

## 원자로압력용기강 용접열영향부의 미세조직 변화가 Magnetic Barkhausen Noise 거동에 미치는 영향

김주학\*, 윤의박\*\*, 문종걸\*, 박덕근\*, 홍준화\*

\* 한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀

\*\* 한양대학교 금속공학과

**초 록** 최근 자기적 특성의 변화가 재료의 미세조직적 상태에 민감하다는 보고가 있다. 재료의 미세조직은 상(phase), 결정립의 크기, 석출물 등의 다양한 인자로 구성되며, 본 연구에서는 이러한 인자들을 이용하여 재료의 특성과 Barkhausen noise(BN)의 관계를 연관시키기 위한 시도를 하였다. ASTM A 508 Gr. 3 원자로압력용기강을 대상으로 용접열영향부의 미세조직적인 변화를 일곱가지 대표적인 영역으로 구분하였고, 각 영역에서의 미세조직과 기계적특성의 변화를 파악한 후, 각 조건별로 BN을 측정하였다. 통상의 보자력이나 잔류자화 같은 자기적 성질은 큰 변화가 없었지만, BN은 미세조직의 상태에 따라 현격한 변화를 보였다. 결정립과 석출물의 크기가 증가함에 따라 BN은 증가하였고, tempered martensite 보다는 tempered bainite 조직에서 높은 BN을 나타냈다.

### 1. 서론

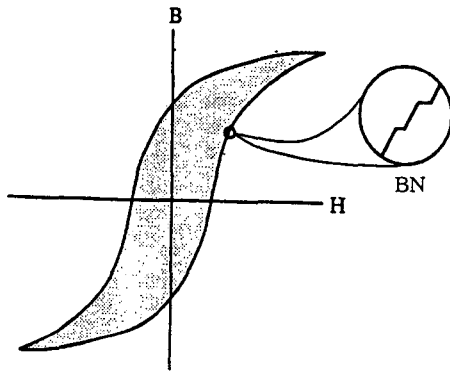
강자성(ferro-magnetic) 물질에 변화하는 자기장을 가하면, 재료내의 결함 등에 의하여 자구벽(domain wall)은 불연속적인 운동을 하게 된다. 이러한 불연속적인 자구벽의 운동과정을 탐지코일(pick-up coil)로 측정하면 Fig. 1과 같은 신호가 측정되는데, 이를 Barkhausen noise(BN)라 한다<sup>1-6)</sup>. BN은 재료내의 결함인 전위(dislocation), 비자성 개재물(non-magnetic inclusion), 결정립계(grain boundary), 석출물(precipitates), 잔류응력(residual stress) 등에 의해 많은 영향을 받으므로, 이를 이용하면 재료의 상태나 성질을 비파괴적으로 측정할 수 있다<sup>7, 8)</sup>.

그러나, 재료의 미세조직은 대개의 경우 매우 복잡하게 구성되어 있어서, BN에 영향을 미치는 미세조직적 인자를 찾아내기란 쉽지 않다. 특히, 철강 재

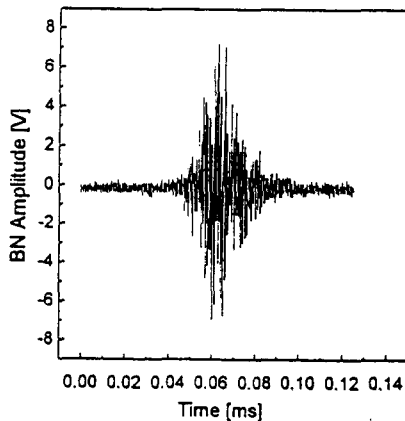
료의 경우, 여러 가지 상이 공존하고 있고 결정방향의 불연속 지점인 결정립계 및 합금원소에 의한 석출물 등이 그 크기와 분포를 달리하여, 재료의 특성 변화에 결정적인 역할을 한다. 합금의 성분이 일정하다고 하더라도 열처리 등의 제조공정은 재료의 미세조직적 그리고 기계적 특성에 영향을 미친다. 한편, 원자로 압력용기강은 중성자 조사에 의하여 미세조직이 변하고 기계적특성이 크게 저하하는 조사취화(irradiation embrittlement) 현상을 보이는데, 최근 이를 비파괴적으로 평가해야할 필요성이 크게 대두되고 있는 추세이다<sup>9)</sup>. 특히, 용접열영향부(heat-affected zone, HAZ)는, 어느 정도 균질한 미세조직과 기계적특성을 나타내는 모재와는 달리, 용접 열의 영향을 받은 좁은 영역에서 위치에 따라 미세조직 특성이 크게 변화하며 따라서 기계적 성능도 큰 차이를 보이므로, 이들을 해석 및 평가하는데 많은

어려움이 있다<sup>10)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 원자로압력용기강을 대상으로 용접열영향부내의 국소영역별 열사이클 재현시험편을 제작하여 미세조직관찰, 기계적시험 및 BN 측정을 수행하였으며, 이로부터 재료의 미세조직 및 기계적특성과 BN의 관계를 고찰하고자 시도하였다.



(a)



(b)

Fig. 1 Hysteresis loop for magnetic material showing magnetic discontinuities that produce BN (a) and typical BN signal (b)

## 2. 실험방법

### 2.1. 모재 및 용접조건

본 연구에 사용된 재료는 ASTM A 508 Gr. 3 원

자로 압력용기용강으로<sup>11)</sup> 모재의 화학성분은 Table 1과 같다. Mn-Mo-Ni계 저합금강이며 tempered bainite 기지조직을 갖는다. 따라서, 주로 탄화물과 matrix 인 bainitic ferrite lath에 의해 미세조직 특성이 결정된다. 이러한 모재는 원자로압력용기 제조 공정상 용접과정을 거치게 되는데, 실제 구조물의 용접조건은 Table 2와 같다. NG-SAW(narrow-gap submerged arc welding)에 의해 220mm 이상의 두께를 자동으로 130 pass 이상 다층(multiple pass) 용접하였으며, 용접후 열처리(post weld heat treatment)가 실시되었다.

Table 1 Chemical composition of ASTM A 508 Gr. 3 steel

Elements	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
wt, %	0.19	0.08	1.35	0.006	0.002	0.82	0.17	0.51

Table 2 Welding condition for thick-section of reactor pressure vessel

Process	Wire size (mm)	Ampere	Voltage	Travel speed (cm/min)	Preheat temp min.(°C)	Interpass temp. max. (°C)	PWHT** (°C)/hrs
SAW*	4.0	500-600	28-32	30-40	121	200	615±20/40

\* Submerged Arc Welding

\*\* Post Weld Heat Treatment

### 2.2. 재현 열영향부 시험편 제작

자동용접에 의해 다층용접된 용접열영향부는 일정한 크기의 단위 열영향부(unit HAZ)가 반복되는 것으로 볼 수 있다. 단위 열영향부내에서의 온도분포를 해석하면, 다층 용접조건에 따른 미세조직의 분포를 정성적으로 예측할 수 있다<sup>12)</sup>. 원자로압력용기강의 용접부를 단위화하여 내부에서의 온도분포에 따라 Fig. 2와 같이 대표적인 일곱가지 미세조직 영역으로 구분하고, 재료물성과 용접조건에 의해 각 영역에서의 열 cycle 을 계산을 하였다. 이러한 열 cycle 에 의하여 승온속도, 유지시간 및 냉각속도가 결정되었으며, 이들 일곱가지 각 위치별 열영향부 재현조건이 Table 3에 정리되어 있다. 용접 열 cycle 의 재현은 Gleeble-1500 장치를 이용하였다.

Table 3 Thermal cycle simulation conditions for various HAZ positions

Position*	Typical HAZ Region**	N <sup>th</sup> pass			Inter-pass temp. (°C)	(N+1) <sup>th</sup> pass		
		Heating rate (°C/sec)	Holding temp.(°C) time(sec)	Cooling rate(°C/sec), t <sub>8/5</sub> (sec)***		Heating rate (°C/sec)	Holding temp.(°C), time(sec)	Cooling rate(°C/sec), t <sub>8/5</sub> (sec)***
S1	U CG	256	1350, 10	13, 23	200	256	1350, 10	13, 23
S2	SCR CG	256	1350, 10	13, 23	200	100	900, 10	12, 25
S3	IR CG	256	1350, 10	13, 23	200	56	700, 10	8, -
S4	SCR FG	100	900, 10	12, 25	200	100	900, 10	12, 25
S5	IR FG	100	900, 10	12, 25	200	56	700, 10	8, -
S6	IR	56	700, 10	8, -	200	56	700, 10	8, -
S7	SR	45	650, 10	7, -	200	45	650, 10	7, 0

\* Refer to Fig. 2.  
 \*\* U CG - unaltered coarse-grained, SCR CG - supercritically reheated coarse-grained, IR CG - intercritically reheated coarse-grained, SCR FG - supercritically reheated fine-grained, IR FG - intercritically reheated fine-grained, IR - intercritically reheated, SR - subcritically reheated.  
 \*\*\* t<sub>8/5</sub> : cooling time between 800°C and 500°C.

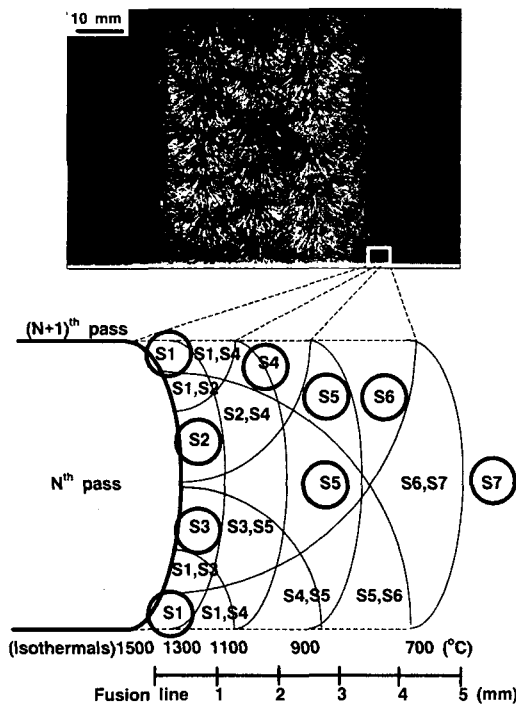


Fig. 2 Macrostructure of the actual weld HAZ and typical HAZ regions indicating simulation conditions

2.3. BN 측정, 미세조직 및 기계적 시험

이와같이 준비된 시험편을 이용하여 각 조건별로 BN 측정, 미세조직 관찰, 기계적 특성 시험 등이 수

행되었다. BN은, 함수발생기로 5 Hz의 정현파를 발생시킨 후 이를 전력증폭기로 증폭하고, 탐지코일에 유도된 신호를 band pass filter를 사용하여 25-30 kHz 사이에서 선택한 후 low noise pre-amplifier를 사용하여 56 dB 로 증폭하였다<sup>13)</sup>. 시험편의 크기는 1×2×10(mm)로 하였다. 이 과정을 도식적으로 Fig. 3과 같이 정리하였다. 미세조직은 광학현미경과 전자현미경을 이용하여 관찰되었으며, 기지조직의 상과 결정립 크기, 석출물 크기 등이 측정되었다. 기계적특성은 표준 샤프충격시험에 의해 노치인성이, 자동압입시험<sup>14)</sup>에 의해 경도 및 인장강도가 측정되었다. 한편, 상대적인 잔류응력의 변화는 XRD(X-ray diffractometer)에 의해 측정되었고, 측정조건은 40 kV/120 mA, 2θ=113~119도였다.

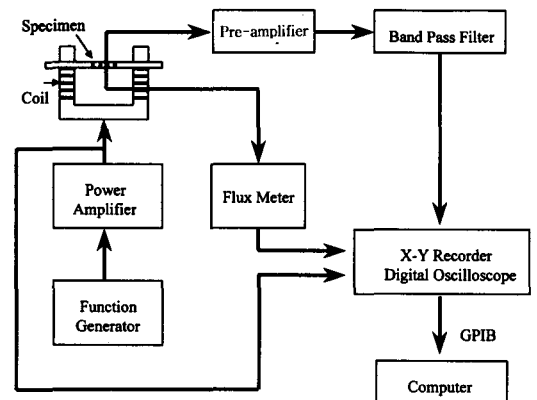


Fig. 3 Block diagram of Barkhausen noise measurement system

Table 4 Microstructural alteration in the unit HAZ regions

Base Metal	Heat Affected Zone						
	1st Thermal Cycle			2nd Thermal Cycle			PWHT (Final)
	T <sub>pl</sub> (°C)	Microstructure	Subzone Id.	T <sub>pl2</sub> (°C)	Microstructure	Subzone Id.	
TB	1350	CGM	CGHAZ	1350	CGM	UCGHAZ	CGTM
				900	(M)+B	SCRCGHAZ	(TM)+TB
				700	(M)+B+F	IRCGHAZ	(TM)+TB+F
	900	FGB	SCFGHAZ	900	FGB	SCRFGHAZ	FGTB
				700	FGTB+(B+F)	IRFGHAZ	FGTB+(TB+F)
	700	TB+(F+B)	ICHAZ	700	TB+(F+B)+C	IRHAZ	TB+(F)+CC
650	TB+C	SHAZ	650	TB+CC	SRHAZ	TB+CC	

F : ferrite B : bainite TB : tempered bainite FGB : fine grain bainite FGTB : fine grain tempered bainite M : martensite TM : tempered martensite CGM : coarse grain martensite CGTM : coarse grain tempered martensite C : carbides CC : coarse carbides	CGHAZ : coarse grained HAZ UCGHAZ : unaltered coarse grained HAZ SCRCGHAZ : supercritically reheated CGHAZ IRCGHAZ : intercritically reheated CGHAZ SCRFGHAZ : supercritically reheated FGHAZ IRFGHAZ : intercritically reheated FGHAZ IRHAZ : intercritically reheated HAZ SRHAZ : subcritically reheated HAZ SCFGHAZ : supercritical FGHAZ ICHAZ : intercritical HAZ SHAZ : subcritical HAZ
---	---

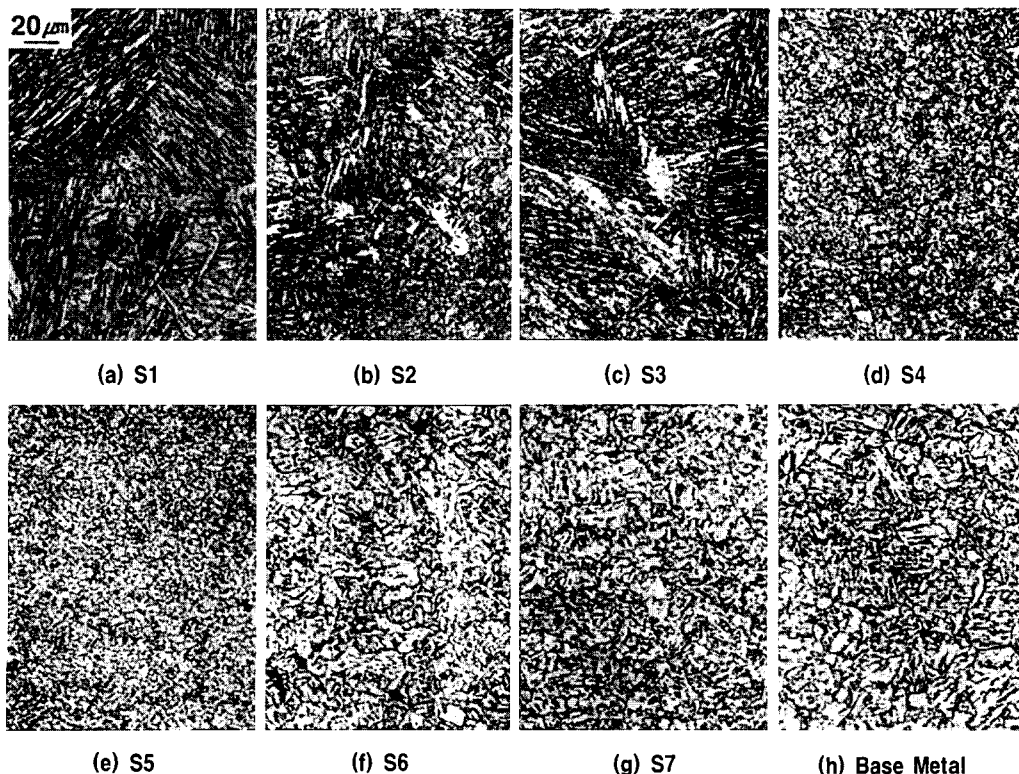


Fig. 4 Microstructures in various HAZ regions observed through OM showing CG HAZs ((a), (b) and (c)), FG HAZs ((d) and (e)), IR HAZ (f) and SR HAZ (g) All of the HAZs were subjected to PWHT

### 3. 실험결과

다층용접을 재현한 단위열영향부내의 세부 영역들은 각각 열영향을 미치는 최고온도에 따라 미세조직이 크게 변화였다. Table 4에 정리된 바와 같이, 반복된 열 cycle과 용접후열처리를 받은 열영향부의 미세조직은 각 위치별로 서로 다른 변화의 과정을 거쳐 tempered bainite가 주를 이루던 모재가 최종적으로 용접용융선(fusion line, FL)으로부터 모재측으로 coarse-grained tempered martensite (S1, S2, S3 시험편), fine-grained tempered bainite (S4, S5 시험편) 및 overtempered bainite (S6, S7 시험편)의 특징을 보이는 경향을 나타냈다. 모재와 일곱가지 대표영역에 해당하는 광학현미경 미세조직 사진이 Fig. 4에 나타나 있다. S1, S2 및 S3 시험편은 tempered martensite 조직의 특징을 보이는 반면, S4부터 S7까지는 tempered bainite 조직이 주를 이룸을 볼 수 있다. 여기서 S4와 S5는 열 cycle 이력으로 볼 때 재변태된 tempered bainite로 미세한 조직을 보이지만, S6와 S7은 모재와 유사한 미세조직을 보이는데, 이는 열 cycle 이력으로 볼 때 변태가 일어나지 않고 모재의 tempered bainite에 추가 열 cycle만 가해진 상태이다. 또한, 이들 조직은 모두 용접후열처리(PWHT)를 받은 것이다.

이러한 미세조직들을 포함하는 용접열영향부는, 각 위치별로 서로 다른 기계적 특성을 나타냈다. 인성(toughness)의 경우, Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 용접후 열처리 전후에 큰 폭의 변화를 겪는데, 특히 결정립조대화 영역(CG HAZ)인 S1, S2, S3와 결정립미세화 영역(FG HAZ)인 S4, S5의 경우 용접후열처리에 의한 인성 회복이 뚜렷이 나타났다. 이는 각각 martensite와 bainite가 tempered martensite와 tempered bainite로 변한 것과 관계가 있다. 실제 구조물의 상태인 용접후열처리 후를 비교했을 때는, S6와 S7이 모재에 비해 낮은 인성을 나타냈다. 인장강도와 경도의 경우도, 각각 Fig. 6와 Fig. 7에 나타나 있듯이, S6와 S7이 최저임을 볼 수 있다. 이는 미세조직의 변화와 직접적인 관계가 있는데, S6과 S7의 경우 광학현미경상으로는 모재와 유사한 tempered bainite 조직형태를 보였으나, 전자현미경 관찰에 의하면, Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 탄화물(주로 cementite 석출물)의 조대화 경향을 뚜렷이 볼 수 있었다. 이 영역에서의 인성과 강도 및 경도의

저하에서 볼 수 있듯이, 일종의 overtempering 효과에 의한 softening 현상이 나타난 것으로 볼 수 있다. 석출물의 크기를 측정된 결과 Fig. 9와 같이 S6, S7 영역에서 용접후열처리에 의해 그 크기가 증가한 경향을 볼 수 있었다.

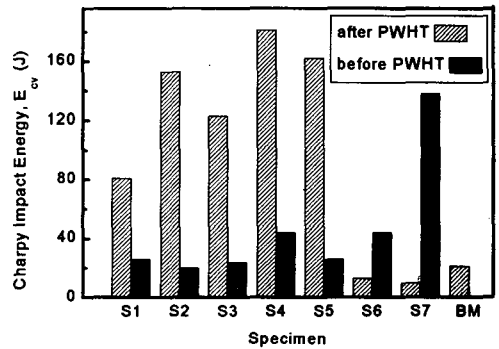


Fig. 5 Notch toughness variations in various HAZ regions (S1~S7) and base metal

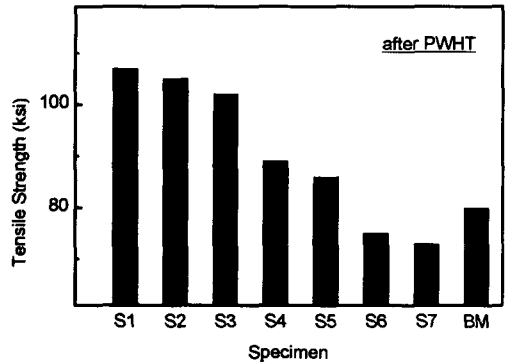


Fig. 6 Tensile strength variations in various HAZ regions (S1~S7) and base metal

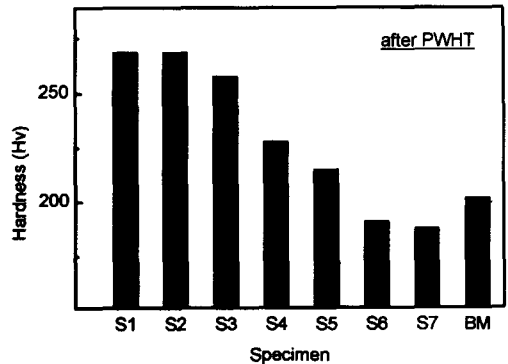


Fig. 7 Hardness variations in various HAZ regions (S1~S7) and base metal

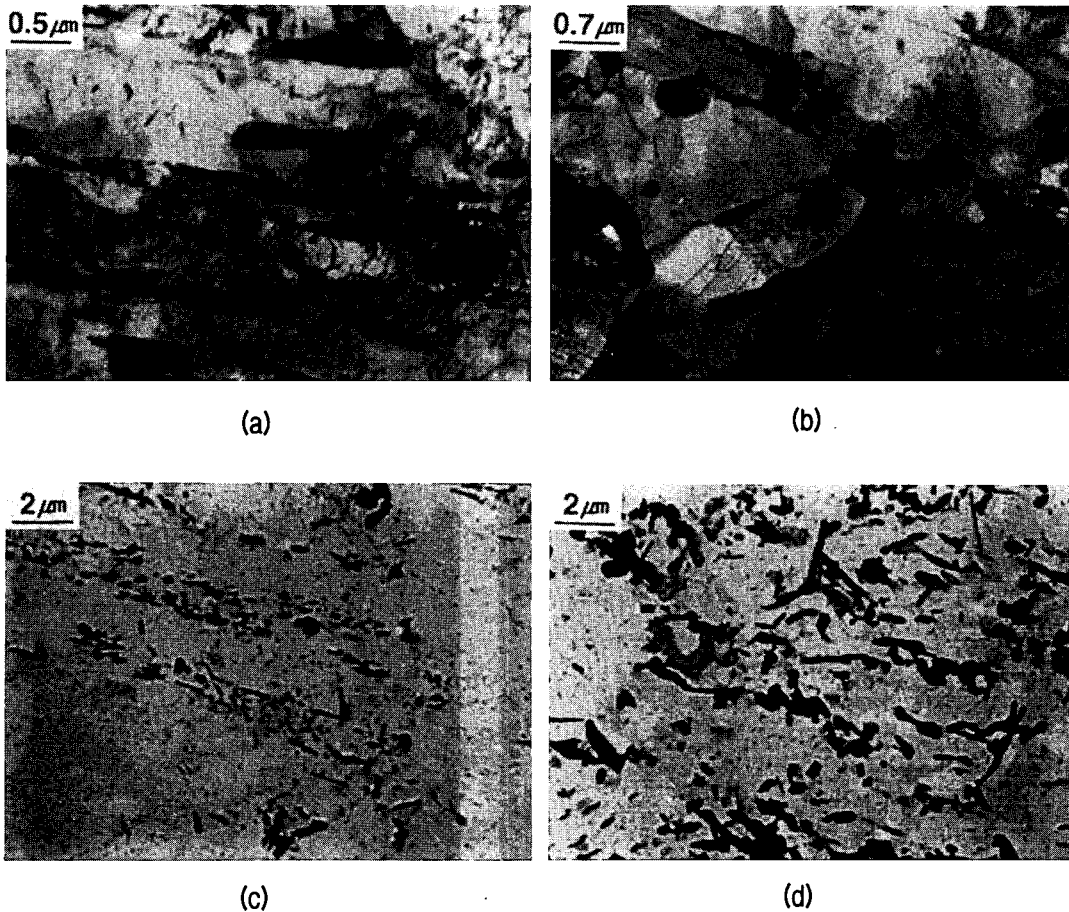


Fig. 8 Thin foil ((a) and (b)) and extraction replica ((c) and (d)) TEM microstructures of base metal ((a) and (c)) and reheated HAZ region ((b) and (d)) showing carbides coarsened by repeated thermal cycle effects at around  $A_1$  temperature

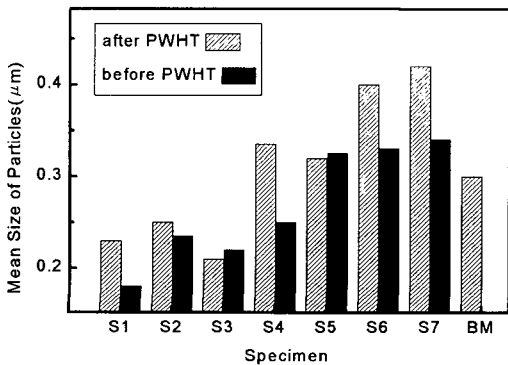


Fig. 9 Particle size variations in various HAZ regions (S1~S7) and base metal

한편, 미세조직에 있어서 석출물과 함께 결정립도 매우 중요한 인자로 작용한다. 따라서, 각 시험편 조건별 결정립도를 측정된 결과, Fig. 10과 같이 나타났다. 결정립도의 측정은 충분히 tempered된 상태에서는 매우 어려우므로, 용접후열처리를 실시하기 전의 시험편을 대상으로 하였다. 단층용접시 martensite를 이루며 결정립조대화 영역을 나타내는 S1, S2, S3 가운데, S1과 S3가 매우 크게 결정립을 형성한 것은 두 번째 열 cycle의 최고온도가 각각 1350℃와 700℃로 조대화된 결정립을 그대로 유지했거나 약간의 tempering 효과만을 받았기 때문이다. 반면, S2는 두 번 열 cycle을 900℃에서 받았으므로 결정립이

미세해졌을 가능성이 있다. S4~S7의 경우는, 모두 bainite 조직으로 S4와 S5는 미세하고, S6와 S7은 상대적으로 조대한 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 미세조직과 기계적 특성의 변화와 일관성이 있다.

상의 변태나 석출물, 그리고 결정립 크기의 변화와는 달리, 용접후에는 잔류응력의 변화가 발생하는데, 원자간 거리의 규모로 나타나므로 직접 관찰하기는 매우 어렵고 그 대신 직간접적인 측정은 가능하다. 여기서는, 실제 용접부를 대상으로 하지 않아 실제의 구속력은 나타나지 않지만, 조직의 변태와 열영향 최고온도가 서로 상이 하므로 재현시험편을 대상으로 용접 열 cycle 후 잔류응력의 변화를 XRD를 이용하여 측정하였다. 그 결과가 Fig. 11에 나타나 있는데, 용접후열처리하기 전에는 모재측 열영향부를 나타내는 S5~S7 보다는 용접용융선측에 가까운 S1~S4가 월등히 잔류응력이 높았다. 그러나, 용접후열처리에 의해 비교적 평균화된 응력분포를 볼 수 있다. 실제 용접부의 경우는 인장과 압축이 공존하지만 여기서는 구조물에 의한 구속력이 제외되었으므로, 약 65MPa 정도를 기준으로 보면 용접후열처리의 효과에 의해 열영향부 각 위치에서의 잔류응력의 편차가 완화된 것을 볼 수 있다.

이러한 미세조직과 기계적특성 및 잔류응력을 나타내는 용접열영향부 각 위치에서의 BN 특성은 Fig. 12와 같이 나타났다. 측정기로부터 검출된 BN의 크기를 나타내기 위해 BNA(Barkhausen noise amplitude)를 사용했으며, 단위는 volt이다. 비교를 위하여, hysteresis loop 상에서의 자기적 특성 변화를 나타내는 보자력(coercivity), 잔류자화(remanence), 최대자기유도(maximum induction) 등을 측정한 결과, 이들은 거의 변화가 없었는데, 이에 비하면 BN의 변화는 매우 큰 것이었다. 특히 용접후열처리에 의해 S4, S5 및 S6 시험편은 BNA의 크기가 크게 증가하였으며, S1~S3와 S7 그리고 모재는 변화의 폭이 매우 작았다. S1~S3는 용접후열처리에 의해 martensite에서 tempered martensite로, 그리고 S4, S5 및 S6는 bainite 기지조직으로부터 tempered bainite로 변한 것과 관련이 있는 것으로 생각되었다.

4. 고찰

용접열영향부의 특성을 양호하게 하고 성능을 향

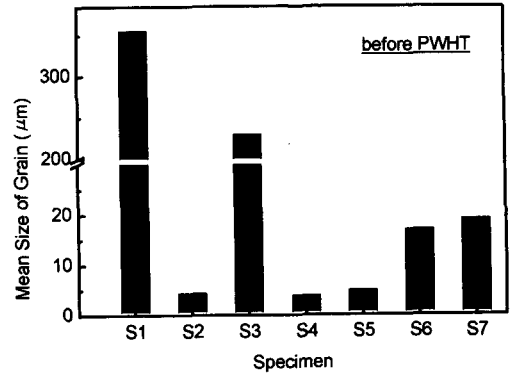


Fig. 10 Grain size variations in various HAZ regions (S1~S7)

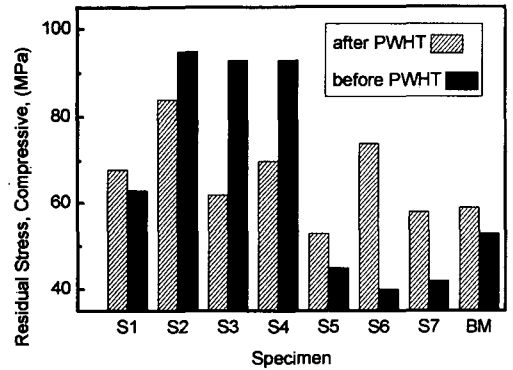


Fig. 11 Residual stress variations in various HAZ regions (S1~S7) and base metal

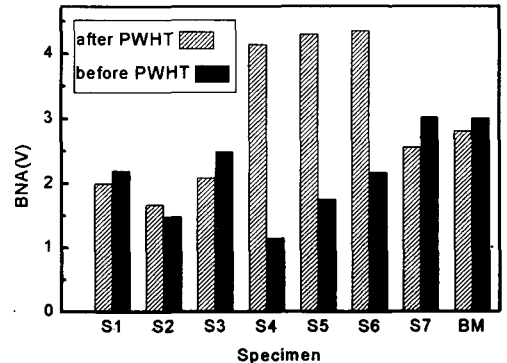


Fig. 12 Barkhausen noise amplitude(BNA) variations in various HAZ regions (S1~S7) and base metal

상시킴을 위해 실시되는 용접후열처리(PWHT)는, 그것의 가장 중요한 목적중의 하나가 잔류응력의 완화에 있지만, 원자로압력용기강과 같은 철강재의 경우 용접후열처리 온도인 615°C에서는 탄소의 이동이 충분히 가능하다<sup>15)</sup>. 따라서, 변태가 일어나기 시작하는 A<sub>1</sub> 온도 이하이므로 상의 변태는 일어나지 않지만, 미세조직의 변화는 가능하다. 용접후열처리 전과 후의 BN 특성은 Fig. 13과 같다. 이는 열영향부를 대표하는 일곱가지 미세조직에 대해 평균한 값으로, 용접후열처리 후에 BNA가 증가했음을 볼 수 있다. 이러한 BNA의 증가에 기여한 것은 잔류응력의 변화와 미세조직의 변화에 기인한다고 볼 수 있다. 또한, 전위밀도의 감소에 의한 자벽운동의 평균자유행로가 증가한 것파도 관계한다<sup>16)</sup>. 미세조직은 그 영향인자가 매우 복잡하고도 다양하지만, 가장 큰 기여를 하는 것으로 상 그 자체와 석출물 및 결정립 크기 등을 들 수 있다. 특히, 본 연구의 대상인 원자로압력용기강은 그 모재가 tempered bainite로 되어 있어, 주로 탄화물과 결정입도에 의해 기계적 성질이 특징지워진다. 우선, 상의 변화에 의한 BN의 특성은 Fig. 14에서 볼 수 있듯이, tempered martensite에 비해 tempered bainite에서 두 배에 가까운 BNA가 검출되었다. 이는 각 상에 있어서의 탄화물의 크기 변화와 관련이 깊다. 따라서, 탄화물의 크기와 BNA의 관계를 Fig. 15에 나타내었다. 탄화물 크기의 증가에 따라 BNA의 증가 경향을 볼 수 있다.

여기서, BN은 자구벽의 운동이 비자성 개재물에 의하여 방해받을 때 감소하며, 일반적으로 개재물의 크기가 자구벽의 크기와 비슷한 경우 가장 효과적으로 자구벽의 운동을 방해할 수 있다고 알려져 있다. 이는 개재물이 spike 자구를 형성시켜 자구벽의 정자기 에너지를 감소시키기 때문이다<sup>17)</sup>. 자구벽의 크기는 철의 경우 50-100nm 정도인 것으로 알려져 있다. 따라서, 측정된 탄화물의 크기는 0.1 μm 이상으로 그 크기가 감소할수록 자구벽의 이동이 방해받을 수 있고, 따라서 BN은 감소 경향을 보였다.

또한, 결정립의 크기도 BN 특성에 영향을 미치는데, Fig. 16에서 볼 수 있듯이, 결정립의 크기가 증가함에 따라 BNA도 증가 경향을 보였다. 이는 동일한 bainite 미세조직을 갖는 경우에 해당되며, 만약 상이 다르게 되면 그에 의한 영향도 고려되어야 한다. 결정립의 크기와 BN 사이의 상관관계는 여러 연구자들에 의하여 보고된 바 있다<sup>18)</sup>. 일반적으로

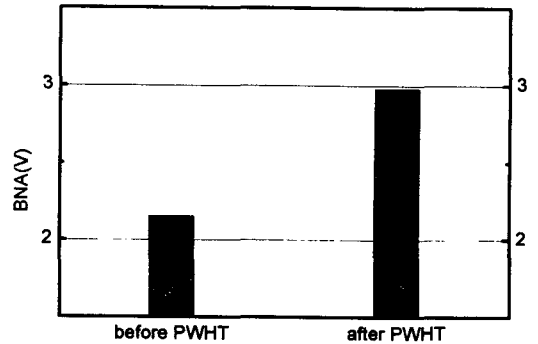


Fig. 13 Comparison of Barkhausen noise amplitude (BNA) between before and after postweld heat treatment

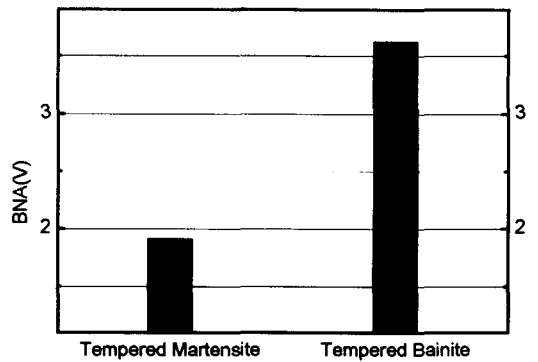


Fig. 14 Comparison of Barkhausen noise amplitude (BNA) between tempered martensite and tempered bainite microstructure

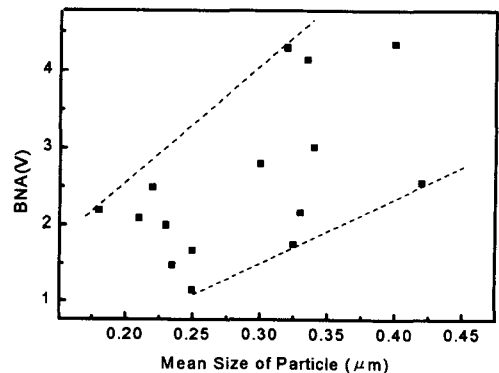


Fig. 15 Trends of Barkhausen noise amplitude(BNA) with reference to particle size



결정립은 수많은 자구로 나누어지며 자구의 수는 입도의 크기에 비례하는 것으로 알려져 있다. 한편, 결정립의 증가에 의한 BNA의 증가는, 석출물에 의한 BNA 증가량보다 그 정도가 작게 나타났다. 즉, 이 두 경우, Fig. 15와 Fig. 16에서, 개략적인 기울기는 각각 12와 0.08로 나타났으며, 석출물에 의한 효과가 결정립계에 의한 효과보다 월등히 큼을 알 수 있다.

기계적 특성의 변화는 결국 미세조직과 불가분의 관계이며, 특히 BN과 관련한 그 영향인자는 미세조직에 비해 더욱 복잡한 양상을 띤다. Fig. 17은 인성과 BN의 관계를 나타낸 것으로 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 인성이 상의 종류와 결정립 및 석출물 크기 등과 밀접한 관련이 있으며, 나아가 시험온도와 파괴 mode의 변화에도 관련이 있는 점으로 미루어, 이와 관련한 별도의 시험 및 해석 방법이 연구되어야 할 것으로 생각된다. 인장강도의 경우는, Fig. 18에서 볼 수 있듯이, 동일한 bainite상에서 강도의 증가시 BNA의 감소 경향을 보였다. 이는 인장강도가 재료의 미세조직적 상태, 특히 석출물과 결정립의 크기에 영향을 받는 사실과 관련된다고 볼 수 있다. 즉, 일반적으로 동일 matrix에서 인장강도에 영향을 미치는 입계 크기보다 큰 석출이 많을수록, 또한, 결정립 크기가 클수록 인장강도가 낮아지는 경향과 일치한다. 경도의 경우도 강도와 유사한 경향을 나타냈는데, 이는 Fig. 19에 나타나 있다. 경도와 강도의 저하는 일종의 softening으로 간주되며<sup>19)</sup>, 이때 BN은 증가하고, 넓은 의미에서 재료의 강화기구에 영향을 미치는 인자가 적을수록 BN은 어느정도 증가한다는 물리적인 의미를 갖는 것으로 생각된다.

잔류응력의 경우도, 잔류응력이 감소하면 BN은 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 20은 용접후열처리 전후의 잔류응력을 전체의 평균치(65.75 MPa)로 normalization한 값과 BNA의 경향을 비교한 것이다. 여기서, normalization 방법을 이용한 것은, 실제의 구조물에서 생기는 응력의 구속 효과가 재현시험편에서는 무시되었기 때문으로, 여기서는 단지 상변태에 의한 상대적인 값을 비교했기 때문이다. 결과로 볼 때, 용접후열처리 후에 응력의 평균화 경향이 뚜렷하였으며, 잔류응력의 증가에 따라, 미세해지만, BNA의 감소 경향을 보였다.

이와같이, 재료의 미세조직은 복잡한 여러 가지 영향인자로 구성되지만, 대표적인 상의 종류나 결정립의 크기, 석출물의 크기 등에 의해 BN의 특성이

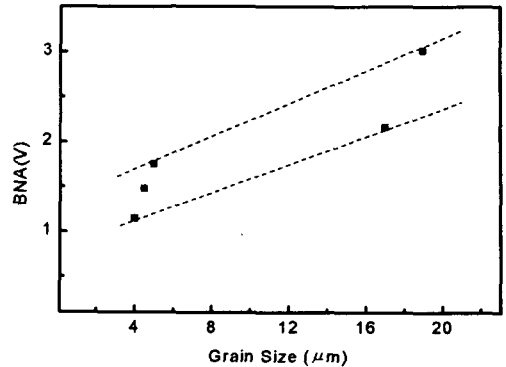


Fig. 16 Trends of Barkhausen noise amplitude(BNA) with reference to grain size

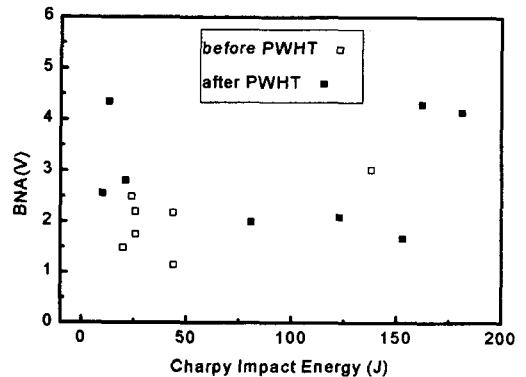


Fig. 17 Trends of Barkhausen noise amplitude(BNA) with reference to notch toughness

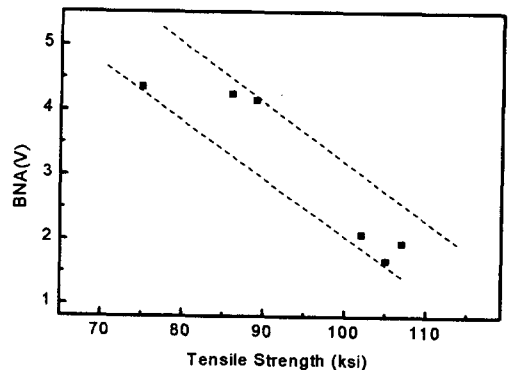


Fig. 18 Trends of Barkhausen noise amplitude(BNA) with reference to tensile strength

변하는 것을 알 수 있었다. 또한, 잔류응력도 BN의 발생과 무관하지 않으며, 기계적특성의 변화도 미세

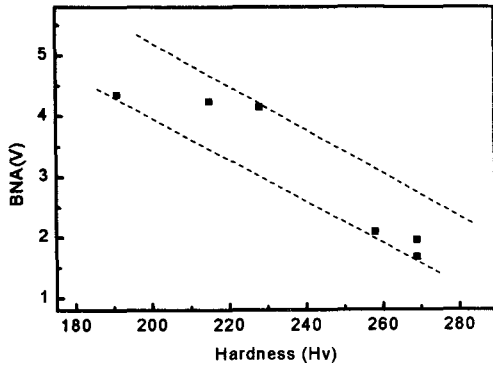


Fig. 19 Trends of Barkhausen noise amplitude(BNA) with reference to hardness

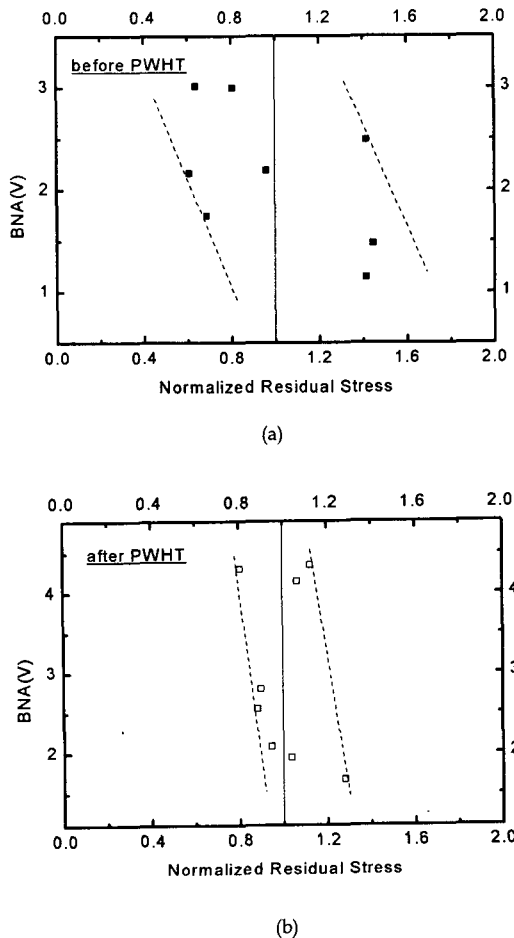


Fig. 20 Trends of Barkhausen noise amplitude(BNA) with reference to residual stress

조직과 연관하여 BN의 해석에 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

원자로압력용기강을 대상으로 용접열영향부의 다양한 미세조직적 변화를 이용하여 재현열 cycle 시험편을 제작, 각종 미세조직적 인자가 Barkhausen noise(BN) 특성에 미치는 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용접후열처리에 의해 BN은 증가하는 경향을 보였다. 특히, tempered martensite 보다는 tempered bainite의 경우 BN의 발생이 컸으며, 이는 탄화물의 크기가 증가한 사실과 관련이 있다.
2. 탄화물 크기의 증가에 따라 BN은 증가하는 경향을 나타냈으며, 이는 자구벽의 크기와 관련한 기존의 이론과 일치한 실험 결과였다.
3. 결정립의 크기가 증가할수록 BN은 증가하는 경향을 나타냈다. 여기서, 결정립에 의한 BN 증가량보다는 석출물에 의한 증가량이 훨씬 크게 나타났으며(약 12:0.08), 따라서, BN에 미치는 영향으로는 결정립보다 석출물이 훨씬 지배적임을 알 수 있었다.
4. 인장강도와 경도의 증가는 BN의 감소와 관계되며, 역으로 강도와 경도의 감소는, 미세조직적으로 탄화물의 조대화와 함께 softening 현상과 관련되므로, BN의 증가 경향과 일치하였다.
5. 잔류응력은 용접후열처리에 의해 평균화되는 경향을 나타냈으며, 잔류응력의 증가에 따라 미세한 정도의 BN 감소 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업중 원자로 압력경계 재료과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) H. Barkhausen, Physik. Z. 20, 401 (1919)
- 2) C. Kittel, et al., Solid State Physics, Vol. 3, Academic Press, (1956)
- 3) S. Chikazumi, Physics of Magnetism, John

- Wiley & Sons, (1964)
- 4) R. M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE Press, (1993)
  - 5) H. J. William and W. Sockey, Phy. Rev. 75, (1949) 178
  - 6) C. G. Kim, Magneto-Acoustic Emission and Barkhausen Noise by Magnetic Domain Dynamics in 3% SiFe, Ph. D. Thesis, KAIST, (1988)
  - 7) J. C. McClur and K. Schroder, CRC Critical Reviews in Solid State Science 6, (1976) 45
  - 8) D. Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Champman & Hall, (1991)
  - 9) D. G. Park, et al., J. Mat. Sci. 32 (1997), 6141
  - 10) J. H. Kim, et al., Proc. Korean Nuclear Society Spring Meeting, Vol. II, Kwangju, Korea, May (1997), pp. 17-22
  - 11) ASTM A508/A508M-95, (1995)
  - 12) J. H. Kim and E. P. Yoon, J. Kor. Ins. Met. & Mater., Vol. 36, No. 8(1998), pp. 1329-1337
  - 13) D. G. Park, Ph. D. Thesis, KAIST, (1998)
  - 14) F. M. Haggag and W. R. Corwin, ASTM STP 1204, (1993), 27
  - 15) K. H. Lee, J. H. Kim and E. P. Yoon, J. Kor. Weld. Soc., Vol 7, No. 4(1989), pp. 30-37
  - 16) Baldev Raj, V. Moorthy, and S. Vaidyanathan, Mat. Eval. (1997) 81
  - 17) B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley Pub. (1972)
  - 18) F. Ichikawa, M. Okuno, M. Okamoto and F. Tanaka, Mat. Sci. Forum, Vol. 210-213 (1996), pp. 195-202
  - 19) J. H. Kim and E. P. Yoon, J. Nucl. Mater., 254 (1998)

## Effects of Microstructural States on Magnetic Barkhausen Noise Behavior in the Weld Heat-Affected Zone of Reactor Pressure Vessel Steel

Joo-Hag Kim\*, Eui-Pak Yoon\*\*, Jong-Gul Moon\*, Duck-Gun Park\* and Jun-Hwa Hong\*

\* Nuclear Materials Technology Development Team,  
Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon 305-600

\*\* Department of Metallurgical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791

**Abstract** Recent study has demonstrated that some magnetic properties are sensitive to the microstructural state of material. The ASTM A 508 Gr. 3 reactor pressure vessel steel has various microstructural changes including martensitic and bainitic phases, and various sizes of grain and precipitates in the weld heat-affected zone (HAZ). To correlate the microstructural state with Barkhausen noise (BN), specimens were prepared through simulating various weld thermal cycles using a thermal simulator. The conventional magnetic properties, i.e. coercive force, remanence and maximum induction, did not change significantly, whereas the BN amplitude and energy during a magnetization cycle changed markedly with microstructural state. The BN increased with increasing grain and carbide sizes, and the tempered bainite structure showed higher BN parameter than tempered martensite.