KAERI/TR-2820/2004

원자력발전소의 확률론적안전성평가시
고장수목분석 절삭치 불확실성 평가

Truncation Uncertainty of the Fault Tree Analysis in the Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants

한 국 원 자 력 연 구 소

제　　　출　　　문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2004년도 "위험도 정보 활용 기반 기술 개발"에 관한 기술 보고서로 제출합니다.

2004. 11. 17

과 제 명: 위험도 정보 활용 기반 기술 개발
주 저 자: 정우식 (종합안전평가부)
공 저 자: 양준언 (종합안전평가부)

요약문

절삭오차(truncation error)에 의한 고장수목 정량화 불확실성이 원자력발전소의 확률론적안전성분석(probabilistic safety assessment, PSA) 대형 고장수목 정량화시 큰 관심사였다. 절삭치(truncation limit)는 고장수목 정량화 중에 절삭치보다 작은 확률을 갖는 단절집합(cut sets)들을 절삭하는 데 사용된다. 이 절삭에 의해 절삭확률(truncated probability)이 발생하며 이 절삭오차를 적정 수준이내로 유지해야 한다. 본 연구에서 절삭확률을 예측하기 위한 척도들을 개발하여 고장수목정량화 스프트웨어 FTREX (Fault Tree Reliability Evaluation eXpert)에 계산 모듈을 추가하고, 이 척도들의 유용성을 보이기 위해 Benchmark 시험을 수행하였다.

본 연구에서 제시한 절삭치오차를 예측하기 위한 척도들은 단 한번의 고장수목 정량화만으로 계산할 수 있다. 본문의 Benchmark 시험결과에서 보여준 것처럼, LBTP(lower bound of truncated probability)와 ATP(approximate truncation probability) 척도는 절삭오차 즉 절삭확률을 예측하고 동시에 정확한 정점사건 확률(top event probability)을 예측할 수 있다. 이 척도들을 근거로 현재의 절삭치에서 절삭오차를 판단하고 또한 절삭오차들이 일정 값 이하로 오도록 절삭치를 설정할 수 있다. 또한 신뢰도 분석자나 신뢰도 분석 결과에 대한 검토자들이 고장수목 정량화가 얼마나 정확하게 수행되었는지를 판단하기 위해 본연구의 척도들을 사용할 수 있다. 본 연구의 척도들은 기존의 정량화 소프트웨어에 쉽게 구현할 수 있고 추가 계산 시간 또한 짧다.

Summary

The fault tree quantification uncertainty from the truncation error has been of great concern for the reliability evaluation of large fault trees in the probabilistic safety assessment (PSA) of nuclear plants. The truncation limit is used to truncate cut sets of the gates when quantifying the fault trees. This report presents measures to estimate the probability of the truncated cut sets, that is, the amount of truncation error. The functions to calculate the measures are programmed into the new fault tree quantifier FTREX (Fault Tree Reliability Evaluation eXpert) and a Benchmark test was performed to demonstrate the efficiency of the measures.

The measures presented in this study are calculated by a single quantification of the fault tree with the assigned truncation limit. As demonstrated in the Benchmark test, lower bound of truncated probability (LBTP) and approximate truncation probability (ATP) are efficient estimators of the truncated probability. The truncation limit could be determined or validated by suppressing the measures to be less than the assigned upper limit. The truncation limit should be lowered until the truncation error is less than the assigned upper limit. Thus, the measures could be used as an acceptability of the fault tree quantification results. Furthermore, the developed measures are easily implemented into the existing fault tree solvers by adding a few subroutines to the source code.

목차

제 1 장 서론 8

제 1 절 최소단절집합에 기초한 방법 8

제 2 절 BINARY DECISION DIAGRAM에 기초한 방법 9

제 3 절 연구 목적 10

제 2 장 절삭오차 예측 방법 11

제 1 절 최소단절집합에 기초한 정점사건 확률 11

제 2 절 최소단절집합의 분류 12

제 3 절 절삭오차 14

제 4 절 절삭 불확실성 17

제 3 장 개발된 방법의 적용 18

제 4 장 결론 24

참고 문헌 25

그림 목차

그림 1. 정점사건 확률과 절삭치와의 관계 16
그림 2. 절삭치에 따른 점점사건 확률 변화 20
그림 3. 절삭치에 따른 최소단절집합들의 갯수 변화 20
그림 4. 절삭치에 따른 절삭오차 변화 21
그림 5. 절삭치에 따른 절삭불확실성 변화 21
그림 6. 절삭치에 따른 중요 기본사건들의 갯수 변화 22

표 목차

표 1. 울진 3/4 NPP의 초기사건 18
표 2. 울진 3/4 NPP에 대한 Benchmark 시험 결과 19

제 1 장 서론

제 1 절 최소단절집합에 기초한 방법

고장수목분석에 기초한 신뢰도분석방법은 복잡한 산업설비의 신뢰도 분석에 사용되는 가장 일반적인 방법이다. 전통적인 고장수목분석은 최소단절집합(minimal cut set , MCS)을 구하는 방법에 기초하고 있다[1-3]. Boolean 연산에의해 고장수목은 최소단절집합들의 OR 조합으로 변환된다.

최근 수년간, 고장수목분석 방법의 정확성과 효율성을 증진하는 데 많은 발전이 있어 왔다. 근래에는 메인 프레임이 아닌 개인 컴퓨터에서 고장수목들이 정량화되고 있다. 그러나 원자력발전소와 같이 복잡한 대형 계통의 고장수목분석 시 무한개에 가까운 최소단절집합이 생성되기 때문에, 계산과정에서 절삭치(truncation limit)보다 작은 확률을 갖는 최소단절집합을 제거한다. 이 절삭치가 주관적으로 경험적으로 설정되기 때문에, 높게 설정된 경우 정점사건 확률(top event probability)이 심각하게 저평가될 수 있다.

또한 최소단절집합을 사용하여 얻어지는 risk achievement worth (RAW)와 Fussel-Vesely (FV) 중요도[4]는 위험도 입장에서 중요한 structure, system, and components (SSCs)를 선별하는 척도로 사용된다. 높은 절삭치에의해 많은 최소단절집합들이 절삭되었다면 RAW와 FV 중요도가 저평가되어 중요 기기를 선정할 수 없게 된다[5,6]. 이와 같이 최소단절집합 절삭(MCS truncation)은 고장수목분석과 그 결과에 기반한 여러 응용에서 불확실성을 유발하는 요인으로 작용한다.

고장수목분석 시 절삭치 사용에 의한 정량화 불확실성 예측은 원자력발전소의 확률론적안전성평가 (probabilistic safety analysis, PSA)에서 중요한 관심사 중하나이다[5-8]. 절삭오차를 줄이기위해 ASME 확률론적안전성평가 표준[8]은 다음 사항을 요구하고 있다:

1. 사고경위와 관련계통 모델은 중요한 상호 종속성이 사라지지 않도록 충분히 낮은 절삭치를 사용해야한다.
2. 절삭치를 낮추어가며 여러 번의 정량화에 의해 전체모델의 결과가 크게 변하지 않음을 보이고 중요 사고경위가 사라지지 않도록 최종 절삭치를 선정한다.

절삭치 선정을 위한 몇 가지 방법들[6,9-11]이 개발되었다. Modarres[9]는 최소단절집합의 크기와 확률에 기초한 절삭 방법을 제시하였다. Brown[10]은 정점사건 확률의 상한치를 예측하는 방법에 의한 절삭치 선정을 제시하였다. Contini[11]는 고장수목정량화의 두가지 방법인 top-down과 bottom-up 방법을 동시에 사용하는 방법을 제시하였다. 그러나 고장수목내에 반복되는 기본사건들이 존재할 때, 설명한 방법들[9-11]은 절삭오차를 너무 크게 예측하는 단점이 있다. Ĉepin[6]은 절삭치 선정을 위해 몇 개 기본사건의 중요도가 수렴할 때 정점사건이 수렴하는 것으로 판단하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 많은 정량화를 요구한다.

제 2 절 Binary Decision Diagram에 기초한 방법

BDD (Binary Decision Diagram)방법은 MCS 방법의 절삭오차를 극복하기 위해 개발되었다. 절삭없이 고장수목의 신뢰도 분석을 수행하기 위한 대안으로 BDD 알고리즘이 개발되었다[2,12,13]. 이 BDD 알고리즘으로 고장수목의 정확한 점점사건 확률을 계산할 수 있다.

그러나, 이 BDD 알고리즘은 사용 컴퓨터의 계산 메모리를 지나치게 많이 사용한다는 사실이 잘 알려져 있다. BDD 계산 결과 BDD 구조가 생성된다. BDD 구조의 크기는 고장수목을 풀기전에 미리 결정하여 입력으로 사용하는 기본사건들의 순서(ordering)에 크게 의존한다. 짧은 시간안에 빠르게 적은 메모리를 사용하여 원전 PSA에서 사용되는 규모의 고장수목을 풀 수 있는 BDD 알고리즘은 현재 존재하지 않는다.

최소단절집합 없이 BDD 구조로 정확한 정점사건 확률을 계산할 수 있다. 그러나, 최소단절집합은 신뢰도 분석자에게 정성적으로 또 정량적으로 중요한 정보를 제공하기 때문에, BDD 구조에서 최소단절집합들을 추출해내야 한다. 이러한 BDD 구조 계산과 최소단절집합 추출의 두가지 과정을 한번에 빠르게 수행할 수 있는 coherent BDD 알고리즘[14]과 이에 기초한 소프트웨어 FTREX[15]를 원자력연구소에서 개발하였다. 이 coherent BDD 알고리즘은 BDD 구조 생성시 절삭치를 사용하기 때문에 절삭오차 문제를 가지고 있다.

제3절 연구 목적

절삭치 선정을 위한 여러 가지 방법들[6,9-11]이 제안 되었지만 정점사건 확률을 너무 보수적으로 예측하는 등의 단점이 있어왔다. 이에 정점사건 확률과 절삭오차를 정확히 예측하여 적절하게 절삭치를 선정하는 간단한 방법을 개발하기 위해 본 연구가 수행되었다.

본 연구의 목적은 절삭오차를 예측할 수 있는 척도 개발과 동시에 개발된 척도들의 유용성을 보이는 것이다. 개발된 척도들은 2장에 설명되어 있다. FTREX[15]에 척도들의 계산모듈을 추가하여 Benchmark 시험을 수행하였고 그 결과들이 3장에 요약되어 있다.

제2장 절삭오차 예측 방법

정점사건 확률의 절삭오차를 예측하기 위한 본 연구의 방법을 설명하기 위해 다음을 정의하였다:

C_i	i 번째 최소단절집합 (minimal cut set, MCS)
C_i^k	절삭치 1×10^{-k} 보다 큰 확률을 갖는 최소단절집합
$\overline{C}_i^k$	모듈 전개시 절삭치 1×10^{-k} 보다 작은 확률을 갖는 최소단절집합
$\hat{C}_i^k$	모듈화된 고장수목 정량화 시 절삭치 1×10^{-k} 보다 작은 확률을 갖는 최소단절집합
P_k	최소단절집합들 C_i^k 의 확률, $P\left(C_1^k + C_2^k + \ldots\right)$
$\overline{P}_k$	최소단절집합들 $\overline{C}_i^k$ 의 확률, $P\left(\overline{C}_1^k + \overline{C}_2^k + \ldots\right)$
$\hat{P}_k$	최소단절집합들 $\hat{C}_i^k$ 의 확률, $P\left(\hat{C}_1^k + \hat{C}_2^k + \ldots\right)$
ΔP_k	정점사건 확률 (top event probabilities)의 차이, $P_k - P_{k-1}$
P_T	정확한 정점사건 확률
P_T^S	정점사건 확률, 희귀사건 근사를 사용
P_T^M	정점사건 확률, minimal cut set upper bound (MCUB)를 사용
P_T^U	P_T 의 상한치로서 P_k , $\overline{P}_k$, 그리고 $\hat{P}_k$ 의 합
TP_k	절삭된 확률로서 $\overline{P}_k$ 와 $\hat{P}_k$ 의 합
$LBTP_k$	절삭된 확률의 하한치로서 $\overline{P}_k$
ATP_k	절삭된 확률의 근사치로서 $\overline{P}_k$ 와 ΔP_k 의 합
TU_k	절삭 불확실성
$LBTU_k$	$LBTP_k$ 불확실성
ATU_k	ATP_k 불확실성

제1절 최소단절집합에 기초한 정점사건 확률

Coherent 고장수목[3]의 정량화시 절삭된 최소단절집합이 없이 n 개의 최소단

절집합이 생성되었을 때, 정확한 최소단절집합 P_T 는 다음의 inclusion exclusion expansion (IEE)[3]에의해 얻어진다.

$$\begin{aligned} P_T &= P(C_1 + \ldots + C_n) \\ &= \sum_{i=1}^{n} P(C_i) - \sum_{1 \le i < j \le n} P(C_i C_j) + \sum_{1 \le i < j < k \le n} P(C_i C_j C_k) - \ldots + (-1)^{n-1} P(C_1 C_2 \ldots C_n) \ . \end{aligned} \quad (1)$$

다음의 관계는 쉽게 증명할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{n} P(C_i) - \sum_{1 \le i < j \le n} P(C_i C_j) \ \le \ P_T \ \le \sum_{i=1}^{n} P(C_i) \ . \quad (2)$$

최소단절집합 수의 증가에 따라 지수적으로 식 (1)의 계산량이 증가하기 때문에 다음 식과 같은 희귀사건 근사(rare event approximation)나 minimal cut set upper bound 계산이 수행된다 (식 3과 4참조). 이들은 최소단절집합들이 서로 독립적이라는 가정을 사용한다. 기본사건들의 확률이 아주 작을 때 (희귀사건 근사), 최소단절집합 확률들의 합으로 정점사건 확률을 표현할 수 있다.

$$P_T \ \le \ P_T^S = \sum_{i=1}^{n} P(C_i) \ . \quad (3)$$

여기에서 식 (1)의 나머지 값들은 아주 작은 확률 값을 갖고 있으므로 생략되었다(희귀사건 근사). 식 (3)의 P_T^S 는 정점사건 확률을 과대 평가하는 경향이 있기 때문에 다음의 minimal cut set upper bound[3]를 사용한다.

$$P_T \ \le P_T^M = 1 - \prod_{i=1}^{n} \left(1 - P(C_i)\right) \ . \quad (4)$$

원전의 PSA 수행시 정점사건 확률 계산식으로 (4)의 minimal cut set upper bound P_T^M 의 사용이 추천되고 있다[8]. 위의 정점사건 확률 계산식들간의 관계는 다음과 같다.

$$P_T \ \le P_T^M \le P_T^S \ . \quad (5)$$

제 2 절 최소단절집합의 분류

전형적인 고장수목 정량화 절차는 다음과 같다. 아래의 단계 2와 3에서 bottom-up 방법으로 주어진 게이트의 단절집합(cut set)들을 계산하고, 절삭치보다 작은 확률을 갖는 단절집합들을 절삭하고(truncation), 그리고 하부집합들을 지운다(subsuming):

1. 고장수목을 재구성(restructure)하고 독립된 모듈을 찾아낸다.
2. 각 모듈에 해당하는 게이트를 풀어 최대 최소단절집합 확률을 모듈에 할당하고 이후 모듈은 기본사건으로 취급한다.
3. 모듈화된 고장수목을 푼다. 즉 정점사건의 최소단절집합을 구한다.
4. 정점사건의 최소단절집합 내의 모듈들을 모듈의 최소단절집합들로 대체한다.
5. 최종 최소단절집합으로 정점사건의 확률을 구한다.

큰 크기를 갖는 많은 수의 독립된 모듈을 얻기위해서, 고장수목을 풀기전에 각 고장수목에 대한 재구성이 수행된다[16,17]. 이 고장수목의 전처리(pre-processing)에 의해 고장수목의 정량화는 가속된다.

단절집합들은 단계 2, 3, 그리고 4에서 절삭된다. 절삭치가 1×10^{-k} 인 경우, 모든 최소단절집합들은 다음과 같이 세개의 그룹으로 나눌 수 있다.

C_i^k = 확률이 절삭치 1×10^{-k} 보다 큰 최소단절집합

$\overline{C}_i^k$ = 단계 4에서 절삭된 최소단절집합

$\hat{C}_i^k$ = 단계 2와 3에서 절삭된 최소단절집합

최소단절집합 C_i^k 는 절삭치 1×10^{-k} 를 사용하여 고장수목을 푼 경우 얻어지는 최종 결과이다. 최소단절집합 $\hat{C}_i^k$ 경우와는 달리, 최소단절집합 $\overline{C}_i^k$ 는 기존 고장수목 정량화 소프트웨어의 간단한 수정으로 얻을 수 있다.

위의 세가지 최소단절집합에 기초한 정점사건 확률을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_T \le P_T^U = P_k + \overline{P}_k + \hat{P}_k \qquad (6)$$

여기에서

$$P_k = P\left(C_1^k + C_2^k + \ldots\right) \qquad (7)$$

$$\overline{P}_k = P\left(\overline{C}_1^k + \overline{C}_2^k + \ldots\right) \tag{8}$$

$$\hat{P}_k = P\left(\hat{C}_1^k + \hat{C}_2^k + \ldots\right). \tag{9}$$

식 (7)에서 (9)까지의 확률들은 식 (1), (3), 혹은 (4)에 의해 계산될 수 있다. 식 (7)에서 (9)까지의 확률들의 단순합인 식 (6)의 P_T^U는 P_T보다 항상 크거나 같다. 그 이유는 식 (7)에서 (9)까지의 최소 단절집합들은 서로 독립이라는 가정하에 최소 단절집합간의 조합을 무시하기 때문이다. 최소단절집합 $\overline{C}_i^k$는 기존 고장수목 정량화 소프트웨어의 간단한 수정으로 얻을 수 있기 때문에 식 (8)의 $\overline{P}_k$는 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 최소단절집합 $\hat{C}_i^k$는 얻을 수 없기 때문에 식 (9)의 $\hat{P}_k$ 또한 계산할 수 없다.

불리안 식 $abc(d+e+f)(g+h+i+j)(k+l+m)$를 갖는 고장수목 정량화의 예를 들어 보자. 여기에서 기본사건들의 확률의 크기 순서는 $P(a) > P(b) > \ldots > P(m)$이고, 최종적으로 최소단절집합 $abcdgk$만이 살남았다고 가정하자.

1. 독립 모듈 $D=(d+e+f)$, $G=(g+h+i+j)$, 그리고 $K=(k+l+m)$가 정량화 절차 단계 1에서 얻어지면 불리안 식은 $abcDGK$이 된다.
2. 이후 계산에서 독립 모듈 D, G, 그리고 K는 기본사건으로 취급되고 최대의 기본사건 확률이 이들에게 할당된다. 즉, $P(D)=P(d)$, $P(G)=P(g)$, 그리고 $P(K)=P(k)$의 확률이 이후 정량화 동안 사용된다.
3. 모듈화된 최소단절집합 $abcDGK$이 단계 3에서 업어진다.
4. 36개의 최소단절집합 $abc(d+e+f)(g+h+i+j)(k+l+m)$을 가진 최소단절집합 $abcDGK$가 단계 4에서 전개된다. 최소단절집합 $abcdgk$만이 살아남은 경우 나머지 35개의 최소단절집합들 $\overline{C}_i^k$이 절삭된다.

제 3 절 절삭오차

절삭치가 1×10^{-k}인 경우, 절삭오차는 단계 2에서 4까지에서 절삭된 최소단절집합 확률들의 합이다. 절삭오차로서 절삭확률(truncated probability, TP)은 다음과 같이

정의된다.

$$TP_k = \overline{P}_k + \hat{P}_k \ . \tag{10}$$

절삭확률 TP는 쉽게 계산할 수 없다. 그 이유는 최소단절집합 $\overline{C}_i^k$ 와 그확률 $\overline{P}_k$ 는 기존 고장수목 정량화 소프트웨어의 간단한 수정으로 얻을 수 있지만, 최소단절집합 $\hat{C}_i^k$ 와 그확률 $\hat{P}_k$ 는 얻을 수 없기 때문이다. 절삭치를 낮추면 절삭확률 TP는 소멸된다. 즉, $\lim_{k\to\infty} TP_k = 0$ 을 만족한다.

절삭확률 TP의 하한치(lower bound of truncated probability, LBTP)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$LBTP_k = \overline{P}_k \ . \tag{11}$$

$\hat{P}_k$ 를 얻을 수 없기 때문에 절삭확률 TP를 계산할 수 없다. 이러한 이유로 절삭확률 TP의 근사치를 구하려면 $\hat{P}_k$ 대신에 다른 값을 사용해야 한다. 본 연구에서는 $\hat{P}_k$ 대신 $\Delta P_k = P_k - P_{k-1}$ 를 사용하였다. 그림 1에서와 같이, ΔP_k 는 절삭치 $1\times 10^{-(k-1)}$ 와 1×10^{-k} 사이의 최소단절집합 확률들의 합이다. 이 경우, 근사절삭확률 (approximate truncated probability, ATP)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$ATP_k = \overline{P}_k + \Delta P_k \ . \tag{12}$$

3장의 적용에서 근사절삭확률 ATP가 절삭확률 TP의 근사치로 사용할 수 있음을 보였다.

또한, $P_k + ATP_k$ 는 P_{k+1} 의 예측치로서 사용될 수 있다. 절삭치의 변화에 따른 정점사건의 변화 모양이 concave 혹은 convex 냐에 따라 다음의 관계가 성립한다

$$P_{k+1} \le P_k + \Delta P_k \ \text{(concave 범위)} \tag{13}$$

$$P_{k+1} \ge P_k + \Delta P_k \ \text{(convex 범위)} \ . \tag{14}$$

여기에서, $P_k + \Delta P_k$ 는 P_{k+1} 의 예측치이다. $P_k + ATP_k$ 은 더 보수적인 P_{k+1} 의 예측치이다. $P_k + ATP_k$ 는 concave 범위에서 P_{k+1} 의 상한치를 제공한다.

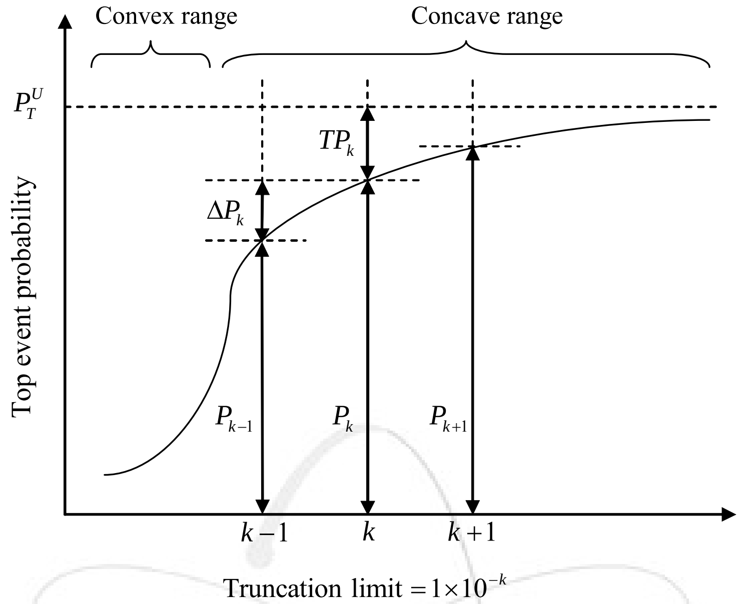

그림 1. 정점사건 확률과 절삭치와의 관계

정점사건 확률의 concave 범위에서 다음의 크기관계가 성립한다.

$$LBTP_k \le TP_k \le ATP_k \quad (\text{concave 범위}) \tag{15}$$

절삭치를 낮출수록 $P_k + LBTP_k$ 와 $P_k + ATP_k$ 는 정점사건 확률 P_T^U 에 수렴하고

$$\lim_{k\to\infty}\left(P_k + LBTP_k\right) = P_T^U \quad \text{and} \quad \lim_{k\to\infty}\left(P_k + ATP_k\right) = P_T^U \tag{16}$$

LBTP와 ATP는 소멸한다.

$$\lim_{k\to\infty} LBTP_k = 0 \quad \text{and} \quad \lim_{k\to\infty} ATP_k = 0\,. \tag{17}$$

식 (11)과 (12)의 LBTP와 ATP는 1×10^{-k} 의 절삭치에서 한번의 정량화 만으로 계산된다. 2.2절의 정량화 단계 1에서 최대크기의 많은 모듈을 얻기위해 고장수목 재구성이 수행된다. 고장수목 정량화 소프트웨어에 따라 재구성능력은 달라진다. 단계 4에서 절삭되는 최소단절집합들은 모듈의 수와 크기에 따라 달라지기 때문에, 고장수목 정량화 소프트웨어의 재구성능력에 따라 LBTP와 ATP의 크기가 달라진다. (주의: TP는 정량화 소프트웨어와 관계없이 항상 일정).

제 4 절　절삭 불확실성

본 연구에서 정량화 불확실성(truncation uncertainty)의 척도로서, TU (Truncation Uncertainty), LBTU (Lower Bound of Truncation Uncertainty), 그리고 ATU (Approximate Truncation Uncertainty) 가 다음과 같이 정의 되었다.

$$TU_k = \frac{TP_k}{P_T^U} = \frac{TP_k}{P_k + TP_k} \tag{18}$$

$$LBTU_k = \frac{LBTP_k}{P_k + LBTP_k} \tag{19}$$

$$ATU_k = \frac{ATP_k}{P_k + ATP_k}\ . \tag{20}$$

식 (19)와 (20)의 분모는 정점사건 확률 P_T^U 가 되어야 하지만, 각각 $P_k + LBTP_k$ 와 $P_k + ATP_k$ 가 사용되었다. 그 이유는 한번의 정량화만으로 $LBTU_k$ 와 ATU_k 를 계산하기 위해서이다.

제3장 개발된 방법의 적용

2절에서 정의된 척도들의 효율성을 보이기 위해, 고장수목 정량화 소프트웨어 FTREX[15]를 일부 수정하여 울진 3/4호기 원자력발전소[18]의 노심손상빈도 고장수목을 정량화하였다. 노심손상빈도 고장수목은 울진 3/4호기 원자력발전소 노심손상 고장수목은 위험도감시 전산 시스템[19]의 입력으로 개발된 것으로 표 1의 49개의 초기사건과 3,477의 게이트와 2,501개의 기본사건을 가지고 있다.

표 1. 울진 3/4 NPP의 초기사건

	Initiator group	Number of initiators
	Large LOCA	6 (4 for cold legs and 2 for hot legs)
	Medium LOCA	6 (4 for cold legs and 2 for hot legs)
LOCA (a)	Small LOCA	1
	Reactor vessel rupture	1
	Steam generator tube rupture	2 (for steam generators 1 and 2)
	Interfacing system LOCA	1
	Large secondary side breaks	2 (for steam generators 1 and 2)
	Loss of main feedwater transient	1
	Loss of condenser vacuum transient	1
	Loss of offsite power	1
Transients	Station blackout (b)	NA (d)
	General transient	23
	Loss of component cooling water train	1
	Loss of 4.16KV AC bus	1
	Loss of 125V DC bus	2 (for 125V DC bus A and B)
	ATWS (c)	NA

(a) loss of cooland accident
(b) loss of offsite power * loss of AC power
(c) initiators transferred to anticipated transient without scram (ATWS) * failure of reactor trip
(d) NA: Not applicable

정량화 결과는 그림 2에서 6까지 그리고 그 요약은 표 2에 있다. 표 2와 그림 2, 4, 그리고 5에서와 같이, 절삭치를 낮출수록 정점사건 확률은 P_T^U 에 수렴한다.

표 2. 울진 3/4 NPP에 대한 Benchmark 시험 결과

k	Truncation limit 1.0E-k	MCSs (a)	MCSs (b)	P_k/P_{16} (c) %	$(P_k+LBTP_k)/P_{16}$ %	$(P_k+ATP_k)/P_{16}$ %	TP_k (d) in Eq. (10)	$LBTP_k$ in Eq. (11)	ATP_k in Eq. (12)	TU_k % in Eq. (18)	$LBTU_k$ % in Eq. (19)	ATU_k % in Eq. (20)	Run time (seconds)
8	1.0E-08	257	80,965	76.76	83.08	103.26	5.100E-06	1.389E-06	5.818E-06	23.20	7.61	25.67	0.42
9	1.0E-09	1,205	270,306	89.33	93.20	105.78	2.340E-06	8.497E-07	3.611E-06	10.70	4.15	15.55	0.56
10	1.0E-10	5,842	1,840,383	95.45	97.72	103.84	9.990E-07	4.980E-07	1.841E-06	4.55	2.32	8.08	0.88
11	1.0E-11	27,227	7,872,462	98.44	99.36	102.35	3.420E-07	2.014E-07	8.583E-07	1.56	0.92	3.82	1.69
12	1.0E-12	99,922	25,603,438	99.49	99.83	100.88	1.110E-07	7.289E-08	3.037E-07	0.51	0.33	1.37	3.59
13	1.0E-13	342,488	86,589,221	99.85	99.96	100.31	3.400E-08	2.487E-08	1.020E-07	0.16	0.11	0.46	8.03
14	1.0E-14	1,103,758	320,228,727	99.96	99.99	100.10	9.000E-09	8.041E-09	3.241E-08	0.04	0.04	0.15	19.00
15	1.0E-15	3,436,562	964,350,847	99.99	100.00	100.04	2.000E-09	2.455E-09	9.936E-09	0.01	0.01	0.05	43.81
16	1.0E-16	10,203,408	NA (e)	100.00	100.00	100.01	0.000E+00	7.188E-10	2.889E-09	0.00	0.00	0.01	149.41

(a) MCSs that have probabilities larger than the truncation limit (See Section 2.2)

(b) MCSs that are truncated when expanding the modules at Step 4 (See Section 2.2)

(c) P_k in Eq.(7) and $P_T^U \approx P_{16}$

(d) $TP_k \approx P_T^U - P_k \approx P_{16} - P_k$

(e) NA: Not applicable since the number is beyond the size of the 32 bit integer variable

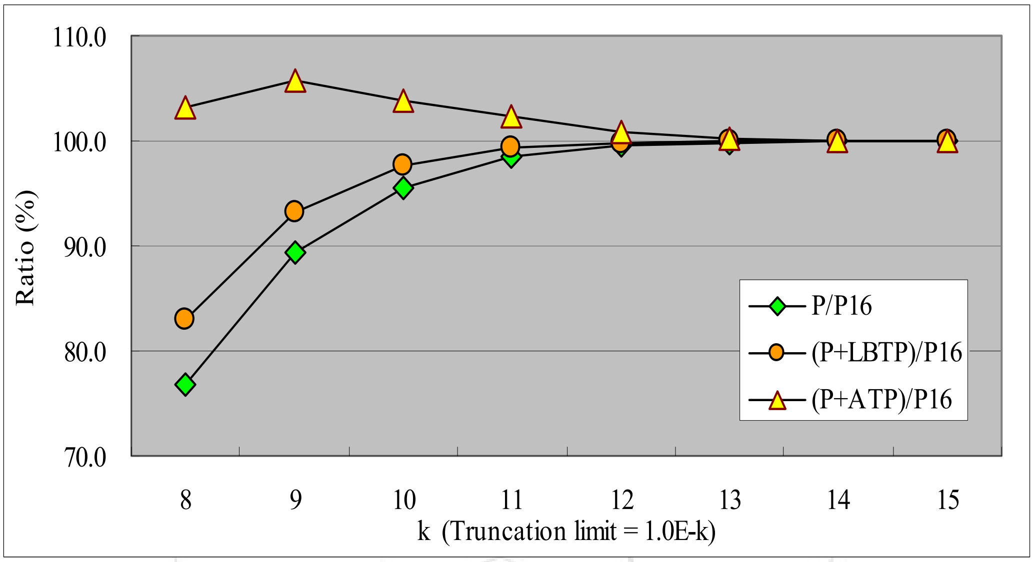

그림 2. 절삭치에 따른 점점사건 확률 변화

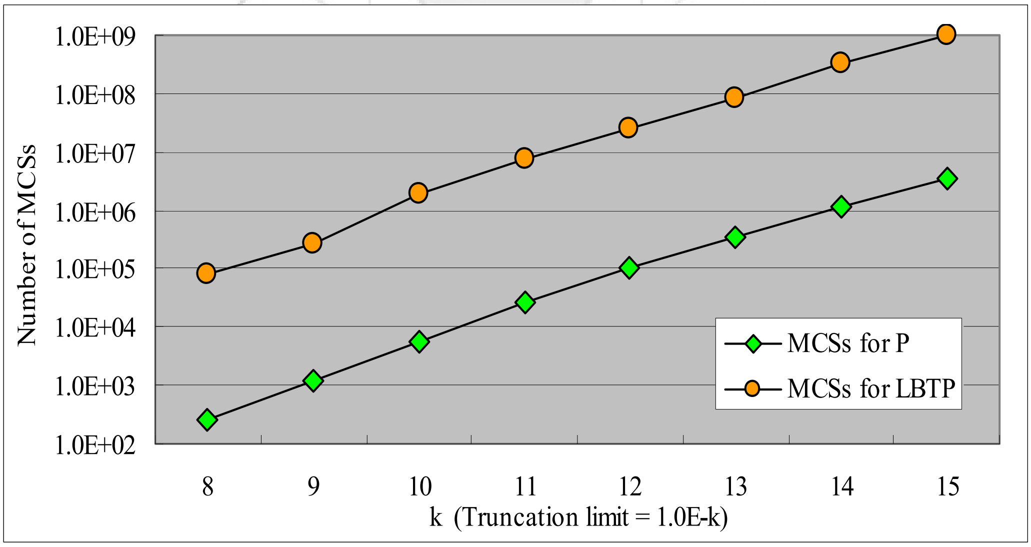

그림 3. 절삭치에 따른 최소단절집합들의 갯수 변화

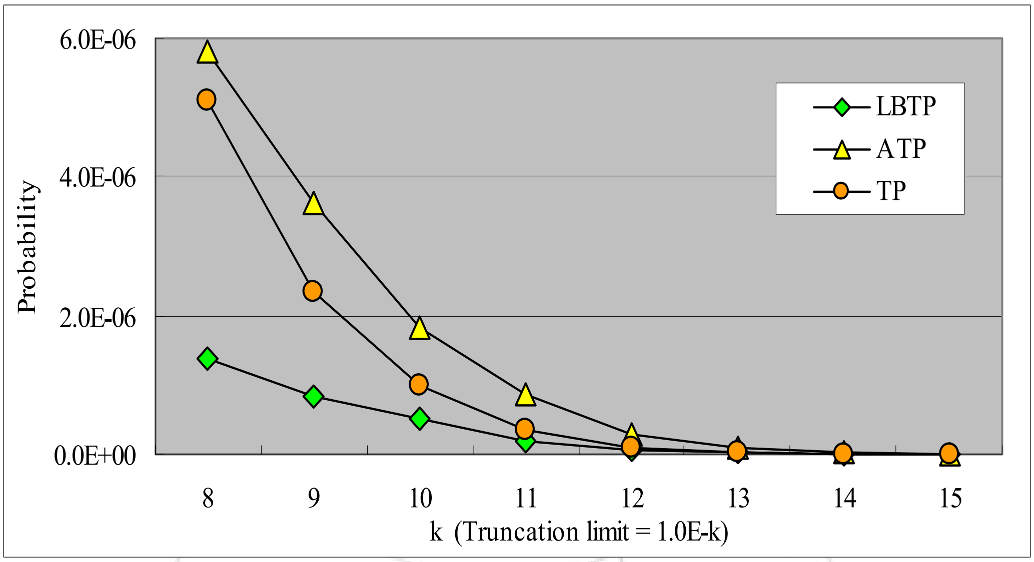

그림 4. 절삭치에 따른 절삭오차 변화

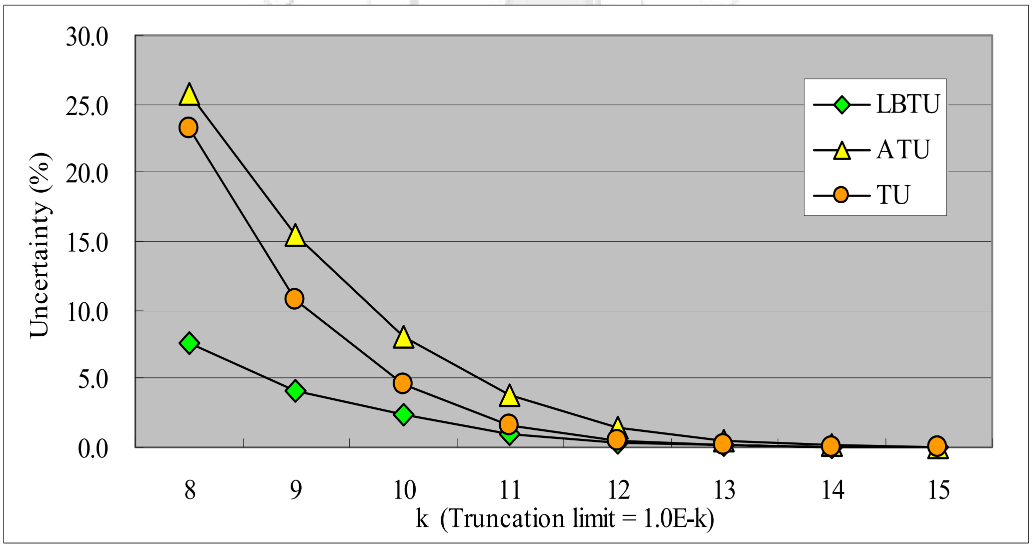

그림 5. 절삭치에 따른 절삭불확실성 변화

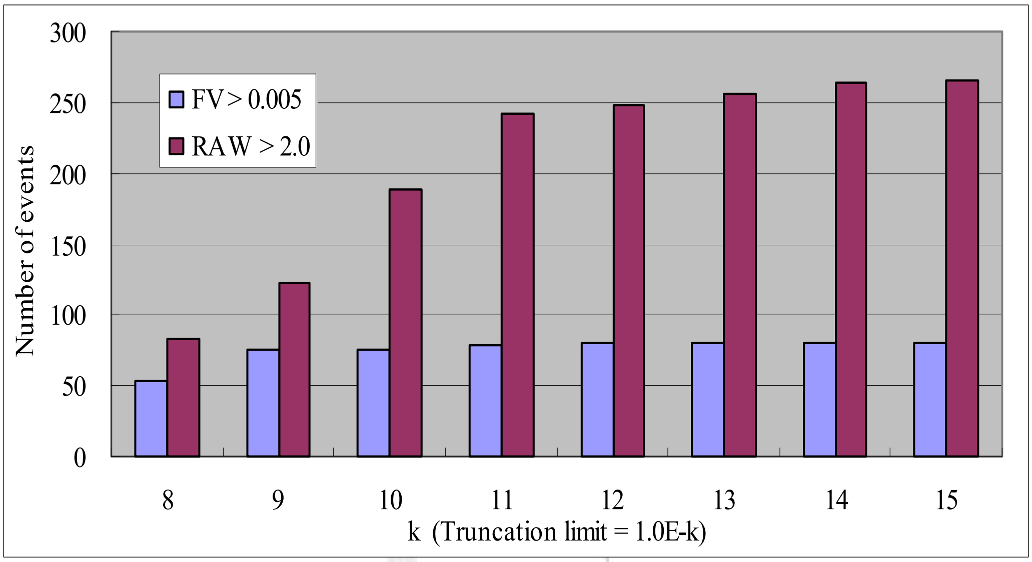

그림 6. 절삭치에 따른 중요 기본사건들의 갯수 변화

그림3은 절삭치를 낮출수록 최소단절집합 C_i^k 혹은 $\overline{C}_i^k$ 의 숫자가 지수증가함을 보인다 (주의: 그림 3의 Number of MCSs 축은 로그 스케일임). 절삭치가 1×10^{-16} 이하 인 경우 최소단절집합 $\overline{C}_i^k$ 의 숫자가 32 bit 정수형 변수의 상한치보다 커지기 때문에, 절삭치를 1×10^{-16} 이하로 낮출 수 없었다 (주의: FTREX[15]의 관련 변수를 64 bit 정수형으로 변경해야 함). TP와 TU를 계산하기 위해 절삭치가 1×10^{-16} 일 때의 정점사건 확률을 P_T^U 라고 가정하였다. 이 때문에, 표2에서와 같이 절삭치가 1×10^{-15} 와 1×10^{-16} 에서 TP와 LBTP의 크기가 역전되었다.

그림 4는 절삭치를 낮출수록 LBTP와 ATP가 소멸함을 보여준다. 그림 3과 4는 기존에 고장수목 정량화시에 많은 숫자의 최소단절집합 $\overline{C}_i^k$ 가 절삭됨을 보여준다. 즉, 가치있는 정보를 버리고 있음을 알 수 있다.

표2에 보이는 것처럼, ATP는 절삭확률 TP의 바람직한 근사치이고 TP의 상한치로서 행동한다. 또한 표2는 LBTP와 ATP는 절삭확률 TP의 바람직한 예측치임을 보여준다.

참고문헌 5와 6에서와 같이, 그림 6은 절삭치가 큰경우 중요도 척도 RAW가 많이 저평가됨을 보여준다. 중요도 척도 RAW와 FV는 위험도 관점에서 중요한 SSC를 고르는데 사용된다.

LBTU와 ATU가 미리 설정된 범위 안에 오도록 하여 절삭치를 결정할 수 있다. 예를 들어, 표2에서 LBTU와 ATU가 1%보다 작아지도록 하면 절삭치는 1×10^{-11} 과 1×10^{-13} 으로 각각 설정할 수 있다. 이와 같이 LBTP, ATP, LBTU, 그리고 ATU는 절삭치 선정에 사용될 수 있다.

본연구에서 정의된 척도들은 기존의 고장수목 정량화 소프트웨어의 간단한 수정으로 계산할 수 있다. 또한 LBTP, ATP, LBTU, 그리고 ATU 추가 계산은 0.2초내에 수행할 수 있다.

제4장 결론

절삭오차는 대형 고장수목의 신뢰도분석에서 중요한 관심사이다. 본 연구는 최소단절집합 방법에 기초한 신뢰도 분석방법의 단점을 보완하기 위해 수행되었다. 즉, 절삭확률을 예측하여 바람직한 절삭치를 선정하기 위해 본 연구가 수행되었다.

절삭오차의 양은 고장수목의 크기보다 계통이나 기기 사이의 종속성의 크기 등의 고장수목의 복잡성(fault tree complexity)에 더 많이 영향받는다. 이 고장수목의 복잡성은 큰 절삭오차를 유발하는 고장수목 정량화의 난이도로 표현할 수 있다. 만일 많은 수의 최소단절집합들이 그룹별로 특정확률에 몰려 있을 때, 절삭치는 이 들 특정확률보다 작아야한다.

본 연구는 절삭치를 사용한 고장수목정량화 시 절삭치오차를 예측하기 위한 척도들을 제시하였다. Benchmark 시험결과 개발된 척도들은 절삭확률을 잘 예측하고 있다. 절삭확률 예측치인 LBTP와 ATP 척도는 정확한 정점사건 확률 예측에도 사용할 수 있다.

지정된 절삭치에서 단 한번의 고장수목 정량화만으로 본 연구의 절삭오차 척도들을 계산할 수 있다. 이 절삭오차들이 일정 값 이하로 오도록 절삭치를 설정할 수 있음을 Benchmark 시험에서 보였다. 신뢰도 분석자나 신뢰도 분석 결과에 대한 검토자 들이 고장수목 정량화 시 절삭치가 바람직하게 설정되었는 지를 판단하기 위해 본연구의 척도들을 사용할 수 있다. 또한 본연구의 척도들은 기존의 정량화 소프트웨어에 쉽게 구현할 수 있고 추가 계산 시간 또한 짧다.

고장수목 정량화 소프트웨어의 고장수목 재구성능력에 따라 LBTP와 ATP의 크기가 달라 지지만 본 연구의 척도를 유용하게 사용할 수 있다.

참고 문헌

[1] Vesely WE, Goldberg FF, Roberts NH, and Haasl DF, Fault Tree Handbook, NUREG-0492, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1981.

[2] Vesely W, Dugan J, Fragola J, Minarick J, Railsback J, Fault Tree Handbook with Aerospace Applications, National Aeronautics and Space Administration, 2002.

[3] Barlow RE and Proschan F, Statistical Theory of Reliability and Life Testing, Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1975.

[4] Cheok MC, Parry GW, and Sherry RR, "Use of importance measures in risk-informed regulatory applications," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 60, pp.213-226, 1998.

[5] Fleming KN, "Issues and Recommendations for Advancement of PRA Technology in Risk-Informed Decision Making," U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6813, 2003.

[6] Ĉepin M, "Analysis of Truncation Limit in Probabilistic Safety Assessment," Reliability Engineering and System Safety, 2004 (to appear in 2004).

[7] Nuclear Energy Institute Risk-based Applications Task Force, "Probabilistic Risk Assessment Peer Review Process Guidance," 2000.

[8] ASME, "Standard for Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications," ASME RS-S-2002, 2002.

[9] Modarres M and Dezfuli H. "A truncation methodology for evaluating large fault trees," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 33(4), pp.325-328, 1984.

[10] Brown KS, "Evaluating fault trees with repeated events, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 39(2), pp.226-235, 1990.

[11] Contini S, "A new hybrid method for fault tree analysis," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 49, pp.13-21, 1995.

[12] Coudert O and Madre JC, "Implicit and Incremental Computation of Primes and Essential Primes of Boolean Functions," Proceedings of the 29th ACM/IEEE Design Automation Conference, DAC'92, June 1992.

[13] Rauzy A, "New Algorithms for Fault Trees Analysis," Reliability Engineering and System Safety, 40, pp. 203-211, 1993.

[14] Jung WS, Han SH, Ha JJ, "A Fast BDD Algorithm for Large Coherent Fault Trees Analysis," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 83, pp. 369–374, 2004.

[15] Jung WS, Han SH, Ha JJ, "Development of an Efficient BDD Algorithm to Solve Large Fault Trees," Proceedings of the 7th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, June, Berlin, Germany, 2004.

[16] Niemelä I, "On Simplification of Large Fault Trees," Reliability Engineering and System Safety, 44, pp. 135-138, 1994.

[17] Reay KA and Andrews JD, "A Fault Tree Analysis Strategy Using Binary Decision Diagrams," Reliability Engineering and System Safety, 78, pp. 45-56, 2002.

[18] Korea Electric Power Corporation. Ulchin Units 3&4 Final Probabilistic Safety Assessment Report, 1997.

[19] Kim SH, Jang SC, Kim KY, Han SH, "Development of Full Power Risk Monitoring System for UCN 3, 4 Nuclear Power Plant", Proceedings ESREL'03, Maastricht, Netherlands, 2003.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-2820/2004			

제목/부재	원자력발전소의 확률론적안전성평가시 고장수목분석 절삭치 불확실성 평가
주 저 자	정우식 (종합안전평가부)
연구자 및 부서명	양준언 (종합안전평가부)

출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년도	2004. 11
페이지	p.28	도표	있음(O), 없음( )	크기	27Cm
참고사항					

비밀여부	공개(O), 대외비( ), _급비밀	보고서 종류	기술보고서
연구위탁기관		계약번호	

초록

절삭오차(truncation error)에 의한 고장수목 정량화 불확실성이 원자력발전소의 확률론적안전성분석(probabilistic safety assessment, PSA) 대형 고장수목 정량화시 큰 관심사였다. 절삭치(truncation limit)는 고장수목 정량화 중에 절삭치보다 작은 확률을 갖는 단절집합(cut sets)들을 절삭하는 데 사용된다. 이 절삭에 의해 절삭확률(truncated probability)이 발생하며 이 절삭오차를 적정 수준이내로 유지해야 한다. 본 연구에서 절삭확률을 예측하기 위한 척도들을 개발하여 고장수목정량화 스프트웨어 FTREX (Fault Tree Reliability Evaluation eXpert)에 계산 모듈을 추가하고, 이 척도들의 유용성을 보이기 위해 Benchmark 시험을 수행하였다.

본 연구에서 제시한 절삭치오차를 예측하기 위한 척도들은 단 한번의 고장수목 정량화만으로 계산할 수 있다. 본문의 Benchmark 시험결과에서 보여준 것처럼, LBTP(lower bound of truncated probability)와 ATP(approximate truncation probability) 척도는 절삭오차 즉 절삭확률을 예측하고 동시에 정확한 정점사건 확률(top event probability)을 예측할 수 있다. 이 척도들을 근거로 현재의 절삭치에서 절삭오차를 판단하고 또한 절삭오차들이 일정 값 이하로 오도록 절삭치를 설정할 수 있다. 또한 신뢰도 분석자나 신뢰도 분석 결과에 대한 검토자들이 고장수목 정량화가 얼마나 정확하게 수행되었는지를 판단하기 위해 본연구의 척도들을 사용할 수 있다. 본연구의 척도들은 기존의 정량화 소프트웨어에 쉽게 구현할 수 있고 추가 계산 시간 또한 짧다.

주제명키워드	절삭오차, 절삭확률, 고장수목분석

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-2820/2004			

Title/Subtitle	Truncation Uncertainty of the Fault Tree Analysis in the Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants
Main Author and Department	Jung, Woo Sik (Integrated Safety Assessment Division)
Researcher and Department	Yang, Joon-Eon (Integrated Safety Assessment Division)

Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2004. 11
Pages	p.28	Fig. & Tab.	Yes(O), No( )	Size	27Cm
Note					

Classified	Open (O), Restricted ( ), _Class	Report Type	Technical Report
Sponsoring Org.		Contract No.	

Abstract

The fault tree quantification uncertainty from the truncation error has been of great concern for the reliability evaluation of large fault trees in the probabilistic safety analysis (PSA) of nuclear plants. The truncation limit is used to truncate cut sets of the gates when quantifying the fault trees. This report presents measures to estimate the probability of the truncated cut sets, that is, the amount of truncation error. The functions to calculate the measures are programmed into the new fault tree quantifier FTREX (Fault Tree Reliability Evaluation eXpert) and a Benchmark test was performed to demonstrate the efficiency of the measures.

The measures presented in this study are calculated by a single quantification of the fault tree with the assigned truncation limit. As demonstrated in the Benchmark test, lower bound of truncated probability (LBTP) and approximate truncation probability (ATP) are efficient estimators of the truncated probability. The truncation limit could be determined or validated by suppressing the measures to be less than the assigned upper limit. The truncation limit should be lowered until the truncation error is less than the assigned upper limit. Thus, the measures could be used as an acceptability of the fault tree quantification results. Furthermore, the developed measures are easily implemented into the existing fault tree solvers by adding a few subroutines to the source code.

Subject Keywords	Truncation Error, Truncated Probability, Fault Tree Analysis