

냉간 압연강판 십자형 점용접부의 피로강도 평가

김호경[†] · 최덕호^{*} · 양경탁^{*}

서울산업대학교 자동차공학과 · ^{*}서울산업대학교 산업대학원 자동차공학과
(2006. 7. 9. 접수 / 2006. 9. 25. 채택)

Fatigue Strength Evaluation of SPCC Cross-Tension Spot Weld Joints

Ho-Kyung Kim[†] · Deok-Ho Choi^{*} · Kyoung-Tak Yang^{*}

Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology

^{*}Department of Automotive Engineering, Graduate School, Seoul National University of Technology

(Received July 9, 2006 / Accepted September 25, 2006)

Abstract : In this study, SPCC cross-tension type specimens produced under various spot welding conditions were tensile and fatigue tested. Decrease of 2 kA in normal current condition of 10 kA caused a large amount of reduction in both static joining strength and fatigue life. And 2 kA increase resulted in increase of static joining strength and an increase in low cycle regime but a decrease in high cycle regime, revealing the fact that fatigue strength rather than static joining strength would be a major factor during design process in view of the body endurance. As a results of estimating the fatigue lifetimes of various types of spot weld specimens. equivalent stress intensity factor is the proper parameter for predicting the lifetimes of various types of specimens. which can be expressed as $\Delta K_{eq}(N/mm^{1.5}) = 11550N_f^{-0.36}$.

Key Words : cross-tension, equivalent stress intensity factor, fatigue life, static strength, spot welding

1. 서 론

전기저항용접의 일종인 점용접은 박판을 겹쳐놓고 압력을 가하면서 0.3초 이내의 짧은 시간 동안 높은 전류를 흘려 접촉 저항에 의한 주열 열을 발생시켜 박판 접촉부를 용융 집합하는 방법이다^{1,2)}. 점용접은 작업이 간단하며 극히 짧은 시간에 이루어지므로 자동차, 차량, 항공기, 가전제품 등의 박판 구조물의 집합과 조립법으로서 리벳이음 대신 점용접 이음이 널리 이용되고 있다. 특히 자동차 차체 구조의 판재 조립에는 용접의 편리함, 자동화와 대량생산의 견지에서 점용접에 의한 방법이 많이 이용되고 있다. 그러나 점용접부는 집합이 용접점에 국한되어 있기 때문에 외부 하중을 받았을 때 응력 집중이 크며 이음부의 설계가 적합하지 않으면 점용접부에 피로 크랙이 발생하는 원인이 된다. 따라서 피로 강도 및 내구성 평가의 정밀도 향상은 자동차 경량화에 따른

안전대책을 수립하는데 중요한 인자가 되며 피로 수명을 통일적으로 평가하기 위한 연구가 진행되어 왔다³⁾.

점용접 구조물의 피로수명을 예측하기 위해서는 기본적으로 단순한 형태의 시험편을 대상으로 피로 강도를 충분히 파악하는 것이 경제적이다. 즉, 시험편의 형상, 힘의 작용방향, 판 두께 및 너겟 직경 등이 달라지더라도 일관된 평가를 가능하게 해주는 매개변수를 설정하고 이를 이용하여 수명을 평가 혹은 예측하는 여러 매개변수가 제안되었다^{4,7)}. 대부분의 매개변수는 고전적인 작용응력⁴⁾과 너겟 부위의 노치를 고려하여 이것을 파괴역학적으로 적용하여 제안한 변수^{5,7)}로 분류된다. 그러나 지금까지 점용접부의 수명에 관하여 파괴역학적으로 접근한 연구는 주로 인장-전단형 시험편 형상에 중점적으로 이루어져 십자형 인장 시험편(cross-tension specimen)의 형상에 대한 노치부의 응력확대계수에 대한 연구^{7,8)}는 매우 제한적이다. 그 중 Zhang⁷⁾은 십자형 인장시험편에 대하여 등가응력 확대계수(K_{eq}), J integral을 이용하여 피로수명과의 관계를 제안하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
kimhk@snu.ac.kr

본 연구에서는 냉간 압연 강판(SPCC) 십자형 인장 시험편을 사용하여 최적의 점용접 조건을 기준으로 용접 전류와 용접시간을 변화시킨 5종의 시험편에 대하여 인장시험 및 피로 실험을 수행하였다. 실험 데이터를 이용하여 피로강도에 대한 용접조건 영향의 고찰하고 점용접부의 피로강도 평가에 사용된 매개변수들을 적용하여 십자형 인장 시험편의 피로수명을 예측하는데 가장 적절한 매개변수를 도출하고자 한다.

2. 실험

2.1. 재료 및 시험편 제작

본 연구에서 실험에 사용한 재료는 자동차 차체로 많이 사용되고 있는 냉간 압연강판으로 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 점용접 시험편은 KS B 0852⁹⁾에 의거하여 Fig. 1과 같이 시험편의 형상을 제작하였다. 점용접에는 Fig. 2와 같은 상태에서 직경 6mm의 CF형 전극(electrode)과 정격용량 50kVA인 공압식 점용접기를 사용하였다. 용접 조건은 Fig. 3에서 통전 시간(welding time)과 용접전류(welding current)가 피로수명에 미치는 영

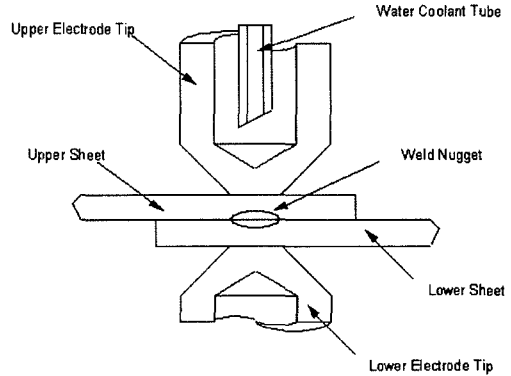


Fig. 2. Schematic diagram of spot welding system.

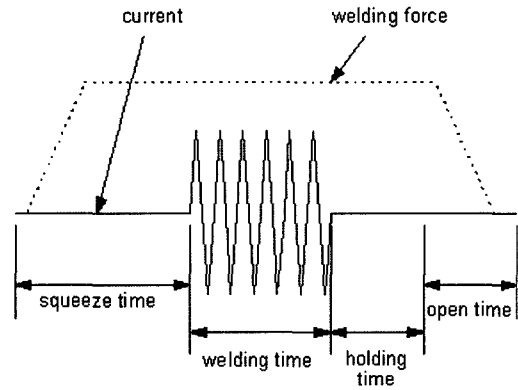


Fig. 3. Sequence of spot welding.

Table 1. Chemical compositions of SPCC(wt. %)

Material	C	Mn	P	S	Al	Fe
SPCC	0.04	0.25	0.01	0.005	0.05	bal.

Table 2. Mechanical properties of base metal for the spot welded cross-tension specimen

Material	σ_u (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	E (N/mm ²)	ϵ_f (%)
SPCC	374.7	222.1	2.1×10 ⁵	40

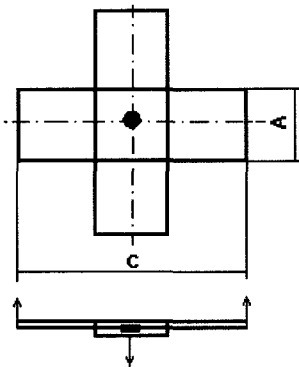


Fig. 1. Configuration and dimensions of a cross tension specimen(c=150mm, A=50mm).

향을 파악하기 위하여 자동차 제작사에서 2mm 두께의 냉간 압연 강판의 점용접시 최적의 조건으로 사용하고 있는 조건을 기준으로 통전시간과 용접전류를 변화시켜 시험편을 제작하였다. 가압력(welding force)은 3.72kN으로 일정하게 유지하고 통전시간은 기준시간 (=18cycles)에서 5cycles을 증가 혹은 감소시켰으며, 용접전류는 기준을 12kV로 하고 각각 2kV를 증가 혹은 감소시켜 변화시킨 5종류의 시험편을 제작하였다.

2.2. 실험방법

십자형 점용접 시험편의 인장 및 피로시험을 측정하기 위한 인장실험과 피로 강도를 평가하기 위한 실험에는 10ton 용량의 전기 유압식 만능 재료 시험기(Instron 8516 dynamic universal testing machine)를 사용하였고, 인장시험에서는 변위 제어방식으로 10mm/min의 속도로 수행하였다.

점 용접된 십자형 시험편의 피로 실험은 하중 제어방식으로 응력비($R = P_{min}/P_{max}$)가 0.05인 10Hz의

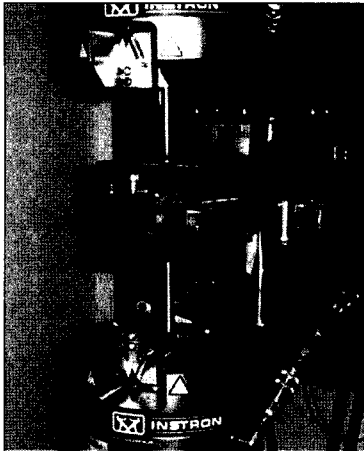


Fig. 4. Testing apparatus for tensile and fatigue experiments.

정현파형(sine wave form) 반복하중을 일정하게 가하고, P_{max} 의 값을 4, 2, 1, 0.8kN의 순으로 차례로 낮추며 수행하였다. Fig. 4는 인장실험 및 피로실험에 사용한 만능 재료 시험기에 지그와 십자형 시험편을 장착한 사진이다.

점용접부의 너겟 직경을 측정하기 위하여 시험편의 절단은 다이아몬드 절단기를 사용하였으며 마운팅 시킨 시험편의 표면을 #1000까지 연마한 후 산화 알루미늄(Al_2O_3)분말을 사용하여 연마하여 광학 현미경(Unitron Versamet-2)을 사용한다. 다양한 용접 조건에 대하여 측정된 너겟 직경은 Table 3과 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1. 점 용접부의 인장강도

5종류의 십자형 시험편에 대하여 인장시험을 실시한 결과에 대한 인장하중과 변위와의 관계를 Fig. 5에 나타내었으며 최대 인장하중 P_{max} 와 최대변위 δ_{max} 를 포함하여 Table 3에 요약하였다. 실제 현장에서 사용되는 최적의 용접조건에서 제작된 #1 시험편은 Fig. 5에서와 같이 18.5kN의 하중에서 변위가 62.7mm까지 인장되어 파단되었으며, 용접전류를 2kA 상승시켜 용접시킨 #2 시험편은 20.6kN의 최대하중에서 파단되어 최적의 용접조건에서 제작된 시험편(#1)보다 파단하중이 높았다. 또한 2kA만큼 감소시킨 #3 시험편의 경우 파단하중이 8.7kN으로 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 용접 전류의 2kA 증가에 따라 시험편의 정적 강도가 증가하는 경향은 너겟 직경의 증가로 시험편의 파단하중을 향상시켰기 때문이라고 판단된다.

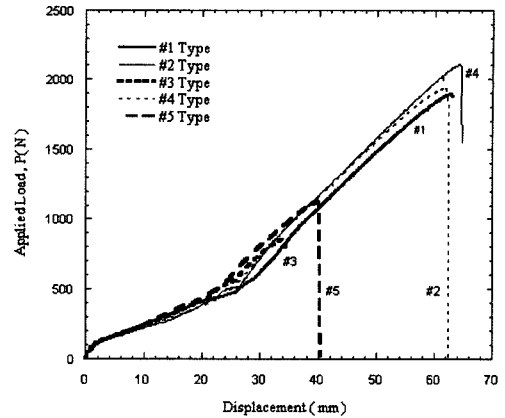


Fig. 5. Relationship between load and displacement for various types of cross-tension specimens.

또한 기준 #1 시험편 보다 용접시간이 5cycles 증가시킨 #4 시험편은 파단하중이 19.1kN, 파단 변형량이 61.5mm로 강도가 약간 증가하였으나 5cycles 만큼 감소시킨 #5 시험편의 경우 파단하중이 10.9kN으로 급격히 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 통전시간의 감소로 너겟 직경이 축소되어 파단하중이 저하된 것으로 사료된다. 기준 시험편 #1과 비교하여 특히, 용접 시간을 5cycles 증가시킨 #4 시험편이 변형량 및 강도측면에서 향상된 결과를 보이고 있다. 비산을 일으키는데 영향을 미치는 용접전류와 시간을 무시한 단순히 정적 인장강도를 고려한 경우 용접시간을 증가시킨 #4 시험편이 가장 우수한 것으로 나타났다.

3.2. 점용접부의 피로수명

Table 3의 5종류의 용접 조건으로 제작한 시험편에 대한 피로 실험을 수행하였으며 실험결과를 Table 4에 요약하였다. 실제 현장에서 사용되는 최적의 용접조건에서 제작된 #1 시험편을 위주로 나머지 4 조건은 비교를 위하여 추가로 피로실험을 수행하였다. 여기서 시험편의 피로수명은 시험편이 피로하중에 대한 변위가 급격히 떨어지는 시간을 파단 수명으로 간주하였다. Table 4에서와 같이 14kA로 용접을 한 시험편의 경우 12kA로 용접을 한 시험편보다 단수명(low cycle) 영역에서는 수명이 더 길었으나 장수명(high cycle) 영역에서는 수명이 더 짧은 것을 알 수 있었다.

한편 10kA로 용접한 시험편의 경우 장·단수명 구간(high and low cycles) 모두 기준 시험편인 #1 시험편보다 감소하는 것으로 나타났다. 그러므로 단순

Table 3. Results of tensile test for various types of specimens

Spec.	Sheet Thick (mm)	Weld. Cur. (kA)	Weld. Force (kN)	Weld. Time (cyc.)	Nugget Dia. (mm)	Results	
						δ_{-max} (mm)	P_{max} (kN)
#1	2	12	3.72	18	7.10	62.7	18.5
#2		14		18	7.46	64.1	20.6
#3		10		18	5.53	36.8	8.7
#4		12		23	7.80	61.5	19.1
#5		12		13	6.70	39.7	11.0

한 정적 인장 파단강도로 점용접부의 피로강도를 평가하는 것은 바람직하지 않다고 판단된다. 또한 용접 시간을 23cycles로 용접한 시험편의 경우 18cycles로 용접한 시험편 보다 장·단수명 구간에서 모두 수명이 더 긴 것을 알 수 있었다. 따라서 2kA의 용접 전류 증가가 인장강도와 더불어 단수명에서는 피로 수명이 증가하나 장수명 구간에서는 용접 전류의 증가가 오히려 피로 수명을 감소시키게 된다. 그러나 5cycles의 용접시간의 증가 시에는 인장강도와 더불어 피로수명이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 피로실험에 대한 하중진폭(ΔP)과 피로 수명과의 관계이다. 또한 십자형, 인장-전단(tensile-shear), coach-peel 시험편과 같은 다양한 시험편 형상에 대하여 피로실험을 수행한 다른 연구에 대한 데이터⁸⁾를 추가하였다. 그 결과 본 실험 결과 자체만으로는 하중진폭(ΔP)이 다양한 조건으로 제작한 십자형 점용접 시험편의 수명을 적절히 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 하중진폭은 본 십자형 점용접 시험편을 포함한 인장-전단, coach-peel 시험편과 같은 다양한 시험편 형상의 피로 수명예측에는 적절하지 않은 매개변수로 나타났다. 그러므로 응력이나 파괴역학적 매개변수로 수명을 예측하는 것이 바람직하다. Zhang⁷⁾은 십자형 인장시험편의 점용접부 선단에서의 유효 응력확대계수 K_{eq} 및 J 적분을 다음과 같이 제안하였다.

$$K_{eq} = \frac{0.108cT}{dt\sqrt{t}} \quad (1)$$

$$J = \frac{117(1-\nu^2)c^2T^2}{1024E\pi^2d^2t^3} \quad (2)$$

여기서 c는 Fig. 1에서 표시한 바와 같은 십자형 시험편의 하중간격, d는 너겟 직경, T는 작용하중, t는 판재의 두께, E는 탄성계수, ν 는 포와송비이다.

Table 4. Results of stress based fatigue test for the cross-tension specimens

	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	N_f				
			#1	#2	#3	#4	#5
1	15	0.75	1,196	-	-	-	-
2	12	0.60	2,646	-	-	-	-
3	6	0.30	8,579	-	-	-	-
4	4	0.20	25,191	59,753	19,014	50,542	17,931
5	2	0.10	107,516	66,216	76,644	289,614	138,109
6	1	0.05	974,267	637,926	672,162	1,018,743	866,068
7	0.8	0.04	1,656,988	-	-	-	-

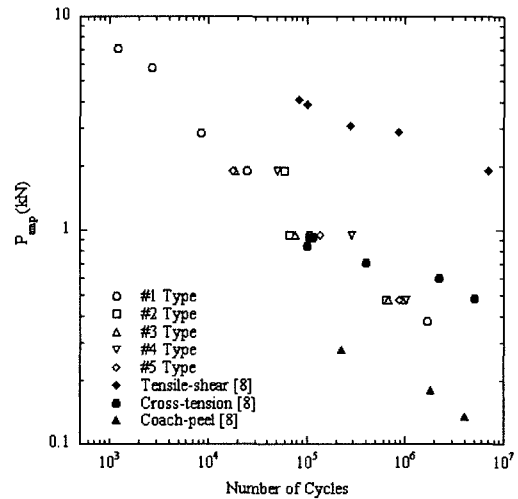


Fig. 6. Load amplitude against fatigue life for the cross-tension specimens with different types of specimens.

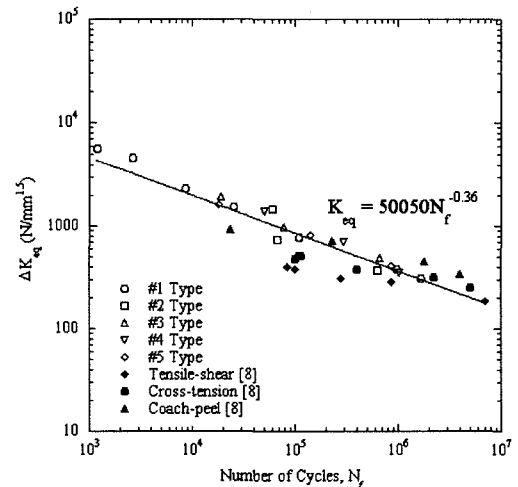


Fig. 7. Fatigue life as a function of equivalent stress intensity factor range for the cross-tension specimens with different types of specimens.

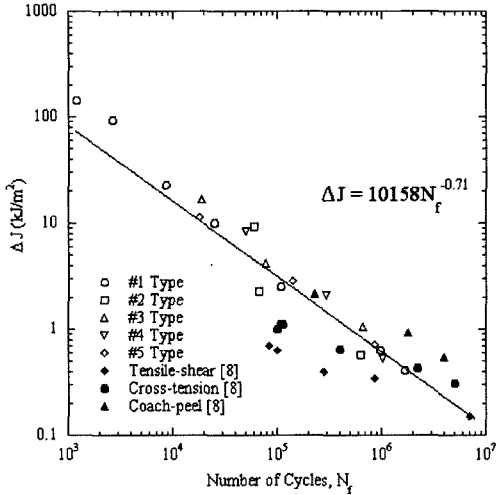


Fig. 8. Fatigue life as a function of J integral for the cross-tension specimens with different types of specimens.

Fig. 7, 8은 각각 식 (1), (2)의 점용접부 선단에서의 등가응력 확대계수범위(ΔK_{eq}) 및 J-Integral 범위(ΔJ)를 이용하여 피로수명과 관계의 관계를 나타내었다. 각 매개변수인 하중진폭, 유효응력확대계수, J적분을 검토한 결과 등가응력확대계수가 본 실험에서 수행한 십자형 인장 시험편의 수명 결과와 다른 연구자가 수행한 십자형 인장, 인장-전단, coach-peel과 같은 다양한 시험편 형상에 대한 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 등가응력 확대계수가 점용접부의 피로수명을 예측하는데 가장 적절한 매개변수로 나타났으며 다른 다양한 시험편 형상의 피로수명 결과를 포함한 본 실험 결과는 KaleidaGraph 소프트웨어를 사용하여 곡선 맞춤(curve fitting) 결과 $\Delta K_{eq}(N/mm^{1.5}) = 11550N_f^{-0.36}$ 과 같이 표현할 수 있다. 그러므로 시험편의 형상, 힘의 작용방향, 판 두께 및 너겟 직경이 다른 다양한 냉간 압연강판 점용접부의 피로 수명을 등가응력 확대계수를 통하여 예측이 가능하여 결과적으로 자동차 차체 점용접부의 피로 내구성 평가가 가능하다고 판단된다.

4. 결론

점 용접 조건 중 용접전류와 통전시간을 변화시킨 십자형 인장 시험편을 사용하여 인장 및 피로 실험을 통하여 정적강도와 피로수명을 평가하였다. 또한 점용접부위에 대한 다양한 피로 수명 매개변수를 이용하여 피로 수명 예측을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기준 용접조건인 10kA에 용접 전류가 2kA 감소시킨 결과 파단하중 및 피로수명 모두 급격히 감소하였다. 또한 2kA 증가에 따라 시험편의 파단하중은 증가하였으며 피로수명은 단수명 구간에서는 증가하였으나 장수명 구간에서는 감소하여 차체의 내구성을 고려하여 설계시 파단하중 보다는 피로강도 측면에서 설계가 바람직하다.

2) 기준 용접조건인 18cycles에 용접시간을 5cycles 감소시킨 결과 파단하중 및 피로수명 모두 급격히 감소하였다. 또한 5cycles 증가시 시험편의 파단하중 및 피로수명 모두 약간 증가하였다.

3) 5종의 시험편의 중심을 절단하여 너겟의 지름을 측정하여 지름의 크기에 따른 피로수명을 평가한 결과 등가응력 확대계수 ΔK_{eq} 가 점용접부의 피로수명을 예측하는데 가장 적절한 매개변수로 나타났으며 다른 다양한 시험편 형상의 피로수명 결과를 포함한 본 실험 결과는 $\Delta K_{eq}(N/mm^{1.5}) = 11550N_f^{-0.36}$ 과 같이 표현할 수 있다.

참고문헌

- 1) Kearns, W. H., "Welding Handbook", American Welding Society, Seventh Edition, Vol. 5, pp. 276~311, 1984.
- 2) 차천석, 양인영, 전형주, 김용우, 김정호, "점용접된 차체구조용 모자형 단면부재의 축방향 압축 특성", 산업안전학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 20~27, 2000.
- 3) Oh, H. L., "Fatigue life prediction for spot weld using Neuber's rule", ASTM STP 761, pp. 296~309, 1981.
- 4) Kurath, P., "Multiaxial fatigue criteria for spot welds", SAE Paper 920668, pp. 143~153, 1992.
- 5) Pook, L. P., "Fracture mechanics analysis of the fatigue behavior of spot welds", Int. Journal of Fracture, Vol. 11, pp. 173~176, 1975.
- 6) Wang, P. C. and Ewing, K. M., "A J-Integral approach to fatigue resistance of a tensile-shear spot weld", SAE Paper 880373, pp. 247~255, 1988.
- 7) Radaj, D. and Zhang, S., "Stress intensities at spot welds", Int. J. Fracture, Vol. 88, pp. 167~185, 1997.
- 8) 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, pp. 382~391, 1988.
- 9) KS B 0852, 점용접 이음의 인장시험방법, 한국산업규격, 1991.