

피로손상된 용접이음의 피로수명 향상을 위한 햄머피닝 처리법의 적용

Applicability of Hammer-Peening Treatment for Fatigue Life Improvement of Fatigue Damaged Weld Joints

김 인 태^{1)*}
Kim, In Tae

박 민 호²⁾
Park, Min Ho

정 진 환³⁾
Cheung, Jin Hwan

Abstract

In this study, fatigue tests were performed on longitudinal out-of-plane gusset fillet welded joints and transverse non-load-carrying cruciform rib fillet welded joints, and then applicability of hammer-peening treatment on improvement of fatigue life for fatigue damaged weld joints were investigated. Fatigue tests were carried out on three types of gusset and rib welded specimens: as-welded specimens, post-weld hammer peened specimens and hammer peened specimens at 50% of as-welded specimen's fatigue life. Before and after hammer peening treatment, the geometry of weld toes and surface stresses near weld toes were measured. As a result of hammer peening treatment, compressive residual stresses of 30-83MPa were introduced near weld toes of the gusset and rib welded joints, and 130% increase in fatigue life and fatigue limit of the welded joints could be realized by hammer peening treatment at 50% fatigue life of as-welded conditions.

Keywords : Gusset, Rib, Fillet welded joint, Compressive residual stress, Hammer peening treatment, Improving fatigue life

1. 서 론

강구조물의 피로강도 향상에는 용접토우 (Weld toe)의 기하학적 형상을 개선하여 응력집중을 완화시키는 방법과 피로균열 발생 부위에 압축잔류응력을 도입하는 방법이 적용되고 있다. 응력집중 완화에는 그라인딩 (Grinding)과 TIG 드레싱 (Dressing)을 적용하고 압축잔류응력 도입에는 열처리와 피닝처리법을 단독 적용하거나, 이 방법들을 조합하여 피로강도를 향상시킬 수 있다 (Maddox, 1991; Haagensen, 1993; Lim et al., 1999; Hong et al., 2000; IIW, 2001; Han and Han, 2009).

이와 같은 피로강도 향상을 위한 용접후 처리법에 대해서는 다양한 연구가 진행되어 왔으며, JSSC (1993), IIW (2008) 등의 설계기준이나 피로설계지침에는 그라인딩 처리법의 적용에 의한 피로강도 향상 정도 및 피로 설계등급이 제시되어

있다. 그리고 IIW (2008)에는 TIG 드레싱, 햄머피닝, 니들피닝 처리된 용접이음의 피로강도향상 정도 및 피로설계등급도 제시되어 있다. 그러므로 강구조물 제작시, 이들 용접후 처리법을 적용하여 용접이음부의 피로강도를 향상시킬 수 있을 것이다.

이와 같은 용접후 처리법에 의한 예방적 피로강도 향상법과는 달리, 공용중인 강구조물에 피로균열이 발생한 경우에는 피로균열을 제거하거나, 피로균열 진전 속도를 지연시켜 피로수명 연장 및 피로강도 향상을 도모할 수 있다. 즉, 피로균열의 크기 및 발생위치 등에 따라 재용접, 균열선단의 열처리, 스톱홀 가공, 스톱홀 가공후 볼트체결, 볼트에 의한 보강판 접합 등에 의한 보수·보강법이 제안되어 있다. 그리고 피로균열이 발생한 강구조물의 보수 방법 및 이들 방법들에 의한 피로수명 연장 효과 등에 대한 연구가 진행되고 있다 (Yamada et al., 2009; Mori et al., 2011).

1) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 부교수, 교신저자
2) 정회원, STX 고성조선해양주식회사
3) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수

* Corresponding author : itkim@pusan.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2013년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

전술한 용접후 처리법은 용접이음부의 피로강도 향상을 위해 강구조물의 공용전 및 제작시에 적용할 수 있는 방법이다. 그러나 이들 용접후 처리법 중 햄머피닝, 니들피닝과 쇼트 피닝법 등은 압축잔류응력의 도입에 의해 피로균열의 발생수명과 진전수명을 향상시키는 방법으로, 이를 공용중인 강구조물의 용접이음에 적용하면 피로손상이 발생한 용접이음의 피로수명도 향상 시킬 수 있을 것으로 예상된다.

이에 본 연구에서는 용접후 피로강도 향상법으로 널리 사용되고 있는 햄머피닝 처리법을 공용 중인 또는 피로손상이 발생한 용접이음에의 적용성을 검토하기 위한 기초적 연구로서 면외거셋 용접이음과 하중비전달형 리브 용접이음의 피로시험을 실시하였다. 피로시험에는 용접후 햄머피닝 처리를 하지 않은 용접그대로의 용접이음, 피로시험 전 (피로수명의 0% 시점) 및 피로시험 중 예상 피로수명의 50% 시점에 햄머피닝 처리한 용접이음을 대상으로 하였으며, 그 결과 햄머피닝 처리의 유무 및 시점이 피로거동과 피로수명 향상에 미치는 영향을 정량적으로 검토하였다.

2. 피로시험

2.1 시험편 제작

본 실험에서 사용된 면외거셋과 리브 필렛용접 시험편은 현재 강교량 제작에 널리 사용되고 있는 용접구조용 강재인 SM490B와 SM400B로 제작하였으며, 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다. 면외거셋과 리브는 반자동용접법인 FCAW (Flux Core Arc Welding)을 이용하여 모재의 양측에 목표 필렛용접치수 6mm로 부착하였다. 그리고 면외거셋 양단에는 돌림용접을 실시하고 용접의 시점과 종점을 두지 않도록 제작하였다.

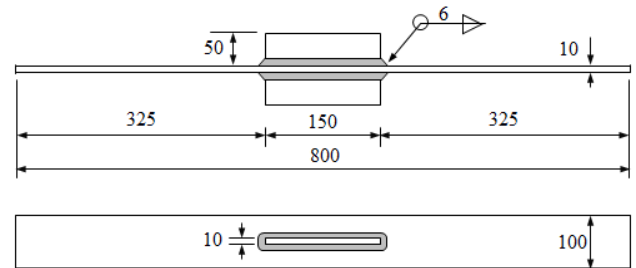
사용 강재의 기계적 성질과 화학성분은 각각 Table 1과 2에 나타내었고, 용접조건은 Table 3에 나타내었다.

2.2 피로시험방법

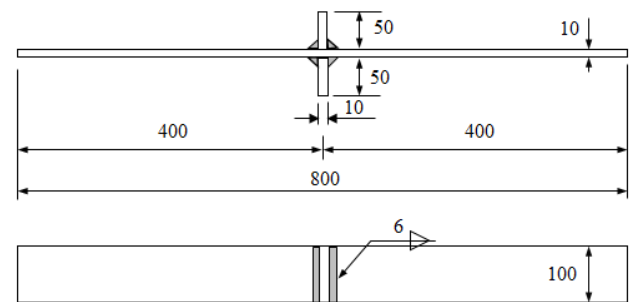
본 실험에서의 햄머피닝 처리는 IIW (2008)을 참고하여, Fig. 2의 분당 타격수 (BMP) 4000이 가능한 상용 공압식 치핑 햄머 (Air Chipping Hammer)를 사용하였고, 햄머피닝 시의 공기압은 0.5~0.6MPa이었다. 그리고 치셀 (Chisel)은 햄머피닝 처리후의 시험편 표면형상 변화를 최소화하고, 압축 잔류응력 도입 표면적을 최대화하기 위해 치셀 끝부분을

4×5mm의 크기로 평평하게 가공한 후, 고주파 열처리를 실시하였다.

시험편은 Table 4에 나타난 것과 같이 면외거셋과 리브를 필렛용접 후 햄머피닝 처리하지 않은 용접그대로 (As-Welded)의 시험편 (이하 AW 시험편이라 칭함), 필렛용접 후 피로시험 전 (피로수명의 0%시점)에 햄머피닝 처리한 시험편 (이



(a) Out-of-plane gusset welded specimen



(b) Rib fillet welded specimen

Fig. 1 Dimension and geometry of test specimens (unit: mm)

Table 1 Chemical composition (wt.%)

Specimen	Metal	C	Si	Mn	P	S
Gusset	SM490B	0.15	0.16	0.91	0.019	0.009
Rib	SM400B	0.15	0.16	0.91	0.019	0.009

Table 2 Mechanical properties

Specimen	Metal	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus of Elasticity (GPa)
Gusset	SM490B	322	456	25	206
Rib	SM400B	280	430	30	206

Table 3 Welding process parameters

Welding wire shield gas	Arc voltage (V)	Welding current (A)	Welding speed (cm/min)
FCAW Dual Shield 7100(E71T-1)	28	265	27.6

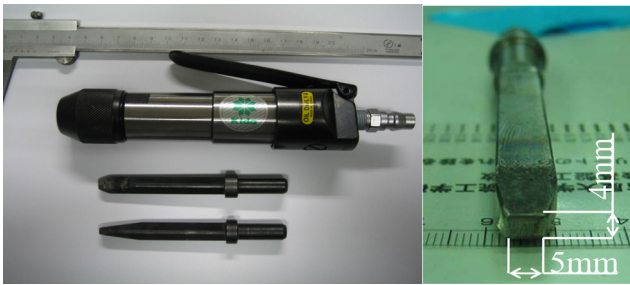


Fig. 2 Hammer-peening tool

Table 4 Test specimen list

Specimen	Weld toe treatment	Symbol	Number
Gusset	As-Welded	AW	6
	Hammer Peening at 0% cycle of fatigue life	HP0	3
	Hammer Peening at 50% cycle of fatigue life	HP50	4
Rib	As-Welded	AW	3
	Hammer Peening at 0% cycle of fatigue life	HP0	3
	Hammer Peening at 50% cycle of fatigue life	HP50	4



Fig. 3 Test setup

하 HP0 시험편이라 칭함)과 필렛용접 후 피로시험 도중 먼저 피로시험한 용접그대로 시험편 (AW)의 피로수명의 50% 시점에 햄머피닝 처리한 시험편 (이하 HP50 시험편이라 칭함)의 3종류로 하였다.

피로시험에는 Fig. 3에 나타난 $\pm 1000\text{kN}$ 용량의 전기유압식 피로시험기를 사용하였다. 응력범위는 100, 150, 200MPa로, 최소응력은 10MPa (최소하중 10kN)로 일정하게 하였다. 그리고 반복하중의 재하속도는 응력범위에 따라 3~7Hz로 하였다.

피로시험은 AW, HP0, HP50 시험편 순으로 실시하였으며, 시험편이 파단 되거나 반복회수가 천만회에 도달할 때까지 실시하였다. HP50 시험편의 피로시험은 피로시험 진행중 용접그대로의 시험편 (AW)의 50% 피로수명에서, 먼저 간이전자현미경 (최대 100배)을 통해 피로균열 발생 유무를 확인하고, 피로시험을 일시 중지하였다. 그리고 반복하중의 최소하중인 10kN을 작용시킨 상태에서 햄머피닝 처리하고, 반복하중을 작용시켜 피로시험을 계속 진행하였다.

피로균열의 발생위치 및 크기를 측정하기 위해서 다이마크 (Dye marking)를 실시하였고, 피로균열 발생 및 성장 과정을 평가하기 위해 일부 시험편에는 최대하중을 고정시키고 반복하중의 진폭을 반감시켜 비치마크 (Beach mark)를 도입하였다. 비치마크에 소요된 반복회수는 피로수명 산정에 포함하지 않았다.

2.3 용접지단부의 기하학적 형상 및 잔류응력 측정

2.3.1 용접지단부의 비드형상 측정

본 실험에 적용된 햄머피닝 처리에 의해 Fig. 4에 나타난 것과 같이 용접토우부의 기하학적 형상 개선 및 압축잔류응력의 도입이 예상된다. 햄머피닝 처리에 의한 용접지단부의 형상변화를 정량화하기 위하여, 피로시험 전에 햄머피닝 처리된 시험편 (HP0), 피로시험 중 예상피로수명의 50% 시점에 햄머피닝 처리된 시험편 (HP50)을 대상으로 용접토우부 4곳을 라텍스고무 (silicon 인장재)를 이용하여 햄머피닝 전·후의 용접토우의 접선각도와 곡률반경을 측정하였다 (Kim et al., 2011). 측정된 접선각도와 곡률반경은 Table 5에 정리하

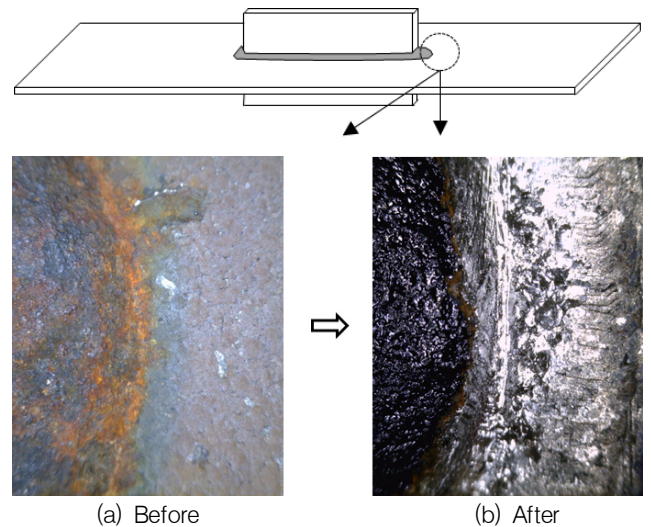


Fig. 4 Weld toe before and after hammer-peening treatment

였다. 그리고 햄머피닝 처리 전·후의 곡률반경 변화에 따른 면외거셋과 리브 용접이음의 응력집중계수를 각각 ESDEP (2012)의 식 (1)과 Tom and Naman (2006)의 식 (2)에 의해 계산하여 Table 6에 정리하였다.

$$K_t = -1.115 \log \frac{r}{t} + 0.5370 \log \frac{L}{t} + 0.1384 \log \frac{h}{t} + 0.2848 \log \frac{e}{t} + 0.6801 \quad (1)$$

$$K_t = \left[1 + 0.2 \left(2 - \frac{s}{t} \right)^{0.5} \left(\frac{t}{r} \right)^{0.5} \right] \quad (2)$$

여기서 r 은 곡률반경이고 t, L, h, e, s 는 각각 모재의 두께 및 거셋의 길이, 거셋의 폭, 거셋의 두께, 필렛용접의 크기이다.

Table 5에 나타난 것과 같이 접선각도는, 용접그대로의 면외거셋과 리브 시험편 (AW)에 비해 HP0 시험편에서는 각각 0.46%, 4.2%로, HP50 시험편에서는 각각 0.15%, 1.7%로 미소하게 증가하였다. 그리고 곡률반경은 AW 시험편에 비해 HP0 시험편은 각각 25%, 29% 증가하였고, HP50 시험편은 15%, 28% 증가하였다. 이와 같은 접선각도와 곡률반경의 증가에 따라 응력집중계수는 Table 6에 나타난 것과 같이 최대 12% 정도 감소하였지만, 이로 인한 피로수명의 증가는 현저하지 않을 것으로 예상된다.

Table 5 Flank angles and curvature radii

Specimen		AW		HP0		HP50	
		Flank angle (°)	Radius (mm)	Flank angle (°)	Radius (mm)	Flank angle (°)	Radius (mm)
Gusset	M [*]	143.68	0.88	144.41	1.27	143.75	1.10
	S [*]	4.71	0.20	5.69	0.22	5.69	0.22
Rib	M	134.92	0.58	142.92	0.96	137.17	0.75
	S	3.72	0.08	2.51	0.09	2.51	0.09

M^{*}: Mean, S^{*}: Standard deviation

Table 6 Stress concentration factors at weld toe

Specimen	AW	HP0	HP50
Gusset	2.65 (0.0)*	2.52 (-5.1)	2.44 (-8.1)
Rib	1.91 (0.0)	1.71 (-10.6)	1.67 (-12.4)

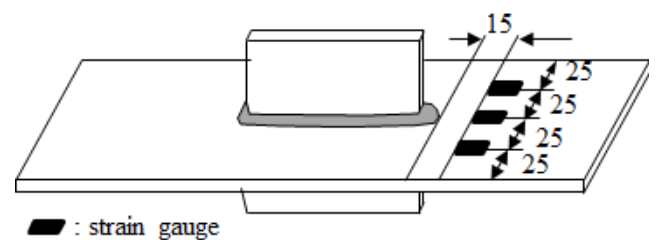
(%): Ratio of stress concentration factor

2.3.2 햄머피닝 처리 전·후의 표면응력 측정

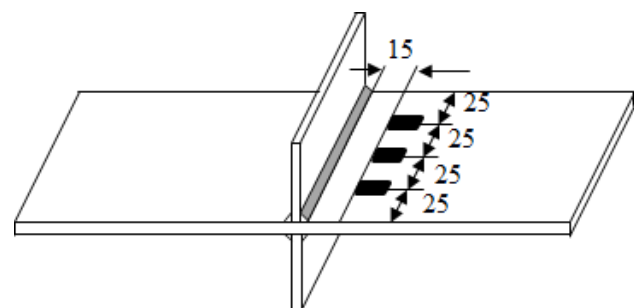
햄머피닝 처리에 의해 햄머피닝 처리된 표면에는 압축잔류응력이 도입되고, 햄머피닝 정도에 따라 압축잔류응력의 도입량이 변화할 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 적절한 햄머피닝의 정도 또는 처리회수를 결정하기 위하여 햄머피닝 회수에 따른 모재 표면의 응력변화를 측정하였다. 햄머피닝 처리에 의해 용접토우부에 도입되는 표면응력의 변화를 측정하기 위하여 Fig. 5에 나타난 것과 같이 용접토우에서 15mm 떨어진 위치에 1축 변형률게이지 3매를 부착하였다.

햄머피닝 처리회수에 따른 변형률 측정에서는 먼저 반복하중의 최소하중인 10kN을 재하한 상태에서 변형률을 측정하고, 1회에서 9회까지 햄머피닝 처리회수를 1회씩 증가시키면서 각 햄머피닝 처리 후의 변형률을 측정하였다. 그 결과, 햄머피닝 처리 전을 기준으로 햄머피닝 처리회수의 증가에 따른 표면응력의 변화량을 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 표면응력은 면외거셋과 리브 시험편에 부착된 3매의 변형률 게이지 중에서 중앙에 부착된 변형률 게이지로부터 측정된 변형률에 탄성계수 210GPa을 곱하여 계산하였다.

Fig. 6에 나타난 것과 같이, 면외거셋 시험편에서는 햄머피닝 처리회수 7회 후에 약 177MPa의 압축응력이 도입되었고, 리브 시험편의 경우에는 7회 처리 후에 113MPa 정도의 압축응력이 도입되었다. 그리고 7회 이후의 처리회수 증가에



(a) Gusset specimen



(b) Rib specimen

Fig. 5 Attachment of strain gauges (unit: mm)

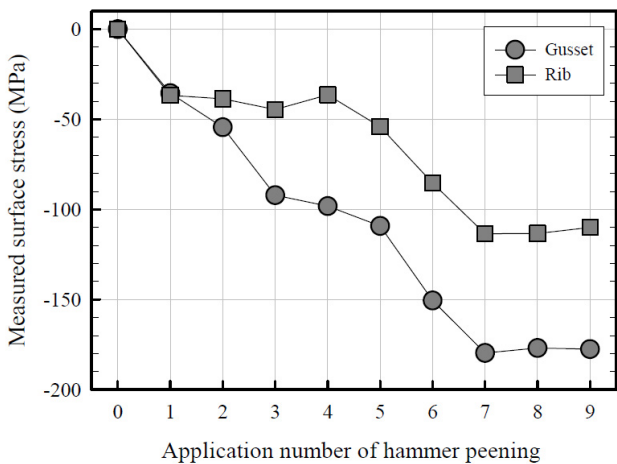


Fig. 6 Change in surface stress according to application number

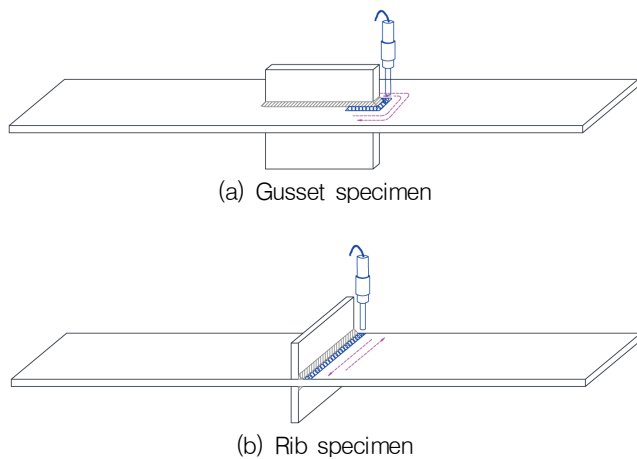


Fig. 7 Hammer peening processing

다른 압축응력의 증가는 미미하였다. 이에 본 실험에서 햄머 피닝 처리회수는 면외거셋과 리브 시험편에서 모두 7회로 일정하게 하였다. 여기서 햄머피닝 처리회수 1회는 Fig. 7에 나타난 것과 같이, 햄머피닝기를 모재표면에 직각으로 거셋과 리브의 용접토우부에 접하게 왕복하여 피닝 처리한 것으로 하였다.

적절한 햄머피닝 처리회수를 결정하기 위하여 면외거셋과 리브 시험편에서 피로균열의 발생이 예상되는 4곳의 용접토우부 중 한 곳을 대상으로 변형률 게이지를 부착하고 햄머피닝 처리를 실시하였다. 따라서 이와 같이 편면에 햄머피닝 처리를 7회 실시하면 면외거셋 용접토우 부근에는 177MPa, 리브 용접토우 부근에서는 113MPa의 압축응력이 도입됨을 알 수 있다.

그러나 본 실험에서는 통상적인 면외거셋과 리브 용접이

음 시험편과 동일하게 모재 양면에 면외거셋과 리브를 필렛 용접하여 시험편을 제작하였다. 그리고 햄머피닝도 한 곳이 아닌 양면 4곳의 용접토우부에 실시하였다. 따라서 동일한 시험편인 경우에도 용접토우부 4곳을 햄머피닝 처리한 경우와 용접토우부 한 곳을 햄머피닝 처리한 경우에는 압축응력 도입 정도가 다를 것으로 예상된다. 즉, 양면 면외거셋과 리브 시험편에서 햄머피닝을 편면에 적용한 경우와 양면에 적용한 경우에는 햄머피닝에 의한 표면응력의 변화량이 다를 것으로 예상된다.

편면 및 양면 햄머피닝 처리에 의한 표면응력의 변화를 검토하기 위하여 용접토우부 4곳 모두를 햄머피닝 처리한 HP0와 HP50 시험편의 표면응력도 측정하였다. 변형률 측정에서는 먼저 응력범위의 최소응력 10MPa을 가한 상태에서 변형률을 측정 후, 변형률 게이지를 부착한 용접토우부를 시작으로 용접토우부 4곳에 각각 7회씩 햄머피닝 처리를 실시하고 변형율을 재 측정하였다. 그 결과, 면외거셋 시험편에서는 양면 햄머피닝 처리에 의해 44~72MPa의 압축응력이 도입 되었으며, 리브 시험편에서는 30~83MPa의 압축응력이 도입 되었다. 이와 같은 변형률 측정을 통해, 용접토우부 4곳의 햄머피닝 처리 순서가 압축응력 도입에 미치는 영향을 검토할 수 없었지만, 양면 햄머피닝 처리하는 경우에는 편면 햄머피닝 처리에 의해 도입된 압축잔류응력이 다른 편면의 햄머피닝에 의해 완화되어 그 결과 양면 햄머피닝시의 압축응력이 편면에 비해 작게 도입되는 것으로 추정된다.

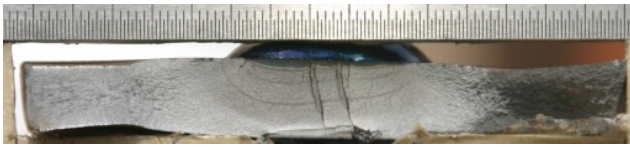
위와 같이 용접토우부에 햄머피닝 처리를 실시하면 압축응력이 도입되고, 이로 인하여 햄머피닝 처리된 면외거셋과 리브 시험편의 피로수명이 증가할 것으로 예상된다.

3. 피로시험 결과

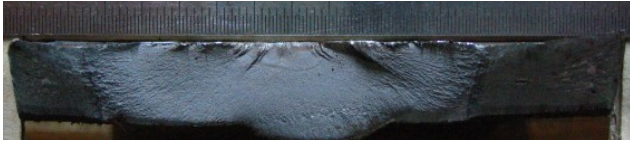
3.1 피로균열의 발생 및 진전거동

대표적인 면외거셋과 리브 시험편의 파단면을 각각 Fig. 8에 나타내었다. 면외거셋 시험편의 경우, 거셋단부의 용접토우에서 2~3개의 피로균열이 발생하여, 반타원형 균열로 진전하였다. 그리고 리브 시험편의 경우에는 용접토우에서 다수의 피로균열이 발생한 후 합체하여 하나의 얇은 반타원 균열로 진전하였다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 햄머피닝 처리의 유무에 따른 피로균열의 발생위치 및 진전형상의 현저한 차이는 확인되지 않았다.

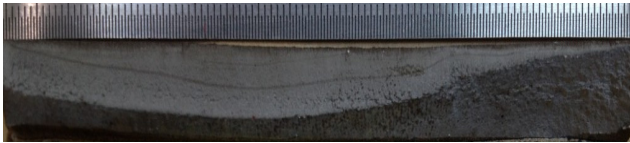
응력범위 200MPa의 면외거셋 AW 시험편과 HP50 시험



(a) AW gusset specimen ($\Delta\sigma=200$ MPa)



(b) HP50 gusset specimen ($\Delta\sigma=200$ MPa)



(c) AW rib specimen ($\Delta\sigma=200$ MPa)

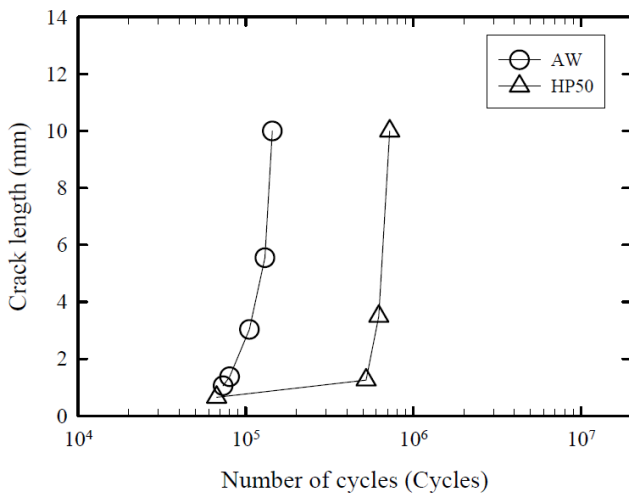


(d) HP50 rib specimen ($\Delta\sigma=200$ MPa)

Fig. 8 Typical fracture surfaces

편, 그리고 150MPa의 리브 AW 시험편, HP0과 HP50 시험편의 파단면에 남겨진 다이마킹과 비치마크로부터 측정된 두께방향으로 피로균열길이 (a)와 이에 해당하는 반복회수 (N)를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9(a)에 나타낸 것과 같이 면외거셋 AW 시험편의 경

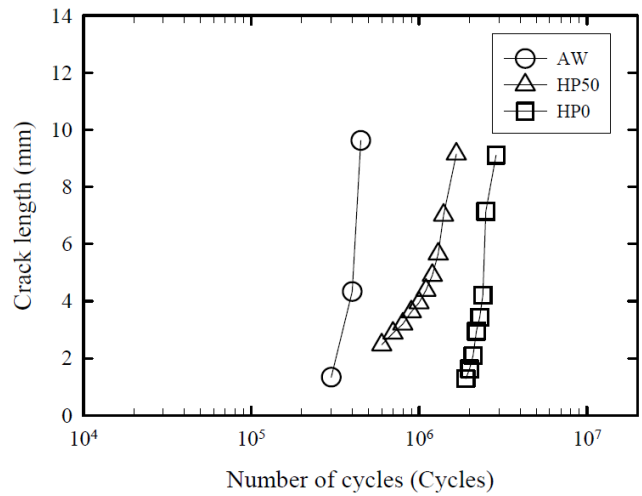


(a) Gusset specimen ($\Delta\sigma=200$ MPa)

우에는 반복회수 약 7.3만회에 1.1mm의 피로균열이 발생하였으며, 반복회수가 8.0만회, 10.5만회, 14.4만회로 증가함에 따라 피로균열도 1.4, 3.0, 10.0mm로 진전하여 파단 되었다. 이와 비교하여 HP50 시험편은 반복회수 7.2만회 (피로수명의 50% 시점)에서의 햄머피닝 처리에 의해 피로균열이 약 1mm에서 1.3mm로 진전하는데 46만회가 소요되었다. 따라서 피로수명의 50% 시점에서의 햄머피닝 처리로 표면 압축잔류응력이 발생하여 피로균열진전이 지연되어 피로균열 진전수명이 증가하고 피로수명도 증가함을 추정할 수 있다. 그리고 리브 시험편의 경우에도 Fig. 9(b)에 나타낸 것과 같이 햄머피닝 처리로 도입된 표면 압축잔류응력에 의해 피로균열 발생수명이 증가하거나 피로균열 진전이 지연되어 피로수명이 증가함을 추정할 수 있다. 따라서 피로수명의 50% 시점에서의 햄머피닝처리로 용접도우부에 압축잔류응력이 도입되어, 그 결과 면외거셋과 리브 용접이음의 피로균열 발생수명 또는 진전수명이 증가하여 전체 피로수명이 증가함을 추정할 수 있다.

3.2 피로수명

면외거셋과 리브 시험편의 피로실험 결과를 S-N 선도로 Fig. 10에 나타내었다. 기존의 용접그대로의 면외거셋과 십자형필렛 시험편의 피로실험 결과도 Fig. 10에 나타내었다. 그리고 피로 파괴된 전체 용접그대로 (AW)의 데이터에 대해 최소자승법으로 계산한 평균회귀곡선과 표준편차도 도시하였다.



(b) Rib specimen ($\Delta\sigma=150$ MPa)

Fig. 9 a-N Curve

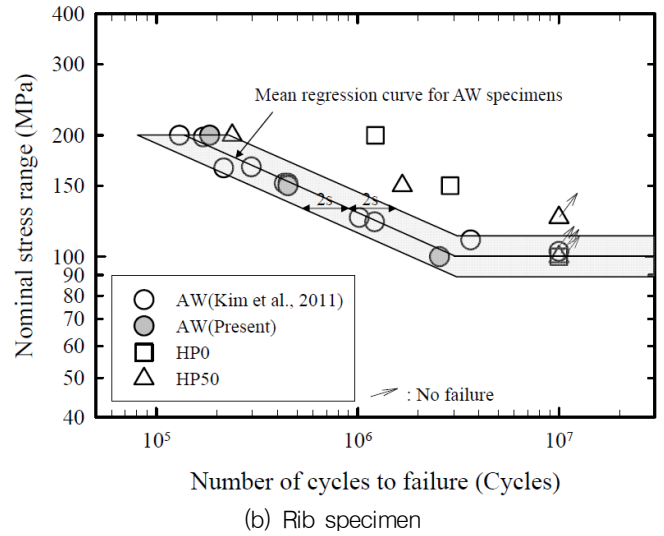
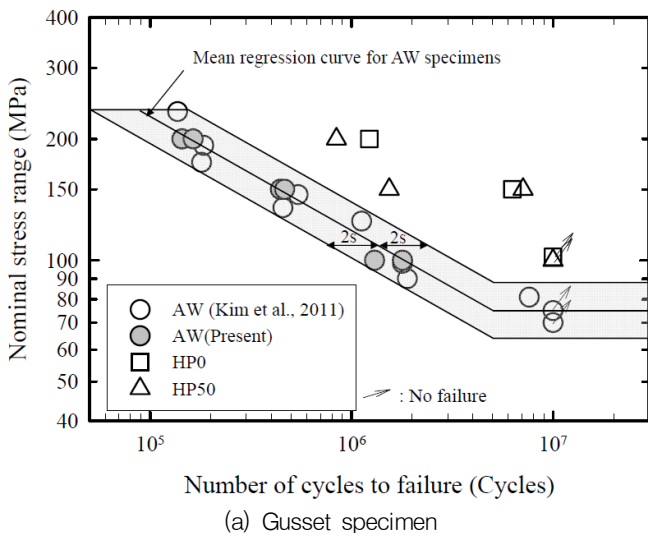


Fig. 10 S-N curves

Fig. 10에 나타난 것과 같이 면외거셋 용접이음의 피로수명은 AW 시험편에 비교하여, 응력범위 200MPa에서 HP50 시험편은 5.6배, HP0은 8.1배 증가하였다. 그리고 응력범위 150MPa과 100MPa에서 HP50 시험편은 각각 평균 9.6배와 6.2 이상, HP0 시험편은 13.9배 이상과 6.2배 이상 증가하였다. 그리고 천만 회까지 피로파괴가 발생하지 않은 응력범위를 피로한계라고 하면, 피로한계는 AW 시험편에 비교하여 HP50과 HP0 시험편은 각각 1.3배 이상 향상되었다.

리브 용접이음의 피로수명은 AW 시험편에 비교하여 응력범위 200MPa에서 HP50 시험편은 1.5배, HP0 시험편은 7.8배 증가하였다. 그리고 응력범위 150MPa과 125MPa에서 HP50 시험편은 각각 3.8배와 9.0배 이상, HP0 시험편은 150MPa에서 6.5배 증가하였다. 그리고 HP50 시험편의 피로한계는 AW 시험편에 비교하여 1.3배 이상 향상 되었다.

작용응력범위와 용접이음의 종류에 따른 HP50 시험편의 피로강도 향상효과를 비교하면, 작용응력범위가 작을수록 피로강도 향상효과는 증가하고, 리브용접이음에 비해 면외거셋 용접이음의 피로강도 향상효과가 더 크게 발생함을 알 수 있다.

위의 결과로부터 용접그대로 용접이음의 피로수명의 50% 시점에 햄머피닝 처리를 실시하면, 면외거셋 용접이음의 경우에는 피로수명이 5.6배 이상 향상되고 피로한도는 1.3배 향상됨을 알 수 있다. 그리고 리브 용접이음의 경우에는 피로수명이 1.5배 이상, 피로한계는 1.3배 이상 향상됨을 알 수 있다. 따라서 햄머피닝 처리법은 강구조물 제작시 적용하여 용접이음의 피로수명을 크게 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 이를 공용기간이 예상 피로수명의 50% 이하인 강구조물의

용접이음에 적용하여도 최소 30% 이상의 피로수명과 피로한계 향상 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 피로손상이 발생한 공용중인 강구조물의 용접이음의 보수·보강법으로 햄머피닝 처리법을 직접 적용하기 위해서는 추가적인 실험을 통한 피로실험 데이터의 축적 및 이에 대한 검토가 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 용접후 피로강도 향상법으로 널리 사용되고 있는 햄머피닝 처리법을 공용중인 또는 피로손상이 누적된 용접이음에의 적용성을 실험적으로 검토하기 위하여 면외거셋 용접이음과 십자필렛 용접이음 시험편의 피로실험을 실시하였다. 본 실험으로부터 얻어진 주요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 면외거셋 및 리브 필렛용접이음의 편면 햄머피닝 처리에 의해 용접도우부에는 각각 177MPa와 113MPa 정도의 압축응력이 도입되었다. 양면 햄머피닝 처리에 의해서는 면외거셋 시험편에는 44~72MPa, 리브 시험편에는 30~83MPa의 표면 압축응력이 도입되었다.
- (2) 햄머피닝 처리된 면외거셋과 리브 시험편의 피로수명은 햄머피닝 처리되지 않은 시험편에 비교하여 각각 5.6배와 1.5배 이상 향상되었다. 그리고 햄머피닝 처리에 의해 피로한계 (천만회의 피로강도)도 각각 1.3배 이상 향상되었다.

- (3) 용접후 피로강도 향상법으로 사용되고 있는 햄머피닝 처리법은 예상 피로수명의 50% 이하의 공용중인 용접 이음에 적용하여도 최소 30% 이상의 피로강도 향상 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의해 연구되었음.

References

1. Haagensen, P. J., The Effects of Grinding and Peening on the Fatigue Strength of Welded T-Joints, International Institute of Welding (IIW) Document, XIII-1510-93, 1993.
2. Han, J. and Han, S., "Research for fatigue life extension technique in weldments via pneumatic hammer peening", Transactions of the KSME A, vol. 33, No. 8, 2009, pp.842-848. (in Korean)
3. Hong, S., Kyung, K., Choi, D. and Yong, H., "Fatigue characteristics of non load-carrying fillet welded joints according to post-processing in weld bead toes", Journal of Korean Society of Steel Construction, vol. 12, No. 6, 2000, pp.701-713. (in Korean)
4. International Institute of Welding (IIW) Commissions XIII and XV, IIW Recommendations on post weld improvement of steel and aluminum structures, IIW Document XIII-1815-00, 2001.
5. International Institute of Welding (IIW) Commissions XIII and XV, Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW Document XIII-1823-07, 2008.
6. Japan Society of Steel Construction (JSSC), Fatigue design recommendations for steel structures, JSSC, Gihodo Shuppan, 1993. (in Japanese)
7. Kim, I., Jung, Y. and Lee, D., "Improving fatigue strength of weld joints by blast cleaning used in painting steel bridge", Journal of Korean Society of Steel Construction, vol. 23, No. 2, 2011, pp.137-146. (in Korean)
8. Lim, C., Park, M. and Chang, C., "The study about the fatigue strength improvement mechanism by the processing of fillet welded joint", Journal of Korean Society of Steel Construction, vol. 11, No. 3, 1999, pp.319-327. (in Korean)
9. Maddox, S. J., Fatigue of steel Fillet Welds Hammer Peened under Load, IIW Document XIII-1690-97, 1991.
10. Mori, T., Shirai, A., Sasaki, K., Nakamura, M., "Repair for fatigue cracks at connection between main girder web and lateral girder flange by bolting stop-hole method with attached plates", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1, vol. 67, No. 1, 2011, pp.493-502. (in Japanese)
11. The European Steel Design Education Programme (ESDEP), WG12 Fatigue, Lecture 12.12- Determination of stress intensity factors, 2012, pp.22-23.
12. Tom Lassen and Naman Recho, Fatigue life analyses of welded structures, ISTE Ltd., 2006, pp.372-373.
13. Yamada, K., Kakiichi, T., Ishikawa, T., Extending fatigue life of cracked welded joints by impact crack closure retrofit treatment, IIW-Documents XIII-2289r1-09, 2009.

Received : 02/26/2013

Revised : 04/03/2013

Accepted : 04/10/2013

요 지

본 연구에서는 피로 손상된 용접이음의 피로수명 향상을 위한 방법으로 햄머피닝 처리법의 적용성을 검토하기 위하여 면외거셋 필렛 용접이음과 하중비전달형 리브 필렛 용접이음의 피로실험을 실시하였다. 본 실험에서는 면외거셋과 리브를 필렛 용접한 후 햄머피닝 처리를 하지 않은 용접그대로의 시험편, 용접후 햄머피닝 처리한 시험편, 그리고 용접그대로 시험편의 피로수명의 50% 시점에 햄머피닝 처리를 한 시험편의 피로실험을 실시하였다. 그리고 햄머피닝 처리에 의한 면외거셋과 리브 용접도우부의 형상 및 표면응력의 변화를 측정하였다. 그 결과, 햄머피닝처리에 의해 30~83MPa의 압축잔류응력이 도입 되었으며, 이로 인하여 강구조물의 제작시 용접후에 햄머피닝 처리를 실시하면 피로수명을 크게 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 이를 공용기간이 예상 피로수명의 50% 이하인 강구조물의 용접이음에 적용하여도 최소 1.3배 이상의 피로수명과 피로한계 향상효과를 기대할 수 있음을 제시하였다.

핵심 용어 : 거셋, 리브, 필렛용접이음, 압축잔류응력, 햄머피닝처리, 피로수명향상