

# 저항 점 용접부의 피로강도에 미치는 잔류응력의 영향

## Effect of Residual Stress on Fatigue Strength in Resistance Spot Weldment

양영수\*, 손광재\*\*, 조성규\*\*  
\*전남대 기계과, \*\*전남대 대학원

### 1. 서 론

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[1~3]. 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 ABAQUS를 사용하였고 제안된 피로수명 예측방법의 타당성은 실험을 통하여 얻은 값과의 비교를 통하여 검증하였다.

### 2. 잔류응력 및 피로하중 계산

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 온도분포해석을 위해 전기장 해석을 수행하였다. 열전달 해석시, 해석영역 내부의 초기조건은 시작 시간에서의 온도는 상온이고 경계조건으로는 대기로 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 요소분할은 Fig.1과 같이 대칭을 고려하여 반쪽을 해석영역으로 선정하였다. 저항 점 용접부의 잔류응력을 구하기 위하여, 열유동 해석을 통하여 얻은 열이력을 바탕으로 모재의 탄소성 해석을 수행하였다. 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 다축응력을 1축 응력으로 등가 시키기 위하여 Sines' Method를 사용하였다[4]. 등가 단축피로하중을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

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

$S_N$  값을 구한 후, 모재의 S-N 곡선에서 응력 상태에 해당하는 피로사이클을 구한다. 이때  $m=0.25$ 를 사용하였으며  $K$  값은 1.6을 사용하였다. 용접부의 잔류응력을 구한 후 피로하중의 최대값과 최소값

을 작용한 응력상태를 계산하여 식(1)을 적용하였다. 일반적으로 연강의 경우 피로수명과 인장강도와  
의 관계는 다음과 같다[5].

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

### 3. 피로시험

용접은 두 가지 조합에 따라 2판 겹 용접과 3판 겹 용접을 사용하였다. 2판 겹 용접의 경우 두께가  
1mm인 SHCP40 재질의 시편 2개를 용접하고, 3판 겹 용접의 경우에는 두께 1mm인 SHCP40재질의  
시편 2개 사이에 두께가 1.6mm인 SAPH45 시편 1개를 끼워 넣고 용접하여 제작하였다. 2판 겹 용접  
시편에 대하여는 인장-전단 피로시험을 실시하였고 3판 겹 용접 시편은 십자-인장 피로시험을 실시  
하였다.

### 4. 결과 및 고찰

열유동 해석의 결과로 구해진 열이력을 이용하여 2판 겹 용접과 3판 겹 용접, 각각의 경우에 대해  
잔류응력을 구하였다. 2판 겹 용접의 잔류응력해석의 경우 잔류응력의 분포 양상은 Fig.2에 나타낸  
바와 같이 너깃 주변에서 최대치를 가짐을 알 수 있었다. 3판 겹 용접의 경우도 2판 겹 용접과 유사  
한 잔류응력의 분포 양상을 가졌다. 용접부의 피로수명은 (1)식의 Sines' method와 (2)식을 이용하여  
잔류응력을 고려한 피로수명과 잔류응력을 고려하지 않은 피로수명을 계산하였다. 잔류응력을 고려  
하거나, 고려하지 않는 경우 모두 외부하중에 의한 응력의 분포는 너깃의 주변, 즉 열영향부에 집중  
되는 양상을 보인다. 그러나 응력의 크기에 있어서는 Fig.3에 나타낸 바와 같이 잔류응력을 고려했을  
경우가 그렇지 않은 경우보다 너깃 주변에서 매우 크게 존재함을 알 수 있다. 외부하중을 제거 하였  
을 때 응력의 분포양상을 살펴 보면 Fig.4에 나타낸 바와 같이 잔류응력이 존재하지 않은 상태나 잔  
류응력을 고려한 상태 모두 하중을 가하지 않았던 원래 상태의 응력분포 양상을 가졌다. 본 연구에  
서는 너깃 끝 단부터 1mm지점의 응력을 계산하여 등가응력을 구하였는데 이는 점 용접부의 피로  
파단 너깃 끝단에서 약1mm 떨어진 위치에서 주로 발생하였기 때문이다. 실험을 통해 얻은 인장-전  
단 시험의 피로수명과 본 연구에서 제안한 방법을 통해 구한 피로수명과 관계는 Fig.5에 ,십자-인  
장의 경우는 Fig.6에 나타내었다. 잔류응력을 고려하여 예측한 피로수명이 그렇지 않은 경우의 예측  
값 보다 실험 치에 잘 근접함을 볼 수 있는데 이는 인장잔류응력이 너깃 주변에 매우 크게 존재하  
므로 외부하중과의 증폭작용을 일으켜 피로수명에 큰 영향을 주기 때문이다.

### 5. 결 론

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 피  
로시험을 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 있다.

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 추정한 피로수명보다 작은 값

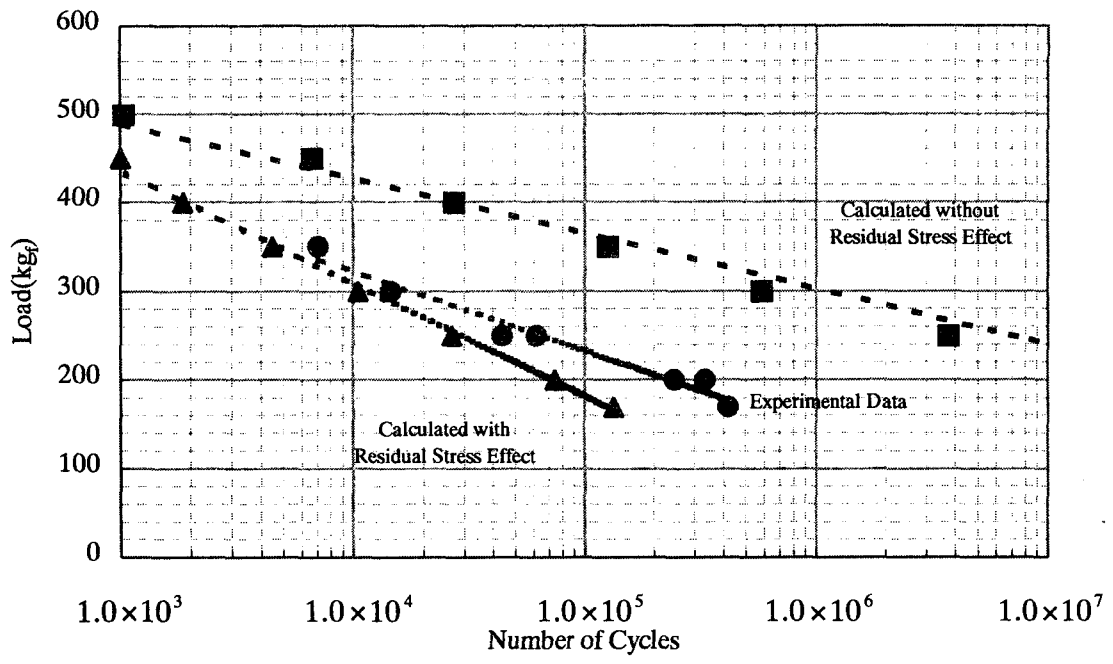


Fig.5 Experimental and calculated fatigue life for tensile-shear specimen

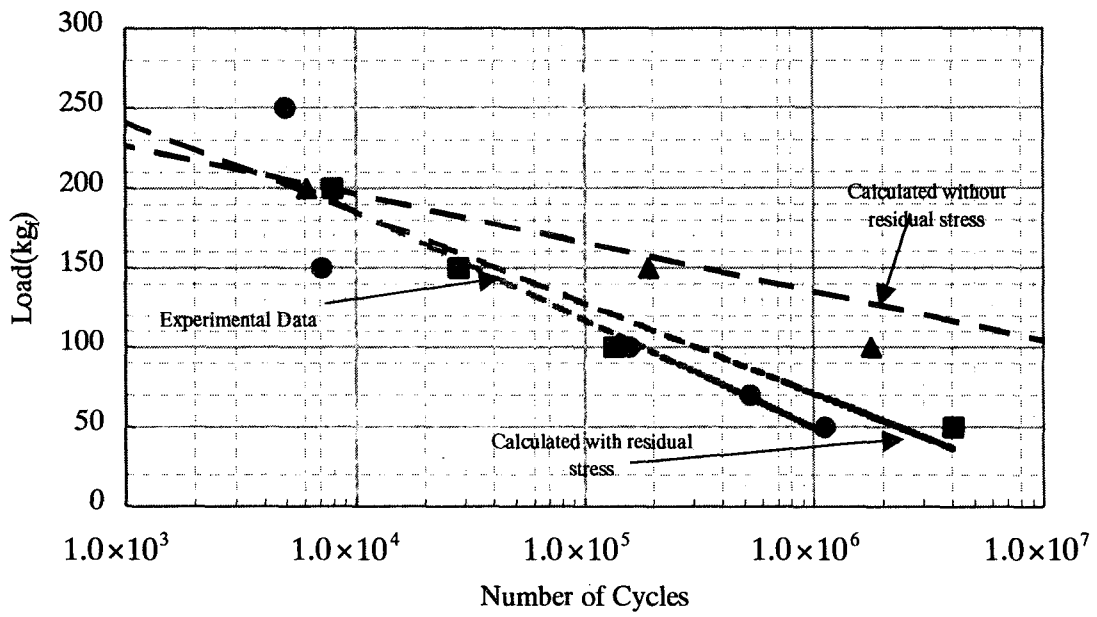


Fig.6 Experimental and calculated fatigue life for cross-tension specimen

을 가지며 실험을 통해 얻은 피로수명 데이터와 잘 일치함을 보인다. 이는 점 용접부 주변에 존재하는 잔류응력이 피로수명에 큰 영향을 미치는 인자이기 때문이다.

### 참고문헌

- 1) G.S.Choi, K.M.Han and S.H.Paik, 2000/11/20, "Dynamic Stress Analysis of Vechile Using Virtual Proving Ground Approach", SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, March 6-9
- 2) Ch.Gaier, B.Unger and J.Vogler, 1999, "Theory and Applications of Femfat-A-FE-Postprocessing Tool for Fatigue Analysis", Fatigue Conference Beijing
- 3) S.D.Sheppard and M. Strange, 1992, "Fatigue Life Estimation in Resistance Spot Welds; Initiation and Early Growth Phase", Fatigue Fract. Engng Master. Struct., vol.15, No.6, pp.531-549
- 4) H.O.Fuchs and R.I.Stephens, 1980, Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, pp176-181
- 5) J.A.Bannantine, J.J.Comer and J.L.Handrock, 1990, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall

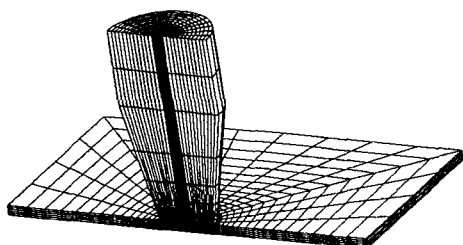
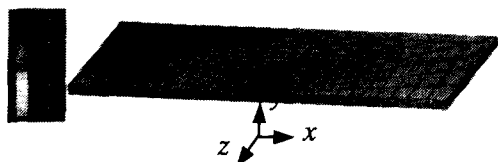


Fig1. Finite Element Mesh



Fig. 2 Residual stress(von-Mises stress) distribution after resistance spot welding of 2 layered welding

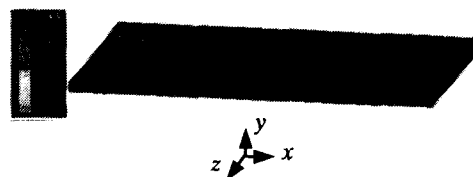


(a) von Mises stress after loading 200kg<sub>f</sub> only



(b) von Mises stress after loading 200kg<sub>f</sub> with residual stress

Fig.3 Stress distribution for tensile-shear loading (200kg<sub>f</sub>) in resistance spot of 2 layered welding



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



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

Fig.4 Stress distribution for unloading state of 200kgf tensile-shear in resistance spot of 2 layered welding