

Mössbauer 분광법에 의한 원자로 용기재료의 비파괴적 중성자 조사평가에 대한 연구

Study of the Nondestructive Test Method for the Embrittlement Evaluation of Nuclear Reactor Vessel Material by Mössbauer Spectroscopy

정명모*, 장기상**, 유근배**, 김길무***, 윤인섭****, 홍치유****

M. M. Jung*, K. S. Jang**, K. B. Yoo**, G. M. Kim***, I. S. Yoon**** and C. Y. Hong****

초 록 본 연구에서는 고속 중성자가 조사된 원자로 용기 재료의 자기적 성질 변화를 Mössbauer 분광법을 이용하여 측정하였으며, X-선 회절실험을 이용하여 중성자 조사재료의 결정성 변화를 평가하였다. 시편은 크기가 23mm×18mm×70 μ m로 제작되었으며, 343K에서 10¹²n/cm²~10¹⁸n/cm²의 범위에서 중성자 조사를 하였다. X-선 회절실험 결과로부터, 10¹⁶n/cm²의 중성자가 조사된 시료에서부터 결정성이 변화가 시작되고, 10¹⁷n/cm² 이상의 중성자가 조사된 시료에서 결정성이 심각하게 손상되는 것이 관찰되었다. 또한 Mössbauer 분광실험으로부터 중성자 조사량이 10¹⁶n/cm² 이하인 시료에서는 자기적성질의 변화가 관찰되지 않았으나, 10¹⁷n/cm² 이상의 중성자가 조사된 시료에서 자기완화 현상이 일어나는 것이 관찰되었다. 따라서 두 실험 모두 비파괴적 실험방법에 따른 중성자 조사취화 평가로 활용이 가능한 것으로 평가되었다.

주요용어 : 원자로 압력용기 강재, 조사취화, 고속중성자, 뫼스bauer 스펙트럼

Abstract The purpose of this study is to evaluate the magnetic property change of the nuclear reactor vessel steel irradiated by fast neutrons using Mössbauer spectroscopy, and the effects of the defects produced by neutron irradiation on the changes using X-ray diffraction. The specimens, fabricated with the dimension of 23mm×18mm×70 μ m, were irradiated by neutron fluence from 10¹²n/cm² to 10¹⁸n/cm² at 343K. Throughout the experiments, it is understood that (1) the X-ray diffraction measurement shows that the change of crystal nature is started at the irradiation of 10¹⁶n/cm² and a crystal structure has been severely damaged at the irradiation over 10¹⁷n/cm², (2) the analysis of the Mössbauer spectra has shown that magnetic transition phenomena occur at the irradiation over 10¹⁷n/cm² and (3) both methods can be utilized as nondestructive test methods for the embrittlement evaluation of materials irradiated by fast neutrons.

Keywords: nuclear reactor vessel steel, irradiation embrittlement, fast neutron, Mössbauer spectrum

1. 서 론

원자로 가동 중 원자로용기 강재에 1MeV 이상의 고속 중성자가 조사(irradiation)되면 강재 내에 결함들이 생성되어[1] 연성(ductility)이 감소하고, 경도(hardness)가

증가하는 중성자 조사취화(neutron irradiation embrittlement) 현상이 나타난다[2]. 따라서 원자로 용기의 건전성 평가를 위하여 원자로 내의 감시용기(surveillance capsule assembly)에 내장된 감시시편(surveillance specimen)을 주기적으로 인출하여 파괴실험으로 중성자 조사에 의

한 손상 정도를 시험·평가하고 있다.

그러나 이러한 시편들은 기계적 실험방법에 의한 손상에 의해 더 이상 시편으로 활용될 수 없으므로 원자로의 수명을 연장한 후의 중성자 조사취화 평가가 문제시되고 있다. 따라서 이와 같은 문제점 해결을 위하여 비파괴적으로 중성자 조사취화 정도를 평가할 수 있는 방법들이 많이 연구되고 있다. 그러나 중성자 조사에 의해 생기는 결함의 크기는 2~4nm 정도의 극히 미세한 결함[3]이므로 기존의 비파괴적 검사방법으로는 탐지가 불가능하다. 이에 따라 최근에 소형 시편으로, 간편하고, 정확하게 미세변화를 평가할 수 있는 Mössbauer 분광학실험[4-6] 및 자기적 특성실험[7-10] 방법이 연구되고 있다. 최근에 Devinel[9], Shong[10] 등은 중성자 조사량증가에 따라 최대 자기유도 및 잔류자기가 감소함을 측정하였다. 그러나 이러한 자기적 특성의 변화가 중성자 조사량에 관련이 있는 것으로 보고되고 있으나, 중성자 조사에 의한 자기적 특성변화 원인은 충분히 설명되지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Mössbauer분광법으로 고속 중성자가 조사된 원자로 용기 강재의 자기적특성의 미세변화를 분석하여 원자로 용기 강재의 자기적 특성변화 원인을 설명하였다. 또한 X-선 회절실험을 이용하여 중성자 조사에 의한 결함의 생성이 자기적 성질 변화에 미치는 영향을 알아보았으며, 이 두 실험방법이 중성자 조사 영향 평가에 비파괴적인 방법으로 사용될 수 있는지를 조사하였다.

2. 실험

2.1. 시편의 성분 및 가공

본 연구에 사용한 재료는 원자로 압력용기 강재인 SA508 Class 3로서 한국중공업에서 단조(forging)하여 만들었으며, 중성자가 조사되지 않은 as-received (virgin) 상태의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 화학적 성분을 비교해 보면 약 97%가 자연 철(Fe)이며, 약 3%가 불순

Table 1 Chemical composition of SA508 Class 3

원소	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
wt%	0.17	0.004	1.42	0.004	0.003	0.98	0.22
원소	Mo	Al	Cu	V	Co	Fe	
wt%	0.58	0.003	0.045	0.003	0.006	Bal	

물이다. 이 재료는 철 원소의 양이 97% 이상이므로 Mössbauer분광 측정이 가능하다. 시편은 X-선 회절 및 Mössbauer분광 변화측정을 위하여 23mm×18mm×70 μ m 크기로 가공하였다. 이때 두께 70 μ m는 Mössbauer 분광실험의 γ -ray 투과를 고려한 것이다.

2.2. 중성자 조사

제작된 시편은 한국원자력연구소 서울분소의 TRIGA MARK III 원자로에서 343K의 온도로 중성자를 조사하였다.

본 실험에서는 비조사, 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} , 10^{15} , 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} n/cm²의 중성자가 조사된 8 종류의 시편을 만들었다.

2.3. X-선 회절실험

본 연구에 사용한 X-ray diffractometer는 Philips 사의 PW-1710형이며, 가속전압은 30kV, 가속전류는 20mA, 애노드로는 Cu를 사용하였다. X-선 회절무늬를 측정하기 위하여 이용한 X-선은 Ni 필터를 사용하여 얻은 파장이 1.524Å 인 Cu K α 선이다. X-선 회절무늬의 측정 각도는 회절각 2θ 가 0~120° 인 범위에서 이루어졌으며, scanning 시 step은 0.05°, 속도는 0.05°/sec 이었다.

2.4. Mössbauer 분광측정

측정에 사용된 Mössbauer spectrometer는 Austin 사의 S-600형이며 등가속도형으로서 Motorola 68000 컴퓨터로 제어된다. linear drive motor에 가해진 Doppler 속도는 최대값이 16mm/sec가 되도록 하였다. 이때 사용한 γ -ray source는 Dupont사 제품으로 6 μ m 두께의 rhodium에 electrodeposit 시킨 10 mCi의 ⁵⁷Co를 이용하였다. 여기서 ⁵⁷Co에서 방출되는 에너지 중 14.4 keV의 전이 에너지를 프시바우어 스펙트럼 측정에 사용하였으며 linear drive motor의 등가속도 운동에 의한 Doppler 속도는 자연 철의 공명흡수선의 위치에 대한 상대속도로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. X-선 회절

중성자가 조사된 시편들의 X-선 회절을 상온에서 측

정한 결과 Fig. 1과 같은 회절선들이 나타났다. X-선 회절무늬 측정에서 구하여진 각 시편들의 회절 peak 들에 대한 위치(2θ), 격자 면간 거리(d) 및 격자상수(a) 값들

은 Table 2와 같으며, 10^{17} , 10^{18} n/cm² 의 중성자가 조사된 시편들은 peak가 없으므로 2θ , d , a 를 구할 수 없어 Table 2에 기록하지 못하였다.

또한 이 값들로부터 $s = (h^2 + k^2 + l^2) = 2, 4, 6, 8, 10$ 의 값을 가지므로 이 재료는 bcc 구조의 α -Fe 임을

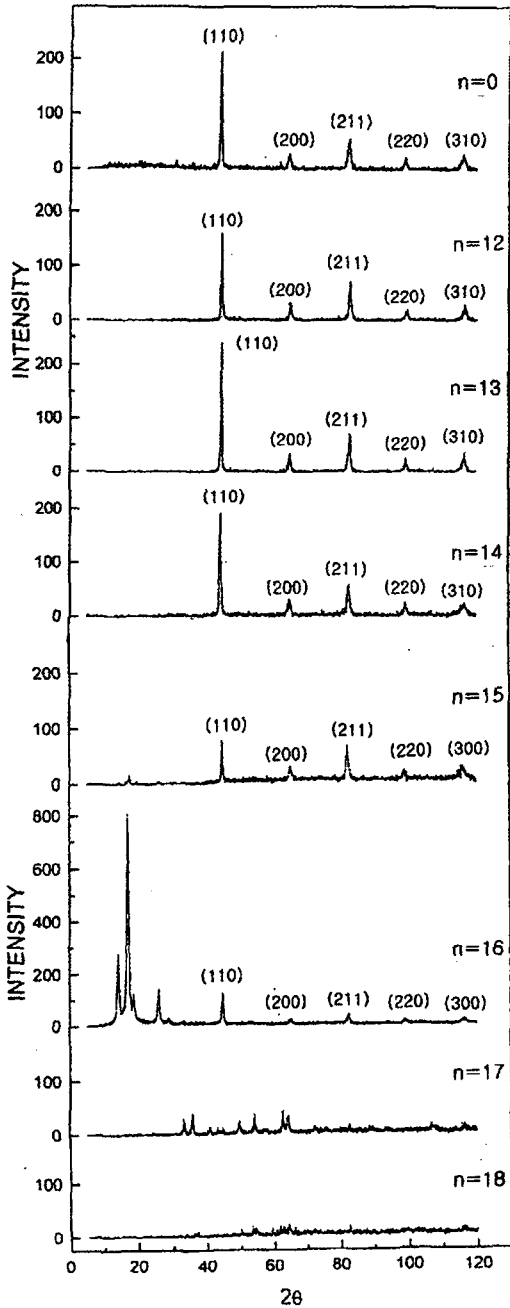


Fig. 1 X-ray diffraction patterns as a function of neutron fluence(10^n n/cm²) [adoped from Ref. 6]

Table 2 Change of X-ray diffraction parameters

Specimen Number	plane	2θ (°)	Y (intensity)	d(Å)	lattice const.(Å)
A-1 (비조사)	110	44.6	100	2.02	2.87
	200	64.9	14.4	1.43	
	211	81.4	25.9	1.18	
	220	98.9	11.6	1.01	
	310	116.0	13.9	0.91	
A-2 (10^{12} n/cm ²)	110	44.9	100	2.01	2.86
	200	65.3	20.4	1.43	
	211	82.6	44.6	1.16	
	220	99.4	12.6	1.01	
	310	116.4	18.7	0.91	
A-3 (10^{13} n/cm ²)	110	45.0	100	2.01	2.86
	200	65.4	15.0	1.43	
	211	82.5	30.0	1.16	
	220	99.3	11.7	1.01	
	310	116.6	16.7	0.90	
A-4 (10^{14} n/cm ²)	110	44.9	100	2.01	2.86
	200	65.0	15.5	1.43	
	211	82.6	31.5	1.16	
	220	99.0	15.0	1.01	
	310	116.6	15.5	0.91	
A-5 (10^{15} n/cm ²)		17.5	47.4	5.06	2.85
		26.2	21.0	3.42	
	110	45.3	100	2.00	
	200	65.3	39.5	1.40	
	211	82.8	80.1	1.14	
	220	99.2	29.0	0.98	
	310	116.5	39.5	0.89	
A-6 (10^{16} n/cm ²)		14.3	35.0	6.20	2.86
		17.2	100	5.15	
		18.8	15.5	4.72	
		26.0	17.6	3.42	
	110	44.9	16.4	2.01	
	200	65.2	3.5	1.43	
	211	83.2	2.6	1.16	
		87.9	1.8	1.11	
		93.9	2.0	1.05	
	220	99.0	2.8	1.01	
310	116.6	3.3	0.91		

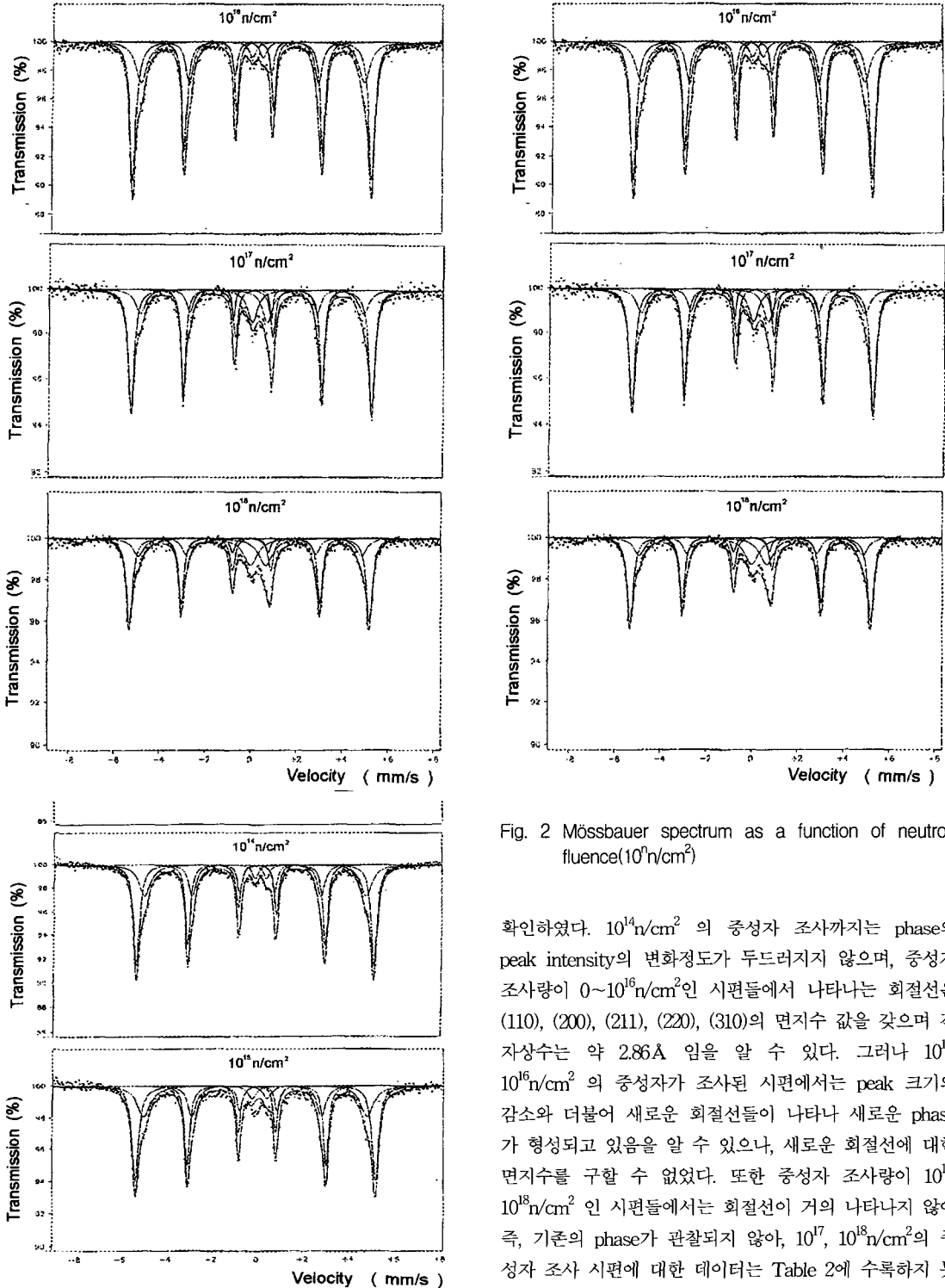


Fig. 2 Mössbauer spectrum as a function of neutron fluence(10^{18} n/cm²)

확인하였다. 10^{14} n/cm²의 중성자 조사까지는 phase와 peak intensity의 변화정도가 두드러지지 않으며, 중성자 조사량이 $0 \sim 10^{16}$ n/cm²인 시편들에서 나타나는 회절선은 (110), (200), (211), (220), (310)의 면지수 값을 갖으며 격자상수는 약 2.86Å임을 알 수 있다. 그러나 10^{15} , 10^{16} n/cm²의 중성자가 조사된 시편에서는 peak 크기의 감소와 더불어 새로운 회절선들이 나타나 새로운 phase가 형성되고 있음을 알 수 있으나, 새로운 회절선에 대한 면지수를 구할 수 없었다. 또한 중성자 조사량이 10^{17} , 10^{18} n/cm²인 시편들에서는 회절선이 거의 나타나지 않아, 기존의 phase가 관찰되지 않아, 10^{17} , 10^{18} n/cm²의 중성자 조사 시편에 대한 데이터는 Table 2에 수록하지 못하였다.

따라서 $10^{15}n/cm^2$ 이상의 중성자 조사 시편에서는 bcc 상이 감소하며, $10^{17}n/cm^2$ 이상의 중성자 조사에서는 시편의 결정성이 변화되고 있음을 알 수 있다. 이로부터 격자배열이 무질서해지고 있음을 알 수 있으며, 이는 공공(vacancy) 및 격자간원자(interstitial atom)가 생성되어 원자간 결합이 끊어져 dangling bond가 증가하고 있음을 의미한다[1].

3.2. Mössbauer Spectrum 및 Parameter

3.2.1. Mössbauer 스펙트럼의 변화

중성자 조사량이 비조사~ $10^{18}n/cm^2$ 인 시편들의 Mössbauer 분광스펙트럼은 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 초미세 자기장에 의한 Zeeman splitting으로 나타나는 두 site 중 공명흡수면적이 큰 site를 A site라 하고, 작게 나타나는 site를 B site라 하였다. 그리고 quadrupole splitting에 의해 2개의 공명흡수선이 나타나는 site를 C site라 하였다. Fig. 2의 Mössbauer 분광에서는 Zeeman splitting에 의해 생기는 6개의 공명흡수선이 두 쌍 나타나므로 A, B site는 자기적 특성이 강자성이며, 중성자 조사 후에도 시편은 강자성을 유지함을 알 수 있다. 또한 초미세 자기장에 의한 상호작용이 나타나지 않고 quadrupole splitting에 의해 생기는 2개의 공명흡수선이 중앙에 중첩된 모습(doublet)으로 나타나므로 C site는 비자성 물질에 의해 나타남을 알 수 있다.

Fig. 2로부터 중성자 조사량이 비조사~ $10^{16}n/cm^2$ 인 시편들에서는 중성자 조사량이 증가함에 따른 Mössbauer 분광의 변화가 거의 없으며, 중성자 조사량이 $10^{17} \sim 10^{18}n/cm^2$ 인 시편들에서는 중성자 조사량이 증가함에 따라 A, B site의 공명흡수면적은 감소하나, 이때 peak의 위치변화는 보이지 않음을 알 수 있다. 또한 분광의 중앙부에 위치한 C site의 공명흡수면적이 증가되었음을 알 수 있다. 이 결과는 G. Brauer[4]의 측정결과와도 잘 일치한다.

따라서 시편은 미시적으로 강자성을 유지하고 있지만 거시적으로는 상자성이 증가하는 자기완화 현상이 일어나고 있음을 알 수 있다. 이러한 자기완화 현상에 대하여 Ishikawa[11]는 bulk 내에서 magnetic atom이 nonmagnetic atom에 둘러 쌓여 일어난다고 설명하고 있다. 또한 Booth 등[12,13]도 Bulk 내에 자기완화 현상이 일어남을 밝힌바 있다.

3.2.2. Mössbauer Parameter의 변화

3.2.2.1. Magnetic Hyperfine Field

중성자 조사량이 비조사~ $10^{18}n/cm^2$ 인 시편들에서의 magnetic hyperfine field는 Fig. 3과 같이 A site 에서 326.9~330.6 kOe, B site 에서 303.8~307.2 kOe 정도의 값을 갖는다. A 와 B site 에서 모두 중성자 증가함에 따라 magnetic hyperfine field가 다소 감소하는 경향을 보이나 뚜렷한 변화는 나타나지 않으므로 A, B site 에서는 중성자 조사량에 따른 자기적 특성이 변화하지 않음을 알 수 있다.

한편 Fusita[13]의 탄소강에 대한 연구결과로부터 magnetic hyperfine field가 305 kOe 정도인 B site 는 Fe 원자의 2nd 나 3rd 인접 원자들 중에 비자성 원자가 존재하는 site임을 알 수 있으며, magnetic hyperfine field 가 330kOe 정도인 A site는 Fe 원자의 4th 이상의 인접 원자들 중에 비자성 원자가 존재하는 site임을 알 수 있다.

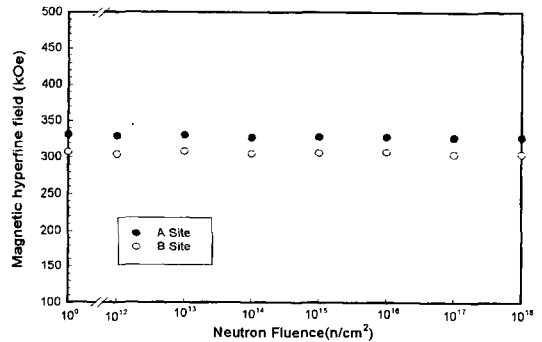


Fig. 3 Change of magnetic hyperfine field as a function of neutron fluence

3.2.2.2. Isomer Shift 및 Quadrupole Splitting

Fig. 4와 5에서는 중성자 조사량이 $0 \sim 10^{16}n/cm^2$ 인 시편들에서 전자 분포상태를 알 수 있는 isomer shift(IS) 및 핵의 대칭성을 알 수 있는 quadrupole splitting(QS) 값은 A, B site에서 0에 가깝고, C site에서 IS 값은 0.17~0.21mm/sec의 값을, QS 값은 0.47~0.50mm/sec의 값을 가지므로 A, B, C site 모두 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 중성자 조사량이 $10^{17} \sim 10^{18}n/cm^2$ 인 시편들

에서도 A, B site의 IS 및 QS 값은 거의 변화가 없으나, C site의 IS는 0.32~0.33mm/sec으로, C site의 QS는 0.64~0.66mm/sec으로 급격히 증가한다.

따라서 A site 와 B site 의 IS 값이 0에 가까운 값을 가지는 것으로부터 Fe 원자가 bcc 구조에 존재하는 metallic Fe($3d^64s^2$)인 것을 알 수 있으며, C site 에서는 IS 값이 0.2~0.3mm/sec의 값을 가지므로 Fe는 Fe^{+3} (high spin: $3d^5$)로 존재하는 것으로 추정된다. 따라서 X-선 회절무늬의 변화에서 알 수 있듯이 isomer shift 값의 증가는 dangling bond의 증가에 의해, 결합에 참여하지 않는 Fe 원자의 d전자들에 의해 s 전자의 차폐가 증가하거나, Fe 원자핵과 상호작용을 일으키는 s 전자의 밀도가 감소하기 때문에 일어남을 알 수 있다.

한편 A site 와 B site 에서 QS 는 모두 zero 에 가까운 값을 나타내고 있으므로 이들 site 에서는 Fe 원자 주위의 전하 분포가 대칭적으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 또한 X-선 회절무늬와 isomer shift로부터 알 수 있듯이 Fe가 bcc 구조에 metallic Fe($3d^64s^2$)로 존재함을 알 수 있으며, C site 에서는 QS 값이 0.5~0.6mm/sec의 값을 가지므로 Fe는 Fe^{+3} (high spin: $3d^5$)로 존재함을 알 수 있다. 따라서 C site의 QS값 변화는 결정성이 사라짐에 따라 dangling bond가 증가하여, 결합에 참여하지 않는 전자들이 증가하므로 Fe 원자 주위의 전하분포가 비대칭적으로 변화하기 때문이다.

3.2.2.3. 공명흡수 면적 및 선폭

Fig. 6 에 나타낸 바와 같이, A, B site의 공명흡수 면

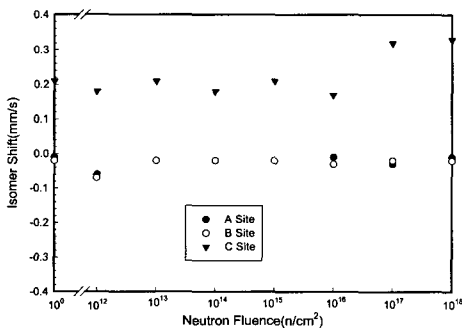


Fig. 4 Change of isomer shift as a function of neutron fluence

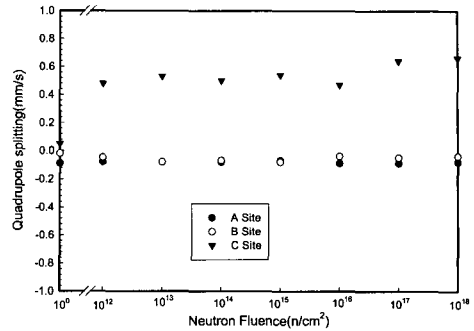


Fig. 5 Change of quadrupole splitting as a function of neutron fluence

적은 중성자 조사량이 비조사~ $10^{16}n/cm^2$ 까지는 변화가 없으나, $10^{17}, 10^{18}n/cm^2$ 의 조사에서는 급격히 감소한다. 그 이유는 isomer shift, quadrupole splitting, X-선 회절 무늬변화로부터 알 수 있는 바와 같이 dangling bond의 증가로 결정성이 변화하기 때문인 것으로 추정된다. 즉, Fe 원자들은 중성자 조사 전에는 결정에 속박됨으로써 되뒀 에너지를 무시할 수 있었으나, 결정성이 변화함에 따라 되뒀 에너지를 무시할 수 있는 (즉, 결정에 속박되어 있는) Fe 원자수가 적어짐에 의해 Mössbauer 효과가 감소하기 때문이다.

그러나 doublet으로 나타나는 C site 의 면적은 비조사~ $10^{16}n/cm^2$ 까지는 큰 변화가 없으나 $10^{17}, 10^{18}n/cm^2$ 에서는 급격히 증가한다. doublet 면적/총 공명흡수 면적의 비를 살펴보면 비조사~ $10^{16}n/cm^2$ 까지는 4.0~4.8% 정도로 큰 변화가 없으나 $10^{17}, 10^{18}n/cm^2$ 의 조사에서는 각각 15.0, 21.3%로 급격히 증가함을 알 수 있다. 또한

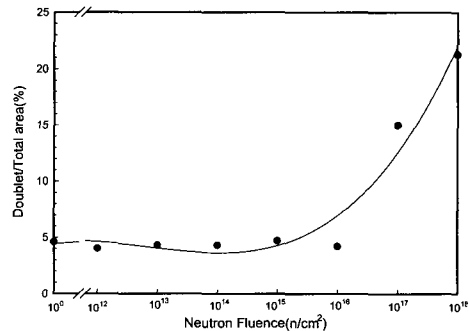


Fig. 6 Relative change of doublet/total area as a function of neutron fluence

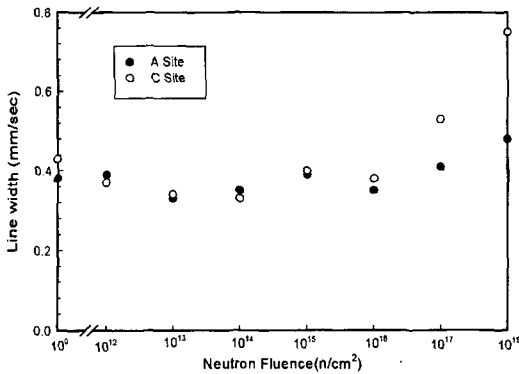


Fig. 7 Change of line width as a function of neutron fluence

Fig. 7에 나타난 바와 같이 선폭은 비조사~ 10^{16} n/cm² 중성자 조사까지는 큰 변화가 없으나, 10^{17} , 10^{18} n/cm²의 중성자 조사에서는 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 X-선 회절 결과에서 논의한 바와 같이, 중성자 조사의 증가에 의해 dangling bond가 증가하여, 시편의 결정구조가 변하여 원자 및 전자의 배위구조가 복잡해지기 때문이다. 한편 본 연구에서 사용된 시편의 경우 비자성 원소의 함량비가 2% 미만이며, 중성자 조사과정 중 외부에서 비자성 원자의 첨가가 없었다. 따라서 10^{16} n/cm²의 중성자 조사까지의 C site는 SA508 Class 3 site는 SA508 Class 3 강재 생산 시 포함된 비자성 원자와 Fe의 결합에 의해 나타나는 것이며, 10^{17} , 10^{18} n/cm² 중성자 조사에서는 결합의 증가에 의해 비자성원소인 결합과 Fe 원자의 상호작용이 증가하여 C site 면적이 증가하였음을 알 수 있다.

4. 결론

4.1. X-선 회절

강재의 결정구조는 bcc 구조이며, 고속 중성자 조사량(이하 조사량이라 함)이 10^{16} n/cm² 이하에서 강재의 결정구조는 변화가 없다. 그러나 조사량이 10^{17} , 10^{18} n/cm² 인 강재는 결정성이 크게 변하여 가며, 결정 이방성 상수가 감소한다.

4.2. Mössbauer parameters

1) 강재의 Mössbauer 스펙트럼에는 강자성을 나타내는

두 개의 site와, 비자성을 나타내는 한 개의 site가 나타났다. 조사량이 10^{16} n/cm² 이하인 강재의 비자성 site의 IS, QS는 거의 변화가 없으나 조사량이 10^{17} n/cm² 이상인 강재에서는 급격히 증가한 값으로 나타나며, 비자성 site의 Fe는 Fe³⁺으로 존재함을 알 수 있다.

2) 조사량이 10^{16} n/cm² 이하인 강재의 강자성 site의 공명 흡수 면적은 중성자 조사량의 증가에 따른 변화가 거의 없으나, 10^{17} n/cm² 이상인 강재의 강자성 site의 공명 흡수 면적은 급격히 감소한다. 또한 조사량이 10^{16} n/cm² 이하인 강재의 비자성 site의 공명 흡수 면적은 변화가 거의 없으나, 10^{17} n/cm² 이상인 강재의 비자성 site의 공명 흡수 면적은 급격히 증가한다. 그러나 조사량이 10^{17} n/cm² 이상인 강재의 강자성 site의 Mössbauer 스펙트럼에서의 공명 흡수선 모양은 6개 peak가 그대로 나타나므로, 고속 중성자 조사량 증가에 따라 비자성인 중성자 조사 결합의 증가로 강재 내에는 강자성이 약화되고, 비자성이 증가하는 자기완화 현상이 일어남을 알 수 있다.

3) 조사량이 10^{16} n/cm² 이하인 강재의 Mössbauer 스펙트럼의 비자성 site의 선폭은 0.38~0.43 mm/s의 값을 갖으나, 조사량이 10^{17} n/cm² 이상인 강재의 비자성 site의 선폭은 0.53~0.75 mm/s로 급격히 증가한다. 따라서 조사량이 10^{17} n/cm² 에서 강재의 결정이 크게 변화함을 알 수 있으며, 이 결과는 X-선 회절 실험결과와도 일치한다.

4.3. 비파괴 검사에의 응용성 평가

X-선 회절선, Mössbauer spectrum을 측정 조사하여 얻은 결과들은 모두, 고속 중성자 조사량이 10^{17} n/cm² 이상일 때 강재의 물성이 변화함을 보여주므로, 이 방법들은 비파괴적인 중성자 조사취화 평가방법으로 활용 가능함을 알 수 있다.

4.4. 물성변화를 일으키는 임계조사량

343K에서 중성자가 조사된 원자로 용기 강재의 물성이 변하는 임계 고속 중성자 조사량(critical fast neutron fluence)은 10^{17} n/cm² 이다.

참고문헌

[1] M. W. Thompson, Defects and radiation damage in

- metals, Cambridge University Press, (1969)
- [2] R. L. Fish, *J. Nucl. Mater.*, Vol. 46, pp. 113, (1973)
- [3] J. T. Buswell, W. J. Phythian, R. J. McErloy, S. Dumbill and P. H. Ray, *J. Nucl. Mater.*, Vol. 225, pp. 196, (1995)
- [4] G. Brauer, W. Matz and Cs. Fetzer, *Hyperfine Interaction*, pp. 56, (1990)
- [5] Y. Yoshida, and S. Nasu, *Point Defect and Defect Interaction in Materials*, Yamada Science Foundation, pp. 199, University of Tokyo Press, (1982)
- [6] Y. G. Yi, et al., *Sae Muli*, Vol. 38, pp. 379-385, (1998)
- [7] J. F. Stubbins, J. G. Williams, J. U. Patel and W. J. Shong, *Proc. 5th EDM*, pp. 719, (1992)
- [8] J. F. Stubbins, W. J. Shong, M. Giacobbe, A. M. Ougouag and J. G. Williams, *ASTM STP 1204*, pp. 5, (1993)
- [9] M. K. Devine, D. C. Jiles, P. K. Liaw, R. D. Rishel and D. S. Drinon, *Rev. Progress in QNDE*, Vol. 12B, pp. 1815-1822, (1993)
- [10] W. J. Shong, M. Giacobbe, J. F. Stubbin, J. G. Williams, *Proc. 6th Int. Symp. on Environ. Degr. Mat. in Nucl. Power Sys.*, pp.153, (1993)
- [11] Ishikawa, *J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp.1054, (1964)
- [12] J. G. Booth and J. Crangle, *Proc. Phys. Soc. London*, Vol. 79, pp. 1278, (1962)
- [13] R. M. Hously, R. W. Grant, A. H. Muir, M. Blander, M. Abdel-Gawad, *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf., Geochim. Cosmochim. Acta Suppl. Vol. 2, No. 3*, pp. 2125, (1971)
- [14] F. E. Fusita, *Mössbauer Spectroscopy II*, Springer-Verlag, Berlin, (1981)