

레이저 용접이음의 피로강도*

주석재, 신인섭
기계자동차공학부

<요 약>

점용접은 승용차 차체 용접법으로 이제까지 널리 사용되었으나 최근에 일부 점용접이 레이저 용접으로 대체되었고 적용사례가 점점 많아지고 있다. 레이저 용접은 점용접에 비하여 생산속도, 생산제품의 치수정확도, 경량화 특성 등에서 뛰어나다. 이 논문에서는 레이저 용접의 정적강도와 피로강도를 실험과 해석적인 방법으로 점용접과 비교하였다. 정적강도에 대하여 레이저 용접조건의 영향을 조사하여 정적강도 예측식을 구하였다. 피로강도에 대하여 레이저 용접과 점용접 모두 용접부 가장자리 최대스트레인으로 정리하니 서로 일치하였다.

Fatigue Strength of Laser Welded Joints

Seok Jae Chu, In Seop Shin
School of Mechanical and Automotive Engineering

<ABSTRACT>

Spot-welded joints have been widely used in passenger car industry. Recently, some spot-welded joints are replaced by laser-weld joints and such applications are increasing. Laser-welded joints are superior to spot-weld joints in production speed, accuracy of the product and production of light-weight structure.

In this paper, both the static strength and fatigue strength of laser-welded joints are compared to those of spot-welded joints experimentally and analytically.

* 본 연구는 2000년도 현대자동차와 울산대 지역협력연구센터(기계부품 및 소재특성평가센터)의 지원으로 이루어진 것입니다.

The influence of change in welding conditions on the static strength are investigated from the results of tensile tests. The equation to predict the static strength can be constructed from the above influence factors.

From the finite element solution, the maximum strains at the edge of the weld on surface of the specimens are calculated. The fatigue strength is inversely proportional to the maximum strain during the load cycle.

1. 서론

자동차 차체의 용접으로는 이제까지 점용접이 널리 사용되었다. 레이저 용접은 다음과 같은 여러 가지 장점이 있어 최근에는 국내 자동차 업계에서도 레이저 용접을 본격적으로 사용하기 시작하였다. (1) Nd- YAG 레이저는 광케이블을 타고 흐르기 때문에 마치 전기와 같이 발생장치는 한쪽에 두고 용접할 부위를 찾아 레이저를 주사할 수 있다. 점용접에 비하여 로봇이 움직여야 할 무게가 줄어 로봇의 소형화가 가능하다. (2) 점용접에 비하여 용접속도가 빠르므로 생산성이 높다. (3) 레이저는 에너지 밀도가 높아 짧은 시간 내에 용접을 마치므로 열변형의 문제가 적다. (4) 점용접과 달리 레이저는 비접촉식이므로 용접을 위하여 흠 너비를 일부러 늘릴 필요가 없다. 따라서, 경량화와 자유로운 설계가 가능하다.

본 논문에서는 레이저 용접이음의 인장강도가 최대가 되는 용접조건을 찾기 위하여 레이저 출력, 이송속도, 초점의 위치, 강판의 간격 이상 4 가지 용접조건에 여러 가지 조합에 대하여 인장시험과 피로시험을 실시하고 분석하여 보았다.

2. 레이저 용접시편

2.1 레이저 용접시편의 제작

Fig. 1과 같이 2~3 장의 강판(높이 100 mm, 너비 240 mm 이상)을 30 mm 겹쳐 놓고 YAG 레이저(최대출력 4 kW)를 주사하였다. 레이저 용접은 stitch 방식으로 20 mm 용접하고 10 mm 띄웠다 다시 용접하는 것을 반복하였다. 레이저 용접을 마친 후 전단기에 넣어 너비 30 mm 간격으로 절단하였다.

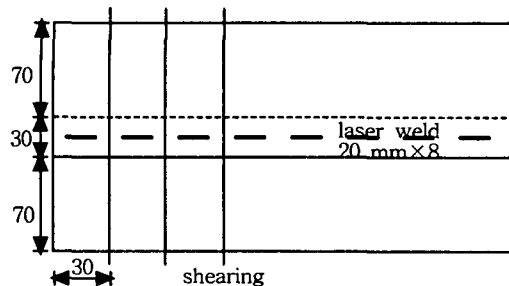


Fig. 1 Construction of laser welded specimens

2.2 두께와 재료의 조합

자동차 차체에는 2 점이나 3 점 이음이 사용되며 강판의 두께와 재료의 조합은 다양하다. Fig. 2와 같이 2 점 1가지와 3 점 3 가지 방식에 대하여 시편을 준비하였다. Fig. 2 각각의 방식에서 레이저빔은 왼쪽(차체의 내부)에서 주사하였다.

아연도금 강판은 레이저 용접 중 아연이 기화하는 문제가 있으므로 Table 1에서 보는 것처럼 일반 강판과 아연도금 강판을 구분하여 보았다. Table 1에서 시편 기호(3자리 숫자)는 Inner panel, Reinforcement, Outer panel 순서대로 각각 어느 재료인가를 가리킨다. 여기서 짝수인 재료가 아연도금 강판이다.

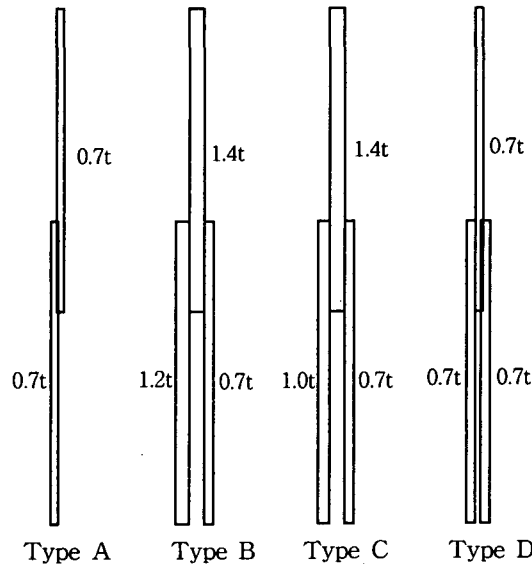


Fig. 2 Types of thickness combinations

2.3 용접조건 조합

레이저 용접의 최적 조건(최대 강도)을 찾기 위하여 다음과 같이 4 가지 용접 조건에 대하여 각각 2~3 단계로 설정하여 모든 조합에 대하여 시편을 제작하였다. 용접조건은 (1) 레이저 출력 (2) 레이저 이송속도 (3) 레이저 초점 위치 (4) 강판사이의 간격이다. 구체적인 것은 Table 1에 열거하였다. 용접 부위에 대한 입력 에너지는 레이저 출력에 비례하고 레이저 이송속도에는 반비례한다. Table 1을 보면 Type B, Type C, Type D, Type A 순서로 입력에너지가 높고 이것은 강판 전체 두께의 순서와 같다.

3. 인장강도의 분석

3.1 용접조건에의 영향

용접조건에의 모든 조합에 대하여 정적 인장강도를 구하였다. 3 겹 시편(Type B~Type D)에 대하여는 같은 것을 2 개 만들어 Inner panel과 Reinforcement, Reinforcement와 Outer panel 사이의 인장강도를 각각 측정하여 합산하였다.

Table 1 Variation of welding conditions

| Specimen Type | Input Power [kW] | Travelling Speed [mm/s] | Focus Offset [mm] | Gap between the Plates [mm] |
|---------------|------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|
| A110 | 0 2 4 | 0 50 100 | -4 -2 0 | 0.0 0.2 0.5 |
| A220 | 0 2 4 | 0 50 100 | -4 -2 0 | 0.0 0.2 0.5 |
| B331 | 0 2 4 | 0 50 100 | -4 -2 0 | 0.0 0.2 0.5 |
| B342 | 0 2 4 | 0 50 100 | -4 -2 0 | 0.0 0.2 0.5 |
| B442 | 0 2 4 | 0 50 100 | -4 -2 0 | 0.0 0.2 0.5 |
| C331 | 0 2 4 | 0 50 100 | -4 -2 0 | 0.0 0.2 0.5 |
| C442 | 0 2 4 | 0 50 100 | -4 -2 0 | 0.0 0.2 0.5 |
| D331 | 0 2 4 | 0 50 100 | -4 -2 0 | 0.0 0.2 0.5 |
| D232 | 0 2 4 | 0 50 100 | -4 -2 0 | 0.0 0.2 0.5 |

* 1(SPCC, SPEN) 2(RCNCEN, SGACEN) 3(SPRC) 4(SGARC)

4 가지 용접조건은 복합적으로 작용하였다. 즉, 어느 1 가지 용접조건만 바뀌었을 때 나머지 3 가지 용접조건에 따라 인장강도가 증가하는 경우도 있고 반대로 감소하는 경우도 있다. A110 시편(2 겹, SPCC+SPCC)에 대한 경우 어느 1 가지 용접조건만 바뀌었을 때 인장강도의 증감률을 Fig. 3에 그려보았다. 중앙 수평선의 상부 영역은 증가한 경우, 하부 영역은 감소한 경우에 해당한다. 횡축 최대하중은 용접조건이 바뀌기 전후 인장강도의 평균을 취한 것이다.

A110 시편에 대한 경우 증감률의 평균치만 고려하였을 때 어느 1 가지 용접 조건 중 출력 증가(2.0 →2.7 kW), 이송속도 증가(60 →80 mm/s)의 순서로 인장강도가 많이 증가하

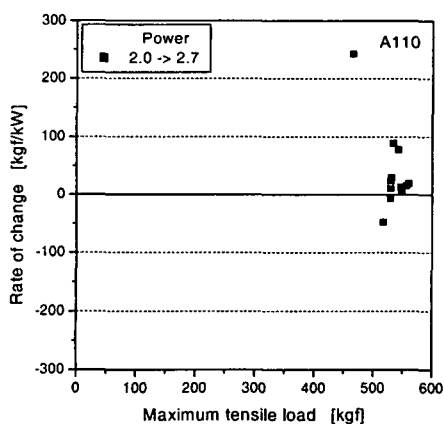
였고, 반대로 강판 간격의 증가(0.2 → 0.5 mm), 강판 간격의 증가(0.0 → 0.2 mm)의 순서로 인장강도가 많이 감소하였다.

A110 시편에 대한 경우 어느 1 가지 용접조건만 바뀌었을 때 인장강도의 증감 평균치를 사용하여 식(1)과 같이 인장강도를 예측하여 보았다.

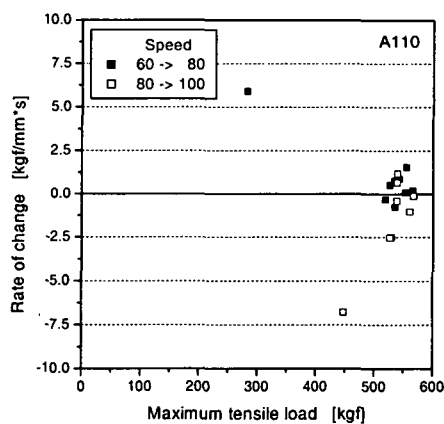
(1)

$$[\text{predicted maximum load}] = [\text{average measured load}] +$$

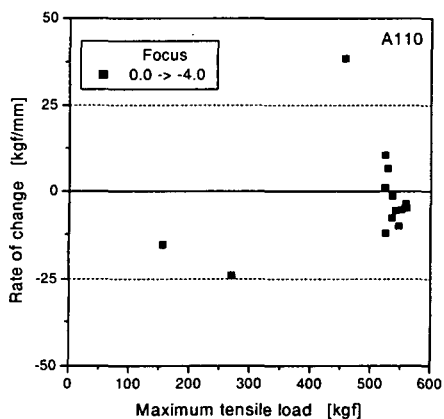
$$\begin{Bmatrix} 0.0(2.0\text{kW}) \\ 28.0(2.7\text{kW}) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0.0(60\text{mm/sec}) \\ 20.0(80\text{mm/sec}) \\ -8.5(100\text{mm/sec}) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0.0(0.0\text{mm}) \\ 9.4(-4.0\text{mm}) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0.0(0.0\text{mm}) \\ -21.4(0.2\text{mm}) \\ -289.9(0.5\text{mm}) \end{Bmatrix}$$



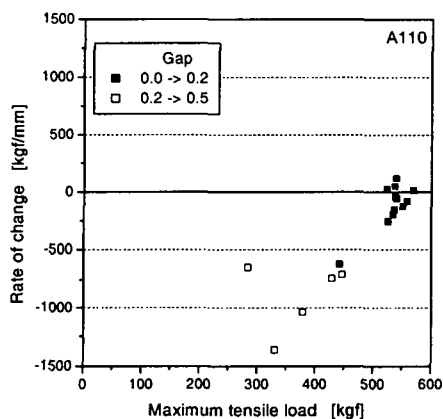
(a) Effects of laser power



(b) Effects of travelling speed



(c) Effects of focusing



(d) Effects of gap between plates

Fig. 3 Effects of welding conditions on the static strength

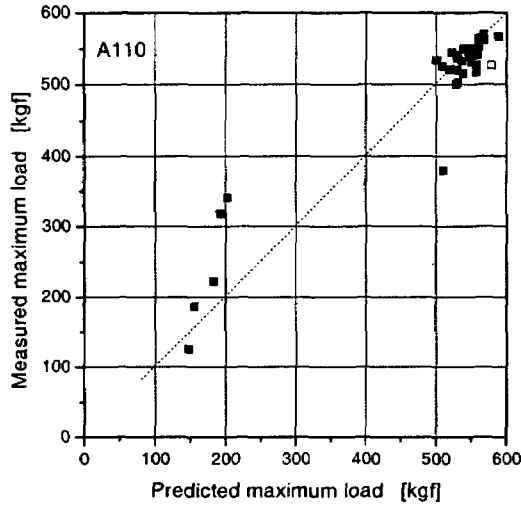


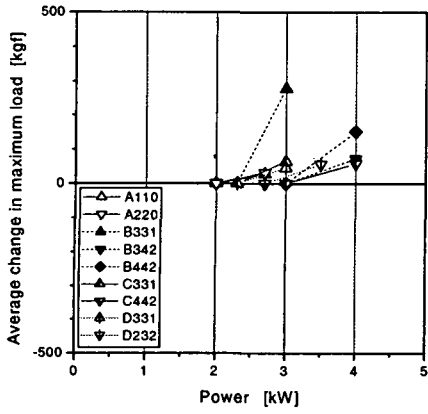
Fig. 4 Comparison between the predicted strength and the measured strength (static)

인장강도 측정치를 예측치에 대하여 Fig. 4에 그려보았다. 기울기 1인 직선 주위에 약간 흩어진 분포를 보여 어느 1 가지 용접조건만 바뀌었을 때 인장강도 증감 평균치를 사용하는 방법은 한계가 있다. 이것은 Fig. 3에서 보듯이 4 가지 용접조건은 복합적으로 작용하기 때문이다.

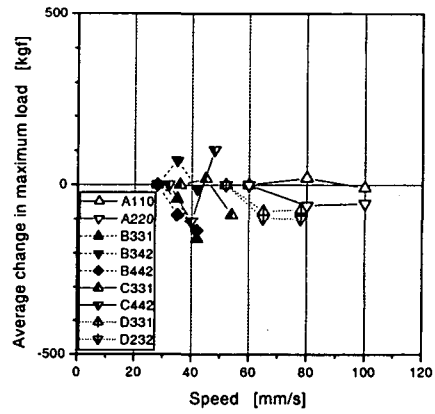
나머지 시편(A220, ..., D232)에 대하여도 어느 1 가지 용접조건만 바뀌었을 때 인장강도 증감 평균치를 계산하여 Fig. 5에 그려보았다. 강판 간격, 레이저 출력의 순서로 영향이 컸다. 취급한 범위 안에서 강판 간격의 증가는 인장강도를 증가시키거나 감소시켰지만 레이저 출력의 증가는 인장강도를 증가시키기만 하였다.(평균적으로)

레이저 출력의 증가는 Type B(가장 두꺼운 경우)에 대하여 인장강도 증가가 가장 컸다. B331인 경우에 비하여 B342나 B442(아연도금강판)인 경우는 인장 강도 증가가 약간 낮았다. 나머지 Type에 대하여는 이런 경향이 없이 일반 강판이나 아연도금강판이나 경향이 서로 비슷하였다.

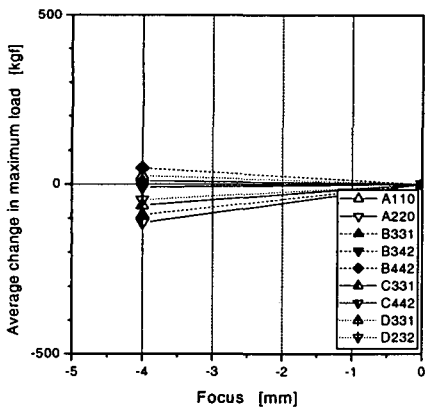
이송속도에 대하여 일반 강판이나 아연도금강판은 인장강도 증감 경향이 서로 반대인 것이 많았다. 이송속도가 증가할수록 용접부위에 대한 입력에너지는 감소하므로 일반적으로 인장강도가 낮아질 것이 기대된다. 그러나, 일부 아연도금 강판 시편(C442, A220)은 이송속도 증가 마지막 단계에서 오히려 인장강도가 다소 증가하였다. 이것은, 이송속도가 증가할수록 입력에너지가 감소하여서, 아연이 기화하여 용접불량을 초래하는 문제가 완화되었기 때문이라고 추측한다.



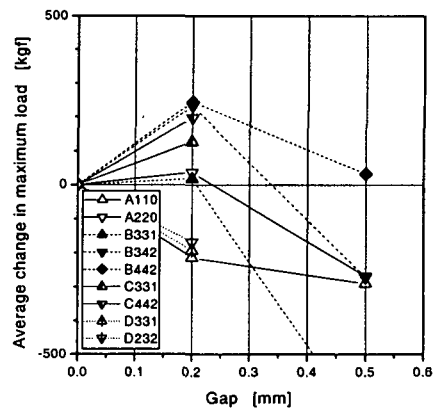
(a) Effects of laser power



(b) Effects of travelling speed



(c) Effects of focusing



(d) Effects of gap between plates

Fig. 5 Average effects of welding conditions on the static strength

강판 간격의 증가는 일반 강판에 비하여 아연도금강판에 유리하게 작용하였다. 이것은 기화된 아연이 배출되기 쉽기 때문이다.

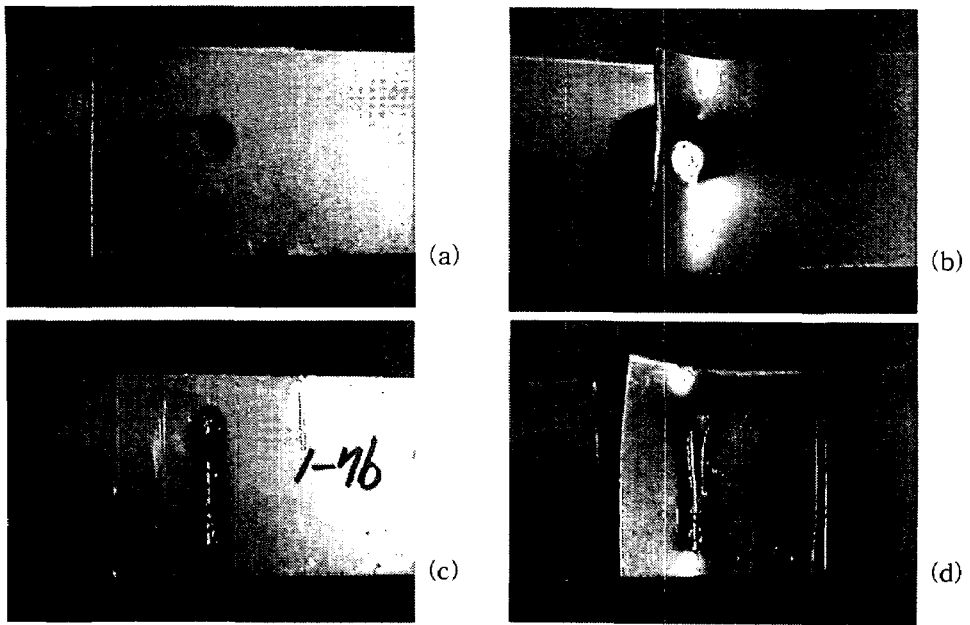


Fig. 6 Spot welded specimen and laser welded specimen before and after fatigue test

4. 피로 강도의 분석

4.1 유한요소해석

점용접과 레이저 용접(2 겹) 시편에 대하여 피로강도를 비교하였다.

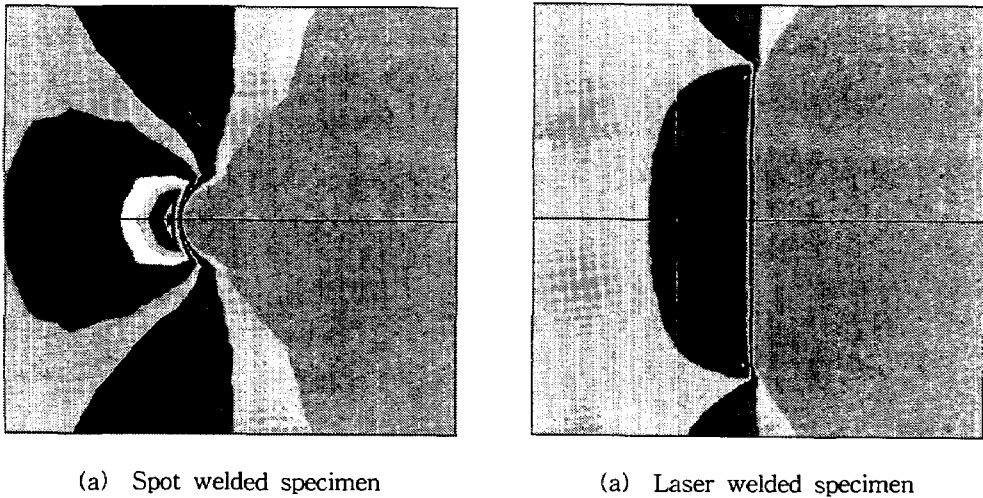


Fig. 7 Distribution of maximum principal stresses

Fig. 6는 점용접 시편과 레이저 용접 시편의 사진이다. 피로균열은 점용접 시편의 경우 중앙에서, 레이저 용접 시편의 경우 양단에서 먼저 발생한다.

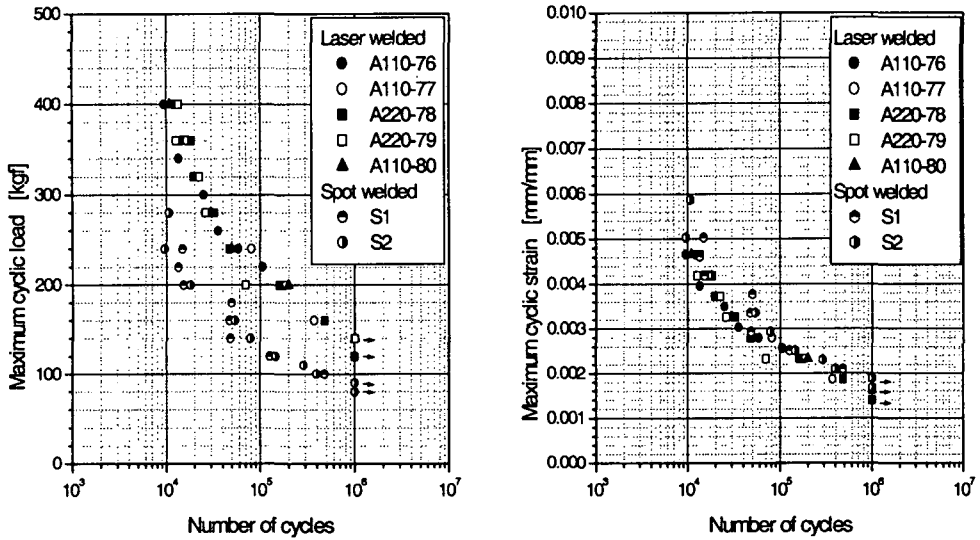
Fig. 7은 시편의 용접부 부근의 최대주응력 분포를 그린 것이다. 유한요소해석은 DISPLAY III와 NISA II를 사용하였다. 각각의 용접 시편은 셀 요소를 사용하여 표현하고 용접부는 강체요소로 상하 강판을 연결하여 표현하였다. 강판의 두께(0.7 mm),탄성계수(20,500 kgf/mm²), Poisson 비(0.3), 인장하중(10 kgf)과 같은 조건은 서로 같다.

최대주응력이 발생하는 부위는 Fig. 6 피로균열이 발생하는 부위와 일치한다. Fig. 7은 color band는 서로 같은 것을 사용하였다. 점용접이 레이저용접보다 용접부 가장자리 주응력이 높다.

Table 2 Comparison of principal strains from finite element results

| Course mesh | | |
|--|---------|---------|
| | Spot | Laser |
| σ_1 [kgf/mm ²] | 4.714 | 2.511 |
| σ_2 [kgf/mm ²] | 1.369 | 0.442 |
| $\epsilon_1[\times 10^{-6}]$ | 209.917 | 116.020 |
| $\epsilon_{1(laser)}/\epsilon_{1(spot)}$ | | 0.553 |
| Fine mesh | | |
| | Spot | Laser |
| σ_1 [kgf/mm ²] | 5.163 | 2.788 |
| σ_2 [kgf/mm ²] | 1.428 | 0.500 |
| $\epsilon_1[\times 10^{-6}]$ | 230.956 | 128.683 |
| $\epsilon_{1(laser)}/\epsilon_{1(spot)}$ | | 0.557 |

용접부 부근 요소망은 영성한 것(coarse mesh)과 촘촘한 것(fine mesh) 2 가지를 사용하여 요소망의 영향을 확인하였다. Table 2에서 보는 것처럼 주 스트레인은 요소망의 영향을 받지만 점용접과 레이저 용접에 대한 스트레인의 비는 거의 일정하였다. 이 비를 이용하여 피로시험 결과를 분석하여 보았다.



(a) Load amplitude - fatigue life data (b) Maximum principal strain - fatigue life data

Fig. 8 Comparison of fatigue test results

4.2 피로시험결과의 분석

Fig. 8(a)와 같이 레이저 용접이음이 점용접이음보다 피로강도가 높았다. 레이저 용접이음의 경우 일반 강판과 아연도금강판의 차이는 거의 없었다.

Table 2의 결과를 이용하여 하중 진폭을 용접부 가장자리 스트레인으로 바꾸어 정리하여 보았다. Fig. 8(b)와 같이 수명곡선은 서로 일치한다. 이것은 용접부 피로강도에 관한 한 용접 조건과는 무관하고 용접부 가장자리 최대 주스트레인으로 결정됨을 가리킨다.[1]

4. 결론

레이저 용접이음의 인장강도에 대하여 강판 간격, 레이저 출력의 순서로 용접조건에 영향을 주었다. 강판 간격의 증가는 일반 강판에 비하여 아연도금강판에 유리하게 작용하였다. 이것은 기화된 아연이 배출되기 쉽기 때문이다. 그러나, 과도한 강판 간격의 증가는 용접비드의 생성 불량을 초래하므로 적절한 강판 간격의 유지는 필수적이다.

레이저 용접부 피로강도는 2 겹 시편의 경우 용접조건과는 무관하고 용접부 가장자리 최대 주스트레인으로 결정되었다.

참고문헌

1. 주석재 외 4인, "점용접 시편의 피로수명 해석," 한국자동차공학회논문집, 제7권, 제6호, pp. 279-286, 1999.