

A Preliminary Study on Measuring Void Fraction in a Fuel Rod Assembly by using an X-ray Imaging System

Sun-Young Lee, Oh-Sung Oh, Se-Ho Lee, Seung-Wook Lee*

Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

Received: November 23, 2017. Revised: December 25, 2017. Accepted: December 31, 2017

ABSTRACT

Bubbles are generated by the boiling of the cooling water when an accident occurs in the reactor and then in order to measure the void fraction, the Optical Fiber Probe(OFP) and optical camera are used in thermal hydraulic safety research. However, such an optical method is not suitable for measuring the void fraction in a 17×17 array of fuel rods due to the geometrical limitations. This study was conducted as a preliminary study using x-ray system and various phantoms before applying to rod bundles. Through radiographic and tomographic experiments, the tube voltage of the x-ray generator was 130 kVp and the tube current was 1 mA. In addition, it is possible to measure the hole of 1mm in size visually through the bubble resolution phantom, and it is confirmed that the contrast is relatively decreased in the inside of the freon in the case of the contrast evaluation using the road phantom. However, we could obtain good image without distortion when reconstructing the image. Bubble generation phantom experiments were used to confirm the flow direction of the bubbles and to acquire tomography images. The image J tool was used to measure the void fraction of 18 % for a single tomography image. This study has carried out previous researches for the measurement of the bubble rate around the nuclear fuel and could be used as a basic research for continuous research.

Keywords: Two phase flow, X-ray System, Phantom, Radiography, Tomography

I. INTRODUCTION

원자로 내 냉각수의 비등을 막기 위해 고온 고압 환경에서 운전되지만 냉각계통에 문제가 발생하게 되면 핵연료 주변에서 비등으로 인해 기포가 발생한다. 기포의 비정상적인 발달로 기포율이 증가하게 되면 열전달률은 급격하게 떨어지고, 핵연료 냉각에 치명적인 영향을 미치게 된다.^[1,2]

열수력 안전 분야에서는 Optical fiber probe나 카메라를 이용하여 기포의 거동을 측정한다.^[3] 이 경우 하나의 봉(Rod) 또는 일렬로 배열된 봉 다발에 대해서는 측정이 가능하나, PWR 원자로의 17×17 배열에서는 봉 직경 9.5 mm, 간격 12.6 mm 이기 때문에 장비 부착이 어렵다.^[1] 이와 같은 문제점을 개

선해보고자 국외에서는 X선이나 감마선을 이용한 기포율 측정 연구가 이루어지고 있다.^[4,6] 대표적으로 독일 Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf(HDZR) 연구기관의 U. Hampel *et. al.*^[4]의 연구에서 세슘(Cs-137) 선원을 이용하여 9×9 배열의 봉 다발에 대해서 아티팩트 저감 연구를 수행하였고, 지속적으로 기포율 측정을 위한 연구를 수행하고 있다. 참고문헌을 통해 방사선을 이용한 방법은 기포율을 측정하는 것으로 제한되며 실제 기포 측정에는 한계가 있는 편이다.^[4,6] 감마선의 경우 고에너지를 방출해 감쇠계수가 낮은 물질은 구분이 어려울 수 있으며, 감마선에 사용되는 Photon counting 검출기는 매우 고가이다.

본 연구는 실제 구조물 적용 전 핵연료 집합체와

* Corresponding Author: Seung-Wook Lee

E-mail: seunglee@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-1013

유사한 모의실험을 위해 비용 절감 및 장비 구축이 용이한 X선을 이용하고, 다양한 팬텀을 제작하여 기포율 측정 가능성 연구를 수행하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

2. 실험 방법 및 영상 재구성

2.1 실험 장비

본 연구에서 사용한 실험 장비는 X선 발생장치^[7]와 CMOS 검출기^[8], Computed Radiography(CR) 필름^[9]을 사용하여 측정하였다. 실험에 사용한 X선은 관전압 130 kVp, 관전류 1 mA로 설정하였다. 보유 중인 CMOS 검출기의 경우 X선의 허용에너지 범위가 작아 고에너지에 적합한 CR 필름을 이용하여 추가적으로 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 검출기의 Pixel 크기는 $49.5 \mu m$ 이며, 4×4 Binning Mode를 통해 $198 \mu m$ 로 설정하여 실험을 수행하였다. 장비의 성능 및 실험 조건들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Specifications of CMOS Detector, CR Film and experiment conditions.

Device	Specification
CMOS Detector	Active Area : $116 \times 146 \text{ mm}^2$ Pixel Size : $49.5 \mu m$ (4×4 Binning Mode : $198 \mu m$) Scintillator : CsI:TI 14-bit Digital Output X-ray Energy Range : 40 - 90 kVp
	CR Film
Source to Detector Distance (SDD)	100 cm
Source to Object Distance (SOD)	50 cm
Magnification (M)	2

2.2 모사 팬텀

연구에 사용한 팬텀은 3가지이며, 팬텀을 담은 케이스는 총 2가지 케이스를 제작하였다. 케이스 I의 경우 PWR의 핵연료 집합체의 17×17 배열, 봉 직경 9.5 mm, 간격 12.6 mm를 고려하였지만, 선행 연구이므로 17×17 배열의 크기는 필요하지 않다. 따라서 절반인 17×8 배열을 고려하여 케이스 I을

제작하였고, 단층(Tomography) 영상 실험을 위해 CMOS 검출기의 유효면적을 고려하여 케이스 II을 제작하였다. 기포 발생 팬텀은 3D 프린팅으로 제작하였으며 단일 봉 주변으로 기포 구멍을 뚫고 기포 발생장치를 연결하여 실제 기포를 발생시켜 실험을 수행하였다. 팬텀의 재료는 Polycarbonate(PC)를 이용하여 제작하였다.

Table 2. Size and specification of phantoms in experiments.

Phantom	Size and Specification	
Case I	$220.15 \text{ mm} \times 116.15 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$	
Case II	$64.05 \text{ mm} \times 64.05 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$	
Bubble Resolution Phantom	Size	$56 \text{ mm} \times 56 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$
	Hole Diameter	1, 2, 3, 4, 6, 10 mm
Rod Phantom	Circular	$\phi 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$
	Rectangular	$10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$
	Size	$70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$
Bubble Generation Phantom	Rod	$\phi 40 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$
	No. of Hole	31
	Size of Hole	1.5 mm

Table 2에 각 팬텀 별 크기 및 특징을 나타내었고, 실험에 사용한 팬텀은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 (a)는 X선의 투과도 및 대조도 평가를 위한 팬텀이고 (b)와 (c)는 단층 영상 획득을 위해 사용한 팬텀이다. (d)는 실제 기포 발생 실험을 위해 제작한 팬텀이다.

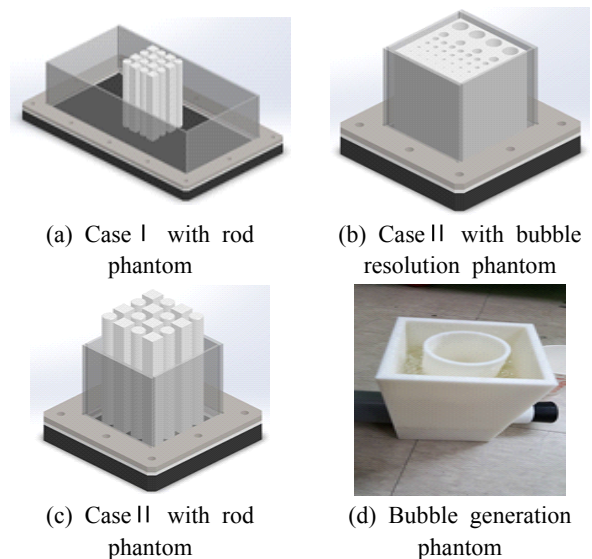


Fig. 1. Case and Phantom.

2.3 실험 방법

실험은 케이스 I 을 이용하여 막대 팬텀을 이용한 라디오그래피(Radiography) 영상을 획득하였다. 케이스 I 실험의 경우 최대 길이에서 투과도가 중요하므로 X선이 케이스의 20 cm를 투과할 수 있게 두고 측정하였다. 단층 영상의 경우 케이스 II를 이용하여 영상을 획득하였다. 또한, 실제 기포를 발생시켜 기포의 거동을 확인하기 위한 실험도 수행하였다.

실험 시 CMOS 검출기는 20 frame으로 설정 후 노출시간 Hz로 조절을 할 수 있으며 3, 5, 10 Hz를 이용하였다. 예를 들어, 10 Hz로 설정 후 10 frame 측정하는 경우 10 frame을 평균한 1장의 영상을 얻으며, 영상의 총 노출 시간은 1초에 해당한다.

2.4 영상 재구성 및 대조도 평가

영상 재구성은 케이스 II를 이용하여 총 360장의 충분한 수의 투과 영상을 획득하였다. 단층 영상을 획득하기 위하여 매트랩과 OCTOPUS 상용 툴을 이용하여 Filtered Back projection(FBP)와 Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique(SART) 방식을 이용하여 영상 재구성을 수행하였다.^[10] 매트랩은 코드(Code)를 수정하면서 Artifact를 저하 시킬 수 있지만 상대적으로 속도가 느리고, OCTOPUS의 경우 상용 툴이므로 빠르게 영상을 획득할 수 있지만 즉각적인 코드 수정이 불가능한 단점이 있다. 실험 후 대조도 평가를 위해서 Contrast to Noise Ratio(CNR)을 이용하였다. CNR은 영상에서 비교하고자 하는 두 물질간의 대조도를 평가를 위함이고 Eq. (1)을 통해 CNR 계산을 수행하였다.^[11]

$$CNR_{AB} = \frac{M_A - M_B}{\sigma_B} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 M_A 는 A 물질의 신호 값, M_B 는 배경이 되는 B 물질의 신호 값, σ_B 는 물질 B의 표준편차 값이다.

III. Results and Discussion

3.1 케이스 I 을 이용한 투과 및 대조도 실험

케이스 I 을 이용하여 라디오그래피 실험을 수행하였다. Fig. 2를 통해 액체 영역에서 막대 팬텀의 대조(Contrast)를 확인할 수 없었고, X선 발생 장치의 관전압의 변화 및 검출기의 Hz 조절에도 불구하고 측정이 불가하였다. 사용한 CMOS 검출기에서 측정이 불가하여 CR film을 이용하여 같은 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 3은 케이스 내부에 막대 팬텀을 좌측부터 4열, 3열, 2열, 1열로 배열한 영상이고, 130 kVp에서 액체와 팬텀과의 대조를 확인할 수 있었다.

CMOS 검출기의 경우 관전압의 변화 및 노출 시간 변화에 따라 강도(Intensity)변화는 있지만 X선 에너지의 허용 범위를 벗어나 감도(Sensitivity)가 떨어져서 액체 내부에서 측정이 불가능함을 알 수 있다. Fig. 4는 CMOS 검출기의 노출 시간 변화에 따른 강도 변화를 나타내었고, 노출 시간이 짧아질수록 강도의 감소를 확인할 수 있고, Fig. 5는 X선 발생장치 관전압의 변화에 따른 공기 영역, 2열, 4열로 배열된 막대 팬텀과 프레온 영역에서의 강도 변화이며 관전압이 높아짐에 따라 각 영역에서의 강도도 증가함을 확인할 수 있다.

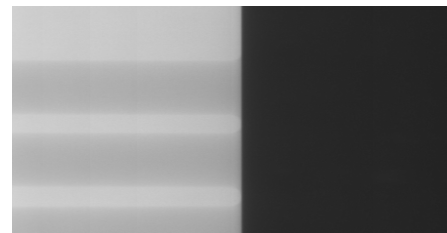


Fig. 2. Radiography image with rod phantom using CMOS detector set by 3Hz.

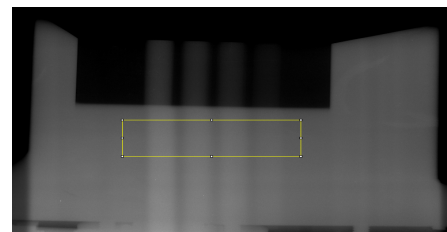


Fig. 3. Radiography image with rod phantom using CR film.

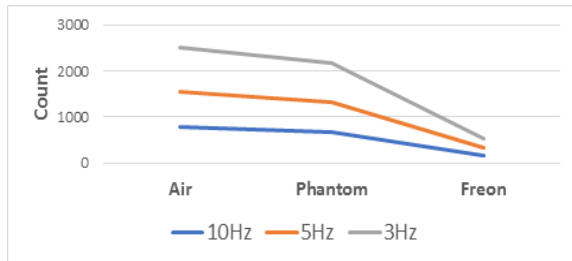


Fig. 4. Intensity according to exposure time(Hz).

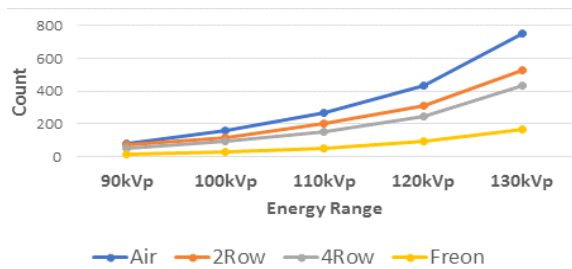


Fig. 5. Intensity according to X-tube voltage.

CR Film을 이용하여 얻은 영상에서 대조도를 확인하기 위하여 Contrast to Noise Ratio(CNR)을 계산하였고, Table 3을 통해 확인할 수 있다.

현재 실험은 최대 4개 배열을 기준으로 하여 측정하였지만 실제 구조물의 경우 17 × 17 배열이므로 대조는 현재보다 더 좋을 것이다.

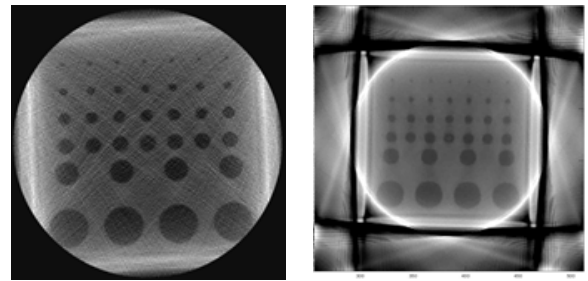
Table 3. CNR value in radiography image at 130kVp.

	4 row	3 row	2 row	1 row	Freon
Mean	192.2	186.8	183.4	174.5	172.3
Std	-	-	-	-	3.19
CNR	6.25	4.55	3.46	0.7	-

3.2 케이스II를 이용한 토모그래피 실험

단층 영상 획득을 위한 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 팬텀은 공기 해상도 팬텀과 막대 팬텀을 조립 후 케이스 내부에 프레온 액체를 채워 단층 영상을 획득하였다.

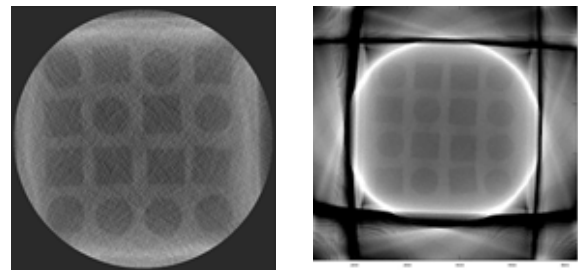
Fig. 6은 공기 해상도 팬텀을 이용한 단층 영상이며, 두 가지 틀을 이용하였다. 그 결과 가시적으로 1 mm 크기부터 10 mm 크기의 구멍을 확인할 수 있다.



(a) OCTOPUS - FBP (b) MATLAB - SART

Fig. 6. Reconstruction image with void resolution phantom.

아래 Fig. 7은 Freon 영역에서 얻은 단층 영상이다. Freon 유체의 경우 밀도가 $1.46g/cm^3$ 으로 높기 때문에 감쇠가 많이 일어나 공기 영역보다 대조도가 떨어짐을 확인할 수 있다.



(a) OCTOPUS (b) MATLAB

Fig. 7. Reconstruction image with SART in Freon.

실험 시 검출기의 유효면적을 벗어나 SART 및 MATLAB 재구성 영상에서 케이스의 외곽이 잘린 Truncation Artifact가 발생함을 확인할 수 있다.

Table 4는 액체 영역에서 해상도 팬텀의 CNR, Table 5는 막대 팬텀의 공기 및 액체 영역에 대한 CNR 값을 나타내었다.

팬텀 별 재구성 한 단층 영상에서도 가시적으로 확인할 수 있지만 CNR 값의 경우 SART 방식이 훨씬 좋은 것을 확인할 수 있다.

Table 4. CNR with void resolution phantom

Freon Zone	OCTOPUS	MATLAB
FBP	2.445	0.661
SART	-	8.47

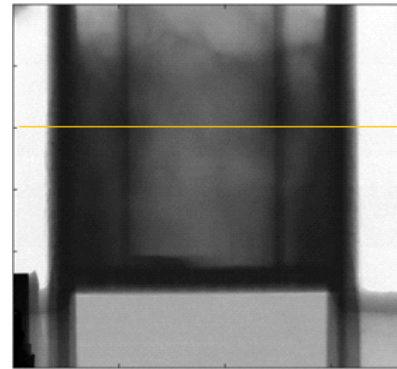
Table 5. CNR with rod phantom

Air Zone	OCTOPUS	MATLAB
FBP	4.74	3.96
SART	5.12	13.68
Freon Zone	OCTOPUS	MATLAB
FBP	1.73	2.95
SART	1.37	13.89

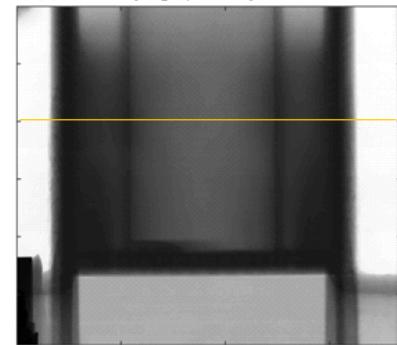
3.3 기포 발생 실험

기포 발생 장치를 이용해 기포를 발생 시켜 기포 및 기포율 측정 실험을 수행하였다. 실험 시 검출기 노출시간은 10 Hz로 설정 후 1 frame의 영상과 20 frame 영상을 획득하였다. Fig. 8은 검출기를 1 frame과 20 frame으로 설정 후 촬영한 라디로그래피 영상이다. Fig. 8의 (a)를 통해 흐릿하게 기포의 잔상을 확인할 수 있으며 (b)의 영상은 20장의 영상을 평균화하여 보여주기 때문에 기포의 잔상은 확인할 수 없다. 또한, 가운데 봉 주변으로 기포가 배출되어 위로 상승할수록 큰 앵글을 가지며 기포가 커짐을 확인할 수 있다. 유동 방향은 Fig. 8 및 Fig. 10의 (a), (c)를 통해 확인할 수 있다. Fig. 9는 Fig. 8의 노란색 선에서의 라인 프로파일을 나타내었다.

Fig. 10은 검출기를 20 frame으로 설정 후 렌더링을 통해 얻은 단면도와 단층 영상이다. (a)와 (b)의 경우 기포가 막 방출되는 위치에서의 단면도 및 단층 영상, (c)와 (d)는 기포가 퍼져나가는 위치에서의 단면도 및 단층 영상이다. (b)를 통해 기포가 막 방출되는 경우 주변 기포와의 간섭이 적어 기포간의 경계를 확인할 수 있지만 (d)에서는 기포가 상승하면서 직경이 커지고 기포 간의 간섭으로 봉 주변으로 원형 띠 형태로 확인이 가능하다. Image J를 이용해 시각적으로 범위 설정 후, Measure에서 면적을 계산해주는 기능을 이용하여 (d)의 기포율 계산하였고 약 18 %로 측정하였다.



(a) Radiography image of 1frame



(b) Radiography image of 20frame

Fig. 8. Radiography image of 1frame and 20frame.

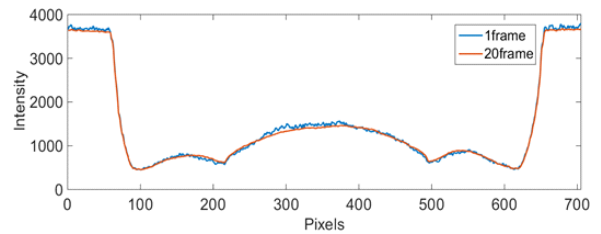
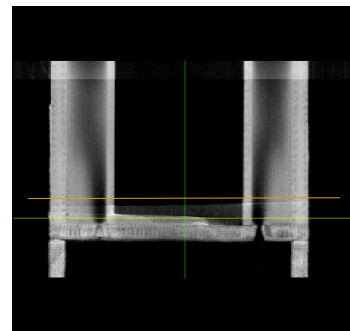
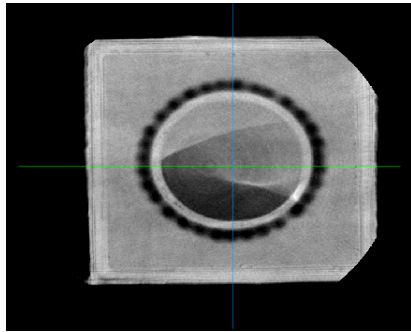


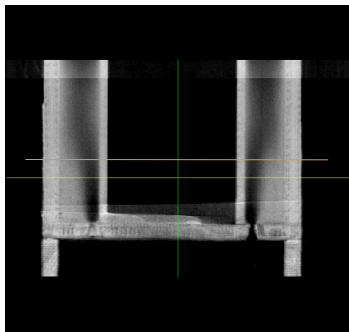
Fig. 9. Line profile at yellow line of Fig. 8.



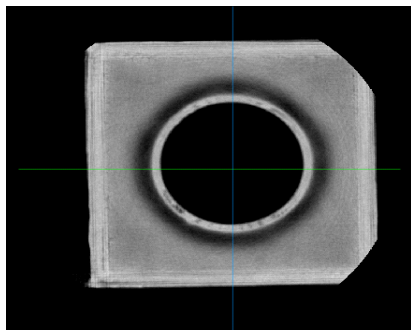
(a) Sectional view of the bubble phantom



(b) Tomography at the yellow line of image (a)



(c) Sectional view of the bubble phantom



(d) Tomography at the yellow line of image (c)

Fig. 10. Tomography of generating bubble phantom.

IV. CONCLUSION

본 연구에서는 기포율 측정을 위한 가능성 평가 연구를 수행하였고, 연구 가능성을 확인하였다. 본 연구에서는 X선 발생장치를 이용하였고, 실험을 위해 봉 직경과 간격을 고려한 케이스와 막대 팬텀 및 기포 해상도 팬텀을 이용하여 실험을 수행하였다. 영상 재구성 시 Truncation Artifact가 발생하였지만 가시적으로 좋은 영상을 획득하였다. 또한, 기포 발생 장치와 기포 발생 팬텀을 이용하여 실제 기포를 발생시켜 frame 별 라디오그래피 및 단층

영상 실험을 수행하였고, 기포 유동 방향을 확인 및 단층 영상을 통해 대략적인 기포율은 측정이 가능하였다. 또한, 기포 방출 시 기포의 크기가 작고 기포 간 간섭이 적어 경계 구분이 있으면 기포 하나의 대략적인 크기 및 기포 크기의 발달과정을 확인할 수 있지만 기포가 상승하면서 크기가 커지고 기포 간에 간섭을 주면 Blurry effect로 인해 원형 띠 형태로 확인할 수 있었다.

기포 발생 팬텀 실험을 통해 평면 검출기보다 기포를 따라가면서 측정할 수 있는 라인 검출기(Line Detector)가 더 적합하다. 라인 검출기는 수평의 단일 라인으로 측정 후 수직 방향으로 스캔하여 2차원 영상으로 보여주며, 스캔 속도의 단위는 cm/s로 기포의 속도에 맞는 라인 검출기가 요구되어진다.^[12]

본 연구를 통해 X선을 이용하여 봉 다발 내 기포율 및 기포 발생 현상 측정을 위한 기초 연구 자료로 이용할 수 있으며 이 연구를 바탕으로 기포 발생 팬텀의 봉 배열수를 증가 시키고, 기포의 상승 속도에 맞는 라인 검출기와 실험 결과와의 비교 평가를 위해 광학 장비를 이용하여 동시에 실험을 수행하여 X선을 이용한 정량적인 기포율 측정 연구를 수행한다면 더 좋은 연구 결과가 예상 된다.

Acknowledgement

본 연구는 NRF-2017M2A8A4018510 및 NRF-2017M2A2A6A01016849의 지원을 받아 수행하였습니다.

Reference

- [1] Neil E. Todreas and Mujid S. Kazimi, *NUCLEAR SYSTEMS : THERMAL HYDRAULIC FUNDAMENTALS*, 2nd Ed., CRC Press, Vol. 2, pp. 1-28, 183-185, 2012.
- [2] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, *Foundations of Heat Transfer*, 6th Ed., WILEY, pp. 604-611, 2014.
- [3] In-Cheol Chu, Seung-Hun Lee, Young Jung Youn, Jong Kuk Park, Hae Seob Choi, and Dong-Hin Euh, QUANTIFICATION OF LOCAL BUBBLE PARAMETERS OF SUBCOOLED BOILING FLOW IN A VER

TICAL ANNULUS CHANNEL, Specialist Workshop on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques for Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Italy, 2016.

- [4] U. Hampel, A. Bieberle, D. Hoppe, J. Kroneberg, E. Schleicher, T. Suhnel, F. Zimmermann and C. Zippe, High resolution gamma ray tomography scanner for flow measurement and non-destructive testing applications, Review of scientific instruments, Vol. 78, 2007.
- [5] D. Bauer, H. Chaves and C. Arcoumanis, Measurements of void fraction distribution in cavitating pipe flow using x-ray CT, Measurement Science and Technology, Vol. 23, No. 5, 2012.
- [6] E. Nazemi, S.A.H. Feghhi, G.H. Roshani, R. Gholipour Peyvandi and S. Setayeshi, Precise Void Fraction Measurement in Two-phase Flows Independent of the Flow Regime Using Gamma-ray Attenuation, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 48, pp. 64-71, 2006.
- [7] SEC CO.,LTD, 160kV Directional type open tube Specification, 1991.
- [8] http://www.rayence.com/ko/index.php?mid=cmosdetector&document_srl=260/
- [9] FUJIFILM, FUJIFILM Medical Systems CR User's Guide, FUJIFILM Medical Systems USA, 2004.
- [10] A. C. Kak and M. Slaney, *Principle of computed Tomographic Imaging*, IEEE Press, New York, USA, 1988.
- [11] <http://www.phys.cwru.edu/courses/p431/notes-2003/note123.html/>
- [12] DALSA, Application Note Line Scan Imaging Basics.

X선 영상 장치를 이용한 핵연료 집합체 내 기포율 측정을 위한 선행 연구

이선영, 오오성, 이세호, 이승욱*

부산대학교 기계공학부

요 약

원자로 내 사고발생 시 냉각수의 비등으로 기포가 발생하고, 기포율을 측정하기 위하여 열수력 안전 분야에서는 주로 Optical Fiber Probe(OFP)나 광학 카메라를 이용하여 측정하지만 기하학적 구조의 한계로 인해 17 × 17 배열의 봉 다발 내에 장비를 설치하는 것에는 어려움이 있다. 본 연구는 예비 연구로서 봉 다발에 적용하기 전 X선 시스템과 다양한 모사 팬텀을 이용하여 연구 가능성 평가를 수행하였다. 라디오그래피 및 토모그래피 실험을 통해 X선 발생 장치의 관전압 130 kVp, 관전류 1 mA가 적합하였다. 또한, 기포 해상도 팬텀을 통해 가시적으로 1 mm 크기의 구멍에 대해 측정이 가능하였으며 막대 팬텀을 이용한 대조도 평가의 경우 프레온 내부에서 대조도가 상대적으로 떨어짐을 확인할 수 있었다. 그러나 영상 재구성 시 일그러짐이 없는 좋은 영상을 획득할 수 있었다. 기포 발생 팬텀 실험을 통해 기포의 유동 방향 확인 및 단층 영상을 획득할 수 있었고, Image J 툴을 이용하여 하나의 단층영상에 대해 18 %의 기포율을 측정할 수 있었다. 본 연구는 핵연료 주변 기포율 측정을 위한 선행 연구를 수행하였고 지속적인 연구를 위한 기초 연구로서 활용할 수 있을 것이다.

중심단어: 2상 유동, 팬텀, X선 발생 장치, 투과 영상, 단층 영상