

자기 Balance형 Probe법에 의한 잔류응력의 측정

대우조선공업(주) 이 만승 *
한 종만
한 용섭

1. 서 문

강구조물의 안전성을 평가하는데 있어서 가공후에 발생하는 잔류응력(Self-Equilibrating Stress)과 재하하중에 의한 부가응력의 정확한 측정을 필요로 한다. 특히, 복잡한 구조와 형상으로 된 용접구조물에서 잔류응력을 비교 평가하는 것은 구조의 안전 뿐만아니라 잔류응력 완화 처리에 대한 경제적인 이유에서도 대단히 중요하다.

지금까지 알려진 잔류응력 측정법 중 완벽한 측정법은 존재하지않고 각기 다른 제한과 결점을 가지고 있지만 보다 간편하고 비파괴인 물리적 방법에 의한 잔류응력 측정이 많이 행해지고 있다. 물리적인 방법중에서 X-선 회절법은 정도있는 측정은 가능하나 낮은 측정깊이, 높은 비용 및 연속 Data를 얻을 수 없다는 결점이 있는데 반해서 자기적 방법은 국내에서 잘 알려져 있지 않은 방법으로서 환경과 구조의 제약을 크게 받지 않고 신속, 간편하게 측정할 수 있고, 동적인 연속 Data 출력도 가능하다.

본 연구에서는 자기적 응력측정법 중 자기 Balance형 Probe법의 원리와 구조를 설명하고, 원점조정 Test와 함께 열처리한 연강, 고장력강(AH32, AH36, HY80), 합금강(Invar) 시편에 대해 Calibration을 수행하고 이 방법에 있어서 주요 특성치인 재료의 종류, 주파수, 열처리에 대한 자기적 지시값의 변화를 설명하고 활용 방안을 제시하였다.

2. 자기적 방법의 특징

비파괴, 물리적인 자기적 응력측정은 피측정 재료가 강자성(Ferromagnetism)을 지니는 재료에 제한되고 일반 구조용 강은 이에 해당한다. 이 방법은 자구벽의 운동(Magnetic Domain Wall Movement)와 탄성응력(Elastic Stress)의 상호관계(Magneto-Elastic Interaction)에 기인하며 이를 통하여 응력을 측정하는 방법에는 두가지가 있다.

2.1 Magnetoelastic Barkhausen Noise Method

1919년 Barkhausen[1]에 의해 자구벽의 이동이 불연속적이라는 것이 밝혀졌고, Gerlach, Lertes[2]는 이 Barkhausen Noise를 해석함으로써 어떤 강자성 재료(Ferromagnetic Material)가 자화(Magnetize)되면 주어진 자장방향으로 길이의 변화(Magnetostrictive)가 발생하게 된다. 역으로 이 재료에 응력이 부가되면 하중방향으로 약간의 자화가 일어난다는 현상을 밝혔다.

이후 Cullity[3]등 많은 연구자들에 의해서 Barkhausen Noise와 재료의 응력상태에 대해 명확한 관계를 설명하는 논문이 발표되었고 X-선 회절법과 비교하여 정도 확인을 하였다.

한편, Tiitto[4,5]는 Mn-Zn core를 통하는 교류전류를 이용한 자기센서로서 감지된 Barkhausen Noise 와 유기된 전압을 증폭, 필터링하여 2-channel digital spectrum analyser로 해석하였다. BHN의 주파수 범위는 500 ~ 20000 Hz이고, RMS(Root Mean Square)전압과 BHN spectrum은 100회를 평균한 후에 구하였다. 측정면적은 1 ~ 15 mm²으로서 시편의 국부적인 응력 변화를 감지할 수 있어 용접부와 같이 응력이 급변하는 부위에서 유용한 방법이다.

2.2 Magnetic Balanced Probe Method

安積[6] 자기 Balance형 Probe법을 발표했다. 安積은 이 방법에서 Probe로부터 직접 얻어지는 주응력과 주응력 방향에서 주응력을 분리하는 방법을 유도하고 이를 이용하여 용접부위의 잔류응력을 측정하여 X-선 회절법과 비교하였다.

3. 자기 Balance형 Probe법의 원리와 구조

강자성체는 포화까지 磁化되어있는 작은 구역(磁區: Magnetic domain)으로 이루어져 있고, 각구역에 있어서 각각의 자화방향은 불규칙하다. 그러나 이것에 자장을 보내면 각 구역의 자화의 방향이 자장의 방향을 향하는 것에 의해서 磁化가 행해진다. 자화의세기를 磁場의세기를 증가하므로써 증가되고, 어떤세기에 이르면 일정치(Magnetic saturation)가 된다. 이 현상은 강자성체의 주요특징 중의 하나이고 물질에 따라 일정하다. 이를 등가회로로서 자장의 변화를 감지하여 응력에 상응하는 전압을 출력한다.

자기 Balance형 Probe의 기본 구조는 4개의 자극을 가진 고유자물 자성재료로 된 Core와 각 자극에 감겨진 Coil로 되어있고, 자극은 마주보는 2개의 극을 한조로 하여 여자극(勵磁極)과 검출극(檢出極)으로 구성된다(Fig. 1).

Fig. 2 는 Probe와 피측정체에 의해 작동되는 자기회로를 등가회로로서 나타낸다. 자극사이의 피측정체의 자기저항을 R로 하고, 검출극에 흐르는 자속의 양을 I로 한다. 응력이 존재하지 않는 경우(즉, R이 모두 같은 경우)에는 2개 검출극의 Potential이 같아서 검출극 내를 흐르는 자속은 발생하지 않는다. 그러나 Fig. 3에서 나타난 것처럼 피측정체 안의 자기저항이 방향에 따라 변화하면 검출극의 자기 Potential의 차이에 의해 검출극 사이에 자속이 흐르게 된다. 이 자속량의 변화를 감지, 증폭함으로써 피측정체의 자기 이방성의 정보를 얻을 수 있다.

安福의 결과에 따르면 이 자속 I은

$$I = E \cdot K \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \text{ 로 된다.}$$

여기서, E : 기자력
 K : 재료에 따른 계수
 σ_1 : 최대 주응력
 σ_2 : 최소 주응력
 θ : σ_1 과 이루는 임의의 각

검출극에 흐르는 자속량 I은 $\theta = 0$, 즉, 주응력방향(σ_1 의 방향)에서 최대가 되고, 그 값은 여자극의 세기 E와 주응력의 차($\sigma_1 - \sigma_2$)에 비례한다. 검출극에 흐르는 자속량의 변화에 의해 검출극에 있는 Coil에 생기는 전압은 이 자속량의 변화에 의해서

$$V_{out} = - \frac{dI}{dt} \text{ 이므로}$$

E를 교번자계로 하면 V out는 주응력차($\sigma_1 - \sigma_2$)에 비례하는 전압을 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 Probe를 회전함으로써 최대출력 전압을 나타내는 방향을 알 수 있다.

4. 재료에 따른 Calibration 실험 및 고찰

4.1 원점 조정 Calibration 실험

자기 Balance형 응력측정기 '자화식 응력지시계'의 원점 Calibration을 위해서 일반 구조용강재 시편(SS41, AH36, HY80, B × L = 10 × 10 mm)을 ASME, PWHT Rule에 의해 Fig. 4와 같이 열처리하였다.

열처리 전, 후의 잔류응력의 크기를 자기적방법과 Hole Drilling Method를 이용하여 측정하고 Table 1에서 비교하였다. 여기서 열처리는 잔류응력의 이완목적에서 자기소거상태인 Curie point(Fe: 770 C°)까지는 가열하지 않았고, 표면 거칠기는 본 자기적 방법에서 영향이 없다고 관찰된 연마지 #80으로 하였다. 실험결과 재료에 따라 원점값에 다소의 차이가 있는 것으로 나타났고, 전체적으로 열처리한 후에 두 방법 모두 응력지시값이 원점에 가까이 값을 알 수 있었지만 재료의 냉간가공상태에 따라서 매우 민감한 반응을 나타내었다.

4.2 인장시험에 의한 실험

ASME, PWHT Rule에 의해 Fig. 4와 같이 열처리한 일반 구조용강 시편(SS41, AH36, AH36, HY80, INVAR, B × L = 25 × 220mm)을 인장시험기에 의해 Uniaxial load로 Fig. 5과 같이 연결하여 연속적인 Data를 받았다(20 data/ 1sec).

2종류의 주파수 500Hz, 5000Hz에 의해 인장하중에 따른 응력지시값을 Fig. 6 ~ 10에 나타내었다. 그림에서 실선은 열처리한 정상곡선(normal curve)이고, 점선은 판부재 본래 냉간가공된 상태에서의 응력지시값을 나타내었다. 위 두 곡선 사이에는 다소 큰 차이가 있다. 그러므로, 이 방법에서는 냉간가공상태에 매우 민감하므로 상태에 따른 Calibration을 해야함을 알 수 있다.

5. 결 론

실구조물의 잔류응력 측정에서 경제적이면서 간단하고 신뢰성있는 측정법은 아직 존재하고 있지않다. 그러므로 여러 측정법을 부분적으로 이용해야하나 본 자기적측정법은 강자성체 응력집중의 정성적인 평가에 매우 유용한 방법이고, 재료에 따라 정확한 Calibration만 된다면 정량적인 평가도 가능하다. 또한 환경적 제약없이 여러조건에서 폭넓게 사용될 수 있고, Dynamic Data 측정은 실구조물의 응력측정에 유용한 수단이 되리라고 생각한다.

< 참고 문헌 >

- [1] H. Barkhausen, Phys. Zeitschrift 20 , 401 ,1919.
- [2] W. Gerlach and P. Lertes, Phys. Zeitschrift 22 , 568 ,1921.
- [3] S. Abuku, B.D.Cullity, A Magnetic Method for the Determination of Residual Stress, SESA Fall Meeting, 1970.
- [4] K. Tiitto, Solving Internal Stress Measurement Problems by A New Magnetoelastic Method, A.S.T..
- [5] J.B.Hull, V.B.John, Residual Stress Analysis using Magnetic Methods, Vol.85, No.3, Foundryman, March,1992.
- [6] 安積建治郎, 岩柳順三, 吉永照男 : 일본기계학회지, 68(照 40), 314.

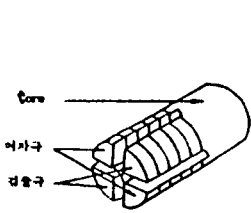


Fig. 1 Magnetic Balanced Probe

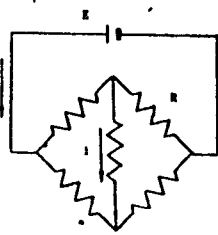


Fig. 2 Magnetic Equilibrated Bridge between Probe and Material

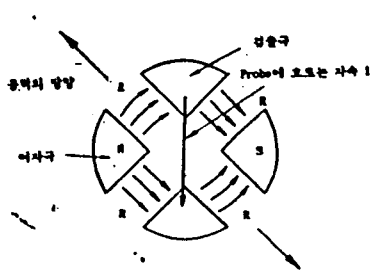


Fig. 3 Variation of Magnetic Equilibrated Bridge by Stress

Table 1 Stress Comparison of Several Materials on Magnetic Method and M.H.M. in Pre & Post Heat Treatment

강종	종류	검출리 전		검출리 후	
		자기적 방법 SI/Mpa	H.D.M. kg/cm ²	자기적 방법 SI/Mpa	H.D.M. kg/cm ²
HY80	σ ₁	-11	-2.70	-27	0.10
	σ ₂	5	-1.10	11	0.20
	σ ₃	0	-1.20	31	0.50
A138	σ ₁	63	-0.20	19	0.60
	σ ₂	18	-0.60	18	0.30
	σ ₃	25	-1.04	28	0.37
A133	σ ₁	-30	-1.03	40	-0.05
	σ ₂	30	-1.20	18	0.38
	σ ₃	120	-0.93	28	0.78
SS41	σ ₁	120	-0.93	28	0.89
	σ ₂	-10	0.33	8	0.74

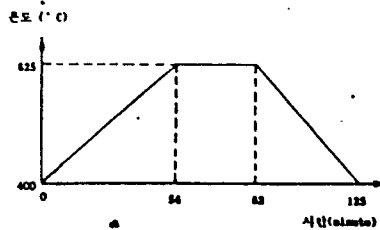


Fig. 4 Procedure of Post Heat Treatment

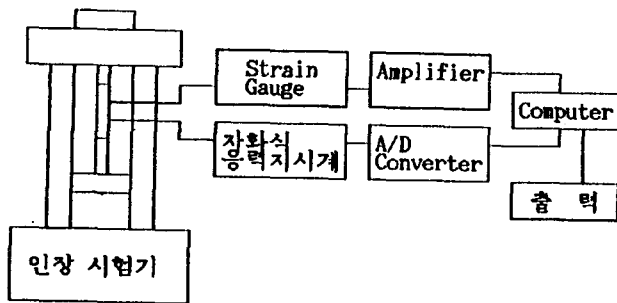


Fig. 5 Data Acquisition System

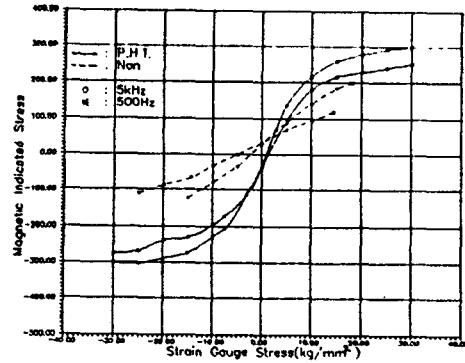


Fig. 6 Magnetic Indicated Stress Curves Subjected to Uniaxial Load in HY80 Steel

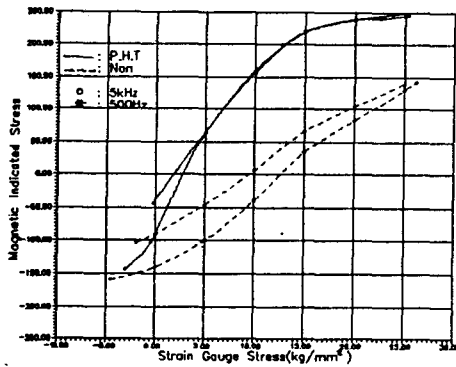


Fig. 7 Magnetic Indicated Stress Curves Subjected to Uniaxial Load in AH36 Steel

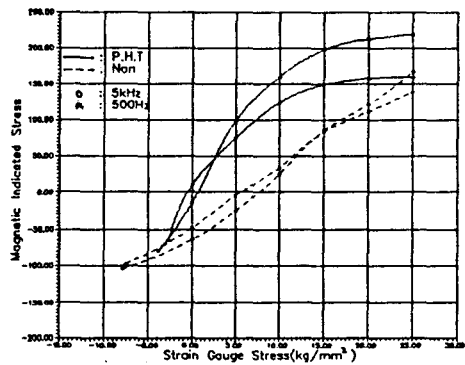


Fig. 8 Magnetic Indicated Stress Curves Subjected to Uniaxial Load in AH32 Steel

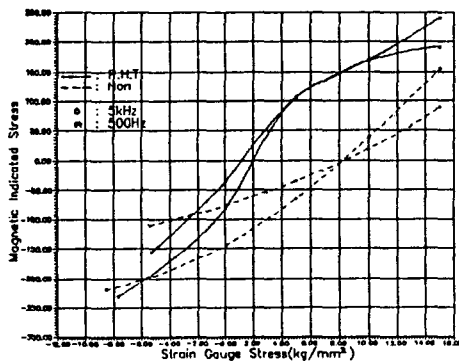


Fig. 9 Magnetic Indicated Stress Curves Subjected to Uniaxial Load in SS41 Steel

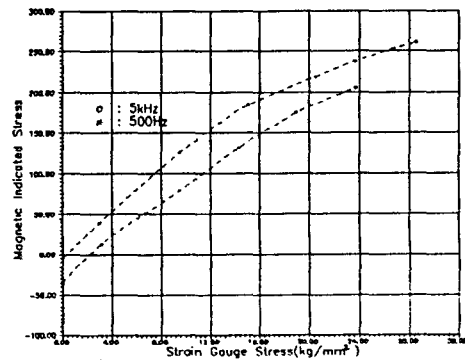


Fig.10 Magnetic Indicated Stress Curves Subjected to Uniaxial Load in INVVAR