研究論文

플러그 용접이음부의 피로수명에 미치는 설계형상의 영향

임 재 규* · 이 중 삼** · 서 도 원***

Effect of Design Shape on Fatigue Life of Plug Welded Joint

J. K. Lim*, Z. S. Li** and D. W. Seo***

Key Words : Plug Welding(플러그 용접), Hole Size and Pitch(홀 크기 및 간격), Shear and Bending Strength(전단 및 굽힘강도), Shear and Bending Fatigue Life(전단 및 굽힘 피로수명)

Abstract

This study was intended to use for the fatigue test in real structures and offer basic data for optimum welding structure design. To this purpose, we obserded the effect of the size and distance of plug welding hole on the static strength and fatigue life of welding structure under the shear/bending load for the improvement of fatigue life of plug welding joint between S/MBR and C/MBR in the lower structure of large bus.

The result below is shown through this study.

1) Static and fatigue strength are strongly influenced by the direction of plug weld hole distributed. 2) Distances and diameters of the distributed holes are little dependent on the static strengths. 3) In case of the directions of the distributed plug weld holes are vertical to the loading pin, fatigue life is dependent on distance of the distributed hole. 4) In case of the directions of the distributed plug weld holes are parallel to the loading pin, fatigue life is dependent on distance of the hole diameter.

1. 서 론

자동차 차체구조는 일반적으로 주행과정에서 노면의 요철, 커브 및 경사 등 노면상황에 따른 불규칙적이고 반복적인 동적 하중 및 충격하중을 받으며, 또한 자동차 자체의 가속, 감속 및 제동 등에 의한 충격하중 및 동적 하중도 받는다. 이러한 반복적인 하중 및 충격 등에 의한 피로파괴는 자동차 차체구조 파손사례의 상당부분을 차지하고 있다[1].

최근 생산되고있는 대형버스의 차체 하부 구조 중 내구력에 문제가 되는 부분은 SECTION MEMBER와 CROSS MEMBER간의 결합부로서 이들의 접합방식 중 플러그 용접 이음이 상당 부분을 차지하고 있으며, 이 부분에서 반복하중에 의한 피로파괴가 많이 발생하는 것이 시험주행 및 실제운행 등에 의해서 발견되었

※ 1998년 3월 27일 접수

* 정회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차 신기술연구소
** 비회원, 전북대학교 대학원, 中國延邊大學校機械係
*** 비회원, 전북대학교 기계공학부
• 임재규:jklim@moak.chonbuk.ac.kr

다. 그런데 대형 버스 구조에서 발생하는 변동하중에 의한 피로수명의 정량적인 평가는 지금까지 확실하게 이루어지지 않고 있다[2].

용접구조의 피로강도에 영향을 주는 인자로는 용접부 재질의 차이, 이음형상, 하중상태, 용접부 표면상태, 응력 집중, 용접결함 및 환경영향 등 여러 가지가 있다[3]. 용접 홀의 배열방향과 간격 및 홀의 크기와 개수 변화에 대한 시험편의 실험에서 얻은 적정한 용접 홀의 크기, 간격 등을 실제 결합구조물의 용접설계에 적용하여 피로강도를 평가함으로써 취약부를 찾아내고 보강하기 위한 실제 구조물 피로시험에 적용할 수 있는 기초적 자료축적은 현실적으로 필요한 문제이며, 플러그 용접 형태(용접 홀의 크기, 간격), 용접 개수 등을 변화시켜 이들 변화인자가 피로수명에 미치는 영향을 규명하여 결합부의 내구력 향상을 위한 데이터베이스 구축과 설계기준을 설정하는 것은 시급한 과제이다.

따라서 본 연구에서는 플러그 용접이음에 영향을 주는 인자 중, 구조설계와 가장 밀접히 관련된 접합부의 용접 홀의 개수, 배열방향, 크기 및 간격을 변경하여 제작한 시험편에 대하여 전단 및 굽힘 피로시험을 실시하여 이들 영향과 파괴기구를 고찰하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시편제작

실험재료는 자동차구조용 열간 압연강판인 SAP41 강이며 화학조성 및 기계적 성질은 Table 1과 같다[4]. 시험편은 실험대상인 대형버스 차체 실제구조물에 적용되는 플러그 용접방식으로 택하였고, 용접부 설계형상의 변화가 강도 및 피로수명에 미치는 영향을 알아보고자 용접 홀의 배열방향 및 간격, 용접 홀의 크기 및 용접 개수를 변경시켜 시편을 제작하였다. 시편의 형상은 Fig. 1(a) 및 (b)와 같다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of weld base metal

	Chemical composition		Mechanical properties		
SAP41	P	S	σ_t(MPa)	σ_y(MPa)	Elongation(%)
	0.010%	0.010%	410MPa	275MPa	30%

2.2 실험장치 및 실험방법

실험장치는 INSTRON사의 25ton 용량의 동적유압 피로시험기를 사용하였으며, 정적강도 평가시험에서 얻어진 시험편의 항복강도를 피로시험의 평균하중을 정하는 근거로 하였다.

전단시험은 0.2 mm/min의 Crosshead 속도로 변위제어하여 진행하였다. 굽힘 시험은 ASTM E-855-10의 시험법을 참조하여 3점굽힘 방식으로 진행하였으며, Crosshead의 속도는 0.5 mm/min 로 하였다[5]. 피로시험은 하중비 R=0.04 , 하중반복수는 10싸이클로 하였다.

시편 Plug용접부는 내부에 피로균열이 발상하여 진전할 수 있기에 균열개시 시점을 찾기 위한 방법으로 직류전위차 측정법(PDM : Potential Drop Method)을 이용하였다. 본 연구에서는 직류전위차법에 의해 검출된 균열개시 시점에서의 반복 싸이클 수

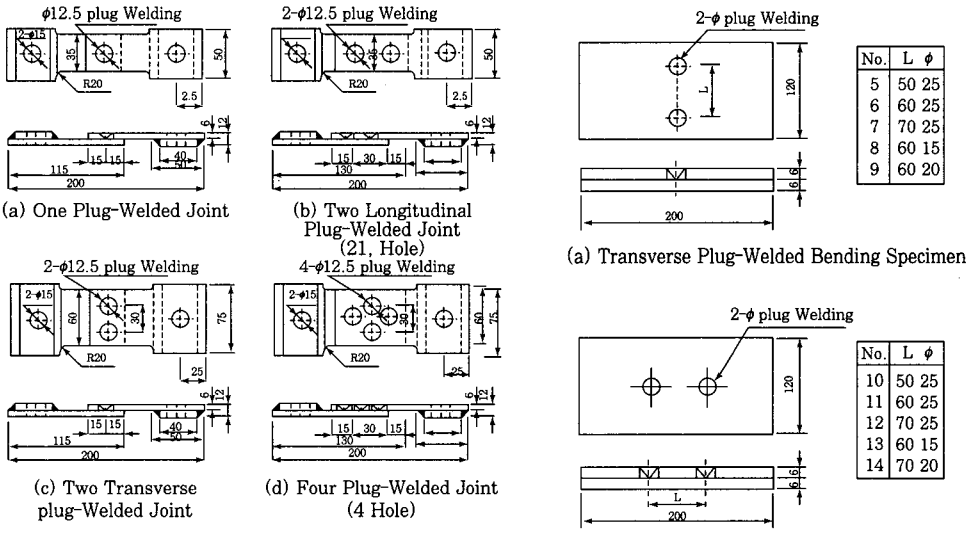


Fig. 1 Configuration of specimens for shear and bending test

를 각 조건 시편의 피로수명으로 정하였다. 시험과정에서 시편표면에 나타난 균열을 관찰하기 위하여 이동식 현미경을 이용하였으며 관찰한 결과는 직류전위차법의 결과와 비교하여 참고로 하였다[6]. Fig. 2는 본 실험장치를 나타내고 있다.

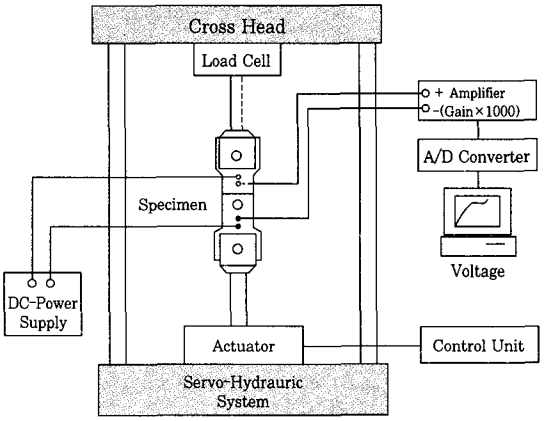


Fig. 2 Schematic diagram of fatigue test and DC potential system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전단강도 평가

정적하중 상태에서 전단시험의 결과는 Fig. 3과 같이 응력-변위선도로 표시하였다. 항복 점에서는 2개의 플러그 용접홀의 분포방향이 인장하중에 수직인 2T-hole 시편이 가장 큰 전단 응력을 가지며, 용접 개수가 가장 많은 4-hole 시편의 항복응력이 가장 작았다. 이는 4-hole 시편에서 용접점의 밀집으로 응력집중과 용접후 열변형에 의한 잔류응력의 영향이 상대적으로 크게 나타나 결과적으로 시편의 강도를 약화시킬 수 있기 때문인 것으로 생각된다. 4-hole 시편에서 파단되기까지의 변위가 가장 크게 나타난 것은 플러그 용접이음부에 균열이 발생한 후에도 인장하중과 평행되게 분포된 2개의 플러그 용착금속에 모재가 걸려서 그것이 상당히 크게 연신된 후 이탈되기 때문이다.

3.2 전단피로수명 평가

전단피로시험의 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 전체적으로 2개의 플러그 용접이음을 가지며 용접홀이 하중 방향에 수직으로 분포된 2T-hole 시편이 가장 큰 피로수명을 나타내고 있으며, 용접이음 개수가 가장 많은 4-hole 시편의 피로수명이 가장 낮음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 일정응력 하에서 각 시편의 피로수명을 나타내고 있다. 여기서 배열 방향이 하중에 수직인 2T-hole 시편이 하중에 평행 된 2L-홀 시편보다 약 55% 큰 피로수명을 나타내고 있음을 볼 수 있었다.

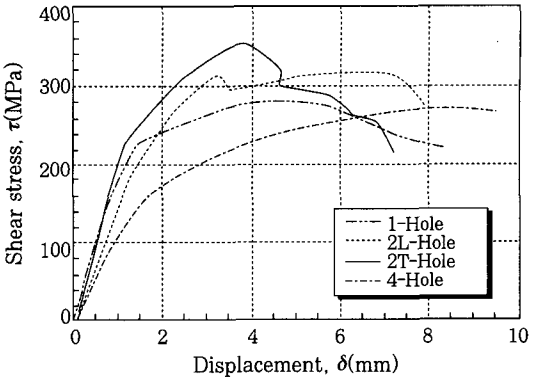


Fig. 3 Shear stress-displacement curve of shear test

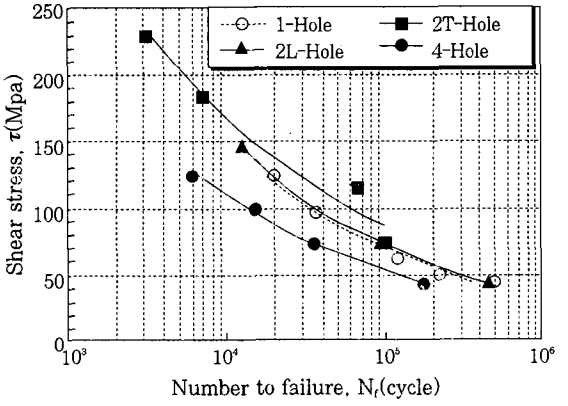


fig. 4 τ-N curve of four types shear specimens

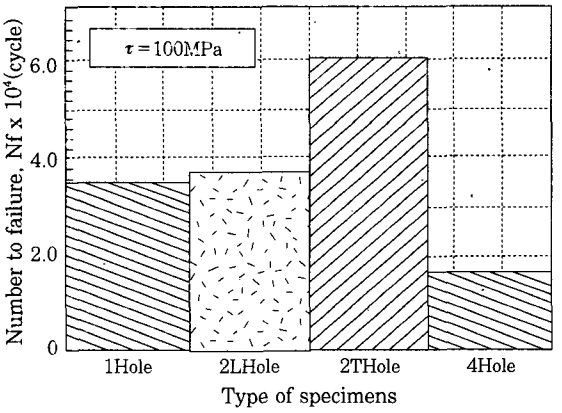


Fig. 5 Relation of fatigue life in four types shear specimens

시편의 파단 형태를 보면 용접 홀에서 균열이 발생하여 플러그 용접부의 Fusion line을 따라 파단에 이르는 경우가 약 80%를 차지하여 피로파괴는 주로 용접홀에서 일어남을 알 수 있었다.

Photo. 1은 전단시편의 용접부 Fusion line 모재 쪽 금속파면의 SEM 사진으로서 파단 면에서 딤플을 관찰 할 수 있으며 이는 시편의 파괴가 연성파괴 양상을 나타내고 있음을 설명한다[7].

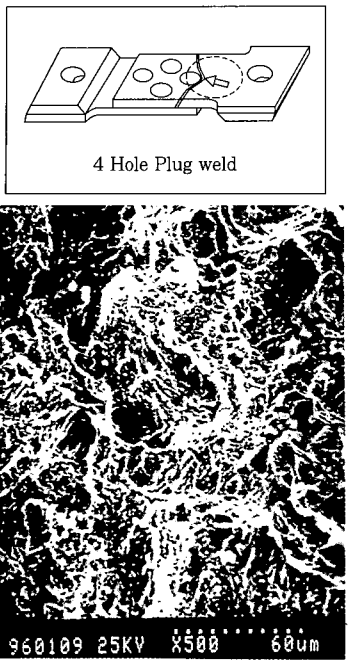


Photo 1. SEM photograph of 2T-Hole shear specimens

3.3 굽힘강도 평가

Fig. 6은 굽힘 시편의 정적강도를 비교한 그림으로서 폭 방향 배열(2T시편)과 길이방향 배열(2L시편) 모두 플러그 용접 홀 간격 및 직경의 영향은 크지 않았다. 그러나 홀 배열 방향이 서로 다른 2L시편의 평균 항복하중이 2T 시편보다 약 35% 크게 나타나 용접 홀 배열방향이 구조물의 정적강도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

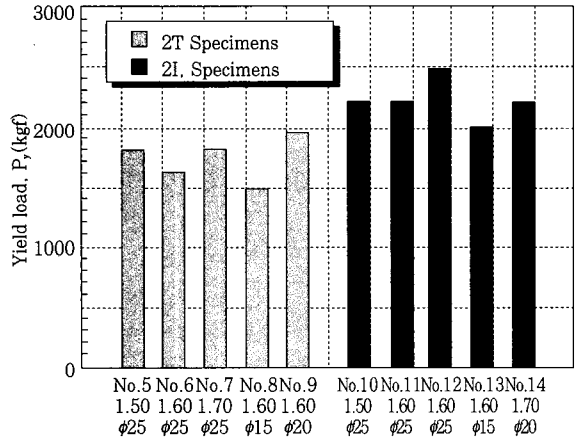


Fig. 6 Relation of bending strength in 2T and 2L specimens

3.4 굽힘피로수명 평가

3.4.1 2T 시편

플러그 용접 홀이 시편의 폭 방향으로 배열되고, 홀 간격 및 직경이 다른 2T시편의 굽힘피로 시험결과를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 또한 Fig. 7(b)에서는 일정 하중진폭 (ΔP=1400 kgf)의 조건에서 각 시편의 피로수명을 비교하였다. 전체적으로 홀 직경이 큰 시편 (ϕ=25mm)이 직경이 작은 시편보다 피로수명이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 2T시편 중 가장 큰 피로수명을 갖고 있는 시편은 L=60mm, ϕ=25mm인 시편이었다.

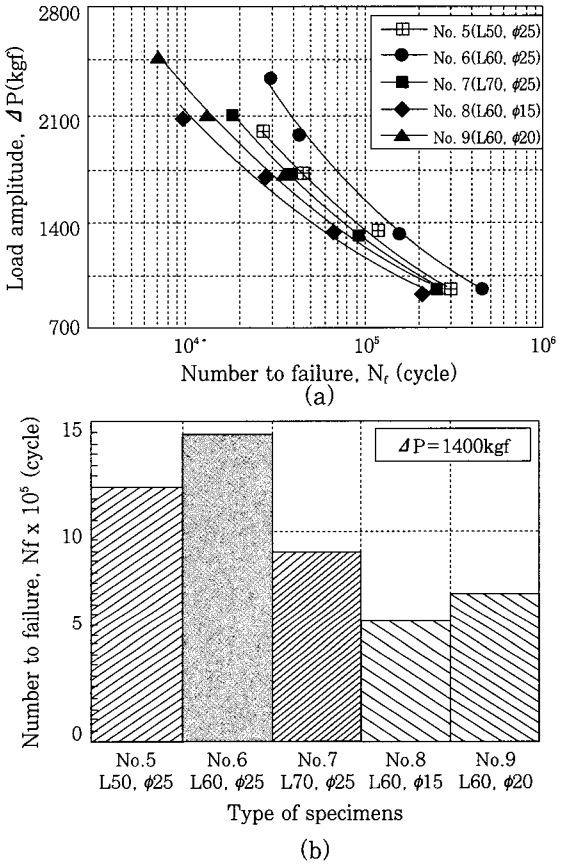


Fig. 7 ΔP-N curve and relation of fatiue life in five types 2T specimens

Fig. 8(a)에서 볼 수 있는 것처럼 시편의 피로수명은 ϕ15mm에서 ϕ20mm사이에서는 완만하게 증가하다가 ϕ25mm에서는 급격히 증가하였다. 이는 홀 직경이 큰 경우 시편의 관성모멘트가 상대적으로 크므로 응력집중이 상대적으로 작아지며, 피로시험에서는 작은 응력 변화에 상응하여 비교적 큰 수명의 차이로 나타날 수 있기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 8(b)에서 보여준 것처럼 피로수명은 홀 간격의 증가에 따라 증가하지는 않았다. 그 원인은 2T시편에서 홀

배열방향과 굽힘하중의 분포방향이 일치하여 홀 간격의 변화가 시편의 부하능력에 큰 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 폭 방향 배열의 구조에서는 플러그 용접 홀 직경의 변화가 피로수명에 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있었다.

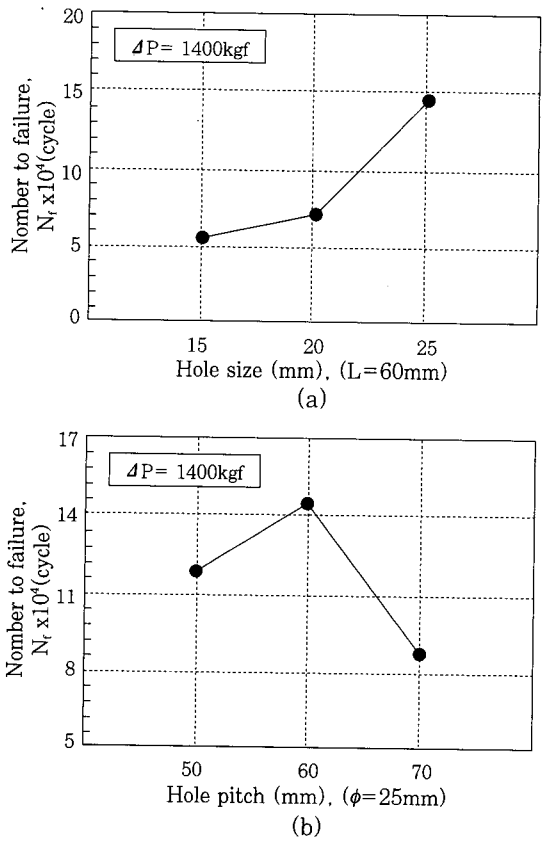


Fig. 8 Relation of fatigue life to 2T specimens with hole size and pitch

3.4.2 2L 시편

Fig. 9(a)는 2L시편의 하중진폭-반복회수의 관계를 나타내고 있으며, Fig. 9(b)는 일정한 하중진폭에 대한 각 시편의 반복회수를 도시하였다. 일정한 하중에서 (약 최대 하중의 50%) No. 14(L=70, φ=20) 시편의 피로강도가 가장 우수한 것으로 나타났다.

피로수명이 가장 큰 No. 14 시편(L=70, φ=20)은 피로수명이 가장 작은 No. 10 시편(L=50, φ=15)보다 약 235%의 수명차이를 보였다. Fig. 10은 홀 간격과 피로수명의 관계를 도시한 것으로서 홀 간격이 클수록 피로수명이 증가함을 알 수 있다. 이는 홀 배열방향과 굽힘하중의 분포방향이 수직되므로 일정한 범위 내에서 홀의 간격이 증가함에 따라 동일한 굽힘하중에 대응되는 응력집중이 작아지므로 피로수명이 증가할 수 있을 것으로 생각된다.

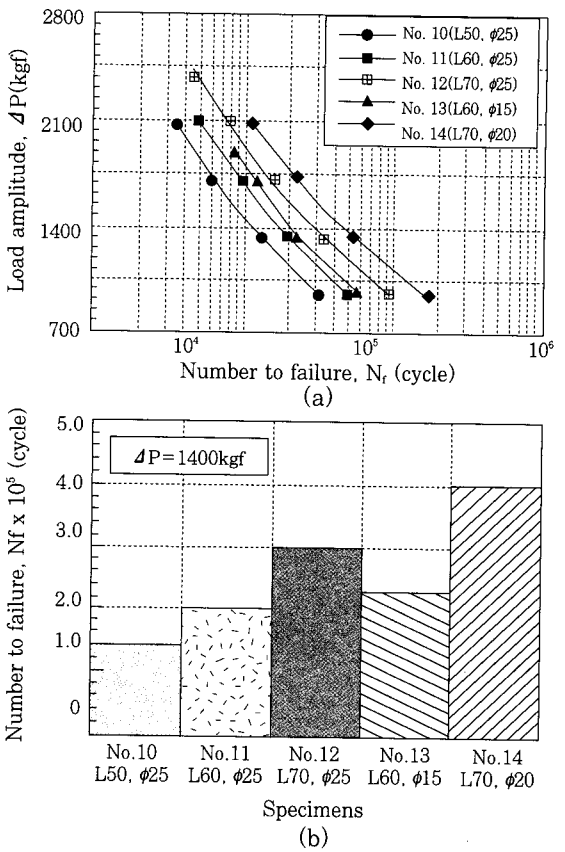


Fig. 9 ΔP-N curve and Relation of fatiue life in five types 2L specimens

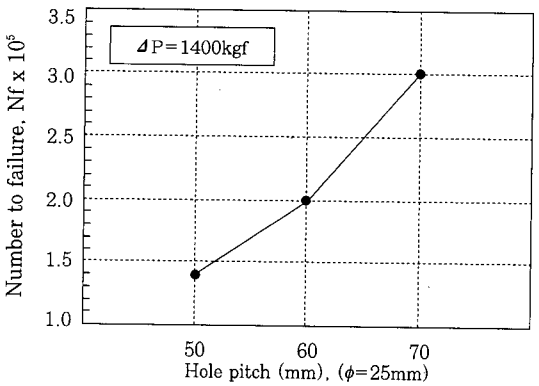
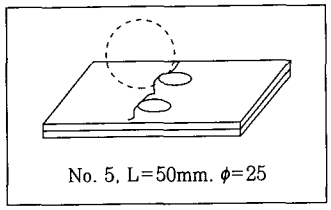


Fig. 10 Relation of fatigue life to 2L specimens with hole pitch

3.5 파면관찰

Photo. 2는 2T시편의 SEM 파면사진이다. SEM 시편의 채취부위는 균열개시 점으로 사료되는 Fusion Line부였다. 파단부의 SEM 사진을 보면, 용착부와 모재의 경계부가 사진의 우상변에서 관찰되며, 균열의 진전이 우상변쪽을 향하는 것을 알 수 있다. 300배 확대한 사진에서는 HAZ부에 불연속부가 관찰되며, 이는 균열개시 원인중의 하나라고 생각된다.

Photo. 3은 2L시편의 SEM 파면사진이다. 이 시편의 경우 모재의 HAZ부에서 균열이 발생하여 진전하였다. 모재의 균열 개시 점 부근의 파단 형태는 사진에서 볼 수 있는 것처럼 취성 파괴에 가까운 파면형상을 보이고 있다.



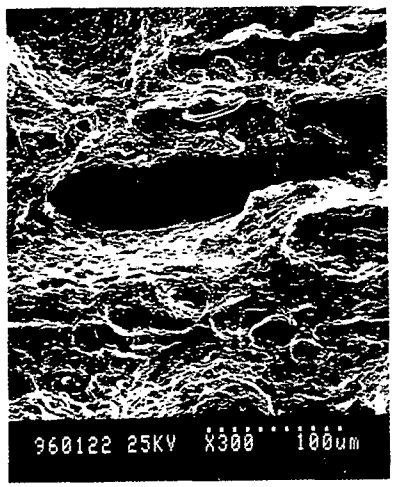


Photo 2. SEM photograph of 2T bending fatigue specimens

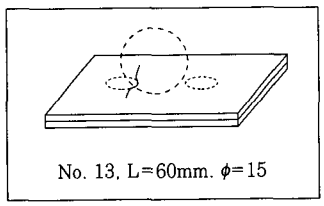


Photo 3. SEM photograph of 2L bending fatigue specimens

3.6 2T 시편과 2L 시편의 피로강도의 주요 영향인자

앞에서 언급한 것처럼 플러그 용접 홀의 배열 방향이 같을 때 홀 크기 및 간격의 변화에 따라 피로수명은 일정한 차이를 나타내었다. 홀의 배열방향이 굽힘피로수명에 미치는 영향은 Fig. 11에서 볼 수 있다. 길이 방향으로 배열된 2L시편의 평균 피로수명이 폭 방향으로 배열된 2T시편보다 약 155% 크게 나타나며, 동적인 굽힘하중을 받는 경우 길이 방향으로 플러그 용접홀을 배열하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있었다.

홀 배열 방향이 다른 두 가지 시편의 피로수명에 영향을 미치는 인자가 서로 다른 것은 동일한 3점굽힘 반복하중을 받을 때 이들의 응력 분포 및 크기가 서로 다른 것이 주요 원인 이라고 생각된다. 2T시편에서는 굽힘하중을 가하는 핀의 방향과 용접 홀의 분포방향은 일치하므로 간격의 영향은 상대적으로 작으며, 홀의 직경이 시편 관성모멘트를 증가시키는 주요 인자로 작용한다. 이와 반대로 2L시편에서는 하중분포 방향과 홀의 분포가 수직되므로 일정한 범위 내에서 간격이 클수록 굽힘 강성이 증가하므로 작용 응력은 작아지며, 따라서 피로수명이 향상될 것으로 사료된다.

한편 시편의 정적강도 강도와 피로강도의 영향을 고찰하여 보면, 정적강도에 대한 용접 홀의 분포 방향의 영향은 조금 있으나 홀의 크기 및 간격의 영향은 작으며, 피로강도에 미치는 이들 설계형상의 영향과는 대조적인 경향을 보였으며, 이는 기타문헌에서 보여준 경향과도 일치하다[8].

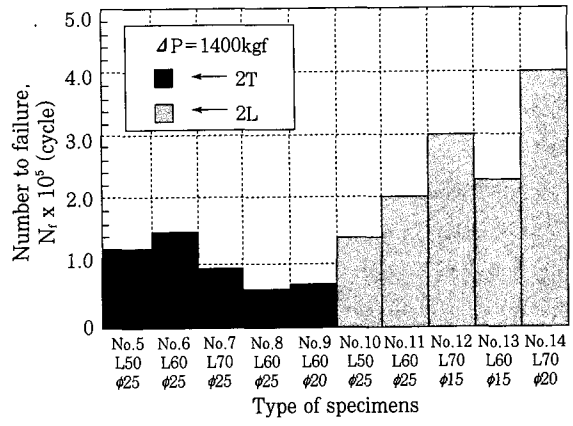


Fig. 11 Relation of bending fatigue life in 2T and 2L specimens

4. 결 론

접합부의 플러그 용접 홀의 개수, 배열방향, 용접 홀의 크기 및 간격을 변경하여 제작한 시편의 정적 강도

실험과 피로시험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 홀의 배열방향은 정적강도에 큰 영향을 주지만, 홀의 간격 및 크기는 정적강도에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 피로강도에 미치는 홀의 크기와 간격의 영향은 크게 나타났다.

2) 전단 피로시험의 경우 폭 방향 배열의 2T-홀 플러그 용접 시편이 가장 큰 피로수명을 갖고 있었다.

3) 굽힘 피로시험의 경우 홀을 길이 방향으로 배열시킨 시편(2L 시편)이 폭 방향으로 배열시킨 시편(2T 시편)보다 피로수명이 약 155%정도 크므로, 용접 점을 길이 방향으로 배열하는 경우가 내구력이 강함을 알았다.

4) 2T-홀 시편의 굽힘 피로시험 결과, 홀 직경의 영향이 Hole 간격의 영향보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나 2L-홀의 경우는 이와 반대로 홀 간격이 피로수명에 큰 영향을 미쳤다.

참 고 문 헌

1. Hertzgerg rolfe &Barsom, "Deformation and fracture mechanics of engineering materials", pp. 211~212
2. Garro, L. and Vullo., "Deformations Car Body joints under Operation", SAE 861379, pp. 5403~5420
3. 김창일, 문정훈등, "용접구조설계와 시공", 원창출판사; pp. 93~114
4. "自動車構造用鋼壓延鋼板及び鋼帶" , Jis 1987, pp. 111
5. ASTM Standard, E855-90, "Standard Test Methods for Bend Testing of Metallic Materials for Spring Applications Involving Static Loading", 1993
6. Johnson, H.H, Materats Research and wand Standards, 1965, pp.442~445
7. "鋼溶接部の破面寫眞集", 溶接學會溶接冶金委員會編, 1982, pp. 400~401
8. 윤중근 · 박동환 등 : "용접 구조 설계". 대한용접학회지, 1992. 12. 10권 4호, pp. 51