

하나로에서의 고속 동적 레이디오그래피 장치 개발 현황

Progress Report on the Development of High Speed Dynamic Neutron Radiography Facility in HANARO

임인철, 심철무, 남기용, 이창희, 박상준, 황승렬, 전병진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로에 이상 유동 실험에 주로 활용되는 고속 동적 레이디오그래피 설비를 구현하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 하나로의 IR 빔포트를 활용하면 JRR-3M의 NR용 빔포트에서 보다 우수한 이상 유동 영상을 얻을 수 있고 더 두꺼운 유체층에 대한 실험도 수행할 수 있는 것으로 판명되었다. 또한, 기존의 SIT 카메라를 활용하여 NR 빔포트에서 이상 유동의 하나인 물 표면파에 대한 영상을 얻는데 성공하였다.

ABSTRACT

A research has been performed for the establishment of high speed neutron radiography facility in HANARO, which will be mainly used for the two-phase flow research. It was found that the images from the IR beam port of HANARO would be superior to those from JRR-3M NR port and, the thickness of the fluid in experiment would be larger in HANARO than in JRR-3M. Also, the dynamic images for surface waves were successfully taken by using the SIT camera in HANARO NR port.

1. 서론

중성자 레이디오그래피 기술은 크게 정적 레이디오그래피(Static radiography)와 동적 레이디오그래피(Dynamic radiography)로 나눌 수 있다. 정적 레이디오그래피 기술은 주로 비파괴 검사에 활용되며, 동적 레이디오그래피 기술은 주로 이상 유동의 연구에 많이 활용되고 있다. 국내에서는 1983년에 TRIGA Mark III 연구로에 중성자 레이디오그래피 시설이 설치되어 고고학적 유물의 촬영, 산업 기계의 촬영, 핵연료봉의 손상 관찰 등에 정적 레이디오그래피 기술을 활용하였다[1]. 중성자 레이디오그래피를 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 레이

오그라피를 이용한 이상 유동 실험을 수행하기 위한 시설이 아직 마련되어 있지 않아 관련 연구가 수행된 바는 없으나 중대사고에 대한 실험적 연구와 관계되어 중성자 라디오그라피의 활용이 제안된 바 있었고[2], 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[3]. 이러한 요구 사항을 반영하여 이상 유동 실험을 위한 고속 동적 라디오그라피(High Speed Dynamic Radiography) 장치 개발에 대한 기초적인 연구가 수행된 바 있다[4]. 이 연구 결과를 바탕으로 하나로에 고속 동적 라디오그라피 장치를 설치하기 위한 연구가 계속되고 있으며 SIT(Silicon Intensifier Target) 카메라를 이용하여 실시간 동적 라디오그라피 영상을 획득하는데 성공하였다. 본 논문에서는 이와 관련한 업무의 진척 정도와 앞으로의 계획을 기술하였다.

2. 동적 라디오그라피와 이상 유동

중성자의 투과율은 핵종에 따라 민감하게 변화하는데 수소의 경우에는 투과율이 아주 낮다. 이러한 특성을 이용하여, 물이 비등하여 생기는 이상 유동이나 고체 속으로 물이 투과하는 형태로 생기는 이상 유동의 경우에 상간 정보를 중성자 라디오그라피를 이용하여 얻을 수 있다. 이상 유동에 대한 측정을 통하여 정확하고 자세한 상간 정보를 도출하려면 몇 가지의 요건이 있는데 중성자 라디오그라피를 이용한 측정법은 이러한 요건을 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 라디오그라피를 이용하면 최대 0.1 mm 정도의 공간 분해능을 얻을 수 있다.

세 번째로, 이상 유동의 흐름을 방해하지 않으면서 측정이 이루어져야 한다. 중성자 라디오그라피의 경우에는 실험부를 지나면서 중성자의 세기가 감소하는 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 있다. 다른 방사선 계측 장비와 같이 활용하면 3차원 tomography도 가능할 것으로 생각된다.

마지막으로, 고온·고압 조건에서 수행되는 이상 유동 실험의 경우에는 실험대가 빛이 투과하지 못하는 물질로 만들어지는데, 이 경우에도 내부의 유동을 관찰할 수 있어야 한다는 것이다. 실험대의 구성물로 사용되는 SUS나 Al에 대하여 중성자는 X-ray에 비하여 투과력이 좋아 불투명한 실험대를 사용하는 경우에 내부의 유동 현상을 관찰하기에 적당하다.

3. 라디오그라피 구성 요소와 하나로 현황

고속 동적 라디오그라피를 위한 구성 요소와 이상 유동에 대한 실험을 통하여 얻을 수 있는 대표적인 정보를 그림 1에 도시하였다. 각 구성 요소별로 장비 구축 현황을 소개하면 다음과 같다.

3.1 원자로 빔

열중성자속이 높을수록 밝은 화상을 얻을 수 있고, n/v 비가 클수록 감마선에 의한 잡음을 줄일 수 있어 좋다. L/D 가 클수록 해상도가 좋아진다. 기존에 라디오그래피에 사용하던 NR 빔 이외에 BNCT 용으로 IR 빔이 개발되었는데 이 빔의 특성이 고속 동적 라디오그래피를 하기에 매우 우수한 것으로 판명되었다[5]. 또한, IR 빔 전면에 설치되어 있는 BNCT 조사실의 넓이는 $6 \times 4.3 \text{ m}^2$ 정도이고 높이는 3.5 m로서 이상 유동 실험을 위한 실험 장치를 설치하기에 충분하다. BNCT 조사실 전면의 그림의 그림 2와 같고, 빔 특성은 표 1에 JRR-3M의 특성과 같이 나타내었다.

3.2 전환막(Converter)

중성자를 빛으로 전환시키는 기능을 하는 전환막은 다음의 요구 조건을 갖추어야 한다.

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

전환막에 대한 연구는 그간 여러 사람들에 의하여 수행되었는데 현재 하나로에 마련되어 있는 NE426이 고속 동적 라디오그래피를 하기에 가장 적절한 것으로 알려져 있다[7]. 또한, 전환막 후면에서의 조도 측정을 통해 전환막의 성능이 정상적임을 입증하였다[8].

3.3 카메라

고속 동적 라디오그래피를 구현하기 위해서는 image intensifier와 고속 카메라가 필요하다. 이에 대해서는 자료 조사가 진행 중이며 아직 구체적인 장비 사양을 정하지는 못하였다. 시간 분해능은 카메라의 속도에 따라 정해지는데 카메라의 속도에 따라 측정의 오차가 바뀐다. Hibiki와 Mishima는 핵계측값이 Poisson 분포를 한다는 가정 하에 카메라 속도와 계측 오차와의 관계를 아래와 같이 유도하였다[9].

노출 시간이 t 일때에 면적이 R^2 인 영상 센서에 이르는 중성자 수율은 아래와 같다.

$$F = \Phi_{th} \exp(-\Sigma\delta) R^2 t \quad (1)$$

여기서 Φ_{th} 는 열중성자속이고, Σ 는 거시적 전단면적이고, δ 는 중성자속이 통과하는 액체의 두께이다.

Poisson 분포의 경우에 측정 오차는 아래와 같이 표현되고,

$$E = \frac{\sqrt{F}}{F} \quad (2)$$

카메라의 frame rate는 노출시간의 역수임을 고려하면 측정 오차와 다른 변수들과의 상관 관계는 아래와 같다.

$$M = \frac{1}{t} = \Phi_{th} \exp(-\Sigma\delta) R^2 E^2 \quad (3)$$

이 식에서 실험부에서 중성자의 감쇄가 전혀 일어나지 않는 경우($\delta=0$)에 얻을 수 있는 최대 frame rate는 중성자속에 비례하고, 동일한 frame rate에서 실험에 사용하는 유체의 거시적 전단면적이 작을수록 측정 오차는 줄일 수 있다. 이 식을 이용하여 10%의 측정 오차를 감수할 경우에 하나의 IR 빔포트에서 사용할 수 있는 최대 frame rate와 JRR-3M의 최대 frame rate를 비교하면 그림 3과 같다. 하나의 IR 빔포트의 collimator에서 2 m 떨어진 위치에서 실험을 하는 경우에 투과하는 유체의 두께, 측정 오차 및 가능한 frame rate 간의 관계도 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 그 관계를 유체가 물인 경우에 대하여 구하면 그림 4와 같고, 유체가 중수인 경우에 대하여 구하면 그림 5와 같다. 그림 4에서 물을 유체로 사용하는 경우에는 카메라의 frame rate가 1000 회/s를 넘으면 물 두께

가 3.5 mm 정도 이상이 되면 5% 이하의 측정 오차는 기대하기 어려움을 알 수 있다. 그러나, 그림 5에서 중수를 유체로 사용하는 경우에는 frame rate가 2000 회/s로 높아져도 측정 오차를 5% 이내로 유지할 수 있는 유체층의 두께는 12 mm로 두꺼워짐을 알 수 있다.

하나로가 30 MW로 운전하는 경우에 IR 빔포트의 collimator로부터의 2 m 거리에서 얻을 수 있는 중성자속은 JRR-3M의 약 2배이다. 따라서, 동일한 오차를 허용할 때에 하나로에서 적용 가능한 frame rate는 JRR-3M의 약 2배가 된다. 또, 중수를 실험에 사용하는 경우에 frame rate가 1000 회/s이고 5%의 측정 오차를 허용하면, 실험에 사용 가능한 유체층의 두께는 하나의 경우는 27.5 mm이고 JRR-3M의 경우에는 10 mm이다.

3.4 영상 획득 및 영상 처리

영상 처리를 위한 image board와 영상 처리 software 로는 DT3152와 Image-Pro를 구비하고 있다. 획득한 영상을 실시간으로 보정하고 처리하는 기술이 앞으로 갖추어야 할 부분이다.

4. SIT 카메라를 이용한 실시간 동적 라디오그래피 실험

아직 고속 카메라는 구비하지 못하였으나 기존에 있던 SIT 카메라를 이용하여 NR 빔포트에서 실시간 동적 라디오그래피 실험을 수행하였다. 실시간이란 frame rate가 30 frames/s인 경우로 시간 분해능이 33 msec이다. 실험에 사용된 test section의 모양은 그림 6과 같으며 전환막 전면에 test section을 설치한 모습은 그림 7과 같다. Test section에 물을 채우고 압축 공기를 표면에 붙여 표면 파가 형성되도록 하고 이를 SIT 카메라를 이용하여 실시간으로 촬영하였다. 그림 8 및 9는 SIT 카메라로 촬영한 영상으로서 그림 8은 공기의 흐름이 없는 경우이고 그림 9는 공기의 흐름에 의해 표면파가 형성된 경우이다. 이 실험에서 현재의 NR 빔포트에서도 이상 유동에 대한 실시간 영상을 얻을 수 있음을 확인하였다. 동일한 실험을 IR 빔포트에서 수행한다면 더욱 좋은 영상을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

하나로에 고속 동적 라디오그래피 장치를 구현하기 위하여 연구를 수행해 왔다. 이들 연구를 통해 얻은 결론과 앞으로의 진행 방향을 정리하면 아래와 같다.

- 하나로 IR 빔포트의 특성은 지금까지 고속 동적 라디오그래피를 이용한 연구가 많이 수행되어 왔던 JRR-3M의 특성보다 우수하다.
- 기존의 전환막은 고속 동적 라디오그래피에도 충분히 사용할 수 있다.
- 중수를 이상 유동 실험의 유체로 사용하면 실험에 사용 가능한 유체의 두께는 20 mm 이상이다.
- 초당 30 frame의 속도로 실시간 영상을 제공하는 SIT 카메라를 이용하여 기존의 NR 빔포트에서 표면파 촬영 시험을 수행한 결과 NR 빔포트에서도 실시간 영상을 획득할 수 있음을 확인하였고, 동일한 실험을 IR 빔포트에서 수행한다면 더욱 좋은 영상을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 하나로 IR 빔포트에서 조기에 고속 동적 라디오그래피 실험을 수행하기 위해서는 외국의 이미 갖추어진 카메라 장비를 활용하는 것도 하나의 방안이다. 장비를 갖춘 외국의 이용자를 유치하여 기술을 습득하고 관련 동향을 익히는 것이 하나로 IR 빔포트에 최선의 카메라 장비를 갖추는 일에 도움이 될 것으로 생각한다.
- 고속 동적 라디오그래피 장비의 구축과 더불어 이상 유동 측정에 다른 방사선 계측 장비를 같

이 활용하는 방안도 생각해 보아야 한다.

감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 기관고유사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고 문헌

- [1] H.J. Kim, et al., "Neutron radiography application in Korea," Fujine, S.(eds.), Neutron Radiography(3), pp.549-556, Kluwer Academic Press., Holland, 1990.
- [2] 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.
- [3] S.Y. Lee, et al., "COBRA/RELAP5: A merged version of the COBRA-TF and RELAP5/MOD3 codes," Nucl. Tech, Vol.99, pp.177-187, 1992.
- [4] 임인철 외 3인, "이상 유동 연구를 위한 하나로 NR 설비의 특성화 연구", 한국원자력연구소, KAERI/RR-2094/2000, 2000.
- [5] I.C. Lim, et al., "Characteristics of Neutron Beam from IR Beam Port of HANARO for its Application to Dynamic Neutron Radiography", approved for the presentation at PHYSOR2002, Seoul, Korea, 2002.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 한국표준과학연구원, "시험성적서: 하나로 NR scintillator", 2000.
- [9] T. Hibiki, K. Mishima, "Feasibility of high-frame 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.184-194, 1996.

표 1. JRR-3M NR 빔과 하나로 IR 빔의 특성 비교

Location		JRR-3M NR (20 MW)[6]	HANARO IR Beam Port (24 MW)[5]			
		Specimen Table	Collimator exit	1.5 m from collimator exit	2.0 m from collimator exit	3.57 m from collimator exit
Flux (n/cm ² ·s)	Calculation	-	6.11E8	2.86E8	1.90E8	9.66E7
	Measurement	1.5E8	8.34E8	3.32E8	2.61E8	1.28E8
	Ratio	-	1.37	1.16	1.37	1.32
N/v ratio (n/mR·cm ²)		6.3E6	1.48E8	-	-	-
Cd ratio		130	104	160	-	-

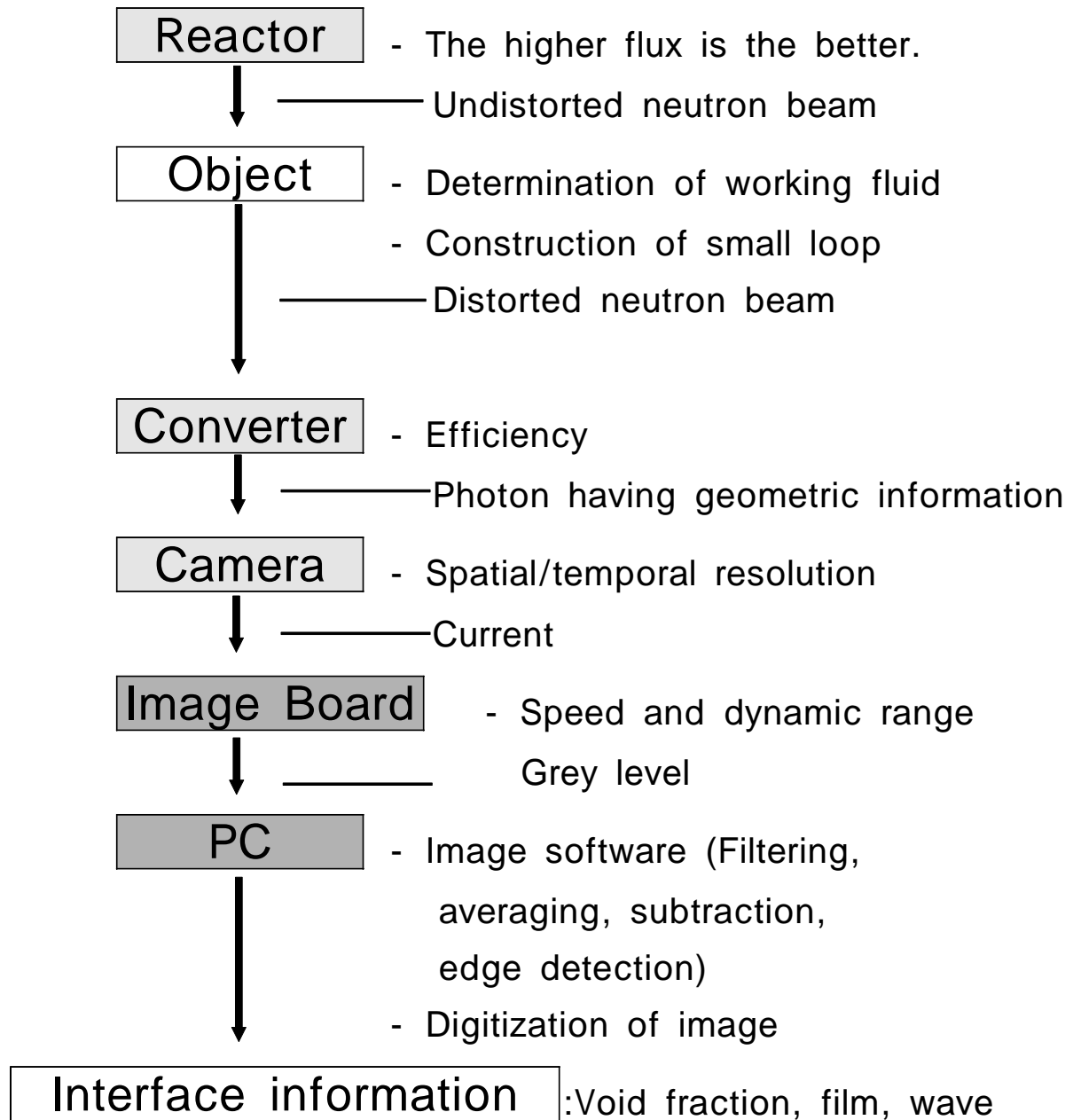


그림 1. 동적 래디오그래피를 이용한 이상 유동 실험 계통



그림 2. BNCT 조사실 전면

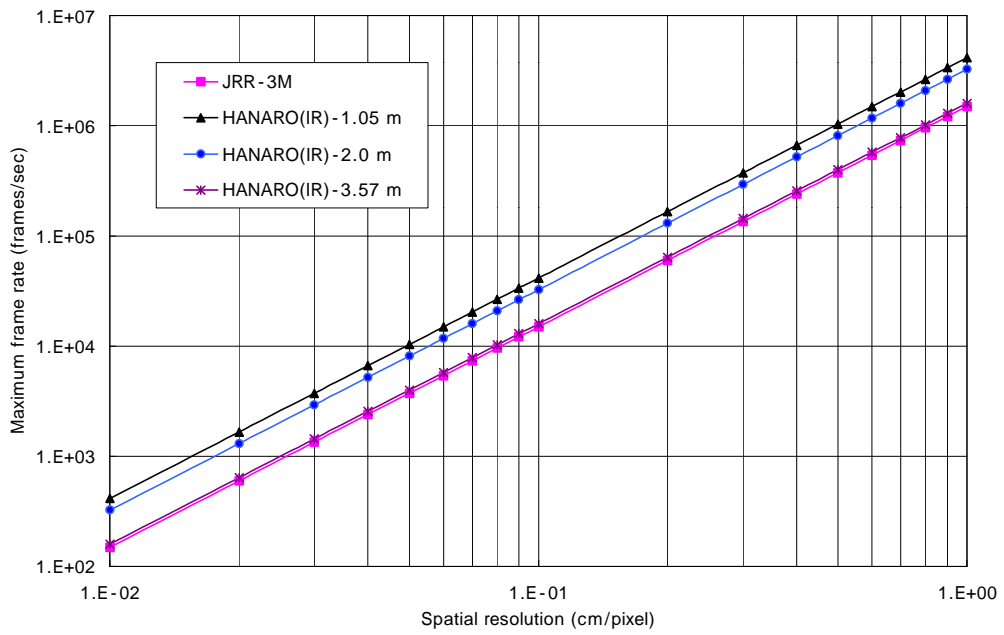


그림 3. 10% 측정 오차를 감수하는 경우의 최대 카메라 frame rate 비교

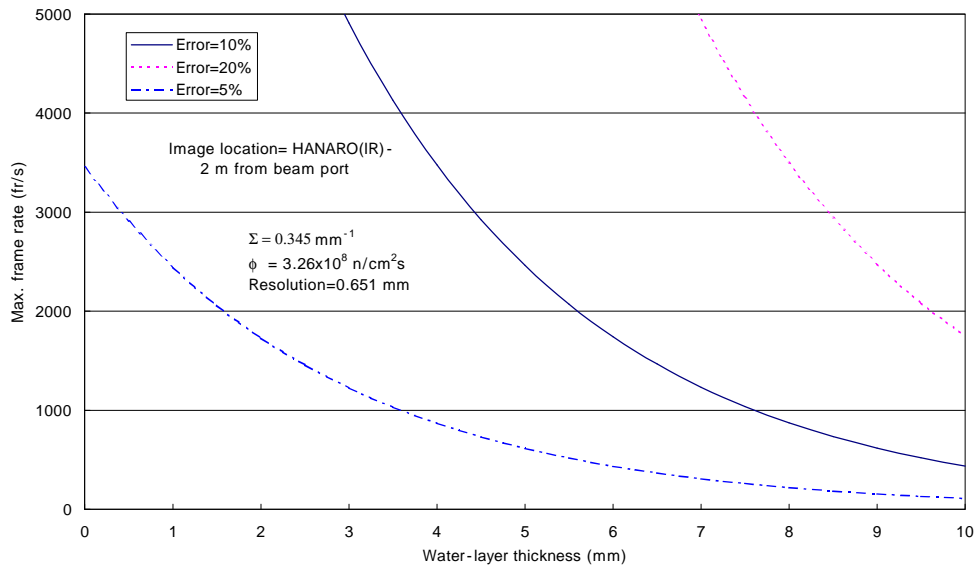


그림 4. 물 두께 및 측정 오차와 카메라 frame rate의 관계

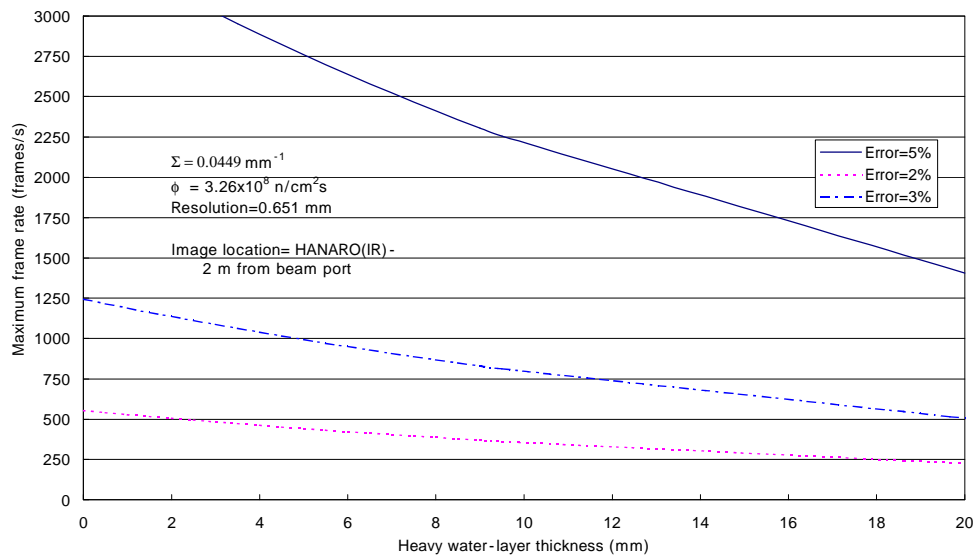


그림 5. 중수 두께 및 측정 오차와 카메라 frame rate의 관계

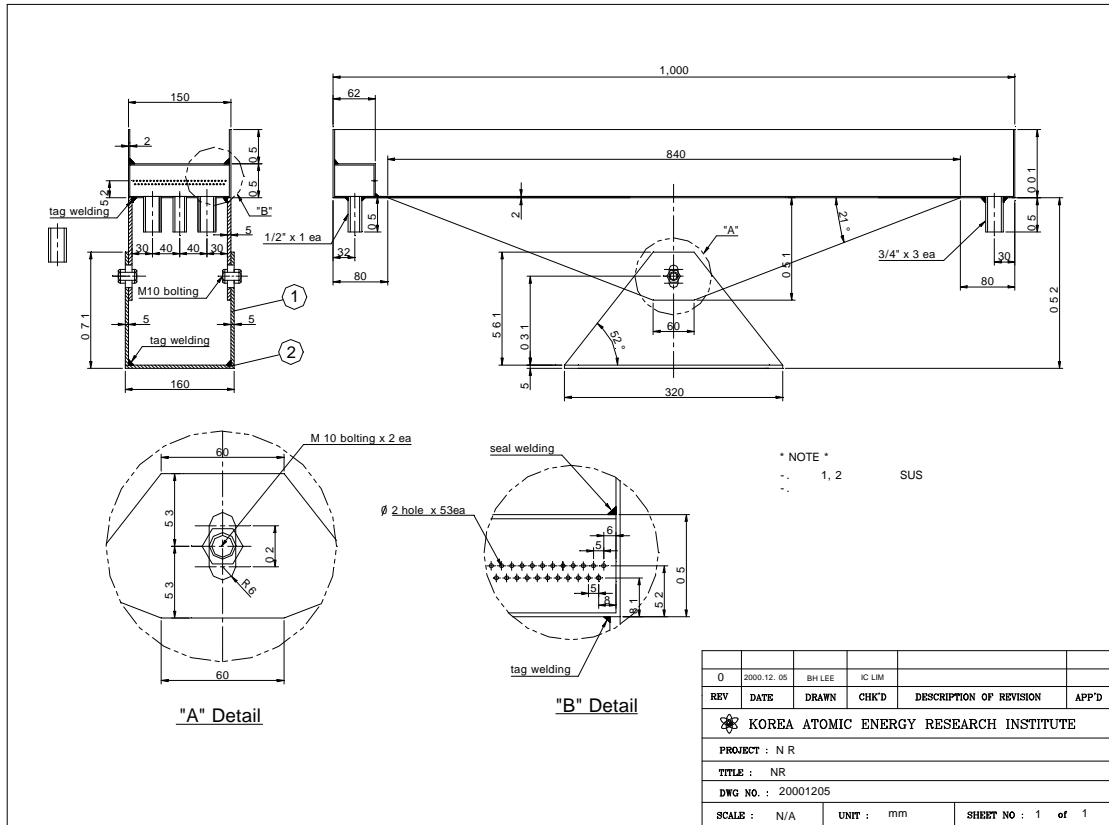


그림 6. 물 표면과 측정용 Test Section



그림 7. 물 표면과 측정용 실험 장치 배치 모습

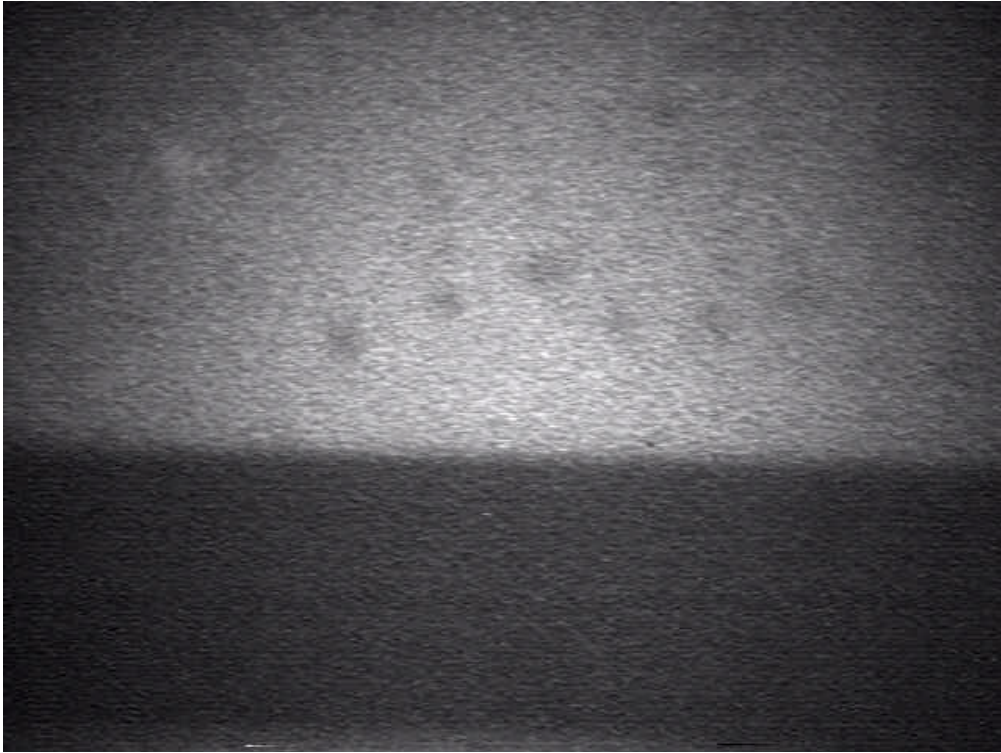


그림 8. 공기 흐름이 없을 때의 물과 공기의 경계층 영상

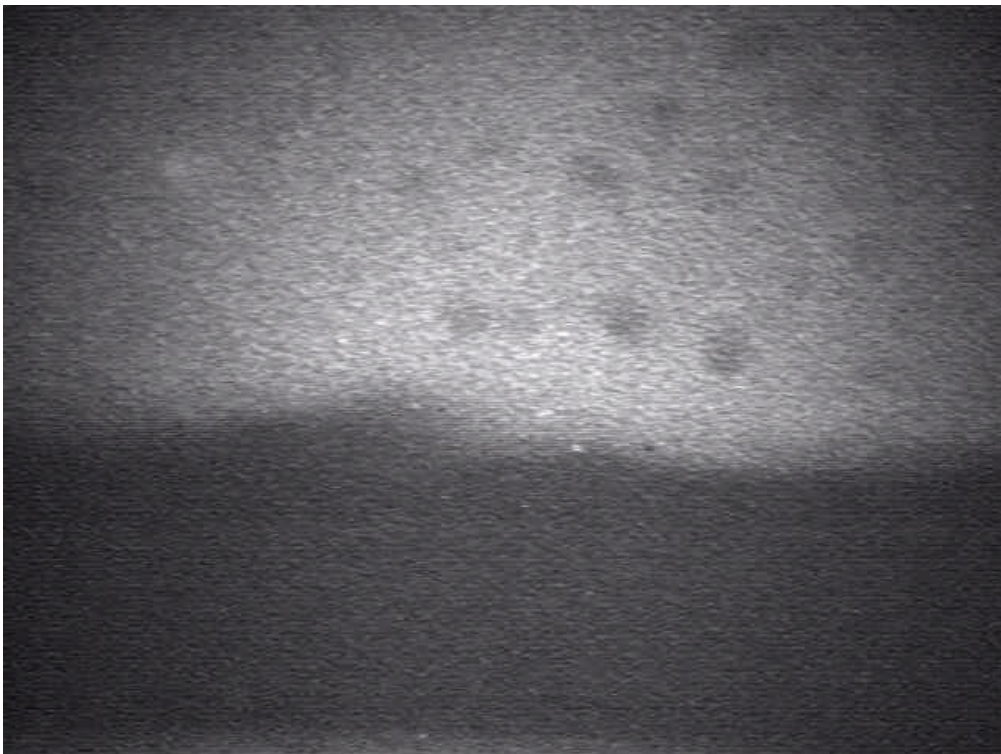


그림 9. 공기를 흘릴 때의 물과 공기의 경계층 영상