

최대응력을 이용한 STS301L 다중접합 점용접 이음재의 피로해석

남 태 헌¹⁾ · 정 원 석²⁾ · 배 동 호^{*3)}

현대자동차¹⁾ · 성균관대학교 대학원 기계공학과²⁾ · 성균관대학교 기계공학부^{*3)}

Fatigue Analysis of Spot-welded Multi-Lap Joint of STS301L Using the Maximum Stress

Teahun Nam¹⁾ · Wonseok Jong²⁾ · Dongho Bae^{*3)}

¹⁾Hyundai Motor Co., 772-1 Jangduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi-do 445-716, Korea

²⁾Graduate School, Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi-do 440-746, Korea

^{*3)}School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi-do 440-746, Korea

(Received 28 August 2002 / Accepted 1 October 2003)

Abstract : Since stainless steel sheets have good mechanical properties, weldability, appearance and corrosion resistance, they are commonly used as one of the structural materials of the railroad cars or the commercial vehicles which are manufactured by the spot welding. Among the many kinds of spot welded lap joints, it can be found that multi-lap joints are employed in their body structure. But, fatigue strength of these joints is lower than that of base metal due to high stress concentration at the nugget edge of spot weld and is considerably influenced by welding conditions as well as the mechanical and geometrical factors. Thus, it is necessary to establish a reasonable and systematic design criterion for the long life design of the spot-welded body structures. In this paper, the stress distribution and deformation around the spot-welded multi-lap joints subjected to tensile shear load was numerically analyzed. Also, the $\Delta P-N_f$ curve was obtained by fatigue tests. Using these results, $\Delta P-N_f$ curves were rearranged in to the $\Delta\sigma-N_f$ relation with the maximum stress at nugget edge of spot weld.

Key words : Tensile shear load(인장-전단하중), Spot-welded multi-lap joint(다중 접합 점용접 이음재), Spot welding(점용접), Nugget(너깃), Stress concentration(응력집중), Fatigue strength(피로강도), Maximum stress(최대응력)

Nomenclature

E : young's modulus (Mpa)
FEM : finite element method
2L : lapped length of specimen (mm)
 ΔP : applied load range
 σ_{max} : maximum principal stress (Mpa)

Subscripts

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

1. 서론

전동차 차체는 프레스(press) 가공된 다양한 박판 성형재를 조합해서 용접 등의 부분접합에 의하여 조립되고 있다. 그리고, 전동차의 구조는 일반적으로 측면골조(side frame), 천장골조(roof frame), 바닥골조(under frame) 및 단부골조(end frame)로 구성되

*To whom correspondence should be addressed.
bae@yurim.skku.ac.kr

어 있으며, 각각의 골조는 외판(skin plate)과 결합되어 구조적 강성(structural rigidity)을 지닌 전체구조로 제작된다.

구조 보강재 및 골조(frame)류 등을 구성하는 성형재는 주로 두께 1.0 ~ 4.5 mm 정도의 스테인레스강(STS301L) 판재를 프레스 가공해서 외판과 보강재를 결합하거나, 폐단면(closed section) 부재에 조립되고 있으며, 이들을 일체화하는 수단으로는 점용접과 가스용접이 적용되고 있다. 특히, 철도차량 제작 및 조립과정에는 다양한 두께의 판재를 2겹 또는 3겹 이상 다중으로 겹쳐서 점 용접해야 하는 경우가 많다.

그런데, 3겹 이상 다중 겹침으로 접합한 점 용접 이음재의 경우는 2겹 겹침 점 용접 이음재에 비해 변형(deformation)과 응력분포 상황이 상이할 뿐만 아니라, 점 용접부의 형상이 직경 수 mm인 점상이기 때문에 외력에 의한 응력 집중원(stress concentration source)이 됨으로써, 반복하중에 의한 피로강도(fatigue strength)가 모재(parent metal)의 그것에 비해 훨씬 떨어져서 피로균열(fatigue crack)의 발달이 되고 있다. 이 때문에 점 용접에 의해 제작되는 철도차량 차체의 강성과 내구성이 점 용접부의 피로강도에 의해 결정되는 경우도 적지 않다.

그래서, 철도차량 차체의 내구성 평가는 물론 장수명 설계기준(long life design criterion)을 확보하기 위해서는 3겹 이상 다중 겹침 점 용접 이음재에 대한 응력분포 상황을 해석하고 피로강도를 평가하는 것이 매우 중요하고 필요한 사항이다. 하지만, 실차 차체 구조의 강도를 직접 평가하는 것은 어렵기 때문에, 실차 차체와 동일한 구조적 특성을 갖는 시뮬레이션(simulation) 시험편을 고안하고, 용접 구조의 피로강도 평가 기준량을 구하여 안전설계에 적용하는 것이 일반적인 수법이다.^{1,2)}

따라서, 본 연구에서는 실제로 철도차량 차체에 적용되는 각종 다중접합 점 용접 이음재 형상 가운데 대표적인 이음 모델을 도출하였다. 그리고, 이들이 인장-전단하중(tensile shear load)을 받는 경우에 대한 응력해석을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 피로강도를 평가함으로써, 다중접합 점 용접 이음재의 경제적이고 합리적인 피로해석(fatigue analysis)

을 위한 기초로 사용하고자 하였다.

2. 변형과 응력분포의 유한요소해석

2.1 해석모델

Fig. 1과 같은 TS형(tensile shear type) 점 용접 이음재에 인장-전단하중이 작용하면, 점 용접 너깃(spot welded nugget)에는 면 내 전단력(in-plane shear force)과 면 외 굽힘모멘트(out-of-plane bending moment)가 분담하중으로 작용하게 되어, 박판 특유의 복잡한 변형을 야기시킨다. 그리고, 피로균열은 일반적으로 부하측 내 표면 너깃단(nugget edge)에서 발생 및 성장하여 외 표면으로 나타나기 때문에, 내 표면 너깃단 주위의 응력분포와 변형을 해석하는 것은 피로균열 발생기구를 파악하는데 매우 중요하다.^{3,4)}

따라서, 본 연구에서는 철도차량 차체재료로 사용되는 Tables 1, 2의 STS301L 판재의 다중 겹침 점 용접 이음재에 대한 피로해석을 목적으로, 대표적인 점 용접 이음 형태인 Fig. 1(a)의 2L형(2 sheets lapped type)을 기본모델로 하고, Fig. 1(b),(c)의 3L과 4L의 시뮬레이션 모델(simulation model)을 제작하였다.

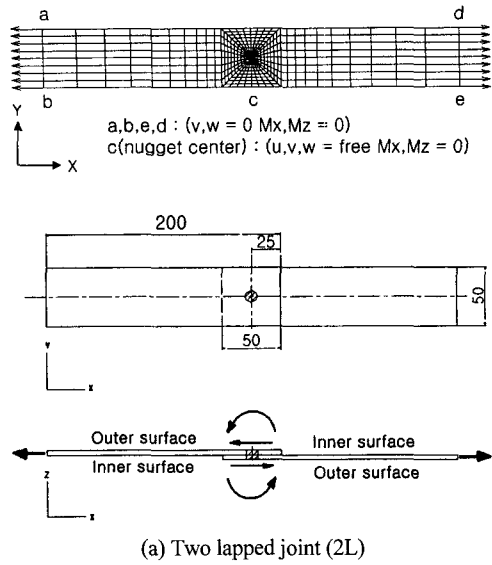
그리고, 이 모델들은 실제 판재제작 과정에서의 열처리 및 압연방법에 따른 재료성질과 철도차량 제작현장에서 실제 적용하고 있는 판의 두께, 너깃 직경, 겹침 매수를 고려하여 Table 3과 같이 다양하게 시험편을 제작하였다.

Table 1 Chemical composition of STS301L

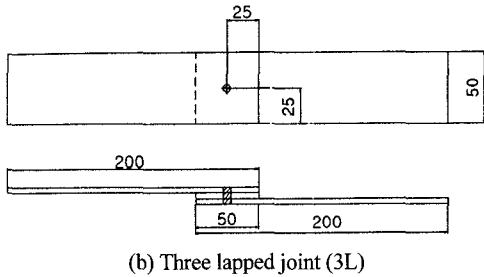
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.03	1.00	2.00	0.045	0.03	6.0~8.0	16.0~18.0	0.2

Table 2 Mechanical property of specimen

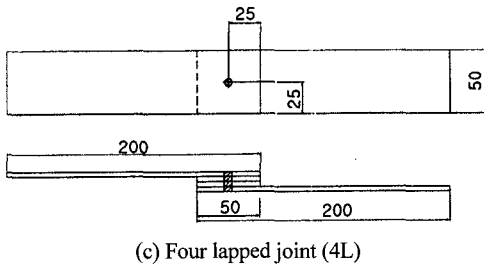
Symbol	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Processing management
LT	≥215.6	≥548.8	≥441	Solution treatment
DLT	≥343	≥686	≥392	Skin pass mill
ST	≥411.6	≥754.6	≥343	
HT	≥686	≥931	≥196	



(a) Two lapped joint (2L)



(b) Three lapped joint (3L)



(c) Four lapped joint (4L)

Fig. 1 FEM model for TS type specimen subject to tensile shear load

2L, 3L, 4L의 점 용접 이음재 모두 판의 중첩으로 인한 오프셋(offset)의 영향을 고려하기 위해 JIS Z 3138 (method for fatigue testing for spot welded joint)에 의거하여 실제적인 3차원 유한요소해석 모델을 작성하였으며, 각 모델 공히 상·중·하 평판의 요소 분할은 동일하게 하였다. 그리고, 각 시편의 좌·우, 상·하의 대칭성을 고려하고, 시편의 양단에 가해진 정적 인장하중이 직경 수 mm의 점 용접부에 전단력

Table 3 Specimen types for FEM

Lapped sheets	Lapped type (plate thickness)	Nugget diameter (mm)
2L	LT(4)+LT(4)	10
	LT(4)+HT(4)	10
	ST(2)+ST(2)	7
	DLT(2)+ST(2)	7
3L	ST(2)+ST(2)+ST(2)	7
	DLT(2)+ST(1.5)+HT(4.5)	7
	DLT(2)+DLT(2)+ST(2)	7
	DLT(2)+ST(2)+ST(2)	7
4L	DLT(2)+DLT(2)+ST(2)+ST(2)	7
	LT(4)+HT(4.5)+ST(1.5)+DLT(2)	6

LT: Low tensile, HT: High tensile
DLT: Deatlite tensile, ST: Special tensile

으로 전달될 수 있도록 유한요소 해석의 경계조건을 공히 Fig. 1(a)의 2L의 경우와 동일하게 설정하였다. Table 3에 나타낸 바와 같은 3가지 직경의 용접 너깃부는 8절점의 육면체 요소를 적용하였으며, 너깃부에 해당하는 상·하 평판의 내 표면 절점을 동일 절점으로 하여 너깃을 작성하고, 너깃부 두께는 이음재 전체 두께가 되도록 하였다. 그리고, 용접부 너깃은 점 용접 과정에서 야기되는 발열(heat generation)에 의한 열변형(thermal strain)과 전극 가압력에 의한 소성변형(plastic strain)으로 모재와는 상이한 기계적 성질을 지닌다. 때문에, 유한요소해석 시 너깃부에 대한 종탄성계수(Young's modulus)등의 기계적 성질을 모재와 달리해야 타당하나, 너깃 직경이 수 mm의 점상이기 때문에 실제로 너깃부의 기계적 성질을 정량적으로 직접 측정하기가 매우 어렵다. 그리고 유한요소해석 시 너깃부의 종탄성계수를 모재와 동일시해서 해석하더라도 너깃단 주위의 전체적인 응력분포에는 큰 영향이 없음을 밝힌 배 동호 등⁵⁾의 연구결과를 바탕으로, 본 연구에서는 모재와 등가인 종탄성계수 E값을 용접 너깃부에 입력하여 해석하였다. 해석에 사용된 요소는 3차원 육면체 요소(solid element)로서 각 이음 형상별(요소 수, 절점 수)은 2L형(1164, 1922), 3L형(1164, 1922), 4L형(1164,1922)이다.

모델링(modeling)과 탄·소성 해석은 상용프로그램인 IDEAS와 ABACUS를 사용하였다.

2.2 해석결과

Figs. 2~4는 Fig.1의 TS형 다중 겹침 모델들의 형상을 겹침 길이(lapped length) = 50 mm, 판폭(W) = 50 mm로 일정하게 하여 제작하고, 피로실험 과정에서 가해진 피로하중을 초기 인장력으로 가했을 때 나타나는 시편의 변형과 응력분포 상황을 예시한 것이다. 실제 겹침 형태와 판재의 두께에 관계없이 인장-전단하중에 의해 발생하는 최대응력(hot spot stress)은 Figs. 2~4와 같이 시편 내 표면의 부하측 너깃단에서 발생됨을 확인할 수 있었다. 그리고, Table 3의 2L, 3L 및 4L형 시편의 응력집중 발생위치는 판 두께와 STS301L의 기계적 성질에 관계없이 시편 내 표면의 부하측 너깃단으로 일치하나, 각각의 변형 형태와 최대응력 값은 상이함을 알 수 있었다.

먼저, Fig. 2와 같은 2L형 시편들은 인장-전단력으로부터 유도된 면의 굽힘모멘트에 의해 너깃을 중심으로 점 용접 이음개의 전형적인 변형 형태인 면외 굽힘변형(out-of-plane bending deformation)이 일어나지만, 대체로 판 두께가 두꺼워지면 판의 굽힘강성(bending rigidity)이 증가하여 굽힘변형과 최대응력값은 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고, Fig. 3과 같은 3L형 시편들의 상·하 외부 판재도 2L형과 같이 면외 굽힘모멘트에 의해 굽힘변형을 일으키며, 판 두께가 얇을수록 굽힘변형이 커지고, 이에 비

례해서 너깃단의 최대응력도 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 중간 판재에서는 판 두께에 관계없이 거의 변형이 일어나지 않음을 확인할 수 있었는데, 이것은 중간판재는 무부하 상태이고, 상·하 외부 판재가 인장-전단력에 의해서 Fig. 3의 변형도에서 보듯이 굽힘모멘트에 의해 너깃을 중심으로 회전굽힘변형을 일으키기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4의 4L형의 경우도 2L 및 3L의 경우와 유사한 변형형태를 나타내나, 두께가 다른 시편들의 경우 전체두께의 증가에 의한 굽힘 모멘트(bending

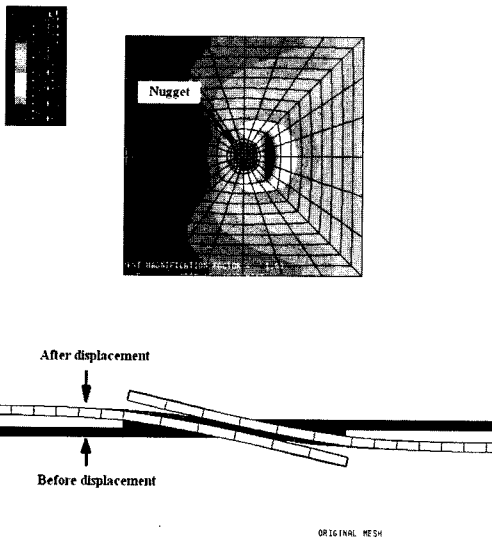


Fig. 2 Stress distribution around the nugget edge on the inner surface and deformed shape of 2L type joint (ST+ST)

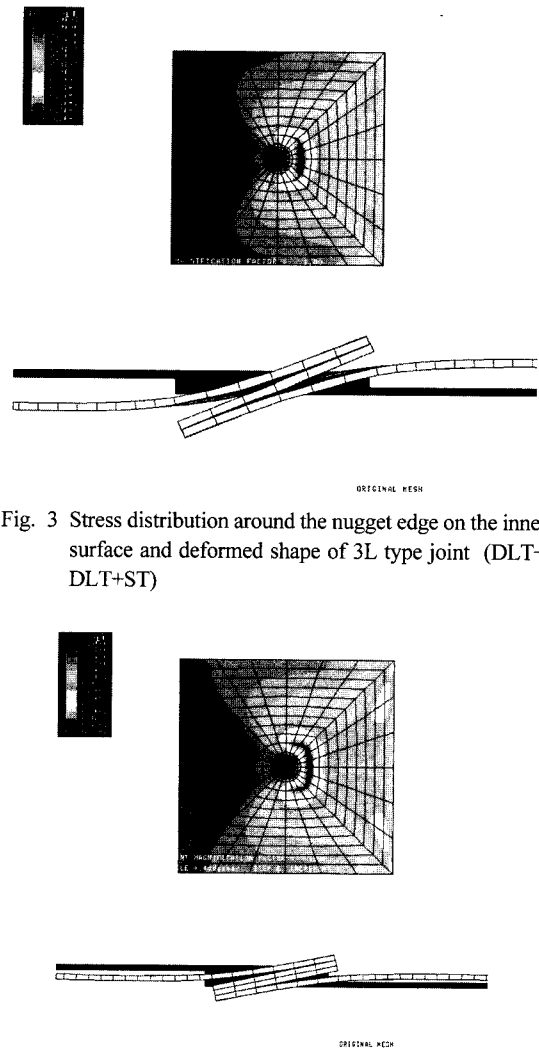


Fig. 3 Stress distribution around the nugget edge on the inner surface and deformed shape of 3L type joint (DLT+DLT+ST)

Fig. 4 Stress distribution around the nugget edge on the inner surface and deformed shape of 4L type joint (DLT+DLT+ST+ST)

moment)의 증가로 2L과 3L에 비해 굽힘 변형량을 클 것으로 예상되나, 판 두께, 기계적 성질 및 굽힘 강성의 차이에 의해 오히려 변형이 감소하는 결과를 나타내었다.

LT(4.0)+HT(4.5)+ST(1.5)+DLT(1.0)와 같이 두께와 기계적 성질이 상이한 판재를 다중으로 겹쳐 접합한 경우에는 판 두께가 얇은 쪽의 변형과 너깃단 응력집중이 크게 발생하는 경향을 나타내었다.

3. 다중접합 점용접 이음재의 피로강도 평가

이상의 여러 가지 다중접합 점 용접 이음재들에 관한 응력해석 결과를 실 구조물 설계에 적용하기 위해서는 피로강도 평가가 필수적이다.

Fig. 5는 열처리와 압연 방법을 달리한 STS301L 판재를 점 용접하여 제작한 다중접합 점 용접 시편들에 가해진 피로하중 범위와 피로수명관계를 $\Delta P - N_f$ 선도로 나타낸 것이다.⁶⁾

Fig. 5에서, 피로강도에 대한 시편의 기하학적 인자와 기계적 성질의 영향이 전체적으로 잘 반영되고 있음을 확인 할 수 있다. 그러나, 고 하중(4 kN 이상), 단 수명(10^4 cycles 이하) 영역에서 피로하중 범위는 5~13(kN)이고, 저 하중(4 kN 미만), 장 수명(10^6 cycles 이상) 영역에서 피로하중 범위는 2~5(kN)으로 평가되었다. 그리고, 피로한도(fatigue limit)에 해당하는 10^7 cycles에서의 피로하중 범위는 1~4 (kN)로 평가되었다. 따라서, Fig. 5와 같이 다중 겹침 점 용접 이음재의 피로수명을 시편에 가한 피로하중 범위로 나타낸 $\Delta P - N_f$ 선도는 판재 겹침 매수,

판 두께, 용접부 너깃 직경, 그리고 열처리 및 압연 방법에 따른 STS301L의 기계적 성질 등의 변화에 따른 피로강도와 피로수명을 용이하게 비교·평가할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 데이터의 분산 폭이 너무 크기 때문에, 실 구조물 설계에 있어서 다중 겹침 점 용접 이음재의 기하학적, 역학적 인자들을 종합적으로 고려한 통일적이고 합리적인 설계기준을 설정하기가 매우 곤란함을 알 수 있다. 특히, 점 용접 구조물의 장 수명 설계기준이 되는 피로한도의 경우는 1~4(kN)으로서 상·하한 값의 차이가 너무 크기 때문에 적절한 설계기준을 설정하기가 어렵다.

이러한 문제를 개선하기 위해, 배동호 등⁷⁾과 손일선 등⁸⁾은 여러 가지 기하학적 형상을 갖는 점 용접 이음재들의 피로설계법 개발을 위한 일련의 연구를 수행한 결과, $\Delta P - N_f$ 관계를 점 용접 이음재 내 표면 부하축 너깃단 최대응력(hot spot stress)으로 재정리하면, 기하학적 인자를 종합적으로 고려할 수 있는 통일적인 피로강도 평가가 가능함을 제시한 바 있다.

다중접합 점 용접 이음재의 경우도 너깃단 최대응력에 대한 이음재의 기하학적 인자(geometrical factors), 즉, 판 두께, 판 폭, 겹침 매수 등과 재료의 기계적 성질 등의 영향이 유한요소해석 결과와 피로강도에 그대로 반영되고 있음을 Fig. 5로부터 확인할 수 있다.

그래서 본 연구에서도 피로균열(fatigue crack)의 발생 위치인 Fig. 6의 점 용접부내 표면 너깃단 최대응력으로 인장-전단 하중을 받는 다중접합 점 용접

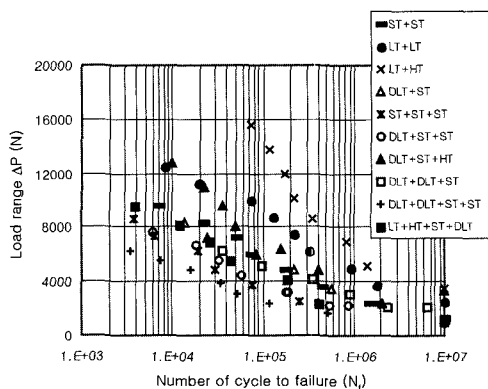


Fig. 5 relation for various spot-welded lap joint



Fig. 6 Fatigue crack revealed around the nugget edge on the outer surface of the specimen (P=931kgf, Nf=10,843 cycles, DLT)

이음재의 피로강도를 재정리함으로써, 피로설계가
가능성을 평가해 보았다.

4. 최대응력(σ_{max})에 의한 피로강도 평가

앞에서 지적한 바와 같이, 다중접합 점 용접 이음재들의 피로수명을 시편에 가해진 피로하중으로 정리한 Fig. 5의 $\Delta P - N_f$ 선도는 판 두께, 겹침 매수, 용접부 너짓 직경 등의 기하학적 인자들과 열처리 및 압연방법에 따른 재료의 기계적 성질 변화에 따른 피로강도와 피로수명에 대한 비교평가는 가능하나, 데이터의 분산 폭이 너무 크기 때문에, 실 구조물 설계에 있어서 여러 가지 기하학적, 역학적 인자들을 통일적으로 고려한 설계기준을 설정하기가 곤란하다.

이러한 경우의 피로강도를, 점 용접부 너짓단(nugget edge)의 최대응력으로 정리하면, 이음재의 너짓단에서의 최대응력에 대한 이음재의 기하학적 인자와 재료의 기계적 성질들의 영향이 유한요소해석 결과에 의해 나타나고, 각종 크기를 갖는 시험편의 피로강도가 통일적으로 정리됨을 제시한 바 있다.^{7,8)} 따라서 인장-전단하중을 받는 TS형 점 용접 이음재의 피로강도도 유한요소해석 결과로부터 얻어진 너짓단에서의 최대응력(σ_{max})으로 재 정리해 보았다.

Fig. 7은 각 시편에 실제로 가해진 피로하중에 대하여 유한요소해석을 수행해서 얻은 다중 겹침 점 용접 이음재의 내표면 너짓단 최대 주응력으로 $\Delta P - N_f$ 를 $\Delta\sigma_{max} - N_f$ 관계로 재정리한 결과를 나타낸 것이다.

여러 가지 기하학적 형상을 갖는 TS형 점 용접 이음재의 피로강도가 $\Delta P - N_f$ 관계에 비해 데이터의 분산 폭이 매우 좁게 다시 재정리 됨을 알 수 있다. 즉, Fig. 7에서 다양한 기하학적 형상과 기계적 성질을 갖는 STS301L 판재로 제작된 다중 겹침 점 용접 이음재의 피로설계기준을 통일적으로 평가할 수 있음을 확인할 수 있다.

이상의 결과는 다중접합 점 용접 이음재의 피로강도를 나타내는 어떤 특정 크기를 갖는 TS형 점 용접 이음재에 대한 $\Delta\sigma_{max} - N_f$ 의 관계가 얻어진다면, 이

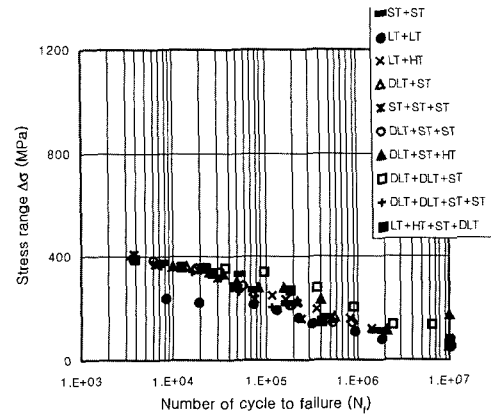


Fig. 7 Relationship between $\Delta\sigma$ and N_f of various specimens

곡선에 의해 다른 임의의 크기를 갖는 점 용접 이음재의 피로수명, 피로강도 및 피로설계기준을 추정할 수 있음을 의미한다.

4. 결론

철도차량 차체 제작용 STS301L 판재의 각종 점 용접 이음재 형상 가운데 다중접합의 경우에 대한 기하학적 인자와 재료성질을 동시에 고려한 통일적인 설계기준을 제시할 목적으로, 다중 겹침 점 용접 이음재에 대한 대표적인 모의시편을 도출하여 유한요소법으로 응력 분포상황과 변형특성을 해석하고 피로강도를 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) STS301L 판재로 제작된 다중 겹침 점 용접 이음재에 인장-전단하중이 작용하는 경우, 내표면 너짓단에 발생하는 응력집중에 의한 최대응력(hot spot stress)은 이음재의 기하학적 인자와 판의 기계적 성질에 영향을 받는다.
- 2) 인장-전단형 피로하중을 받는 STS301L 다중 겹침 점 용접 이음재의 피로강도 데이터를 $\Delta P - N_f$ 관계로 나타내면, 이음재의 기하학적 인자와 기계적 성질의 영향을 비교 평가할 수 있지만, 데이터의 분산 폭이 크기 때문에, 제 영향을 종합적으로 고려할 수 있는 장수명 설계기준을 설정하기는 어렵다.
- 3) STS301L 다중 겹침 점 용접 이음재의 내표면 너짓단 최대응력으로 $\Delta P - N_f$ 관계를 재정리한 $\Delta P - N_f$ 선도는 데이터의 분산 폭이 기존의 $\Delta P - N_f$

선도의 분산 폭보다 현저히 줄어들기 때문에, $\Delta P-N_f$ 관계를 이용한 재래적인 피로설계 방법을 개선함과 동시에, 이음재의 기하학적 인자와 기계적 성질 등의 제 인자를 종합적으로 고려한 피로설계기준 설정이 가능하다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

References

- 1) Spot Welding Technology, JWS, pp.12-89, 1983.
- 2) Automotive Handbook, Bosch, pp.320-350, 1993.
- 3) J. B. Kang, "Fatigue Strength of the TS- Type Spot-welded Lap Joint of STS301L," Thesis of Master, Sungkyunkwan University, 2001.
- 4) "Automobile Technology Handbook-Experimental Assessment," JSAE, pp.81-105, 1991.
- 5) D. H. Bae, J. E. Niisawa, N. Tomioka, "Theoretical Analysis of Stress Distribution of Single Spot Welded Lap Joint under Tension-shear Load," Transaction of JSAE, No.39, pp.627- 630, 1988.
- 6) D. H. Bae, "Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of A Single Spot Welded Lap Joint Subject to Tensile Shear Load," Journal of KSAE, Vol.13, No.5, pp.42-50, 1991.
- 7) I. S. Shon, "A Study on the Fatigue Design Methods and Expert System Development for Thin Steel Spot Welded Lap Joint," Thesis of Ph. D, Sungkyunkwan University, 1999.
- 8) I. S. Shon, W. S. Jung, H. K. Lee, D. H. Bae, "Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of IB Type Spot Welded Lap Joint Subject to Tensile Shear Load," Transactions of KSAE, Vol.6, No.5, pp.20-27, 1998.