

# 필렛용접이음부의 후처리에 따른 피로강도 향상 메커니즘의 연구

## The Study about the Fatigue Strength Improvement Mechanism by the Processing of Fillet Welded Joint

임 청 권<sup>1)</sup> · 박 문 호<sup>2)</sup> · 장 준 호<sup>3)</sup>

*Lim, Cheong Kweon Park, Moon Ho Chang, Chun Ho*

요 약 : 본 연구는 필렛용접 이음으로 된 종리브 십자 시험체를 대상으로 용접토우의 후처리에 의한 피로강도 향상의 메커니즘을 밝히고, 적절한 후처리법을 제안하고자 한다. 인장피로시험 결과, 용접 그대로의 시험체 보다는 후처리된 시험체들에서 피로강도 향상이 보였다. 특히, 피로균열 발생수명  $N_c$ 는 해머피닝(Hammer-Peening) 후 그라인더 처리를 한 시험체에서, 그리고 피로균열 진전수명  $N_p$ 는 해머피닝 시험체들에서 각각 증가현상을 보였다. 여기서,  $N_c$ 는 용접토우의 기하학적 형상, 즉 응력집중의 완화때문에, 또한  $N_p$ 는 해머피닝에 의해 표면에 도입된 큰 압축잔류응력이 피로균열의 진전을 억제하고 있기 때문이라고 생각된다.

ABSTRACT : This study makes mechanism of the fatigue strength improvement by the processing of weld toe clear for the vertical cross rib specimens which was made fillet weld joint, also it proposes to the appropriate later processing. As a result of tension fatigue test, the fatigue strength improvement could have been seen in later processed specimens than as-weld specimens. Especially, fatigue crack initial life  $N_c$  increased in specimens which processed grinder after hammer-peening. Also, fatigue crack propagation life  $N_p$  improved more in hammer-peening specimens than as-weld or TIG specimens. It thinks that  $N_c$  is because of the geometrical shape of weld toe, i.e. the relaxation of the stress concentration and also that  $N_p$  is because the big compression residual stress which was introduced in the surface by hammer-peening is restraining the propagation of fatigue crack.

핵심용어 : 피로균열 발생수명, 진전수명, 응력집중, 압축잔류응력, 피로강도

KEYWORDS : fatigue crack initial life, propagation life, stress concentration, compression residual stress, fatigue strength

1) 정희원, 서일대학교 토목공학과 교수  
2) 정희원, 경북대학교 토목공학과 교수  
3) 정희원, 경북대학교 토목공학과 공학박사

본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

최근, 구조물의 대형화·고성능화의 요구가 높아짐에 따라, 고강도 강철의 수요가 증가하고 있다. 교량에 고강도 강을 사용하면, 구조의 경량화, 장대화가 가능하고, 강관의 판 두께가 얇아짐에 따라 운반이 쉬워지고, 절단이나 가공, 용접 시공이 용이해진다.<sup>(1)</sup> 그러나 모재의 강도가 높다고 하더라도, 용접이음부에서의 피로강도는 강재강도에 의존하지 않는다.<sup>(2)</sup> 이것은, 강재강도가 높으면 균열 감수성도 커지고, 또 용접잔류응력도 커지기 때문에 열 이력을 받은 용접부가 재질 변화를 일으키고 피로균열이 용접금속측으로 전파되기 때문이다. 실제로 대형시험체를 이용한 피로시험결과에서 강재강도의 상승에 따라 피로강도가 저하한다(피로강도의 강재강도 역 의존성)고 하는 보고<sup>(3,4)</sup>가 있다. 그 때문에 고강도강을 용접 구조로써 교량부재에 이용한 경우는 높은 재료강도를 그대로 설계에 적용하는데 제약이 생기며, 따라서 고장력강의 피로강도개선, 즉 용접이음부의 피로강도 향상문제가 극히 중요하게 된다.

현재, 용접이음부의 피로강도향상법으로서 각국, 각 분야에서 TIG 처리(TIG-Dressing), 그라인딩(Grinding), 해머피닝(Hammer-Peening) 등의 처리방법이 제안되고, 실용화의 단계에 들어갔다.<sup>(5~8)</sup> 그러나, 세계적으로 이들 후처리의 규정이 정해져 있지 않고, 용접이음부의 각 처리에 의한 피로강도 향상의 원인이 명확하게 밝혀지지 않았기 때문에 각 용접이음부의 최적 처리방법에 대한 평가가 이루어지지 않고 있다. 이와 같이, 후처리에 대한 일반적인 규정을 정하고 실용성을 향상시키기 위해, 각 용접이음부에 대해서 어떠한 방법으로 후처리를 하면 어떠한 원인으로 강도가 향상하는가 하는 피로강도 향상의 정량적 평가와 그 향상 메커니즘을 보다 명확히 밝힐 필요가 있다. 또한, 후처리에 의해 용접토우부의 피로강도가 향상되면서, 상대적으로 피로강도가 낮아진 용접루트부에서 균열의 발생 가능성도 배제할 수가 없다.

이에 본 연구는 필렛용접 이음으로 된 종리브 십자 시험체를 대상으로 용접토우부 처리에 의한 피로강도 향상 메커니즘을 밝히고 적절한 후처리법에 대해 제안하고자 한다. 그 방법으로는, 우선 고강도 강을 사용한 종리브 십자 이음을 가진 용접 그대로(AW)인 시험체와 TIG, 해머피닝 및 Grinding 등의 후처리를 행한 시험체를 각각 제작한 후, 인장피로시험을 통해 피로강도를 서로 비교하고, 그 비교결과를 토대로 피로강도 향상 메커니즘을 고찰해 보고자 한다.

## 2. 종리브십자시험체의 인장피로시험

### 2.1 시험체 및 실험의 개요

시험체는 용접비드의 절단이 없고 용접토우부의 처리에 대해서 잔류응력이 비교적 그대로 남아있는 하중 비전달형 종리브십자이음을 선택해서 인장피로시험을 행했다. 이는 실구조물이나 대형 시험체에 가까운 형상이며 잔류응력의 절대치에 의한 피로시험이 가능하다.<sup>(9)</sup> 그러나, 인장하중에 의한 응력분포를 고려하면, 용접루트부에 인장응력이 존재하고, 용접토우부의 개선에 의해 용접루트부에서부터 균열이 발생할 가능성이 있다. 그러므로 처리에 의한 용접토우부의 피로강도 향상효과를 확인할 수 있고, 또한 처리에 의해 용접루트부의 피로강도가 상대적으로 저하해서 균열이 발생하는 현상을 검토할 수 있을 것으로 생각된다.

그림 1에 시험체의 형상 및 치수를, 표 1에 시험체의 기계적 성질 및 화학적 성분을, 표 2에 용접조건을 각각 보인다. 모재는 SM570(항복강도 555[MPa], 인장강도 626[MPa]), 리브는 SS400을 사용해서, 저수소계 용접봉에 의한 서브머지드 아아크용접(submerged arc welding)을 행하였다.

용접 그대로(As-Weld, AW로 표기)의 시험체에 모판측 용접토우부를 후처리하였다. 처리 방법으로는 현재 국제적으로 제안되어지고 있는 TIG-Dressing

표 1. SM570강의 기계적 성질 및 화학적 성분

Mechanical Property			Chemical Property (%)								
Yield Stress	Tension Stress	Elongation	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
555 (MPa)	626 (MPa)	40 (%)	0.14	0.35	1.32	0.009	0.002	0.001	0.02	0.03	0.01

(TIG로 표기), 해머피닝 (HP로 표기)을 용접토우부에 실시했으며, HP는 1패스(HP1)와 3패스(HP3)의 2종류를 하고, 특히 HP1은 그라인더 및 사포로 연마함으로써 처리면의 거칠기를 제거한 시험체(HP1+G로 표기)도 사용했다. TIG의 처리조건은 표 3에, HP는 표 4에 각각 나타낸다.

피로균열의 발생은 용접토우에 붙인 변형률 게이지(Strain Gauge)의 이완률로 부터 측정했다. 이때 피로균열발생수명  $N_c$ 는 균열깊이 1mm에 해당하는 하중반복회수를 사용했다.<sup>(10)</sup> 게이지 위치는 그림 2와 같이 토우에서 2mm 위치에 폭 1mm 게이지를 설치했다. 또한 일부의 시험체에 균열의 진전을 확인하기 위해 응력집중게이지를 부착했다. 피로시험은 정적 최대부가능력  $\pm 294\text{KN}$ , 최대변위  $\pm 25\text{mm}$ 의 유압 서브(surb)제어시험기를 이용해서 하중제어를 했다. 재하는 일축반복인장재하로, 응력비 $R=0$ , 파형은 sine파, 주파수는 8~15 (Hz)이다. 여기서 최대공칭응력 범위는 응력비 0에 대해서 250[MPa]로 하였다. 그리고, 균열이 발생하지 않았을 때의 최대 인장하중 변위보다 2.5mm 이상 변위가 발생했을 때를 시험체의 파괴로 정의하고, 이때의 하중반복회수를 파단수명  $N_f$ 로 하였다.

표 2. 용접조건

용접봉	저수소용접봉 L-60G
	항복강도 530 (MPa)
	인장강도 630 (MPa)
용접조건	서브머저지드 아크용접 (SMAW)
	전류 320 (A)
	전압 28 (V)
	속도 24 (cm/min)

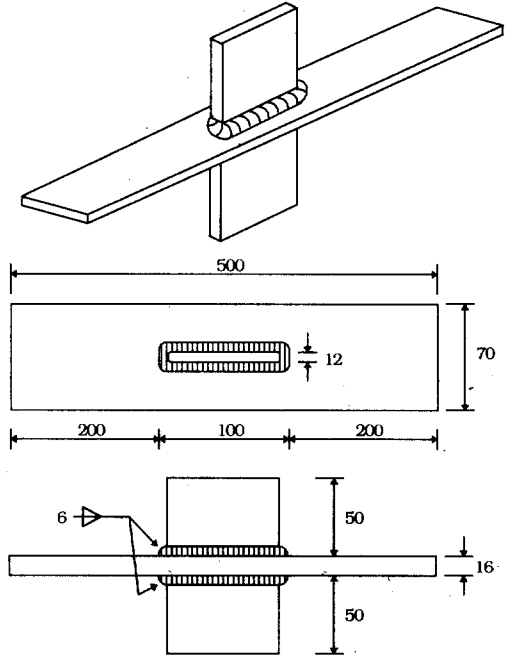


그림 1. 시험체의 형상 및 치수

표 3. TIG 처리조건

사용한 TIG	590~780 N/mm <sup>2</sup> 급 고장력강용 TIG TGS-62
	0.2% 내력 480 (MPa)
	인장강도 630 (MPa)
TIG 처리조건	전류 150 (A)
	전압 14 (V)
	속도 79 (mm/min)

표 4. HP 처리조건

선 단 직 경	12 mm
압 축 공 기	6 kg/cm <sup>2</sup>
타 격 회 수	43 타/sec
기 구 중 량	1.7 kg
이 동 속 도	6 mm/sec
타 격 각 도	45 도
패 스 수	1, 3 패스

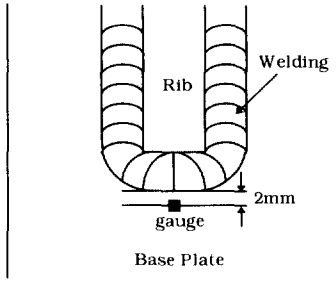


그림 2. 변형률 게이지의 부착 위치

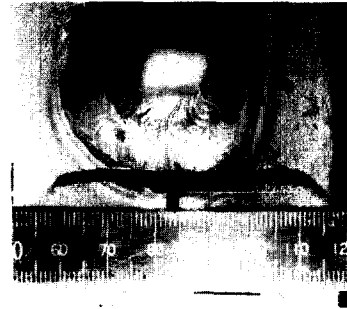
### 3. 인장피로시험의 결과

인장피로시험 결과, 각 시험체의 파괴양상을 그림 3에 보인다. 그림 3(a)의 AW 시험체는 용접 지단부에서 균열이 발생하고, 토우를 따라 어느

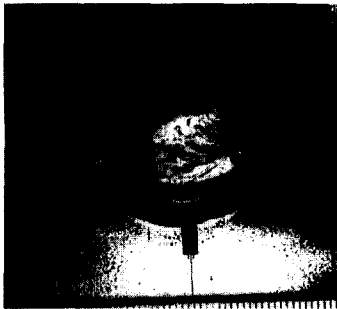
정도 진전한 후 도중에서 하중방향과 직각으로 진행해서 파괴된다. 본 시험체는 십자 이음임으로 복수의 토우가 존재하며, 2곳 이상에서부터 균열이 발생했다. 그림 3(b)의 TIG 처리 시험체는, 대체로 처리부 내측으로 1~1.5mm 정도 들 어간 위치에서 균열이 발생하고, 직선적으로 표면 및 내부로 진전해서 파괴되었다. 그림 3(c)의 HP1 시험체는 AW와 비슷하게 처리 전의 토우 부를 따라 곡선적으로 균열이 발생, 진전하고, 도 중에서 하중방향과 직각으로 진행해서 파괴되었 다. 그림 3(d)의 HP1+G와 그림 3(e)의 HP3 시험체는 루트부에서 균열이 발생, 진전해서 파괴 되었다. 이러한 루트부에서 발생한 균열로부터 토 우의 파괴강도는 충분히 개선되어졌음을 알 수 있다. 그리고, 그림 3(f)에서 HP1 시험체의 마



(a) AW 시험체



(b) TIG 시험체



(c) HP1 시험체

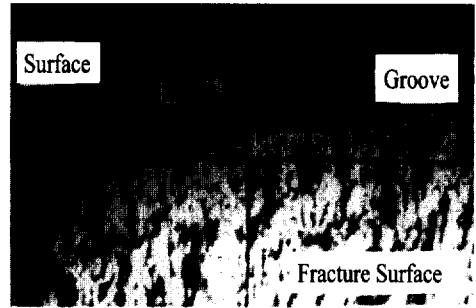


(d) HP1+G 시험체

그림 3. 인장피로시험 후 각 시험체들의 파괴양상



(e) HP3 시험체



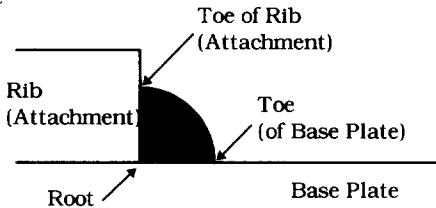
(f) HP1 시험체의 마이크로 스코프 관찰

그림 3. 인장피로시험 후 각 시험체들의 파괴양상

표 5. 인장피로시험의 균열발생 장소

	Toe	Root	Toe of rib
As-Weld	○		
TIG-Dressing	○		○
HP1	○		
HP1+G		○	
HP3		○	

where



이 마이크로 스코프 관찰 그림을 보면, 해머피닝후 표면부에 생긴 미세 홈(groove)들을 볼 수 있다. 이들 미세 홈들은 초기균열화 되어 피로균열 발생수명에 많은 영향을 끼칠 것으로 생각된다. 위의 시험체에 대한 피로시험결과를 요약해서 표 5에 나타낸다. 본 연구에서의 피로시험결과를 공칭응력범위와 파단수명  $N_f$ 와의 관계로 해서 그림 4에 보인다. 여기에서, 처리를 하지 않은 AW시험체보다는 처리 후의 시험체들에서 피로강도가 향상된 것을 확인할 수 있다. 또한, 고응력범위보다 저응력범위에서의 피로강도가 더 크다는 것을 알 수 있고, 루트에서 균열이 발생한 HP1+G와 HP3 중, 본 실험에서 가능한 응력범위인 250MPa까지는 HP3의 피로강도가 높음을 알 수 있다.

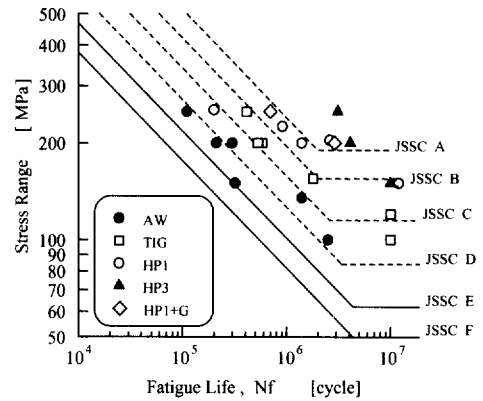


그림 4. 파단수명과 공칭응력범위와의 관계

그리고, 위의 그림 4는 JSSC의 피로설계곡선<sup>(2)</sup>과 함께 비교하였으며, JSSC에 의하면, 본 실험에서 사용한 이음에 대한 토우보강은 E등급으로, 비보강이음은 F등급으로 규정짓고 있다. 이에, 본 실험의 AW는 E등급을 만족하고 있고, TIG는 C등급을 만족하고 있다. HP1은 고응력범위에서 D등급, 저응력범위에서는 B등급까지 올라간다. 그리고, HP3 및 HP1+G는 본 실험의 공칭응력범위에서 상당히 높은 등급상승이 보인다.

그림 5에 각 시험체의 피로균열 발생수명  $N_c$ 와 공칭응력범위의 관계를 보인다. 이 그림으로부터, 후처리를 한 시험체들이 AW시험체보다  $N_c$ 가 향상되었음을 알 수 있다. 이는, 용접토우부의 표면처리에 의해 응력집중이 완화되었기 때문이라고

생각된다. 여기서, HP1보다 HP1+G와 HP3의  $N_c$ 가 훨씬 증가된 것은, 마이크로 시험에서도 알 수 있듯이 표면이 상대적으로 거친 HP1은 시험체 표면에 생긴 흠이 초기균열로 되었기 때문에 피닝후 한 번더 그라인더를 해서 표면을 매끄럽게 처리한 HP1+G, 또는 많은 피닝처리에 의해 초기균열이 없어진 HP3보다 피로균열 발생수명이 많이 떨어지게 된다. 한편, 이들 시험체의 피로균열 발생수명의 향상원인으로써 응력집중의 영향을 다음절에서 밝히기로 한다.

다음으로, 그림 6의 피로균열 진전수명  $N_p$ 와 공칭응력범위와의 관계를 보면, TIG시험체는 AW와 비교해서  $N_p$ 가 크게 향상되지는 않았지만, 피닝처리를 한 HP 시험체들에서 상당한 향상효과가 있음을 알 수 있다. 이는, HP 시험체들에 가해진 해머피닝에 의해 시험체에 압축잔류응력이 도입되었고 이것이 균열의 진전을 억제하고 있다고 생각된다.

또한, 위 그림들에서 용접토우부의 후처리에 의해 토우부의 피로강도는 향상되었다고 할 수 있겠지만, 용접루트부에서 피로균열이 발생하는 점으로 미루어, 상대적으로 강도가 약해진 용접루트부의 피로강도 개선 방법을 모색할 필요가 있다고 생각되며, 이는 다음 논문에서 다루기로 한다.

#### 4. 피로균열의 발생과 진전에 대한 영향의 검토

##### 4.1 응력집중의 영향

응력집중계수를 구하기 위해 각 시험체들에 대한 해석과 실험을 행하였다. 그 중 해석방법에 대해 간단히 서술하면 다음과 같다.

용접토우부의 기하학적 형상인  $\rho$ 와  $\theta$ 를 측정하기 위해 우선, 각 시험체들의 처리부에서 인상재(印象材)에 의한 형뜨기를 행하고, 그 형을 1mm 간격으로 슬라이스한 후 확대투영기를

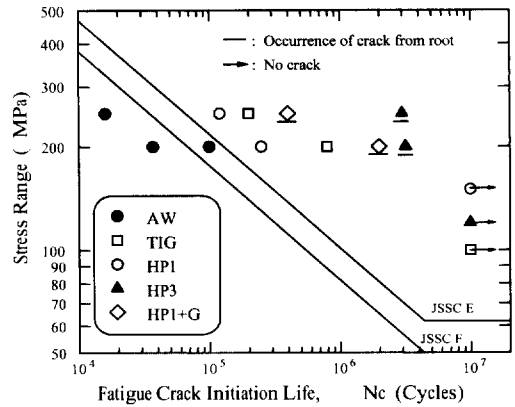


그림 5. 피로균열 발생수명과 응력범위와의 관계

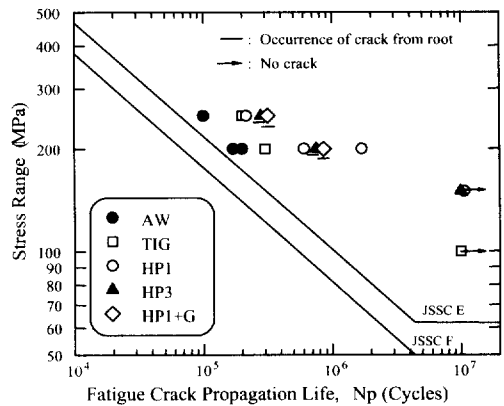


그림 6. 피로균열 진전수명과 응력범위와의 관계

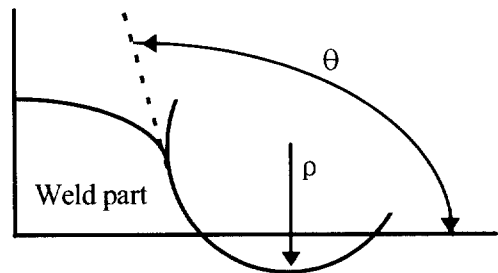


그림 7. 용접토우부의 기하학적 형상 측정

통해 10배로 확대해서 그림 7에 보이듯이  $\rho$ 와  $\theta$ 를 측정하고 대략적인 평균치를 취하여 표 6과

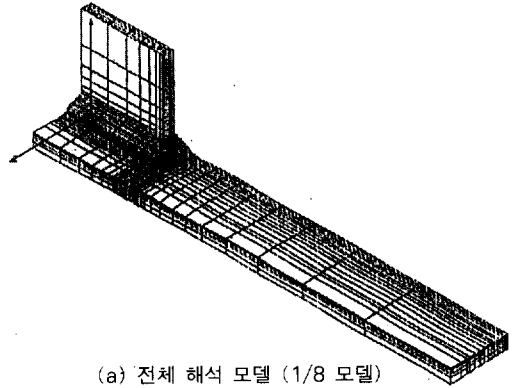
같이 정리하였다. 측정된  $\rho$ 와  $\theta$ 로부터 가능한 실물과 일치하도록 그림 8과 같이 3차원 유한 요소 해석 모델을 설정하였다. 이때, 각 처리부의 형상을 고려하는 3차원 해석이므로 계산용량의 부족으로 인해 우선 그림 8(a)처럼 전체해석을 행하고 그 후, 그림 8(b)와 같이 확대된 용접이음부에 경계조건을 넣어서 각 시험체들의  $\rho$ 와  $\theta$ 를 고려한 토우부의 응력상태를 구하였다. 이들 해석모델로 부터 동일한 공칭응력에 대한 내부 최대응력과 의 비인 응력집중계수(Stress Concentration Factor)를 구하였다.

또한, 각 시험체들의 처리부(용접부)에 게이지 길이 0.4~1 mm 찢치의 집중게이지를 붙이고 해석과 동일한 공칭응력 하에서의 내부응력을 실측한 후 응력집중계수를 실험에 의해 구하고 위의 해석결과와 비교했다. 그 결과를 그림 9에 나타낸다. 이때, 피닝처리를 행한 시험체는,  $\rho$ ,  $\theta$ 에 대해 거의 변화가 없으므로 형상개선 또한 거의 비슷한 양상을 할 것이라고 생각된다. 따라서 해석도 그림 8(b)와 같이 피닝의 대표치 하나에 대해서만 행하였다.

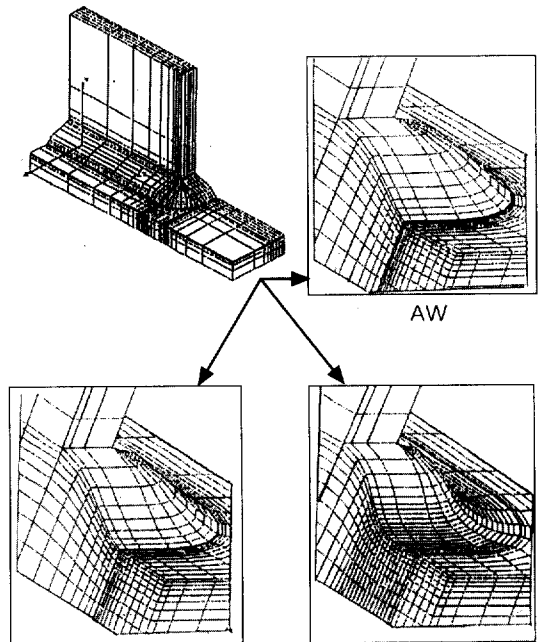
그림 9에서 실측에 의한 응력집중계수를 살펴 보면, 피닝처리를 한 시험체들이 거의 비슷한 응력집중계수 분포를 보이고 있으며, 토우부 처리에 의해 응력집중이 완화되었음을 알 수 있다. 그러나, 앞의 인장하중 피로시험 중, HP1 시험체에서 응력집중의 완화에도 불구하고 균열이 발생한 것은 역시 마이크로 스코프로 의해 관찰된 미세 흠이 초기 균열화되었기 때문이라고 생각된다. 이는, 좀더 많은 피닝처리를 한 HP3나 피닝 후 그라인더 처리로써 표면을 매끄럽게 한 HP1+G 시험체의 처리부에서 피로균열이 발생하지 않은 점으로 미루어 봐도 알 수 있다. 따라서, 용접부의 처리에 있어 피닝처리에 의해 발생하는 거친 표면 또는 미세균열은 피로강도 향상에 악영향을 미칠 수가 있다는 것을 고려할 필요가 있으며, 이러한 표면 결함을 없애기 위해 그라인더 처리와 같은 특별한 처리가 병행되어야 한다고 생각된다.

표 6.  $\rho$ 와  $\theta$ 의 평균 측정치

처리방법	$\rho$ (mm)	$\theta$ (degree)
AW	0.8	135
TIG	1.8	135
HP1	6.6	137
HP3	6.8	135
HP1+G	7.1	139



(a) 전체 해석 모델 (1/8 모델)



(b) 경계조건을 고려한 세부 해석 모델

그림 8. 종리브 십자 이음의 해석 모델과 방법

## 4.2 잔류응력의 영향

앞절에서 살펴본 바와 같이 피로균열 발생수명에는 응력집중의 영향이 상당히 크다는 것을 알 수 있었고, 본 절에서는 피로균열 진전수명에 미치는 잔류응력의 영향을 살펴보기 위해 각 시험체들의 잔류응력 측정을 고유변형을 이론에 기인한 절단법<sup>(11)</sup>에 의해 행하였다.

시험체를 판두께 방향으로 슬라이스하는 두께는, 예비실험으로부터 절단에 의한 영향을 무시할 수 있는 최소두께인 4mm로 했다. 판두께 방향으로 하중방향의 잔류응력분포  $\sigma_x$ 의 측정결과를 그림 10에 보인다. 이때, 판두께 중앙부를 원점으로 하고, 하중방향을 X, 하중직각방향을 Y로 한다. 그림 10에서 HP 시험체들에 큰 압축잔류응력이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, HP1과 HP3에서는, HP3쪽이 표면에서 큰 압축잔류응력, 내부에서는 이에 평형을 취하기위해 큰 인장잔류응력이 존재하는 경향을 보인다. 그러나, 종리브 시험체의 항복점(550MPa)정도의 잔류응력은 존재하지 않기 때문에, 패스수를 증가시킴에 의해 더 큰 압축잔류응력을 작용시킬 가능성이 있다고 생각된다. 이러한 압축잔류응력이 분포하고 있는 영역은 그림 10에서도 알 수 있듯이, 거의 표면에서부터 3~4mm 정도이다. 이는, 표면의 처리부에서부터 발생한 피로균열의 진전거동을 억제하는 요인이 되며, 결국 압축잔류응력이 피로균열 진전에 크게 영향하고 있음을 알 수 있게 된다. 따라서, 해머피닝 처리는 피로균열의 발생수명에는 관여하지 않지만, 진전수명에는 많은 향상 효과를 기대할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

## 5. 결 론

고강도 강을 사용한 종리브 십자 이음을 대상으로 용접 그대로(AW로 표기)의 시험체와 용접 토우부를 후처리한 시험체들 즉, TIG처리, 해머 피닝 1패스와 3패스(각각 HP1, HP3로 표기),

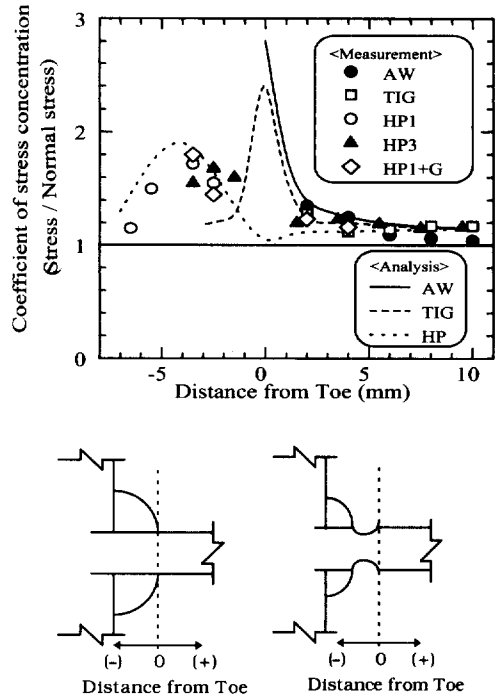


그림 9. 응력집중계수의 해석치와 실험치

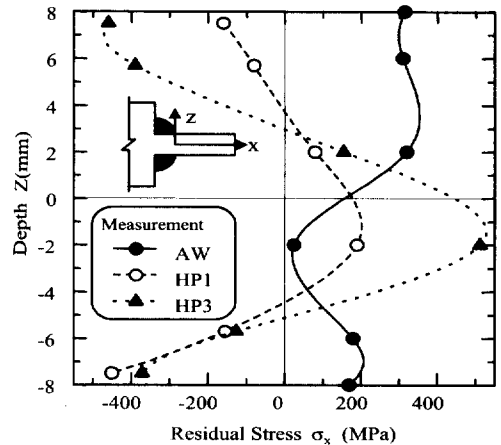


그림 10. 판두께에 대한 하중방향의 잔류응력 분포

그리고 해머피닝 후 그라인더 처리(HP1+G로 표기)를 한 시험체들의 인장 피로시험 결과, 다음과 같은 사항을 결론지을 수 있다.



1) AW 시험체에 비해 후처리를 한 시험체들에서 전반적인 피로강도 향상이 보였다.

2) 후처리 한 시험체 중, HP1은 가해진 해머피닝에 의해 표면이 거칠고 미세 흠들이 발생하였으며, 이러한 결함들이 초기 균열로 작용하여 피로균열 발생수명  $N_c$ 을 저하시켰다. 그러나, 해머피닝 후 그라인더 처리로 표면을 매끄럽게 한 HP1+G에서는  $N_c$ 가 크게 향상되었음을 알았다. 따라서, 해머피닝 후, 표면을 매끄럽게 할 특별한 처리가 병행될 때 제대로 처리효과를 볼 수 있음을 알 수 있다.

3) 후처리 시, 피로강도 향상의 메커니즘으로써, AW, TIG, 및 HP1 시험체보다 HP1+G나 HP3에서 피로균열 발생수명  $N_c$ 가 증가된 것은 그라인더 처리와 더 많은 패스의 피닝처리에 의해 용접토우부의 기하학적 형상, 즉 응력집중 현상이 완화되었기 때문이라고 생각된다. 또한, AW와 TIG 시험체보다 HP 시험체들에서 피로균열 진전수명  $N_p$ 가 향상된 것은 해머피닝에 의해 표면 부근에 도입된 큰 압축잔류응력이 균열의 진전거동을 억제하고 있기 때문이다.

4) 고강도 강의 용접 이음부에 발생하는 높은 인장잔류응력이나 응력집중의 영향을 줄이고 피로강도를 향상시킬 수 있는 방법으로써, 많은 패스 수의 해머피닝이나 적은 패스 수의 해머피닝 일지라도 그라인더 처리를 병행하는 방법이 유효적절하다고 생각되며, 경제적인 면을 생각한다면 적은 패스 수의 해머피닝에 그라인더 처리를 병행하는 것이 좋다는 결론을 내릴 수 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) 三木千壽 : 鋼橋の技術開發, 橋梁と基礎, 1997. 8, pp.95-105
- (2) 日本鋼構造協會 : 鋼構造物疲勞設計指針・同解説, 技報堂, 1993
- (3) 大江愼一, 三木千壽, 奥川淳志, 安井成豊 : 800MPa級鋼材を用いた實物トラス弦材各種構造の疲勞強度, 構造工學論文集, Vol. 38A, 1992, pp. 1031-1044
- (4) Takena, Hirano, Itoh, Miki : Fatigue Strength of Box Section Truss Chord with Corner Joints, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol. 14, No. 1, 1987, pp. 67-75
- (5) A.M. Horn, I. Huther, H.P. Lieurade : Fatigue Behaviour of T-Joints Improved TIG Dressing, IIW-Doc. XIII -1692-97
- (6) 日本鋼構造協會 : 止端加工による疲勞強度向上法, JSSC Report, No. 6, 1987
- (7) 渡邊吉弘, 長谷川典彦, 松村義和 : ショットピーニングによる殘留応力分布のシミュレーション, 재료, Vol. 44, No. 496, 1995, pp. 110-115
- (8) 太田省三郎, 淺井公屋, 大谷愼一 : すみ肉溶接継手の止端部TIGアーク再溶融による疲勞強度の向上, 溶接學會論文集, 第8巻, 第2号, 1990, pp. 254-261
- (9) 鳥居太始之, 本田和男, 杉山雅彦 : 殘留応力場の表面疲勞龜裂伝波舉動, 日本機械學會論文集 (A編), 54巻, 505号(昭63-9)
- (10) John M. Barsom, Stanley T. Rolfe : Fracture and Fatigue Control in Structures,
- (11) 임정권, 박문호 : 용접상세의 변화에 따른 용접이음부의 잔류응력에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 제10권, 제10호, 1998. 12.

(접수일자 : 1999년 3월 9일)