

잔류응력을 고려한 국부변형률과 공칭응력 기준 피로수명 평가

구 병 춘[†]·양 승 용*·서 정 원*·정 흥 채*

Fatigue Life Evaluation by $\sigma - N$ and $\epsilon - N$ Approaches Considering Residual Stresses

Byeong Choon Goo, Sung Yong Yang, Jung Won Seo and Hung Chai Jung

Key Words: Fatigue Life(피로수명), Local Strain(국부변형률), Nominal Stress(공칭응력), Residual Stress Relaxation(잔류응력 이완), Welded Joints(용접 이음부)

Abstract

To evaluate the fatigue lives of welded joints taking into residual stress relaxation, two approaches are applied. One is based on the conventional local strain analyses. The other is based on a model developed by the authors. In the first approach, the Ramberg-Osgood relation, Lawrence model and S.W.T. parameter are used. In the second approach, The S-N curve for a welded joint is deduced from that of the parent material. Residual stress relaxation obtained by finite element analysis is considered. Finally, we evaluate the fatigue lives for four weld details using the two approaches.

1. 서 론

기호설명

E	: 탄성계수
K_f	: 피로노치계수
K_t	: 응력집중계수
S	: 공칭응력
S_a	: 공칭응력의 진폭
S_y	: 항복응력
S_u	: 인장강도
S_{max}	: 작용응력의 최대값
σ, ϵ	: 국부 응력, 국부 변형률
σ_{res}	: 초기 잔류응력

용접에 의해 발생한 압축이나 인장 잔류응력이 작용하중, 균열의 진전 등에 의해 완화되거나 압축이 인장으로 혹은 인장이 압축으로 변하기도 하여 그 영향이 매우 복잡하다.⁽¹⁾ 잔류응력의 영향을 고려하기 위해 Han 등은^(2,3) 전통적으로 용접부 수명평가에 사용되는 hot-spot 응력과 수정 Goodman식을 사용하여 잔류응력을 평균응력으로 고려하였다.

본 연구에서는 잔류응력을 고려하면서 공칭응력을 이용하는 $\sigma - N$ 방법과 국부변형률을 이용하는 $\epsilon - N$ 방법으로 4 종류의 용접 유형에 대해 피로수명을 예측하고 비교 검토하고자 한다.

2. 잔류응력을 고려한 수명 예측

Fig. 1은 잔류응력, 노치 및 용접후열처리가 피로거동에 미치는 영향을 도식적으로 표현한 그래프이다.

[†] 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

E-mail : bcgoo@krri.re.kr

TEL : (031)460-5243 FAX : (031)460-5289

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

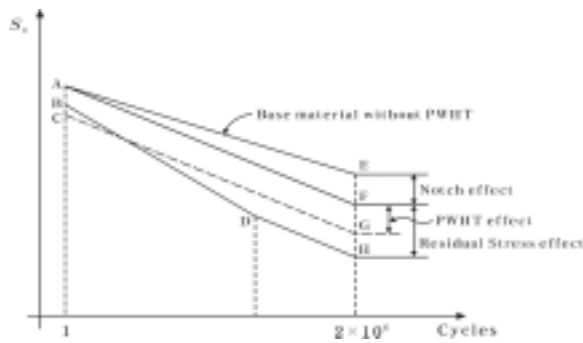


Fig. 1 Schematic representation of residual stress and notch effect

피로 선도 AE는 후열처리를 하지 않은 모재의 S-N 선도이다. 2×10^6 사이클에서의 모재의 피로 강도는 S_f 이다. 피로 선도 AF는 용접 이음부의 노치효과를 고려한 S-N 선도이다, 피로강도는 모재의 피로강도를 피로노치계수 K_f 로 나눈 S_f/K_f 이 되고 한 사이클에서의 피로강도는 모재와 동일하다고 가정하고 점 A와 F를 연결하여 피로선도를 얻는다. 선 CG는 용접 비드와 같은 노치를 갖는 모재를 후열처리 하는 경우의 피로 선도이다. 용접된 부품이나 부재의 잔류응력을 제거하기 위하여 후열처리를 하는 경우 조직의 정도, 항복강도, 인장강도가 변화하므로 피로강도도 변한다. 후열처리를 하면 인장 잔류응력이 완화되어 피로강도가 증가할 수 있지만 선 CG에서는 개념상 잔류응력은 고려하지 않고 열처리에 의한 조직의 변화가 피로강도에 미치는 영향만 고려하고 잔류응력은 따로 고려한다. 선 BDH는 용접에 의한 잔류응력의 영향과 노치 효과를 모두 고려한 S-N 선도이다.

제안된 방법을 사용하여 피로수명을 예측하는 절차는 참고문헌 (4)에 자세히 기술하였다.

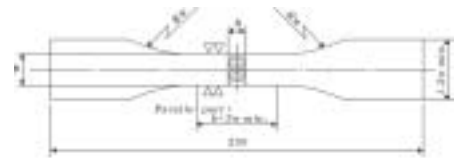
3. 용접시편의 피로수명 예측

3.1 유한요소 모델 및 피로노치계수 계산

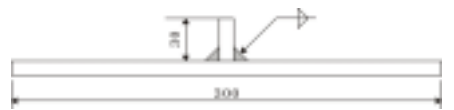
수명예측을 위하여 4가지 시험편을 선정하였고 이에 대한 형상은 Fig. 2와 같다. 여기서 첫 번째 맞대기 용접시편은 3 pass 이고 나머지는 1 pass 아크 용접이다. 용접 토우부의 응력집중계수를 구하기 위하여 토우 반경 및 용접비드 길이를 측

정하였다. 맞대기 용접의 경우 노치부 반경, $r=2$ mm, $\theta=21^\circ$, 용접비드 높이 $h=1.64$ mm이다. TN 용접의 경우 노치부 반경, $r=0.183$ mm, 용접비드 각장 $h_1=9.008$ mm, $h_2=9.319$ mm이고, NCN 용접의 경우 노치부 반경, $r=0.169$ mm, 용접비드 각장 $h_1=9.320$ mm, $h_2=9.840$ mm, CN 용접의 경우 노치부 반경, $r=0.235$ mm, 용접비드 각장 $h_1=8.710$ mm, $h_2=9.290$ mm이다.

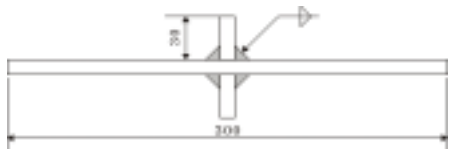
유한요소해석 결과 맞대기 용접의 경우에는 응력집중계수 $K_f=1.6$, TN의 경우 $K_f=2.71$, NCN의 경우 $K_f=3.64$, CN의 경우 $K_f=4.22$ 이다.



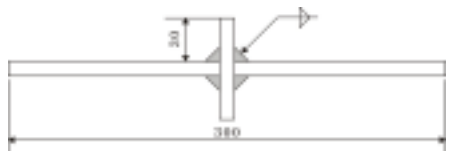
a) Butt welded specimen for analysis



b) TN specimen for analysis



c) NCN specimen for analysis



d) CN specimens for analysis

Fig. 2 Specimens for tests and analyses

피로노치계수 K_f 는 Peterson의 식을 사용하였다.⁽⁵⁾

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + a/r} \quad (6)$$

여기서 $a = 0.0254 \left(\frac{2070}{S_u} \right)^{1.8}$ 는 재료에 의존하는 특성 길이로 경험적으로 얻어진 식이다. 이것을 통하여 구한 노치계수 K_f 는 Table 1과 같다.

Table 1 Fatigue notch coefficients

Specimen types	K_t	K_f
Butt weld	1.6	1.52
TN	2.71	1.63
NCN	3.64	1.93
CN	4.22	2.40

3.2 용접 잔류응력 및 잔류응력 이완 해석

용접 해석은 ABAQUS 코드를 이용하였다. 용접 비드는 ABAQUS에서 제공하는 요소 생성법을 이용하였고 해석에 사용된 변수의 값과 온도에 의존하는 재료의 성질들은 참고문헌 (4)에 기술하였다.

Fig. 3은 맞대기 용접시편의 용접부 형상을 보여 준다. Fig. 4는 중심부 D와 측면부 A (혹은 E)에서의 잔류응력이 작용 외력에 의해 완화되는 경향을 보여준다. 중심부에서는 초기의 인장 잔류응력은 외력이 증가하며 따라 점진적으로 감소하다가 압축잔류응력으로 변화되고 있다. 측면에서의 잔류응력은 그 절대값이 약간 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보인다. CN 시편의 경우 외력이 작은 경우 중심부가 취약부이나 외력이 큰 경우는 측면부위가 취약부가 되어 작용하중에 따라 파손위치가 달라질 수 있다는 것을 알 수 있다.

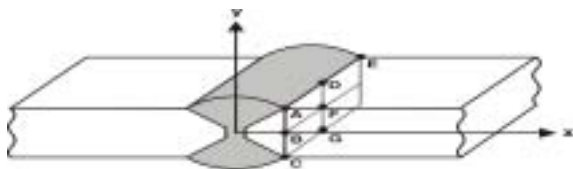
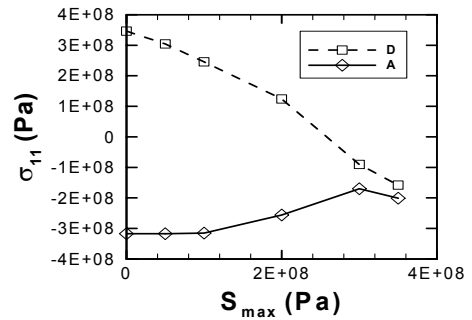
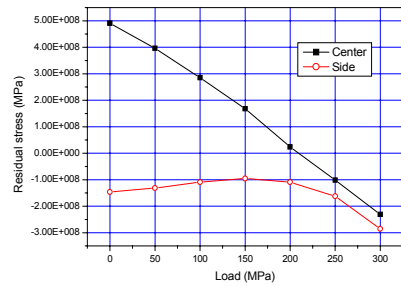


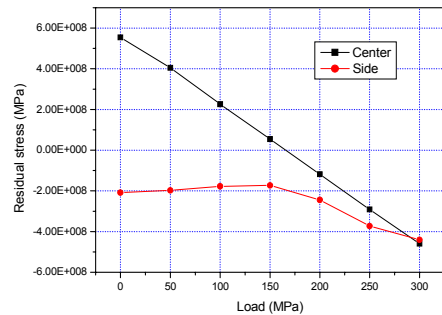
Fig. 3 Butt welded specimen



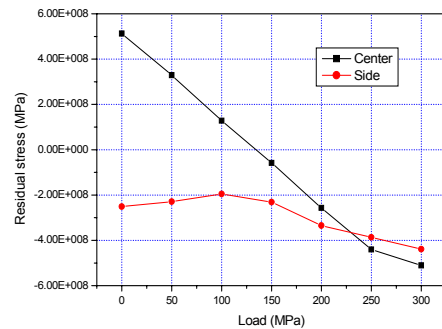
a) Butt weld specimen



b) TN specimen



c) NCN specimen



d) CN specimen

Fig. 4 Residual stress relaxation at A and D by applied loading

3.3 $\epsilon - N$ 방법에 의한 수명 해석

용접에 의한 잔류응력의 영향을 고려하기 위하여 Lawrence의 모델을⁽⁶⁾ 사용하였으며 수명 예측을 위해서는 아래 식 (7)로 표현되는 S.W.T. 파라미터⁽⁵⁾ 이용하였다.

$$\sigma_{\max} \epsilon_a E = (\sigma_f')^2 (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' E (2N_f)^{b+c} \quad (7)$$

여기서 상수 $b, c, \sigma_f', \epsilon_f'$ 의 값은 Han 등이⁽⁷⁾ SM 490 B의 실린더 형 시편의 열영향부에 대해서 구한 값을 사용하였다.

Fig. 5는 맞대기용접 시편에 대해 Lawrence 모델과 S.W.T. 파라미터를 사용한 수명예측 결과를 보여 준다. 전반적으로 실험결과와 유사한 결과를 예측하나 잔류응력이 존재하지 않는 경우는 실험에 비해 긴 수명을 예측함을 알 수 있다. Fig. 6은 TN 시편에 대한 수명예측 결과로 상당히 정확하게 시험수명을 예측함을 알 수 있다. Fig. 7과 8은 NCN과 CN 시편에 대한 것으로 앞의 두 결과와 유사한 정확도를 갖는 것을 알 수 있다.

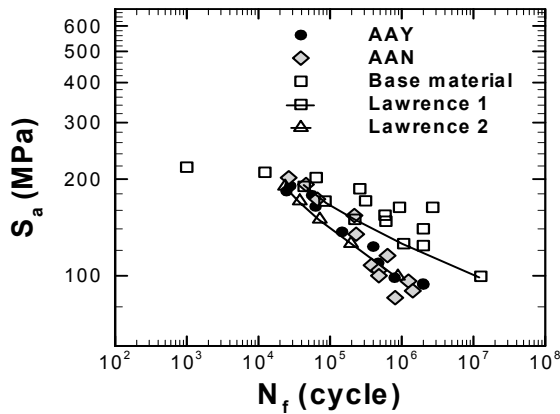


Fig. 5 S-N curves. Base material, AAN, AAY are experimental results. Lawrence 1 and 2 are the predicted results for $\sigma_{res}=0$ MPa and $\sigma_{res}=346$ MPa, respectively.

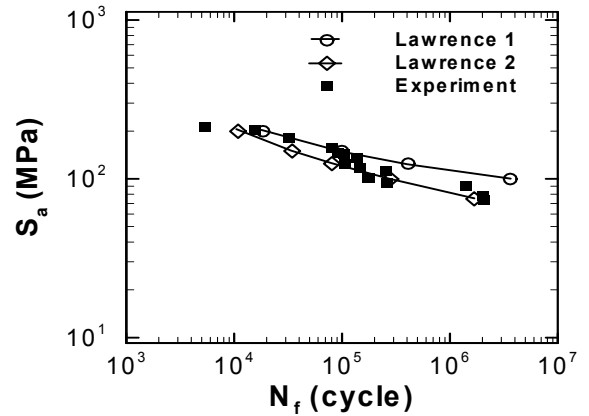


Fig. 6 Fatigue life evaluation for the TN specimens. Lawrence 1 and 2 are the predicted results for $\sigma_{res}=0$ MPa and $\sigma_{res}=500$ MPa, respectively.

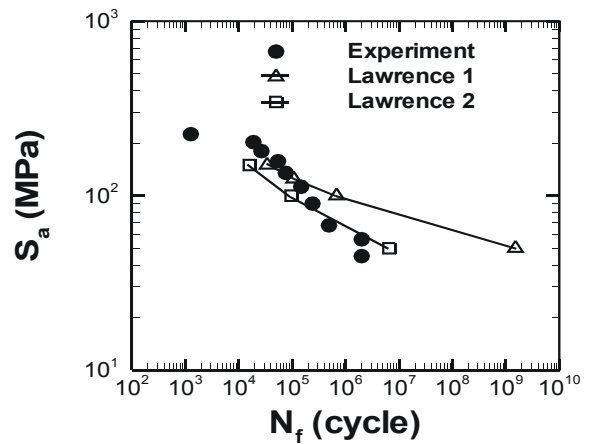


Fig. 7 Fatigue life evaluation for the NCN specimens. Lawrence 1 and 2 are the predicted results for $\sigma_{res}=580$ MPa and $\sigma_{res} = \text{maximum}$ MPa, respectively.

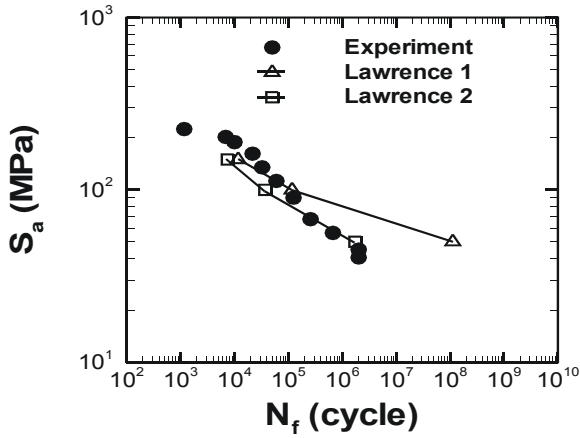
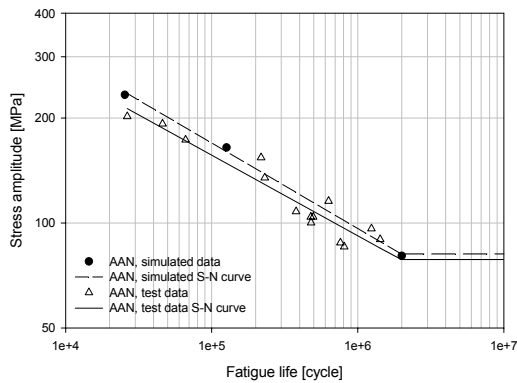


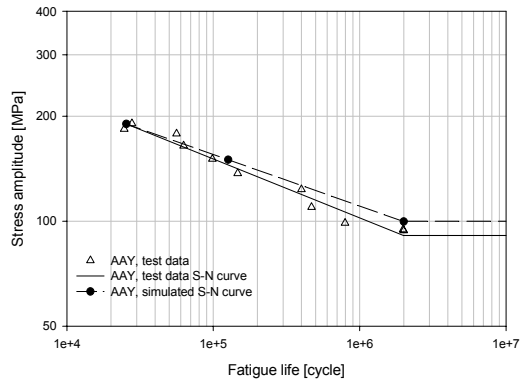
Fig. 8 Fatigue life evaluation for the CN specimens. Lawrence 1 and 2 are the predicted results for $\sigma_{res}=540$ MPa and $\sigma_{res} = \text{maximum MPa}$, respectively.

3.4 $\sigma - N$ 방법에 의한 피로수명 예측

Fig. 9 a), b)는 각각 후열처리를 하지 않은 맞대기 용접시편과 후열처리를 한 맞대기 용접시편에 대한 피로수명 예측 결과이고, Fig. 10은 TN 시편, Fig. 11은 NCN 시편, Fig. 12는 CN 시편에 대한 예측결과이다. 맞대기 용접시편에 대해서는 시험결과를 잘 모사하고 있고, TN 시편의 경우 피로노치계수 K_f 만을 고려한 경우가 가장 정확한 예측을 하고 제안 모델도 비교적 정확한 예측을 함을 알 수 있다. NCN과 CN 시편의 경우 약간 긴 수명을 예측하나 시험수명의 두 배 이내의 수명을 예측하고 있다.



a) AAN specimen



b) AAY specimen

Fig. 9 Fatigue life prediction for the AA specimens

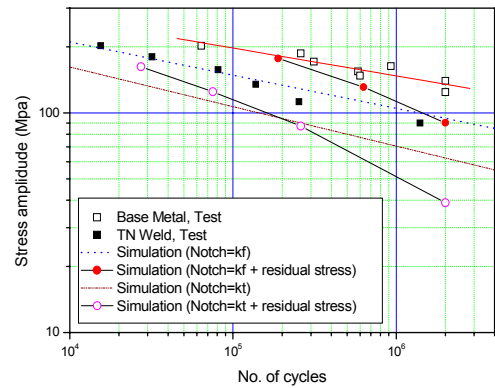


Fig. 10 Fatigue life prediction for the TN specimens

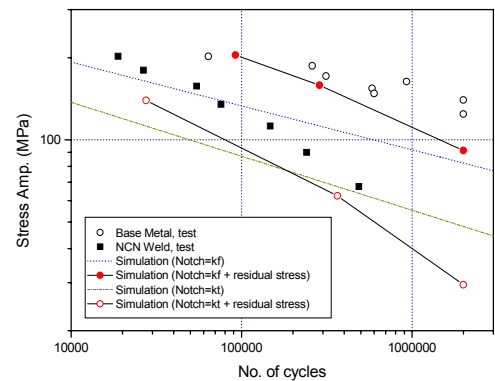


Fig. 11 Fatigue life prediction for the NCN specimens

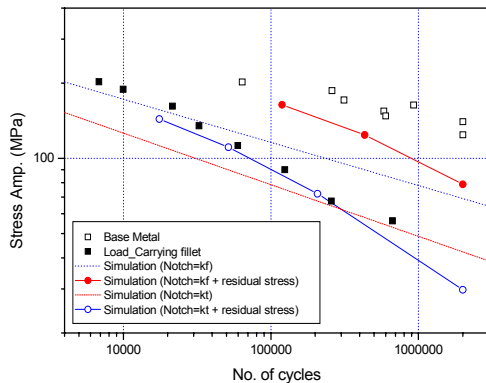


Fig. 12 Fatigue life prediction for the CN specimens

4. 검토 및 결론

피로수명과 깊은 관계가 있는 K_t 와 K_f 값에 있어 맞대기 용접의 경우는 노치반경이 크기 때문에 두개의 값의 차이가 거의 발생하지 않았지만 그 외에 다른 시험편의 경우에는 곡률반경이 작아져 K_t 와 K_f 가 크게 차이가 발생하였다. 수명 예측 결과 맞대기 용접의 경우 응력집중계수와 피로노치계수의 차이가 거의 발생하지 않아 어느 값을 이용하여도 유사한 결과를 얻을 수 있으나 응력집중계수가 가장 큰 값을 가지는 CN 용접의 경우에는 응력집중계수를 이용한 예측이 실제와 유사하게 예측되었다.

용접시험편의 경우 대부분의 균열이 열영향부에 발생하고 이 부위의 경도와 항복강도는 모재와 다르므로 정확한 피로수명의 예측을 위해서는 사용된 재료의 피로노치계수의 정확한 평가가 필요하다. 또한 용접부의 수명예측 시에는 용접시험편의 변형, 용접라인의 불일치 등이 고려되어야 더 정확한 수명예측이 될 것으로 판단된다.

전반적으로 Lawrence 모델과 S.W.T. 파라미터를 사용한 수명예측과 독자모델에 의한 수명예측은 시험수명의 2배수 이내의 수명을 예측하여 구조물의 수명 예측에 활용이 가능하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Takanashi, M. and Iida, K., 2001, "Relaxation of Welding Residual Stresses by Reversed and Repeated Loadings," *Japanese Welding Society*, Vol. 19, No. 1, pp. 129~139.
- (2) Han, S. H., Han, J. W. and Shin B. C., 1998, "Fatigue Strength Estimation and Fatigue Design of Welded Members under Hot-Spot Stress Concept," *KSME Trans. A*, Vol. 22, No. 11, pp. 2072~2083.
- (3) Han, S. H., Han, J. W., Shin, B. C. and J. H. Kim, 2003, "Fatigue Life Estimation of Welded Components Considering Welding Residual Stress Relaxation and Its Mean Stress Effect," *KSME Trans. A*, Vol. 27, No. 1, pp. 175~182.
- (4) Goo, B. C. and Yang, S. Y., 2004, "Fatigue Life Evaluation Model of Welded Joints With Residual Stress," *KSME Trans. A*, Vol. 28, No. 9, pp. 1328~1336.
- (5) Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. and Fuchs, H. O., 2001, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 196~205.
- (6) Lawrence, F. V., Burk, J. D. and Yung, J. Y., 1982, "Influence of Residual Stress on the Predicted Fatigue Life of Weldments," *ASTM STP 776*, pp. 33~43.
- (7) Han, J. W., Han, S. H., Shin, B. C. and Kim, J. H., 2003, "Fatigue Life Evaluation of Various Welding Details based on Notch Strain Approach," *Proceedings of the Seventeenth Conference on Mechanical Behaviors of Materials*, The Korean Institute of Metals and Materials, pp. 365~372.