

A study on optimum parameter Fatigue Design for Gas Welded joint of STS301L

Seungyeob Baek, and Dongho Bae

Key Words : Design of Experiments(실험계획), Fatigue strength(피로강도), Gas welding(가스용접), Main Effect(주효과), Interaction analysis(교호작용 분석)

Abstract

Stainless steel sheets are widely used as the structure 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 and ring type joint, it is important to obtain optimum design parameter information on gas welded joints. In this paper, analysis approach for fatigue test using experimental design are evaluated optimum factor in gas welded joint type and geometrical parameters of materials. Using these results, that factors applied to fundamental information for fatigue design.

1.

스테인리스 강(stainless steel)은 고온강도 및 내부식성(corrosion resistance)이 우수할 뿐만 아니라 성형성(formability)과 용접성(weldability)이 좋기 때문에 철도차량 차체, 자동차 배기 가스 계를 비롯하여 중화학설비, 원자력발전설비, 석유화학 설비 등 산업설비 재료로 많이 사용되고 있고, 그 밖의 사용범위도 다양화되고 있다.[1] 특히 철도차량과 자동차 차체의 경우는 냉간 압연한 스테인레스 강판을 성형 또는 가공해서 사용하고 있으며, 이들을 일체화하는 수단으로 전기저항 점용접(electric resistance spot welding)과 가스용접(gas welding)이 이용되고 있다. 용접부는 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이 외력에 의한 응력집중원(stress concentration)이 되는 것은 물론 용접

과정에서의 입열(heat input)로 인한 성분과 조직의 변화, 용접잔류응력(welding residual stress)발생 등에 의해 반복하중에 대한 피로강도(fatigue strength)가 모재(base metal)의 그것에 비해 훨씬 떨어진다. 따라서, 용접 구조물의 용접 이음부(weldment)에 대한 신뢰성(reliability) 확보는 구조물의 건전성과 내구성에 직접적인 영향을 미치므로, 용접구조물 설계 시에는 이러한 조건들을 만족시킬 수 있도록 설계되어야 할 것이다. 철도차량과 자동차와 같은 박판용접 구조물의 설계에 있어서는 무엇보다도 용접과정에서 발생하는 금속학적, 역학적 현상 외에도 용접이음부의 기하학적 인자(geometrical factors)들이 피로강도에 미치는 영향에 대한 정보를 확보하는 것이 매우 중요하고 필요하다. 지금까지 박판 용접 구조물의 피로설계(fatigue design)를 위한 연구들은 피로하중 범위-피로 수명(P-N_f) [2,3] (S-N_f) [3,4] (fatigue design criterion) 가 ,

† 책임저자, 학생회원, 성균관대학교 대학원 기계공학부

E-mail : baek@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7443 FAX : (031)290-5849

* 성균관대학교 대학원 기계공학부

(factor)

(fatigue data)

(statistical

analysis)

따라서 본 연구에서는 철도차량 차체제작에 적용되는 대표적 이음형상들을 시뮬레이션(simulation)하고 이들을 일체화하는 수단으로 여러 가지 가스용접을 적용하여 시편을 만들어 피로수명 데이터를 얻었다. 그리고 실험계획법(experimental design approach)을 이용하여 피로수명에 대한 최적 설계 파라메타(optimized design parameter)가 무엇인지 통계적으로 분석한 후 실제 실험을 통하여 획득된 피로수명데이터와 비교평가 하였다. 이러한 분석은 $\sigma-N_f$ 가

(optimized joining

condition)

2. 가

2.1 실험계획법[5~6]

실험의 특성치(characteristic value)에 대해서 영향을 미치고 있는 원인이 어떻게 관계되어 있는가를 이론 또는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 왜냐하면, 특성치에 영향을 미치는 원인은 다양하기 때문이다. 즉 시험편의 제작, 시험장치, 시험자의 숙련도 등의 차이에서 오는 데이터의 산포(scatter)가 있고, 환경조건의 변동, 표본오차(sampling error) 등에 의하여서도 영향을 받기 때문이다. 실험에 있어서 측정 데이터에 산포를 준다고 생각되는 많은 원인들 중에서 실험과정에서 조절 가능한 원인을 인자(factor) 라하고, 이들 인자의 특정한 조건을 인자의 수준(level)이라고 한다. 이러한 특성치와 인자를 고려한 실험계획법이란 주어진 실험에 대해 최소의 실험회수로 최대의 정보를 얻기위한 실험설계와 통계적 방법으로 실험 데이터를 분석하는 것이라 할 수 있다. 실험계획법에 적용되는 분산분석(ANOVA ; Analysis of Variance)은 특성치의 변동을 인자별로 분해하여 어느 인자가 큰 변동을 나타내고 있는가를 규명하는 방법으로써 각 파라메타들의 최적

수준 및 최적 조건을 선정하는데 주로 적용하고 있다.

2.2

2.2.1

본 연구에서는 Table 1 과 같이 철도차량 차체구조 제작에 있어서 가장 많이 사용하고 있는 가스용접 이음형태인 +자형 필렛이음(fillet joint), 플러그 이음(plug joint), 링 이음(ring joint)을 본 연구의 대상으로 선정하였다. 그리고 각 이음형태의 수평재(horizontal), 수직재(vertical), 수평재와 수직재를 일체화 시키는 용접방법 그리고 스트레스를 인자로 설정하고, 각 인자의 수준은 3 수준으로 하였다.

2.2.2 직교배열표

Table 2 는 실험에 사용된 직교배열표를 나타낸 것이다. 일반적으로 요인간의 직교성을 갖도록 실험계획하여 데이터를 구하면 같은 실험회수라도 검출력(power of test)이 더 좋은 검정을 할 수 있고, 정도가 더 높은 추정을 할 수 있다. 본 연구는 파라메타 연관성 연구를 위한 것이므로 실험의 회수를 줄이는 것보다 파라메타의 연관성 분석의 정확도를 위해 2 차 교호작용까지 분석한 완전요인 실험법(full factorial design)을 적용하였다.

Table 1 Factors and levels used in experiment

Factor Level	Horizontal	Factor		
		Vertical	Welding type	Stress
1	ST(1.5)	ST(1.5)	Fillet	30%
2		DLT(1.5)	Plug	50%
3		HT(1.5)	Ring	70%

Table 2 Total experimental numbers and effect analysis in table of orthogonal array

실험계획 종류	실험 회수	효과	
직교 배열표	인자분석 27회 X 3회반복 : 81회 (총 실험회수)	주 효과	○
		2차 교호효과	○

Table 3 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 4 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

2.3 실험설계 결과

Table 5 는 이음재 재질, 용접종류, 스트레스 수준을 특성치에 영향을 주는 인자로 선정하고, 각각의 인자에 3 가지 수준수를 적용하여 실험설계 한 것을 나타낸 것이다. 실험방법에 있어서는 수명에 대한 최적 파라메타의 연관성을 분석하기 위해서, 3 수준 완전 요인배치법(3-levels full factorial design)을 적용하였다. 따라서 총 실험회수는 3 인자 3 수준의 실험설계에 실험오차를 객관적 정량적으로 평가하기 위해 실험계획의 기본원리를 적용하여 각각 3 회 반복시험을 수행하는 것으로 해서 총 81 회 피로시험을 실시하였다. 피로시험의 판정기준을 파단시점으로 하였으며, 무한수명은 10⁷ cycles로 하였다. 실험설계 및 분석에 사용된 상용 프로그램은 MINITAB 14.0 을 사용하였다.

Table 5 Experimental design table

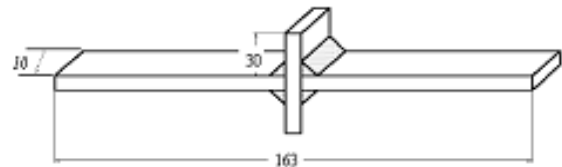
StdOrder	Horizontal	Factors		
		Vertical	Welding type	Stress
1	ST	ST	Fillet	30%
2	ST	ST	Fillet	50%
3	ST	ST	Fillet	70%
4	ST	ST	Plug	30%
5	ST	ST	Plug	50%
6	ST	ST	Plug	70%
7	ST	ST	Ring	30%
8	ST	ST	Ring	50%
9	ST	ST	Ring	70%
10	ST	HT	Fillet	30%
11	ST	HT	Fillet	50%
12	ST	HT	Fillet	70%
13	ST	HT	Plug	30%
14	ST	HT	Plug	50%
15	ST	HT	Plug	70%
16	ST	HT	Ring	30%
17	ST	HT	Ring	50%
18	ST	HT	Ring	70%
19	ST	DLT	Fillet	30%
20	ST	DLT	Fillet	50%
21	ST	DLT	Fillet	70%
22	ST	DLT	Plug	30%
23	ST	DLT	Plug	50%
24	ST	DLT	Plug	70%
25	ST	DLT	Ring	30%
26	ST	DLT	Ring	50%
27	ST	DLT	Ring	70%

3. (experimental design)

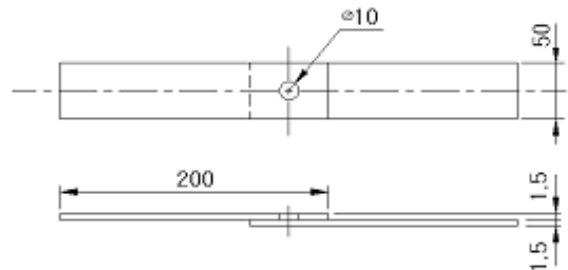
(parameter) 가

3.1

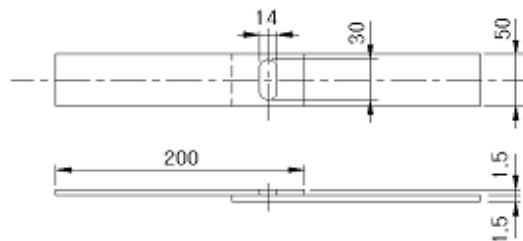
피로 시험편은 Tables 3, 4 의 STS301L 을 Fig. 1 (a)(b)(c)와 같은 형상으로 동종재 및 이종재간 가스용접한 이음재로써, 용접성 평가를 통하여 도출된 최적 용접조건으로 제작하였다. 피로시험장치는 서보유압식 피로시험기(MTS, 용량 : 10ton)와 면압식 지그(Jig)를 사용하였다..



(a) Fillet welded type



(b) Plug welded type



(c) Ring welded type

Fig. 1 Welded joint specimen

3.2

하중 반복속도를 25Hz 로 하고, 부하형태는 하

중비($R=P_{min}/P_{max}$)가 0($P_{min}=0$)인 정현파(Sine wave)로 하였다. 시편 종류별로 인장강도(tensile strength)의 70%, 50%, 30% 하중으로 JIS Z2273

및 JIS Z 3103 에 의거 피로시험을 수행하였고, 무한수명의 피로한도(fatigue limit)를 구하기 위해서는 10^7 Cycles에 이를 때까지 실험을 진행하였다.

Table 4 Maximum tensile strength of the various fillet welded joints

Welded joint type (plate thickness)		Max tensile strength N (Kg _f)
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)	≥ 22706 (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)

3.3

전체적인 STS301L 의 가스용접이음 형태에 따른 최적 파라메타 분석을 하였으며, Fig. 2 와 Fig. 3 은 인장강도의 30% 하중에서의 주 효과 인자분석을 나타낸 것이다. 가스용접 과정에서 야기된 용접부 용접 금속의 야금학적 변화와 2 절에서의 실험계획법에 의한 과단 및 무한수명 데이터 결과를 가지고 이음형상, 재질 등을 종합적으로 고려한 피로설계 최적인자는, 필렛용접의 경우 이중재인 ST+DLT 결합시편이 장 수명설계에 적합한 최적 결합형태로 분석되었다. 그리고 Fig. 3 의 수명에 대한 가스용접이음 형태와 재질에 대한 교호작용 (Interaction analysis)을 분석해 보았다. 100,000 cycles 이하에서 필렛 용접을 제외한 플러그 용접과 링 용접에서 주 효과에 대한 2 차 교호작용이 많이 나타났다. 그래서 플러그 용접과 링 용접에 대한 주 효과 분석 및 교호효과 분석을 Fig. 4, Fig. 5 와 같이 시도해 본 결과, 장수명에 영향을 주는 최적 파라메타는 플러그 용접한 동종재 ST+ST 로 분석되었다. 이상의 실험계획에 의한 결과는 Fig. 6 의 P-Nf 관계로 나타내었을 때도 비슷한 경향을 보였다. 따라서, 이와 같은 분석결과는 향후 수명에 대한 설계기준을 설정하는데 보다 효과적인 설계

가 가능할 것으로 판단한다.

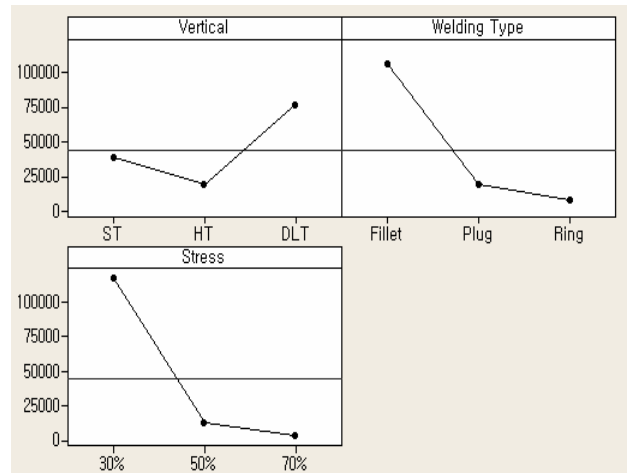


Fig. 2 Main effect factor analysis for sort of joint type and materials and stress condition

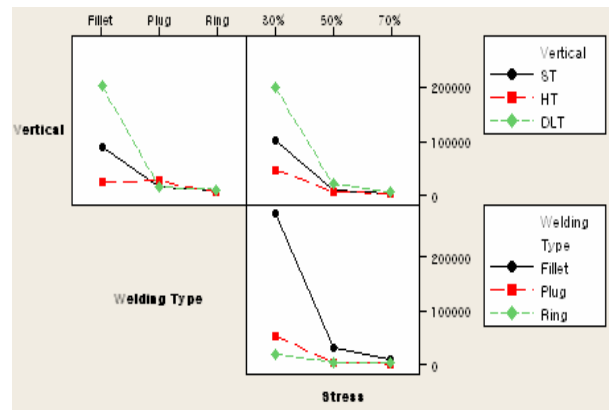


Fig. 3 Interaction analysis for sort of joint type and materials and stress condition

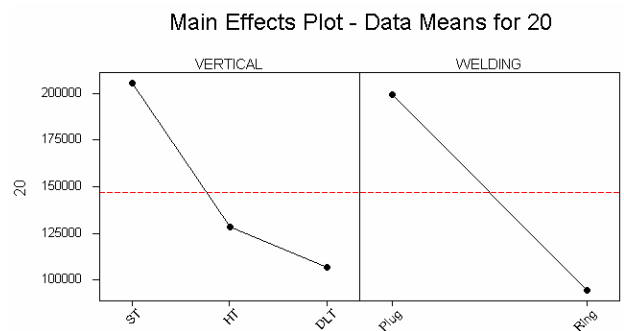


Fig. 4 Main effect factor analysis on plug and ring welded joint in 20% load condition

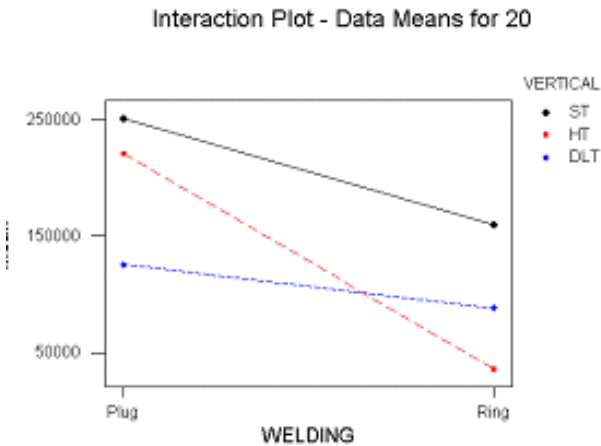


Fig. 5 Interaction analysis of plug and ring welded joint in 20% load condition

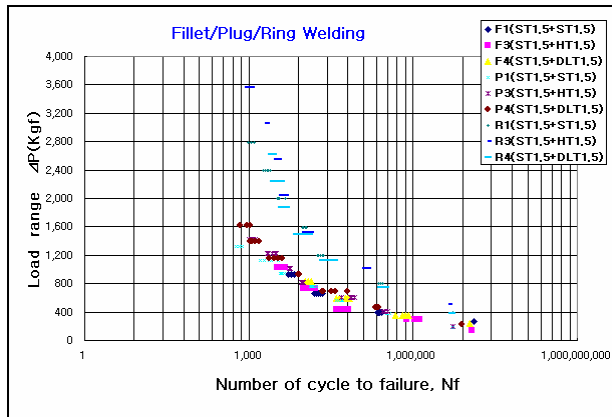


Fig. 6 P-Nf relation of various fillet welded joints

4.

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여, 철도차량에 적용되는 여러 형태의 용접 이음 형태들 중에서 수명(특성치)에 영향을 미치는 최적인자를 통계적으로 분석하여, 하중 별 최적 용접형태와 재료 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기하학적 인자가 동일하고 용접이음형태와 이음재의 재료조합을 고려했을 때, 장 수명(특성치)을 얻을 수 있는 최적 파라메타는 필렛 용접이며, 재료의 조합에 있어서는 ST+DLT 로 분석되었다.
- 2) 전체적인 용접이음 형태에 대해 장수명(특성치) 피로설계를 위한 용접방법을 분석한 결과, 필렛 용접의 피로수명은 플러그 용접 및 링 용접과 상이한 것으로 판단되는 반면, 플

러그 용접과 링 용접은 수명에 대해 비슷한 현상을 보이는 것으로 분석되었다.

- 3) 필렛 용접을 제외한 플러그 용접과 링 용접 이음형태의 피로수명에 대한 최적 파라메타를 비교분석한 결과, 동종재인 ST+ST 재질을 조합해서 플러그 용접을 한 경우가 장수명 설계에 가장 적합한 최적인자로 분석되었다.
- 4) 실험계획법에 의한 통계적 분석을 통하여 최적의 실험회수로 용접방법 및 재료, 기하학적 인자들의 상관관계를 고려한 최적 설계인자를 도출하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

5.

- (1) 恩晶杓, 申昌善, 1989, "自動車 構造學", 東新 出版社, pp. 14~15
- (2) 裴東鎬, 1991, "引張-剪斷荷重을 받는 一點 spot 熔接 이음재의 破壞力學的 疲勞強度評價", 自動車工學會 論文集 제 13 권 5 호, pp. 42~50
- (3) D. H. Bae, J. E. Niisawa and N. Tomioka, "Theoretical analysis of stress distribution of single spot welded lap joint under tension-shear load", Transection of JSAE, No. 39, pp. 627~630, 1988.
- (4) D. H, Bae, 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.
- (5) Hogg, R.V. and Ledolter, J., "Applied Statistics for Engineers and Physical Scientists", New York, CIP pp. 264~269, 1992.
- (6) "Automatic Technology Handbook-Experimental Assessment," JSAE, pp.81~105, 1991.