

강자성 박판소재의 잔류응력 측정 시스템의 설계 및 제작

김상원* · 양충진

포항산업과학연구원 재료공정연구센터 금속·코팅재료연구팀
경북 포항시 남구 효자동 산 32, 790-600

(2001년 1월 15일 받음, 2001년 2월 9일 수정본 받음)

강자성 극박소재에 유기된 잔류응력을 검출하기 위하여 자기유도형 탐촉자(probe)를 설계·제작하였으며, 이를 장착한 잔류응력 평가시스템은 박판내에 유기된 잔류응력의 주응력 방향과 크기를 효과적으로 결정하여 준다. 이 시스템을 반도체 칩 패키지(package)용으로 사용하는 Fe-42Ni계 lead frame 판재의 잔류응력 검출에 적용한 결과, 양호재 및 잔류응력과다 불량재에 대한 출력전압은 명확히 구별되었고, 잔류응력이 축적된 판재는 양호재와 비교하여 응력의 분포 및 크기에 있어 항상 차이를 나타내었다. 이러한 차이는 탐촉자에 투입하는 전류와 주파수의 합수로 잘 분해되어질 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

철강재의 제조공정에서 용접, 성형, 열처리 등으로 도입되는 재료내부의 잔류응력은 기계 및 구조물의 강도와 변형에 있어 중요한 문제가 되고 있으며, 특히 높은 정도를 요구하는 기계 혹은 미세구조물, 플랜트의 설비 등에 대한 비파괴 정밀 측정기술의 확보는 중요한 의미를 가진다. 잔류응력평가는 대부분은 응력해방에 의한 파괴 측정으로, 실물 측정시에는 비파괴 측정을 해야만 하는 어려운 점이 많다. 잔류응력을 비파괴로 측정하는 방법으로 가장 일반적인 것이 X선 응력측정법[1, 2]이며, 그 외 스트레인 게이지와[3], 초음파를 이용하는 방법[4, 5] 등이 있다. 최근에는 실제 구조물의 초기응력 혹은 거시적인 잔류응력 측정이 요구되고 있으며, 이런 종류의 응력은 구조물 제작시 스트레인 게이지의 부착 혹은 표식점의 형성 등 어떠한 조작을 실시하지 않으면 어느 정도 응력이 발생했는가 알 수 없다. 현재까지 X선 측정법이 가장 유력한 수단이나, X선에 의한 응력측정은 고가의 장치와 높은 기술이 요구되는 한편, 측정되는 두께는 결정격자간 변위의 측정으로 표면으로부터 수십 μm 의 얇은 층에 분포하는 응력이다. 따라서 미시적인 잔류응력의 측정에서는 유용한 방법이지만 거시적인 잔류응력 측정에는 부적절한 점이 많다.

따라서 지금까지 측정이 곤란했던 이와 같은 응력을, 대부분의 기계 및 구조물은 강자성 철강재로 이루어져 있으므로 응력에 따라 재료의 자기특성이 변화하는 이른바 자기탄성효과를 이용하여 비파괴로 실물 측정하는 기술의 확립에 주안점을 두고 본 연구를 착수하였다. 특히 본 연

구에서는, 동합금계보다 강도가 훨씬 우수하고 열팽창율이 작아 IC의 신뢰성 향상에 기여하는 Fe-42Ni계 lead frame 판재를 대상소재로 하여 잔류응력 평가시스템을 개발함으로써 거시적 잔류응력측정의 기초를 확립하고자 하였다. lead frame 판재를 대상소재로 한 것은, 소재의 냉간압연, 교정가공, 절삭·연마가공 등으로 소재 내에 잔류응력이 발생하며 특히 슬릿트(slit) 가공시 소재의 가장자리(edge)부에서 발생하는 잔류응력은 스탬핑(stamping)·에칭(etching)공정에서 뒤틀림 현상을 유발시켜 공정이 정지되어야 하는 등 제품생산에 치명적 악영향을 미친다. 이러한 잔류응력을 판정하기 위하여 잔류응력이 존재하는 소재의 표층부를 용해시키면 잔류응력의 균형이 붕괴되어 판재가 휘게 되며 그 휨의 정도로 잔류응력을 판별하는 방법과 가장자리에서 2 mm 정도의 폭과 160 mm 정도의 길이로 슬릿트 가공하면 잔류응력의 유무에 따라 슬릿트의 변형형상과 정도로 판별하는 방법 등이 이용되고 있으나 장시간을 필요로 한다. 따라서 잔류응력 유무를 단시간 내에 검지할 수 있는 잔류응력 평가시스템의 개발이 시급히 요구된다.

II. 잔류응력측정에 관한 이론적 배경

2.1. 측정원리

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 피측정체의 표면에 고투자율 재료에 1차 코일(exciting coil, 여자코일)과 2차 코일(searching coil, 검출코일)이 +자 모양으로 일체화된 probe를 접촉하면 폐자기 회로가 구성된다. 1차 코일에 피

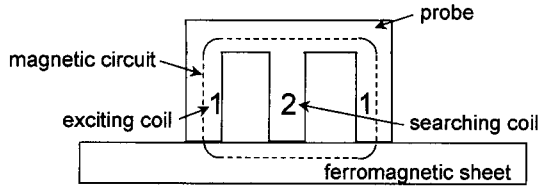


Fig. 1. Closed magnetic circuit constituted with magnetic inductive probe.

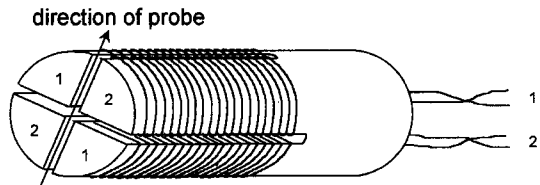


Fig. 2. Scheme of magnetic inductive probe.

측정체를 자화시킬 교류전류를 흘리면 자계가 발생한다. 이 자계의 영향권내에 있는 강자성체인 피측정체에 응력을 가하면 자기변형효과로 발생한 유도자기이방성에 따라 자화방향이 변화하고 이에 따라 유도기전력이 발생하며 응력의 상태에 따라 변화한다. 이 기전력의 변화는 1차 코일에 직각방향인 2차 코일에서 검출된다[6, 7]. Fig. 2에는 본 연구에서 제작한 자기유도형 탐촉자(probe)의 외관을 나타낸다. 이 탐촉자를 응력이 전혀 없는 이상적인 등방성 강자성 피측정체에 눌러 접촉시키면 임의의 순간 자극분포는 Fig. 3의 (a)와 같이 된다. 즉 같은 량의 N, S극이 유기되어 2차 코일에는 유도기전력이 유기되지 않는다. 한편 인장응력이 작용하고 있고 자기변형상수 λ 가 양(+)인 피측정체에 눌러 접촉시킨 경우, 인장응력방향으로의 자화는 용이하게, 직각방향으로의 자화는 곤란하게 된다. 따라서 그 순간의 자극분포는 (b)와 같이 되며 이 경우는 2차 코일에 유도기전력이 유기된다. 결국 1차 코일에 가한 교류전압에 동기화해서 2차 코일의 유도기전력을 측정하면 그때의 평균출력전압이 응력과 관계한 값으로 파악되는 것이다.

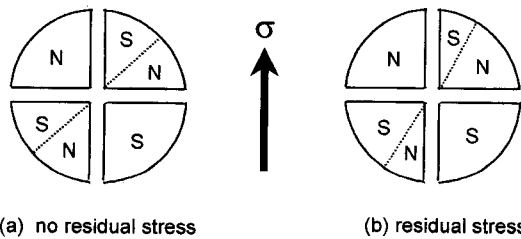


Fig. 3. Change of magnetic poles according to residual stress.

2.2. 측정이론

그림 1의 자기회로에서 누설자속이 없고, 응력 σ 의 방향으로 피측정체의 자화 M 이 배열한다고 가정하면, 정현파 자기유도하의 자기회로에서 발생하는 유도기전력 e 는 자기특성과 관련하여 다음의 일반식[8]으로 정리된다.

$$\begin{aligned} e &= -n \frac{d\Phi}{dt} \\ &= -nA \frac{dB}{dt} \\ &= -nA \frac{d(H + 4\pi M)}{dt} \\ &= -nA \frac{d\{H + 4\pi (M_s^2 H / 3\lambda_s \sigma)\}}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

식에서, Φ 는 자속, B 는 자속밀도, M_s 는 포화자화, A 는 단면적, H 는 인가한 자계, λ_s 는 포화자기변형상수이다. 따라서 상기의 물성치중 σ 를 제외한 나머지는 재료와 측정조건이 결정되면 고정되는 상수로 취급 가능함으로 얻어지는 e 는 σ 의 함수로 나타나게 된다.

자기회로적 관점에서 위 사항을 다시 검토하면, 탐촉자 및 피측정체의 자기저항 R_s, R_m 는 다음과 같이 된다.

$$R_s = l_s / (\mu_s \cdot S_s) \quad (2)$$

$$R_m = l_m / (\mu_m \cdot S_m) \quad (3)$$

여기서 l_s, μ_s, S_s 는 각각 탐촉자의 유효 자로, 투자율, 유효 단면적이며, l_m, μ_m, S_m 는 각각 피측정체의 유효 자로, 투자율, 유효 단면적이다. 따라서 탐촉자와 피측정체로 이루어지는 자기회로에서 자기저항 R 은 다음과 같다.

$$R = R_s + R_m \quad (4)$$

이식과 자속 Φ 와의 관계를 구한 후, e 와의 관계를 도출하면,

$$\begin{aligned} e &= -n \frac{d\Phi}{dt} \\ &= -n \frac{d\{nI / (l_s / (\mu_s \cdot S_s) + l_m / (\mu_m \cdot S_m))\}}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (8)이 된다. 여기서 e 는 $n, I, \mu_s, S_s, \mu_m, S_m$ 등에 비례하게 되는데 $n, I, \mu_s, S_s, \mu_m, S_m$ 는 탐촉자 제작시 재질, 형상 및 권선수, 측정시의 투입전류가 결정되면 고정되는 값으로 피측정체에 응력이 작용하는 경우 변화하는 것은 μ_m 밖에 없다. 따라서 출력쪽의 유도기전력은 피측정체의 투자율 μ_m 의 변화에 비례하고 특히 출력감도를 좋게 하기 위하여 상기의 내용에서 R_s/R_m 를 작게 할수록 좋음을 확인할 수 있다.

결국 현재의 경우와 같이 1, 2차 자극이 일체화되어 있는 탐촉자를 사용하는 경우 R_s/R_m 을 작게 하기 위한 방안으로 R_m 에 비하여 R_s 를 대폭 감소시킬 필요가 있다.

따라서 식 (3)에서 μ_s 를 μ_m 보다 훨씬 더 큰 물질로 탐촉자를 제작해야만 되는 재질선정에 있어 불가결한 요구조건이 생긴다.

이상에서는 자기적 잔류응력 측정에 대하여 개론적으로 설명하였으나 본 연구에서 목표로 하는 잔류응력 측정의 대상체인 lead frame 판재는 두께가 매우 얇은 2차원적 형상이므로 평면응력상태에 있다고 간주하면, 도출 과정이 매우 복잡하나 응력과 자기특성간의 관계는 다음식으로 간단하게 표현된다[9].

$$e = -n (d\Phi/dt) = K(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\phi \quad (6)$$

여기서, σ_1 , σ_2 는 주응력 방향이며, ϕ 는 σ_1 과 탐촉자의 방향이 이루는 각도이다. K 는 자기변형감도로 $\Delta\mu_m/\mu_m$ 을 의미하며, 재료마다 다른 상수이다.

III. 잔류응력평가 시스템의 제작

3.1. 자기유도형 탐촉자의 제작

탐촉자의 제작에 있어 식 (3)에서 확인된 대로 자기출력감도를 좋게 하기 위하여 자기회로를 짧게 하고 단면적을 크게 하며 투자율이 큰 물질을 사용하는 것이 유리하다. 현재 응력측정 대상체인 lead frame 판재는 폭이 30.5~48 mm, 두께가 0.125~0.25 mm인 것이 주종이며, 폭방향으로의 응력변화 평가가 중요하다. 따라서 폭방향으로의 응력 평가를 위해서는 가능한 작은 탐촉자의 제작이 필요하다. 이와 같은 상황이라면 자로와 단면적을 조절하는 데는 한계가 있으므로 탐촉자의 재질을 투자율이 큰 것으로 채용함으로써 출력감도를 높였다. 탐촉자의 재질로서 초고투자율재료로 유명한 Mo퍼멀로이로 하였으며 직경을 5 mm ϕ 로 한 탐촉자를 제작하였다. 1차 코일은 0.22 mm ϕ 의 피복동선을 자극이 되는 각각의 다리에 100회씩, 2차 코일은 0.08 mm ϕ 의 피복동선을 200회씩 권선하였으며, 임의의 순간 자극의 분포가 그림 3과 같이 되도록 결선하였다. Table I과 II는 Mo퍼멀로이의 성분과 자

기특성을 나타낸다.

3.2. 시스템의 제작

수작업으로 불편했던 기존의 방법을 대폭 개선시키기 위하여 시스템을 고안·제작함에 있어 다음 사항을 고려하였다. ① 대면적의 시편에 있어서도 탐촉자를 동일한 압력으로 피측정체에 접촉시켜 측정의 정확도를 높일 수 있고, ② 탐촉자의 측정위치변경 및 회전각도의 제어가 가능하며, ③ 대면적 시편의 평가에 있어 단시간내 측정을 완료할 수 있을 것 등이다. 이러한 사항을 만족시키기 위하여 탐촉자의 X, Y, Z축 이동을 스마트 액츄에이터(smart actuator)가 접속된 스텝핑 모터(steping motor)를 사용함으로써 각각 최대 300 mm, 200 mm, 50 mm로 이동 가능하게 하였고, 회전은 스텝핑 모터의 구동력을 타이밍 벨트(timing belt)를 통하여 4개의 탐촉자에 도달하게 함으로써 정확히 제어되도록 하였다. 피측정체에 4개의 탐촉자를 동시에 접촉할 때 동일한 하중이 부과되도록 동일 사양의 스프링(SWP강)을 사용하였다. 탐촉자에 투입하는 전류(1~50 mA) 및 주파수(0.1~10 kHz)를 결정하며 검출된 신호를 증폭(8 채널, X 10~X 2650)하고 받아들이는 신호 발생부 및 검출회로부를 제작하였으며, 탐촉자의 이동과 관련한 로봇(robot)부와 각종 신호제어부는 컴퓨터로 인터페이싱(interfacing)시켜 모든 작업이 지령에 따라 자동 혹은 수동으로 진행될 수 있도록 구축하였다. 시스템 구체적 구성도를 Fig. 4에, 제작 완성된 시스템의 외관을 Fig. 5에 나타내었다. 시스템 운용 S/W인 Iron Stress Tester version 1.0은, Windows NT 기반의 환경에서 작동하도록 구성하였다.

IV. Lead frame 판재의 잔류응력 평가

본 연구에서는 동일 공정으로 제작된 동일 사양의 lead frame 판재에 있어 실제 스텝핑 공정에서 양호와 잔류응력 과다존재로 불량판정이 난 시편을 대상으로 제작된 시

Table I. Chemical composition of probe material.

elements	Ni	Fe	Mo	Mn	Si	C	P	S	the others
range (wt.%)	79.5-80.3	bal.	3.9-4.2	0.7 max.	0.02 max.	0.02 max.	0.005 max.	0.005 max.	0.1

Table II. DC magnetic properties of probe material.

DC properties	B_m (Gauss)	B_r (Gauss)	H_c (Oe)	μ_o	μ_m	B_m/B_r
values	6266	6020	0.018	20700	247633	0.96

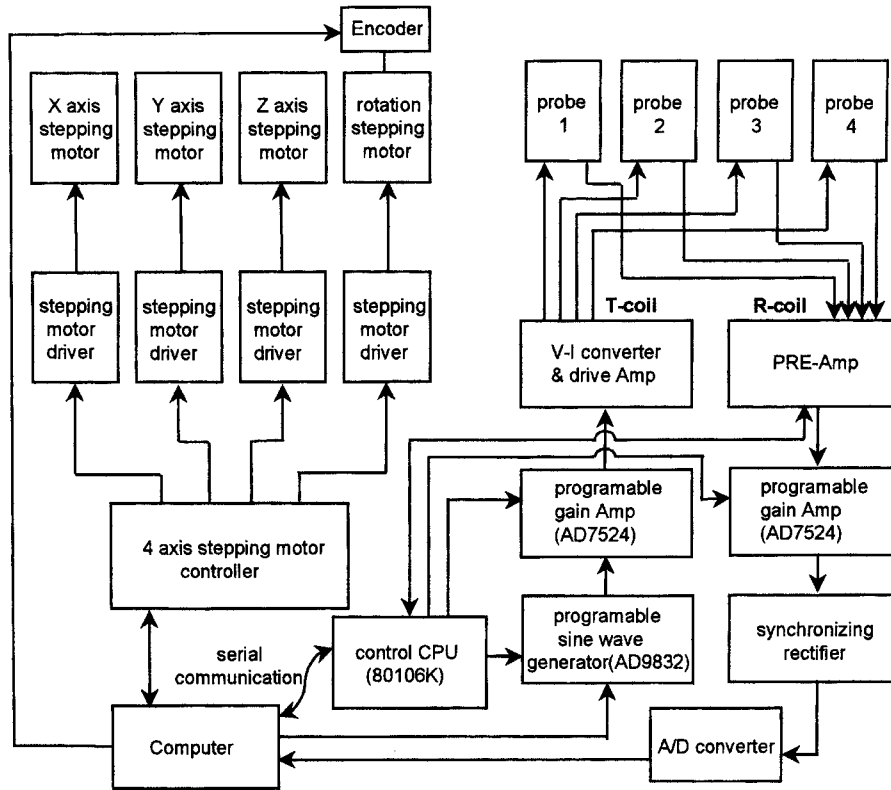


Fig. 4. Block diagram of the residual stress measurement system.



Fig. 5. Photograph of the residual stress measurement system constructed in this work.

시스템의 성능확인에는 물론, 양호 및 불량재에서 나타난 자기 출력을 비교·검토했었다.

4.1. 소재의 재료적 특성

자속밀도 등 자기적 성질은 재료의 조성, 가공, 열처리 등에 의하여 정해지나 응력에 의한 변화는 앞의 인자들을

제어 혹은 보정하면 응력의 영향만을 검출하는 것이 가능할 만큼의 크기를 가질 수 있다. 그러나 자성에 영향을 주는 전술의 제인자의 영향이 크기 때문에 응력을 정밀하게 측정하기 위하여 이들의 영향을 가능한 한 작게 할 필요가 있다. 따라서 잔류응력 이외 자기출력에 영향을 줄 수 있는 인자로서 성분, 열처리, 결정립경 등이 있으므로 스템핑 공정에서 양호 및 불량재로 판정난 판재를 시편으로 상기 인자에 어떠한 차이가 있는지 성분분석, 미세조직, 표면조도, 자기특성 등을 평가하였다. 구체적 결과는 생략하였으나 각 특성은 양, 불량재에 있어 거의 동일하게 나타나는 것이 확인되었다. 이는 압연조건, 열처리 등 소재의 제작공정변수에 크게 의존하는 바, 이미 최종제품에 대하여 비교·검토했고 있으므로 당연할 수 있다. 그러나 스템핑 공정에서 불량으로 판정되는 판재가 존재하므로 확인된 결과만으로는 불량재의 존재가 설명되지 않는다. 따라서 불량재는, 스템핑 공정에서 사용하는 판재 코일의 슬리팅(slitting) 혹은 미지의 원인에 의해 소재의 길이 혹은 폭방향에서 국부적으로 과다하게 존재한 잔류응력이 원인이 되어 발생한 것으로 판단하였다.

4.2. 탐촉자의 전자기적 특성

판재의 잔류응력을 평가하기에 앞서 탐촉자를 시편에 접촉시키지 않은 상태에서 1차 코일에 투입하는 교류전류에 대하여 2차 코일에서 검출되는 유도기전력을 조사하였으며 그 결과를 Fig. 6, 7에 나타내었다. 현재의 경우, 출력전압의 상대 비교가 목적이므로 반드시 유도기전력이 영이 되지 않아도 무방하다. Fig. 6은 주파수 함수로 투입전류의 크기에 따른 출력전압의 변화이다. 그림에서 출력전압은 투입전류가 증가함에 따라 직선적으로 증가하며 주파수가 증가할수록 그 정도는 현저해짐을 알 수 있다. Fig. 7은 투입전류 함수로 주파수에 따른 출력전압의 변화이다. Fig. 6과는 달리 출력전압은 주파수가 증가함에 따

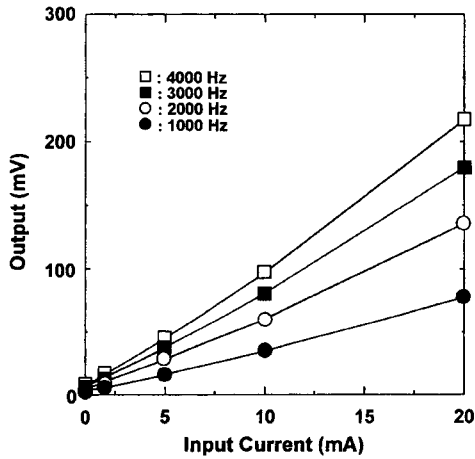


Fig. 6. Input current dependence of output voltage as a function of frequency.

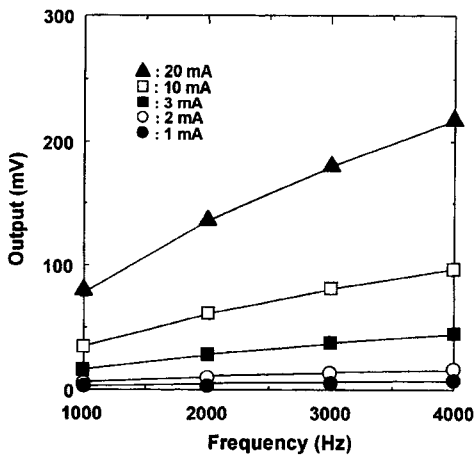


Fig. 7. Frequency dependence of output voltage as a function of input current.

라 포물선적으로 증가하고 있으며 투입전류가 증가할수록 그 정도는 현저해진다. 이와 같은 미묘한 차이는 주파수 증가에 따른 탐촉자 재질의 와전류에 의한 투자율의 감소와 관련있다. 이 결과로부터 출력전압을 크게 얻기 위해서는 라면 주파수보다 투입전류를 증가시키는 것이 효과적임을 알 수 있고, 본 연구에서는 이를 바탕으로 투입전류 및 주파수의 변화범위를 각각 1 mA~20 mA, 1000~4000 Hz로 하였다. 본 시스템에서는 50 mA까지의 전류투입이 가능하나 40 mA 이상이 되면 검출되는 출력전압파형에 심한 왜곡이 발생하여 평균값을 취하기가 곤란하여 오차가 커지며, 4000 Hz 정도에서 탐촉자를 시편에 접촉시켰을 때 소재에의 표피효과(skin depth)에 의한 침투깊이는 0.6 mm 정도로 통상 lead frame 판재의 두께이상이 되므로 두께 방향으로의 응력검출에는 문제가 없기 때문이다. 한편, 이미 언급된 탐촉자의 제작 등이 이상적으로 이루어졌을 경우, 상기의 실험결과와는 달리 2차 코일에서 검출되는 유도기전력은 영(zero)이 되어야 함이 타당하다. 이는 근본적으로 1, 2차 자극이 일체화된 탐촉자의 기본 형상에 기인하며, 제작시 자극 가공의 정밀도 및 코일 권선시 자극의 변형 등도 일부 원인이 되었을 것으로 추정된다. 따라서 현 상황에서 2차 유도기전력을 영으로 하는 것은 곤란하나, 향후 보정 등을 생각하면 제작 완성된 탐촉자 고유의 전자기적 특성에 관한 상기의 정보를 반드시 조사해 둘 필요가 있다. 현재의 경우, 양, 불량재간 출력전압의 상대 비교가 목적이므로 동일한 탐촉자를 사용하면 반드시 유도기전력이 영이 되지 않아도 무방하다.

4.3. 판재의 잔류응력평가

4.3.1 양호 판정 시편에 대한 잔류응력평가

양호한 판재로 판정된 두께 0.15 mm, 폭 35 mm, 길이 200 mm의 시편으로 주파수를 4000 Hz, 2000 Hz, 1000 Hz로 바꾸고 각 주파수에서 투입전류를 1 mA, 5 mA, 20 mA로 변화시켰을 때 출력전압의 변화를 측정하였다. 얻어진 결과중 4000 Hz, 1 mA의 투입전류로 얻어진 것을 대표적인 일례로 Fig. 8에 나타내었다. 측정은 탐촉자를 원점에서 시편의 폭방향으로 4 mm 간격으로 28 mm까지 이동하며 그후 길이방향으로 4 mm 이동하여 폭방향으로 전과 동일한 방법으로 되풀이하여 길이방향으로 40 mm까지 이동시키면서 수행되었다. 그림에는 폭방향으로 16 mm까지 이동시 결과만 나타내었다. 또한 각각의 측정점에서 탐촉자를 0°에서 160°까지 20° 간격으로 회전시켰다. 그림의 가로방향(X축)이 시편의 길이방향이며, 세로방향(Y

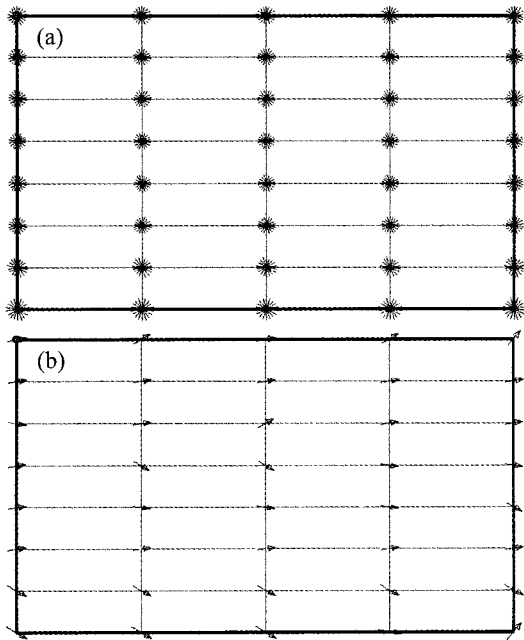


Fig. 8. Variations of output voltages measured with 1 mA input current of 4000 Hz for qualified lead frame thin sheet, (a) distribution of residual stress, (b) direction of maximum residual stress.

측)이 폭방향이므로 각 측정점을 X, Y 좌표계로 표시할 수 있다. 그림에서 (a)는 탐촉자의 회전각도에 따라 얻어진 출력전압을 모두 나타내었고, 길이는 출력전압의 크기를 나타내며 잔류응력의 크기와 대응되는 것이다. (b)는 (a)에서 최대 출력전압, 즉 잔류응력이 가장 큰 방향을 나타낸다. (a)에서는 측정면에 있어 응력분포의 전체적 양상을 볼 수 있으며 (b)에서는 최대 응력의 방향의 분포를 파악할 수 있다. 그림의 결과는 검출된 자기출력을 284배 증폭한 결과이다. (a)에서 $X > 36 \text{ mm}$, $Y > 0 \text{ mm}$ 의 측정점 일부를 제외하면 각 측정점에서의 결과는 거의 동심원 형상을 나타내고 있으므로 탐촉자의 회전방향에 따라서는 거의 균일한 응력분포로 되어 있음을 알 수 있다. 한편, 시편의 폭방향 양쪽 가장자리쪽일수록 가운데에 비하여 동심원의 크기가 증가하여 잔류응력은 가장자리쪽이 크게 나타남을 보이고 있다. 최대 응력의 방향을 파악할 수 있는 (b)에서는 최대 응력의 방향이 전반적으로 시편의 압연 방향인 길이방향으로 배열하고 있다. 결국 시편에 있어서 잔류응력의 주응력 방향은 압연방향인 길이방향임을 의미하는 것이다. 이상에서 언급한 거동은 주파수, 투입전류의 크기에 상관없이 거의 유사한 것으로 나타났다. 주파수 함

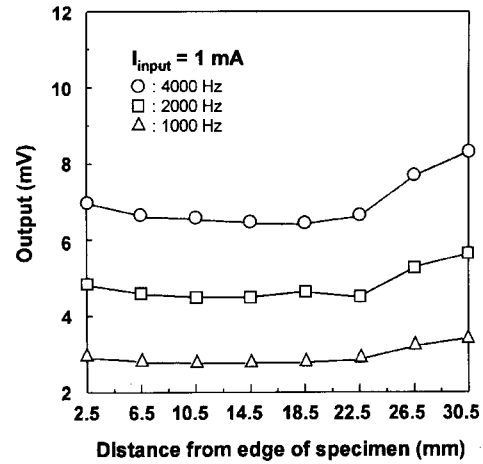


Fig. 9. Variations of output voltages in the width direction of qualified sheet measured with 1 mA input current as a function of frequency.

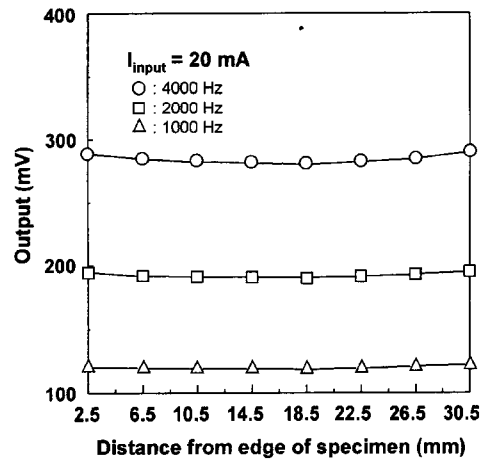


Fig. 10. Variations of output voltages in the width direction of qualified sheet measured with 20 mA input current as a function of frequency.

수로 투입전류를 1 mA, 20 mA를 바꾸었을 때 Fig. 8과 같은 일련의 결과를 얻고 각 경우의 증폭도로 나누어 계산된 출력전압의 절대값을 Fig. 9, Fig. 10에 나타내었다. 그림의 값은 X를 8 mm로 고정하고 Y 방향으로 위치를 변화시켰을 때의 것만 표시한 것이다. 그림의 횡축은 시편의 폭방향을 나타내며, 횡축의 0은 탐촉자의 중심이 측정시 시스템의 원점임을 의미하고 원점에서의 탐촉자의 위치는 탐촉자 단면의 가장자리가 시편의 폭방향 가장자리에 위치하게 되므로 실제 탐촉자의 중심은 시편의 폭방향 가장자리로부터 2.5 mm만큼 가운데 쪽으로 떨어진 곳에

위치한다. 출력전압은 전체적으로 시편의 중앙부에서 가장자리로 갈수록(16.5 mm→2.5 mm, 16.5 mm→30.5 mm) 증가하는 동일한 경향을 나타내고 있다. 한편 출력의 크기는 주파수 및 투입전류의 증가와 함께 증가하나, 시편의 가장자리에서의 증가 경향은 동일 투입전류에서 주파수가 증가할수록 크게 나타나며, 동일 주파수에서는 투입전류가 작을수록 현저해짐을 알 수 있다. Fig. 9의 4000 Hz, 1 mA의 투입전류에서 얻어진 시편의 중앙부 및 가장자리의 출력전압을 비교하면 가장자리 쪽이 30% 정도 크고, Fig. 10의 4000 Hz, 20 mA의 경우는 가장자리가 3% 정도 큰 사실이 이를 잘 나타내고 있다. 따라서, 현재의 경우라면 주파수를 높이면서 투입전류를 작게 하여 미약한 출력신호를 만들고 이를 크게 증폭하여 비교하는 것이 잔류응력검출에 보다 유리한 것으로 판단된다.

4.3.2 불량 판정 시편에 대한 잔류응력평가

Fig. 11에는 불량으로 판정된 3개의 판재에서 4000 Hz, 1 mA의 투입전류로 얻은 결과중 일례만 나타내었다. 측정은 원점에서 시편의 폭방향으로는 Fig. 8과 동일하고 길이방향으로는 4 mm씩 16 mm까지 이동하여 얻은 결과이다. 탐촉자의 회전각도에 따라 얻은 (a)에서 각 측정점에서의

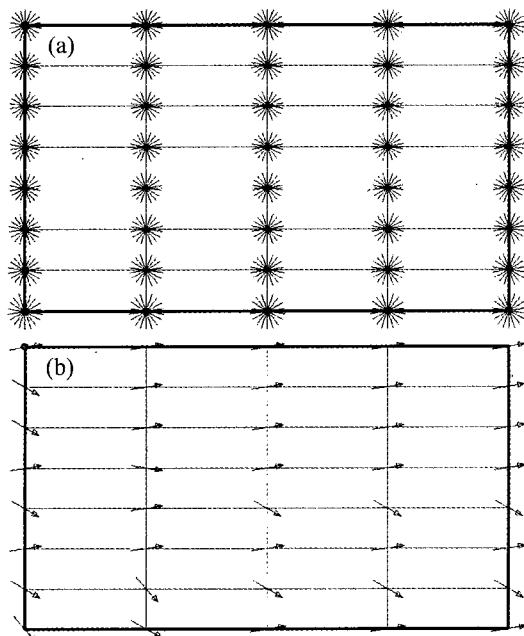


Fig. 11. Variations of output voltages measured with 1 mA input current at 4000 Hz for quality-rejected lead frame thin sheet, (a) distribution of residual stress, (b) direction of maximum residual stress.

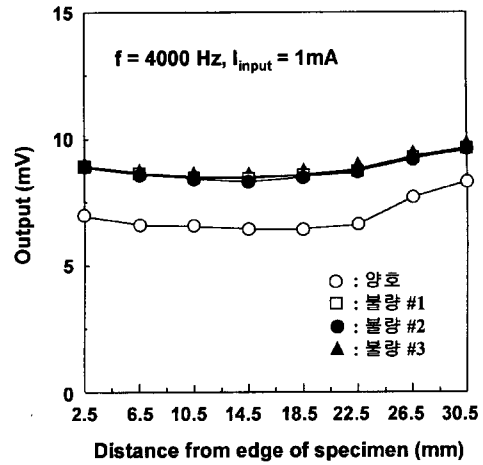


Fig. 12. Variations of output voltages in the width direction of quality-rejected sheet measured with 1 mA input current.

결과는 Fig. 8의 양호재와 유사하게 나타나 있으나 중심원은 대체로 크게 나타나 있다. 최대 응력의 방향을 파악할 수 있는 (b)에서 최대 응력의 방향은 시편의 압연방향인 길이방향으로 배열하고 있으며, 불량재에 있어서도 최대 응력의 주방향은 양호재와 동일함을 알 수 있다. 비교를 위하여 Fig. 9의 양호재와 불량재의 출력전압을 Fig. 12에 함께 나타내었다. 3개의 불량시편에 있어 각 측정점에서의 출력전압은 거의 유사한 값을 나타내고 있으며 양, 불량재 간 출력전압의 크기 차는 불량재의 경우가 양호재에 비하여 약 30%정도 큰 값을 나타내고 있는 것이 확인된다. 이상 양호, 불량재에서 얻어진 상기의 결과는, 특정 측정 조건에서 소수의 시편에서 얻어진 것이고 또한 시편중 극히 일부의 측정면에서 얻어진 것이므로 같은 종류의 판재에 대하여 일률적으로 적용하기는 곤란한 판정의 척도로 생각된다. 그러나 임의의 조건에서 넓은 면적에 대한 양호재의 측정값을 확보하고, 이것과 동일 사양을 가지는 미지의 시편에서 동일 조건으로 얻은 측정값을 비교하면 양호, 불량재의 판정이 충분히 가능함을 입증하는 결과이다.

따라서, 본 시스템을 이용하여 임의의 측정조건에서 양호, 불량재에 대한 면밀한 응력측정을 수행하고 양호재에 대한 불량재의 결과를 상대비교 하면, 간단하면서도 용이하게 비파괴적 방법으로 잔류응력에 의한 불량재를 판별할 수 있는 것으로 결론지을 수 있다.

V. 결 론

‘강자성 박판소재의 잔류응력 측정 시스템의 설계 및 제

작” 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 직경 5 mm의 자기유도형 탐촉자는 Mo퍼멀로이 재질을 사용하여 두 자극이 서로 직교하는 형상으로 제작되었다. 탐촉자의 전자기적 특성으로 주피수합수로 투입전류의 증가에 따라 출력전압은 직선적으로, 투입전류합수로 주피수에 따른 출력전압은 포물선적으로 증가하였다.

(2) 상기 자기유도형 탐촉자를 4개 장착한 기구부가 X, Y, Z축으로 이동 가능하며, 탐촉자 자신은 360° 회전이 가능한 구조의 로봇부를 제작하였고, 탐촉자에의 투입전류 및 주피수를 결정하며 출력신호를 검출하는 신호발생부 및 검출회로부를 제작하였으며, 로봇부와 신호제어부를 컴퓨터로 자동 혹은 수동으로 제어할 수 있는 잔류응력 측정 시스템 운영체제를 구축하였다.

(3) 제작된 시스템을 활용하여 Fe-Ni계 lead frame 양호 판정 판재에 대한 잔류응력 평가결과, 탐촉자의 방향에 따라서는 거의 균일한 분포를 나타내었고, 시편의 폭방향 양쪽 가장자리 방향일수록 가운데에 비하여 크게 나타났으며 최대 응력의 방향은 시편의 압연방향이었다.

(4) 제작된 시스템을 활용하여 불량 판정 시편에 대한 잔류응력 평가결과, (3)과 유사한 결과가 얻어졌으나 시편 중 임의의 위치에서 얻어진 양, 불량재간 출력전압의 크기 차이는 불량재의 경우가 양호재에 비하여 약 30 % 정도

큰 값을 나타나 상대적으로 큰 잔류응력의 존재를 확인하였다.

(5) 상기의 결과에서 탐촉자에 의한 출력값은 주응력 차이에 대응하는 것으로 반드시 정량적 주응력 해석을 행하지 않고도 잔류응력의 대소 및 방향을 직접 파악할 수 있으므로 실용상 충분히 응용 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] M. R. James and J. B. Cohen, The measurement of residual stresses by x-ray diffraction techniques, Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 19A, Experimental Methods, ed. H. Herman, Academic Press (1980).
- [2] C. S. Barrett, T. B. Massalski, Structure of metals, 3rd ed. McGraw-Hill, New York, pp. 446-485 (1966).
- [3] ASTM Standard E837-92, ASTM, 1992.
- [4] Y. H. Pao, W. Sachse and H. Fukuoka, Physical Acoustic, **17**, 61(1984).
- [5] N. N. Hsu, Experimental Mechanics, **14**(5), 169(1974).
- [6] 北川茂, 定地幹夫, 吉川嘉雄, 非破壊検査, **32**(12), 971 (1983).
- [7] 安福精一, 磯野敏雄, 非破壊検査, **35**(11), 805(1986).
- [8] B. D. Cullity, Introduction to magnetic materials, Addison-Wesley Publishing Co., (1972), pp. 270.
- [9] 吉永昭男, 船舶技術研究所報告, **17**(1), 1(1980).

System Design and H/W Development of the Residual Stress Measurement for Ferromagnetic thin Sheet

SangWon Kim* and ChoongJin Yang

Electromagnetic Materials Laboratory, Research Institute of Industrial Science & Technology(RIST), Pohang 790-600, Korea

(Received 15 January 2001, in final form 9 February 2001)

Magnetic inductive probe was designed and assembled for sensing the residual stress developed in the ferromagnetic thin sheet. The residual stress measurement system with this probe could resolve the residual stresses developed in the sheet in terms of principal stress orientation, and magnitude of the principal stress. It was confirmed that the obtained probe output voltage from the qualified ferromagnetic Fe-42Ni lead frame sheet and quality-rejected sheet is effectively determined using the developed device. The lead frame sheet which has accumulated a high level of residual stress always showed a distinctive stress distribution and magnitude compared with those of qualified lead frame sheet. Those differences were well resolved as functions of input current or used frequency.