

論 文

Magnetoelastic Method 를 이용한 표면 경화층의 잔류응력 평가

남옥현 · 이인우 · 김성원* · 김문일

연세대학교 금속공학과

* 생산기술 연구원

Evaluation of Residual Stresses of Hardened Surface by Magnetoelastic Method

O.H. Nam, I.W. Lee, S.W. Kim* and M.I. Kim

Department of Metallurgical Engineering, Yonsei University

* Korea Academy of Industrial Technology

ABSTRACT

Barkhausen noise(BN) is created by the abrupt changes in the magnetization of materials under applied AC magnetizing field. These changes are known to be sensitive to residual and applied stresses.

In this study, BN theory was reviewed and it was examined how BN intensity was affected by simultaneous stress, hardness and microstructural changes. Also, magnetoelastic effect was used to evaluate residual stresses through carrying out the cantilever beam test.

An increase in BN intensity was observed when applied and residual stress changes from compression into tension. Microstructural softening by tempering also increased the amount of BN.

Therefore, the quantitative evaluation of residual stress and microstructural changes will be possible, provided BN method is more studied about various materials through comparing with different stress measuring techniques.

1. 서 론

용접구조물, 기어, shot peening, 퀘칭등 가공시에 잔류응력이 제품특성에 크게 영향을 미친다는 사실은 오래 전부터 알려져 왔으며, 따라서 잔류응력을 평가하는 방법도 여러가지로 연구되고 있다.

이중에서 Hole drilling, Ultrasonic, XRD, Barkhausen noise 등이 가장 많이 연구되고 있는 방법이다. Hole drilling¹⁾은 파괴적인 방법이며 미소응력을 평가할 수 없는 단점이 있으며, Ultrasonic²⁾은 3 차원적인 응력

장 해석이 가능하지만 존재하는 상(phase)들의 분포에 너무 민감하다는 제약을 갖고있다.

XRD³⁾는 비파괴적인 잔류응력 측정의 유일한 기술로 알려져 있으나 응력측정이 재료의 표면부(통상 20 μ m)에 국한되는 단점등으로 인해서 아직 일반적인 적용이 이루어지고 있지 않다.

반면 Barkhausen noise⁴⁻⁵⁾는 강자성체에 자장이 부가될 때 자구의 이동에 의해 발생하며, 이 noise의 발생이 재료에 존재하는 응력장에 민감하게 영향을 받는 현상을 이용하여 잔류응력을 측정하는 방법이다.

이 방법은 철계의 강자성재료에 국한된다는 단점이 있으나, 장비가 간단하며 Barkhausen noise 가 재료의 잔류응력뿐 아니라 미세구조와 경도에도 영향을 받기 때문에 철강재료의 잔류응력 및 경도를 정성적으로 평가하는 데는 많은 장점을 갖고있다.

따라서, 본 연구에서는 Barkhausen noise 에 대한 응력, 경도, 미세조직의 영향을 고찰하고, magnetoelastic method 에 의한 응력보정 실험과 X선 회절법에 의해 측정된 잔류응력을 비교하여 magnetoelastic method 를 이용하여 잔류응력을 정량적으로 평가하기 위한 기초 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1. Barkhausen Noise

강자성 재료는 자구벽에 의해 서로 분리된 자구로 구성되어 있다. 자장이 가해질 때 이 자구들은 bcc 인 재료의 경우 자화 방향인 <100>을 따라 포화된다. 이러한 재료에 외부에서 자장이 가해지면 자구벽의 이동에 의해 재료가 자화되며, 이때 자속밀도의 변화는 부드럽고 연속적인 것이 아니라 Fig.1 과 같이 불연속적이라는 것이 1919년 Barkhausen⁶⁾에 의해 발견되었다.

이때 발생하는 전기적인 신호를 Barkhausen noise 라 하며, Fig.2는 1/2 cycle 의 교류자장에 의해서 Barkhausen noise 가 어떻게 발생하는가를 보여준다. noise pulse 의 진폭은 자기유도의 변화 정도가 최대일 때, 즉 이력곡선의 기울기가 가장 클 때 최대가 되며, 이것은 Barkhausen noise intensity 가 이력곡선과 밀접한 관계를 갖는다는 것을 의미한다. Barkhausen noise 는 재료의 미세 조직과 응력에 의해 큰 영향을 받으며, 재료의 비파괴적인 평가에 매우 중요하다는 사실이

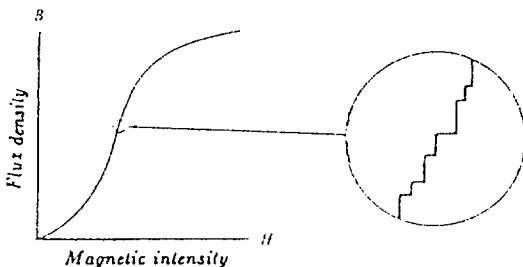


Fig.1. Barkhausen effect⁹⁾.

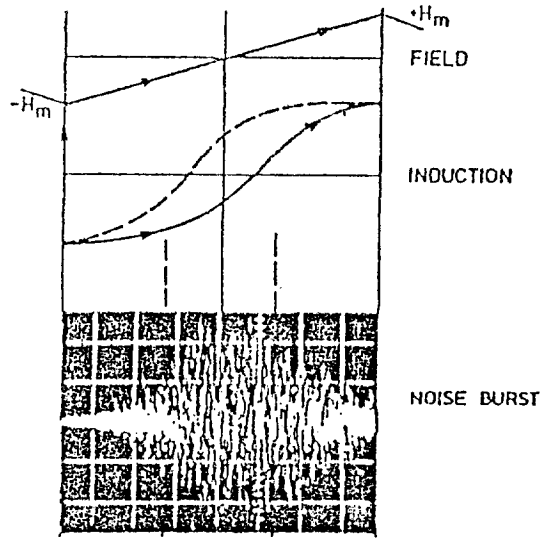


Fig.2. Magnetizing filed, sample induction and Barkhausen noise burst for one magnetizing half cycle.

1979년 Matzkanin 과 Beissner 등⁵⁾에 의해 제안되었다.

2.2. Magnetoelastic Effect

1865년 Villari⁷⁾는 강자성 재료에 탄성변형을 가했을 때, 가한 응력방향으로 재료의 투자율이 변화한다는 사실을 발견했으며 이러한 현상을 magnetoelastic effect 라 한다.

양(+)의 magnetostriction 을 갖고있는 재료는 인장 응력하에서 투자율이 증가하며, 음(-)의 magnetostriction 을 갖고있는 재료는 투자율이 감소한다. 양(+)이나 음(-)의 magnetostriction 을 갖고 있는 재료에 대한 인장응력의 영향을 나타내는 실험로서 Fig.3에 68% Permalloy 와 pure Ni, Co-based amorphous alloy 의 이력곡선을 나타내었다.

3. 실험방법

3.1. 시편준비

본 연구에서는 연강(mild steel)과, 기계 구조용재인 SM45C, SCM440 (KS 규격)을 시편으로 준비하였다.

3.1.1. 응력보정 실험용 시편

판상의 강재를 구입하여 210mm × 25mm × 7mm 의 크기로 가공하고 진공 관상로에서 각각 어닐링 및 노르 말라이징 처리를 한 후, SiC 연마지로 #600 까지 연마

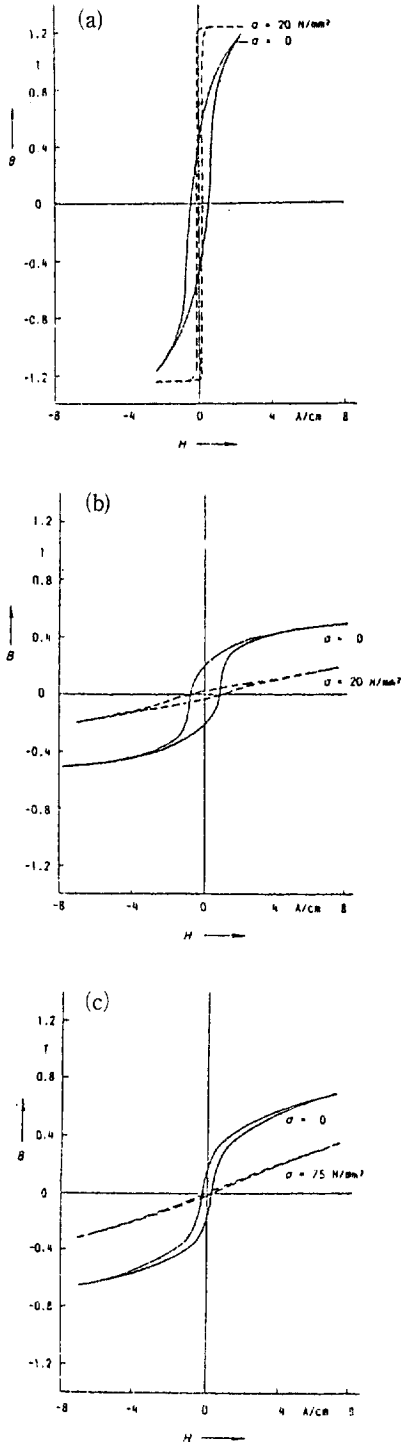


Fig. 3. Hysteresis loops under tensile stress σ .
 (a) Crystalline 68% NiFe, (b) crystalline pure Ni, (c) amorphous Co-based alloy.

하여 알콜과 아세톤으로 탈지 및 표면세척을 하였다. 이와같이 준비된 시편을 응력보정 실험을 하기 위하여 Photo.1과 같이 응력측정 위치에 스트레인 게이지를 접착하였다.

3.1.2. X선 응력 측정용 시편

X선 회절에 의한 잔류응력 측정용 시편은 10mm × 10mm × 5mm로 가공한 후, 기계적 연마로 발생하는 잔류응력의 변화를 억제하기 위해서 먼저 SiC 연마지로 #2000까지 연마한 후에 진공 열처리를 행하였다.

3.2. Magnetoelastic Stress Analyzer를 이용한 응력 측정

Magnetoelastic stress analyzer (AST, STRESS-CAN 500C system)는 철강재료 표면에 존재하는 잔류응력을 정성적인 수치(MP : Magnetoelastic Barkhausen Noise Parameter)로 측정하기 때문에 보정이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 응력 보정 실험으로 Cantilever beam test를 행하여 MP 값을 정량화 하고자 하였으며, 그 개략도를 Fig.4에 나타내었다. Cantilever beam test는 Photo.1과 같이 준비된 시편의 한쪽 끝을 고정시키고 반대편 끝에 가해진 외부하중에 의해 표면에 발생된 응력을 일정한 지점에서 Magnetoelastic stress analyzer를 사용하여 MP 값을 측정하고, 이때 접착된 스트레인 게이지로 가해진 외력에 따른 스트레인을 측정하여 응력을 계산하였다.

3.3. X선 회절을 이용한 잔류 응력 측정

여러 조건으로 열처리를 행한 SM45C와 SCM440에 대해서 Cr-K α 선($\lambda = 2.291 \text{ \AA}$)을 사용하여 X선 회절 시험(Rigaku Co., ROTAFLEX and STRAINFLEX model)을 하였다.

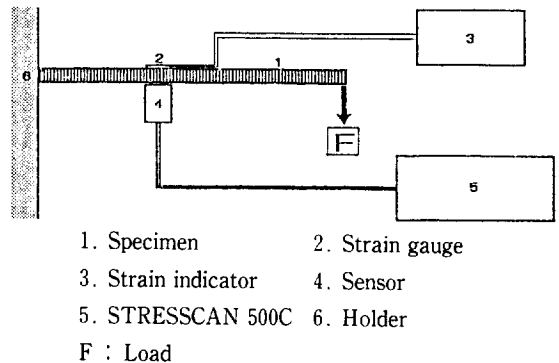


Fig.4. the schematic diagram of stress calibration experiment.

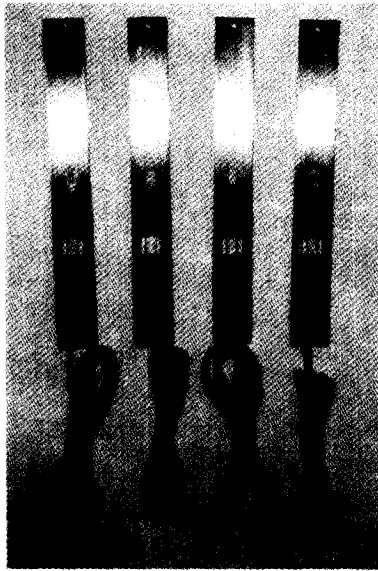


Photo 1. Specimens attached strain gauges for stress calibration experiments.

이때 측정오차를 최소한도로 줄이기 위해서 회절각이 크고 비교적 회절강도가 높은 Fe(211)면($2\theta = 156^\circ$)을 선택하여 잔류응력을 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. MP 값에 미치는 응력의 영향

4.1.1. 자기장 강도의 영향

Magnetoelastic Stress Analyzer 를 이용하여 MP 값 을 측정할때, 자기장의 강도에 따라 응력에 대한 MP 값 의 변화정도가 달라지며, 자기장의 강도가 너무 낮거나 높을 경우에는 Barkhausen noise intensity 의 변화가 미약하여 응력을 정확히 평가할 수 없다.

따라서 응력보정실험을 행하기 전에 5 종류의 시편에 대해서 적당한 자기장의 강도(MAGN : Magnetizing current fed to the sensor)를 결정하여 Table 1 에 나타내었고, 이 중에서 연강에 대한 결과를 Fig.5 에 나타내었다.

이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 가장 좋은 민감도를 갖는 자기장의 강도는 시편의 종류 및 응력측정깊이에 따라 다르기 때문에 정확한 응력보정실험을 행하기 위해서는 먼저 적절한 자기장의 강도(MAGN)를 결정하는 것이 선행되어야 한다.

Table 1. The Results of MAGN Setting for Best Stress Sensitivity

시편 \ 측정깊이	0.02mm	0.07mm	0.2mm
mild steel	30	30	30
annealed SM45C	30	30	30
normalized SM45C	35	25	30
annealed SCM440	25	25	25
normalized SCM440	70	70	55

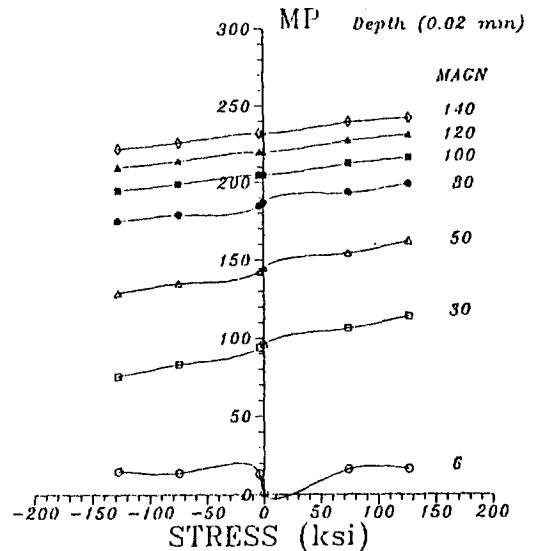


Fig.5. Uniaxial stress calibration curves determined for stress relieved MILD steel with a general purpose sensor. Best stress sensitivity is obtained at MAGN = 30.

4.1.2. 응력의 영향

Table 1 과 같이 결정된 자기장의 강도로 어닐링처리된 연강, SM45C, SCM440 에 대해 응력보정실험을 행하여 그 결과를 Fig.6~Fig.9 에 나타내었다.

Fig.6 은 연강에 대한 응력보정실험시에 역학적으로 계산한 응력과 스트레인 게이지로 스트레인을 측정하여 구한 응력을 비교한 결과이다.

이 그림과 같이 역학적으로 계산한 응력은 오차를 포함하고 있으며, 외력이 증가함에 따라 이러한 오차는 더욱 증가함을 알 수 있다.

따라서 응력보정실험을 행할때는 스트레인 게이지로

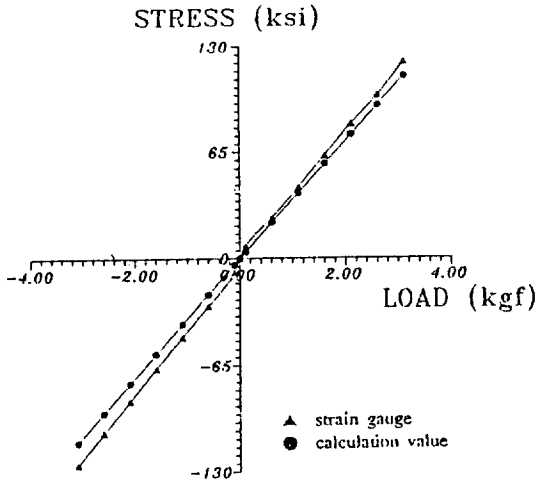


Fig. 6. Stress curves obtained by cantilever beam test and strain gauge method for MILD steel in uniaxial stress calibration experiment.

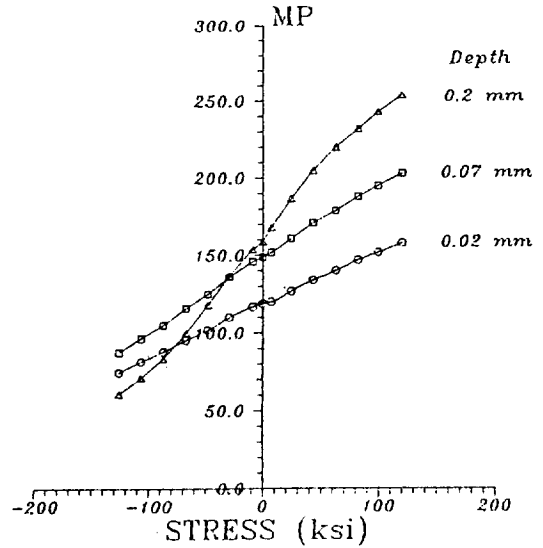


Fig. 7. Uniaxial stress calibration curves determined for stress relieved MILD steel with a general purpose sensor at MAGN = 30.

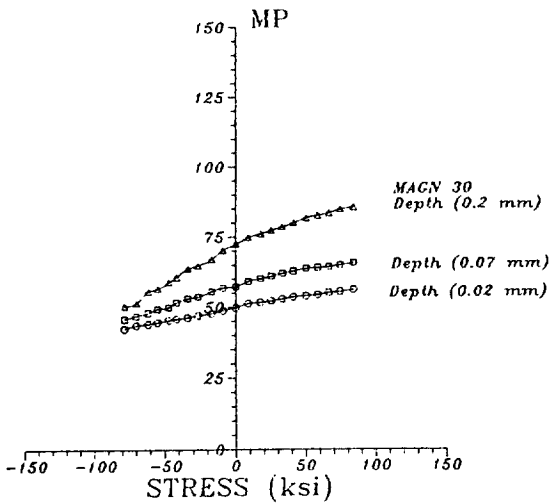


Fig. 8. Uniaxial stress calibration curves determined for annealed SM45C steel with a general purpose sensor.
(0.02mm : MAGN = 30, 0.07mm : MAGN = 30, 0.2mm : MAGN = 30).

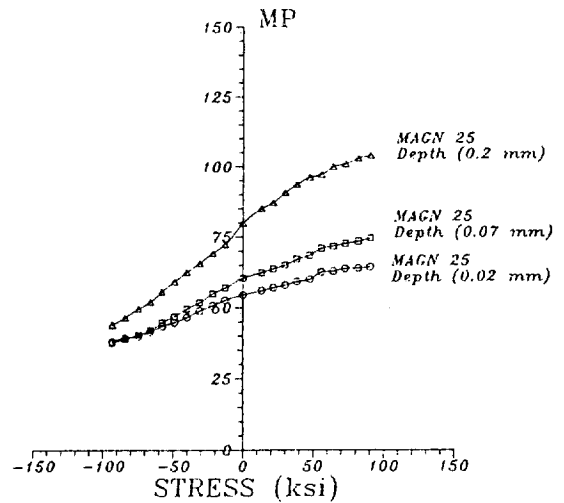


Fig. 9. Uniaxial stress calibration curves determined for annealed SCM440 steel with a general purpose sensor.
(0.02mm : MAGN = 25, 0.07mm : MAGN = 25, 0.2mm : MAGN = 25)

응력을 결정해야 하며, 이때에도 게이지를 정확한 위치에 접촉해야 한다. 또한 응력보정실험시에 외부응력에 따른 MP(Magnetoelastic Barkhausen Noise Param-

eter)값의 변화를 Fig.7~Fig.9에 나타내었다.

외부응력이 압축에서 인장으로 변화함에 따라 Barkhausen noise intensity(MP)는 모든 시편에 대해서 증

가하는 경향을 나타내고 있다.

이것은 본 연구에서 사용한 시편이 모두 자장을 가할 때 자장방향으로 부피가 팽창하는 양(+)의 magnetostriction 을 갖고 있는 재료이며, 이의 반대현상인 magnetoelastic effect 도 양(+)의 값을 나타내기 때문이다.

즉, 양(+)의 magnetostriction 을 갖고 있는 재료에 자기장과 동일한 방향으로 인장응력이 작용하면 인장응력에 평행한 자화방향을 갖는 자구들이 성장하게 되어 자화가 용이하게 되며, 이때 발생하는 Barkhausen noise intensity 가 증가하는 것으로 생각된다.

4.2. MP 값에 미치는 조직 및 경도의 영향

열처리에 따른 조직 변화가 응력보정실험시 MP 값에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 어닐링 및 노르말라이징 처리한 SM45C 와 SCM440 에 대해서 동일한 자기장의 강도(MAGN)로 MP 값을 측정하여, 그 결과를 Fig. 10 과 Fig.11 에 나타내었다.

어닐링처리한 시편이 노르말라이징 처리한 경우에 비해서 동일한 응력과 측정깊이에서 높은 MP 값을 나타내고 있다. 이것은 어닐링처리한 시편이 내부결함이나 잔류응력이 적어서 자구벽의 이동이 용이하기 때문에, 이

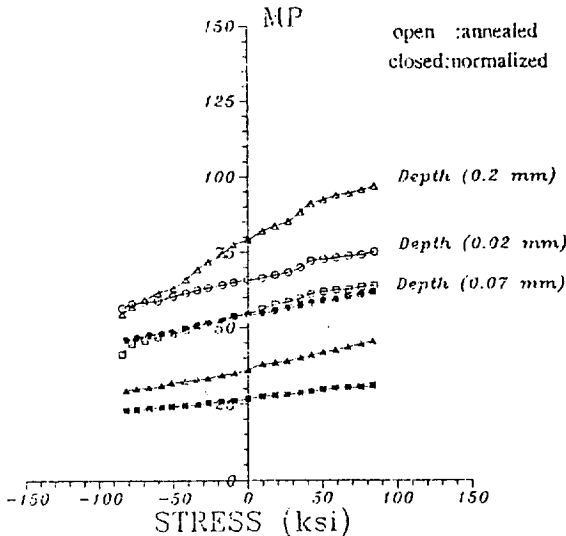


Fig. 10. Uniaxial stress calibration curves determined for annealed and normalized SM45C steels with a general purpose sensor.
(0.02mm : MAGN = 35, 0.07mm : MAGN = 25, 0.2mm : MAGN = 30)

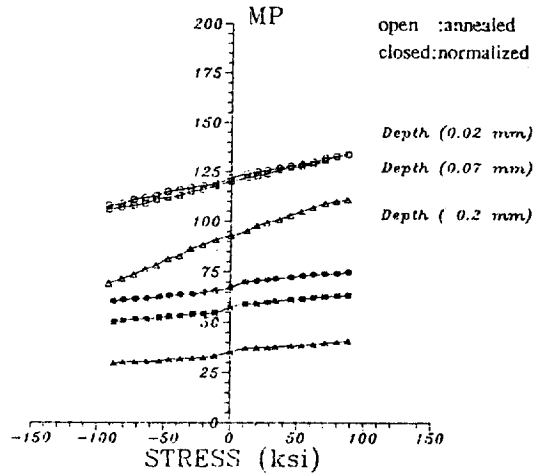


Fig. 11. Uniaxial stress calibration curves determined for annealed and normalized SCM440 steels with a general purpose sensor.
(0.02mm : MAGN = 70, 0.07mm : MAGN = 70, 0.2mm : MAGN = 55)

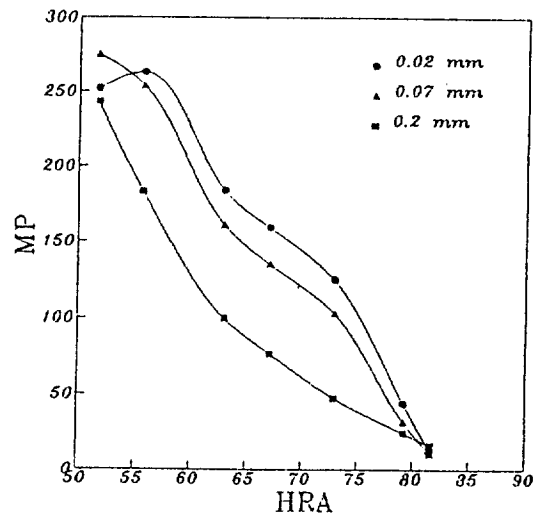


Fig. 12. The effects of hardness on the MP values measured at MAGN = 80 for SM45C steels.

때 발생하는 Barkhausen noise intensity 가 증가하여 더 높은 MP 값을 나타내는 것으로 사료된다.

또한 여러 조건으로 열처리된 SM45C 와 SCM440 의 경도와 MP 값과의 관계를 각각 Fig.12 와 Fig.13 에 나타내었다.

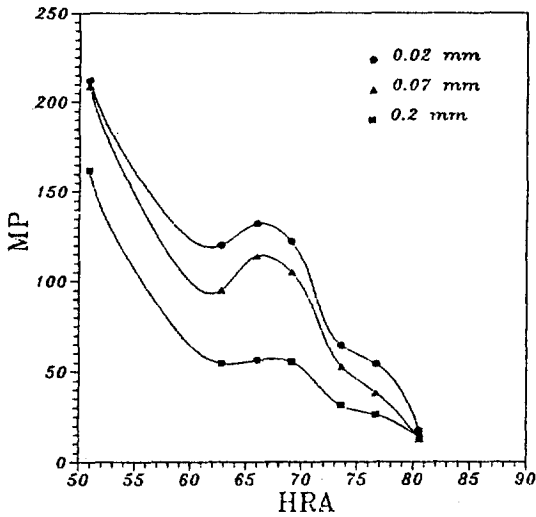


Fig.13. The effects of hardness on the MP values measured at MAGN = 80 for SCM440 steels.

공히 시편의 경도가 증가함에 따라 MP 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 결정립 미세화와 내부결함 등에 의한 경도의 증가가 자구벽의 이동을 억제하기 때문인 것으로 생각된다.

그러나 Fig.13에서 노르말라이징 처리한 SCM440의 경도는 HRA 62.8로서 500℃와 600℃에서 템퍼링했을 때의 경도, HRA 69.7과 66.0 보다 낮은 값을 갖고 있으나, MP 값은 템퍼링처리한 시편보다도 감소하였다.

조직관찰결과⁹⁾ 노르말라이징 처리한 SCM440은 미세하며 불규칙한 band structure를 갖고 있음을 확인하였다. 이 결과는 Barkhausen noise intensity가 경도와 미세 조직에 의해서 복합적으로 영향을 받는다는 사실을 의미한다.

4.3. X선 회절법에 의해 측정된 잔류 응력과 MP 값의 비교

Magnetoelastic method는 응력보정실험 후 정량적인 응력 측정이 가능하고 이 보정값에도 상당한 오차를 포함하고 있으며, 재료에 이미 존재하는 잔류응력의 측정 은 불가능하므로 X선 회절법⁹⁾을 이용하여 잔류응력을 측정하였다.

X선 회절법으로 켄칭 및 템퍼링처리한 SM45C와 SCM440의 잔류응력을 측정한 결과를 어닐링처리한 시편으로 응력보정 실험을 할 때 측정된 MP 값(측정값

Table 2. The Comparison of MP Values and Residual (or Applied) Stresses Measured by Various Methods for SM45C Steel.

(stress 단위 : ksi)

열처리 상태	Stress (by XRD)	MP	annealing 시편	
			Stress (strain gauge)	MP
quenching	-24.3	12.3	-26.5	47.2
200℃ tempering	-17.6	43.8	-16.9	47.8
400℃ tempering	-12.5	125	*	*
500℃ tempering	-11.6	159	- 9.0	48.8
600℃ tempering	-5.8	184	*	*

Table 3. The Comparison of MP Values and Residual(or Applied) Stresses Measured by Various Methods for SCM440 Steel.

(stress 단위 : ksi)

열처리 상태	Stress (by XRD)	MP	annealing 시편	
			Stress (strain gauge)	MP
quenching	-18.5	17.4	-21.7	50.8
200℃ tempering	-17.6	54.2	*	*
400℃ tempering	-12.2	64.3	-12.7	52.8
500℃ tempering	- 9.9	122	*	*
600℃ tempering	- 9.1	132	*	*

이 : 0.0.2mm)과 비교하기 위해서 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

X선 회절법에 의해 잔류응력을 측정한 결과, 켄칭한 시편은 모두 압축잔류응력을 갖고 있으며, 이 시편을 템퍼링할 경우, 템퍼링 온도가 증가함에 따라 압축잔류응력이 점차 감소함을 알 수 있다. 이것은 템퍼링처리로 인한 마르텐사이트의 분해 및 압축잔류응력의 감소¹⁰⁾에 기인한다.

어닐링처리한 SM45C와 SCM440으로 응력보정실험을 행하여 구한 응력과 X선 회절법으로 측정된 응력을 비교하면, SM45C는 Table 2와 같이 켄칭 및 200℃, 500℃에서 각각 템퍼링처리한 시편의 경우와 비교가 가능하다. X선 회절법에 의한 측정값, -24.3, -17.6, -11.6 ksi와 가장 유사한 응력인 -26.5, -16.9,

-9.0 ksi 에 해당하는 MP 값은 각각 47.2, 47.8, 48.8 이다.

또한 퀘칭 및 400°C에서 템퍼링처리한 SCM440 에 대해서도 Table 3 과 같이 X 선 회절법에 의해 측정된 응력 -18.5, -12.2 ksi 와 비슷한 응력은 스트레인 게이지로 측정했을때 -21.7, -12.7 ksi 이며, 이것에 해당하는 MP 값은 각각 50.8 과 52.8 이다.

이와같이 응력보정실험시에 어닐링처리한 시편에 대해서 측정된 MP 값과 퀘칭 및 템퍼링처리한 시편에 대한 MP 값을 비교하면 절대값은 차이를 나타내지만 경향은 일치하고 있다.

즉, 퀘칭 및 템퍼링처리한 시편에 대한 X 선 회절실험결과와 어닐링처리한 시편에 대한 응력보정실험으로부터, 압축응력이 감소할수록 MP 값이 증가한다는 사실을 알 수 있다.

5. 결 론

Magnetoelastic method 를 이용하여 여러조건으로 열처리를 행한 연강(mild steel), SM45C, SCM440 에 대해서 표면경화층의 잔류응력, 미세조직 및 경도가 MP (Magnetoelastic Barkhausen Noise Parameter) 값에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시편은 모두 양(+)의 magnetostriction 을 갖고 있기 때문에 인장응력은 재료의 투자율을 증가시켜 MP 값이 거의 직선적으로 증가하며, 압축응력을 가하면 MP 값은 감소한다.

2) 결정립 미세화, 합금원소의 첨가, 내부결함의 도입 등에 의한 경도의 증가는 MP 값을 감소시킨다. 이것은 imperfection 의 존재가 자구벽(magnetic domain wall)의 이동을 방해하여 Barkhausen noise 의 발생을 억제하기 때문이다.

3) X 선 회절법으로 측정된 잔류응력은 magnetoelastic method 에 의해 측정된 MP 값과 같은 경향을 나타내었다. 그러나 Barkhausen noise 의 발생은 재료의 미세구조, 경도 및 잔류응력 등에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에, MP 값을 정량화하기 위해서는 Bark-

hausen noise 에 미치는 여러 인자에 대한 고찰 및 다른 응력측정방법과의 비교연구가 필요하다고 사료된다.

「후 기」

본 연구는 한국 기계 연구원의 연구과제중의 일부로서 본 연구를 위한 한국기계 연구원의 적극적인 후원에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. R.G. Bathgate, J. Brit. Soc. for Strain Measurement 4, No.2 (1968).
2. Proceedings of a Workshop on Nondestructive Evaluation of Residual Stresses, AFML, NTAIC-76-2, Southwest Research Center, San Antonio, TX. (1976).
3. I.C. Noyan and J.B. Cohen, "Residual Stress : Measurement by Diffraction and Interpretation," Springer-Verlag, New York (1987).
4. C.D. Gardner, AMMRC CTR 72-22, Army Material and Mechanics Research Center, Watertown, MA. (1972).
5. G.A. Matzkanin et al, "The Barkhausen Effect and its Application to NDE, SWRI Report No. NTIAC-79-2, Southwest Research Center, San Antonio, TX. (1979).
6. H. Barkhausen Phys. Z, 29, 401, (1919).
7. E. Villari, "Change of Magnetization by Tension and Electric Current," Ann. Phys. Chem. 126 (1865) P87-122.
8. 김문일, "Magnetoelastic Method 를 이용한 표면 경화층의 잔류응력 및 경화특성 예측," 연세대학교 산업기술연구소 연구보고서 (1991) P38.
9. B. D. Cullity, "Elements of X-Ray Diffraction" 2nd ed. Wiley, New York (1974) P447-478.
10. 김문일, 신영식, "열처리 공학," 반도출판사, 서울, (1990) P67-71.