

## Barkhausen Noise를 이용한 원자로 압력용기강 용접열영향부(HAZ)의 비파괴적 평가

박덕근, 김주학, 문종걸, 옥치일, 홍준화

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

원자로 압력용기 용접열영향부의 세부영역별 열 cycle 재현(simulation) 시험편을 제작하여 기계적 특성시험, 미세조직시험 및 magnetic Barkhausen noise (BN) 측정을 수행하였다. 각 영역에서 보자력(coercivity)은 크게 변하지 않았으나, Barkhausen noise (BN) 는 현격한 차이를 볼 수 있었다. 용접열영향부 각 위치에 대한 BN 는 미세조직과 기계적특성의 변화와 어느정도 특징적 변화를 보였으나, 미세조직 인자별로 정량적인 관계를 찾기 위하여는 더욱 더 많은 연구가 필요한 것으로 보였다. 이는 BN 의 변화에 미치는 영향인자가 미세조직적으로 매우 복잡한 관계를 갖기 때문으로 생각되었다.

### 1. 서 론

최근 자구의 불연속적인 운동에 의하여 발생하는 Barkhausen noise(BN)가 재료의 상태(상(phase), 결정립의 크기, 석출물 등)에 따라 변화하는 것을 이용하여 재료의 특성을 비파괴적으로 평가하려는 연구가 진행되고 있다 [1]. 한편, 원자로재료는 중성자 조사에 의해 미세조직이 변하고 기계적특성이 크게 저하하여 조사취화되는 경향을 보이는데, 이를 비파괴적으로 평가해야할 필요성이 크게 대두되고 있다 [2]. 특히, 용접열영향부는 위치에 따라 재료의 특성이 급격히 변화하며, 이를 해석 및 평가하는데 많은 어려움이 있다 [3]. 따라서, 본 연구에서는 원자로압력용기강을 대상으로 용접열영향부내의 세부영역별 열 cycle 재현(simulation) 시험편을 제작하여 미세조직검사, 기계적 특성시험 및 BN 검사를 수행하였으며, 이로부터 재료의 미세조직 및 기계적특성과 BN의 관계를 고찰하고자 시도하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 현재 상용되는 ASTM A 508 Gr. 3 원자로압력용기용 저합금 단조강으로 모재의 화학성분과 용접조건은 표 1 에 나타나 있다. 용접 열영향부를 재현하기 위하여,

이론으로부터 도출된 열 cycle 과 최고온도(peak temperature,  $T_p$ )분포 및 냉각시간 ( $\Delta t_{800 \sim 500}$  : 800℃에서 500℃ 사이의 냉각시간)을 근거로 표 2와 같이 단위 열영향부(unit HAZ)를 설정하였고, 단위 열영향부내의 세분화된 영역들을 각각 재현하여 시험편을 준비하였다. 사파충격인성과 경도 및 인장시험을 수행하였고, 광학 및 전자현미경 관찰을 병행하였다. 자기적 성질을 측정하기 위하여 함수발생기로 5 Hz 의 정현파를 발생시킨 후 이를 전력증폭기로 증폭하였으며, BN 는 탐지코일에 유도된 신호를 band pass filter를 사용하여 25-30 kHz 사이에서 선택한 후 low noise pre-amplifier를 사용하여 56 dB 로 증폭하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

다층용접(multipass weld)을 재현한 단위열영향부내의 세부 영역들은 각각 열영향을 미치는 최고온도에 따라 미세조직과 기계적특성이 크게 변하였다. 반복된 열 cycle 과 용접후열처리(post weld heat treatment, 후열처리)를 받은 열영향부의 미세조직은 용접용융선(fusion line, FL)으로부터 모재측으로 coarse-grained tempered martensite (CG HAZ), fine-grained tempered bainite (FG HAZ) 및 overtempered bainite (IR and SR HAZ) 의 특징을 보이는 경향을 나타냈다. 이에 따라 대부분의 영역들은 모재에 비해 우수한 강도와 인성을 나타내었으나, 모재측에 인접한 영역에서는 기지조직과 탄화물의 조대화에 의한 연화(softening)현상을 보였다. 자기적특성 측정결과, 각 영역에서 보자력(coercivity)은 크게 변하지 않았으나, Barkhausen noise (BN) 는 현격한 차이를 볼 수 있었다.

그림 1 은 SA508-3 강의 실제 용접부에서의 약 4.5 mm 정도되는 HAZ 부위의 미세조직과 모사(simulation)조건을 나타낸 것으로 용접 용융선 으로부터 모재측으로 채취한 것이다. 시편번호 S1-S7 에 해당하는 열처리 조건은 표 2에 표시된 것과 같다. 그림 1 의 HAZ 각 부위에 해당하는 광학현미경 미세조직 사진은 그림 2 에 나타나 있다. 시편번호 S1 - S3 은 martensite 조직이 우세하며 S4 - S7 은 bainite 조직이 주가됨을 알 수 있다. 이들 조직은 각각 후열처리 후에 tempered martensite 와 tempered bainite 조직으로 변화한다.

그림 3 은 용접 열영향부의 재현 조건에 따라서 Charpy 충격에너지와 BN 의 변화를 나타낸 것이다. HAZ 부위로부터 시편의 위치에 따라 인성과 BN 이 현저한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 인성은 일반적으로 후열처리에 의하여 증가 되었으며, 7번 시편을 제외 하고는 일반적으로 martensite 조직에서는 후열처리 후에 BN 이 감소 하였으며, bainite 조직에서는 후열처리 후에 BN 이 증가하였다는 것을 알 수 있다. 또한 martensite 시편은 후열처리에 의하여 tempered martensite 조직으로 변화시 BN 의 변화가 작은반면 bainite 조직에서는 후열처리에 의하여 tempered bainite 조직으로 변할 때 큰 BN 의 변화를 보였다. bainite 영역에서 as-received 시편의 경우 충격에너지가 증가할 수록 BN 도 증가 하였으며, 후열처리된 시편에서는 일반적으로 높은 충격에너지값과 BN 값을 보였다.

후열처리 에 의하여 인성이 증가하는 것은 기지(matrix)내의 탄화물이 조대화되며 기지가 연

화되었기 때문인 것으로 알려져 있다. 그러나 열처리가 인성에 미치는 영향은 탄화물의 크기 외에 여러 가지 요인이 있기 때문에 일반적으로 말하기 힘들다. BN 은 자구벽의 비가역적 운동에 의하여 일어나며, 주어진 조건에서의 자구벽의 수 및 평균 자유행로에 의존하며 이는 입계의 크기, 전위밀도, 제2상의 형상 및 크기분포와 같은 재료의 미세조직적 요인에 의하여 영향을 받는다. BN 은 자구벽의 운동이 비자성 개재물 (non-magnetic inclusion) 에 의하여 방해받을 때 감소한다는 것이 알려져 있다. 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 [4]. 자구벽의 크기는 철의 경우 50-100 nm 정도인 것으로 알려져 있다. 그림 4에 보인 바와 같이 martensite 영역에서는 탄화물의 크기가 작으며 bainite 영역에서는 탄화물의 크기가 크다, 또한 대개 후열처리에 의하여 탄화물의 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 martensite 조직에서 후열처리에 의하여 BN 이 감소한 것은 후열처리에 의하여 생성된 자구벽과 비슷한 정도의 크기를 가진 탄화물이 자구벽의 운동을 방해 하였기 때문인 것으로 생각된다. 또한 martensite 시편의 경우 후열처리에 의하여 BN의 변화가 작은 것은 일반적으로 martensite 조직의 경우 큰 잔류응력을 포함하고 있기 때문인 것으로 생각된다. 열처리 전 전위밀도를 감소시키며, proeutectoid ferrite 와 cementite 의 미세한 석출물로 변화함으로써 분해되는 것이 잘 알려져 있다. 후열처리에 의하여 BN 이 증가한 것은 전위밀도의 감소에 의한 자벽 운동의 평균자유행로가 증가하였고 [5], bainite 의 lath 경계가 수축하고 석출물의 수가 감소 하였기 때문인 것으로 보인다. 그림 5 는 입도의 크기와 BN 의 관계를 나타낸 것인데, bainite 영역에서는 BN 이 입도의 크기에 따라 증가 하는 것을 알 수 있다. 입도의 크기와 BN 사이의 상관관계는 여러 연구자들에 의하여 보고 되었다 [6]. 이는 일반적으로 입도는 수많은 자구로 나누어지며 자구의 수는 입도의 크기에 비례하기 때문인 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

원자로압력용기강 용접열영향부에 대한 자기적특성 측정결과, 각 영역에서 보자력(Coercivity) 은 크게 변하지 않았으나, Barkhausen noise (BN) 는 현격한 차이를 볼 수 있었다. BN 는 미세조직과 기계적특성의 변화에 따라 어느정도 특징적으로 변화했으나, 단순히 서로의 관계를 찾기는 다소 무리가 있는 것으로 판단되었으며, 그 이유는 BN 의 변화에 미치는 영향인자가 미세조직적으로 매우 복잡한 관계를 갖기 때문으로 생각되었다. BN 는 자구벽의 운동으로 설명되며, 결정립의 크기, 석출물의 크기, 자기이방성 에너지 등의 변화에 의하여 많은 영향을 받으므로 이들 각각의 미세조직과 BN 의 거동을 정량적으로 비교 분석하기 위해서는 별도로 각각의 미세조직의 특징을 고려한 재현 기초실험이 필요한 것으로 생각되었다.

#### 감사의글

본 연구는 과기부에서 시행한 원자력 중장기사업 원자로압력경계재료 과제 의 일환으로 수행된

것으로 연구비 지원에 감사 드린다.

참고 문헌

1. G. Dobmann, N. Meyendorf, and E. Schneider, Nucl. Eng. Design, 171 (1977) p95.
2. Duck-Gun Park, Jun-Hwa Hong, In-Sup Kim, and H.C. Kim, J. Mat. Sci. 32 (1997) 6141
3. 김주학 등, 한국원자력학회 '97 춘계학술대회 논문집 (1997) p. 17
4. B.D. Cullity, Introduction to magnetic materials, Addison-Wesley Pub. (1972)
5. Baldev Raj, V. Moorthy, and S. Vaidyanathan, Mat. Eval. (1997) 81
6. F. Ichikawa, M. Okuno, M. Okamoto and F. Tanaka, Mat. Sci. Forum, Vol. 210-213 (1996) 195-202

Table 1  
Chemical composition of ASME SA 508 Cl. 3 steel studied

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  
Thermal cycle simulation conditions for various HAZ positions

Position*	Typical HAZ Region**	N <sup>th</sup> pass			Interpass 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, -

\* Refer to Fig. 1.

\*\* 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.

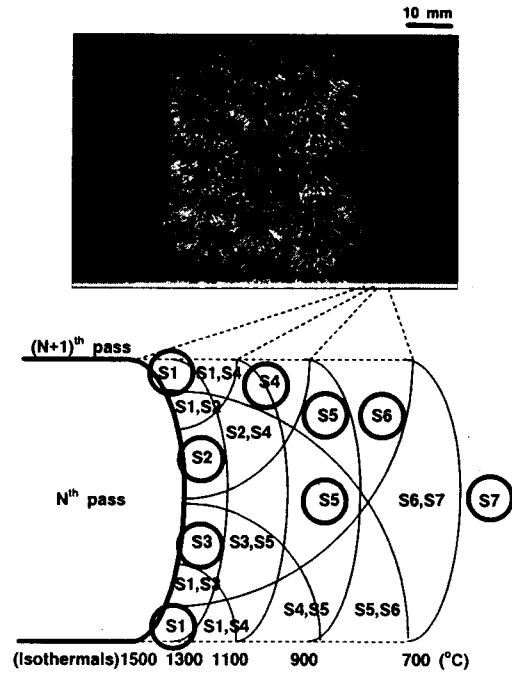


Fig. 1 Real weld HAZ and typical positions indicating simulation conditions in unit HAZ

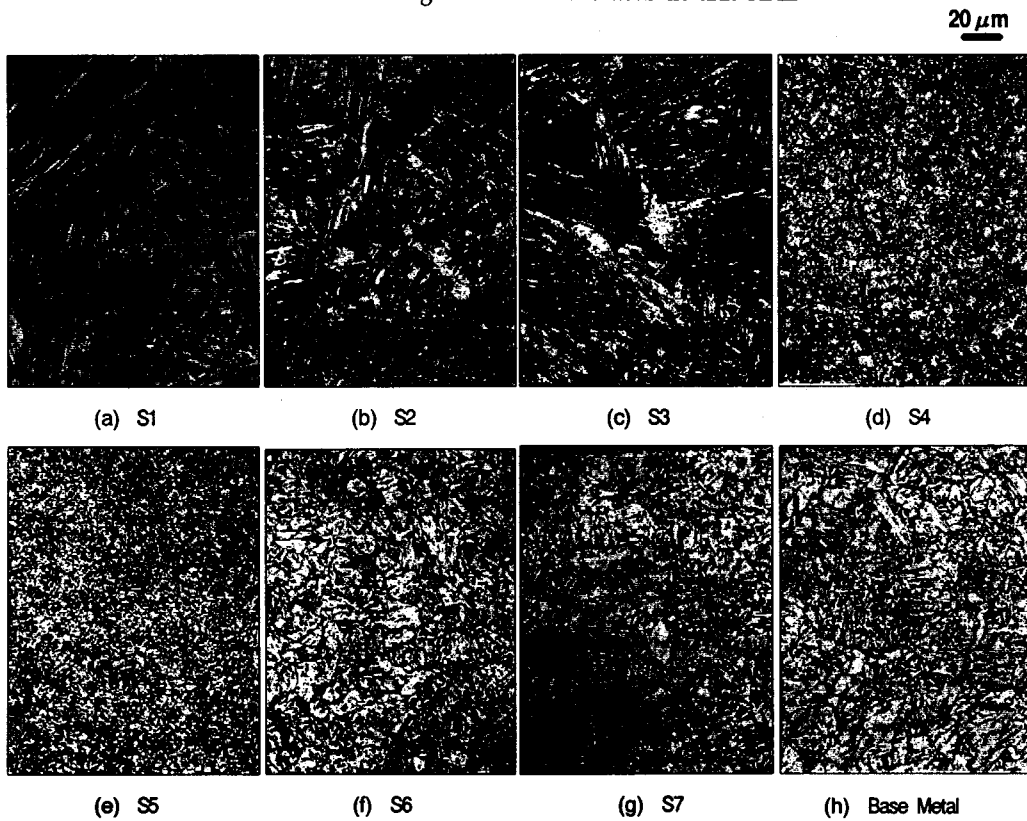


Fig. 2 Microstructures in various HAZ regions observed through OM showing CG HAZs ((a), (b) and (c)), FG HAZs ((d) and (e)), IR HAZ (f) and SR HAZ (g). All of the HAZs were subjected to PWHT.

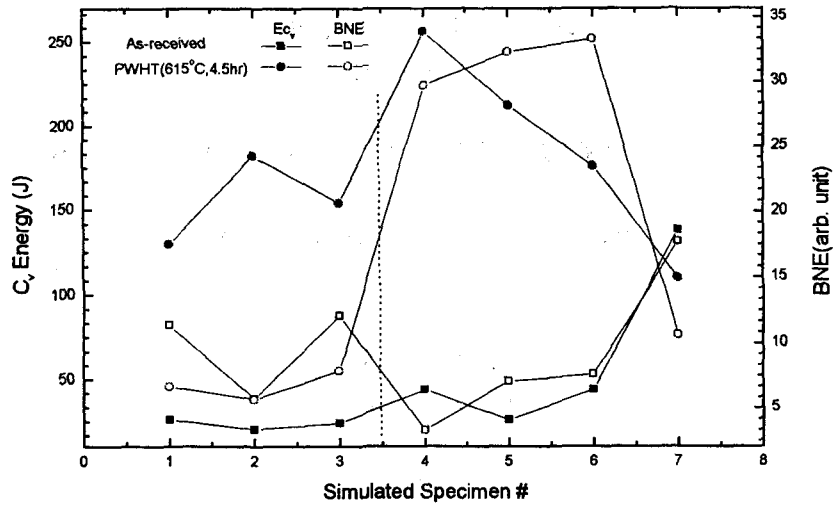


Fig. 3 The change of Toughness and BNE with simulation condition

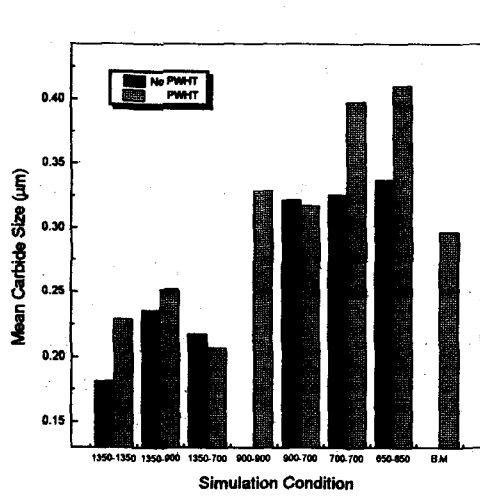


Fig. 4 Variation of mean carbide size with simulation condition.

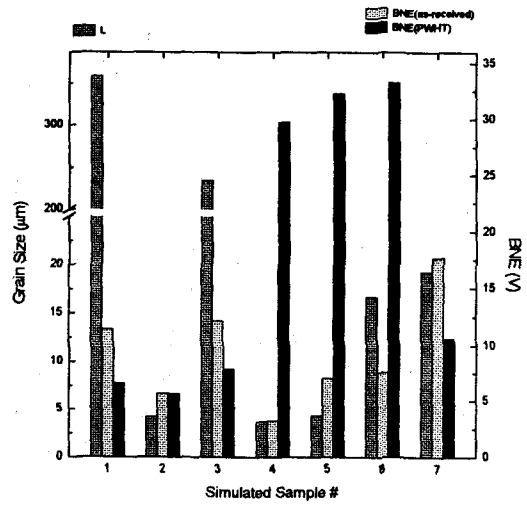


Fig. 5 The change of grain size and BNE with simulation condition