

상온 및 액체질소 온도에서 고속 중성자 조사된 원자로 압력 용기의 취화 현상에 관한 연구

김형배 · 김형상*

동국대학교 물리학과, 서울시 중구 필동 3가 26

김순구 · 신동훈

MINT, 동국대학교, 서울시 중구 필동 3가 26

유연봉

삼척대학교 교양학부, 강원도 삼척시 교동 산 23

고정대

제주대학교 물리학과, 제주도 제주시 아라1동

(2005년 2월 22일 받음, 2005년 3월 2일 최종수정본 받음)

고속 중성자 조사한 원자로 압력 용기의 취화현상을 상온에서 X-선 회절 실험과 액체 질소 온도에서 Mössbauer 분광법으로 조사하였다. 시료의 중성자 조사량은 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} , 10^{15} , 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} n/cm²이다. X-선 회절 패턴에서 중성자 조사하지 않은 시료는 bcc 형태를 나타내었으나, 중성자 조사량이 10^{17} n/cm² 이상인 시료에서는 bcc 구조가 사라지는 심각한 손상을 보였다. 모든 시료의 Mössbauer 스펙트럼은 두개 혹은 그 이상의 sextet의 중첩을 보였다. 모든 Mössbauer 스펙트럼은 본문에서는 3조의 sextet으로 fitting 하였다. 이성질체 이동치와 사중극자 분열치는 거의 영에 가까운 값을 나타내었다. 액체 질소 온도에서 중성자 조사량이 10^{17} ~ 10^{18} n/cm²인 시료에서 S1 sextet의 초미세 자기장과 흡수 면적이 급격히 상승하는 현상을 관측하였으며, 상온에서 또한 이 현상을 관측하였다. 이는 중성자 조사에 의한 시료 내부의 ⁵⁵Mn 혹은 ⁵⁶Fe이 ⁵⁷Fe의 친이에 의한 ⁵⁷Fe의 Mössbauer 핵종의 증가에 기인하는 것으로 추측된다.

주제어 : Mössbauer, RPV, neutron

I. 서 론

핵 원자로의 안전을 연구하는 가장 중요한 일 중의 하나는 원자로 압력 용기의 안전성을 평가하는 일이다. 원자로 압력 용기의 수명은 압력 용기에 조사된 방사선 입자의 에너지와 조사량에 의존한다. 원자로 압력 용기의 조사 손상에 관계되는 방사선으로는 중성자, 양성자, 중양자, α -선, β -선, γ -선 및 핵분열 생성물 등이 있지만, 특히 역학적 특성에 영향을 주는 입자는 중성자이다[1].

원자로는 운전 중 1 MeV 이상의 고에너지 중성자 및 다른 입자들에 의하여 압력 용기 강 내의 원소는 핵반응에 의한 핵 종 변환과 입사 입자의 충돌에 의하여 격자 원자가 격자 내의 위치에서 이탈하여 생성되는 점 결함인 vacancy와 격자 원자간 원자가 각각 서로 모여 결함을 발생시킨다. 이와 같은 결함들은 상호간에 강한 상호 작용을 일으키며, 결과적으로 중성자 조사 취화 현상(neutron irradiation embrittlement)

으로 나타나게 된다. 조사 손상의 결과로 원자로 압력 용기는 연성(ductility)이 저하되고 취성(brittle)이 증가하는 취화 현상이 일어나 압력 용기의 안전성을 위협한다[1-5].

중성자 조사량에 따른 파괴적 방법은 검사 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라, 거시적인 data에만 의존하기 때문에 원하는 만큼의 정확한 정보를 제공하지 못하는 등 많은 문제점을 가지고 있다. 또한 중성자 조사에 의하여 생기는 점 결함의 크기는 수 nanometer 정도의 극히 미세한 결함[6]이므로 중성자 조사에 의한 시편의 미시적 구조 변화는 기존의 파괴적 방법으로는 조사가 불가능하다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 신속하고 정확한 비 파괴 검사 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[7, 8]. 이 방법들은 검사의 신속, 정확성 때문에 기존의 파괴 검사 방법을 대체하여 활용될 전망이다. 이러한 비파괴 검사 방법의 하나로 Mössbauer 효과 [9]에 의한 연구는 물질의 자기적 변화의 원인을 밝힐 수 있는 방법으로 다른 비파괴 검사와 비교, 분석하여 검사 결과의 정확성을 높일 수 있는 좋은 방법으로 생각된다.

Brauer *et al.*[10]은 원자로 압력 용기 재료에 고속 중성자

*Tel: (02) 2260-3210, E-mail: hskim@doguk.edu

를 조사한 후 열 처리에 의한 영향 평가를 Moossbauer 분광법으로 조사하였고, Yoshida *et al.*[11]은 순수 철에 고속 중성자 조사 후 열 처리 조건에 따른 시료의 격자 결함을 조사하였다.

본 연구에서는 원자로 압력 용기 재료인 SA 508 class 3 강에 고속 중성자(>1 MeV)를 조사하여 X-ray diffractometer로 상온에서 중성자 조사에 의한 압력 용기 재료의 구조 변화를 연구하였으며, 미시적 평가 방법의 하나인 Mössbauer 분광법에 의하여 압력 용기 재료들의 중성자 조사량에 따른 spectra를 상온과 액체질소 온도에서 측정하여 Mössbauer parameter로부터 내부자기장의 변화를 측정하였다.

II. 실험

본 연구에서 사용된 시료는 원자로 압력 용기 재료인 SA 508 class 3강으로 화학적 성분은 Table I과 같다. 시료가 가공으로 인한 재질의 변형을 최소화하기 위하여 두께 1 mm 까지 가공 후, 수동 다듬질하여 Mössbauer spectrum 측정에 적합한 18 mm×23 mm×70 μm 크기로 만들었다.

시료의 중성자 조사는 실험용 원자로에서 1.5 MW 출력으로 실시하였고, 조사는 노심 중심 부근의 동위 원소 생산용인 조사봉을 사용하였다. 조사량은 Fe dosemeter를 이용하여 측정하였고, 원자로내의 조사 온도는 70 °C였다. 시편의 중성

Table I. Chemical composition of sample.

Composition	C	Si	Mn	P	S	Ni
w.t. %	0.17	0.004	1.42	0.004	0.003	0.98
Composition	Al	Cu	Cr	Mo	V	Fe
w.t. %	0.003	0.045	0.22	0.58	0.003	Bal

자 조사량은 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} , 10^{15} , 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} n/cm²이다.

Mössbauer 분광 실험은 상온과 액체질소 온도에서 실시하였고 spectrometer는 등가속도 형을 사용하였으며, γ-ray source는 6 μm 두께의 Rhodium matrix의 10 mCi ⁵⁷Co 동위 원소이다. Linear drive motor의 등가속도 운동에 의한 Doppler 속도 보정은 α-Fe의 흡수선을 사용하였다. 실험에 사용한 Doppler 속도는 ±10 mm/sec이며, γ-ray source와 detector 사이의 거리는 120 mm이다.

X-ray 회절 실험은, generator tension은 40 kV, generator current는 20 mA, 사용된 X-ray source는 Cu-K_α선이고, 측정 범위 2θ는 5°~120°이고 주사 속도는 0.1°/sec이다.

III. 결과 및 논의

3.1. X-Ray Diffraction

측정한 Mössbauer spectrum의 fitting을 위하여 모든 시편

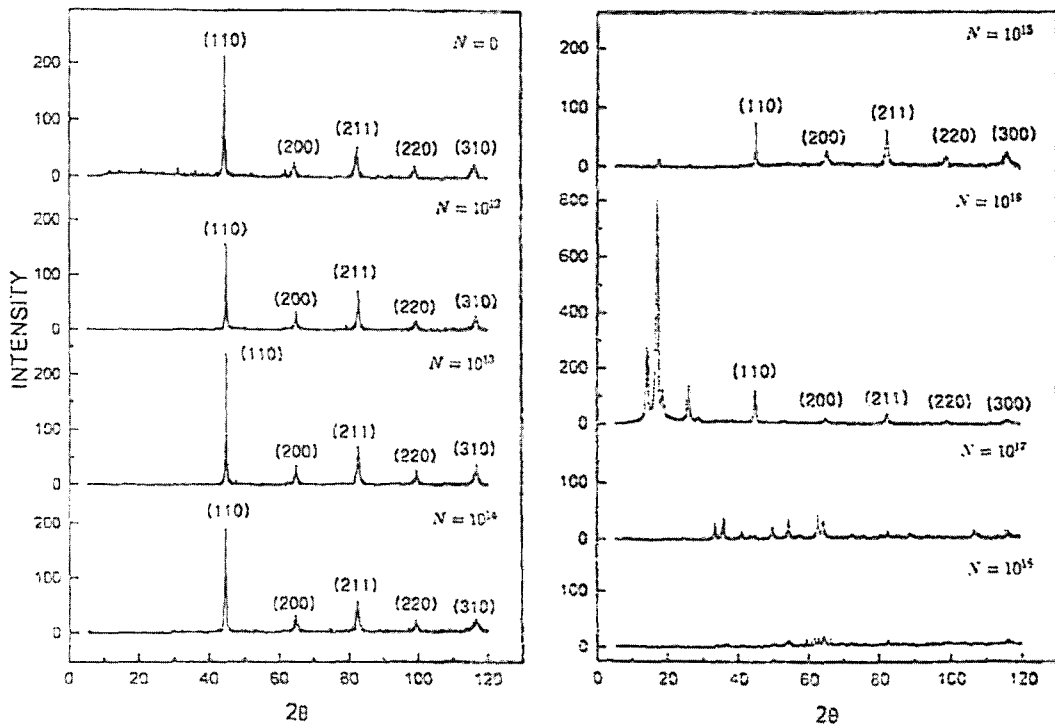


Fig. 1. X-ray pattern of specimens owing to neutron fluence (n/cm²).

들을 Mössbauer 분광 실험 전에 상온에서 X-ray 회절 실험을 하였다. Fig. 1은 시료들의 X-ray diffraction pattern을 보여 주고 있다. 주요 회절선의 2θ 값으로부터 시료는 bcc 구조이고, 격자 상수 $a=2.86(2)$ Å이다.

Fig. 1에서 보는바와 같이 as-received 시편과 중성자 조사량이 $10^{12}\sim 10^{14}$ n/cm²인 시편의 XRD pattern은 peak의 위치나 격자 상수의 변화가 거의 없다. 즉 중성자 조사량이 10^{14} n/cm²까지 증가하더라도 시료가 bcc의 구조를 유지하고 있기 때문에, 중성자 조사에 의한 격자 손상은 약한 것으로 나타났다. 조사량이 10^{15} , 10^{16} n/cm²인 시편에서는 bcc 흡수선 peak의 세기가 감소하면서 회절각 $10^\circ\sim 20^\circ$ 부근에서 새로운 peak이 나타나며, 이는 중성자 조사에 의하여 시편의 phase에 변화가 일어나는 것을 알 수 있다. 조사량이 10^{17} , 10^{18} n/cm²인 시료에서는 bcc 구조의 phase가 중성자 조사에 의하여 격자 원자가 이탈되어 결합하고 있던 원자에서 떨어져지면서 격자 배열이 무질서해지는 것으로 생각된다.

3.2. Mössbauer Spectra

액체질소 온도와 상온에서 측정된 as-received 시료와 중성자 조사를 조사한 시료들의 Mössbauer spectra는 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 spectra의 공명 흡수선은 magnetic hyperfine splitting에 의해 6개

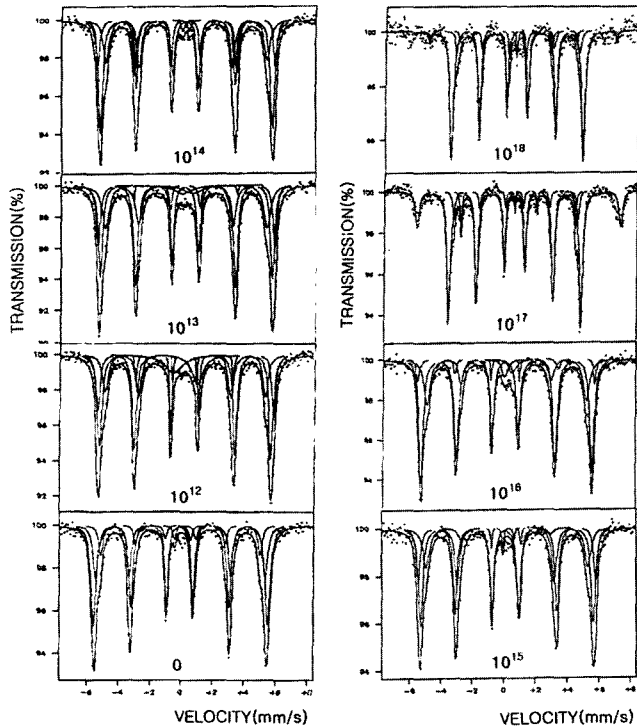


Fig. 2. The Mössbauer spectra of sample for various neutron fluence at liquid nitrogen temperature.

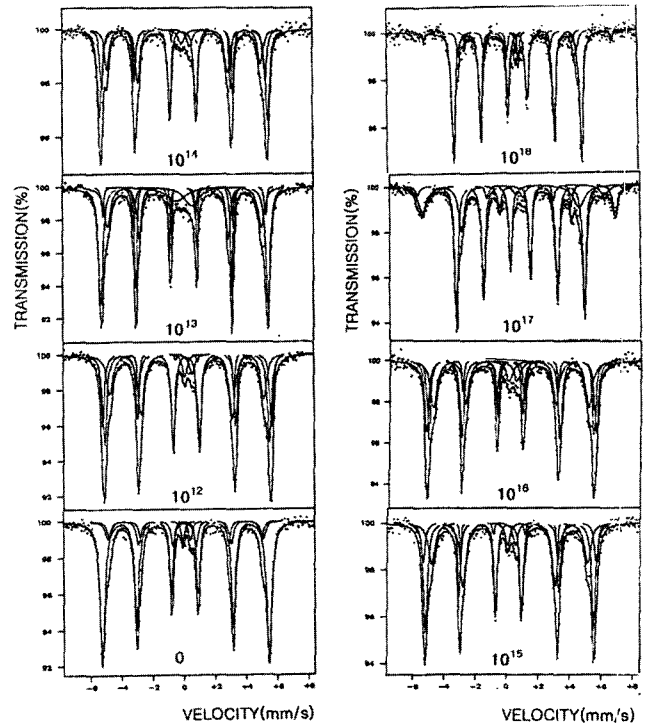


Fig. 3. The Mössbauer spectra of sample for various neutron fluence at room temperature.

로 갈라진 두 쌍 이상의 공명 흡수선이 중첩되어 있는 것으로 나타난다. as-received 시료와 중성자 조사량이 $10^{12}\sim 10^{16}$ n/cm²인 시료에서의 Mössbauer spectrum의 흡수선의 형태는 조사량에 따라서 큰 변화가 없다. 이것은 10^{16} n/cm² 이하의 중성자 조사량은 시료의 자기적 성질에 주목할 만한 변화를 일으키지 못하는 것으로 생각된다. 그러나 중성자 조사량이 10^{17} n/cm²인 시료에서는 새로운 위치에 공명 흡수선이 나타나고, 조사량이 10^{18} n/cm²인 시료에서는 이 새로운 흡수선의 면적과 흡수율이 줄어든다. 이는 중성자 조사에 의해서 시료의 주성분인 철 주위의 내부 자기장이 변화를 일으킨 것으로 볼 수 있다[9, 12].

Brauer *et al.*[10]은 중성자가 조사된 원자로 압력 용기의 Mössbauer 연구에서 측정된 spectrum을 철의 3개의 site에서 hyperfine 상호 작용에 의한 sextet fitting을 하였다. 본 연구에서도 철의 3개의 sites에 의한 3쌍의 sextet으로 측정된 모든 spectra를 fitting 하였다. 세 쌍의 magnetic hyperfine splitting에 의한 spectrum 중 magnetic hyperfine field 값이 가장 큰 것을 S1, 두 번째 큰 것을 S2 그리고 가장 작은 것을 S3으로 표시하였다. 한 쌍의 magnetic hyperfine splitting에 의하여 나타나는 6개의 흡수선의 반폭치는 같고 면적 비는 3:2:1:1:2:3이 되도록 fitting 하였다. 이와 같이 Mössbauer spectrum을 fitting 할 때 사용한 함수는 Lorentzian이다.

3.3. Isomer Shift(I.S.)

As-received 시료와 중성자가 조사된 시료들의 I.S. 값은 Table II과 Table III에 보여지고 있다. Table III에서 보는 바와 같이, 액체 질소 온도에서 as-received 시료의 I.S. 값은 S1, S2, S3에서 0.4 mm/sec 정도의 값을 가지나 중성자 조사량이 10^{12} n/cm²인 시료에서는 3개의 sextet에서 0.4 mm/sec 정도로 커졌다가 조사량이 10^{13} n/cm²에서는 중성자의 의존성을 발견할 수 없었으며, 조사량이 10^{17} , 10^{18} n/cm²인 시료에서는 S1이 0.6~0.8 mm/sec 정도의 값으로 증가한다.

Table III에서 보는 바와 같이, 상온에서 as-received 시료의 I.S. 값은 S1, S2, S3에서 0.4 mm/sec 정도의 값을 가지나 중성자 조사량이 10^{12} n/cm²인 시료에서는 3개의 sextet에서 0.6 mm/sec 정도로 커졌다가 조사량이 10^{13} n/cm²에서 10^{16} n/cm²인 시료에서는 zero 근처의 값을 가지며 조사량이 증가함에 따라 I.S. 값도 증가하는 경향을 보인다. 중성자 조사량이 10^{17} n/cm² 이상인 시료에서는 3개의 sextet에서 다소 증가하여 0.3 mm/sec 정도의 값을 가지며, 10^{18} n/cm²인 시료의 S3에서는 0.6 mm/sec 정도로 커진다. 이 I.S. 값에서 시료의 주성분인 철 원자는 Fe⁺³(high spin) 상태로 존재하며, 다른 비자성 원자와 결합되어 있음을 알 수 있다. 자연 철에 I.S. 값의 변화는 철 원자의 s-electron density의 변화로 설명된다[12].

또한 상온과 액체 질소 온도에서 중성자 조사량이 10^{17} n/cm² 이상의 시료의 S1에서 I.S. 값의 증가는 중성자 조사에 의한 dangling bond의 수가 증가함에 따라 d-electron의 차폐효과 때문이다[13].

3.4. Quadrupole Splitting(Q.S.)

액체 질소 온도와 상온에서 as-received 시료와 중성자가 조사된 시료의 Mössbauer spectra에서 구한 Q.S. 값은 Table II, III에서 보는 바와 같이 모든 시료들의 Q.S. 값은 zero 근처의 값을 가지며 규칙적인 변화는 보이지 않는다. 그러나 중성자 조사량이 10^{17} ~ 10^{18} n/cm²로 증가함에 따라 액체 질소 온도에서 S3의 Q.S.값은 -0.3 mm/sec로 변화하며, 상온에서는 -0.6 mm/sec로 변한다. 이것은 중성자 조사에 의하여 결합이 증가하고 결정성이 낮아지면서 결합에서 벗어난 전자들에 대하여 Fe 주위의 구조가 비대칭적으로 변화되어 나타난 결과로 볼 수 있다.

3.5. Magnetic Hyperfine Field

Brauer *et al.*[10]은 그들의 연구에서 철의 3개의 각 sextet에서 내부 자기장이 약 300 kOe로 보고하였다. Table II, III에서 보는바와 액체 질소 온도와 상온에서 as-received 시료와 중성자 조사량이 10^{12} ~ 10^{16} n/cm²인 시료에서 magnetic

Table II. The Mössbauer parameters of RPV steel as a function of neutron fluence at liquid nitrogen temperature.

Neutron fluence (n/cm ²)	I.S. (mm/sec)			Q.S. (mm/sec)			Heff (kOe)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
0	0.416	0.419	0.499	0.050	0.450	-0.090	346.4	337.6	323.4
10^{12}	0.566	0.511	0.566	0.063	0.056	0.013	345.4	336.1	314.5
10^{13}	0.196	0.192	0.232	0.060	0.045	-0.037	348.2	339.3	318.6
10^{14}	0.551	0.489	0.745	-0.066	0.062	-0.462	342.9	337.0	318.4
10^{15}	0.202	0.184	0.242	0.038	0.066	-0.031	348.01	338.7	317.3
10^{16}	0.141	0.150	0.201	0.011	0.053	-0.049	350.3	338.2	315.5
10^{17}	0.641	0.183	0.231	-0.006	0.108	-0.276	519.4	336.6	317.5
10^{18}	0.839	0.279	0.325	-0.285	-0.018	0.009	472.1	334.3	311.6

Table III. The Mössbauer parameters of RPV steel as a function of neutron fluence at room temperature.

Neutron fluence (n/cm ²)	I.S. (mm/sec)			Q.S. (mm/sec)			Heff (kOe)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
0	0.403	0.373	0.429	0.006	0.069	-0.047	337.6	329.1	313.9
10^{12}	0.588	0.592	0.618	0.039	0.035	-0.038	335.9	327.8	306.2
10^{13}	0.091	0.093	0.109	0.601	0.056	0.023	334.2	325.5	307.7
10^{14}	0.674	0.377	0.431	-0.540	0.033	-0.021	336.2	330.1	305.9
10^{15}	0.167	0.157	0.204	0.017	0.047	-0.061	341.2	331.5	307.3
10^{16}	0.162	0.149	0.194	0.031	0.055	-0.060	337.4	328.6	308.9
10^{17}	0.338	0.325	0.343	-0.016	0.009	-0.665	507.7	328.4	302.5
10^{18}	0.343	0.247	0.677	-0.023	0.197	-0.606	483.7	328.2	303.1

hyperfine field 값은 S1에서는 약 340 kOe 정도이며 이것은 α -Fe의 magnetic hyperfine field 값보다 약간 큰 값이며, 이는 시료의 성분 중에서 Cr, V, Mo이 α -Fe matrix에 용해된 것으로 가정하면, 이러한 원자들이 용질 원자로서 작용할 때 철의 내부 자기장을 증가시키는 것으로 알려져 있다[13-16]. S2에서는 magnetic hyperfine field 값이 330 kOe 정도이며, S3에서는 310 kOe 정도의 값을 나타낸다. S1, S2, S3에서 중성자 조사량에 따른 magnetic hyperfine field 값의 변화는 매우 미약하다. 따라서 중성자 조사에 따른 시료의 자기적 성질은 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 그러나 중성자 조사량이 10^{17} n/cm² 이상의 시료에서는 새로운 위치에서 흡수선이 관측되며, S1에서 magnetic hyperfine field 값이 519 kOe 까지 증가한다. 이것은 중성자 조사에 의하여 시료의 자기적 성질이 변했기 때문이며, 내부 자기장이 증가하는 것은 시료의 성분 중 Cr과 Mn이 중성자 조사에 의해 원자 간격이 멀어지면서 강자성 배열로 바뀌었거나[17], 또는 중성자 조사에 의하여 $^{55}\text{Mn} \rightarrow ^{56}\text{Mn} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ 과 $^{56}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$ 로 핵종 변환[18]이 일어나서 내부 자기장이 급격히 커진 것으로 생각된다. 실험에 사용한 시료는 실험 원자로 온도 상승에 의한 원자의 거리 이동은 거의 불가능하다. 따라서 핵종 변환으로 인한 입자수의 증가 및 내부 자기장의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

3.6. Absorption Area

Fig. 2, 3에서 보는 바와 같이 액체 질소 온도와 상온에서 시료의 Mössbauer spectrum의 공명 흡수 면적은 as-received 시료와 중성자 조사량이 $10^{12}\sim 10^{16}$ n/cm²인 시료에서는 주목할 만한 변화는 나타나지 않는다. 그러나 중성자 조사량이 10^{17} n/cm² 이상의 시료에서는 새로운 위치에 나타나는 흡수선들에 의하여 면적이 증가한다. 이것은 중성자 조사에 의하여 시료에서 Mn이 $^{55}\text{Mn} \rightarrow ^{56}\text{Mn} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ 과 $^{56}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$ 로 핵종 변환에 의한 철 원자의 증가와, $^{56}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$ 로 핵종 변환에 의하여 공명 원자핵인 ^{57}Fe 원자의 증가에 의한 것으로 생각된다. 그러나 Mn에서 Fe 원자의 핵종 변환은 매우 약하기 때문에 흡수면적의 증가는 주로 $^{56}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$ 로 핵종 변환에 기인한 것으로 사료된다. S1에서는 새로운 위치에 나타나는 흡수선에 의하여 전체 흡수 면적이 15% 증가한다. 그러나 중성자 조사량이 10^{18} n/cm²인 시료에서는 새로운 흡수선의 면적이 조사량이 10^{17} n/cm²인 시료에 비하여 감소하는데, 이것은 X-ray 회절 무늬에서도 확인된 것 같이 중성자 조사에 의하여 시료는 비정질 상태로 변하고 되튐 에너지가 증가함으로 공명 흡수 면적이 감소하게 되는 것으로 볼 수 있다[19]. 또한 액체 질소 온도에서 총 공명 흡수 면적은 상온에의 공명 흡수 면적에 비하여 조사량별로 약 2~3% 증가

함을 알 수 있다. 이는 온도가 내려가면 시료의 격자 진동이 감소함에 따라 Debye-Waller-factor가 증가하기 때문이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 원자로 압력 용기 재료의 고속 중성자 량에 따른 취화 현상을 조사하기 위하여 X-ray 회절 실험과 철의 거동을 미시적으로 파악하는 Mössbauer 분광법을 이용하였다. 그 결과 중성자 조사량이 증가함에 따라서 시료의 bcc 결정성 구조가 낮아지면서, 새로운 phase가 형성이 되고 조사량이 10^{17} n/cm² 이상인 시료에서는 격자 배열이 무질서해지고, vacancy 및 interstitial atom이 생성되는 것으로 사료된다.

As-received 시료와 중성자 조사량이 $10^{12}\sim 10^{16}$ n/cm²인 시료에서는 Mössbauer 공명 흡수선의 형태는 중성자 조사량에 따라서 큰 변화는 없었지만, 조사량이 $10^{17}\sim 10^{18}$ n/cm²인 시료에서는 새로운 위치에서 공명 흡수선이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 S1 sextet에서의 magnetic hyperfine field 값이 액체 질소 온도에서는 480~520 kOe, 상온에서는 480~507 kOe 까지 급격히 증가하는 데 이것은 중성자 조사에 의하여 시료 내의 자연 철들이 Mössbauer 공명 핵인 ^{57}Fe 로 핵종 변환됨에 따라 입자수의 증가로 인하여 흡수 면적이 증가하고, 강자성체인 철 원자의 상호 작용에 의하여 내부 자기장이 증가한 것이다. 따라서 중성자 조사량이 10^{17} n/cm² 일 때가 중성자 조사에 의하여 시료가 물성 변화를 일으키는 임계점으로 생각된다.

위와 같은 결과를 볼 때 Mössbauer 효과를 이용한 원자로 압력 용기의 조사 취화 특성 평가는 좋은 방법으로 판단되나 시료의 중성자 조사 효과에 대한 근본적인 이해를 위해서는 원자로의 실제 운전 조건에서 중성자가 조사된 시료를 이용한 평가가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 2003학년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어 졌음.

참고문헌

- [1] 이기순, 조사공학, 문경출판사, (1997).
- [2] W. J. Shong, J. F. Stubbins, J. G. Willams, J. W. Rogers, and M. Giacobbe, ASTM, STP, **1228**, 215(1994).
- [3] W. J. Shong, and J. F. Stubbins, 7th Int. Symp. on Environ. Degr. Mat. in Nucl. Pow. Sys. 795 (1995).
- [4] E. A. Little, D. J. Buttle, and C. B. Sceuby, Phys. Stat. Sol. (a), **12**, 55(1989).

- [5] M. K. Devine, and D. C. Jiles, *Rev. Prog. Quant. NDE*, **12**, 1815(1993).
[6] P. H. Ray, *et al.*, *J. Nucl. Mat.*, **225**, 196(1995).
[7] R. Ranjan, *et al.*, *Acta Metall*, **35**, 1515(1987).
[8] L. Atherton, *J. of Appl. Phys.*, **72**, 601(1992).
[9] U. Gonser, *Mossbauer Spectroscopy*, Springer Verlag, Berlin (1975).
[10] G. Bauer, W. Matz, and Cs. Fetzler, *Hyperfine Interaction*, **56**, 1563(1990).
[11] Y. Yoshida, *et al.*, *Point Defects and Defect Interaction in Metal*, 199(1982).
[12] G. J. Long, *Mössbauer spectroscopy Applied to Inorganic Chemistry*, Plenum Press, 20(1976).
[13] X. S. Chang, and C. Hohenemser, *Hyper. Inter.*, **36**, 467(1987).
[14] M. Rubinstein, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **37**, 1334(1966).
[15] I. Vincze, and I. A. Campbell, *J. Phys. F*, **3**, 647(1973).
[16] S. M. Dubiel, *Hyper. Inter.*, **8**, 291(1980).
[17] 고재귀, 송재만, *자성 물리학의 기초와 응용*, 숭실대학교 출판부, (1997).
[18] KAERI, *table of Nuclide* (1999).
[19] R. E. Watson, and A. J. Freeman, *Phys. Rev.*, **123**, 2027(1961).

A Study on Embrittlement of Fast Neutron-irradiated Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels at Room- and Liquid Nitrogen-temperature

H. B. Kim and H. S. Kim*

Department of Physics, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

S. K. Kim and D. H. Shin

MINT, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

Y. B. Yu

Samcheok National University, Samcheok 245-711, Korea

J. D. Ko

Department of Physics, Cheju National University, 690-756, Korea

(Received 22 February 2005, in final form 2 March 2005)

The embrittlement of fast neutron-irradiated reactor pressure vessel (RPV) steels was investigated by X-ray diffraction patterns at room temperature and Mössbauer spectroscopy at room- and liquid nitrogen-temperature. Neutron fluence on the samples were 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} , 10^{15} , 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} n/cm². The X-ray diffraction patterns showed that the structure of the neutron unirradiated sample was bcc type, where as but the neutron irradiated samples with the fluence higher than 10^{17} n/cm² were so severely damaged, that bcc type structure disappeared. The Mössbauer spectra of all samples showed superposition of two or more sextets. In this paper all Mössbauer spectra were fitted by three set of sextet. The isomer shift and quadrupole splitting values were found around zero. At liquid nitrogen temperature, magnetic hyperfine field and absorption area increase rapidly S1 sextet in the samples of 10^{17} ~ 10^{18} n/cm² neutron fluences. And at room temperature, magnetic hyperfine field and absorption increased rapidly at S1 sextet in the samples of 10^{17} ~ 10^{18} n/cm² neutron fluences. This rapid increase of magnetic hyperfine field and absorption area were inferred to be caused by the change of ⁵⁶Fe, ⁵⁵Mn into ⁵⁷Fe due to by neutron irradiation.

Key words : Mössbauer, neutron, RPV