

## 레이저 표면경화 공정에서 경화층깊이의 실시간 측정을 위한 실험적 연구

우 현 구\*, 박 영 준\*, 조 형 석\*, 한 유 희\*\*

### An Experimental Study on the In-Process Measurement of Case Depth for LASER Surface Hardening Process

Hyun-Gu Woo\*, Young-Jun Park\*, Hyung-Suck Cho\*, You-Hie Han\*\*

#### ABSTRACT

This paper proposes a monitoring method for nondestructive and in-process measurement of the case depth in LASER surface heat treatment process. The method is essentially an eddy-current method, and measures sensing coil's electrical impedance which varies with the changes of the material microstructure due to hardening. To investigate the validity of the proposed method a series of experiments were performed for various hardening depths. The results show that the relationship between the eddy-current sensor output and the changes in case depth is almost linear. This indicates that the eddy-current measuring method can be used as one of the possible monitoring method for measuring the hardened depth in LASER heat treatment processes.

**Key Words :** LASER surface hardening process (레이저 표면경화 공정), transformation (변태), martensite (마르텐사이트), in-process measurement (실시간 측정), eddy-current (와 전류), skin effect (표피 효과), case depth (경화층 깊이)

#### 1. 서 론

고출력의 레이저는 매우 높은 에너지를 가공하는 부분에만 아주 작은 크기로 집속할 수 있어 많은 부분을 가열하는 통상적인 방법보다 가공이 빠르고 복잡한 형상의 부품을 정밀 가공할 수 있으며 열로 인하여 야기되는 열응력, 뒤틀림 및 균열등의 부품 손상을 최소한으로 줄일 수 있다. 이러한 장점으로 레이저는 금속의 표면 경화와 금속의 용접, 여러가지 금속과 비금속의 절단과 천공, 반도체의 어니일링, 그리고 박판의 미소 가공등 재료의 여러 열가공 분야에서 폭넓게 사용되고 있다(1).

이들 중 레이저를 이용한 금속의 표면 경화처리에는 종래의 표면 경화처리인 고주파 유도 가열법이나 화염 경화법과는 달리 제품에 손상이 거의 없이 빠른 속도로 가공을 진행시킬수 있어 70년대 이후부터 그 응용이 확대되어져 왔고, 현재에 이르기까지 많은 연구가 진행되어왔다(2). 그러나 레이저에 의한 재료가공은 많은 장점도 가지고 있는 반면에 대개변수가 많고, 또한 종래의 가공기술과 달리 표준화가 되어있지 못하며, 가공의 재현성이 떨어지는등의 단점도 지니고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여서는 경화층의 질을 높이고, 이를 일정하게 유지시키도록 공정의 제어가 이루어져야 하며, 이를 위해서는 경화층깊이를 대변할 수 있는 공정변수의

\* 한국과학기술원 정밀공학과

\*\* 한국기계연구원 레이저가공실(경화원)

선정과 이것을 측정할 수 있는 모니터링 장치가 필요하다. 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이며, 대부분의 연구가 표면경화의 현상학적인 고찰에 치중하고 있다.

보통 경화층깊이는 열처리된 제품을 절단하여 표면으로부터의 경도를 측정하여 어느 한계경도에 이르는 곳까지의 깊이로 결정되는데(3), 이러한 파괴적인 방법은 경제적, 시간적인 손실이 심하고 전수검사가 어려우며 공정의 자동화를 위한 실시간 측정이 불가능하므로 비파괴적으로 경화층의 깊이를 측정할 수 있는 방법이 절대적으로 필요하다. 이미 발표된 재료물성의 측정에 관한 비파괴적 방법은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 여러가지 방법이 연구되어 있으며(4-6), 이 많은 방법중 경화층 깊이의 실시간 측정에 적합한 것으로는 재료의 전기적 성질(투자율)의 변화를 와전류를 이용하여 측정하는 방법, 재료조직의 변화를 초음파를 이용하여 측정하는 방법, 재료의 전기전도도의 변화를 양단의 전위차를 이용하여 측정하는 방법등이 있으며, 간접적인 방법으로서 재료의 표면온도를 측정하여 경화층깊이를 추정하는 것이 있다.

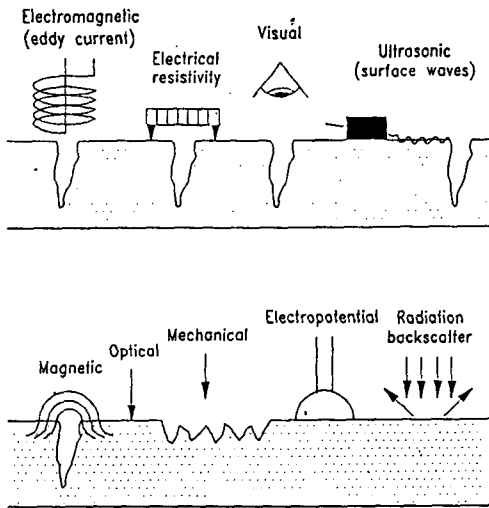


Fig. 1 Methods of non-destructive testing

먼저 Bussiere(7)등이 발표한 초음파에 의한 재료조직의 변화를 측정하는 방법은 움직이고 있는 재료의 경화층 측정에는 어려움이 있으며 최근 레이저 표면경화 공정에서 경화층깊이를 실시간으로 제어하기 위한 연구로서 Rubruck(8)이 제안한 경화층 양단의 전위차를 측정하는 방법은 균일한 전기장을 미리 재료 내부에 형성시

켜야 하므로 역시 실시간 측정에는 어려움이 있다. 그 밖에 Bieler(9)과 Bergmann(10)은 적외선 온도 센서를 사용하여 표면경화하고자 하는 재료표면의 한점의 온도를 가공공정중에 실시간 측정하였고 이를 미리 설정한 일정한 온도로 유지되도록 레이저 빔의 출력을 제어하여 일정한 두께의 경화층을 얻고자 하였다. 표면의 온도를 일정하게 유지시킴으로서 거의 일정한 깊이의 경화층이 형성되어 경화층의 질을 개선시킬 수 있었으나 경화층 깊이는 표면의 온도 뿐만 아니라 시간 즉, 레이저빔의 이동속도와도 관계되므로 이들이 측정된 표면의 한점의 온도만으로 경화층깊이를 정확히 예측하여 추정함에는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 레이저 표면경화 처리공정에서 중요한 변수인 경화층의 깊이를 실시간으로 측정하기 위하여 재료의 물성변화에 따른 와전류의 변화를 측정하는 방법을 제시하고자 한다(11). 이것은 재료가 상변태 과정을 거칠때나, 조직의 변화가 있을때에 물성의 변화, 특히 자기적 투자율이 변한다는 사실을 이용한 것으로서 본 논문은 이 방법의 실험적 결과를 보여준다.

## 2. 레이저 표면경화 공정

레이저에 의한 금속의 표면경화 처리공정은 Fig. 2에서와 같이 재료의 표면에 접촉된 레이저빔을 조사시켜

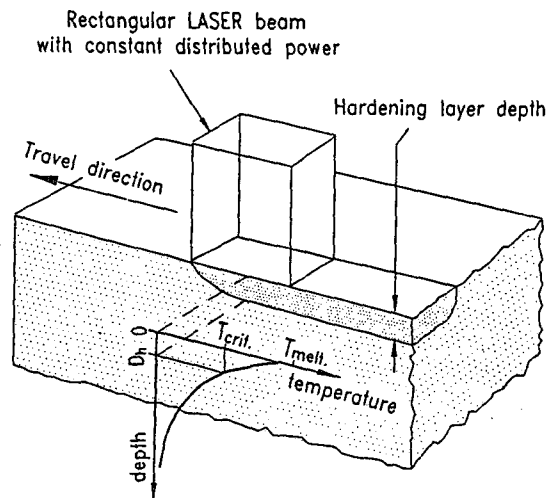


Fig. 2 Schematic diagram of laser surface hardening process

재료내부로의 열전도에 의해 표면의 국부적인 층만을 경화시키는 공정으로서 종래의 경화 처리공정과는 달리 재료내부의 성질에는 영향을 주지 않고, 얇은 표면층만을 마르텐사이트 조직으로 만들어준다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 표면경화공정에서 사용하는 레이저는 단면을 사각형으로 구조화시킨 빔(rectangular LASER beam)을 사용하며, 이때 재료 표면으로의 단위면적당 열용입량은 일정이다. 이 사각형의 빔을 재료의 표면에 조사시키면 표면의 온도는 재료의 용융온도 부근까지 급속히 가열되고, 이것은 재료내의 열전도에 의해 재료표면의 국부적인 얇은층을 A<sub>3</sub> 변태점 이상으로 만들어 준다. 이러한 레이저 경화 처리공정은 현상적으로 볼때 크게 세부분으로 나누어 생각할 수 있다.

- 1) 가열부분으로, 순철과 퍼얼라이트로 구성된 모재(base metal)의 표면조직을 A<sub>3</sub> 변태점 이상의 온도를 가열하여 재료의 표면층을 오스테나이트조직으로 만들어준다.
- 2) 온도 유지부분으로, 냉각되기 전에 탄소의 확산이 충분히 일어날 수 있도록 A<sub>3</sub>온도 이상으로 일정시간 유지하여 재료의 표면층을 균일한 오스테나이트 상으로 만들어준다.
- 3) 냉각부분으로, 레이저 빔이 이동하면 표면에 집속된 열은 치밀하게 연속된 기지조직 내부로 급속히 전달되면서 표면층은 높은 냉각률을 갖게 되어 정상적인 고상변태가 이루어지지 못하고 준안정조직인 마르텐사이트조직으로 변태된다. 이러한 재료내의 자기담금질 효과는 종래의 경화법으로는 얻기 어려운 효과로, 부가의 냉각제없이 금속의 기지조직은 변화시키지 않으면서 표면의 얇은 층만이 경화되도록 한다(2).

### 3. 와전류에 의한 경화층 깊이의 측정

#### 3.1 와전류 측정법의 개요

재료의 물성이나 조직내의 결함등을 비파괴적으로 측정하기 위한 검사법중 하나인 와전류 검사법은 원자력, 항공, 해양, 고온, 고압, 고속의 공학 시스템등에 사용되는 금속 재료에 대해 신속하면서도 낮은 비용 때문에 재료의 비파괴검사에 폭넓게 사용되고 있다(5). 따라서 이 와전류를 이용한 측정법은 비파괴 검사법의 매우 중요한 분야로서 현재까지도 많은 연구가 이루어져 왔으며, 특히 최근에는 자동차, 엔진, 기계부품, 그리고

그이외의 소모성 생산재의 검사에 적합성이 인식되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 있고, 산업에의 적용도 일부 다른 비파괴 방법을 대신하면서 널리 확산되고 있다.

이 와전류를 이용한 비파괴 검사는 금속판의 두께 측정, 기지 조직과 코팅된 재료의 전자기 특성이 현저하게 다른 경우에 코팅 두께 측정, 재료내의 불연속, 크랙등 결함의 검출, 강자성 재료의 표면경화깊이 측정등 많은 분야에서 사용되고 있다(5).

와전류는 표피 효과(skin effect)에 의해 Fig. 3에 보인 바와 같이 재료 표면에서 최대의 전류 밀도를 가지며 내부로 갈수록 지수함수적으로 감소하는 분포를 갖는다. 이때, 표면 최대 전류밀도의 36.8%(=e<sup>-1</sup>) 되는 깊이를 와전류의 표준 침투 깊이(standard depth of penetration, X<sub>0</sub>)라 부르며 이것을 결정하는 중요 변수로는 대상 재료의 전기전도도, 자기투자율, 시험 코일에 흐르는 교류의 주파수 등이 있는데 세가지 모두 값이 낮을수록 표준침투 깊이는 깊어져 재료 표면에 비해 내부에서 발생하는 와전류의 양이 상대적으로 많아진다(12).

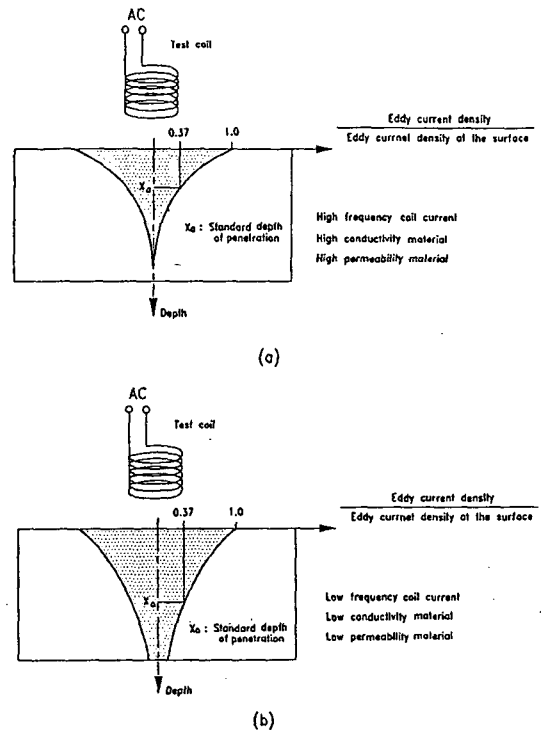


Fig. 3 Eddy current distribution and standard depth of penetration

재료가 경화되어 기조직이 다른 조직으로 변화되면 자기 투자율의 값이 현저하게 변화되어 와전류의 분포가 달라지고 결과적으로 시험코일의 임피던스가 변화되므로 이것을 감지하면 표면경화층의 깊이를 추정할 수 있다. 와전류형의갠센서는 이러한 임피던스의 변화를 측정하므로 갠센서가 경화층 깊이 측정장치로서 사용될 수 있을 것이라는 생각에서 본 연구를 수행하였다.

이 방법에 대한 연구로는 G. Bach 등<sup>(13)</sup>이 와전류를 이용한 자기적 Barkhausen 소음 측정에 의해 크랭크 축과 브레이크 풀리등의 경화층의 깊이를 측정하고자 하였고, 이들에 의하면 약 5mm 깊이의 경화층까지 측정할 수 있다고 보고하였다. 그리고 Stephan 과 chesney<sup>(14)</sup>는 유도 경화된 자동차 추진축의 경화층 깊이와 경도를 와전류 센서를 이용하여 측정하였고, 와전류의 신호와 경화층의 깊이사이의 선형적인 비례관계가 있음을 보고하였다. 또한, 한 승용<sup>(15)</sup>은 와전류의 임피던스 변화를 측정하여 고주파 유도경화에 의해 표면 경화된 원형축의 경화층 깊이를 측정할 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 이와 같은 연구 성과들은 와전류 센서를 이용함으로써 레이저에 의해 표면 경화 처리가 되어지고 있는 시편의 경화층 깊이를 실시간으로 측정할 수 있음을 시사하고 있다.

그러나 레이저에 의해 표면경화 처리되는 시편의 경화층의 깊이를 와전류 센서를 이용하여 실시간으로 측정하기 위해서는 몇가지의 고려해야할 점이 있는데, 첫째는 공정 도중에 시편과 주위의 온도가 상승하면 와전류 센서가 영향을 받으므로 이에 대한 고려가 따라야 하며, 둘째는 측정하고자하는 시편의 표면이 원형의 봉이나 파이프가 아니라 평면이고, 이 평면의 형상은 공정중에 열 응력에 의해 변형되므로 이에 대한 고려가 있어야 한다. 이중 온도에 대한 고려에 대해서는 Schwartz 와 Lord<sup>(16)</sup>의 연구가 있었는데, 이들에 의하면 온도보상 코일을 갖춘 와전류 프로브를 사용함으로써 온도의 상승에 대해 와전류 신호의 변화가 크지 않고, 이러한 변화도 일정한 위상차와 크기를 갖는다는 것을 보고하였다. 그러나 측정 표면의 변형에 대한 고려에 대해서는 현재까지 연구, 발표된 것이 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 레이저 표면경화 처리되는 시편 경화층의 깊이를 와전류를 이용하여 실시간으로 측정하기 위해 우선 평면재료의 여러 경화층 깊이에 대한 와전류형 갠센서의 출력 신호를 측정하여 보았다.

### 3.2 와전류의 측정원리

와전류를 이용하여 금속재료의 물성이나 결함등을 측정하는 것은 전자기유도의 원리로써 설명되어질 수 있다 (6). 이 와전류 센서의 사용에 의해 재료의 물성을 측정할때 검출되어지는 것은 센서코일의 임피던스의 변화인데 이것은 측정 대상물체의 형상이나 전기 전도도, 자기 투자율의 변화에 의존하게 되므로 검출하고자하는 대상과 임피던스 변화사이의 관계를 규명함으로써 측정하고자 하는 것 즉, 경화층의 깊이를 검출할 수 있다.

Fig. 4 (a)의 2차 코일 시스템은 전자기유도의 원리를 간단하게 보여준다. 이제 Fig. 4 (a)와 같이 코일 1에 교류의 전류  $i_1$ 를 가하면 코일 1의 주위에서는 1차 시변자계  $H_p$ 가 형성된다. 이때 코일 1에 코일 2를 근접시키면 전자기유도에 의해 코일 2에는 교류의 기전력이 유기되는데 코일 2가 폐회로를 구성하고 있으면 코일 2에는 유도 전류( $i_2$ )가 흐른다. 또한, 코일 2에 흐르는 교류의 유도전류 역시 2차의 시변자계  $H_s$ 를 형성시키는데 이의 방향은 1차 시변자계  $H_p$ 의 반대가 된다. 이 코일 2에 의해 형성된 2차 시변자계  $H_s$ 는 코일 1에 역기전력을 유발시키게 되므로 코일 2의 부하의 변동에 비례하여 코일 1의 기전력도 증감하게 된다.

이제 Fig. 4 (b)처럼 코일 2 대신 금속판을 코일 1에 근접시키면 도체인 금속판에는 동심원상의 교류인 유도 전류가 흐르는데 이를 와전류라 한다. 이 와전류의 세기에 따라 코일 1의 회로의 기전력이 증감하므로 이 기전력의 증감, 임피던스의 변화를 측정함으로써 전자기적 물성치가 다른 경화층의 깊이를 검출할 수 있다.

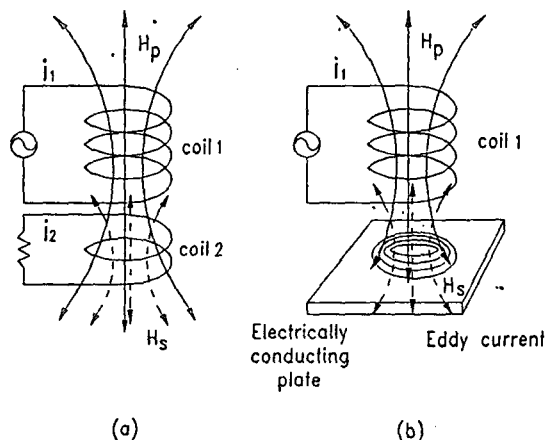


Fig. 4 Induction of eddy current

또한, 물성이 다른 여러층으로 구성된 시편에 대한 코일 임피던스에 관한 J. R. Waitd와 R. L. Gardner<sup>(17)</sup>의 연구는 임피던스 변화는 기지조직과 경화조직의 전기적 물성과 대상 물체의 형상, 그리고 인가되는 교류의 주파수에 의해 결정된다는 것을 말해주고 있다.

### 3.3 금속의 조직에 따른 물성의 변화

와전류의 임피던스에 영향을 미치는 중요 인자들은 앞에서 설명한 바와같이 전기적 전도도, 자기적 투자율, 교류 주파수 그리고 시편의 기하학적인 형상등이 있다. 이 중 시편의 재료가 철, 니켈, 코발트와 같은 강자성체인 경우에는 자기적 투자율의 영향이 가장 크게 나타나며, 일반적으로는 투자율과 임피던스는 비례관계가 있다<sup>(5)</sup>.

2장의 설명에서와 같이 레이저 표면경화 처리공정에 의해 재료를 가공할 때 재료내에는 온도에 따른 상변태가 일어나게 된다. 이러한 금속의 상변태에서는 재료의 여러 물성치에 큰 변화가 수반된다. 특히 자기적 투자율의 온도에 따른 변화를 보면 A<sub>2</sub> 변태점을 지나면서 크게 감소하고, A<sub>3</sub> 변태점 이상의 온도에서 생성되는 오스테나이트조직은 거의 비자성체에 가깝다. 또한 냉각된 후 표면 경화층에 형성된 마르텐사이트 조직도 결정격자의 어긋남이 자벽이동을 방해하기 때문에 기지조직에 비해 매우 적은 투자율을 갖는다<sup>(18)</sup>. 이와같이 표면경화층의 조직인 마르텐사이트 조직이 기지조직에 비해 매우 적은 자기적 투자율을 가지며, 전기적 전도도는 거의 비슷한 값을 갖기 때문에 모재의 재료의 조직이 경화 처리후 마르텐사이트 조직으로 바뀌면 임피던스값은 낮아지게 되고, 경화층의 깊이가 깊어질수록 임피던스값은 비례적으로 낮아진다. 따라서 일반적인 와전류를 사용한 겹센서의 임피던스의 변화를 측정함으로써 물성치의 변화 즉, 경화층깊이의 변화를 예측할 수 있다.

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 레이저 표면 경화 장치의 구성

시편의 경화처리를 위한 장치의 개략도는 Fig. 5와 같고 본 연구의 실험에서 사용된 것은 한국 기계연구원 레이저 가공실에서 보유하고 있는 출력 4kW 급 CO<sub>2</sub> 레이저(미국, Rofin-Sinar 840)이다.

이 장치는 빔 스위칭에 의해 빔이 용접헤드로 가면 용접 및 절단을 하기 위한 원형빔을 사용할 수 있고

열처리 헤드로 가면 표면경화처리를 위한 사각빔을 사용할 수 있도록 되어져 있다. 사각빔으로 만들기위해 중간에 설치된 분할경은 같은 초점위치를 갖도록 각각 각도가 맞추어진 많은 수의 작은 사각형 거울로 구성되어 있으며 이것을 지난 사각빔은 다시 렌즈를 통해 재료를 열처리할 수 있도록 집광된다. 이 열처리헤드 아래에 경화처리 되어질 시편을 고정시키고, 이동시키기 위한 X-Y 테이블이 있다. Fig. 6은 분할경과 열처리헤드 부분의 실제 모습을 보여준다.

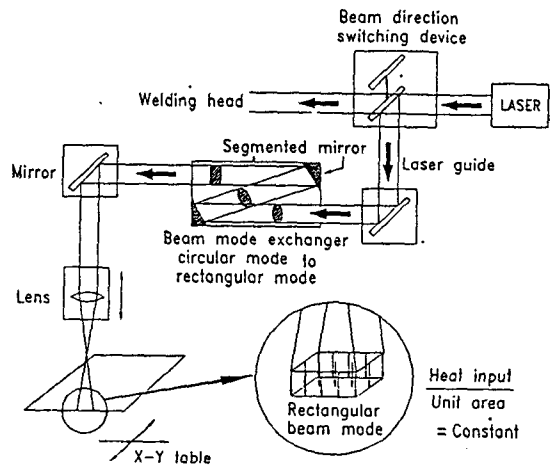


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus for laser surface treatment

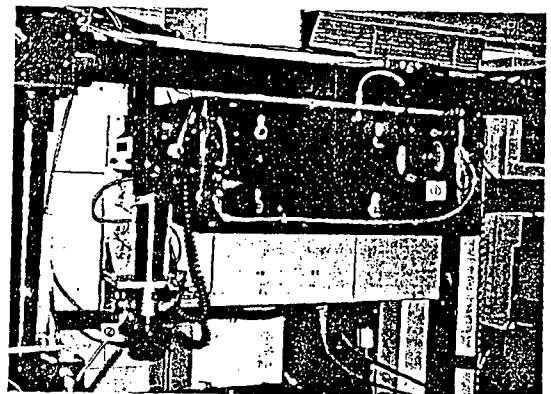


Fig. 6 Photograph of beam delivery and shaping for laser surface treatment.

- ① : Segmented mirror
- ② : laser head for heat treatment

4.2 레이저 경화 실험 및 시편

열처리하기 위한 시편으로서 중탄소강 영역의 열간압연된 S45C 강재를 사용하였으며 그 화학적 조성을 Table 1에 나타내었고 크기는 300mm×50mm×9mm로 충분히 크게 제작하였다. 열처리되는 시편의 조직을 일정하게 하고 잔류자기를 제거하기 위해 800°C 근방에서 1시간동안 노멀라이징(normalizing)하고 표면을 연삭하였다. 레이저가 조사되는 표면의 상태에 따라 빔의 흡수율이 크게 차이가 나는데 본 연구에서는 흡수율을 높이기 위한 코팅제로써 손쉽게 구입이 가능한 무광택 흑색 페인트를 표면에 칠하였다. 레이저 경화 공정의 중요 변수로서는 출력, 이송 속도, 빔의 크기등이 있으며 Fig. 16은 이러한 변수들을 여러가지로 바꾸어가며 실험한 시편에 대한 것이며 Fig. 10-15는 비교가 용이하도록 출력은 4kW, 빔 크기는 10mm×10mm로 고정시키고 시편의 이송 속도를 순서대로 각각 1.54, 1.23, 0.90, 0.75, 0.67, 0.54 m/min로 바뀌가며 실험한 시편에 대한 것이다. 경화층의 깊이는 표면 경화처리 후에 단면을 절단하고 연마한 후 에칭(etching)하여 보여주는 경화층 단면중 가장 깊은곳을 측정한 값이다. Fig. 9는 레이저빔으로 표면경화한 시편의 단면을 보여준다.

Table 1. chemical composition of the specimens (wt%)

원 소	C	Mn	Si	P	S	Ni
함 량	0.434	0.698	0.259	0.023	0.011	0.096
원 소	Mo	V	Ti	Co	W	Cr
함 량	0.023	0.003	0.004	0.008	0.009	0.110

4.3 경화층 깊이 측정 방법

레이저 경화처리후 형성된 표면경화층 깊이의 증감 즉, 마르텐사이트 조직의 양의 증감에 따른 재료의 투자율을 측정하기 위하여 와전류 측정의 원리를 이용하는 상용화된 직경 5mm의 갭센서가 사용되었으며 이것은 일본 AEC 회사의 모델 5505로서 0-2000μm의 범위에서 0.5μm의 갭까지 측정할 수 있고 ±5 Volt 범위의 신호를 출력한다. 본 연구에서 측정하여본 와전류 가진 주파수는 약 1MHz이다.

경화층 측정을 위해 센서의 프로브는 시편의 바로 위 0.7mm의 지점에 고정시키고 시편을 일정한 속도로

이송시키면서 센서의 출력을 측정하였다. Fig. 7은 와전류 센서로 경화층의 깊이를 측정하는 실험 장치의 구성을 개략적으로 보여주고, Fig. 8은 갭센서를 이용하여 경화된 시편의 경화층을 측정할때 측정의 방향을 보여준다. 이 그림에서 보는바와 같이 폭방향으로의 측정은 경화층의 중심에서 좌측으로 17.5mm 되는 지점을 시작점으로 하여 총 35.0mm를 가로지르며 측정하였고, 길이방향으로의 측정은 임의의 위치에서부터 70.0mm 되는 곳까지를 측정하였다. 이때 길이방향으로의 측정을 위하여 경화층의 깊이가 연속적으로 변화되는 경화시편을 제작하였는데 이것은 시편의 표면에 흡수제의 양을 증감하여 각 부분에서의 흡수율을 다르게 하여 제작한 것이다.

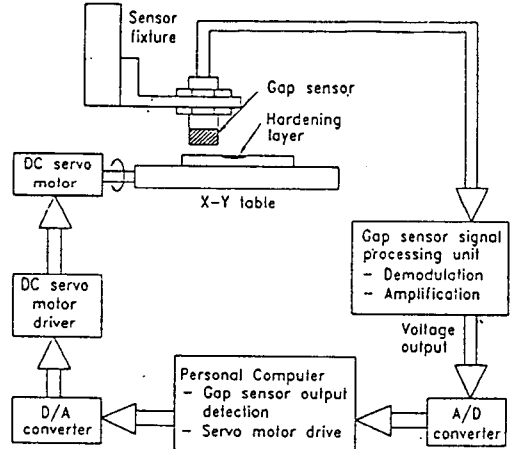


Fig. 7 Experimental setup for depth measurement of hardened layer

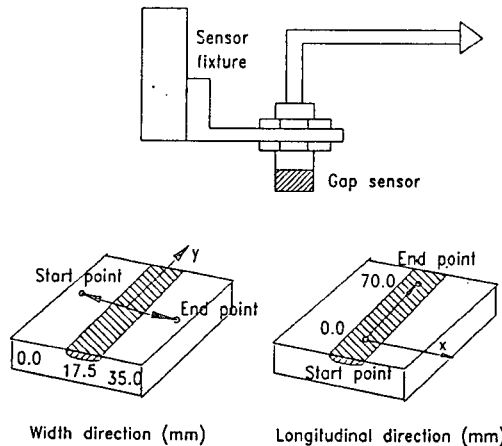


Fig. 8 Travelling direction for depth measurement

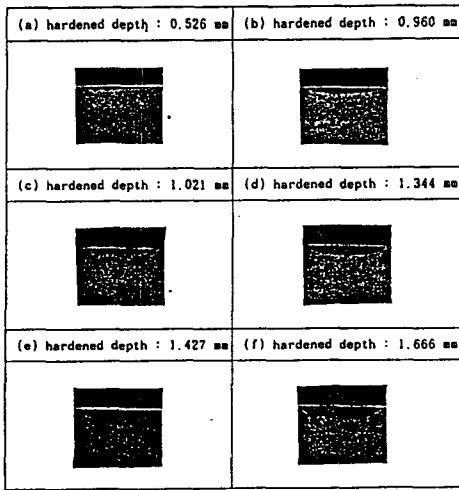


Fig.9 Cross sections of hardened layer

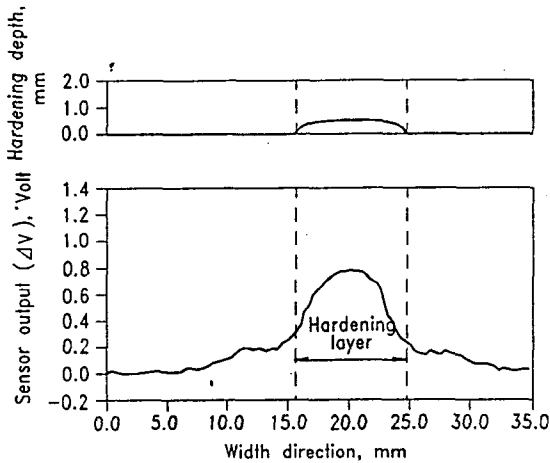


Fig.10 Gap sensor output along the width direction (depth : 0.526 mm)

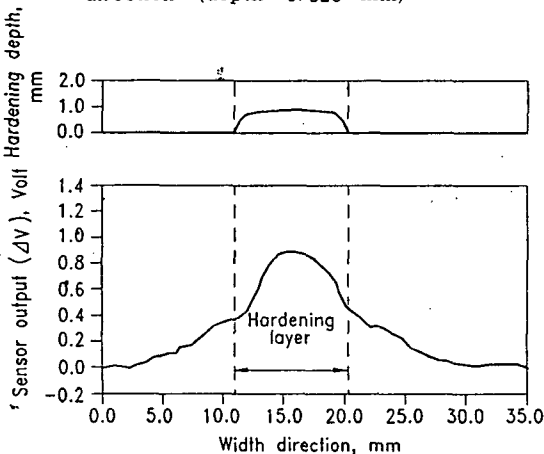


Fig.11 Gap sensor output along the width direction (depth : 0.960 mm)

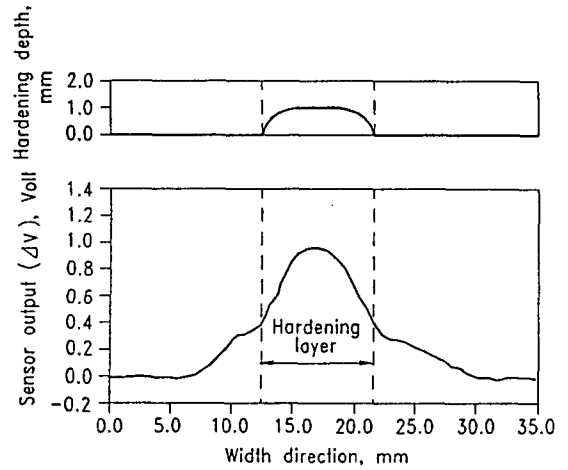


Fig.12 Gap sensor output along the width direction (depth : 1.021 mm)

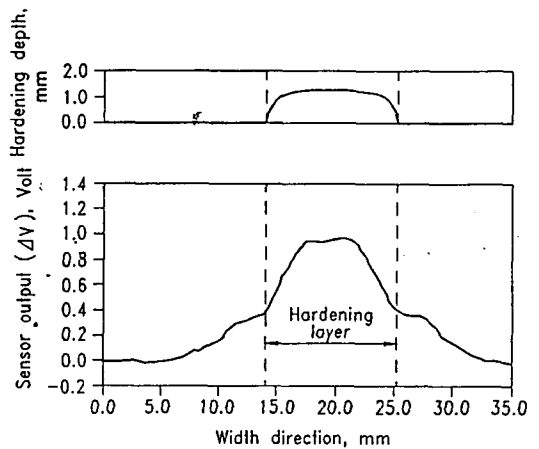


Fig.13 Gap sensor output along the width direction (depth : 1.344 mm)

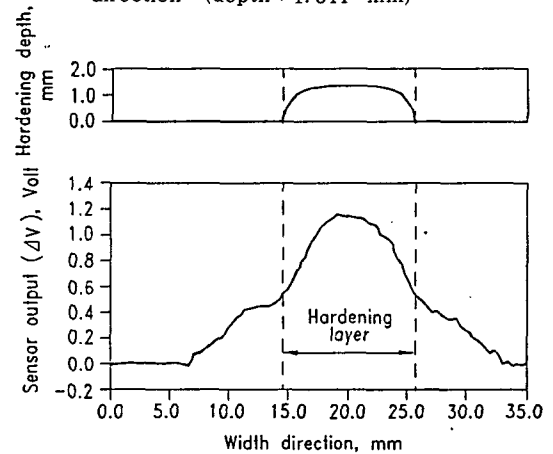


Fig.14 Gap sensor output along the width direction (depth : 1.427 mm)

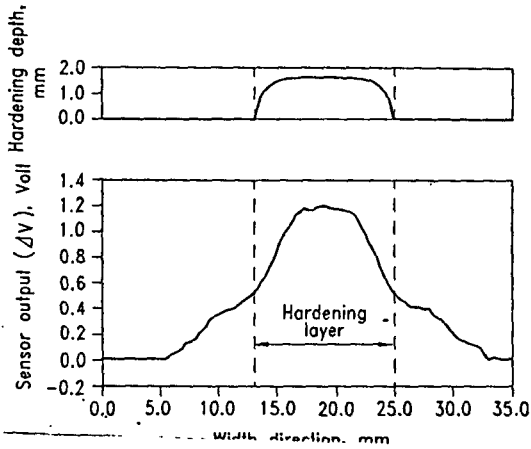


Fig. 15 Gap sensor output along the width direction (depth : 1.666 mm)

4.4 실험의 결과 및 고찰

Fig. 10부터 Fig. 15까지의 결과는 Fig. 9에서 보여진 시편들에 대한 센서를 시편표면위 0.7mm에 고정하여 각 시편의 열처리되지 않은 부분의 센서출력을 기준으로 하여 열처리된 부분의 센서출력의 상대적인 값을 측정 한 결과를 보여준다. 센서출력이 실제 경화층보다 폭이 넓게 퍼져있는 이유는 센서 출력은 대상 물체의 센서 바로 아래부분에 가장 큰 영향을 받고 센서에서 멀어질수록 그 영향은 작아지므로, 센서가 경화층의 바로 위에 있지않아도 경화층에 가까이 있으면 영향을 받으며, 센서가 경화층 바로 위에 있을 때 가장 큰 영향을 받아 출력이 최대가 된다.

Fig. 16은 여러 시편에서 측정되어진 센서출력은 최대 값과 경화층 깊이와의 관계를 정리하여 보여준 것으로서 각 점은 한개의 시편에 대한 실험결과를 나타내며 이로부터 경화층의 깊이의 변화에 대한 각 시편의 최대 센서출력이 대개 선형적인 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 17는 경화된 시편을 길이방향으로 측정 한 결과를 보여준다. 여기서 Fig. 17 (a)는 경화층의 깊이가 1.05mm로 일정하게 형성된 경화시편에 대한 결과이고, (b)는 흡수율을 다르게하기 위해 흡수체를 3 단계로 나누어 코팅한 시편으로서 길이방향으로의 경화층의 깊이가 처음에 1.04mm 에서 0.75mm, 그리고 0.2mm 이하의 경화층, 마지막으로 1.04mm 로 변화되어진 시편에 대한 측정 한 결과이다. 그리고 (c)는 흡수체를 2 단계로 나누어코팅한 시편으로서 길

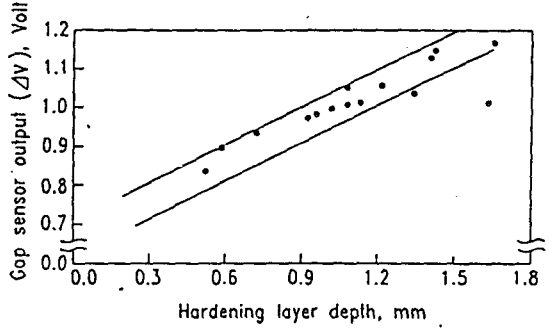


Fig. 16 Relation between the hardened depth and maximum of sensor output

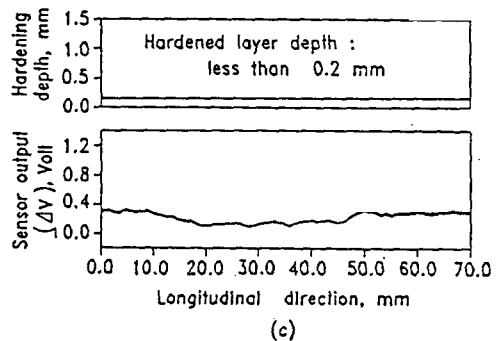
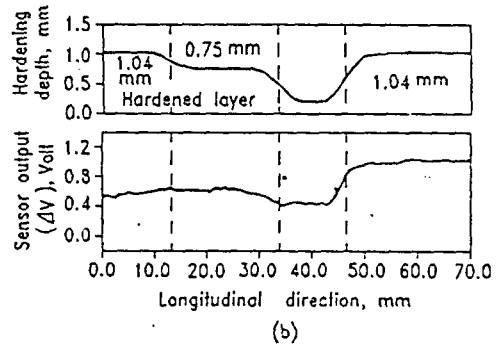
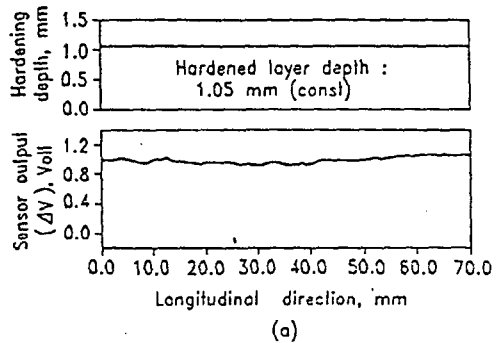


Fig. 17 Gap sensor 측정 output along the longitudinal direction



이방향으로의 경화층의 깊이가 0.2mm 이하로서 너무 얇아 측정이 곤란한 시편에 대한 결과이다. 이 결과를 보면, 경화층의 깊이가 변화하는 경우에 대해서 와전류 겹센서는 경향은 비교적 잘 나타내주고 있으나 측정된 센서의 신호로부터 경화층의 깊이가 정확히 얼마의 값을 갖는가에 대해서는 뚜렷이 알수 없었다. (a), (c)에서 일정한 경화층깊이에 대해 센서출력에 약간의 변동이 있고, 특히 (b)의 경우는 경화층깊이가 처음부분과 끝부분이 1.04mm로 같은데 처음부분의 센서출력이 낮아서 제대로 경화층을 측정하지 못하였다. 이것에 대한 원인은 첫째, 재료가 경화 처리중에 열응력등으로 인해 길이 방향으로 형상이 변화되어 시편과 센서의 거리를 처음부분과 끝부분을 동시에 0.7mm로 유지하기가 매우 어려웠고 특히 (b)의 경우 처음부분에서 0.7mm보다 가까운 거리에서 측정이 행해졌으며 둘째, 본 실험에서 사용한 센서가 재료 내부의 물성 측정용이 아닌 재료와 센서 사이의 거리 측정용의 상용화된 겹센서를 사용하였기 때문에 대상재료의 표면에만 매우 민감해서 표면흡수재나 열응력등으로 인해 발생할 수 있는 불균일한 표면 상태에 크게 영향받았기 때문으로 생각된다.

만약 와전류의 재료내 침투 깊이가 더 깊어지도록 와전류 코일에 가진시켜주는 교류의 주파수를 낮추어준 센서를 사용한다면 센서출력이 재료 표면보다 내부에 상대적으로 많은 영향을 받으므로 보다 정확한 표면 경화층의 예측이 가능할 것이다. 이에 대한 박 영준의 연구<sup>(11)</sup>는 경화층 깊이를 측정하기위한 와전류 센서의 가진 주파수는 10kHz에서 20kHz의 범위일때 최적임을 수치적 해석을 통해 보여주고 있다.

## 5. 결 론

레이저를 열원으로 재료 표면층에 상변태를 일으키는 레이저 표면경화 공정에서 가장 중요한 변수의 하나인 경화층깊이를 비파괴적으로 실시간 측정하기 위한 방법으로서 와전류를 이용한 측정방법을 제시하였다. 이방법은, 재료의 조직변화 즉 모재가 경화층으로 바뀔때 따라 재료 내에 발생하는 와전류의 양이 달라지므로 이 변화량을 측정함으로써 경화층 깊이를 추정할 수 있다는 원리로부터 채택되었다.

측정장비로서 널리 쓰이고 있는 와전류형의 겹센서를 사용하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 레이저 표면경화에서 경화층 깊이가 0.4-1.0mm인

범위에서 와전류 겹센서의 최대 출력과 경화층 깊이는 선형적인 관계를 갖는다.

- 2) 상용화된 겹센서 대신 재료내 와전류의 침투깊이를 조절할 수 있는 와전류 측정장비를 사용한다면 경화층깊이의 변화를 보다 정확히 예측할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 김도훈, 레이저 가공학, 경문사, 1990, pp.235~255.
2. Mazumder, J., "Laser heat treatment: the state of art", Journal of Metals, pp.18~26, May 1893.
3. KS;DO215, "Methods of measuring case depth for steels", 1985.
4. "Nondestructive inspection and quality control", Metals Handbook, ASM, Vol. 11, 8th Ed. 1976.
5. "Electromagnetic testing", Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed., Vol. 4.
6. Doebelin, E. O., "Measurement systems: application & design", McGraw Hill International Edition 4th Ed., 1990.
7. Bussiere, J. F., "On-Line measurement of the microstructure and mechanical properties of steel", Material Evaluation, Vol. 44, pp.560~567, April 1986.
8. Rubruck, V., Geissler, E., and Bergmann, H. W., "Case depth control for laser treated materials", Proc. 3rd ECLAT Conf., Vol. 1, pp.207~216, 1990.
9. Bieler, H. W., et al., "Methods of adaptive control in surface processing with laser radiation", Proc. 2nd ECLAT Conf., pp.46~53, 1988.
10. Bergmann, H. W. and Geissler, E., "On-Line computer controlled laser hardening", Proc. 2nd ECLAT Conf., pp.109~113, 1988.
11. 박영준, "레이저 표면경화 공정을 위한 경화층깊이의 실시간 측정에 관한 연구", 석사 학위 논문, 한국 과학 기술원, 1992.

12. Hagemaiier, D. J., "Eddy current standard depth of penetration", Material Evaluation, Vol. 43, Oct. 1985.
13. Bach, G., Goebbels, K. and Theiner, W. A., "Characterization of hardening depth by Barkhausen noise measurement", Material Evaluation, Vol. 46, pp.1676~1680, Nov. 1988.
14. Stephan, C. H. and Chesney, H. L. "Computer-aided measurement of case depth and surface hardness in automobile axle shafts", materials Evaluation, Vol.42, pp.1612~1618, 1984.
15. 한승용, "외전류법을 이용한 강의 표면경화층 측정  
에 관한 연구", 석사 학위 논문, 한양 대학교, 1988.
16. Schwartz, S. W. and Lord, W., "Effects of temperature on eddy-current probe response", Materials Evaluation, Vol.41, pp.1395~1398, Nov. 1983.
17. Wait, J. R. and Gardner, R. L., "Electromagnetic nondestructive testing of cylindrically layered conductors", IEEE Trans, on Instrumentation, Vol. IM-28, No. 6, pp.159~161, 1979.
18. 박희선, 철강 재료학, 동명사, 1982, pp.103~105, 155~176.