

다점용접이음의 피로 시험과 해석

주석재* · 이광후**

Fatigue Test and Analysis of Multi-point Spot Welded Joints

Seok Jae Chu, Kwang Hoo Lee

Key Words: fatigue(피로), multi-point spot welded joint(다점용접이음), finite element method(유한요소법)

Abstract

In real structure, multi-point spot welded joints are more frequently used than a single-point spot welded joint. Most researches, however, have been focused to a single-point spot welded joint until now. In this paper, the fatigue behavior of multi-point spot welded joints are investigated both experimentally and analytically using the finite elements. 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-point spot welded joints is different from that of single-point spot welded joints. The local strain approach is still applicable to multi-point spot welded joints.

1. 서론

실제 구조에서는 보통 다점용접이 사용되지만 이제까지 연구는 단점용접에 집중되어 왔다. 다점용접에 대한 연구^(1, 2)는 최근에 시작되었다. 김남호 등⁽¹⁾은 단점용접에 대한 방법을 2, 3, 4 점용접인 다점용접에 대하여 적용하여 보았고, 송삼홍 등⁽²⁾은 시편 너비방향 2 점 용접에 대하여 용접점 간 피치의 영향을 해석하였다. 피로수명 예측방법으로는 2 연구 모두 파괴역학적인 방법을 사용하여 김남호 등⁽¹⁾은 응력강도계수, 송삼홍 등⁽²⁾은 균열개구변위를 이용하였다.

그러나, 파괴역학적인 방법 이외에도 피로균열이 발생하는 점용접 너깃 가장자리의 스트레인을 이용하는 피로수명 예측방법^(3, 4)도 있다. 전자는

유한요소 결과를 한 번 더 처리하여야 하는 간접적인 방법이고, 후자는 유한요소 결과를 바로 이용하는 직접적인 방법이다. 따라서 후자가 사용되기 훨씬 간단하다.

본 논문에서는 1, 2, 4 점 다점용접에 대하여 여러 가지 시편을 체계적으로 만들어 정적 시험과 피로시험을 수행하고 시험 자체 결과, 유한요소 해석 결과, 스트레인 측정 결과를 이용하여 다점용접에 대한 피로수명을 예측하는 방법을 개발하고자 한다.

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 점 점용접이다. p_L, p_T 는 각각 종방향과 횡방향 피치를 가리킨다. 그룹 A는 시편 너비 w 의 영향, 그룹 B는 종방향 피치의 영향, 그룹 C는 횡방향 피치, 그룹 D는 종방향과 횡방향 피치의 종합 영

* 울산대학교 기계자동차공학부

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

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

** 울산대학교 기계자동차공학부 대학원생

향을 살펴보기 위한 시편 그룹이다. 시편의 재료는 승용차 차체에 일반적으로 사용되는 SPCC 강판이고, 시편의 두께는 모두 1.0 mm이고 용접너깃의 지름은 6.0 mm이다. 용접조건은 현재 생산 현장에서 사용하는 최적조건을 택하였다.

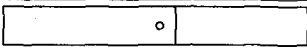

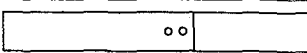
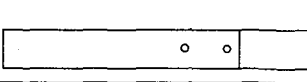
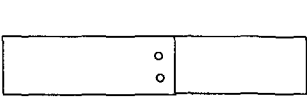
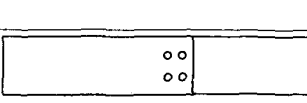
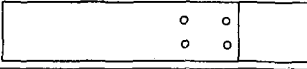
		d_L	d_T	w
A1		0	0	40
A2		0	0	80
B1		20	0	40
B2		60	0	40
C1		0	25	65
D1		20	25	65
D2		60	25	65

Fig. 1 Configuration of multi-spot specimens

2.2 인장시험

인장시험은 모든 그룹 시편에 대하여 충분히 느린 속도로 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 비례하지는 않았다. 용접점 1 개 당 최대하중은 용접점이 2 개인 그룹 B와 그룹 C의 평균최대하중은 용접점이 1 개인 그룹 A의 85%, 용접점이 4 개인 그룹 D의 평균최대하중은 용접점이 1 개인 그룹 A의 75%에 불과하였다.

중방향으로 용접점이 1 개인 그룹 A와 C는 최대하중에 도달하였을 때 2~4 mm 늘어났지만, 용접점이 2 개인 그룹 B와 그룹 D는 15~40 mm 늘어났다. 중방향 피치가 증가할수록 파단될 때까지 소성변형이 많이 진행되었다.

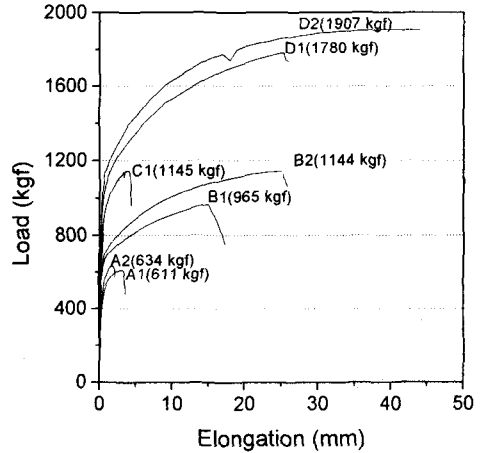


Fig. 2 Results of static tensile tests

2.3 피로시험

피로시험은 20 Hz sine 파로 편진하중을 주어 인장상태를 유지하였다. Fig. 3은 최대피로하중(= 기준하중+하중진폭)을 피로수명(반복횟수)에 대하여 그린 것이다. 피로시험의 범위는 피로수명 $10^4 \sim 10^6$ 범위에 한정하였다. 시편이 피로파단되지 않더라도 10^6 에서 중단하였다. 피로균열은 시편 모두 점용접 너깃 가장자리에서 발생하였다.

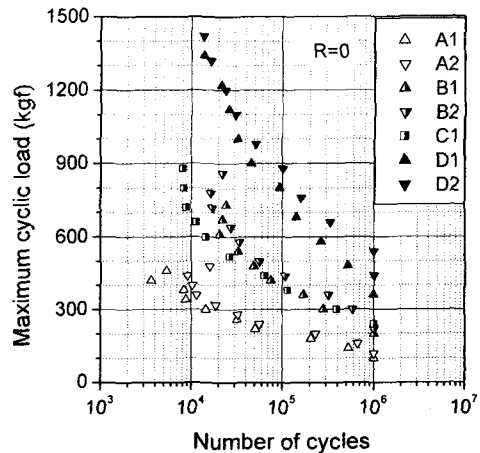


Fig. 3 Results of fatigue test

Fig. 3을 보면 Fig. 2 인장시험 최대하중의 분포

와 비슷하게 피로시험 S-N 곡선도 용접점의 갯수에 따라 3 개의 그룹으로 나뉘었다. 이에 대하여 3 장에서 여러 가지로 분석하여 보았다.

3. 해석

3.1 인장강도와 피로강도의 관련성

Fig. 3 그래프의 종축 최대피로하중을 각각의 시편그룹의 최대정적하중(Fig. 2)으로 나누어 보았다. 피로수명이 10^6 일 때 최대하중의 비는 20% 내외였다. 편진하중인 경우 하중진폭은 최대피로하중의 절반이므로 하중진폭은 최대정적하중의 10% 내외다. 참고로 편진하중인 경우 저탄소강 모재에 대하여, 피로수명 10^6 일 때 하중진폭은 인장강도의 30 % 내외다.⁽⁵⁾ 이런 피로강도의 저하는 잔류응력과 같은 점용접의 영향 때문인 것으로 추측한다.

Fig. 4와 Fig. 3을 비교하여 보면 인장강도에 대한 비를 고려하니 피로시험 결과의 흠어짐이 상당히 많이 감소하였으나 여전히 종방향 용접점 개수에 따라 그룹 A와 그룹 C, 그룹 B와 그룹 D로 나뉘어진다.

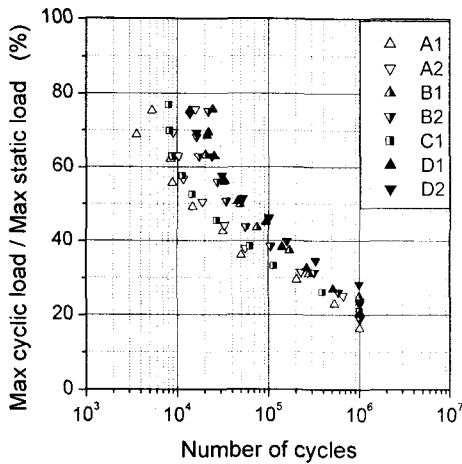


Fig. 4 Plot of fatigue life vs. relative max cyclic load

3.2 유한요소해석

모든 그룹 다점용접시편에 대하여 셀 요소와 강체요소를 사용하여 유한요소모델을 만들었다.

셀 요소가 놓인 평면은 강판의 중립면과 일치시켰고 점용접 너깃은 상하 강판(각각 sheet 1과 2) 대응 절점을 강체요소로 연결하여 표현하였다.⁽⁴⁾

Fig. 5는 그룹 A1에 대하여 해석 결과인 σ_1 의 분포를 그린 것이다. 본 논문에서 그린 σ_1 의 분포는 보이는 표면(top surface)에서의 분포이다.

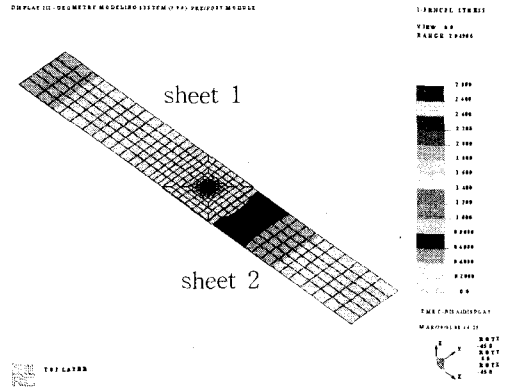


Fig. 5 Contour of max principal stresses at load = 98 N (A1 sheet 1 & 2)

Fig. 6은 sheet 1을 지우고 sheet 2만 그린 것이다. 점용접에서는 이와 같이 내표면 너깃 가장자리에서 응력이 최대이고 바로 이 부위가 피로균열이 발생하는 부위이다.

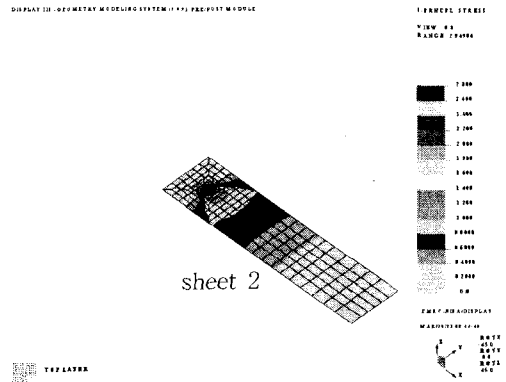


Fig. 6 Contour of max principal stresses at load = 98 N (A1 sheet2 only)

Fig. 7은 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.

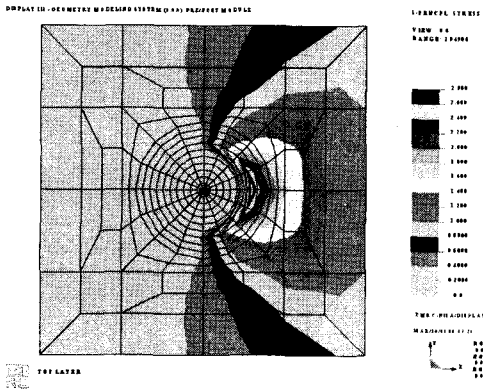


Fig. 7 Contour of max principal stresses around a weld nugget at load = 98 N (A1 sheet 2)

Fig. 8은 모든 시편 그룹에 대하여 sheet 2 σ_1 의 분포를 그린 것이다. 물론 너깃 부근 유한요소망은 모든 그룹에 대하여 같은 것을 사용하였다. σ_1 의 대소를 비교하기 쉽도록 color band(0~2.8 kgf/mm² 14 단계)는 모두 같은 것을 사용하였고 모두 인장하중 10 kgf가 작용할 때에 대한 것이다.

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

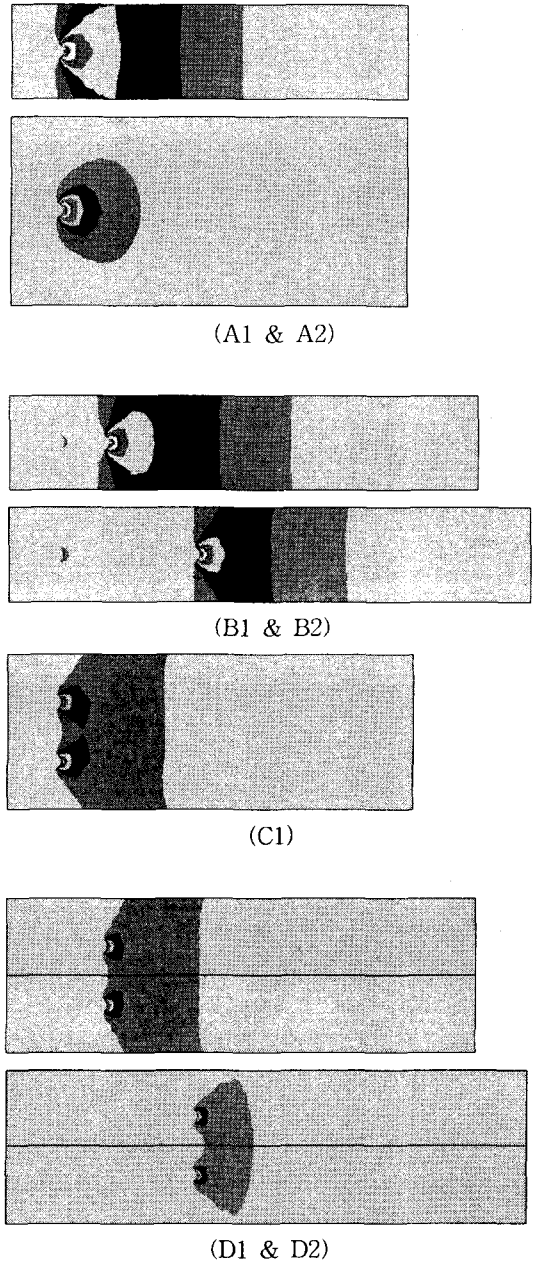


Fig. 8 Distribution of maximum principal stresses at load = 98 N

Table 1 Principal strains near the weld
nugget at load = 98 N

	σ_1	σ_2	ϵ_1	$\epsilon_1 / \epsilon_{1(A1)}$
A1	2.940	0.822	0.000137	1.000
A2	2.465	0.700	0.000115	0.837
B1	2.520	0.734	0.000117	0.854
B2	2.194	0.632	0.000102	0.744
C1	1.586	0.447	0.000074	0.539
D1	1.374	0.397	0.000064	0.466
D2	1.189	0.341	0.000055	0.404

Table 1은 너깃 가장자리 σ_1 이 최대인 절점에서
응력과 스트레인 유한요소 결과이다. 이 결과를
이용하여 Fig. 3 최대피로하중-피로수명
그래프를, Fig. 9 최대피로스트레인-피로수명
피로시험 그래프로 바꾸어 보았다.

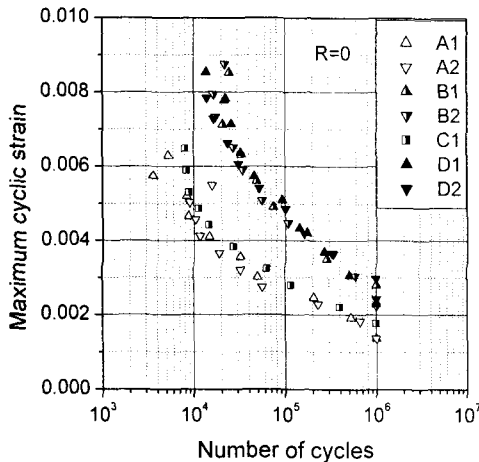


Fig. 9 Plot of fatigue life vs. max cyclic
strain

Fig. 9를 보면 종방향으로 용접점이 1 개인 그
룹(A1, A2, C1)과 2 개인 그룹(B1, B2, D1, D2)으
로 나뉘어진다. 이것은 점용접 가장자리 피로균
열이 발생한 형태가 다르기 때문이다. 즉, Fig. 10
과 같이 종방향으로 용접점이 1 개인 그룹(A1,
A2, C1)에서는 피로균열이 용접점 상하 강판 모
두에 발생하지만, 2 개인 그룹(B1, B2, D1, D2)에
서는 용접점 상이나 하 강판 어느 한 쪽에만 피
로균열이 발생한다. 따라서 그룹(B1, B2, D1, D2)
은 용접점 너깃이 회전이 덜 되어 가장자리가 덜
굽혀져 피로수명이 높은 것이다. Table 1의 스트

레인 균열이 발생하지 않은 상태에 대한 것이므
로 피로균열 발생 후의 상태까지 이것으로 설명
되지는 않는다. Fig. 9와 같이 피로균열 발생 형
태가 같은 것끼리 모아서 다루는 것이 편리할 것
이다.

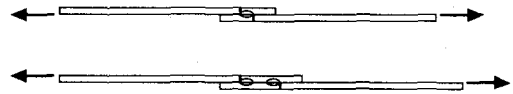


Fig. 10 Difference in locations of fatigue crack
creation and growth

3.3 스트레인 측정과 결과 분석

Fig. 11과 같이 종방향으로 용접점이 2 개인 시
편 B2를 선택하여 양쪽 표면에 스트레인 게이지
를 각각 붙여 스트레인의 변화를 비교하여 피로
균열의 발생과 성장을 간접적으로 지켜보았다.
주파수 20 Hz 피로하중 5,000 주기마다 주파수를
0.05 Hz로 낮추고 최대하중일 때 양쪽 표면 스트
레인을 측정하였다.

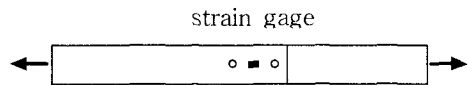


Fig. 11 Monitoring surface strains(B2)

Fig. 12를 보면 시험 초기 스트레인은 스트레인
게이지 A에서 221×10^{-6} , B에서 246×10^{-6} 이었다.
유한요소 결과 247×10^{-6} 과 비교하여 부착 위치의
오차를 감안하면 잘 일치한다. 스트레인은 한 쪽
표면에서는 증가→감소, 반대쪽 표면에서는 감소
→증가하여 경향이 서로 반대이고 양쪽 스트레인
의 합은 일정하게 유지되었다. 증가→감소(반대쪽
은 감소→증가)로 바뀐 시점은 전체 수명의 66 %
이었고 전체수명의 94 % 이후에는 모두 증가하
다 파단되었다. 균열이 어느 한 용접점에서 먼저
발생하여 어느 정도 성장하였을 때 나머지 용접
점에서도 발생하여 성장하기 시작하고 결국 균형
을 이루는 것이다.

참고문헌

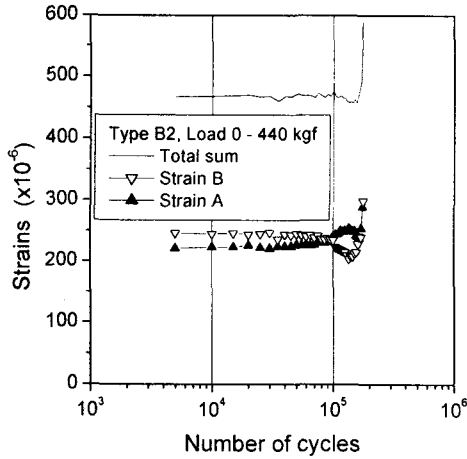


Fig. 12 Variation of surface strains

4. 결론

다점용접이음의 편진 피로시험 결과

(1) 피로수명 10^6 에 대한 편진하중진폭은 다점용접이음의 경우 최대정적하중의 10% 내외로 저탄소강의 경우 30% 내외인 것에 비하여 낮았다.

(2) 피로시험 결과를 대표면 너깃가장자리 스트레인에 관하여 정리하면 종방향으로 용접점이 1개인 그룹과 2개인 그룹으로 나뉘어져 잘 정리된다. 용접점 상하 강판 모두에서 피로균열이 발생하는 경우(전자)와 상하 어느 한 쪽 강판에만 발생하는 경우는 나뉘서 다루는 것이 자연스럽다.

(3) 종방향으로 용접점이 2개인 그룹에 대하여 스트레인 모니터 결과 균열이 어느 한 용접점에서 먼저 발생하여 어느 정도 성장하였을 때 나머지 용접점에서도 발생하여 성장하기 시작하고 결국 균형을 이루는 것이 확인되었다.

후기

이 논문은 울산대학교 2000학년도 연구비 지원에 의한 것입니다.

- (1) 김남호·이형일, 2000, "K_e에 의한 차량 안전벨트 앵커의 점용접 피로수명예측," 대한기계학회 논문집 A권 제24권 제3호, pp.701~709.
- (2) 송삼홍·양운진·전재욱, 2000, "냉간압연강판 점용접제의 너깃간의 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勞強度と壽命推定.
- (4) 주영우·주석재·최병길·염영진·유희, 1999, "점용접 시편의 피로 수명 해석," 자동차공학회 논문집 제7권 제6호, pp.279~286.
- (5) Eliahu Zahavi, 1996, *Fatigue Design*, p.83, CRC Press.