

유한요소 해석에 의한 맞대기 용접 이음의 응력집중에 관한 연구

구 병 춘* · 최 병 일* · 김 재 훈*

*한국철도기술연구원 차량기계연구본부

Finite Element Analysis of the Stress Concentrations for Butt Welded Joints

Byeong-Choon Goo*, Byung-II Choi* and Jai-Hoon Kim*

*Rolling Stock Department, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-050, Korea

Abstract

The purpose of this study is to investigate the influence of weld bead profiles on stress concentration factors of double V groove butt-welded joints. The influence of three parameters such as toe radii, flank angles and bead heights on the stress concentration factors is studied by finite element analysis. It is shown that the three parameters have similar effects on the stress concentration factors. Finally a formula to estimate the stress concentration factors considering the three parameters and others is proposed and estimated results are compared with the results obtained by finite element analysis.

*Corresponding author : bcgoo@krri.re.kr

(Received March 12, 2004)

Key Words : Butt weld, Finite element analysis, Stress concentration factor

1. 서 론

용접은 각종 구조물의 결합을 위해 매우 유용한 수단이지만 설계나 건전성의 평가가 쉽지 않다는 단점이 있다. 그동안 주로 실험적인 방법을 통하여 용접 이음부의 강도평가나 피로수명 평가 등이 연구되어 왔다¹⁻⁷⁾. 이러한 평가를 위해 기본적으로 필요한 자료의 하나가 응력집중계수이다. 그런데 용접의 경우 비드 형상이 위치에 따라 달라 모든 경우에 대해 수치해석이나 실험을 통하여 응력집중계수를 구하는 것은 매우 번거로운 작업이고 실제 설계자에게는 큰 도움이 되지 않으므로 용접형상별로 신뢰할 수 있는 정확도로 응력집중계수를 구할 수 있는 예측식을 제시하면 산업현장에서 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 X형 맞대기 용접에 대해 접선 각 θ , 용접비드의 높이 h , 용접 지단부의 필렛 반경 r 을 단계적으로 변화시켜 응력집중계수를 계산하고 그 경향을 분석하여 각 요소들이 용접부의 응력에 미치는 영향을 정량화하고, 응력집중계수를

예측할 수 있는 간편한 식을 제안하였다.

2. 유한요소 모델링

해석 대상은 Fig. 1과 같이 $100 \times 300 \times 10$ t인 두 개의 판을 X형 맞대기 용접한 후 폭이 25 mm가 되게 기계가공을 하여 제작하였다. AWS ER 70S-G 1.2 ϕ 용접봉을 사용하여 CO₂ GMAW 용접기에서 반자동 용접을 하였다. 제작된 40개의 시편에 대해 형상측정기를



Fig. 1 Welding of two plates

이용하여 용접 비드의 접선 각, 높이, 용접 지단부 반경, 용접 비드의 폭을 측정하여 이들 값의 분포 범위를 구한 후⁸⁾ 이 범위 내에서 이들 값을 변화시켜 가면서 응력집중계수를 구하였다.

해석 모델은 시편의 끝단에서 인장하중이 작용하는 경우이다. 대칭성을 고려하여 Fig. 2와 같이 길이 200 mm, 높이 10 mm, 폭 25 mm인 시편의 1/4을 해석 대상으로 취하였다. Fig. 3은 유한요소 해석을 위한 요소분할을 보여 준다.

해석에 사용된 요소는 기본적으로 4개의 노드를 갖는 2차원 사각형 평면변형률 요소이다. 시편의 형상을 고려하여 응력집중부에는 세밀하게 분할하여 요소를 증가시켜 가면서 응력의 수렴을 확인한 후 이 때의 요소 크기를 사용하여 응력집중계수를 구하였다. 용접 비드의 형상에 따라 다르나 요소의 개수는 1760개, Node 수는 1870개 정도이다. 경계조건으로는 1/4 요소 모델이므로 중앙 절단부에 x축 방향으로 대칭조건, 아랫면에는 y축 방향으로 대칭 경계조건을 설정하였다. 작용 하중은 오른쪽 끝단에 일정한 응력을 가하였다. 탄성계수 $E=206,010 \text{ N/mm}^2$, 그리고 푸아송 비 $\nu=0.3$ 을 사용하였다. 해석 코드는 ABAQUS를 사용하였다.

3. 해석 결과

r 은 용접 지단부의 반지름이고, θ 는 접선각, h 는 비드의 높이이다. 해석에 사용된 r , θ , h 의 값은 실제 용접 비드에서 측정된 값의 범위에서 선정하였다. r 값은 0.25, 1.0, 1.75, 2.5, 3.25 mm의 다섯 가지로

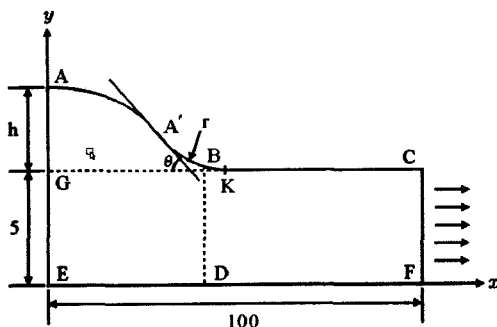


Fig. 2 Weld bead profile

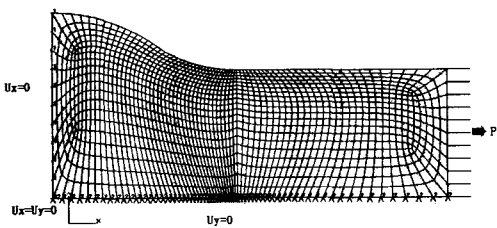


Fig. 3 FE model

나누었고 θ 는 25° , 40° , 55° 의 세 가지 그리고, 비드의 높이 h 는 1.5, 2.25, 3.0 mm의 세 가지로 하여 총 54개의 형상을 모델링하여 출력된 값에서 von-Mises 등가응력, σ_{xx} 그리고 주응력을 구하여 응력집중계수 K_t 를 산출하였다. Fig. 4에 보여 주는 바와 같이 용접 비드의 형상은 실제 형상측정기로 측정한⁸⁾ 모양과 유사하게 모델링 하였다.

Fig. 5 (a), (b)는 시험편에서 일반적으로 확인할

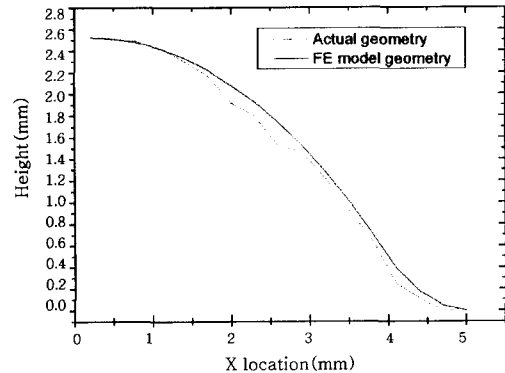
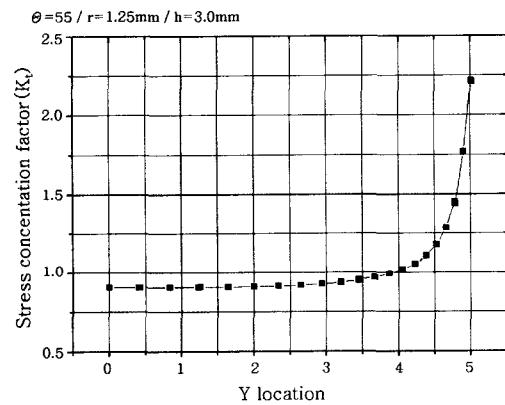
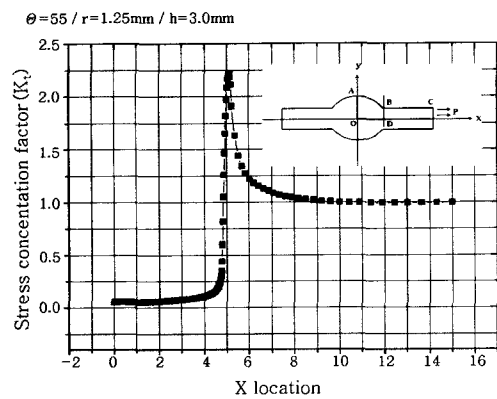


Fig. 4 Measured and modeled geometries



(a) K_t along the line ABC



(b) K_t along the line DB

Fig. 5 Stress concentration factors

수 있는 응력집중계수의 분포도로서 (a)는 위 표면의 라인 ABC를 따라 그린 응력집중계수이고, (b)는 시편의 두께 방향으로의 응력집중계수의 분포도이다. 최대 응력은 Fig. 1의 B 점 부근이다. 용접 지단부인 B점을 기준으로 오른쪽 1 mm 범위의 좁은 영역에서 응력이 집중적으로 증가함을 알 수 있다. B에서 A로 가면서 응력은 급격히 줄어들고 A 부근에서는 거의 응력이 작용하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6, 7, 8은 각각 비드의 높이가 1.5, 2.25,

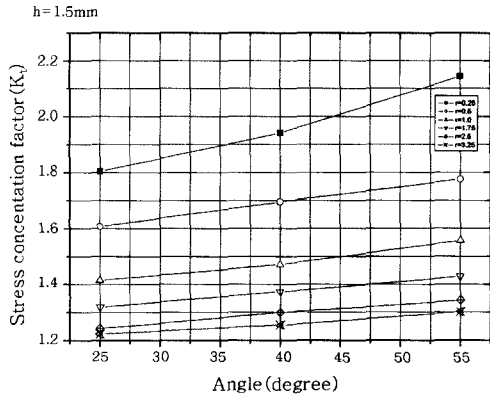


Fig. 6 Stress concentration factors vs. angle variation (h=1.5 mm)

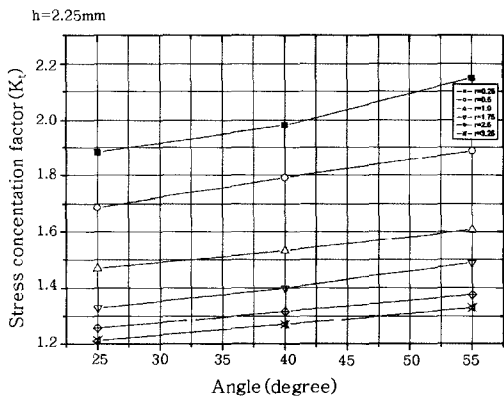


Fig. 7 Stress concentration factor vs. angle variation (h=2.25 mm)

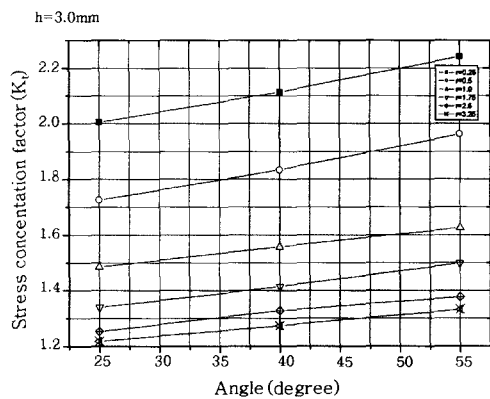


Fig. 8 Stress concentration factor vs. angle variation (h=3.0 mm)

3.0일 때 용접부의 접선 각과 필렛 반경이 변화할 때 응력집중계수의 추이를 보여준다. K_t 는 von Mises의 응력을 기준으로 계산하였다. h 가 증가 할수록 K_t 는 증가하고, r 이 작을수록 K_t 는 각도 θ 의 변화에 더 민감함을 알 수 있다.

Fig. 9, 10, 11은 von-Mises 응력분포를 기준으로 $\theta=25^\circ, 40^\circ, 55^\circ$ 로 일정하게 두고 h 와 r 의 변화에 대한 K_t 의 변화를 그린 것이다. r 이 작거나($r=0$) r 이

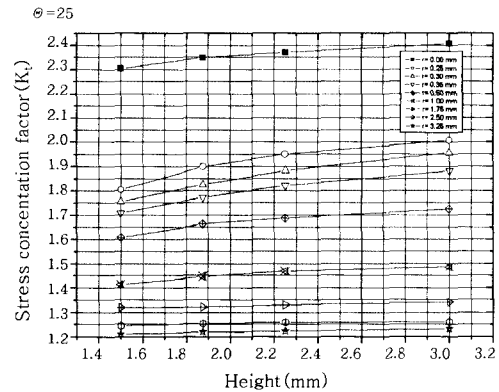


Fig. 9 Stress concentration factor vs. height variation ($\theta=25^\circ$)

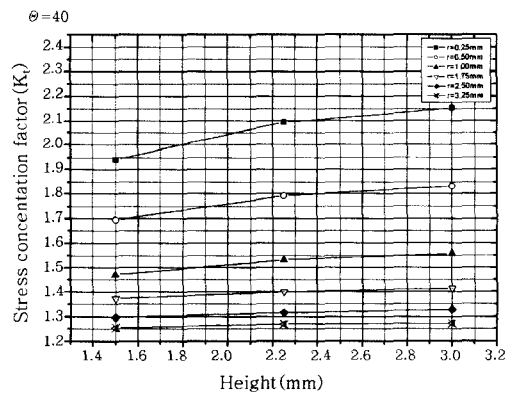


Fig. 10 Stress concentration factor vs. height variation ($\theta=40^\circ$)

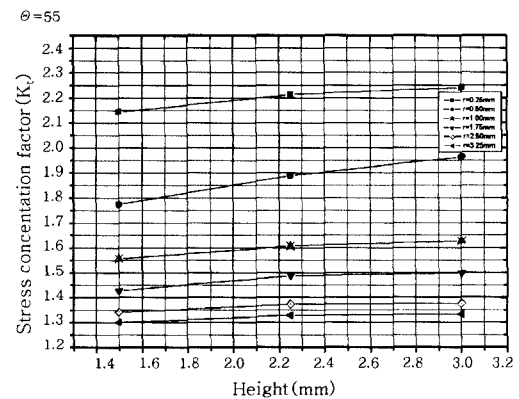


Fig. 11 Stress concentration factor vs. height variation ($\theta=55^\circ$)

큰($r=3.25$) 경우보다 $r=0.25\sim 0.5$ 인 경우 K_t 는 높
이 h 에 더 민감하게 변화함을 알 수 있다.

Fig. 12에서 보면 h 의 변화에 대한 K_t 의 변화는 r
이 작은 경우가 더 크고 $r=1.5$ 이상에서는 거의 변화
가 없음을 알 수 있다.

Fig. 13, 14, 15에서는 $\theta=25^\circ, 40^\circ, 55^\circ, h=3$
일 때 r 의 변화에 대해 von-Mises, S_{11} , 주응력을 사

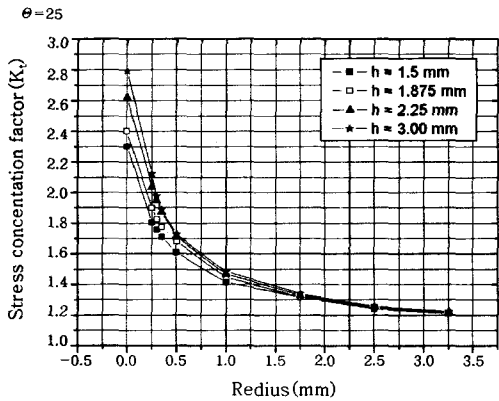


Fig. 12 Stress concentration factor vs. radius variation ($\theta=25^\circ$)

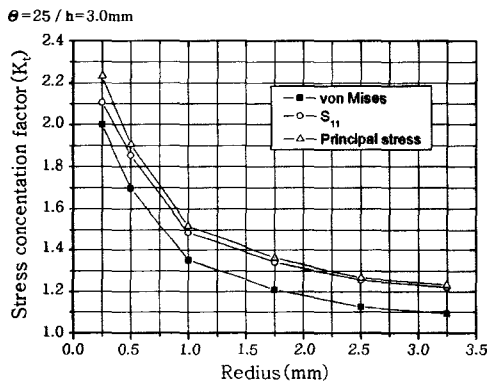


Fig. 13 Stress concentration factor vs. radius variation ($\theta=25^\circ, h=3.0$)

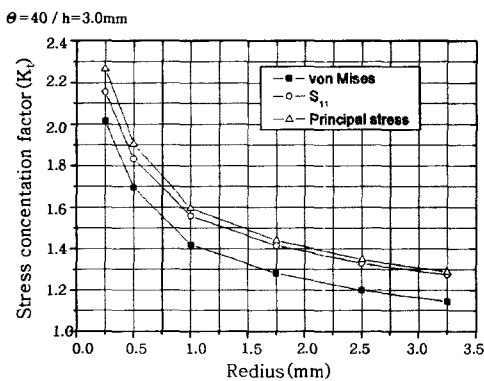


Fig. 14 Stress concentration factor vs. radius variation ($\theta=40^\circ, h=3.0$)

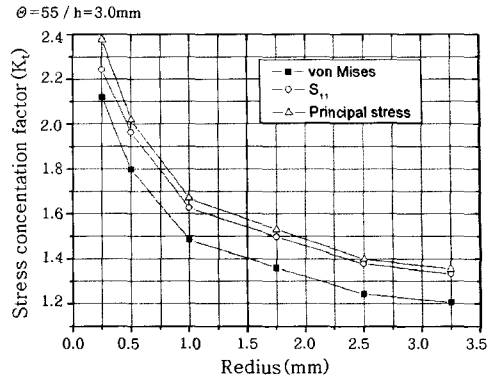


Fig. 15 Stress concentration factor vs. radius

용하여 K_t 를 비교하였다. 주응력을 사용한 경우 K_t 가
가장 크고 von-Mises의 경우 K_t 가 가장 작다.

아래 Table 1은 비드의 높이(h), 필렛 반경(r), 접
선각(θ)의 세 가지 파라미터의 변화에 대한 응력집중계
수를 간략히 정리한 표로서 형상의 변화에 대한 응력집
중계수의 변화 경향을 보여주고 있다. 비드의 높이가
높을수록 접선 각이 클수록 필렛 반경이 작을수록 응력
집중이 커지는 경향을 확인할 수 있었다. 접선 각도가
15°씩 증가하면 응력집중계수는 약 1.1배씩 증가하였
고, 비드의 높이 0.75mm 증가 시 약 1.15배, 그리고
반지름 0.75mm 감소 시 약 1.03배의 증가율을 보이
고 있다.

토우부의 응력집중계수에 영향을 미치는 변수는 비드
의 각도 θ , 용접 지단부의 곡선부가 끝나는 점 사이의
길이 W , 토우부의 반경 r , 두께 t 및 높이 h 이다. 이
들 변수를 이용하여 응력집중계수 K_t 를 Yoshida 등⁷⁾
의 결과를 참고하여 아래와 같이 간편한 식으로 표현할
수 있다.

$$K_t = 1 + \left(\frac{1 - \exp(-0.90 \sqrt{A_2} \theta)}{1 - \exp(-0.45 \pi \sqrt{A_2})} \right) (\alpha_1 - 1) \quad (1)$$

Table 1 Stress concentration factors (S_{11})

h (mm)	θ (deg)	r (mm)					
		0.25	0.5	1.0	1.75	2.5	3.25
1.5	25	1.804	1.607	1.414	1.319	1.243	1.222
	40	1.941	1.695	1.470	1.373	1.299	1.255
	55	2.114	1.775	1.556	1.428	1.343	1.301
2.25	25	1.884	1.687	1.468	1.329	1.257	1.212
	40	1.981	1.792	1.532	1.400	1.316	1.270
	55	2.149	1.889	1.607	1.488	1.375	1.329
3.0	25	2.006	1.725	1.485	1.340	1.253	1.218
	40	2.154	1.833	1.558	1.414	1.329	1.273
	55	2.241	1.936	1.627	1.498	1.377	1.333

여기서,

$$a_1 = 1 + c [1 / (2.8 \Delta_1 - 2) \cdot h / r]^\beta$$

$$\beta = 0.65 - 0.3 \exp(-0.63 W / t)$$

$$c = 1 - 0.40 \exp(-0.74 W / t)$$

$$\Delta_1 = (2h + t) / t, \quad \Delta_2 = \Delta_1 / 2$$

Fig. 16은 Eq. (1)에 의해 주어진 K_t 와 S11을 기준응력으로 하여 유한요소해석을 통해 얻은 K_t 를 비교한 것이다. Eq. (1)은 유한요소 결과를 비교적 잘 예측하므로 맞대기 용접의 경우 유한요소 해석을 하지 않고 식 (1)을 이용하여 간단히 응력집중계수를 구해 구조 강도 예측, 피로수명 평가 등에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 17은 Eq. (1)에서 c 의 값으로 $c = 1 - 0.80 \exp(-0.74 W / t)$ 를 사용하여 구한 K_t 와 von Mises 응력을 기준응력으로 하여 유한요소해석을 통해 얻은 K_t 를 비교한 것이다. S11의 경우와 마찬가지로 유사한 정확도로 해석결과를 예측한다.

Fig. 18은 Yoshida 등이⁷⁾ 여러 문헌의 시험 데이터로부터 구한 S_{11} 을 기준으로 한 맞대기 용접부의 응

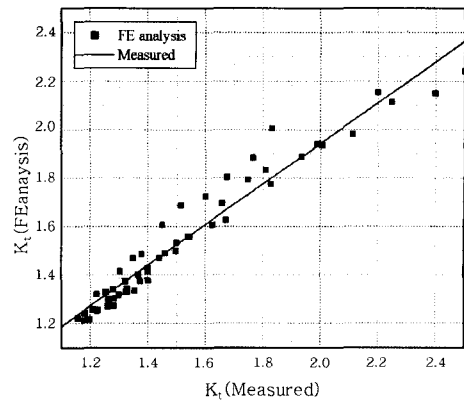


Fig. 18 FE analysis and experiments⁷⁾ (S_{11})

력집중계수 추정식과 본 연구에서 유한요소해석을 통해 구한 응력집중계수를 비교한 것이다. 용접 방법에 따라 용접 비드의 형상이 약간씩 다른 것을 고려할 때 두 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

유한요소 해석을 통하여 X형 맞대기 용접의 응력집중계수에 대해 체계적으로 연구한 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 일반적인 예상과는 달리 비드의 높이 h 도 응력집중계수에 무시할 수 없는 영향을 미친다. h 는 r 이 1.5보다 큰 영역에서는 그 영향이 미미하였다.
- 2) 응력집중계수는 r 의 변화에 상대적으로 더 민감하게 변화한다.
- 3) 응력집중계수를 주응력, S_{11} , von Mises 응력을 기준으로 계산할 때 주응력으로 구한 값이 제일 크고 von Mises 응력으로 구한 값이 제일 작다.
- 4) X형 맞대기 용접의 경우 응력집중계수에 관한 예측식을 Eq. (1)의 형태로 표현할 때 예측값은 유한요소 해석을 통해 얻은 값 및 시험값과 유사한 결과를 준다. 응력분포를 고려할 때 이 식은 V형 맞대기 용접에도 적용이 가능하다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. R. P. Newman and T. R. Gurney : Fatigue Tests of

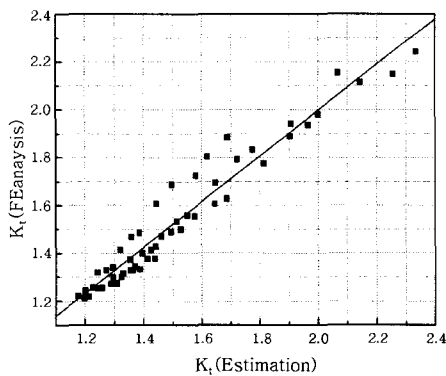


Fig. 16 K_t by Eq. (1) and FE analysis (S_{11})

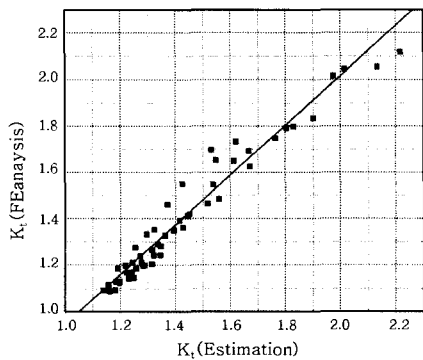


Fig. 17 K_t by Eq. (1) and FE analysis (von Mises)

- Plain Plate Specimens and Transverse Butt Welds in Mild Steel, *British Welding Journal*, (1959), 569-594
2. N. Kenyon, W. B. Morrison and A. G. Quarrell : Fatigue Strength of Welded Joints in Structural Steels, *British Welding Journal*, (1966), 123-137
 3. T. Kawasaki, Y. Sawaki and K. Yagi : Effect of Micro-Structure and External Geometry on Fatigue Strength of Welded High Tensile Steel, *Journal of Japan Welding Society*, **37-12**, (1968), 65-78 (in Japanese)
 4. K. Takahashi and A. Ito : Effect of External Geometry of Reinforcement on the Fatigue Strength of a Welded Joint, *Journal of Japan Welding Society*, **40-8**, (1971), 13-25 (in Japanese)
 5. I. Masumoto, T. Shinoda and K. Suzuki : Fatigue Strength of Welded Joints by CO₂ Welding, *Journal of Japan Welding Society*, **45-10**, (1976), 62-69 (in Japanese)
 6. F. V. Lawrence, Jr., R. J. Mattos, Y. Higashida and J. D. Burk : Estimating the Fatigue Crack Initiation Life of Welds, *Fatigue Testing of Weldments*, ASTM STP 648 (1978), 134-158
 7. S. Yoshida, M. Inagaki, M. Kanao, E. Sasaki, M. Nihei and M. Kamakura : Effect of Size and Frequency on Fatigue Properties of SM 50 B Butt Welded Joint, *Journal of Japan Welding Society*, **47-9**, (1978), 627-632 (in Japanese)
 8. J. H. Kim, B. C. Goo, and J. W. Seo : Statistical Study on the Effect of Butt Weld Bead Profiles on Fatigue Behavior, *Proceeding of 2003 Spring Annual Meeting of KWS*, Pusan (2003), 272-277 (in Korean)