

저합금강의 바크하우젠 노이즈 파라미터와 미세조직인자와의 관계

The Relation Between Barkhausen-noise Parameters and  
Microstructure Factor in Low Alloy Steel

이상용, 박덕근, 양원준, 문은주, 김기덕, 이봉상, 권상철, 홍준화  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

최근 자기적 특성의 변화가 재료의 미세조직적 상태에 민감하다는 다수의 보고가 있다. 본 연구에서는 재료의 결정립크기, 석출물등의 인자와 기계적 성질인 인장강도 및 항복강도 등을 이용한 재료의 특성과 자기적 Barkhausen noise(MBN)의 관계를 연관시키고자 하였다. SA 508 GR. 3 원자로 압력용기 강을 대상으로 열처리온도를 달리하여 시험편을 제작하였으며, 열처리온도에 따른 미세조직과 기계적특성의 변화를 살펴본 후, 각 조건별로 BN을 측정하였다. 석출물의 크기나 분포는 열처리 온도에 따라 큰 변화가 없었지만 결정립크기는 온도가 증가함에 따라 커졌다. BN은 결정립크기가 커짐에 따라 root mean square(RMS) 전압, Barkhausen noise count(BNC) 그리고, maximum peak of amplitude(MPA)가 증가하였다. 항복강도와 극한인장강도는 결정립크기가 증가함에 따라 약간 감소하였으며, BN의 파워스펙트럼결과 새로운 파라미터인 ratio of mean amplitude vs. high amplitude on power spectrum(RMHA)과 웨이블릿 디노이징기법을 적용한 ratio of mean amplitude vs. high amplitude on wavelet de-noising power spectrum (RMHAD)이 좋은 상관관계를 보였다.

Abstract

Austenitic grain size and magnetic Barkhausen noise (MBN) level have been correlated in the heat treated low alloy SA 508 Gr. 3 reactor pressure steel. Specimens having different austenitic grain size have been prepared through heat treatments simulating various thermal cycle. Microstructural examinations by OM and SEM, and tensile tests by MTS were performed. Various BN parameters such as root mean square(RMS) voltage, BN count(BNC), maximum peak of amplitude(MPA), ratio

of mean vs. high amplitude(RMHAD) and power spectrum density were obtained by signal analysis including wavelet de-noising and fast Fourier transformation. The grain sizes increased, but YS (yield strength) and UTS (ultimate tensile stress) decreased with increasing heat treatment temperature. The grain size and mechanical parameters are well correlated with the behavior of BN parameters. The results indicated that domain wall pinning ability in the heat-treated materials are closely related with grain size and mechanical characteristics such as YS and UTS.

## 1. 서론

원자로의 압력용기는 약 10인치 (250mm) 정도의 두께를 갖는 대형 구조물로서 소재에서 요구되는 가장 중요한 특성은 내압에 충분히 견딜 정도의 강도 및 파괴인성이다. 원자로 압력용기는 가동 중 고속중성자 조사를 지속적으로 받아서 파괴인성이 저하되고 연성-취성 천이온도가 고온 쪽으로 이동하는 취화 현상이 발생하기 때문에, 발전소의 안전운전 여유를 충분히 확보할 필요가 있다. 본 연구에서 사용된 재료는 원자로 압력용기용으로 널리 사용되는 SA 508 Gr. 3 단조재이다.

대형강재의 내부 미세조직은 열간가공 후 annealing 혹은 normalizing-tempering 단계에 의해 좌우가 되는데 이 단계에서 결정립의 미세화 및 정립화, 수소균열 방지, 초음파탐상정도의 개선 등이 이루어진다[1]. Normalizing-tempering 단계를 거친 다음 quenching 단계에서는 대형 강재의 경우 두께에 따른 온도차이를 가지게되므로 이에 영향을 미치는 화학조성, 결정립 등의 요인이 최종 기계적 성질에 영향을 미치게 된다. 본 연구는 열처리 온도를 달리하여 각기 다른 오스테나이트 결정립 크기를 가지는 시편을 제작하고 바크하우젠 노이즈법을 이용하여 BN 파라미터와의 상관관계를 도출하고자 하였다. 또한 항복강도 및 극한 인장강도와 BN의 파워스펙트럼을 통한 새로운 파라미터를 도입하여 상관관계를 도출하고자 시도하였다.

## 2. 관련이론

### 2.1.1. 바크하우젠 노이즈

바크하우젠 노이즈는 강자성체 재료의 자기적 거동에 기초한 비파괴 시험방법중의 하나이다. 철강, 코발트, 니켈, 일부희토류금속 등의 강자성체 재료의 자화는 외부 자기장(자계)의 변화에 반응한 구동력(driving force)에 의하여 재료 내의 자기구역(磁氣區域)(또는 자구(磁區 ; magnetic domain))이 발생되고, 성장하는 과정에서 자기구역벽(磁氣區域壁)(또는 자벽(magnetic domain wall))의 이동에 의해 자기적 성질을 갖게 된다. 이 자벽의 이동은 재료의 결정입계나 전위, 석출물, 비자성개재물, 각종결함(전위, 공공(空孔))등의 억제영역(retarding field)으로부터 방해받게 되는데, 이를 억제력(retarding

force)이라 하며 이 힘에 의해 불연속적으로 이동하게 되고, 급격한 자속변화에 대응하는 펄스(pulse)적인 자기노이즈가 발생한다.

강자성체 재료가 자화하는 경우, 자벽의 불연속 이동으로부터 자기노이즈가 발생하는 현상. 다시말해, 강자성체를 자기화할 때, 그 둘레에 감은 코일에 잡음전압이 발생하게 되고 이를 증폭하면 파동음(波動音)과 같은 잡음이 발생하는 현상을 바크하우젠 효과라 하며, 1919년 독일의 물리·전기공학자인 Barkhausen에 의해 발견되었다[2].

강자성체를 자화시킬 때 불연속적인 자화 과정을 유도코일로 측정하면 유도전압이 측정되는데 이를 BHN (또는 MBN, BN)라고 한다[3]. 이 바크하우젠 노이즈는 금속재료의 미세 조직이나 응력상태에 매우 민감하게 대응한다는 것이 다수 보고되고 있다.

### 2.1.2 BN 발생원리

자기장을 걸면 자기장의 방향으로 자화(磁化)되고, 자기장을 제거하여도 자화가 남아 있는 물질을 강자성체라 하는데, 이 강자성체는 그림 2.1과 같이 개개의 자벽으로 나누어진 자기구역 및 이들간의 에너지 완충지역 역할을 하는 자기 구역벽으로 구성되어 있으며, 교환에너지와 결정이방성 에너지와의 상호작용을 통해 일정 두께의 자벽을 형성하게 된다.

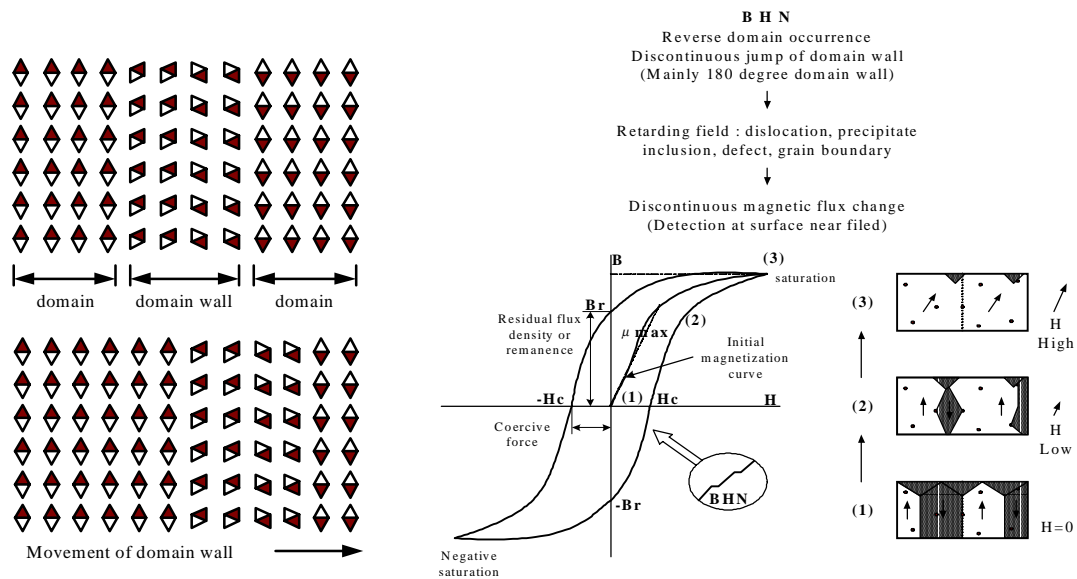


Fig. 2.1. Movement of domain wall in ferromagnetic material

Fig. 2.2. Occurrence of magnetic Barkhausen noise(BHN) and domain wall motion in ferromagnetic material[5]

이와 같은 자기적 구조를 갖는 강자성체 재료에 외부자기장(자계)을 가하면 시험체의 자속밀도는 증가하게 되고, 자벽이 점프(jump)를 하는 자벽 이동의 불연속성을 보이게 된다[4]. 그림 2.2는 자기이력곡선을 보여주고 있으며(B-H 곡선), BN를 적분해서 얻어진다

고 할 수 있다. 외부자기장  $H=0$ 일 때, 자벽은 각각 평형상태를 유지하지만,  $H=high$ 로 변함에 따라 점차 자벽이 소멸되어 자기포화상태에 이르는 도식적으로 보여주고 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1. 재료 및 시편준비

실험에 사용된 시험편 재료는 원자력 압력용기 소재로 널리 사용되는 SA 508 Gr. 3 강으로 880°C에서 8시간 균질화(normalizing)처리, 620°C에서 8시간 템퍼링(tempering)처리하여 비슷한 크기의 탄화물 분포를 가지면서 오스테나이트(austenitizing) 온도만을 달리하여 결정립 크기만을 다르게 하여 그림 3.1과 같이 3가지 조건(온도)에 따라 열처리를 수행하였다.

시험편은 크기가 20×5×0.7mm인 직육면체로써, 시험편 가공시 응력을 최소화하기 위하여 와이어 컷팅하여 제작하였다. 시편의 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다.

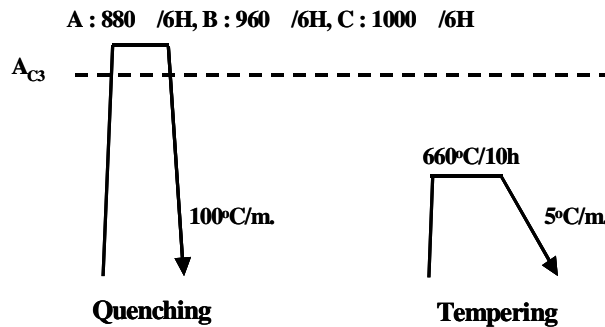


Fig. 3.1. Schematic sketch of three heat treatments conditions.

Table 1. Chemical composition of SA508 steel

Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Fe
Comp. (wt. %)	0.21	0.24	1.36	0.0002	0.07	2.21	0.49	Bal.

#### 3.2. 실험방법

열처리 조건에 따른 미세조직의 변화는 3% nital 용액과 Lepera 용액(1% Sodium Metabisulfate 수용액 + 4% Picral)을 사용하여 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM) 및 광학현미경(Optical Microscope)을 이용하여 관찰하였다.

본 연구에서는 상분석기를 이용하여 880°C, 960°C, 1000°C로 하여 서로 다른 크기의 austenite grain size 및 effective grains size를 구하였다. 각각의 온도에서 0.0005/s의 변형률 속도로 MTS 810 인장시험기를 이용하여 인장시험을 수행하였다.

그림 3.2는 BN 실험장치의 구성을 보여주고 있다. 함수발생기를 통하여 인가된 함수는 전원공급기를 통하여 증폭되고, 헬름홀츠 코일을 통하여 자기장을 형성한다. 자기장의 세기는 가우스미터를 통하여 측정하며, 코일내에 놓인 시편에 pick-up 코일(또는 search coil)을 이용하여 BN을 검출하고 오실로스코프를 통하여 파동음을 관찰한다.

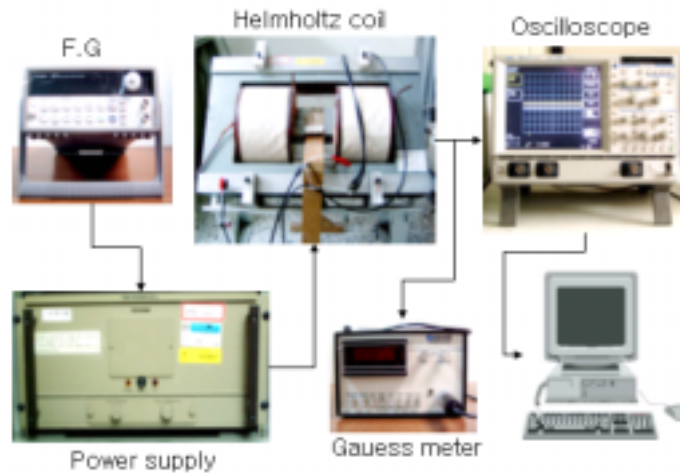


Fig. 3.2. Schematic photograph of the experimental set-up

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1. 열처리 온도에 따른 미세조직 관찰

그림 4.1과 그림 4.2에 광학현미경 및 주사전자 현미경으로 관찰된 대표적인 미세조직을 나타내었다.

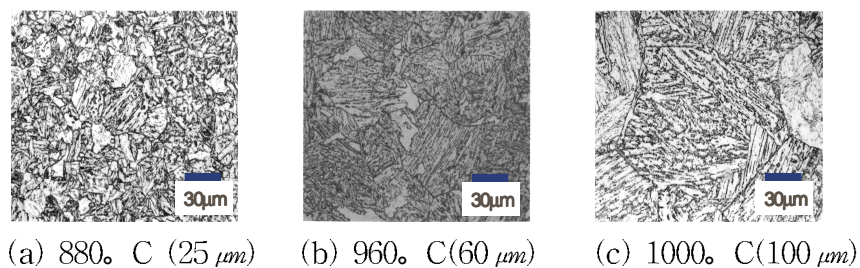


Fig. 4.1. Optical micrographs of the specimens

미세조직은 전형적인 템퍼드 베이나이트이며, 결정립의 크기는 열처리 조건에 따라 각각

25  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$  및 100  $\mu\text{m}$ 였다. 그리고 상분석기를 이용하여 결정된 탄화물 정량화 결과를 그림 4.3에 나타내었다. 그림에서처럼 비교적 비슷한 분포를 가지면서 결정립의 크기가 다른 조직을 얻을 수 있었다.

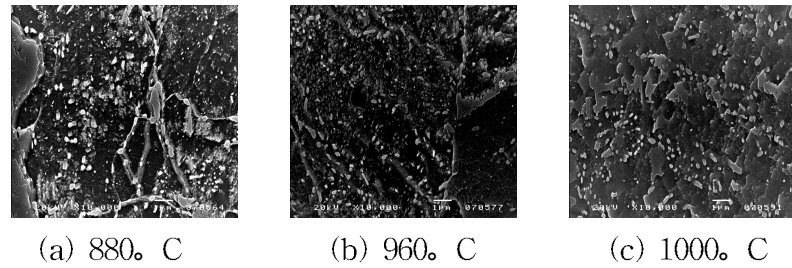


Fig. 4.2. SEM micrographs showing coarsening of carbide

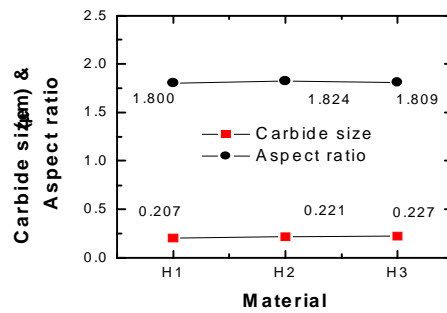


Fig. 4.3 Carbide size and aspect ratio

#### 4.2. 열처리 온도에 따른 인장시험의 변화

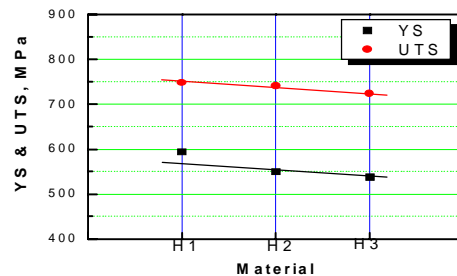


Fig. 4.4 Yield strength and ultimate tensile strength

그림 4.4는 인장시험 결과를 보여주고 있다. 인장강도와 항복강도의 경우 일반적으로 알려져 있듯

이 결정립의 크기가 커질수록 작게 나타났으며, 결정립의 크기와 항복강도의 관계를 묘사한 Hall-Petch 관계식(4)을 만족함을 알 수 있었다.

$$\sigma_0 = \sigma_i + kd^{-1/2} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_0$ 는 항복강도,  $d$ 는 결정립크기 ( $\mu m$ )이며  $\sigma_i$ 와  $k$ 는 상수이다.

### 4.3. 열처리 온도에 따른 BN의 변화

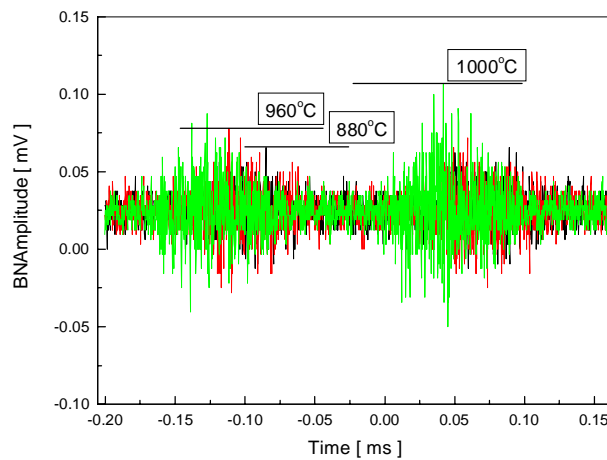


Fig. 4.5 Plot result of Barkhausen noise signal with heat treatment temperature

그림 4.5는 BN의 파형을 보여주고 있으며, 위의 파형은 두 개를 확대한 것이지만, 신호 처리는 12개 파형에 대하여 BN의 파라미터를 살펴보았다. 그림 4.6은 열처리 온도에 따른 BN의 RMS(root mean square) 전압값을 보여주고 있으며, 다른 연구결과들과 비교하여 볼 때, 결정립크기가 증가할 경우 BN이 커지는 결과와 일치한다. 그림 4.7은 BN의 BNC(Barkhusen count; number of event)를 보여주고 있으며, RMS와 마찬가지로 열처리 온도가 증가할수록 증가하고 있음을 알 수 있으며, BN의 크기로 대표되는 maximum peak of amplitude(MPA)또한 그림 4.8과 같이 열처리온도가 증가할수록 증가함을 알 수 있다.

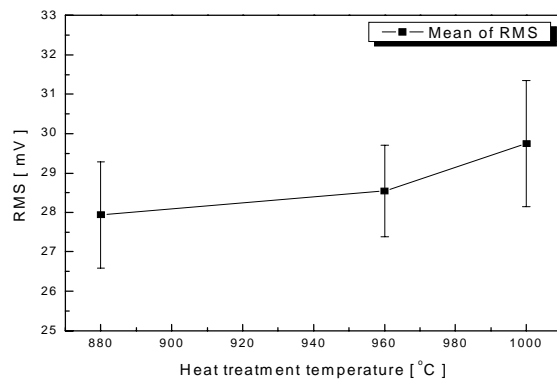


Fig. 4.6. Plot result of RMS vltage with heat treatment temperature

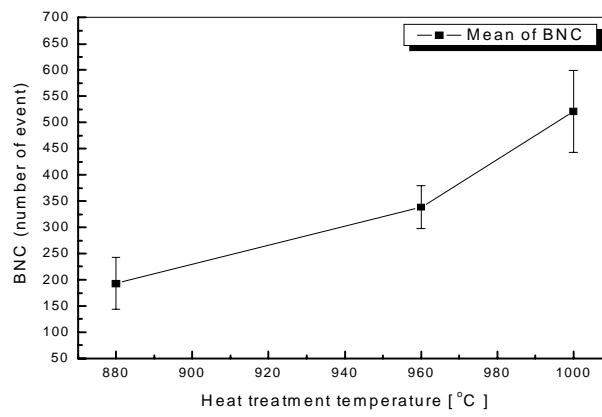


Fig. 4.7. Plot result of BNC with heat treatment temperature

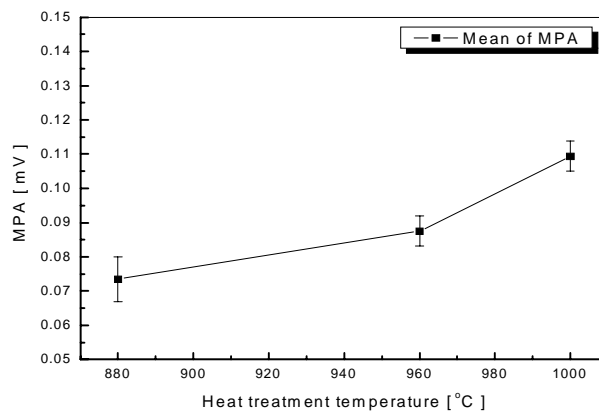


Fig. 4.8. Plot result of MPA with heat treatment temperature



### 4.3. 열처리 온도에 따른 BN의 파워 스펙트럼

그림 4.9는 BN의 파워스펙터럼 결과를 보여주고 있다. 스펙트럼의 결과를 비교하기는 상당히 난해함으로 MATLAB이용하여 BN 스펙트럼의 최대 피크와 평균피크를 계산하여 그림 4.10과 같이 그 비(RMHA; ratio of mean vs. high amplitude on power spectrum)를 구하였다. 또한, 웨이블릿 디노이징 기법을 적용하여 신호의 잡음성분을 제거하여 신호를 재구성한 후 RMHA를 구하였는데 이를 RMHAD(ratio of mean vs. high amplitude on power spectrum by wavelet de-noising)로 명명하고 그 값을 비교하여 보았다. 그 결과 RMHA와 RMHAD는 인장강도 및 항복강도가 작아짐에 따라서 감소하는 경향을 보였으며, RMHAD가 보다 민감하게 변하는 경향을 보였다. 이 두 파라미터의 검증여부는 또 다른 연구를 통하여 유용성의 검증이 필요할 것으로 사료된다.

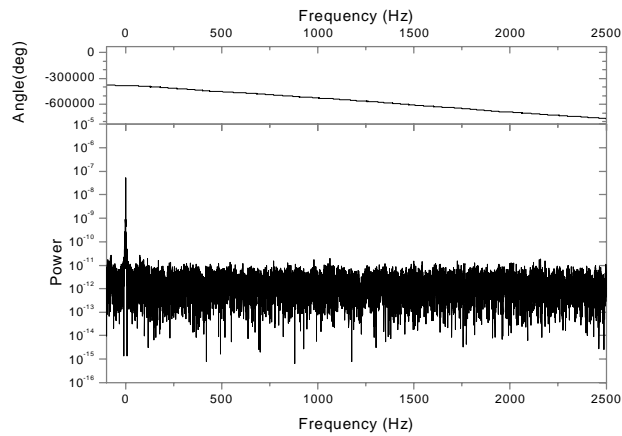


Fig. 4.9. Plot result of Power Spectrum of BN

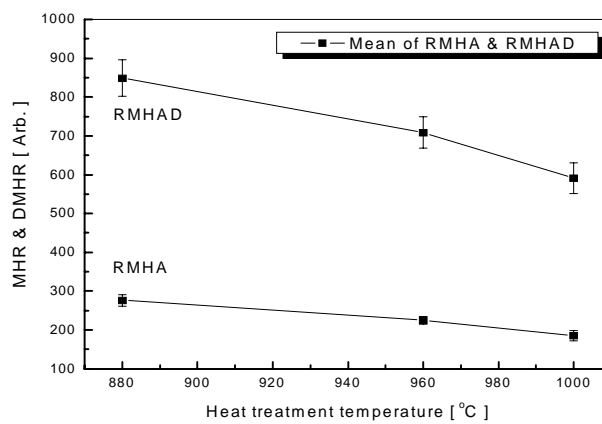


Fig. 4.10. Plot result of RMHA & RMHAD with heat treatment temperature

#### 4.5. 결정립 크기와 BN와의 상관관계

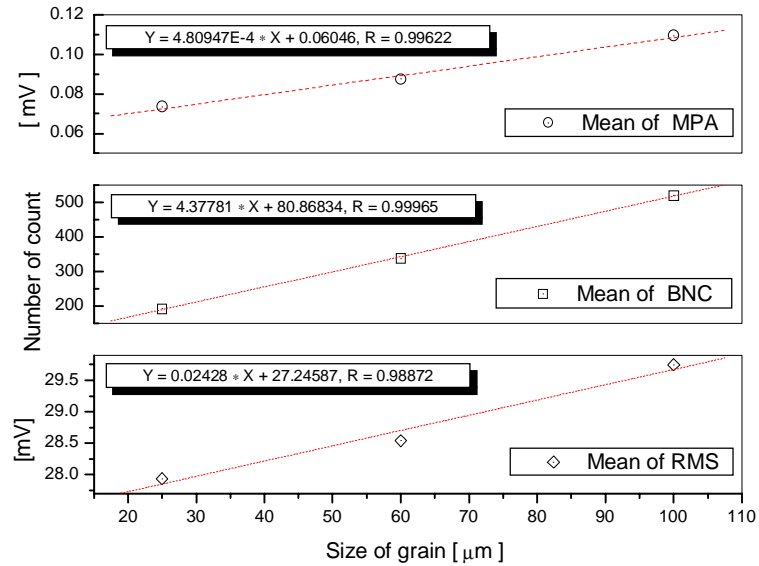


Fig. 4.11. Correlation between normalized RMS voltage and grain size

그림 4.11은 BN의 RMS 전압값, 이벤트 수 및 최대 진폭등의 파라미터와 결정립크기와의 상관관계를 선형회기 분석한 결과를 나타내고 있다. 분석결과 선형적 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

#### 4.5. 결정립 크기와 항복강도 및 극한인장강도와의 상관관계

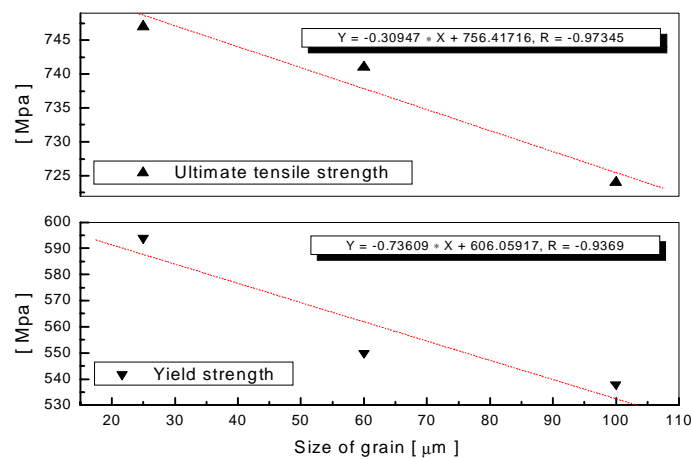


Fig. 4.12. Correlation between normalized Yield strength & Ultimate tensile strength and grain size

그림 4.12는 결정립 크기와 항복강도, 그리고 결정립 크기와 극한 인장강도와의 상관관계를 보여주고 있다.

#### 4.6. 항복강도, 극한인장강도와 RMHA & RMHAD의 상관관계

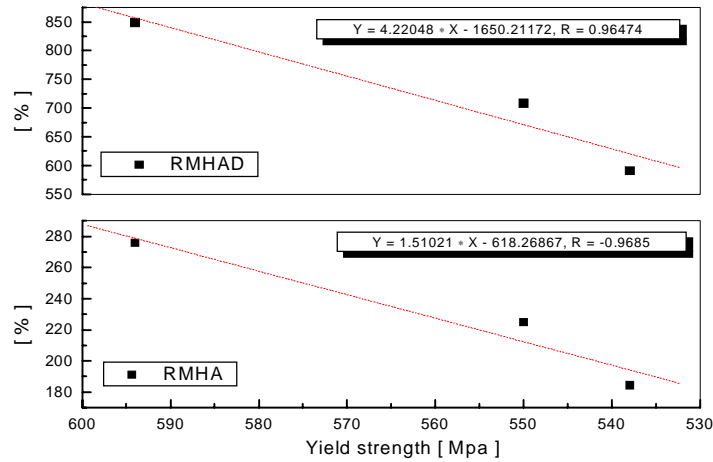


Fig. 4.13. Correlation between normalized Yield strength and RMHA & RMHAD

그림 4.13은 항복강도에 대한 RMHA와 RMHAD의 상관관계를 그림 4.14는 극한인장강도에 대한 RMHA와 RMHAD의 상관관계를 보여주고 있으며, 그림과 같은 선형적인 관계로부터 인장강도 및 항복강도를 평가 할수 있는 파라미터로 예상되며, 앞으로도 많은 연구를 통하여 그 유용성을 검증하게 될 것이다.

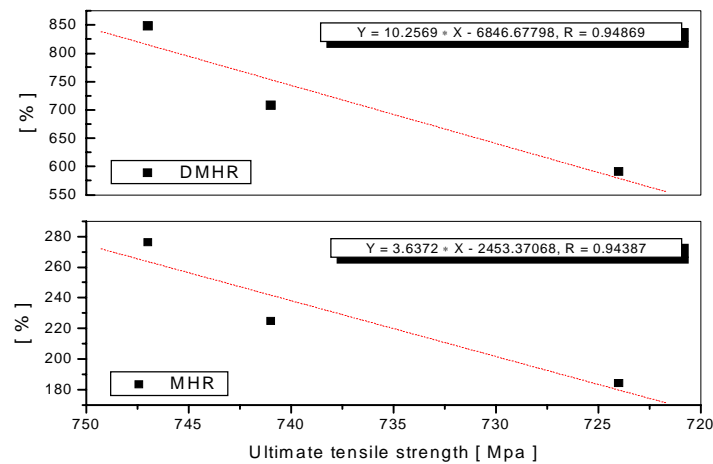


Fig. 4.14. Correlation between normalized Ultimate tensile strength and RMHA & RMHAD

## 5. 결 론

SA 508 GR. 3 강을 Austenitizing temp.를 각각 880° C, 960° C, 100° C로 하여 미세조직인자 및 기계적 특성과 연관지어 BN의 파라미터를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 결정립크기는 열처리온도가 증가함에 따라 증가하였으며, Image analyzer를 이용한 탄화물 정량화 결과는 결정립크기와는 달리 비슷한 크기 및 형상의 탄화물 분포를 보여주었다.
- (2) 기계적 특성을 살펴본 결과, 항복강도 및 극한인장강도는 결정립크기가 증가할수록 약간 감소하는 경향을 보였다.
- (3) 결정립크기가 증가할수록 BN의 RMS 전압값, BNC(Barkhausen noise count), 그리고 MPA(maximum peak of amplitude)등은 증가하였다.
- (4) 인장강도 및 항복강도의 감소와 BN 파워스펙트럼의 RMHA 및 RMHAD는 유사한 경향으로 감소하였다. RMHA 및 RMHAD를 이용하여 BN을 해석할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 과학기술부 최종보고서 : “Nuclear Material Technology Developments”, 연구기관 한국원자력연구소, pp. 366-374, KAERI/RR-2225/2001
- [2] Barkhausen, H. : Phys. Zeitschrift, 20, pp. 201, 1919
- [3] 김동원, “Barkhausen noise method의 정량화를 위한 미세조직분석과 파괴특성의 비파괴적 평가”, 한국비파괴검사학회 추계학술발표회, pp. 300-308, 1999
- [4] 이종민 외 5인, “Barkhausen noise와 Spherical Indentation를 이용한 1Cr-1Mo-0.25V강의 열화도 평가”, 한국비파괴검사학회 추계학술대회, pp.248-253, 2001
- [5] 伊藤勇一, “バルクハウゼンノイズを用いた材料評価 その1 - バルクハウゼンノイズ法の基礎 -”, 非破壊検査 46巻 第1号, pp 3-7, 1996
- [6] 김주학, 박덕근 외 3인, “원자로 압력용기강 용접부의 미세조직 변화가 Magnetic Barkhausen Noise 거동에 미치는 영향”, 한국비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 4, pp.292-303, 1998
- [7] 이봉상, 홍준화, “압력용기용 페라이트계 철강소재의 파괴인성 천이특성 평가기술”, 대기기계학회지, Vol. 37, No. 11, pp. 40-42, 1997
- [8] 이봉상, 양원준 외 3인, “소형시험편의 Master Curve 방법을 이용한 원자로 압력용기강의 파괴인성 천이특성평가”, 대기기계학회지, Vol. 24, No. 2, pp. 303-310, 2000
- [9] 양원준, 이봉상 외 3인, “원자로 압력용기강의 천이영역파괴인성에 미치는 결정립크기의 영향”, 2002 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회
- [10] V. Moorthy, B.A. shaw 외 2인, “Evaluation of Heat treatment and Deformation induced changes in Material properties in Gear steels using Magnetic Barkhausen Noise Analysis”, 3rd International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, 2001
- [11] J. Grum, B. Pecnik, 외 1인, “Analysis of power or a captured Barkhausen-noise signal in the frequency domain of structural steel Fe360-B”, 3rd International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, 2001