

## 이종재료의 레이저용접에서 잔류응력 평가

오세현<sup>+</sup>, 민택기\*

(논문접수일 2004. 2. 16, 심사완료일 2004. 3. 22)

### The Study on Residual Stress of Laser Weldment for the Heterogeneous Materials

Se-heon Oh<sup>+</sup>, Taeg-ki Min\*

#### 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 is bonded by laser welding. But laser welding induces the non-uniform temperature distribution and locally residual stress is yielded by these temperature deviation. This paper studies residual stress of laser weldment using FEA and hole drilling method. The results are followed. In the case of heterogeneous materials weldment, higher residual stress induced in the weldment region of SUS 304 which have larger CTE than Ni 36 and residual stress on the middle of specimen is higher by 10.9% than that of its surface. Measured residual stress of SUS 304 yield 481MPa and that of Ni 36 is 140.5MPa in the vicinity of the welding region. And the residual distribution is very similar in comparison with FEA result.

**Key Words :** Heterogeneous Materials(이종재료), Laser Weldment(레이저 용접), Residual Stress(잔류응력), Thermal-Mechanical Analysis(열-구조 연성해석), Hole Drilling Method(원구멍뚫기법), Compensation Spring(보강강쇠)

## 1. 서론

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 요구된다.

Color CRT(Cathode Ray Tube)에는 전자총에서 나온 전자빔을 일부만 화면에 도달하게 만드는 얇은 차단막이 있는데, 이를 섀도우 마스크(Shadow Mask)라고 하며 섀도우 마스크는 충돌하는 전자에 의해 발생하는 열에 의해서 변형이 발생한다. 열에 의해 발생된 열변형은 화상의 정밀도를 저하한다<sup>(1)</sup>.

+ 충남대학교 공과대학 기계공학과 대학원 (ohsh58@smba.go.kr)

주소: 302-701 대전광역시 서구 둔산동 920번지

\* 충남대학교 공과대학 기계공학과

이와 같은 열변형을 보정하기 위해 보강강쇠(Compensation Spring)가 사용한다. 이러한 보강강쇠는 바이메탈식과 구석 지지방식이 있으나, 성능이 우수한 바이메탈식의 사용이 지배적이다. 바이메탈식에 사용되는 후크스프링(hook spring)은 트리 메탈(tri-metal)로 레이저용접에 의해서 접합되어 제작된다. 하지만, 레이저 용접은 재료를 부분적으로 가열하여 접합하고 냉각되는 용접법으로, 재료 내부에서 기인된 불균일한 온도분포로 열변형 및 열응력이 발생되어 이와 관련된 문제에 대해 다양한 연구가 수행되고 있다.

김등은 용접부의 열전달 및 잔류응력을 평가할 수 있는 시스템을 개발하고, 맞대기 용접에 대해 유한요소해석 및 실험을 수행하여 결과값을 비교분석하였다<sup>(2)</sup>. 장등은 예열 처리가 스테인리스강의 용접부에 발생하는 잔류응력에 미치는 영향을 분석하기 위해 열전달 및 열응력해석을 수행하여 실험값과 비교분석하였다<sup>(3)</sup>. Variyar 등은 3차원 요소로 열해석을 수행한 이후 응력해석을 위해 새로운 9절점 2D-요소를 개발하여 용접부의 잔류응력값을 평가하였다<sup>(4)</sup>. 또한, Olabi 등은 용접후의 열처리가 저탄소강의 잔류응력에 미치는 영향을 구멍뚫기법으로 분석하였다<sup>(5)</sup>.

일반적으로 동일재료의 용접에 관련된 해석과 실험결과는 다양하게 연구되어왔으나, SUS304와 Ni36와 같이 이종재료의 레이저 용접에 관련된 연구는 미비하다. 그러므로, 본 연구에서는 이종재료의 용접에서 발생하는 잔류응력 분포를 분석하기 위해, ANSYS를 이용한 열전달해석을 수행하고, 이후 열응력해석을 수행하여 레이저 용접부위에서 발생하는 잔류응력을 구하였다. 이후 구멍 뚫기법을 이용하여 실제 용접 부재에 발생하는 잔류응력을 측정하여 해석에서 구한 값을 검증하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석 방법

구조물의 용접시에 발생하는 열로 인하여 용접 부재에서는 열응력이 발생하게 되고, 발생된 과도한 응력은 잔류응력으로 부재에 존재하게 된다. 그러므로 이종재료의 용접시 발생하는 열의 영향을 분석하기 위해, 우선 열전달해석을 수행하였다. 본 연구에서는 시험편의 크기가 작고, 용접속도가 4m/min이므로, 시간에 따른 열원의 이동을 무시하고, 초기 용접부의 온도가 균일한 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

이후 열전도해석에 구한 불균일한 열분포 결과를 재료와 온도에 따른 열팽창계수의 차이를 고려한 열-구조해석을 대

입하여 비선형해석을 수행하여, 용접 부위에서 발생하는 잔류응력을 구한다.

### 2.2 재료 물성치 및 경계조건

해석을 수행하기 위해 전체 모델을 사용하지 않고, 1/8 모델만을 적용하였고, 분할된 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 대칭되는 단면에는 대칭 경계조건을 부과하였으며, Fig. 1의 상단에는 전체 모델의 형상을 부분적으로 확대하여 나타내었다. 열전달 해석을 수행하기 위해, 적용한 각 재료의 온도에 따른 물성치의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 온도가 상승함에 따라 열팽창계수는 증가하고 있으나, 반대로 영계수는 감소함을 알 수 있다. 선팽창계수는 SUS304가 Ni36에 비해 거의 10배 정도 크며, 온도에 따라 그 값은

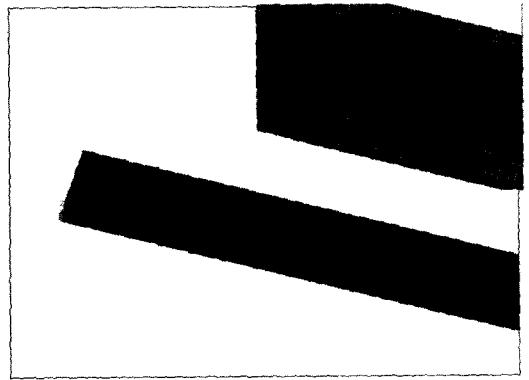


Fig. 1 The shape of meshed finite element model

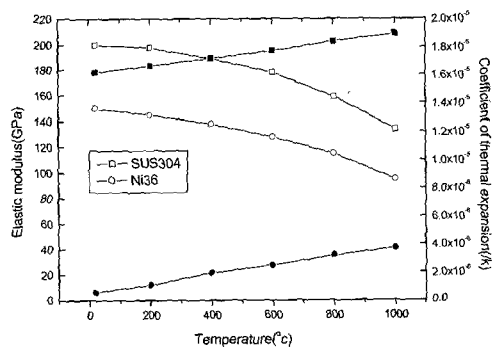


Fig. 2 The mechanical properties of both materials with respect to variation of temperature

Table 1 Mechanical properties of each material

	SUS 304	Ni 36
Hardness (Hv)	370-440	190-240
Tensile strength (MPa)	≥ 1150	63
Elastic modulus (GPa)	198	143
Max. strain (%)	5-12	8-13
Thermal expansion coefficient (×10 <sup>-6</sup> /°C)	14-16	≤ 1.5

변화하지만, 그 비율은 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

일반적으로 온도에 따라서 재료가 연성이 강해지고, 600 °C 이상에서는 항복강도는 거의 0에 가까워져 쉽게 소성유동이 가능해진다. 그러므로 600 °C 이상에서 발생하는 잔류응력은 거의 없다고 할 수 있다. 또한, Table 1에서는 열응력해석을 위해 사용된 재료의 탄성적 특성을 나타내었다.

### 3. 잔류응력 측정

#### 3.1 잔류응력 측정 원리

이종재료의 용접시 용접재의 기계적 특성 차이로 기인하여 용접부 주위에서 국부적인 잔류응력이 발생하게 된다. 특히 얇은 평판으로 제작되는 본 연구의 시험편에 발생하는 잔류응력은 온도가 구멍 뚫기법이나 X-선 회절법에 의해서 측정하게 되나 본 연구에서는 45°방향으로 배열된 스트레인 게이지에서 잔류응력을 구하는 구멍 뚫기법을 채택하였다. 스트레인 게이지에서 구해진 변형율은 식 (1)~(3)와 같이 나타내어진다. 이상의 식을 풀면 주응력은 (4)이고, 주응력 방향과 변수 A, B는 (5)~(7)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_a = A + B \cos 2\psi \quad (1)$$

$$\epsilon_b = A + B \cos 2(\psi + 45^\circ) \quad (2)$$

$$\epsilon_c = A + B \cos 2(\psi + 90^\circ) \quad (3)$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{1 - \nu} \pm \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_c)^2 + (2\epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c)^2} \right] \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{2}(\epsilon_a + \epsilon_c) \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2} \quad (6)$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{\epsilon_a - 2\epsilon_b + \epsilon_c}{\epsilon_c - \epsilon_a} \quad (7)$$

#### 3.2 실험 장치

본 연구에서 사용된 스트레인 게이지 로제트는 미국 Micro-Measurement사 제품으로 2축 상태의 응력 성분을 측정하기 위해 게이지를 일정한 형태(0, 90, 225°)에 따라 균일한 반경에 배열시킨 3축형 게이지이다. 게이지 저항은 120Ω이고, 게이지 상수는 5.15이다. 일반적으로 게이지 증양의 구멍에 정확하게 위치하지 못하고 편심이 발생하는 경우 추가적인 보정작업이 필요하므로 본 실험에서는 확대 망원경을 사용하여 최대한 게이지 구멍이 증양에 존재하도록 하였다.

#### 3.2 잔류응력 측정 실험

일정한 크기로 제작된 SUS304와 Ni36을 레이저 용접으로 접합하여 제작되는 트리 메탈의 형상을 Fig. 3에 나타내고 있다. 직사각형 형상을 가진 트리메탈은 고열팽창재료(SUS 304) 2개와 저열팽창재료(Ni 36) 1개를 지그로 고정 한 후 테이블을 이송하면서, 길이방향으로 용접하여 제작한다. 이때, 사용되는 소재의 폭은 8, 14, 8mm, 두께는 1mm, 길이는 260mm이다.

각각 재료에서 발생하는 잔류응력을 구하기 위해 SUS304

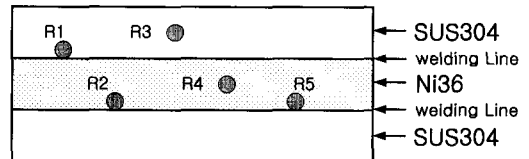


Fig. 3 The shape of specimen and position measured residual stress by hole drilling method

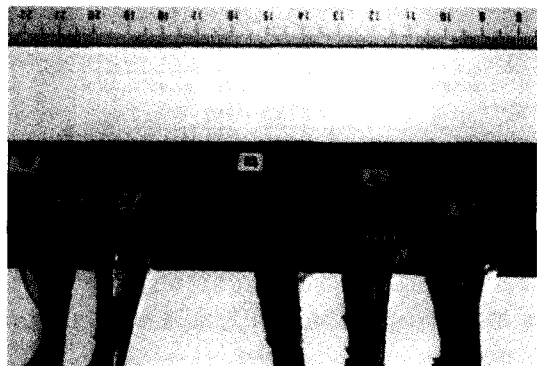


Fig. 4 The shape of tri-metal specimen with rosette strain gauge

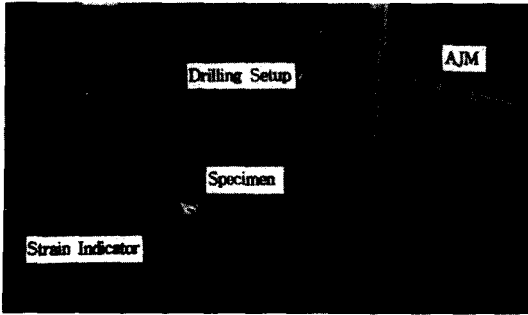


Fig. 5 The experimental apparatus for hole drilling method

Table 2 Hole diameter and position of each rosette

Rosette No.	Hole Dia.(mm)	Dist. from welding line	
R1	1.835	1.116	SUS304
R2 (R5)	1.850	1.4	Ni 36
R3	1.835	4.250	SUS304
R4	1.850	8.30	Ni 36

와 Ni36 재료 모두에 게이지를 부착하였으며, 특히, 용접부 부근(R1, R2)과 모재(R3, R4)로 구분하여 각각 측정하였으며, 2번 게이지와 폭방향으로는 동일한 위치이나 레이저용접에 의해 길이방향에 따른 잔류응력분포를 구하기 위해 중앙에 위치하는 Ni36재료에 하나를 더 추가하였다. 실제 게이지를 부착한 위치는 Fig. 4에 나타내고 있으며, 정확한 게이지 위치와 잔류응력 측정을 위해 생성된 홀의 지름은 Table 2에 나타내고 있다.

Fig. 5는 구멍뚫기법에 의한 잔류응력 측정 실험장치를 나타내고 있다. 실험장치는 드릴링장치, 공기연마분사기, 노즐, 그리고 변형률 측정장치로 구분한다. 공기연마분사기에 사용되는 알루미늄 분말의 평균 입자크기는 50 $\mu$ m이며, 고압공기와 알루미늄의 노즐을 통해 로제트의 중앙에 분사되면서 구멍을 뚫기 된다. 실험전 알루미늄 분말에 존재하는 습기를 완전히 제거하였다.

#### 4. 결과 및 토의

이종재료의 레이저용접에 의해서 발생하는 잔류응력을 평가하기 위해 열-구조 연성해석과 구멍뚫기법을 수행하여 다음의 결과를 얻었다.

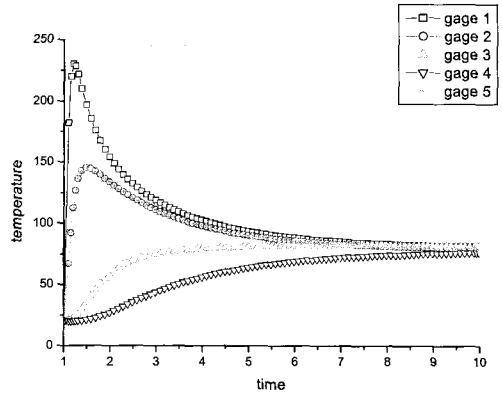


Fig. 6 The temperature distribution with respect to variation of relative time on each strain gauge position

#### 4.1 열전도해석

재료가 가지는 비열과 잠열등을 고려하지 않아 온도구배에 따른 정확한 시간을 예상하지 못하였다. 하지만, 열전도계수와 열대류계수를 고려하여 열분포도는 정확하게 도출하였다. 우선, 용접부의 초기 온도는 1600 $^{\circ}$ C이며, 시험편의 초기온도는 20 $^{\circ}$ C로 정의하였다.

Fig. 6에서는 게이지가 부착된 위치에서 시간의 증가에 따른 온도의 변화를 초기 시간에 대해 극부적으로 나타내고 있다. 시간이 증가함에 따라, 자연 방열과 열전달에 의해서 용접부의 온도는 감소하고, 상온의 시험편 온도는 점차 증가하고 있다. 이후 균일한 온도가 유지되면서 점차적으로 열전달에 의해서 감소함을 나타내고 있다. 게이지 2와 5는 위치상으로 거의 유사하므로 시간에 따른 온도값이 겹쳐서 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 용접부에 근접할수록 온도의 변화가 급격하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 열응력해석

Fig. 7에는 시험편의 길이 방향으로 중간지점에서 폭방향으로의 위치변화에 따른 잔류응력값을 보여주고 있다. 용접부에서는 이종재료의 극부적인 열팽창차이와 특성으로 인하여 극부적으로 잔류응력이 분포하고 있다.

초기 온도 상승으로 용접부의 SUS304와 Ni 36에서는 재료가 열의 상승으로 인하여 인장, 즉 팽창하여야 하나 외부 제한에 의해 압축응력이 발생하고, 이후 시험편의 온도가 낮아짐에 따라 초기에 발생된 과도한 압축응력으로 기인

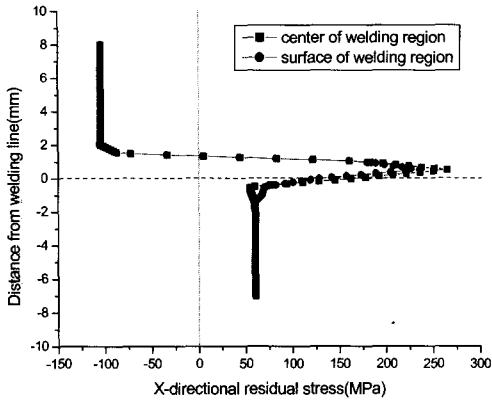


Fig. 7 The x-directional residual stress distribution on center and upper position of tri-metal specimen

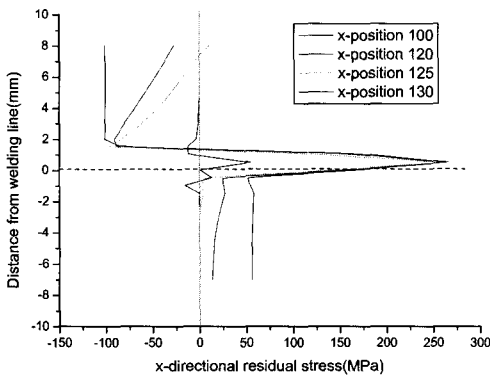


Fig. 8 The y-directional residual stress distribution on center position of tri-metal specimen

된 소성변형으로 완전한 탄성회복이 되지 않아, 인장잔류응력이 발생하게 된다. 또한, 용접부에서 떨어진 곳에서의 SUS304와 Ni 36는 반대적인 잔류응력값은 보이고 있다. SUS304인 경우에는 초기 온도상승으로 높은 인장이 발생하고, 이후 냉각되면 용접부와는 반대적인 경향이 발생하여 압축 잔류응력이 발생하게 된다.

SUS 304 재료의 용접부에서 최대 인장 잔류응력은 265.1MPa이 발생하였으며, 이후 점차적으로 -104.5MPa의 압축잔류응력이 발생하고 있다. Ni 36에서는 60.4MPa로 인장잔류응력이 발생하고 있으며, SUS304의 영향으로 Ni36 재료의 용접부에서는 171.2Ma로 높은 인장잔류응력이 발생하고, 용접부에서 멀어짐에 따라 응력값이 감소하고

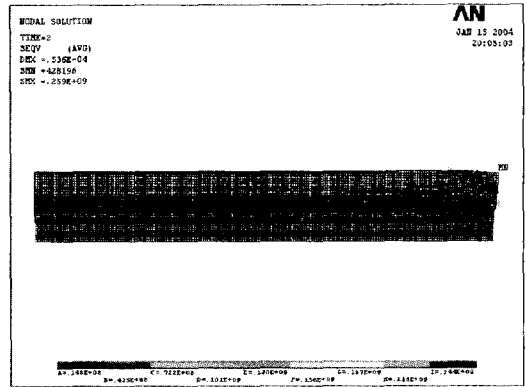


Fig. 9 The residual equivalent stress distribution on tri-metal specimen

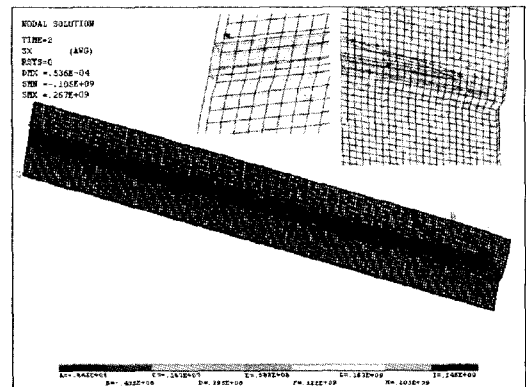


Fig. 10 The x-directional residual stress distribution on tri-metal specimen

있다. 또한, 비교적 변형이 자유로운 시험편의 표면에서보다 중심에서 29MPa정도 더 큰 잔류응력값을 보이고 있다.

시험편의 중심에서 길이 방향으로 100mm 지점에서부터 끝단(130mm)까지 중심에서의 응력분포를 Fig. 8에 나타내었다. 중심에서 100mm 지점까지는 X축 방향의 잔류응력은 거의 유사하게 나타나고 있으며, 또한 게이지가 위치하는 길이 방향에 대해서도 X축 방향의 잔류응력값은 거의 동일하게 발생하였다. 하지만, 시험편의 끝단에서는 X축 길이방향에 대해 급격한 변형으로 잔류응력 값이 상당히 복잡하다.

시험편의 끝단, 즉 거리가 130mm지점에서는 용접부에서 멀어짐에 따라 잔류응력이 거의 0에 근접하고 있다. 이것은 Ni 36재료에 의해서 가해지는 변형의 제한으로부터 비교적

자유로운 열팽창과 수축이 가능하므로 잔류응력은 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 초기 열에 의해 SUS304 재료의 과다한 변형이 예상되나, 잔류변형은 아주 미비하다.

Fig. 9는 시험편의 전체에서 발생하는 잔류상당응력 분포를 보여주고 있다. 용접부에서 높은 응력이 발생하고 있으며, 시험편의 끝단에서는 복잡한 응력분포를 보여주고 있다. 또한, Fig. 10에서는 시험편 길이방향(X축)으로의 잔류응력분포도를 나타내고 있다. Fig. 9와 동일하게 용접부에서 큰 응력이 나타나고 있으며, 또한 모재에서는 압축응력이 나타남을 알 수 있다. 또한, Fig. 10의 상단에서는 시험편의 중간부분과 끝단의 응력분포도를 확대하여 나타내었다. 용접부 주위에서는 균일한 응력분포를 볼 수 있으며, 시험편의 끝단에서는 압축응력분포가 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, 시험편의 끝단에서는 변형이 급격하게 발생하므로 트리 메탈의 제작시에 고려하여야 할 것으로 사료된다.

### 4.3 잔류응력측정

Table 2에서 R1과 R2는  $\epsilon_2$ 방향의 스트레인 게이지는 다른 재료에 걸쳐게 되므로 앞에서 설명한 이론적 해석 방법으로는 잔류응력을 구하기 힘들다. 따라서 용접선 부근의 잔류응력을 해석하기 위해서는 용접선에서 떨어진 순수 SUS304와 Ni36 재료에서 측정하여야 한다. 따라서, R3와 R4 로제트의 계산결과를 기준으로 하여, 트리 메탈에 존재하는 잔류응력을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에서는 SUS304에서는 인장잔류응력이 발생되며, Ni36에서는 압축잔류응력이 발생함을 알 수 있다. 그리고 상당히 큰 전단응력이 발생하고 있음을 알 수 있다.

로제트에서 X방향에 대한 잔류응력값을 Fig. 12에 나타내었다. SUS304에서는 해석에서와 유사하게 열팽창계수의

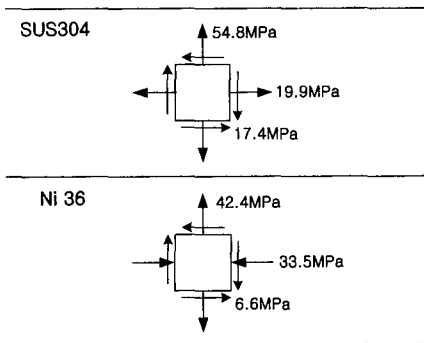


Fig. 11 The residual stress distribution induced by combination of R3 and R4 gauges

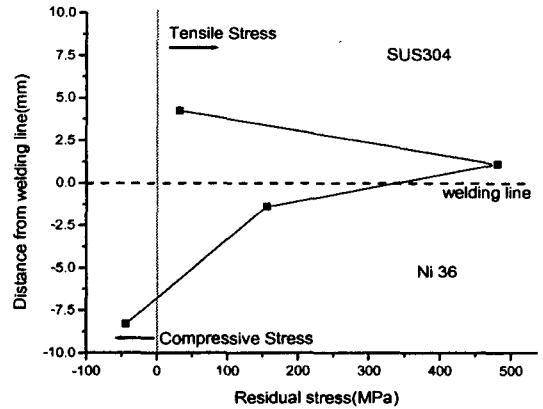


Fig. 12 The x-directional residual stress distribution on tri-metal specimen

차이로 인하여 높은 인장잔류응력이 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고, SUS304의 용접부에서 최대 잔류응력값은 동일하게 발생하고 있다. 용접부에서는 해석에서 구한 결과와 매우 유사한 응력분포를 나타내고 있으나, 모재에서 반대적인 결과가 나타나고 있다.

## 5. 결론

TV 브라운관의 새도우 마스크의 정밀도를 향상시키는 보강강쇠에 사용되는 이종재료를 이용한 레이저 용접에서 발생하는 잔류응력을 유한요소해석과 구멍뚫기법을 사용하여 분석하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 이종재료의 재료적 특성으로 인하여 높은 열팽창계수를 가진 재료인 SUS304에서 높은 인장잔류응력 265.1MPa 이 발생하였으며, 이 값은 용접부에서 멀어짐에 따라 낮아지고, 재료에 따라 SUS304인 경우에는 압축이, Ni36인 경우에는 인장잔류응력이 각각 발생하였다. 열처리를 수행하여, 이후 열변형 거동에 미치는 영향을 최소화하여야 할 것으로 사료된다.
- (2) 용접부에서는 팽창과 수축이 비교적 자유로운 상단에서 발생하는 잔류응력은 236.0MPa로 중심에서 발생하는 응력 265.1MPa보다 10.9% 낮게 발생하였다.
- (3) 게이지 크기의 제한에도 불구하고, SUS304인 경우에는 용접선 근처에서 길이방향의 응력이 최대 481MPa이 발생하였으며, Ni 36재료 인 경우에는 용접선 근처에서 140.47MPa이 발생하였다.

- (4) 시험편의 끝단에서는 변형이 급격하게 발생하므로 보강 장치에 사용되는 트리 메탈은 끝단의 국부적인 변형을 방지할 수 있는 설계가 고려되어야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Okata, T., 1983, "A structural analysis study on shadow mask thermal deformation of color CRT," *Japan Display*, pp. 20~25.
- (2) Kim, I. S., Kim, I. K., Moon, C. J., Jeong, Y. J., and An, Y. H., 2000, "A study on Analysis of heat transfer and residual stress on the weld zone using FEM," *J. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 5, pp. 96~104.
- (3) Jang, G. B., Kim, H. K., and Kang, S. S., 1998, "Finite element analysis of effect of preheating on the residual stress in 304 Stainless steel weldment," *J. of KWS*, Vol. 16, No. 5, pp. 67~75.
- (4) Variyar, S. M., and Prasad, N. S., 1999, "Estimation of residual stress in weldments using a nine-noded degenerated shell element," *J. of Materials Proceeding Technology*, Vol. 91, pp. 150~160.
- (5) Olibi, A. G., and Hashimi, M. S., 1996, "Stress relief procedures for low carbon steel(1020) welded components," *J. of Materials Proceeding Technology*, Vol. 56, pp. 552~562.