



KR0100945

KAERI/RR-2094/2000

이상 유동 연구를 위한 하나로 NR 설비의 특성화 연구

Study on the characterization of the neutron
radiography facility in HANARO
for two-phase flow research

한국원자력연구소

32 / 48

**PLEASE BE AWARE THAT
ALL OF THE MISSING PAGES IN THIS DOCUMENT
WERE ORIGINALLY BLANK**

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2000 연도 “이상 유동 연구를 위한 하나로 NR 설비의 특성화 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2000. 1. 29.

과 제 명 : 이상 유동
연구를 위한
하나로 NR 설비의
특성화 연구

과제책임자 : 임 인 철
참 여 자 : 서 철 교
정 정 환
이 번 헌
최 영 산

요 약 문

I. 제 목

이상 유동 연구를 위한 하나로 NR 설비의 특성화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

라디오그래피를 이용한 분석 기술은 크게 정적 현상 분석 기술과 동적 현상 분석 기술로 나눌 수 있다. 정적 현상 분석 기술은 주로 비파괴 검사에 활용되며, 동적 현상 분석 기술은 이상 유동의 연구에 많이 활용되고 있다. 정적 현상 분석 기술은 하나로의 라디오그래피 설비 설치 이후에 산업적으로 여러 분야에 활용되었으나, 동적 현상 분석 기술은 앞으로도 많은 연구가 필요한 분야이다.

이상유동 연구에 라디오그래피를 활용하기 위해서는 국내에서 수행되고 있는 안전성 관련 연구 중에서 중성자 라디오그래피가 도움이 될 수 있는 분야를 구체적으로 파악하여야 하며, 카메라, 전환막 및 영상처리 계통이 적절하게 구성되어야 하고, 이상 유동 실험에 필요한 특성 곡선 획득 방법론의 수립 등을 포함한 특성화 연구가 필요하다.

III. 국내외 연구 동향

중성자 라디오그래피를 이용한 이상 유동의 연구는 연구용 원자로를 가지고 있는 미국, 캐나다 및 일본의 대학을 중심으로 진행되어 왔으며 국가간 및 대학간의 공동 연구도 수행되었다. 1980년대에는 미국의 대학에서 연구가 활발히 수행되었으며 1990년대에는 일본과 캐나다의 대학에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 국가 중 가장 활발한 연구가 수행되고 있는 나라는 일본인데, 이는 90년대 초에 높은 중성자속을 내는 JRR-3M이 완공된 것에 힘입은 바 크다. 우리나라에서는 중성자 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험을 수행하기 위한 시설이 아직 마련되어 있지 않아 관련 연구가 수행된 바는 없으나 이상 유동 실험에 있어 라디오그래피가 지니는 장점을 고려할 때에 이에 대한 시설 투자는 매우 가치있는 일이다.

IV. 연구개발의 수행 내용 및 결과

본 과제에의 첫 번째 목표는 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험을 수행하기 위하여 필요한 장비에 대한 검토를 수행하고 일부 장비를 마련하는 것이었다. 하나로의 NR 조사실과 BNCT 조사실에서 중성자 빔 특성을 평가한 결과 BNCT 조사실에서 얻을 수 있는 중성자 빔이 NR 조사실의 빔보다 우월하고 BNCT 조사실에서는 고속 라디오그래피도 가능한 것으로 확인되었다. 따라서, 고속 라디오그래피의 수행에 필요한 카메라 및 전환막에 대한 검토를 수행하였으며 영상 처리에 필요한 장비와 프로그램을 구비하였다.

두 번째 목표는, 실험 수요의 확인과 실험 장비 확보 방안의 마련이었다. 중성자 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험에 대한 외국의 연구물과 안전성 관련 과제들의 결과물 검토 및 안전성 관련 연구자들과의 대화를 통하여 고속의 중성자 라디오그래피를 이용하여 수행한다면 기존의 방법보다 좋은 결과를 얻을 수 있는 실험 항목을 도출하였다. 실험부를 제외한 주요 장비로는 하나로의 기존 시설이나 다른 실험에 사용하였던 장비를 활용할 수 있음을 확인하여 실험 수행을 위해서는 실험부만 필요함을 확인하였다. 또한, film flow 특성의 측정에 필요한 실험 장비를 제작하여 지속적으로 연구를 추진할 수 있게 하였다.

세 번째 목표는, 중성자 라디오그래피를 이용하여 이상 유동 실험을 수행하는데 필요한 중성자가 일정 길이의 액체(path length)를 지나면서 감쇄하는 특성을 나타내는 특성 곡선(calibration curve)을 구하는 방법을 확립하는 것이었다. 외국의 경우를 보면 이 특성 곡선은 이상 유동 실험에 사용할 유체를 대상으로 실험적으로 구하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 여러 종류의 gap size를 갖는 slit 및 관에 대하여, 라디오그래피 방법으로 투과율을 실험적으로 구하고 이를 MCNP 전산 코드를 이용하여 구한 계산값과 비교하여 보았다. 이러한 비교 연구를 통하여 코드 계산을 통하여 특성 곡선을 얻을 수 있음을 확인하였다.

부수적인 성과로서, 본 과제의 수행을 통하여 확보한 영상 처리 계통이 하나로 원자로의 구조물 검사에도 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

V. 결론 및 추후 연구 방향

본 과제 수행을 통하여 얻은 장비 검토 내용과 2001년에 수행될 BNCT 조사실에서의 빔 특성 측정 결과를 참고로 하여 추가 소요 장비를 확정하고 중성자빔 이용 연구 과제를 통하여 2001년에 카메라와 image intensifier 장비를 마련하면 고속 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험에 필요한 장비를 완비하게 될 것이다. 이러한 일들이 실현되면 고속 라디오그래피는 원자력 관련 이상 유동의 연구뿐만 아니라

전기장을 이용하여 열전달을 촉진시키는 열전달 촉진법에 대한 연구에 있어서의 유동 가시화에도 잘 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

잔여 예산을 활용하여 확보한 film flow에 대한 실험 장치와 기존의 NR 실험 장치를 이용하여 이상 유동 실험을 추후에 수행할 예정이며 이는 본 과제의 수행을 통하여 확인한 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험에 대한 수요를 만족시키기 첫 걸음이 될 것이다.

SUMMARY

I . Project Title

Study on the characterization of the neutron radiography facility in HANARO for two-phase flow research

II . Objective and Importance of the Project

The neutron radiography techniques are categorized into two; radiography of static objects and that of dynamic object. The former is mainly applied to the nondestructive testing and the latter is applied to the two-phase flow research. In Korea, the static technique has been applied to various industries but no research has been done in the dynamic technique area.

For the application of neutron radiography technique to two-phase flow experiments, the research items to which the radiography technique gives the better experimental results than the other experimental techniques should be identified. In addition, the proper experimental devices including camera, converter and image processing system should be prepared and the method to get the calibration curve necessary for the two-phase flow experiment should be setup.

III . Research in Other Countries and Korea

The researches on two-phase flow using neutron radiography have been performed mainly in the United States, Canada and Japan. In 1980's, the United States led the research in this field. In 1990's, Japan and Canada have made major achievements. In these days, the researches are most vigorously performed in Japan, which is indebted to the operation of JRR-3M. In Korea, it was impossible to perform the two-phase experiment using radiography due to the absence of equipments. Considering the merits of neutron radiography in two-phase flow research, the investment on the dynamic radiography is believed very valuable.

IV. Contents of Project and Results

The first objective of this project was to survey the equipments including the neutron beam required for radiographic two-phase flow experiments in HANARO and to prepare the hardwares and the software for image processing. The study shows that the characteristic of neutron from the BNCT beam port is better than that from the NR beam port and even the high speed neutron radiography(HSNR) can be performed in the BNCT facility. Thus, the survey of equipments was focused on the camera and the converter required to HSNR. Also, the hardwares and the software for image processing were purchased.

The second objective was to confirm the needs to use radiography for two-phase flow experiments and the find the measures for the preparation of equipments required to build the test loop. Several experimental items to which the radiography technique is beneficial were identified through the review of the outputs from the related researches and the discussions with experts. It was confirmed that the existing facilities and devices in HANARO could be spared for the dynamic radiography experiments. In addition, a test section for the research on characteristic of film flow was built by using the residual budget of this project.

The third objective was to setup the method to get the calibration curve necessary for the two-phase flow experiment. The comparisons of the neutron attenuation ratios obtained by using radiography technique with them by MCNP calculation show that the characteristic curve can be obtained without the experiment, which is believed to facilitate the design of a experiment.

In addition, it was found that the image processing system prepared by this project could be used for the in-service inspection of HANARO.

V. Conclusion & Recommendation for Further Research

The decision on the equipments required for the dynamic radiography in HANARO will be made based on the outcomes from this project and the

measurement results on the BNCT beam characteristics which will be performed in 2001. The key equipments such as camera and image intensifier will be purchased by using the resources from the neutron beam utilization project. If these are realized, the dynamic radiography technique should become a good tool for the two-phase flow research as well as for the flow visualization for heat transfer enhancement research.

The experiments on the film flow by using the existing NR equipments will be performed and this will be the first step to fulfill the needs on the two-phase research using dynamic radiography technique.

CONTENTS

Statement for Report Submission	i
Summary in Korean	ii
Summary	v
Contents	viii
Contents in Korean	x
Contents of Table	xii
Contents of Figure	xii
Chapter 1. Introduction	1
Section 1. Background of Project	1
Section 2. Objectives of Project	1
Chapter 2. Research in Other Countries and Korea	3
Section 1. Two-Phase Flow and Neutron Radiography	3
Section 2. Research in Other Countries	4
2.2.1 Oregon State University	4
2.2.2 Penn State University	4
2.2.3 Michigan University	5
2.2.4 Kobe University and JAERI	5
2.2.5 Nagoya University and JAERI	5
2.2.6 KURRI(Kyoto University Research Reactor Institute) and JAERI	6
2.2.7 McMaster University	6
Section 3. Research in Korea	7
Chapter 3. Contents of Project and Results	8
Section 1. Investigation on NR System for Two-phase Flow Research	8
3.1.1 Introduction	8
3.1.2 Investigation of Neutron Beam	11
3.1.3 Investigation of Camera	17
3.1.4 Investigation of Converter	24
3.1.5 Purchase of Frame Grabber	26
3.1.6 Image Process Software and Computer	33
Section 2. Survey on Need for Two-phase Flow Experiment and Requirement	33
Section 3. Experiment on Characteristic Curve for Two-phase Flow	

Experiment	34
3.3.1 Experiment	34
3.3.2 Calculation Using MCNP	36
3.3.3 Analysis of Results	37
Section 4. Byproduct of Project	41
Chapter 4. Conclusion and Recommendation for Further Research	44
Chapter 5. References	46

목 차

제 출 문	i
요 약 문	ii
Summary	v
Contents	viii
목 차	x
표 목 차	xii
그 림 목 차	xii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경	1
제 2 절 연구의 목표	1
제 2 장 국내외 연구 현황	3
제 1 절 이상 유동 연구와 중성자 래디오그래피	3
제 2 절 외국의 연구 현황	4
2.2.1 Oregon State University	4
2.2.2 Penn State University	4
2.2.3 Michigan University	5
2.2.4 Kobe University와 JAERI	5
2.2.5 Nagoya University와 JAERI	5
2.2.6 KURRI(Kyoto University Research Reactor Institute)와 JAERI	6
2.2.7 McMaster University	6
제 3 절 국내의 연구 동향	7
제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과	8
제 1 절 이상 유동 실험을 위한 계통 장비 검토	8
3.1.1 개요	8
3.1.2 원자로 빔 검토	11
3.1.3 카메라 검토	17
3.1.4 전환막의 검토	24
3.1.5 Frame Grabber의 구매	26
3.1.6 영상 처리 software 및 영상 처리 computer	33
제 2 절 이상 유동 실험 수요 및 실험 요건 파악	33
제 3 절 동적 현상 분석을 위한 특성 실험	34
3.3.1 실험	34
3.3.2 MCNP를 이용한 계산	36
3.3.3 결과 평가	37

제 4 절	부수적 효과	41
제 4 장	결론 및 추후 연구 방향	44
제 5 장	참고문헌	46

표 목 차

표 3-1. 원자로 빔 특성 비교	12
표 3-2. 카메라의 규격 비교	20
표 3-3. Image intensifier의 규격 비교	22
표 3-4. 전환막에 사용되는 대표적인 중성자 흡수 물질	27
표 3-5. 대표적인 전환막	27
표 3-6. 하나로 NR 설비에서의 조도 측정 결과	28
표 3-7. 하나로와 KUR에서의 전환막 후면에서의 조도 비교	28
표 3-8 DT-3152 frame grabber의 특성	28

그 림 목 차

그림 3-1. 중성자 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험 계통	10
그림 3-2. 하나로 노심과 빔 튜브의 배치	12
그림 3-3. NR 빔튜브의 collimator	13
그림 3-4. 현 NR 조사실의 구조	13
그림 3-5. BNCT 조사실의 외관	14
그림 3-6. BNCT 조사실의 입구	14
그림 3-7. BNCT 조사실 내부의 모습	15
그림 3-8. BNCT 조사실의 평면도	16
그림 3-9. 촬상판의 특성 비교	23
그림 3-10. CCD pixel의 일반적인 구조	24
그림 3-11. 전환막의 일반적인 구조	29
그림 3-12. 전환막의 발광능 비교	30
그림 3-13. 하나로 NR 설비에서의 조도 측정 위치	31
그림 3-14. 하나로 NR 설비에서의 조도 측정 결과	32
그림 3-15. LiF-ZnS의 발광능	32
그림 3-15. Film flow 실험을 위한 test section 설계 도면	35
그림 3-17. Slit의 gap 두께 변화에 따른 중성자빔의 감쇄 - 물	39
그림 3-18. Slit의 gap 두께 변화에 따른 중성자 빔의 감쇄 - 중수	39
그림 3-19. 직경 25 mm 관에서 path length에 따른 중성자 빔의 감쇄	40
그림 3-20. 관과 slit에서의 실험 및 계산 자료 비교	40
그림 3-21. 하나로 원자로 유동관 상부에 대한	42
그림 3-22. 그림 3-21에 rank filter를 적용한 결과	42
그림 3-23. 그림 3-22에 sobel filter를 적용한 결과	43

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

우리 나라에서는 TRIGA Mark III 연구로를 이용한 중성자 라디오그래피 기술을 산업 분야에 적용하여 왔고, 1995년 30 MW급 하나로의 준공과 더불어 라디오그래피 설비가 설치되었다.

라디오그래피를 이용한 분석 기술은 크게 정적 현상(static) 분석 기술과 동적 현상(dynamic) 분석 기술로 나눌 수 있다. 정적 현상 분석 기술은 주로 비파괴 검사에 활용되며, 동적 현상 분석 기술은 이상 유동의 연구에 많이 활용되고 있다. 정적 현상 분석 기술은 하나로의 라디오그래피 설비 설치 이후에 산업적으로 여러 분야에 활용되었으나, 동적 현상 분석 기술은 앞으로도 많은 연구가 필요한 분야이다.

라디오그래피를 이용한 기포율(void fraction)의 측정, 계면 면적(interfacial area)의 측정과 용융 금속의 유동 관찰 등을 포함한 이상 유동에 대한 연구는 원자로의 안전성을 규명하는데 있어서 매우 중요한 분야이다. 이상 유동 시험 중에 다수는 고온·고압 조건에서 수행되어야 한다. 고온·고압 조건에서의 실험을 위해서는 금속으로 된 시험설비를 사용하여야 하는데, 금속으로 된 실험설비에서는 유동의 육안 관찰이 불가능하고, 한다고 해도 관찰창(window) 등을 통한 제한된 관찰만이 가능하다. 라디오그래피를 이용하면 공간적으로 넓은 영역에 대한 관찰이 가능하고 물리량의 시간적인 변화도 쉽게 얻을 수 있어 기존의 이상 유동 측정 장비들의 단점을 극복할 수 있다.

라디오그래피를 활용한 이상 유동 연구를 위해서는 국내에서 수행되고 있는 안전성 관련 연구 중에서 중성자 라디오그래피가 도움이 될 수 있는 분야를 구체적으로 파악하여야 하며, 카메라, 전환막 및 영상처리 계통이 적절하게 구성되어야 하고, 이상 유동 실험에 필요한 특성 곡선 획득 방법론 수립 등을 포함한 특성화 연구가 필요하다.

제 2 절 연구의 목표

본 과제와 목표는 아래와 같았다.

가. 실질적 이상 유동 시험을 위한 계통 장비 검토

- 1) 실시간(real time: 30 frame per sec)의 영상 획득 속도를 갖는 영상 획득 장비(frame grabber)와 영상 분석(image analysis)용 프로그램을 마련한다.

2) 문헌 조사와 국내외 전문가와의 협의를 통하여 현 래디오그래피 계통의 카메라와 전환막(converter)의 개선 방안을 마련한다.

나. 이상 유동 실험 수요 및 실험 요건 파악

안전성 연구 관련 분야의 과제 결과물 검토 및 담당자와의 협의를 통하여 래디오그래피를 활용할 수 있는 실험 설비 항목 도출 및 실험 설비 마련 방안을 도출한다.

다. 현재 있는 래디오그래피 설비를 이용한 동적 현상 분석 특성 시험

1) 특성 시험을 위한 실험 장치의 소내 제작

2) 중성자빔 이용 연구 과제에서 확보하고 있는 영상 처리(image processing) 계통과 소내 타과제의 영상 처리 계통을 이용하여 영상 처리 계통 특성 실험 방안을 확립한다.

제 2 장 국내외 연구 현황

제 1 절 이상 유동 연구와 중성자 래디오그래피

이상 유동이란 기체, 액체 및 고체의 삼상(三相, three phase) 중에서 두 개의 상이 서로 혼합하여 흐르는 유동을 이야기한다. 이러한 이상 유동의 예는 우리 주변에서 매우 쉽게 찾을 수 있는데, 물이 끓는 현상, 공기를 이용한 곡물의 건조 과정, 물이 흙 속으로 침투하는 현상 등을 들 수 있다. 이상 유동에 대한 해석은 단상 유동의 경우와 마찬가지로 연속 방정식, 운동 방정식 및 에너지 방정식을 이용하여 수행된다. 이러한 해석을 위해서는 기포율, 계면 면적 및 계면과와 같은 상간 정보(interfacial information)가 매우 중요하며 이러한 상간 정보에 관한 모델은 실험적 관찰에 기초하여 만들어진다.

중성자의 투과율은 핵종에 따라 민감하게 변화하는데 수소의 경우에는 투과율이 아주 낮다. 그래서, 물이 비등하여 생기는 이상 유동이나 고체 속으로 물이 투과하는 형태로 생기는 이상 유동의 경우에 이러한 특성을 이용하여 상간 정보를 중성자 래디오그래피를 이용하여 얻을 수 있다. 이상 유동에 대한 측정을 통하여 정확하고 자세한 상간 정보를 도출하려면 몇 가지의 조건이 있는데 중성자 래디오그래피를 이용한 측정법은 이러한 조건을 잘 만족시킨다.

먼저 시간에 따라 빠르게 변하는 현상에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서는 시간 분해능이 뛰어나야 하는데 카메라의 발달로 인하여 초당 500회 내지 1000회의 속도로 정보를 얻는 것이 가능하며, 이 정도의 시간 분해능으로는 유동 양식의 천이나 노심 용융물이 물과 반응하는 현상의 자세한 관찰도 가능하다.

두 번째로, 상간 경계를 확실히 구별하기 위해서는 공간 분해능이 뛰어나야 하는데 중성자 래디오그래피를 이용하면 약 0.05 mm 정도의 공간 분해능을 얻을 수 있다.

세 번째로, 이상 유동의 흐름을 방해하지 않으면서 측정이 이루어져야 한다. 중성자 래디오그래피의 경우에는 실험부를 지나면서 중성자의 세기가 감쇄되는 원리를 이용하므로 실험부에 탐침자와 같은 센서를 별도로 삽입할 필요가 없어 측정 기구에 의하여 유체의 흐름이 왜곡되는 현상을 방지할 수 있다.

네 번째로, 다차원의 측정을 동시에 하여 측정의 동시성을 높이고 측정에 드는 노력을 줄일 수 있어야 한다. 측정 설비의 특성에 따라 다르지만 20 cm X 20 cm 정도 크기의 공간에서의 다상 유동을 이차원으로 동시에 측정할 수 있으며 tomography 기술을 이용하면 삼차원의 측정도 가능하다.

마지막으로, 고온·고압 조건에서 수행되는 다상 유동 실험의 경우에는 실험대가

빛이 투과하지 못하는 물질로 만들어지는데, 이 경우에도 내부의 유동을 관찰할 수 있어야 한다는 것이다. 실험대의 구성물로 사용되는 SUS나 AI에 대하여 중성자는 X-ray에 비하여 투과력이 좋아 불투명한 실험대를 사용하는 경우에 내부의 유동 현상을 관찰하기에 적당하다.

제 2 절 외국의 연구 현황

중성자 라디오그래피를 이용한 이상 유동의 연구는 연구용 원자로를 가지고 있는 미국, 캐나다 및 일본의 대학을 중심으로 진행되어 왔으며 국가간 및 대학간의 공동 연구도 수행되었다. 1980년대에는 미국의 대학에서 연구가 활발히 수행되었으며 1990년대에는 일본과 캐나다의 대학에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 각 대학 및 연구소의 연구 동향을 기술하면 아래와 같다.

2.2.1 Oregon State University

이곳에서는 3000 MW까지의 펄스 운전이 가능한 TRIGA 원자로를 이용하여 고속 라디오그래피에 대한 연구가 일찍부터 수행되었다[1,2,3]. Bossi[4]는 물에서 공기 기포가 상승하는 것을 1000 frames/s의 속도로 촬영하였고 여러 종류의 전환막(converter)의 반응 특성에 대한 연구를 수행하였다. Robinson과 Wang[5]은 철사(wire) 주변의 수조 비등(pool boiling) 현상을 integrated flux pulsed(flash) radiography를 이용하여 관찰하였고 물 속에서의 공기 기포의 이동과 증기(steam)의 이동을 각각 5000 및 1000 frame/s의 고속 라디오그래피를 이용하여 관찰하였다. 또한 이상 유동 현상을 관찰하기 위해서는 중수가 물보다 적절함을 지적하였고, 각 frame의 상의 균일성을 유지하기 위해서는 저출력 펄스 운전과 저속 촬영(125 frames/s)이 필요함을 지적하였다.

2.2.2 Penn State University

Penn State 대학에서는 TRIGA-III 원자로를 이용하여 단상 유동 패턴의 연구와 이상유동에서의 기포율 측정에 중성자라디오그래피를 활용하였다. Cimbala [6,7]는 원형봉 주변에서의 유동 양식(flow pattern)을 실시간 라디오그래피를 이용하여 관찰하였고 TRIGA형 원자로의 특성인 펄스 운전을 활용하여 jet에 의한 유동과 자동차 자동변속기에서의 오일 유동 양식을 snap-shot 방법을 이용하여 관찰하였다. 펄스 운전시의 고속 라디오그래피(HSNR: High Speed Neutron Radiography)의 가능성도 고찰하였으나 해상도가 만족스럽지 못하였으며 1000 frame/s에

서 제한적으로 성공하였다. 또한, Glickstein[8]은 5 cm 폭의 oval 형 채널에서의 기포율을 실시간 래디오그래피와 영상 처리 방법을 통하여 정량적으로 측정하였는데, 영상 처리에 있어서는 frame들을 평균(averaging)하는 방법만 적용하였다.

2.2.3 Michigan University

Michigan 대학의 PML(Phoenix Memorial Laboratory)에서는 2 MW의 MTR인 FNR(Ford Nuclear Reactor)을 이용하여 단상 및 이상 유동 시험을 수행하였다. 1984년에는 엔진의 스프레이(spray)와 윤활류의 거동에 대한 연구를 하였고 스프레이의 NCT(Neutron Computed Tomography)도 수행하였다[9,10]. 또한, 자동차 자동변속기에서의 기어 오일의 흐름과 땅속으로 물이 침투하는 과정을 실시간 래디오그래피(RTNR: Real Time Neutron Radiography)를 이용하여 관찰하였다[9,10]. 1994년에는 KURRI와의 공동연구로서 원형관과 사각채널에서의 유동 양식을 관찰하였는데, FNR에서의 RTNR 결과가 KURRI나 JRR-3M에서 촬영한 결과보다는 우수하지 못하였다[11]. 이 연구에서는 화상 강화(image enhancement)를 위하여 영상 처리 방법이 사용되었다.

2.2.4 Kobe University와 JAERI

Kobe 대학에서의 중성자 래디오그래피에는 Sumitomo 중공업의 Cyclotron과[12,13,14] JRR-3M이 사용되었다[15,16,17]. 노즐(nozzle)을 통한 이상 유동에서 기포율의 변화를 영상 처리 방법을 통하여 측정하였는데, 특히 Sonoda는 tomography 방법을 사용하여 기포율의 삼차원적 변화를 관찰하였다[13]. 또한, Pb-Bi 액체 금속(liquid metal)의 유동을 고체 추적자(tracer: Ag-Cd)와 염료(dye: Pb-Bi-Cd)를 이용하여 관찰하였고[14,15], tube-bank 열교환기에서의 기포율 분포를 측정하였다[16]. 최근에는[17] JRR-3M 원자로의 시설을 이용하여 BWR 4X4 핵연료 채널 형상에서의 기포율 분포를 물과 공기를 매체로 하여 측정하였는데, CCD 카메라와 NIH image processor를 이용하여 tomography를 수행하였다.

2.2.5 Nagoya University와 JAERI

Nagoya 대학에서는 주로 교토 대학의 원자로를 이용하여 래디오그래피 기술을 발전시켜 왔다. 1988년에는 NCT processing 방법을 개발하였고[18], 그 이후에는 주로 heated pipe에서의 증발(evaporation) 현상과 응축(condensation) 현상을 관찰하는데 래디오그래피를 이용하였다[19,20]. 또한, 이상유동 현상 해석에 필

수적인 수평관에서의 유동 천이 현상(flow pattern transition)을 관찰하였고 핵융합로 blanket에서의 Li와 Pb의 혼합 현상을 관찰하였다[21]. 최근에는, JAERI의 JRR-3M 원자로를 이용하여 자연대류시의 기포율 분포를 관측하였다[22].

2.2.6 KURRI(Kyoto University Research Reactor Institute)와 JAERI

KURRI에서는 80년대 중반부터 중성자 래디오그래피에 필요한 영상 처리 계통에 대한 연구를 KUR을 이용하여 수행하였다[23,24,25]. 영상 처리 계통의 구축 이후, 핵융합로의 blanket의 냉각과 판상형 핵연료에서의 열수력 현상의 규명에 필요한 사각 채널에서의 기포율과[26,27], 유동 양식에 대한 시험을 수행하였다[28,29]. 중성자 래디오그래피를 이용하여 측정된 기포율과 전기전도도 탐침자(conductance probe)를 이용하여 측정된 기포율을 비교하는 연구도 수행되었다[30]. 90년대 초에 높은 중성자속을 내는 JRR-3M이 완공되면서, KURRI의 이상 유동에 대한 연구의 중심은 JRR-3M으로 옮겨 갔으며[28], 가는 관(직경 1-4 mm)에서의 기포율 측정이 수행되었다[31,32]. KUR의 중성자속(1×10^6 n/cm²sec)보다 100배가 높은 JRR-3M의 준공은 고속 래디오그래피에 대한 연구를 촉진하여 사각 채널에서의 기포율의 분포와 유동 양식 천이 및 환상류(annular flow)에서의 교란파(disturbance wave)를 1000 frame/sec의 속도로 관찰할 수 있었다[33,34,35]. 또한, 영상 증압기(image booster)를 사용하는 경우에는 KUR의 중성자속으로도 고속 래디오그래피를 이용한 이상 유동의 관찰이 가능함을 보였다[36]. 최근에는 산란된 중성자가 기포율의 측정에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었다[37].

2.2.7 McMaster University

캐나다 McMaster 대학에서의 중성자 래디오그래피를 이용한 이상유동 연구는 80년대 말에 시작되었다. 초기에는 파이프와 CANDU형 핵연료집합체 채널에서의 물-공기 유동을 중성자 래디오그래피를 이용하여 관찰하였다[38]. 이들 시험에서는 영상 처리 계통의 미비로 인하여 image subtraction과 같은 초보적인 영상 처리만이 가능하며, 유동의 변화에 따른 계면(interface)의 변화만을 관찰할 수 있었고 정량적인 분석은 불가능하였다. 물-공기 자연순환 유동에 대한 실험에서는 Taylor bubble을 관찰하였는데 background image의 averaging, low pass filter, edge contour map 및 intensity contour map 등과 같은 화상 강화 기술을 시도하였다[39]. Bubble column에 대한 시험에서는 계면 면적 및 기포율을 정량적으로 분석하였다[40]. 이러한 과정을 거쳐 영상 처리 계통 및 방법이 정비된 후, Abel inversion technique를 이용하여 관에서 횡방향으로 측정된 기포율 분포로부터 반경

방향의 기포율 분포를 구하였고[41], 환형 채널 형상에 대하여 X-ray를 이용한 측정 방법과 결과를 비교하여 측정 방법의 정당성을 확인하였다[42,43]. 그런데, 이 환형 채널에 대한 실험은 개량형 PWR 핵연료에 대한 시험에 앞서 준비 단계로 행해진 것이다. 최근에는, CANDU 핵연료집합체를 대상으로 유동 양식과 stratified wavy flow에서의 계면파(interfacial wave)의 형상을 관찰하였고[44], swirl flow가 비등(boiling)에 미치는 영향을 연구하였다[45]. 또한, 편이 달린 핵연료 집합체에서의 유동 양식 천이와 기포율의 측정[46]에 라디오그래피를 활용하였다.

제 3 절 국내의 연구 동향

국내에서는 1983년에 TRIGA Mark III 연구로에 중성자 라디오그래피 시설이 설치되었으나, 그 활용은 미미하여 고고학적 유물의 촬영, 산업기계의 촬영, 핵연료봉의 손상 관찰 등 정적인 촬영 방법을 이용한 활용에 그치었다[47]. 그러나, 하나로의 준공 이후에 NR 빔포트에 중성자 라디오그래피 설비가 설치되고 현재는 156 msec의 처리 속도를 갖는 영상 처리 계통이 개발되었다[48,49]. 그러나, 이 계통은 영상 획득 속도가 느려 이상 유동에 대한 실험을 수행하기에는 적절하지 못하다.

이상 유동 연구 분야에 있어서는 중대사고 관련 연구와 관계되어 중성자 라디오그래피의 활용이 제안된 바 있었고[50], 원자력중장기 연구의 일환으로 진행되고 있는 이상유동 해석 코드의 개발에 있어 계면 면적, 액체 비적(entrained droplet)의 분포 등에 관련된 정보가 필요한 것으로 제시된 바 있다[51]. 중성자 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험을 수행하기 위한 시설이 아직 마련되어 있지 않아 실질적인 실험이 수행된 바는 없으나 이상 유동 실험에 있어 라디오그래피가 지니는 장점을 고려할 때에 이에 대한 시설 투자는 매우 가치있는 일이라 생각된다.

제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 이상 유동 실험을 위한 계통 장비 검토

3.1.1 개요

중성자 라디오그래피를 이용한 이상 유동 측정 계통을 도시하면 그림 3-1과 같다.

중성자 라디오그래피를 위해서는 중성자원이 있어야 하는데 중성자원으로는 원자로에 설치된 빔포트가 가장 널리 쓰인다. 감마선에 의한 잡음을 줄이기 위해서 beam port는 대개의 경우에 원자로심에 접선 방향으로 설치되고 감마선을 줄이기 위하여 Bi-filter를 사용한다. 중성자 라디오그래피를 이용하여 얻은 이미지의 dynamic range를 크게 하고 공간 분해능과 시간 분해능을 향상시키기 위해서는 중성자속이 높을수록 유리하다. 라디오그래피를 이용한 이상 유동의 초기적 연구에는 TRIGA형 원자로의 맥동 운전시에 얻어지는 높은 중성자속을 활용하였다. 그러나, 이러한 방식의 실험을 위해서는 카메라의 작동과 원자로의 맥동 운전을 동기화시켜야 하고 실험 과정을 통하여 중성자속이 변하는 단점이 있다. 최근에는 높은 중성자속을 내는 연구용 원자로들이 가동되면서 이 분야의 연구가 매우 활성화되었다. 그 대표적인 예가 일본의 JRR-3M이다.

실험대를 통과하여 나오는 중성자 빔에는 이상 유동의 정보가 각인된다. 왜냐하면, 물의 비등 실험인 경우에는 물이 많은 부분을 통과하여 나온 중성자속은 상대적으로 많이 감쇄되고 기포가 많은 부분을 통과하여 나온 중성자속은 상대적으로 적게 감쇄되기 때문이다. 빔포트에서 나오는 중성자속이 낮거나 실험대에 존재하는 유체의 두께가 두꺼운 경우에는 기상과 액상간의 dynamic range가 적게 되어 좋은 정보를 얻을 수가 없다. 이런 경우에는 중수를 비등시험에 사용하기도 한다. 또한, 실험 설비에 따라 고온·고압에서의 물의 비등시험에 대체용으로 프레온을 사용하기도 한다.

전환막은 중성자를 광자(photon)로 바꾸어주는 역할을 한다. 실험대를 통과하여 이상 유동의 정보가 각인된 중성자속이 광자로 바로 변환되므로 전환막을 거쳐도 이상 유동의 정보는 그대로 유지된다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 전환막 물질은 LiF-ZnS이다. 중성자가 Li와 반응하여 알파 입자가 생성되고 이 알파 입자가 ZnS 결정과 충돌하여 광자가 생성된다. 이 계열의 전환막은 80년대 초반에 중성자 라디오그래피를 이용한 다상 유동 연구가 시작되면서부터 사용되기 시작한 물질인데 아직도 널리 사용되고 있는 것으로 보아 전환막 관련 기술의 발전은 매우 느린 것으로 생각된다. 최근에는 중성자 및 감마선과 반응하여 특정 파장을 내는 전환막과 감마

선과 반응하여 특정 파장을 내는 전환막을 이중으로 붙인 다색 전환막(multi-color converter)도 개발되었다. 이러한 종류의 전환막은 기존 원자로의 구조상, 필요한 중성자속을 얻는 과정에서 감마선속을 줄이는데 한계가 있는 실험 설비에서 잘 사용될 수 있다.

Image sensing device는 반도체 산업의 발전과 더불어 80년대 후반 이래로 많이 발전한 분야이다. 과거에는 SIT 등이 카메라로 많이 사용되었으나, 이 경우에는 시간분해능이 33 msec(30 frame/sec)로 제한되었다. 최근에는 광자의 양을 10만 배까지 증폭할 수 있는 영상증배관(image intensifier)이 개발되어 고속 카메라와 같이 사용하는 경우에 HSNR(500-1000 frame/sec)도 가능하게 되었고, 중성자속이 상대적으로 낮은 원자로를 이용해서도 HSNR을 시도하고 있다.

카메라를 거친 화상은 영상 획득 장비를 거쳐 grey level로 디지털화되며 영상 분석 프로그램 및 사용자 프로그램을 이용하여 물리적 의미를 지니는 이상 유동 정보로 바뀌게 된다. 영상 획득 장비 및 영상 분석 프로그램은 80년대 말부터 비약적으로 발전한 부분이다. 컴퓨터 기술이 발전하면서 화상처리용 컴퓨터는 micro computer에서 개인용 컴퓨터로 발전하였고, RAM의 용량이 대형화하면서 image board의 buffer memory를 사용하던 기술은 컴퓨터의 RAM을 이용하는 방법으로 대체되었다. RAM을 이용함으로써 image 획득 속도를 빨리 할 수 있으며 RTNR의 경우에는 image 획득부터 다상 유동 정보의 출력까지를 실시간으로 수행하는 것도 가능하게 되었다. 또한, 산업계에서 화상처리 기술이 널리 사용되게 되면서 상용 화상처리 프로그램도 쉽게 구할 수 있게 되었다.

위에 기술한 바와 같이 중성자 래디오그래피를 이용하여 이상 유동을 측정하려면 여러 단계의 신호 변환을 거치게 되는데, 이러한 측정 기술의 발달은 고출력 연구용 원자로의 건설 및 관련 전자 공학 기술의 발전에 힘입은 바 크다고 생각된다. 높은 중성자속의 실현과 image intensifier의 발달로 시간분해능과 공간분해능은 과거보다 많이 향상되었다고 생각되며 앞으로는 측정에 있어서의 잡음 요소를 줄이는 것과 유동의 3차원 측정 분야에서 연구가 많이 진행될 것으로 생각된다.

본 과제에서는 그림 3-1에 있는 이상 유동 실험 계통 중 열은 회색으로 되어 있는 요소를 검토의 대상으로 하였으며, 짙은 회색으로 되어 있는 요소를 과제 예산 내에서 마련하였다.

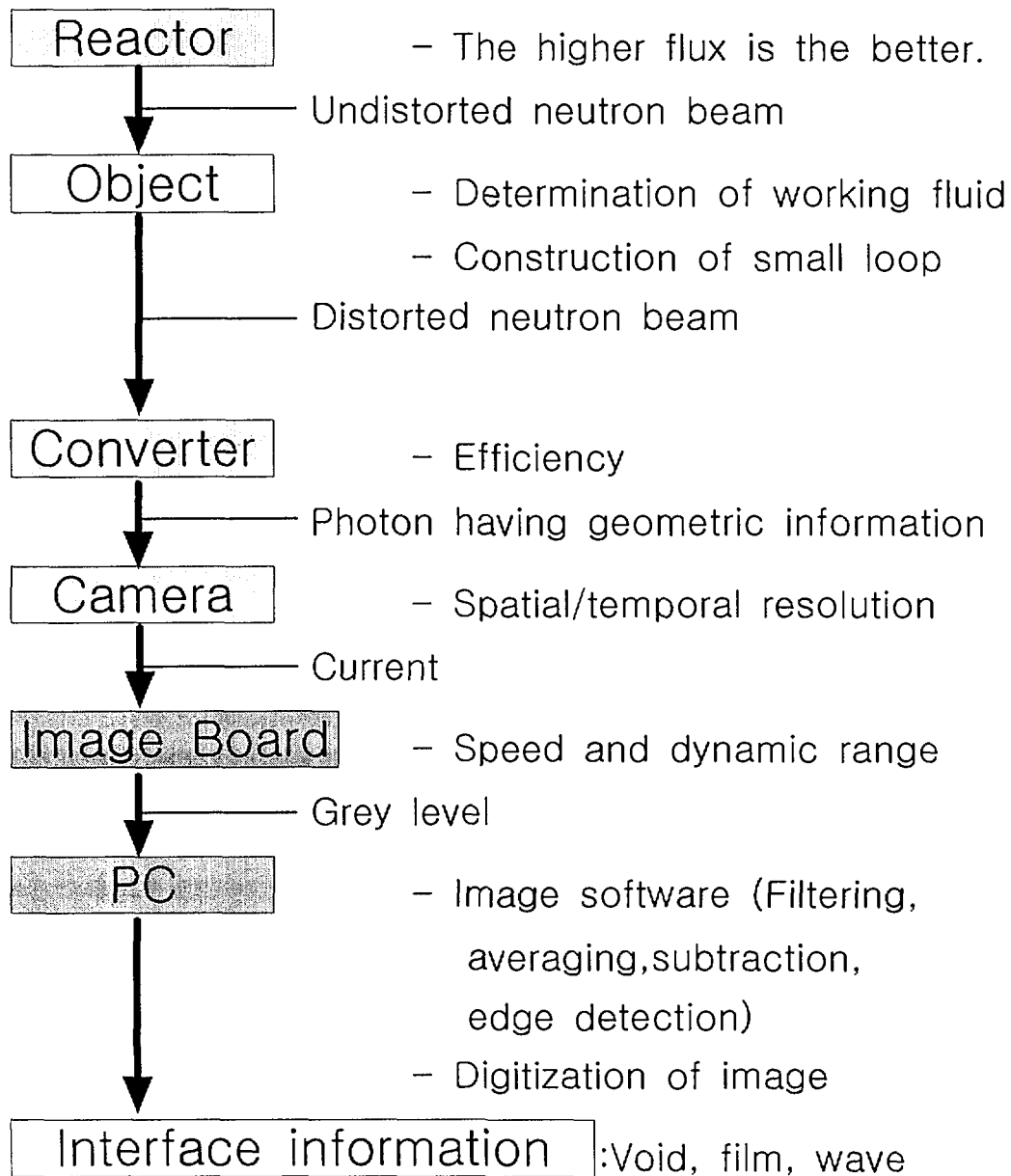


그림 3-1. 중성자 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험 계통

3.1.2 원자로 빔 검토

하나로 노심과 NR 빔 튜브의 배치는 그림 3-2와 같고 NR 빔 튜브에는 그림 3-3과 같은 in-pile collimator가 설치되어 있다. 빔 aperture의 크기는 25 mm로서 B₄C 판을 내포하고 있는 2개의 알루미늄 판을 관통하여 만들어 졌다. 중성자 빔의 반사를 방지하기 위하여 빔 튜브의 내벽에는 보론 고무판이 붙어 있다. Collimator의 설계에는 두 가지 사항이 고려되었다. 첫 번째는 감마선을 최소화하는 것이고 두 번째는 빔을 수평되게 만드는 것이다. 감마선을 줄이기 위하여 길이가 82 mm이고 직경이 50 mm인 다결정 비스무스 필터를 빔 aperture 전단에 설치하였다. 이 비스무스 필터를 거치면서 감마선은 입사속의 3%로 감소하고 열중성자속은 33%로 감소한다[48].

NR 설비의 구조는 그림 3-4와 같다. 제 1 조사실 및 제 2 조사실의 크기는 모두 120 cm(폭)x185 cm(길이)x190 cm(높이)이다. 두 조사실 사이에는 30 cm(폭)x40 cm(높이)의 빔 창이 있다. 조사 시간은 빔 셔터를 개폐함으로써 조절되는데 빔 셔터의 구동에는 15초가 걸린다. 이들 조사실의 공간은 이상 유동 실험 설비를 설치하기에 충분하지 못하다.

실험을 통하여 얻은 제 2 조사실의 빔 특성은 표 3-1과 같다. 이 표에는 래디오그래피를 이용한 이상 유동 연구를 활발하게 수행하고 있는 JRR-3M NR 설비의 빔 특성[31] 및 HSNR을 시도하기에 유망한 BNCT 설비에서의 빔 특성[52]도 같이 나타내었다. 열중성자속이 높을수록 밝은 화상을 얻을 수 있고, n/γ 비가 클수록 감마선에 의한 잡음을 줄일 수 있어 좋다. L/D가 클수록 해상도가 좋아진다. 하나로 출력의 출력이 JRR-3M에 비하여 높음에도 NR 조사실에서의 중성자속이 하나로 경우가 더 낮은 이유는 빔 튜브 노즈의 위치와 빔 튜브 노즈로부터 조사 위치까지의 거리의 차이에 기인한다고 생각된다. 또한 이 표에서 현 NR 조사실보다 BNCT 조사실을 이용하는 경우 HSNR도 가능한 매우 좋은 빔을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

BNCT 조사실의 모습은 그림 3-5에서 3-8과 같다. 조사실의 넓이는 6×4.3 m² 정도이고 높이는 3.5 m[53]로서, 이상 유동 실험에 필요한 실험 설비를 설치하기에 충분한 공간이다.

이상과 같이 빔의 특성 측면이나 공간적 측면에서 래디오그래피를 활용한 이상 유동 실험을 하기에는 현 NR 설비보다는 BNCT 조사실이 훨씬 유리하다.

표 3-1. 원자로 빔 특성 비교

	JRR-3M NR (20 MW)	하나로 NR 제 2 조사실 (30 MW)	하나로 BNCT (30 MW)
열중성자속 (n/cm ² -s)	1.5E8	5.4E6	3.0E8
N/γ (n/mR-cm ²)	6.3E6	1.6E6	1.5E8
L/D	176	266	측정 필요

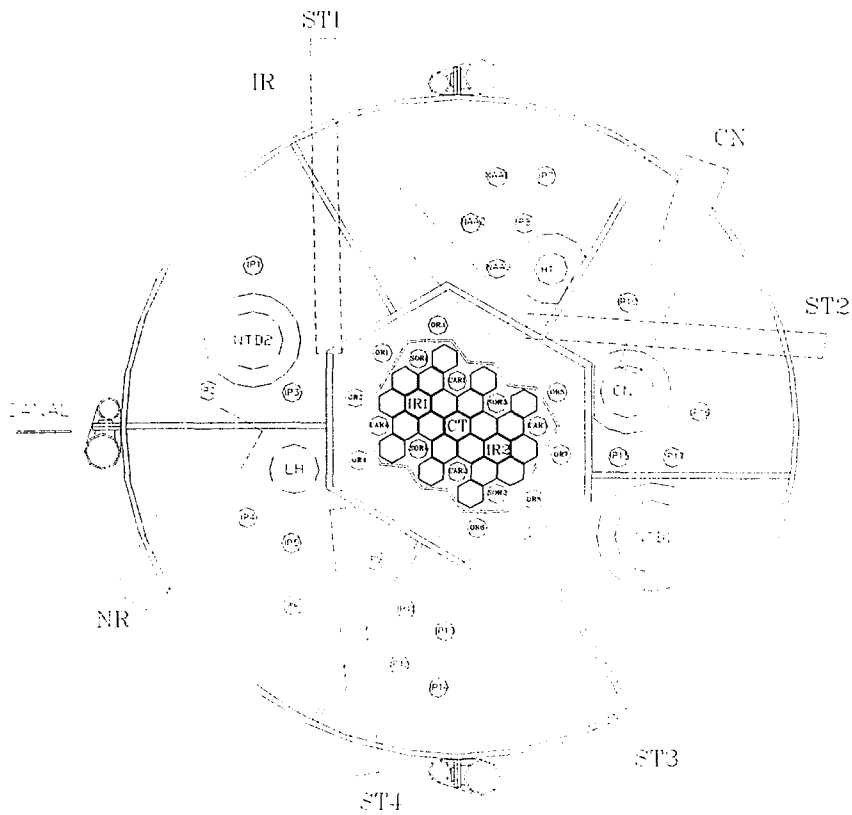


그림 3-2. 하나로 노심과 빔 튜브의 배치

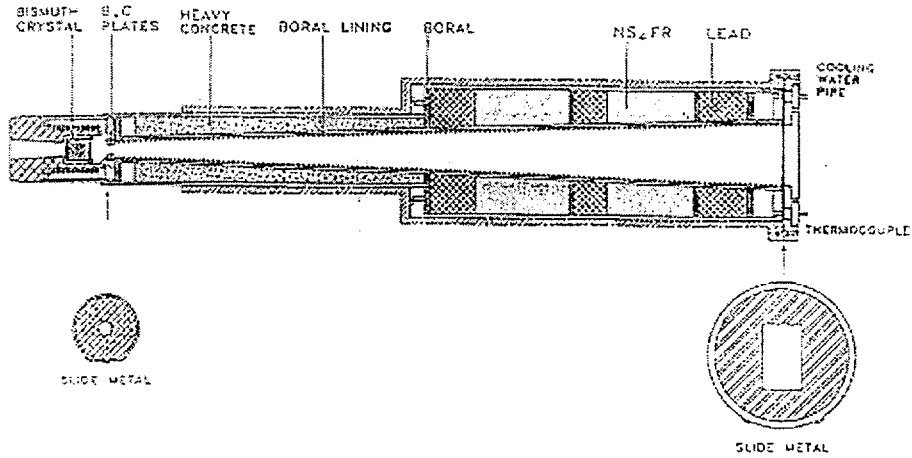
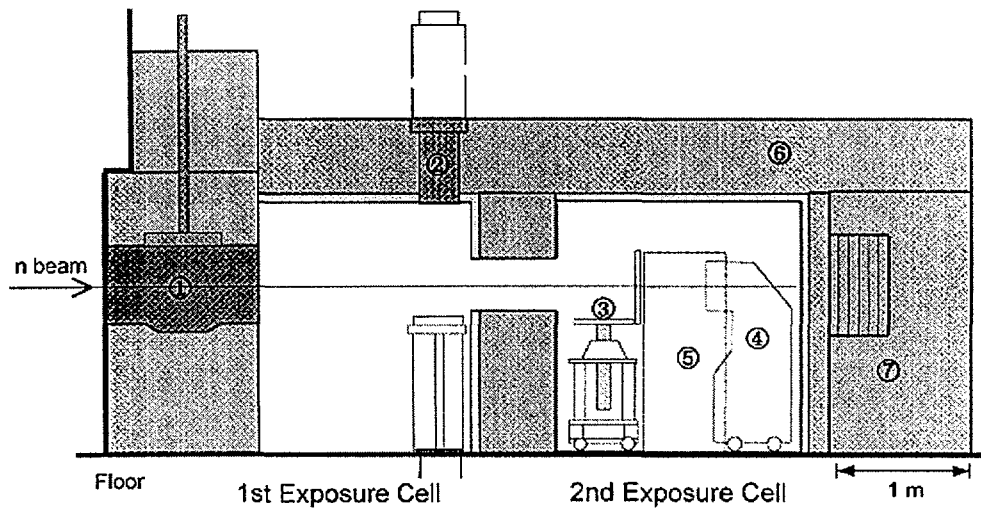


그림 3-3. NR 빔튜브의 collimator[48]



- | | |
|----------------------|--|
| 1. Main beam shutter | 2. High-radioactive material access plug |
| 3. Sample table | 4. Image processing TV camera box |
| 5. Entrance door | 6, 7. Shielding (polyethylene, steel and concrete) |

그림 3-4. 현 NR 조사실의 구조[48]

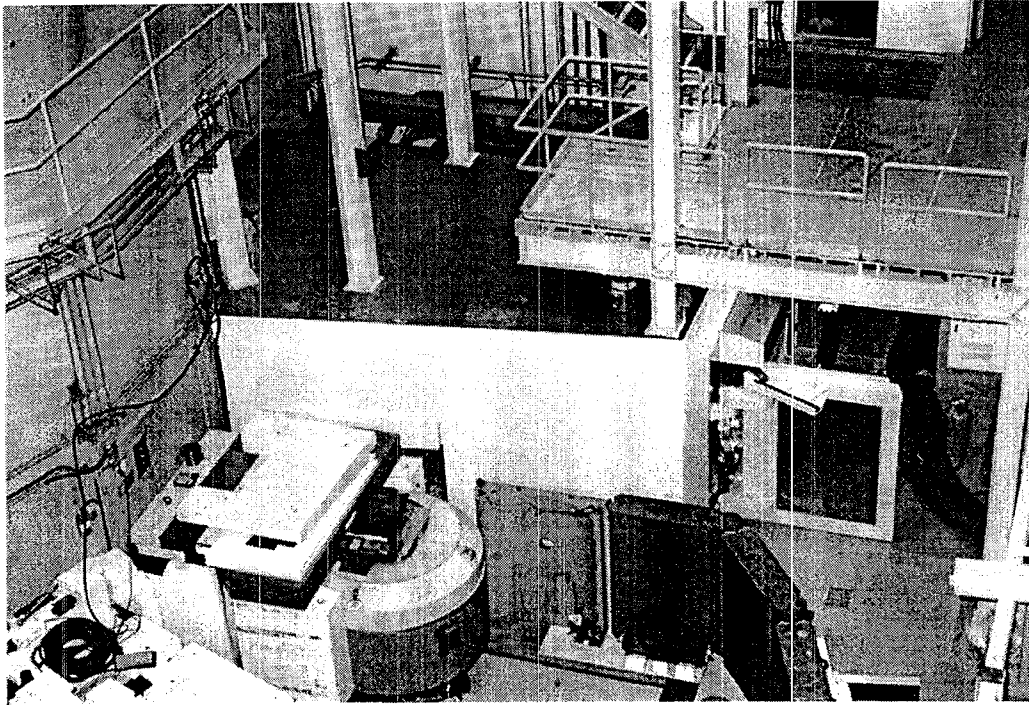


그림 3-5. BNCT 조사실의 외관[53]

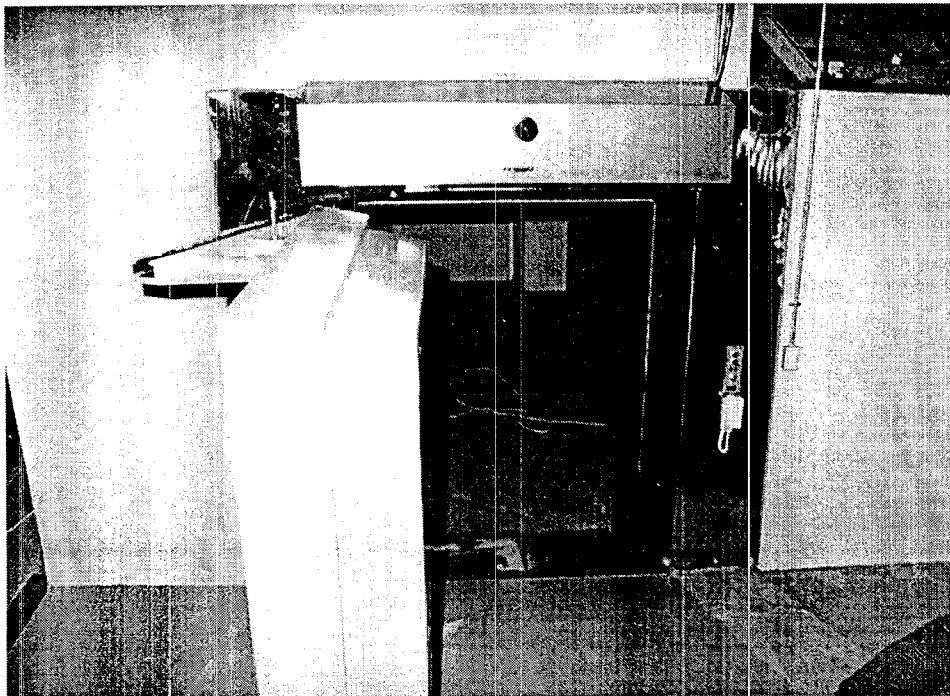


그림 3-6. BNCT 조사실의 입구[53]

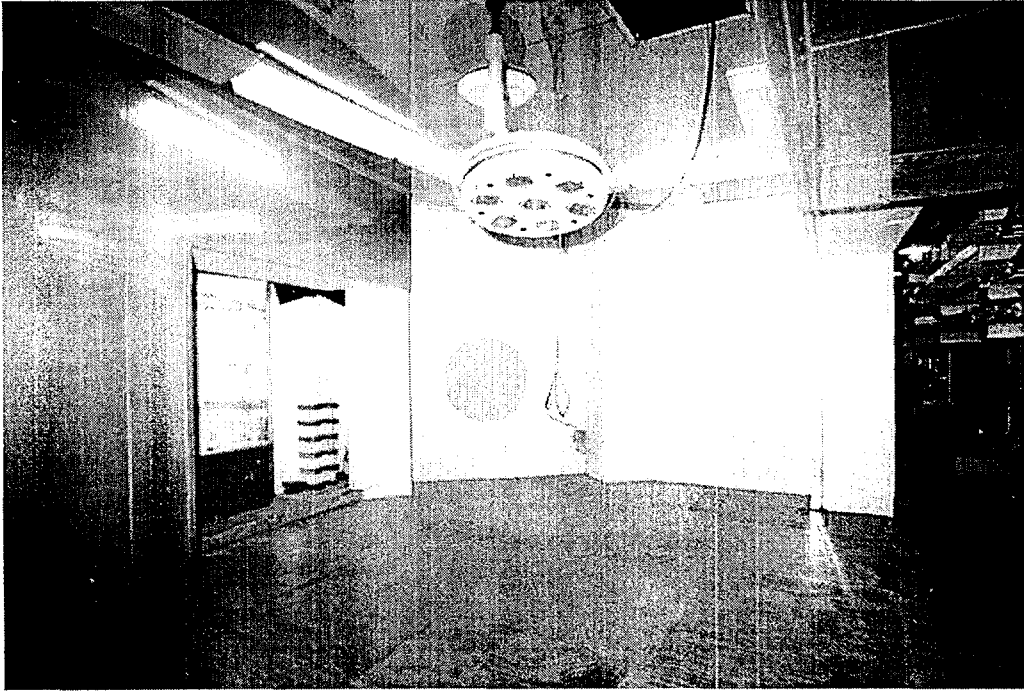


그림 3-7. BNCT 조사실 내부의 모습[53]

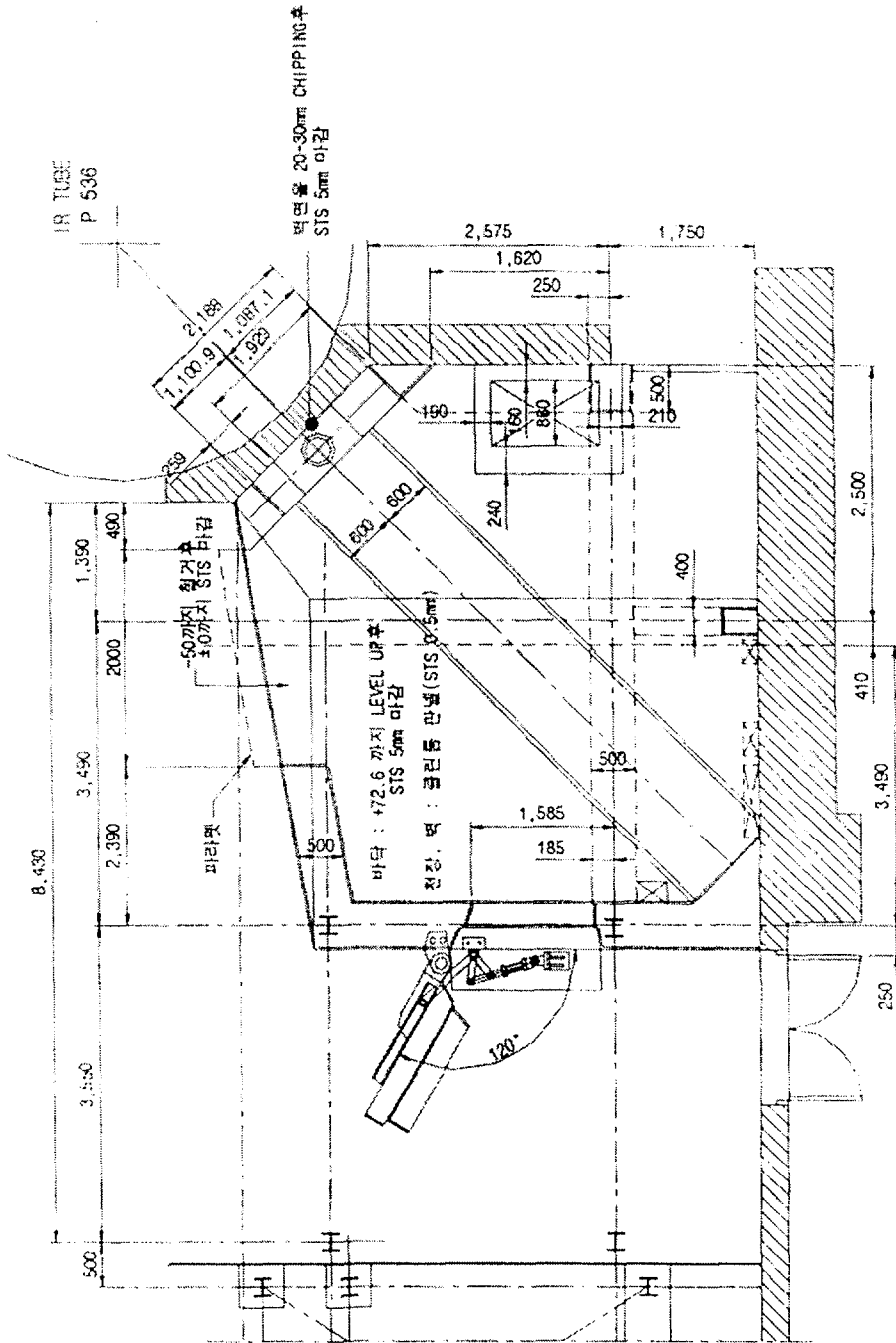


그림 3-8. BNCT 조사실의 평면도[53]

3.1.3 카메라 검토

중성자 라디오그래피에 사용되는 카메라는 Orthicon과 SIT, CCD 등이다. 이 중, Orthicon과 SIT는 촬상관(Camera tube) 형으로서 그림 3-9에 있는 것과 같이 다른 촬상관에 비하여 감도가 높다. 이들 카메라의 특성을 기술하면 아래와 같다.

3.1.3.1 Orthicon

Orthicon은 X-ray용 카메라인데 KURRI에서의 초기 연구에서 활용하였다 [24,25]. Orthicon은 iconoscope의 한 변형이다. Iconoscope는 서로 절연된 광전자 방출 미립자를 절연판 위에 आरो새겨 모자이크 형상의 타겟으로 삼고, 여기에 결상된 광학상에 대응하여 축적된 상전하(像電荷)를 1000V 정도로 가속한 전자빔으로 주사하여 타겟 뒷면의 신호전극에서 출력을 빼내게 되어 있는 촬상관이다. 축적형으로서 처음으로 실용화된 관인데 1933년 RCA 사에서 발표되었으며, 그 후 촬상관의 모체가 되었다. Orthicon은 타겟에 수십 V 이하의 저속도 전자빔을 주사하는 촬상관으로 1939년에 RCA사가 발표하였다[55]. 그러나, 이를 사용한 경우에 공간 분해능이 나쁘고 contrast가 나빠 초기의 연구 이후에는 사용하지 않고 있다.

3.1.3.2 SIT(Silicon Intensifier Target)

SIT는 현재 real-time radiography에 있어 가장 널리 사용되고 있다 [31,44,56]. SIT는 광전면과 실리콘 증배 타겟, 전자빔 주사부분으로 구성되는데, 광전면상의 광학상에 대응하여 생긴 광전류를 3-10 kV로 가속하여 실리콘 모자이크 다이오드 증배 타겟에 결상하고 거기서 그 신호 광전류의 증배와 축적을 한다. 이 타겟에 저속의 전자빔으로 주사하여 출력을 얻는다. 실리콘 증배 타겟은 실리콘 비디콘과 유사한 구조이고, 입력 고속 전자가 그 수십배 내지 수천배의 도전 캐리어를 발생하기 때문에 매우 감도가 높다. 1969년 일본의 도시바사에서 SEM(silicon electron multiplication)관이라고 명명하여 발표했고, 이어서 RCA사에서 SIT관이라고 명명하여 발표했다. 다른 종류의 촬상관과 마찬가지로 선형성은 떨어진다. 최근에는 SIT 앞에 image intensifier를 붙여 감도를 향상시킨 ISIT도 나온다.

3.1.3.3 CCD(Charge Coupled Device)[57]

CCD라는 것은 빛 즉, photon을 전자로 변환시켜 주는 전자 센서이다. 우리가 CCD 센서라고 하는 것은 일반적으로 line array나 area array 형태로 배치되는 많은 각각의 CCD의 배열을 의미한다. 이미지 센서에서 각각의 CCD element들을 pixel이라고 부른다. 그것의 크기는 대개 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 혹은 100 pixels/mm 정도

이다. 이러한 pixel들의 역할을 그림 3-10에 단면으로 나타내었다. CCD는 절연용 산화층(insulating oxide layer), n-layer(anode), 그리고 p-layer(cathode)의 표면에 금속도체(metal conductors)를 입힌 반도체 substrate(대개는 실리콘)에 설치된다. 금속 도체들과 p-layer 사이에 생기는 작은 전위차라도 반도체내에서는 전기장을 발생시키게 된다. Electron이 부족함에 따라서 각 pixel의 밑에서 발생된 전기장의 국부적인 최소값이 발생하게 되고 이를 potential well이라고 부른다. 본질적으로 potential well은 charge 즉, electron 들을 저장하는 capacitor에 상응한다. 적당한 파장의 photon이 반도체의 p-n junction에 들어갈 때에 electron-hole pair가 생성된다. 물리적으로 이러한 효과는 photoelectron 효과로 알려져 있다. Positive charge의 carrier로서 hole이 p-layer에 흡수되는 동안 생성된 electron은 전기장의 기울기에 따라 최소값쪽으로 즉, potential well로 이동한다. Electron들은 pixel이 빛에 노출되는 동안 계속적으로 축적된다. 그러나, pixel의 저장 용량은 한계가 있다. 대개의 CCD 센서들은 pixel당 10,000개에서 100,000개의 전자를 수용할 수 있는 full-well capacity를 가지고 있다. 노출되는 동안에 축적되는 전자의 수가 이 허용한계를 초과하게 되면(과노출, overexposure), 여분의 전자들은 image blooming을 일으켜서 옆의 pixel로 이동한다. 최근의 CCD 센서들은 특수한 specialized anti-blooming architecture를 사용하여 이 효과를 크게 감소시키고 있다.

Pixel의 또 다른 특징은 그 광학적 반응 면적과 총면적의 비로 정의되는 fill factor란 aperture를 들 수 있다. 이 값은 특징의 후방 조명 센서에 대해서 100%를 가지며 interline-transfer 방식의 CCD 센서는 15% 정도로 낮은 값을 가지는 경우도 있다. Pixel들의 aperture가 제한되는 주된 이유로는 센서 표면의 불투명한 부분이라든가 potential well 형성과 read-out port로 charge를 이동시키는데 사용되는 metal conductor나 국부적으로 charge를 저장하기 위해 masking하는 면적에 기인한다. Fill factor를 향상시키는 데에는 두 가지 방법이 있다. Back-thinning 법은 값비싼 방법으로 substrate 후방을 수십 마이크로 정도 제거하여 센서가 후방으로부터 노출되도록 하는 기법이다. Back-thinned CCD는 주문 생산형으로 종종 천문학과 분광학 분야에 사용된다. 또한, 이 기법은 모아진 charge를 임시로 저장하기 위한 불투명한 부분이 필요하기 때문에 모든 CCD architecture에 적용할 수 없다. 보다 경제적으로 fill factor를 향상시킬 수 있는 대안으로는 각각의 pixel에 보다 많은 입사광을 모을 수 있도록 센서 위에 마이크로 렌즈 배영을 만드는 방법이다. 이 방법으로 pixel의 light sensitivity를 3배까지 향상시킬 수 있다.

CCD 카메라는 고속 중성자 라디오그래피에 사용되고 있다[36,58]. CCD 카메라를 사용하는 경우에는 빛의 양을 증가시키기 위하여 image intensifier를 전면부에 부착하여 사용한다. Image intensifier는 관전음극과 형광면 사이에 전자증배 기구를 갖추어 높은 휘도 증배를 하게 하는 것이다.

3.1.3.4 이상 유동 연구 필요한 하나로 NR 카메라의 선택

앞에서 기술하였듯이 하나로에서 목표로 하는 것은 BNCT 조사실에서의 고속 래디오그래피이다. 이를 위해서는 image intensifier와 공간 분해능이 뛰어난 CCD가 필요하다. 시중에서 구할 수 있는 카메라의 규격은 표 3-2와 같고 시중에서 구할 수 있는 image intensifier의 규격을 표 3-3에 정리하였다. 표 3-2에서 알 수 있듯이 가장 공간분해능이 가장 우수한 카메라는 Photron사의 CCN500이다. 이 카메라의 영상 획득 속도는 500 fps로서 일본에서의 연구 결과를 볼 때에 이상 유동을 촬영하기에 충분한 속도이다.

표 3-2. 카메라의 규격 비교

종류	제조회사	모델명	Sensor 종류	해상도(HxV)	Speed(fps)	최소 휘도 (lux)
SIT	Kongsberg	OE1324(color)	Photocathode	700x525	30	10^{-4}
ISIT	"	OE1325(color)	Photocathode	500x525	30	5×10^{-6}
ICCD	"	OE13-100/101 (color)	CCD	500x525	30	6×10^{-6}
High speed Camera	NAC	Memrecam Micro Camera(color)		510x484	100-500	
	"	HSV 500 C ³ (color)	solid state image sensor	510x485	125	
	"	HVS-1000 (color)	MOS	460x350	500	
	"	Memrecam Ci Digital(color)	CMD	572x434	100-2,000	
	"	Memrecam Ci /Rx-2 Digital(color)	CMD	510x484	100-500	
	"	Hi-cam(8bit)		480x420	60-8,000	
	Photron	Ultima-40K (8bit)	MOS	256x256	30-4,500	
		Ultima-I2 (8bit)	MOS	256x256	30-4,500	
		Super 10K (8bit)	CCD	512x480	30-250	
		CCN500 (8bit)	CCD	640x480	30-500	
	Spectra (8bit)	MOS	256x256	30-4,500		

표 3-2. 카메라의 규격 비교(계속)

종류	제조회사	모델명	Sensor 종류	해상도(HxV)	Speed(fps)	최소 휘도 (lux)
High speed Camera	Kodak	SR-500 (8bit)	CCD	512x480	30-250	
		SR-1000 (8bit)	CCD	256x240	1000	
		SR-ultra (8bit)	CCD	256x120	2000	
		4540 (8bit)	CCD	256x256	20-4,500	
		RO Imager (8bit)		512x384	250-1,000	
		1012 (8bit)	NMOS	192x239	50-1,000	
		2000 (8bit)		512x384	30-2,000	

표 3-3. Image intensifier의 규격 비교

제조회사	모델명	Wavelength of maximum gain (nm)	Radiant Emittance gain ($W/m^2/W/m^2$)	Limiting resolution (line pair/mm)	Minimum Effective Diameter (mm)	Effective coupling
Hamamatsu	V2697U	430	8700	30	18	CCD, Vidicon
	V3346U	430	8700	30	25	CCD, Vidicon
	V4170U	430	4×10^6	25	18	CCD
	V5180U	430	8700	30	40	CCD
	V7363A	430			25	CCD, Vidicon
	V7670U	430	6800	48	25	CCD, Vidicon

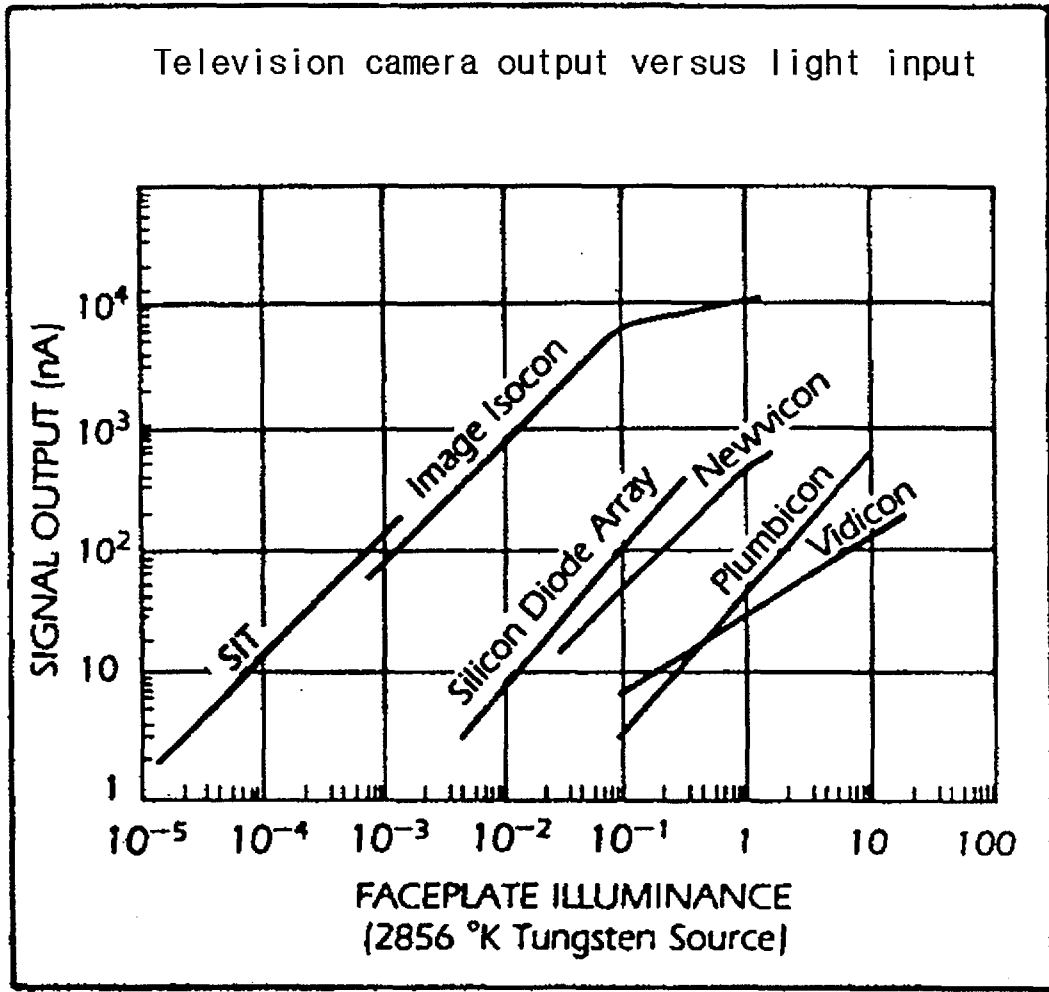


그림 3-9. 촬상관의 특성 비교[54]

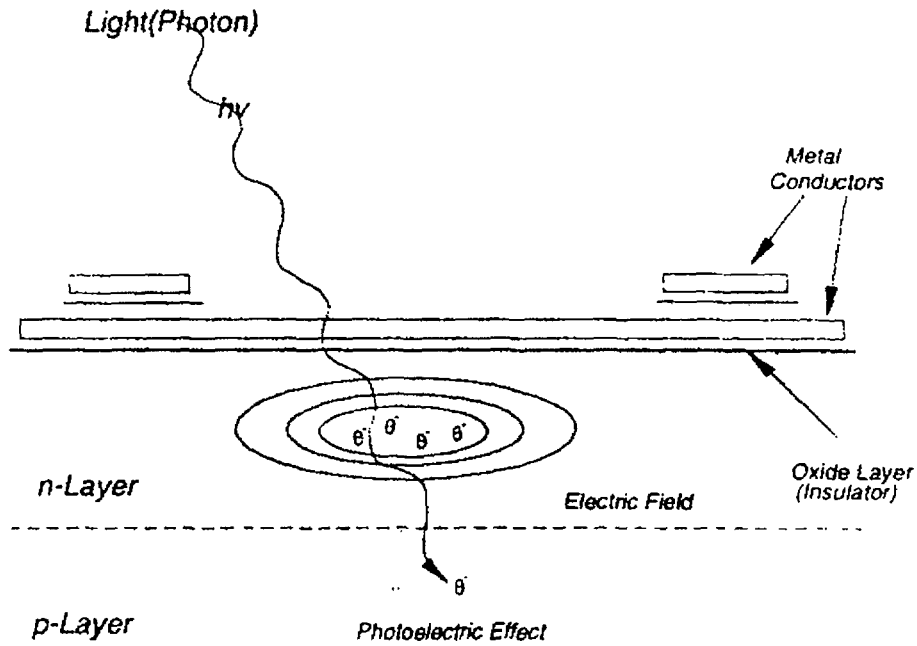


그림 3-10. CCD Pixel의 일반적인 구조

3.1.4 전환막의 검토

현재 하나로 중성자 라디오그래피 시설에 설치되어 있는 전환막이 고속 중성자 라디오그래피를 구현하는데 적절한 지를 검토하였다.

전환막은 중성자를 빛으로 변환시키는 역할을 하는데 이들의 일반적인 구조는 그림 3-11과 같다[33]. 그림 3-11에서 중성자를 흡수하여 빛을 발하는 부분은 형광층인데 이 형광층은 열중성자와의 반응 단면적이 크고 반응을 통하여 알파선, 베타선 혹은 감마선을 방출하는 중성자 흡수 물질과 이들 방사선을 흡수하여 발광하는 형광 물질로 구성되어 있다. 전환막에 사용되는 대표적인 중성자 흡수 물질의 특성은 표 3-4와 같다[59]. 형광 물질로는 희토류 금속, 모넨류 혹은 경금속 원소들이 사용되는데 대표적인 물질은 ZnS, Fr, Tb 등이다. 이들 물질을 이용한 대표적인 전환막들은 표 3-5와 같다.

전환막은 다음의 요구 조건을 갖추어야 한다.

- 공간분해능(resolution)이 좋아야 한다.

- 통계적 특성이 좋아야 한다.
- 발광능(light sensitivity)이 좋아야 한다.
- 감쇄 시간이 짧아야 한다.

고속 중성자 래디오그래피의 구현에 필요한 전환막의 특성에 대한 연구는 Bossi[4], Hibiki[33], Suzuki[60] 및 Brenizer[61] 등에 의하여 수행된 바 있다.

Bossi[4]는 전환막에 대한 특성 연구를 통하여 다음의 결과를 얻었다.

- Gd_2O_3S 와 $GdOBr$ 이 공간분해능 측면에서는 가장 우수하나 감쇄 시간이 $400 \mu s$ 로서 고속 래디오그래피를 구현하기에는 너무 길다.
- 유리 형광체의 감쇄 시간은 40-60 ns로서 감쇄 시간 측면에서는 우수하나 발광능이 낮다.
- ZnS 형광체의 형광은 두 가지 요소로 구성되어 있는데 그들의 감쇄 시간은 각각 40-100 ns, 40-100 μs 이다. 이를 형광체로 사용하는 경우에 중성자 흡수 물질로는 6LiF 나 ${}^{10}B$ 를 사용할 수 있는데 발광능은 6LiF 를 사용하는 경우가 더 우수하다.

Suzuki[60]는 ${}^6LiF/ZnS:Ag$ 나 $Gd_2O_3/ZnS:Ag$ 를 사용하는 50 여종의 전환막의 특성을 연구하여 다음의 결과를 얻었다.

- 그림 3-12에 있는 바와 같이 ${}^6LiF/ZnS:Ag$ 의 발광능은 $Gd_2O_3/ZnS:Ag$ 나 Gd 에 비해 각각 50배, 100배 뛰어나다.
- 형광물의 코팅량에 비례하여 발광능은 증가하나 50 mg/cm^2 이상이 되면 발광능의 증가는 미미하다.

이상의 결과를 통하여 현재 하나로에 사용하고 있는 ${}^6LiF/ZnS:Ag$ 를 형광물질로 사용하는 NE426 전환막은 고속 중성자 래디오그래피에 적절한 물질로 판단된다.

하나로의 NR 설비에 설치되어 있는 전환막의 성능을 검증하여 보기 위하여 전환막 후면에서의 조도를 측정하고[62], 이를 이론적인 계산값과 비교하여 보았다. 측정은 2000년 9월 22일에 16:00부터 16:30 사이에 수행되었고 이 때 원자로 출력은 24 MW, 제어봉은 347 mm 인출된 상태이었다. 조도 측정에는 UDT 211 조명도계가 사용되었는데, 그림 3-13과 같은 측정 위치에서의 측정 결과는 표 3-6 및 그림 3-14와 같다. 한편, NE426 전환막을 만드는 Nuclear Enterprise사의 자료[63]에 의하면 $LiF/ZnS:Ag$ 전환막은 한 개의 중성자 당 약 1.9×10^5 개의 photon을 만들어 낸다. 1 lm 세기의 백색광은 1.3×10^{16} photons/s 해당하는데[64] 이 중 blue light는 약 10% 이므로 blue light의 경우에는 1.3×10^{17} photons/s의 경우가 1 lm에 해당한다. 또, 1 lm/cm^2 는 1000 ft-cd에 해당하고 1 lx는 0.0929 ft-cd이다. 이 관계를 이용하여 KUR[21]과 하나로의 경우에 대하여 측정값과 계산값을 비교하면 표 3-7과 같다. 이 결과를 보면 KUR의 경우에는 측정값과 계산값이 매우 유사하고 하나로의 경우에는 측정값이 계산값의 90% 정도에 이르는 것을 알 수 있다.

Bossi[4]는 LiF/ZnS를 전환막으로 사용하는 경우에 ZnS와 LiF의 혼합비, 형광물(ZnS) 입자의 크기 및 형광층의 두께가 발광능에 미치는 영향을 연구하였다. 그의 연구 결과에 따르면, 형광층의 두께가 증가할수록 전환막의 발광능은 증가하나 너무 두꺼워지면 발광층내에서 빛의 산란이 커져 분해능이 감소한다. 따라서, 최적의 형광층의 두께로 0.1-0.24 mm를 제시하였다. Bossi의 ZnS/LiF 혼합비 및 혼합물 입자의 크기에 대한 연구 결과는 그림 3-15와 같다. 이 그림에서 혼합비의 측면에서 보면 발광능을 최대로 할 수 있는 최적의 혼합비가 존재함을 알 수 있다. 혼합비가 최적의 혼합비보다 커지는 경우에는 발광능의 감소율이 적지만 최적치보다 작아지는 경우에는 발광능의 감소율이 큼을 알 수 있고, 그 감소의 정도는 형광물 입자의 크기가 60 μm 보다 작은 경우가 이보다 큰 경우보다 큼을 알 수 있다. 또한, 혼합비가 2 이하인 경우에 입자가 크면 클수록 발광능은 감소함을 알 수 있다.

전환막에서의 발광은 핵반응 및 형광물에서의 전자의 여기에 의하여 발생하고 이들 과정은 통계적 특성을 지니고 있다. 이 통계적 특성은 분해능에 영향을 미쳐서 fluence가 어느 한계치 이하가 되면 분해능이 감소하게 된다. 통계적 특성이 전환막의 분해능에 영향을 주지 않는 최소의 fluence가 형광체마다 존재하는데 Bossi[4]는 LiF/ZnS를 사용하는 경우에 이 값이 10^7 n/cm² 임을 실험적으로 입증하였다. 30 MW 운전시에 하나로 NR 제 2 조사실에서의 중성자속이 5.4×10^6 n/cm²·s 이고 BNCT 조사실에서의 중성자속이 3.0×10^6 n/cm²·s 이므로 각 설비에서 최고의 분해능을 유지할 수 있는 frame rate 는 각각 0.5 및 30 fps 임을 알 수 있다.

3.1.5 Frame Grabber의 구매

Frame grabber는 카메라에서 오는 전류 신호를 디지털화하는 장비이다. Frame grabber의 선택에 있어 고려하여야 하는 것은 아래와 같다.

- 입력 신호 방식
- 디지털 출력 신호의 bit수
- Spatial resolution
- 신호의 저장 방법

카메라에서 나오는 신호의 표준은 흑백의 경우에는 RS170과 CCIR 방식이 있으며 컬러의 경우에는 NTSC 방법과 PAL 방식이 있다. Frame grabber를 넓은 용도로 사용하기 위해서는 어떤 표준에 따른 신호라도 처리할 수 있는 것이 좋다. 디지털 출력 신호의 bit수가 클수록 dynamic range가 커져서 좋으나 빔의 강도 즉, 전류의 강도가 세다면 크게 문제되지 않는다. Spatial resolution은 클수록 좋다. 신호 저장에 있어서는 자체 메모리보다는 컴퓨터의 메모리를 사용하는 것이 처리 속도가 빨라서 좋다. 이들 사항을 고려하여 Data Translation사의 DT3152를 구비하였으며 그 특성은 표 3-8과 같다.

표 3-4. 전환막에 사용되는 대표적인 중성자 흡수 물질

Material	Abundance of parent isotope (%)	Mode of production of active isotope	Cross-sections (barns)	Half-life	Emission	
					Type	Max. Energy (MeV)
Litium	7.4	$\text{Li}^6(n, \alpha)\text{H}^3$	935	Stable	α	4.7
Boron	19.5	$\text{B}^{10}(n, \alpha)\text{Li}^7$	3,837	Stable	α	2.3
Gadolinium	14.7	$\text{Gd}^{155}(n, e)\text{Gd}^{156}$	58,000	Stable	e	0.14
	15.7	$\text{Gd}^{157}(n, e)\text{Gd}^{158}$	240,000	Stable		0.13

표 3-5. 대표적인 전환막

종류	제조회사
$\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$	Apex Research
$\text{GdOBr}:\text{Er}$	Generic Electric
$\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}:\text{Tb}$	Lockheed, Palo Alto, Ca Konishiroku Photo. Ind. Fuji Film
Ce-glass	Nuclear Enterprises(905)
B/ZnS	Nuclear Enterprises(402)
$\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{ZnS}:\text{Ag}$	Kasei Optonix
$\text{LiF}/\text{ZnS}:\text{Ag}$	Kasei Optonix Nuclear Enterprises(426)
$\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}:\text{Tb}+\text{La}_2\text{O}_3\text{S}:\text{Tb}$	3M(TRIMAX-6)

표 3-6. 하나로 NR 설비에서의 조도 측정 결과

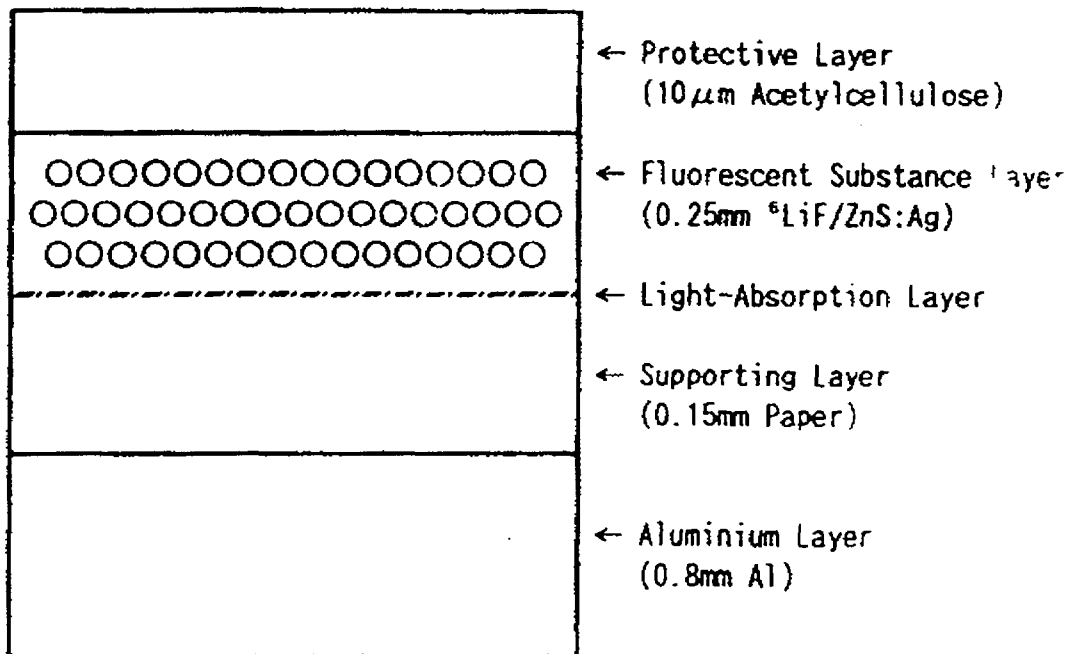
측정 위치 번호	(1)	(2)	(3)	(4)
전환막에서의 거리 (cm)	1	31.5	47.5	76.5
조도 (mlx)	74.9	76.0	65.4	5.43

표 3-7. 하나로와 KUR에서의 전환막 후면에서의 조도 비교

원자로	라디오그래피 설비에서의 중성자속 (n/cm ² ·s)	전환막 종류	전환막 후면의 조도 (mlx)	
			측정값	계산값
KUR	1.2x10 ⁶	NE426	22	19
하나로	4.3x10 ⁶ (24 MW 운전시)	LiF/ZnS:Ag	74.9	68

표 3-8 DT-3152 Frame Grabber의 특성

Spatial Resolution	출력 bit수	입력 신호 방식	신호 저장
4096×4096	8 bit	RS170/CCIR NTSC/PAL	컴퓨터 RAM



Composition of Fluorescent Substance Layer

Weight Ratio of 6 LiF to ZnS:Ag is 4 to 6.
 Weight of 6 LiF/ZnS:Ag is about 45 mg/cm².
 Particle size of 6 LiF is about 8 μ m.
 Particle size of ZnS:Ag is about 4 μ m.

그림 3-11. 전환막의 일반적인 구조[33]

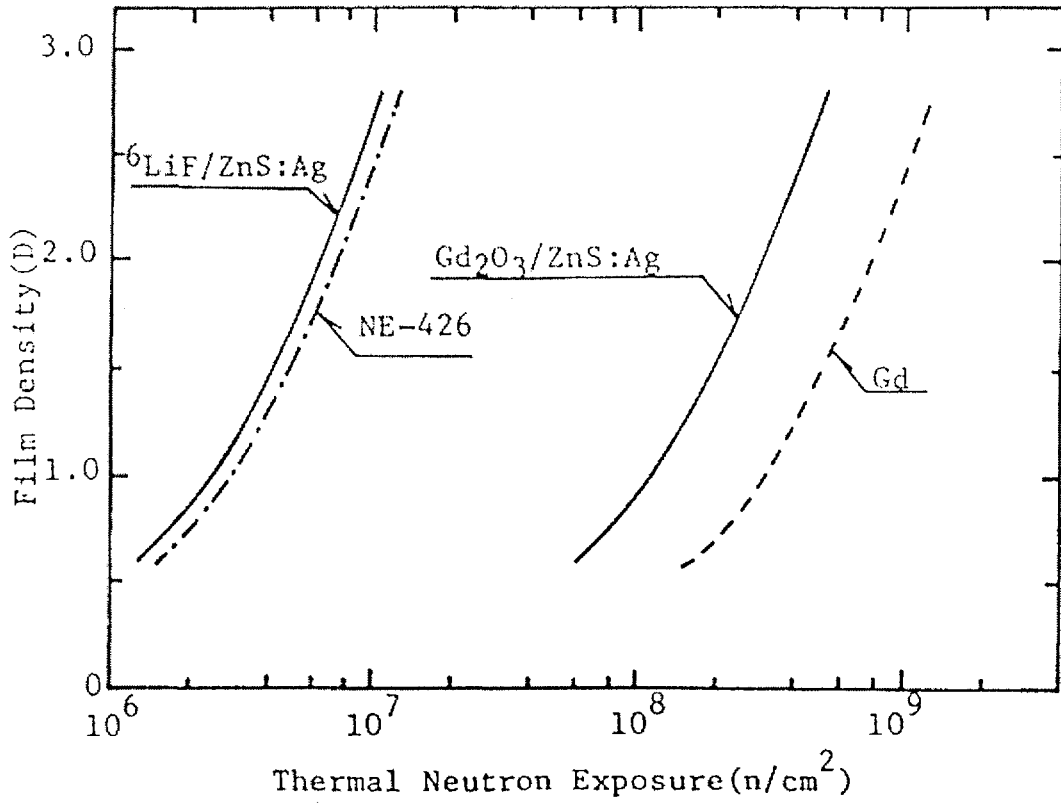


그림 3-12. 전환막의 발광능 비교[60]

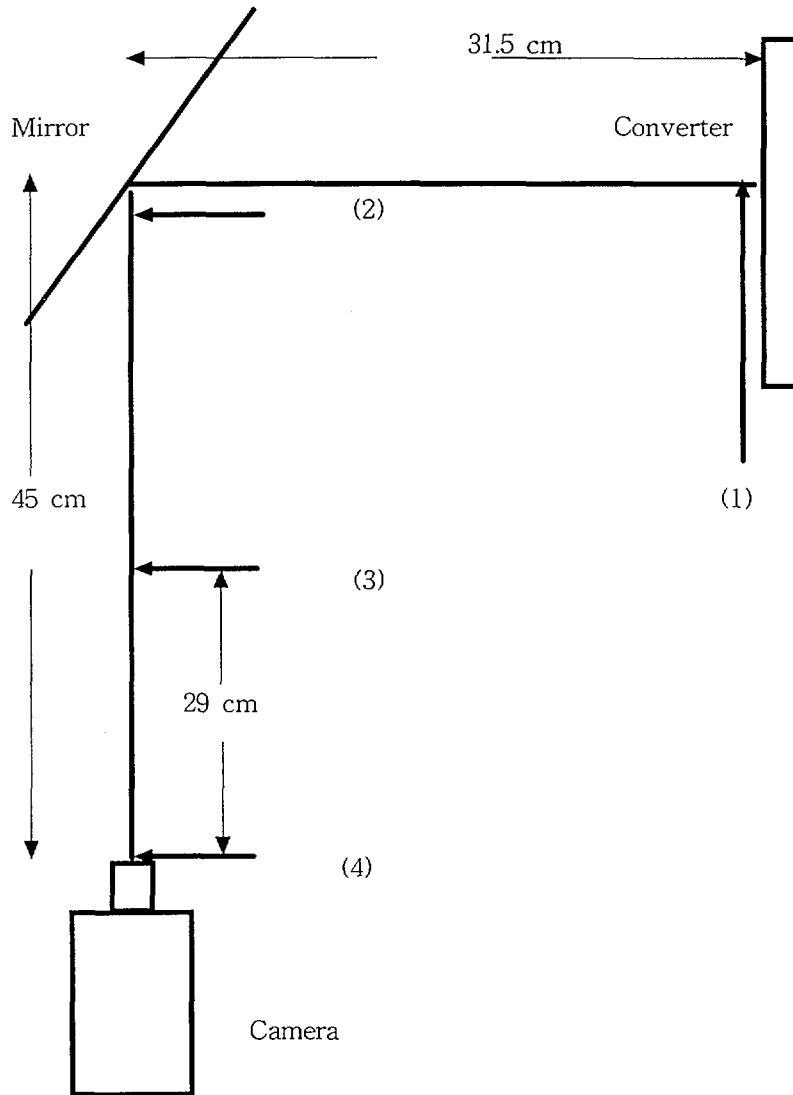


그림 3-13. 하나로 NR 설비에서의 조도 측정 위치

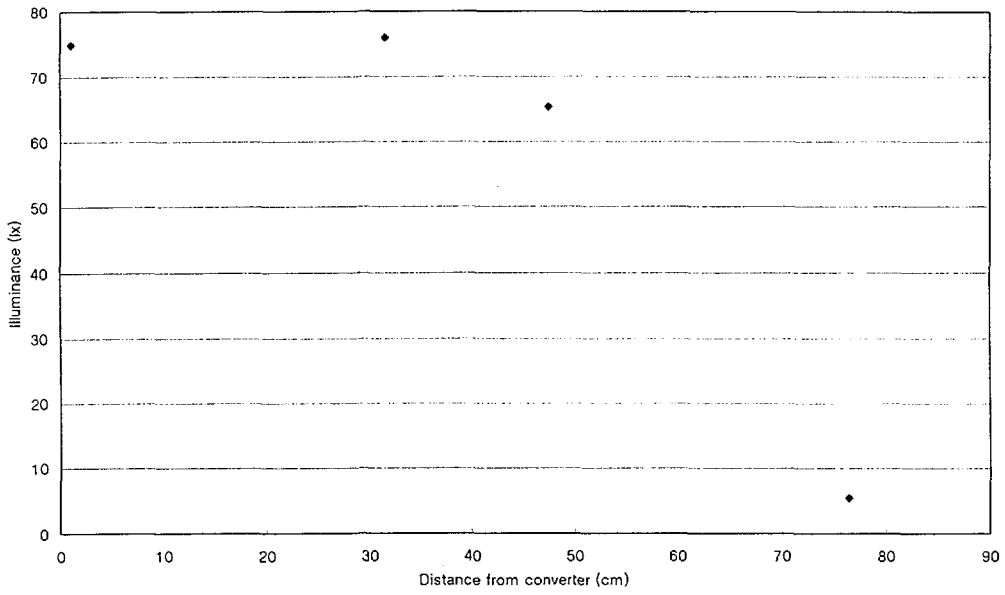


그림 3-14. 하나로 NR 설비에서의 조도 측정 결과

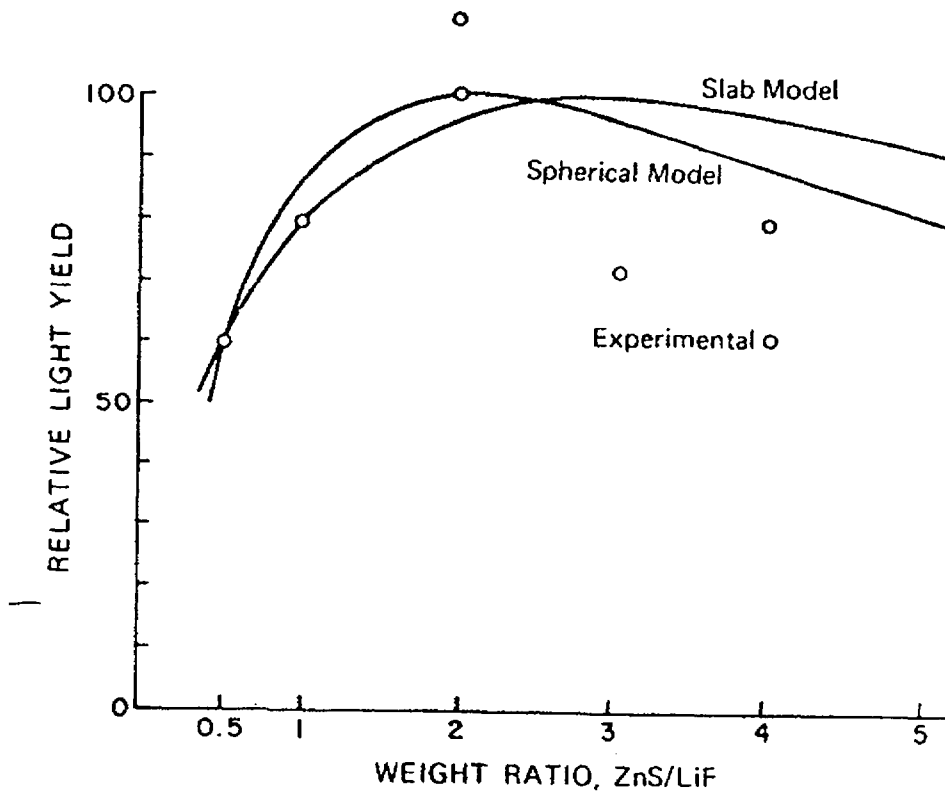


그림 3-15. LiF-ZnS의 발광능[4]

3.1.6 영상 처리 software 및 영상 처리 computer

카메라와 frame grabber를 통하여 획득한 영상을 분석하기 위해서는 영상 처리 software가 있어야 한다. 이를 위하여 Image-pro 4.1을 구입하였다. 이 프로그램은 영상 분석을 위한 범용 프로그램으로서 그 기능이 다양하여 중성자 래디오그래피에 활용하기에 손색이 없으며, 국내에 대리점이 있고, 우리 연구소에서의 사용 실적이 많다.

영상 처리 전용 컴퓨터의 마련에 있어서는 메모리의 크기에 제일 비중을 두었다. 카메라의 해상도가 640×480 인 경우에 한 frame이 차지하는 메모리 용량은 300 kB이다. 500 frame을 frame grabber로 처리하는데 필요한 메모리 용량은 150 MB이다. 이를 고려하여 메모리를 512 MB를 결정하였는데 이는 CCN500을 최고 속도로 사용할 때에 3초간의 촬영분량에 해당하는 양이다. 영상 처리 전용으로 구비한 컴퓨터의 주요 사양은 아래와 같다.

- CPU: Pentium-III Dual 800 MHz
- 메모리: 512 MB
- Main board: Tyan PDVIA
- Graphic card: AGP 32 MB MGA G-400

제 2 절 이상 유동 실험 수요 및 실험 요건 파악

중성자 래디오그래피를 이용한 이상 유동 실험에 대한 외국의 연구물과 안전성 관련 과제들의 결과물 검토 및 안전성 관련 연구자들과의 대화를 통하여 다음의 열수력 실험 항목들을 고속 중성자 래디오그래피를 이용하여 수행한다면 기존의 방법을 이용한 실험보다 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

- A. Pb-Bi 냉각재와 물의 접촉시의 유동 가시화 연구
- B. 얇은 갭에서의 CHF 현상
- C. 각 이상 유동 flow regime에서의 기포 분포, 기포 모양, 기포 크기, 계면 면적 밀도 측정
- D. Flow regime transition 시 기포합체, breakup등의 유동 현상
- E. Stratified flow에서 film thickness 측정 및 2D wave 관찰

이들 실험들을 볼 때에 C, D 및 E는 air-water 실험에서도 좋은 자료를 얻을 수 있으며, A, B 실험은 반드시 열원을 필요로 하며 많은 기술을 필요로 한다. 따라서,

중성자 라디오그래피를 이용하는 실험의 경우에는 E-D-C-B-A의 순서로 접근하는 것이 경험적의 측면과 실험 시설의 구축의 복잡성 측면에서 적합하다고 판단된다. 특히 E의 실험은 BNCT 조사실을 이용하지 않고도 현재의 시설에서 능히 수행할 수 있다고 판단된다.

A와 B의 실험을 수행하기 위해서는 열원에 들어가는 전기, 실험 loop를 냉각하기 위한 2차 냉각수가 필요하다. 현재 하나로에 설치되어 있는 전기 설비 용량의 여분은 이들 실험을 감당하기에 충분하며 2차 냉각수로는 현재 사용하고 있지 않은 실험 설비 냉각 계통을 활용할 수 있음을 확인하였다. 또한, 온도, 압력 및 유량과 같은 공정 변수의 처리와 저장에는 하나로 계장 핵연료 조사시험에 사용한 data acquisition 계통을 사용할 수 있어 추가의 비용이 들지 않을 것이다.

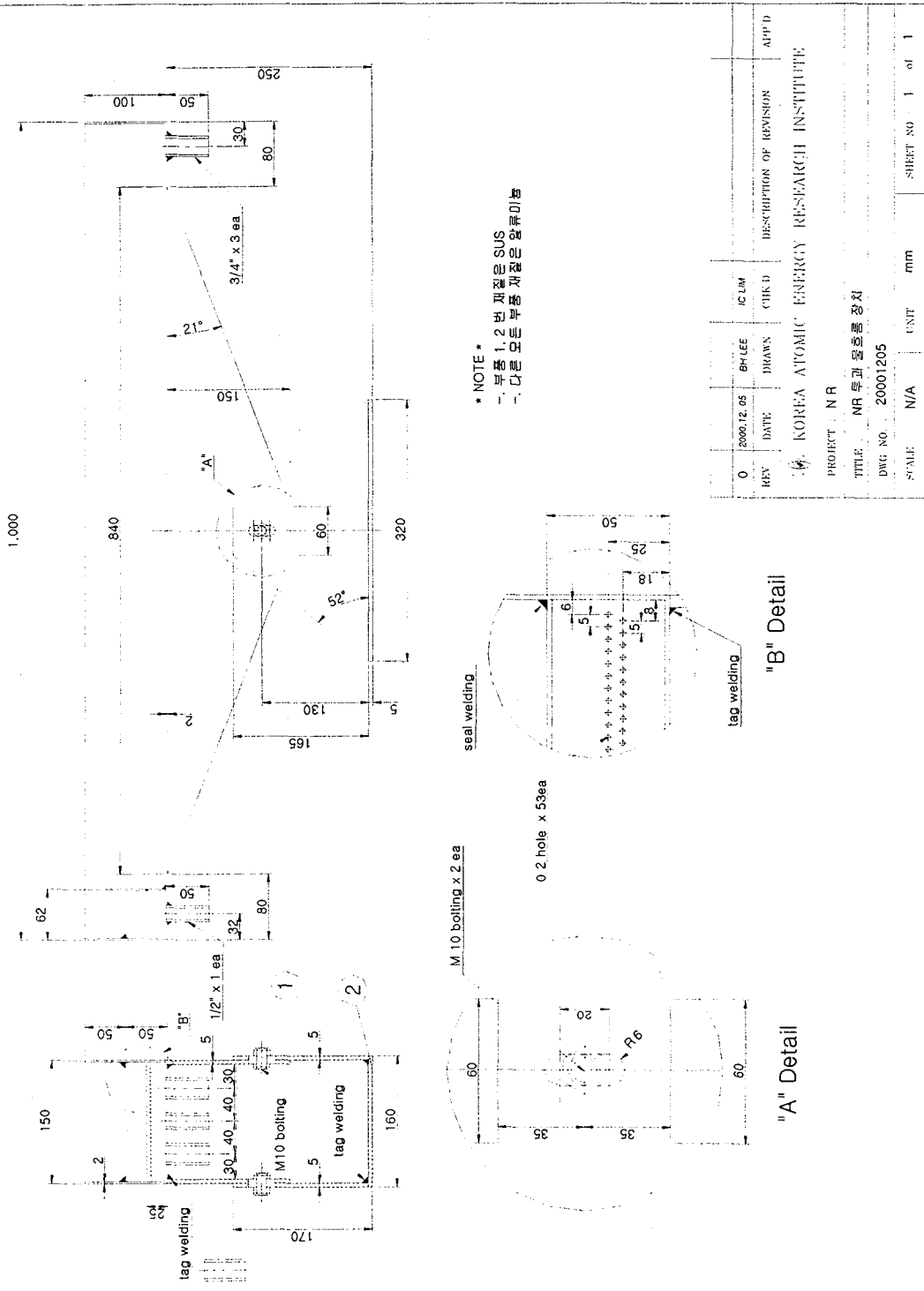
과제를 수행하며 예산의 잔여분이 발생하였고 이 예산을 활용하여 그림 3-16과 같이 film flow를 실험할 수 있는 실험 장치를 제작하였다. 실험 장치이외에 실험을 구현하기에 필요한 부대 장비는 적은 돈으로 마련할 수 있으며 중성자빔 이용연구 과제의 도움을 받아 2001년에 수행할 예정이다.

제 3 절 동적 현상 분석을 위한 특성 실험

중성자 라디오그래피를 이용하여 이상 유동 실험을 수행하기 위해서는 중성자가 일정 두께의 액체(path length)를 지나면서 감쇄하는 특성을 나타내는 특성 곡선(calibration curve)이 있어야 한다. 외국의 경우를 보면 이 특성 곡선은 이상 유동 실험에 사용할 유체를 대상으로 실험적으로 구하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 여러 종류의 gap size를 갖는 slit 및 관에 대하여, 라디오그래피 방법으로 빔의 투과율을 실험적으로 구하고 이를 MCNP 전산 코드를 이용하여 구한 계산값과 비교하여 보았다. 이들 slit 및 관은 중성자 흡수가 적은 알루미늄 6061로 제작하였다. 라디오그래피 실험은 현재 NR 조사실에 설치되어 있는 SIT 카메라로 수행할 예정이었으나 실험 도중에 카메라가 고장이 나서 필름법으로 대처하여 수행하였다. 필름법에서는 필름 카세트를 구성하고 있는 x-ray 필름이 Gd 전환막에서 핵반응에 의하여 발생하는 감마선에 의하여 감광되는데, 실험물마다 중성자가 흡수되는 정도가 다르므로 발생하는 감마선에 차이가 생기고 이 차이가 감광의 정도에 차이를 만든다.

3.3.1 실험

Slit 및 관에 대한 조사는 NR 조사장치의 제 2 조사실에서 수행되었다. Slit 및 관을 제 1 조사실과 제 2 조사실 사이의 빔 창으로부터 108.5 cm 떨어져



* NOTE *
 1. 부품 1, 2 보 재질은 SUS
 2. 다른 모든 부품 재질은 알루미늄

REV	DATE	DRAWN	CHK'D	IC LAM	DESCRIPTION OF REVISION	APP'D
0	2000.12.05	BH-LEE				

PROJECT : NR
 TITLE : NR 투과 율측정 장치
 DWG NO. : 20001205
 SCALE : N/A UNIT : mm SHEET NO. 1 of 1

그림 3-16. Film flow 실험을 위한 test section 설계 도면

있는 조사대에 장착하였으며 필름이 장착된 Gd 전환막을 slit 및 관에 밀착시켰다. 조사는 원자로 출력이 24 MW인 상태에서 10분간 수행되었다. 각 조사물에 물 또는 중수를 채운 경우와 빈 경우를 조사하고, 액체를 채운 경우에 대한 필름, 빈 경우에 대한 필름 및 빈 필름을 같이 현상하였다. 이는 현상에서 오는 차이를 최소화하기 위한 것이었다. 현상 후에는 필름을 photo densitometer에 놓고 투과되는 조도를 읽었다. 읽은 조도로부터 투과율은 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$\text{투과율} = \frac{I_f - I_d}{I_e - I_d} \quad (1)$$

I_f : 실험물에 물 또는 중수를 넣고 찍은 사진에서 읽은 intensity

I_e : 실험물 만을 찍은 사진에서 읽은 intensity

I_d : 조사시키지 않은 필름에서 읽은 intensity

3.3.2 MCNP를 이용한 계산

계산은 실제 실험으로 하기 어려운 여러 가지 상황을 모의하는 것이 용이하므로 실험의 효율을 높이고 이론적인 문제점을 연구해 볼 수 있는 장점이 있다. 모의 계산이 이와 같은 장점을 가지기 위해서는 계산이 정확해야 한다. 현존하는 여러 가지 방법 중에서는 몬테 카를로(Monte Carlo) 방법을 이용하는 것이 가장 정확하게 계산하는 것으로 알려져 있다. NR 실험에 대한 분석은 몬테 카를로 방법을 사용하는 전산 코드 중에서 가장 흔하게 사용되는 MCNP를 이용하였다.

NR의 실험 위치가 중성자원인 원자로에서 많이 떨어져 있어 방향성이 큰 중성자는 도달하지 않고 거의 평형 성분의 중성자만 도달하기 때문에 중성자는 거의 평행 선원(parallel source)이다. 이처럼 실험 위치에서의 중성자는 매우 작은 방향성을 가지지만 화상의 선명도에 영향을 주므로 중요한 관심 대상인데 방향성을 나타내는 L/D는 하나로 제 2 조사실 조사대 위치에서 265.63으로 평가되었으므로[65] 계산에서도 중성자의 방향성을 그대로 모의하였다. MCNP에서 가능한 선원의 방향성은 단방향(mono-directional) 또는 등방(isotropic) 선원이므로 작은 방향성을 갖는 선원을 직접 모의할 수 없기 때문에 측정된 L/D와 같은 성질을 갖도록 하기 위하여 등방 선원을 표적에서 적절한 거리에 놓았다. 등방 선원을 그대로 모의하여 모든 방향으로 중성자 선원을 생성시키면 계산 시간이 길어져 현실적으로 계산이 불가능하다. 계산 시간을 줄이기 위해서는 적절한 variance reduction 방법을 사용해야 한다. 이 방법을 사용하면 등방 선원이더라도 발생하는 중성자의 일부분만 표적으로

로 향하므로 표적 방향으로만 중성자 선원을 생성시키는 ‘cone directional biasing’ 방법[66]을 사용하여 계산 시간 문제를 해결할 수 있다.

중성자의 에너지에 따라 반응 핵 단면적이 다르므로 발생하는 중성자 선원은 적절한 에너지를 갖도록 해야 한다. NR 실험 위치에서 중성자 빔의 전체 에너지 영역에 대한 중성자 스펙트럼은 측정으로 구해진 것이 없으나 고속 및 1/v 영역의 중성자는 매우 적을 것으로 추정되기 때문에 중성자 빔의 스펙트럼은 아래 식과 같은 Maxwell 분포(Maxwellian distribution)를 갖는다고 가정하였다.

$$N(E) = \frac{2\pi N}{(\pi kT)^{3/2}} E^{1/2} e^{-E/kT}, \quad (2)$$

k : 볼츠만(Boltzmann) 상수 (8.6170×10^{-5} eV/K).

Maxwell 분포의 중성자 스펙트럼은 이 식에서와 같이 온도에 의해 결정된다. 충분히 감속된 중성자는 반사체 온도 조건의 Maxwell 분포를 갖는다고 볼 수 있다. 따라서, 계산에서 중성자 선원은 반사체 온도(약 40°C)에서의 Maxwell 분포를 갖도록 하였다.

측정되는 감마선은 카세트 내에 x-ray 필름에 인접하고 있는 Gd(Gadolinium)의 (n, γ) 반응에 의하여 생성되는 것이므로 계산은 Gd의 (n, γ) 반응을 R_γ 을 다음 식을 사용하여 구하였다.

$$R_\gamma = \sum_{i=1}^{Gd} \int N_i \phi(E) \sigma'_i(E) dE, \quad (3)$$

$\phi(E)$: 중성자속,
 $\sigma'_i(E)$: i 번째 Gd 동위원소의(n, γ) 반응 단면적.

MCNP는 몬테 카를로 방법을 사용하기 때문에 계산값에 오차가 있다. 계산값의 오차는 선원의 수를 증가시키면 줄어들지만 계산 시간이 늘어나기 때문에 계산값의 표준 편차가 1% 미만이 되는 정도로 중성자 선원의 수를 설정하였다.

3.3.3 결과 평가

Slit을 물로 채웠을 때의 결과는 그림 3-17과 같으며 중수로 채웠을 때의 결과는 그림 3-18과 같다. 이 그림에 제시된 투과율은 빔 중심으로부터 아래로 0.9 mm 떨어져 있고 서로간의 거리가 약 0.76 mm인 네 곳에 대하여 구한 값을 평균한 값이다. 이 비교 분석을 통하여, 실험을 하지 않더라도 특성 곡선을 코드 계산을 통하여 얻을 수 있는 가능성을 확인하였다. 이는 프레온과 같이 다루기 어려운 유체를 실험에 사용하는 경우에 실험 기획의 단계에서 코드 계산을 통하여 특성 곡선을 얻고 이를 test section의 설계에 활용함으로써 test section의 설계와 test matrix의 구성을 용이하게 수행할 수 있음을 시사한다.

외경 25 mm 관에서 빔 path length에 따른 빔의 투과 정도도 실험적인 방법과 코드 계산을 통하여 구하고 비교하였는데 그 결과는 그림 3-19와 같다. 이 그림에서 측정점은 빔 중심으로부터 21 mm 위쪽에 위치하였다. 증수의 경우에는 slit의 경우와 마찬가지로 실험 결과와 해석 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 그러나, 물의 경우에는 실험값과 계산값이 차이를 보였다. 이런 차이가 나는 이유에 대해서는 추가의 검토가 필요하다.

그림 3-20에는 관과 slit에 물 또는 증수를 채웠을 때 path length에 따른 빔의 투과 정도를 slit에서의 투과 정도와 같이 나타내었다. Slit의 경우에 beam path length가 가장 긴 것은 11 mm이고 관에 대한 측정점 중 가장 path length가 짧은 것은 11.4 mm 이다. 관의 경우 path length가 최소인 측정점은 관의 중심에서 반경 방향으로 10 mm 떨어져 있는 곳이었다. 관의 내경이 23 mm임을 고려하면 이 곳은 관의 최외곽에 매우 근접한 곳이다. 측정 지점에서 중심 방향으로는 물의 두께가 두꺼워지고 외곽 방향으로는 물의 두께가 얇아져서 1.5 mm만 더 지나면 공기가 존재하여 산란된 중성자가 외곽으로 유출되는 경향이 많은 곳이다. 이러한 효과에 의하여 그림 3-19에서 있는 바와 같이 11 mm 근방에서 slit과 관 사이의 급격한 변화가 발생한다고 판단된다. 이 결과로부터 관을 이용한 실험에서는 slit에 대하여 구한 특성 곡선을 같이 사용할 수 없음을 발견하였다.

Neutron Beam Attenuation through H₂O (Slit)

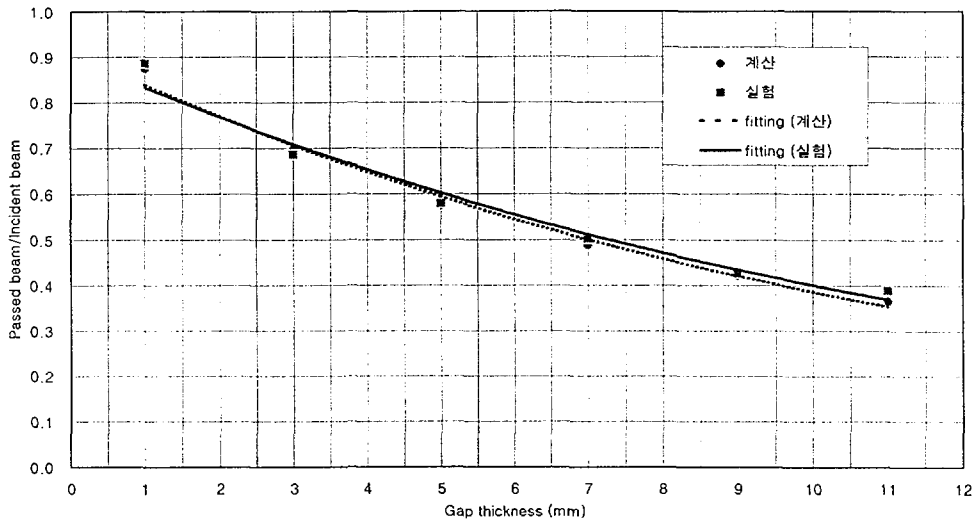


그림 3-17. Slit의 gap 두께 변화에 따른 중성자빔의 감쇄 - 물

Neutron Beam Attenuation through D₂O (Slit)

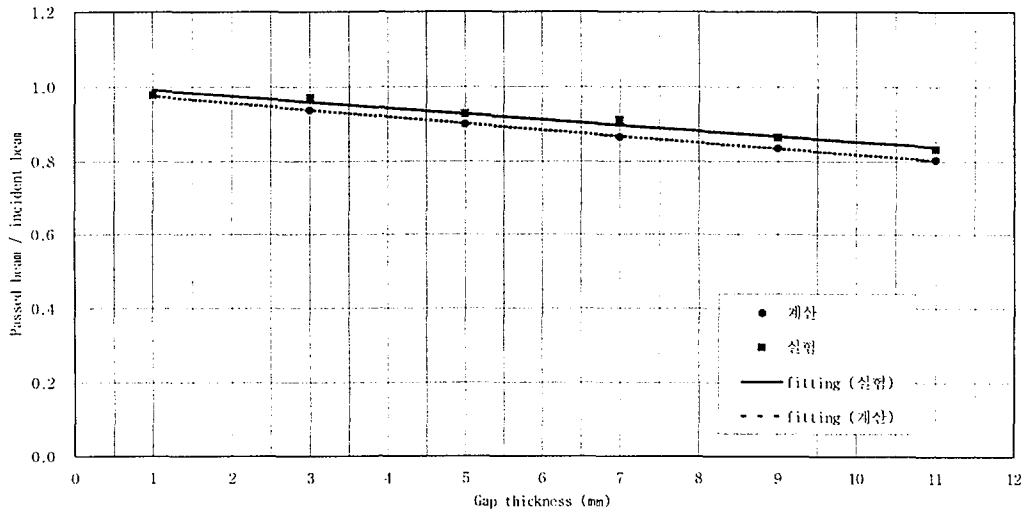


그림 3-18. Slit의 gap 두께 변화에 따른 중성자 빔의 감쇄 - 중수

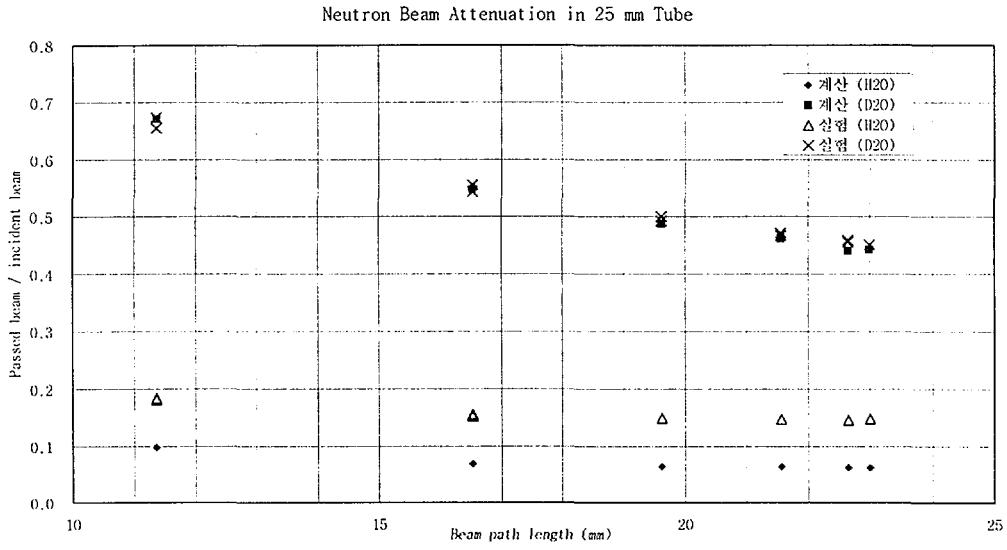


그림 3-19. 직경 25 mm 관에서 Path length에 따른 중성자 빔의 감쇄

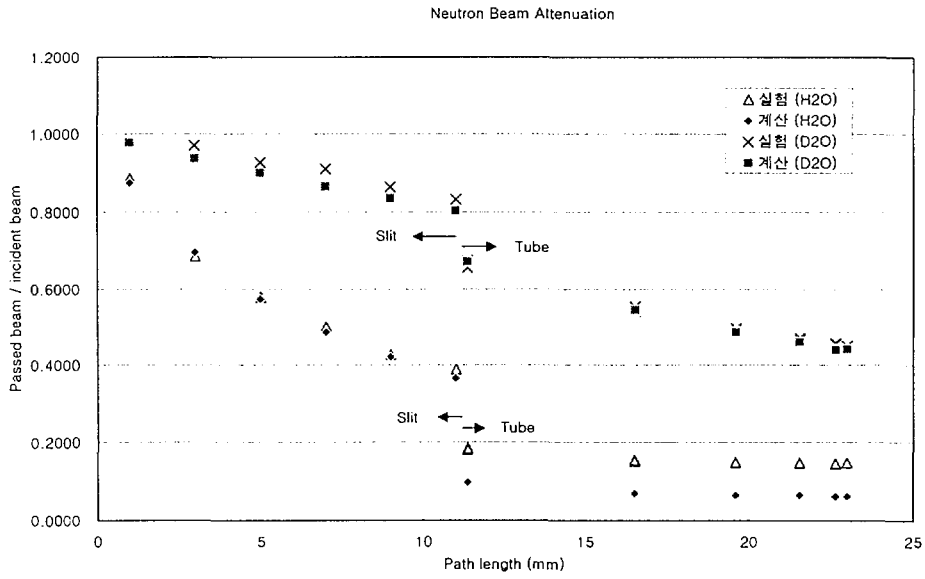


그림 3-20. 관과 slit에서의 실험 및 계산 자료 비교

제 4 절 부수적 효과

하나로 원자로 정지 중에 수중 카메라를 이용하여 유동관 상부를 검사하는 구조물 검사가 수행되었다. 비디오에 녹화된 영상에는 그림 3-21에 보는 것과 같이 방사선에 의한 spike noise가 존재한다. 이 영상에 rank filter를 적용하면 그림 3-22와 같은 깨끗한 상을 얻을 수 있다. Rank filter는 어떤 한 픽셀의 grey level을 주변 픽셀의 grey level과 함께 비교하여 순서를 정하고 해당 픽셀의 grey level을 비교 대상이 되었던 픽셀들 중 사용자가 정한 순위에 있는 grey level로 대체하는 filter이다. 또한, 이 영상에 sobel filter를 적용하면 그림 3-23과 같이 유동관의 경계가 확연히 드러난다. Sobel filter는 어떤 픽셀의 grey level을 grey level의 gradient로 대체하는 filter로서 상의 경계를 확연히 하는데 사용되는 filter이다. 원자로 검사 중에 카메라를 고정시켜 놓을 수 있다면 raw image를 훨씬 깨끗하게 얻을 수 있고 이에 rank filter 및 sobel filter를 차례로 적용하면 유동관 사이의 gap의 크기도 정량화 할 수 있을 것으로 생각된다.

위의 예로 보아 본 과제의 수행을 통하여 마련된 영상 처리 계통은 하나로 원자로의 가동 중 검사에도 유용하게 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

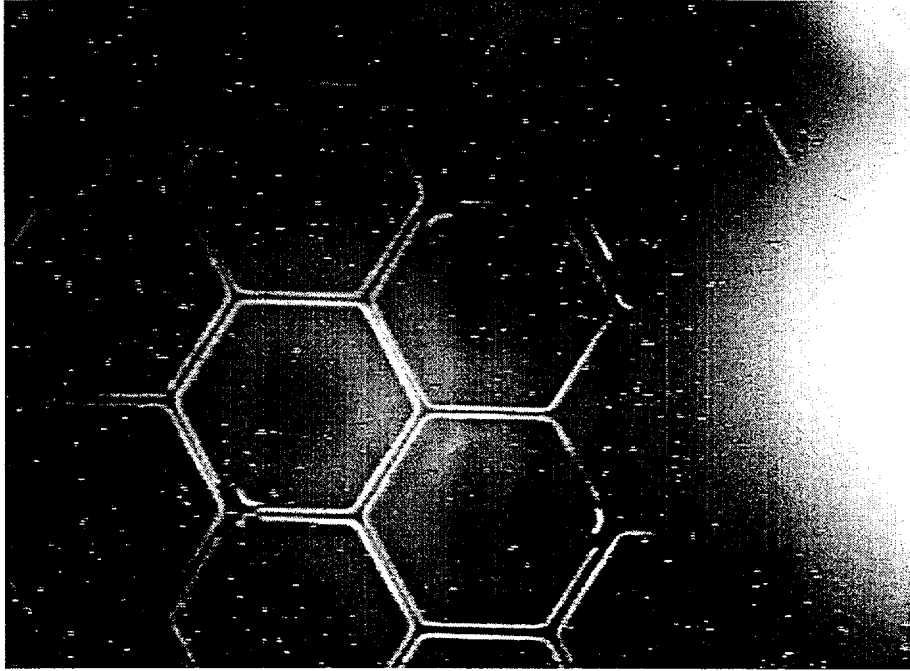


그림 3-21. 하나로 원자로 유동관 상부에 대한 비디오 촬영 결과(Single frame)

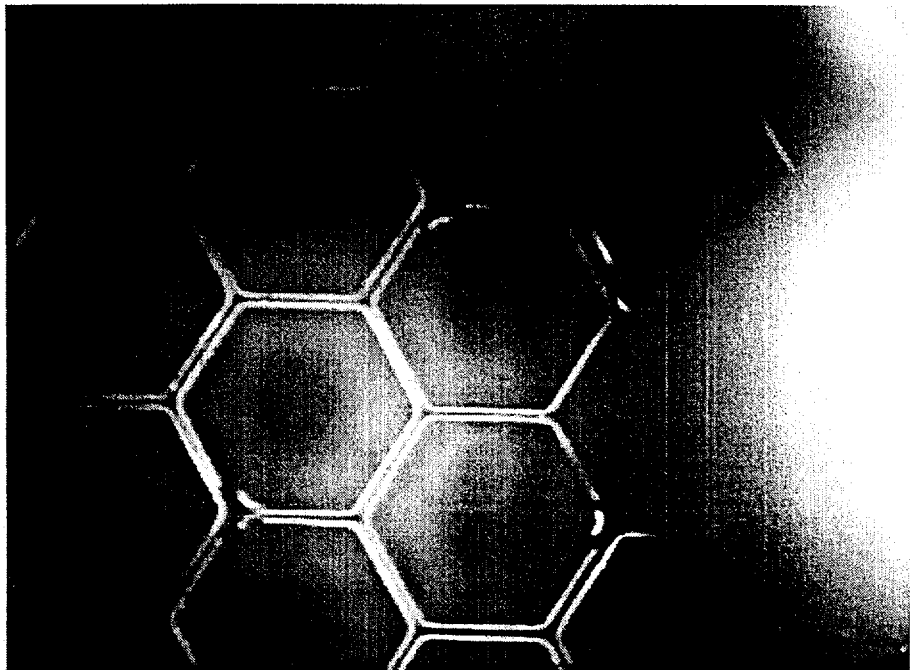


그림 3-22. 그림 3-21에 rank filter를 적용한 결과

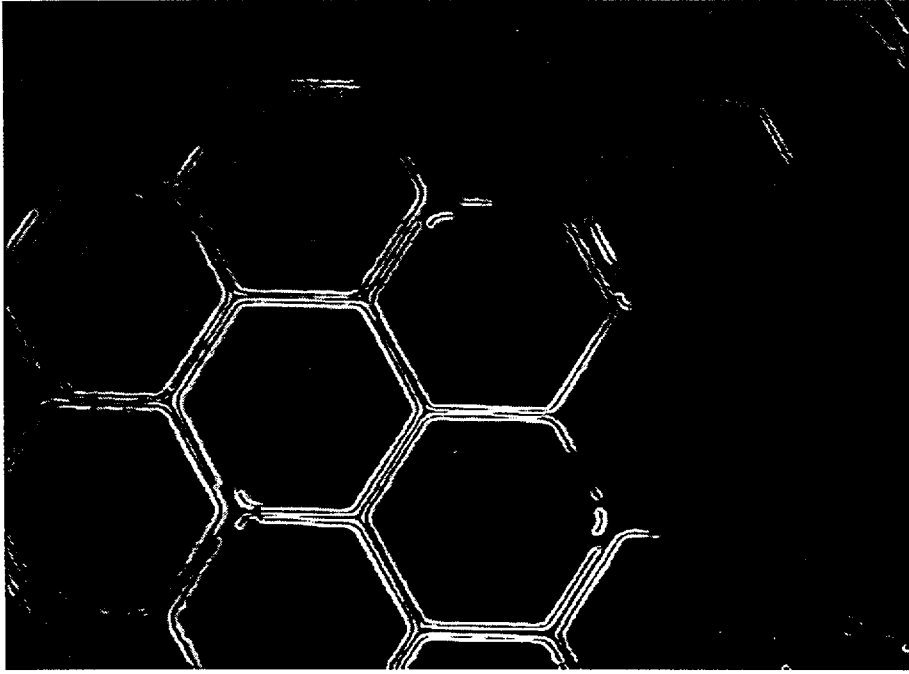


그림 3-23. 그림 3-22에 sobel filter를 적용한 결과

제 4 장 결론 및 추후 연구 방향

본 과제 수행을 통하여 얻은 결과와 추후 연구 방향을 요약하면 아래와 같다.

- 실질적 이상 유동 실험을 위한 계통 장비 검토
BNCT 조사실을 활용하면 현재 라디오그래피를 이용한 이상 유동 연구가 활발히 진행되고 있는 JRR-3M에서 보다 더 좋은 빔을 얻을 수 있음을 확인하였다. 이상 유동 실험의 실질적 수행에 필요한 카메라의 검토를 종료하였고, 현재 설치되어 있는 전환막 이상의 성능을 내는 상용 전환막은 개발된 것이 없으며, 실험을 통하여 이 전환막이 제 성능을 내고 있어 이상 유동 실험에 활용할 수 있음을 밝히었다. 또한, 실시간의 영상 획득 속도를 갖는 frame grabber와 영상 분석 프로그램을 구비하였다. 이러한 검토 결과와 2001년에 수행될 BNCT 조사실에서의 빔 특성 측정 실험 결과를 참고로 하여 추가 소요 장비를 확정하고 중성자빔 이용 연구 과제를 통하여 2001년에 카메라와 image intensifier 장비를 마련하면 고속 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험에 필요한 장비를 완비하게 될 것이다. 고속 라디오그래피는 원자력 관련 이상 유동의 연구뿐만 아니라 전기장을 이용하여 열전달을 촉진시키는 열전달 촉진법에 대한 연구에 있어서의 유동 가시화에도 잘 활용할 수 있을 것으로 생각된다.
- 이상 유동 실험 수요 및 실험 요건 파악
문헌 조사와 관련 연구자들과의 대화를 통하여 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험 가능 항목을 도출하였고, 개별 실험에 필요한 기반 시설로 하나로 원자로 내부에 설치되어 있거나 다른 실험에 사용하였던 것들을 재활용할 수 있음을 확인하였다. 또한, 잔여 예산을 활용하여 film flow에 대한 실험을 수행할 수 있는 장치를 확보함으로써 지속적인 관련 연구의 수행이 가능하게 되었다. 이 실험의 수행은 본 과제의 수행을 통하여 확인한 수요를 충족시키기 위한 첫 걸음이 될 것이다.
- 동적 현상 분석 특성 실험
소내에서 제작한 특성 장치를 이용하여 이상 유동의 분석에 필요한 path length에 따른 중성자 투과율을 나타내는 특성 곡선을 얻는 방법을 연구하였다. 이 연구를 통하여 특성 곡선을 전산 코드를 통한 분석을 통하여 얻을 수 있음을 확인하였다. 이는 추후 실험 설비의 설계와 실험 matrix 결정 과정을 코드 계산을 통하여 용이하게 할 수 있음을 의미한다. 또한, slit에서의 특성 곡선과 관에서의 특성 곡선은 확연히 다름을

확인하였다.

- 부수적 성과

하나로 원자로 구조물 검사 과정에서 촬영한 비디오를 영상 분석 방법을 통하여 분석하면 구조물 검사의 효율을 제고할 수 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 하나로에서 주기적으로 수행될 원자로 구조물 검사에 영상 분석 기법을 적극 활용하는 방안을 추구할 계획이다.

제 5 장 참고문헌

- [1] A.H. Robinson and J.P Barton, "High speed motion neutron radiography", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.15, p140, 1972.
- [2] J.P Barton et al., "In motion radiography at 10,000 frames per sec", ASNT Spring Conference, Los Angeles, California, 1973.
- [3] R.H. Bossi, "High speed Motion Neutron radiography", Thesis, Oregon State Univ., 1976.
- [4] R.H. Bossi et al., "High-speed motion neutron radiography", Nucl. Tech., Vol.59, pp.363-374, 1982.
- [5] A.H. Robinson and S.L. Wang, "High speed motion neutron radiography of two-phase flow" , Neutron Radiography, J.P. Barton and P. von der Hardt(eds.), pp.653-659, 1983.
- [6] J.M. Cimbala et al., "Application of neutron radiography for fluid flow visualization", Nucl. Tech., Vol.81, pp.435-445, 1988.
- [7] J.M. Cimbala et al., "Neutron radiography as a flow visualization tool", Neutron Radiography(3), S. Fujine(eds.), pp.497-504, Kluwer Academic Press, Dordrecht, Holland, 1990.
- [8] S.S. Glickstein et al., "Void fraction measurements using neutron radiography", Nucl. Sci. & Eng'ng, Vol.121, pp.153-161, 1995.
- [9] J.T. Lindsay et al., "Real-time neutron radiography application in dynamic fluid flow study", Tran. ANS, Vol.53, pp.181-182, 1986.
- [10] J.T. Lindsay et al., "Real time neutron radiography and its application to the study of internal combustion engines and fluid flow", J.P Barton(eds.), Neutron Radiography, pp.579-586, 1987.
- [11] S. Fujine et al., "Study on visualization of fluid phenomena using neutron radiography technique", J.P. Barton(eds.), Neutron Radiography(4), pp.309-316, 1994.
- [12] N. Takenaka et al., "Application of real-time neutron radiography to multiphase flow visualization and measurement", S. Fujine et al.(eds.), Neutron Radiography(3), pp.505-512, 1990.
- [13] K. Sonoda et al., "Visualization and volumetric fraction measurement of multiphase flow by neutron radiography", J.P. Barton(eds.), Neutron Radiography(4), pp.347-354, 1994.
- [14] N. Takenaka et al., "Visualization of streak lines in liquid metal by neutron radiography", J.P. Barton(eds.), Neutron Radiography(4), pp.355-

362, 1994.

- [15] N. Takenaka et al., "Liquid metal flow measurement by neutron radiography", Nucl. Inst. & Methods in Phys. Re. A, Vol.377, pp.156-160, 1996.
- [16] M. Ozawa et al., "Void fraction profile in tube-banks of a simulated fluidized-bed heat exchanger", Nucl. Inst. & Methods in Phys. Re. A, Vol.377, pp.144-147, 1996.
- [17] N. Takenaka et al., "Three-dimensional void fraction measurement of steady two-phase flow by Neutron Radiography", presented at the OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques, Santa Barbara, March 17-20, 1997.
- [18] Y. Ikeda et al., "Neutron computed tomography with a high-speed image processor", Material Evaluation, Vol.46, pp.1471-1476, 1988.
- [19] M. Takami et al., "Analysis of two-phase counter flow in heat pipe by neutron radiography", J.P Barton(eds.), Neutron Radiography, pp.609-616, 1987.
- [20] M. Tamaki et al., "Hydrodynamic behavior of liquid, vapor and non-condensable gas in a closed two-phase flow system", S. Fujine et al.(eds.), Neutron Radiography(3), pp.523-530, 1990.
- [21] Y. Ikeda et al., "Real-time Neutron radiography for fluid dynamics and molten metals behavior", S. Fujine and et al.(eds.), Neutron Radiography(3), pp.531-538, 1990.
- [22] Y. Tsuji et al., "Visualization and correlation analysis of counter-current two-phase flow in a thermosyphon by neutron radiography", Nucl. Inst. & Methods in Phys. Re. A, Vol.377, pp.148-152, 1996.
- [23] S. Fujine et al., "An on-line video image processing system for real-time neutron radiography", Nucl. Inst. & Methods in Phys. Re. A, Vol.215, pp.277-289, 1983.
- [24] S. Fujine et al., "Digital processing to improve image quality in real-time neutron radiography", Nucl. Inst. & Methods in Phys. Re. A, Vol.377, pp.148-152, 1996.
- [25] S. Fujine et al., "Real-time imaging for neutron radiography at KURRI", proceeding of the 1st ASRR, pp.371-380, Rikkyo Univ., Tokyo, Japan, Nov.18-21, 1986.
- [26] S. Fujine et al., "Visualization on gas-liquid two-phase flow in a narrow rectangular duct", S. Fujine et al.(eds.), Neutron Radiography(3), pp.513-

521, 1990.

- [27] K. Mishima et al., "Study on two-phase flow in a coolant channel of a plate-type fuel with use of neutron radiography technology", proceeding of the 3rd ASRR, pp.597-603, Hitachi, Ibaraki, Japan, Nov.11-14, 1991.
- [28] K. Mishima et al., "Visualization and measurement of fluid phenomena using neutron radiography technique, proceedings of the 5th Sym. on Advanced Nuclear Energy Research, pp.788-795, Mito, Japan, Mar.12-13, 1993.
- [29] K. Mishima et al., "Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts", Int. J. Multiphase flow, Vol.19, No.1, pp.115- 124, 1993.
- [30] K. Mishima et al., "A study of air-water flow in a narrow rectangular duct using image processing technique", the 3rd Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, Ohtsu, Japan, 1988.
- [31] T. Hibiki et al., "Application of neutron radiography to visualization and void fraction measurement of air-water two-phase flow in a small diameter tube", J. of Nucl. Sci. & Tech., Vol.30, No.6, pp.516-523, 1993.
- [32] K. Mishima et al., "Some characteristics of air-water two-phase flow in a small diameter vertical tube", Int. J. Multiphase Flow, Vol.22, No.4, pp.703-712, 1996.
- [33] T. Hibiki et al., "Visualization of fluid phenomena using a high frame-rate neutron radiography with a steady thermal neutron beam", Nucl. Inst. & Methods in Phy. Re. A, Vol.351, pp.423-436, 1994.
- [34] T. Hibiki et al., "High frame-rate neutron radiography for visualization and measurement of gas-liquid two-phase flow in a metallic rectangular duct", FED- Vol.209, ASME, pp.243-250, 1995.
- [35] T. Hibiki et al., "Application of high-frame-rate neutron radiography with a steady thermal neutron beam to two-phase flow measurements in a metallic rectangular duct", Nucl. Tech., Vol.110, pp.422-435, 1995.
- [36] T. Hibiki and K. Mishima, "Feasibility of high frame-rate neutron radiography by using a steady thermal neutron beam with 10^6 n/cm²s flux", Nucl. Inst. & Methods in Phy. Re. A, Vol.369, pp.186-194, 1996.
- [37] H. Unesaki et al., "Evaluation of scattered neutron component in the thermal neutron radiography image: Influence of scattered neutrons and unparallelness of incident neutron beam", Nucl. Inst. & Methods in Phy. Re. A, Vol.413, pp.143- 150, 1998.

- [38] J.S. Chang et al., "Real-time neutron radiography for visualization of interfacial geometry and phase distribution in two-phase flow", proceedings of NURETH-4, pp.413-417, Karlsruhe, GFR, Oct. 10-13, 1989.
- [39] W.H. Fairholm et al., "Visualization of two-phase interfaces in a natural circulation loop by a real-time neutron radiography imaging system", ANS proceedings, 1991 National Heat Transfer Conference, pp.199-206, Minneapolis, Minnesota, July 28-31, 1991.
- [40] J.S. Chang et al., "Determination of gas-liquid bubble column instantaneous interfacial area and void fraction by a real-time neutron radiography method", Chem. Eng. Sci. Vol.47, No.13/14, pp3639-3646, 1992.
- [41] G.D. Harvel et al., "Determination of time-dependent void fraction distribution in bubbly two-phase flow by a real-time neutron radiography technique", Nucl. Tech., Vol.109, pp.132-141, 1995.
- [42] G.D. Harvel et al., "Cross-sectional void fraction distribution measurements in a vertical annulus two-phase flow by high speed X-ray computed tomography and real-time neutron radiography techniques", proceedings of NURETH-7, NUREG/CP-0142, pp.574-590, Saratoga Springs, NY, Sept. 10-15, 1995.
- [43] G.D. Harvel et al., "Real-time cross-sectional averaged void fraction measurements in vertical annulus gas-liquid two-phase flow by neutron radiography and X-ray tomography techniques", Nucl. Inst. & Methods in Phy. Re. A, Vol.371, pp.544-552, 1996.
- [44] G.D. Harvel et al., "Investigation of large amplitude stratified waves in a CANDU-type 37 rod nuclear fuel channel by a real-time neutron radiography technique", NURETH-8, Kyoto, 1997.
- [45] D.R. Novog et al., "Real time neutron radiography of boiling refrigerant 134a under smooth and swirl flow conditions", ExHFT 4, 1997.
- [46] G.D. Harvel et al., "A real-time neutron radiography diagnostic of a vertical co-current two-phase flow channel with a hexagonal finned bundle", ExHFT 4, 1997.
- [47] H.J. Kim et al., 1990, "Neutron radiography application in Korea," Fujine, S.(eds.), Neutron Radiography(3), pp.549-556, Kluwer Academic Press., Holland.
- [48] H.J. et al., "The Neutron Radiography Programme at KAERI", preceding

- of FENDT '97, pp.295-303, Cheju-do, Korea, Oct. 8-11, 1997.
- [49] 김희율, "중성자 라디오그래피 영상처리 시스템 개발", KAERI/CM-274/98.
- [50] K.H. Bang, "Boiling and two-phase flow in narrow space and future application of neutron radiography," proceedings of the 5th ASRR, pp. 519-524, May 29-31, 1996, Taejon, Korea.
- [51] S.Y. Lee and et al., "COBRA/RELAP5: A merged version of the COBRA-TF and RELAP5/MOD3 codes," Nucl. Tech, Vol.99, pp.177-187, 1992.
- [52] 이병철, "BNCT collimator 바깥에서의 중성자속", 내부통신문, HAN-RR-CR-490-00-093, 2000.
- [53] 전병진 외 21명, "연구로 이용 기술 개발: 하나로를 이용한 암 치료 장치 개발", 연구소 연구 보고서, KAERI/RR-2018/99, 2000.
- [54] L.E. Bryant, "Nondestructive Testing Handbook, Vol.3", ASNT, 1985.
- [55] 광용어 사전, 일진사, 1995.
- [56] W.E. Dance and S.F. Carollo, "High sensitivity electronic imaging system for reactor or non-reactor neutron radiography", Neutron Radiography, 2, 415-422, 1986.
- [57] S.J. Lee, "PIV Velocity Field Measurement", 포항공대 첨단유체공학 연구센터 산학연 협동 단기강좌, 99-09.
- [58] H. Nakamura et al., "High-frame-rate video visualization of simulated lower head behavior during TMI accident using neutron radiography", 5th World Conference on Neutron Radiography, Berlin, June 17-20, 1996.
- [59] P. Von D. Hardt and H. Rottger, "Neutron radiography handbook", D. Reidel Pub. Co., 1981.
- [60] Y. Suzuki et al., "Development of imaging converter", S. Fujine et al. (eds.), Neutron Radiography(3), pp.277-279, 1990.
- [61] J. S. Brenizer et al., "Performance characteristics of scintillators for use in an electronic neutron imaging system for neutron radiography", Rev. Sci. Instrum., Vol.68, No.9, pp.3371-3379, 1997.
- [62] 한국표준과학연구원, "시험성적서: 하나로 NR scintillator", 00-09-27.
- [63] NE Technology Services, NE Technology America, Monmouth Junction, New Jersey, 1989.
- [64] W. Low and M Schieber, "Applied Solid State Physics", Chap.4, p.115, Plenum, New York, 1970.
- [65] 남기용, "L/D 측정 결과", 내부통신문, HAN-NP-NR-NKY-MEMO-1121, 00-11-21.

[66] J. F. Briesmeister (Editor), "MCNP-A general Monte Carlo N-Particle Transport Code," LA-12625-M, Los Alamos National Lab., 1993.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-2094/2000			
제목 / 부제	이상 유동 연구를 위한 하나로 NR 설비의 특성화 연구		
연구책임자 및 부서명	임인철, 하나로운영팀		
연구자 및 부서명	서철교(하나로운영팀), 정정환(하나로이용연구팀) 이병헌(하나로운영팀), 최영산(하나로운영팀)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	53 p.	도표	있음(O), 없음()
발행년	2001. 1.		
크기	0.7 cm.		
참고사항			
비밀여부	공개(O), 대외비(), __ 급비밀	보고서종류	연구 개발 보고서
연구위탁기관		계약 번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>이상 유동 연구에 라디오그래피를 활용하기 위하여 국내에서 수행되고 있는 안전성 관련 연구 중에서 중성자 라디오그래피가 도움이 될 수 있는 분야를 구체적으로 파악하고, 실험 계통 구성에 필요한 빔 포트, 카메라 및 전환막 등에 대한 검토를 수행하였으며, 영상 분석에 필요한 장비와 프로그램을 구비하였다. 또한, 이상 유동 실험에 필요한 중성자 감쇄율에 대한 특성 곡선을 코드 계산을 통하여 얻을 수 있음을 확인하였다.</p> <p>본 과제를 통하여 얻은 장비 검토 결과와 BNCT 조사실에서 중성자 빔 특성 실험 결과를 토대로 고속 카메라와 image intensifier를 마련하면 BNCT 조사실에서 고속 라디오그래피를 이용한 이상 유동 실험을 실현할 수 있을 것으로 판단된다.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	중성자 라디오그래피, 이상 유동, 카메라, 전환막, 특성 곡선 BNCT,		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-2094/2000			
Title / Subtitle	Study on the characterization of the neutron radiography facility in HANARO for two-phase flow research		
Project Manager and Department	I.C. Lim(HANARO Operation Div.)		
Researcher and Department	C.G. Seo(HANARO Operation Div.), J.H. Jeong(HANARO Util. Tech. Dev. Div.), B.H. Lee(HANARO Operation Div.), Y.S. Choi(HANARO Operation Div.)		
Publication Place	Daejon	Publisher	KAERI
Page	53 p.	Ill. & Tab.	Yes(O), No ()
Note			
Classified	Open(O), Restricted(), ___ Class Document	Report Type	
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)	<p>For the application of dynamic neutron radiography to the two-phase flow research using HANARO, several experimental items to which the radiography technique is beneficial were identified through the review of the outputs from the related researches and the discussions with experts. Also, the investigation of the equipments including the beam port, camera and converter was made and a hardware and a software for image processing were equipped.</p> <p>It was confirmed that the calibration curve for the attenuation of neutron beam in fluid which is required for the two-phase flow experiment could be obtained by the computer code calculation.</p> <p>Based on the investigation results on the equipment and the results from the measurement of BNCT beam characteristics, a high speed camera and an image intensifier will be purchased. Then, the high speed dynamic neutron radiography facility for two-phase flow experiments will be fully equipped.</p>		
Subject Keywords (About 10 words)	high speed dynamic neutron radiography, two-phase flow, camera, converter, calibration curve, BNCT		