

실험계획법을 이용한 STS301L 이음재의 GMA 용접 자동화에 관한 연구

백 승 엽*† · 손 일 선**

*서울대학 자동차과

**오산대학 자동차기계계열

A Study on GMA Welding Automation of STS301L Joint using Design of Experiment

Seung Yeb Baek*† and Il Seon Sohn**

*Dept. of Automotive, Seoul University, Seoul 131-702, Korea

**Automotive and Mechanical Division, Osan University, Gyeonggi-do 17, Korea

†Corresponding author : sandos7@kornet.net

(Received March 5, 2010 ; Revised April 14, 2010, Accepted April 15, 2010)

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 GMAW (gas metal arc welding). For fatigue design of GMA welded joints such as fillet and plug, ring type joint, it is important to obtain optimum design factor information on GMA welded joints. In this paper, analysis approach for fatigue test using design of experiment are evaluated optimum factor in GMA welded joint type and geometrical parameters of materials. Using these results, that factors applied to fundamental information for fatigue design.

Key Words : Design of experiment, Fatigue strength, Gas metal arc welding, Main effect, Interaction analysis

1. 서 론

철도차량 차체의 성형 재는 모두 조질 압연(skin pass)한 고강도 스테인리스강(예를 들면, STS301L, STS304L 등) 냉연강판을 프레스(press) 가공해서 외판과 보강재를 결합하여 이들을 일체화하는 수단으로 주로 점용접과 가스용접이 이용되고 있다^{1,2)}. 따라서, 용접구조물의 용접이음부에 대한 신뢰성 확보는 구조물의 건전성과 내구성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 용접구조물은 이러한 조건들을 만족시킬 수 있도록 설계 되어야 할 것이다. 철도차량과 자동차와 같은 박판 용접구조물의 설계에 있어서는 무엇보다도 용접과정에서 발생하는 금속학적, 역학적 현상 외에도 용접이음부의 기하학적 인자들이 피로강도에 어떠한 영향을 미치고 있는가를 평가하는 것은 매우 중요하고 필요하다.

그러나 피로시험에 있어서 시험에 영향을 미치는 실험적 특성 치(피로수명)들에 대해서 어떤 원인들이 어떻게 관계되어 있는가를 이론 또는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 왜냐하면, 특성 치에 영향을 미치는 원인들은 워낙 다양하고 복합적인 영향을 미치기 때문이다. 예를 들어, 시험편 제작 시 발생하는 오차, 시험방법, 시험장치, 시험자의 숙련도 등의 차이에서 오는 데이터의 산포(scatter)가 있고, 환경조건의 변동, 표본오차(sampling error)등에 영향을 받기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 실제 철도차량에 적용되는 GMA 용접 이음재 가운데 대표적인 형상시편의 피로시험을 수행하기 위해 실험계획법(DOE; Design of Experiment)³⁾을 이용하여 수명에 직접적인 영향을 주는 피로설계인자(fatigue design factor)와 수준(level)을 설정하고, 실험의 규모를 결정한 후, 이들에 대한 피로시험을 수행하여 피로하중 범위-피로수명($\Delta P-N_f$) 관계

를 도출하여, 수치 해석적 유한요소법을 이용하여 용접 이음 재의 응력분포를 해석하여 $\Delta\sigma-N_f$ 관계로 재정리함으로써, 어떤 인자가 수명에 영향을 많이 주고 있는가를 파악하거나, 피로수명에 작은 영향만 미치는 요인들이 전체적으로 어느 정도의 영향을 미치는지 그리고 어떤 조건일 때 피로설계에 있어서 수명에 대해 적합한 설계조건 인지를 알아내고자 하였다. 방법으로는 실험을 수행하여 얻어진 실험데이터를 통계적 분석방법인 분산분석, 상관분석 등을 활용하여 수명에 대한 각각의 설계 인자들의 최적수준 및 조건들의 영향을 비교·검토하여 철도차량 차체의 경제적이고 합리적인 피로설계를 위한 기초정보로 사용하고자 하였다.

2. GMA 용접 이음 재의 실험설계

2.1 실험설계

실험의 목적을 달성하기 위해서는 실험을 하기 이전에 실험에 대한 충분한 계획이 없이는 소기의 목적을 달성하기 어렵다. 실험설계 시, 설계하고자 하는 피로 시험에는 여러 개의 피로설계인자(fatigue design factor)들과 그 설계 인자들이 취하는 수준이 있다. 또한, 이 설계 인자들이 어떠한 값을 취하느냐에 따라 분석결과와 정확성이 결정된다. 이러한 측면에서, 실험설계는 최적의 분석 데이터 값을 도출하기 위해 적합한 설계 인자와 수준의 조합을 결정하는 것이 무엇보다 중요하다.

설계 인자 값들의 조합을 구하는 방법에는 모든 인자들에 대한 가능한 수준들의 조합에 대하여 실험을 하는 완전요인 실험계획법(full factorial experiments)과 불필요한 교호작용(interaction)이나 고차의 교호작용을 구하지 않고 각 인자의 조합 중에서 일부분만 선택하여 실험을 하는 일부 실시법(fractional factorial design) 등이 있다⁴⁾.

본 연구에서는 최소의 실험횟수로 경제적인 검증을 하기보다는 설계 인자들의 연관성 분석의 정확도를 위한 것이므로 모든 경우의 수를 분석할 수 있는 완전요인 실험계획법을 적용하였고 요인 간의 직교성

(orthogonality)을 갖도록 Table 1과 같이 직교 배열표를 적용하였다. 또한, 각 인자 간의 교호작용 가운데 기술적으로 생각하여 무시할 수 있는 것을 주 효과(main effect)와 교락시켜 최소한의 실험으로 모든 경우에 대한 실험결과를 예측할 수 있도록 실험설계 하였다.

인자와 수준의 결정에는 용접방법에 따른 기하학적 인자와 재질의 연관성에 대한 설계 인자를 분석하기 위해 철도차량 차체구조에서 가장 많이 볼 수 있는 GMA 용접방법(필렛, 플러그, 링 용접)과 이음 재의 재질 그리고 인가된 피로하중을 주요인자로 설정하였다.

동일한 조건의 기하학적 인자에서 서로 다른 용접방법을 적용한 이음 재의 수명데이터에 대한 설계 인자분석은 용접부의 피로균열발생 기구에 대한 영향인자(effect factor)를 파악하는데 매우 중요하다^{5,6)}. 따라서, 철도차량에 적용되는 가장 얇은 두께일 때 수명에 대한 영향을 분석하기 위해 시험편 두께를 1.5 mm로 동일하게 적용하였으며, 분석의 일관성을 갖기 위해 동일한 모재(base metal) ST(Special Tensile)를 적용하였다. 교호작용은 2차 교호작용까지 분석하였다. 재료는 철도차량 차체재료로 사용되는 STS301L 판재를 적용하였고, 재료의 화학적 조성 및 기계적 성질은 Table 4, 5에 나타나 있는 입력자료를 사용하였다. 또한, 실험설계 및 데이터분석에 사용된 상용화 통계프로그램은 MINITAB 14.0을 사용하였다.

2.2 표준 실험설계 결과

실험 오차를 객관적·정량적으로 평가하기 위해 실험 계획법의 5가지 기본원리인 랜덤의 원리, 반복의 원리, 블록의 원리, 교락의 원리, 직교의 원리를 적용하여, 2.1절에 설명한 바와 같이 Table 2와 같은 인자와 수준을 결정하여, Table 3과 같은 시험편의 조합들에 대한 실험설계 결과를 도출하였다. 그리고 피로시험을 수행하기 위해 최대인장강도의 70%, 50%, 30%, 20% 하중으로 4회 반복시험을 하여 총 시험횟수는 108회 조건별 시험을 수행하는 것으로 설계하였다.

Table 2 Table of experimental design for optimal parameter level determination

Table 1 Tables of experimental design for orthogonal arrays

DOE	Number of test	Effect Analysis	
Orthogonal Array	1) Factor Analysis: 27	Main effect	0
	2) Replicate test: 4	Second interaction	0
	3) Number of total test: 108		

Level	Factor	Factor			
		Horizontal	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 3 Design of Experiments

Std Order	Horizontal	Factors		
		Vertical	Welding type	Stress
1	ST(1.5)	ST(1.5)	FILLET T.	30
2	ST(1.5)	ST(1.5)	FILLET T.	50
3	ST(1.5)	ST(1.5)	FILLET T.	70
4	ST(1.5)	ST(1.5)	PLUG T.	30
5	ST(1.5)	ST(1.5)	PLUG T.	50
6	ST(1.5)	ST(1.5)	PLUG T.	70
7	ST(1.5)	ST(1.5)	RING T.	30
8	ST(1.5)	ST(1.5)	RING T.	50
9	ST(1.5)	ST(1.5)	RING T.	70
10	ST(1.5)	HT(1.5)	FILLET T.	30
11	ST(1.5)	HT(1.5)	FILLET T.	50
12	ST(1.5)	HT(1.5)	FILLET T.	70
13	ST(1.5)	HT(1.5)	PLUG T.	30
14	ST(1.5)	HT(1.5)	PLUG T.	50
15	ST(1.5)	HT(1.5)	PLUG T.	70
16	ST(1.5)	HT(1.5)	RING T.	30
17	ST(1.5)	HT(1.5)	RING T.	50
18	ST(1.5)	HT(1.5)	RING T.	70
19	ST(1.5)	DLT(1.5)	FILLET T.	30
20	ST(1.5)	DLT(1.5)	FILLET T.	50
21	ST(1.5)	DLT(1.5)	FILLET T.	70
22	ST(1.5)	DLT(1.5)	PLUG T.	30
23	ST(1.5)	DLT(1.5)	PLUG T.	50
24	ST(1.5)	DLT(1.5)	PLUG T.	70
25	ST(1.5)	DLT(1.5)	RING T.	30
26	ST(1.5)	DLT(1.5)	RING T.	50
27	ST(1.5)	DLT(1.5)	RING T.	70

Table 4 Chemical composition of materials(Wt, %)

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 5 Mechanical properties of materials

Material	Symbol	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
STS301L	LT	≥ 215.6	≥ 548.8	≥ 44
	DLT	≥ 343	≥ 686	≥ 39
	ST	≥ 411.6	≥ 754.6	≥ 34
	HT	≥ 686	≥ 931	≥ 19

LT: Low Tensile, DLT: Deadlite Tensile
ST: Special Tensile, HT: High Tensile

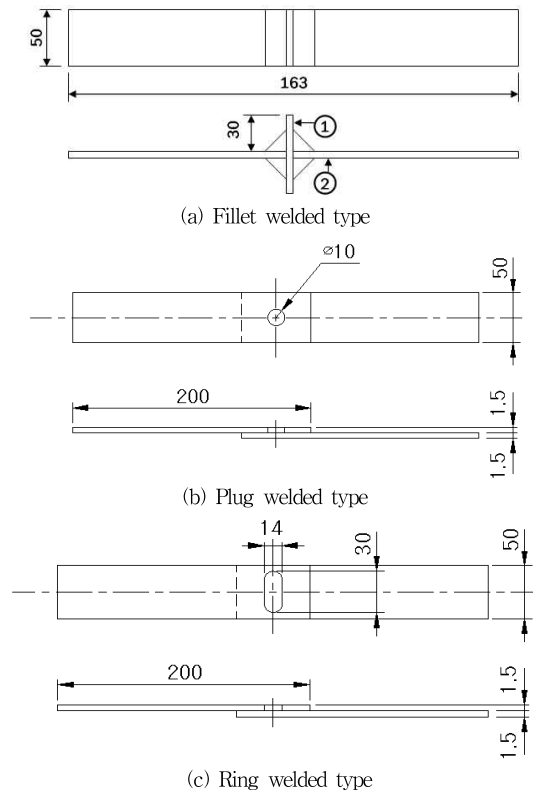


Fig. 1 Simulated model of GMA welded joints

3. 실험계획법에 의한 피로강도평가 및 최적설계 인자분석

3.1 시험편 및 실험장치

피로시험편의 화학적 조성과 기계적 성질은 Table 4, 5와 같으며 Fig. 1과 같은 형상으로 제작하였고, 용접조건은 Table 6에서 제시된 바와 같이 용접성 평가를 통하여 도출된 최적용접조건으로 동중재 및 이종 재간 GMA 용접을 하여 시험편을 제작하였다. 그리고 용가 재(filler metal)의 규격인 AWS ER308L에 대한 화학적 조성과 기계적 성질을 Table 7, 8에 나타내었다. 피로시험장치는 서보 유압식 피로시험기(MTS, 용

량; 10 ton)와 면압식 지그(Jig)를 자체 설계하여 제작하였다.

3.2 시험조건 및 시험방법

본 연구에서는 하중 반복속도를 25Hz로 하고, 부하 형태는 하중 비($R=P_{min}/P_{max}$)가 0($P_{min}=0$)인 정현파

Table 6 GMA welding condition and process

Materials		STS 301L	
Welding Method		GMAW Semi-auto robot	
Welding condition	Welding type	Fillet	Plug/Ring
	Pass	1Pss/4position	1Pss/1position
	Current(A)	100~120	100~120
	Voltage range(V)	12~13	12~13
	Travel speed (cm/min)	8~10	8~10
	GAS(%)	Ar98%	Ar98%
	Flow rate(l/min)	18~20	18~20
	Filler metal	AWS ER 308L	AWS ER 308L

Table 7 Chemical composition of AWS ER308L, (Wt, %)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Remarks	
					B.M	GAS(%)
0.02	0.35	1.60	10.1	19.9	SUS301L	Ar98%+ 2%O ₂

B.M : Base Metal

Table 8 Mechanical properties of AWS ER308L

Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Impact Strength J(Kg _f · km)		FN
		0°C	-20°C	
560	42	90(9)	50(5)	10-14

Table 9 Maximum tensile strength of GMA welded joints

Welding joint type (plate thickness)		Maximum tensile Strength N(Kg _f)
Fillet type	ST(1.5)+ST(1.5)	≥12,985(1,325)
	ST(1.5)+HT(1.5)	≥14,308(1,460)
	ST(1.5)+DLT(1.5)	≥11,652(1,189)
Plug type	ST(1.5)+ST(1.5)	≥19,727(2,013)
	ST(1.5)+HT(1.5)	≥22,706(2,317)
	ST(1.5)+DLT(1.5)	≥18,502(1,888)
Ring type	ST(1.5)+ST(1.5)	≥39,921(3,990)
	ST(1.5)+HT(1.5)	≥49,921(5,094)
	ST(1.5)+DLT(1.5)	≥36,691(3,744)

(Sine wave)로 하였다. 무한수명의 피로 한도(fatigue limit)를 구하기 위해서는 시편을 종류별로 인장강도(tensile strength)의 70%, 50%, 30%, 20% 하중으로 JIS Z 2273 및 JIS Z 3103에 의거 피로시험을 수행하였고, 10⁷ cycles에 도달할 때 까지 실험을 진행

하였다. 그리고 각 시편의 피로수명(fatigue life)은 시편이 완전히 파단 되었을 때의 하중 반복수로 하였다. GMA 용접의 용접종류별 최대인장강도는 Table 9와 같이 평가되었으며 피로시험결과는 Fig. 3과 같이 평가되었다.

3.3 피로강도평가

Fig. 2는 동종재 및 이종재간 GMA 용접한 이음 재의 피로강도를 $\Delta P-N_f$ 선도로 나타낸 것이다. Fig. 3의 결과는 GMA 용접 이음 재의 재질 및 이음형상 등의 피로강도를 정량적으로 비교·평가할 수는 있지만, GMA 용접과정에서 야기된 용접부 용접금속의 야금학적변화와 용접 잔류 응력의 조합된 영향으로 이음형상 및 재질 등을 종합적으로 고려한 피로설계인자를 결정하는데 지장을 줄 만큼 데이터의 분산 폭($\Delta P=1,500 \sim 5,000$ N)이 너무 크기 때문에 합리적인 설계기준을 설정하기가 매우 어렵다. 또한, 설정된 설계기준의 신뢰성 문제도 제기될 수 있기 때문에 이러한 문제를 개선하기 위해서, 각 용접이음 형태별 용접 열영향부에서 피로균열이 발생 및 성장하는 위치의 최대 주응력으로 피로강도를 평가하는 것이 타당하다는 연구결과⁷⁾를 바

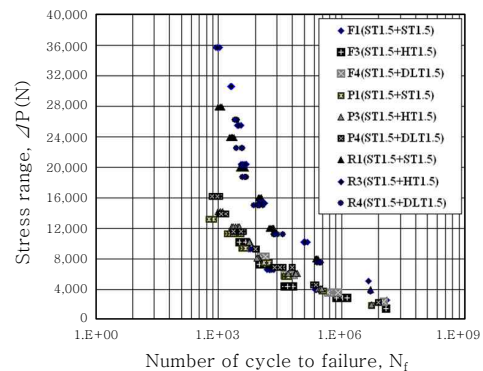


Fig. 2 $\Delta P-N_f$ relation of the various welded joints

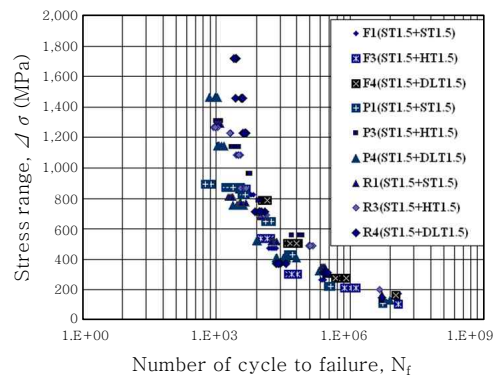


Fig. 3 $\Delta \sigma-N_f$ relation of the various welded joints

탕으로, 용접부 주변의 최대 응력 값을 응력분포해석을 수행하여 응력진폭($\Delta\sigma$)과 피로수명(N_f) 관계를 도출하여 피로데이터를 재정리한 결과, Fig. 3의 결과를 얻었다.

피로데이터의 분산이 Fig. 2의 $\Delta P-N_f$ 선도에 비해서 피로설계기준을 정할 수 있을 만큼 데이터의 분산 폭이 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있었으며, GMA 용접 이음형태와 각 이음 재의 기하학적 인자를 종합적으로 고려한 피로설계기준이 약 100~200 MPa 정도로 평가되었다.

따라서, GMA 용접 이음재에서 다양한 기하학적 형상과 재질들을 고려한 피로설계는 최대 주응력으로 설계기준을 정하는 것이 효과적임을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과를 바탕으로 최적설계 인자를 합리적으로 도출할 수 있을 것으로 판단한다.

3.4 최적설계 인자분석

설계 인자를 분석하기 위해서 완전요인 실험계획법을 적용하여 3인자 3수준으로 분산분석을 하였다. Fig. 4는 최대인장강도의 30% 하중에 대한 필렛, 플러그, 링 용접 이음 재의 주 효과 분석결과를 나타낸 것이고, Fig. 5는 최대인장강도의 30% 하중에서 필렛, 플러그, 링 용접 이음 재의 교호작용(interaction analysis)을 분석한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 4의 경우, 피로수명에 대한 기하학적 요소와 용접형태를 고려한 종합적인 최적설계 인자는 필렛 용접, ST+DLT 재료의 용접 시편이 장 수명설계에 가장 적합한 결합 형태로 분석되었다. 이러한 결과는 최대인장강도의 70%, 50%하중 일 때도 동일하게 분석되었다. 이것은 Table 5의 재료의 기계적 성질에서 알 수 있듯이 DLT의 인장강도 및 항복강도가 ST와 HT보다 상대적으로 낮기 때문에 DLT 판재의 변형이 ST와 HT보다 상대적으로 커서 수명향상에 영향이 더 미치는 것

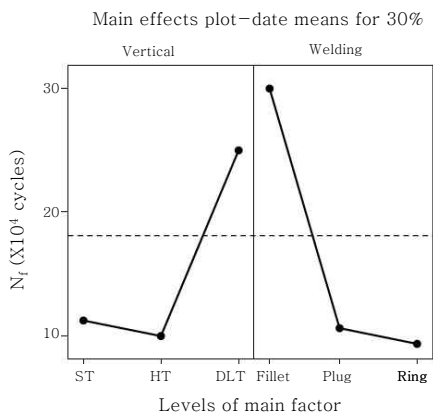


Fig. 4 Main effect factors analysis for sort of welded and materials in load of 30%

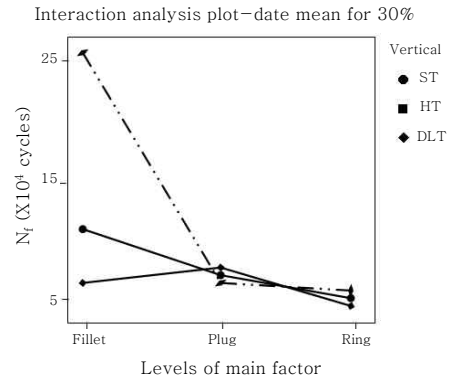


Fig. 5 Interaction analysis of the fillet, plug welded and ring welded in load of 30%

으로 분석되며, 실제 피로시험의 결과인 Fig. 3의 $\Delta\sigma-N_f$ 관계와 유사한 경향성이 나타나는 것으로 분석되었다.

Fig. 5의 경우, 용접 종류별 재질에 대한 교호작용 분석을 한 결과이다. 교호작용이란 2개 이상의 주요설계 인자들이 특정한 인자 수준의 조합에서 일어나는 효과를 의미하며, 변수끼리 상호작용하여 발생하는 효과의 합으로, 예측할 수 없는 결과가 나타나는 것을 의미한다. 따라서, Fig. 5의 결과를 보면, 최대인장강도의 30% 하중을 가했을 때, 150,000 cycles 이하에서 플러그와 링 용접은 각각의 재료(ST, HT, DLT)에서 수명에 대한 교호작용이 존재하여 피로수명에 영향을 많이 주는 것으로 분석되었으나, 필렛 용접에서는 각각의 재료에 대해서 교호작용이 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 그리고 최대인장강도의 70%하중 보다는 하중이 낮을수록 교호작용이 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 이것은 수명에 영향을 미치는 재료와 용접메커니즘이 필렛 용접은 플러그, 링 용접과는 다른 것으로 분석된다. 실제 용접방법에서도 Table 6에서 제시된 바와 같이 필렛 용접은 4패스(4Pass/1Position)이고, 플러그와 링 용접은 1패스(1Pass/1Position)로 용접 시 발생하는 입열량(heat input)으로 인한 조직과 성분이 모재에 영향을 미치는 정도가 필렛 용접과 플러그, 링 용접은 서로 상이함을 알 수 있다.

Fig. 6, 7은 최대인장강도의 20% 하중이 작용했을 때 플러그와 링 용접에 대한 주 효과 분석 및 교호작용 분석을 나타낸 것이다. 수명향상에 영향을 주는 인자는 링 용접으로 접합한 이종재 ST+DLT에서 최적설계 인자로 분석되었다. 교호작용에는 하중의 70%, 50%의 높은 하중일 때, DLT 재료는 ST와 HT재료와는 교호작용이 적은 것으로 분석되나, 하중의 20%인 낮은 하중으로 갈수록 ST, HT, DLT 재료의 상호 교호작용이

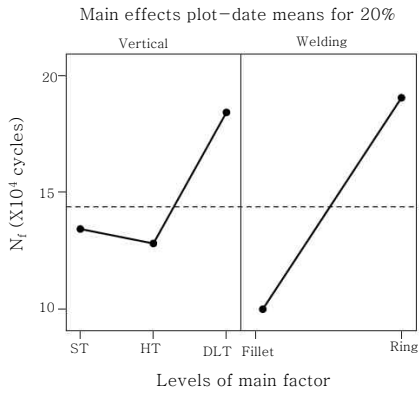


Fig. 6 Main effect factor analysis of the plug and ring welded in 20% of load

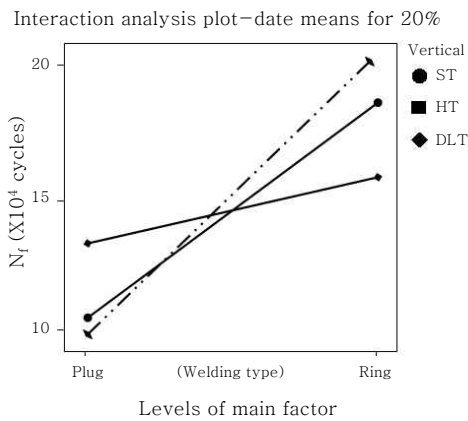


Fig. 7 Interaction analysis of the plug and ring welded in 20% of load

많이 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 플러그와 링 용접에 있어서는 낮은 하중일수록 접합방법에 따른 재료의 조합의 선택이 장 수명 피로설계에 영향을 많이 미치는 것으로 분석되었다. 이와 같은 분석결과는 향후 설계자가 플러그와 링 용접에 있어서 장 수명 설계기준을 설정하는데 더욱 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단한다.

4. 결 론

실험계획법을 이용하여, 철도차량에 적용되는 여러 형태의 용접이음형태들 중에서 피로수명에 영향을 미치는 설계 인자와 수준들을 선정하여, 통계적으로 분석한 결과 최적설계 인자에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기하학적 인자가 동일하고 용접이음형태와 이음재의 재질조합을 고려했을 때, 장 수명을 얻을 수 있는 최적설계 인자는 필렛 용접이며, 재질조합에 있어서는 ST+DLT 재료로 분석되었다. 이러한 결과는 실제 피로시험을 통한 $\Delta\sigma-N_f$ 관계와 전반적인 경향과 크기가 잘 일치함을 알 수 있었다.

2) GMA 용접 이음재에 대한 $\Delta P-N_f$ 선도를 최대 응력 $\Delta\sigma-N_f$ 관계로 정리하면, 기하학적 인자와 재료의 기계적 성질을 종합적으로 고려한 통일된 피로설계기준을 설정할 수 있을 것으로 판단되며, 다양한 GMA 용접 이음재의 피로 한도는 약 100~200 MPa 정도로 평가되었다.

3) 플러그 용접과 링 용접 이음형태의 피로수명에 대한 최적설계 인자를 비교·분석한 결과, 이종재인 ST+DLT 재료에 링 용접을 한 경우가 장 수명 설계에 가장 적합한 인자로 분석되었으며, 높은 하중보다는 낮은 하중일수록 접합방법 및 재료의 조합이 피로수명에 복합적인 영향을 많이 미치는 것으로 분석되었다.

4) 실험계획법을 적용하여 실험설계를 한 후, 피로데이터를 통계적으로 분석하면, 피로시험에 대한 각각의 설계 인자 정보를 구체적으로 얻을 수 있으며, 이러한 결과는 설계자가 피로설계를 할 경우 객관적이고 합리적인 설계 인자를 결정할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Spot welding Technology, *JWS*, 12'89.
2. James, A. Davidson. : "A Review of the Fatigue Properties of Spot-Welded Sheet Steels", SAE830033 (SAE TRANS), 9, 1983
3. Seo, S. K. : "Analysis of Degradation Data Using Robust Experimental Design", Dong-A University, 2004(in Korea)
4. Taguchi, G. : "Systems of Experimental Design", Kraus International Publications, 1-2, 1987 103~164
5. Kang, J. B. : "Fatigue Strength of the TS-Type Spot-welded Lap Joint of STS301L", Thesis of Master, Sungkyunkwan University, 2004. (in Korean)
6. "Automatic Technology Handbook-Experimental Assessment", *JSAE*, 1991, 81~105
7. Sohn, I. S., Jung, W. S., Lee, H. K. and Bae, D. H. : "Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of IB-Type Spot Welded Lap Joint under Tension-Shear Load", *KSAE*, 6-5, 1998, 20~27 (in Korean)