



레이저 용접에 의한 이종재료의 잔류응력과 굽힘 특성 분석

오세현*·민택기*

*충남대학교 공과대학 기계공학과

The Analysis of the Residual Stress and Bending Characteristics on the Heterogeneous Materials by Laser Welding

Se-Heon OH* and Taeg-Ki MIN*

*Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Abstract

Generally, it is used the compensation spring to compensate the inaccuracy of screen image induced by thermal deformation in CRT monitor. Its mechanism is bi-metallic system made of heterogeneous metals and these springs are bonded by laser welding. But laser welding induces a non-uniform temperature distribution, and residual stress is yielded locally by these temperature deviation.

Therefore, this study measures the curvature constant to assess functions of the compensation spring of shadow mask with respect to increment temperature and estimates the effect of residual stress on the performance of tri-metal used to compensation spring.

* Corresponding author : ohsh58@smba.go.kr

(Received December 12, 2003)

Key Words : Curvature constant, Heterogeneous materials, Laser weldment, Hole drilling method, Residual stress

기 호 설 명

K : 만곡상수
α : 열팽창계수

1. 서 론

TV 브라운관의 생명은 정밀한 화상재현이며, 이러한 정밀한 화상 재현을 위해서는 고정밀 제어가 가능한 전자빔 주사와 관련된 기술이 선행되어야 한다. 또한, 사용 시간에 따른 화상의 변화를 최소화할 수 있는 기술도 병행되어야 한다.

Color CRT(Cathode Ray Tube)에는 화면의 해상도를 높이기 위해 전자총에서 나온 전자빔을 일부만 화면에 도달하게 만드는 얇은 차단막이 있는데, 이를 새도우 마스크(Shadow Mask)라고 하며 새도우 마스크는 충돌하는 전자에 의해 발생하는 열에 의해서 변형이

발생한다. 열에 의해 발생된 열변형은 화상의 정밀도를 저하한다. 이와 같은 열변형에 의한 화상의 정밀도를 보정하기 위해 보강강쇠(Compensation Spring)을 사용한다. 이러한 보강강쇠는 바이메탈식과 구석지지방식이 있으나, 성능이 우수한 바이메탈(Bi-metal)식이 실제로 많이 적용된다^{1,2)}. 특히, 바이메탈식을 이용한 훅스프링(Hook spring)에 사용되는 소재는 트리메탈(Tri-metal)로 레이저용접에 의해서 접합이 된다. 하지만, 레이저 용접은 재료를 부분적으로 가열하여 접합시키고 냉각하는 용접법이므로, 재료내부에는 불균일한 온도분포로 기인된 열변형 및 열응력이 발생되어 여러 가지 문제점이 제기되고 있으며, 이에 대한 다양한 연구도 수행되고 있다.

양등은 레이저 점용접과 저항점용접의 강도를 비교하여 자동차 차체에 레이저 용접을 사용할 때 문제점을 검토하였다³⁾. Tso-Liang 등은 맞대기 용접에서 용접조건과 용접 순서에 의한 잔류응력의 영향을 분석하였다⁴⁾.

Perry등은 박막에서 발생하는 잔류응력값은 구멍뚫기법, XRD, 외팔보법을 이용하여 비교, 분석하였다⁵⁾. 또한, Olabi등은 용접후의 열처리가 저탄소강의 잔류응력에 미치는 영향을 구멍뚫기법을 이용하여 연구하였다⁶⁾. 본 연구에서는 온도 상승에 따른 새도우마스크의 열변형을 보상하는 트리메탈의 성능 평가를 위해 STS304와 Ni36 재료를 이용한 바이메탈을 가지고 만곡상수를 측정하고, 이후에 레이저 용접시 발생하는 국부적인 열에 의해 생성되는 잔류응력을 구멍뚫기법을 이용하여 측정하고, 유한요소해석에 이 값을 대입하여, 잔류응력이 만곡상수에 미치는 영향성을 분석하여, 이중재료를 이용한 트리메탈 제작에 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 만곡 상수 측정

2.1 만곡상수의 정의

바이메탈을 소재로 한 트리메탈 혹은 스프링은 온도 상승에 따른 새도우 마스크의 열변형을 정밀하게 보상하는 기능을 가지고 있으며, 이러한 능력을 평가하는 방법으로 만곡상수를 제안한다. 동일 크기의 바이메탈에서 온도변화에 대한 처짐량의 무차원수인 만곡상수는 식(1)에 의해서 구할 수 있으며, 단순화된 시험편과 시험장치의 형상을 Fig. 1에 나타내고 있다.

$$K = \frac{Dt}{L^2 \Delta T} \quad (1)$$

여기서, D는 온도상승에 따른 길이 L의 최대 처짐량 (δ_{max})이고, ΔT 는 온도차, L은 시험편의 길이, t는 시험편의 폭을 각각 나타낸다.

2.2 시험편 제작

제작된 STS304와 Ni36 재료를 지그로 고정된 후 용접 테이블을 이용하면서, 레이저 용접을 수행하였다. 사용되는 재료의 금속조성은 Table 1에 나타내었으며,

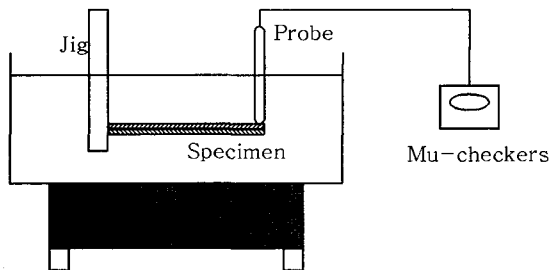


Fig. 1 The schematics of equipment and specimens measuring curvature constant

Table 1 Chemical composition of materials used

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
STS304	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	9-10	18-20	0.35	bal
Ni36	0.08	-	-	-	-	35-37	-	-	bal

Table 2 Mechanical properties of materials used

	STS 304	Ni 36
Hardness (H _v)	370-440	190-240
Tensile strength(MPa)	≥1150	63
Elastic modulus (GPa)	198	143
Max. strain (%)	5-12	8-13
Thermal expansion coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}C$)	14-16	≤1.5

Table 3 Specification of laser welding machine

Type	Power(W)	Beam mode	Diverse angle	Optics	Polarization
Fanuc C1000	1000	TEM01	<1.5mrad	f=5"	Circular

각 재료의 기계적 성질은 Table 2에 표시하였다. 이송 속도는 4m/min이며, 원형 편광빔을 사용하였다. 적용한 레이저의 사양은 Table 3에 나타내었다.

2.3 유한요소해석

이중재료로 제작되는 바이메탈의 만곡상수에 대해서 유한요소해석을 수행하였으며, 또한 실험에서 구한 잔류응력을 유한요소해석에 도입함으로써 잔류응력이 만곡상수에 미치는 영향성을 평가하였다. 모델과 경계조건은 실험과 동일하게 부가하였으며, 외부 열에 의해 재료는 모두 동일한 온도분포를 나타내는 것으로 가정하였다. 또한, 열변형해석은 상용 프로그램인 ANSYS7.0를 이용하여 수행하였으며, 요소는 3자유도를 가진 8절점 솔리드요소로 하였고, 사용된 총 요소수는 2720개이고, 절점수는 4871개이다.

3. 잔류응력 측정

3.1 잔류응력 측정 원리

이중재료의 용접시 용접재의 기계적 특성 차이로 인하여 용접부 주위에서 국부적인 잔류응력이 발생하게 된다. 특히 얇은 평판으로 제작되는 본 연구의 시험편에 발생하는 잔류응력은 온도깊이 구멍 뚫기법이나 X-선 회절법에 의해서 측정하게 되나 본 연구에서는 45° 방

향으로 배열된 각 스트레인 게이지에서 잔류응력을 구하는 구멍 뚫기법을 채택하였다.

스트레인 게이지에서 구한 변형율은 식(2)~(4)와 같이 나타내어진다. 이상의 식을 풀면 주응력은 (5)와 (6)이고, 주응력방향과 변수 A, B는 (7)~(9)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_1 = A + B \cos 2\phi \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = A + B \cos 2(\phi + 45^\circ) \quad (3)$$

$$\epsilon_3 = A + B \cos 2(\phi + 90^\circ) \quad (4)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1 - \mu^2} \times (\epsilon_1 + \mu\epsilon_2) \quad (5)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1 - \mu^2} \times (\epsilon_2 + \mu\epsilon_1) \quad (6)$$

$$A = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_3) \quad (7)$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (8)$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \quad (9)$$

3.2 시험편 및 재료의 조성

이종재료의 용접에서 발생하는 잔류응력값이 바이메탈의 만곡상수에 미치는 영향을 분석하기 위해, 직사각형 형상을 가진 고열팽창재료(STS 304) 2개와 저열팽창재료(Ni 36) 1개를 각각 길이방향으로 레이저 용접을 수행하여 트리메탈을 제작한다. 제작된 트리메탈의 단순한 형상과 로제트의 위치를 Fig. 2에 나타내고 있다. 레이저용접은 만곡상수 측정을 위해 제작된 시험편과 동일한 조건으로 수행하였으며, 두 용접선을 따라 동시에 좌우 대칭으로 용접을 수행하였다. 이때, 사용되는 소재의 폭은 각각 8, 14, 8mm이며, 두께는 0.8 ~ 1.2mm이며, 재료는 만곡상수를 측정하기 위한 것과 동일하게 사용하였다.

3.3 실험 장치

본 연구에서 사용한 스트레인 게이지 로제트는 미국

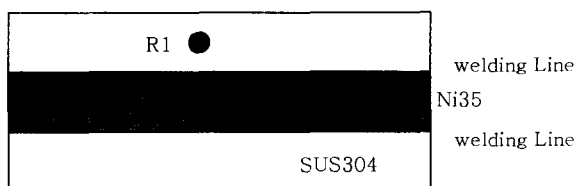


Fig. 2 The shape of specimen and measuring position of residual stress by hole drilling method

Micro-Measurement사 제품으로 2축 응력 상태의 응력 성분을 측정하기 위해 게이지를 일정한 형태(0, 90, 225°)에 따라 일정한 반경에 배열시킨 3축형 게이지이다. 게이지 저항은 120Ω이고, 게이지 상수는 2.04이다. 또한, 게이지의 지름은 5.15mm이고, 길이는 1.59mm이다. 일반적으로 게이지 중앙의 구멍에 정확하게 위치하지 못하고 편심이 발생하는 경우 추가적인 보정작업이 필요하므로 본 실험에서는 확대 망원경을 사용하여 최대한 게이지 구멍이 중앙에 존재하도록 하였다. 정확히 측정된 각각의 게이지 위치와 잔류응력 측정을 위해 생성된 홀의 지름을 Table 4에 나타내고 있다.

Fig. 3는 구멍뚫기법에 의한 잔류응력 측정 실험장치를 나타내고 있다. 실험장치는 드릴링장치, 공기연마분사기, 노즐, 그리고 변형을 측정장치로 구분한다.

공기연마분사기에 사용되는 알루미늄 분말의 평균 입자크기는 50μm이며, 고압공기와 알루미늄은 노즐을 통해 로제트의 중앙에 분사되면서 구멍을 뚫게 된다. 실험전 알루미늄 분말에 존재하는 습기를 완전히 제거하기 위해 200℃의 전기로에서 2시간정도 제습공정을 수행하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 만곡 상수 측정

Fig. 5는 세 가지 시험편에 대해서 온도에 따른 처짐값과 동일한 조건에 대해 수행한 유한요소해석 결과를 나타내었으며, 각각의 시험편에 대해 만곡상수를 구하였다. 각 경우에 만곡상수는 시험편 (a) 경우는

Table 4 Hole diameter and position of each rosette

Rosette No.	Hole Dia.(mm)	Dist. from welding line	Material
R1	1.835	4.250(mm)	STS304
R2	1.850	8.30(mm)	Ni 36

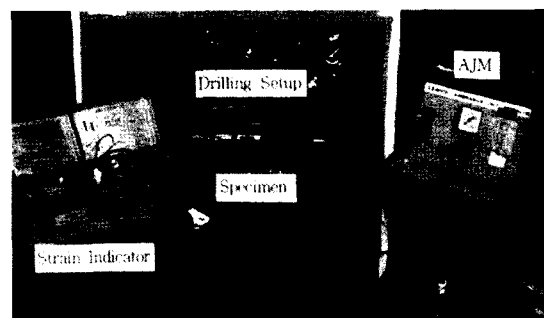


Fig. 3 The experimental apparatus for hole drilling method

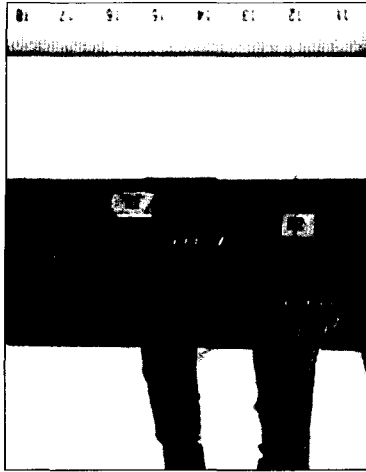


Fig. 4 The shape of tri-metal specimen with rosette strain gauge

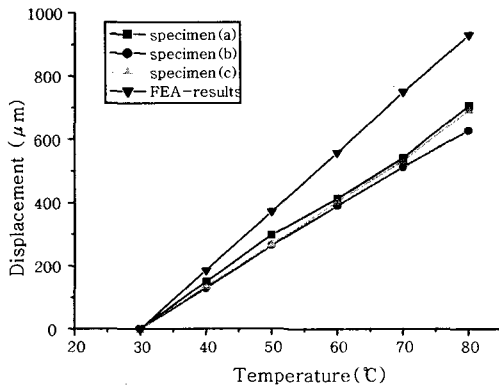


Fig. 5 The displacements of each bi-metal specimen with respect to variation of temperature

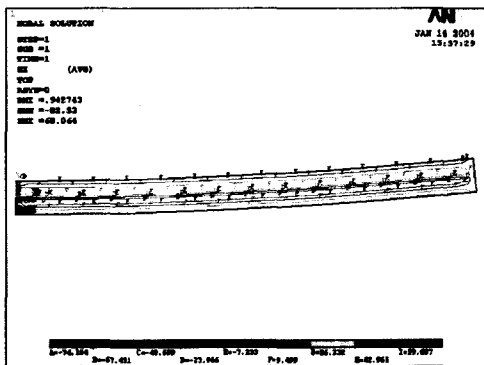


Fig. 6 The bending stress distribution of the bi-metal under thermal load

$14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, (b)의 경우는 $12.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, (c)의 경우는 $13.77 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 가 구해졌으며, 유한요소해석의 결과는 $15.35 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 시험편 (a)의 경우보다 시험편 (b)의 경우 실험 전 시험편에서 약간의 휨변형이 관측되어 처짐량에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 그리고, Fig. 6에서는 초기 휨변형값을 대입하지 않고, 실험에서 구한 처짐값만을 나타내었다. 유한요소해석은

실험값과 상당한 차이를 나타내고 있으며, 이것은 잔류응력이 배제된 효과라 사료된다. 그러므로, 용접이후에 열처리를 수행하여 잔류응력을 억제하는 것이 제품의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 잔류응력 측정

이종 재료에 사용되는 재료에서 발생하는 잔류응력을 측정하기 위한 로제트의 위치는 Table 4에 나타내었고, R1와 R2의 로제트 계산결과를 기준으로 하여, 트리 메탈에 존재하는 평균잔류응력을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 STS304에서는 길이방향으로 인장잔류응력이 발생되며, Ni36에서는 압축잔류응력이 발생함을 알 수 있다. 여기서 중요한 사항은 전단응력의 존재이다. 이는 시편의 제조시에 두 용접선을 동시에 용접하지 않고 분리하여 따로 용접한 결과로 기인될 수 있다. 따라서 용접장치는 두 용접선을 동시에 용접하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

이후 구멍뚫기법에 의해서 구해진 지점의 잔류응력값을 Fig. 8에 나타내었다. 열팽창계수의 차이로 인하여 상당히 높은 인장잔류응력이 나타남을 알 수 있다. 이

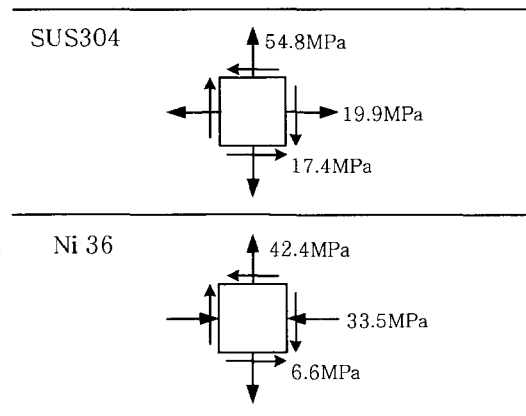


Fig. 7 The residual stress distribution induced by combination of R3 and R4 gauges

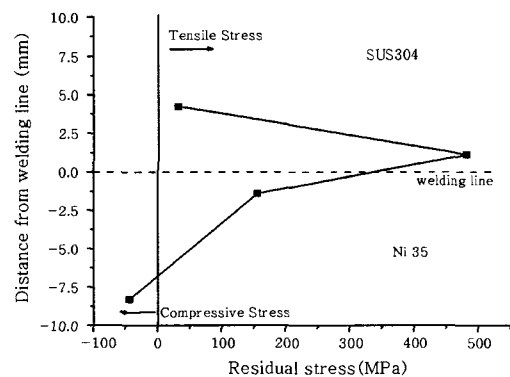


Fig. 8 The x-directional residual stress distribution on tri-metal specimen

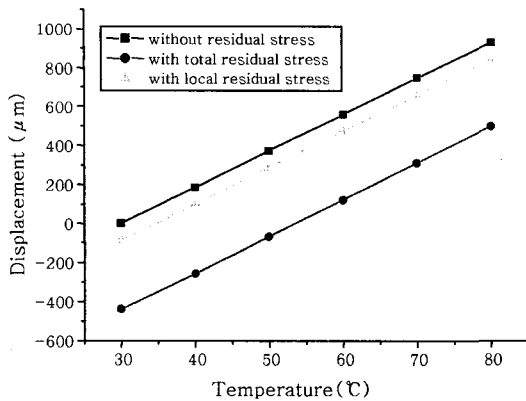


Fig. 9 The displacements of each bi-metal specimen with respect to variation of temperature using FEA

것은 초기 열팽창에 의해서 STS304에서 상당히 큰 압축소성변형이 발생하게 되고, 이후 냉각됨에 따라서 인장잔류응력이 발생된 것으로 사료되며, 그 값은 481 MPa로 상당히 크게 발생하고 있다.

4.3 잔류응력이 고려된 만곡상수

Fig. 9에서 구해진 잔류응력이 각각 재료 전체에 영향을 미치는 것과 게이지 1과 2번이 폭으로 동일한 위치에서 길이방향에 대해 국부적으로 잔류응력이 영향을 미치고 있는 것으로 각각 가정하여 해석을 수행하였다. 재료 전체적에 영향을 미치고 있는 경우에는 만곡상수가 $15.48 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 상승하였다. 하지만, 국부적으로 구해진 잔류응력을 전체 모델에 대입하여 해석을 수행하였으므로, 그 값이 실험과 반대로 만곡상수가 증가됨을 알 수 있다. 또한, 초기 온도에서 잔류응력으로 시험편은 반대방향으로 $438.75\mu\text{m}$ 만큼 휘어져 있으며, 최대온도 80°C 에서는 STS304에서의 인장응력도 상당히 낮아짐을 알 수 있다. 시험편에 국부적으로 잔류응력이 분포하는 경우에는 만곡상수가 $15.36 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

5. 결 론

TV 브라운관의 새도우 마스크의 정밀도를 향상시키는 보강강쇠에 사용되는 트리메탈은 이종재료를 이용한 레이저용접에 의해서 제작되므로, 이에 관련된 만곡상

수 측정과 레이저용접에 의한 잔류응력 측정으로 다음의 결론을 얻었다.

1) 만곡상수는 온도에 따라 대체적으로 선형적인 특성을 나타내고 있으나, 초기 바이메탈 시험편 제작시 발생된 잔류응력으로 시험편이 휘어지고, 또한 만곡상수가 낮아짐을 알 수 있었다.

2) 용접부 주위에서 인장잔류응력이 발생하였고, 용접부에서 멀어짐에 따라 STS304인 경우에는 0으로 수렴하고, Ni 36인 경우에는 압축잔류응력이 발생하고 있다.

3) 게이지 크기의 제한에도 불구하고, STS304인 경우에는 용접선 근처에서 최대 481MPa이 발생하였으며, Ni 36재료인 경우에는 용접선 근처에서 140.47 MPa이 발생하였고, 용접선에서 멀어짐에 따라 압축잔류응력 34.11MPa이 발생하였다.

4) 잔류응력의 영향으로 동일한 온도에서 바이메탈의 처짐량이 변화하므로, 트리메탈의 제작시 발생하는 불균일한 잔류응력의 분포를 완화시키기 위해서는 용접작업 이후에 열처리를 수행하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. T. Okata et al., A structural analysis study on shadow mask thermal deformation of color CRT, Japan Display, 1983, 20-25
2. K. Tokita, H. Urata, M. Nakamura, and T. Soae, A new shadow mask, Proceedings of SID, 29-1
3. Y. S. Yang and S. H. Lee, A study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications, J. of Materials Proceeding Technology, Vol. 94, 1999, 151-156
4. T. L. Teng and C. C. Lin, "Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, 1998, 857-864
5. Anthony J. Perry, J. Albert Sue and Philip J. Martin, Practical measurement of the residual stress in coatings, J. of Surface & Coatings Technology, Vol. 81, 1996, 17-28
6. A. G. Olibi and M. S. I. Hashimi, Stress relief procedures for low carbon steel(1020) welded components, J. of Materials Proceeding Technology, Vol. 56, 1996, 552-562