[논 문] 한국재료학회지
Korean Journal of Materials Research
Vol. 8, No. 11 (1998)

중성자에 조사된 Mn-Mo-Ni 저합금강의 기계적 및 자기적성질 변화

장기옥[1,2] · 지세환[1] · 박승식[1,2] · 김병철[1] · 김종오[2]

[1]한국원자력연구소
[2]충남대학교 재료공학과

Changes in Mechanical Properties and Magnetic Parameters of Neutron Irradiated Mn-Mo-Ni Low Alloy Steels

K.O. Chang[1,2], S.H. Chi[1], S.S. Park[1,2], B.C. Kim[1] and C.O. Kim[2]

[1]Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-353
[2]Dept. of Materials Engineering, Chungnam National University, Taejon 305-764

(1998년 5월 18일 받음, 1998년 9월 9일 최종수정본 받음)

초 록 Mn-Mo-Ni 저합금강의 중성자 조사에 따른 기계적(미세경도, 인장, 샤피충격시험) 및 자기적(포화자화, 보자력, 잔류자화, Barkhausen Noise(BN) 진폭, BN에너지) 성질 변화를 측정하여 이들의 상관관계를 고찰하였다. 기계적 성질시험 결과, 중성자 조사로 인하여 항복강도, 인장강도, 미세경도 및 천이온도(T_{41J})는 증가하였고 최대흡수에너지(USE)는 감소하였으며, 인장시험의 경우 용접금속에서는 모재와 비교했을 때 큰 변화가 없었다. 자기적성질을 측정한 결과, 잔류자화, BN진폭, BN에너지는 감소하였고 보자력은 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 기계적 · 자기적 성질변화의 상관관계에서 자기적성질인 보자력 증가에 따라 천이온도, 항복강도, 경도는 증가하고 USE는 감소하였고, BN진폭의 경우는 보자력과 반대의 경향을 보였다. 본 실험에서 중성자 조사로 인한 기계적 · 자기적 성질변화가 일관성 있는 상관관계가 있음을 확인하였고, 이들의 변화를 통해 조사손상을 평가하는 데 이용 가능하다.

Abstract Irradiation-induced changes in mechanical properties and magnetic parameters were measured and compared to explore possible correlations for Mn-Mo-Ni low alloy steel surveillance specimens which were irradiated to a neutron fluence of 2.3×10^{19}n/cm^2 (E>1.0MeV) in a typical pressurized water reactor environment at about 288℃. For mechanical property parameters, microvickers hardness, tensile and Charpy impact test were performed and Barkhausen noise amplitude, coercivity, remanence, maximum induction were measured for magnetic parameters, respectively. Results of mechanical property measurements showed an increase in yield and tensile strength, microvickers hardness, 41J indexed RT_{NDT} and a decrease in upper shelf energy irrespective of base and weld metals. However, in the case of tensile properties, the changes in weld metal were negligible compared to the base metal. In the case of magnetic measurements, it is found that magnetic remanence, BN amplitude, BN energy have dropped significantly but coercivity(H_c) has increased rapidly after irradiation. In this study, the measurements conducted on surveillance specimens of Mn-Mo-Ni low alloy steel showed that there were strong correlations between mechanical properties and magnetic properties.

1. 서 론

원자로 압력용기강과 같은 페라이트계 합금이 중성자에 조사되면 연성-취성천이온도(DBTT)와 항복응력이 증가하게 되고, 최대흡수에너지(USE : upper shelf energy)가 감소하는 취화현상이 나타난다. 이러한 원자로 압력용기강의 조사취화를 일으키는 조사손상 기구에 관한 지금까지의 연구결과를 정리하면,[1,2] 조사에 따른 결함(공공, 침입형 결함)의 생성 및 이들 결함과 잔류 불순물(Cu, P) 혹은 합금원소(Ni)와의 상호작용에 의하여 생성된 결함(vacancy-impurity clusters) 등이 주요 원인으로 밝혀져 있다. 특히 Cu가 과포화된 압력용기 재료인 경우에는 중성자 조사에 따른 미세한 Cu석출물 생성이 전위의 이동을 방해하여 취화를 유발시키는 것으로 나타났다. Cu의 함량이 적은 경우에는 안정화된 vacancy-interstitial cluster 혹은 interstitial 및 vacancy loop 형성이 주요 요인으로 거론되고 있으나 현재까지 명확하게 규명되어 있지 않다. 중성자 조사에 따른 압력용기 재료의 조사취화 평가결과는 발전소 안전 운전조건 결정 및 수명평가에 중요한 자료로 사용되고 있다. 정확한 취화평가 방법과 관련하여 지금까지 많은 방법들이 적용, 연구되어 왔으며,[3~5] 최근에는 충격, 인장, 파괴인성등의 파괴적인 평가방법과 함께 비파괴적 평가방법(자기측정법, 전자기시험법, 초음파시험법등)의 적용이 연구되고 있다.[6~9] 특히 강자성 재료가 중성자에 조사되면 중성자 조사에 의해 생성된 점결합들의 모임(defect clusters 또는 depleted zone)이 자구벽의 이동을 방해함으로써 자

기적성질에 영향을 미친다고 알려져 있다.[10] 자기측정법에는 자기이력곡선에 나타나는 자기적 변수들을 이용하여 재료의 자기적성질 변화를 관찰하는 방법과 강자성 물질이 자화될 때 불연속적인 자화에 의해 발생하는 Barkhausen Noise(BN)의 변화를 측정하는 두 가지 방법이 있는데 최근 이 두 측정법을 조사손상 평가에 응용하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다.[11~13] 본 연구에서는 조사취화의 비파괴적 평가법 개발과 관련하여, 중성자 조사에 따른 기계적성질 변화 측정이 완료된 시편에 대하여 자기적성질을 측정한 후, 이를 조사 전 측정자료와 비교 분석하여 조사에 따른 기계적 성질 변화와 자기적성질 변화의 상관관계를 조사하였다.

2. 실 험 방 법

2.1 재료 및 시편 제작

본 실험에 사용한 시편 재료는 Mn-Mo-Ni 저합금강 단조재이며, 이는 SA508 Class-3강에 해당되는 재료이다. 이 재료는 국내 상용발전소의 원자로 압력용기 노심대부위(beltline region) 내부표면 1/4T 위치에서 채취한 모재와 용접금속으로, 재료의 조성성분과 열처리 조건은 표 1 및 표 2와 같다. 충격 및 인장시험용 시편은 원자력 발전소 감시시험 계획에 따라 제공된 시편으로 충격시편은 10mm×10mm×55mm 표준시편이며, 인장시편은 gauge length 25.5mm, pin hole 직경 9.5mm인 round type 시편이다. 경도시험용 시편은 Hot Cell에서 diamond cutter를 이용, 3mm×10mm×0.5mm로 가공한 후 미세경도 측정에 적합한 표면을 만들기 위해 사포와 diamond paste를 이용하여 연마하였다. 자기이력곡선 측정용 시편은 반자장을 고려하여 disc형태인 3mmΦ×0.2mm로 가공하였으며, BN 측정용 시편의 크기는 방사선량을 고려하여 2.5mm×10mm×0.5mm로 가공하였다. 그림 1은 모재와 용접금속의 광학현미경 사진이며 모재시편의 미세구조는 bainitic이다.

Table 1. Chemical composition(wt%) of Mn-Mo-Ni low alloy steels.

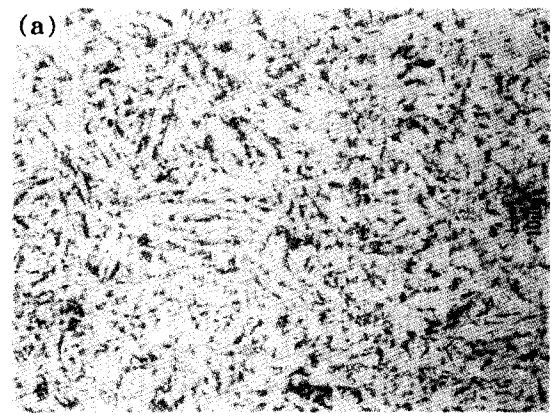
Element	C	Mn	P	S	Si	Ni
Base	0.155	1.28	0.006	0.005	0.168	0.712
Weld	0.062	1.68	0.007	0.008	0.371	0.582
Element	Mo	Cr	Cu	Al	Co	Fe
Base	0.484	0.171	0.063	0.011	0.012	Bal.
Weld	0.554	0.033	0.044	0.004	0.011	Bal.

2.2 기계적 성질시험

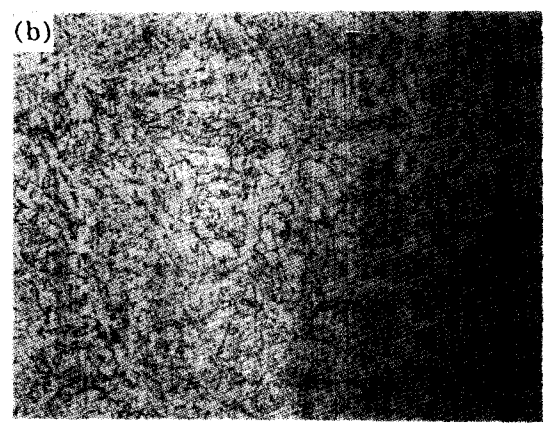
샤피충격시험(Charpy V-notch impact test)은 ASTM A-370[14]에 따라 충격시험기(Tinius Olsen, Model 84)로 완전한 충격곡선(full Cv-curve)을 얻을 수 있도록 시편수량과 온도(-60℃~288℃)를 조절하면서 수행하였다. 특히 최대흡수에너지와 천이구역이 분명히 나타나도록 시험하였다. 최대흡수에너지의 결정은 ASTM E185에 따라 천이구역 상단부의 최대치 부근의 평균값으로 정하였다.

Table 2. Heat treatment of Mn-Mo-Ni low alloy steels.

Material	Temperature	Time(hours)	Coolant
Base Metal	Austenitizing (871℃)	4	Water -quenched
	Tempered (663℃)	4	Air-cooled
	Stress Relief Heating : 595℃ Holding : 595℃ Cooling : 310℃	15℃/hr 6hr 10℃/hr	Air-cooled
Weld Metal	Post Welded Stress Relief Heating : 595℃ Holding : 595℃ Cooling : 290℃	15℃/hr 6hr 10℃/hr	Air-cooled



a) base metal



b) weld metal

Fig. 1. Optical Micrographs of a) base and b) weld metal.

또한, 천이온도의 변화($\triangle RT_{NDT}$)의 결정은 흡수에너지가 41 joules (30 ft-lb)인 점(T_{41})에서의 조사 전·후의 온도변화로 결정하였다. 인장시험은 재료시험기(Instron Model 8502)를 이용, ASTM E-8 및 E-21[15,16]에 따라 항복강도, 최대인장강도, 연신율, 단면수축율등을 측정하였다. 시편의 변형량 측정은 LVDT, 표점거리는 1inch, 온도조절은 K-type 열전대가 부착된 로에서 30분 유지하였고, 인장속도는 0.2㎜/min.으로 수행하였으며, 32 bit A/D converter를 이용하여 computer로 입력한 후 분석 soft-

ware로 결과를 처리하였다. 미세경도 측정은 미세경도시험기(Model Nikon QM-2)를 사용하였으며 냉각속도는 0.8~1.0 ℓ/min., 압축공기는 5kg/㎠, 불활성 기체(nitrogen gas)는 100mℓ/min.로 조정하여 측정하였다. 측정시 현미경 배율을 400배로 초점을 맞추고 1kg의 하중을 15초 동안 가한 후, 10회 이상 측정하여 평균값을 사용하였으며 측정상의 표준편차는 ±3%이다.

2.3 자기적 성질시험

자기이력곡선은 감도가 0.05~50 emu/full scale이고, 정밀도가 ±1%인 시료진동형자력계(vibrating sample magnetometer)를 이용, 상온에서 측정하였다. 표준시료는 1emu인 Ni원판을 사용하였으며, 측정용 시료는 지름 3㎜의 디스크 형태로 제작하여 반자장 계수를 일정하게 하였다. 이때 5kOe의 인가자장으로 완전히 포화시켜 자기이력곡선을 구하였으며, 보자력은 2kOe의 자장을 가한 상태에서 측정하였다. 자기이력곡선으로부터 포화자화, 잔류자화, 보자력 및 자기이력곡선의 각형비를 구하였다. Barkhausen noise (BN)는 헬름홀쯔코일, 요크 등을 사용하여 교류 전류로서 시편을 포화시킨 후, 시편에 적합한 encircle형 탐촉자를 사용, 시편의 긴 방향으로 자화시켜 측정하였다. 이때 사용한 교류자기장의 주파수 및 자기장의 세기는 각각 5 Hz 및 40 Oe 이었다. 탐지코일에 유도된 신호는 low pre-amplifier로 46 dB로 증폭한 후, 16~18 kHz의 band pass filter를 거쳐 digital oscilloscope(DSO, Lecroy 9310)를 이용하여 신호 형태를 측정하였다. BN envelope의 측정은 증폭된 BN신호를 처리하기 위하여 정류기와 콘덴서를 사용하였다. BN 신호는 digital storage oscilloscope를 통한 후 GPIB보드에 연결된 PC로 수집하여 처리하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기계적성질 변화

조사전·후의 경도, 인장 및 충격시험 결과를 표 3에 정리하였다. 표 3에서와 같이 미국 원자력 규제위원회의 조사취화 평가규정인 Regulatory guide 1.99, revision 2[17]에 언급된 조사량에 따른 천이온도 및 최대흡수에너지 값의 예상 변화량과 실제 가동 원자로에서 2.3×10^{19}ncm^{-2}의 중성자에 조사된 시편의 천이온도와 최대흡수에너지 측정값을 비교해 보면 예상치 보다 적은 변화를 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 재료의 Cu 및 불순물 함유량은 매우 낮기 때문에 조사취화량이 예상보다 작은 것으로 판단된다. 모재의 경우 41 Joules에서 조사에 따른 천이온도 변화량($\triangle T_{41J}$)은 21.7℃이었고, 흡수에너지는 11.4 ft-lb감소하여 조사 후 평균 최대흡수에너지는 107 ft-lb로 측정되었다. 용접금속 시편의 경우, 천이온도는 $\triangle T_{41J}$에서 31.9℃증가하였고 최대흡수에너지는 15.3 ft-lb의 감소하여 평균 최대흡수에너지는 108.2 ft-lb로 측정되었다. 충격시험 후 시편 파단면 양상은 시험온도 증가에 따라 점진적으로 연성이 증가하였으며 실험결과는 지금까지의 연구결과와 같이 모재보다는 용접금속이 중성자 조사에 의한 조사손상량이 더 큰 것으로 나타났다. 이것은 많은 연구 결과[18,19]와 일치하고 있다. 조사에 따른 항복강도와 천이온도의 증가 및 최대흡수에너지 감소요인은 중성자 조사에 따라 형성된 결함(석출물, 전위 loop, vacancy-interstitial clusters등) 때문인 것으로 알려져 있다.[20] 각 시편에 대한 조사 전 후의 인장시험 결과 모재의 경우 0.2% 항복강도는 7 ksi, 최대 인장강도는 1.4 ksi 증가하였고, 용접금속의 경우 0.2% 항복강도는 6.4 ksi 증가와 최대 인장강도는 거의 변화가 없었다. 조사에 따라 두 재료 모두 항복강도는 뚜렷이 증가한 반면, 연신율과 단면수축율 등은 약간 감소하거나 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. Odette[21]는 본 연구에 사용된 재료와 유사한 화학조성 및 중성자 조사량(2×10^{19}ncm^{-2})에서 중성자 조사에 따른 재료의 천이온도의 상승은 항복강도와 $\triangle T_{41J}=\alpha\cdot\Delta\sigma_y$($\alpha$: 비례상수, $\triangle T_{41J}$: 천이온도 변화, $\Delta\sigma_y$: 항복강도 변화)의 관계가 있음을 보고하였다. 이들의 연구결과 비례상수 α값은 대부분의 압력용기강의 경우 1이하인 0.45~0.85범위를 가지는 것으로 나타났다. 본 실험에 사용된 Mn-Mo-Ni 저합금강의 경우 모재와 용접금속은 각각 0.45, 0.72로 나타났다. 용접금속이 모재보다 높은 α값을 보이는 것은 Odette 등의 결과에서 확인된 바와 같이 모재와 비교하여 용접금속의 높은 불순물 함유량 때문인 것으로 판단된다. 압력용기강에서 P나 S같은 불순물은 조사로 인하여 생성되는 결함 혹은 결함들의 집합체(cluster)들을 안정화시키거나, P와 S같은 미세한 석출물을 형성 혹은 입계에 석출하여 취화를 일으키는 것으로 보고되고 있다. 한편, 경도는 조사에 따라 모재 및 용접금속 각각 27.8, 20.8 및 14%, 10% 증가한 것으로 나타났다.

Table 3. Mechanical properties of base and weld metal.

Materials		Hardness (Hv)	Tensile			TT_{41J}(℃)		USE(ft-lb)	
			YS (ksi)	UTS (ksi)	UE (%)	Predicted	Measured	Predicted	Measured
Base	Unirr.	203.9	60.5	88.1	15.6	-55.7	-55.7	118.4	118.4
	Irr.	231.7	67.5	89.5	13.1	-31.9	-34.0	91.2	107.0
Weld	Unirr.	213.8	71.2	94.2	15.7	-61.1	-61.1	123.5	123.5
	Irr.	234.6	77.6	94.0	15.1	-28.1	-29.2	95.1	108.2

*YS: Yield Strength, UTS: Ultimate Tensile Strength
UE: Uniform Elongation, TT_{41J}: 41 joule indexing temperature
USE: Upper Shelf Energy

3.2 자기적성질 변화

모재와 용접금속의 조사 및 비조사재에 대한 자기이력곡선 측정결과은 그림 2와 같다. 두 금속 모두 조사에 의하여 자기이력곡선이 시계방향으로 회전하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 조사에 의하여 자화곡선이 시계방향으로 회전한다는 것은 상대적으로 투자율(μ: permeability)이 감소된다는 것을 의미한다. 이러한 조사에 의한 투자율 감소는 조사량이 1.2×10^{18}ncm^{-2}인 A533B강에 대한 Shong[22] 등의 자기측정 결과에서도 관찰된 바 있는데 두 경우 모두 약 20% 감소되었다. 조사에 의한 투자율 감소는 조사결함 형성에 따른 자구벽 이동의 장애에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 자기이력곡선으로부터 구한 모재와 용접금속의 잔류자화, 보자력 및 각형비를 표 4에 나타내었다. 포화자화 값은 재료의 고유상수 값이고, 재료의 미세구조에는 변화하지 않는다고 알려져 있다.[23] 따라서 중성자 조사에 의해서 포화자화 값은 거의 변화하지 않고 약 211~213emu/g으로 일정하였다. 그러나 잔류자화와 보자력은 중성자의 조사에 매우 민감한 것으로 나타났다. 잔류자화는 조사에 의하여 모재와 용접금속 모두 현저히 감소되었으며, 보자력은 잔류자화와는 반대로 약 2배의 증가를 나타내었다. 이러한 보자력과 잔류자화의 측정 결과 역시 조사에 의한 투자율 감소와 같이 조사결함 형성이 원인이 되어 자구벽을 고착시켜 이에 따라 자구벽 에너지 감소와 자구벽 이동을 방해하는 것이 그 원인으로 지적되고 있다.[24,25] 또한 Narayan[26]은 고강도 저합금강의 미세구조와 기계적, 자기적성질 연구에서 제 2상의 입자들의

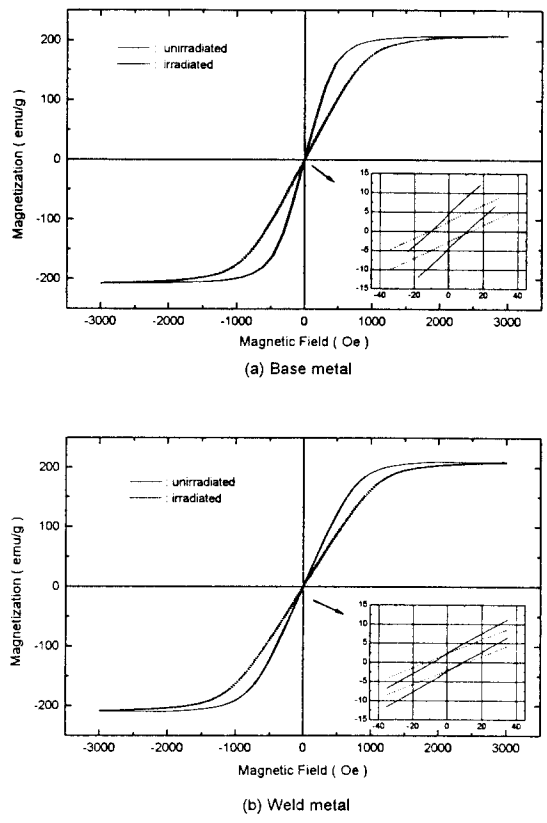


Fig. 2. Hysteresis loop from a) base and b) weld metal.

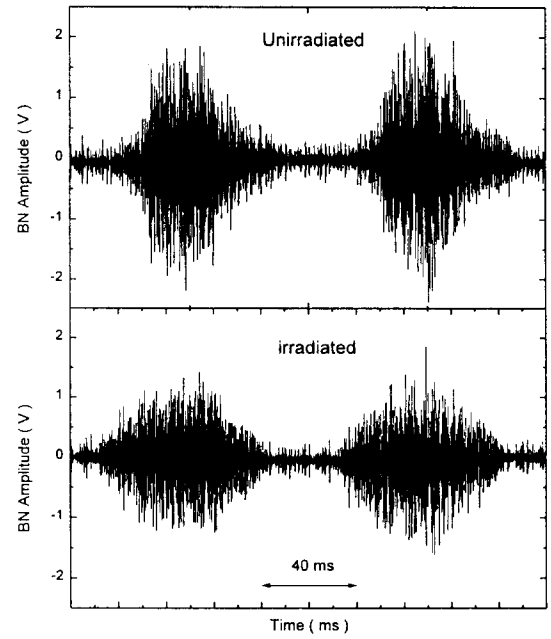


Fig. 3. Comparison of BN waveforms of base metal (irradiated to 2.3×10^{19}ncm^{-2} at 563K).

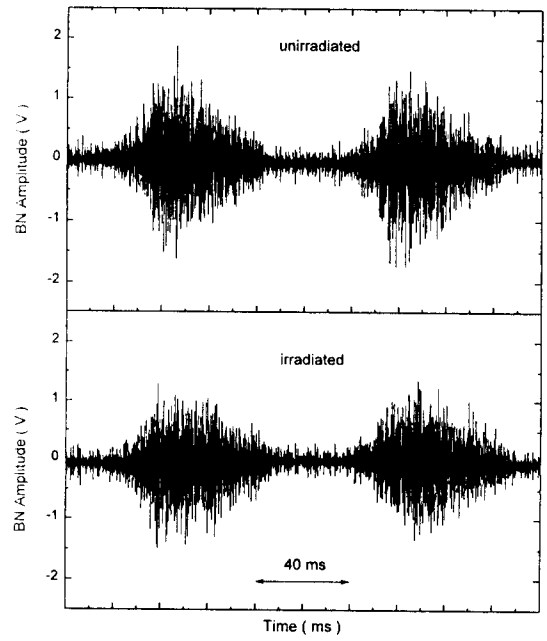


Fig. 4. Comparison of BN waveforms of weld metal (irradiated to 2.3×10^{19}ncm^{-2} at 563K).

크기와 형태가 자기적성질 특히 보자력에 큰 영향을 미친다고 보고하였다. 강자성물질이 자화될 때 불연속적 자화에 의해 발생하는 BN 신호는 시편내에 자기유도된 신호로 자구벽의 비가역적인 운동을 반영하며 유도코일의 회전수와 재료의 미세조직이나 상태등 여러 요인들이 결합되어 일어나는 통계적인 과정으로 볼 수 있다. 따라서 일반적으로 재료에서 자구벽 운동이 방해를 받아 평균 폭이 작아질 때 BN 신호는 감소한다. 그림 3, 4는 모재 및 용접금속에서 비조사재와 조사재에 대해 교류주파수 5 Hz, 40 Oe의 자기장의 세기에서 측정한 BN 신호를 나타내었

Table 4. Magnetic parameters of base and weld metal.

Materials		Hysteresis Loop				Barkhausen Noise		
		M_s (emu/g)	M_r (emu/g)	M_r/M_s (%)	H_c (Oe)	BNA (V)	RMS (mV)	Energy (V^2)
Base	Unirr.	213.07	50.20	23.56	15.70	3.43	301	1439
	Irr.	211.35	26.80	12.68	30.60	2.13	200	350
Weld	Unirr.	213.87	30.80	14.40	18.30	2.80	239	883
	Irr.	212.23	22.20	10.46	31.10	2.52	208	261

다. 그림에서 모재와 용접금속에서 비조사재에 비해 중성자에 조사된 재료는 BN 진폭이 작음을 보여주고 있다. 이것은 중성자 조사에 의해 생성된 결함이 자구벽의 운동을 방해하기 때문이다. 그리고 표 4에는 BN 진폭, RMS voltage와 에너지를 나타내었다. 그림과 표에서 보는 바와 같이 측정한 3개의 변수들은 비조사재에 비해 중성자에 조사된 재료에서 모두 감소하였다. 따라서 여러 연구결과를 종합하여 볼 때 BN의 변수들이 감소하는 것은 조사에 의해 생긴 결함의 밀도가 커져 자구벽의 자유이동평균거리(mean free path)가 작아졌기 때문으로 보인다.

3.3 조사에 따른 기계적 · 자기적성질 변화

조사에 따른 기계적성질과 자기적성질과의 관계는 그림 5~8과 같다. 그림 5와 6은 보자력-항복강도 및 경도 변화와 보자력-천이온도 및 최대흡수에너지 변화를 나타내었다. 측정결과는 조사취화 진행에 따라 보자력이 증가함을 보여준다. 한편 BN 진폭-천이온도 및 최대흡수에너지 변화와 BN 진폭-항복강도 및 경도의 변화는 그림 7, 8과 같으며, 측정결과는 조사취화 진행에 따라 BN 진폭이 감소함을 보여준다. 자기이력 측정시 인가해준 자장내에서 자화방향으로 자구이동이 순조롭게 이루어지지 않아 방해

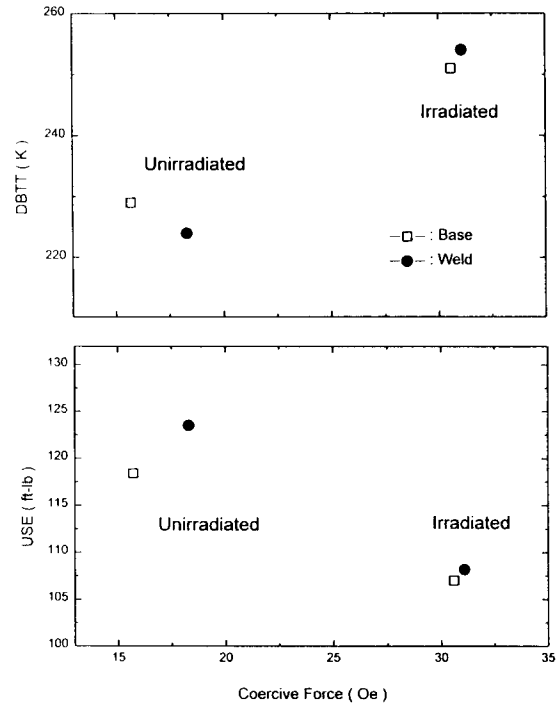


Fig. 6. Changes in coercive force with a) DBTT and b) USE for base and weld metal.

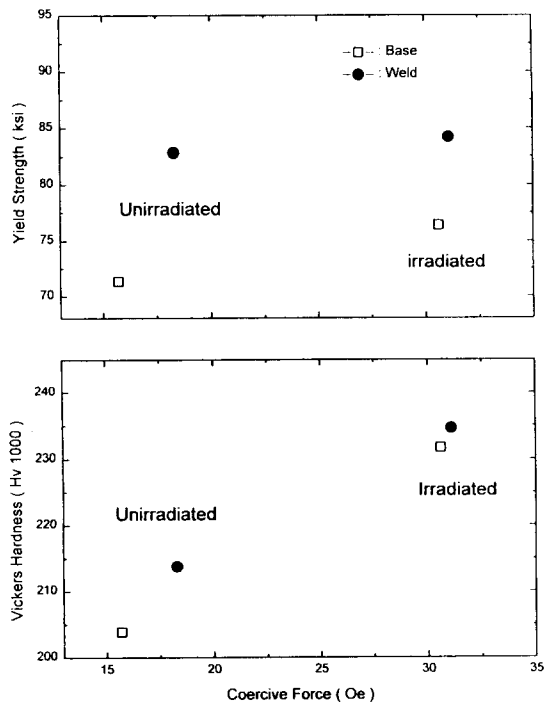


Fig. 5. Changes in coercive force with a) yield strength and b) hardness for base and weld metal.

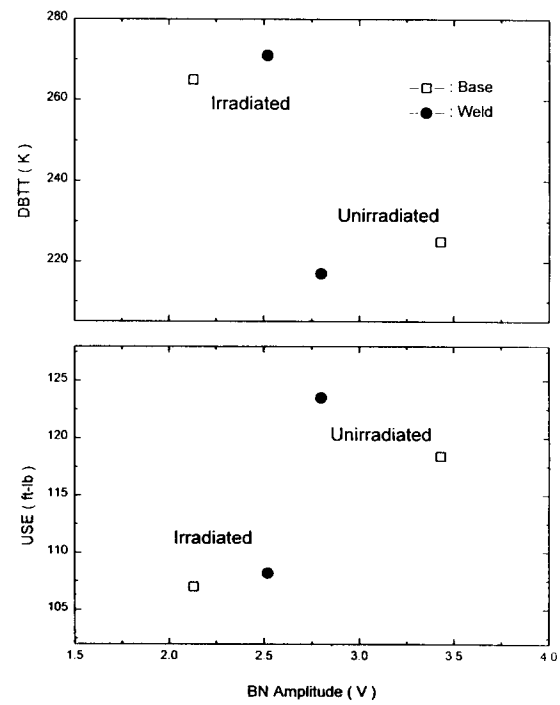


Fig. 7. Changes in BN amplitude with a) DBTT at T_{41J} and b) USE for base and weld metal.

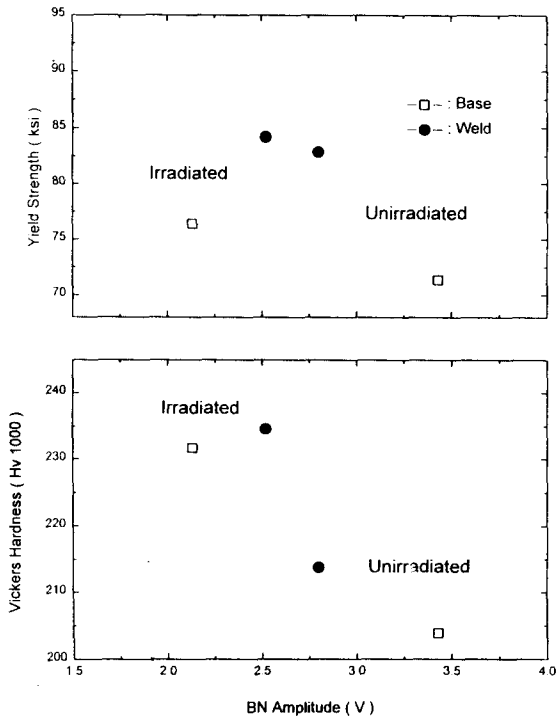


Fig. 8. Changes in BN amplitude with a) yield strength and b) hardness for base and weld metal.

를 받게 되면 보자력이 증가하게 된다. 따라서 조사에 따른 보자력의 증가는 조사결함과 자구벽과의 상호작용 증가에 그 원인 있는 것으로 판단된다. 조사결함과 자구벽과의 이러한 상호작용은 BN 진폭의 경우 반대로 나타난다. BN 진폭은 측정 순간에 인가해준 자장방향으로 움직이는 자구벽수(number of domain walls) 및 이들 자구벽의 자유이동평균거리에 비례하므로 BN 진폭의 감소는 조사결함이 자구벽을 고착화시켜 자유이동평균거리의 감소로 이해될 수 있다.

4. 결 론

중성자 조사(조사량 : 2.3×10^{19}ncm^{-2})에 따른 Mn-Mo-Ni 원자로 압력용기 저합금강 모재 및 용접금속의 기계적성질과 자기적성질 변화를 측정하여 비교 검토한 결과, 두 금속 모두 항복강도, 경도 및 연성-취성천이온도는 증가하고 최대흡수에너지는 감소하는 조사취화 현상을 보였으며, 용접금속이 모재에 비하여 다소 높은 취화량을 나타내었다. 이러한 조사취화 현상을 자기측정법으로 평가한 결과 잔류자화, BN 진폭 및 BN 에너지는 감소하고 보자력은 증가하였다. 이러한 현상은 조사결함의 생성에 따른 전위 및 자구벽 이동의 장애물 형성에 기인 한 것이다. 따라서 본 실험 결과로 나타난 기계적 변수와 자기적 변수들 상호간 변화의 일관성은 자기적 변수를 이용한 비파괴적 재료평가 가능성을 보여준다.

참 고 문 헌

1. G. Gage and E.A. Little, Nuclear Energy, **33**, No. 3, 153-172 (1994)
2. W.J. Phythian and C.A. Englih, J. Nucl. Mater., **205**, 162-177 (1993)
3. C.A. English et al., Int. J. Pres.Ves. and Piping, **54**, 49-88 (1993)
4. J.T. Buswell et al., J. Nucl. Mater., **205**, 198-205 (1993)
5. R.G. Faulkner et al., Mater. Characterization, **25**, 83-97 (1990)
6. W.J. Shong, J.G. Williams and J.F. Stubbiks, ANS Transactions, (1993)
7. D.S. Drinon, R.D. Rishel and P.K. Liaw, 12th Internatoinal conference on NDE in Nuclear Pressure Vessel Industries, ASM International, (1994)
8. D.O. Hunter, Battlele Northwest Labs. Report No. BNWL-SA-1467, CONF-671011-3 (1967)
9. F. Hori, M. Takenaka, E. Kuramoto and U. Aono, Scripta Metallurgica, **29**(2) (1993)
10. M.R. Govindaraju, et al., The Mineral, Metals and Materials Society, (1994)
11. A. Mitra, Z.J. Chen and D.C. Jiles, NDT & E International, Vol. **28**, No. 1 (1995)
12. I. Altpeter, Journal of NDE, Vol. **15**, No. 2 (1996)
13. J. Kameda, Scripta Metallurgica, Vol. **22** (1988)
14. ASTM A370-92, ASTM Standards, Section 3, Philadelphia, PA, (1993)
15. ASTM E8-93, ASTM Standards, Section 3, Philadelphia, PA, (1993)
16. ASTM E21-92, ASTM Standards, Section 3, Philadelphia, PA, (1993)
17. Regualtory Guide 1.99, Revision 2, US NRC, May, (1988)
18. F. Gillemot, P. Trampus, An International Review, ASTM STP 1011, (1989)
19. T.R. Mager, An Interantional Review, ASTM STP 1170, (1993)
20. G.R. Odette, Mat. Res. Symp. Proc. Materials Research Society, Vol. **373**, 137-148 (1995)
21. G.R. Odette, P.M. Lombrozo and R.A. Wullaert, ASTM STP 870, 840-860 (1985)
22. W.J. Shong, et al., The Mineral, Metals and Materials Society, (1993)
23. R.M. Bozoth, Ferromagnetism, IEEE Press., (1993)
24. S.K. Ray and O.N. Mohanty, J. Magn. Magn. Mat., **78** (1989)
25. W.C. Leslie and D.W. Stevens, Trans., ASM **57** (1964)
26. S.P. Narayan, at al., J. of Magn. Magn. Mat., **96**, 137-144 (1991)