

# 노치응력법에 의한 용접 연결부 피로수명 추정에 관한 연구

양박달치\* · 송준규\*

\*울산대학교 조선해양공학부

## Estimation Fatigue Life of Weldments by Notch Stress Approaches

Park-Dal-Chi Yang\* and Joon-Kyu Song\*

\*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Univ. of Ulsan, Ulsan, Korea

**KEY WORDS:** Local stress 국부응력, Fatigue effective notch stress 유효노치피로응력, Critical distance 임계거리, Finite fatigue life, 유한 피로수명

**ABSTRACT:** This paper analyzes the fatigue-life of welded joints using the notch stress approach. In the notch stress approach, the notch effects are usually approximated by introducing weld-bead parameters for the local detailed weld joints. The actual bead shape is complex and 3-dimensional. It may also greatly influence the fatigue strength. In this study, the welded shape was modeled using a 3D-scanner. The critical distance method was adopted in the evaluation of the fatigue effective notch stress for the weldments. Fatigue life tests were performed to verify the present method of fatigue life estimation for two types of welded plates with longitudinal attachments. The estimated results of the present methods were applied to the results of the experiment. The results of the analysis showed that the scatter of fatigue-life for the experimental data expressed in the nominal stress was significantly reduced by applying the effective fatigue stress of the present study.

### 1. 서 론

용접 연결부의 복잡한 기하학적 형상에 의한 응력집중과 이로 인한 피로강도의 저하는 설계과정에서 적절하게 고려하여야 한다. 특히 용접 루트부와 토우부는 피로파단에 대해 노치와 같은 거동을 하고 그 끝단부의 무디거나 날카로운 형상에 따라 피로강도 평가에 사용하는 응력이 달라져야 한다는 것이 알려져 왔다. 예를 들면 용접지단부에 토우 그라인딩(Toe grinding), 용접 프로파일링(Weld profiling)등과 같은 용접부 개선처리에 의한 피로강도의 향상 효과를 정량적으로 평가하기 위해서는 실제 용접 연결부의 형상을 정확히 정의하고 유효피로응력을 산정하는 것이 필요하다(임성우 등, 2008).

기존의 용접부에 대한 피로강도 평가 방법에는 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로, 용접연결의 종류와 하중의 방향에 따라 여러 등급으로 나누어지는 S-N곡선을 적용하는 공칭응력법과, 유한요소법을 이용하여 균열발생 위치에서의 응력을 구하고, 통합 S-N선도를 적용하여 피로 수명을 얻는 핫스팟(Hot spot) 구조응력법이 있다. 그러나 이 방법 역시 용접비드부의 자세한 국부 형상을 고려할 수 없는 단점이 있다(Radaj et al., 2006). 마지막으로 노치부근의 급격한 응력구배를 고려하여 일정영역에서의 평균응력이 피로강도에 관련이 있다는 가설하에 유효피로응력을 피로 기준응력으로 사용하는 노치응력법이 있다(Taylor et al., 2002).

본 연구에서는 이전 연구에서 개발한 용접부의 실제 비드 형상을

고려한 국부적인 해석모델을 생성하는 과정을 도입하고 임계거리법의 체적법을 이용하여 피로수명을 추정하였다(Bellet et al., 2005, Yang and Ahn, 2010). 1930년대 이후로 용접 노치부의 날카로운 정도에 따른 피로강도의 저하를 산정하기 위한 방법에 대해 많은 연구가 수행되어 온 가운데 Neuber(1958)에 의해 처음 제안된 노치응력법의 임계거리 이론은 Peterson(1974)과 Taylor(2007) 등에 의한 지속적인 발전을 통해 근래에는 노치 피로강도 해석에 가장 널리 사용되고 있다. Neuber 방법의 개념은 용접부의 응력집중 첨단부 주위에 작용하는 탄성응력에 대한 평균 응력을 피로파단의 유효응력으로 가정하는 것이다. 최근에 이 개념은 선형과피역학의 이론을 고려한 재고찰을 통해 노치를 가지는 구조요소의 고 사이클 영역에서의 피로강도의 추정과 연결된 임계거리를 산정하는 방법으로 확장되어 제안된 바 있다. 이러한 임계거리법의 새로운 정식화에 의한 노치 피로강도의 추정은 20%이내의 오차를 나타낼 정도의 정확도를 보였다(Taylor, 2007).

본 연구에서는 임계거리법이 피로한도 추정에 사용되는 것을 중간피로수명 영역으로 확대하여 적용하고자 한다. 이를 위하여 재료의 피로발생에 관련되는 임계거리를 변수로 가정하는 이론을 도입하였다. 중부착판이 판의 중앙에 부착된 모델과 옆면에 부착된 2 가지 모델에 대해 피로시험을 수행하고 피로수명 추정에 임계거리법의 체적법을 적용하였다. 용접비드부의 형상을 고려하기 위하여 이전 연구에서 개발된 3차원 스캐너를 이용한 형상모델링방법을 사용하였다(Yang and Park, 2009). 이 모델들에

대한 피로시험을 통해 얻어진 피로수명을 비교하여 실제 비드 형상을 고려한 효과에 대해 검토하였다.

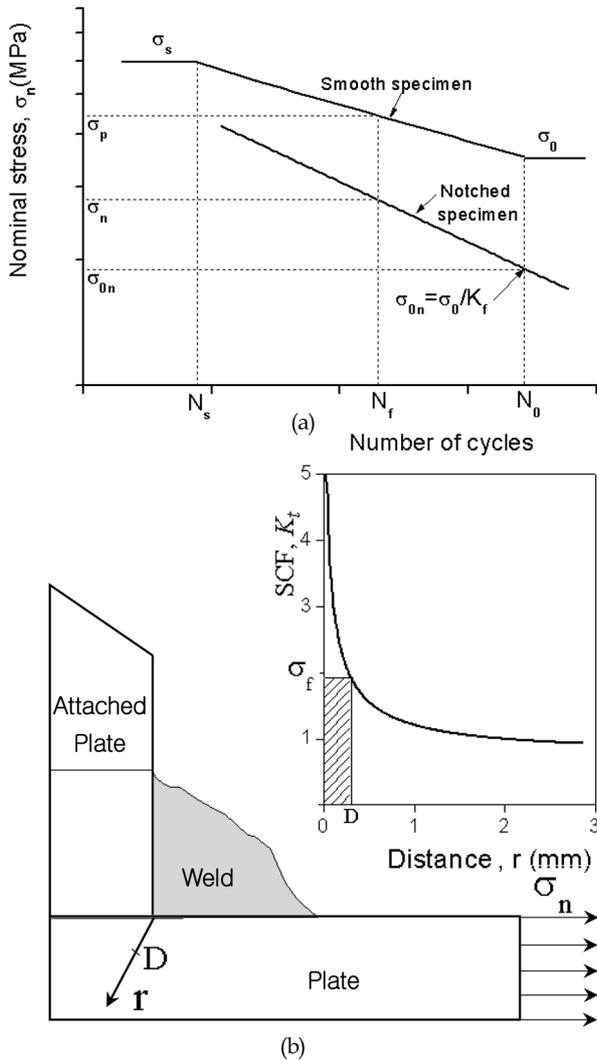


Fig. 1 (a) Fatigue curves of smooth and notched specimens  
(b) Linear elastic stress near the stress concentration

### 2. 노치응력법에 의한 피로수명

용접 연결부의 토우부 근처는 기하학적인 불연속으로 응력집중이 나타나고 피로파단에 대해 노치와 유사한 거동을 한다. 노치응력법의 피로한도(Fatigue limit)에 대한 균열 발생조건은 용접지단부를 노치로 간주할 수 있는 시편에 하중이 작용하는 경우를 예로 들면, Fig. 1b의 노치부근에 대한 유효피로응력  $\sigma_f$ 를 재료의 피로한도 응력  $\sigma_0$ 와 비교하여 판단하는 것으로 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_f = K_f \sigma_n \geq \sigma_0 \tag{1}$$

여기에서  $\sigma_n$ 은 공칭응력의 진폭이고  $K_f$ 는 노치피로계수 (Fatigue notch factor)로서 노치의 기하학적 형상에 따라 달라진다. Fig.

1a에서 나타난 피로한도 응력  $\sigma_0$ 는 무노치 시편에 대한 실험 결과로부터 얻어진다. 노치응력법에서는 주어진 노치 형상에 대한 유효피로응력을 최대응력점, 즉 노치의 정점 주위의 탄성응력장에 대한 평균응력으로 나타내는데 이를 결정하는 다양한 방법이 제안되고 있다. 이들 중 임계거리법은 응력집중의 정점으로부터 일정거리 떨어진 위치에 대한 탄성 주응력을 참고로 유효응력을 결정하는 방법으로, 일정거리  $D_p$  떨어진 위치의 응력을 사용하는 점응력법(Point method), 정점으로부터  $D_L$ 거리의 직선상의 평균응력을 사용하는 선응력법(Line method), 반경  $D_A$ 내의 면적에 대한 평균응력을 사용하는 면적법(Area method)과 반경  $D_V$ 내의 평균응력을 사용하는 체적법(Volume method)이 있다. 여기서  $D_p, D_L, D_A$ 와  $D_V$ 는 각각 사용하는 방법에 대한 임계거리이다. Taylor et al. (2002)은 피로한도 추정 of 경우, 임계거리를 식(2)로 표시되는 파괴역학의 균열발생 조건식에 의해 결정되는 재료 특성길이  $L$ 과 관련이 있다고 가정하였다.

$$L = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma_0} \right)^2 \tag{2}$$

이 식에서  $\Delta K_{th}$ 는 응력확대계수 범위의 하한계치(Threshold value)이고  $\Delta \sigma_0$ 는 무노치 시편의 피로한도 범위이다. 식(2)에 의한 특성거리  $L$ 은 하나의 재료 상수로서 재료와 하중비  $R$ 에 따라 달라진다. 기존의 연구에서는 임계거리들을  $D_p=L/2, D_L=2L, D_A=L$ 을 사용하여 유효피로응력  $\sigma_f$ 를 구하고, 노치가 없는 시편의 피로한도  $\sigma_0$ 에 적용하여 노치를 가진 부재의 피로한도를 추정하였다(Bellet et al. 2005).

본 연구에서는 노치부근 일정영역내의 평균응력을 기준으로 하는 용접부의 실제 형상을 고려할 수 있는 임계거리법의 체적법을 적용한다. 체적법은 균열전단부의 탄성응력장에 대하여 반경  $D_V$ 를 가지는 반구 내에서의 평균응력을 유효피로응력으로 정의한다. 여기에서 임계영역의 반경  $D_V$ 는 식(3)과 같이 표시된다(Yang and Ahn, 2010).

$$D_V = 0.434 \left( \frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma_0} \right)^2 \tag{3}$$

(2)식과 (3)식으로 부터 임계반경  $D_V$ 와 특성길이  $L$ 의 관계, 즉  $D_V=1.363L$ 를 얻을 수 있다.

일반적으로 부재의 피로균열 발생에 대한 유효피로응력에 해당하는 임계거리는 작용응력범위, 즉 피로수명에 따라 달라진다(Susmel and Taylor 2007). 예를 들면 Fig. 1(a)에서 보인 것과 같이 노치를 가지는 시편의 피로수명이 피로한도의 기준 사이클 수보다 작은 중간영역에서 무노치 시편에 대해 일정 비율로 감소되지 않고 피로응력의 감소율, 즉 노치피로계수가 변화하며 감소하는 경향을 보여준다. 이는 식(2)에 의한 임계거리는 엄밀하게 피로한도에만 적용되고 중간 사이클 영역에서의 임계거리는 변화한다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 중간영역의 피로수명에 대한 특성거리  $L_M$ 은 식(4)와 같이 변화하는 것으로 가정하였다.

$$L_M(N_f) = AN_f^B \tag{4}$$

여기에서  $A, B$ 는 재료 상수로서 하중비  $R$ 에 따라서 달라진다. 본 연구에서는 Susmel and Taylor(2007)이 강구조 용접에 대해 제안한  $A=6.9, B=0.193$ (하중비,  $R=0$ )을 사용하였다. 식(4)의 특성거리를 이용하여 변동임계거리(Variable critical distance)를 구하고 피로수명을 추정하는 과정에서 시행착오법을 적용해야 한다. 우선, 처음에 적용하는 피로수명의 값( $N_{f1}$ )을 가정하고 이에 대한 임계거리  $L_{M1} = AN_{f1}^B$ 를 식(4)에 의해 구한다. 노치 부근에서 이에 대한 임계거리  $D_1$  떨어진 거리에서의 응력크기  $\sigma_{1,a}$  얻을 수 있고, S-N curve를 통해 식(5)의 피로수명을 얻는다.

$$N_{f,2} = N_0 \left( \frac{\sigma_0}{\sigma_{1,a}} \right)^k \quad (5)$$

여기서  $\sigma_0$ 는 노치가 없는 시편에 대한 피로한도와  $N_0$ 는 그에 대응하는 피로수명이다. 또한  $k$ 는 S-N곡선의 역기울기이다. 만약,  $N_{f1}$ 과  $N_{f2}$  같지 않다면, 다시 위의 절차를 통해 재계산되며,  $N_{f1}$ 과  $N_{f2}$ 가 수렴할 때까지 이 과정을 반복한다.

### 3. 피로시험과 응력해석

본 연구에서 고려한 용접시편의 모재에 대한 피로시험은 하중속도 10~15Hz와 하중비  $R=0$ 로 수행하였으며 그 결과는 Yang et al., (2009)에서 보인 것과 같이 피로한도 기준사이클 수  $N_0 = 2 \times 10^6$  cycles에 대하여  $\sigma_0 = 187$ MPa와 S-N곡선의 역기울기는  $k=13.0$ 을 얻었다.

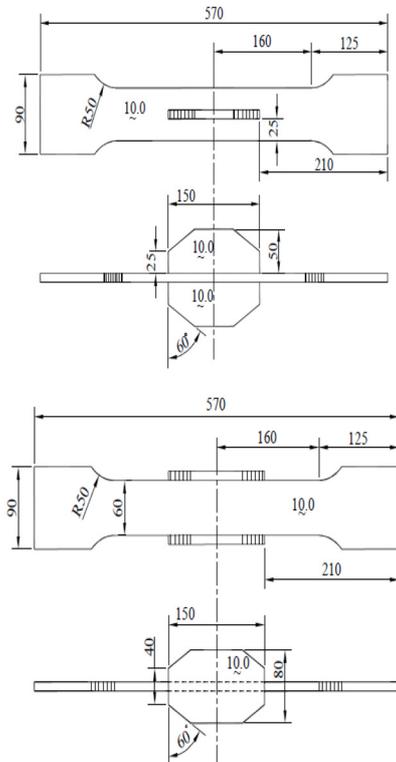


Fig. 2 Geometry of the specimens ; (a) with longitudinal attachment at the center(LF), (b) at the edges of the plate(GF)

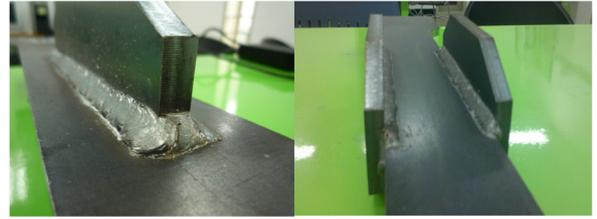


Fig. 3 Photos of the specimens and bead shapes for the LF-model and the GF-model

용접 연결부에 대한 피로시험 모델에 대한 형상과 치수를 Fig. 2에 보이고, 용접비드부의 형상을 포함한 각 시편의 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 피로시험모델의 종류는 2가지로 Fig. 2에서 보인 것과 같이 판 중앙의 양면에 종 방향의 거셋판이 부착된 판(LF모델)과 판의 옆면에 거셋판이 부착된 판(GF모델)이다. 시편의 수는 LF모델 17개, GF모델 15개이며 판 두께는 모두 10mm로 구조용 연강을 사용하여 시편을 제작하였다. 본 연구에서 피로시험은 하중속도 10~15Hz, 하중비는  $R=0$ 로 수행하였다.

Fig. 3에서는 제작된 시편의 실제 용접비드의 형상을 보이고 있는데 이는 3차원의 복잡한 형상을 나타내고 있음을 볼 수 있는데, 이들의 세밀한 형상이 피로강도에 큰 영향을 끼친다. 그러나 이와 같은 용접부 비드에 대한 실제 형상의 모델링은 그 복잡성과 데이터 처리의 어려움으로 중요성에 비해 실제 연구가 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 3-D 스캐너를 사용하여 용접비드부의 곡면 데이터를 구하고 이로부터 용접부의 실제 형상을 고려한 응력해석을 수행하는 과정에 대한 이전의 결과를 이용하였다(Yang and Park, 2009; Yang and Song, 2010).

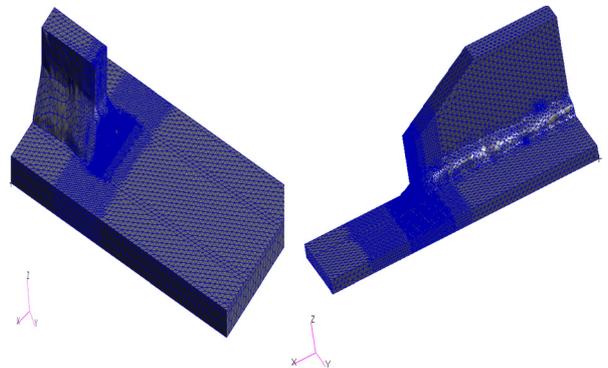


Fig. 4 Results of FE modelling for the plate specimens with longitudinal attachments at the both faces (LF-model) and at the side-edges of the plate (GF-model).

노치피로계수 산정에는 매우 세분화된 유한요소의 분할이 요구되는데 이에 따라 모델링의 복잡성과 해석 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 본 연구에서는 각각의 모델에 대해 전체 형상을 하나의 솔리드로 분할하고 이를 다시 토우부 또는 응력집중부 근처에서는 국부적으로 세밀한 요소로 세부 분할하여 응력해석을 수행하였다. Fig. 4는 본 연구에서 도입한 판 중앙의 양면에 종 방향 거셋판이 부착된 판 모델, 측면에 거셋판이 부착된 판의 모델에 대한 1/4형상의 유한요소 모델링의 결과로서

해석 모델의 비드부 형상은 실제 형상을 그대로 나타낸 것이다. 특히 Yang and Park(2009)에 의한 이전 연구에서 세분화된 해석을 위한 단계해석법을 적용하는 과정에서의 번거로움과 오차로 인한 해석의 부정확성을 줄이기 위하여 Fig. 4에서 보인 것과 같이 하나의 형상모델의 결과에 대해 조밀분할 영역과 세밀한 요소를 사용하는 영역을 조합하는 모델링 방법을 개발하여 해석모델의 준비과정과 해석시간을 크게 개선하였다.

#### 4. 유효피로 응력과 피로수명 추정

각 시험 모델을 대상으로 비드부의 형상을 포함하는 상세 요소분할 모델에 대한 구조해석을 수행하였고 그 응력해석 결과를 이용하여 용접 토우선상의 각 절점에 대해 적분영역 안에 포함되는 요소들을 선택하여 유효피로응력을 계산하였다. 각 시편에 대하여 유효피로응력을 구하기 위한 응력해석 도구는 MSC/NASTRAN을 사용하였다. 그 결과들로 부터 식(4)와 식(5)를 사용하여 임계거리  $L_M$ 와 피로수명을 추정하였다.

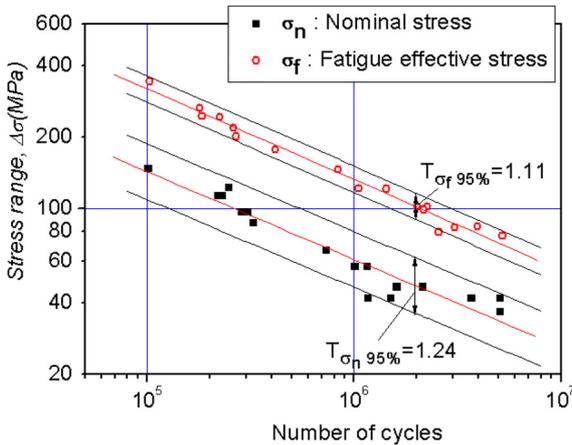


Fig. 5 Fatigue experimental results of LF-model and fatigue effective stress with estimated fatigue life

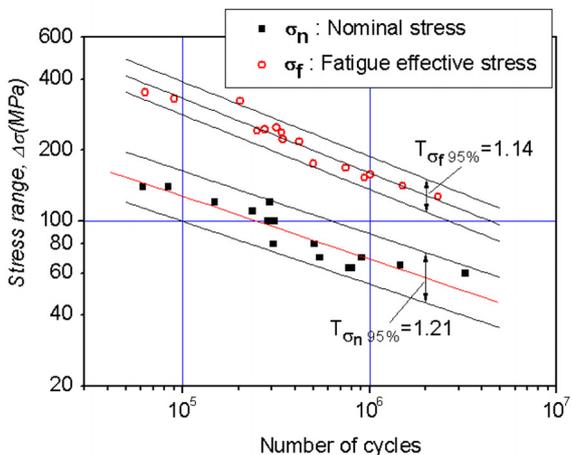


Fig. 6 Fatigue experimental results of GF-model and fatigue effective stress with estimated fatigue life

Fig. 5, 6은 각각 LF-모델과 GF-모델에 대하여 공칭응력 vs. 실험 피로수명과 유효피로노치응력 vs. 추정 피로수명의 결과를 나타내었다. 각각의 그림에서는 평균곡선인 S-N곡선과 확률 95%의 상한곡선( $P=97.5\%$ )과 하한곡선( $P=2.5\%$ )을 같이 나타내었다. Fig. 5의 LF-모델에 대한 결과에서 나타난 바와 같이 유효 피로응력에 대한 계산결과들의 산포도가  $T_{\sigma_f 95\%}=1.11$ 으로 공칭 응력의 산포도 1.24에 비해 10.5% 감소한 결과를 보이고 있다. 또한, Fig. 6에서 보인 GF-모델의 유효피로응력에 대한 산포도가  $T_{\sigma_f 95\%}=1.14$ 로 공칭응력의 산포도 1.21에 비해 5.8% 감소한 것을 나타내었다. 이는 용접연결부에 대한 S-N곡선을 이용한 피로수명의 산정에 있어서 노치응력법의 체적법에 의한 유효피로응력의 사용이 보다 오차가 적거나 신뢰성이 높아질 수 있음을 의미한다. 또한 본 연구의 피로시험은 용접비드의 실제형상을 제외하고 모든 치수가 동일한 시편을 사용한 것이지만 피로수명의 추정에 있어서는 실제 비드형상을 고려한 결과, 각각의 시편에 따라 노치피로계수가 달라진다. 이것은 체적법에 의한 유효피로응력과 변동임계거리를 이용한 피로수명추정을 통해 얻어진 피로수명 결과들의 산포도가 공칭응력에 의한 산포도보다 감소한 것은 실제 비드형상을 고려한 효과가 요인의 하나로 볼 수 있다.

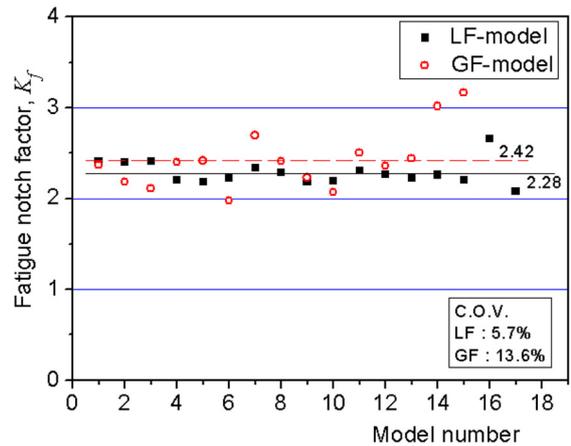


Fig. 7 Fatigue notch factors estimated by the variable critical distance method with effects of actual weld bead shape

각 모델별로 계산된 노치피로계수  $K_f$ 의 분포를 Fig. 7에 보였다. 여기에서 보인 노치피로계수 또는 이로부터 계산되는 유효피로 응력 값의 분포는 용접비드 형상에 기인하는 것으로 이것이 피로수명에 직접 영향을 미치는 것으로 생각할 수 있다. LF-모델에 대한 노치피로계수의 값은 평균 2.28, 최대 2.66, 최소 2.08과 C.O.V.는 5.7%이고, GF-모델은 평균 2.42, 최대 3.17, 최소 1.97과 C.O.V.는 13.6%의 결과를 보였다. 전체적으로 GF-모델의 결과가 LF-모델에 비해 큰 분산을 보이고 있는데 이는 GF-모델의 피로 파단 발생점인 거셋판의 용접 끝단부의 형상이 상대적으로 일정하지 않고 매끈하지 못한 것이 응력의 증가와 큰 불균일을 초래한 것으로 판단된다.

Fig. 8에서는 노치응력법의 변동임계거리법을 이용해서 추정된 피로수명과 실험을 통해 얻어진 피로수명을 비교한 결과를 보였다. 대부분의 피로수명 추정결과가 확률 95%의 상한곡선( $P=$

97.5%)과 하한곡선( $P_f= 2.5\%$ )사이에 놓이고, LF모델 2개와 GF 모델 3개의 결과가 95%신뢰구간에서 벗어남을 보이고 있다. 피로수명 추정에 대한 오차는 LF모델이 10.4%, GF모델이 10.3%로서 전체 오차 평균은 10.3%의 좋은 결과를 나타내었다.

참고문헌

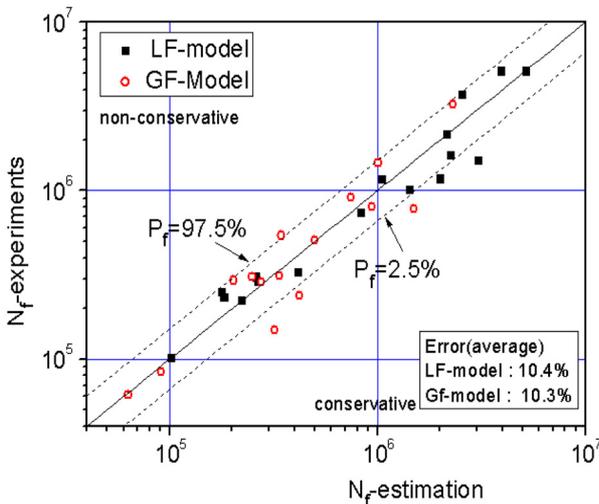


Fig. 8 Comparison of the fatigue life between the experiments and the estimation by the variable critical distance

5. 결 론

용접 연결부의 피로강도 향상을 위한 토우 그라인딩, 용접 프로파일링 등 용접 끝단부의 가공에 의한 효과를 정량적으로 산정하기 위해서는 용접부 비드형상을 고려한 피로수명 추정의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 노치응력법의 임계거리법을 피로수명 추정에 적용하였다. 이를 위해 변동 임계거리의 개념을 도입하고, 응력해석의 결과로부터 체적법을 반복적으로 적용함으로써 유효피로응력과 피로수명을 추정하는 방법을 제시하였다.

종 방향 거셋판이 부착된 두 가지 종류의 실험 모델의 용접 연결부에 대하여 실제 비드 형상을 3D 스캐너로 형상정보를 획득하고 응력해석모델을 생성하는 절차를 고안하였다. 이에 변동 임계거리법을 이용한 피로수명을 추정한 결과를 유효피로응력에 적용하여 LF모델과 GF모델의 피로수명에 대한 산포도는 공칭응력에 의한 산포도보다 각각 5.8%, 10.3% 감소한 결과를 얻었다. 실험의 피로수명과 추정된 피로수명의 비교를 통해서 얻어진 결과의 대부분은 95%신뢰구간 내에 속하고 추정피로수명 추정 오차의 평균이 10.3%를 보이는 결과를 얻었다.

향후 본 연구의 방법을 보다 다양한 용접모델에 대하여 적용하여 정밀도를 높이고 실제 비드형상을 고려하는 방법을 용접부의 가공처리에 의한 피로수명의 효과에 대한 연구에 적용할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2011년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었습니다. 울산대학교의 연구비지원에 감사드립니다.

임성우, 장인화, 김상식, 송하철, (2005). "용접구조물의 부식피로수명에 미치는 용접부 개선처리 효과", 한국해양공학회지, 제22권 제2호, pp 50-57.

Bellet, D., Taylor, D., Marco, S., Mazzeo, E., Guillois, J. and Pircher, T. (2005). "The Fatigue Behaviour of Three-Dimensional Stress Concentrations", International Journal of Fatigue, Vol 27, pp 207-221.

Neuber, H. (1958). Theory of Notch Stresses: Principles for Exact Calculation of Strength with Reference to Structural Form and Material, Springer Verlag, Berlin.

Peterson, R.E. (1974). Stress Concentration Factors, New York Wiley & Sons.

Radaj, D., Sonsico, C.M. and Fricke, W. (2006). Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches, Second Edition, Woodhead Publ.

Susmel, L. and Taylor, D. (2007). "A Novel Formulation of the Theory of Critical Distances to Estimate Lifetime of Notched Components in the Medium-cycle Fatigue Regime", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol 30, pp 567-581.

Taylor, D. (2007). Theory of Critical Distances-A New Perspective in Fracture Mechanics, Elsevier.

Taylor, D., Barrett, N. and Lucano, G. (2002). "Some New Methods for Predicting Fatigue in Welded Joints", International Journal of Fatigue, Vol 24, pp 509-518.

Yang, P.D.C. and Ahn, J.H. (2010). "A Comparative Study of the Fatigue Strength on Cruciform Joints by Local Stress Approaches", Journal of Society of Naval Architecture of Korea, Vol 47, No 4, pp 573-579.

Yang, P.D.C. and Park, C.M. (2009). "Notch Fatigue Analysis Based on the Actual Bead Shape of Welded Joint", Journal of Society of Naval Architecture of Korea, Vol 46, No 4, pp 417-423.

Yang, P.D.C., Park, C.M. and Ahn, J.H. (2009). "Fatigue Strength Assessment of Cruciform Joints by Local Stress Approaches", Proceeding of the Annual Autumn Meeting, Society of Naval Architects of Korea, Moonkyung, 29-30 October, 2009, pp 113-118.

Yang, P.D.C. and Song, J.K. (2010). "Fatigue Assessment of Weldments with Longitudinal Attachments by the Notch Stress Approaches", Proceeding of the Annual Autumn Meeting, Society of Naval Architects of Korea, Changwon, 21-22 October, 2010, pp 1249-1253.

2011년 8월 31일 원고 접수  
 2011년 9월 27일 심사 완료  
 2011년 10월 17일 게재 확정