

# 인장-전단하중을 받는 SUS301L 다중접합 점용접 이음재의 피로 강도 평가

## Fatigue Strength Evaluation of Spot-welded Multi-lap Joint of SUS301L Subjected to Tensile Shear Load

강 정보\*      배 동호\*\*

\* 성균관대 대학원      \*\* 성균관대

### 1 서 론

전동차 차체는 프레스(press) 가공된 다양한 박판 성형재를 조합해서 용접 등의 부분접합에 의하여 조립되고 있다. 전동차의 구조는 일반적으로 측면골조(side frame), 천장골조(roof frame), 바닥골조(under frame) 및 단부골조(end frame)로 구성되어 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 냉간 압연한 고장력 강판인 스테인레스강(SUS301L)을 프레스(press) 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 이상 다중으로 겹쳐서 점용접해야 하는 경우가 많은데, 점용접부는 그 형상이 직경 수 mm의 점상이기 때문에 외력에 의한 응력 집중원(stress concentration source)이 될 뿐만 아니라, 반복하중에 의한 피로강도(fatigue strength)가 모재(parent metal)의 그것에 비해 훨씬 떨어져서 피로균열(fatigue crack)의 발달이 되고 있다. 이 때문에 점용접에 의해 제작되는 철도차량 차체의 강성과 내구성이 점용접부의 피로강도에 의해 결정되는 경우도 적지 않다. 그래서, 철도차량을 포함한 점용접에 의해 제작되는 박판 구조물들의 피로설계를 위해, 점용접 이음재의 피로강도와 내구수명 평가를 위한 연구가 진행되고 있고, 지금은 피로 데이터도 상당히 축적되어 있는 상황이다. 그러나, 이들 데이터의 대부분이 점용접 이음의 기본형상인 2겹의 경우에 관한 것이고, 3겹 이상의 경우에 관한 예는 매우 드문 실정이기 때문에, 다중 이음재에 대한 설계 데이터의 확보가 요구되고 있기도 하다. 한편, 철도차량 차체의 내구성 평가는 물론 장수명 설계기준(long life design criterion)을 확보하기 위해서는 점용접 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, 그것으로부터 용접 구조의 피로강도 평가 기준량을 구하여 안전설계에 적용하는 것이 일반적인 수법이다. 따라서, 본 연구에서는 실제로 철도차량에 적용되는 각종 용접 이음재 형상 가운데 대표적인 모의시편을 도출하여 피로실험을 수행하고, 유한요소법으로 용접이음재의 응력분포상황을 해석한 다음,  $\Delta P-N_f$  로부터 최대응력범위-피로수명( $\Delta\sigma-N_f$ ) 관계를 구하여 다중 점용접 이음재의 기하학적 인자를 통일적으로 고려 할 수 있는 설계기준을 제시하고자 하였다.

### 2. 유한요소법에 의한 응력분포 해석

#### 2.1 해석모델

TS형(tensile shear type) 점용접 이음재에 인장-전단하중이 작용하면, 점용접 부위에는 면내 전단력(in-plane shear force)과 면외 굽힘모멘트(out of plane bending moment)가 분담하중으로 작용하게 되어, 박판 특유의 복잡한 변형을 야기시킨다. 그리고, 피로균열은 일반적으로 부하측 내표면 너깃단에서 발생 및 성장하여 외표면으로 나타나기 때문에, 내표면 너깃단 주위의 응력분포와 변형상태를 해석하는 것은 피로균열 발생기구를 파악하는데 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 철도차량 차체재료로 사용되는 Tables 1, 2의 SUS301L 판재의 점용접 이음재에 대한 피로강도를 평가할 목적으로, 대표적인 점용접 이음형태인 2L형(2 sheets lapped type)을 기본모델로 하고, 판재제작 과정에서 압연방법에 따른 재료의 성질과 판의 두께를 고려하여 Table 3과 같이 다양하게 제작된 시편들에 대한 용접부 너깃주위의 응력분포와 변형을 해석하였다. 판의 중첩으로 인한 offset의 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 요소분할은 동일하게 하였다. 너깃부는 사각형 요소를 적용하였으며, 이음재 전체 두께의 단일요소로 분할하여 상·하 평판을 일체화하였다. 그리고, 직경

수mm인 점상의 용접부에 대한 종탄성계수 등의 기계적 성질은 직접 측정하기 어려우므로, 본 연구에서는 E를 모재와 동일하게 하였다.

## 2.2 해석결과

Figs.2-4는 겹침 길이(2L) = 50 mm, 판폭(W) = 50 mm의 다중 접합된 TC형 점 용접시편에 4.9kN의 인장력을 가했을 때 나타나는 시편의 변형과 응력 분포상황을 예시한 것이다. 겹침 형태에 관계없이 인장-전단하중에 의해 발생하는 너깃단(nugget edge) 주위의 최대응력은 Fig. 2와 같이 시편 내 표면의 부하측 너깃단에서 발생되고, 피로시험시 시편표면에 나타나는 피로균열도 동일위치에서 발생됨을 확인할 수 있었다. 그리고, 2L, 3L 및 4L의 응력집중 발생위치는 판두께에 관계없이 일치하나, 각각의 변형형태와 최대응력값은 상이함을 알 수 있었다. 먼저 Fig.3의 2L 시편은 인장-전단력에 의해 유도된 면의 굽힘모멘트에 의해 너깃을 중심으로 굽힘변형이 일어나고, 대체로 판두께가 두꺼워지면 굽힘 강성이 증가하여 굽힘 변형과 최대 응력값은 감소하는 경향을 나타내었다. Fig.4의 3L 시편은 중간 판재에서는 어떠한 변형도 일어나지 않으나, 상·하 외부 판재는 면의 굽힘모멘트에 의해 굽힘변형을 일으키며, 판두께가 얇을수록 굽힘변형이 크지고, 너깃단의 최대응력도 증가하는 경향을 보였다. Fig.5의 4L의 경우도 2L 및 3L의 경우와 유사한 변형형태를 나타내나, 두께가 다른 LT(4.0)+HT(4.5)+ST(1.5)+DLT(1.0) 시편의 경우 전체두께의 증가에 의한 굽힘 모멘트의 증가로 2L과 3L에 비해 굽힘 변형량이 클 것으로 예상되나, 판두께와 강도 차이에 의해 변형이 감소하는 결과를 나타내었다. 특히, 두께와 강도가 상이한 판재를 다중으로 겹쳐 접합한 경우에는 판두께가 얇은 쪽의 변형과 너깃단 응력집중이 크게 발생하였으며, 피로균열의 발생도 동일한 경향을 나타내었다.

## 3. 피로강도 평가

### 3.1 시편 및 실험방법

시편제작을 위한 점용접은 RWMA에서 권장하고 있는 Table 4의 조건을 기준으로 하여 수행하였다. 판재의 두께는 1.5t~4.5t로 하였으며, 점용접에 의해 접합되는 각 시편은 판재의 압연방법에 따라 다양하게 조합하여 제작하였다. 피로실험 장치는 서보유압식 피로시험기(MTS, ±10 ton)를 사용하였으며, 시편 외표면 부하측 너깃단에 나타난 균열의 길이측정은 이동식 현미경(×50)을 사용하였다. 피로실험 조건은 하중비(R) = 0.1, 하중 반복속도(f) = 50 Hz인 사인파(sine pulse)형으로 수행하였다. 피로 수명(Nf)은 시편 내표면 너깃 단에서 발생한 균열이 시편 외표면에 나타나서 너깃 직경과 같은 길이가 될 때까지의 싸이클 수로 결정하였으며, 피로한도(fatigue limit)는 피로시험조건 하에서의 10<sup>7</sup> cycles까지 균열이 발생하지 않은 하중으로 하였다.

### 3.2 피로시험 결과

Fig. 6은 압연방법을 달리한 판재를 점용접하여 제작한 다중접합 시편들의 피로실험 결과를  $\Delta P-N_f$ 의 관계로 나타낸 것이다. 인장-전단 피로하중에 의해서 내표면 너깃단에서 발생한 피로균열은 전체적으로 FEM해석 결과에서 보였던 응력 집중부인 부하 측 너깃단 근방에서 발생하여 파단 수명에 이르는 경향을 보였다. 동일 두께로 다중접합된 시편의 피로수명은 동일하중범위에서 2L형 시편이 3L과 4L형에 비해 전체적으로 길었고, 피로강도도 상대적으로 큰 경향을 나타내었다. 이것은 FEM해석 결과에서 지적한 바와 같이 인장-전단력에 의해 유기된 면외굽힘 모멘트 성분이 이음재의 전체적인 두께가 증가할수록 커지기 때문인 것으로 판단된다.

그러나, 동일 접합형태라 하더라도 판두께와 인장강도가 크면, 피로수명은 증가하는 경향을 나타내었고, 그리고, 이종재를 다중 접합한 시편에서는 FEM해석 결과 최대응력이 상대적으로 큰 ST와 DLT 측이 파단되는 경향을 나타내었다. 이것은 열처리에 의한 스테인레스강의 재질변화와 응력집중 효과에 기인된 것으로 사료된다.

## 4. 최대 주응력( $\sigma_{1max}$ )에 의한 피로강도 평가

Fig. 6과 같이 피로시험 결과를 하중과 피로수명의 관계로써 나타낸  $\Delta P-N_f$  선도는 판재의 겹침 매수와 용접부 너깃 직경의 크기, 그리고 압연방법에 따른 재료성질의 변화에 의한 피로강도와 피로수

명을 비교평가 할 수는 있으나, 데이터의 분산폭이 너무 크기 때문에, 실 구조물 설계에 있어서 이상의 여러 인자들을 종합적으로 고려한 통일적인 설계기준을 설정하기가 곤란하다. 그러나, 점용접된 다중접합 이음재의 너깃단 최대응력에 대한 이음재의 기하학적 인자와 재료의 기계적 성질들의 영향이 FEM해석 결과에 의해 나타나고, 또한 이것이 피로강도에 그대로 반영되고 있음을 Fig. 6로부터 확인할 수 있었기 때문에, 점 용접부 너깃단의 최대 주응력으로 피로강도를 정리하면 각종 크기를 갖는 시험편의 피로강도가 통일적으로 정리될 수 있을 것으로 판단된다. 그래서, 인장-전단 하중을 받는 다중접합 이음재의 피로강도를 유한요소해석 결과로부터 얻어진 너깃단 최대응력으로 재정리해 보았다.

Fig. 7은 기하학적 형상과 기계적 성질이 다른 여러 가지 점용접 이음재들의 피로강도를 피로시험 시 시편에 실제로 가해진 각 피로하중에 대해서 FEM해석하여 얻어진 너깃단 최대응력으로 재정리한 결과를 Log-Log좌표계로 나타낸  $\Delta\sigma-N_f$ 의 관계이다. Fig. 6에 비해 데이터의 분산폭이 상당히 감소됨을 알 수 있으며, 따라서, Fig. 7의 관계로부터, 기하학적 형상과 기계적 성질이 상이한 SUS301L 관계의 다중접합 점용접 이음재의 피로강도를 통일적으로 평가할 수 있음과 동시에 피로한도를 고려한 피로설계기준을 설정할 수 있을 것으로 기대한다.

## 5. 결론

실제로 철도차량에 적용되는 각종 용접 이음재 형상 가운데 다중접합의 경우에 대한 기하학적 인자와 재료성질을 동시에 고려한 통일적인 설계기준을 제시할 목적으로, 점용접에 의해 다중 접합된 대표적인 모의시편을 도출하여 피로실험을 수행하고 용접부의 피로강도를 평가함으로써,  $\Delta P-N_f$  관계를 구하였다. 그리고, 유한요소법으로 용접이음재의 응력 분포상황을 해석한 다음,  $\Delta P-N_f$  관계를 용접부 내표면의 너깃단 최대응력으로 재정리한 결과,  $\Delta\sigma-N_f$  관계로부터 다중 점용접이음재의 기하학적 인자와 재료의 기계적 성질을 동시에 고려한 통일적인 설계기준을 설정할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) 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, 1988, pp. 627 ~ 630.
- 2) 'Automotive Handbook', Bosch, 1993, pp. 320~350.
- 3) '自動車技術ハンドブック-試験・評価編', 日本自動車技術會, 1991, pp. 81~105.
- 4) 'スポット 溶接 継手 疲勞 強度 データ 集', 日本自動車技術會, 1987, pp. 12~185.
- 5) 배 동호, "인장-전단하중을 받는 일점 spot 용접이음재의 파괴역학적 피로강도평가", 자동차공학회 논문집 제 13권 5호, 1991 pp.42~50.
- 6) 손 일선, 정 원석, 이 휘광, 배 동호, "인장-전단하중을 받는 IB형 일점 spot 용접 이음재의 파괴역학적 피로강도 평가", 자동차 공학회 논문집 제 6권 제 5호, 1998, pp.20~27.



Fig. 1 TS type specimen subjected to tensile shear load

Table 1 Chemical composition of SUS301L

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 properties of specimen

Processing management	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	mark
Solution Treatment	≥ 22	≥ 56	≥ 45	LT
Skin Pass	≥ 35	≥ 70	≥ 40	DLT
	≥ 42	≥ 77	≥ 35	ST
	≥ 70	≥ 95	≥ 20	HT

Table 3 Specimen types for evaluation of stress distribution and fatigue strength

Lapped sheets	Lapped type (plate thickness)	Nugget diameter (mm)
2L	LT(4)+LT(4)	10
	LT(4)+HT(4.5)	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

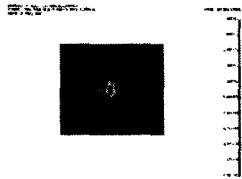


Fig. 2 Stress distribution at the nugget edge

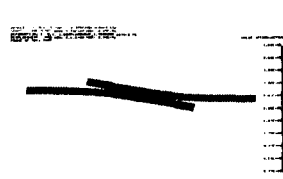


Fig.3 Strain and stress distribution of LT+LT joint

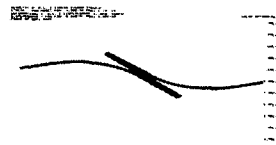


Fig.4 Strain and stress distribution of DLT +DLT +ST joint

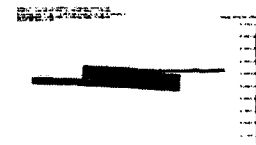


Fig. 5 Strain and stress distribution of LT+HT+ST +DLT joint

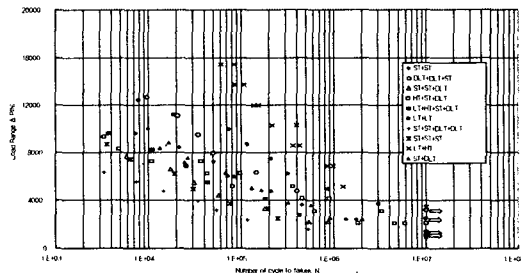


Fig. 6  $\Delta P - N_f$  relation for various spot welded multi-lap joint

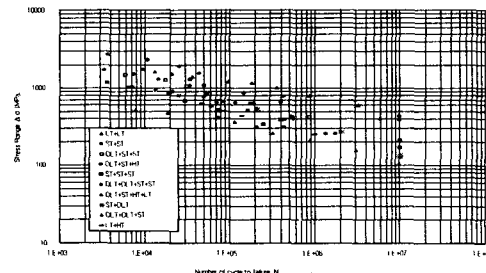


Fig. 7  $\Delta \sigma - N_f$  relation for various spot welded lap joint

Table 4 Welding condition

Joint type	Welding time (cycles)	Electrode force (N)	Welding current (A)
LT+LT	85	13720	11,500
LT+HT	85	13720	12,000
DLT+ST	30	7840	10,000
ST+ST	30	7840	10,000
DLT+DLT+ST	45	7840	9,700
DLT+ST+ST	45	7840	9,700
DLT+ST+HT	45	13720	9,600
ST+ST+ST	45	7840	9,700
DLT+DLT+ST+ST	60	7840	9,300
DLT+ST+HT+LT	70	13720	9,200