

# 용접지단부의 후처리에 따른 하중비전달형 필렛용접부의 피로특성

## Fatigue Characteristics of Non Load-Carrying Fillet Welded Joints according to Post-Processing in Weld Bead Toes

홍 성 욱<sup>1)</sup> · 경 갑 수<sup>2)</sup> · 최 동 호<sup>3)</sup> · 용 환 선<sup>4)</sup>

*Hong, Sung Wook Kyung, Kab Soo Choi, Dong-Ho Yong, Hwan Sun*

요 약 : 본 연구에서는 하중비전달형 필렛용접부를 대상으로 순수휨 상태에서 그라인딩 처리 및 TIG 처리에 따른 피로강도 향상정도 및 피로특성을 정량적으로 평가하기 위해서 일련의 4점 휨실험을 실시하였다. 피로실험결과 그라인딩 처리한 경우와 TIG 처리한 경우  $2 \times 10^6$ 회 피로강도가 한등급 향상되는 것을 알 수 있었으며, 국내·외의 피로설계기준에서 규정하고 있는 피로강도등급을 대체로 만족하고 있음을 알 수 있었다. 용접지단부의 기하학적 형상에 대한 매개변수해석결과 하중비전달형 필렛용접부에서 응력집중계수에 영향을 미치는 인자는 곡률반경과 비드접선각도임을 알 수 있었다. 한편 파괴역학적 해석결과 피로균열 발생초기에는 균열보정계수에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 기하학적 형상보정계수임을 알 수 있었으며, 상대깊이가 0.4 이상이 되면 기하학적 형상보정계수 보다는 유한판 보정계수가 보다 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 유한요소해석결과로부터 산정한 응력확대계수범위와 피로균열성장속도의 관계식으로부터 하중비전달형 필렛용접부의 피로수명을 비교적 정확하게 산정할 수 있었다.

ABSTRACT : In this study, the 4-point bending test has been performed in order to estimate effect of grinding on fatigue characteristics quantitatively for as-welded specimen, grinding specimen & TIG-dressing specimen for non load-carrying fillet welded joints subjected to pure bending. As a result of fatigue tests, fatigue strength at  $2 \times 10^6$  cycles of grinding specimen and TIG-dressing specimen has been increased compared with as-welded specimen and satisfied the grade of fatigue strength prescribed in specifications of domestics and AASHTO & JSSC. As a result of beachmark test, fatigue cracks on all specimens have occurred at several points where stress

- 1) 정희원, 한림정보산업대학 토목과 전임강사, 공학박사
- 2) 정희원, 한국도로공사 도로연구소 강구조연구실 책임연구원, 공학박사
- 3) 정희원, 한양대학교 도시환경건설공학과군 조교수, 공학박사
- 4) 정희원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

concentration factors are high, and grown as semi-elliptical cracks. Also, because of compressive stress by bending load fatigue fracture has occurred at the part subjected tensile stress and ductile fracture has occurred at the part subjected compressive stress. As a result of finite element analysis, stress concentration factor of grinding specimen & TIG-dressing specimen have been getting lower than that of as-welded specimen. From the result of parametric study of geometric shape of weld bead toes, the factors which affect stress concentration factor most are flank angle and radius of curvature. From the result of fracture mechanical analysis, the factor largely affecting crack correction factor is stress gradient correction factor at the first part and is finite width correction factor when relative depth is over 0.4. Also, from the relation between stress intensity factor range estimated from FEM analysis and fatigue crack growth rate, fatigue life of non load-carrying fillet welded joints has been correctly calculated.

**핵심용어** : 하중비전달형 필렛용접부, 순수휨, 응력집중계수, 기하학적 형상보정계수, 피로강도 응력확대계수범위, 그라인딩 처리, TIG 처리

**KEYWORDS** : Non load-carrying fillet welded joints, Pure bending, Stress concentration factor, Stress gradient correction factor, Stress intensity factor range, Fatigue Strength, Grinding specimen, TIG-dressing specimen

## 1. 서론

용접부의 피로강도 향상방법으로는 용접부의 응력을 저감시키는 것이 가장 근본적인 대책이다. 이와 같은 방법으로는 단면을 증가시켜 전체적으로 응력을 저감시키는 방법과 용접부를 후처리하여 국부응력을 저감시키는 방법을 생각할 수 있는데, 경제성 및 효율성 측면으로부터 후처리에 의한 방법이 일반적으로 사용되고 있다<sup>(2),(3)</sup>.

용접부의 피로강도를 향상시키기 위해서는 용접지단부의 응력집중을 저감시키는 방법과 용접에 의해 발생하는 높은 인장응력을 저감시키거나 압축응력으로 바꾸어 주는 것이 효과적이다. 후처리에 의한 피로강도 향상방법으로는 그라인딩처리, TIG(Tungsten Inert Gas)용접처리, 부가용접 등의 용접지단부의 기하학적 형상을 개선시키는 방법과 피닝(Peening)처리, 선상가열, 풀림과

같은 열처리 등에 의해 잔류응력을 저감시키는 방법 등이 많이 사용되고 있다<sup>(8),(13)</sup>.

이들 방법에 대해서는 많은 연구가 외국에서 수행되어 피로강도 향상의 효과를 확인하였고, 일부 방법은 실제 교량에 적용된 사례도 있다<sup>(11)</sup>. 그러나 국내의 경우 이와 같은 방법에 대한 확실한 기준은 물론 그 적용사례가 전무하며, 또한 이들 방법에 대한 연구가 거의 수행되지 않고 있는 상황이다. 그 결과 강교량의 보수나 보강에 이들 방법의 적용에 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 용접형 강교량에서 적용되는 구조상세 중 피로손상이 많이 발생하는 것으로 보고되고 있는 하중비전달 필렛용접부를 대상으로 국내고유의 기준을 작성하기 위한 기초적인 자료의 축적을 목적으로 그라인딩, TIG용접의 후처리 실시에 따른 피로강도 향상정도와 이에 따른 피로특성을 정량적으로 규명하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 대상으로 한 시험체의 강재는 강교량에서 자주 사용되고 있는 SM490B이고, 시험체 형상 및 치수는 그림 2.1과 같으며, 반자동용접법인 플럭스 코어드 아크용접법(CO<sub>2</sub> 용접)으로 그림 2.2에서 나타낸 바와 같이 용접을 실시하였다. 용접부 형상을 완전용입상태로 한 것은 피로 균열을 용접지단부에서 발생시켜 후처리에 의한 피로강도 향상 효과를 확인하기 위한 것이다.

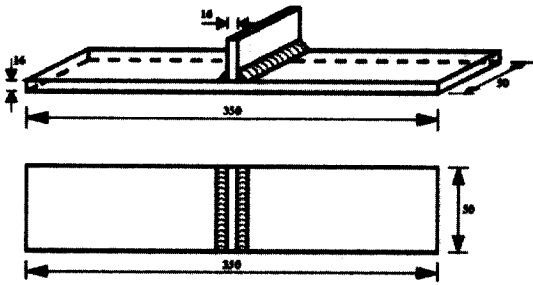


그림 2.1 시험체 형상 및 치수

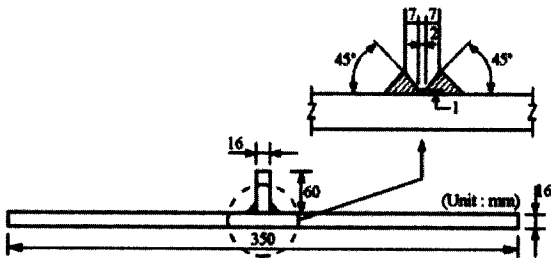


그림 2.2 시험체 용접모식도

또한 본 연구에서 사용한 시험체의 용접방법 및 용접조건은 표 2.1 및 표 2.2와 같으며, 그라인딩 처리조건은 표 2.3에, 그리고 TIG 처리조건은 표 2.4에서 나타내었다.

표 2.1 용접방법

시험체	봉경 (mm)	전류 (amp.)	전압 (volt)	속도 (cm/sec)
ASW,GRD,TIG	1.2	270~300	36~38	10~15

표 2.2 용접조건

자재	용접봉 종류	극성	전극	가스
F	SF-71	DC, RP	단극	CO <sub>2</sub> 25l/min

표 2.3 그라인딩 처리조건

방식	회전속도	선단부직경	이동속도	패임량
공기식	13000(rpm)	10(mm)	20(mm/min)	1.0(mm)

표 2.4 TIG 처리조건

전극봉 직경 (mm)	월드 가스	가스 분출율 (l/min)	예열 온도 (°C)	전류 (amp.)	전압 (volt)	이동속도 (mm/min)
2.0	아르곤	10	50	250	15	80

그라인딩 방법으로는 burr그라인더에 의한 방법과 디스크 그라인더에 의한 방법이 있는데, burr그라인더에 의한 방법은 그라인딩 처리에 따른 피로강도 향상효과는 좋으나, 디스크 그라인더에 비해서 용접지단부의 가공에 상당한 비용과 시간이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 향후의 실교량에의 적용성을 고려해서 그라인딩 작업시 노치와 같은 결함이 발생할 확률은 높으나 그라인딩 효과가 높은 디스크 그라인더를 이용해서 피로강도 향상정도를 정량적으로 평가하였다. 그라인딩 처리조건은 IIW의 burr그라인더에 대한 제안기준<sup>(10)</sup>을 참고로 하였으며, TIG처리기준은 IIW에서 제시하고 있는 처리조건<sup>(10)</sup>에 근거해서 실시하였다.

본 연구에서는 ±25ton 용량의 전기유압식 피로시험기를 이용해서 그림 2.3에서 나타낸 바와 같이 4점 휨피로실험을 실시하였다.

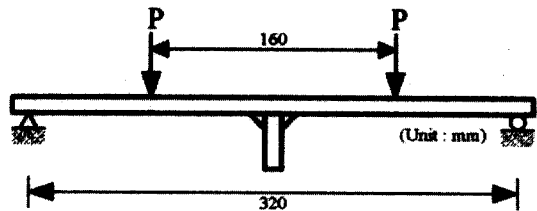


그림 2.3 4점 휨피로실험방법

피로실험시 작용하중은 정현파의 일정진폭하중을 이용하였으며, 하중재하속도는 7.5Hz, 응력비는 0.1로 하였다.

실제 강교량에 적용되는 하중비전달형 필렛용접부의 경우, 용접지단부를 처리하지 않는 경우가 일반적이므로 본 연구에서는 용접후 지단부를 처리하지 않은 상태와 용접지단부를 그라인딩 처리 및 TIG 처리를 실시해서 피로실험을 실시하였다.

또한 피로균열발생 및 성장특성을 정량적으로 평가하고 파괴역학적 해석을 실시하기 위해서 일정반복회수마다 비치마크시험을 실시하여 비치마크를 도입하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 4점 휨피로실험결과로부터 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계를 미국의 AASHTO<sup>(14)</sup> 및 일본의 JSSC<sup>(8)</sup>에서 규정하고 있는 피로설계곡선과 비교해서 나타내면 그림 3.1과 같으며, 피로균열발생수명과 피로균열성장수명을 구분해서 나타내면 그림 3.2와 같다.

여기서, TIG처리 시험편에 대해서는 저자들에 의해 기 발표된 실험결과<sup>(1)</sup>를 이용하였다.

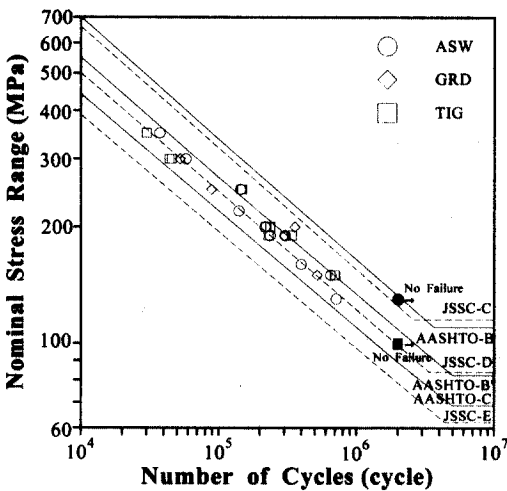


그림 3.1 공칭응력범위-반복회수 선도

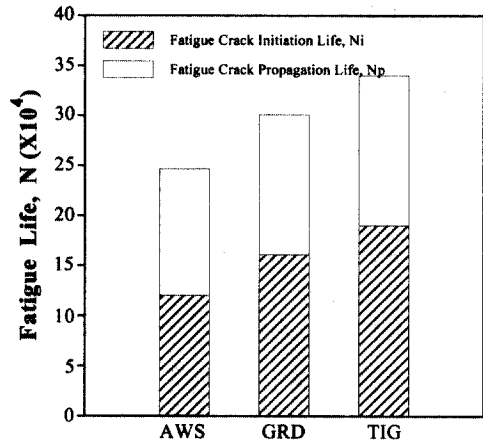


그림 3.2 피로균열발생수명과 피로균열성장수명 사이의 관계

그림 3.1에서 나타난 AASHTO C등급, JSSC E등급은 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도등급으로, 그림 중의 실선은 AASHTO, 점선은 JSSC에서 규정하는 피로설계곡선을 나타낸다.

그림 3.1에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 실시한 순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부 시험체에 대한 모든 피로강도는 현행 시방서에서 규정하고 있는 피로강도등급을 만족하고 있으며, 현행 시방서에서 규정하는 피로설계곡선의 기울기 3보다 다소 완만한 경향을 나타내었다.

그라인딩 처리한 시험체와 TIG 처리한 시험체의 경우, 후처리에 의한 효과에 의해 개략 피로등급이 1등급 정도 상승하는 경향을 나타내고 있는데 이는 JSSC에서 규정하고 있는 피로강도 향상 효과와 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 그라인딩 처리 시험체의 피로강도는 기존의 burr그라인더에 비해 그 효과가 크지 않게 나타났는데, 이것은 앞에서 기술한 것과 같이 그라인딩 작업시 노치등이 지단부에 남기 쉬운 작업특성에 의한 영향으로 생각한다. 따라서, 디스크 그라인더에 의한 후처리 작업시에는 세심한 작업이 필요할 것으로 생각된다.

후처리에 의한 피로강도 향상효과가 기존연구결과와 같이 낮은 응력범위에서 그 개선효과가

확실하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

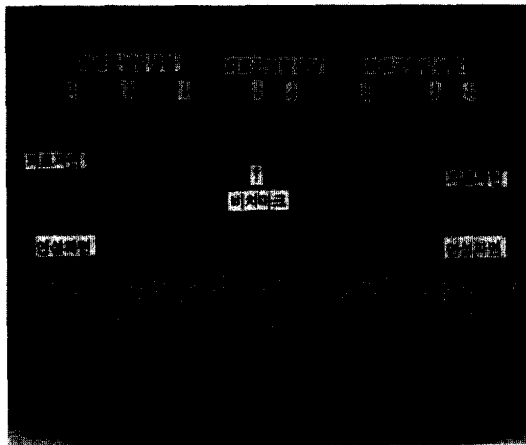
또한 그림 3.2에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서의 후처리에 의한 피로강도 향상 정도는 피로균열발생수명의 증가에 따른 것으로 생각되며, 피로균열성장수명에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

한편 그림 3.1의 결과로부터 회귀분석법을 이용해서 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계를 나타내면 표 3.1과 같다.

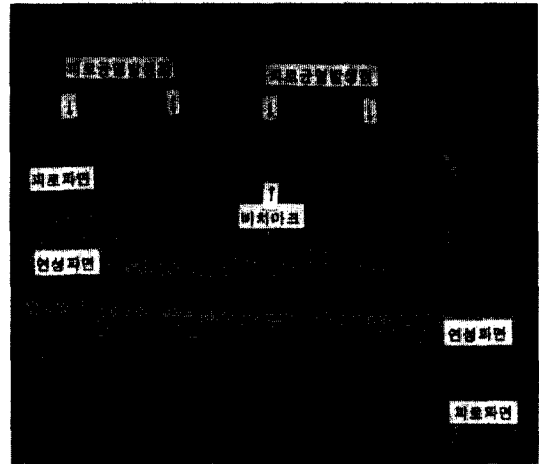
표 3.1 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계식

시험체 종류	회귀분석식	2×10 <sup>6</sup> 회 피로강도	S-N선도 기울기
ASW	$\log(\Delta\sigma) + 0.219\log(N) = 8.0$	96MPa	3.12
GRD	$\log(\Delta\sigma) + 0.197\log(N) = 7.8$	113MPa	3.69
TIG	$\log(\Delta\sigma) + 0.197\log(N) = 7.8$	114MPa	3.82

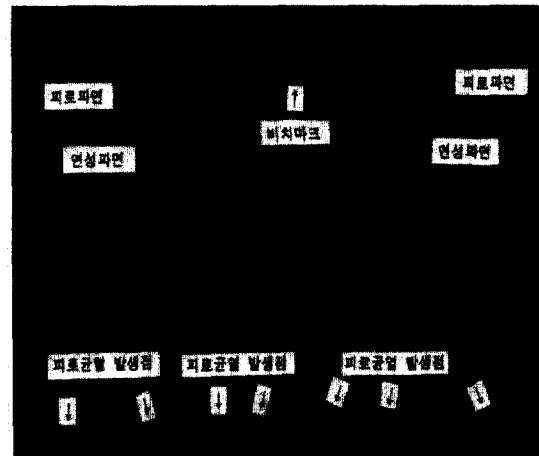
표 3.1에서도 알 수 있는 바와 같이 순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부에 대해서 용접후 처리에 따른 피로강도 향상효과는 약 20% 정도를 나타냈다. 또한 순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부의 피로균열발생 및 성장특성을 조사하기 위해서 피로실험을 종료한 후의 파단면 형상을 나타내면 그림 3.3과 같다.



$\Delta\sigma = 190(MPa)$   $N_f = 236,490(cycles)$   $R = 0.1$   
(a) 용접후처리를 실시하지 않은 시험체



$\Delta\sigma = 190(MPa)$   $N_f = 300,810(cycles)$   $R = 0.1$   
(b) 그라인딩 처리한 시험체



$\Delta\sigma = 190(MPa)$   $N_f = 400,810(cycles)$   $R = 0.1$   
(c) TIG 처리한 시험체

그림 3.3 피로실험결과에 따른 파단면 특성

그림 3.3에서 알 수 있는 바와 같이 본 시험체에서 발생한 반타원형의 피로균열에 대한 기하학적 형상을 측정된 결과 형상비가 약 0.20~0.25이었으며, 일반적으로 수직응력을 받는 경우의 반타원형 균열의 형상비인 0.50과 비교하면<sup>(5),(6)</sup> 매우 작은 값을 가지고 있는데, 이는 순수 휨하중을 받는 경우 인장응력의 분포가 판두께 방향에

따라서 변화하기 때문인 것으로 생각된다.

또한 이러한 현상은 용접부의 길이방향으로 용접지단부의 형상이 일정하지 않기 때문에 비드접선각도와 곡률반경이 작은 부분, 즉 용접지단부의 응력집중계수가 큰 여러 부분에서 피로균열이 발생하며, 합체되는 것을 파면관찰에 의해 확인할 수 있었으며, 또한 이러한 경향은 용접지단부에 대한 비드형상 측정결과와도 일치하는 경향을 나타냈다.

한편 시험체가 순수 휨상태에 있는 경우 수직응력 상태에 있는 경우보다 피로파면의 비치마크 간격이 매우 작음을 알 수 있는데 이는 휨하중을 받는 경우 판두께의 약 절반 부분이 압축응력을 받게 되고 압축응력을 받는 부분에서 피로균열은 성장하지 않기 때문인 것으로 생각되고 이러한 경향을 유한요소해석결과로부터 확인할 수 있었다.

#### 4. 유한요소해석

본 연구에서는 하중비전달형 필렛용접부의 용접지단부에 대한 국부적인 응력특성을 해석적으로 평가하고 피로실험시 측정된 시험체의 모재부분과 용접지단부에서의 변형률 자료의 정확성을 검

증하기 위해서 범용유한요소해석프로그램인 LUSAS를 이용해서 선형탄성해석을 실시하였다.

유한요소해석시 모든 시험체에서 용접지단부에서 피로파괴를 유도하기 위해서 완전용입된 상태로 가정하고 평면변형률상태를 전제로 2차원 헬요소를 이용해서 모델링을 실시하였다.

용접지단부에 대한 모델링시 용접지단부의 형상을 정확하게 나타내기 위해서 용접지단부를 라텍스고무를 이용해서 그림 4.1에서 나타낸 바와 같이 용접지단부의 형상을 채취한 후 비드형상을 16배로 확대해서 측정된 결과의 평균값을 이용하였다.

용접지단부의 형상 즉, 비드접선각도와 곡률반경의 측정결과에 대한 통계분석 결과 비드접선각도와 곡률반경의 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차를 정리해서 나타내면 표 4.1과 같다.

표 4.1에서와 같이 비드접선각도는 TIG 처리를 실시하는 경우에, 곡률반경은 그라인딩 처리를 실시하는 경우에 증가하는 것을 알 수 있었다.

표 4.1의 비드접선각도와 곡률반경에 대한 통계분석을 실시해서 비드접선각도와 곡률반경의 분포특성을 정리해서 나타내면 그림 4.2와 같다.

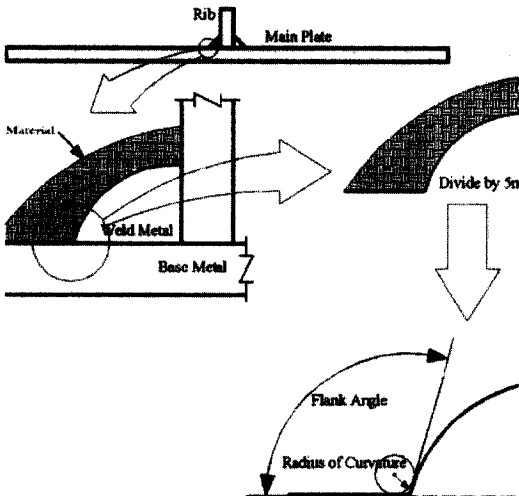
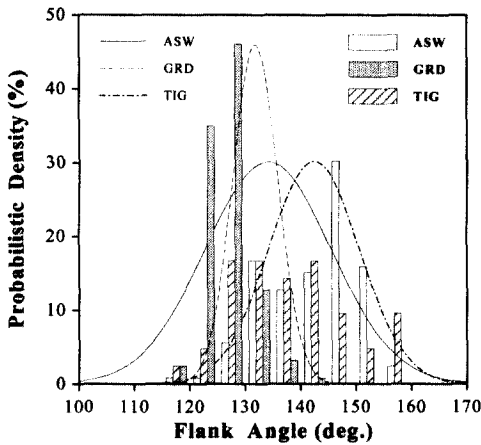


그림 4.1 용접지단부에 대한 형상측정의 이례

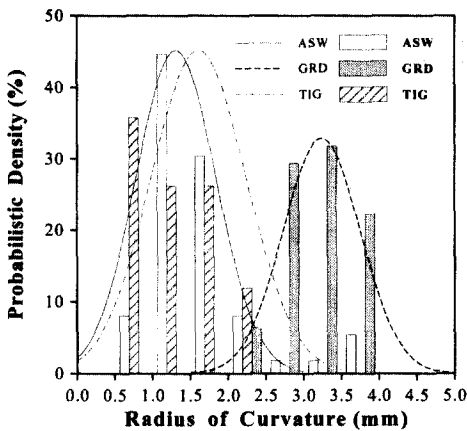
표 4.1 용접비드형상에 대한 통계분석결과

구분	ASW		GRD		TIG	
	비드 접선 각도	곡률 반경 (mm)	비드 접선 각도	곡률 반경 (mm)	비드 접선 각도	곡률 반경 (mm)
최대값	149°	2.06	148°	4.35	158°	3.50
최소값	126°	0.94	121°	2.12	118°	0.84
평균값	137°	1.50	135°	3.24	143°	1.61
표준편차	5.7°	0.33	9.4°	0.51	8.2°	0.63

표 4.1 및 그림 4.2에서와 같이 용접지단부를 그라인딩 처리한 경우 비드접선각도는 큰 변화가 없으나 곡률반경은 약 116% 증가하였으며, TIG 처리한 경우 비드접선각도는 약 6%, 곡률반경은 23% 증가하는 것을 알 수 있었다.



(a) 비드접선각도 분포특성



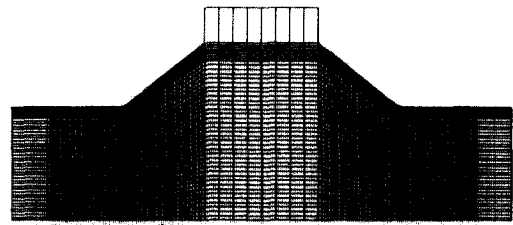
(b) 곡률반경 분포특성

그림 4.2 용접지단부의 비드형상 분포특성

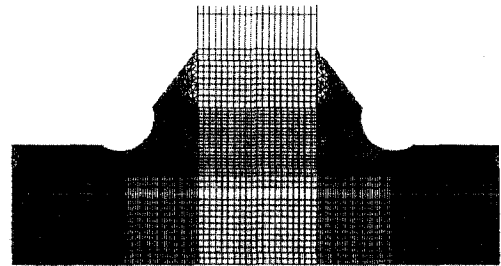
용접지단부의 형상 중 곡률반경이 응력집중계수에 보다 큰 영향을 미친다는 연구결과<sup>(4),(5),(6),(7)</sup>로부터 용접지단부를 후처리하는 것에 의해 곡률반경이 증가하고 이로부터 용접지단부의 응력집중계수가 감소함으로써 피로균열발생수명이 증가하여 피로강도가 향상되는 것으로 생각한다.

유한요소해석 모델링시 용접지단부의 기하학적 형상에 관한 자료는 표 4.1에서 나타낸 평균값을 이용하여 그림 4.3과 같이 모델링하였으며, 요소의 크기는 0.2~1.0mm까지 변화시켰다.

그림 4.3에서 나타낸 시험체에 단위하중을 작



(a) 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 TIG 처리한 시험체의 모델링 일례



(b) 그라인딩 처리한 시험체의 모델링 일례

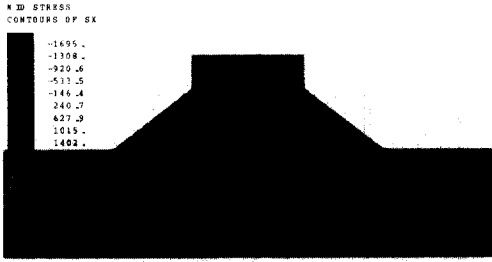
그림 4.3 유한요소해석 모델링의 일례

용시킨 경우에 대한 유한요소해석 결과의 일례를 나타내면 그림 4.4와 같다. 그림 4.4의 응력등고선이 나타내는 값은 전체좌표계상의  $x$ 축방향으로 작용하는 응력을 의미하고 단위는  $kgf/cm^2$ 이다.

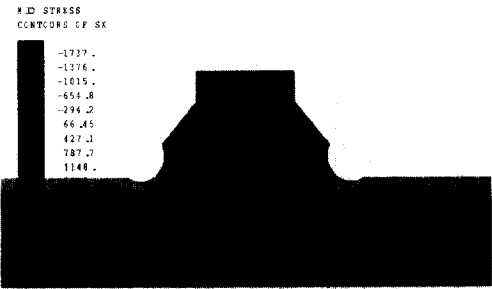
그림 4.4에서 알 수 있는 바와 같이 최대응력은 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 TIG 처리한 시험체의 경우 용접지단부에서 발생하고, 그라인딩 처리한 시험체의 경우 그라인딩 하단부의 패임깊이가 가장 큰 부분에서 발생하였다.

이는 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 TIG 처리한 시험체의 경우 용접지단부에서 단면의 기하학적 형상이 변화함에 따라 응력집중현상이 발생하기 때문인 것으로 생각되며, 그라인딩 처리한 시험체의 경우 그라인딩 처리에 따른 단면손실이 가장 많이 발생한 부분에서 응력집중현상이 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

이러한 결과로부터 그림 3.1에서 나타낸 피로균열 발생위치가 유한요소해석결과의 응력집중현상의 발생위치와 일치함을 알 수 있었으며, 피로



(a) 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 TIG 처리한 시험체의 해석결과



(b) 그라인딩 처리한 시험체에 대한 해석결과

그림 4.4 유한요소해석 결과의 일례

균열의 발생수명에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 용접지단부의 기하학적 형상 즉, 비드접선각도와 곡률반경임을 확인할 수 있었다. 이 두가지 인자가 응력집중에 미치는 영향에 대해서는 나중에 기술하도록 한다.

용접지단부를 그라인딩 처리와 TIG 처리함에 따른 판표면에서의 응력집중계수의 정량적인 변화 정도를 고찰하기 위해서 용접지단부와 그라인딩이 시작되는 부분으로부터 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 그라인딩 처리한 시험체 및 TIG 처리한 시험체에 대한 판표면에서의 응력분포특성을 정리해서 나타내면 그림 4.5와 같다.

그림 4.5에서 나타낸 바와 같이 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우 2.02, 그라인딩 처리한 시험체의 경우 1.78, TIG 처리한 시험체의 경우 1.83의 값을 가지므로 용접지단부에 대해서 그라인딩 처리를 실시하는 경우 응력집중계수는 약 14% 정도 감소하고 TIG 처리를 실시하는 경

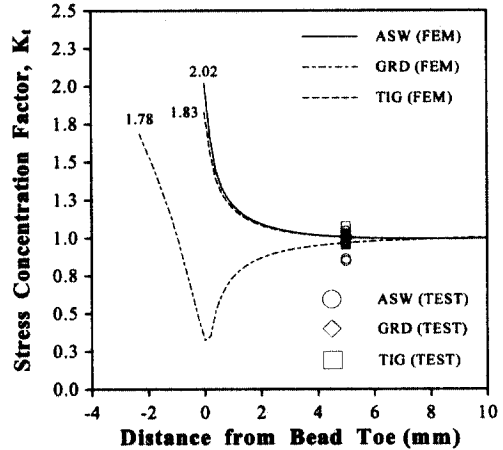


그림 4.5 각 시험체별 응력분포특성

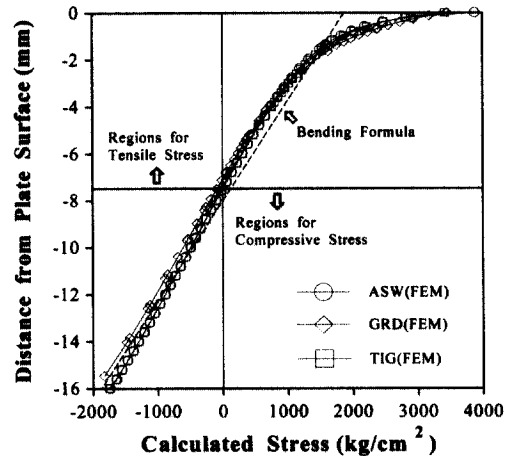


그림 4.6 각 시험체별 판두께 방향의 응력분포특성

우 약 10% 감소함을 알 수 있었다.

또한 순수휨상태에서 판두께 방향의 응력분포특성을 평가하기 위해서 용접후처리를 실시하지 않은 시험체 및 TIG처리 시험체의 경우 용접지단부, 그라인딩 처리한 시험체의 경우 패임량이 가장 큰 부분에서부터 판두께 방향의 응력분포특성을 나타내면 그림 4.6과 같다.

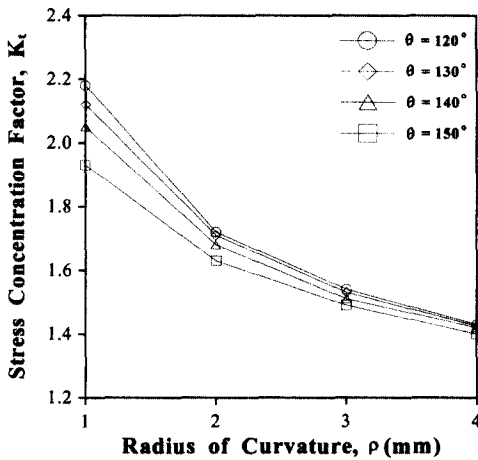
그림 4.6에서와 같이 판두께 방향의 응력분포는 모든 시험체에서 시험체 전체두께의 약 45% 정도에서 압축응력장이 형성되는 것을 확인하였다.

한편 본 연구에서 대상으로 한 시험체에 대해서

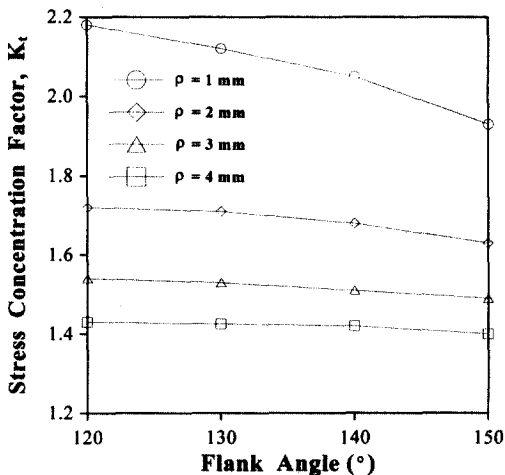


용접지단부의 기하학적 형상이 응력집중계수에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서 일련의 매개변수해석을 실시하였으며, 이에 따른 응력집중계수의 분포특성을 나타내면 그림 4.7과 같다.

그림 4.7에서 알 수 있는 바와 같이 용접지단부의 형상에 따른 응력집중계수의 분포특성을 고찰하면 비드접선각도가 증가함에 따라서 용접지단부에서 응력집중계수는 선형적으로 증가하는 경향이 있으며, 곡률반경이 증가함에 따라서 용접



(a) 비드접선각도에 따른 응력집중계수의 분포특성



(b) 곡률반경에 따른 응력집중계수의 분포특성

그림 4.7 용접비드형상에 따른 응력집중계수의 분포특성

지단부에서 응력집중계수는 급격하게 감소하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과로부터 용접지단부의 응력집중계수에 영향을 미치는 인자는 용접지단부의 기하학적 형상 즉, 비드접선각도와 곡률반경을 알 수 있으며, 비드접선각도보다는 곡률반경이 응력집중계수에 보다 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

## 5. 파괴역학적 해석

본 연구에서 사용한 하중비전달형 필렛용접부를 대상으로 그라인딩 처리에 따른 피로균열성장특성을 정량적으로 평가하고 파괴역학적 해석을 실시하기 위해서 일련의 기하학적 형상보정계수<sup>(12)</sup>와 균열보정계수를 산정한 결과를 나타내면 그림 5.1 및 그림 5.2와 같다.

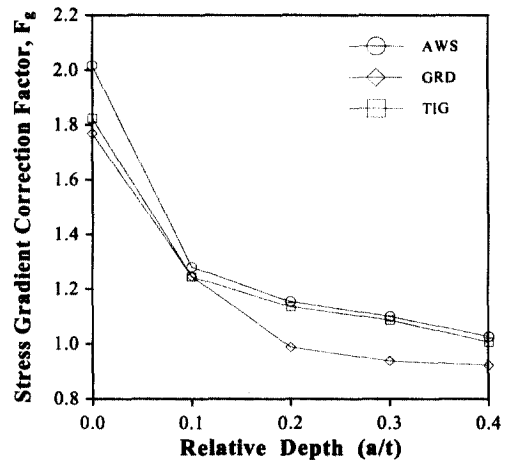


그림 5.1 각 시험체별 기하학적 형상보정계수 산정결과

그림 5.1 및 그림 5.2에서 알 수 있는 바와 같이 기하학적 형상보정계수와 균열보정계수는 균열깊이가 증가함에 따라서 급격하게 감소하다가 압축영역이 시작되는  $a=0.4t$ 인 부분에서부터는 일정하게 수렴하는 경향을 나타내고 있었다. 이상의 결과로부터 피로균열 발생초기에는 기하학적 형상보정계수가 피로균열발생에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

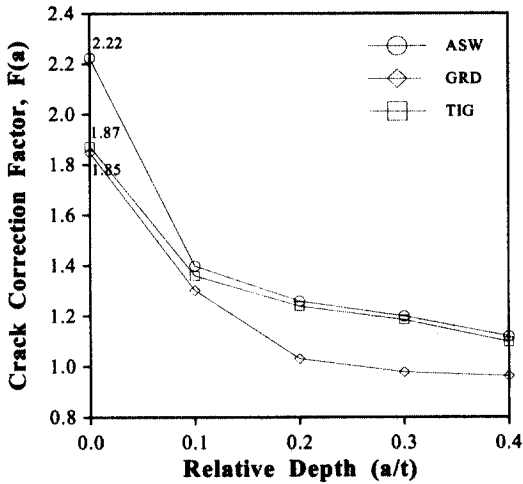


그림 5.2 각 시험체별 균열보정계수 산정결과

또한 용접지단부를 그라인딩 처리 또는 TIG 처리를 하는 경우에는 피로균열 발생초기에는 기하학적 형상보정계수와 균열보정계수가 현저하게 감소하는 경향을 나타내었다.

한편 그림 5.2의 결과로부터 용접후처리를 실시하지 않은 시험체, 그라인딩 처리한 시험체 및 TIG 처리한 시험체의 균열보정계수에 대한 회귀분석결과를 다항식의 형태로 나타내면 식 (5.1) ~ 식 (5.3)과 같다.

[ASW-Specimen]

$$F(a) = 2.20 - 15.0\left(\frac{a}{t}\right) + 88.1\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 228.6\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 212.1\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (5.1)$$

[GRD-Specimen]

$$F(a) = 1.85 + 6.7\left(\frac{a}{t}\right) - 10.9\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 21.7\left(\frac{a}{t}\right)^3 - 51.9\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (5.2)$$

[TIG-Specimen]

$$F(a) = 1.87 - 8.8\left(\frac{a}{t}\right) + 46.4\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 111.3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 94.8\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (5.3)$$

여기서,  $a/t$ 는 상대깊이이고  $a/t \leq 0.4$  즉, 균열 깊이가 시험체 두께의 0.4 이하인 경우에만 유효하다.

한편 균열보정계수에 대한 결과를 이용해서 파괴역학적 해석을 실시하기 위해서 비치마크실험결과로부터  $a-N$  선도를 나타내면 그림 5.3과 같다.

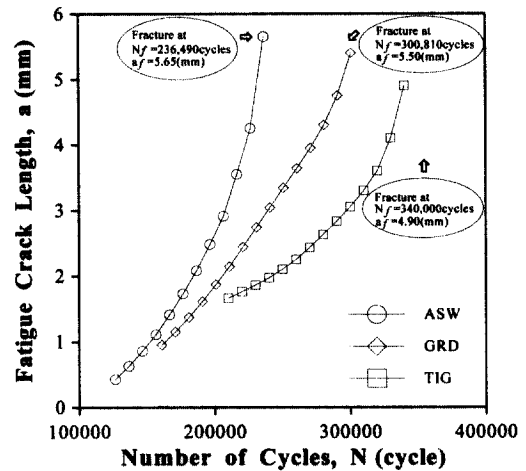


그림 5.3 각 시험체별  $a-N$  선도

그림 5.3에서 나타낸 균열길이는 비치마크실험으로부터 얻은 반타원형의 표면균열의 판두께방향 즉, 단축방향의 균열길이를 의미한다. 또한 그림 5.3에서 나타낸 결과로부터 7점법을 이용해서 산정한 피로균열성장속도와 식 (5.1)에서 나타낸 응력확대계수범위 사이의 관계를 나타내면 그림 5.4와 같다.

그림 5.4에서 나타낸 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계로부터 재료상수  $C$ ,  $m$  을 산정한 결과 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우  $C=3.0 \times 10^{-9}$ ,  $m=2.45$ , 그라인딩 처리한 시험체의 경우  $C=7.0 \times 10^{-9}$ ,  $m=1.82$ ,

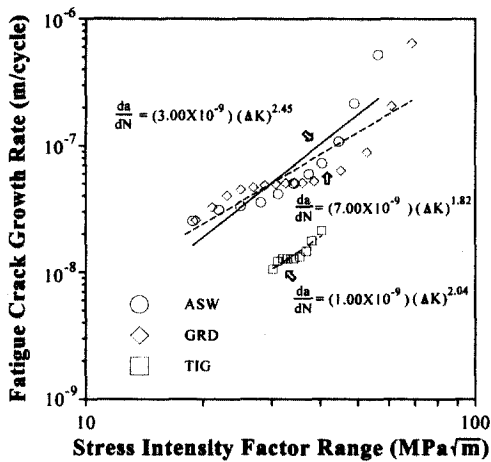


그림 5.4 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계

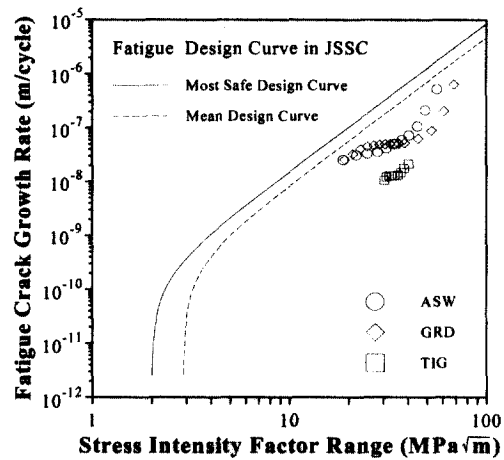


그림 5.5 JSSC 피로설계지침과의 비교

TIG 처리한 시험체의 경우  $C=1.0 \times 10^{-9}$ ,  $m=2.04$ 임을 알 수 있었다.

이로부터 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 용접후처리를 실시한 시험체에서  $C$ 값은 큰 차이가 없으나 피로균열성장속도는 후처리한 시험체의 경우 약 15% 정도 감소하는 것을 알 수 있었다.

따라서 용접후처리를 실시한 경우 피로균열성장속도도 저감되어 피로균열성장수명에도 후처리에 의한 잔류응력 등의 변화에 의한 영향이 있는 것으로 생각되므로 이것에 대한 연구가 향후 필요할 것으로 생각한다.

한편 그림 5.4에서 나타난 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계를 JSSC 피로설계지침에서 제안하고 있는 최안전설계곡선 및 평균설계곡선과 비교해서 나타내면 그림 5.5와 같다.

그림 5.5에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 대상으로 한 하중비전달형 필렛용접부의 용접후처리를 실시하지 않은 시험체에 대한 파괴역학적 해석결과는 JSSC 피로설계지침에서 제안하고 있는 평균설계곡선에 거의 일치하고 있으나 기울기는 다소 완만한 경향을 나타내고 있었다.

또한 그라인딩 처리한 시험체와 TIG 처리한 시험체의 경우에는 JSSC의 평균설계곡선에 하회하는 경향을 나타내고 있으며, 기울기 또한 완만한

경향을 나타내고 있었다.

한편 그림 5.4에서 산정한 재료상수 및 JSSC 피로설계지침에서 제안하고 있는 정수값을 이용하고 식 (5.13)에서 나타난 Paris-Erdogan이 제안한 피로수명에 대한 식<sup>(9)</sup>으로부터 본 연구에서 대상으로 한 하중비전달형 필렛용접부에 대해 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 그라인딩 처리한 시험체에 대한 피로수명을 산출하면 그림 5.6과 같다.

$$N_p = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K_m^m - \Delta K_{th}^m)} da \quad (5.13)$$

여기서,  $a_i$ : 초기균열길이,  $a_f$ : 한계균열길이이다.

본 연구에서는 초기균열길이는 0.03(mm)로 가정하였으며, 한계균열길이는 시험체 전체단면 중에서 휨하중에 의해서 인장응력만이 작용하는 한계값인  $0.45t (=7.2mm)$ 로 가정하였다.

그림 5.6에서 알 수 있는 바와 같이 실험피로수명과 계산피로수명의 비( $N_C/N_E$ )는 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우  $0.78 \leq N_C/N_E \leq 1.95$ , 그라인딩 처리한 시험체의 경우  $0.30 \leq N_C/N_E \leq 2.02$ , TIG 처리한 시험체의 경우

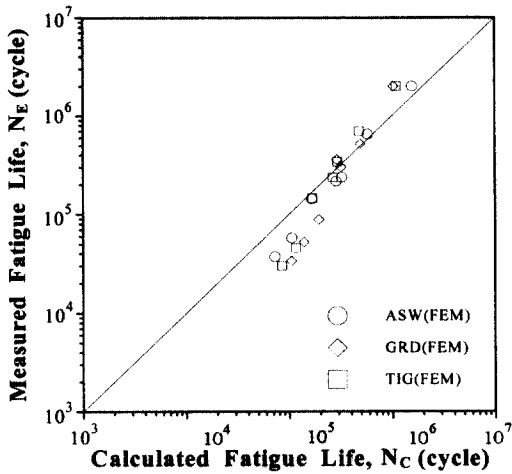


그림 5.6 실험피로수명과 계산피로수명의 비교

$0.55 \leq N_C/N_E \leq 2.84$ 에서 분포하고 있으며, 계산 결과가 실험결과보다 다소 과대평가하고 있는 경향을 나타내고 있었다. 이와 같이 실험결과와 계산결과에 차이가 존재하는 이유는 후처리에 따른 잔류응력의 변화, 비치마크실험으로부터 측정된 피로균열 측정에서의 명확성의 한계 및 시험체에 용접열영향으로 인한 각변형이 존재하여 용접지단부의 오목한 부분에서 면외 휨인장응력이 추가적으로 작용하였기 때문이 것으로 생각된다.

## 6. 결 론

- 1) 순수휨상태에서 하중비전달형 필렛용접부의 용접지단부를 그라인딩 처리 또는 TIG 처리의 후처리에 의해  $2 \times 10^6$ 회 피로강도는 피로 설계기준에서 정의하고 있는 피로강도등급이 한 등급 향상되는 것을 확인하였다.
- 2) 응력집중계수가 큰 여러 부분에서 피로균열이 동시다발적으로 발생해서 반타원형의 표면균열 형태로 성장하다가 서로 합체되어 보다 큰 형상의 반타원형 균열로 성장해서 파단에 이르는 것을 확인하였다.
- 3) 유한요소해석결과 하중비전달형 필렛용접부의 응력집중계수는 비드접선각도 및 곡률반경과

밀접한 관련이 있으며, 특히 곡률반경이 보다 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

- 4) 파괴역학적 해석결과 기하학적 형상보정계수는 피로균열발생초기에 큰 영향을 미치며, 피로균열이 성장함에 따라 유한판보정계수가 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.
- 5) 피로균열성장속도와 유한요소해석결과 및 기존의 제안식으로부터 산정한 응력확대계수범위 사이의 관계로부터 하중비전달형 필렛용접부에 대해서 피로수명을 비교적 정확하게 산정할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구에서 사용한 시험체는 (주)대림산업 철구사업부에서 지원해 주었으며, 용접지단부에 대한 그라인딩 처리는 현대직업전문학교 용접과에서 지원해 주었습니다. 이에 필자들은 관계자 여러분들께 진심으로 감사드리는 바입니다.

## 참 고 문 헌

1. 정 영화, 경 갑수, 홍 성욱, 김 익겸, 남 왕현, "TIG 처리에 따른 하중비전달형 필렛용접부의 피로특성", 한국강구조학회논문집, 제12권 제5호, pp.617-628, 2000.
2. 日本土木學會編, "鋼橋における劣化現象と損傷の評価", (株)丸善, pp. 10-12, 1996.
3. 衫本一朗, "溶接鋼鐵道橋の疲勞強度と延命化に關する研究", 鐵道總研報告, 鐵道總合技術論文集, 特別 第23號, pp. 1-8, pp. 57-63, 1998.
4. 飯田國廣 外, "鋼隅肉溶接繼手の曲げ疲勞強度に及ぼす隅肉形狀等の影響", 日本造船學會論文集, 第143號, 1978.
5. 寺崎俊夫, 秋山哲也, 横島直彦, 磯谷壽甫, 堅田寬治, "余盛形狀と應力集中率: 溶接繼手部の應力集中率・應力擴大係數について(第1報)", 溶接學會論文集, 第51卷, 第9號, pp. 790-796, 1982.
6. 小野塚正一, 後川理, 熊倉靖, 辻勇, "溶接止端

- 部形状が疲労強度に及ぼす影響(第1報) : ビード止端の応力集中と疲労強度”, 日本造船學會論文集, 第170號, pp. 693-703, 1991.
7. 辻勇, “非荷重傳達型すみ肉溶接継手の応力集中係数の推定式”, 西部造船會會報, 第80卷, 1990.
  8. 日本鋼構造協會編, “鋼構造物の疲労設計指針・同解説”, 技報堂出版, pp. 5-12, pp. 240-260, 1993.
  9. P.C.Paris, F.Eldogan, “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Trans. ASTM D-85, pp.528-534, 1963.
  10. IIW, “IIW Guidance on Assessment of the Fitness for Purpose of Welded Structures”, International Institute of Welding, Cambridge, SST-1157-90, 1990.
  11. M.A.Hirt, J.W.Fisher, “Fatigue Crack Growth in Welded Beam”, Engineering Fracture Mechanics, Vol.5, pp.413-429, 1973.
  12. P.Albrecht, K.Yamada, “Rapid Calculation of Stress Intensity Factors”, Proceedings of ASCE, Vol. 103, No. ST2, 1977.
  13. S.J.Maddox, “An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints”, International Journal of Fracture, Vol. 11, No. 2, pp. 221-243, 1975.
  14. AASHTO(American Association of State Highway & Transportation Officials), “Standard Specification for Highway Bridges”, pp. 144-147, 1996.

(접수일자 : 2000년 11월 14일)