

점용접 박리-인장 시험편의 후면접촉 영향

이용복* · 정진성** · 박영근** · 최지훈**

The Effects of Tail Contact for Spot Welding Peel-tension Specimen

Y. B. Lee*, C. S. Chung**, Y. K. Park** and J. H. Choi**

Key Words : Peel-tension specimen(박리-인장 시험편), Tail effect(점용접부 후면접촉의 영향), Stress index parameter(응력 지수 매개변수)

Abstract

Spot welding has been used in the sheet metal joining processes because of its high productivity and convenience. In this study, predicting methods of fatigue life of spot welded joint have been investigated and fatigue and static tests were conducted with the peel-tension specimens using cold rolled steel plate(SPCC). Fatigue life of peel-tension spot welded joint was influenced by tail effect. Fatigue life evaluation using modified stress index parameter, considering the effective eccentric length, can predict the life more exactly than conventional stress index parameter.

1. 서 론

점용접은 작업이 간단하고 짧은 시간에 이루어지므로 자동화, 대량생산 등이 쉽기 때문에 자동차 차체, 철도 차량 등의 구조물에 널리 사용되고 있다. 점용접의 신뢰성을 결정하는 것은 주로 피로강도이며, 반복하중에 의한 점용접부의 파괴거동은 많은 연구자들의 관심을 끌어들였다.¹⁾ 그러나 점용접부의 피로균열은 주로 재료, 용접 및 구조역학적 인자의 영향을 받으며 3차원적으로 균열이 성장하므로 다축응력에 의한 혼합모드이고, 피로균열 발생 및 성장의 검출이 곤란하여 이에 대한 해석과 예측이 어렵다.^{2,3)} 차체 등의 박판 구조물에서 직경이 수mm에 지나지 않는 점용접 주위는 높은 응력집중으로 인해 모재의 강도에 비해 훨씬

취약하기 때문에 피로강도 및 내구성 향상은 구조 경량화와 더불어 안전대책을 수립하는데 중요한 인자가 된다.⁴⁾

지난 20년간 점용접부의 피로수명을 평가하기 위한 꾸준한 연구가 진행되었다. Kitagawa⁵⁾, Mizui⁶⁾ 등은 스트레인 게이지를 사용하여 내외면 변형률을 측정하여 변형률 변화범위를 이용한 피로수명 예측에 관하여 연구하였다. 한편 Pook⁷⁾, Wang⁸⁾ 등은 점용접부의 피로수명 예측에 응력확대계수를 적용하였으며, Kurath⁹⁾와 Swellam^{10,11)} 등은 점용접부의 기하학적 인 형상과 응력비의 영향을 고려하여 점용접부의 피로수명 예측에 관한 응력 지수 파라미터를 제안하였다.

그러나 점용접부의 피로강도 평가는 대부분이 인장-전단 시험편(tensile-shear specimen)에 편중되었다. 인장-전단의 경우보다 상대적으로 취약한 인장-굽

※ 1999년 3월 4일 접수

* 정회원, 홍익대학교 기계공학과

** 비회원, 홍익대학교 대학원 기계공학과

이용복 : rblee@wow.hongik.ac.kr

힘 하중이 작용하는 박리-인장 시험편(peel-tension specimen)에 대한 연구¹²⁾는 피로실험시 시험편의 큰 변형으로 인한 정확한 하중제어의 어려움 등으로 인하여 매우 드물며, 최근 응력 지수 파라미터를 통한 점용접부의 피로수명예측^{9~11,13,14)}은 상당한 진전을 보였지만 인장-굽힘하중을 받는 경우에는 점용접부 후면접촉의 영향(tail effect)을 고려하지 못하여 정확한 수명예측이 곤란하였다.

따라서, 본 연구에서는 박리-인장 시험편을 사용하여 인장실험과 피로실험을 수행하고, 점용접부에 작용하는 다축응력과 후면접촉의 영향을 고려하여 응력 지수 파라미터를 수정하고, 그것을 이용하여 인장-굽힘 하중을 받는 점용접부의 피로수명에 관한 향상된 예측을 시도하였다.

2. 점용접부의 응력과 응력 지수 파라미터

일반적으로 점용접부에 작용하는 하중은 Fig. 1과 같이 너깃(nugget)에 수직인 방향으로 작용하는 수직력 F, 너깃을 통과하는 방향으로 작용하는 전단력 Q, 그리고 작용 하중의 편심에 의하여 발생하는 모멘트 M의 세 가지 성분으로 나뉘어 진다. 양호한 접합이 이루어진 경우에 균열은 너깃을 통과하는 방향으로 진전하지 않으며^{9,10)} 인장-굽힘을 동시에 받는 점용접부의 경우 작용응력은 다음과 같이 계산된다.

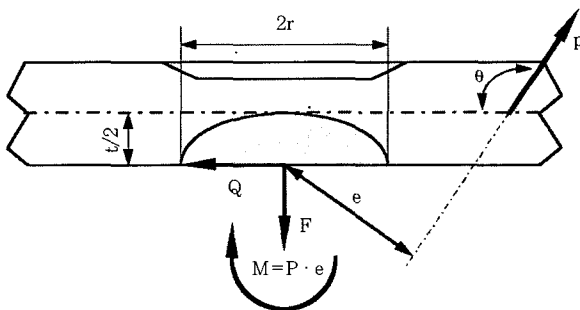


Fig. 1 Generalized loading for a spot weld

$$\sigma_n = \frac{F}{\pi r^2}, \sigma_m = \frac{Mc}{I} = \frac{P \cdot e}{z} \quad (1)$$

$$M = Pe, Q = 0, F = P \quad (2)$$

$$\sigma_r = \sigma_n + \sigma_m, \tau = 0 \quad (3)$$

여기서, σ_n , σ_m , σ_r 는 각각 수직응력, 굽힘응력, 합성응력을 나타내며 e와 z는 각각 편심거리와 단면계수를 나타낸다^{9~11)}. 점용접부에 작용하는 F, M, Q

에 의한 응력확대계수^{9~11)}는 다음과 같다.

$$K_f = \frac{F}{2r\sqrt{\pi r}} \quad (4)$$

$$K_M = \frac{3M}{2r^2\sqrt{\pi r}} \quad (5)$$

$$K_Q = \frac{Q}{2r\sqrt{\pi r}} \quad (6)$$

$$K_I = K_f + K_M, K_{II} = K_Q \quad (7)$$

단순화한 모드 I의 상당응력확대계수를 이용한 응력 지수 파라미터 K_I 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_I = \sqrt{K_{II}^2 + \beta K_I^2} \quad (8)$$

여기서, β 는 K_{II} 과 K_I 의 상호작용을 정량화한 상수로 저탄소강의 경우는 2, 고장력강의 경우 3으로 사용되나 인장-굽힘을 받는 박리-인장 시험편의 경우 전단력 Q로 인해서 무시된다. 시험편의 기하학적인 형상과 응력비의 영향을 고려하여 Kurath 등에 의해서 제안된 응력 지수 파라미터는 다음과 같다.^{9~11)}

$$K_I = K_{i_{max}}(1-R)^{0.85} = \sqrt{\frac{K_{II}^2 + \beta K_I^2}{r^3 \left(\frac{9r^2}{4r^2} + 1 \right)}} (1-R)^{0.85} \quad (9)$$

3. 실험

실험에 사용한 재료는 자동차 차체로 많이 이용되고 있는 냉간압연강판(SPCC)으로 재료의 기계적 성질 및 화학적 성분은 Table 1, 2에 각각 나타내었다. 박리-인장 시험편(peel-tension specimen)은 JIS Z3136를 참고하여 시험편의 치수를 결정하였다. Fig. 2에 시험편의 형상과 Table 3에 시험편의 치수를 나타내었다. 또한, 점용접부의 후면 접촉의 영향을 알아보기 위하여 동일한 용접조건의 L형 시험편과 점용접 뒷부분의 접촉을 제거한 H형 시험편으로 각각

Table 1 Mechanical properties of the base metal

Material	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	E (GPa)	Elongation (%)
SPCC	341	200	2.09×10^2	50.4

Table 2 Chemical compositions of specimen (wt. %)

Material	C	Mn	P	Al	Fe
SPCC	0.04	0.25	0.01	0.005	bal.

Table 3 Dimension of peel-tension specimens(mm)

t	w	L	d	e
1.0	30	100	6.0	15.1
2.3	40	125	7.7	20.3

Table 4. Conditions for spot welding

Thickness (mm)	Current (kA)	Force (kN)	Time (cycle)
1.0	10	2.45	12
2.3	12	3.73	18

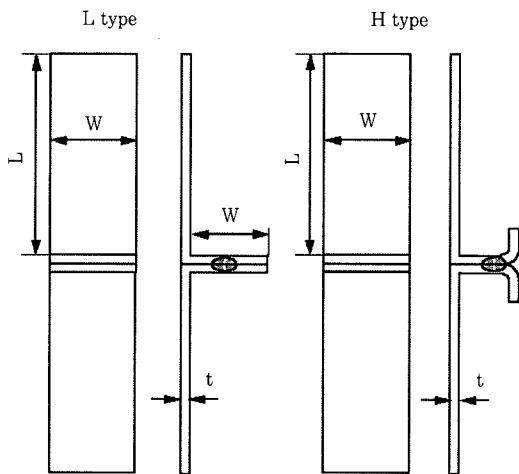


Fig. 2 Configuration of peel-tension specimens

제작하였으며, 실험에 사용된 용접조건은 Table 4에 나타내었다.

정적 강도에서 후면 접촉의 영향을 알아보기 위하여 인장실험을 변위제어 방식으로 2mm/min의 인장속도로 수행하였다. 실험 후 점용접부의 너깃중앙을 다이아몬드 절단기로 절단한 후 경면 연마 하고, 예칭시켜 금속현미경으로 너깃 직경을 측정하였다. 너깃 직경은 판두께가 1 mm인 경우와 2.3mm인 경우 각각 7.7±0.1mm로 측정되었다.

피로실험은 49 kN용량의 전기 유압식 만능 재료 시험기(Instron 8511)를 사용하여 응력비(R)가 0.5인

정현파형(sine wave form) 반복하중을 하중제어 방식으로 5~10Hz의 진동수로 실험하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 정적 강도에 미치는 후면접촉의 영향

점용접부 너깃 주위에 나타나는 일반적인 파괴 형태는 너깃을 형성하는 경계를 중심으로 그 바깥에서 파괴가 일어나는 찢어짐, 너깃 내부에 속하는 너깃 들레부근에서 파괴가 일어나는 버튼 파괴, 너깃 내부의 두 판의 접합면에서 파괴가 일어나는 전단 파괴로 나눌 수 있다.^{3,4)}

이와 같이 파괴 형태가 각기 다르게 나타나는 원인은 ①점용접 조건, ②너깃내의 불순물, ③너깃주위에 취약한 금속 조직, ④너깃경계가 갖는 자연적인 노치 효과 등으로 알려져 있다.^{2,3)} 인장실험 결과 판두께가 1 mm와 2.3 mm인 두가지 경우 모두 초기에는 버튼형태로 파단이 발생하나 인장강도점을 지나면서 찢어짐의 형태로 최종 파단되었다.

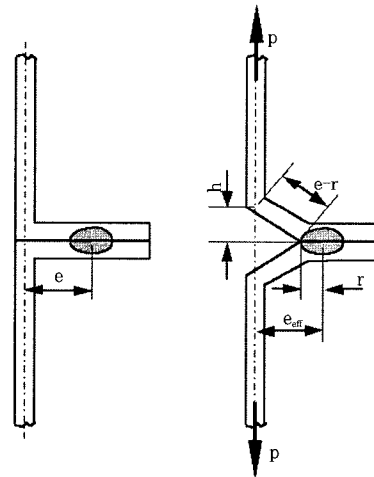


Fig. 3 Change in geometry after loading

L형 시험편과 H형 시험편의 인장실험 결과를 Fig. 4, 5에 각각 나타내었다. Fig. 4는 판두께가 1 mm인 경우인데 하중작용 초기에는 하중이 증가함에 따라 직선적인 기울기로 변위가 증가하다가 시험편에 작용하는 굽힘응력으로 인해서 겹쳐져 있던 두판이 벌어지게 되어 변위는 비선형적인 곡선의 형태로 증가하고 너깃 중심과 하중방향과의 유효편심거리(e_{eff})는 급격하게 감소하게 된다. 판두께가 2.3 mm인 Fig. 5의 경우도 하중-변위-유효편심거리의 관계가 동일한 경향을 나타내었다.

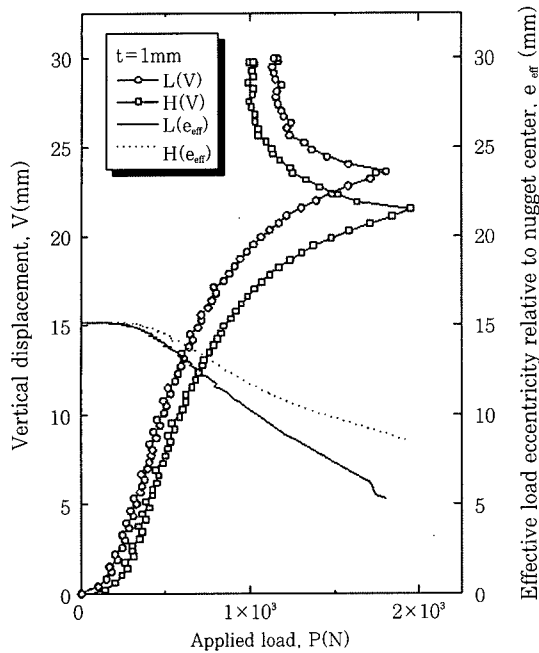


Fig. 4 Applied load vs. vertical displacement and effective load eccentricity (t=1mm)

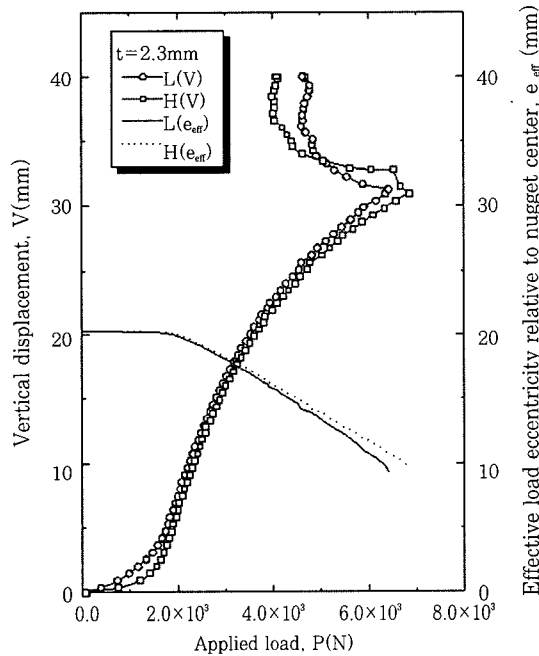


Fig. 5 Applied load vs. vertical displacement and effective load eccentricity (t=2.3mm)

점용접부 뒷부분을 제거한 H형의 경우가 L형에 비해 인장강도는 약간 높게 나타나며, 같은 하중일 때 수직변위가 작게 발생하므로 유효편심거리(e_{eff})가 L형에 비해 증가하는 경향을 갖는다. L형의 경우 하중선 반대편에서 점용접부 뒷부분이 서로 접촉하여 작용하중

을 분산시키고 같은 하중에서 H형에 비해 상대적으로 두 판 사이의 변위를 증가시키며 결과적으로 유효 편심거리(e_{eff})를 감소시키게 된다. 여기서 유효편심거리는 Fig. 3과 같이 작용하중 증가에 의한 형상변화를 고려하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$e_{eff} = r + \sqrt{(e-r)^2 - h^2} \quad (10)$$

여기서, r 은 너짓반경, h 는 수직변위의 반폭, e 는 초기 편심거리를 나타낸다.

4.2 피로 수명의 평가와 후면접촉의 영향

Wang⁸⁾ 등은 점용접부 주변에서 균열 진전에 의해 파괴가 일어나는 경우, Fig. 6과 같이 전체 피로수명을 3영역으로 구분하였다. 즉, 영역 I은 초기부터 균열이 발생하기 까지의 단계이며, 영역 II는 균열이 발생하여 두께방향으로 관통하는 단계로 응력집중을 받은 용접부에서 초기 균열이 발생한 후 반타원 형상으로 진전하는 구간이다. 영역 III은 균열이 폭방향으로 진전하여 최종 파단에 이르는 단계이며, 이 단계는 균열의 진전보다는 찢어짐의 형태로 급속 파단하게 된다. 박리-인장 시험편에서 판두께가 비교적 얇은 경우 (t=1mm)는 각 영역의 천이점을 이동식 현미경을 이용하여 육안으로 관찰하는 것이 가능하나, 판두께가

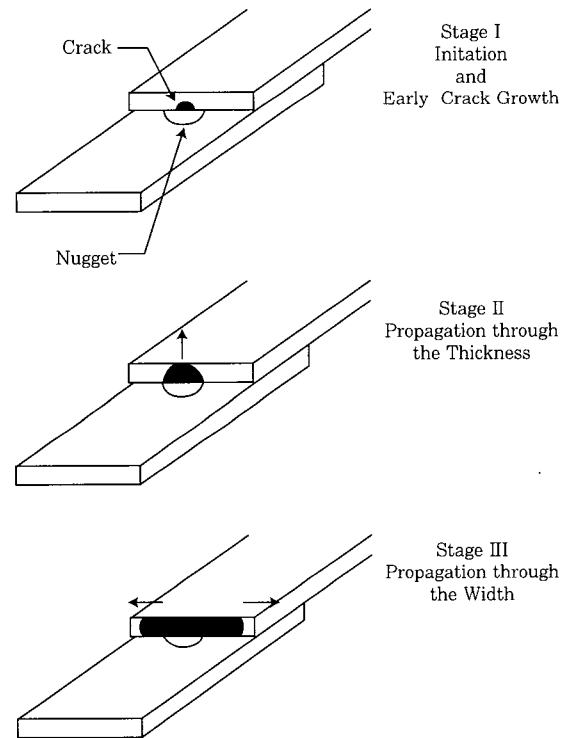


Fig. 6 The different stage of the fatigue life

두꺼운 경우($t=2.3\text{mm}$)는 시험편의 굽힘강성이 증가하기 때문에 고하중 영역(피로수명이 약 $10^4 \sim 10^5$ 회 이하)을 제외하고는 두판 접합부의 벌어짐이 적어서 육안으로 관찰하는 것이 불가능하였다.

피로 수명에 미치는 후면접촉의 영향을 파악하기 위하여 L형과 H형 시험편의 피로실험결과에 의한 각 영역수명을 전체수명의 비율로 Fig. 7, 8에 나타내었다. L형의 경우 작용하중폭 감소에 의한 영역별 수명분율의 차이가 크지않은 반면, 후면접촉의 영향이 없는 H형 시험편의 경우 작용하중폭이 감소할 수록 영역 I의 분율이 증가하고, 상대적인 영역 II, III의 분율이 감소하였다. H형과 구별되는 L형의 영역 II, III 증가현상은 낮은 하중폭에서 균열이 발생한 후에 점진적으로 전파하여 나가는 영역에서 후면접촉으로 인한 균열선단의 응력집중이 다소 완화되어 피로수명에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 9는 하중범위를 매개변수로 사용하여 L형과 H형의 수명을 평가한 선도이다. Fig. 9에서 동일한 하중 조건으로 실험한 경우 H형에 비해서 L형의 피로수명이 뚜렷하게 더 길다. 이것은 점용접부 뒷부분의 상

호 접촉이 작용하중을 분산시키고, 최초의 하중에 의해서 두 판 사이의 변위를 증가시키며, 변위의 증가는 유효 편심거리(e_{eff})를 감소시키므로 결과적으로 같은 하중상태에서 점용접부에 작용하는 모멘트 M 을 감소시키기 때문이다. 즉, 반복하중이 가해질 때 L형에서 점용접부 뒷부분 접촉은 모멘트 M 을 감소시키므로 굽힘 모멘트에 의한 응력집중이 다소 약화되어 피로균열 전진을 지연시키는 역할을 한다. 한편, Fig. 10은 응력범위-수명선도를 나타낸 것으로 Fig. 9과 마찬가지로 피로수명을 예측하기에는 적합하지 않다. 점용접부의 통일적인 피로수명을 평가하기 위해서는 너깃직경, 시험편 두께, 폭과 같은 기하학적 형상의 고려가 필요하며 특히 Fig. 3에서와 같이 초기 하중이 작용할 때 형상의 변화를 고려하여야 한다.

Fig. 11은 응력지수파라미터(S.I.P.)와 초기 형상 변화에 의한 유효편심거리를 고려한 수정된 응력지수 파라미터(M.S.I.P.)를 비교하여 나타낸 것으로 M.S.I.P.가 후면접촉의 유무에도 불구하고 S.I.P.보다 약간 더 정확하게 피로수명이 예측되었다.

Fig. 12는 후면접촉 영향을 파악하기 위하여 제작한

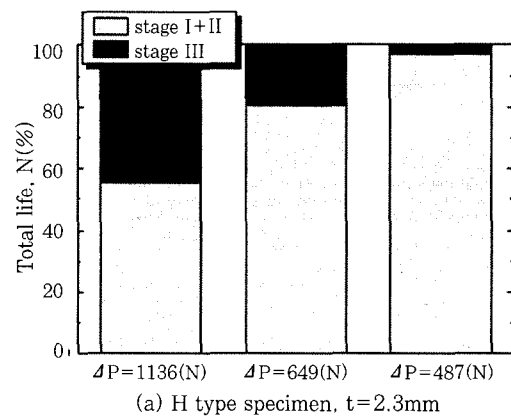
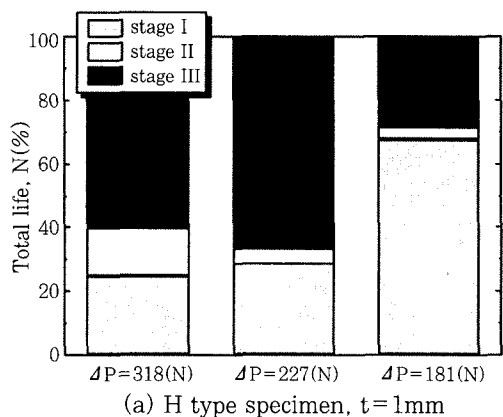
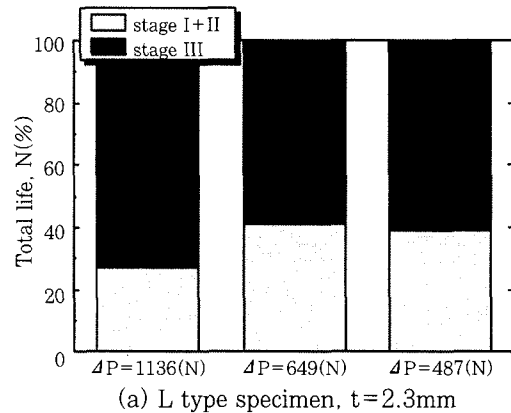
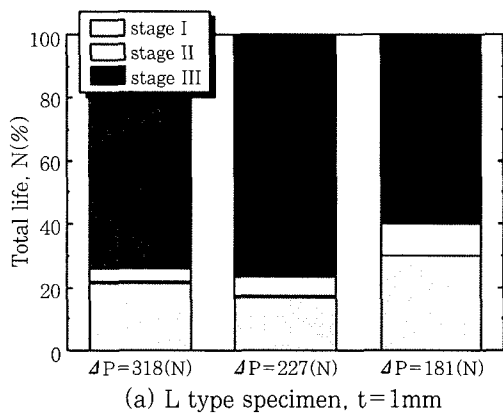


Fig. 7 Fatigue life fraction(%) data for L type and H type peel-tension specimens, $t=1\text{mm}$

Fig. 8 Fatigue life fraction(%) data for L type and H type peel-tension specimens, $t=2.3\text{mm}$

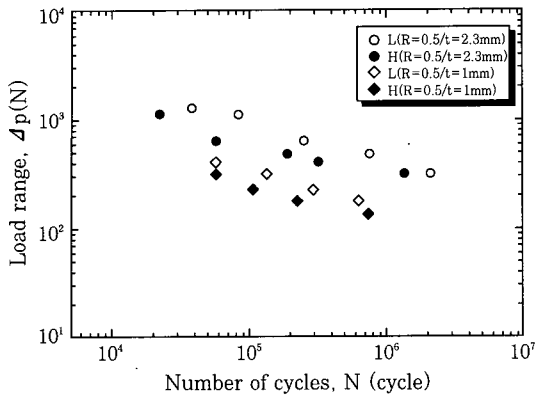


Fig. 9 Load range vs. total life for L and H type specimens

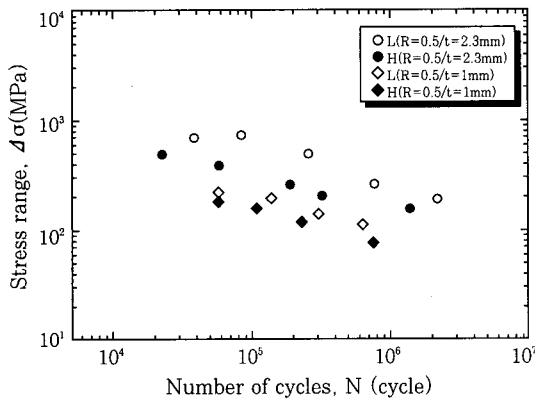


Fig. 10 Stress range vs. total life for L and H type specimens

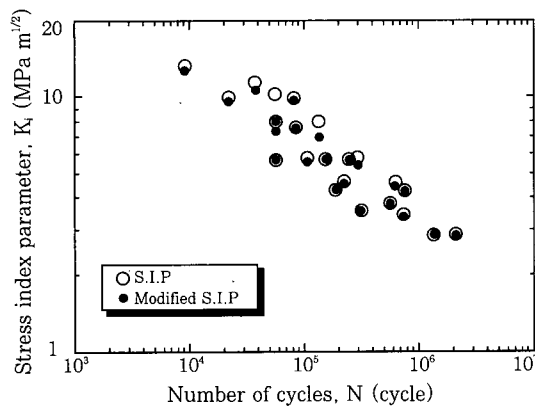


Fig. 11 Comparison of prediction methods using original and modified stress index parameter

L형과 H형 시험편의 박리-인장 정적강도와 10⁶ 사이클의 수명을 갖는 피로강도와의 관계를 나타낸다. 판두께(t)가 1 mm에서 2.3 mm로 증가한 경우 정적강도와 함께 피로강도도 증가하였다. 그러나 용접조건이 동일하고 판폭, 판두께등도 일정하나 점용접 후면

의 기하학적 형상에 따라 변화하는 후면접촉의 영향으로 정적강도뿐만 아니라 피로강도도 많은 영향을 받게 된다. 즉, 정적강도는 후면접촉의 영향을 제거한 H형의 경우가 후면접촉의 영향을 받는 L형 보다 약간 우수하나, 피로강도에서는 점용접 후면접촉의 영향으로 L형의 경우가 피로수명이 증가된다. 또한, 박리-인장에서의 정적강도 대 피로강도 비는 후면접촉의 영향을 받는 L형의 경우가 후면접촉의 영향을 받지 않는 H형 경우보다 정적강도 대 피로강도의 비가 높으며 정적강도 대 피로강도의 비가 약 5% 이상이었다.

본 연구에서 수행한 점용접 박리-인장실험 결과와 전보의 인장-전단 데이터를 비교하면 정적강도 뿐만 아니라 피로강도면에서도 인장-굽힘하중이 작용하는 박리-인장의 경우가 상대적으로 매우 취약하므로 박리-인장시험편에 대한 정확한 피로강도평가가 이루어져야 한다.

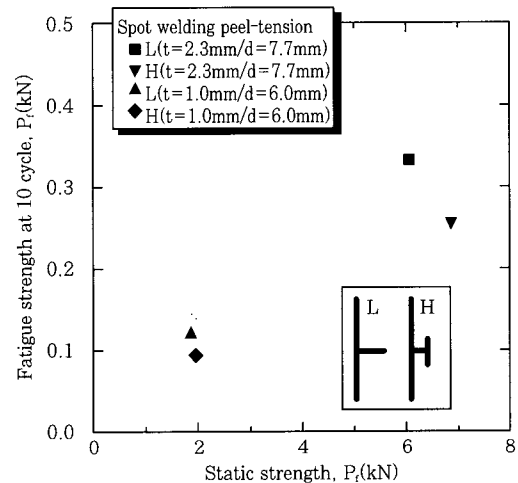


Fig. 12 Fatigue strength at 10⁶ cycles vs. static strength for various spot welded peel-tension specimens

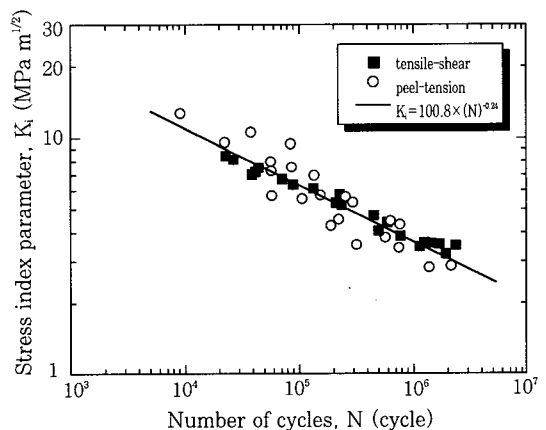


Fig. 13 Stress index parameter vs. number of cycles for spot welded tensile-shear and peel-tension specimens

Fig. 13은 복합하중이 작용하는 점용접부의 피로수명을 응력지수매개변수로 평가한 것으로 박리-인장의 경우는 본 연구에서 제안된 수정된 응력지수매개변수를 사용하였다. 기하학적인 형상과 응력비 및 후면접촉을 고려한 응력지수매개변수를 통하여 복합하중 상태에 있는 점용접부의 피로수명을 Fig. 13과 같이 통일적으로 평가 및 예측 가능하다. 그러므로 점용접 구조의 피로 설계시 위에서 제시한 응력지수매개변수는 적절한 설계 기준을 제시할 수 있다.

5. 결 론

- 1) 정적 실험에서 L형의 인장강도는 H형에 비해 낮은 것으로 나타났으며, 이것은 동일 하중에서 L형의 유효편심거리(e_{eff})가 H형에 비해 감소하는 점용접부 후면접촉의 영향이다.
- 2) L형의 경우 낮은 하중폭에서 균열이 점진적으로 전파하는 영역 II, III은 점용접부 후면접촉의 영향으로 균열선단의 응력집중이 완화되어 피로수명을 증가시킨다.
- 3) 박리-인장 점용접 시험편에서 유효편심거리를 고려하여 응력지수 파라미터를 수정한 피로수명 평가 결과 기존의 응력지수매개변수보다 정확한 수명예측이 가능하였다. 즉, 점용접 구조의 피로설계시 응력지수매개변수는 적절한 설계기준을 제시할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Davidson, J. A. : A Review of the Fatigue Properties of Spot-Welded Sheet Steels, SAE Paper 830033, (1983)
2. 강성수 : 이중 점용접재의 피로거동에 관한 실험적 연구, 경북대학교 박사학위 논문, (1989)
3. 송삼홍, 김부동 : 점용접재의 파괴거동과 응력분포, 대한기계학회논문집, 8-3, (1984), pp. 224~231.
4. Pollard, B. : Spot Welding Characteristics of HSLA Steel for Automotive Applications, Welding Journal, Vol. 53, Aug., (1974), pp. 343~350.
5. Kitagawa, H., Satoh, T. and Fujimoto, M. : Fatigue Strength of Single Spot-Welded Joints of Rephosphorized High-Strength and Low-Carbon Steel Sheets, SAE Paper 850371, (1985)
6. Mizui, M., Sekine, T., Tsujimura, A.,

- Takishima, T. and Shimazaki, Y. : An Evaluation of Fatigue Strength for Various Kinds of Spot-Welded Test Specimens, SAE Paper 880375, (1988)
7. Pook, L. P. : Fracture Mechanics Analysis of the Fatigue Behavior of Spot Welds, Int. Journal of Fracture, Vol. 11, (1975), pp. 173~176.
8. Wang, P. C., Corten, H. T. and Lawrence, F. V. : A Fatigue Life Prediction Method for Tensile-shear Spot Welds, SAE Paper 850370, (1985)
9. Kurath, P. : Multiaxial Fatigue Criteria for Spot Welds, SAE Paper 920668, (1992)
10. Swellam, M. H. : A Fatigue Design Parameter for Spot Welds, Ph.D Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, (1991)
11. Swellam, M. H., Banas, G. and Lawrence, F. V. : A Fatigue Design Parameter for Spot Welds, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol. 17, No. 10, (1994), pp. 1197~1204.
12. Lawrence, F. V., Wang, P. C., Ho, N. J. and Corten, H. T. : The Fatigue Resistance of Thin Gauge Automotive Weldments Summary of Phase IV Test Results GM & UIUC Technical Report, (1984)
13. 이용복, 김영훈, 정진성, 조주환 : SPCC 점용접부의 피로수명예측에 관한 연구, 대한기계학회 '97 춘계 학술대회 논문집(I), (1997), pp. 29~34.
14. 이용복, 정진성, 김영훈, 김호경 : 인장-전단 하중을 받는 점용접부의 피로 균열 전파거동에 관한 연구, 한국공작기계기술학회지, 6-4, (1997), pp. 27~33.
15. Davidson, J. A. : A Fracture Mechanics and System Stiffness Approach to Fatigue Performance of Spot-Welded Sheet Steels, SAE Paper 830034, (1983)
16. Mori, N., Amago, T., Ono, M., Sasanabe, M. and Hiraide, T. : Fatigue Life Prediction Method for Spot Welds in T-Shaped Members under Bending, SAE Paper 860604, (1986)