

중성자 영상법을 이용한 Heat Pipe 내의 이상유동 가시화

김태주[†] · 박수지* · 김종열* · 도승우**

Visualization of 2-Phase Flow at Heat Pipe using Neutron Imaging Technique

TaeJoo Kim, SuJi Park, JongYul Kim and SeungWoo Doh

Abstract The circular and flat heat pipe were experimentally investigated by using neutron imaging technique. This experimental study was performed at the DINGO of OPAL research reactor, Australia. The diameter of the circular heat pipe is 10 mm and the dimension of flat is 10(width) × 3(thickness) mm², respectively. We used the distilled water as a coolant. The coolant distributions and 2-phase flow patterns were measured under heating conditions. Experimental results show that neutron imaging technique is a good tool to visualize the 2-phase flow and phenomena in the heat pipe. The coolant distributions and 2-phase flow patterns depend on installation posture of the heat pipe and volume ratio of the coolant. Finally, it was discussed to calculate the void fraction by neutron imaging technique.

Key Words : Flow Visualization(유동가시화), Heat Pipe(히트 파이프),
Neutron Imaging Technique(중성자 영상법), 2-Phase Flow(이상유동)

기호설명

A 단면적[m²]
i 시편 구성체 색인
t 시편의 두께[m]
V 부피 [m³]
 μ 중성자 흡수 계수 [cm⁻¹]
 Φ 전환막 앞에서의 중성자선속 [n/sec-cm²]
 Φ_0 시편 앞에서의 중성자선속 [n/sec-cm²]

1. 서론

최근 들어 고성능 전자기기가 개발되고 기기의 내구성, 신뢰성과 작동 효율 향상을 위해 기기 내의 효과적인 열관리가 주요 관심사이다. 히트 파이프(Heat Pipe)는 양단 사이에 주어진 온도차에 의하여 작동 유체가 기체-액체의 상변화를 일으키며 열을 전달하는 밀폐형 열수송 소자로서 작은 온도 차로 대량의 열수송이 가능하다^{1,2,3,4}. 일반적으로 히트파이프는 넓은 작동 범위에서 안정된 작동을 보이는 것으로 알려져 있다. 그러나 제한된 작동 영역에서는 내부 작동 유체의 비등과 2상유동에 관련된 불안정성에 기인하여 여러 형태의 불안정한 작동 현상이 나타난다. 한 예로써 증발부에서 불연속적인 핵비등이 진행되고, 이 결과 히트파이프의 온도가 시간에 따라 증가와 감소를 반복하는

[†] Korea Atomic Energy Research Institute
E-mail: tj@kaeri.re.kr

* Korea Atomic Energy Research Institute

** Pohang University of Science and Technology

진동현상이 나타난다. 이러한 진동현상은 열수송이 진행되지 않아 열원의 과열과 함께 여러 가지 문제들이 심각하게 발생될 수 있다^{5,6,7,8)}.

불안정 작동 특성을 이해하고 해결하기 위해 내부 작동 유체의 핵비등 과정, 2상유동 거동 및 작동 유체의 분포를 가시화 기법을 활용하여 다양한 연구가 최근까지 활발히 수행되고 있다. 그러나 대부분의 연구들은 히트파이프의 구조적 문제로 인해 투명한 유리관 등 활용했기 때문에 온도장의 변형 등과 같은 한계가 존재한다. 본 연구에서는 작동 중인 히트파이프 내의 2상유동 구조 및 작동 유체 분포를 중성자 영상법으로 가시화하고, 특성을 이해하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 조건

2.1 중성자 영상법 및 영상 장치

중성자 영상법은 물질에 따라 서로 다른 중성자 투과 특성을 활용하는 X선, 감마선과 같은 방사선 촬영법의 한 종류이다. 방사선 촬영법은 방사선원에서 방출된 X선 혹은 중성자량이 시편을 투과하면서 지수적으로 감소한다는 원리를 이용하며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 Φ 는 검출기 전단에 도착하는 중성자속을 의미하며, Φ_0 는 중성자원에서 방출하는 중성자속을 의미한다. 그리고, μ 는 물질의 중성자 흡수 계수를 나타내며, t 는 시편의 두께이다. Fig.1은 원자번호에 따른 X선과 중성자의 흡수계수 변화를 보여주는 것으로, X선은 원자번호가 증가할수록 투과가 쉽지 않기 때문에 금속 내부의 2상유동 가시화가 쉽지 않다. 그렇지만, 중성자는 물질에 따라 투과 특성이 서로 다르고, 특히 알루미늄, 구리는 잘 투과하기 때문에 금속 내부의 2상유동 가시화에 적합하다.

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\sum_i \mu_i t_i} \quad (1)$$

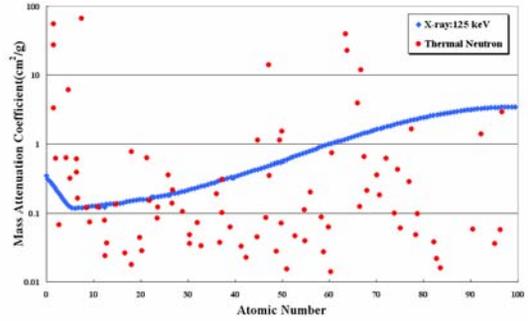


Figure 1. Mass attenuation coefficient among thermal neutron and X-ray[10]

중성자 영상법은 Fig. 2과 같이 중성자를 발생하는 중성자원(Neutron Source), 중성자원에서 발생된 중성자를 원하는 방향으로 보내주는 집속기(Collimator), 시편, 그리고 검출기(Detector)로 크게 구분할 수 있다.

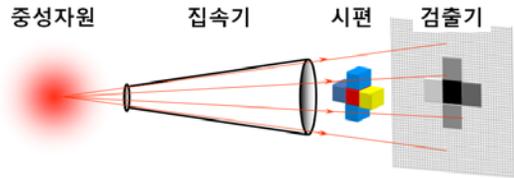


Figure 2. Components of neutron imaging technique

본 연구에서는 중성자원으로 Fig.3의 호주 OPAL 연구용 원자로 내의 중성자 영상 장치(DINGO)를 이용하였다. DINGO는 실험 종류에 따라 중성자속(Neutron Flux)과 빔 집속비(L/D ratio)를 다양하게 선택할 수 있다. 중성자 영상법에서 중성자속은 시간 분해능, 빔 집속비는 공간 분해능과 상호 연관성을 가지고 있다. 중성자 속과 빔 집속비를 동시에 향상 시킬 수는 없기 때문에 작동 중인 히트파이프 내의 2상유동을 가시화하기 위해 중성자속과 빔 집속비의 최적화가 필요하다. DINGO 장치 성능과 식(1)를 바탕으로 본 연구에서는 6×10^7 n/cm²sec와 500의 중성자 속과 빔 집속비를 선택하였다⁹⁾.

본 연구에서는 중성자 검출기로 Andor사의 Neo CMOS (2560 × 2160 pixels, 16 bit) 카메라와 두께

100 μm 의 $^6\text{LiF/ZnS:Ag}$ 의 중성자 전환막을 사용하였다. 각 실험 조건에서 1분 동안의 변화를 측정하였으며, 실험이 수행된 조건에서 공간 및 시간 분해능은 100 μm /pixel와 0.05 초이다.

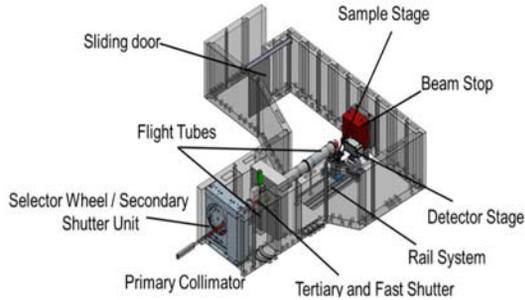


Figure 3. Schematic diagram of DINGO, OPAL.

2.2 히트파이프 내 비등 실험

Fig.4은 히트파이프 내 비등 실험장치의 개념도를 보여준다. 카트리지 히터(100W)와 알루미늄 블록으로 가열부를 제작하고, 가열부 상부에 히트파이프의 증발부를 삽입하였다. 가열부에 공급되는 전압을 조절하여 히트파이프 증발부의 온도를 제어하였다. 히트파이프의 작동 유체 충전율에 따른 변화를 동시에 가시화하기 위해 3개의 히트파이프를 가열부에 결합하고, K형 열전대와 자료획득장치(Agilent 34970A)를 통해 2초 간격으로 히트파이프의 벽면 온도를 측정하였다. Table 1과 Fig.5는 본 연구의 실험 조건 및 조건에서의 히트파이프 기울기에 대한 개념도이다.

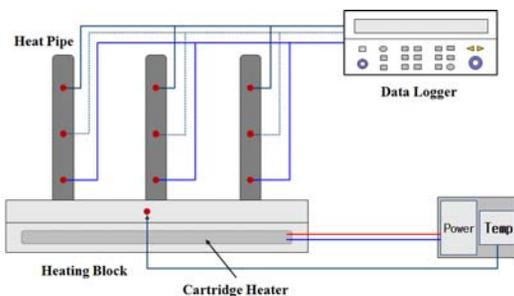


Figure 4. Schematic diagram of the test apparatus

Table 1. Experimental conditions

Parameter	Specification
Working Fluid	Water
Volume ratio [%]	10, 30, 60
Tube Shape	Flat, Circular
Tube size [mm]	Flat: width(10), depth(3) Circular: diameter(10)
Tube Angle [°]	70, 90

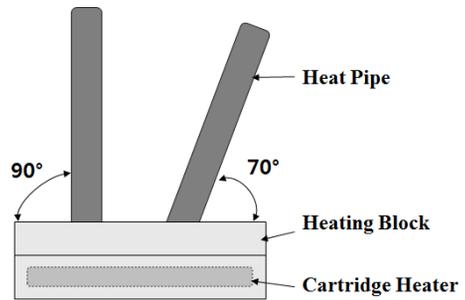


Figure 5. Schematic diagram of heat pipe Angle [front view]

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비등 가시화 결과

Fig.6은 직경 10mm 원형 히트파이프를 가열하기 전 상태를 중성자 영상법으로 가시화한 결과이며, 충전율에 따라 히트파이프 증발부 Pool 계면의 높이가 서로 다른 것을 비파괴적으로 확인할 수 있다. 특히, 히트파이프 내부에 있는 심지(Wick)에 모세관 현상 등에 의해 작동유체가 존재하는 것을 중성자의 투과율 차이로 인해 생기는 음영으로 확인할 수 있다.

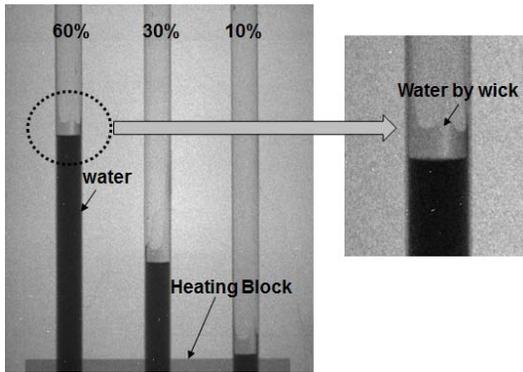


Figure 6. Visualization images of circular heat pipe by neutron imaging technique without heating

Fig-7-14는 평판형 및 원형 히트파이프를 기울기 (70, 90°) 와 충전률(10, 30, 60 %)에 따른 작동 유체의 분포 및 2상유동 구조 변화를 보여주는 가시화 결과이다. 기존의 가시화 기법으로는 힘든 히트파이프 내의 2상유동 구조 및 거동을 중성자 영상으로 명확하게 분석할 수 있는 것을 알 수 있다.

초기 충전율에 따라 증발부 및 단열부에 존재하는 작동유체가(Fig.7) 가열부의 온도가 차츰 증가함(30°C)에 따라 충전율 30% 조건에서 히트파이프의 하단 증발부의 핵비등 현상에 의해 기포핵이 생성되고 여기에서 간헐적으로 작고, 독립적인 기포(Bubble)가 나타난다(Fig.8).

온도가 상승함(70°C)에 따라 충전율 60% 조건에서는 증발부 하단에 생성된 기포핵에서 연속적으로 기포가 생성되지만, 충전율 30% 조건에서는 30°C에서 생성된 기포핵이 급격히 폭발하듯이 성장하여 Slug류가 생성되고, 간헐적으로 상부의 액체를 단열부 및 응축부로 축출하는 Blow-up 현상이 발생한다(Fig.9).

온도가 더 상승함(90°C)에 따라 충전율 30% 조건에서는 만들어진 기포핵의 크기가 더 확대되고, 만들어진 2~3개의 기포핵에서 지속적으로 생성된 기포들이 상승하면서 서로 합쳐져서 Slug 류 및 Churn 류를 이루고 있다. 이와 같이 증발부 상부에서 Churn류를 이룸에 따라 증발부 Pool 계면의 높이가 초기에 비해 약 상승함을 볼 수 있다. 70°C 조건에서 간헐적으로 나타나던 Blow-up 현상이 활발하게 나타난다. 이에 비해 충전율 60% 조건에서는

히트파이프의 기울기에 따라 기포핵의 개수가 다르며, 충전율 30%조건인 낮은 온도에 해당하는 Bubble류가 주를 이루는 것을 알 수 있다(Fig.10).

원형 히트파이프에서는 70°C이상 온도에서 간헐적으로 발생하는 Slug류와 응축부에서 응축된 작동 유체가 증발부로 귀환하면서 나타나는 재젖심 (rewetting)현상이 관찰되지만, 두께 3mm의 편판형보다 두꺼운 작동 유체(10mm)두께로 인해 2상유동 구조 변화를 관찰하기가 쉽지 않았다.

이처럼 중성자 영상법은 작동 중인 히트파이프 내부에서 일어나는 핵비등 과정, 2상유동 거동 및 작동 유체의 분포를 비파괴적으로 가시화할 수 있다. 중성자 영상법으로 측정된 2상유동 구조 변화 정보는 히트파이프 성능 향상에 필수적인 최적 충전율 계산 등에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

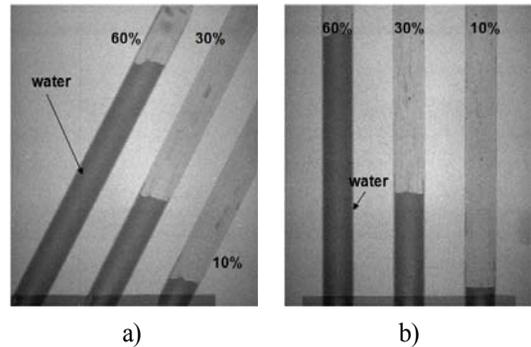


Figure 7. Visualization Images of flat heat pipe without power: a) 70° and b) 90°

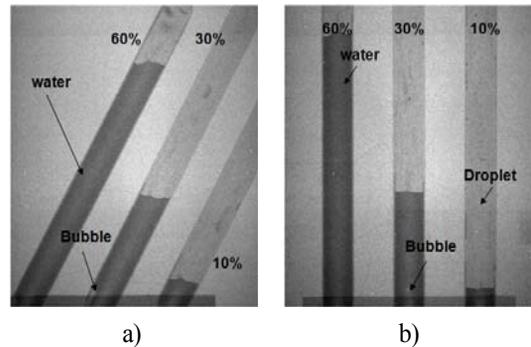


Figure 8. Visualization Images of flat heat pipe at 30°C: a) 70°and b) 90°

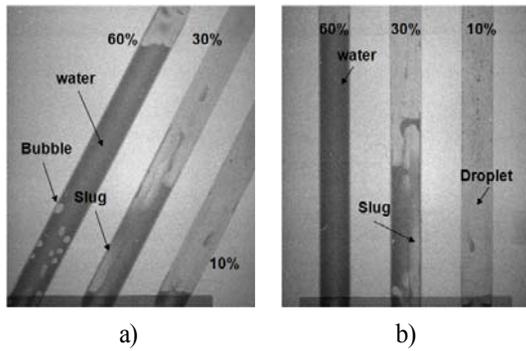


Figure 9. Visualization Images of flat heat pipe at 70°C: a) 70° and b) 90°

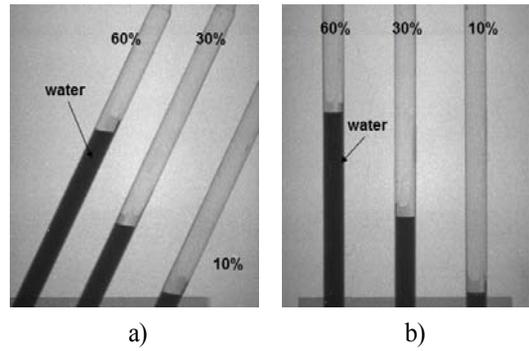


Figure 12. Visualization Images of circular heat pipe at 30°C: a) 70° and b) 90°

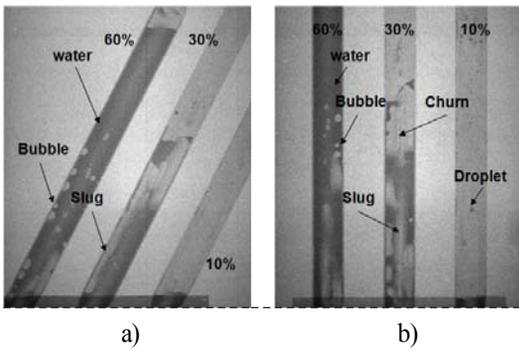


Figure 10. Visualization Images of flat heat pipe at 90°C: a) 70° and b) 90°

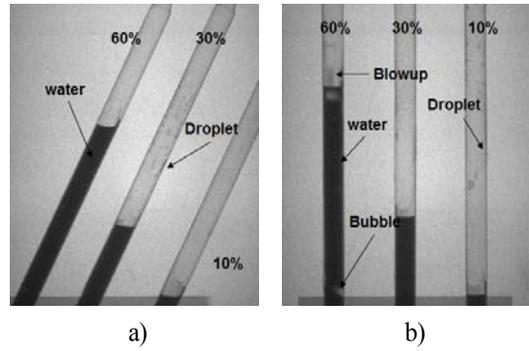


Figure 13. Visualization Images of circular heat pipe at 70°C: a) 70° and b) 90°

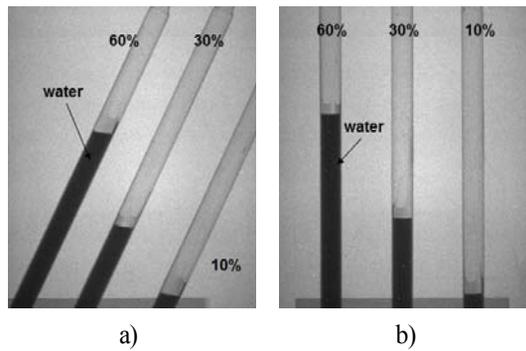


Figure 11. Visualization Images of circular heat pipe without power: a) 70° and b) 90°

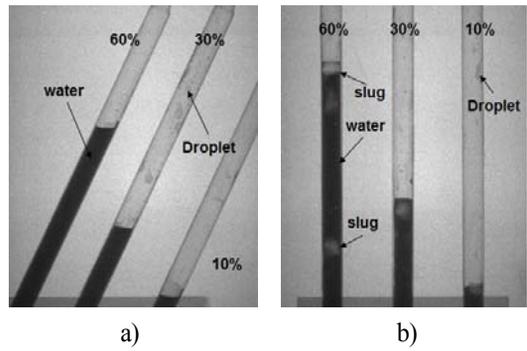


Figure 14. Visualization Images of circular heat pipe at 90°C: a) 70° and b) 90°

3.2 정량화 방법에 대한 고찰

히트파이프의 성능 향상을 위해서는 기포의 크기 및 기공을 예측이 중요하다. 증성자 영상법은 비파괴적으로 히트파이프 내부의 2상 유동 구조와 같은 정성적인 분석도 가능하지만, 식(1)을 활용하면 이론적으로 기공을 계산과 같은 정량적인 분석도 가능할 것으로 판단된다. 식(1)을 이용하여 이론적으로 작동 중인 히트파이프 내의 2상 유동에 대한 다양한 정보(액막 두께, 기공을 등)는 다음과 같이 구할 수 있다¹⁰⁾.

- 기체(vapor)만 존재하는 히트파이프를 증성자 영상법으로 가시화한다(Dry 이미지).
- 작동 중인 히트파이프를 증성자 영상법으로 가시화한다 (Wet 이미지).
- Wet 이미지를 Dry 이미지로 나누고, 양변에 자연로그를 취한다.

$$\ln\left(\frac{\Phi_{wet}}{\Phi_{Dry}}\right) = \ln\left(\frac{\Phi_o e^{-\sum_i \mu_{H_2O} + \mu_{water} t_{water}}}{\Phi_o e^{-\sum_i \mu_{H_2O}}}\right) = \mu_{water} t_{water} \quad (2)$$

- 액막의 두께는 작동유체의 증성자 흡수 계수 값을 이용하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$t_{water} = -\frac{1}{\mu_{water}} \ln\left(\frac{\Phi_{wet}}{\Phi_{Dry}}\right) \quad (3)$$

식(3)에서 구한 액막의 두께를 활용하여 2상 유동 구조 변화에 따른 기공율의 변화를 이론적으로 계산할 수 있을 것으로 판단된다. 그렇지만 식(3)을 적용하기 위해서는 히트파이프 작동유체의 증성자 흡수 계수를 측정해야 하고, 증성자 영상법으로 계산한 이론적 기공율에 대한 검증 및 적용을 위한 추가적인 연구의 수행이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 운전 중인 평판형 및 원형 히트파이프 내부의 2상유동의 구조 변화를 증성자 영상법으로 가시화 실험을 수행하였다. 본 연구로부터 도출된 주요결과는 다음과 같다.

- 증성자 영상법은 금속 히트파이프 내의 2상 유동 구조 변화를 비파괴적으로 가시화할 수 있다.
- 증발부 Pool 내부에서의 비등 형태는 작동 온도에 따라 초기의 간헐적인 Bubble류에서 Slug류 및 Churn류로 발전하고, Blow-up 및 응축수의 재젖힘 현상 등이 관찰되었다.

향후 본 연구에서 소개한 증성자 영상법을 활용하여 다양한 조건에서 히트파이프 내의 2상유동 구조 변화 특성에 대한 정량화된 데이터를 획득하고, 이를 바탕으로 최적 충진을 계산에 활용한다면 히트파이프 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-원자력연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No 2012M2A2A6004262).

REFERENCE

- 1) Lee, H. J., Kong, S.-W., Ha, S.-J., Hwang, J.-H., Jang, J.-W., Son, K.-J., and Kim, J.-S., 2009, "Flow Visualization of Bubble jet Loop Heat pipe", Proc. SAREK Summer Annual Conference, pp.279~283.
- 2) Kim, C.J., Kim, H.K., and Oh, K. H., 1994, "A Visual Study on Nucleate Boiling Phenomena in a Closed Two-Phase Thermosyphon", Energy Engg. J, Vol.4(2), pp.261~269.
- 3) Kim, J.S., Kwon, Y.H., and Kim, J.W., 2014, "Development of High Performance Bubble Jet Loop Heat Pipe for Hot Water Floor Heating System", Journal of the Korean Society for Power

- System Engineering, Vol 18(4), pp.23~28.
- 4) Woo, J.H., Kim, J.S., Kong, S.U., Ha, S.J., and Lee, H.G., 2010, "A Study on the performance of Heat Transfer for Various Working Fluid of Bubble Jet Loop Heat Pipe", KOSME 2010 Fall Conference, pp. 435~436.
 - 5) Shin, J.S., Kwon, Y.H., and Kim, J.S., 2013, "The study of BJLHP performance according to the shape of evaporating section", Proc. SAREK 2009 Summer Annual Conference, pp.21~25.
 - 6) Reay, D.A., Kew, P.A., and McGlen, R.J., 2013, "Heat Pipes Theory, Design and Applications", Elsevier, pp. 45~52.
 - 7) Lee, H.J., Kong, S.W., Ha, S.J., Hwang, J.H., Jang, J.W., Son, K.J., and Kim, J.S., 2009, "Flow Visualization of Bubble Jet Loop Heat Pipe", Proc. SAREK 2009 Summer Annual Conference, pp. 279~283.
 - 8) Lee, S.Y., Kim, B.J., and Kim, M.H., 1993, "Two-Phase Flow Heat Transfer", Deayoungsa, PP. 14~19.
 - 9) Garbe, U., Randall, T., Hughes, C., Davidson, G., Pangelis, S., and Kennedy, S.J., 2015, "A new Neutron Radiography / Tomography / Imaging Station DINGO at OPAL", Physics Procedia, Vol. 69, pp.27~32.
 - 10) Kim, T.J., Jung, Y.M., Kim, M.H., Sim, C.H., Lee, S.W., and Jeon, J.S., 2006, "Visualization of the internal water distribution at PEMFC using neutron imaging technology: Feasibility test at HANARO", Nuclear Eng. and Technology, Vol.38(5), pp.449~454.