

다점용접이음의 피로수명 예측에 관한 연구

주 석 재*

(2001년 5월 18일 접수, 2002년 1월 14일 심사완료)

Study on the Prediction of Fatigue Life of Multi-Spot Welded Joints

Seok Jae Chu

Key Words: Fatigue(피로), Multi-Spot Welded Joint(다점용접이음), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

In real structures, multi-spot welded joints are more frequently used than a single-spot welded joint. Most researches, however, have been focused to a single-spot welded joint until now. In this paper, the fatigue behavior of multi-spot welded joints are investigated using the finite element solutions of the multi-spot welded specimens. The local strain approach is used rather than the stress intensity factor approach to estimate the fatigue life since the former is quite simple and straightforward. It is found that the fatigue behavior of multi-spot welded joints is different from that of single-spot welded joints. The local strain approach is still applicable to multi-spot welded joints.

1. 서 론

실제 구조에서는 보통 다점용접이 사용되지만 이제까지 연구는 단점용접에 집중되어 왔다. 국내에서 다점용접에 대한 연구^(1,2)는 최근에 시작되었다. 김남호 등⁽¹⁾은 단점용접에 대한 방법을 2, 3, 4 점 용접인 다점용접에 대하여 적용하여 보았고, 송삼홍 등⁽²⁾은 시편 너비방향 2 점 용접에 대하여 용접점 간 피치의 영향을 해석하였다. 피로수명예측방법으로는 두 연구 모두 점용접부를 균열로 취급하여, 점용접 시편에 대한 유한요소해를 파괴역학적으로 처리하였다. 김남호 등⁽¹⁾은 응력강도계수(stress intensity factor), 송삼홍 등⁽²⁾은 균열선단개구각(crack tip opening angle)을 이용하였다. 김남호 등⁽¹⁾은 점용접부를 통하여 전달되는 인장력, 전단력, 굽힘모멘트에 대하여 모드 I, II 응력강도계수를 구하고, 이것을 조합하여 구

한 등가응력강도계수에 대하여 피로수명 데이터가 정리된다고 제시하였으나, 그 상관관계는 완전하지는 못한 편이었다. 송삼홍 등⁽²⁾은 균열선단개구각에 의하여 피로수명 데이터가 정리된다고 제시하였으나, 어느 한 가지 시편 두께에 한하며, 여러 가지 두께 범위에 대한 적용성은 입증되지 않았다.

점용접 피로수명을 예측하는 방법으로는 파괴역학적인 방법 이외에도 피로균열이 발생하는 점용접 너깃 가장자리의 스트레인을 이용하는 방법^(3,4)도 있다. 이 방법은 단점용접에 대하여 너깃 가장자리의 스트레인과 피로수명 데이터의 상관관계도 만족스러운 편이었고, 여러 가지 두께 범위에 대한 적용성도 입증되었다.⁽⁴⁾

본 논문에서는 단점용접과 2, 4 점 다점용접에 대하여 체계적으로 여러 가지 시편을 만들어 정적 시험과 피로시험을 수행하고 시험 결과와 유한요소 해석 결과를 이용하여 다점용접에 대한 피로수명을 예측하는 방법을 제시하고자 한다. 그리고, 김남호 등⁽¹⁾의 피로시험 데이터를 본 방법으로 처리하여 비교하고자 한다.

* 회원, 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail : sjchu@uou2.ulsan.ac.kr

TEL : (052)259-2141 FAX : (052)259-1680

2. 인장시험과 피로시험

2.1 다점용접시편

점용접시편은 Fig. 1과 같이 A~D 4 개의 그룹으로 나누어 제작하였다. 그룹 A는 1 점, 그룹 B와 C는 2 점, 그룹 D는 4 점 용접으로 모두 2 겹 점용접이다. p_L, p_T 는 각각 종방향과 횡방향 너깃 중심간 거리, 즉 피치를 가리킨다. 그룹 A는 시편 너비 w 의 영향, 그룹 B는 종방향 피치의 영향, 그룹 C는 횡방향 피치, 그룹 D는 종방향과 횡방향 피치의 종합 영향을 살펴보기 위한 시편 그룹이다.

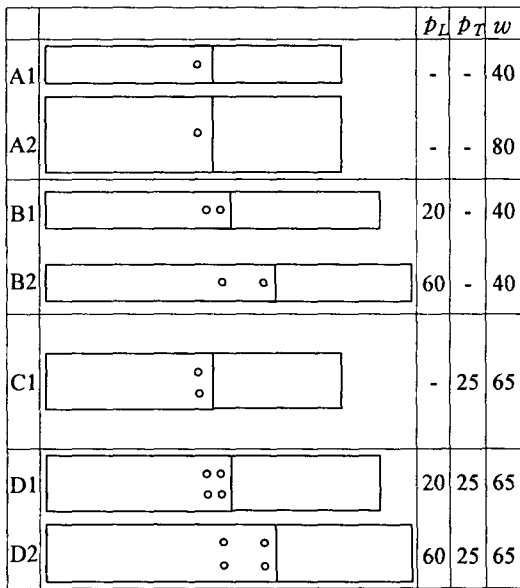


Fig. 1 Configuration of multi-spot welded specimens

Table 1 Chemical composition and welding conditions

C	Si	Mn	S	P	Al
0.007%	0.03%	0.025%	0.02%	0.02%	0.06%
Welding current(kA)					10.0
Applied force(kgf)					210
Resistance welding time(cycles)					10

시편의 재료는 승용차 차체에 일반적으로 사용되는 SPCC 강판이다. 이것의 화학적 성분과, 사용한 강판(두께 모두 1.0 mm)에 대한 용접조건은 Table 1과 같다. 점용접 너깃의 지름은 6.0 mm이었다

2.2 인장시험

인장시험은 모든 그룹 시편에 대하여 충분히 느린 속도(10 mm/min)로 진행하였다. Fig. 2를 보면 최대하중의 분포는 용접점의 갯수에 따라 3 그룹으로 나뉘었다. 용접점이 2 개인 그룹 B와 그룹 C의 평균최대하중은 용접점이 1 개인 그룹 A의 1.7 배, 용접점이 4 개인 그룹 D의 평균최대하중은 용접점이 1 개인 그룹 A의 3.0 배로 용접점의 갯수에 정확히 비례하지는 않았다.

종방향으로 용접점이 1 개인 시편(A와 C)에 비하여, 종방향으로 용접점이 2 개인 시편(B와 D)은 상대적으로 용접점 1 개 당 너비가 좁아서 점용접 부위 이외의 부위(Grip에서 점용접 부위 사이)의 소성변형이 수반되어 많이 늘어났다. 그리고, B1은 종방향 용접점이 서로 가까워서 간섭효과(상호작용) 때문에 C1보다 강도가 낮았고, B2는 종방향 용접점이 충분히 멀어 간섭효과가 줄었기 때문에 C1과 강도가 비슷하여진 것으로 추측한다.

2.3 피로시험

피로시험은 20 Hz의 완전 편진(R=0) sine파로

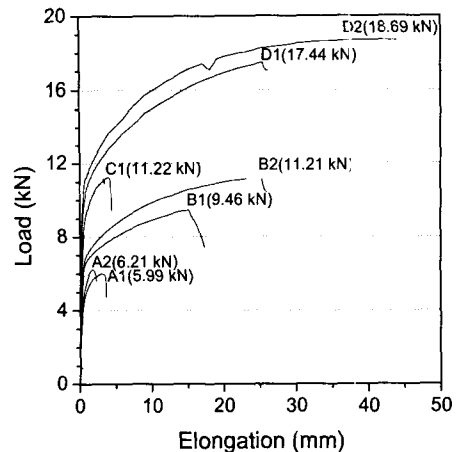


Fig. 2 Results of static tensile tests

수행하였다. Fig. 3은 최대피로하중을 피로수명(반복횟수)에 대하여 그린 것이다. 피로시험의 범위는 피로수명 104~106 범위에 한정하였다. 시편이 피로파단되지 않더라도 106에서 중단하였다.

Fig. 3을 보면 Fig. 2 인장시험 최대하중의 분포와 비슷하게 피로시험 S-N 곡선도 용접점의 갯수에 따라 3 개의 그룹으로 나뉘었다. 이에 대하여 3 장에서 여러 가지로 분석하여 보았다.

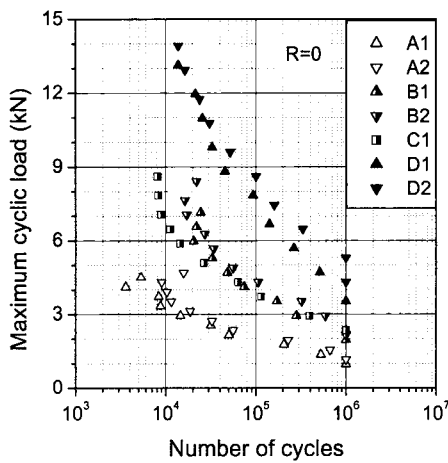


Fig. 3 Plot of fatigue life vs. maximum cyclic load

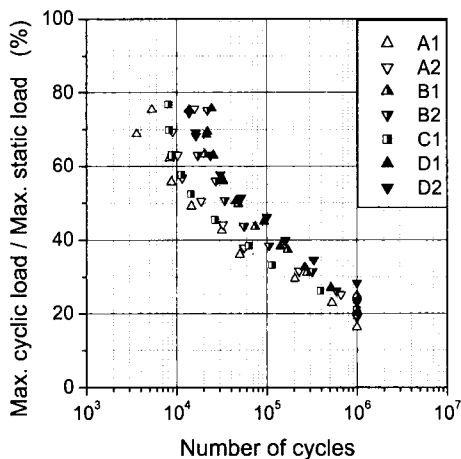


Fig. 4 Plot of fatigue life vs. relative maximum cyclic load

3. 해석

3.1 인장강도와 피로강도의 관련성

Fig. 3 그래프의 종축 최대피로하중을 각각의 시편그룹의 최대정적하중(Fig. 2)으로 나누어 보았다. 피로수명이 10⁶일 때 최대피로하중은 최대 정적인장하중의 20% 내외였다.

Fig. 4와 Fig. 3을 비교하여 보면, 최대인장강도에 대한 비를 고려하였을 때 피로시험 결과의 흠여짐이 상당히 많이 감소하였으나, 여전히 종방향 용접점 개수에 따라 그룹 A와 그룹 C, 그룹 B와 그룹 D로 나뉘어진다.

3.2 유한요소해석

모든 그룹 다점용접시편에 대하여 셀 요소와 강체요소를 사용하여 유한요소모델을 만들었다. 유한요소 프로그램은 EMRC NISA II(Version 9.0) 선형탄성해석 모델을 사용하였다. 셀 요소가 놓인 평면은 강판의 중립면과 일치시켰고 점용접 너트는 상하 강판(각각 sheet 1과 2) 대응 절점을 강체요소로 연결하여 표현하였다. Fig. 5는 그룹 A1에 대하여 해석 결과인 σ_1 (최대주응력으로 본 논문의 경우 그 방향은 시편 종방향과 일치하거나 거의 같음.)의 분포를 그린 것이다. 본 논문에서 그린 σ_1 의 분포는 보이는 표면에서의 분포이다.

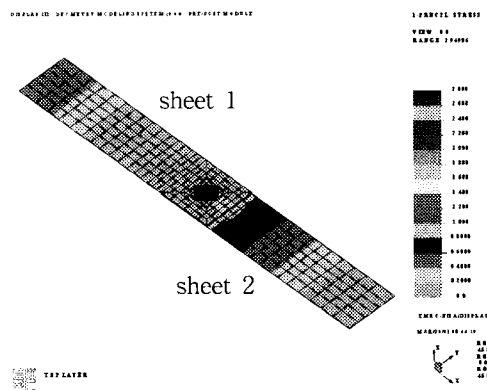


Fig. 5 Contour of maximum principal stresses at load = 98 N (A1 sheet 1 & 2)

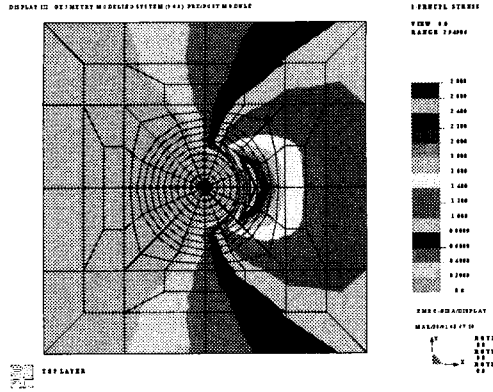


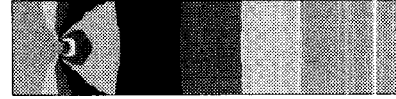
Fig. 6 Contour of maximum principal stresses around a weld nugget at load = 98 N (A1 sheet 2)

Fig. 6은 sheet 2 너깃 부근을 확대하여 그린 것이다. 너깃은 반경방향 길이 0.5 mm, 원주방향 30°인 요소 96 개를 배치하여 표현하였다. σ_1 은 너깃 가장자리(너깃 중심에서 3.0 mm)에서 최대이지만 유한요소 특성 상 너깃 가장자리에 인접한 절점(너깃 중심에서 3.5 mm)에서 σ_1 이 최대가 되었다.

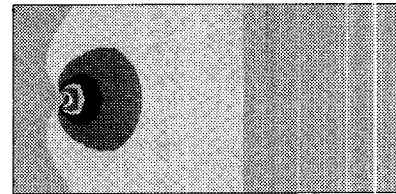
Fig. 7은 모든 시편 그룹의 sheet 2에 대한 σ_1 의 분포를 그린 것이다. 물론 너깃 부근 유한요소망은 모든 그룹에 대하여 같은 것을 사용하였다. σ_1 의 대소를 비교하기 쉽도록 color band(0 ~ 27.4 kN/mm² 14 단계)는 모두 같은 것을 사용하였고 모두 인장하중 98 N이 작용할 때에 대한 것이다.

시편의 너비가 증가하거나(A1과 A2), 종방향 피치가 증가할 때(B1과 B2, D1과 D2) 너깃 가장자리 σ_1 이 감소하는 것이 뚜렷하다.

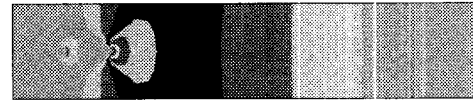
Fig. 8은 σ_1 이 최대인 방향(x 방향)에서 너깃 가장자리에 접근하며 최대 스트레인을 그린 것이다. 균열선단부근 스트레인의 특이성 $r^{-1/2}$ 을 고려하여 너깃 가장자리에서의 거리 r (mm)의 제곱근에 대하여 그려 보니 거의 직선상에 분포하였다. Fig. 9는 스트레인을 어느 기준 시편(A1)에 대한 스트레인으로 나눠 그 비를 그려본 것이다. 이 비는 거의 일정하게 유지되었다. Table 2는



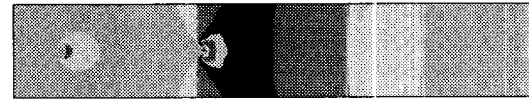
(A1 & A2)



(B1 & B2)



(C1)



(D1 & D2)

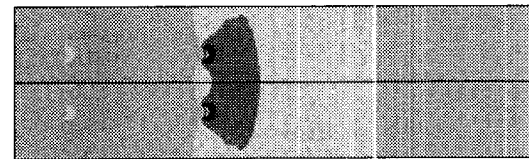
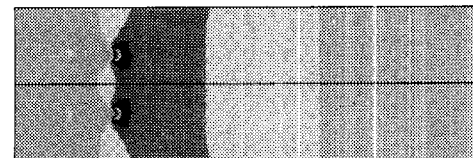
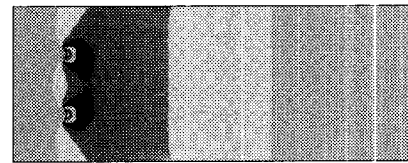


Fig. 7 Distribution of maximum principal stresses at load = 98 N

최대주스트레인, 주스트레인의 비에 대한 결과이다. 이 결과를 이용하여 Fig. 3 최대피로하중-피로수명 그래프를, Fig. 10 최대피로스트레인-피로수명 그래프로 바꾸어 보았다.

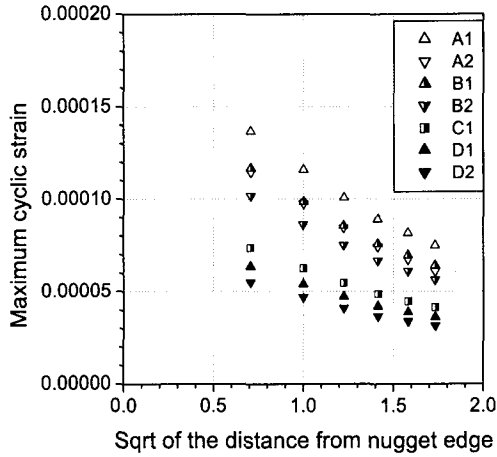


Fig. 8 Variation of maximum principal strains near the weld nugget at load = 98 N

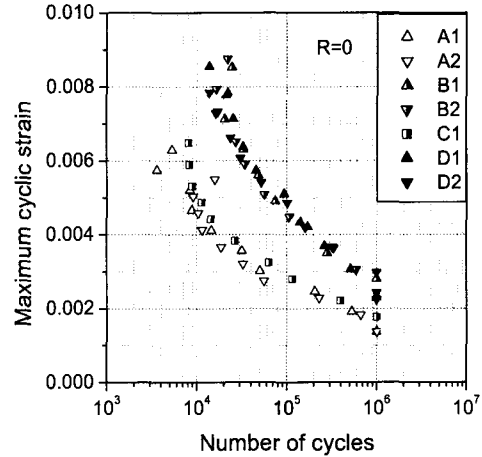


Fig. 10 Plot of fatigue life vs. maximum cyclic strain

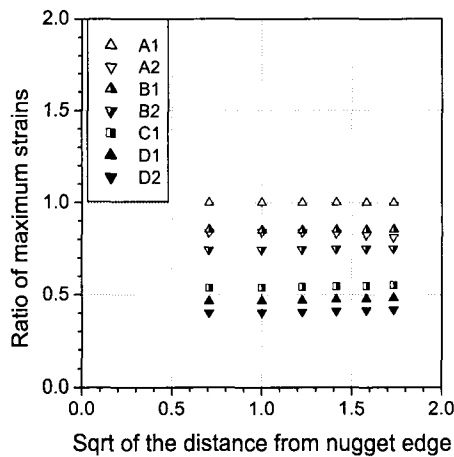


Fig. 9 Ratio of maximum principal strains with respect to those of reference specimen A1 near the weld nugget

Table 2 Principal strains near the weld nugget at load = 98 N

	t(mm)	ϵ_1	$\epsilon_1 / \epsilon_{1(A1)}$
A1	1.0	0.000137	1.000
A2	1.0	0.000115	0.837
B1	1.0	0.000117	0.854
B2	1.0	0.000102	0.744
C1	1.0	0.000074	0.539
D1	1.0	0.000064	0.466
D2	1.0	0.000055	0.404

Fig. 10을 보면 그룹(A1, A2, C1)과 그룹(B1, B2, D1, D2)로 나뉘어진다. 이것은 점용접 가장 자리에 발생한 피로균열의 형태가 다르기 때문이다. 본 연구에서 피로시험한 시편의 파면을 관찰하여 보니, 그룹(A1, A2, C1)에서는 피로균열이 일반적으로 상·하 강판 모두 발생하지만, 그룹(B1, B2, D1, D2)에서는 상·하 강판 어느 한 쪽에만 피로균열이 주로 발생하였다. Fig. 11을 보면 시편 A1은 피로균열이 상·하 강판 모두 발생하였고, 최대피로하중(그림에 삼입)이 낮을수록 피로균열이 더 넓게 성장한 후 파단되었다. 그리고, 시편 B1은 상·하 강판 어느 한 쪽(t1과 b2)에만 피로균열이 주로 발생하였고, t2와 b1 부위는 피로균열이 약간만 발생하여 단면이 얇아져 연성파단되었다. 그리고, 최대피로하중이 아주 낮아지면(Fig. 11에서 B1 3.8 kN) t1과 b2 부위가 피로파단되었을 때도 t2와 b1 부위는 파단되지 않았다.

Table 2의 스트레인은 균열이 발생하지 않은 상태에 대한 것이므로 피로균열 발생 후의 상태까지, 이것으로 피로거동이 설명되지는 않는다. Fig. 10에 나타난 것처럼 피로균열 발생 형태가 같은 것끼리 나뉘어서 다루는 것이 합리적이다.

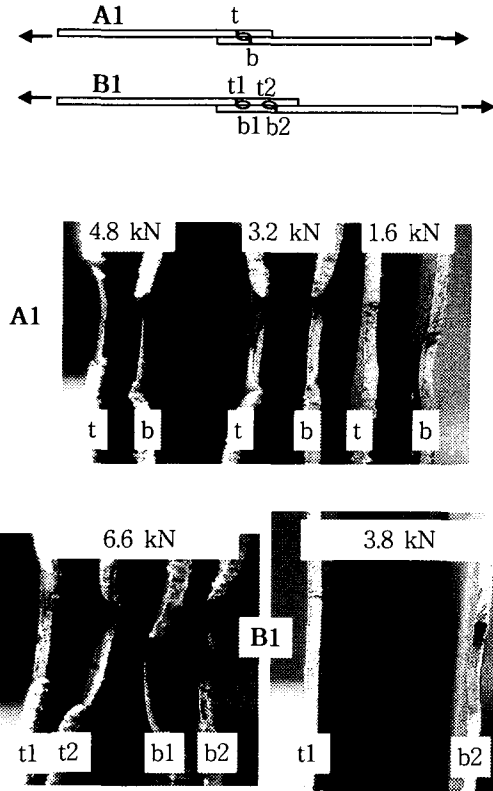


Fig. 11 Difference in location of fatigue crack creation and growth (specimen A1 & B1)

Table 3 Principal strains near the weld nugget at load = 980 N

spots	t(mm)	ϵ_1	$\epsilon_1/\epsilon_{1ref}$
2	1.0	0.00831	1.000
	1.4	0.00400	0.481
3	1.0	0.00845	1.017
	1.4	0.00405	0.487
4	1.0	0.00543	0.653
	1.4	0.00260	0.313

* $\epsilon_{1ref}=0.00831$ (for two-spot welded specimen with thickness 1.0 mm)

3.3 안전벨트 앵커 다점용접 해석

김남호 등⁽¹⁾의 방법과 비교하기 위하여 같은 문제를 본 논문의 방법으로 처리하여 보았다.

Fig. 12 시편은 강판 a와 b를 점용접한 것으로 경계조건은 상단 a1과 b1은 고정, 중상부 a2와 b2는 수평변위 고정, 하단은 b3에만 수직하중을 작용하였다. 강판의 두께는 두 장 모두 1.0 mm인

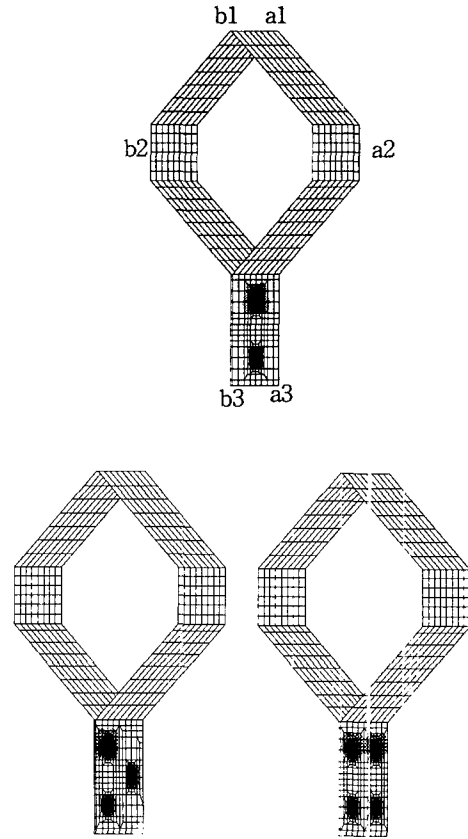


Fig. 12 Finite element mesh for seat belt anchor multi-spot welded specimens

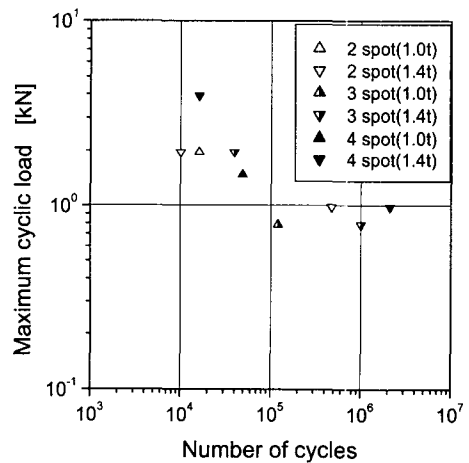


Fig. 13 Plot of fatigue life vs. maximum cyclic load

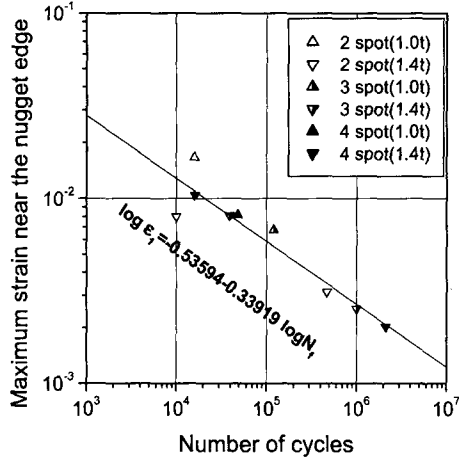


Fig. 14 Plot of fatigue life vs. maximum cyclic strain

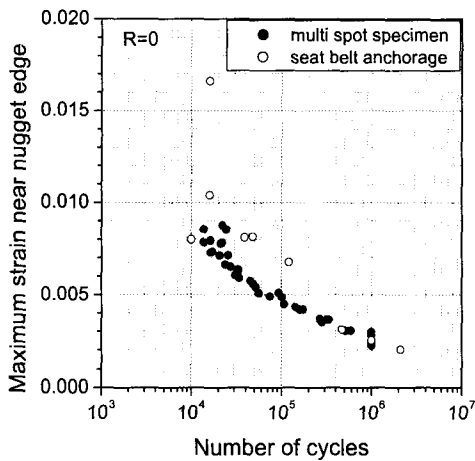
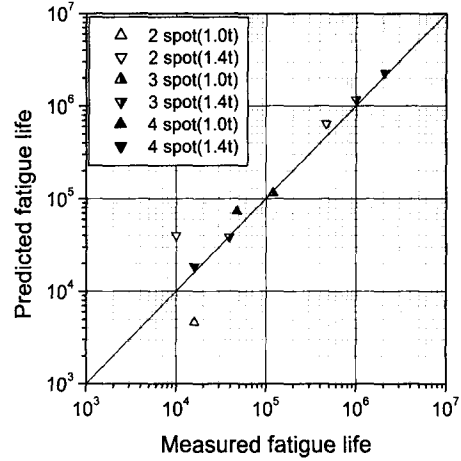


Fig. 15 Comparison of maximum principal strain - fatigue life data

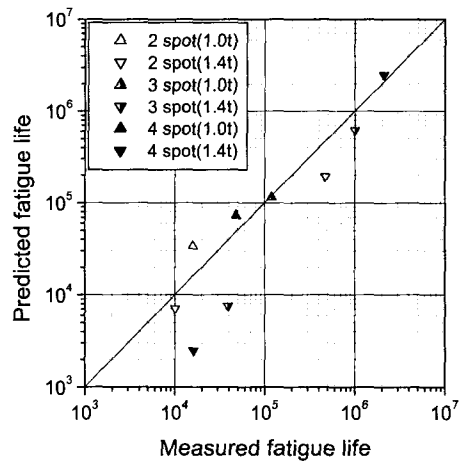
경우와 1.4 mm인 2 가지 경우를 다루었다.

Table 3은 스트레인과 스트레인의 비에 대한 결과이다. 이 결과를 이용하여 Fig. 13 최대피로하중-피로수명 그래프(1)를, Fig. 14 최대피로스트레인(ϵ_1) - 피로수명(N_f) 그래프로 바꾸어 보았다. 피로시험 결과가 비교적 잘 정렬되었다. 이것은 다음과 같이 선형적으로 근사화되었다.

$$\log \epsilon_1 = -0.53594 - 0.33919 \log N_f \quad (1)$$



(a) present result



(b) results of reference(1)

Fig. 16 Comparison of the fatigue life prediction results

$$\log N_f = -1.5801 - 2.9482 \log \epsilon_1 \quad (2)$$

2~4 spots 시편 모두 상, (중), 하 용접점 중 최대스트레인은 상부 점용접 너깃 가장자리에서 발생하므로 그룹(B1, B2, D1, D2)와 비슷하다. Fig. 15는 Fig. 10 그룹(B1, B2, D1, D2)에 대한 결과와 Fig. 14 안전벨트 앵커에 대한 결과를 모아 비교해 본 것이다.

용접조건이나 재료의 차이(본 논문은 SPCC, 김남호 등⁽¹⁾은 SPRC)에도 불구하고 장수명영역에서는 거의 일치하였고, 단수명영역에 가까울수록 약간 흩어졌다.

Fig. 16(a)은 (2)식을 이용하여 예측한 수명과 실제 수명을 비교한 것이다. 단수명영역 일부 결과가 어긋났지만 단수명영역이나 장수명영역이나 모두 고루 서로 잘 일치하였다. Fig. 16(b)는 김남호 등⁽¹⁾의 예측결과로서 본 논문의 예측결과보다는 다소 일치성이 떨어진다.

4. 결 론

다점용접이음의 편진 피로시험에 대한 해석 결과

(1) 피로시험 결과를 대표면 너트가장자리 스트레인에 관하여 정리하면 그룹(A1, A2, C1)과 그룹(B1, B2, D1, D2)로 나뉘어져 잘 정리된다. 본 연구에서 피로시험한 시편에 대하여 파면을 관찰하여 보니, 그룹(A1, A2, C1)은 용접점 상·하 강판 모두에서 피로균열이 발생하였고, 그룹(B1, B2, D1, D2)은 상·하 어느 한 쪽 강판에만 주로 발생하였다. 다점용접의 피로수명은 피로균열 발생 형태가 같은 그룹끼리 나눠 평가하여야 한다.

(2) 안전벨트 앵커 점용접 이음에 대하여 너트가장자리 스트레인을 사용하는 본 논문의 방법은 기존의 파괴역학적인 방법보다 피로수명을 더 정

확히 예측하였고 사용하기 간편하였다. 그리고, 최대피로스트레인-피로수명곡선은 본 논문의 다점용접 시편에 대한 것파, 특히 장수명 영역에서, 거의 일치하였다.

후 기

이 논문은 울산대학교 2000학년도 연구비와 울산대 지역협력연구센터(기계부품 및 소재특성평가센터) 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) 김남호, 이형일, 2000, "K_c에 의한 차량 안전벨트 앵커의 점용접 피로수명예측," 대한기계학회 논문집 A권 제24권 제3호, pp. 701~709.
- (2) 송삼홍, 양윤진, 전재욱, 2000, "냉간압연강판 점용접제의 너트간의 거리에 따른 피로거동," 대한기계학회 논문집 A권 제24권 제11호, pp. 2845~2852.
- (3) (社)自動車技術會, 1986, 自動車スポット溶接構造の疲労強度と壽命推定.
- (4) 주영우, 주석재, 최병길, 염영진, 유희, 1999, "점용접 시편의 피로 수명 해석," 자동차공학회논문집 제7권 제6호, pp. 279~286.