KAERI/RR-1604/95

KR9600226

초기하분포를 사용하는 사찰표본 할당 프로그램 개발

Development of sample size allocation program using hypergeometric distribution

한 국 원 자 력 연 구 소

VOL 205

제 출 문

소장 귀하

본 보고서를 "초기하분포를 사용하는 사찰표본 할당 프로그램 개발" 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

1996. 1.

연구실명: 사찰운영실

과제책임자: 김현태

연 구 원: 곽은호

" : 박완수

" : 민경식

" : 박찬식

감수 위원: 류건중

요 약 문

Ⅰ. 제목

초기하분포를 사용하는 사찰표본 할당 프로그램 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 중요성

목 적: 초기하분포를 사용하는 표본할당 객체지향프로그램 개발

중요성: 사찰관련 통계적 기법 습득 및 IAEA (International Atomic Energy Agency, 국제원자력기구) 사찰에 사용되는 표본할당법에 통계적 정확성 부여

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

IAEA 는 사찰활동 수행시, 비복원추출(非復元抽出)을 기술하는 초기하분포 (hypergeometric distribution) 대신 복원추출(復元抽出)을 기술하는 표준이항분포 (standard binomial distribution)를 간략하게 적용하여 최대 세가지 검증방법들에 표본을 할당한다. 초기하근사할당법, 개선된 이항근사할당법, 그리고 바르게 적용된 표준이항근사할당법들을 개발하여 IAEA 의 간략하게 적용된 표준이항근사할당법과 비교하였다.

Ⅳ. 연구결과 및 활용에 대한 건의

① 바르게 적용된 표준이항분포를 사용하는 표본근사할당 객체지향프로그램,

② 개선된 이항분포를 사용하는 표본근사할당 객체지향프로그램,

③ 초기하분포를 사용하는 표본근사할당 객체지향프로그램

을 Visual C++로 개발하였고 이들에 대응하는 프로그램들을 EXCEL(Visual Basic for Application 사용)로 개발하였다. IAEA 와 공동연구를 수행하여 위의 개발한 근사할당법들을 검증할 필요가 있으며 초기하분포, 개선된 이항분포, 또는 바르게 적용된 표준이항분포를 사용하는 표본할당 프로그램을 개발할 필요가 있다.

SUMMARY

Ⅰ. Project Title

Development of sample allocation program using hypergeometric distribution

Ⅱ. Objective and Importance of the Project

Objective: Development of sample allocation program using hypergeometric distribution with object-oriented method

Importance: Securing inspection related statistical technology and imposing statistical accuracyon the sample allocation algorithm of the IAEA(International Atomic Energy Agency) inspection

Ⅲ. Scope and contents of Project

When IAEA performs inspection, it simply applies a standard binomial distribution which describes sampling with replacement instead of a hypergeometric distribution which describes sampling without replacement in sample allocation to up to three verification methods. Correctly applied standard binomial approximate-allocation program, improved binomial approximate-allocation program, and hypergeometric approximate-allocation program were developed and compared to the simply applied standard binomial approximate-allocation program of the IAEA.

Ⅳ. Results and Proposal for Applications

Object-oriented programs of

① sample approximate-allocation with correctly applied standard binomial approximation,

② sample approximate-allocation with improved binomial approximation, and

③ sample approximate-allocation with hypergeometric distribution

were developed with Visual C++ and corresponding programs were developed with EXCEL(using Visual Basic for Application). It's necessary to co-work with the IAEA to verify the above developed programs, and to develop sample allocation programs with correctly applied standard binomial approximation, improved binomial approximation, or hypergeometric distribution.

목 차

	페이지
표목차	5
List 목차	5
제 1 장 서론	6
제 2 장 주요 용어	9
제 3 장 사찰표본 추출계획	10
제 4 장 초기하분포, 표준이항분포, 개선된 이항분포	20
제 1 절 초기하분포	20
제 2 절 표준이항분포	20
제 3 절 개선된 이항분포	21
제 4 절 미탐지 확률 및 표본크기	23
제 5 장 IAEA 표준이항 할당법	26
제 1 절 예전 방법	28
제 2 절 최근 방법	32
가 초기 계산	32
나 반복 계산	37
제 3 절 IAEA 표준이항 할당법의 문제점 및 대책	48
가 표본크기 계산공식 적용	48
나 초기할당 계산	48
제 6 장 IAEA 표준이항 근사할당법	54
제 7 장 TCNC 근사할당법	57
제 8 장 결론 및 건의사항	61
참고문헌	62

표 목 차

페이지

표 1. 물질수지기간 종료시에 적용되는 예상 측정 정확도 δ_E 14

표 2. 유의량(significant quantity) 16

표 3. 전용시간(conversion time) 17

표 4. 경수로에서의 전용 가능성 요약 18

표 5. On-load 중수로에서의 전용 가능성 요약 19

표 6. 시설자-사찰관 측정 시스템 27

표 7. mq 를 최대로 하는 γ 36

표 8. $\gamma'(\delta)$ 55

List 목차

페이지

List 1. 개선된 이항분포를 사용하는 표본크기계산 VBA 프로그램 25

List 2. 초기할당 계산 순서 37

List 3. 초기할당 코드 49

List 4. γ' 계산 함수 50

List 5. 부분/경미 결함에 대한 표본크기 계산 함수 51

List 6. $-u$ 계산 함수 52

List 7. 누적정규분포 계산 함수 52

List 8. γ/q 계산 함수 53

List 9 바르게 적용된 표준이항분포 사용 표본크기계산 VBA 프로그램 58

List 10. 초기하 계산법을 사용하는 표본크기계산 VBA 프로그램 58

List 11. 초기하 근사할당 프로그램 63

제 1 장 서 론

우리나라는 IAEA(International Atomic Energy Agency, 국제원자력기구)와 [153][1] 형태의 보장조치(safeguards) 협정인 INFCIRC/236 을 체결하였다. 핵무기 확산을 방지하기 위한 IAEA 의 보장조치 활동의 일환으로 IAEA 는 IAEA 와 보장조치 협정을 맺은 국가에 대하여 특수한 형식의 표본추출검사인 사찰을 실시하고 있다[6]. IAEA 의 사찰활동은 평화적 용도로 사용한다고 선언된 핵물질(nuclear material)[2]이 보고된 상태대로 있는지의 여부를 확인하려는 검증활동으로서 핵물질의 전용

---

[1] [153] - INFCIRC/153(Corrected). The Structure and Content of Agreements between the Agency and States required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons.
Structure and Content Document - The Structure and Content of Agreements between the Agency and States required in Connection with the Treaty on the Non-proliferation of Nuclear Weapons was published by the IAEA as document INFCIRC/153(Corrected). In February 1972 the Board of Governors requested the Director General of the IAEA to use this material as the basis for negotiating safeguards agreements under the NPT. As opposed to the Safeguards Document [66], the Structure and Content Document [153] spells out in great detail the material to be inserted in safeguards agreement; it contains the outline of agreement provisions rather than mere guidelines for the parties. It contains strict requirements for the IAEA to follow when drafting agreements unless a particular situation warrants a departure from the stadard text.
(IAEA safeguards glossary 325)

[2] Nuclear material - any source material and special fissionable material as defined in Article XX of the Statute of the International Atomic Energy Agency:
Source material - "uranium containing the mixture of isotopes occuring in nature; uranium depleted in the isotope 235; thorium; any of the foregoing in the form of metal, alloy, chemical compound, or concentrate; any other material containing one or more of the foregoing in such concentration as the Board of Governors shall from time to time determine; and such other material as the Board of Governors shall from time to time determine". Under [153] type safeguards, the term source material is interpreted as not applying to ore or ore residue[153/para. 112], in particular to yellow cake, a concentrate consisting essentially of U_3O_8.
Special fissionable material - "plutonium-239; uranium-233; uranium enriched in the isotopes 235 or 233; any material containing one or more of the foregoing; and such other fissionable material as the Board of Governors shall from time to time determine; but the term 'special fissionable material' does not include source material."(IAEA safeguards glossary 31, 32, 33)

(diversion)[3]을 適時[4]에 탐지(detection) 하려는 것이다. IAEA 사찰관은 대상 핵시설에서 핵물질에 대한 사찰을 수행할 때에 핵물질이 보고된 내용과 일치하는가의 여부를 판단하는 검증을 실시한다. IAEA 는 사찰대상 전체를 검사하는 경우도 있지만, 시간과 인력 그리고 비용의 제약으로 인하여 표본을 추출하여 검사하는 경우가 있다. 이때 대상이 되는 집단은 크기가 유한(finite)하므로 표본을 추출할 때 적용하는 확률분포는 초기하분포(hypergeometric distribution) 이다. 피사찰측에서 핵물질을 전용하려고 한다는 가정하에 이를 탐지하지 못할 확률을 최소화하는 사찰계

---

[3] Diversion of nuclear material - use for purposes proscribed by the relevant safeguards agreement: Under [153] type agreement, the use of nuclear material for the manufacture of nuclear weapons or other nuclear explosive devices, or other removal from peaceful uses for purposes unknown; or the withdrawal of nuclear material from safeguards except as provided for in the agreement[153/para. 14].

Notes: (1) Diversion of nuclear material does not necessarily mean physical removal from a facility or other location.

(2) The expression 'for purposes unknown' means that the IAEA does not have to attempt to determine how or where diverted material is used.

(IAEA safeguards glossary 15)

[4] Detection time - the maximum time that may elapse between diversion and its detection by IAEA safeguards; according to the current guidelines it should correspond in order of magnitude to conversion time. Detection time is one of the factors used to establish the timeliness component of inspection goals which is to be achieved through specified inspection and physical inventory frequencies and containment and surveillance measures.

Timeliness goal - the adaptation of the design parameter detection time to specific conditions arising from facility practice, available equipment, manpower, etc. The timeliness goal is incorporated in various features of the inspection plan, e.g. frequency of physical inventory taking, intensity of flow verification and frequency of activities in connection with containment and surveillance measures(film evaluation, seal checking, etc.). At present the following timeliness guidelines are used:

- Within 1 month for fresh fuel containing HEU(high enriched uranium), Pu or MOX(mixed oxide);
- Within 3 months for irradiated fuel containing HEU or Pu;
- Within 12 months for fresh fuel containing natural uranium, LEU(low enriched uranium) or Th.

Appropriate guidelines are adopted for other materials subject to safeguards agreements.

(IAEA safeguards glossary 108, 123)

획을 수립하는 것이다. IAEA 에서는 초기하분포에 근사한 이항 분포를 적용하고 있다. 근사범위를 넘어서는 경우를 반드시 고려해야 하는 사찰활동에서 통계적 정확성을 얻기 위하여 초기하분포를 직접 계산하든가 가능한한 근접한 계산을 사용할 필요가 있다. 기존의 간략하게 적용된 표준이항근사법(simply applied standard binomial approximation), 바르게 적용된 표준이항근사법(correctly applied standard binomial approximation), 개선된 이항근사법(improved binomial approximation) 그리고 초기하분포를 직접 사용하는 계산법(hypergeometric algorithm)과 이들에 의한 할당법을 비교하였다. 피사찰 측이 취할 수 있는 가능한 전용방법에 대응해야 하는 상황이므로 게임(game) 이론을 적용하여 표본추출계획을 수립한다[4]. 초기하분포를 이항분포로 근사할 수 있는 범위를 벗어나는 경우를 고려하여야 하므로 주어진 탐지확률 (detection probability, 1- β)[5]에 대하여 표본크기를 계산할 때 초기하분포에 의한 계산에 가능한한 근접한 계산을 할 필요가 있다. 개선된 이항분포를 사용하려는 것이 이러한 시도 중의 하나이다[11][13].

---

[5] Detection probability - the probability, if diversion of a given amount of nuclear material has occurred, that verification activities will lead to detection. In general it is planned that the methods used will provide a detection probability 1-β, i.e. no more than a selected probability β of failing to conclude that a given amount of nuclear material is missing. Where containment and surveillance (C/S) measures are employed an overall detection probability that takes into account their performance can be envisaged but it cannot be calculated since methods for quantifying the performance of C/S measures have not been developed.

Accountancy detection probability - the desired probability of detecting the absence of a given quantity of nuclear material by nuclear material accountancy tests. For designing inspection goals and plans (e.g., sampling and measurement plans) a detection probability $1-\beta_a$ can be preselected as a basic parameter. Here β_a is the non-detection probability, i.e. the probability of failing to conclude from using accountancy that a given amount of nuclear material is missing when diversion has occurred. International working groups have concluded that β_a should be low (0.1 - 0.01). For planning purposes, the probability $1 - \beta_a$ of the detection of the absence of a significant quantity of nuclear material by accountancy measures is normally set at 0.90 - 0.95.

(IAEA safeguards glossary 110, 111)

제 2 장 주요 용어

N: 모집단 크기 (number of items in the population)

x: 모집단에 있는 요소들의 평균무게 (average weight of items in the population)

M: 목표량, 일반적으로 유의량 (1 goal amount is usually 1 significant quantity.)

D: 1 목표량에 해당하는 결함수 (number of defects corresponding to 1 goal amount)

β: 미탐지확률 (non-detection probability)

q: 결함판별력 (probability of classifying a defect as a defect, if measured)

n: 표본크기 (number of items in the sample)

d, m, y, w: 결함수 (number of defects)

γ: 결함율 (defect fraction or missing ratio)

γx: 결함 크기 (defect size) (예) 전체결함(gross defect): x

부분결함(partial defect): $\gamma_2 x$

경미결함(bias defect, small defect): $\gamma_3 x$

γ': γ/q

δ: 상대표준편차 (relative standard deviation)

제 3 장 사찰표본 추출계획

IAEA의 보장조치 목표 "핵물질 有意量[6]의 轉用을 適時에 탐지(timely detection of diversion of significant quantities of nuclear material)"는 물질수지평가(material balance evaluation)에 대한 개념들을 제시한다[3]: 適時(timely) -> 물질수지기간(MBP: material balance period)[7] -> 물질수지구역(MBA: material balance area)[8] -> 전용경로(diversion

---

[6] Significant quantity (SQ) - the approximate quantity of nuclear material in respect of which, taking into account any conversion process involved, the possibility of manufacturing a nuclear explosive device cannot be excluded.(IAEA safeguards glossary 107)

[7] Material balance period(MBP) - the time between two consecutive physical inventory takings (PITs) as reflected in the State's material balance report(MBR)[153].(IAEA safeguards glossary 142)

[8] Material balance area(MBA) - "an area in or outside of a facility such that:

(a) The quantity of nuclear material in each transfer into or out of each 'material balance area' can be determined; and

(b) The physical inventory of nuclear material in each 'material balance area' can be determined when necessary, in accordance with specified procedures,

in order that the material balance for Agency safeguards purposes can be established"[153/para. 110]

Design information made available to the Agency shall be used: "To determine material balance areas to be used for Agency accounting purposes and to select those strategic points which are key measurement points and which will be used to determine the nuclear material flows and inventories; in determining such material balance areas the Agency shall, inter alia, use the following criteria:

(i) The size of the material balance area should be related to the accuracy with which the material balance can be established;

(ii) In determining the material balance area advantage should be taken of any opportunity to use containment and surveillance to help ensure the completeness of flow measurements and thereby simplify the application of safeguards and concentrate measurement efforts at key measurement points;

(iii) A number of material balance areas in use at a facility or at distinct sites may be combined in one material balance area to be used for Agency accounting purposes when the Agency determines that this is consistent with its verification requirements; and

(iv) If the State so requests, a special material balance area around a process step involving commercially

paths) -> 핵물질량 M의 전용탐지. 잠재전용자(potential diverter)가 MBP 동안 MBA에서 핵물질량 M을 전용할 수 있는 방법을 크게 세가지로 구분할 수 있다.

- 資料不僞造(no data falsification): 시설자(operator)의 기록에 위조된 것이 없이 수지계량(balance account)에 전용이 반영된 경우, 이를 "diversion into MUF(Material Unaccounted For, 未計量物質)[9]" 또는 "diversion into SRD(Shipper/Receiver Difference, 船積引受差異)[10]"라고 부른다.
- 資料僞造(data falsification): M이 다양한 방법에 의하여 숨겨졌으며 시설자의 기록이 전용을 감추기 위해서 위조되었다. 수지계량에 전용이 반영되지 않았다.
- 資料不僞造와 資料僞造를 같이 사용한다.

전용자(diverter)가 資料不僞造에 의해 전용을 하려고 한다면 전용된 M은 MUF나 SRD에 나타날 것이다. SRD 방법으로 전용하려고 한다면 시설자는 핵물질을 다른 MBA로부터 받을 때 고의로 적은 량을 받았다(understatement)고 보고할 것이며, 핵물질을 다른 MBA에 보낼 때 고의로 많은 량을 보냈다(overstatement)고 보고할

---

sensitive information may be established"[153/para. 46(b)].(IAEA safeguards glossary 133)

[9] Material unaccounted for (MUF) - "the difference between book inventory and physical inventory"[153/para. 111]. The MUF (material balance) equation is commonly written as:

$$MUF = PB + X - Y - PE$$

where

PB is the beginning physical inventory for period j;

X is the sum of increases to inventory (import, domestic receipt, nuclear production, de-exemption, correction to receipts, as appropriate);

Y is the sum of decreases from inventory (export, domestic shipment, nuclear loss, measured discard, exemption, accidental loss, as appropriate);

PE is the ending physical inventory for period j, which is also the beginning of the physical inventory for period j + 1.(IAEA safeguards glossary 167)

[10] Shipper/receiver difference - "the difference between the quantity of nuclear material in a batch as stated by the shipping material balance area and as measured at the receiving material balance area" [153/para. 114] (IAEA safeguards glossary 168)

것이다. 전용자가 핵물질을 MUF에 의해 전용한다면 인수량(receipts), 선적량(shipments), 그리고 재고량(inventories)등을 정확하게 보고할 것이다. 따라서 MUF에 의한 전용을 탐지하기 위해서는 핵물질 취급과정에 대한 이해와 다양한 통계적 기법들이 필요하게 된다. MUF를 표현하는데 사용되는 용어는 요소(item), 束(batch), 계층(stratum), 성분(component)이다. 요소는 NDA(Non-Destructive Assay)와 DA(Destructive Analysis)의 적용 대상으로서 무게, 부피 등이 측정된다. 동일한 요소들의 집합을 束[11]이라고 한다. 하나의 요소로 이루어진 束도 있다. 유사한 핵물질로 이루어진 요소나 束으로 구성된 집합을 계층[12]이라고 부른다. 다수 또는 하나

---

[11] Batch - "a portion of nuclear material handled as a unit for accounting purposes at a key measurement point and for which the composition and quantity are defined by a single set of specifications or measurements. The nuclear material may be in bulk form or contained in a number of separate items"[153/para. 101]. Some examples are:

- One fuel assembly
- One UF_6 cylinder
- A tray of pellets prepared for loading into one fuel rod
- Several drums of UO_2 powder with the same specifications.

Items with the 'same specifications' are items with the same nominal weight, element composition and enrichment. In some cases, however, materials of different specifications may be included in the same batch, e.g. different materials in a batch of scrap.(IAEA safeguards glossary 147)

[12] Stratum - a grouping of items/batches having similar physical and chemical characteristics (e.g. volume, weight, isotopic composition, location) made for the purpose of facilitating statistical sampling for measurements needed to establish and verify the material balance and its uncertainty (σ_{MUF}). In practice one stratum may contain dissimilar materials.

Note: The various components of a material balance are established by the facility operator on the basis of measurements. These same data are used by IAEA inspectors for verification purposes. Measurement procedures and the formulation of sampling plans can be simplified considerably if the different items and batches with similar characteristics are grouped into strata. Such groupings are also advantageous to facility operators for the purpose of determining the number of measurements needed to establish the material balance and compute its uncertainty (σ_{MUF}).

(IAEA safeguards glossary 163)

의 계층은 하나의 성분[13]을 이룬다. 보장조치는 각각의 MBA에 대하여 MBP 단위로 실시된다. 해당 MBA의 MBP를 종결하는 최종보고서는 물자재고목록(PIL: physical inventory listing)과 이를 핵물질별로 요약한 물질수지보고서(MBR: material balance report)로서 MUF 량을 보고한다. 경수로형 원자력발전소같은 item facility[14]의 MBR은 MUF = 0 으로 보고되는 것이 정상이고, 핵연료 가공시설같은 bulk handling facility[15]에서는 공정중에서 핵물질이 없어지기 때문에 MBR은 일정한 범위내의 MUF ≠ 0 으로 보고되는 것이 정상이다. Bulk handling facility에 표 1의 상대표준편차(relative standard deviation)가 적용된다.

---

[13] Material balance component - the combination of all strata in one term of the material balance equation. For example, arriving UF_6 cylinders and UO_2 powder in drums are combined as the receipts component of the MUF equation. (IAEA safeguards glossary 164)

[14] Item facilities - nuclear facilities where all nuclear material is contained in identifiable items (e.g., fuel assemblies) the integrity of which remains unaltered during their residence at the facility. In such cases, IAEA safeguards are based on item accounting procedures (item counting and identification, non-destructive measurements and examination to verify the continued integrity of the item).

Examples of item facilities are:

(a) Most power and research reactors and critical assemblies, except those fuelled with large quantities of non-identifiable units (e.g., pebbles, coupons), or liquids (e.g., molten salt);

(b) Item storage facilites.

(IAEA safeguards glossary 72)

[15] Bulk handling facilities - nuclear facilities where nuclear material is held, processed or used in loose form, such as liquids, gases, or powders, or in large numbers of non-identifiable units. Where appropriate, bulk handling facilities may be organized for safeguards purposes into multiple material balance areas to simplify safeguards, for instance by separating activities relating only to the storage and assembly of discrete fuel items from those involving storage or processing of bulk material. In bulk material balance areas, flow and inventory values declared by the facility operator are verified by the IAEA through independent measuremants and observation. Examples of bulk facilities are plants for conversion, enrichment, fabrication and reprocessing and bulk storage facilities.(IAEA safeguards glossary 73)

표 1. 물질수지기간 종료시에 적용되는 예상 측정 정확도 δ_E

(Expected measurement accuracy δ_E(relative standard deviation)[16] associated with closing a material balance (IAEA safeguards glossary Table IV)

Bulk facility type	δ_E
Uranium enrichment	0.002
Uranium fabrication	0.003
Plutonium fabrication	0.005
Uranium reprocessing	0.008
Plutonium reprocessing	0.010
Separate scrap storage	0.04
Separate waste storage	0.25

사찰계획은 유의량(표 2)과 전용시간(표 3)을 고려하여 특정한 시점에서 재고 핵물질량을 검증하는 활동과 핵물질의 흐름을 감시하는 활동을 포함한다. 다양한 전용 가능성(표 4, 5)을 참조한다. 사찰 목적은 MBA 에서의 핵물질 통제상태를 반영하는 물질수지 자료를 입증하고 핵물질 통제상태가 만족할 만한 것이가를 확인하기 위한 것, 즉 과다한 MUF 가 없음을 입증하기 위한 것이다. 객관성을 얻기 위해 정량적인 기준이 마련되었으며 사찰활동은 이러한 기준에 의해 수행된다. 검증의 주된 활동은 핵물질 계량관리(material accountancy)이다. 사찰계획을 세울 때, 시설자의 자료가 실수에 의해 실제량을 잘못 표현할 수 있음을 가정한다. 이러한 잘못된

---

[16] Relative error - the chance variation encountered in all measurement work, characterized by the random occurrence of both positive and negtive deviations from a mean value, the algebraic average of which approaches zero in a long series of measurements. The most useful measures of the magitude of the random errors are:

(a) The standard deviation σ

(b) The coefficient of variation or relative standard deviation (RSD = $\delta = \sigma/\mu$, where μ is the true mean)[8]. These measures are sometimes referred to as precision or reproducibility. High precision is equivalent to a small standard deviation. (IAEA safeguards glossary 227)

표현이 단순한 실수 때문일 수 있지만 사찰 계획을 수립하는 목적에서는 이러한 잘못된 표현은 핵물질 전용을 숨기기 위해 의도적으로 틀리게 한 것이라고 가정한다. 사찰계획이 효과적이고 신뢰성이 있기 위해서는 최악의 경우에 대비해야만 하는 것이다. 최악의 경우에는 전용자가 資料僞造에 의해 핵물질을 전용하는 것을 포함한다. 사찰활동은 측정의 복잡성, 비용, 정확성 등의 여러 요인들에 의해 다양하게 구성되지만 크게 속성사찰(attribute inspection)과 변량사찰(variables inspection)로 나뉘어진다. 사찰활동은 모집단 중에 원래 선언된 것이 아닌 것 즉, 결함(defect)이 있을 때 이를 조기에 탐지하고자 하는 것이다. 여기서 결함이라고 하는 것은 모집단에 있던 요소 중에서 요소의 일부가 손상되었거나 다른 것으로 대치되었거나 없어진 것을 말한다. IAEA 에서는 결함을 전체결함(gross defect), 부분결함(partial defect), 그리고 경미결함(bias defect)으로 구분[17]한다. 피사찰 측에서 핵물질을 전용하고자 한다면 다양한 결함들을 고려하여 탐지될 확률이 가장 작아지는 방법을 택할 것이다. 전용자가 資料僞造에 의해 핵물질을 전용할 경우 M 은 기본적으로 세가지 전용경로로 전용된다: 전체결함(gross defect), 부분결함(partial defect), 그리고 경미결함(bias defect). 전용자는 MBP 동안에 M 만큼을 전용하려는 것을 숨기기 위해서 다양한 방법으로 결함들을 만들려고 시도할 것이다. IAEA 는 이러한 상황을 고려하여 표본추출계획을 세운다. IAEA 가 적용하는 가설검정은 다음과 같다[4].

H_0: 모집단(stratum, 계층)에서 전용이 발생하지 않았다.

H_1: 모집단(stratum, 계층)에서 1 목표량(goal amount)의 전용이 발생했다.

1 목표량은 일반적으로 1 SQ(Significant Quantity, 有意量)이다. 특정 계층(stratum)에서의 1 SQ 전용여부에 대한 검증은 해당 시설에서의 1 SQ 전용여부에 대한 검증에

---

[17] 탐지확률 0.025 로 구분하던 정의가 "제 5 장 제 1 절"에 설명되어있다.

해당하고 나아가서는 해당 국가에 대한 1 SQ 전용여부에 대한 검증이라고 볼 수 있다[4]. IAEA 는 두가지 근사식이 유도되는 표준이항분포를 간력하게 적용한 표준이항계산법을 개발하고 있다[9]. J. L. Jaech 는 IAEA 의 표준이항계산법 보다 초기하계산법에 더 근사한 개선된 이항계산법을 유도하였다[11]. 피사찰 측의 예상되는 전용방법에 대응하여 IAEA 는 위의 결함 종류에 대한 최대 3 가지 검증방법을 사용하고 있다. 주어진 β에 대해 계산된 표본크기를 이들 검증방법에 할당하는 방법에는 두가지가 있다. 첫째는 반복할당법으로서 PC(Personal Computer)가 필요하며 두번째 방식은 포켓 계산기로 계산가능한 근사할당법이다. 반복할당법에는 IAEA 에서 개발하고 있는 표준이항할당법[9]이 있으며, TCNC (Technology Center for Nuclear Control, 원자력통제기술센터)에서 개발하고 있는 초기하할당법, 개선된 이항할당법, 그리고 바르게 적용된 표준이항할당법이 있다[14][15]. 근사할당법에는 IAEA 에서 개발하여 사찰 현장에서 사용하고 있는 표준이항근사할당법[9]과 TCNC 에서 개발하고 있는 초기하근사할당법, 개선된 이항근사할당법, 그리고 바르게 적용된 표준이항근사할당법이 있다[14][15].

표 2. 유의량 (significant quantity)

(IAEA safeguards glossary Table III)

	Material	**Significant Quantity**	**Safeguards apply to**
Direct-use nuclear material	Pu[a]	8kg	Total isotope
	U-233	8kg	Total isotope
	U(U-235 ≥ 20%)	25kg	U-235 contained
Indirect-use nuclear material	U (U-235 < 20%)[b]	75kg	U-235 contained
	Th	20t	Total element

[a] For Pu containing less than 80% Pu-238.

[b] Including natural and depleted uranium.

표 3. 전용 시간 (conversion time)[18]

(IAEA safeguards glossary Table II)

Estimated material conversion to finished Plutonium and Uranium metal components	
Beginning material form	**Conversion time**
Pu, HEU or U-233 metal	Order of days(7-10)
PuO_2, $Pu(NO_3)_4$, or other pure Pu compounds; HEU or U-233 oxide or other pure compounds; MOX or other nonirradiated pure mixtures containing plutonium, uranium[(U-233 + U-235) ≥ 20%]; Pu, HEU, and/or U -233 in scrap or other miscellaneous impure compounds	Order of weeks(1-3)[a]
Pu, HEU, or U-233 in irradiated fuel[b]	Order of months(1-3)
U containing < 20% U-235 and U-233; Th	Order of 1 year

[a] The range is not determined by any single factor, but the pure plutonium and uranium compounds will tend to be at the lower end of the range and the mixtures and scrap at the higher end.

[b] Criteria for establishing the irradiation to which this classification refers are under review.

---

[18] Conversion time - the time required to convert different forms of nuclear material to the metallic components of a nuclear explosive device. Conversion time does not include the time required to transport diverted material to the conversion facility or to assemble the device, or any subsequent period. The diversion activity is assumed to be part of a planned sequence of actions chosen to give a high probability of success in manufacturing one or more nuclear explosives with minimal risk of discovery until at least one nuclear explosive device is manufactured. It is therefore assumed that all necessary conversion and manufacturing facilities exist, that processes have been tested, for example by manufacturing dummy components using appropriate surrogate materials, and that non-nuclear components of the device have been manufactured, assembled and tested. The conversion time estimates used at present are given in Table II.(IAEA safeguards glossary 105)

표 4 경수로에서의 전용 가능성 요약[2]

Summary of diversion possibilities for light-water reactors		
Diversion possibilities	***Concealment methods***	***Safeguards measures***
Removal of fresh fuel assemblies from storage	Substitution with dummies Substitution with borrowed fuel	Item counting and identification Application of seals NDA[19] measurements
Removal of irradiated fuel assemblies from the core	Substitution with dummies or fresh fuel	Item counting and identification Seals Optical surveilance Radiation monitoring
Unreported irradiation of fertile material (plutonium production)	Undeclared shutdowns Replacement of guide tube fillers with uranium-containing rods	Seals Optical surveillance Radiation monitoring
Removal of spent fuel assemblies from storage pond (or fuel rods after dismantling assemblies)	Substitution with dummies	Item counting and identification Optical surveillance NDA measurements
Removal of spent fuel from shipping container (or during transit)	Substitution with dummies Understating number of elements shipped	Sealing of shipping container before shipment and verification of content at receipient, if possible

[19] Non-destructive assay (NDA) - measurement of the nuclear material content or element or isotoic concentration of an item without producing significant physical or chemical changes in the item. It is generally carried out by observing the radiometric emission or response from the item and by comparing that emission or response with a calibration based on essentially similiar items whose contents have been determined through chemical analysis. There are two broad categories of NDA:

- Passive assay, in which the measurement refers to spontaneous emissions of nertrons or gamma rays or to total decay energy;
- Active assay, in which measurement refers to a stimulated emission (e.g. nertron- or photon-induced fission) (IAEA safeguards glossary 205)

표 5. On-load 중수로에서의 전용 가능성 요약[2]

Summary of diversion possibilities for on-load heavy water reactors		
Diversion possibilities	***Concealment methods***	**Safeguards measures**
Removal of fresh fuel assemblies from storage	Fuel boxes partially filled or incorrectly stacked Substitution with dummies	Item counting and identification Container (box) counting NDA techniques(box verifier)
Removal of irradiated fuel bundles from the core or from the discharge machine	Use of irregular fuel paths Substitution with dummies	Core discharge monitors Core input counters Irradiated-fuel bundle counters Closed-circuit TV or film cameras Yes/No monitors
Unreported irradiation of fertile material (plutonium production)	Use of irregular fuel paths	Core discharge monitors Core input counters Irradiated-fuel bundle counters Closed-circuit TV or film cameras Yes/No monitors
Removal of spent fuel bundles from regular paths after leaving discharge port	Use of irregular fuel paths Substitution with dummies	Core discharge monitors Irradiated-fuel bundle counters Closed-circuit TV or film cameras Yes/No monitors
Removal of spent fuel bundles from shipping pond	Substitution with dummies	Closed-circuit TV or film cameras Yes/No monitors Irradiated-fuel verifiers Containers and seals
Removal of spent fuel from container(also in transit)	Substitution with dummies on consignment. Understating of number of bundles shipped and substitution with dummies in spent-fuel pond	Sealing of shipping container before shipment and verification of content at receipient facility, if possible

제 4 장 초기하분포, 표준이항분포, 개선된 이항분포

제 1 절 초기하분포

N을 모집단의 크기, D를 1 SQ에 해당하는 예상 결함수, n을 표본크기라 할 때 표본에 d개의 결함이 포함될 확률은 다음의 초기하분포로 나타내진다.

$$h(N,D,n,d) = \binom{D}{d}\binom{N-D}{n-d} \Big/ \binom{N}{n} \tag{4.1}$$

M을 1 SQ에 해당하는 무게, x를 요소(item)의 평균무게, γ를 결함율(defect fraction or missing fraction)이라고 하면 결함수는

$$D = m(\gamma) = \left[\frac{M}{\gamma \cdot x}\right] \tag{4.2}$$

이다. 여기서 $[M/\gamma x]$는 $M/\gamma x$를 절상한 자연수이다. 표본크기 계산시에 모든 결함은 같은 크기(γx)라고 가정한다. 모집단의 크기가 1,000,000인 경우를 고려하려 식 (4.1) 계산에 C/C++ 언어의 long double 이라는 데이타 형태를 사용했다[14]. Long double에서 표현가능한 부동소수의 범위는 $10^{\pm 4932}$이다. 실제의 사찰에서는 보집단의 최대 크기가 5,000 정도로 볼 수 있으므로 $10^{\pm 308}$ 크기의 숫자를 표현하는 double 데이타 형태로도 처리가능하기 때문에 EXCEL(Visual Basic for Application 사용)등에서도 처리 가능하다.

제 2 절 표준이항분포

식 (4.1)은 N이 n과 D보다 크다는 다음의 조건들에 따라 각각 이항분포로 근사된다[12].

$N > 50$, $f = n/N \le 0.10$, $D \le n$ 일 때:

$$h(N,D,n,d) \approx b(D,p,d) = \binom{D}{d} f^d (1-f)^{D-d} \tag{4.3}$$

$N > 50$, $p = D/N \le 0.10$, $n \le D$ 일 때:

$$h(N,D,n,d) \approx b(n,p,d) = \binom{n}{d} p^d (1-p)^{n-d} \tag{4.4}$$

식 (4.3), (4.4)를 적용할 때, $D \le n$ 과 $n \le D$ 의 부등호를 유의하여야 한다.

다. 개선된 이항분포[11]

초기하분포와 이항분포의 평균과 분산을 다음과 같이 등식으로 하여

$$\begin{aligned} n_1 p_1 &= nD/N \\ n_1 p_1 (1-p_1) &= (N-n)nD(N-D)/N^2(N-1) \end{aligned} \tag{4.5}$$

아래의 값으로 기술되는 개선된 이항분포 형태를 구한다.

$$\begin{aligned} p_1 &= 1-(N-n)(N-D)/(N(N-1)) \\ n_1 &= n \cdot D/(N \cdot p_1) \end{aligned} \tag{4.6}$$

식 (4.5)에서 p_1과 n_1은 n과 D에 대하여 대칭이므로 n과 D의 상호크기에 관계없이 p_1과 n_1은 식 (4.6)으로 구해진다. 표준이항분포는 두개의 식 (4.3), (4.4)로 표현되었으나 개선된 이항분포는 식 (4.6) 하나로 표현되는 장점이 있다. 감마함수의 특성을 적용하여 개선된 이항분포 형태가 확률분포로서의 성질을 갖고 있는지 여부를 고려하자.

$$\binom{n}{d} = \frac{n!}{d! \cdot (n-d)!} \tag{4.7}$$

에서 감마함수를 사용하여 아래와 같은 일반적인 형태로 표현할 수 있다.

$$\binom{n}{d} = \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(d+1) \cdot \Gamma(n-d+1)} \tag{4.8}$$

p_1과 n_1으로 표현되는 개선된 이항분포의 형태는

$$b_1(n_1, p_1, d) = \frac{\Gamma(n_1+1)}{\Gamma(d+1) \cdot \Gamma(n_1-d+1)} p_1^d (1-p_1)^{n_1-1} \tag{4.9}$$

이다. 여기서 $\Gamma(a)$는 감마함수로서 다음과 같이 정의된 것이다.

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty e^{-t} t^{a-1} dt \tag{4.10}$$

식 (4.9)에서 d가 n_1+1 보다 큰 경우에는 $b_1(n_1,p_1,d)$중에 음수가 되는 경우가 있기 때문에 $d > (n_1+1)$ 인 경우에 $b_1(n_1,p_1,d) = 0$ 이라고 정의한다. (n_1+1)을 넘지않는 최대 정수를 d_max라고 할 때

$$\sum_{d=0}^{d\_max} b_1(n_1, p_1, d) \approx 1 \tag{4.11}$$

이므로 $b_1(n_1,p_1,d)$를 확률분포같이 사용할 수 있다. 표본크기 계산에서 $b_1(n_1,p_1,d)$는 식 (4.3), (4.4)의 표준이항분포에 의한 표본크기 계산보다 초기하분포에 의한 표본크기에 매우 근접한 계산결과를 보여준다[14][15].

제 4 절. 미탐지확률 및 표본크기

결함을 결함이라고 판정할 확률을 결함판별력 q 라고 하자.

초기하분포의 경우:

미탐지확률은 다음의 형태를 취한다.

$$\beta = \sum_{d=0}^{\mathrm{Min}(n,D)} h(N,D,n,d)(1-q)^d \tag{4.12}$$

여기서 Min(n,D)는 n과 D중에서 적은 값을 갖는 함수이다. $d = 0$ 일 때의 $h(N,D,n,0)$는 표본추출오류에 해당한다. 표본에 결함이 포함되지 않을 확률이다. $h(N,D,n,d)(1-q)^d$는 표본에 결함이 d개 포함되었으나 사찰관이 이를 탐지하지 못할 확률이다. 표본크기를 구하기 위하여 β에 해당하는 n의 근사값 $n_initial$을 계산하는 공식 (4.13)을 유도하자.

$$\begin{aligned}\beta &= h(N,D,n,0)\\ &= \frac{\binom{D}{0}\binom{N-D}{n}}{\binom{N}{n}} = \frac{(N-D)!(N-n)!}{N!(N-D-n)!}\\ &\cong \left(1-\frac{2n}{2N-D+1}\right)^D\end{aligned}$$

이므로 다음의 근사식이 유도된다[1].

$$n\_initial = 0.5\left(1-\beta^{\frac{1}{D}}\right)(2N-D+1) \tag{4.13}$$

$n_initial$에 대한 미탐지확률을 식 (4.12)로 계산하고 이를 주어진 미탐지확률가 비교한다. 계산한 값이 주어진 미탐지확률보다 크면 $n_initial$을 1 씩 증가시키면서 미탐지확률을 계산하여 주어진 미탐지확률을 만족하는 n을 구할 때까지 반복한다.

표준이항분포의 경우:

미탐지확률과 표본크기는 근사조건에 따라 다음의 형태들을 취한다.

$N > 50$, $f = n/N \le 0.10$, $D \le n$ 일 때:

$$\beta = (1 - f \cdot q)^D = (1 - \frac{n}{N} q)^D \tag{4.14}$$

$$n = \frac{N}{q}(1 - \beta^{\frac{1}{D}}) \tag{4.15}$$

$N > 50$, $p = D/N \le 0.10$, $n \le D$ 일 때:

$$\beta = (1 - p \cdot q)^n = (1 - \frac{D}{N} q)^n \tag{4.16}$$

$$n = \frac{\ln(\beta)}{\ln\left(1 - \frac{D}{N} q\right)} \tag{4.17}$$

개선된 이항분포의 경우:

미탐지확률은 식 (4.16)의 형태를 따라 다음의 모양을 취한다.

$$\beta = (1 - p_1 \cdot q)^{n_1} \tag{4.18}$$

식 (4.18)은 n에 대하여 간단히 풀리지 않기 때문에 표준이항분포와 같은 간단한 표본크기 계산 공식이 없다. 따라서 표본크기 계산은 초기하분포의 경우와 같이 식 (4.13)을 적용하여 근사계산을 한 후 미탐지확률을 계산하여 주어진 미탐지확률

과 비교하면서 표본크기를 구한다. List 1 에 표본크기 계산 프로그램이 있다.

List 1. 개선된 이항분포를 사용하는 표본크기계산 VBA 프로그램

```
' Improved binomial approximation
' VBA(Visual Basic for Application) for EXCEL
Function i_size(Beta, N, D, q)
Dim n_initial, nn As Integer
Dim ND1, pf, n1, ib_Beta As Double
If D > N Then
    i_size = "NA"
Else
    n_initial = Int(0.5 + 0.5 * (1 - (0.01 * Beta) ^ (1 / D)) * (N + N - D + 1))
    If (n_initial < 1) Then
        n_initial = 1
    End If
    nn = n_initial
    ND1 = (N - D) / (N * (N - 1))
    Do
      pf = 1 - (N - nn) * ND1
      n1 = nn * D / (N * pf)
      ib_Beta = (1 - 0.01 * q * pf) ^ n1
      If (ib_Beta <= 0.01 * Beta) Then
          i_size = nn
          Exit Do
      Else
          nn = nn + 1
      End If
    Loop While (nn < N)
End If
End Function
```

제 5 장 IAEA 표준이항 할당법[9]

IAEA 는 피사찰 측의 전용방법에 대응하여 정밀도가 상이한 검증방법을 사용한다(표 6 참조). 전체결함들로 1 SQ 를 만들 때 결함수를 d1 이라 하고 이를 탐지하기 위한 표본크기를 nd1, 부분결함들로 1 SQ 를 만들 때 결함수를 d2 라 하고 이를 탐지하기 위한 표본크기를 nd2, 경미결함들로 1 SQ 를 만들 때 결함수를 d3 라 하고 이를 탐지하기 위한 표본크기를 nd3 라 하면 식 (4.2)에 의해

$$d1 < d2 < d3$$

이고 식 (4.15), (4.17)에 의해

$$nd1 > nd2 > nd3$$

이다. 부분결함을 탐지하는 검증방법은 전체결함을 탐지할 것이며, 경미결함을 탐지하는 검증방법은 부분결함과 전체결함을 탐지할 것이다. 따라서 전체결함을 탐지하기위한 표본크기에서 일부를 부분결함을 탐지하기위한 검증방법에 할당하고, 부분결함을 탐지하기위한 표본크기에서 일부를 경미결함을 탐지하기위한 검증방법에 할당하는 방식을 매우 효율적인 것이다.

IAEA 는 식 (4.15)에서 $q = 1$ 로 하여 1 SQ 가 전체결함들로 이루어진 경우에 해당하는 표본크기를 구한다. 사찰장비의 탐지성능을 고려하는 $q < 1$ 에 대하여 식 (4.17)을 적용하여 두번째 검증방법과 세번째 검증방법에 대한 표본크기(η_2)를 구한다. 세가지 검증방법을 사용하는 경우에는 세번째 검증방법에 대한 표본크기(n_3)를 식 (4.17)로 계산한다. 첫번째 검증방법에 할당되는 표본크기를 n_1 이라고 하고 두번째 검증방법에 할당되는 표본크기를 n_2 라고 하자. 두가지 검증방법을 사용하는 경우에는 다음과 같이 표본이 할당된다.

$$n_1 = n - \eta_2$$
$$n_2 = \eta_2 \qquad (5.1)$$

표 6. 시설자-사찰관 측정 시스템

(35th Introductory Course on Agency Safeguards Session 4.3 Annex 01)

Operator-inspector measurement system			
Total (relative) measurement uncertainty $\delta_t = (\delta_o^2 + \delta_I^2)^{0.5}$ δ_o^2 = variance component of error due to the operator measurement system δ_I^2 = variance component of error due to the inspector measurement system			
Recommended error limits			
Method codes	**Interpretation**	**Relative error ranges**	**Detectable defect size**
H	Quantative through NDA (verification in the attribute mode using the last accurate method)	$0.0625 < \delta_i \leq 0.125$	gross
H	Qualitative through NDA (e.g. Cerenkov, Bundle counter)	Error can't be assigned	gross
F	Quantitative through NDA (verification in the attribute mode using a better accurate method)	$0.0100 < \delta_i \leq 0.0625$	partial
E	Quantitative through NDA (verification in the variables mode using the most accurate method) (e.g. K-edge densitometer)	$\delta_i \leq 0.01$	small
D	Quantitative through DA (verification in the variables mode using the most accurate method)	$\delta_i \leq 0.01$	small

세가지 검증방법을 사용하는 경우에는 다음과 같이 표본이 할당된다.

$$n_1 = n - \eta_2$$
$$n_2 = \eta_2 - n_3 \qquad (5.2)$$
$$n_3$$

제 1 절 예전 방법

위의 할당과 관련하여 예전에 사용하던 방식은 다음과 같다. 첫번째 방법에 의해 탐지되지 않으리라고 예상되는(probably not to be detected) 부분결함을 찾기위한 방법에 의해 η_2를 계산하는 방법이 마련되었다. 첫번째 방법으로 부분결함을 탐지할 확률이 0.025 로 임의로 정해졌다. 0.025 라는 값이 부분결함과 경미결함을 정의로 하는데 사용되었다. 두번째 검증방법이 적용되는 부분결함의 크기를 $\gamma_2 x$ 라 하고, 이를 첫번째 검증방법으로 탐지할 확률을 0.025 라고 하면, 속성검사(attribute test)에서 표준편차기각한계(standard deviation reject limit)를 $A = 4$ 로 사용할 때 γ_2 값이 아래와 같다. A 는 유의수준(significance level)[20]을 정하는데 사용되는 값이다.

$$\gamma_2 = \frac{2\delta_1}{1 \pm 2\delta_1} \qquad (5.3)$$

식 (24)에서 - 는 overstatement 경우이고, + 는 understatement 경우이다. Overstatement 는 선언된 핵물질량보다 적은 양이 있는 경우이고, understatement 는 선언된 핵물질량보다 많은 양이 있는 경우이다. x 를 시설자가 선언한 값이라고 하고 x_a 를 사

---

[20] Significance level - a probability associated with the critical region in a test of hypothesis. The chosen significance level for a test is usually small (0.05 or 0.01) and is often expressed as a percentage (5 % or 10 %). The significance level characterizes the test with respect to the probability of an error of rejecting the null hypothesis. That is, a 5 % significance level test has a probability of 0.05 of rejecting the null hypothesis when it is true.(IAEA safeguards glossary 242)

찰관이 측정한 값이다. x_a를 정규분포(normal distribution)를 갖는 확률변수(random variable)라고 하자.

$$\begin{aligned} d &= x - x_a > 0 \quad \textit{for overstatement} \\ d &= x - x_a < 0 \quad \textit{for understatement} \end{aligned} \tag{5.4}$$

이므로 γ_2 는 다음과 같이 유도된다.

γ_2 유도:

Overstatement case

$$\Pr(d > 4\delta_1 x \mid E(d) = \gamma_2 x) = 0.025$$

$$\frac{4\delta_1 x - \gamma_2 x}{\delta_1 (x - \gamma_2 x)} \approx 2 \tag{5.5}$$

$$\gamma_2 = \frac{2\delta_1}{1 - 2\delta_1}$$

Understatement case

$$\Pr(d < -4\delta_1 x \mid E(d) = -\gamma_2 x) = 0.025$$

$$\frac{-4\delta_1 x + \gamma_2 x}{\delta_1 (x + \gamma_2 x)} \approx -2 \tag{5.6}$$

$$\gamma_2 = \frac{2\delta_1}{1 + 2\delta_1}$$

세번째 검증방법이 적용되는 경미결함의 크기를 $\gamma_3 x$라 하고, 이를 두번째 검증방법으로 탐지할 확률을 0.025 라고 하면 γ_3에 대해서도 유사한 식이 유도된다.

η_2를 계산하는 공식으로 식 (5.7)이 사용되었다.

$$n = N(1-\beta^{\frac{\gamma_2 x}{M}}) \tag{5.7}$$

식 (5.7)를 적용하여 $\gamma_2 x$ 크기의 결함을 높은 확률로 탐지하기 위해서는 δ_2 값이 충분히 작아야 한다. δ_2 값이 얼마나 작아야 하는가에 대하여 연구 결과가 발표되었지만 δ_2 크기에 대한 요구사항이 항상 만족되는 것이 아니었으며 이러한 경우에 식 (5.7)는 표본크기를 너무 적게 계산하여 주어진 탐지확률(1-β)를 만족할 수 없었다[7]. 식 (5.7)은 결함판별력 q 를 고려하고 있지 않다. 하지만, $\gamma_2 x$ 크기의 결함을 주어진 탐지확률로 발견할 수 있는 표본크기 η_2를 식 (5.8)로 구할 수 있다. 두번째 검증방법으로 측정했을 때 결함판별력을 q_2라고 하면 미탐지확률은 식 (4.12)를 적용할 때 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\beta &= \sum_{j=0}^{Min(m(\gamma_2),\eta_2)} h(N, m(\gamma_2), \eta_2, j)(1-q_2)^j \\ &= \sum_{j=0}^{Min(m(\gamma_2),\eta_2)} \frac{\binom{m(\gamma_2)}{j}\binom{N-m(\gamma_2)}{\eta_2 - j}}{\binom{N}{\eta_2}}(1-q_2)^j\end{aligned} \tag{5.8}$$

여기서 $Min(m(\gamma_2),\eta_2)$는 $m(\gamma_2)$와 η_2 중에서 적은 값을 갖는 함수이다. 식 (5.8)은 초기하분포에 의한 확률이다. 주어진 β에 대하여 η_2를 구하는 것은 복잡하다. 식 (5.8)를 일정한 조건하에서 근사시키면 η_2에 대한 공식이 유도된다. N에 비해 η_2가 작다고 하고 $\eta_2 < m(\gamma_2)$ 라고 하면 식 (5.8)은 식 (5.9)와 같이 이항분포식으로 간략하게 된다. 식 (4.16)을 유도할 때에는 N이 D 보다 10 배 이상 클 때의 조건을 고려했다.

$$\beta = \sum_{j=0}^{\eta_2} \binom{\eta_2}{j} \left(\frac{m(\gamma_2)}{N}\right)^j \left(1-\frac{m(\gamma_2)}{N}\right)^{\eta_2 - j} (1-q_2)^j$$

$$= \left(1-\frac{m(\gamma_2)}{N}\right)^{\eta_2} \sum_{j=0}^{\eta_2} \binom{\eta_2}{j} \left(\frac{m(\gamma_2)(1-q_2)}{N-m(\gamma_2)}\right)^j \qquad (5.9)$$

$$= \left(1-\frac{m(\gamma_2)}{N}\right)^{\eta_2} \left(1-\frac{m(\gamma_2)(1-q_2)}{N-m(\gamma_2)}\right)^{\eta_2}$$

$$= \left(1-\frac{m(\gamma_2)q_2}{N}\right)^{\eta_2}$$

식 (5.9)에서

$$\eta_2 = \frac{\ln(\beta)}{\ln\left(1-\frac{m(\gamma_2)q_2}{N}\right)} \qquad (5.10)$$

이 유도된다. q_2는 다음과 같이 표현된다.

$$q_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{u_2}^{\infty} e^{-x^2/2} dx$$

$$= 1-\phi(u_2) \qquad (5.11)$$

여기서

$$u_2 = \frac{A \cdot \delta_2 - \gamma_2}{\delta_2(1 \pm \gamma_2)} \qquad (5.12)$$

이다. δ_2는 두번째 검증방법의 상대표준편차(relative standard deviation)이며, - 부호는 overstatement 경우(PIV(Physical Inventory Verification), SD(Shipment Domestic),

SF(Shipment Foreign) 계층)에 해당하고, + 부호는 understatement 경우(RD(Receipt Domestic), RF(Receipt Foreign) 계층)에 해당한다. q_3도 유사하게 정의된다. 식 (5.11), (5.12)의 아래 첨자를 3 으로 바꾸면 된다.

이상이 표본할당의 한가지 방법이었다. 그러나 q_2를 고려하지 않는 식(5.7)는 지나치게 표본크기를 적게 계산했고, 확률 0.025 를 사용하는 식(5.10)은 표본크기를 지나치게 크게 계산하게 되어 탐지확률을 만족하지 못하는 표본할당이 계산됨에 따라 보장조치 분야에서 일반적으로 사용되지 않았다.

제 2 절 최근 방법

IAEA 가 개발하고 있는 반복계산법은 크게 두 부분으로 나뉘어진다. 첫번째 부분은 초기 할당을 계산하는 것이고, 두번째 부분은 초기 할당에 대하여 최대 82 개의 결함률을 적용하여 주어진 미탐지확률을 만족하는지의 여부를 계산하여 초기할당을 조정하는 것이다.

가 초기 계산

세가지 결함크기 (두가지 검증방법을 적용하는 계층에 대하여는 두가지 결함크기)에 대하여 주어진 탐지확률($1-\beta$)을 만족하는 최소 표본할당들을 구할 수 있다는 뜻에서 초기 계산법은 최적화 계산법이다. 세가지 결함크기들은 x(전체결함), $\gamma_2 x$, $\gamma_3 x$ 로서 γ_2와 γ_3는 특별히 정해진 결함율로서 η_2와 n_3를 최소화시킨다. 세가지 결함크기에 대하여 확보된 탐지확률($1-\beta$)이 다른 결함크기에 대해서도 확보된다고 할 수는 없다. 최적화 계산법에 의하여 구해진 η_2와 n_3 값이 더 적어지지는 않을 것이지만, 모든 결함크기에 대하여 주어진 탐지확률을 보장하기 위하여 보다 큰 값을 취할 필요가 있다. 이러한 계산을 수행하기 위하여 초기에 구해진 표본할당 n_1, n_2, n_3 (두가지 검증방법을 사용하는 경우에는 n_1, n_2)를 사용하여 다양한 결함크기들에 대하여 각각의 미탐지확률 Q 를 계산한다. Q 의 최대값 Q_{max}을 찾은 후

에 이를 주어진 미탐지확률 β와 비교한다. Q_{max}가 β보다 작으면 초기할당이 최종 할당이 되어서 표본할당을 구한 것이다. 만약 Q_{max}가 β보다 크면 η_2 또는 n_3가 적절히 증가(n은 고정) 되어서 Q_{max}가 β보다 작게 되도록 한다. 이러한 표본할당의 변화가 다른 결함크기에 대하여 Q_{max}가 β보다 크게 될 수 있기 때문에, Q_{max}가 β보다 작게 될 때까지 반복법을 계속된다. 이때의 가정은 미탐지확률 β가 어렵지 않게 확보될 수 있다는 것이다.

제한점 1: 작은 결함크기에 대하여 주어진 탐지확률을 달성하지 못하는 계층(모집단)들이 일부 있다. 계층의 크기가 매우 커서 M이 많은 수의 요소에 나뉘어지기 때문에 가장 정밀한 검증방법의 δ_1로도 매우 적은 결함크기를 탐지하지 못할 수가 있는 것이다.

제한점 2: 두개의 연속된 δ값, 예를 들면 δ_1과 δ_2가 매우 근접하다면 통계적인 측면에서 어느 검증방법을 사용하여도 마찬가지인 것이다. 특히 $\delta_i/\delta_{i+1} < 1.25$ 이면 i+1 번째 검증방법은 할당방법에서 제외된다. 사찰에 적용할 때에는 i+1 번째 검증방법을 i 번째 검증방법 대신에 사용하거나 같이 사용할 수 있다.

오차모형(error model): 표본크기 계산법을 개발할 때, δ_i에 대한 두가지 극단적 가정을 하여 수학적 모형을 사용했다. 하나는 무작위오차모형(random error model)이고 다른 하나는 계통적오차모형(systematic error model)이다. 실제의 현상은 이 둘의 중간에서 나타나고 있으며 문제의 해법은 대단히 복잡해진다. 두번째와 세번째 검증방법에 대한 표본크기는 무작위오차모형을 적용할 때 보다 계통적오차모형를 적용할 때에 더 크게 계산된다. 하지만 크기의 차이는 크지 않았다. 다수의 측정 자료에 의하면 무작위오차모형이 더 합리적임을 보여준다. 만약 오차가 순전히 계통적오차에 의한 것이라면 동일 요소에 대한 반복된 측정결과가 동일한 값을 보일 것이므로 경험과 상충되어 쉽사리 계통적 오차가 있음을 알 수 있다. 따라서 표본

할당계산법에는 무작위오차모형을 사용한다.

초기표본크기 결정:

기각한계(reject limit) A 는 표준편차의 몇배를 사용할 것인가로 결정된다. 예전에는 $A=4$ 를 사용하였으나 이제는 $A=3$ 을 사용한다. 식 (5.3)는 $A=4$ 를 사용하여 유도한 것이다. $A=3$ 을 사용한 배경에는 세가지 요인이 있었다.

① 비파괴분석(NDA: Non-Destructive Assay) 방법의 민감도와 안정성이 향상됨에 따라, 매우 적은 제 1 종 오류확률(Type 1 error probability or false alarm probability)[21]을 보증하기 위한 $A=4$ 가 더 이상 필요치 않게 되었다.

② 부분결함이 발견된 후에 취해지는 후속조치가 정교하게 개발됨에 따라 제 1 종 오류확률을 지나치게 낮게할 필요가 없어졌다[10].

③ $A=4$ 에 비해 $A=3$ 는 두번째와 세번째 검증방법에 대한 표본크기를 크게 감소시켰다.

①과 ②는 $A=3$ 을 사용하게된 요인이었고 ③은 이러한 결정에 따른 바람직한 결과였다. 이후 $A=3$ 을 사용한다.

초기표본할당법 유도: 식 (5.10)에서 $m(\gamma_2)q_2$를 최대로 하면 η_2는 최소가 된다.

---

[21] False alarm probability - the probability, α, that statistical analysis of accountancy data will indicate an amount of nuclear material missing that is larger than expected on the basis of measurement uncertainties when, in fact, no deversion has occurred. For nuclear material accountancy tests, α is preselected as one of the basic parameters for designing sampling and measurement plans. It is usually set at 0.05 or less. The through evaluation or investigation that is made of observed anomalies or discrepancies results in a false alarm probability which is far below this value.(IAEA safeguards glossary 112)

Type I error - rejection of a null hypothesis in a test of hypothesis when it is true. The probability of committing a type I error is the significance level of the test. Since rejecting a null hypothesis is equivalent to concluding that the hypothesis is not true, the probability α of committing a type I error is often referred to as the false alarm probability.(IAEA safeguards glossary 243)

$m(\gamma_2)q_2$를 최대화 하자. 유도를 간단히 하기 위하여 $m(\gamma_2)q_2$를 mq 라고 하고 u_2, δ_2, 그리고 γ_2 에서 아래 첨자 2 를 제거하고 수식을 유도하자. mq 를 γ 에 대하여 편미분하고 이를 γ 에 대하여 풀자.

$$\frac{\partial mq}{\partial \gamma} = m\frac{\partial q}{\partial \gamma} + p\frac{\partial m}{\partial \gamma} \tag{5.13}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial m}{\partial \gamma} &= \frac{\partial}{\partial \gamma}\left(\frac{M}{\gamma \cdot x}\right) \\ &= -\frac{M}{x \cdot \gamma^2} \end{aligned} \tag{5.14}$$

이고

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial \gamma} &= \frac{\partial}{\partial \gamma}\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_u^{\infty} e^{-x^2/2}dx\right) \\ &= -\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-u^2/2}\frac{\partial u}{\partial \gamma} \\ &= -\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-u^2/2}\left(\frac{\delta(1\pm\gamma)(-1)-(A\delta-\gamma)(\pm\delta)}{\delta^2(1\pm\gamma)^2}\right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-u^2/2}\frac{(1\pm A\delta)}{\delta(1\pm\gamma)^2} \end{aligned} \tag{5.15}$$

이므로

$$\frac{\partial mq}{\partial \gamma} = 0 \tag{5.16}$$

이라고 할 때 $A=3$ 이므로,

$$\frac{e^{-u2/2}}{\sqrt{2\pi}}\frac{(1\pm 3\delta)}{\delta(1\pm\gamma)^2} = \frac{1}{\gamma\sqrt{2\pi}}\int_u^{\infty} e^{-x2/2}dx \tag{5.17}$$

이다. 식 (5.17)의 해는 M/x 에 무관하다. 식 (5.17)를 시행착오법으로 풀면 표 7 과 같다.

표 7. mq 를 최대화 하는 γ (IAEA STR 261 Rev.1 Chaper 4 Table 4.1)

δ	γ for overstatement	γ for understatement
0.15	0.564	0.605
0.14	0.531	0.568
0.13	0.497	0.530
0.12	0.463	0.491
0.11	0.428	0.452
0.10	0.392	0.412
0.09	0.356	0.371
0.08	0.318	0.330
0.07	0.280	0.289
0.06	0.242	0.249
0.05	0.203	0.208
0.04	0.163	0.166
0.03	0.123	0.125
0.02	0.082	0.083
0.01	0.041	0.041
0.005	0.020	0.020

위의 표 7 은 다음의 식들로 근사된다.

Overstatement 경우:

$$\gamma_i = -0.002 + 4.259\delta_i - 3.24\delta_i^2 \qquad (5.18)$$

Understatement 경우:

$$\gamma_i = -0.002 + 4.284\delta_i - 1.508\delta_i^2 \qquad (5.19)$$

초기 표본 할당을 계산하는 순서는 다음의 List 2 와 같다.

List 2. 초기할당 계산순서

① 식(5.18), (5.19)에서 γ_2 를 계산한다.
② 식(4.2)에서 $[M/\gamma_2 x]$를 계산한다.
③ 식(5.11), (5.12)에서 q_2를 계산한다.
④ 식(5.10)에서 두번째와 세번째 검증방법에 할당되는 표본크기인 η_2를 계산한다.
⑤ 식(4.15)에서 $q=1$ 로 하여 전체 표본크기 n을 구한 후, 첫번째 검증방법에 할당되는 표본크기인 $n_1 = n - \eta_2$ 를 계산한다.

세가지 검증방법을 적용하는 경우에는 식 (5.10)에서 세번째 검증방법에 할당되는 표본크기 n_3를 계산하고 $n_2 = \eta_2 - n_3$ 를 계산한다.

나 반복 계산

"가 초기 계산"에서 구한 초기 표본할당으로부터 다양한 크기의 결함에 대한 표본크기를 반복계산하여 주어진 β에 해당하는 표본할당을 계산한다. 미탐지확률이 계산되는 결함수는 m 으로 나타내진다. 결함의 크기가 동일하다고 가정하고 있으므로 m 개의 결함수에 대한 요소의 결함 크기는 M/m 이다. 결함인 요소가 전체결함으로 구성될 때, 결함수 m 은 가장 적은 수인 다음의 값을 갖는다.

$$m = [M / x] \tag{5.20}$$

계층의 요소 전체가 결함인 경우 결함수 m 은 가장 큰 값인 M/N 이다. $\gamma < 1$ 일 때, 80 개의 m 값은 다음의 식으로 주어진다.

$$m = \left(1/m_0 - i \cdot r\right)^{-1} \; ; i = 0,1,2,\cdots,79 \tag{5.21}$$

여기서

$$r = \frac{(1/m_0 - 1/N)}{80} \tag{5.22}$$

$$m_0 = \frac{M(1 \pm 3\delta_1)}{6\delta_1 x} \tag{5.23}$$

이다. 식 (5.23)에서 + 부호는 overstatement 경우에 적용되고 - 부호는 understatement 경우에 적용된다. 식 (5.23)는 결함크기 M/m_0가 높은 탐지확률로 탐지될 경우에 해당한다. 따라서 결함수 m_0에 대한 미탐지확률이 결함수 M/x의 미탐지확률 보다 훨씬 적을 것이므로 M/x와 m_0사이의 결함수에 대해서는 Q가 β를 초과하지 않을 것이다. 가장 큰 결함의 크기는 x 이므로 $(1 - 3\delta_1)/6\delta_1 \geq 1$ 이어야 한다. 따라서 $\delta_1 \leq 1/9$ 이다. $\delta_1 > 1/9$ 이면 $m_0 = M/x + 1$ 이다.

m_o 유도:

Overstatement case

$$\Pr\left(d > 3\delta_1 x \mid E(d) = M/m_0\right) = 0.99865$$

$$\frac{3\delta_1 x - M/m_0}{\delta_1 (x - M/m_0)} = -3 \tag{5.24}$$

$$m_0 = \frac{M(1 + 3\delta_1)}{6\delta_1 x}$$

Understatement case

$$\Pr\left(d < -3\delta_i x \mid E(d) = -M/m_0\right) = 0.99865$$

$$\frac{-3\delta_1 x + M/m_0}{\delta_1 (x + M/m_0)} = 3 \tag{5.25}$$

$$m_0 = \frac{M(1 - 3\delta_1)}{6\delta_1 x}$$

검증방법에 대한 미탐지확률: 주어진 결함수 m에 대하여 적어도 한가지 검증방법에 의하여 적어도 하나의 결함이 탐지된다면 이를 자료위조를 탐지한 것이라고 정의한다. 각각의 m에 대하여 탐지확률을 계산하는 것 보다 미탐지확률을 계산하는 것이 쉽다. 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} Q &= \beta_1\beta_2 \qquad \textit{for two measurement methods} \\ &= \beta_1\beta_2\beta_3 \qquad \textit{for three measurement methods} \end{aligned} \tag{5.26}$$

여기서

β_1 는 첫번째 검증방법에 의해 결함을 찾지못할 확률이고,

β_i 는 j (< i) 번째 검증 방법(들)에 의해 결함을 탐지하지 못했을 때, i 번째 검증 방법에 의해서도 결함을 탐지하지 못할 조건 확률(conditional probability)이다. i = 2, 3 이다.

Q를 계산하는 정확한 공식:

두가지 검증방법을 사용하는 경우를 고려하자. 주어진 $N, M, m, n_1, n_2, \delta_1, \delta_2$ 에서 결함크기 M/m 이 측정되었을 때 결함으로 분류될 확률 q_i, i = 1,2,을 구하자. q_i 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} q_i &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{v_i}^{\infty} e^{-x^2/2} dx \\ &= 1 - \phi(v_i) \end{aligned} \tag{5.28}$$

여기서

$$v_i = \frac{3\delta_i x - M/m}{\delta_i (x \pm M/m)} \tag{5.29}$$

이다. - 부호는 overstatement 경우이고 + 부호는 understatement 경우이다.

v_i 유도:

Overstatement case

$$\Pr(d > 3\delta_i x \mid E(d) = M/m) = 1 - \phi(v_i)$$

$$\frac{3\delta_i x - M/m}{\delta_i (x - M/m)} = v_i \tag{5.30}$$

$$v_i = \frac{3\delta_i x - M/m}{\delta_i (x - M/m)}$$

Understatement case

$$\Pr(d < -3\delta_i x \mid E(d) = -M/m) = \phi(-v_i)$$

$$\frac{-3\delta_i x + M/m}{\delta_i (x + M/m)} = -v_i \tag{5.31}$$

$$v_i = \frac{3\delta_i x - M/m}{\delta_i (x + M/m)}$$

표본크기 $(n_1 + n_2)$에 y 개의 결함이 포함될 확률은 다음과 같다.

$$\binom{m}{y}\binom{N-m}{n_1+n_2-y}\Big/\binom{N}{n_1+n_2} \tag{5. 32}$$

주어진 y에서 첫번째 검증방법으로 측정되는 n_1 중에 결함이 w 개 포함되고, 두번째 검증방법으로 측정되는 n_2 중에 결함이 $(y-w)$개가 있을 확률은 다음과 같다.

$$\binom{n_1}{w}\binom{n_2}{y-w}\Big/\binom{n_1+n}{y} \tag{5.33}$$

이 때 결함을 탐지하지 못할 조건확률은 다음과 같다.

$$(1-q_1)^w(1-q_2)^{y-w} \tag{5.34}$$

위의 식들을 결합하면

$$\beta_{12} = \sum_{y=0}^{Min(m,n_1+n_2)} \frac{\binom{m}{y}\binom{N-m}{n_1+n_2-y}}{\binom{N}{n_1+n_2}} \sum_{Max(0,y-n_2)}^{Min(y,n_1)} \frac{\binom{n_1}{w}\binom{n_2}{y-w}}{\binom{n_1+n_2}{y}}(1-q_1)^w(1-q_2)^{y-w} \tag{5.35}$$

식 (5.26)에서 β_{12}는 $\beta_1\beta_2$ 대신 사용된다.

$$\beta_{123} = \sum_{y} \frac{\binom{m}{y}\binom{N-m}{n_1+n_2+n_3-y}}{\binom{N}{n_1+n_2+n_3}} \sum_{w_1} \sum_{w_2} \frac{\binom{n_1}{w_1}\binom{n_2}{w_2}\binom{n_3}{y-w_1-w_2}}{\binom{n_1+n_2+n_3}{y}}(1-q_1)^{w_1}(1-q_2)^{w_2}(1-q_3)^{y-w_1-w_2} \tag{5.36}$$

식 (5.26)에서 β_{123}는 $\beta_1\beta_2\beta_3$ 대신 사용된다.

위의 식들이 매우 복잡하기 때문에 다음의 근사식이 사용된다.

$n_1 \leq mq_1$ 일 때는

$$\beta_1 = \left(1 - \frac{mq_1}{N - 0.5(n_1 - 1)}\right)^{n_1} \tag{5.37}$$

$n_1 > mq_1$ 일 때는

$$\beta_1 = \left(1 - \frac{n_1}{N - 0.5(mq_1 - 1)}\right)^{mq_1} \tag{5.38}$$

식 (5.9)와 (5.37)을 비교하면 식(5.37)에 $0.5(mq_1\text{-}1)$ 항이 추가되어 있음을 알 수 있다. 이는 초기하분포에 의한 미탐지확률에 근접한 값을 얻기 위함이다. 첫번째 검증방법에 할당되는 n_1 표본 중에 있을 예상결함수 w_1을 구하자. 첫번째 검증방법에 의해 측정되었을 때 n_1 중에서 결함이 발견되지 않을 확률을 가장 크게 하는 w_1을 예상결함수라고 할 수 있다. w_1이 주어졌을 때 결함을 찾지 못할 확률은 다음과 같다.

$$P = \frac{\binom{m}{w_1}\binom{N-m}{n_1-w_1}}{\binom{N}{n_1}}(1-q_1)^{w_1} \tag{5.39}$$

$$= \frac{m!(N-m)!\, n_1!(N-n_1)!\,(1-q_1)^{w_1}}{w_1!(m-w_1)!(n_1-w_1)!(N-m-n_1+w_1)!\,N!}$$

계승(factorial)의 근사식인 다음의 스털링 근사공식을 사용하자.

$$n! \approx \sqrt{2\pi}\, n^{n+(1/2)} e^{-n} \tag{5.40}$$

P를 최대화 시키는 w_1값은 $\ln P$를 최대화 시키는 값이므로

$$\begin{aligned} \ln P = {} & C + w_1 \ln(1-q_1) + w_1 - (w_1 + 0.5)\ln w_1 + (m - w_1) \\ & - (m - w_1 + 0.5)\ln(m - w_1) + (n_1 - w_1) - (n_1 - w_1 + 0.5)\ln(n_1 - w_1) \\ & + (N - m - n_1 + w_1) - (N - m - n_1 + w_1 + 0.5)\ln(N - m - n_1 + w_1) \end{aligned} \tag{5.41}$$

lnl' 를 w_1에 대하여 편미분하고 0 으로 하고 w_1에 대하여 풀면

$$\frac{\partial \ln P}{\partial w_1} = \ln(1-q_1) - \frac{(w_1+0.5)}{w_1} - \ln w_1 + \frac{(m-w_1+0.5)}{(m-w_1)} + \ln(m-w_1)$$
$$+ \frac{(n_1-w_1+0.5)}{(n_1-w_1)} + \ln(n_1-w_1) - \frac{(N-m-n_1+w_1+0.5)}{(N-m-n_1+w_1)} \qquad (5.42)$$
$$- \ln(N-m-n_1+w_1) = 0$$

0.5 항을 무시하면 위의 식은 다음과 같이 w_1에 대한 2 차식이 된다.

$$-w_1(N-m-n_1+w_1) + (1-q_1)(m-w_1)(n_1-w_1) = 0 \qquad (5.43)$$

위의 식을 정리하면

$$q_1 w_1^2 + (N - n_1 q_1 - m q_1) w_1 - m n_1 (1-q_1) = 0 \qquad (5.44)$$

위의 2 차식에서 구한 w_1은 가장 가까운 정수에 반올림된다. 그러면 첫번째 검증 방법에 할당된 표본을 제외한 나머지 계층에 있으리라고 예상되는 결함수 m_1은 다음과 같이 된다.

$$m_1 = m - w_1 \qquad (5.45)$$

β_2 는 식 (5.37)과 (5.38)에서 m 을 m_1으로 대치한 것이고 N을 다음의 N_1으로 대치한 것이며 β, q, 그리고 n의 아래첨자를 1 에서 2 로 바꾼 것이다.

$$N_1 = N - n_1 \qquad (5.46)$$

$n_2 \leq m_1 q_2$ 일 때는

$$\beta_2 = \left(1 - \frac{m_1 q_2}{N_1 - 0.5(n_2 - 1)}\right)^{n_2} \tag{5.47}$$

$n_2 > m_1 q_2$ 일 때는

$$\beta_2 = \left(1 - \frac{n_2}{N_1 - 0.5(m_1 q_2 - 1)}\right)^{m_1 q_2} \tag{5.48}$$

마찬가지 방법으로 나머지 $(N - n_1 - n_2)$ 요소 중에서 n_3 개의 요소를 임의로 추출했을 때, 남아있을 예상결함수는 식 (5.44)에서 w_1, q_1, 그리고 n_1의 첨자를 2로 바꾸고 m을 m_1으로 바꾸고 N을 N_1으로 바꾼 2차식의 解이다. 그러면

$$N_2 = N_1 - n_2 \tag{5.49}$$

$$m_2 = m_1 - w_2 \tag{5.50}$$

$n_3 \leq m_2 q_3$ 일 때는

$$\beta_3 = \left(1 - \frac{m_2 q_3}{N_2 - 0.5(n_3 - 1)}\right)^{n_3} \tag{5.51}$$

$n_3 > m_2 q_3$ 일 때는

$$\beta_3 = \left(1 - \frac{n_3}{N_2 - 0.5(m_2 q_3 - 1)}\right)^{m_2 q_3} \tag{5.52}$$

결함수가 m 일 때 각각의 β_i를 구했으므로 미탐지확률 Q가 계산된다. 모든 m에 대하여 Q를 구한 후 최대값을 찾아 이를 Q_{max}라 하자. Q_{max}가 주어진 미탐지확률인 β보다 작으면 초기할당이 최종할당이 된다. 만약 Q_{max} 가 β보다 크면 할당을 변경시킬 필요가 있다. 두가지 검증방법인 경우에는 $Q = \beta_1\beta_2$이므로 n이 고정된 상태에서 n_2를 증가시키고 n_1을 감소시킨다. 그러면 β_2은 감소하고 β_1은 증가하지만 $\beta_1\beta_2$은 감소한다. n_2를 얼마만큼 증가시킬 것인가를 구하기 위하여 식 (5.37)을 사용한다.

$$\beta_2 = \left(1 - \frac{m_1 q_2}{N_1 - 0.5(n_2 - 1)}\right)^{n_2} \tag{5.53}$$

n_2의 조정에 따른 β_1의 변경을 일단 무시하고, β_2를 다음의 등식이 되도록 β_2'로 감소시킨다고 하면

$$\beta_1\beta_2' = \beta \tag{5.54}$$

에서

$$\begin{aligned}\beta_2' &= \beta/\beta_1 \\ &= \beta_2\beta/Q_{\max}\end{aligned} \tag{5.55}$$

위의 β_2' 값이 $(n_2 + c)$에 의해서 만족된다면 식 (5.53)에 의하여 β_2'는 다음과 같은 근사식으로 표현된다.

$$\beta_2' = \beta_2^{1+c/n_2} \tag{5.56}$$

식 (5.55)으로부터 c는 다음과 같이 된다.

$$c = \frac{n_2(\ln\beta - \ln Q_{max})}{\ln\beta_2} \tag{5.57}$$

따라서 변경된 표본할당은 다음과 같다.

첫번째 검증방법에 할당되는 표본크기: $n_1 - c$

두번째 검증방법에 할당되는 표본크기: $n_2 + c$

위와 같이 구한 새로운 할당에 대하여 다시 미탐지확률 Q를 계산하여 주어진 미탐지확률 β와 비교하여 $Q_{max} \leq \beta$ 가 될 때까지 반복한다.

세가지 검증방법에 대하여는 아래의 기준을 적용하여 유사한 방법으로 반복 계산한다.

$\beta_3 > \beta_2$ 일 때에는 다음과 같이 할당을 변경한다.

첫번째 검증방법에 할당되는 표본크기: $n_1 - c_2$

두번째 검증방법에 할당되는 표본크기: $n_2 + c_2$

세번째 검증방법에 할당되는 표본크기: n_3

$\beta_3 \leq \beta_2$ 일 때에는 다음과 같이 할당을 변경한다.

첫번째 검증방법에 할당되는 표본크기: n_1

두번째 검증방법에 할당되는 표본크기: $n_2 - c_3$

세번째 검증방법에 할당되는 표본크기: $n_3 + c_3$

위와 같이 구한 새로운 할당에 대하여 다시 미탐지확률 Q를 계산하여 주어진 미탐지확률 β와 비교하여 $Q_{max} \leq \beta$ 가 될 때까지 반복한다.

앞에서 지적한대로 측정오차 때문에 주어진 미탐지확률 β를 만족하는 할당을 구하지 못하는 경우가 있다. m이 매우 클 때 이러한 현상이 일어난다. 즉 매우 작은 크기의 결함(bias defect) 으로 인해 가장 정밀한 검증방법으로도 이를 탐지하지 못할 수가 있는 것이다. 매우 큰 계층이 이러한 경우에 해당할 수 있다. m

의 상한값 m_{∞}는 m 이 m_{∞} 보다 클 경우 탐지확률 (1-β)가 성취될 수 없는 경우이다. m_{∞} 는 결함크기 M/m_{∞} 에 의하여 결정된다. 가장 정밀한 검증방법에 의하여 결함크기 M/m_{∞} 가 확률 0.16(1 표준편차 수준)으로 탐지될 경우이다.

$$m_{\infty} = \frac{M(1 \pm \delta_i)}{2\delta_i x} \tag{5.58}$$

- 부호는 overstatement 에 해당하고 + 부호는 understatement 에 해당한다.

m_{∞} 유도:

Overstatement case

$$\Pr\left(d > 3\delta_i x \mid E(d) = M/m_{00}\right) = 0.1587$$

$$\frac{3\delta_i x - M/m_{00}}{\delta_i\left(x - M/m_{00}\right)} = 1 \tag{5.59}$$

$$m_{00} = \frac{M(1-\delta_i)}{2\delta_i x}$$

Understatement case

$$\Pr\left(d < -3\delta_i x \mid E(d) = -M/m_{00}\right) = 0.1587$$

$$\frac{-3\delta_i x + M/m_{00}}{\delta_i\left(x + M/m_{00}\right)} = -1 \tag{5.60}$$

$$m_{00} = \frac{M(1+\delta_i)}{2\delta_i x}$$

m_{∞} 가 계산되면 Q가 계산되는 최대 결함수 N_0 가 다음과 같이 결정된다.

$$N_0 = Min(m_{00},\ N) \tag{5.61}$$

$N_0 = m_{00}$ 이면 Q_{max} 에 대하여 세가지 경우를 고려하여야 한다.

(a) $m = M/x$ 또는 $m = N_0$에서 Q_{max} 가 발생

(b) $m = M/x$ 와 $m = N_0$사이에서 Q_{max} 가 발생하지만 $Q_{max} \le \beta$

(c) $m = M/x$ 와 $m = N_0$사이에서 Q_{max} 가 발생하고 $Q_{max} > \beta$

제 3 절. IAEA 표준이항 할당법의 문제점 및 대책

가 표본크기 계산공식 적용

IAEA의 표본할당 계산법은 표본크기 n을 계산하는 방법과 이를 n_i에 할당하는 방법으로 구분된다. 표본크기 n을 계산할 때에는 식 (4.15)에서 q = 1로 하고 식 (4.2)에서 γ=1 일 때의 D를 사용하여 식 (5.62)로 구한다.

$$n = N(1-\beta^{\frac{1}{D}}) = N(1-\beta^{1/\left[\frac{M}{x}\right]}) \qquad (5.62)$$

식 (5.62)의 근사조건 중의 하나는 $D \le n$ 이다. 계층과 요소의 구성에 따라 $n \le D$ 인 경우도 있기 때문에 식 (5.62)를 전체표본크기 계산에 항상 적용하는 것은 좋은 방법이라고 하기 어렵다. 식 (5.62)에서 구한 표본크기를 두가지 검증방법 또는 세가지 검증방법에 할당하기 위하여 초기 할당을 계산할 때 항상 적용하는 공식은 식 (4.17)이다. $n \le D$ 이 항상 성립한다고 볼 수 없기 때문에 좋은 방법이라고 할 수 없다.

대책: List 9에 있는 방식으로 결함을 결함이라고 판별할 결함판별력 q를 고려하고 식 (4.15)와 (4.17)을 동시에 적용할 필요가 있다.

나 초기할당 계산

IAEA STR-261 Rev.1 의 106 페이지 하단부에는 다음과 같은 초기할당을 계산하는 C 코드가 있다(List 3). 결함율 γ 적용하는 것과 이를 부분/경미 결함에 대응하는 표본크기 계산에서 문제가 발견되었다.

List 3. 초기할당 코드

```
/* CALCULATE INITIAL SAMPLE SIZES (n1, n2, m3) */

gamma_flag = 2 ;   /* INDICATES TO THE calc_gamma        */
                   /* FUNCTION TO CALCULATE gamma2 */
gamma2[j] = calc_gamma(delta1, delta2, j, gamma_flag) ;
if (delta3 != 0)   /*   THREE MEASUREMENT METHODS   */
{
     gamma_flag = 3 ;   /* INDICATES TO THE calc_gamma          */
                        /* FUNCTION TO CALCULATE gamma3   */
                        /* AND TO THE calc_ni0 FUNCTION       */
                        /* TO CALCULATE n30                   */
     gamma3[j] = calc_gamma(delta2, delta3, j, gamma_flag) ;
     # if (NFLAG == 0)
          u3[j] = calc_u(delta3,gamma3[j], A,j) ;
          p3[j] = phi(u3[j]) ;
          f3[j] = gamma3[j]/p3[j] ;
          n30 = calc_ni0(gamma3[j],MNx,N,logbeta,M,x,f3[j],j,gamma_flag);
     #endif
}
#if (NFLAG == 0)
     u2[j] = calc_u(delta2, gamma2[j],A,j) ;
     p2[j] = phi(u2[j]) ;
     f2[j] = calc_f2(gamma2[j],p2[j]);
     gamma_flag = 2 ; /* INDICATES TO THE calc_ni0 */
                      /* FUNCTION TO CALCULATE n20 */
     n20 = calc_ni0(gamma2[j],MNx,N,logbeta,M,x,f2[j],j,gamma_flag);
     calc_n_values(N,na1,n30,n20,n1,n2,n3,j) ;
#endif
```

List 2 와 List 3 을 비교하면 gamma2[j]는 식 (5.18)과 (5.19)를 계산한 것이고, u2[j] 와 p2[j]는 식 (5.11), (5.12)를 계산한 것이다(List 6, 7). f2[j]는 gamma2[j]/p2[j] 이다 (List 8). 그리고 n20 은 식 (5.10)을 계산한 것이다. 그런데 List 5 에 있는 식 (5.10) 을 계산하는 C 코드에는

```
work = 1.0 - (M / ( gamma * N * x)) ;                    (5.63)
```

가 있는데 이를 식 (5.10)과 비교하면

$$work = 1.0 - (M / (f * N * x)) : \tag{5.64}$$

이어야 함을 알 수 있다. 더우기 문제가 된 것은 f2[j]는 List 4 에 있는 calc_gamma 를 계산한 값으로서 식 (5.18), (5.19)의 γ 가 아니고 식 (6.2)의 γq 이다. 이때에는 u2[j], p2[j], 그리고 f2[j] 계산이 의미가 없어진다. (IAEA STR-261 Rev.1 에는 calc_gamma 가 없다. 입수한 calc_gamma 는 IAEA STR-261 Rev.0 에 있던 것이다.)

대책: calc_gamma 를 식 (5.18), (5.19)를 계산하는 프로그램으로 바꾸고 calc_ni0 에 식 (5.64)를 사용하는 것이다.

List 4. γ` 계산 함수

```
/* FUNCTION:  calc_gamma  ***************************************
*                                                                 *
*     calculates gamma2[i] or gamma3[i]                           *
*                                                                 *
*     From    IAEA STR-261 Rev.0                                  *
*                                                                 *
 *****************************************************************/
double calc_gamma(double delta_a, double delta_b, int j, int gamma_flag)
{
   double gamma ;
   double LO ;
   double LU ;
   double powLO ;
   double powLU ;
   if (j == 0 || j == 1)   /* OVERSTATEMENTS CASES 1 AND 2 */
   {
     LO = calc_LO(delta_a,delta_b,gamma_flag) ;
     powLO = pow(LO,2)
     gamma = 4.737 * LO- 5.49 * powLO ;
   }
   else   /* UNDERSTATEMENTS CASES 3 AND 4 */
   {
     LU = calc_LU(delta_a,delta_b,gamma_flag) ;
     powLU = pow(LU,2) ;
     gamma =   4.802 * LU + 4.47 * powLU ;
```

```
    }
    if (gamma > 1.0)
    {
       gamma = 1.0 ;
    }
    return(gamma) ;
}
```

List 5. 부분/경미 결함에 대한 표본크기 계산 함수

```
/* FUNCTION:   calc_ni0   ********************************************
*                                                                     *
*      calculates n20 and n30                                         *
*                                                                     *
*      From     IAEA STR-261 Rev.1                                    *
*                                                                     *
 ***********************************************************************/
double calc_ni0(double gamma,double MNx,double N,double logbeta,double M,
                                        double x,double f,int j,int gamma_flag)
{
    double divisor ;
    double ni0 ;
    double work ;
    if (f == MNx)
    {
        if (gamma_flag == 2)   /* n2 */
        {
           if (j == 0 || j == 2)   /* TWO MEASUREMENT METHODS */
           {
               ni0 = 1.0 ;
           }
           else
           {
               ni0 = 0 ;
           }
        }
        else   /* gamma_flag == 3 (n3) */
        {
           ni0 = 1.0 ;
        }
    }
    else
    {
        work = 1.0 - ( M / (gamma * N * x) ) ;
        if (work <= 0.)
        {
           ni0 = 1. ;
        }
        else
        {
           divisor = log(work) ;
```

```
            ni0 = logbeta / divisor ;
          }
    }
    ni0 = ceil(ni0) ;
    return(ni0) ;
}
```

List 6. -u 계산 함수

```
/* FUNCTION:   calc_u   ******************************************
*                                                                  *
*      calculates u2[i] or u3[i]                                    *
*                                                                  *
*      From     IAEA STR-261 Rev.1                                 *
*                                                                  *
 ******************************************************************/
double calc_u(double delta, double gamma, double A, int i)
{
    double divisor ;
    double y        ;
    if (i == 0   ||   i == 1 )
    {
        divisor = delta * (1.0 - gamma) ;
    }
    else
    {
        divisor = delta * (1.0 + gamma) ;
    }
    if (divisor == 0.)
    {
        y = 5. ;
    }
    else
    {
        y = (gamma - A * delta) / divisor ;
    }
    return(y) ;
}
```

List 7. 누적정규분포 계산 함수

```
/* FUNCTION:   phi     ******************************************
*                                                                  *
*      a function for the normal curve                              *
*                                                                  *
*      From     IAEA STR-261 Rev.1                                 *
*                                                                  *
```

```
 ***************************************************************/
double phi (double x)
{
    double fu           ;
    double vu, vu2      ;
    double wu1          ;
    double wu2          ;
    double wu3          ;
    double wu4          ;
    double wu5          ;
    double wu           ;
    double y            ;
    fu = (1.0/2.506628275) * exp(-x * x / 2) ;
    vu = 1.0/(1.0+(0.2316419*(fabs(x)))) ;
    vu2 = vu * vu ;
    wu1 =  0.319381530 * vu ;
    wu2 = -0.356563782 * vu2 ;
    wu3 =  1.781477937 * vu2 * vu ;
    wu4 = -1.821255978 * vu2 * vu2 ;
    wu5 =  1.330274429 * vu2 * vu2 * vu ;
    wu = fu * (wu1 + wu2 + wu3 + wu4 + wu5 ) ;
    if (x < 0 )
    {
        y = wu ;
    }
    else
    {
        y = 1.0 - wu ;
    }
    return (y) ;
}
```

List 8. r/q 계산 함수

```
/* FUNCTION:  calc_f2 ********************************************
*                                                                 *
*     calculates f2[i]                                            *
*                                                                 *
*     From    IAEA STR-261 Rev.1                                  *
*                                                                 *
 ***************************************************************/
double calc_f2(double gamma2, double p2)
{
    double f2 ;
    f2 = gamma2 / p2 ;
    if (f2 > 1.0)
    {
        f2 = 1.0 ;
    }
    return(f2) ;
}
```

제 6 장 IAEA 표준이항 할당근사법[9]

두번째나 세번째 검증방법에 할당되는 표본크기 η_2, n_3 를 계산하는 공식인 식 (5.10)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n = \frac{\ln \beta}{\ln\left(1 - M/\left(\gamma' Nx\right)\right)} \tag{6.1}$$

여기서

$$\gamma' = \gamma/q \tag{6.2}$$

이다. γ'를 간단한 함수로 표시할 수 있으면 η_2 와 n_3 계산이 쉬워진다. IAEA 는 초기 표본할당이 최종 표본할당과 같다는 가정을 하였다. 시설자-사찰관의 상대 표준편차 δ가 주어지면 γ는 식 (5.18)과 식(5.19)에 의해 계산된다. 식 (5.12)와 (5.11)에서 q 가 계산된다. 표 8 에는 δ에 대한 γ' 값이 계산되어 있다. 표 8 에서 PRED 행은 γ' 행을 curve fitting 한 식 (6.3)과 (6.4)로 계산된 값이며 ratio 행은 PRED/γ' 이다. $\delta_i > 0.15$ 일 때의 γ 식을 입수하지 못하였기 때문에 $\delta_i > 0.15$ 일 때의 근사할당 프로그램을 개발하지 못했다.

$\delta_i \leq 0.15$ 일 때, overstatement 경우:

$$\begin{aligned}
\Delta_2 &= \max(\delta_2; 0.0075 - 0.0531\delta_1 + 2.3690\delta_1^2) \\
\gamma_2' &= 4.737\Delta_2 - 5.490\Delta_2^2 \\
\Delta_3 &= \max(\delta_3; 0.331\delta_2) \\
\gamma_3' &= 4.737\Delta_3 - 5.490\Delta_3^2
\end{aligned} \tag{6.3}$$

표 8. $\gamma'(\delta)$

(IAEA STR-261 Rev.1 Chaper 6 Table 1 참조)

	Overstatement						Understatement					
δ	γ	$-u$	q	γ'	PRED	ratio	γ	$-u$	q	γ'	PRED	ratio
0.150	0.564	1.74	0.959	0.588	0.587	0.999	0.607	0.65	0.742	0.817	0.821	1.004
0.140	0.531	1.69	0.954	0.556	0.556	0.999	0.568	0.68	0.750	0.757	0.760	1.003
0.130	0.497	1.63	0.949	0.524	0.523	0.999	0.529	0.70	0.758	0.698	0.700	1.002
0.120	0.462	1.59	0.944	0.490	0.489	0.999	0.490	0.73	0.767	0.639	0.641	1.002
0.110	0.427	1.54	0.939	0.455	0.455	0.999	0.451	0.76	0.776	0.581	0.582	1.002
0.100	0.392	1.50	0.934	0.419	0.419	0.999	0.411	0.79	0.785	0.524	0.525	1.002
0.090	0.355	1.47	0.929	0.382	0.382	0.999	0.371	0.82	0.794	0.468	0.468	1.002
0.080	0.318	1.43	0.924	0.344	0.344	0.999	0.331	0.86	0.804	0.412	0.413	1.002
0.070	0.280	1.39	0.918	0.305	0.305	0.998	0.290	0.89	0.814	0.357	0.358	1.003
0.060	0.242	1.36	0.913	0.265	0.264	0.998	0.250	0.93	0.823	0.303	0.304	1.004
0.050	0.203	1.33	0.908	0.224	0.223	0.998	0.208	0.97	0.833	0.250	0.251	1.005
0.040	0.163	1.29	0.910	0.181	0.181	0.998	0.167	1.01	0.843	0.198	0.199	1.006
0.030	0.123	1.25	0.894	0.137	0.137	0.998	0.125	1.04	0.851	0.147	0.148	1.007
0.020	0.082	1.19	0.883	0.093	0.093	0.998	0.083	1.07	0.857	0.097	0.098	1.009
0.010	0.040	1.07	0.858	0.047	0.047	0.997	0.041	1.03	0.848	0.048	0.048	1.010
0.009	0.036	1.05	0.852	0.042	0.042	0.997	0.036	1.01	0.844	0.043	0.044	1.010
0.008	0.032	1.02	0.845	0.038	0.038	0.996	0.032	0.99	0.839	0.038	0.039	1.009
0.007	0.028	0.98	0.836	0.033	0.033	0.994	0.028	0.96	0.832	0.034	0.034	1.008
0.006	0.023	0.93	0.823	0.028	0.028	0.991	0.024	0.92	0.821	0.029	0.029	1.006
0.005	0.019	0.86	0.805	0.024	0.024	0.986	0.019	0.86	0.805	0.024	0.024	1.002

$\delta_1 \leq 0.15$ 일 때, understatement 경우:

$$\begin{aligned}
\Delta_2 &= \max(\delta_2; 0.162\delta_1) \\
\gamma_2' &= 4.802\Delta_2 + 4.470\Delta_2^2 \\
\Delta_3 &= \max(\delta_3; 0.208\delta_2) \\
\gamma_3' &= 4.802\Delta_3 + 4.470\Delta_3^2
\end{aligned} \tag{6.4}$$

$\delta_1 > 0.15$ 일 때, overstatement 경우:

$$\begin{aligned}
\Delta_2 &= \max(\delta_2; 0.0324 - 0.3641\delta_1 + 3.3068\delta_1^2) \\
\gamma_2' &= 0.024 + 4.445\Delta_2 - 4.546\Delta_2^2 \\
\Delta_3 &= \max(\delta_3; 0.331\delta_2) \\
\gamma_3' &= 4.737\Delta_3 - 5.490\Delta_3^2
\end{aligned} \tag{6.5}$$

$\delta_1 > 0.15$ 일 때, understatement 경우:

$$\begin{aligned}
\Delta_2 &= \max(\delta_2; 0.0556 - 0.5888\delta_1 + 2.5659\delta_1) \\
\gamma_2' &= 4.802\Delta_2 + 4.470\Delta_2^2 \\
\Delta_3 &= \max(\delta_3; 0.208\delta_2) \\
\gamma_3' &= 4.802\Delta_3 + 4.470\Delta_3^2
\end{aligned} \tag{6.6}$$

이상에서 구한 근사할당을 반복할당법의 초기할당 계산에 사용할 수 있다.

제 7 장 TCNC 의 근사할당법[14][15]

IAEA 가 개발중인 표준할당이항법에 문제가 발견됨에 따라 당초계획 했던 초기 하분포를 사용하는 사찰표본할당법 개발을 변경하게 되었다. 실제로 IAEA 가 사찰을 수행할 때에 적용하는 표본할당은 제 6 장에서 다룬 근사할당법이다. IAEA 근사할당법의 문제점은 "제 6 장 제 3 절 가"에서 지적한대로 표본크기 n 을 계산할 때에 식 (4.15)에서 $q = 1$ 로 하고 식 (4.2)에서 $\gamma = 1$ 일 때의 D 를 사용한 식 (5.62)를 사용하는 것이다. 식 (5.62)를 적용할 근사조건 중의 하나가 $D \le n$ 이므로 이를 항상 적용하는 것은 좋은 방법이라고 보기 어렵다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 TCNC 에서는 다음의 근사할당법들을 EXCEL(Visual Basic for Application 사용)과 Visual C++를 사용하여 개발하였다.

- 바르게 적용된 근사할당법(correctly applied binomial approximate allocation)
  식 (6.3), (6.4)과 식 (5.18), (5.19)를 적용하여 q_i 를 계산하고 이를 List 9 에 있는 식 (4.15), (4.17)으로 표본크기를 계산하여 식 (5.1), (5.2)로 할당하였다

- 개선된 이항 근사할당법(improved binomal approximate allocation)
  식 (6.3), (6.4)과 식 (5.18), (5.19)를 적용하여 q_i 를 계산하고 이를 List 1 에 있는 방식으로 식 (4.18) 계산법을 적용하여 표본크기를 계산하여 식 (5.1), (5.2)로 할당하였다.

- 초기하 근사할당법(hypergeometric approximate allocation)
  식 (6.3), (6.4)과 식 (5.18), (5.19)를 적용하여 q_i 를 계산하고 이를 List 10 에 있는 방식으로 식 (4.12) 계산법을 적용하여 표본크기를 계산하여 식 (5.1), (5.2)로 할당하였다(List 11 참조).

List 9. 바르게 적용된 표준이항분포 사용 표본크기계산 VBA 프로그램

```
Function Ntotc(Beta, N, D, q)
Dim b, i_q, temp, Nt As Double
b = 0.01 * Beta
i_q = 0.01 * q
If D >= N Then
    If D > N Then
        Ntotc = "NA"
    Else
        If i_q >= 1 Then
            Ntotc = 1
        Else
            Nt = Log(b) / Log(1 - i_q)
            If Nt > Int(Nt) Then
                Ntotc = Int(Nt) + 1
            Else
                Ntotc = Nt
            End If
        End If
    End If
Else
    temp = ( N / i_q) * (1 - (b) ^ (1 / D))
    If temp < D Then
        Nt = Log(b) / Log(1 - i_q * D / N)
    Else
        Nt = temp
    End If
    If Nt > Int(Nt) Then
        Ntotc = Int(Nt) + 1
    Else
        Ntotc = Nt
    End If
End If
End Function
```

List 10. 초기하 계산법을 사용하는 표본크기 계산 VBA 프로그램
(Adapted from functions h_size and hyper in List 11)

```
Function h_size(Beta, N, D, q)
Dim DD, nn, NDn1, n_initial, small_n As Integer
Dim b, i_q, qd, h, h_d0, h_d0_xxq As Double
Dim start, d_limit, small_d As Integer
Const one = 1
Const half = 0.5
Const micro = 0.000001
b = 0.01 * Beta
i_q = 0.01 * q
If D >= N Then
```

```
    If D > N Then
        h_size = "NA"
    Else
        If q = 100 Then
            h_size = 1
        Else
            h = Log(0.01 * Beta) / Log(1 - 0.01 * q)
            If h > Int(h) Then
                h_size = Int(h) + 1
            Else
                h_size = h
            End If
        End If
    End If
Else
    n_initial = Int(half + half * (1 - b ^ (one / D)) * (N + N - D + one))
    If (n_initial < one) Then
        n_initial = one
        h_d0 = one
    Else
        h_d0 = hyper(N, D, n_initial - one)
    End If
    small_n = n_initial
    Do
      h_d0 = (N - D - small_n + one) / (N - small_n + one) * h_d0
      h_d0_xxq = h_d0
      If (i_q < one) Then
          h = h_d0_xxq
          DD = D
          nn = small_n
          NDn1 = N - D - small_n + one
          start = one
          qd = one
          d_limit = Int(half + Log(micro) / Log(one - i_q))
          small_d = one
          Do While (small_d <= d_limit And small_d < D And small_d <= small_n)
              qd = qd * (one - i_q)
              h = (DD * nn) / (start * NDn1) * h
              DD = DD - one
              nn = nn - one
              start = start + one
              NDn1 = NDn1 + one
              h_d0_xxq = h_d0_xxq + h * qd
              small_d = small_d + one
          Loop
      End If
      If h_d0_xxq < b Then
          h_size = small_n
          Exit Do
      End If
      small_n = small_n + one
    Loop While (small_n < N)
    h_size = small_n
```

```
End If
End Function


Function hyper(N, D, n_init1)
Dim loopchk, nn, Nnu As Integer
Dim denum, numer, h As Double
Const one = 1
Const zero = 0
h = one
If D <= n_init1 Then
    Nnu = N - n_init1
    numer = Nnu
    denum = N
    nn = one
    Do
        numer = numer * (Nnu - nn)
        denum = denum * (N - nn)
        loopchk = one
        If (denum >= 1E+300) Then
            h = h * numer / denum
            numer = one
            denum = one
            loopchk = zero
        End If
        nn = nn + 1
    Loop While nn < D
Else
    Nnu = N - D
    numer = Nnu
    denum = N
    nn = one
    Do
        numer = numer * (Nnu - nn)
        denum = denum * (N - nn)
        loopchk = one
        If (denum >= 1E+300) Then
            h = h * numer / denum
            numer = one
            denum = one
            loopchk = zero
        End If
        nn = nn + 1
    Loop While nn < n_init1
End If
If loopchk = one Then
    h = h * numer / denum
End If
hyper = h
End Function
```

제 8 장 결론 및 건의사항

본 연구의 목표는 IAEA 의 보고서인 IAEA STR-261 Rev.1 에 기술된 표준이항할당법을 초기하할당법으로 개선하려는 것이었다. 사찰활동이 게임(game)이론에 근거한 계획에 따라 수행되기 때문에 IAEA 의 표본추출계획에 사용되는 이항분포에 의한 간략하게 적용된 이항근사법은 실제 상황에 대응하지 못하는 결과를 초래할 우려가 있는 것이다. 따라서 실제상황에 대응하기 위한 표본추출계획 수립의 일환으로 비복원추출(sampling without replacement)을 기술하는 초기하분포에 의한 표본추출계획을 개발하고자 한 것이다. IAEA 도 초기하분포에 근접한 계산을 시도하고 있다. 과제 수행과정에서 상기 IAEA 보고서에 문제점이 있는 것이 발견되었고, 설명이 되어있지 않은 부분이 일부 있었으며, IAEA 가 사찰에 실제로 사용하는 표본추출계획은 표준이항할당법이 아니고 표준이항근사할당법(상기 IAEA 보고서의 chapter 6)이었기 때문에 다음의 근사할당법들을 EXCEL(Visual Basic for Application 사용)과 객체지향기법(Visual C++ 사용)으로 개발하였다.

- 바르게 적용된 표준이항 근사할당법(correctly applied binomial approximate allocation)
- 개선된 이항 근사할당법(improved binomial approximate allocation)
- 초기하 근사할당법(hypergeometric approximate allocation)

상대표준편차 $\delta \le 0.15$ 인 경우에는 $\gamma(\delta)$ 와 $\gamma'(\delta)$ 를 사용하여 위의 세가지 근사할당법을 개발하였으나, $\delta > 0.15$ 인 경우에는 입수한 자료가 $\gamma'(\delta)$ 뿐이었기 때문에 위의 세가지 근사할당법을 개발할 수 없었다. IAEA 는 상당기간 동안 사찰자료를 데이타베이스(OIDDB: operator-inspector difference database)화 하여 이를 근거로 표본추출계획을 수립하였다. 관련 배경자료를 입수하여야 할당법이나 근사할당법을 개발할 수 있다. 초기하할당법을 개발하고, 개발한 세가지 근사할당법들을 검증하기 위해서는 IAEA 와 공동으로 본 과제를 계속 추진할 필요가 있다.

참고문헌

1. W. M. Bowen and C.A. Bennett, eds., *Statistical Methods for Nuclear Material Management*, pp. 887 Washington, D.C: U.S. NRC (1988)
2. G. W. Eccleston and G. A. Whan, "Power reactors and their fuel cylces", International Training Course on Implementation of States Systems and Accounting for and control of Nuclear Material Session 16, (May 1993)
3. IAEA, "IAEA Safeguards glossary", IAEA, Vienna (1987)
4. IAEA, "IAEA Safeguards: Statistical Concepts and Techniques", 4th rev. ed., IAEA document IAEA/SG/SCT/4 (1989)
5. IAEA, "35th ICAS(Introductory course on Agency safeguards)", IAEA, Vienna (1994)
6. IAEA, "Safeguards Criteria 1991-1995", IAEA Report 1990-11-21 (1994)
7. J. L. Jaech, "Requirements for NDA Methods F and H", IAEA STR-203 (1985)
8. J. L. Jaech, "Statistical Methods in the Analysis of NDA data", IAEA STR-238, (1988)
9. J. L. Jaech and M. Russell "Algorithm to Calculate Sample Sizes for Inspection Sampling Plans", IAEA STR-261, Rev. 1 (1991).
10. J. L. Jaech and M. Russell, "Follow up inspection sample sizes when defects are identified in the initial sample", IAEA STR-262, Rev.0 (1990)
11. J. L. Jaech, "An improved binomial approximation to the hypergeometric density function", *Journal of Nuclear Material Management*, 36-41 (1994).
12. V. K. Rohatgi, *Statistical Inference*, pp. 341-342, John Wiley & Sons, New York (1984)
13. W. D. Sellinschegg, "Statistical Analysis Employed in IAEA Safeguards", IAEA-SM-333/224 (1994)
14. 김현태·박완수·민경식·박찬식·곽은호, "IAEA 사찰표본할당계산법에 의한 초기하분포 적용 연구", '95 춘계학술발표회(한국원자력학회) 1093-1098
15. 김현태, "IAEA 사찰표본 할당계산법 비교연구", '95 추계학술발표회 (한국원자력학회) 1029-1034

List 11. 초기하 근사할당 프로그램

```
/*****************************************************************
*                                                                *
* Registered program of Korea Atomic Energy Research Institute   *
*                                                                *
*                          '95.12.6                              *
*                                                                *
*                  Developed by Kim, Hyun-Tae                    *
*                                                                *
*                        Senior Researcher                       *
*                  Technology Center for Nuclear Center          *
*                                                                *
*****************************************************************
*                                                                *
* Filename: HY_A_ALC.CPP                                         *
*                                                                *
*****************************************************************
*                                                                *
* Approximate allocation using hypergeometric approximation      *
*                                                                *
*                                                                *
*****************************************************************
*                                                                *
* Development Language:   Microsoft Visual C++ 1.51             *
*                                                                *
*****************************************************************
*                                                                *
* Project type: QuickWin[.EXE]                                   *
*                                                                *
* No use of Microsoft Foundation Classes                         *
*                                                                *
* Build mode: Release                                            *
*                                                                *
* Compiler option:                                               *
* /nologo /Gs /G2 /Mq /AM /Ox /D "NDEBUG" /FR                    *
*                                                                *
* Linker option:                                                 *
* /NOLOGO /LIB:"oldnames" /LIB:"libw" /LIB:"mlibcewq" /NOD       *
* /PACKC:57344 /ALIGN:16 /ONERROR: NOEXE                         *
*                                                                *
 *****************************************************************/

#include <iostream.h>
#include <windows.h>
#include <iomanip.h>
#include <stdlib.h>
#include <limits.h>
#include <float.h>
#include <math.h>
```

```
// Class declaration next
class sAllocation
{
private:
    CATCHBUF jmpBufStruct; // Visual C++ has a place to store the system's
                           // state at the Catch()
    int typechk;
    char gross_only, ou;
    long double B, i_q, i_q1, i_q2, i_q3; // Beta/100, class_II/100
    long double n, eta2, n1, n2, n3;
    long double gamma2, gamma3, gam2, gam3;
    long double N, SQ, x_mean, del1, del2, del3, Beta, class_II;
    long double zeroL, halfL, oneL, hunL;
    void InputND(void);
    void init();
    long double h_size(long double); // Sample size calculation with hypergeometric
    long double hyper(long double, long double);          // distribution
    void a_gamma(void);
    void a_alloc(long double);
    void OutputND(long double);
public:
    void hp_size(void);     // Sample allocation with hypergeometric
};                                                        // distribution

void sAllocation::InputND(void)
{

  long double NDnd, D;
  int badVal;             // Holds a value that determines which error occurred
  badVal = Catch(jmpBufStruct); // The system's state is saved here in case
                                // a longjmp() happens later.
  switch (badVal)
  {                             // Errors for N, D, n, d.
    case (1):
    {
      cerr << "\nN should an integer between [2,1000000]." <<
              "\nRestart the program.\n";
      exit(99); // Stop the program
    }
    case (2):
    {
      cerr << "\nSQ and x_mean should be positive." <<
              "\nRestart the program.\n";
      exit(99); // Stop the program
    }
    case (21):
    {
      cerr << "\nThis stratum has less than 1 SQ." <<
              "\nRestart the program.\n";
      exit(99); // Stop the program
    }
    case (3):
    {
```

```
      cerr << "\ndel1 should be in the range of (0.0, 0.15]." <<
              "\nRestart the program.\n";
      exit(99); // Stop the program
    }
    case (4):
    {
      cerr << "\ndel2 should be in the range of (0.0, del1)" <<
              "\nRestart the program.\n";
      exit(99); // Stop the program
    }
    case (5):
    {
      cerr << "\ndel3 should be in the range of [0.0, del2)" <<
              "\nRestart the program.\n";
      exit(99); // Stop the program
    }
    case (6):
    {
      cerr << "\nBeta should be in the range of [1,80]" <<
              "\nRestart the program.\n";
      exit(99); // Stop the program
    }
    case (7):
    {
      cerr << "\nclass_II should be in the range of [70,100]" <<
              "\nRestart the program.\n";
      exit(99); // Stop the program
    }
}

init();

// N
cout << "Maximum value of N is 1000000.\n";
cout << "Please enter N: ";
cin  >> NDnd;
if (NDnd - floorl(NDnd) != zeroL || NDnd < oneL || NDnd > 1000000.0L )
{
  typechk = 1;
  Throw(jmpBufStruct, typechk);
}
N = floorl(halfL + NDnd);

// SQ
cout << "Please enter SQ: ";
cin  >> NDnd;
if (NDnd <= zeroL)
{
  typechk = 2;
  Throw(jmpBufStruct, typechk);
}
SQ = NDnd;
```

```
    // x_mean
    cout << "Please enter x_mean: ";
    cin   >> NDnd;
    if (NDnd <= zeroL )
    {
       typechk = 2;
       Throw(jmpBufStruct, typechk);
    }
    x_mean = NDnd;

    D = ceill(SQ/x_mean);   // # of gross defects
    if (D > N)
    {
       typechk = 21;
       Throw(jmpBufStruct, typechk);
    }

    if (D == N)
    {
       cout << "\nSample size = 1 since D = N.\n";
       exit(99); // Stop the program
    }

// gross_only

    cout << "Sample size for gross only? (y/n)" << endl ;
    cin.ignore();
    do
    {
       gross_only = cin.get();
    } while (!(gross_only == 'y' || gross_only == 'Y' ||
                    gross_only == 'n' || gross_only == 'N'));

    if (gross_only == 'n' || gross_only == 'N')
    {
       // del1
       cout << "Please enter relative standard deviation del1: ";
       cin   >> NDnd;
       if (NDnd <= zeroL || NDnd >= halfL )
       {
          typechk = 3;
          Throw(jmpBufStruct, typechk);
       }
       del1 = NDnd;

       // del2
       cout << "Please enter relative standard deviation del2: ";
       cin   >> NDnd;
       if (NDnd <= zeroL || NDnd >= del1)
       {
          typechk = 4;
          Throw(jmpBufStruct, typechk);
       }
```

```
  del2 = NDnd;

  // del3
  cout << "Please enter relative standard deviation del3: ";
  cin   >> NDnd;
  if (NDnd < zeroL || NDnd >= del2)
  {
    typechk = 5;
    Throw(jmpBufStruct, typechk);
  }
  del3 = NDnd;

  // Overstatement or understatement
  cout << "Please enter 1(overstatement) or 2(understatement): ";
  do
  {
    cin >> NDnd;
    if (NDnd == 1)
    {
      ou = 'o';
      break;
    }
    if (NDnd == 2)
    {
      ou = 'u';
      break;
    }
  } while (NDnd != 1 || NDnd != 2);
}

// Beta
cout << "Please enter Beta in percent: ";
cin   >> NDnd;
if (NDnd <= zeroL || NDnd >= hunL)
{
  typechk = 6;
  Throw(jmpBufStruct, typechk);
}
Beta = NDnd;

B = Beta / hunL ;

// class_II
cout << "Please enter the probability(%) of\n" <<
        " classifying a defect as a defect.: ";
cin   >> NDnd;
if (NDnd <= 70.0L || NDnd > hunL)
{
  typechk = 7;
  Throw(jmpBufStruct, typechk);
}
class_II = NDnd;
```

```
  i_q = i_q1 =class_II / hunL ;

  return;
}

void sAllocation::init(void)
{
  zeroL = 0.0L;
  halfL = 0.5L;
  oneL = 1.0L ;
  hunL = 100.0L;
}

/* FUNCTION:   OutputND  ***************************************
*                                                               *
*   Approximate allocation                                      *
*                                                               *
 ****************************************************************/
void sAllocation::OutputND(long double n)
{
  cout << "\nSample size     total :" <<   setiosflags( ios::right )
       << setw(5) << n << endl << endl ;
  if (gross_only == 'n' || gross_only == 'N')
  {
    cout << "Method-1              n1 :" << setiosflags( ios::right )
         << setw(5) << n1 << endl;
    cout << "Method-2              n2 :" << setiosflags( ios::right )
         << setw(5) << n2 << endl;
    if (del3 > 0)
    {
      cout << "Method-3              n3 :" <<   setiosflags( ios::right )
           << setw(5) << n3 << endl << endl;
    }
    else
    {
      cout << " " << endl ;
    }
 }

  cin.ignore();
  cout << "\nPress Enter to continue.";
  cin.get();
  return;
}

/* FUNCTION:   a_alloc  ****************************************
*                                                               *
*   Approximate allocation                                      *
*                                                               *
 ****************************************************************/
void sAllocation::a_alloc(long double n)
{
  long double D, defectchk ;
```

```
  D = ceill(SQ/(gam2*x_mean));
  i_q = i_q2 ;
  defectchk = D * i_q / N ;
  if (defectchk >= oneL)
  {
    eta2 = oneL;
    n3 = zeroL ;
    n2 = eta2 - n3 ;
    n1 = n - eta2;
    return ;
  }
  else
  {
    eta2 = h_size(D) ;
    if (del3 == zeroL)
    {
      n3 = zeroL ;
      n2 = eta2 ;
      n1 = n - eta2 ;
    }
    else
    {
      D = ceill(SQ/(gam3*x_mean));
      i_q = i_q3 ;
      defectchk = D * i_q / N ;
      if (defectchk >= oneL)
      {
        n3 = oneL ;
        n2 = eta2 - n3 ;
        n1 = n - eta2 ;
        return ;
      }
      else
      {
        n3 = h_size(D) ;
        n2 = eta2 - n3 ;
        n1 = n - eta2 ;
        return;
      }
    }
  }
}


/* FUNCTION:   hp_size   ******************************************
*                                                                  *
*                                                                  *
*   Sample size allocation with hypergeometric distribution        *
*                                                                  *
*                                                                  *
 ******************************************************************/

void sAllocation::hp_size()
```

```
{
  long double n, D;
  InputND();
  D = ceill(SQ/x_mean);
  n = h_size(D);
  if (gross_only == 'n' || gross_only == 'N')
  {
    a_gamma();
    a_alloc(n);
  }
  OutputND(n);
}


/* FUNCTION:   h_size   ****************************************
*                                                               *
*   Sample size calculation with hypergeometric distribution    *
*                                                               *
*   From the registered program of KAERI (94-01-12-3469)        *
*                                                               *
 ***************************************************************/

long double sAllocation::h_size(long double D)
{
  long double n_initial ;
  long double d, d_limit ;   /* defect size */
  long double qd ;           /* non-classification probability, (1.0 - i_q)^d */
  long double micro = 0.000001L ;
  long double h_d0, h_d0_100, h_d0_xx_qd ;
  long double DD, nn, NDn1, one, h ;          /*   h(N,D,n,d)   */


  n_initial = floorl(halfL + halfL*(oneL - powl(B,oneL/D))*(N + N - D + oneL));

  if ( n_initial >= N - D )
  {
    n = oneL ;
    return(n);
  }

  if ( n_initial <= oneL )
  {
    n_initial = oneL ;
    h_d0 = oneL ;
  }
  else
  {
    h_d0 = hyper(n_initial - oneL, D) ;
  }

  n = n_initial ;

  do
```

```
  {
    /***********************************************
    *                                              *
    *            h(0) = h_d0                       *
    *            when i_q = 1.0,   h_d0_100        *
    *            when i_q < 1.0,   h_d0_xx_qd      *
    *                                              *
    ***********************************************/

    h_d0 = (N - D - n + oneL)/(N - n + oneL) * h_d0; // h(n,0) = Hn * h(n-1,0)
    h_d0_xx_qd = h_d0_100 = h_d0 ;

    if ( i_q < oneL )
    {
      h = h_d0_100 ;

      DD    = D ;
      nn    = n ;
      NDn1  = N - D - n + oneL ;
      one   = oneL ;
      qd    = oneL ;

      d_limit = floorl( halfL + logl(micro) / logl( oneL - i_q ) ) ;

      /************      h(N,D,n,d_limit)   calculation     ************/

      for ( d = oneL ; d <= d_limit && d < D && d <= n ; d = d + oneL )
      {
        qd = qd * (oneL - i_q) ;
        h = (DD-- * nn--)/(one++ * NDn1++) * h ; // h(n,d+1) = Dd * h(n,d)
        h_d0_xx_qd = h_d0_xx_qd + h*qd ; // h(0) + qd*h(1) + qd*h(d) + ...
      }
    }

    if ( h_d0_xx_qd < B )
    {
      return(n);
    }
    else
    {
      n = n + oneL ;
    }
  } while ( n < N ) ;
  return(n);
}

/* FUNCTION:   hyper    ******************************************
*                                                                 *
*   hypergeometric distribution calculation                       *
*                                                                 *
*   Registered program of KAERI (94-01-12-3470)                   *
*                                                                 *
 *****************************************************************/
```

```
long double sAllocation::hyper(long double n, long double D)
{
  int loopchk ;
  long double nn ;
  long double denum, numer, h ;
  long double Nnu ;

  h = oneL ;

  if ( D <= n )
  {
    Nnu = N - n ;
    numer = Nnu ;
    denum = N ;

    for ( nn = 1 ; nn < D ; nn++ )
    {
      numer *= ( Nnu - nn ) ;
      denum *= ( N - nn ) ;
      loopchk = 1 ;
      if (denum >= 1.0e+4920L)
      {
        h = h * numer / denum ;
        numer = oneL ;
        denum = oneL ;
        loopchk = 0 ;
      }
    }
  }
  else
  {
    Nnu = N - D ;
    numer = Nnu ;
    denum = N ;

    for ( nn = 1 ; nn < n ; nn++ )
    {
      numer *= ( Nnu - nn ) ;
      denum *= ( N - nn ) ;
      loopchk = 1 ;
      if (denum >= 1.0e+4920L)
      {
        h = h * numer / denum ;
        numer = oneL ;
        denum = oneL ;
        loopchk = 0 ;
      }
    }
  }

  if ( loopchk = 1 )
  {
```

```
      h = h * numer / denum ;
    }
    return h ;
}

/* FUNCTION: a_gamma  ****************************************
*                                                              *
*   calculates gamma2[i] or gamma3[i]                          *
*                                                              *
 ***************************************************************/

void sAllocation::a_gamma(void)
{
    long double delta2, delta3 ;

    if (ou == 'o')   /* Overstatement */
    {
      if (del1 <= 0.15L)
      {
        delta2 = max(del2, 0.0075L - 0.0531L * del1 + 2.369L * del1 * del1) ;
        gamma2 = delta2 * (4.737L - 5.490L * delta2) ;
        gam2 = -0.002L + delta2*(4.259L - 3.24L*delta2) ;
        i_q2 = gam2/gamma2 ;
        if (del3 > zeroL)
        {
          delta3 = max(del3, 0.331L * del2) ;
          gamma3 = delta3 * (4.737L - 5.490L * delta3) ;
          gam3 = -0.002L + delta3*(4.259L - 3.24L*delta3) ;
          i_q3 = gam3/gamma3 ;
        }
      }
      else   // del1 > 0.15L
      {
        delta2 = max(del2, 0.0324L - 0.3641L * del1 + 3.3068L * del1 * del1) ;
        gamma2 = 0.024L + delta2 * (4.445L - 4.546L * delta2) ;
        if (del3 > zeroL)
        {
          delta3 = max(del3, 0.331L * del2) ;
          gamma3 = delta3 * (4.737L - 5.490L * delta3) ;
        }
      }
    }
    else                /* Understatements */
    {
      if (del1 <= 0.15L)
      {
        delta2 = max(del2, 0.162L * del1) ;
        gamma2 = delta2 * (4.802L + 4.470L * delta2);
        gam2 = -0.002L + delta2*(4.284L - 1.508L*delta2) ;
        i_q2 = gam2/gamma2 ;
        if (del3 > zeroL)
        {
          delta3 = max(del3, 0.208L * del2);
```

```
            gamma3 = delta3 * (4.802L + 4.470L * delta3);
            gam3 = -0.002L + delta3*(4.284L - 1.508L*delta3) ;
            i_q3 = gam3/gamma3 ;
          }
        }
        else // del1 > 0.15L
        {
          delta2 = max(del2, 0.0556L - 0.5888L * del1 + 2.5659L * del1 * del1);
          gamma2 = delta2 * (4.802L + 4.470L * delta2);
          if (del3 > zeroL)
          {
            delta3 = max(del3, 0.208L * del2);
            gamma3 = delta3 * (4.802L + 4.470L * delta3);
          }
        }
      }
      return;
}
////////////////////////// Class ends here ///////////////////////

main()
{
    sAllocation HP_A;
    int ans;

    do
    {
      cout << "\nRegistered program of KAERI"
           << "\n          '95.12"
           << "\nDeveloped by Kim, Hyun-Tae"
           << "\nTechnology Center for Nuclear Control\n";
      cout << "\n** Sample size allocation **\n";
      cout << "   1. Hypergeometric approximation\n";
      cout << "   2. Quit\n";
      cout << "Which one ? ";
      cin >> ans;
      switch (ans)
        {
          case 1 : HP_A.hp_size();
                   break;
          case 2 : exit(1);
        }
    } while (ans >= 1 && ans <= 2);
    return 0;
}
```

〈별첨 1〉

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관 보고서번호	표준보고서번호	INIS주제 코드
KAERI/RR-1603/95			

제목 / 부제: 초기하분포를 사용하는 사찰표본 할당 프로그램 개발

연구책임자 및 부서명: 김현태 (원자력통제기술센터 사찰기술부 사찰운영실)

연 구 자 및 부서명: 곽은호, 박완수, 민경식, 박찬식(원자력통제기술센터 사찰기술부)

발 행 지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행일	1996. 1.
페 이 지	74 p.	도표	유(0), 무( )	크 기	26 Cm
참고사항	'95 년도 기본과제				
비밀여부	공개(0), 대외비( ), _급비밀			보고서종류	연구보고서
연구위탁기관				계약번호	

초록 (300단어 내외)

본 과제는 초기하분포를 사용하는 사찰표본 할당을 객체지향프로그램으로 개발하는 것이다. IAEA(International Atomic Energy Agency, 국제원자력기구)는 사찰활동 수행시 非復元抽出을 기술하는 초기하분포를 사용하는 대신 復元抽出을 기술하는 표준이항분포를 간략하게 적용하여 최대 세가지 검증방법들에 표본들을 할당한다. IAEA의 사찰활동은 평화적으로 사용한다고 선언된 핵물질의 轉用을 適時에 탐지하기 위한 활동으로서 이를 위한 표본추출계획에는 게임(game)이론이 적용된다. 따라서 통계적 정확성을 확보하기 위해서는 초기하분포를 직접 사용하든가 초기하분포에 근접한 계산이 필요하다. IAEA의 간략하게 적용된 표준이항분포보다 초기하분포에 근접한 근사법은 바르게 적용된 표준이항분포와 J.L. Jaech에 의해 개발된 개선된 이항분포이다. 본 연구에서

① 바르게 적용된 표분이항분포를 사용하는 표본근사할당 객체지향프로그램,
② 개선된 이항분포를 사용하는 표본근사할당 객체지향프로그램, 그리고
③ 초기하분포를 사용하는 표본근사할당 객체지향프로그램

을 Visual C++로 개발하였고, 이들에 대응하는 프로그램들을 EXCEL(Visual Basic for Application 사용)로 개발하였다.

주제명 키워드 (10단어 내외)

보장조치, 사찰, 표본추출, 초기하분포, 개선된 이항분포, 바르게 적용된 이항분포

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring org. Report No.	Standing Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-1603/95			

Title/Subtitle	Development of sample allocation program using hypergeometric distribution
Project Manager and Dept.	Kim, Hyun-Tae (Dept. of Nuclear Inspection Operation)
Researcher and Dept	E.H. Kwack, W.S. Park, K.S. Min, C.S. Park (Division of Nuclear Inspection Technology)

Pub. place	Taejon	Pub. Org	KAERI	Pub. DATE	'96.1
Page	74 p.	Ill. and Tab	Yes(O). No( )	Size	26 Cm
Note	'95 Basic Research				

Classified	Open(O), Outside( ), _ _Class	Report Type	Research report
Sponsoring Org.		Contrct No.	

Abstract (About 300word)

The objective of this research is the development of sample allocation program using hypergeometric distribution with objected-oriented method. When IAEA(International Atomic Energy Agency) performs inspection, it simply applies a standard binomial distribtion which describes sampling with replacement instead of a hypergeometric distribution which describes samling without replacement in sample allocation to up to three verification methods. The objective of the IAEA inspection is the timely detection of diversion of signigicant quantities of nuclear material, therefore game theory is appllied to its sampling plan. It is necessary to use hypergeometric distributon directly or approximate distribution to secure statistical accuracy. Improved binomial aproximation developed by Mr. J.L. Jaech and correctly applied binomial approximation are more closer to hypergeometric distribution in sample size calculation than the simply applied binomial approximation of the IAEA. Object-oriented programs of

① sample approximate-allocation with correctly applied standard binomial approximation,
② sample approximate-allocation with improved binomial approximation, and
③ sample approximate-allocation with hypergeometric distribution

were developed with Visual C++ and corresponding programs were developed with EXCEL(using Visual Basic for Application).

Subject Keywords (About 10 words) inspection, correctly applied binomial distribution safeguards, sampling, improved binomial distribution, hypergeometric distribution

초기하분포를 사용하는 사찰표본 할당 프로그램 개발

1996年 1月 30日 印刷
1996年 2月 6日 發行
發行人 申 哉 仁
發行處 韓國原子力研究所
大田直轄市 儒城區 德津洞 150

印刷所 大田.忠南 印刷工業協同組合

믿는마음 지킨약속 다져지는 신뢰사회