

강제의 레이저 표면경화 공정제어를 위한 경화층깊이의 실시간 측정에 관한 연구

우 현구 박 영준 조 형석 한 유희
한국과학기술원 생산공학과 한국해사기술연구소

A Study on In-Process Measurement of Hardening Depth for LASER Surface Hardening Process Control

H.G. Woo Y.J. Park H.S. Cho Y.H. Han

Dept. of Production Eng. KAIST LASER Lab, KRISO

ABSTRACT

This paper proposed that the eddy-current measurement method can be used a means of in-process measuring the hardening depth in Laser surface treatment process. Also, this paper deal with the numerical analysis of magnetic flux distribution and experimental result of measurement.

In Laser heat treatment process of steels, a thin layer of the substrate is rapidly heated to austenitizing temperature and subsequently cooled at a very fast rate due to the self-quenching by heat conduction into the bulk body, to produce a martensite structure which have low magnetic permeability. The eddy-current measurement method depends on the properties of material to be measured such as electric conductivity, magnetic permeability and geometry. In this paper, the hardening depth was measured by detecting relevant magnetic permeability changes caused by heat treatment of steels.

1. 서론

고출력의 레이저는 가공하고자 하는 부분에만 매우 높은 에너지 밀도를 유발시킬수 있어 많은 부분을 가열시켜야 하는 통상적인 방법보다 가공이 빠르고 독특한 조직을 얻을 수 있을뿐만 아니라, 부품의 내부에 열로 인하여 야기 되는 열응력, 뒤틀림 및 균열등을 방지할 수 있어 부품의 손상을 최소한으로 할 수 있고, 복잡한 부품의 가공도 용이하게 할 수 있다. 따라서 레이저는 금속의 표면경화와 금속의 용접등 재료의 여러 열가공 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 레이저에 의한 재료가공은 많은 장점도 가지고 있는 반면에 매개 변수가 많고, 또한 종래의 가공 기술과 달리 표준화가 되어 있지 못하며, 가공의 재현성이 떨어지는 등의 단점도 지니고 있다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위하여서는 경화층의 질을 개선하고 이를 일정하게

유지시키기 위해 공정의 제어가 이루어져야 하며 형성된 경화층 깊이를 정확히 예측하고 이를 일정하게 유지되도록 제어하기 위해서는 경화층의 깊이를 정확히 대변할 수 있는 공정변수의 선정과 이를 측정할 수 있는 모니터링 장치가 필요하다.

보통 경화층깊이의 측정은 제품을 절단하여 표면으로부터의 경도를 측정해서 어느 한계경도에 이르는 곳까지의 길이로 결정하는데(1), 이러한 파괴적인 방법은 경제적, 시간적인 손실이 심하고 전수검사가 어려우며 공정의 자동화를 위한 실시간 측정이 불가능하므로 비파괴적 방법(non-destructive measurement method)이 필요하다.

이미 발표된 재질물성의 측정에 관한 비파괴적 방법은 그림 1에 나타낸 바와 같이 여러가지가 있으며(2,3), 이 많은 연구중 경화층 깊이의 실시간측정에 적합한 방법으로는 재료의 전자기적 성질(electromagnetic properties: 투자율)의 변화를 이용하여 와전류로 측정하는 방법과 초음파를 이용하는 방법(4), 그리고 재료의 전기전도도(electic con-

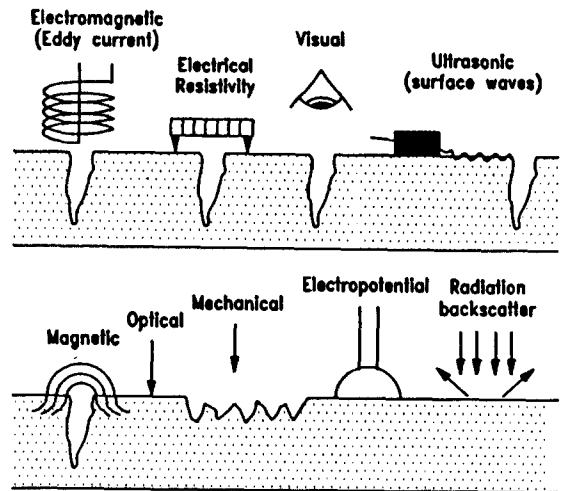


그림 1 비파괴 시험 방법들

Fig. 1. Methods of nondestructive testing

ductivity)의 변화를 이용하여 양단의 전위차를 측정하는 방법등이 있으며(5), 간접적 방법으로는 재료의 표면온도를 측정하여 경화층의 깊이를 추정하는 것이 있다.(6,7) 그러나 초음파를 이용하는 방법(4)은 움직이고 있는 재료의 경화층 측정에는 어려움이 있으며, 경화층 양단의 전위차를 측정하는 방법(5)은 균일한 전기장을 미리 재료 내부에 형성시켜야 하므로 실시간 측정에는 어려움이 있고 또한 적외선 온도센서(pyrometer)를 이용한 온도 측정방법(6,7)은 한점의 온도를 측정하여 재료 전체의 온도분포에 관련되는 경화층의 깊이를 추정하기에 어려움이 있어서 본 논문에서는 와전류를 이용하여 경화층의 깊이를 측정하고자 한다. 이에 관한 연구는 자동차 추진축(axle shaft)과 같은 환봉 재료에 대해서는 발표된 바 있으나(8), 평면 재료를 레이저 표면 경화 처리한 시편에 대한 자료는 빈약하다.

따라서 본 논문에서는 레이저 표면경화 처리 공정에서 재료의 경화층 깊이를 일정하게 유지되도록 제어하기 위해 경화층 깊이를 측정할 수 있는 모니터링 장치로서 와전류를 이용한 측정장치를 제안하고 이의 타당성을 입증하는 것을 목적으로 한다. 이것은 재료가 상변태 과정을 거칠때, 조직의 변화가 있을때에 물성의 변화, 특히 자기적 부자율이 변한다는 사실을 이용하는 것으로서 본 논문 연구는 이의 타당성을 입증하기 위해 전자기장의 유한요소법에 의한 방법으로 와전류를 해석하여 이론적으로 입증하고, 또한 실제 실험을 통하여 이의 사실을 뒷받침한다.

2. 레이저를 이용한 강재의 표면 경화

레이저에 의한 강재의 표면경화 처리공정은 그림 2 에서와 같이 재료의 표면에 집중된 레이저 빔을 조사시켜 재료 내부로의 열전도에 의해 표면의 국부적인 층만을 경화시키는

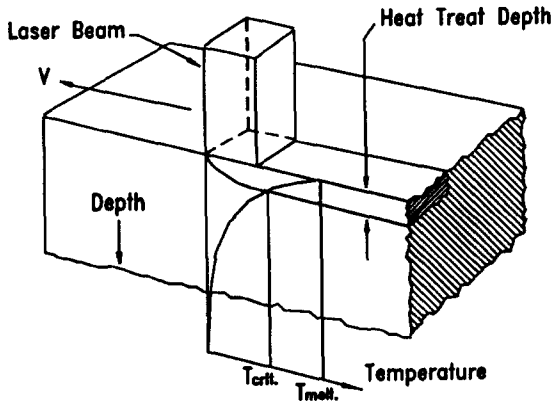


그림 2 레이저에 의한 강재의 경화공정의 개요
(V = 상대속도, I = 빔폭, Tcrit = 최소변태점
Tmelt = 재료의 녹는점)

Fig. 2. The concept of transformation hardening of ferrous materials by laser beam

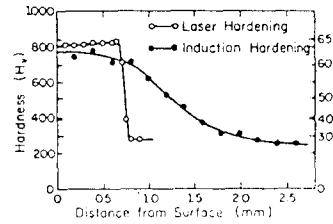


그림 3 레이저 경화법과 유도 경화법에서의 경도분포 비교
Fig. 3. Hardness distributions in laser hardening and induction hardening

공정으로서 종래의 경화 처리공정과는 달리 재료 내부의 성질에는 영향을 주지 않고, 표면만을 마르텐사이트 조직으로 만들어준다. 이러한 레이저 경화 처리공정은 현상적으로 볼때 크게 세부분으로 나누어 생각할 수 있다. 첫번째는 가열부분으로 순철과 퍼일라이트로 구성된 원래의 재료의 조직을 A3 변태점 이상의 온도로 가열하여 재료의 표면 얇은 층을 오스테나이트 조직으로 만들어준다. 그리고 두번째는 유지부분으로 가열과 냉각의 사이에서 재료의 국부적인 얇은층의 온도를 탄소의 확산이 충분히 일어날 수 있도록 오스테나이트 온도로 유지시켜 준다. 마지막 세번째는 냉각 부분으로 레이저 빔이 이동하면 표면에 집중된 열은 치밀하게 연속된 기지조직 내부로 급속히 전달되면서 표면층은 높은 냉각률을 갖게 되어 정상적인 고상변태가 이루어지지 못하고 준안정조직인 마르텐사이트 조직으로 변태된다. 이러한 재료내의 자기담금질 효과(self-quenching effect)는 종래의 경화법으로는 얻기 어려운 효과로, 부가의 냉각제 없이 급속의 기지조직은 변화시키지 않으면서 표면의 얇은 층만을 경화시키게 된다. 그림 3 은 레이저의 빠른 가열과 냉각으로 인해 향상된 표면 경화층의 경도를 고주파 유도 경화법에 의한것과 비교하여 보여준다.(9)

위의 설명에서와 같이 레이저 표면경화 처리공정에 의해 재료를 가공할때 재료내에는 온도에 따른 상변태가 일어나게 된다. 이러한 강재의 상변태에서는 재료의 여러 물성치에 큰 변화가 수반된다(10). 특히 자기적 부자율의 온도에 따른 변화를 보면 A2 변태점을 지나면서 크게 감소하고, A3 변태점 이상의 온도에서 생성되는 오스테나이트 조직은 거의 비자성체에 가깝다. 또한 냉각된 후 표면 경화층에 형성된 마르텐사이트 조직도 결정 격자의 어긋남이 자벽이동을 방해하기 때문에 기지조직에 비해 매우 적은 부자율을 갖는다. 따라서 이러한 물성치의 변화를 와전류를 이용하여 측정함으로써 표면 경화층의 깊이를 측정할 수 있다.

3. 와전류법을 이용한 경화층 깊이 측정 원리

그림 4 (a)와 같이 교류가 흐르는 코일 1 에 코일 2 를 근접시키면 전자기유도에 의해 코일 2 에는 교류의 기전력이

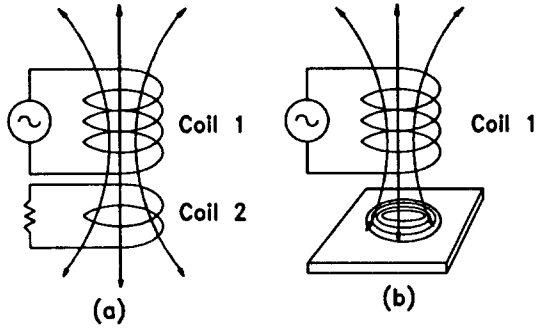


그림 4 전자기유도와 와전류
Fig. 4. Electromagnetic induction and eddy current

유기되는데 이때 코일 2 가 폐회로를 구성하고 있으면 유도 전류가 흐른다. 또한 코일 2 에 흐르는 교류 역시 코일 1 에 유도 전류를 발생시키기 때문에 부하의 변동에 비례하여 코일 1 의 교류의 기전력도 증감한다. 그림 4 (b)처럼 코일 2 대신 금속판을 코일 1 에 접근시키면 도체인 금속판에는 동심원상의 교류인 유도전류가 흐르는데 이를 와전류(eddy-current)라 한다. 와전류 회로의 기전력은 코일의 리액턴스(reactance)에서 발생하는 E_1 과 부하 저항에 의해서 발생하는 E_2 가 90°의 위상차를 가지고 발생하며, (그림 5 (b)) 이를 일정한 전류값 I 로 나누면 그림 5 (c)와 같이 저항과 리액턴스의 두 성분으로 이루어지는 임피던스(impedance) 평면이 된다. 결국 임피던스 Z 는

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$$

이 되며, 시편의 재질이 변화하면 이 임피던스 값은 증감하므로 이 변화를 측정하여 시편의 상태를 추정할 수 있다.

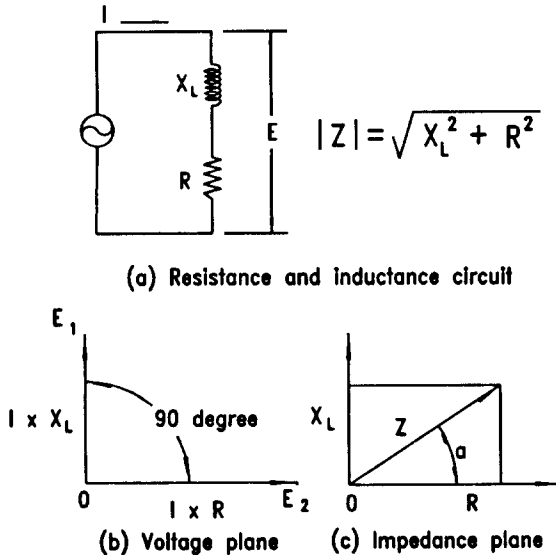


그림 5 전압과 임피던스 평면도
Fig. 5. Voltage plane and impedance plane diagrams

이 와전류의 임피던스에 영향을 미치는 중요 인자들은 전기 전도도(electric conductivity), 자기 투자율(magnetic permeability), 교류 주파수(frequency), 시편의 기하학적 형상(geometry) 등이 있다. 시편의 재료가 철강, 니켈, 코발트와 같은 강자성체인 경우에는 위의 여러 인자들중 투자율의 영향이 가장 크게 나타나며, 일반적으로 투자율과 임피던스는 비례 관계가 있다. (11)

앞의 설명과 같이 표면 경화층인 마르텐사이트 조직은 기지조직에 비해 매우 적은 자기적 투자율을 가지며, 전기적 전도도는 거의 비슷한 값을 갖는다. 따라서 원래의 재료의 조직이 경화 처리후 마르텐사이트 조직으로 바뀌면 임피던스 값은 낮아지게 되고, 경화층 깊이가 깊어질수록 임피던스의 값은 비례적으로 낮아진다. 따라서 일반적인 갭센서에 의해 측정을 하였을 경우 표면 경화처리 전에 비해 후에는 갭센서가 일정한 거리에 떨어져 있음에도 불구하고 원래보다 더욱 가깝게 있는 것처럼 측정이 된다. 이것은 와전류를 사용한 갭센서에서 측정하는 것이 임피던스의 변화를 측정하는 것이기 때문이다. 따라서 일반적인 와전류를 사용한 갭센서에 의해서도 경화층의 깊이를 측정할 수 있다.

4. 유한요소법에 의한 전자기장의 이론적 해석

해석하고자 하는 대상 영역내에 시간에 따라 변화하는 입력전류 J_0 가 가해지는 경우 본래의 자계에 반대방향으로 역자계를 형성하게하는 와전류 J_e (유도전류밀도)가 도체내에 유기되므로 이에 의한 합성자계를 H 라 하면 암페어의 법칙으로부터 다음과 같은 전자방정식을 얻을수 있다.

$$\text{rot } H = J_0 + J_e$$

이제 이 와전류에 의한 전자기장의 자속 분포특성을 유한 요소법을 사용하여 해석하기 위해서는 이의 영향을 고려하여 계지배방정식을 유도하여야 한다. 위의 전자방정식으로부터 시간 의존장에 대해 자기 벡터 포텐셜(vector potential)에 의한 계지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu} \text{rot} A \right] + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \text{grad} \phi - J_0 = 0$$

여기서 μ 는 자기 투자율, σ 는 전기 전도도, J_0 는 계에 가해진 입력 전류, A 는 자기 벡터 포텐셜, 그리고 $\text{grad} \phi$ 는 해석영역의 경계조건에 의해서 결정되는 항이다.

이제 위의 계지배방정식으로 표현되는 해석영역에 대해 유한요소법을 적용하여 근사적인 해를 구하기 위해 변분 원리를 이용한 범함수를 유도하면 다음과 같다.

$$x = \int_V \left[\frac{1}{2\mu} (\text{rot} A)^2 + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) \cdot A - J_0 \cdot A \right] dV + \int_{\gamma_2} (H_2 \times A) \cdot d\gamma$$

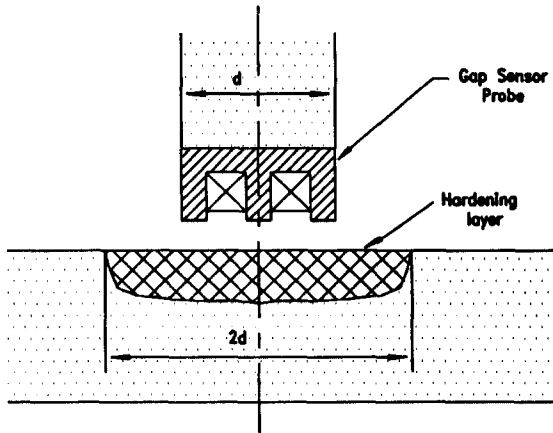


그림 6 해석 대상영역내의 센서 프로브와 경화층의 구성도
 Fig. 6. Geometry of sensor probe and hardening layer in analyzed fields.

여기서, H_2 는 경계 ν_2 상에서 주어진 비제차형 자연경계 조건(Neumann B.C.)이다.

와전류를 이용한 센서에서는 그림 6 에서 보는바와 같이 측정 대상 물체의 표면이 센서 프로브 지름의 2 배가 되면 측정에 문제가 없다는 사실에 입각하여 경화층의 폭이 프로브 지름이 2 배가 되므로 해석 대상영역을 확대칭 3 차원 문제로 간주하여 z-축을 중심으로 한쪽면에 대하여 2 차원 평면상의 문제로 간단화시켰다. 또한 기지조직과 경화층 조직의 상이 급격한 온도상승과 하강으로 인하여 일정하게 분포한다고 가정하여 재료내의 물성 즉, 자기투자율과 전기전도도가 각각 일정한 값을 갖는것으로 하여 해를 구하였다. 본 연구에서는 2 차원 평면상에서 해석 대상영역을 삼각형 요소로 분할하였으며, 경화층의 깊이를 여러가지로 변화시켰을때의 해석 결과를 그림 7 에 나타내었다.

5. 실험 방법 및 결과

본 실험은 레이저 경화처리후 형성된 표면경화층 깊이의 증감 즉, 마르텐사이트 양의 증감에 따른 재료의 투자율을 측정하기 위하여 와전류 측정의 원리를 이용하는 상용화된 직경 5 mm 의 갭센서(gap sensor, AEC 사 제품(일본))를 이용하였으며, 센서의 프로브(probe)는 시편의 바로 위 0.5 mm 지점에 위치시켜 고정하였다. 그리고 이송 테이블(X-Y table) 위에 시편을 고정시켜 일정한 속도로 이송시키면서 센서의 출력인 전압신호를 퍼스널 컴퓨터(PC, personal computer)를 이용하여 연속적으로 측정하였다. 그림 8 는 실험 장치의 구성을 개략적으로 보여준다.

실험에 사용된 시편은 열간 압연된 S45C 의 강재를 크기 300 mm x 50 mm, 두께 10 mm 로 절단하여 표면을 연마하여 깨끗이 한후 광의 흡수율을 높이기 위해 탄소피막을 코팅하여 사용하였다. 경화층 깊이는 표면 경화처리 후 단면을

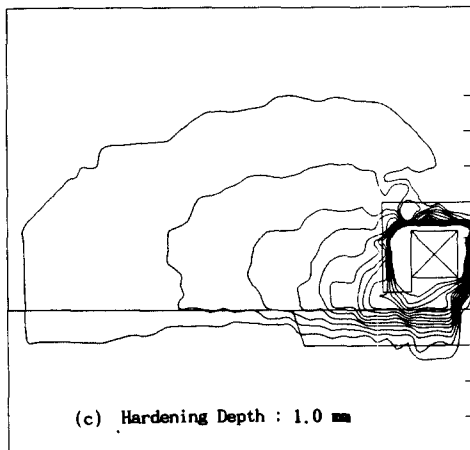
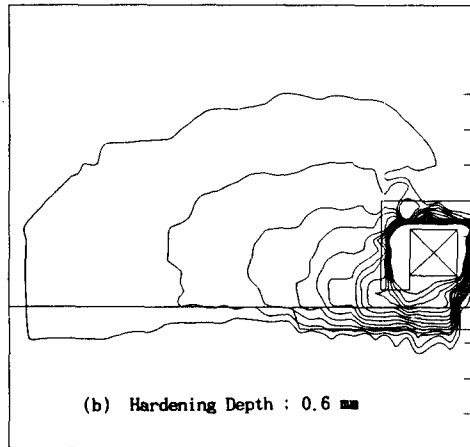
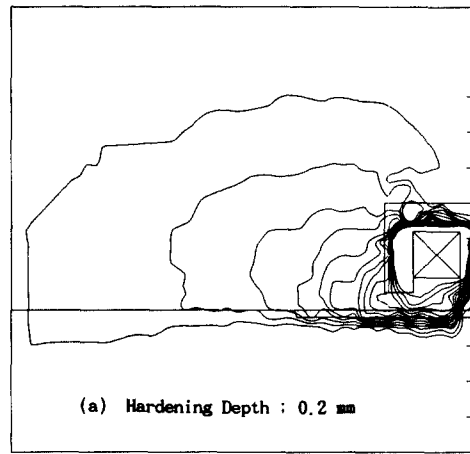


그림 7 유한요소법에 의한 해석 결과 - 해석 영역내의 등자속분포도

Fig. 7. Result of FEM analysis - Equi-potential line diagram in analyzed fields.

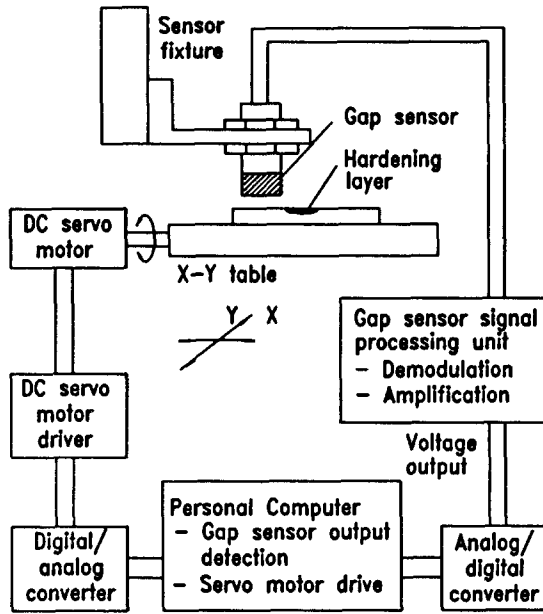


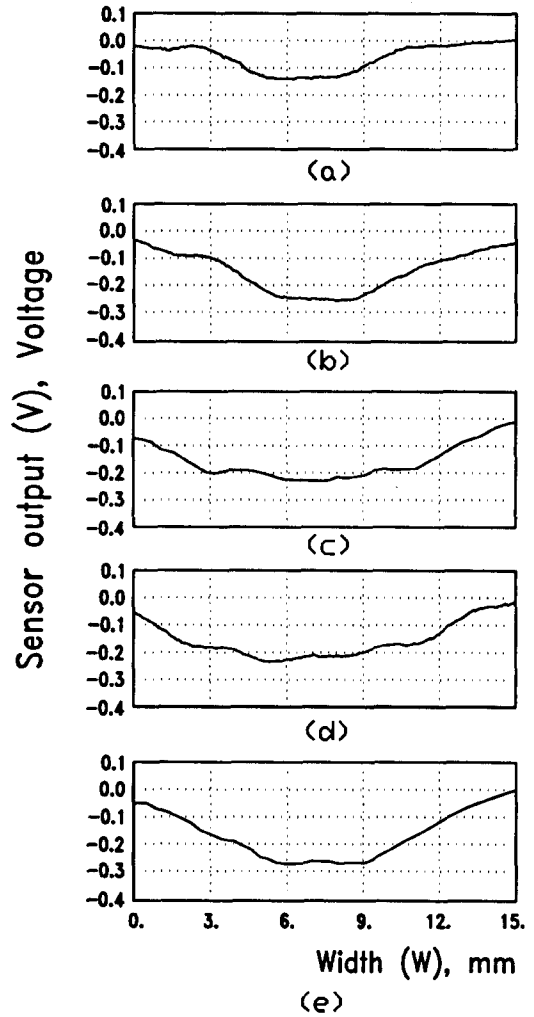
그림 8 실험장치의 개략적인 구성도
Fig. 8. Schematic diagram of experimental setup

절단하고 연마한후 에칭(etching)하여 보여지는 경화층 단면중 가장 깊은곳을 측정한 값이다.

X 축 방향으로 경화 경로를 가로지르며 측정한 결과를 그림 9 에 나타내었으며, 열입력의 증가에 따라 경화층 깊이는 선형적인 비례 관계를 갖고 증가하였으나, 센서의 출력값은 선형적인 비례 관계를 보이지 않았다. 즉 실험에 사용된 갭 센서의 출력값이 경화층의 깊이가 깊을때보다 얕을때 더욱 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 이것은 와전류형의 센서가 지니는 특징인 표준침투깊이(SPD, Standard Penetration Depth)의 영향 때문인 것으로 생각되어진다. 이 와전류의 표준침투깊이는 재료의 전기전도도와 자기 투자율, 그리고 인가되는 주파수에 의해 영향을 받게 되므로 주파수를 조정함으로써 관심되어지는 경화층의 영역에서 보다 민감한 반응을 얻도록 할수 있으리라 생각된다. 그리고 그림 9 (b)의 경우에 있어서는 센서신호가 경화층의 깊이가 더 깊은 (c) 와 (d) 의 센서신호보다 큰 값을 나타내었는데 이것은 표면에 존재하였던 불순물의 영향이거나 재료자체의 상이 변화하여 다른 물성치를 갖게된 영향때문이라 추측된다.

6. 결 론

앞의 와전류 전자기장에 대한 유한요소법에 의한 이론적 해석과 상용화된 와전류형 갭 센서를 이용해 경화층의 깊이를 측정한 결과는 경화층의 깊이를 측정하기 위한 방법으로서 와전류법이 사용될 수 있음을 보여준다. 다만



No.	빔강도 (kW)	이송속도 (m/min)	입열량 (J/mm ²)	경화깊이 (mm)	센서신호 (V)
a	3.8	1.50	13.68	0.425	0.1401
b	2.0	0.50	21.60	0.523	0.2534
c	3.0	0.75	21.60	0.639	0.2289
d	3.8	1.00	20.52	0.733	0.2319
e	3.0	0.50	32.40	1.057	0.2722

(Spot size : 10 x 10 mm)

그림 9 실험 결과 - 경화층 깊이와 갭 센서신호와의 관계
Fig. 9. Experimental result - Relation between hardening depth and gap sensor output across the laser beam traveling direction

상용화된 갭 센서의 경우에 있어서는 인가주파수가 거리의 변화에 민감하게 되도록 고정되어 있기 때문에 우리가 원하는 재질 물성의 변화에 의한 임피던스의 변화를 감지하는 것보다 약간의 거리의 변동에 더 민감하게 반응하여 와전류 신호를 얻게 될지도 모르며, 또한 와전류의 표준침투깊이에

한계가 있도록 주파수가 고정되어 있기 때문에 우리가 요구하는 경화층깊이의 영역까지에 대해 민감한 반응을 보이기는 어렵다. 따라서 와전류형의 센서를 사용하여 경화층의 깊이를 실시간으로 측정하기 위해서는 인가되는 주파수를 조정할 수 있고 신호의 처리에서 재질의 물성변화에 의한 임피던스의 변화를 가장 명확하게 나타내 줄 수 있도록 신호처리 회로를 재구성시켜야 한다. 이러한 일련의 작업을 통해 보다 정확한 측정 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] KS : D0215, "Methods of Measuring Case Depth for Steels", 1985
- [2] "Nondestructive Inspection and Quality Control", Metals Handbook, ASM, Vol.11, 8th ed. 1976
- [3] Ernest O. Doebelin, "Measurement Systems : Application and Design", McGraw Hill International Edition 4th ed., 1990
- [4] J.F. Bussiere, "On-Line Measurement of the Microstructure and Mechanical Properties of Steel", Material Evaluation, Vol.44, pp560-567, April 1986
- [5] V. Rubruck, E. Geissler, H.W. Bergmann, "Case Depth Control for Laser Treated Materials", 3rd European Conference on Laser Treatment of Materials, Vol 1, pp207-216, 1990
- [6] H.W. Bieler, A. Gasser, G. Herziger, E.W. Kreutz, J. Seelhorst, W. Sokolowski and K. Wissenbach, "Methods of Adaptive Control in Surface Processing with Laser Radiation", 2nd ECLAT, pp46-53, 1988
- [7] H.W. Bergmann, E. Gaissler and Erlargen, "On-Line Computer Controlled Laser Hardening", 2nd ECLAT, pp109-113, 1988
- [8] C.H. Stephan and H.L. Chesney, "Computer - Aided Measurement of Case Depth and Surface Hardness in Automobile Axle Shafts", Materials Evaluation, Vol. 42, pp1612-1618, Dec. 1984
- [9] J. Mazumder, "Laser Heat Treatment : The State of Art", Journal of Metals, pp18-26., May 1983
- [10] 박 회선, "철강 재료학", 동명사, pp103-105, 155-176 1982
- [11] "Electromagnetic Testing", Nondestructive Testing Handbook, 2nd ed., Vol.4
- [12] N. Ida, R. Palanisamy, and W. Lord, "Eddy Current Probe Design Using Finite Element Analysis", Material Evaluation, Vol.41, pp1389-1394, Nov. 1983
- [13] 임 달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1987
- [14] 김 도훈, 1990, "레이저 가공학", 경문사, pp235-255