

저항 점 용접부의 피로강도에 미치는 잔류응력의 영향

양영수[†] · 손광재* · 조성규* · 홍석길** · 김선균** · 모경환**
(2001년 1월 22일 접수, 2001년 8월 3일 심사완료)

Effect of Residual Stress on Fatigue Strength in Resistance Spot Weldment

Young-Soo Yang, Kwang-Jae Son, Sung-Kyu Cho, Seok-Gil Hong,
Sun-Kyun Kim and Kyung-Hwan Mo

Key Words : Residual Stress(잔류응력), Fatigue Strength(피로강도), Resistance Spot Welding(저항 점 용접)

Abstract

Estimation of fatigue strength on the spot welded joint is very important for strength design of spot welded steel sheet structures. In this paper, the effect of residual stresses on the fatigue life of resistance spot weldment was studied. Residual stress fields of weldment were calculated by using thermo elastic plastic finite element analysis and equivalent fatigue stress considering residual stress effect was obtained. And then we predicted fatigue life, which included the effect of the residual stresses and the actual loading stresses. The calculation and experimental results were in good agreement. Therefore, the proposed calculation model can be considered to be sufficiently powerful for the prediction of fatigue life.

1. 서론

저항 점 용접은 자동화가 용이하고 대량생산공정에 적합하므로 자동차 차체, 철도차량, 항공기 구조 등 내구성과 신뢰성이 요구되는 박판 구조물의 접합에 널리 사용되고 있다. 저항 점 용접은 복잡한 요소들을 비교적 단순하고, 경제적으로 접합하는 공정인 반면, 이음부의 강도는 여러 가지 요인에 의해 저하된다. 특히 너깃 주위의 노치효과 등에 의한 피로균열의 발달을 유발하는 결함 때문에, 피로강도는 모재에 비하여 현저히 떨어진다. 따라서 구조물의 강성과 강도는 저항 점 용접부의 피로강도에 의해 결정되는 경우가 많다. 그러므로 저항 점 용접부에 대한 피로강도를 평가하는 것은 매우 중요하다.

저항 점 용접부의 피로강도 평가는 오래 전부터 많은 연구자들에 의해 연구되어왔다.^(1~10) 그러나 강도에 영향을 주는 주요인자를 너깃의 크기, 미세조직 변화, 형상 효과에 의한 응력집중 등으로

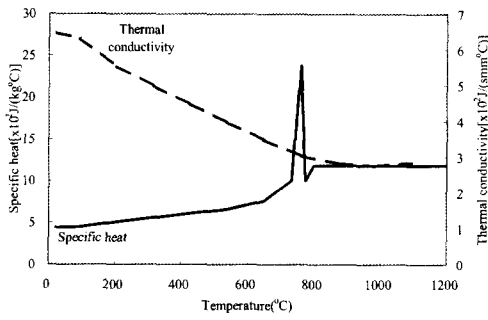
하는 연구가 대부분이며 용접부 잔류응력 효과를 고려한 연구는 거의 없는 실정이다. 일반적으로 용접공정은 온도의 불균일한 분포에 의해 열응력이 생성되어, 용접 후 잔류응력이 존재하며 그 크기는 모재의 항복응력 정도로 큰 응력이 작용되고 있다. 그러므로 잔류응력이 존재하는 저항 점 용접부는 피로강도에 매우 취약한 경향을 보인다. 따라서 잔류응력을 고려한 피로강도의 평가에 대한 연구를 필요로 한다.

본 연구에서는, 열 탄소성 유한요소해석을 통하여 저항 점 용접부의 잔류응력을 계산 하였고, 잔류응력이 존재하는 상태에서 외부하중을 가하여, 등가의 피로하중을 구하고 피로수명을 예측하였다. 유한요소해석은 상용코드인 ABAQUS 를 사용하였고 제안된 피로수명 예측방법의 타당성은 실험을 통하여 얻은 값과 비교를 하여 검증하였다.

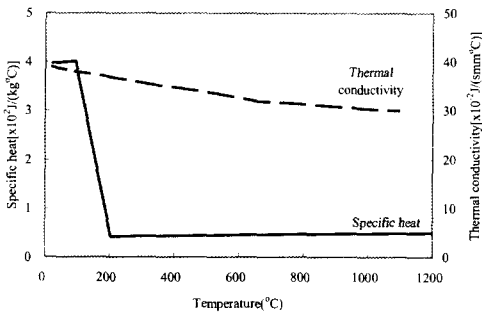
2. 잔류응력 및 피로하중 계산

용접부 해석을 위한 수치해석 기법은 유한요소법(FEM)을 사용하였으며, 해석영역의 모델링 및 요소분할 작업을 위해서는 IDEAS 를 사용하였고 열유동 및 잔류응력 해석을 위해서는 비선형 해석

[†] 책임저자, 회원, 전남대학교 기계공학과
E-mail : ysyang@chonnam.ac.kr
TEL : (062)530-1675 FAX : (062)530-1689
* 전남대학교 기계공학과
** 기아자동차주 승용차체설계 3 팀



(a) Steel sheets



(b) Copper electrode

Fig. 1 Thermal properties of steel and copper

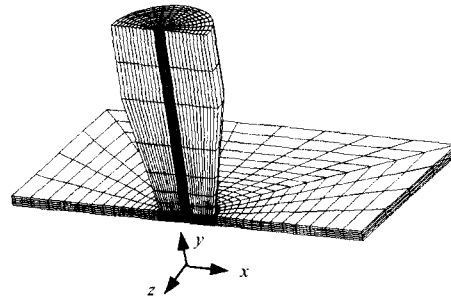


Fig. 2 Finite element mesh for 3-dimensional analysis

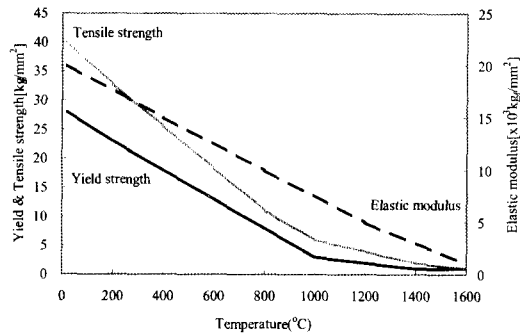


Fig. 3 Mechanical properties of base metal

에 적절한 ABAQUS 를 이용하였다

2.1 열유동 해석

용접부의 잔류응력 및 변형 해석을 위한 전 단계로서 요구되는 용접부의 열이력(thermal history)을 얻기 위한 비정상상태의 온도분포해석을 수행하였다. 저항 점 용접의 경우 열원은 접촉부에서 발생하는 전기 저항에 의한 발열이므로 온도분포 해석을 위해 전기장 해석을 수행하였다. 전기장 해석시 사용된 전류와 통전시간은 Table 1에 나타낸 바와 같고 이때 적용된 접촉부와 모재, 전극봉의 전기저항은 온도에 따라 변화하는 값을 적용하였다.⁽¹¹⁾ 열전달 해석시, 해석영역 내부의 초기조건은 시작 시간에서의 온도는 상온이고 경계조건으로는 대기로 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 일반적으로 비열, 열전도도등과 같은 재료의 열물성치들은 온도변화에 따라 다른 값들을 가진다. 따라서 온도분포 해석을 위해 사용된 재료의 열적 물성치들은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 온도변화에 따라 변화하는 값을 사용하였다.⁽¹¹⁾ 요소분할은 Fig. 2와 같이 대칭을 고려하여 반쪽을 해석영역으로 선정하였고 모델의 요소는 8 절점 3 차원 육면체 요소를 사용하였으며, 온도이력의 변화가 급격한 너깃부는 세분화 하였다.

2.2 잔류응력 해석

저항 점 용접부의 잔류응력을 구하기 위하여, 열유동 해석을 통하여 얻은 열이력을 바탕으로 모재의 탄소성 해석을 수행하였다. 잔류응력 해석시 사용되는 탄성계수와 항복강도, 인장강도 등과 같은 재료의 기계적 물성치들 또한 온도 의존적인 값들을 가지므로 온도에 따른 값들을 고려하였다 (Fig. 3).⁽¹²⁾ 해석영역의 유한요소분할은 Fig. 2와 같이 온도분포 해석시와 동일하게 하였다.

2.3 피로수명 예측

용접부 열유동과 열응력 해석을 수행하면 용접부에 작용하는 잔류응력장을 구할 수 있고 잔류응력이 존재하는 상태에서 외부하중을 가하여 유한요소해석을 수행하면, 용접부에 작용되는 복합응력 상태를 구할 수 있다. 이러한 복합응력을 1 축으로 등가 시키기 위하여 Sines' Method 를 사용하였다.⁽¹³⁾ 등가 단축피로하중을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} + m(\sigma_{m1} + \sigma_{m2} + \sigma_{m3}) = \sqrt{2} \frac{S_N}{K} \quad (1)$$

여기서, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 교반응력 $\sigma_i = \frac{1}{2}(\sigma_{i,max} - \sigma_{i,min})$

$\sigma_{m1}, \sigma_{m2}, \sigma_{m3}$: 평균응력, m : 평균응력 영향계수 (=1/4), K : 피로노치계수(=1.6), S_N : 단축 등가 피로 응력이다.

수치해석에 의하여 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{m1}, \sigma_{m2}, \sigma_{m3}$ 을 구하고 식 (1)에 대입하여 S_N 값을 구한 후, 모재의 S-N 곡선에서 S_N 응력 상태에 해당하는 피로 cycle 수를 구한다. 이때 $m=0.25$ 를 사용하였으며 K 값은 1.6 을 사용하였다. 용접부의 잔류응력을 구한 후 피로하중의 최대값과 최소값을 작용한 응력상태를 계산하여 식 (1)을 적용하였다. 일반적으로 연강의 경우 피로수명과 인장강도와의 관계는 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

$$S = 10^C N^b \quad (\text{for } 10^3 < N < 10^6) \quad (2)$$

여기서, S 는 교반응력(alternating stress), N 은 피로수명(life of failure)이고 C 와 b 는 다음과 같이 정의된다.

$$C = \log_{10} \frac{(S_{1000})^2}{S_e}, \quad b = -\frac{1}{3} \log_{10} \frac{S_{1000}}{S_e}$$

여기서, $S_{1000} = 0.9S_u$, $S_e = 0.5S_u$, S_u 는 재료의 인장강도 이고 S_e 는 재료의 피로한도(fatigue limit) 를 나타낸다. 모재의 인장강도를 알고 있으므로, 본 연구에서 사용된 재료인 SPHC40 과 SAPH45 의 피로수명은 식 (2)에서 제안된 관계식을 사용하여 예측할 수 있다.

3. 피로시험

용접은 두 가지 조합에 따라 2 판 겹 용접과 3 판 겹 용접을 사용하였다. 2 판 겹 용접의 경우 두께가 1mm 인 SHCP40 재질의 시편 2 개를 용접하고, 3 판 겹 용접의 경우에는 두께 1mm 인 SHCP40 재질의 시편 2 개 사이에 두께가 1.6mm 인 SAPH45 시편 1 개를 끼워 넣고 용접하여 제작하였다. 본 시험에서 사용된 시편들의 용접조건은 Table 1 과 같은 조건을 사용하였고 점 용접부의 미세조직실험과 경도를 측정하여 너깃의 형태, 크기, 열영향부의 크기 등을 관찰하여 열유동 해석의 타당성을 확보하였다. 실험을 통해 구한 열영향부와 너깃의 크기는 Table.1 에 나타난 바와 같다. 2 판 겹 용접 시편에 대하여는 인장-전단 피로 시험을 실시하였고 3 판 겹 용접 시편은 십자-인장 피로시험을 실시하였다. 일반적으로 저항 점 용접 구조물은 많은 경우 인장-전단 하중 상태에

Table 1 Welding conditions and nugget, HAZ size of specimens

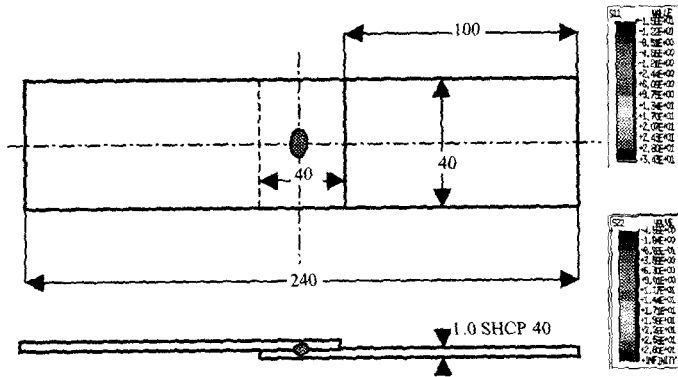
Welding Conditions	2-layer welding (SHCP40-SHCP40)	3-layer welding (SHCP40-SAPH45-SHCP40)
Current(A)	8,000	11,500
Time(cycle)	14	14
Force(kgf)	350	350
Nugget(mm)	5.2	6.1
HAZ(mm)	6.6	7.1

Table 2 Fatigue test conditions

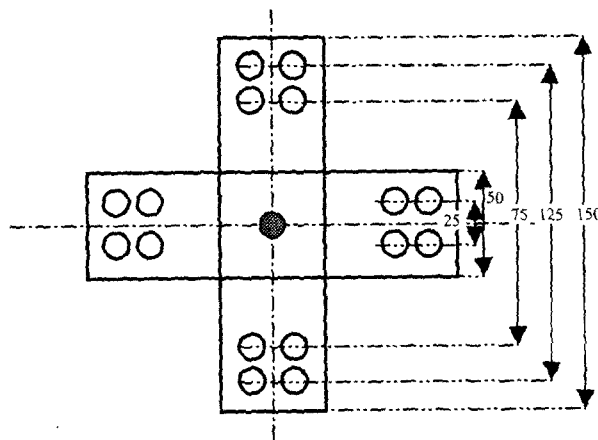
Specimen	Tensile-Shear	Cross-Tension
Control	2-layer welding	3-layer welding
Control method	Load control	Load control
Load ratio	0(0/tension)	0(0/tension)
Frequency	30Hz	15Hz
Wave form	Sine curve	Sine curve
Fatigue limit	1.0×10^6 cycle	1.0×10^6 cycle

노출되기 때문에 2 판 겹 용접은 인장-전단에 대하여 계산과 시험을 실시하였고 보강판이 중앙에 삽입된 형태의 3 판 겹 용접의 경우는 실제 차량에서 점 용접부에 작용하는 하중이 축 방향 하중이기 때문에 이에 대한 피로수명을 예측하기 위하여 십자-인장 시험과 해석을 수행 하였다.

인장-전단 피로시험 시편과 용접조건은 Fig. 4 와 Table 1 에 나타난 바와 같고 시험장치는 INSTRON 사의 2.5ton 전기 유압식 시험기를 사용 하였다. 시험방법은 Table 2 에 나타난 바와 같이 하중제어 방식을 사용하였고, 하중비=0(0/인장), 하중진동수는 30Hz 의 정현파(sine)를 사용하였다. 피로수명은 점 용접된 두 판이 완전히 분리 될 때의 사이클(cycle)로 하였으며, 피로균열이 발생하지 않을 경우에는 1.0×10^6 사이클을 피로한도로 하였다. 십자-인장 피로시험은 SHCP40 재질과 SAPH45 재질의 조합으로 이루어진 3 판 겹 용접의 경우에 대해서 실시하였고 시편 제작시 적용된 용접조건은 Table 1 에 보인 바와 같다. 시편은 Fig. 4 에 나타난 바와 같이 제작하였고 시험방법은 Table 2 에 나타난 바와 같이 하중제어 방식을 사용하였고, 하중비는 0(0/인장), 하중진동수는 15Hz 의 정현파를 사용하였다. 인장-전단 시편과 달리 하중진동수를 적게 한 것은 시편의 특성상 하중에 대해 비교적 큰 변형을 수반하므로 높은 진동수에서 하중의 구현이 어렵기 때문이다.



(a) Tensile-shear specimen



(b) Cross-tension specimen

Fig. 4 Schematics of fatigue test specimens

4. 결과 및 고찰

열유동 해석의 결과로 구해진 열이력을 이용하여 2 판 겹 용접과 3 판 겹 용접, 각각의 경우에 대해 잔류응력을 구하였다. 2 판 겹 용접의 잔류응력해석의 경우 x, z-방향의 잔류응력이 y-방향의 잔류응력보다 매우 크게 존재하였고 분포 양상은 Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 너깃 주변에 최대치를 가짐을 알 수 있었다. 3 판 겹 용접의 경우도 2 판 겹 용접과 유사한 잔류응력의 분포 양상을 가졌다.

용접부의 피로수명은 식 (1)의 Sines' method 와 식 (2)를 이용하여 잔류응력을 고려한 피로수명과 잔류응력을 고려하지 않은 피로수명을 계산하였다. 잔류응력을 고려하거나, 고려하지 않는 경우 모두 외부하중에 의한 응력의 분포는 너깃의 주변, 즉

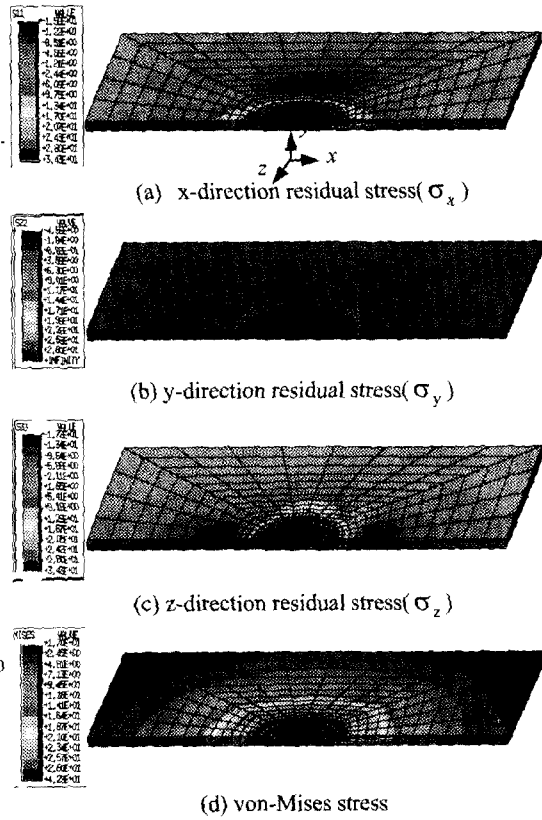


Fig. 5 Residual stress distribution after resistance spot welding of 2 layered welding(1t-1t)

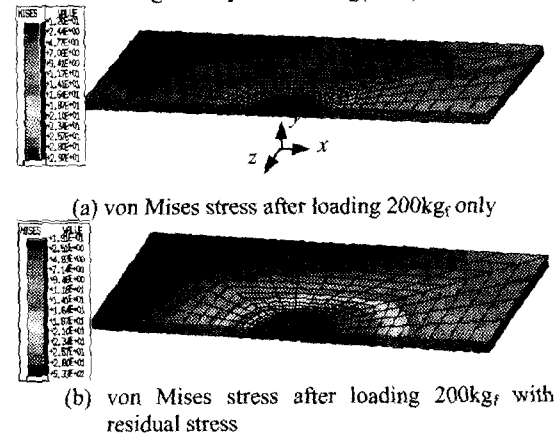
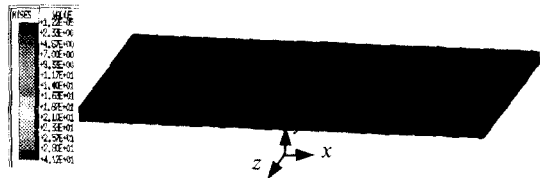


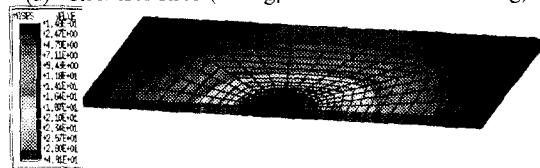
Fig. 6 Stress distribution for tensile-shear loading (200kg_f) in resistance spot of 2 layered welding(1t-1t)

열영향부에 집중되는 양상을 보인다. 그러나 응력의 크기에 있어서는 Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 잔류응력을 고려했을 경우가 그렇지 않은 경우보다 너깃 주변에서 매우 크게 존재함을 알 수 있다.

외부하중을 제거 하였을 때 응력의 분포양상을 살펴 보면 Fig. 7에 나타난 바와 같이 잔류응력이 존재하지 않은 상태나 잔류응력을 고려한 상태 모두 하중을 가하지 않았던 원래 상태의 응력분포양상을 가졌다. 십자-인장(3판 겹 용접)의 경우 잔류응력을 고려한 상태와 고려하지 않은 상태의 외부하중에 의한 응력 분포 양상도 2판 겹 용접과 유사하게 잔류응력을 고려한 상태의 값이 그렇지 않은 상태보다 더 큰 응력을 너깃 주변에서 가짐



(a) von Mises stress(200kgf tensile-shear + unloading)



(b) von Mises stress(welding residual stress + 200kgf tensile-shear + unloading)

Fig. 7 Stress distribution for unloading state of 200kgf tensile-shear in resistance spot of 2 layered welding(1t-1t)

을 알 수 있었고 외부하중을 제거하면 두 상태 모두 인장잔류응력을 가짐을 알 수 있다. 이는 인장-전단의 경우와는 달리 외부하중에 의한 큰 소성변형을 가지기 때문에 너깃 주변의 잔류응력이 재분포 하기 때문이다.

점 용접부의 잔류응력은 접합된 판재의 외표면과 내표면에서 각각 다른 값을 가지는 것으로 보고 되었고⁽¹⁰⁾ 본 연구에서도 확인 되었다. 점용접부의 피로균열은 내표면에서 발생하여 외표면으로 성장해 나가는 양상을 보인다. 따라서, 내표면의, 너깃 끝 단부터 1mm 지점의 응력을 계산하여 등가응력을 구하였는데 이는 점 용접부의 피로 파단 너깃 끝단에서 약 1mm 떨어진 위치에서 주로 발생하였기 때문이다. 등가 단축피로응력과 피로수명은 인장-전단 시편의 경우 Table 3, 십자-인장 시편의 경우 Table 4에 나타내었다.

실험을 통해 얻은 인장-전단 시편의 피로수명과 본 연구에서 제안한 방법을 통해 구한 피로수명과 관계는 Fig. 8에, 십자-인장의 경우는 Fig. 9에 나타내었다. 잔류응력을 고려하여 예측한 피로수명이 그렇지 않은 경우의 예측값 보다 실험치에 잘 근접함을 볼 수 있는데 이는 인장잔류응력이 너깃 주변에 매우 크게 존재하므로 외부하중과의 증폭작용을 일으켜 피로수명에 큰 영향을 주기 때문이다.

Table 3 Equivalent uniaxial fatigue stress and fatigue life of tensile-shear test

Applied load (kgf)	Number of cycles			Equivalent uniaxial fatigue stress(kgf/mm ²)	
	Experiment	Calculated with residual stress effect	Calculated without residual stress effect	Calculated with residual stress effect	Calculated without residual stress effect
170	4.17×10 ⁵	1.34×10 ⁵	2.89×10 ⁸	23.73	12.35
200	2.45×10 ⁵	7.41×10 ⁴	4.64×10 ⁷	24.96	14.43
	3.33×10 ⁵				
250	4.37×10 ⁴	2.64×10 ⁴	3.69×10 ⁶	27.24	17.90
	6.17×10 ⁴				
300	1.45×10 ⁴	1.05×10 ⁴	5.82×10 ⁵	29.48	20.94
350	7.04×10 ³	4.47×10 ³	1.25×10 ⁵	31.69	23.87
400	-	1.85×10 ³	2.70×10 ⁴	34.16	27.20
450	-	1.00×10 ³	6.60×10 ³	36.00	30.66
500	-	2.80×10 ²	1.03×10 ³	40.11	35.92

Table 4 Equivalent uniaxial fatigue stress and fatigue life of cross-tension test

Applied load (kg _f)	Number of cycles			Equivalent uniaxial fatigue stress(kf _f /mm ²)	
	Experiment	Calculated with residual stress effect	Calculated without residual stress effect	Calculated with residual stress effect	Calculated without residual stress effect
50	1.12×10 ⁶	4.05×10 ⁶	2.18×10 ⁹	17.75	10.40
70	5.29×10 ⁵	1.71×10 ⁶	1.5×10 ⁸	19.11	13.06
100	1.57×10 ⁵	1.35×10 ⁵	1.77×10 ⁶	23.72	19.05
150	7.08×10 ³	2.79×10 ⁴	1.90×10 ⁵	27.12	23.03
200	-	7.90×10 ³	6.07×10 ³	30.19	30.88
250	4.91×10 ³	9.53×10 ²	7.95×10 ²	36.12	36.71

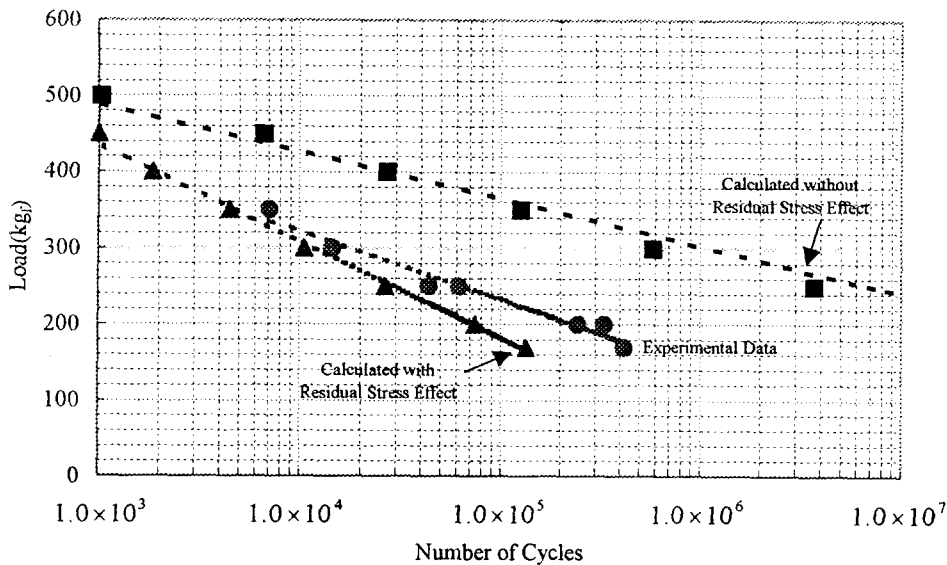


Fig. 8 Experimental and calculated fatigue life for tensile-shear specimen

5. 결론

본 연구에서는, 두 가지 조건의 점 용접 시편들에 대한 유한요소해석을 통하여 열이력과 잔류응력을 구하고, 이를 바탕으로 Sines' Method를 사용하여 용접부에 작용하는 등가 단축피로하중을 도출하여 피로수명을 추정하였다. 각각의 용접조건으로 제작된 점 용접 시편들에 대하여 정적 인장시험과 피로시험을 통하여 정적 하중-변위관계와 반복하중-피로수명 데이터를 얻어 제안된 방법의 피로수명 예측 값의 타당성을 확보하였다. 즉, 점 용접부에 작용하는 잔류응력을 고려한 피로수명

예측방법을 제안하였다. 이와 같은 일련의 과정들을 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 저항 점 용접부에 존재하는 최대 인장잔류응력은 너깃주변(열영향부)에서 나타나며 실제 저항 점 용접부의 피로파괴는 인장잔류응력이 최대로 존재하는 부분에서 발생한다.

(2) 잔류응력을 고려하여 예측한 피로수명이 잔류응력을 고려하지 않고 추정된 피로수명보다 작은 값을 가지며 실험을 통해 얻은 피로수명 데이터와 잘 일치함을 보인다. 이는 점 용접부 주변에 존재하는 잔류응력이 피로수명에 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

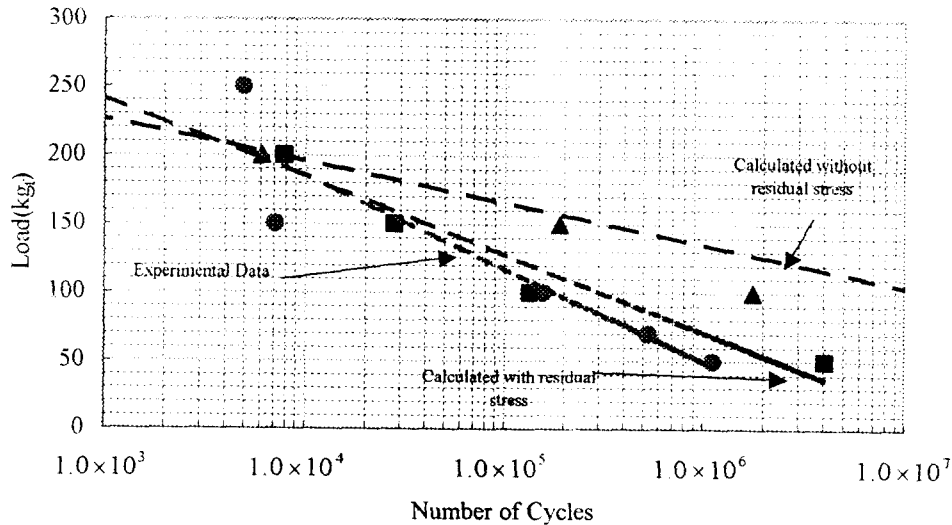


Fig. 9 Experimental and calculated fatigue life for cross-tension specimen

후 기

본 연구는 기아자동차㈜의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다

참고문헌

- (1) Choi, G. S., Han, K. M. and Paik, S. H., 2000, *Dynamic Stress Analysis of Vehicle Using Virtual Proving Ground Approach*, SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, March 6-9.
- (2) Gaier, C. H., Unger, B. and Vogler, J., 1999, *Theory and Applications of Femfat-A-FE-Postprocessing Tool for Fatigue Analysis*, Fatigue Conference Beijing.
- (3) Sheppard, S. D. and Strange, M., 1992, "Fatigue Life Estimation in Resistance Spot Welds; Initiation and Early Growth Phase," *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, vol. 15, no. 6, pp. 531~549.
- (4) Steinwender, G., Gaier, C., Unger, B. and Puch, D., 1999, *Fatigue Simulation During the Design Process of Vehicle Structures*, ISATA 99 CONFERENCE VIENNA PAPER 99SI011.
- (5) Mo, K. H., Suh, K. W. and Hong, S. G., 2000, *New Approach in Vehicle Durability Evaluation, Virtual Proving Ground*, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress.
- (6) Nagpal, R. and Kyo, E. Y., 1996, *A Time-Domain Fatigue Life Prediction Method for Vehicle Body Structures*, 960567.
- (7) Song, S.-H., Choi, B.-H. and Bae, J.-S., 1998, "Crack Propagation Behavior Based on the Characteristic of the Interaction Between Two Fatigue Crack," *KSME Int. J.*, Vol. 12, No. 2, pp. 191~198.
- (8) 이형일, 최진용, 2000, "점용접시편의 과부하해석 및 유효 J -적분에 의한 피로수명예측," *대한기계학회논문집*, 24 권, 3 호, pp. 567~580.
- (9) 이형일, 김남호, 이태수, 2000, "점용접시편의 극한하중과 피로특성에 관한 실험적 고찰," *대한기계학회논문집*, 24 권, 1 호, pp. 38~51.
- (10) 손일선, 배동호, 홍정균, 이범노, 2000, "잔류응력을 고려한 점용접이음재의 피로설계," *대한기계학회논문집*, 24 권, 3 호, pp. 743~751.
- (11) Tasi, C. L., Dai, W. L., Dikinson, D. W. and Papritan, J. C., 1991, "Analysis and Development of a Real-Time Control Methodology in Resistance Spot Welding," *Welding Journal*, pp. 339~351.
- (12) *Metals Handbook*, 10th Edition, Vol.1.
- (13) Fuchs, H. O. and Stephens, R. I., 1980, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, pp. 176~181.
- (14) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, pp. 1~6.