용접후처리에 따른 하중비전달형 필렛용접부의 피로특성

홍 성 욱
한림성심대학 토목과
(2010. 11. 4. 접수 / 2010. 12. 14. 채택)

Fatigue Characteristics of Non Load-Carrying Fillet Welded Joints According to Post-Processing

Sung-Wook Hong
Department of Civil Engineering, Hallym College
(Received November 4, 2010 / Accepted December 14, 2010)

Abstract : A series of fatigue tests have been performed on the non-load carrying fillet welded joints in order to quantitatively assess the fatigue characteristics due to the grindings and TIG(Tungsten Inert Gas) welding treatments. From the results of fatigue tests, it has been shown that the fatigue strengths at 2x106 load cycles were improved in the case of the grinding sand TIG welding treatments, and we could know that it is satisfying fatigue strength prescribed in fatigue design standard in general. Besides, from the results of fracture mechanics approaches, the geometric shape correction factors were the most dominant factors in the initial fatigue crack growth, but as the fatigue crack develops, the finite plate correction factor were became the most dominant factor, and the fatigue life on non-load carrying fillet welded joints could be relatively exactly estimated by using the relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor obtained from finite element analysis and existing proposed formulae.
Key Words : fatigue strength, fatigue life, welded joints, post-Processing

1. 서 론

용접부의 피로강도 향상방법으로 단면을 증가시켜 전체적으로 응력을 저감시키는 방법과 용접부를 후처리하여 국부응력을 저감시키는 방법을 생각할 수 있는데, 경제성 및 효율성 측면으로부터 후처리에 의한 방법이 일반적으로 사용되고 있다.

용접부의 피로강도를 향상시키기 위해서 후처리에 의한 피로강도 향상방법으로 그라인딩처리, TIG(Tungsten Inert Gas)용접처리, 부가용접 등의 용접지단부의 기하학적 형상을 개선시키는 방법과 피닝(Peening)처리, 선상가열, 풀림 열처리 등에 의해 잔류응력을 저감시키는 방법 등이 많이 사용되고 있다.

이에 대한 많은 연구가 외국에서 수행되어 피로강도 향상의 효과를 확인하였고, 일부 방법은 실제 교량에 적용된 사례도 있지만 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 Fig. 1과 같으며, 반자동용접법인 플럭스 코어드 아크용접법(CO_2 용접)으로 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 용접을 실시하였다.

그라인딩 방법으로는 burr그라인더에 의한 방법

† To whom correspondence should be addressed.
swhong@hsc.ac.kr

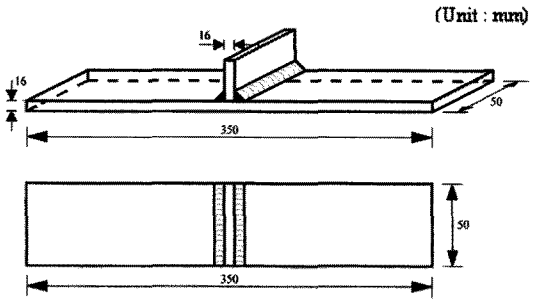


Fig. 1. Shape and dimension of specimen.

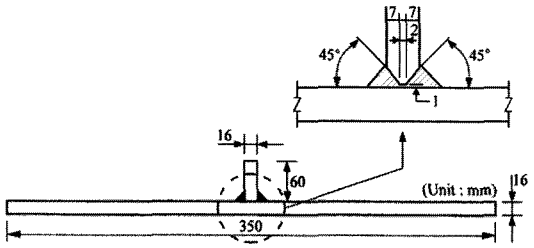


Fig. 2. Welding schematics of specimen.

과 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 제안기준을 참고로 해서 결정하였으며, TIG처리기준은 IIW에서 제시하고 있는 처리조건에 근거해서 실시하였다.

본 연구에서는 ±25ton 용량의 전기유압식 피로시험기를 이용해서 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 4점 휨피로실험을 실시하였으며, 피로실험시 작용하중은 정현파의 일정진폭하중을 이용하였으며, 하중재하속도는 7.5Hz, 응력비는 0.1로 하였다.

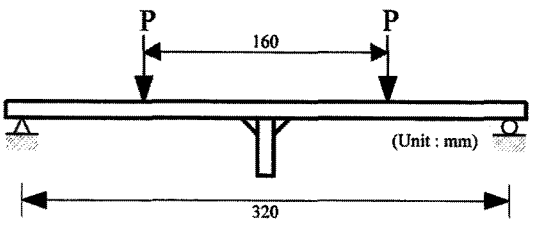


Fig. 3. 4-point bending fatigue test.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구의 피로실험결과로부터 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계를 미국의 AASHTO 및 일본의 JSSC에서 규정하고 있는 피로설계곡선과 비교해서 나타내면 Fig. 4와 같으며, 피로균열발생수명과 피로균열성장수명을 구분해서 나타내면 Fig. 5와 같다.

Fig. 4에서 나타낸 AASHTO C등급, JSSC E등급은 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도등급으로, 그림 중의 실선은 AASHTO, 점선은 JSSC에서 규정하는 피로설계곡선을 나타낸다.

Fig. 4에서와 같이 본 시험체에 대한 모든 피로강도는 현행 시방서의 피로강도등급기준을 만족하였으며, 현행 시방서의 피로설계곡선의 기울기 3보다 다소 완만한 경향을 나타내었는데, 이는 기존 시

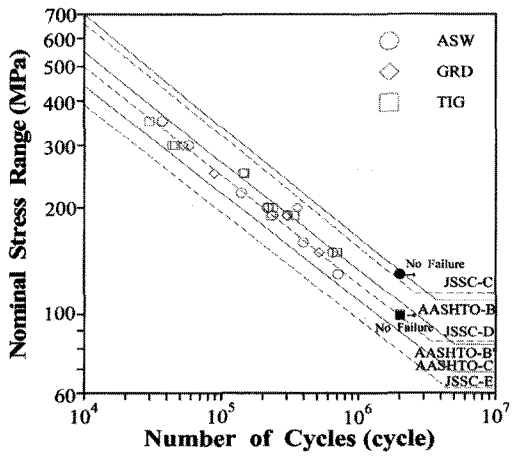


Fig. 4. Δσ-N Curve.

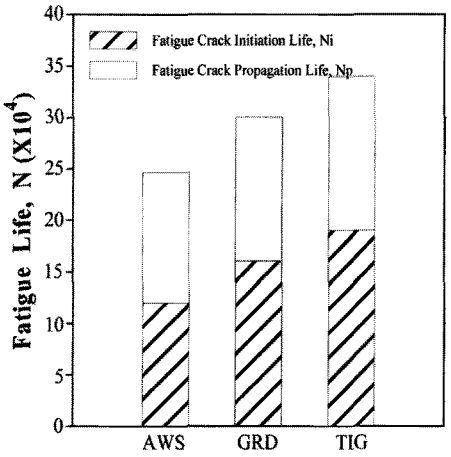


Fig. 5. Fatigue crack initiation & propagation life.

Table 1. Relations between Δσ and N

시험체 종류	회 귀 분 석 식	2×10^6회 피로강도 (MPa)
ASW	log(Δσ) + 0.219log(N) = 8.0	96
GRD	log(Δσ) + 0.197log(N) = 7.8	113
TIG	log(Δσ) + 0.197log(N) = 7.8	114

방서의 기울기 조건을 보수적으로 정한 것에 기인하는 것으로 생각된다. 또한 그라인딩 처리한 시험체와 TIG 처리한 시험체의 경우, 후처리에 의한 효과에 의해 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, 이는 그라인딩시 노치 등이 지단부에 남기 쉬운 작업특성에 의한 영향으로 생각한다. 따라서, 디스크 그라인더에 의한 후처리 작업시에는 세심한 작업이 필요할 것으로 생각된다.

후처리에 의한 피로강도 향상효과가 기존연구 결과와 같이 낮은 응력범위에서 그 개선효과가 확실하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

또한 Fig. 5에서와 같이 본 연구에서의 후처리에 의한 피로강도 향상정도는 피로균열발생수명의 증가에 따른 것으로 생각되며, 피로균열성장수명에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 한편 Fig. 4의 결과로부터 회귀분석법을 이용해서 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계를 나타내면 Table 1과 같다.

Table 1에서와 같이 순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부에 대해서 용접후처리에 따른 피로강도 향상효과는 약 20% 정도를 나타냈다.

4. 유한요소해석

본 연구에서는 하중비전달형 필렛용접부의 용접지단부에 대한 국부적인 응력특성을 해석적으로 평가하고 피로실험시 측정한 시험체의 모재부분과 용접지단부에서의 변형률 자료의 정확성을 검증하기 위해서 범용유한요소해석프로그램인 LUSAS를 이용해서 선형탄성해석을 실시하였다. 유한요소해석시 모든 시험체에서 용접지단부에서 피로파괴를 유도하기 위해서 완전용입된 상태로 가정하고 평면변형률상태를 전제로 2차원 쉘요소를 이용해서 모델링을 실시하였다.

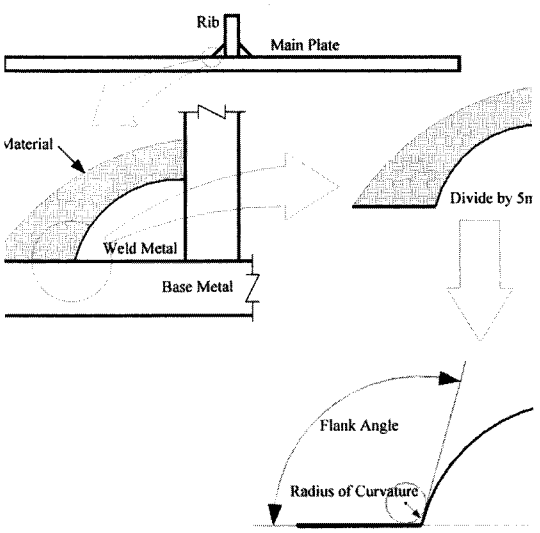


Fig. 6. Measurement of welded shape.

용접지단부에 대한 모델링시 용접지단부의 형상을 정확하게 나타내기 위해서 용접지단부를 라텍스고무를 이용해서 Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 용접지단부의 형상을 채취한 후 비드형상을 16배로 확대해서 측정한 결과의 평균값을 이용하였다.

용접지단부의 형상 즉, 비드접선각도와 곡률반경의 측정결과에 대한 통계분석 결과 비드접선각도와 곡률반경의 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차를 정리해서 나타내면 Table 2와 같다.

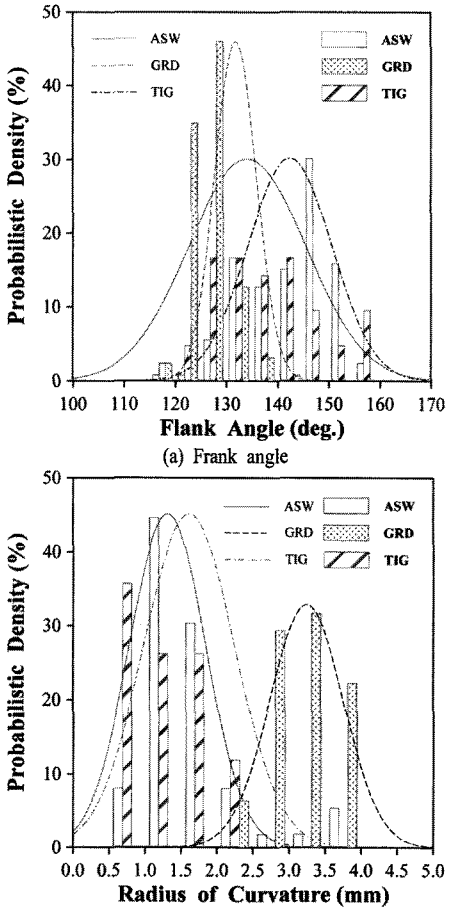
Table 2와 같이 비드접선각도는 TIG 처리를 실시하는 경우에, 곡률반경은 그라인딩 처리를 실시하는 경우에 증가하는 것을 알 수 있었다.

Table 2의 비드접선각도와 곡률반경에 대한 통계분석을 실시해서 비드접선각도와 곡률반경의 분포특성을 정리해서 나타내면 Fig. 7과 같다.

Table 2 및 Fig. 7과 같이 그라인딩 처리한 경우 비드접선각도는 큰 변화가 없으나 곡률반경은 약 116% 증가하였으며, TIG 처리한 경우 비드접선각도는 약 6%, 곡률반경은 23% 증가하였는데, 용접지단부의 형상 중 곡률반경이 응력집중계수에 보

Table 2. Measurement results of welded shape

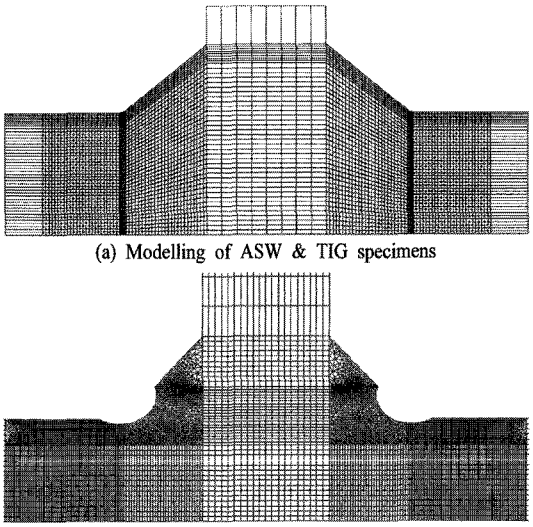
구 분	ASW		GRD		TIG	
	Θ	ρ (mm)	Θ	ρ (mm)	Θ	ρ (mm)
최대값	149°	2.06	148°	4.35	158°	3.50
최소값	126°	0.94	121°	2.12	118°	0.84
평균값	137°	1.50	135°	3.24	143°	1.61
표준편차	5.7°	0.33	9.4°	0.51	8.2°	0.63



(a) Frank angle

(b) Radius of curvature

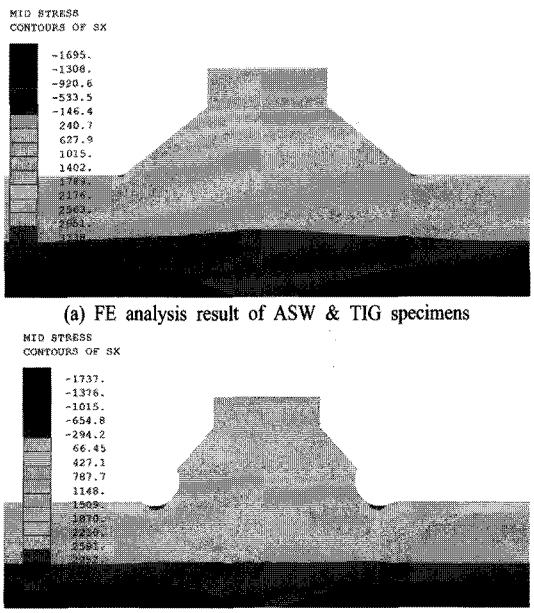
Fig. 7. Distribution characteristics of Welded shape.



(a) Modelling of ASW & TIG specimens

(b) Modelling of ASW & TIG specimens

Fig. 8. Modelling examples of FE analysis.



(a) FE analysis result of ASW & TIG specimens

(b) FE analysis result of GRD specimens

Fig. 9. FE analysis results.

다 큰 영향을 미친다는 연구결과로부터 용접지단부를 후처리하는 것에 의해 곡률반경이 증가하고 이로부터 용접지단부의 응력집중계수가 감소함으로써 피로균열발생수명이 증가하여 피로강도가 향상되는 것으로 생각한다. 유한요소해석 모델링시 용접지단부의 기하학적 형상에 관한 자료는 Table 2에서 나타낸 평균값을 이용하여 Fig. 8과 같이 모델링하였으며, 요소의 크기는 0.2~1.0mm까지 변화시켰다.

Fig. 8에서 나타낸 시험체에 단위하중을 작용시킨 경우 유한요소해석 결과의 일례를 나타내면 Fig. 9와 같다. Fig. 9의 응력등고선이 나타내는 값은 전체좌표계상의 x축방향으로 작용하는 응력을 의미하고 단위는 kgf/cm^2이다.

Fig. 9와 같이 최대응력은 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 TIG처리한 시험체의 경우 용접지단부에서 발생하고, 그라인딩 처리한 시험체의 경우 그라인딩 하단부의 패임깊이가 가장 큰 부분에서 발생하였다. 이는 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 TIG처리한 시험체의 경우 용접지단부의 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

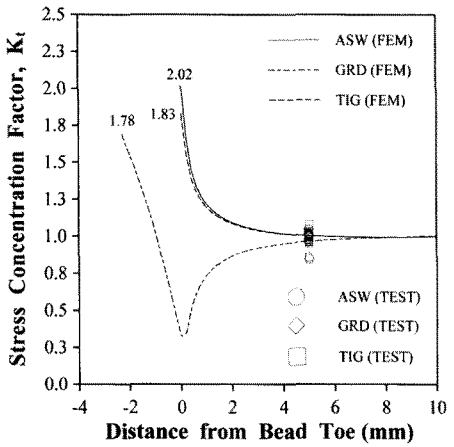
피로균열 발생수명에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 용접지단부의 기하학적 형상 즉, 비드접선각도와 곡률반경임을 확인할 수 있었다.

또한 용접지단부와 그라인딩이 시작되는 부분으로부터 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 그라인딩 처리한 시험체 및 TIG 처리한 시험체에 대한 판표면에서의 응력분포특성을 정리해서 나타내면 Fig. 10과 같다.

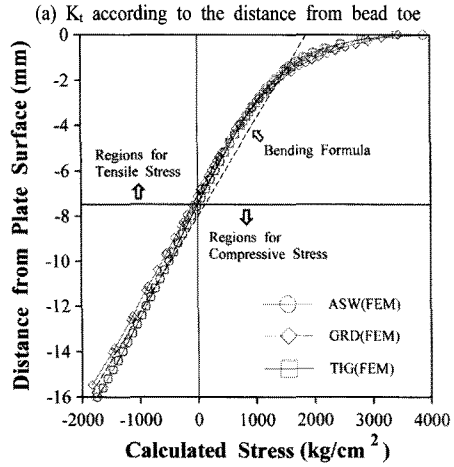
Fig. 10(a)와 같이 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우 2.02, 그라인딩 처리한 시험체의 경우 1.78, TIG 처리한 시험체의 경우 1.83의 값을 가지므로 용접지단부에 대해서 그라인딩 처리를 실시하는 경우 응력집중계수는 약 14% 정도 감소하고 TIG 처리를 실시하는 경우 약 10% 감소함을 알 수 있었다. 또한 순수휨상태에서 판두께 방향의 응력분포특성을 평가하기 위해서 용접후처리를 실시하지 않은 시험체 및 TIG처리 시험체의 경우 용접지단부, 그라인딩 처리한 시험체의 경우 패임량이 가장 큰 부분에서부터 판두께 방향의 응력분포특성을 나타내면 Fig. 10(b)와 같다. Fig. 10(b)와 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 Fig. 11과 같다.

Fig. 11과 같이 용접지단부의 형상에 따른 응력집중계수의 분포특성을 고찰하면 비드접선각도가 증가함에 따라서 용접지단부에서 응력집중계수는 선형적으로 증가하는 경향이 있으며, 곡률반경이 증가함에 따라서 용접지단부에서 응력집중계수는 급격하게 감소하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 용접지단부의 응력

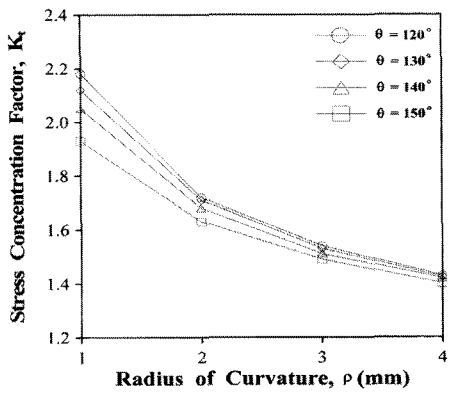


(a) K_t according to the distance from bead toe

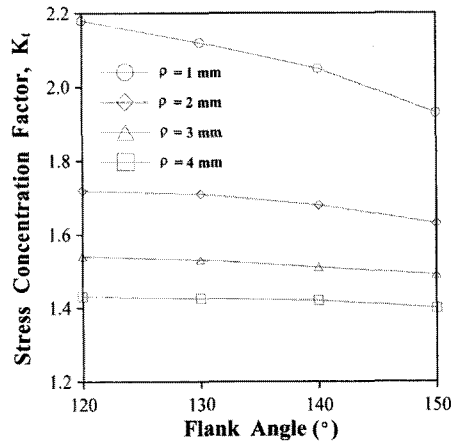


(b) Stresses according to the distance from plate surface

Fig. 10. Stress distribution characteristics.



(a) K_t according to the radius of curvature



(b) Kt according to the flank angle

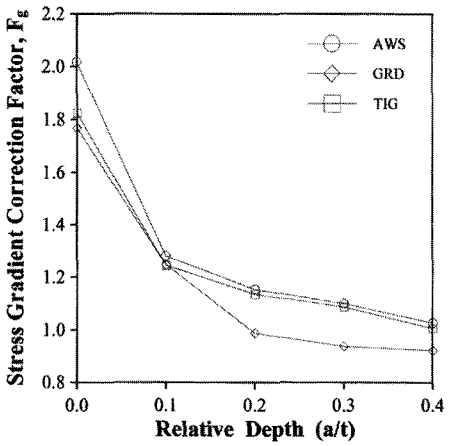
Fig. 11. K_t according to the weld bead shape.

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

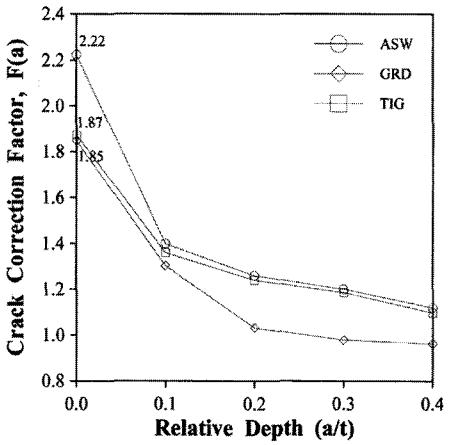
5. 파괴역학적 해석

본 연구에서 사용한 하중비전달형 필렛용접부를 대상으로 그라인딩 처리에 따른 피로균열성장특성을 정량적으로 평가하고 파괴역학적 해석을 실시하기 위해서 일련의 기하학적 형상보정계수와 균열보정계수를 산정한 결과를 나타내면 Fig. 12와 같다.

Fig. 12와 같이 기하학적 형상보정계수와 균열보정계수는 균열깊이가 증가함에 따라서 급격하게 감소하다가 압축영역이 시작되는 a=0.4t인 부분에서부터는 일정하게 수렴하는 경향을 나타내고 있었다.



(a) F_g according to the relative depth



(a) F(a) according to the relative depth

Fig. 12. Fg & F(a) according to the relative depth.

이상의 결과로부터 피로균열 발생초기에는 기하학적 형상보정계수가 피로균열발생에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 용접지단부를 그라인딩 처리 또는 TIG 처리를 하는 경우에는 피로균열 발생초기에는 기하학적 형상보정계수와 균열보정계수가 현저하게 감소하는 경향을 나타내었다.

한편 Fig. 12의 결과로부터 용접후처리를 실시하지 않은 시험체, 그라인딩 처리한 시험체 및 TIG 처리한 시험체의 균열보정계수에 대한 회귀분석결과를 다항식의 형태로 나타내면 식 (1)~(3)과 같다.

[ASW-Specimen]

$$F(a) = 2.20 - 15.0\left(\frac{a}{t}\right) + 88.1\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 228.6\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 212.1\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (1)$$

[GRD-Specimen]

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

[TIG-Specimen]

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

여기서, a/t는 상대깊이이고 a/t≦0.4 즉, 균열깊이가 시험체 두께의 0.4 이하인 경우에만 유효하다.

한편 균열보정계수에 대한 결과를 이용해서 파괴역학적 해석을 실시하기 위해서 비치마크실험결과로부터 a-N 선도를 나타내면 Fig. 13과 같다.

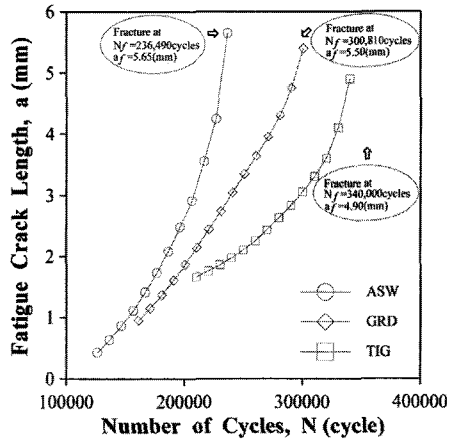


Fig. 13. a-N curve.

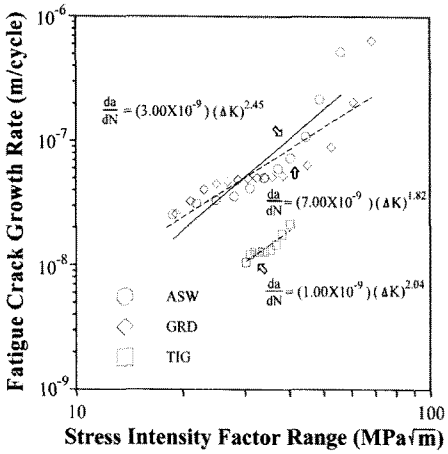


Fig. 14. da/dN-ΔK relations.

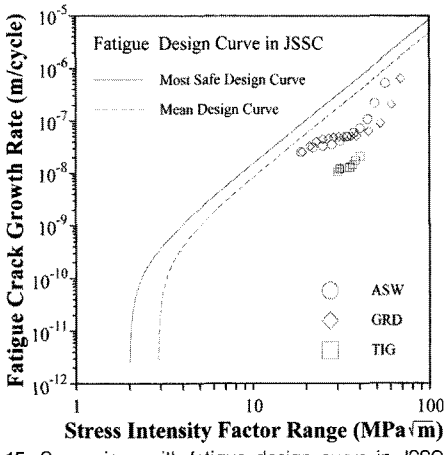


Fig. 15. Comparison with fatigue design curve in JSSC.

Fig. 13에서 나타낸 균열길이는 비치마크실험으로부터 얻은 반타원형의 표면균열의 판두께방향 즉, 단축방향의 균열길이를 의미한다. 또한 Fig. 13에서 나타낸 결과로부터 7점법을 이용해서 산정한 피로균열성장속도와 식 (5.1)에서 나타낸 응력확대계수범위 사이의 관계를 나타내면 Fig. 14와 같다.

Fig. 14에서 나타낸 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계로부터 재료상수 C, m을 산정한 결과 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우 $C=3.0\times10^{-9}$, m=2.45, 그라인딩 처리한 시험체의 경우 $C=7.0\times10^{-9}$, m=1.82, TIG 처리한 시험체의 경우 $C=1.0\times10^{-9}$, m=2.04임을 알 수 있었다.

이로부터 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 용접후처리를 실시한 시험체에서 C값은 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 Fig. 14의 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계를 JSSC 피로설계지침에서 제안하고 있는 최안전설계곡선 및 평균설계곡선과 비교해서 나타내면 Fig. 15와 같다.

Fig. 15와 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 Fig. 15에서 산정한 재료상수 및 JSSC 피로설계지침에서 제안하고 있는 정수값을 이용하고 식 (4)에서 나타낸 Paris-Erdogan이 제안한 피로수명에 대한 식으로부터 본 연구에서 대상으로 한 하중비전달형 필렛용접부에 대해 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 그라인딩 처리한 시험체에 대한 피로수명을 산출하면 Fig. 16과 같다.

$$N_p = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C\left(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m\right)} da \tag{4}$$

여기서, a_i : 초기균열길이, a_f : 한계균열길이

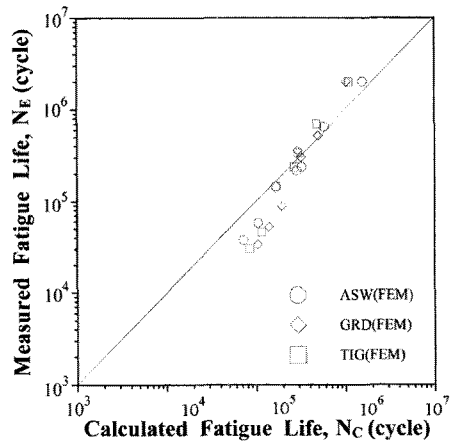


Fig. 16. Comparison between experimental and calculated fatigue life.

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

Fig. 16과 같이 실험피로 수명과 계산피로수명의 비(NC/NE)는 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우 $0.78 \leqq NC/NE \leqq 1.95$, 그라인딩 처리한 시험체의 경우 $0.30 \leqq NC/NE \leqq 2.02$, TIG 처리한 시험체의 경우 $0.55 \leqq NC/NE \leqq 2.84$에서 분포하고 있으며, 계산결과가 실험결과보다 다소 과대평가하고 있는 경향을 나타내고 있었다.

6. 결 론

1) 용접지단부를 그라인딩 처리 또는 TIG 처리의 후처리에 의해 2×10^6회 피로강도는 피로설계기준에서 정의하고 있는 피로강도등급이 한 등급 향상되었다.

2) 유한요소해석결과 응력집중계수는 비드접선각도 및 곡률반경과 밀접한 관련이 있으며, 특히 곡률반경이 보다 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

3) 파괴역학적 해석결과 기하학적 형상보정계수는 피로균열발생초기에 큰 영향을 미치며, 피로균열이 성장함에 따라 유한판보정계수가 더 큰 영향을 주었다.

4) 피로균열성장속도와 응력확대계수범위 사이의 관계로부터 용접부에 대해서 피로수명을 비교적 정확하게 산정할 수 있었다.

참고문헌

1) 김 동준, 홍 성욱, 경 갑수, 최 동호, "순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부의 피로특성에 관한 연구", 한국강구조학회 2000년도 학술발표대회 논문집, pp.75~84, 2000.
2) 日本土木學會編, "鋼橋における劣化現象と損傷の評價", (株)丸善, pp. 10~12, 1996.
3) 杉本一朗, "溶接鋼鐵道橋の疲勞强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强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, "溶接止端部形狀が疲勞强度に及ぼす影響(第1報) : ビード止端の應力集中と疲勞强度", 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繼手の應力集中係數の推定式", 西部造船會會報, 第80卷, 1990.
8) 日本鋼構造協會編, "鋼構造物の疲勞設計指針・同解說", 技報堂出版, pp. 5~12, pp. 240~260, 1993.
9) 後川理, 中山英治, "溶接繼手部の應力集中係數", 石川島播磨技報, 第23卷, 第4號, pp. 351~355, 1983.