

STS301L 용접이음재의 피로설계에 관한 연구

백 승 업*

서일대학 자동차과

A Study on Fatigue Design for Welded Joint of STS301L

Seungyeb Baek*

Automobile Engineering, Seoil University, Seoul 440-746, Korea

(Received 2 November 2009/ Accepted 29 January 2010)

Abstract : Stainless steel sheets are widely used as the structural material for the railroad cars and the commercial vehicles. These kinds of 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. Thus, in this paper, $\Delta P-N_f$ 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 hot spot stresses at the gas welded joints.

Key words : Tensile strength(인장강도), Yield strength(항복강도), Gas welding(가스용접), Weldment(용접부), Stress concentration(응력집중), Fatigue strength (피로강도), Hot spot stress(최대응력)

Nomenclature

E : young's modulus (Mpa)
FEM : finite element method
 ΔP : applied load range
 σ_{max} : maximum principal stress (Mpa)

Subscripts

A, B, C, D, E : node point

1. 서 론

철도차량차체는 스테인리스 강(stainless steel) (예를 들면, STS301L, STS304L 등)과 같은 냉간압연한 고 장력 강판을 프레스(press)가공해서 외판과 보강

재를 결합하여 제작한다. 그리고 이들을 일체화하는 수단으로 주로 전기저항 점용접(electric resistance spot welding) 과 가스용접(gas welding)이 이용되고 있다.^{1,2)}

일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이, 용접 이음부는 형상적으로 외력에 의한 응력집중원 (stress concentration source)이 되는 것은 물론 용접과정에서 의 입 열(heat input)로 인한 성분과 조직이 변화되고 용접잔류응력(welding residual stress)이 존재함에 따라, 반복하중에 대한 피로 강도(fatigue strength)가 모재의 그것에 비해 훨씬 떨어진다. 상용차(commercial vehicle), 철도차량과 같이 구조적 강성(structural rigidity)과 내구성(durability)을 요구하는 경우, 특히 용접부에 대한 신뢰성 있는 설계가 매우 중요하다. 이를 위해서는 먼저 용접방법과 용접 시 재료에 가해진 입 열(heat input)량을 고려한 재료의 성질변화,

*Corresponding author, E-mail: sandos7@kornet.net

용접변형(welding distortion), 용접잔류응력 등에 대한 구체적이고 정량적인 정보가 확보되어야 한다.

그래서 본 연구에서는 실제 철도차량 제작 과정에서 적용되고 있는 가스용접이음 형상들 가운데 대표적인 것들을 선별하고, 이들에 대한 피로시험을 수행하여 피로하중범위-피로수명($\Delta P-N_f$) 관계를 도출하여 비교·평가하였다. 또한 유한요소법(FEM)을 이용하여 용접 이음부의 응력분포상황을 해석한 후, 용접부 최대 주응력(maximum principle stress)으로 $\Delta P-N_f$ 관계를 $\Delta \sigma-N_f$ 관계로 재정리하였다. 이상의 결과들을 바탕으로, 철도차량차체 가스 용접부의 경제적이고 합리적인 피로설계의 기초 정보로 사용하고자 하였다.

2. 가스용접 이음재의 변형과 응력분포에 대한 유한요소해석

2.1 해석모델

철도차량차체 구조제작에 있어서 대표적인 가스용접이음 형태인 필렛 용접, 플러그 용접, 링 용접 이음재에 대한 응력분포해석을 목적으로 Fig. 1의 (a), (b), (c)와 같이 시뮬레이션 모델(simulation model)을 제작하였다.

Fig. 2의 용접종류별 이음재에 인장하중이 작용하면 용접부 주변에는 용접부 특유의 복잡한 응력분포를 일으킨다. 따라서 가스용접 이음재에 대한 응력분포와 변형을 해석하는 것은 용접부 피로균열 발생 기구를 파악하는데 매우 중요하다.^{3,4)} 유한요소해석 모델의 재료는 철도차량 차체재료로 사용되고 있는 STS301L판재이며, 이의 재료성질은 Table 1, 2와 같은 화학적 조성과 기계적 성질을 입력데이터로 사용하였다. 유한요소해석 모델작성에 있어서, 용접부의 용접금속(weld metal)과 열영향(heat affected zone)부는 용접과정에서 용가제(filler metal)와 입열의 영향에 의해 엄밀히 모재와는 다른 성질을 갖는다. 따라서 용접부에 대한 탄성계수(Young's modulus)등의 기계적 성질은 실제로 모재와 달리해야 타당하나, 용접 금속의 기계적 성질을 정량적으로 직접 측정하기는 매우 어려워져서, 본 연구에서의 용접금속은 모재에 비해 경도(hardness)와 강도(strength) 등의 기계적 성질이 상대적으로 크다는

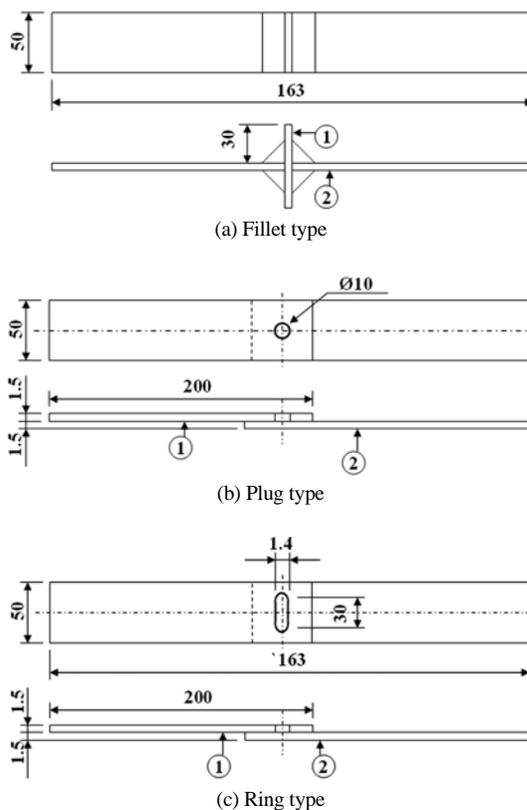


Fig. 1 Typical gas welded joint types in the rail road car body

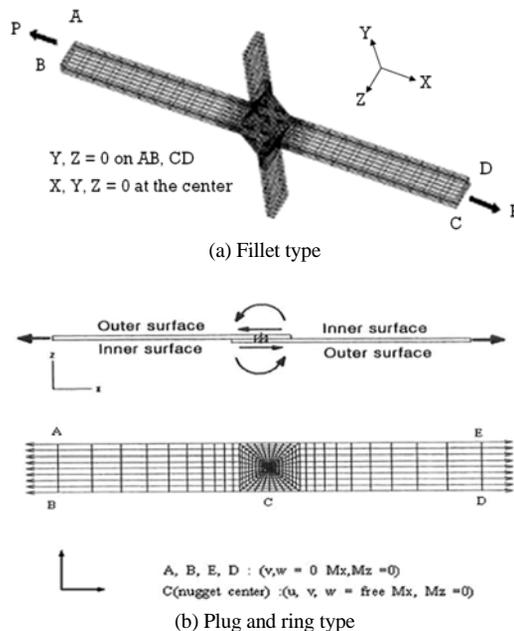


Fig. 2 3-D FEA models of gas welded joint types for stress analysis

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	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
STS 301L	DLT	≥ 343	≥ 686	≥ 39
	ST	≥ 411.6	≥ 754.6	≥ 34
	HT	≥ 686	≥ 931	≥ 19

(DLT : Deadlite Tensile, ST : Special Tensile, HT : High Tensile)

사실^{5,6)}을 바탕으로 용접금속의 탄성 계수를 모재 (ST:18,966 kg/mm²)보다 크게 설정(HT:21,516 kg/mm²)하였으며, 포와송 비는 동일하게 0.3을 적용하였다. 해석에 사용된 요소(element)는 3차원 solid 요소인 C3D8I를 적용하였으며, 필렛 용접의 경우 12,336 개의 요소와 14,909 개의 절점으로 구성하였고, 플러그 용접과 링 용접은 315,450 개의 요소와 353,498 개의 절점으로 구성하였다. 국부적인 용접부 메쉬 크기(mesh size)는 1mm로 하였으며, 용접부 모델링과 탄·소성 해석은 상용 프로그램 I-DEAS 11nx와 ABAQUS 6.7을 사용하였다.

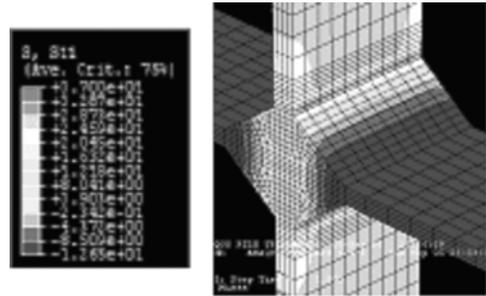
2.2 해석결과

Fig. 3(a)는 STS301L의 ST(1.5)+ST(1.5)의 형태로 필렛 용접한 이음재의 형상을 Fig. 2(a)와 같이 모델링 한 후, 인장하중을 가했을 때, 용접부 주변의 요소에 대한 응력분포상황을 예시한 것이고, (b),(c)는 플러그 용접 및 링 용접한 이음재의 형상을 Fig. 2(b)와 같이 모델링한 용접부 주변의 요소에 대한 응력분포 상황을 예시한 것이다. 용접종류별 인장하중에 의해 발생하는 하중방향의 최대주응력은 Fig. 3(a), (b), (c)에 나타낸 바와 같이 용접부 토우(weld toe)와 열 영향 경계부에서 발생함을 알 수 있다. 이것은 실제 피로시험 중 응력집중현상이 발생되어 파단이 일어남을 확인할 수 있었다.

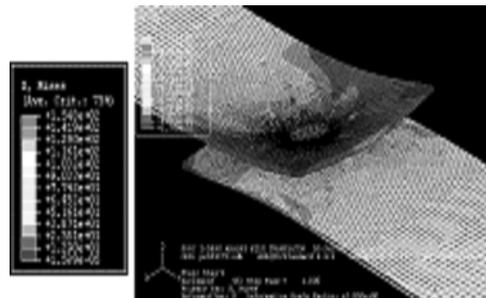
3. 가스용접 이음재의 피로강도평가

3.1 시험편 및 실험장치

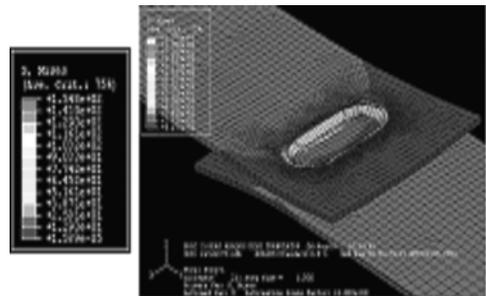
피로시험편은 Table 1, 2의 STS301L을 Fig. 1과 같



(a) Fillet welded joint, ST(1.5)+ST(1.5)



(b) Plug welded joint, ST(1.5)+ST(1.5)



(c) Ring welded joint, ST(1.5)+ST(1.5)

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

Table 3 Maximum tensile strength of the various welded joints

welded joints type (plate thickness)		Max tensile strength N(kgf)
Fillet	ST(1.5)+ST(1.5)	≥ 12985(1325)
	ST(1.5)+HT(1.5)	≥ 14308(1460)
	ST(1.5)+DLT(1.5)	≥ 11652(1189)
Plug	ST(1.5)+ST(1.5)	≥ 18502(1888)
	ST(1.5)+HT(1.5)	≥ 19727(2013)
	ST(1.5)+DLT(1.5)	≥ 22702(2317)
Ring	ST(1.5)+ST(1.5)	≥ 39102(3990)
	ST(1.5)+HT(1.5)	≥ 49921(5094)
	ST(1.5)+DLT(1.5)	≥ 36691(3744)

은 형상과 크기로 동종재(similar material) 및 이종재(dissimilar material)간 가스 용접한 이음재로서, 여러 가지 용접조건(전류, 전압, 입 열량 등)을 고려하여 제작한 예비시편들에 대해 열 영향부의 범위, 용접결합의 발생 유무, 용접부 인장강도 등을 종합적으로 평가하여 도출한 최적용접조건으로 제작하였다. 사용된 피로시험장치는 서보유압식 피로시험기(MTS, 용량: 10 ton)이며, 면압식 지그(jig)는 자체 설계 하여 제작하였다.

3.2 시험조건 및 시험방법

본 연구에서는 하중 반복속도를 25Hz로 하고, 부하형태는 하중비(load ratio; $R=P_{min}/P_{max}$)가 0 ($P_{min}=0$)인 정현파(sine wave)로 하였다.

또한, 무한수명의 한계피로한도(low fatigue limit)를 구하기 위해서 시편 종류별로 Table 3의 최대인장강도(maximum tensile strength)의 90% 에서 10%씩 하중을 감소시키면서, JIS Z 2273 및 JIS Z 3103에 의거 10^7 cycles에 이를 때까지 피로시험을 수행하였다. 그리고 각 시편의 피로수명(fatigue life)은 시편이 완전히 파단 되었을 때의 하중 반복수로 하였다.

3.3 시험결과 및 고찰

Fig. 4는 STS301L의 동종재 및 이종재간 가스 용접한 필렛, 플러그, 링 용접 이음재의 피로 강도를 $\Delta P-N_f$ 선도로 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과는 가스 용접 이음재의 재질, 이음 형상 등의 피로강도를 정량적으로 비교·평가할 수는 있지만, 앞에서 언급한 바와 같이 데이터의 분산 폭($\Delta P=1,500\sim 5,000$ N)이 너무 크기 때문에 합리적인 설계기준을 설정하기가 매우 어려울 뿐만 아니라, 설정된 설계기준의 신뢰성 문제도 제기될 수 있다. 또한, 본 실험결과에서 고려하지 않은 입의의 특정 이음 형상에 대한 설계 데이터가 필요한 경우, 추가적인 피로 시험을 필요로 하기 때문에 이를 위해서는 많은 시간과 경제적인 추가비용이 들 수밖에 없다. 따라서, 피로수명 데이터를 바탕으로 피로 설계기준을 설정함에 있어서 응력(stress)의 개념을 도입할 필요가 있는데 공칭응력(nominal stress)의 경우에는 기하학적 인자의 영향이 민감하기 때문에 적합하다고 할 수 없다.

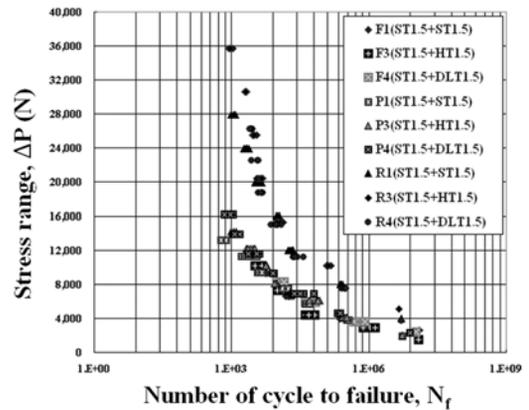


Fig. 4 $\Delta P-N_f$ relation of various gas welded joints

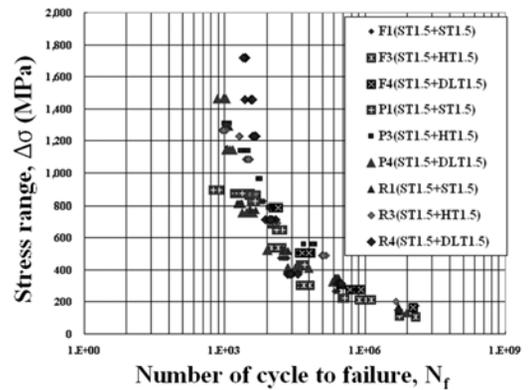


Fig. 5 $\Delta\sigma-N_f$ relation of various gas welded joints

그러나 2절의 응력분포해석 결과에서 보인 바와 같이 최대 주응력은 용접 지단부를 포함한 용접 열 영향 부에서 발생하고 있음을 확인할 수 있었기 때문에 피로균열이 발생 및 성장하는 위치의 최대 주응력으로 피로강도를 평가하는 것이 타당하다고 판단할 수 있었다. $\Delta P-N_f$ 선도의 결과와 응력분포해석 결과를 가지고, 응력진폭($\Delta\sigma$)과 피로수명(N_f) 관계를 도출하여 피로데이터를 재정리한 결과, Fig. 5의 결과를 얻었다. 피로데이터의 분산이 Fig. 4의 $\Delta P-N_f$ 선도에 비해서 피로설계기준을 정할 수 있을 만큼 데이터의 분산 폭이 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 가스용접이음형태와 각 이음재의 기하학적 인자를 종합적으로 고려한 피로설계기준은 약 100~200 MPa 정도로 평가되었다. 따라서, 여러 가지 기하학적 형상과 재질을 기준으로 가스용접 이음재의 피로설계는 최대 주응력으로 설계

기준을 정하는 것이 더욱 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

- 1) STS301L의 가스용접 이음재에 인장 하중이 작용하는 경우, 용접방법에 관계없이 용접부 최대 주응력은 용접부 토우와 열 영향 부 경계부에서 발생하였다.
- 2) 가스용접 이음재에서 피로균열의 발생과 파단은 주로 응력이 집중되는 위치(hot spot point)에서 일어나므로 응력집중에 의한 최대 응력(hot spot stress)으로 설계기준을 정하는 것이 더욱 더 합리적인 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서 얻어진 필렛 용접, 링 용접, 플러그 용접이음재의 피로설계기준이 되는 피로한도범위는 약 100~200MPa 정도 평가 되었다.

Reference

- 1) Spot Welding Technology, JWS, pp.12-89, 2001.
- 2) J. A. Davidson, "A Review of the Fatigue Properties of Spot-Welded Sheet Steels," SAE Transactions, Vol.920, SAE 830033, 1983.
- 3) J. B. Kang, Fatigue Strength of the TS-Type Spot-welded Lap Joint of STS301L, M.S. Thesis, Sungkyunkwan University, 2004.
- 4) Automatic Technology Handbook-Experimental Assessment, JSAE, pp.81-105, 1991.
- 5) D. H. Bae, "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, 1990.
- 6) I. S. Son, A Study on the Fatigue Design Methods and Expert System Development for Thin Steel Spot Welded Lap Joint, Ph. D. Dissertation, Sungkyunkwan University, 1999.