

TS형 박강판 용접 구조물의 자동화설계를 위한 피로특성에 관한 연구

백승엽*, 배동호⁺

(논문접수일 2011. 10. 24, 수정일 2011. 11. 10, 심사완료일 2011. 11. 11)

A Study on Fatigue Characteristics for Design Automation of TS-Type Spot Welded Lap Joint

Baek-Seung Yeb*, Bae-Dong Ho⁺

Abstract

Cold-rolled carbon steel sheets are commonly used in railroad car or commercial vehicles such as the automobile. These are mainly fabricated by spot welding which is a kind of electric resistance welding. But fatigue strength of spot welded joint is lower than that of base metal due to high stress concentration at nugget edge of the spot welded part. And fatigue strength of them is especially influenced by not only geometrical and mechanical factors but also welding conditions of the spot welded joint. So for fatigue design of gas welded joints such as TS-type joints, it is necessary to obtain design information on stress distribution at the weldment as well as fatigue strength of spot welded joints. And also, the influence of the geometrical parameters of spot welded joints on stress distribution and fatigue strength must be evaluated. And analysis approach for fatigue test using design of experiment are evaluated optimum factor in TS-type welded joint and geometrical parameters of materials. Using these results, that factors applied to fundamental information for automation of fatigue design.

Key Words : Design of experiment(실험 계획법), The source of stress concentration(응력 집중원), Automation(자동화), Analysis of variance(분산분석), Orthogonality(직교성)

1. 서론

전기저항(Electric Resistance)을 이용한 용접기술은 자동차, 철도차량, 항공기 등의 박판접합에 널리 사용되고 있는 보편적 기술^(1,2)로써 고정밀도를 요하는 정밀부품생산 뿐 만 아니라 제품의 고급화 및 대량생산의 요구에 따라 이와 같은 용접기술의 사용은 더욱더 증가하고 있다. 특히 화석에너지 소비에 대한 제한적 조건 때문에 자동차 생산업체들은 차체 경량화에 따른 연비절감(fuel cost down) 기술개발에 주력하고 있으며⁽³⁾ 이러

한 박판을 접합하는데 있어서 점용접 기술은 다른 접합수단에 비해 생산성이 높고, 경제적이며 자동화가 용이하기 때문에 능률적이지만 강판의 두께가 점점 얇아짐에 따라 용접 점 수 역시 생산성 및 경제성의 요구로 제한을 받고 있다. 이러한 제한성은 차체가 받는 각종 정적·동적 외력으로부터 더욱 가혹한 응력상태에 높게 되며 직경 수 mm 점상의 점 용접부는 외력에 대한 응력 집중원(the source of stress concentration)이 되어 피로균열의 발단이 되어왔다.

또한 지금까지 점용접 이음재의 피로강도에 대한 국·내외 연

* 대림대학교 기계설계학과 (sandos7@kornet.net)
주소: 431-715 경기도 안양시 동안구 비산동 526-7
⁺ 성균관대학교 기계공학과

구는 보통 인장전단(TS, Tensile-Shear)과 십자인장(CT, Cross-Tension) 형태에 한정되었다. 점 용접부에 전달되는 하중은 TS형의 경우 전단력이 발생되고 CT형은 인장력이 발생되어 최대 인장강도(maximum tensile strength)나 응력확대계수(stress intensity factor)를 구해 피로강도를 정량적으로 평가하는 것이 일반적인 경향이였다⁽⁴⁾. 따라서 점용접부의 효과적인 피로강도를 확보하기 위해서는 우선 점용접 이음재에 대한 응력분포상황을 해석하고 피로강도를 평가하여 장 수명 피로 설계기준을 결정하는 것은 매우 중요하다⁽⁵⁾. 그러나 대부분의 경우는 피로하중-피로수명($\Delta P-N_f$) 관계를 기초로 한 것이 대부분이며 이것은 시편의 형상에 따른 피로수명의 비교평가는 가능하나 데이터 분산 폭이 크기 때문에 기하학적 인자(geometrical factors)와 역학적 인자를 동시에 고려한 피로설계기준(fatigue design criterion)을 설정하기에는 한계가 있음이 지적되어왔다⁽⁶⁾. 또한 피로강도(fatigue strength)에 영향을 미치는 실험적 특성 치들에 대해서 어떤 원인들이 어떤 관계가 있는지를 이론 도는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 왜냐하면 특성 치에 미치는 인자들이 워낙 다양하고 복잡한 조건들의 조합으로 영향을 미치기 때문이다.

그래서 이러한 문제점을 개선하고자 본 연구에서는 용접구조물의 피로하중에 대한 구조적 안전성 측면의 단점을 개선, 보완하기 위하여 유한요소법을 이용하여 용접부의 구조해석을 실시하고 통계적 방법인 실험계획법(DOE)을 적용해서 분산분석(analysis of variance), 상관분석(correlation analysis) 등의 데이터 분석법을 활용하여 구조물의 강도를 향상 시킬 수 있는 최적의 설계변수 조합 및 조건들의 영향을 비교·검토하여 차체의 경제적이고 합리적인 피로설계 자동화를 위한 기초정보로 사용하고자 하였다.

2. 점용접 이음재의 실험설계

2.1 실험설계

기존의 실험계획법은 할 수 있는 범위의 모든 실험조건으로 해석을 하기 때문에 많은 시간과 경비가 요구되었다. 또한 잡음 인자들을 고려하지 못하기 때문에 결과에 대한 신뢰성이 많이 결여되고 설계변수들의 최적화가 쉽지 않았다. 이에 비해 부분배치법(factorial design)을 적용한 실험계획은 직교 배열표(table of orthogonal arrays)를 이용하기 때문에 기존의 실험계획보다 훨씬 적은 실험의 횟수로 중요한 설계인자를 단계적으로 결정할 수 있으며 무엇보다도 실험적 결론의 재현성이 우수하고 경제적이다. 또한 부분배치법은 효과적인 실험배치에 따른 계획실험으로 제어 불가능한 환경조건이나 기계적 오차 등의 잡음인자들이 데이터에 미치는 영향의 정도를 통계적으로 정확하게 평가하기 위한 방법이다⁽⁷⁾.

Table 1 Table of DOE for orthogonal arrays

D.O.E	Number of test	Effect Analysis	
Orthogonal Array	1) Factor Analysis; 81	Main effect	○
	2) Replicate Test; 3	Second interaction	○
	3) Number of total test; 243		

D.O.E; Design of Experiment

본 연구에서는 최소의 실험횟수로 경제적이고 효과적인 검증을 하기보다는 설계인자들의 연관성 분석의 정확도를 위한 것이므로 모든 경우의 수를 분석할 수 있는 완전요인 실험계획법을 적용하였고 요인간의 직교성(Orthogonality)을 갖도록 Table 1과 같이 직교 배열표를 적용하였다. 그리고 각 인자간의 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. 그리고 인자(factors)와 수준(levels)의 결정에 있어서는 용접방법에 따른 기하학적 인자와 재질의 연관성에 대한 설계인자를 분석하기 위해 동적구조물 차체구조에서 가장 많이 볼 수 있는 TS형 점용접 이음재의 재질 그리고 인가된 피로하중, 너깃직경(nugget diameter), 두께(thickness), 겹침 길이(lapped length) 등의 기하학적 인자들을 주요인자로 설정하였다. 교호작용(interaction)은 2차까지 분석하였으며 재료는 동적구조물 차체재료로 사용되는 SPCC(Steel Plate Cold-rolled Coil), SPCE(Steel Plate Cold-rolled Deep Drawn Extra) 판재를 적용하였고 실험설계 및 데이터분석에 사용된 상용화 통계프로그램은 MINITAB 14.0을 사용하였다.

2.2 SN비와 분산분석

2.2.1 SN비

잡음은 제품 특성치의 변형을 초래하여 결과에 대한 신뢰성을 떨어뜨린다. 특히 장기간 피로시험을 통한 파괴·역학적 접근방법에 있어서는 이러한 문제들이 발생되어 어렵게 획득한 피로데이터의 결과에 대한 신뢰성을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 잡음의 특성 치에 대한 주요인자의 특성을 부각시켜 시스템을 안정화 되도록 도입한 것이 SN비(Signal to Noise ratio)이며, SN비는 특성 치에 따라서 망목(Nominal-is- best), 망소(Smaller-the-better), 망대(Larger-the-better), 특성으로 나누어진다. 본 연구에서는 부재에 발생하는 최대응력에 대한 사용수명과 관계되어 있으므로 식 (1)에 주어진 망대특성의 SN비를 이용한다.

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

n ; 실험횟수 y_i ; i번째 특성 값

그리고 A인자의 수준별 SN비는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_A = \frac{1}{n_A} \sum_{i=1}^{N_A} [(SN)_{A_i}]_i \quad (2)$$

여기서, M_A 는 i인자가 수준인 경우 SN 비 평균이고, n_A 는 직교 배열표 상에서 A인자의 해당수준의 출현 횟수이다. 식 (1)와 식 (2)을 이용하여 인자의 수준별 SN 비가 가장 큰 수준들의 인자조합이 최적조건의 조합이 된다.

2.2.2 분산분석

분산분석은 설계인자들의 최적조건을 선정하여 설계에 응용하기 위하여 SN 비를 이용하는 통계적 분석법이다. 특성치의 산포를 제곱 합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱 합을 실험과 관련된 인자마다의 제곱 합으로 분해하여 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법으로 아래의 식들로 구성되어 있다.

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^N n_i^2 - CT \quad (3)$$

(SS_{total} ; 전체실험에 대한 SN비의 총합)

$$SS_A = \frac{1}{m_A} \sum_{i=1}^{L_A} T_{A_i}^2 - CT \quad (SS_A ; \text{제곱 합}) \quad (4)$$

$$CT = \frac{T_{SN}^2}{N} \quad (CT ; \text{수정 항}) \quad (5)$$

$$DOF_A = L_A - 1 \quad (DOF_A ; \text{수정 항}) \quad (6)$$

$$V_A = \frac{SS_A}{DOF_A} \quad (V ; \text{제곱평균}) \quad (7)$$

$$P_A(\%) = \frac{V_A}{V_{total}} \cdot 100 \quad (P ; \text{기여도}) \quad (8)$$

2.3 표준 실험설계 결과

실험오차를 객관적 정량적으로 평가하기위해 각 수준의 조합에서 3회 반복을 하여 시험을 수행하는 것을 조건으로 설계하였고 2개 이상의 인자에서 발생하는 특정한 인자수준의 조합인 교호작용을 2차까지 고려하였다. 그리고 수명에 영향을 주는 인자의 선정과 인자의 수준을 Table 2와 같이 선정하였으며 Table 3에 나타난 바와 같이 직교 배열표에 각 요인별로 배치하여 배치된 실험순서에 따라 피로시험과 유한요소해석을 수행하였다. 피로시험은 최대인장강도의 70%, 50%, 10%의 하중으로 총 시험횟수는 243회 조건별 시험을 수행하는 것으로 설계하였다.

Table 2 Table of DOE for optimal parameter level determination

Joint; TS (Tensile Shear type)				
Level	Main Factor			
	Plate T. T (mm)	Plate W. W (mm)	Lapped L. 2L (mm)	Percent of T.S. (%)
1	1.0	20	20	30
2	2.0	30	30	50
3	3.0	50	40	70

Plate T.; Plate Thickness Lapped L.; Lapped Length
Plate W.; Plate Width T.S.; Tensile Stress

Table 3 Design of Experiments

Std Order	Main Factors			
	Plate T. (mm)	Plate W. (mm)	Lapped L. (mm)	Tensile S. (%)
1	1.0	20	20	3level
2	1.0	30	30	3level
3	1.0	50	40	3level
4	1.0	20	20	3level
5	1.0	30	30	3level
6	1.0	50	40	3level
7	1.0	20	20	3level
8	1.0	30	30	3level
9	1.0	50	40	3level
10	2.0	20	20	3level
11	2.0	30	30	3level
12	2.0	50	40	3level
13	2.0	20	20	3level
14	2.0	30	30	3level
15	2.0	50	40	3level
16	2.0	20	20	3level
17	2.0	30	30	3level
18	2.0	50	40	3level
19	3.0	20	20	3level
20	3.0	30	30	3level
21	3.0	50	40	3level
22	3.0	20	20	3level
23	3.0	30	30	3level
24	3.0	50	40	3level
25	3.0	20	20	3level
26	3.0	30	30	3level
27	3.0	50	40	3level

3. 피로강도평가 및 설계인자분석

3.1 시험편 및 실험장치

본 연구에 사용된 피로시험편은 냉간압연강판인 SPCC, SPCE를 Fig. 1과 같은 형상으로 Table 3과 같은 기하학적 조건으로 점 용접한 이음재로서 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 4, Table 5에 나타내었고, 용접성 평가를 통하여 도출된 Table 6과 같이 최적 용접조건으로 제작하였다. 피로시험장치는 서보 유압식 피로시험기(MTS, 용량 : 10ton)를 사용하였고 시험편을 고정하기 위한 면압식 지그(Jig)는 자체 설계하여 제작하였다.

3.2 시험조건 및 시험방법

피로시험 조건은 시험편의 강성과 피로시험기의 형식을 고려

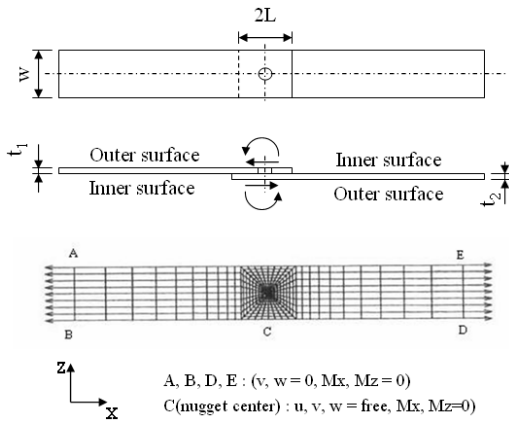


Fig. 1 Simulated model of TS-type spot welded lap joints

Table 4 Chemical composition(% wt) of materials

Materials	C	Si	Mn	P	S	Al
SPCC	0.043	0.002	0.3	0.004	0.008	-
SPCE	0.004	-	0.21	0.017	0.021	0.05

Table 5 Mechanical properties materials

Materials	Yield S. (MPa)	Tensile S. (MPa)	Elongation (%)
SPCC	≥ 238.3	≥ 341.6	≥ 45
SPCE	≥ 183.1	≥ 320.8	≥ 48

Yield S.; Yield Strength / Tensile S.; Tensile Strength

Table 6 Welding condition of specimen (RWMA C-class)

Welding time (cycles)	Electrode Force (N)	Welding current (A)
85	13,720	11,500

해서 하중의 반복속도를 25Hz로 정하고 부하형태는 TS형 시험편의 특성을 고려하여 하중 비($R=P_{min}/P_{max}$)가 0인 완전 편진 정현파(sine wave)로 하였다. 피로수명(N_f)은 시험편의 내 표면 부하 측 너깃 단에서 발생 및 성장된 균열이 시험편의 외 표면에 나타나서 완전히 파단 될 때까지의 사이클(cycles) 수로 결정하였다. 또한 피로한도(fatigue limit)는 최대인장강도(tensile strength)의 70%, 50%, 10% 하중으로 JIS Z 2273 및 JIS Z 3103에 의거 10^7 cycles까지도 피로균열이 발생하지 않는 하중으로서 정상조건 최대에 이를 때까지 피로시험을 수행하였으며 동일조건 동일시험편의 피로시험을 3회 반복 수행하였다. 반복횟수에 대한 결정은 향후 연구과제로 확률론적 통계기법을 적용한 임의의 조건에 대한 수명예측을 하기위한 것으로 정규분포해석을 위한 최소한의 반복횟수로 정하였다.

3.3 피로강도평가

Fig. 2는 기하학적 조건들을 다양하게 제시한 동종재 및 이종재간 점 용접한 이음재의 피로강도를 $\Delta P-N_f$ 선도로 나타낸 것이고 Fig. 3은 피로균열이 발생 및 성장하는 위치의 최대 주응력으로 나타낸 것으로 진폭과 피로수명 관계를 도출하여

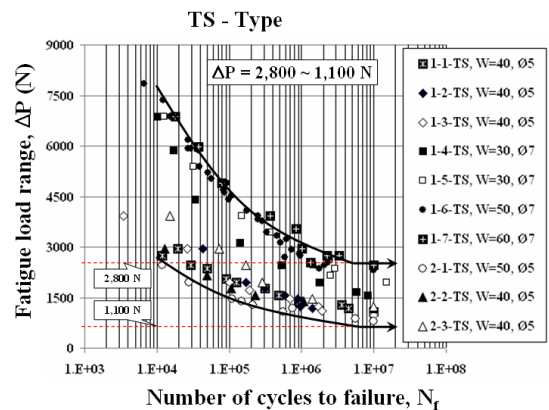


Fig. 2 $\Delta P-N_f$ relation of the various welded joints

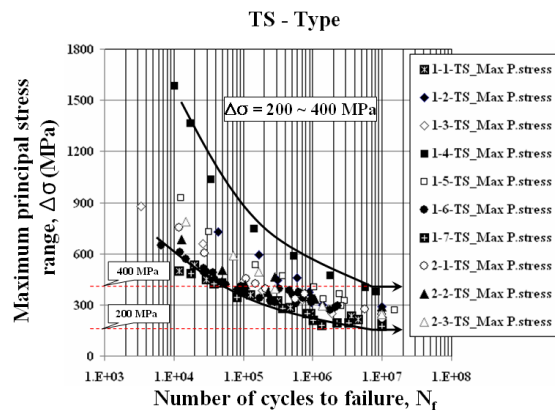


Fig. 3 $\Delta \sigma-N_f$ relation of the various welded joints

$\Delta\sigma_{max}-N_f$ 선도로 나타낸 것이다. Fig. 2의 경우 용접부 너짓 직경, 판 폭, 판 두께 등에 따른 피로강도와 수명 데이터로써 기하학적 조건에 따른 하중에 대한 상대적 비교평가는 가능하지만 전체적인 데이터 분산 폭($\Delta P=1,100\sim 2,800N$)이 너무 크기 때문에 실 구조물 설계에 있어서 종합적인 설계기준을 정하기 매우 곤란함을 알 수 있다. 반면, Fig. 3은 시편에 실제 가해진 각 피로하중에 대하여 유한요소해석을 수행하여 피로 균열 발생점인 용접부 너짓 단 최대주응력으로 재정리한 결과인데 이것은 $\Delta P-N_f$ 관계보다 저 하중-장 수명 영역에서 데이터의 분산 폭($\Delta\sigma=200\sim 400MPa$)이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다. 따라서 점용접 이음재에서 다양한 기하학적 형상과 재질들을 고려한 피로설계는 최대 주응력으로 설계기준을 정하는 것이 합리적이고 효과적인 설계가 가능할 것으로 판단한다.

4. 최적설계인자 분석 및 결과

시험편의 기하학적 인자들이 수명에 영향을 미치는 설계인자들의 상관관계를 분석하기 위해서 Table 3과 같은 완전요인 실험계획을 적용하여 분산분석을 수행하였다. 그 결과 너짓직경

과 판 두께가 동일한 상태에서 다양한 판 폭과 최대인장하중의 변화에 대한 상관관계의 주 효과(main effect) 분석과 인자들 간의 교호작용(interaction analysis)을 분석한 결과 Fig. 4, Fig. 5와 같은 결과를 얻었다.

Fig. 4의 주 효과 분석에서는 너짓 단 최대주응력에 대한 판 폭의 영향을 보면 판 폭이 증가함에 따라 최대 주응력이 일정하게 증가하고 있기 때문에 최대주응력에 대한 판 폭의 영향은 크지 않는 것을 알 수 있으며 Fig. 5의 인자들 간의 교호작용은 최대인장강도의 50% 이상 하중을 가했을 경우 70,000cycles 이하에서 인자들 간의 교호작용이 수명에 영향을 많이 미치는 것으로 분석되었으나 하중이 낮을수록 인자간의 교호작용이 수명에 대한 영향이 적은 것으로 분석되었다.

Fig. 6은 판 두께와 하중이 수명에 영향을 미치는 주 효과 분석을 나타낸 것이고 Fig. 7은 교호작용을 분석한 결과이다. Fig. 6의 결과는 판 두께가 증가하면 너짓 단 최대주응력은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 판 두께가 두꺼워지면 굽힘 강성이 증가하여 굽힘 변형이 적어지기 때문인 것으로 판단되며 각 인자들 간의 교호작용은 Fig. 7과 같이 인장강도의 30% 이상 하중에서 두께가 클수록 교호작용이 존재하여 수명

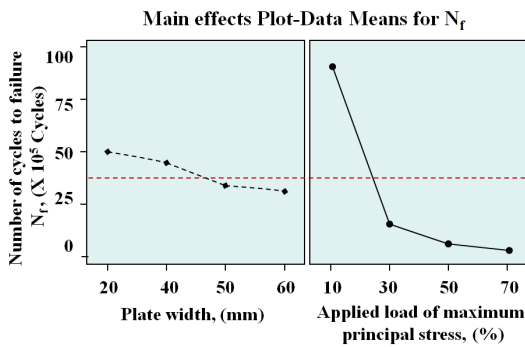


Fig. 4 Main effect factors analysis for sort of plate width and applied load of maximum principal stress

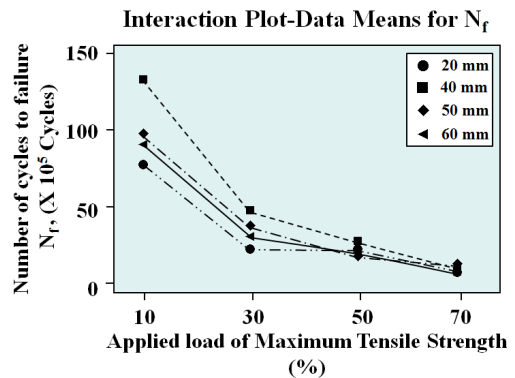


Fig. 5 Interaction analysis of plate width and applied load of maximum principal stress

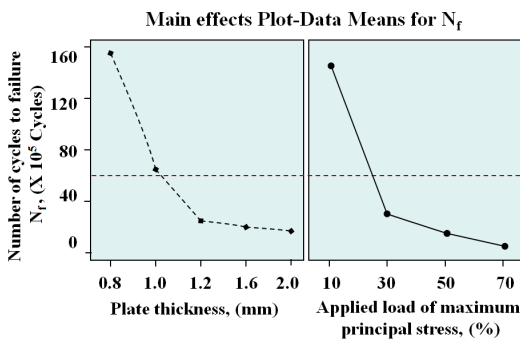


Fig. 6 Main effect factors analysis for sort of plate thickness and applied load of maximum principal stress

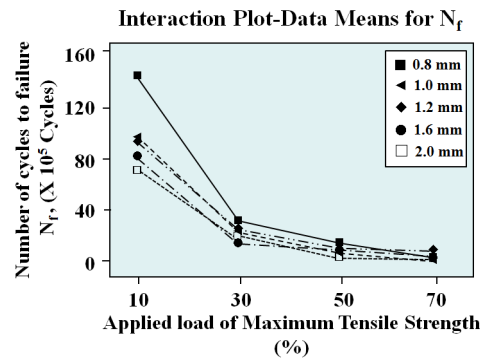


Fig. 7 Interaction analysis of plate thickness and applied load of maximum principal stress

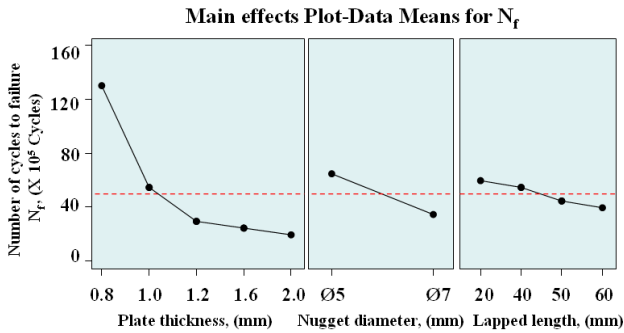


Fig. 8 Main effect factors analysis for sort of plate thickness and nugget diameter, lapped length

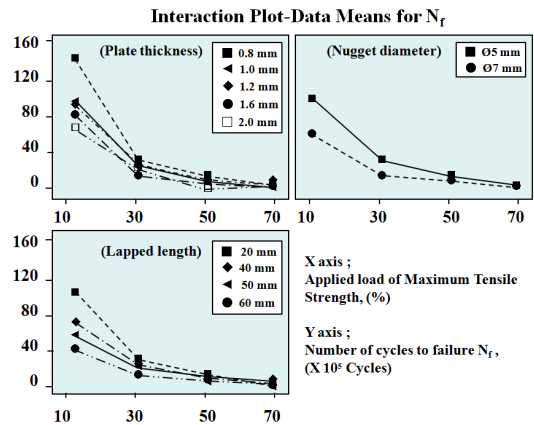


Fig. 9 Interaction analysis of plate thickness and nugget diameter, lapped length

에 영향을 많이 미치는 것으로 분석되었으나 두께가 얇고 하중이 낮을수록 수명에 미치는 영향의 정도가 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 판 두께의 기하학적 요소는 설계 시 수명에 영향을 많이 미치는 주요인자로 분석된다.

Fig. 8의 경우는 두께, 너깃직경, 겹침 길이에 따른 주 효과 분석을 나타낸 것이고 Fig. 9는 각각의 인자들 상호간에 작용하는 교호작용을 나타낸 것이다. 주 효과 분석에서는 두께가 상이한 경우 얇은 판재의 변형과 너깃 단 응력집중이 크게 발생하며 판 두께가 얇을수록, 너깃직경과 겹침 길이는 작을수록 최대주응력이 증가하는 것으로 분석되었다. 그리고 3가지 인자 중 수명에 가장 많은 영향을 미치는 인자들의 순서는 판 두께, 너깃 직경, 겹침 길이 순서인 것으로 분석되었다. 교호작용은 최대인장강도의 30% 이상 하중에서 상호 교호작용이 존재하여 수명에 영향을 많이 미치는 것으로 분석되었다.

5. 결론

동적 구조물 설계 시 피로수명에 영향을 미치는 여러 가지 기하학적 설계인자들을 통계적인 방법인 실험 계획법에 의해 체계적으로 분석한 결과 다음과 같은 정량적 최적설계 인자에 대한 결론을 얻었다.

- (1) TS형 점용접 이음재의 피로데이터는 $\Delta P-N_f$ 관계로 정리하는 것보다 $\Delta \sigma_{max}-N_f$ 관계로 정리하는 것이 종합적으로 고려한 통일된 피로설계기준을 도출하는데 효과적임을 알 수 있으며 다양한 점용접 이음재의 피로한도는 약 200~400MPa 정도로 평가되었다. 또한 $\Delta \sigma_{max}-N_f$ 관계를 이용하면 임의의 특정 크기를 갖는 TS형 spot 용접이음재의 임의의 피로설계기준을 예측할 수 있을 것으로 판단한다.
- (2) 장 수명설계에 대한 여러 가지 기하학적 인자들의 주 효과

분석은 너깃 단 최대주응력에 대한 판 폭의 영향은 크지 않은 것으로 분석되었으나, 판 두께에 따른 최대 주응력은 굽힘 강성에 영향을 많이 주기 때문에 장 수명 설계에 중요한 인자로 분석되었다. 또한 판 두께, 너깃직경, 겹침길이 등이 동시에 작용했을 때의 주 효과 분석은 판 두께가 얇을수록 너깃 직경과 겹침 길이는 작을수록 최대주응력이 증가하는 것으로 분석되었다. 반면 교호작용에 있어서는 최대인장강도의 30% 이상의 하중에서는 인자들 간의 교호작용이 수명에 영향을 많이 미치는 것으로 분석 되었다.

- (3) 실험 계획법을 적용하여 실험설계를 한 후 실험에 의해 획득된 피로데이터를 통계적으로 분석하면, 시험편의 기하학적 인자들에 대한 각각의 설계인자 정보의 연관성을 구체적으로 얻을 수 있으며 이러한 결과는 설계자가 피로설계를 할 경우 장 수명설계에 객관적이고 합리적인 설계인자를 결정할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) Richard, F., 1999, *Performance Welding Handbook*, America Welding Society, pp. 543~552.
- (2) Del, E. J., 2003, *Resistance Welding Manual*, Resistance Welder Manufacturers' Association, Philadelphia, pp. 93~102.
- (3) Baik, S. Y., and Sohn, I. S., 2010, "A Study on GMA Welding Automation of STS301L Joint using Design of Experiment," *Journal of KWJS*, Vol. 28, No. 4, pp. 403~408.
- (4) Lee, Y. B., Chung, C. S., Kim, Y. H., and Kim, H. K., 1997, "Fatigue Life Prediction of Spot Welds in SPCC," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*,

pp. 137~142.

- (5) Kang, J. B., 2003, *Fatigue Strength of the TS-Type Spot-Welded Lap Joint of STS301L*, Thesis of Master, Sungkyunkwan University, Republic of Korea.
- (6) Bae, D. H., 1990, "Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of A Strength Spot Welded Lap Joint Subject to Tensile Shear Load," *Trans of The KSME*, Vol. 13, No. 5, pp. 42~50.
- (7) Taguchi, G., 1987, *Systems of Experimental Design*, Kraus International Publications Inc, Japan, pp. 103~164.