'95 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

미소자성 기법에 의한 SA508-3 강의 기계적성질 변화 평가

박 덕근, 송 훈, 홍 준화
한국원자력연구소

김 인섭
한국과학기술원

요 약

원자로 압력용기 재료인 SA508-3 강의 인장소성변형에 따른 자기적 성질변화를 연구 하였다. 소성변형에 따른 보자력, 잔류자화, 자기이력손실 및 Barkhausen Noise 의 변화를 측정하였으며, 변형에 따른 자기적성질의 변화를 자구와 전위와의 상호작용으로 설명하였다. 강자성체의 자기적성질과 기계적성질 사이는 밀접한 관련이 있으며, 이를 이용하면 압력용기강의 조사효과 평가에 적용 할 수 있을 것으로 보인다.

1. 개 요

원자력 발전소의 압력용기 재료에 대한 조사시편은 다량의 방사선이 나오므로 직접 취급하기가 매우 곤란하다. 따라서 신뢰성 있는 비파괴적 방법이 요구된다. 그 중 중성자 조사에 의한 원자로 재료의 자기적 성질변화를 이용한 열화 탐지 방법은 각국에서 많이 연구되고 있다.

조사효과 평가에 이용되는 재료의 자기적 성질변화는 Hysteresis Loop 의 모양 변화를 이용하는 방법과 Barkhausen Noise 를 이용하는 방법이 있다.

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

재료의 자기적 성질은 미세구조 조직 등에 의하여 변화하기 때문에 이를 이용하여 재료의 성질을 비파괴적으로 평가하려는 시도는 많이 있어왔다[1,2]. 그 중에서

도 특히 재료의 기계적 성질변화에 따른 자기적 특성과 자구의 불연속적인 운동에 의하여 일어나는 Barkhausen Noise 를 이용하여 재료의 성질을 탐색하려는 시도는 계속되고 있다.[3]

본 연구에서는 원자로 압력용기의 비파괴적 조사효과 평가방법 연구의 일환으로 SA508-3 강의 인장 소성변형에 따른 자기적 성질과 Barkhausen Noise 의 변화를 살펴 보았다.

2. 실험

가. 인장시험

실험에 사용된 SA508-3 강은 한국중공업에서 제조된 국산 원자로 압력용기강 (quenched and tempered vacuum-treated carbon and alloy steel forging for pressure vessel) 이며, 상세한 조성 및 제조이력은 관련자료[4]에 나와있다. 시편은 게이지길이 30 mm, 직경 4 mm 인 인장시편 모양으로 가공되었으며, 인장시험기 (Instron model 4505) 를 사용하여 2% 에서 16% 까지 소성변형 되었다.

나. 자기적 성질 측정

1) Hysteresis Loop 측정

자기적 성질을 측정하기 위한 장비는 그림 1 과 같이 제작하였다. 교류전원은 함수발생기로 0.1 Hz 의 정현파를 발생 시킨 후 ±20 A 의 전류를 발생 할 수 있는 Techron 560 전력증폭기로 증폭하여 사용하였다. 시편의 자화를 위하여는 U 모양의 ferrite core 에 220 번 감은 coil 에 교류전원을 연결하여 12 KA/m 의 자기장을 발생하여 자화 시켰다. 자기장의 세기는 gauss meter(Walker MG-3D) 을 사용하여 측정하였으며, 유도된 자속밀도 B 는 시편 주위에 2200 번 감은 탐지 coil 에 유도된 전압을 자속계(Walker, MF-3D) 로 적분하여 구하였다. 자속계에서 나온 신호는 digital storage oscilloscope(DSO, Lecroy 9310) 를 통하여 관찰 하였으며, DSO 는 GPIB 보드를 통하여 PC 에 연결하였다.

2) Barkhausen Noise 의 측정

Barkhausen Noise 를 측정하기 위하여, 탐지 coil 에 유도된 신호를 Low Noise Pre Amplifier 로 70 dB 로 증폭한후 150 - 200 Hz 사이의 Band Pass Filter 를 통과하였다. Barkhausen Noise 의 파형은 DSO 에 연결된 PC 를 통하여 저장되었다.

3. 결과 및 검토

그림 2 는 소성변형에 따른 자기이력곡선(Hysteresis Loop, HL) 의 모양을 보여준다. 소성변형이 진행 될수록 HL 은 시계방향으로 회전하며 최대자화유도(B_{max})가 감소함을 알 수 있다. Jiles 등은 AISI 4140 강의 압축소성응력에 따른 자화관계의 연구에서, HL 의 면적을 나타내는 자기이력손실(Hysteresis Loss, W_h) 와 보자

력은 소성변형에 따라 증가하였으며, 자기이역손실과 보자력(coercivity, H_c) 은 다음 식과 같이 선형성을 보인다는 것을 보고하였다.[3]

$$W_h = \text{const} \times H_c$$

본 연구결과 에서도 W_h 와 보자력은 상관계수 R=0.987 로 좋은 선형성을 보여주었다. 철을 기반으로 하는 강자성체(soft magnetic material) 의 자기이력손실은 격자결함에 의한 자구벽의 pinning 효과에 의존한다는 것이 밝혀져 있다.[5,6]

Hwang[7] 등은 연강(99.5% Fe)에서 소성변형이 6.7% 까지는 전위밀도의 증가에 의하여 자기이력 손실이 증가하고 그 이상에서는 전위망과 통과 할 수 없는 결함수의 증가에 의하여 자기이력 손실은 감소한다고 보고하였다. SA508-3 강의 경우, 그림 3 에서처럼 Hysteresis Loss 는 소성변형이 12% 까지는 증가하였고 그후로 감소하였다.

보자력은 시편의 개재물이나 전위와 같은 격자결함에 크게 영향을 받는다. Vicena[8] 는 처음으로 180° Bloch 벽을 벽 표면에 평행한 전위로부터 분리시키는데 필요한 자기장의 강도로서 보자력을 계산하였다. Seeger 와 Tranhl 은 전위의 통계적 분포와 자구벽상의 전위에 작용하는 힘을 사용하여 보자장(coercive field)를 계산하였다. 이들 모델은 보자력 H_c 는 전위밀도 ρ 의 제곱근에 비례한다고 결론 지었다.

$$H_c = \text{const} \times \rho^{1/2}$$

본 연구의 결과에 의하면 소성변형이 증가할수록 보자력은 증가하였으며(그림 4), 최대 자기유도는 1.655 T 에서 1.4 T 로 감소하였다. 보자력은 균일인장영역 까지는 0.565 KA/m 에서 1.037 KA/m 까지 증가하였으며 그후 감소하였다.

소성변형에 의한 가공경화는 전위밀도의 증가와 전위들 사이의 상호작용에 의한 것이다. 가공경화에 의한 응력의 변화는 다음 식에 의하여 주어진다.[9]

$$\sigma_{WH} = \alpha G b \rho^{1/2}$$

여기서 α 는 상수이며, b 는 버그스벡타, G 는 강성률 이다.

즉 가공경화는 전위밀도의 제곱근에 비례한다. 또한 보자력도 전위밀도의 제곱근에 비례하므로 가공경화에 의한 응력은 보자력과 선형적인 비례관계가 있을 것이다. 이는 그림 5 의 보자력과 각 변형 단계에서의 최대 응력인 peak stress 와의 관계에서 확인 할 수 있다. 이들 사이의 상관계수 는 R=0.984 로 매우 좋은 선형성을 보여주고 있다. 즉 응력이 증가 할 수록 보자력도 증가한다는 것을 나타내고 있다. 이는 보자력과 Hysteresis Loss 가 선형적인 변화관계를 가진다는 사실로 부터도 알 수 있다.

잔류자화와 소성변형 사이의 관계는 다른 자화변수들 보다 민감성이 떨어진다. 이는 Jiles[3] 등의 연구와도 일치하고 있다 그들은 AISI4130 강에서 잔류자화는 소성변형에 대하여 덜 민감하다고 보고하였다.

소성변형에 의한 Barkhausen Noise 의 모양은 Peak Amplitude 의 모양이 전체적으로 줄어들었으며, Barkhausen Count 는 소성변형이 진행 될 수록 감소 하였다. (그림 6) 이는 Hwang[7] 등의 연구와도 일치하며, 이는 전위밀도가 증가함에 따라 domain 이 움직이기 힘들기 때문으로 보인다. 보자력과 Barkhausen Count 사이의 관계(그림7) 및 Hysteresis Loss 와 Barkhausen Count 사이도 모두 좋은 상관관계를 보여주고 있다.

Hwang[7] 등은 Barkhausen Noise 의 envelope 의 voltage 를 제곱한 Barkhausen Energy 는, 연강에서 자구벽의 생성과 소멸 에너지의 감소로 인하여 6.7% 소성변형까지 급격히 감소하고 그후 완만히 감소한다는 것을 보고하였다.

Peak Stress 와 Barkhausen Count 사이의 관계도, R=0.897 로 비교적 좋은 상관관계를 보여준다. 따라서 Barkhausen Count 도 전위가 자구벽의 운동을 방해함으로서 증가한다는 것을 알 수 있다.

4.. 결 론

SA508-3 압력용기강의 인장소성변형에 따른 자기적 성질변화와 Barkhausen Noise 특성에 관하여 조사하였다. 잔류자화, 보자력, Hystrersis Loss 및 Barkhausen Noise 는 소성변형에 따라 변화 하였으며, peak stress 각 자기량들 사이도 선형적으로 변화 하였다. 이 현상은는 전위밀도의 변화에 따른 자구벽의 운동변화로 설명 할 수 있다.

소성변형과 관련된 자기적 특성 변화와 Barkhausen Noise 의 변화는 원자로 압력용기 재료의 조사취화 평가를 위한 비파괴적 방법으로 유용히 적용 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Titto,S. (1977) Acta Polytechnica Scand., 119, 1.
2. Sundstrom, O. and Torronen, K. (1979) Mater. Eval., 37, 51.
3. Jiless, D. C., (1988) J. Phys. D: Appl. Phys., 21, 1196
4. 홍 준화 외 "Cyclotron 을 이용한 원자로 재료의 조사효과 연구"(1994), KAERI/RR-1444/94
5. Cuillity, B.D., (1972), Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley Pub.
6. Jiless, D. C. (1989), Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Champman & Hall
7. Hwang, D. G., Kim., H. C., J. Phys. D: Appl. Phys., 21, 1807

8. Chin-Wen Chen, Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials, (1977), North-Holland Publishing Company
9. Barrett, C.R., The Principles of Engineering Materials, (1973), Prince-Hall

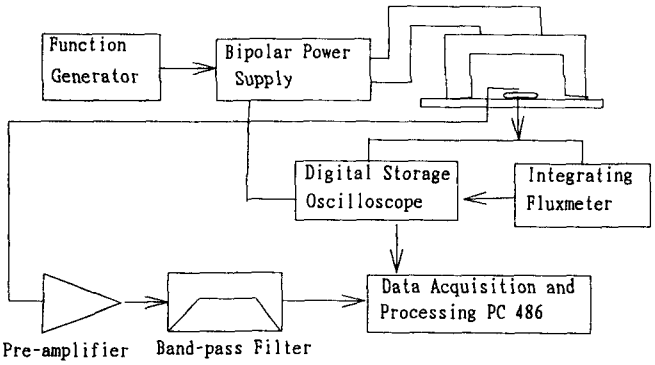

Fig. 1. Schematic diagram of magnetic properties and Barkhausen Effects measurement system

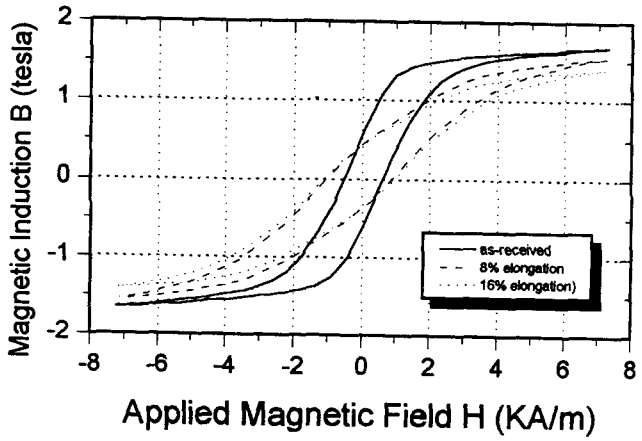

Fig. 2. Magnetic hysteresis loop for as-received, 8% and 16% plastic deformation, (a magnetizing frequency 0.1 Hz)

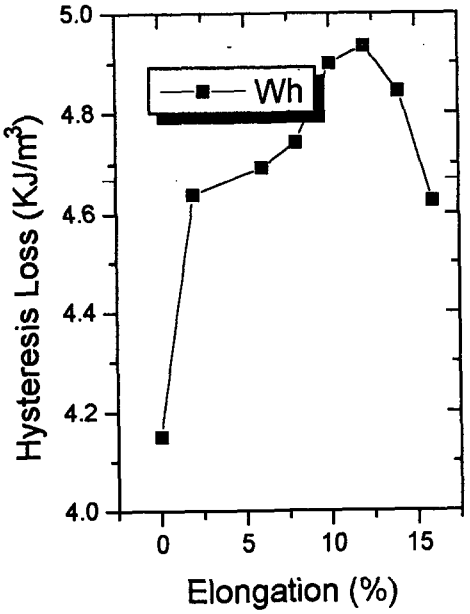

Fig. 3. The variation of hysteresis loss with plastic deformation

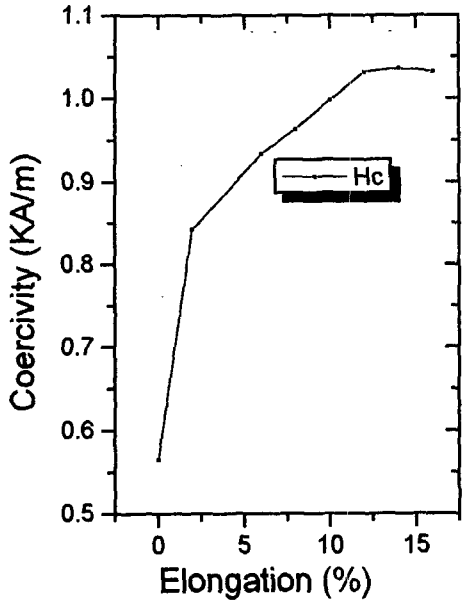

Fig. 4. The variation of coercivity with plastic deformation

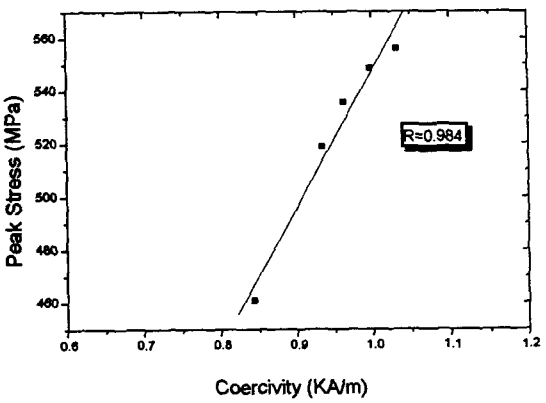

Fig. 5. Correlation between coercivity and peak stress

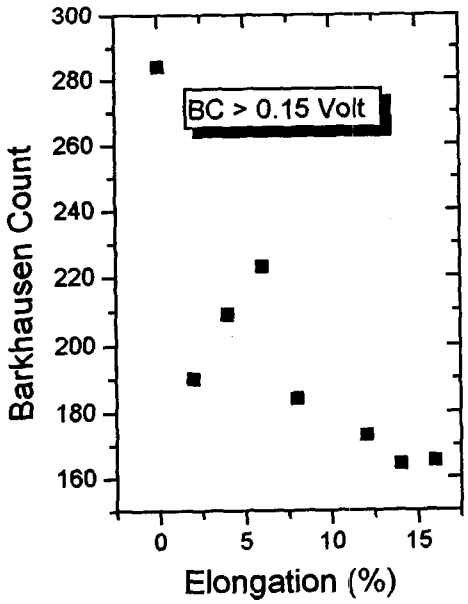

Fig. 6. The variation of Barkhausen Count with plastic deformation

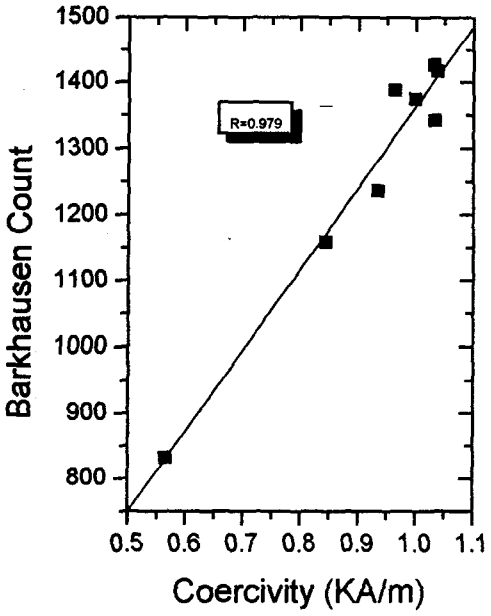

Fig. 7. Correlation between Barkhausen Count and coercivity