

'95 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 미소자성 기법에 의한 원자로 압력용기강의 조사취화 회복특성 평가

박 덕 근, 홍 준 화

한국원자력연구소

김 인 섭

한국과학기술원

### 요 약

고속중성자를 조사한 원자로 압력용기용 SA508-3 강의 조사취화 회복에 따른 Barkhausen Noise 의 변화와 미세경도의 변화를 조사하였다. 동온소둔에 의한 미세경도의 변화와 Barkhausen Count 의 변화를 측정 하였으며, 이들 사이의 상호 관련성을 고찰하고 격자결함에 의한 자구벽의 운동변화로 이를 설명 하였다. 이는 앞으로 자기적성질 변화를 이용한 조사손상 평가에 적용될 수 있을 것이다.

### 1. 서 론

원자력 발전소의 압력용기나 조사시편은 다량의 방사선이 나오므로 직접 취급 하기가 매우 곤란하다. 따라서 조사효과를 쉽게 평가할 수 있는 신뢰성 있는 비파괴적 방법이 요구된다. 그중 중성자 조사에 의한 원자로 재료의 자기적 성질변화를 이용한 열화 탐지 방법은 각국에서 많이 연구되고 있다.

조사효과 평가에 이용되는 재료의 자기적 성질변화는 Hysteresis Loop 의 모양변화를 이용하는 방법과 Barkhausen Noise를 이용하는 방법이 있다. 또한 자기장의 변화에 의해 재료에 유도되는 초음파의 발생을 이용한 Acoustic Emission 방법이 있다.

강자성체(ferromagnetic material)가 변화하는 자장속에 놓이면 자화(magnetization)는 불연속적으로 변하며, 자구벽도 이에따라 갑작스런 점프(jump) 를 한다. 이에 의하여 Barkhausen Noise 가 발생하며, Barkhausen Noise 는 결정립의 크기나 조직과 같은재료의 미세조직(microstructure) 및 조성(composition), 그리고 응력등에 따라 변한다. 실제로 모든 격자간 불순물은 자구 운동의 방해물로 작용하여, 불규칙적(uneven) 이고 불연속적(discontinuous)인 자벽운동을 초래한다.[1]

재료의 자기적 성질은 미세구조 조직 등에 의하여 변화하기 때문에 이를 이용하여

재료의 성질을 비파괴적으로 평가 하려는 시도는 많이 있어 왔다. 그중에서도 특히 재료의 기계적성질변화에 따른 자기적 특성과 자구의 불연속적인 운동에 의하여 일어나는 Barkhausen Noise 를 이용하여 재료의 성질을 탐색 하려는 시도는 계속되고 있다.[2,3]

본 연구에서는 비파괴적 조사효과 평가방법을 개발하기 위하여 중성자 조사에 의한 Barkhausen Noise 의 변화와 조사취화 회복거동을 관찰 하였다. 또한 자기적성질과 기계적성질의 상관관계를 연구하기 위하여 미세경도 시험에 의한 결과와 비교 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 중성자 조사

SA508-3 강으로 제작한 1.5 mm dia x 15 mm 크기의 Barkhausen Noise 시험용 시편과 2 mm x 5 mm 크기의 미소경도시험용 시편을 한국원자력연구소 서울분소의 TRIGA MARK III 원자로를 사용하여 중성자 조사하였다. 조사는 노심 외곽의 G-14 조사공을 사용하였다. 조사량은 Fe dosimeter로 측정된 결과 fluence는 약  $2 \times 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 시편의 조사온도는 저융점 공정합금으로 조사한 결과 약 70 °C 이하인 것으로 추정되었다. 상세 실험내용은 참고문헌 4 를 참조바란다.

### 2.2. 자기적 성질 측정

자기적 성질을 측정하기 위한 장비는 실험실에서 제작 하였다. 함수발생기로 0.1 Hz 의 정현파를 발생 시킨후  $\pm 20$  A 의 전류를 발생 할 수 있는 Techronix 560 전력증폭기로 증폭하였다. 시편의 자화는 U 모양의 ferrite core 에 150 번 감은 coil 에 연결하여 12 KA/m 의 자기장을 발생 하여 자화 시켰다. 자기장의 세기는 gauss meter (Walker MG-3D) 을 사용하여 측정하였다.

Barkhausen Noise 는 탐지 coil 에 유도된 신호를 Low Noise Pre Amplifier 로 48 dB 로 증폭하여 100 - 250 Hz 사이의 Band Pass Filter 를 통과 하였다. Barkhausen Noise 의 파형은 digital storage oscilloscope (DSO, LeCroy 9310) 를 통하여 받았으며, DSO 는 GPIB 보드를 통하여 PC 에 연결 하였다.

### 2.3. 열처리 회복실험

중성자 조사에 의하여 생성되는 결함은 조사온도보다 높은 온도에서 열처리에 의해 소멸된다. 생성된 결함의 종류와 회복에 따른 거동은 열처리회복실험을 통하여 회복 활성화 에너지와 반응차수 그리고 characteristic rate constant 를 구함으로서 예측할 수 있다. SA508-3 강에서 중성자 조사에 따라 어떠한 결함이 생성되며, 이 결함들의 회복거동은 어떠한가에 대한 조사를 하기 위하여 등온 및 등시소둔 (Isochronal & Isothermal annealing) 을 실시하였다.

등시 소둔은 137 °C ~ 570 °C 온도간에서 15 °C~30 °C 간격으로 각 온도에서 40분간 실시하였으며, 등시소둔 결과로 부터 가장 큰 회복거동을 보이는 온도간에서 등온소둔 온도를 결정하였다. 등온소둔은 362 °C 및 474 °C에서 asymptote가 나타날 때까지 실시하였다. 열처리회복시 시편의 산화 방지를 위하여 300 C 까지는 실

리콘 오일 속에서 하였으며, 그 이상의 온도에서는 salt bath( $\text{NaNO}_3 : \text{KNO}_3 = 50 : 50$ , Melting Point =  $230^\circ\text{C}$ ) 내에서 실시하였다. 회복에 따른 기계적성질 변화와 자기적 성질변화 측정을 위해 동시소둔의 각 단계 에서 시편을 salt로 부터 인출하여 경도시험과 Barkhausen Noise 측정시험을 실시하였다.

경도시험은 ASTM E 384-73, "Standard test method for microhardness of material"에 따라 시험하중 200g, 하중시간 20초의 시험조건에서 15 - 25회 측정하여 평균값을 경도값으로 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

SA508 강과 같은 압력용기 재료는 중성자 조사에 의해 조사손상이 일어난다. 그 중에서 조사취화는 압력용기의 건전성에 매우 큰 영향을 미친다. 조사취화된 재료는 열처리에 의하여 회복될 수 있다. 열처리회복에 따른 결함의 거동을 파악함으로써 회복 활성화 에너지를 알 수 있는데 이론적으로 알아야 할 거동은 조사와 열처리 회복에 따른 생성된 결함과 회복되는 (사라지는) 결함의 숫자이다. 그러나 현실적으로 생성 및 소멸되는 결함의 숫자를 파악한다는 것은 불가능하기 때문에 많은 경우 존재하는 결함의 숫자와 비례되는, 실험으로 측정할수 있는 값의 변화로써 결함수의 변화를 측정한다. 이 경우 사용되는 방법은 조사취화 회복에 의한 재료의 물리적,기계적 성질의 변화를 이용한다.

본 연구에서는 조사와 열처리 회복에 따른 결함수의 변화와 미세경도 값의 변화와는 비례한다는 가정하에 조사와 열처리회복에 따른 미세경도값의 변화와 Barkhausen Noise 를 측정 하였다.

중성자조사에 의한 미세경도값의 변화는 조사경화 현상으로 일반적으로 많이 연구되어 왔다. 그러나 중성자 조사에의한 자기적 성질변화는 비교적 최근에 시작되었으며 아직까지 연구결과는 많이 발표되지 않았다. 일반적으로 기계적성질변화에 의한 자기적성질 변화는 많이 연구되어 왔으며 주로 Hysteresis Loop 의 변화나 Barkhausen Noise 중 신호의 크기를 나타내는 Amplitude 나 RMS 전압을 측정변수로 사용하고 있다. 그리고 이들변수와 경도변화를 연관시키는 연구가 여러곳에서 수행 되었으나 좋은 상관관계를 이끌어 내지 못하였다.[5,6]

본 연구에서는 신호의 갯수를 표시하는 Barkhausen Noise Count 를 측정하였으며, 열처리 회복실험과 미세경도와의 상관관계 연구에서 그림 1 과 같이 좋은 결과를 얻었다.그림 2 에서 나타난 것과같이  $362^\circ\text{C}$  에서 BNC(Barkhausen Noise Count)의 급격한 변화가 일어났는데 이는  $362^\circ\text{C}$  에서 첫번째 회복이 일어나는 점이기에 때문인 것으로 보인다. 이는 그림 3 의 동시소둔에 의한 미소경도의 변화에서 확인 할 수 있다. 그림 3 에서 보듯이 2단계로 조사취화 회복이 일어났으며 회복온도는 그림 4 에서처럼  $362^\circ\text{C}$  와  $474^\circ\text{C}$  라는것을 알 수 있다. 그림 4 는 그림 3 을 미분한 그림으로 명확한 조사취화 회복구간을 보여주고 있다.

보고에 의하면 중성자 조사에 의하여 Barkhausen Amplitude 가 감소한다고 알려져 있다[7]. 본연구에서 Barkhausen Count 가 중성자 조사에 의해 321 에서 291 로

감소한것은 Amplitude 의 감소에 의하여 낮은 Amplitude 의 Noise 가 Background 영역으로 사라졌기 때문인 것으로 생각된다. 그림 1 에서 중성자 조사에 의하여 감소한 BNC 는 열처리에 의하여 회복됨을 알 수 있다.

중성자 조사에 의하여 Barkhausen Noise 가 변하는 것은 아직 많이 연구되지 않았으나 조사에 의하여 생긴 결함이 자구의 운동을 방해하여 생기든가 결함이 전위의 운동을 방해하고 이전위가 자구벽의 운동을 방해하여 일어나기 때문인 것으로 생각된다. 자구벽의 운동은 inclusion 과 전위와 같은 시편의 격자결함에 크게 영향을 받는다고 알려져 있다[2]. 그러나 격자결함이 자구벽의 운동에 영향을 미친다는 것은 알려져 있지 않다.

#### 4. 결 론

SA508-3 압력용기강의 중성자 조사에 의한 미세경도의 변화와 Barkhausen Noise 변화를 조사 하였다. 중성자 조사에 의하여 BNC 는 감소 하였으며, 열처리에 의하여 회복되었다. 그리고 BNC 의 변화는 미세경도의 변화와 좋은 상관관계를 보여 주었다. 이는 결함에 의한 자구벽의 운동이 방해를 받기 때문인 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. Cuillity, B.D., (1972), Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley Pub.
2. Jile, D. C. (1989), Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman & Hall
3. Jiles, D. C., (1988) J. Phys. D: Appl. Phys., 21, 1196
4. 홍준화 외, KAERI/RR-1444/94 "Cyclotron 을 이용한 원자로 재료의 조사효과 연구", 한국원자력 연구소, 1995
5. M.R. Govindaraju, et al, "Non-Destructive Evaluation and Material Properties II", Metals & Materials Society, p121, 1994
6. L.B. Sipahi et al, "Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation", Vol. 13, p 1801, 1994
7. E.A. Little et al, "Magnetoacoustic and Barkhausen Emission Studies of Neutron Irradiated Iron and Iron-Copper Alloys" ASTM STP 1046, pp 165-179, 1990

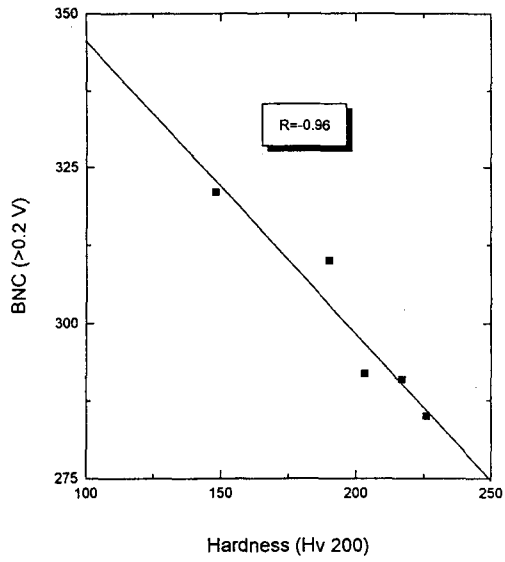


Fig. 1 Correlation between Barkhausen Noise Count and MicroVickers hardness

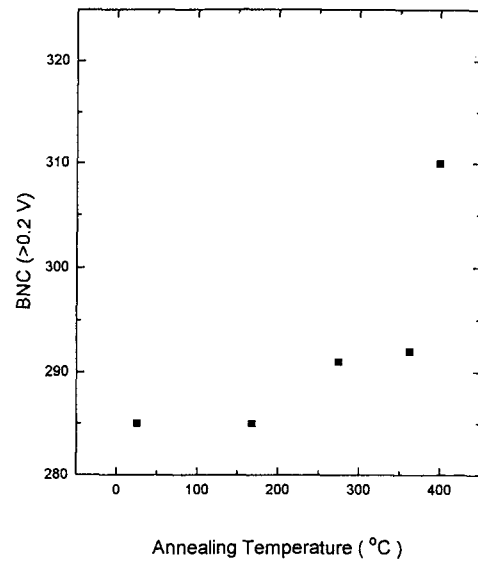


Fig. 2 Barkhausen Noise Count as a function of annealing temperature

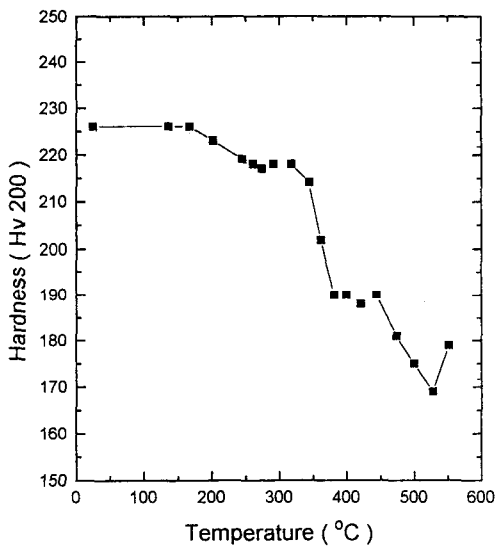


Fig. 3 Isochronal annealing curve of neutron irradiated SA508-3 steel (annealing time duration : 40 min)

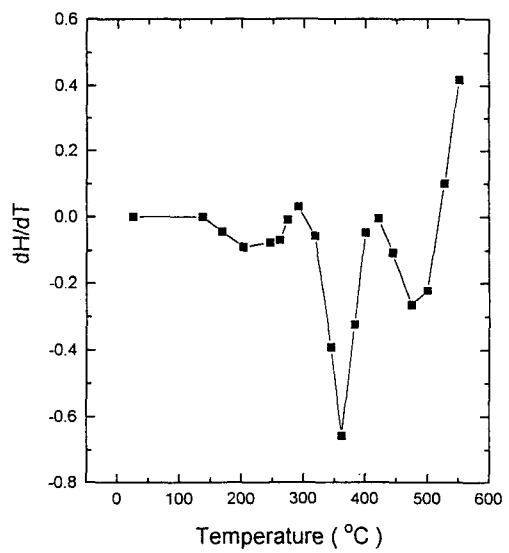


Fig. 4 Differential of isochronal annealing curve shows each recovery stage