大韓機械學會論文集 第18卷 第3號, pp. 529~539, 1994

〈論 文〉

레이저 표면경화공정에서 경화층깊이의 실시간 측정을 위한 와전류 전자기장의 이론적 해석

박영준* · 조형석* · 한유희**

(1992년 8월 10일 접수)

A Numerical Analysis of Eddy-Current Electromagnetic Field for the In-Process Measurement of Case Depth in Laser Surface Hardening Processes

Young-Jun Park, Hyung-Suck Cho and Yoo-Hee Han

Key Words: Hardening Depth(경화층깊이), Eddy Current(와전류), Magnetic Permearbility (자기투자율)

Abstract

In laser heat treatment process of steels, the thin layer of substrate is rapidly heated to the austenitizing temperature and subsequently cooled at a very fast rate due to the self-quenching effect. Consequently, it is transformed to martensitic structure which has low magnetic permeability. This observation facilitates the use of a sensor measuring the change of electromagnetic field induced by the hardening layer. In this paper, the eddy-current electromagnetic field is analyzed by a finite element method. The purpose of this analysis is to investigate how the electrical impedance of the sensor's sensing coil varies with the change in permeability. To achieve this, a numerical model is formulated, taking into consideration the hardening depth, distance of the sensor from the hardened surface and the frequency driving the sensor. The results obtained by numerical simulation show that the eddy-current measurement method can feasibly be used to measure the changing hardening depth within the frequency range from 10 kHz to 50 kHz.

I. 서 론

고출력의 레이저는 가공하고자 하는 부분에만 매우 높은 에너지밀도를 유발시킬 수 있어 가공이 빠르고 독특한 조직을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 부품의 내부에 열로 인하여 야기되는 열응력, 뒤틀림 및 균열 등 부품의 손상을 최소한으로 할 수 있고, 복잡한 부품의 가공도 용이하게 할 수 있다. 따라서 레이저는 금속의 표면경화와 용접, 여러가지 금속과 비금속의 절단과 천공 등 재료의 여러 열가공 분야에서 폭 넓게 사용되고 있다.[1]

이들 중 레이저를 이용한 금속의 표면경화처리는 제품에 손상이 거의 없이 빠른 속도로 가공을 진행시킬 수 있다는 장점이 있어 70년대 이후부터 응용이 확대되어져 왔고, 현재에 이르기까지 많은 현상학적인 연구가 진행되었다.[2] 그러나 레이저에 의한 재료가공은 많은 장점도 가지고 있는 반면에 매개변수가 많고, 또한 종래의 가공기술과 달리 표준화가 되어 있지 못하며, 가공의 재현성이 떨어지는 등의 단점도 지니고 있다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해서는 경화층의 질을 개선하고, 이를

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과
**한국기계연구원 레이저가공실

일정하게 유지시키기 위해 공정의 제어가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 경화층의 깊이(hardening depth, Dh)를 정확히 대변할 수 있는 공정변수의 선정과 이를 측정할 수 있는 모니터링 장치가 필요하다. 그러나 이러한 연구는 매우 미흡한 실정이며, 대부분의 연구가 표면경화의 현상학적인 고찰에 치중하고 있는 실정이다.

보통 경화층깊이의 측정은 제품을 절단한 후 표면으로부터의 경도를 측정하여 어느 한계경도에 이르는 곳까지의 깊이로 결정한다.[3] 그러나 이러한 방법은 경제적, 시간적인 손실이 심하고 전수검사가 어려우며 공정의 자동화를 위한 실시간 측정이 불가능하다. 따라서 경화층의 깊이를 측정할 수 있는 비파괴적인 방법이 필요하다. 이미 발표된 재질물성의 측정에 관한 비파괴적 방법은 재료의 전자기적 성질(투자율)의 변화를 와전류를 이용하여 측정하는 방법과 재료조직의 변화를 초음파를 이용하여 측정하는 방법, 그리고 재료의 전기전도도의 변화를 양단의 전위차를 이용하여 측정하는 방법 등이 있으며,[4~6] 이외에 간접적인 방법으로써 공정중에 재료의 표면온도를 측정하여 경화층깊이를 추정하는 것이 있다.

그러나 먼저 Bussiere,[7] Rumbold,[8] 그리고 Gericke[9]에 의해 발표되어진 바 있는 초음파에 의한 재료의 조직의 변화를 측정하는 방법은 움직이고 있는 재료의 경화층 측정에는 어려움이 있다. 그리고 최근 Rubruck[10]과 Hain[11]은 레이저 표면경화공정에서 경화층깊이를 실시간으로 제어하기 위한 연구의 일환으로 경화층 양단의 전위차를 측정하는 방법을 제시했는데, 이 방법은 균일한 전기장을 미리 재료내부에 형성시켜야 하므로 초음파 측정방법과 마찬가지로 실시간 측정에는 어려움이 있다. 그리고 최근에 Bieler[12]와 Bergmann[13]에 의해 발표된 표면경화하고자 하는 재료표면의 한점의 온도를 적외선 온도센서를 사용하여 가공공정중에 실시간 측정하여 이를 미리 설정한 일정한 온도로 유지되도록 레이저빔의 출력을 제어하여 일정한 두께의 경화층을 얻고자 한 연구는 표면의 온도를 일정하게 유지시킴으로써 거의 일정한 깊이의 경화층이 형성되어 경화층의 질을 개선시킬 수 있었으나 경화층깊이는 표면의 온도뿐만 아니라 시간 즉, 레이저빔의 이동속도와도 관계되므로 이들이 측정한 표면의 한점의 온도만으로 경화층깊이를 정확히 예측하여 추정함에는 어려움이 있었다.

따라서 본 논문에서는 레이저 표면경화처리공정에서 중요한 변수인 경화층의 깊이를 실시간으로 측정하기 위하여 와전류를 이용하여 재료의 물성변화를 측정하는 방법을 제시하고자 한다. 이것은 재료가 상변태 과정을 거칠 때나, 조직의 변화가 있을때에 물성의 변화, 특히 자기적 투자율이 변한다는 사실을 이용하는 것으로써 이에 관한 연구는 Bach 등[14]이 와전류를 이용한 자기적 Bakhausen 소음측정에 의해 크랭크축과 브레이크 풀리 등의 경화층의 깊이를 측정하고자 하였고, 이들에 의하면 약 5 mm 깊이의 경화층을 측정할 수 있다고 보고되어 있다. 그리고 Stephan[15]은 유도 경화된 자동차 추진축의 경화층깊이와 경도를 와전류센서를 이용하여 측정하였고, 와전류의 신호와 경화층의 깊이사이에 선형적인 비례관계가 있음을 보고하였다. 또한, 한승용[16]은 와전류의 임피던스 변화를 측정하여 고주파 유도경화에 의해 표면경화된 원형축의 경화층깊이를 측정할 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 이와 같은 연구 성과들은 와전류센서를 이용함으로써 레이저에 의해 표면 경화처리가 되어지고 있는 시편의 경화층깊이를 실시간으로 측정할 수 있음을 시사하고 있다.

그러나 레이저에 의해 표면경화처리되는 시편의 표면은 앞의 연구에서와 같이 원형의 봉이나 파이프가 아니라 평면이고, 이 평면의 형상이 공정중에 열의 영향에 의해 미세하지만 변하게 되므로 이의 보정을 위한 고려가 있어야 한다. 그러나 측정표면의 변형에 대한 고려에 대해서 현재까지는 연구가 거의 시도되어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 레이저에 의해 표면경화처리되는 시편의 경화층의 깊이를 와전류를 이용하여 실시간으로 측정하기 위해 우선 유한요소법에 의한 전자기장의 수치적 해석을 통하여 평면재료의 경화층깊이의 변화에 대한 와전류센서 신호의 변화를 알아보고 이를 특성화시켜 본 논문연구의 타당성을 이론적으로 입증하고, 나아가 와전류센서 프로브의 설계에 이용할 수 있도록 하고자 한다.[17]

2. 레이저 표면경화와 물성의 변화

Fig. 1은 레이저에 의한 강재의 표면경화처리공정의 개요를 나타내며, 이것은 재료의 표면에 집속된 레이저빔을 조사시켜 재료내부로의 열전도에 의해 표면의 국부적인 층만을 경화시키는 공정으로써

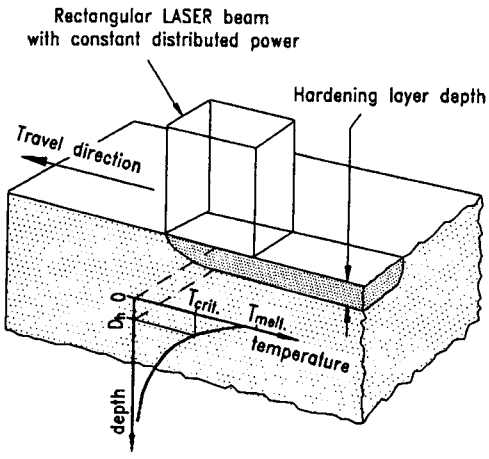
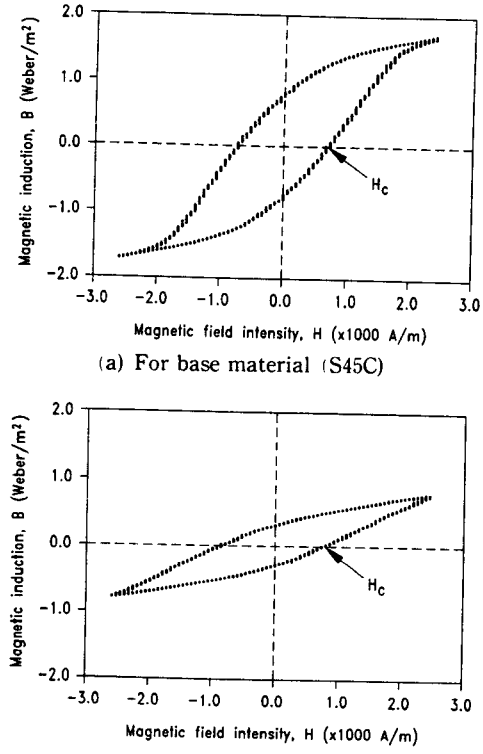


Fig. 1 Schematic diagram of LASER surface hardening process

종래의 경화처리공정과는 달리 재료내부의 성질에는 영향을 주지 않고, 표면만을 마르텐사이트 조직으로 만들어 준다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 표면경화공정에서 사용하는 레이저는 단면을 사각형으로 구조화시킨 빔(rectangular LASER beam)을 사용하며, 이때 재료 표면으로의 단위면적당 열입열량은 일정하다. 이 사각형의 빔을 재료의 표면에 조사시키면 표면의 온도는 재료의 용융온도($T_{melt.}$) 부근까지 급속히 가열되고, 이것은 재료내의 열전도에 의해 재료표면의 국부적인 얇은층을 A_3 변태점($T_{crit.}$) 이상으로 만들어 준다. Fig. 1에 나타낸 이러한 레이저 경화처리공정은 현상적으로 볼 때 크게 세부분으로 나누어 생각할 수 있다. 첫번째는 가열부분으로 순철과 퍼얼라이트로 구성된 원래의 재료의 조직을 A_3 변태점($T_{crit.}$) 이상의 온도로 가열하여 재료의 표면 얇은층을 오스테나이트조직으로 만들어준다. 그리고 두번째는 유지부분으로 가열과 냉각기의 사이에서 재료의 국부적인 얇은층의 온도를 탄소의 확산이 충분히 일어날 수 있도록 오스테나이트 온도로 유지시켜 준다. 마지막 세번째는 냉각부분으로 레이저빔이 이동하면 표면에 집속된 열은 치밀하게 연속된 기지조직 내부로 급속히 전달되면서 표면층은 높은 냉각률을 갖게 되어 정상적인 고상태가 이루어지지 못하고 준안정조직인 마르텐사이트 조직으로 변태된다. 이러한 재료내의 자기 담금질효과는 종래의 경화법으로는 얻기 어려운 효과로, 부가의 냉각제없이 금속의 기지조직은 변화시키지 않으면서 표면의 얇은 층만을 경화시키게 된다.[2] 이렇게 경화된 표면의 얇은 경화부는 일정한 마르텐사이트 조직의 분포를 가지게 되고, 기지조직은 거의 영향을 받지 않으므로 본 논문에서는 해석대상영역의 물성치를 각 부분에 대해 일정한 값을 갖는 것으로 하여 해석하였다.



(a) For base material (S45C)

(b) For hardening material (martensite)

Fig. 2 B-H curve

앞에서 설명한 바와 같이 레이저 표면경화처리공정에 의해 재료를 가공할 때 재료내에는 온도에 따른 상변태가 일어나게 된다. 이러한 강재의 상변태에서는 재료의 여러 물성치에 큰 변화가 수반된다. 특히 자기적 투자율의 온도에 따른 변화를 보면 A_2 변태점을 지나면서 크게 감소하고, A_3 변태점 이상의 온도에서 생성되는 오스테나이트조직은 거의 비자성체에 가깝다. 또한 냉각된 후 표면경화층에 형성된 마르텐사이트 조직도 결정 격자의 어긋남이 자벽이동을 방해하기 때문에 기지조직에 비해 매우 적은 투자율을 갖는다.[18] Fig. 2(a)와 (b)는 본 연구에서 사용한 시편인 S45C의 자기투자율(μ_b)과 이것의 경화조직인 마르텐사이트의 자기투자율(μ_m)의 변화를 비교하기 위하여 시편에 가하는 자기장의 세기를 변화시키면서 형성되는 자속밀

도를 자기 측정장치인 Magnemetrics flux meter (Model MF-3A, Walker scientific inc.)에 의해 측정하여 얻은 Data를 라인핏팅(line fitting)함으로써 얻은 자화곡선(magnetizing curve or hysteresis loop)이다. 이 Fig. 2에서 자기투자율(μ_b, μ_m)은 자기장의 세기의 변화에 대한 자속밀도의 변화율이 되며, 여기서 비교되어지는 값은 H_c(coercivity)에서의 자기투자율(differential pemearbility near H_c)이 된다. 이 측정결과로부터 μ_b와 μ_m은 각각 다음과 같다.

$$\mu_b = 1.284 \times 10^{-3} [\text{Wb/Am}] \quad (1)$$

$$\mu_m = 4.323 \times 10^{-4} [\text{Wb/Am}] \quad (2)$$

따라서 기지조직이 경화조직으로 바뀌면 표면의 얇은층은 원래에 비해 세배정도가 적은 자기투자율 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

그리고 해석에서 사용되어진 재료의 전기전도도의 값은 온도에 따라 값의 변화가 생기지만 본 연구의 해석에서는 상온에서의 값을 사용하였고, 조직의 변화에 대해서는 전기전도도의 값이 크게 변화하지 않을 것으로 가정하여[18] 기지조직과 경화조직이 모두 같은 값을 갖는 것으로 하였다. 그 값은

$$\sigma = 0.59 \times 10^{7} [\text{℧/m}] \quad (3)$$

가 된다.[19]

3. 와전류에 의한 경화층깊이 측정원리

재료의 물성이나 조직내의 결함 등을 비파괴적으로 측정하기 위한 검사법 중 하나인 와전류 검사법은 금속재료의 빠르고, 넓은 범위의 검사에 대해 비교적 저가격 방법을 제시함으로써 철이나 기타 강자성 재료의 표면경화깊이 측정, 금속판의 두께나 금속튜브의 두께측정, 기지 조직위의 코팅된 재료의 두께측정, 재료내의 크랙 등의 결함 검출 등 재료의 비파괴 검사에 폭 넓게 사용되고 있다.[5] 이것들은 모두 측정하고자 하는 대상 물체의 전자기장내에서의 조건에 영향을 미치는 요인의 변화에 의존하는 것으로써 특히, 표면경화층깊이를 측정하는 것은 재료가 경화되어 기지조직과는 다른 조직으로 되면 자기투자율의 값이 현저하게 변화된다는 사실을 응용한 것이다.

와전류를 이용하여 금속재료의 물성이나 결함 등

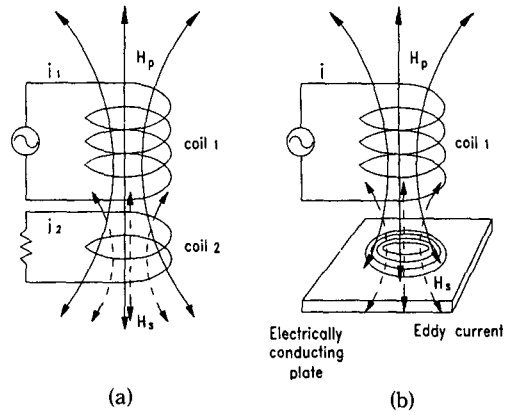


Fig. 3 Principle of the electromagnetic induction

을 측정하는 것의 기본 원리는 전자기 유도의 원리로써 설명되어질 수 있다.[6] Fig. 3(a)의 2차 코일 시스템은 전자기유도의 원리를 간단하게 보여준다. 이제 Fig. 3(a)와 같이 코일 1에 교류의 전류 i_1을 가하면 코일 1의 주위에는 1차 시변자계 H_p가 형성이 된다. 이때 코일 1에 코일 2를 근접시키면 전자유도에 의해 코일 2에는 교류의 기전력이 유기되는데 코일 2가 폐회로를 구성하고 있으면 코일 2에는 유도 전류 i_2가 흐른다. 또한, 코일 2에 흐르는 교류의 유도전류 역시 2차의 시변자계 H_s를 형성시키는데 이의 방향은 1차 시변자계 H_p의 반대가 된다. 이 코일 2에 의해 형성된 2차 시변자계 H_s는 코일 1에 역기전력을 유발시키게되므로 코일 2의 부하의 변동에 비례하여 코일 1의 기전력도 증감하게 된다. 이제 Fig. 3(b)처럼 코일 2대신 금속판을 코일 1에 근접시키면 도체인 금속판에는 동심원상의 교류인 유도전류가 흐르는데 이를 와전류라 한다. 이 와전류의 세기는 측정 대상물체의 형상이나 전자기적 물성에 의존하게 되고, 또한 와전류의 세기에 따라 코일 1의 회로의 기전력이 증감하므로 이 기전력의 증감 즉, 임피던스의 변화를 측정함으로써 측정대상인 경화층의 깊이를 검출할 수 있다.

즉, 이 와전류센서의 사용에 의해 재료의 물성등을 측정할 때 검출되어지는 것은 센서코일의 임피던스의 변화가 되는데 경화층이 형성되면서 야기되는 물성의 변화와 코일의 임피던스의 변화 사이를 이론적 해석으로 알기는 매우 어렵다. 이에 대한 연구로는 Wait[20]가 환봉 주위의 긴 코일에 대한 임피던스를 계산하였는데, 이들은 코일의 임피던스의 변화가 기지조직과 경화조직의 전자기적 물성과

대상물체의 형상, 그리고 인가되는 주파수에 의존한다는 사실을 밝혔다. 이 중 시편의 재료가 철, 니켈, 코발트와 같은 강자성체인 경우에는 자기적 투자율의 영향이 가장 크게 나타나며, 일반적으로 투자율과 임피던스는 비례관계가 있다.[5]

2장의 설명에서와 같이 레이저 표면경화처리공정에 의해 재료를 가공할 때 경화조직이 기지조직에 비해 매우 적은 자기적 투자율을 가지며, 전기적 전도도는 거의 비슷한 값을 갖기 때문에 원래의 재료의 조직이 경화처리 후 마르텐사이트조직으로 바뀌면 임피던스값은 낮아지게 되고, 경화층의 깊이가 깊어질수록 임피던스값은 비례적으로 낮아진다. 따라서 와전류센서를 사용하여 임피던스의 변화를 측정함으로써 경화층의 깊이를 예측할 수 있다.

4. 전자기장의 이론적 해석

해석하고자 하는 대상영역내에 시간에 따라 변화하는 입력전류 J_o가 가해지는 경우 본래의 자계에 반대방향으로 역자계를 형성하게 하는 와전류(유도전류, eddy-current)가 도체내에 유기된다. 따라서 와전류에 의한 전자기장의 자속분포특성을 유한요소법을 사용하여 해석하기 위해서는 이 와전류의 영향을 고려하여 해석대상이 되는 전자기장의 자속분포에 대한 지배방정식을 유도하여야 한다.[21~23] 이제 해석대상영역에 대해 자속분포에 대한 지배방정식을 맥스웰방정식(Maxwell's equation)으로부터 유도하여 보면 식(4)와 같다.

$$\nabla\times\left(\frac{1}{\mu}\nabla\times A\right)+\sigma\frac{\partial A}{\partial t}+\sigma\nabla\phi-J_o=0 \qquad (4)$$

여기서,

- A ; 자기벡터 포텐셜(magneticvector potential, $\nabla\times A=B$)
- μ ; 자기투자율(magnetic permeability)
- σ ; 전기전도도(electric conductivity)
- J_o ; 계에 가해진 초기 입력전류밀도
- $\nabla\phi$; 와전류에 의한 전 계의 기준을 결정하기 위해 필요한 보정항으로써 해석영역의 경계조건에 의해서 결정되는 항이다.

이 식(4)에서 A는 교류의 자장에 대한 자기 벡터 포텐셜을 나타내기 때문에 이에 대한 시간의 미분은 다음과 같다.

$$\partial A/\partial t=j\omega A \qquad (5)$$

이제 식(4)의 지배방정식으로 표현되는 해석영역에 대해 유한요소법을 적용하여 근사적인 해를 구하기 위해 변분원리를 이용한 범함수 χ를 유도한다. 먼저 해석 대상영역에 대한 경계 조건을 고려하면 S_1(제1경계) 상의 고정 경계조건(dirichlet B.C.)과 S_2(제2경계) 상의 자연 경계조건(neumann B.C.)으로 나눌 수 있고, 와전류 전자장의 문제에서 이 두개의 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{고정 경계조건 : } \delta A=0.\ \text{or}\ A=\text{const} \qquad (6)$$

$$\text{자연 경계조건 : } \frac{1}{\mu}\nabla\times A+H_2=0. \qquad (7)$$

여기서, H_2는 경계 S_2 상에서 주어진 자연 경계조건이다. 이제 해석대상 영역내의 미지함수 A의 변분을 δA라 하고 식(4)의 양변에 δA를 곱하고 영역 D에 대해 적분하면

$$\int_D\left[\nabla\times\left(\frac{1}{\mu}\nabla\times A\right)+\sigma\frac{\partial A}{\partial t}+\sigma\nabla\phi-J_o\right]\delta A\,dD=0 \qquad (8)$$

이 되고, 식(8)에 Gauss-Green의 공식을 적용하면

$$-\int_D\left[\frac{1}{\mu}\nabla\times A\,\delta(\nabla\times A)+\sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t}+\nabla\phi\right)\delta A-J_o\delta A\right]dD+\int_S\left(\frac{1}{\mu}\nabla\times A\right)\delta A\,dS=0 \qquad (9)$$

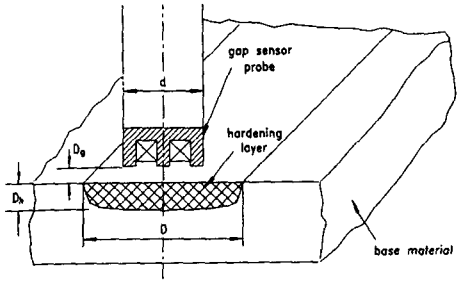
이 된다. 이제 함수 A는 주어진 경계조건을 만족하므로 식(6)에 주어진 경계 S_1 상에 대해서는 δA가 0이 되고, 따라서 식(9)의 좌변 둘째항의 적분은 경계 S_2 상의 적분항이 된다. 따라서 식(9)는

$$\delta\left\{\int_D\left[\frac{1}{2\mu}(\nabla\times A)^2+\sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t}+\nabla\phi\right)A-J_oA\right]dD+\int_{S_2}\left(H_2\times A\right)dS_2\right\}=0 \qquad (10)$$

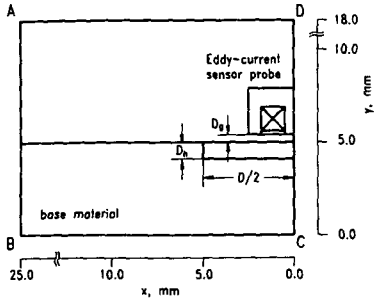
와 같이 되는데, 이 식(10)은 결국 변분원리에 의해 다음과 같은 범함수 χ의 제1변분을 0으로 놓는 범함수의 정류조건식이 된다. 즉,

$$\chi=\int_D\left[\frac{1}{2\mu}(\nabla\times A)^2+\sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t}+\nabla\phi\right)A-J_oA\right]dD+\int S_2(H_2\times A)\,dS_2 \qquad (11)$$

이라 할때



(a) Geometry



(b) Axisymmetric 3-dimensional analytic field (half region)

Fig. 4 Eddy-current probe on to the base material with a hardening layer

$$\delta\chi=0$$

이제 와전류센서에 의한 경화층깊이에 따른 자속분포를 유한요소법에 의하여 해석하여 실험의 결과를 예측하기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 해석 대상영역을 설정하였다. 이 Fig. 4(a)에서 D_h는 경화층의 깊이, D는 경화층의 폭, D_g는 센서프로브로부터 재료표면까지의 거리, 그리고 d는 센서프로브의 지름이다. 여기에서 경화층의 폭 D와 센서프로브의 지름 d는 실제 실험에서 사용되어질 값으로 각각 10 mm와 5 mm를 사용하였고, 경화층의 깊이 D_h와 센서프로브로부터 재료표면까지의 거리 D_g는 해석시 변화시킬 변수로 하였다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 경화층의 깊이를 와전류를 이용하여 측정하는 것을 수치적으로 해석하기 위해서는 해석 대상 물체의 형상이 센서프로브의 축을 중심으로 각 방향으로 일정치가 않기 때문에 일반적인 3차원 문제로 해석하여야 한다. 그러나 와전류 센서에 의해 측정되어지는 대상물체의 크기가 센서프로브의 지름의 2배 이상이 되면 측정의 결과는 큰 차이가 없게 되므로,[24] 본 연구에서는 문제를 간단히 하기 위해 해석대상영역을 축대칭 3차원으로 가정하여 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 2차원상에서 해석하였고, 센서 프로브를 중심으로 축대칭이 되므로 축의 한쪽방향만을 해석대상영역으로 설정하였다. 그리고 전해석 대상영역은 자속의 형성에 영향을 받지 않을 정도로 충분히 크게 잡았다. 이때 경계조건은 Fig. 4(b)의 해석대상영역의 모든경계(A, B, C, D)에서 식(6)에 주어진 고정경계조건(Dirichlet B.C.)만이 존재한다. 이렇게 결정한 전해석대상영역은 Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 삼각형요소로 분할하였다.

이제 각 분할된 요소에 대해 식(11)을 적용하여 각요소에 대한 범함수를 구한 후 이 범함수의 제1변분 $\delta\chi$가 0이 되도록 요소계수매트릭스 $[K^e]$와 요소구동매트릭스 $[F^e]$를 구성시킨 후, 전체요소에 대해 합하면 다음과 같은 전체 영역에 대한 매트릭스 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\delta\chi&=\sum_{e=1}^{n}(\delta[A^e]^T)([K^e][A^e]+[F^e])\\&=(\delta[A]^T)([K][A]+[F])\\&=0\end{aligned}\tag{12}$$

여기서,

$$[K^e]=\int_{D^e}\frac{1}{\mu}[N^e]^T[I][N^e]dD^e$$

$$[F^e]=\int_{D^e}\left[\sigma^e\left(\frac{\partial A^e}{\partial t}+\nabla\phi^e\right)-J_o^e\right][N^e]dD^e+\int_{Se}[H_z^e][N^e]dS^e$$

$[N^e]$: 요소의 형상함수

$[A^e]$: 요소내의 각 절점에서의 자기벡터 포텐셜

이 되고, 따라서

$$[K][A]+[F]=[0]\tag{13}$$

이제 경화층깊이의 변화에 대해 와전류센서가 어떠한 결과를 나타낼 것인가를 예측하기 위해서는 센서 코일의 임피던스를 계산하여야 하는데 이것은 식(13)으로부터 구해진 자기벡터 포텐셜 A에 의해 직접적으로 계산할 수 있다. 전류 I_s가 흐르는 반경 r_i의 원형 루프 코일의 임피던스 z_i는[21]

$$z_i=\frac{j2\pi\omega r_iA_i}{I_s}\tag{14}$$

이 된다. 여기서 A_i는 반경 r_i에서의 자기벡터 포

텐셜의 값이다. 이제 코일의 임피던스는 식(14)를 코일의 단면에 대해 적분을 취하여 얻을 수가 있다. 그러나 식(14)에서 A_i의 값은 코일단면내의 모든 코일이 감겨진 위치에서의 값을 알 수가 없으므로 해석의 결과로 각 절점에서의 구해진 값을 이용하여 각 요소내에서의 평균치를 구해 요소내의 코일의 임피던스를 구한 후 이를 코일에 해당하는 요소에 대해 모두 더하면 코일의 총 임피던스를 얻을 수 있다. 즉, 총 임피던스 Z_{coil}은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Z_{coil}=-\frac{j2\pi\ \omega\ N_s}{I_s}\sum_{i=1}^{N} r_{ci}A_{ci}\Delta_i \tag{15}$$

$$=-\frac{j2\pi\omega J_s}{I_s^2}\sum_{i=1}^{N} r_{ci}A_{ci}\Delta_i \tag{16}$$

여기서,

N_s ; 단일 단면적내의 코일의 감김수
I_s ; 코일에 인가되는 교류전류(주파수 ; f)
J_s ; 코일에 흐르는 교류전류밀도($=N_sI_s$)
N ; 코일 단면에 해당하는 요소의 수
r_{ci} ; 대칭축으로부터 각 요소의 면적중심까지의 거리
A_{ci} ; 각 요소내의 자기벡터 포텐셜의 평균값
Δ_i ; 각 요소의 면적

5. 해석과 결과의 고찰

본 연구에서는 와전류 전자기장을 유한요소법에 의하여 해석하기 위하여 다음과 같은 몇 가지의 가정을 세웠다.

(1) 4장에서 설명되어진 바와 같이 와전류센서에 의해 측정되어지는 대상 물체의 크기가 센서프로브의 지름의 2배 이상이 되면 측정의 결과는 큰 차이가 없게되므로 원래의 일반적인 3차원장의 문제를 간단히 하기 위해 축대칭 3차원으로 가정하여 2차원에서 해석하였다.

(2) 레이저 표면경화공정에서는 표면의 국부적인 층만이 급격히 가열되었다 냉각되므로 기지조직의 물성에는 전혀 가공의 영향이 미치지 않게 되고 경화층 조직의 상은 급격한 온도상승과 하강으로 인하여 일정한 마르텐사이트 조직으로 변하게 되므로 재료내의 물성 즉, 자기투자율과 전기전도도가 각각 일정한 값을 갖는 것으로 하여 해를 구하였다.

(3) 레이저에 의해 표면경화되는 재료는 잔류자기 즉, 자성을 띄지 않으므로 해석영역내에 입력전류 이외에 다른 자장을 일으킬 요소가 없다고 간주하였다.

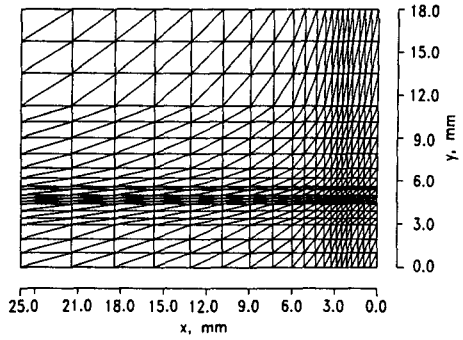


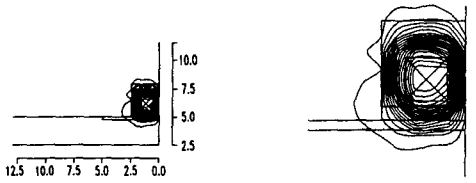
Fig. 5 Triangular finite element mesh

(4) 경화층조직인 마르텐사이트의 전기전도도가 원래의 기지조직의 전기전도도와 거의 같은 값을 갖는다고 가정하였다.

이러한 가정아래 경화층의 깊이의 변화에 민감하게 반응하는 최적의 주파수를 구하기 위해 해석의 입력변수로 인가되는 입력전류의 주파수를 0.5 kHz에서부터 상용의 갭센서에서 사용하는 1 MHz까지의 여러 주파수로 변화시키면서 각각의 주파수에 대해 경화층의 깊이 D_h와 경화층의 표면과 센서프로브 사이의 거리 D_g를 각각 0.0 mm부터 1.5 mm까지 0.1 mm 단위로 변화시켰을 때에 대하여 해석을 하였다. 여기서, D_h와 D_g를 변화시키면 Fig. 5의 삼각형 요소를 재분할하여야 한다.

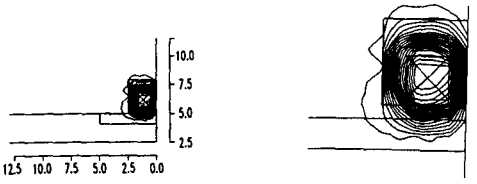
해석은 해석영역내의 각 요소에 대해 식(12)의 매트릭스 방정식을 구한 후 전체요소에 대해 더하여 식(13)의 전체 해석영역에 대한 매트릭스 방정식을 구성시킨 다음 이 식(13)의 매트릭스 방정식을 풀어 각 요소절점에서의 자기벡터 포텐셜을 구하였다. 그리고 이렇게 구해진 자기벡터 포텐셜의 값을 식(16)에 대입하여 센서 프로브에서 측정할 수 있는 임피던스를 계산하였다. 그리고 이의 결과들로부터 경화층의 깊이의 변화에 대해 임피던스가 가장 민감하게 변화하는 입력 주파수를 구하였다.

Fig. 6(a)와 (b)는 센서에 가해지는 인가주파수가 1 MHz이고 센서거리가 0.4 mm일 때에 경화층의 깊이가 각각 0.3 mm와 0.9 mm일 때의 자속분포 특성을 보여준다. 여기서, 각각의 등자속선의 자기포텐셜 값은 선형함수적으로 증가시켜가며 나타내었다. 이 결과를 비교하여 보면 인가주파수가 1



Hardening depth : 0.3 mm Magnify an object 3 times

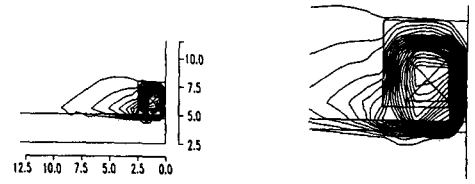
(a)



Hardening depth : 0.9 mm Magnify an object 3 times

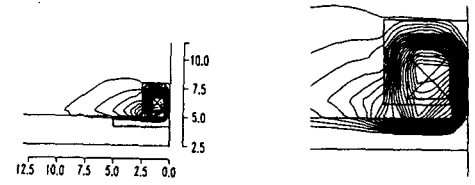
(b)

Fig. 6 Magnetic flux distribution of frequency 1 MHz and D_g=0.4 mm



Hardening depth : 0.3 mm Magnify an object 3 times

(a)



Hardening depth : 0.9 mm Magnify an object 3 times

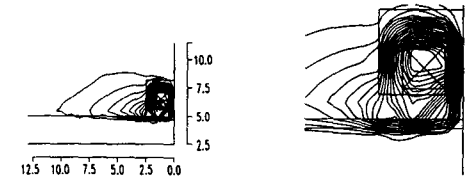
(b)

Fig. 7 Magnetic flux distribution of frequency 5 kHz and D_g=0.4 mm

MHz인 경우에 있어서는 경화층의 변화에 대해 자속의 재료내 침투깊이가 미세하게 변화함을 알 수 있다. 즉, 경화층의 형성이 적을 때는 자속의 침투깊이가 깊고, 경화층의 형성이 커질수록 자속의 침투는 얕아짐을 알 수 있다. 이것은 표면에 자기투자율의 값이 작은 경화층의 형성이 커지면 자속의 침투를 방해하기 때문인 것으로 생각된다.

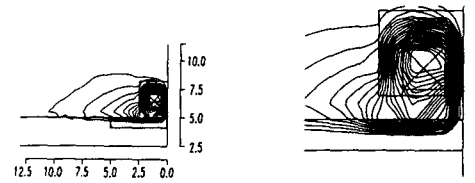
Fig. 7(a)와 (b)는 센서에 가해지는 인가주파수가 5 kHz, 센서거리가 0.4 mm, 그리고 경화층의 깊이가 각각 0.3 mm와 0.9 mm일 때의 자속분포 특성을 보여준다. 그리고 Fig. 8(a)와 (b)는 Fig. 7의 경우에서 센서거리를 0.7 mm로 하였을 때의 자속분포의 변화를 보여준다. 이 두 결과를 비교하여 보면 경화층의 깊이가 변함에 따라 자속의 분포특성이 Fig. 6의 경우와 마찬가지로 경화층의 형성이 적을 때는 자속의 침투깊이가 깊고, 경화층의 형성이 커질수록 자속의 침투는 얕아짐을 알 수 있다. 그러나 경화층 깊이의 변화에 대한 자속분포의 변화는 미세한 차이만을 나타내고, 오히려 센서거리의 변화에 대해서 민감하게 변함을 알 수 있다.

따라서 센서거리의 변화에 대해서는 둔감하고, 경화층깊이의 변화에 대해서는 민감하게 반응하는 인가주파수를 구하여야 하는데 이를 위하여 여러가지 인가주파수에 대해 해석하여 이를 종합적으로 나타내면 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 앞의 해석으로부터 구하여진 자기벡터 포텐셜의 값을 이용하여 계



Hardening depth : 0.3 mm Magnify an object 3 times

(a)



Hardening depth : 0.9 mm Magnify an object 3 times

(b)

Fig. 8 Magnetic flux distribution of frequency 5 kHz and D_g=0.7 mm

산한 코일의 임피던스 변화를 주파수와 경화층의 깊이의 변화에 대해 나타낸 것이다. 이 Fig. 9에서 보면 경화층의 깊이가 깊어질수록 임피던스의 값은 낮아지는 경향을 보임으로써 경화층의 깊이가 깊어지면 일반적인 갭센서의 경우에 있어서는 그만큼 거리가 멀리 떨어져 있는 것으로 측정될 것이라는 예측을 하게 된다. 그러나 상용의 갭센서에 가해지는 인가주파수 1 MHz의 경우를 보면 경화층의 변

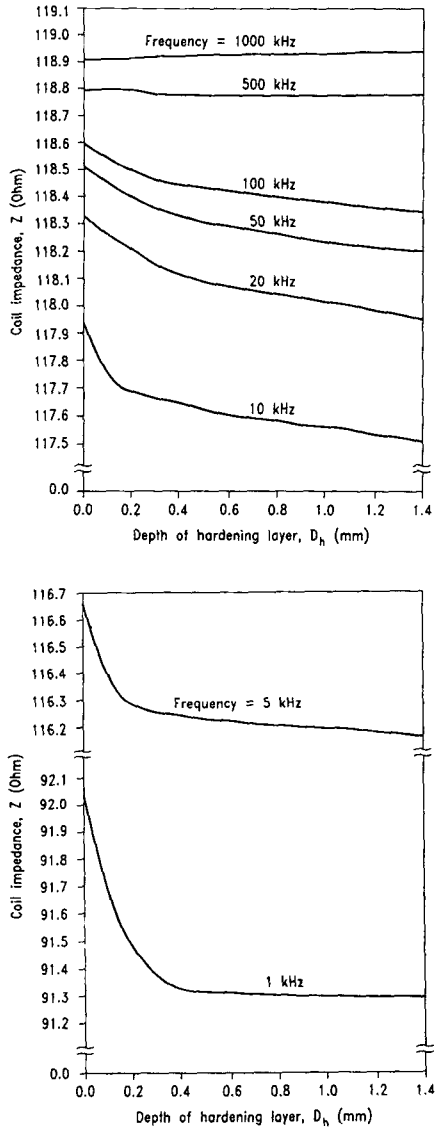


Fig. 9 The relation between coil impedance and hardening layer depth

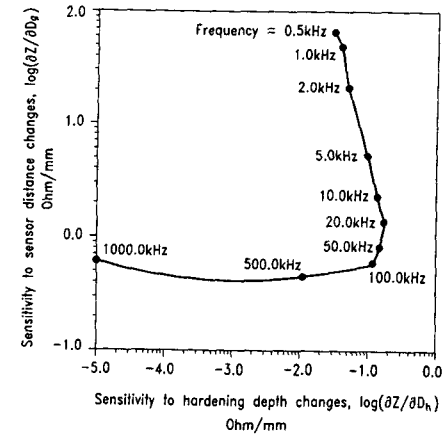


Fig. 10 Sensitivity for a change of hardening depth and sensor distance

화에 대해 임피던스의 변화가 거의 없어 실제로 갭 센서를 이용하여 경화층의 깊이를 측정을 한다 하더라도 그 관계를 명확하게는 나타내지 못하리라고 생각된다. 이제 인가주파수가 1 MHz보다 작게 떨어질수록 경화층의 깊이와 임피던스의 관계가 비교적 선형성을 유지하면서 명확하게 됨을 볼 수 있다. 이러한 경향은 주파수가 10 kHz로 떨어질 때까지 계속되고 다시 10 kHz 이하가 되면 경화층의 깊이가 0.2 mm까지는 코일의 임피던스가 급격히 변화하지만 0.2 mm 이상이 되면 경화층 깊이와 임피던스와의 관계가 둔화됨을 보여준다. 이것은 인가주파수가 10 kHz 이하에서는 자속의 분포가 넓은 영역으로 확장되어 경화층외부의 기지조직에 많은 영향을 받기 때문으로 생각된다.

Fig. 10은 주파수에 따른 경화층의 깊이와 센서거리의 변화에 대한 민감도를 종합적으로 나타낸다. 여기서, 경화층의 깊이변화에 대한 민감도 S_h는 임피던스의 변화를 경화층의 깊이에 대해 편미분을 취하여 얻어진 값으로 정의하였고, 센서거리의 변화에 대한 민감도 S_g는 임피던스의 변화를 센서거리에 대해 편미분을 취하여 얻어진 값으로 정의하였다. 즉,

$$S_h=\frac{\partial Z}{\partial D_h}\Big]_{D_h=0.6\text{ mm},\ D_g=0.4\text{ mm}} \tag{17}$$

$$S_g=\frac{\partial Z}{\partial D_g}\Big]_{D_h=0.6\text{ mm},\ D_g=0.4\text{ mm}} \tag{18}$$

이다. 여기서, 기준점 $D_h=0.6$ mm와 $D_g=0.4$ mm는 표면경화공정에서 주로 관심의 대상이되는 점을 선정한 것이다. Fig. 10에서 보면 경화층의 변화에 따른 민감도는 주파수가 1 MHz에서 20 kHz 근방에 이르기까지 점점 증가하고 센서거리의 변화에 대한 민감도는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그리고 주파수가 20 kHz 이상이 되면 경화층의 변화에 대한 민감도는 거의 변화가 없이 센서거리의 변화에 대한 민감도만 큰 폭으로 증가한다. 따라서 경화층의 변화에 대한 민감도가 가장 큰 주파수는 20 kHz 근방이 되지만 센서거리의 변화에

대한 민감도를 감안하여 최적의 주파수구역은 10 kHz에서 50 kHz 사이의 값이 되는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 레이저에 의해 표면경화되어지는 재료의 경화층의 깊이를 실시간으로 측정하기 위한 방법으로써 와전류형의 센서를 사용하는 것을 제안하였고, 이의 타당성을 증명하기 위하여 전자기장의 자속분포에 대한 모델을 세우고 이를 유한요소법에 의해 이론적으로 해석하였다. 이 해석되어진 결과로부터 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

(1) 경화층의 깊이가 깊어질수록, 센서거리가 멀어질수록 센서코일의 임피던스는 낮은값을 나타낸다. 즉, 범용의 와전류형 갭센서(gap sensor)를 사용하여 경화층깊이를 측정하게 될 경우 센서거리가 일정하게 떨어져 있음에도 경화층깊이가 깊어지면 측정거리가 멀리 떨어져 있는것처럼 측정이 될 것이다.

(2) 센서거리의 변화에는 비교적 둔감하고, 경화층의 깊이변화에 대해 민감하게 측정되는 최적의 인가주파수는 10 kHz에서 50 kHz의 값이 됨을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 경화층깊이를 측정하기 위한 방법으로써 와전류법이 사용될 수 있다는 것과, 와전류 센서프로브의 설계와 인가주파수의 결정에 유한요소법을 사용한 해석의 결과가 이용될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

그러나 만일 경화층의 깊이를 측정하기 위해 상용화된 갭센서를 사용하게 되면 인가주파수가 거리의 변화에 민감하게 되도록 고정되어 있기 때문에 본 연구에서 원하는 재질물성의 변화에 의한 임피던스의 변화를 감지하는 것보다 약간의 거리의 변동에 더 민감하게 반응하여 와전된 신호를 얻게 될지도 모르며, 또한 와전류의 표준침투깊이에 한계가 있도록 주파수가 고정되어 있기 때문에 관심의 대상이 되는 경화층의 영역에 대해 민감한 반응을 보이기는 어렵다. 따라서 와전류형의 센서를 사용하여 경화층의 깊이를 실시간으로 측정할 때보다 정확한 모니터링장치를 얻기 위해서는 해석의 결과로 구한 인가주파수를 센서프로브에 인가하며, 신호의 처리에서 재질의 물성변화에 의한 임피던스의 변화를 가장 명확하게 나타내 줄 수 있도록 신호처리회로를 구성시켜야 한다.

참고문헌

(1) 김도훈, 1990, "레이저 가공학," 경문사, pp. 235~255.

(2) Mazumder, J., 1983, "Laser Heat Treatment: The State of Art," *Journal of Metals*, pp. 18~26.

(3) KS ; DO215, 1985, *Methods of Measuring Case Depth for Steels.*

(4) *Nondestructive Inspection and Quality Control,* Metals Handbook 8th ed., ASM, Vol. 11.

(5) *Electromagnetic Testing,* Nondestructive Testing Handbook 2nd ed., Vol. 4.

(6) Doebelin, E. O., 1990, *Measurement Systems ; Application & Design,* McGraw Hill International Edition 4th ed.

(7) Bussiere, J. F., 1986, "On-Line Measurement of the Microstructure and Mechanical Properties of Steel," *Material Evaluation,* Vol. 44, pp. 560~567.

(8) Rumbold, J. G. and Krupski. S., 1981, "Ultrasonic Thickness Variation Measurement of Hot Forged Cannon Tubes," *Material Evaluation,* Vol. 39, pp. 939~942.

(9) Gericke, O. R., 1963, "Determination of the Geometry of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing," *J. of the Acoustical Society of America,* Vol. 35, No. 3, pp. 364~368.

(10) Rubruck, V., Geissler, E. and Bergmann, H. W., 1990, "Case Depth Cotrol for Laser Treated Materials," *3rd European Conference on Laser Treatment of Materials,* Vol 1, pp. 207~216.

(11) Hain, W., 1989, "Monitoring Material Property Transformations with Electrical Resistivity," *Material Evaluation,* Vol. 47, pp. 619~630.

(12) Bieler, H. W., et al., 1988, *Methods of Adaptive Control in Surface Processing with Laser Radiation,* 2nd ECLAT, pp. 46~53.

(13) Bergmann, H. W., Gaissler, E. and Erlargen, 1988, *On-Line Computer Controlled Laser Hardening*, 2nd ECLAT, pp. 109~113.

(14) Bach, G., Goebbels, K. and Theiner, W. A., 1988, "Characterization of Hardening Depth by

Barkhausen Noise Measurement," *Material Evaluation,* Vol. 46, pp. 1676~1680.

(15) Stephan, C. H. and Chesney, H. L., 1984, "Computer-Aided Measurement of Case Depth and Surface Hardness in Automobile Axle Shafts," *Materials Evaluation,* Vol. 42, pp. 1612~1618.

(16) 한승용, 1988, "와전류법을 이용한 강의 표면 경화층 측정에 관한 연구," 한양대학교, 석사학위논문.

(17) 박영준, 1992, "레이저 표면경화공정을 위한 경화층깊이의 실시간 측정에 관한 연구," 한국과학기술원, 석사학위논문.

(18) 박희선, 1982, "철강 재료학," 동명사, pp. 103~105, pp. 155~176.

(19) *Properties and Selection ; Irons and Steels,* Metals Handbook 9th ed., ASM, Vol. 1.

(20) Wait, J. R. and Gardner, R. L., 1979, "Electomagnetic Nondestructive Testing of Cylinderically Layerd Conductors," *IEEE Trans. on Instrumentation,* Vol. IM-28, No. 6, pp. 159~161.

(21) Ida, N., Palanisamy, R. and Lord, W., 1983, "Eddy Current Probe Design Using Finite Element Analysis," *Material Evaluation,* Vol. 41, pp. 1389~1394.

(22) Palanisamy, R. and Lord, W., 1980, "Finite Element Analysis of Eddy Current Phenomena," *Materials Evaluation,* pp. 39~43.

(23) 임달호, 1987, "전기계의 유한요소법," 동명사.

(24) *Gap Sensor ; Non-Contacting Displacement Measurering System,* Applied Electronics Corporation