중성자 래디오그래피를 이용한 액체금속 유동장 측정

차재은[†] · 사이토^{*}

Measurement of Liquid-Metal Flow with a Dynamic Neutron Radiography

Jae-Eun Cha and Yasushi Saito

Abstract. The flow-field of a liquid-metal system is very important for the safety analysis and the design of the steam generator of liquid-metal fast breeder reactor. Dynamic neutron radiography (DNR) is suitable for a visualization and measurement of a liquid metal flow and a two-phase flow in a metallic duct. However, the three dimensional DNR techniques is not enough to obtain the velocity information in the wide channel up to now. In this research, a high speed DNR technique was applied to visualize the heavy liquid-metal flow field in the narrow channel with the HANARO-beam facility. The images were taken with a high frame-rate neutron radiography at 250 fps and analyzed with a Particle Image Velocimetry(PIV) method. The images were compared with the results of the commercial CFX code to study the feasibility of DNR technique for the measuring the heavy liquid-metal flow field. The PIV images could discern the turbulent vortex flow in the two-dimensional narrow channel.

Key Words: Dynamic Neutron Radiography(중성자 래디오그래피), Liquid Metal(액체금속), Flow Visualization(유동가시화)

1. 서 론

중성자 래디오그래피(neutron radiography)는 물질에 따라 중성자를 흡수하는 특성에 차이가 나는 성질을 이용하여 화상(image)을 측정하는 기법이다. 엑스선(X-ray)은 원자량이 큰 물질을 투과하기 어려워 증속이나 금속의 화상관찰에 이용하기 용이하지 않다. Fig. 1은 각종 원소의 질량흡수계수를 나타낸 것으로, 중성자 래디오그래피는 물질에 따라서 중성자에 반응하는 단면적(cross section)이 다른 특성으로 인하여 재질에 따라서는 금속관도 잘 투과한다. 따라서 금속관 내부의 유동관찰이나 상변화 현상이 있는 물 등의 2상유동(two-phase flow) 관찰에 장점이 있다^{(1,2)(3,4)}. 중성자 래디오그래피는 그 방법에 따라 정적 래디오그래피(static neutron radiography)와 동적 중성자 래디오그래피(dynamic neutron radiography)로 크게 나눌 수 있다.

정적 래디오그래피는 고해상도의 CCD 카메라를 이용하여 주로 정지화상을 관찰하는 기법으로, 구조물의 건전성에 영향을 주는 핀홀(pin hole)같은 미세한 파손 부위를 탐색하는데 사용된다. 동적 래디오그래피는 고속 촬영기(high speed camera)와 연계하여 빠르게 변하는 유동장을 관찰하는데 주로 사용된다.

Fig. 2는 한국원자력연구원 고속로기술개발부에서 개념설계한 소듐냉각고속로 KALIMER-600의 3차원 개략도이다⁽⁵⁾. KALIMER-600은 600 MWe의 전기를 생산하는 원자로로서, 1차계통 펌프와 중간열교환기가 원자로 용기 내부에 설치된 풀(pool)형 원자로이다. 소듐은 열수력적인 특성과 전기적 특성이 좋아서 액체금속로의 냉각재로서 가장 많이 연구된 금속이며, 소듐 냉각고속로는 제 4세대 원자로 후보중에서 기술적으로 상용화에 가장 근접한 액체금속로이다. 액체소듐은 물과 급격히 반응하여 원자로의 안전성에 영향을 줄 수 있으므로, 소듐(sodium)을 냉각재로 사용하는 소듐 냉각고속로는 기존의 경수로와는 다르게 중간 계통이 하나더 있어, 1차계통 중간열교환기에서 얻어온 열을 증기발생기로 수송하고, 여기서 터빈을 구동하기 위

[†]한국원자력연구원 고속로기술개발부

E-mail : jecha@kaeri.re.kr

^{*}교토대 원자로연구소

Table 1. Characteristics of ENF-Beam

Location	Collimator exit	1.05 m from exit	2 m from beam exit	3.57 m from beam exit
Flux (n/cm ² s)	8.34E8	3.34E8	2.58E8	1.30E8
N/g ratio (n/mRcm ²)	1.48E8	-	-	1.10E8
L/D	38.5	47.3	55.2	68
Cd ratio	104	160	-	-

(L: distance from collimator exit to test section, D: collimator diameter)

미러박스(mirror-box) 끝부분에 설치한 고속카메라를 이용하여 가시광선을 촬영하여 유동장을 측정한다.

하나로(HANARO)는 한국원자력연구소에 설치된 출력 30MWth의 연구용 원자로(research reactor)로서 현재 동위원소 생산 및 각종 재료 및 열수력 실험 등에 이용되는 중성자원(neutron source)이다. Table 1은 하나로 ENF(Ex-core Neutron Facility)룸의 중성자속 등의 특성을 정리한 것이다.

Fig. 4는 하나로의 ENF(Ex-core Neutron Facility)룸 내부에 설치한 실험장치의 개략도이다. 측정부 및 카메라를 포함한 화상측정용 장비들은 ENF룸 내부에 설치하였고, 룸외부에서 측정부의 온도와 유량, 화상측정시스템을 제어하였다. Fig. 5는 측정부 및 카메라시스템을 설치한 모습을 보여준다. 화상촬영을 위한 고속카메라와 화상증배기 및 미러박스(mirror box)는, 감마선(Gamma ray) 및 중성자에 노출(irradiation)되어 손상되는 것을 막기위하여, 1인치이상의 두께를 갖는 납덩이(lead block)와 보론천(boron sheet)로써 차폐하였다.

측정부의 액체금속 순환은 측정부내에 주입하는 고순도 질소가스로써 액체금속내에 밀도차를 발생시켜

Fig. 4. Schematics of the experimental apparatus. **Fig. 5.** Arrangement of the experimental apparatus.

순환시키는 gas-lift pump의 원리를 이용하였다. 측정부(test section)는 유동장 측정을 위하여 단상의 액체 금속만이 흐르도록 구성된 하강부(downcomer)와 가스를 주입하기 위하여 하강부의 양측에 설치한 상승부(riser)로 구성된다. 하강부에는 유동장 측정의 몇가지 모델이 되는 구조물을 설치하였다.

측정부는 중성자 투과와 가열이 용이하도록, 두께 5 mm(채널폭 10 mm, 높이 475 mm)의 알루미늄을 이용하여 제작하였다. 측정부의 외부 표면에는 직경 1 mm의 히터(용량 1.5 kW)를 밀착시켜 부착하고 보온을 위하여 그 표면을 세라믹울(ceramic wool)로써 단열하였다. 장치의 온도는 외부 표면에 부착한 1/16 인치의 열전대(sheath K-type)와 온도조절기를 이용하여 조절하였다. 질량유량계(mass flow meter)와 미세유량 조절밸브(metering valve)를 이용하여 기체상인 질소 가스의 유량을 조절하였다. 측정부 내부로 주입된 질소가스는 밀도차에 의하여 측정부내의 하강부(downcomer)내에 있는 액체금속을 아래방향으로 순환시킨다. 질소가스의 주입은 약 3 mm의 내경을 갖는 1/8인치 튜브를 이용하여 좌우측의 유량을 질량유량계로써 정밀하게 제어하여 조절하였다. 질소가스는 주입관 외벽에 설치한 히터로써 예열하여 측정부에서의 액체 금속과 동일한 온도가 되도록 하였다.

2.2 화상장치 및 해석방법

Table 2는 본 실험에서 사용된 화상측정 장비(imaging system)를 정리한 것이다. CMOS 센서를 내장한 REDLAKE사의 모델 HG-LE 고속카메라는 1500 fps이하의 촬영속도에서는 752×752의 해상도(resolution)를 갖는다. 전환막에서 발생한 영상 신호는 고속카메라에서 측정하기에 충분치 않으므로, 화상증

Fig. 6. Raw images taken by HFNR in HANARO.

Fig. 7. Seeding Particles.

폭을 위한 화상증배기(Image intensifier)를 중간에 삽입하였다.

측정부는 원자로의 중성자 빔출구(beam port)로부터 1500 mm의 거리에 설치하였다. 측정부의 중심에서 카메라시스템의 전환막의 외표면은 약 75 mm의 거리가 되도록 설치하여 촬영한 영상의 해상도를 높이도록 구성하였다.

Fig. 6은 본 실험에서 고속 중성자라디오그래피로써 측정된 측정부내의 영상을 화상처리없이 가공되지 않은 상태(raw image)로 보여준 것이다. 본 실험에서 화상부의 영역이 전체 유동장을 측정하기에 원자로의 특성상 부족하여 3개의 영역(domain)으로 나누어 측정하였다. 각각의 화상은 100×80 mm²의 측정 영역을 가진다. 측정부에서 중성자속과 L/D는 각각 2.9E8 n/cm²·s 와 50 이다. 측정된 화상은 하나의 픽셀(pixel)이 0.128 μm의 해상도를 가진다. 영상은 photon 증폭을 위하여 화상증배기(image intensifier)의 열림 시간(gate time)을 1800 μsec 로 설정하여 250 fps(500 fps, 500 msec)의 촬영속도에서 측정하였다.

실험에 사용된 액체금속은 납-비스무스 공융합금(Pb44.5wt%-Bi55.5 wt%, 밀도 10550 kg/m³)으로 용융점이 124.5°C이다. Fig. 7은 유동장 측정을 위한 추적입자(tracer particles)를 보여주는 것으로, 금-카드뮴 합금(AuCd3, 밀도 10700 kg/m³) 을 이용하여 직경 1mm(±0.5)내외로 제작하여 사용하였다.

Fig. 6(a)는 증기발생기(steam generator)의 외벽에 흐르는 액체금속의 유동을 관찰하기 위하여 KALIMER-600의 증기발생기를 1/2 scale의 축소하여 튜브의 피치 중 1개를 제거한 것이다. Fig. 6(b)는 제 4세대 액체금속로의 후보로서 연구되고 있는 가속기구동 미입계 원자로(Accelerator Driven Transmutation System)의 빔창(beam window)으로 사용되는 target의 유동을 모사하기 위하여 설치한 것이다. Fig. 6(c)는 상승부와 하강부 사이에 유동을 분기시키기 위하여 필요한 분기부(branch)에서 유동을 관찰한 것이다.

속도 벡터의 추출을 위한 화상해석(image analysis)은 연속되는 두개의 화상에서 입자들의 움직임을 해석하는 PIV(Particle Image Velocimetry)법을 사용하였다. 공간 상관계수(spatial cross correlation coefficient)는 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$R(p, q) = \frac{\int G_1(x, y) G_2(x+p, y+q) dV}{\sqrt{\int G_1^2 dV \int G_2^2 dV}} \quad (1)$$

여기서 G_1 과 G_2 는 각각 첫번째 또는 두번째 화상의 그레이 레벨(gray level)을 나타낸다. PIV해석은 20×20 픽셀과 30×30 픽셀의 탐색창(search window)을 이용하여 수행하였다. 화상해석은 중성자를 조사하지 않은 상태의 dark current를 제거한 후 수행하였다.

3. 실험결과

본 실험은 150°C의 온도에서 수행하였다. 상승부(riser)에 주입하는 질소가스의 유량을 0.5~12 lpm (상승부의 기상의 길보기 속도 0~50 cm/s) 범위에서 조절하여 밀도차에 의하여 액체금속을 순환시켰다.

Table 2. List of optical devices

Converter	NE426 type
Lens	Nikon 105 mm Telegraphic lens
Image intensifier	Hamamatsu C6598 + booster
Relay lens	Hamamatsu A4539
Camera	Redlake HG-LE

Fig. 8. Comparison of velocity field with integration time (gas velocity 16.7 cm/s, 250 fps, 1800 msec gate-time).

Fig. 9. Comparison of velocity field with gas-pumping flow (integration time 0.2 sec, 250 fps, 1800 msec gate-time).

Fig. 8는 증기발생기를 모사하는 cross flow의 유동을 시간평균(time-averaged)하여 화상해석한 것으로, 본 실험의 액체중금속속에서 측정한 유동장이 관군유동을 제대로 반영하고 있는지를 보여준다. 화상을 해석하는 시간에 따라 유동장에 평균효과가 나타남을 볼 수 있다. 원관 후류에서 발생하는 와류(vortex)는 뒷열의 원관에 영향을 주고 있어, 기포펌핑에 의한 자연순환을 이용하는 신개념의 증기발생기의 성능분석에 중성자래디오그래피를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 펌핑하는 가스의 유량에 따라서, 관군 주위의 유동 특성이 어떻게 변하는 가를 측정한 것이다. 가스 펌핑량이 증가할수록 관군주위에서 교란이 증가하여 와류의 크기가 증가함을 잘 보여준다. Fig. 9(b)는 가스를 공급하는 좌우 상승부(riser)의 유량을 불균일하게 공급한 것인데, 좌우측의 유속에 차이가 있음을 잘 보여준다. 또한 관군사이의 채널에는 속도가 상대적으로 빨라지는데 이러한 효과는 기포펌핑의 세기가 증가할수록 커짐을 해석결과에서 볼 수 있다.

Fig. 10은 측정 영역에 따른 대표적인 측정결과(기포 펌핑속도는 다름)를 나타낸 것으로, cross flow 및 target 또는 branch 유동에서 구조물 주위에서 형성되는 기본적인 유동을 narrow channel에서 측정할 수 있음을 보여준다. 그러나 중성자 래디오그래피는 그 특

Fig. 10. Comparison of velocity field with flow shape (integration time (a)(b) 0.4sec_250 fps, (c) 0.5sec_500 fps).

성상 아직 3차원 유동을 측정하는 기법의 개발에 근본적으로 많은 장애물이 있다. 따라서 간단한 유동구조에 대한 유동해석 결과와 화상촬영 결과를 비교하여 촬영이 어느 정도 유동장을 적절히 반영하였는지를 비교 검토하였다.

Fig. 11은 ANSYS사의 CFX 10 solver를 이용하여 측정부의 입구속도가 40 mm/s인 경우(가스유량 16.7 cm/s)에 대하여 해석한 것이다. 전체적으로 관주위에서의 와류와 branch 부위의 와류는 중성자래디오그래피의 화상해석과 그 형태가 거의 유사함을 볼 수 있다. 따라서 중금속을 중간매개체로 하는 기포펌핑을 이용한 증기발생기를 개발할 경우 기본설계 수행한 후, 전산해석에 필요한 기초적인 유동장 특성자료는 중성자래디오그래

Fig. 11. Axial velocity with CFD analysis (inlet velocity 40 mm/s).

피를 통하여 정성적인 특성들은 분석할 수 있음을 어느정도 보여주고 있다.

4. 결 론

하나로(HANARO)에서 narrow channel내에 액체중 금속인 납합금을 이용하여 중성자 래디오그래피로써 유동장을 측정하였다. 촬영속도 250 fps의 고속촬영 기법으로 유동을 관찰하였고 PIV방법을 이용하여 화상을 해석하였다. CFX를 이용한 수치해석과 화상해석 결과는 narrow channel의 2차원적인 실험조건에서는

어느정도 유사한 유동결과를 보여주었다. 향후 혁신개념 증기발생기 개발 및 중성자래디오그래피를 이용한 3차원 유동장 측정 방법론 개발에 본 연구 기반을 토대로 범위를 확장해 나갈 것이다.

후 기

본 연구는 중장기 원자력연구개발사업 및 출연금 주요사업의 지원으로 수행되었습니다. 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) I.C. Lim, 2001, Study on the characterization of the neutron radiography facility in HANARO for two-phase flow research, *KAERI Report*, KAERI/RR-2094/20010.
- 2) Mishima K., Hibiki T., 1996, "Quantitative method to measure void fraction of two-phase flow using electronic imaging with neutrons," *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 124, pp. 327-338.
- 3) I.C. Lim, 2004, *ITMNR-5*, Garching, Germany, 26-30 July.
- 4) Y. Saito, 2000, "Visualization and measurement of liquid phase velocity and void fraction of gas-liquid metal two-phase flow by using neutron radiography," *9th Symposium on Flow Visualization*
- 5) D.H. Han *et al.*, 2007, KALIMER-600 Conceptual Design Report, KAERI/TR-3381/2007, KAERI Technical Report.