SFR 모의 금속연료심 결함 중성자 래디오그래피 분석

오석진, 김선하, 전현준, 김기환, 이찬복
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111
sjoh@kaeri.re.kr

1. 서론

SFR 금속연료심 시편의 내부결함으로 존재하는 기공, 수축공 같은 결함은 육안검사가 불가능하다. 이러한 내부결함검사 비파괴방법에는 X-ray/감마선을 이용하거나 중성자빔을 이용한다. 그러나 본 모의연료심은 주재질이 우라늄(U)이므로 저용량의 X-ray 검사는 검사가 매우 어려우며 대용량의 X-ray 가 필요하나 본 연구의 목적에 적합한 장비가 연구원 내에 없다. 중성자를 이용한 검사는 중성자의 특성이 우라늄에 대한 투과력이 강하여 본 시료인 모의연료심의 내부결함을 관찰하기에 적합하다. 중성자비파괴검사장치를 이용하여 모의연료심 내부결함 상태의 image 확보에 목적이 있다.

2. 본론

2.1 중성자 및 X-ray/감마선 투과특성 비교

현재 일반적으로 육안으로 가장 빠르게 판별하는 비파괴검사법은 X-ray/감마선을 이용한 비파괴검사 와 중성자를 이용한 비파괴검사가 있다. X-ray 과 감마선은 전자기파이므로 원자의 궤도전자와 반응한다. 그러므로 전자기파는 가벼운 원소(수소, 탄소, 산소 등)는 궤도전자 수가 적으므로 투과할 확률이 높고 무거운 원소(텅스텐, 납, 우라늄 등)는 궤도전자가 많으므로 투과할 확률이 적다. X-ray/감마선이 원자의 궤도전자와 반응하는 반면에 중성자는 원자의 원자핵과 반응한다. 하지만 X-ray/감마선이 원소의 원자번호가 클수록 반응확률이 높은 반면에 중성자는 원자핵과 반응하나 원자핵의 크기와 관계없이 즉 원자번호에 관계없이 투과력이 매우 불규칙적으로 많은 실험에 의해 결정된다. 일반적으로 X-ray/감마선 비파괴검사와 중성자비파괴검사는 상호보완적으로 이용된다. 왜냐하면 중성자는 일반적으로 X-ray 가 투과력이 강한 수소, 붕소, 물 등 가벼운 물질에 대한 투과력이 매우 약하고 반면에 X-ray 가 투과력이 매우 약한 무거운 물질인 납, 우라늄 등에는 투과력이 매우 강하다. 수소원소가 포함된 물질(예: 물)이나 유기물질에는 투과력이 매우 약하여 X-ray 와 비교되는 특성으로 항공기 부품에 수소로 인한 부식 결함 등의 관찰이 용이하다. 그러므로 중성자비파괴검사와 X-ray 비파괴검사는 물질을 투과하는 특성이 일반적으로 물질에 따라 서로 상호 보완적으로 이용된다. 일상적으로 사용되는 주요원소에 대하여 투과력을 그림으로 비교하면 그림 1과 같다. 일반적으로 가벼운 원소로 구성된 시료 내부의 무거운 원소의 관찰에는 X-ray/감마선 비파괴검사가 이용되며 무거운 원소로 구성된 시료 내부의 가벼운 원소의 관찰에는 중성자 비파괴검사가 이용된다. 이외에 중성자 비파괴검사는 X-ray/감마선 비파괴검사가 매우 어려운 분야인 방위산업의 화약 충진상태, 방사성물질의 검사에 매우 유용하며 고고학 유물의 내부구조 검사, 식물의 수분 유동성 추적 등에 이용되나 중성자가 수소에 대한 투과력이 약하므로 생물학적 연구에는 X-ray/감마선 비파괴검사와 비교하여 현저하게 취약점을 갖는다.

2.2 실험방법

본 실험 모의연료심의 크기는 길이가 약 30cm ~35cm 이다. 하나로 NRF 장치에서 필름법에 의한 관찰은 필름 및 convertor의 크기에 제한이 있어 관찰면적이 20cm(W) × 25cm(H)로 제한되므로 모의연료심의 상단부와 하단부로 나누어 관찰하였다. 모의연료심 조사 각도는 모의연료심의 표면에 특별한 식별기준이 없으므로 0도의 기준은 임의로 정하여 외부에 파란 유성펜으로 mark 하였다. 본 검사는 그림 2에서 보여주는 한국원자력연구원의 실험용 원자로에 설치된 중성자 래디오그래피 장치(Neutron Radiography Facility : 이하 "NRF"라함)에서 실시하였다. 하나로 NRF 장치는 중성자빔을 이용하여 시료 내부의 구조를 관찰하는 목적으로 설치되었으며 제1조사실과 제2조사실로 구성되어 있다. 제1조사실에서는 일반적으로 핵연료시료 등 방사선을 방출하는 방사선물질에 대한 중성자 비파괴검사를 수행하도록 설계되었

으며 제2조사실은 일반 시료에 대한 중성자 비파괴검사를 수행하도록 설계되었다.

2.3 고찰 및 결과

일반적으로 X-ray 및 중성자 비파괴검사에 사용되는 필름은 동종의 화학적 성분으로 구성되어 제조된다. 하지만 X-ray 검사에 사용되는 필름은 X-ray에 감광되는 화학적 성분이 필름의 양쪽에 코팅되어 있으나 중성자 비파괴검사에 사용되는 필름은 한쪽만 코팅되어있다. 또한, X-ray 검사는 X-ray 필름을 직접 X-ray로 조사하여 사용하나 중성자 비파괴검사는 중성자에 조사되면 중성자와 반응하여 X-ray 혹은 전자를 방출하는 convertor가 추가되어 사용된다. X-ray 필름을 구성하는 물질의 결정입자 크기에 의하여 결정되나 단면 코팅된 X-ray 필름을 실험한 결과 필름 해상도는 12.5 μm로 측정되었다[1]. 그러므로 이론적으로는 12.5 μm 까지 볼 수 있으나 검사시료의 물질 및 두께(thickness)에 따라 달라질 수 있다. 필름법을 이용한 검사시료 내부의 기공의 관찰 여부는 실험장치가 아닌 관찰자의 육안으로 판단하는 것이므로 경험적으로 볼 때 기공이 검사물 두께의 1/10 이상일 경우까지 관찰이 가능하다. 모의 연료심 8개에 0도 각도에서 관찰된 상단부 및 하단부의 중성자 래디오그래피는 그림 3(a) 와 같고 90도의 각도에서 관찰된 상단부 및 하단부의 중성자 래디오그래피는 그림 3(b)와 같다. 관찰 결과 모의연료심의 많은 부분에서 기공이 관찰되며 특히 하단부보다 상단부에서 많은 기공이 관찰되었다.

3. 결론

중성자 빔을 이용한 결함분석 이미지는 감마선 분석보다 선명한 이미지를 얻을 수 있었다. 밀도가 높은 우라늄 합금의 감마선 또는 X-선에서는 직경 또는 두께가 투과력과 상관관계가 있으나 본 실험에서 중성자 빔을 이용한 연료심에서는 변수의 영향을 받지 않았다[2].

4. 감사의 글

본 실험은 하나로 중성자 회절빔 시설을 이용하였음을 알려드리며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

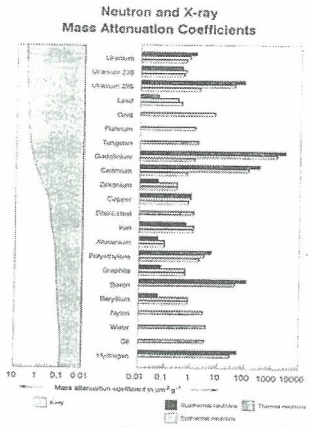

Fig. 1. Neutron and X-ray Mass Attenuation Coefficient.

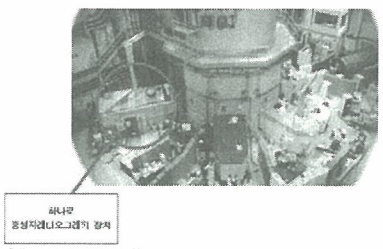

Fig. 2. Neutron Radiography Facility of HANARO Research Reactor.

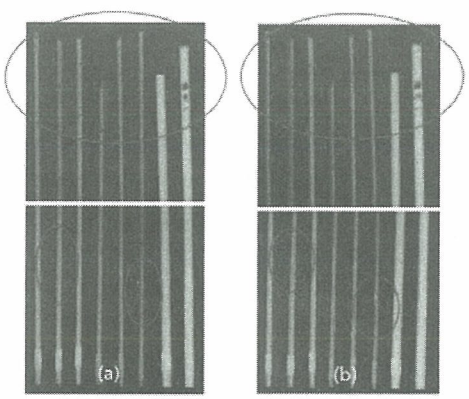

Fig. 3. Results of Neutron Radiography (a) 0° (b) 90°.

5. 참고문헌

[1] Practical Neutron Radiography edited by J.C.Domanus, Kluwer Academic Publishers pp. 86.

[2] 한국재료학회학회, 2012년 춘계학술발표회 논문요약집, pp.143, 2012.