

## 자기적 비파괴 방법으로서의 Barkhausen Noise를 이용한 강자성체의 파괴인성 및 응력분포해석

김동원\*, 권동일  
서울대학교 재료공학부

### The evaluation of fracture characteristics and the analysis of stress distribution of ferromagnetic materials by Barkhausen noise method

Dong-won Kim\*, Dong-il Kwon  
Department of Material Science and Engineering, Seoul National University

**Abstract** - The magnetic nondestructive test can be applied to evaluate the magnetic material characteristics and the fracture properties through the internal defects of SA-508 used in the pressure vessels of the nuclear power plants as the direct and accurate in-situ testing methods. The fracture toughness, yield strength and the stress distribution around the defects in the surface and sub-surface of magnetic materials can be directly estimated by Barkhausen noise(BN) methods as NDT.

The testing process of SA-508 by Barkhausen noise method was advanced by controlling the austenizing peak temperature and the time of maintenance at a constant austenizing peak temperature, therefore causing the variation of fracture toughness. Through above process, we can evaluate the variations of effective grain size and the correlation of effective grain size and FATT at each situation. And the stress distribution around the defects can be quantified nondestructively through Barkhausen method.

#### 1. 서 론

비파괴 검사는 압력용기나 배관 등의 설비에서부터 전자재료나 그 부품들에 이르기까지 제작 또는 작동 중에 결함을 검출하기 위해서 실시되는 방법으로서 검사방법은 사용하는 조건에 따라 달라지게 된다. 이러한 결함탐지에 주로 사용되던 비파괴 검사 방법 및 새로운 비파괴 방법들이 최근에는 재료물성을 측정하기 위해 여러 연구들이 진행되고 있다. 각 측정 방법들은 나름대로의 장단점을 가지고 있기 때문에 측정하고자 하는 대상에 맞는 방법을 선택하거나 복합적인 방법으로 사용되어야 할 것이다. 그 중 자기적인 방법은 특성상 강자성체에 주로 사용되며, 측정장비가 간편하고, 빠른 측정이 가능하며, 높은 감도를 나타내기 때문에 여러 분야에서 많이 사용되고 있다.

강자성 재료가 외부의 자장에 의해 자화될 때 재료의 여러 미세적인 성질에 의한 magnetic domain wall의 불연속적인 이동에 의해 불연속 자화를 하게 된다. 이런 효과를 Barkhausen effect라고 하며, 불연속적인 자화 과정의 유도코일로 측정하면 유도전압이 측정되는데 이를 Barkhausen noise(BN)라고 말한다.[1]

본 연구에서는 이러한 Barkhausen noise를 이용하여 강자성 재료의 파괴인성 및 미세조직과 연관된 재료물성을 평가해 보았으며, 기존의 평가 방법보다 더 간편한 방법으로 원전설비의 압력용기에 나타날 수 있는 결함존재시의 하중에 의한 결함주위의 응력분포 및 응력집중계수를 정량적으로 평가해 보고자 한다. 그리고, 이러한 평가 방법을 실 시스템에 적용하여 현장에서의 미세파손 및 경연열화 현상을 정량적으로 분석해 보고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 Barkhausen noise(BN)를 이용한 재료의 파괴인성 평가

###### 2.1.1 BN과 파괴인성과의 상관관계

강자성체를 외부의 자장으로 자화시 재료내부로부터 발생하는 BN은 식(1)과 같이 나타날 수 있다.[2]

$$V(t) = nCS \left( \frac{dB}{dt} \right) \cos \theta \quad (1)$$

$$= 2nCSI_x \left( \frac{du}{dt} \right) \cos \theta$$

- n : 코일의 감은수
- C : 단위상수
- S : 코일의 단면적
- 2lx : 180° magnetic domain wall 이동에 의해 변화된 자화량
- du : 자화상태가 변화된 domain wall의 부피
- θ : 자기선속의 변화와 코일사이 각도

식(1)에서  $du = Adl(x)$ 이므로(A는 자화상태가 변화된 domain wall의 단면적이고, l(x)는 domain wall의 이동거리이다.), 식(1)은 아래식과 같이 된다.

$$V(t) = 2nCSI_x \left( \frac{dAl(x)}{dt} \right) \cos \theta \quad (2)$$

$$= 2nCSI_x Av(x) \cos \theta$$

식(2)에 나타난 것처럼 BN은 domain wall의 이동속도  $v(x)$ 와 비례관계가 성립함을 알 수 있다. 즉, grain size가 작아짐에 따라 강자성체의 조직으로서의 규칙적인 원자배열의 규모가 줄어들게 되고, 그에 따른 domain wall의 크기가 작아지므로, domain wall의 이동속도가 줄어들게 된다. 그러므로, grain size가 작아지게됨에 따라 BN의 rms값의 감소현상을 일으키게 된다.

이에 따라 본 연구에서는 원자력 압력용기용 SA508강의 austenizing peak temperature와 일정한 peak temperature에서의 유지시간에 변화를 줌으로써 grain size에 차이를 주어 이에 따른 각각의 BN를 구해보았다.

###### 2.1.2 실험방법 및 결과

실험재료로 사용된 SA508강의 성분은 표1에 나타나 있으며, SA508의 열처리 공정은 그림1에 표시하였다.

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Fe
0.21	1.36	0.007	0.002	0.24	0.92	0.21	0.49	0.005	0.03	0.022	Bal.

표1 실험재료 SA508의 성분

그림1에서와 같이 다른 austenizing temperature에서 열처리한 후 공냉하고, 다시 655℃에서 10시간 tempering하였을 때, 이에따른 결정립 크기는 각각의 온도가 증가함에 따라 커지는 현상을 보였다. 이러한 각각의 austenizing 온도에 따른 normalizing된 BN값을 그림2에 나타내었다

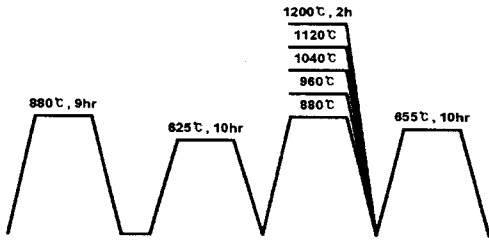


그림 1 SA508의 austenizing peak temperature의 차이에 따른 열처리 과정

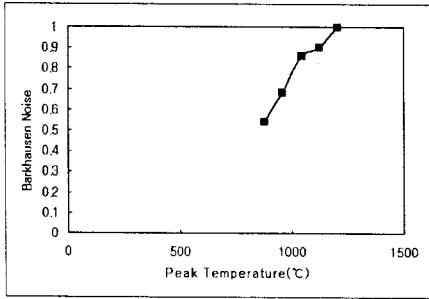


그림 2 austenizing peak temperature변화에 따른 Barkhausen noise의 변화

그리고, austenizing temperature를 950°C로 하고, 유지시간을 각각 1, 2, 4, 8, 16시간으로 하였을 때, 이에 대한 결정립크기는 유지시간이 증가함에 따라 커지는 현상이 나타났으며, 이에 대한 각 유지시간별 normalizing된 BN를 그림3에 나타내었다. 그림2, 3에 나타난바와 같이 결정립 크기와 BN사이의 비례적관계를 이용하여 각각의 열처리 공정시의 peak temperature와 유지시간이 커짐에 따라 BN값도 같이 증가함을 알 수 있다.

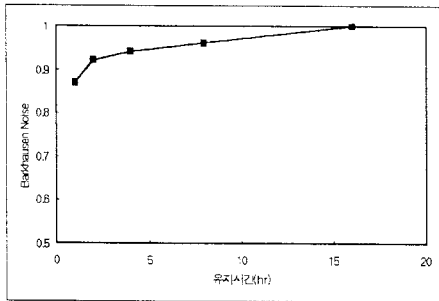


그림 3 austenizing peak temperature 유지시간에 따른 Barkhausen noise의 변화

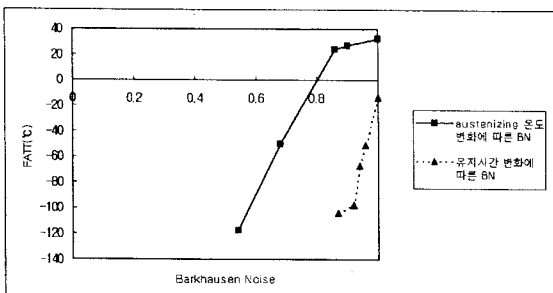


그림 4 열처리 조건에 따른 FATT와 BN의 관계

또한 얻어진 결정립 크기로부터 FATT값을 구할 수 있는데 이에대한 FATT값과 normalizing된 BN와의 관계를 그림4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 결정립 크기가 작아짐에 따라 낮은 FATT값을 갖게되고, 파괴인성이 향상됨을 알 수 있다. 그리고, 이에따른 BN값의 변화로부터 강자성 재료의 파괴인성을 BN를 이용한 비파괴적 방법으로서 평가할 수 있을 것이다.

위의 두가지 열처리과정으로부터 결정립크기에 대한 BN의 관계를 fitting하여, austenizing 온도를 다르게 하였을 경우에는

$$Grain\ size = 7.65112 e^{\frac{BN}{0.11837}} \quad (3)$$

그리고, 유지시간을 변화시켰을 경우에는

$$Grain\ size = 20.7 + 0.78194 e^{\frac{BN}{0.05622}} \quad (4)$$

와 같은 식이 나왔다. 위 두 식이 서로 유사한 결과가 나왔지만, 일치하지 않는 것은 BN의 상대적 결과 및 열처리 또는 평가중의 실험오차로부터 유발된 것으로 보이며, 이러한 정량화된 결과로부터 다양한 강자성체 재료들의 파괴인성을 Barkhausen Noise를 통해서 비파괴적으로 얻을 수 있을 것이라 생각한다.

## 2.2 Barkhausen Noise를 이용한 균열주위의 응력분포 해석

### 2.2.1 BN을 이용한 원형 결함 주위의 응력분포와 잔류응력의 해석

강자성 재료 내에 인장 응력이 가해지는 경우 180° magnetic domain wall의 수가 증가하고[3],[4], 180° domain wall의 형태가 재배열되며[5], 응력에 의해 domain wall의 이동을 저해하는 pinning energy에 변화가 생기기 때문에 재료의 자화 특성이 변화하게되고, BN의 증가를 야기한다. 반대로 압축 응력이 작용할 경우 위의 역상황이 나타나므로 BN은 감소하게된다. 이러한 관점에서 재료표면의 균열주위 응력 분포나 잔류응력 등은 BN에의해서 비파괴적으로 평가될 수 있다.

그림5는 각각 본 실험에서 사용된 굽힘장치와 시편의 개략도이다.

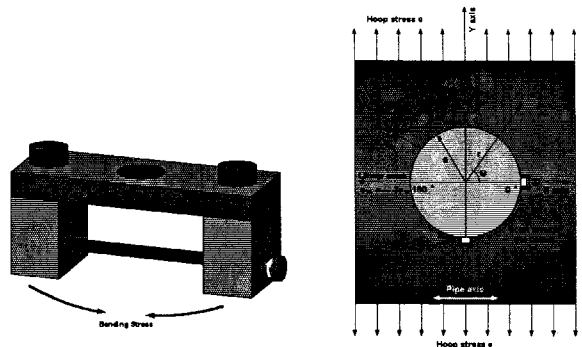


그림 5 굽힘시험 장치의 개략도

그림5에서 보는바와 같이 굽힘시험을 하면서 동시에 원형결함주위의 응력분포를 측정하기 위하여 hole주위에 BN탐지 sensor를 scanning하였다. 이 때 hole주위의 응력분포는 Airy's function에의해서 아래와 같은 식으로 주어질 것이다.

식(5)에서 hole주위에서는 tangential한  $\sigma_{\theta\theta}$ 만이 존재하게되고 r은 그림5에 나타난 hole의 반경(a)이므로 이에대한 식을 도식화하면 그림6과 같이 된다. 그리고, 시편두께의 30%깊이의 hole주위에서의 응력분포를 BN을 통해서 측정해 보았을 때 실험결과와 hole깊이가 30, 50, 80%일때의 잔류응력에의한 BN의 변화를 그림7과 같이 나타냈으며, 그림7에서 보다시피 응력에의한 BN의

결과가 Airy's function과 유사하게 나타남을 알 수 있다. 여기서 응력방향은 그림6과 동일하다.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{\sigma_0}{2} \left[ \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \left(1 + \left(\frac{3a^2}{r^2} - 1\right) \cos 2\theta\right) \right] \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{\sigma_0}{2} \left[ \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right] \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma_0}{2} \left[ \left(1 + \frac{3a}{r^2}\right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \right] \end{aligned} \quad (5)$$

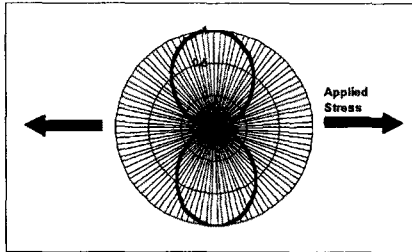


그림 6 Airy's function에 의한 hole주위의 응력분포

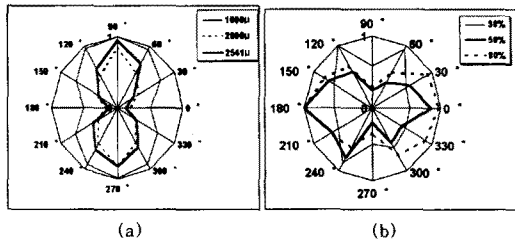


그림 7 (a)굽힘시험과 (b)잔류응력존재시 hole주위에서의 Barkhausen noise

### 2.2.2 BN을 이용한 응력집중계수의 정량화

본실험에서는 그림8에서와 같이 20×10×125mm의 직사각형의 SA508시편에 길이 10mm, 폭1mm의 pre-crack을 주고 앞선 실험과 동일한 방법으로 굽힘실험을 행하였으며, 균열 첨단에서의 응력집중계수를 비파괴적으로 정량화 해 보았다.

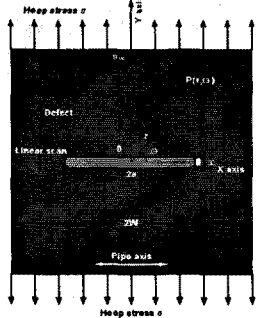


그림 8 균열첨단에서의 응력 집중 현상 평가를 위한 시편개략도

여기서 균열첨단에서의 응력분포는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다[7]. 또한, 식(6)에서 1축굽힘시험시  $\sigma_{yy}$ 만이 남게되고 위의 실험 data를 대입하게되면  $\theta=0$ 에서의 응력집중현상은 균열 첨단으로부터의 거리의 -0.5 지수를 가지는 양상을 나타내게 된다. 이러한 상황에서 균열첨단에서의 BN를 scanning하여 측정된 결과를 그림9에 나타내었다. 그림9로부터 fitting하여 균열첨단에서의 거리에 따른응력집중현상을 정량화해보면 거리의 -0.672지수로서 나타나게되는데, 이것은 위의 -0.5지수와 매우 유사하다고 볼 수 있을 것이다. 그러므로, 어떤재료의 응력집

중계수는 BN을 이용한 비파괴방법에의해 정량적으로 평가될 수 있다고 할 수 있을 것이다.

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $K_1 = \frac{P}{BNw} f\left(\frac{a}{w}\right)$   
 $f\left(\frac{a}{w}\right) = \sqrt{\frac{\pi a}{4w} \sec \frac{\pi a}{2w} \left[1 - 0.025\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 0.06\left(\frac{a}{w}\right)^4\right]}$

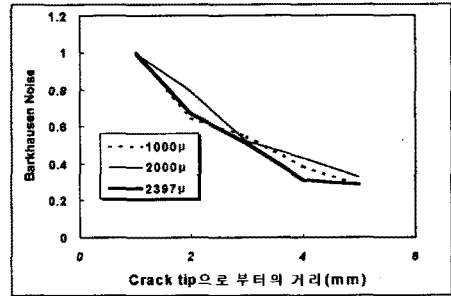


그림 9 crack tip으로부터의 거리에 따른 BN

### 3. 결 론

자기적인 비파괴 평가방법으로서 Barkhausen noise는 강자성 재료의 결정립크기 및 FATT값이 증가함에 따라 커지는 결과를 얻게 되었으며, 이를 통해서 재료의 파괴인성을 BN를 이용하여 정량적으로 평가, 분석할 수 있다. 그리고, 재료내 응력상태에 따라 BN값이 변화하는점을 이용하여 균열주위의 응력분포와 응력집중계수를 BN을 통해 정량화 할 수 있음을 알 수 있었다.

이렇게 정량적인 비파괴평가 방법으로서의 BN를 현장에 응용하기 위해서는 BN과 재료의 파괴인성 및 파괴특성의 더욱 정확한 정량관계를 이끌어내어야 할 것이며, 이를 위해서는 실험적 고찰과 이론 규명에 있어서 더욱 많은 시간을 투자해야 할 것이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 김정태, 성운학, 권희경, "Barkhausen Effect을 이용한 SA508 class 3강의 충격인성의 비파괴적 평가", Proc.of the 21th Conference on Mechanical Behaviors of Materials, pp.495~501, 1998
- [2] 황도근, 김호철, "구조강판에서 탐색코일의 형태에 따른 Barkhausen Noise 특성조사", Korean Applied Physics, Vol.5, pp.280~285, 1992
- [3] T.W. Krause, J.M. Makar, D.L. Atherton, "Investigation of the magnetic field and stress dependence of 180° domain wall motion in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise", J. Magn. Mater., Vol.137, pp.25~34, 1994
- [4] T.W. Krause, J.M. Makar, D.L. Atherton, "Investigation of strain dependent magnetic barkhausen noise in steel", IEEE Trans. Magn., Vol.31, pp.3376~3378, 1995
- [5] L.B. Sipahi "Overview of applications of micromagnetic Barkhausen emission as noninvasive material characterization technique", J. Appl. phys., Vol.75, pp.6978~6980, 1994
- [6] B.D. Cullity, "Introduction to magnetic materials Reading", MA:Addison-Wesley, pp.325, 1972
- [7] T.L. Anderson, "Fracture Mechanics (fundamentals and Application)", CRC, pp.51~63, 1995