

STS301L 필렛 용접이음재의 피로설계에 관한 연구

A Study on Fatigue Design for Fillet Welded Joint of STS301L

백 승엽*, 배 동호**

* 성균관대학교

** 성균관대학교

ABSTRACT

Stainless steel sheets are widely used as the structural material for the railroad cars and the commercial vehicles. These kinds structures used stainless steel sheets are commonly fabricated by using the gas welding. For fatigue design of gas welded joints such as fillet and plug type joint, it is necessary to obtain design information on stress distribution at the weldment as well as fatigue strength of gas welded joints. And also, the influence of the geometrical parameters of gas welded joints on stress distribution and fatigue strength must be evaluated. the $\Delta P-N_f$ curves were obtained by fatigue tests. Using these results, $\Delta P-N_f$ curves were rearranged in the $\Delta \sigma-N_f$ relation with the maximum stress at the edge of fillet welded joint.

1. 서 론

철도차량 차체의 성형재는 모두 스테인리스 강(예를 들면, STS301L, STS304L 등)과 같은 냉간 압연한 고 장력 강판을 프레스(press) 가공해서 외판과 보강재를 결합하여 이들을 일체화하는 수단으로 주로 집용접과 가스 용접이 이용되고 있다. 용접부는 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이, 외력에 의한 응력 집중원(stress concentration source)이 되는 것은 물론 용접 과정에서 입열(heat input)로 인한 성분과 조직의 변화에 의해 반복하중에 대한 피로 강도(fatigue strength)가 모재의 그것에 비해 훨씬 떨어져서 피로균열(fatigue crack)의 발단이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제로 철도차량에 적용되는 가스용접 이음재 가운데 대표적인 형상시편을 재질별로 피로실험을 수행하여 피로하중범위 - 피로수명($\Delta P-N_f$) 관계를 도출하여 비교 평가하였다. 또한 수치해석적 유한요소법을 이용하여 용접이음재의 응력분포상황을 해석 한 후, 용접이음부에 발생하는 최대주응력으로 $\Delta P-N_f$ 관계를 $\Delta \sigma-N_f$ 관계로 재정리하였다. 이상의 결과들을 바탕으로, 가스용접이 적용된 철도차량 차체의 경제적이고 합리적인 피로설계를 위한 기초정보로 사용하고자 하였다.

2. 필렛용접 이음재의 변형과 응력분포에 대한 유한요소 해석

2.1 해석 모델

철도차량 차체구조 제작에 있어서 대표적인 용접이음 형태인 필렛용접 이음재에 대한 응력분포 해석을 목적으로 Fig.1과 같이 시뮬레이션 모델을 제작하였다. Fig.2의 필렛용접 이음재(fillet welded joint)에 인장하중이 작용하면 용접 과정에서 발생된 용접잔류응력(welding residual stress)과 외력에 의한 응력의 조합에 의해 용접부 주변에는 용접부 특유의 복잡한 응력분포를 야기한다. 필렛용접 이음재에 대한 응력분포와 변형을 해석하는 것은 용접부의 피로균열 발생기구를 파악하는데 매우 중요하다.^{3,4)} 유한요소해석 모델의 재료는 철도차량 차체재료로 사용되는 Tables 1, 2의 STS301L 판재의 재료성질을 입력데이터로 사용하였다.

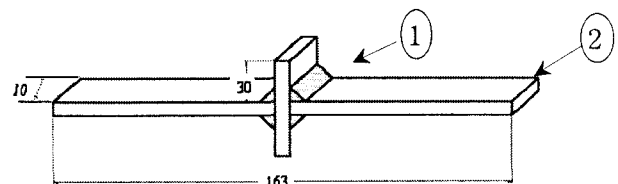


Fig. 1 Fillet welded joint specimen

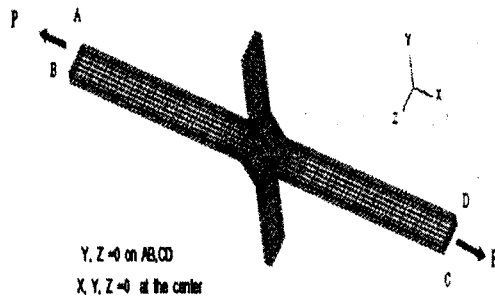


Fig. 2 3-D FEA model of fillet welded joint for stress analysis

유한요소 해석 시 용접금속에 대한 종탄성계수(Young's modulus)등의 기계적 성질을 모재와 달리해야 타당하나, 용접금속의 기계적인 성질을 정량적으로 직접 측정하기는 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석 시 용접금속의 종탄성계수를 모재의 종탄성계수와 동일하게 사용하여 해석하더라도 용접부 주위의 전체적인 응력분포에는 큰 영향이 없음을 밝힌 배동호⁹⁾ 등의 연구결과와 용접금속은 모재에 비해 경도와 강도 등의 기계적 성질이 상대적으로 크다는 사실을 바탕으로 1차적으로 용접금속의 기계적 성질을 모재보다 크게 설정하였으며, 열영향부 용접잔류응력은 전혀 고려하지 않고 응력해석하였다. 해석에 사용된 요소는 3차원 육면체 요소로서 각 이음별, 형상별 요소 수 및 절점 수는 12336, 14909이다. 모델링과 탄·소성 해석은 상용 프로그램인 I-DEAS와 ABAQUS를 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of material

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.03	1.00	2.00	0.04	0.03	6~8	16~18	0.2

Table 2 Mechanical properties of materials

Material	Symbol	Yeild strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
STS 301L	LT	≥215.6	≥548.8	≥44
	DLT	≥343	≥686	≥39
	ST	≥411.6	≥754.6	≥34
	HT	≥686	≥931	≥19

2.2 해석결과

Fig.3은 STS301L의 ST(1.5)+ST(1.5)의 형태로

필렛용접 한 이음재의 형상을 모델링 한 후에 인장하중을 가했을 때 용접부 주변의 응력 분포 상황(Fig.3)을 예시한 것이다. 인장하중에 의해 발생되는 최대주응력은 Fig.3에 나타낸바와 같이 용접토우(weld toe)와 열영향부 경계부에서 발생함을 알 수 있다. 실제로 피로시험 중에 이 부분에서 응력집중과 용접잔류응력의 조합으로 인하여 파단이 일어남을 확인 할 수 있었다.

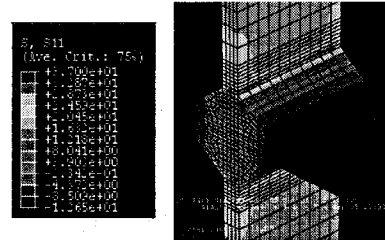


Fig. 3 Stress distribution of fillet welded joint (for example, STS301L, ST(1.5)+ ST(1.5))

3. 가스용접 이음재의 피로강도 평가

3.1 시험편 및 실험장치

피로시험편은 Table1의 STS301L을 Fig.1과 같은 형상으로 동종재 및 이종재간 가스 용접한 이음재로서, 용접성 평가를 통하여 도출된 최적 용접 조건으로 제작하였다. 피로실험 장치는 서보 유압식 피로 시험기(MTS, 용량:10ton)와 면압식 지그(Jig)는 자체 설계하여 제작하였다.

3.2 시험조건 및 시험 방법

본 연구에서는 하중반복속도를 25Hz로 하고, 부하형태는 하중비($R=P_{min}/P_{max}$)가 0 ($P_{min}=0$)인 정현파(Sine wave)로 하였다. 무한수명의 피로한도(fatigue limit)를 구하기 위해서는 시편 종류별로 인장강도(tensile strength)의 90%에서 10%씩 하중을 감소시키면서 JIS Z 2273 및 JIS Z 3103에 의거 10^7 cycles에 이를 때까지 피로실험을 수행하였다. 결과는 Table.3에 나타내었다.

3.3 시험결과 및 고찰

Fig. 4은 STS301L의 동종재 및 이종재간 가스 용접한 필렛용접 이음재의 피로강도를 $\Delta P-N_f$ 선도로 나타낸 것이다. 가스용접 과정에서 야기된 용접부 용접금속의 야금학적 변화와 2절에서의 응력분포해석 결과 및 용접잔류응력의 조합된 영향으로 데이터의 분산 폭이 이음형상, 재질 등을 종합적으로 고려한 피로설계인자를 결정하는데 지장을 줄만큼 매우 큼을 알 수 있다.

Table 3 Maximum tensile strength of the various fillet welded joints

Welded joint type (plate thickness)	Max tensile strength N (Kgf)
ST(3.0)+ST(3.0)	≥ 27371 (2793)
ST(1.5)+ST(1.5)	≥ 12985 (1325)
HT(4.5)+LT(4.0)	≥ 33163 (3384)
HT(4.5)+ST(4.0)	≥ 33310 (3399)
ST(1.5)+HT(1.5)	≥ 14308 (1460)
ST(4.0)+LT(2.5)	≥ 32134 (3279)
ST(1.5)+DLT(1.5)	≥ 11652 (1189)
ST(2.0)+DLT(2.0)	≥ 18581 (1894)
DLT(2.0)+DLT(2.0)	≥ 43385 (4427)
LT(4.0)+LT(4.0)	≥ 34241 (3494)

철도차량 차체제작에 있어서 Fig. 4의 피로강도 평가 결과로부터 설정된 피로설계기준(피로한도)을 바탕으로 설계하는 경우에 무한수명에 해당하는 피로한도의 범위($\Delta P=200 \sim 2000$ (Kgf))가 너무 크기 때문에 필렛용접 이음재의 재료성질과 이음재의 기하학적 인자들을 종합적으로 고려한 설계기준(fatigue design criterion)을 설정하기가 매우 어렵다.

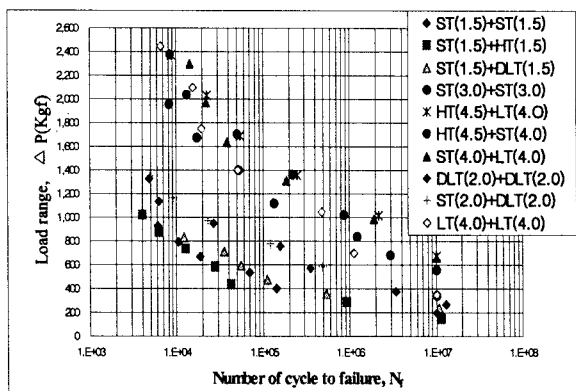


Fig. 4 $\Delta P-N_f$ relation of various fillet welded joints

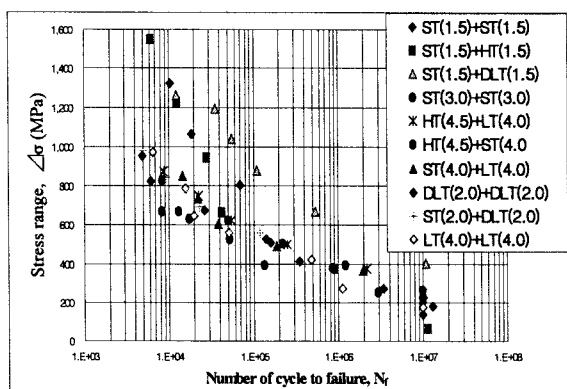


Fig. 5 $\Delta \sigma-N_f$ relation of various fillet welded joints

그래서 본 연구에서는 피로하중범위로 표시된 Fig. 4의 $\Delta P-N_f$ 선도를 응력해석 결과로부터 얻어진 필렛용접 이음재의 최대주응력을 가지고 재정리하여 Fig. 5의 $\Delta \sigma-N_f$ 선도를 얻었다. 설계기준이 되는 피로한도에 해당하는 응력의 범위는 약 100~400MPa 정도로 평가되었으며 여러 가지 기하학적 형상과 재질을 갖는 필렛용접 이음재의 피로설계는 Fig. 5의 최대주응력에 의한 설계기준을 설정함으로써 보다 더 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단한다.

4. 결론

- 1) 필렛용접 이음재에 인장하중이 작용하는 경우, 용접부 최대주응력은 용접토우와 열영향부 경계부에서 발생한다.
- 2) 피로강도 데이터를 $\Delta P-N_f$ 관계로 나타내면 기하학적 인자와 기계적 성질의 상대적인 비교평가는 가능하지만, 무한수명에 해당하는 피로한도의 범위는 매우 크다.
- 3) 가스용접한 필렛용접 이음재의 피로설계는 피로균열이 발생 및 성장하여 파단에 이르게 하는 용접부 최대주응력($\Delta \sigma-N_f$ 관계)을 기준으로 하는 것이 타당하다.
- 4) 본 연구에서 얻어진 필렛용접 이음재의 설계기준이 되는 피로한도 범위는 약 100~400MPa 정도로 평가되었다.
- 5) 가스용접한 필렛용접 이음재의 합리적인 피로설계를 위해서는 가스용접부에 발생하여 잔존하는 용접잔류응력을 고려함이 타당하다.

참고 문헌

- (1) Spot welding Technology, *JWS*, pp.12~89
- (2) Automotive Handbook, *Bosch*, pp.320~350
- (3) Kang, J.B, 2004, "Fatigue Strength of the TS-Type Spot-welded Lap Joint of STS301L," Thesis of Master, Sungkyunkwan University.
- (4) "Automatic Technology Handbook-Experimental Assessment," *JSAE*, pp.81~105,1991.
- (5) Bae, D.H, 1990, "Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of A Strength Spot Welded Lap Joint Subject to Tensile Shear Load," *Journal of KSME*, Vol.13, No.5,pp.42~50.
- (6) Son, I.S, 1999, "A Study on the fatigue Design Methods and Expert System Development for Thin Steel Spot Welded Lap Joint," Thesis of Ph.D, Sungkyunkwan University.