맞대기 이음 용접의 피로수명에 베벨 각도가 미치는 역할

박 지 환 · 한 창 완 · 정 승 빈 · 박 성 훈*

부산대학교 기계공학부

Role of Bevel Angles Influenced on the Fatigue Life of Butt-welded Joints

Jihwan Park · Changwan Han · Seungbin Jung · Seonghun Park*

Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
(Received 19 August 2013 / Revised 27 November 2013 / Accepted 28 November 2013)

Abstract : This study aims to investigate the influence of bevel angles on the fatigue life of V-groove butt-welded joints with back-plates made by SM490A steel material, generally used for excavators, because changes in the geometry, material and surface properties of welded regions affect the fatigue life of welded structures. Butt type test specimens were prepared by the CO₂ welding of rolled steel plates (SM50A steel) with a thickness of 13.5 mm at a welding speed of 30 cm/min and these Butt type test specimens had two different groove angles, which are 40° (A type) and 30° (B type). In order to investigate differences in fatigue life between two types, 4-point bending fatigue tests were conducted with a stress ratio of R=0.1 under the cyclic loading environment at a frequency of 5 Hz at room temperature. The fatigue life of A type specimens was approximately 7% higher than that of B type specimens. The stress concentration factors calculated by finite element analysis were 2.16 for A type and 2.25 for B type, whose difference was caused by the influence of the back-plates of butt-welded structures. The current results could provide important guidelines to determine the V-groove angle of butt-welded joints with a satisfactory fatigue life, although under severe operating conditions.

Key words : Welding structure(용접 구조물), Bevel angle(베벨 각도), Fatigue life(피로 수명), Stress concentration(응력 집중), Finite element analysis(유한요소해석), Residual stress(잔류 응력)

Nomenclature

$\sigma_{\max}$	: maximum stress
$\sigma_{\min}$	: minimum stress
El	: total elongation
R	: stress ratio ($\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$)
S	: nominal stress
S_y	: yield strength
S_u	: tensile strength
K_t	: stress concentration factor

1. 서 론

용접 접합기술이 지향하는 목표로는 용접결함을 최소화하여 용접구조물의 신뢰성 향상, 비용과 인력을 절감하여 단기간 내에 목표로 하는 구조물을 완성하는 생산성 향상, 그리고 용접 변형을 최소화하여 정밀하고 정확한 구조물을 제작하기 위한 정밀성 향상 등이 있다. 따라서, 대형구조물의 외판과 같은 후판 용접 시, 깊은 용입을 가능하게 하고 용락을 방지하는 백플레이트를 채용한 맞대기 용접을 하는 경우가 많아지고 있는 추세이다.^{1,2)} 이와 같은 이점을 토대로 백플레이트를 채용한 맞대기 용접은 현재 건설기계 장비인 굴삭기 중 상/하부프레임 구

*Corresponding author, E-mail: paks@pusan.ac.kr

조물 제작 시 사용되고 있으며, 선박의 외판 제작 시에도 적용되고 있다.

그러나 이러한 용접 작업은 필수적으로 용접 결합(기공, 혼입, 주조 결합 등)과 용접 시 발생하는 열에 의한 열영향부(HAZ)를 내포하고 있고,^{3,4)} 같은 종류의 용접 방법을 사용하였다 하더라도, 용접 전 모재의 가공 형태에 따라 다른 크기의 용입 깊이와 열영향부가 생성되고, 구조물에 서로 다른 응력집중현상을 보일 수 있으므로 강도 면에서 큰 차이를 보일 수 있다.^{5,6)} 이러한 용접 결합과 열영향부는 금속의 조직 또는 물성을 변화시켜서 피로수명에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 실제 제품에 적용되기 전에 피로수명 평가가 필히 요구된다.^{7,8)}

현재 V형 금속 맞대기 이음 용접에서 판의 두께에 따른 비드의 수, 용접봉의 지름, 아크 전류/전압, 용접 속도는 제안이 되어 있는 실정이다. 그러나, 백플레이트를 채용한 V형 금속 맞대기 이음용접에서는 표준 시공 조건이 하나의 평균값으로써 최소 개선 각도 45°, 모재 간 최소 간격 6mm로만 정의되어 있으며, 개선 각도에 따른 물성의 차이에 대해서는 아직 조사되어 있지 않은 실정이다.⁹⁻¹¹⁾ 따라서, 본 연구에서는 건설 기계의 외장 프레임에 사용되는 버트(butt) 용접의 그루브(groove) 형태에 따른 용접부의 피로 수명효과를 알아보기 위하여, 아크용접으로 제작된 버트 용접 시험편이 30° (B type)와 40° (A type)의 서로 다른 개선 각도를 가질 때, 서로 다른 개선 각도가 시험편의 피로 수명에 미치는 영향에 대하여 파악하고자 한다. 이를 통하여 용접부의 수명에 조금 더 효과적인 베벨 각도를 파악하고, 이를 제품 생산에 적용시킬 수 있는 기초자료로써 활용하고자 한다.

2. 실험 방법 및 결과

2.1 시험편 제작

본 연구에 사용된 시험편은 실제 굴삭기에 적용되고 있는 판 두께 13.5mm의 용접구조용 강판(SM490A)을 가공/용접하여 제작하였다. SM490A는 용접구조용 압연강재로써, 0.20 [wt. %] 이하의 탄소량을 함유하고 있어서 용접이 용이하다.

따라서, SM490A는 강재를 용접으로 연결할 때

Table 1 Chemical compositions of SM490A

C	Si	Mn	P	S
0.14	0.41	1.32	0.16	0.05

Table 2 Mechanical properties of SM490A

Metal	S _y [MPa]	S _u [MPa]	Elongation[%]
Base	370	520	29
As welded	510	540	16
PWHT	340	490	32

주로 사용된다. 재료의 화학적 성분은 Table 1, 상온에서의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.¹²⁾

용접시험편을 얻기 위하여 강판을 40mm×300mm의 크기로 절단한 후, 강판의 중앙에 각각 30°, 40°로 V-groove를 기계 가공하였고, ISO 5817의 맞대기 이음 용접의 규정 중 엄격한 기준에 따라 용접 백플레이트를 사용하여 용접을 수행하였다.^{13,14)}

Fig. 1, 2에 가공한 시험편의 치수 및 스트레인게이지 부착위치를 나타냈으며, 시험편의 용접조건은 Table 3과 같다.

제작된 시험편의 개수는 각도별로 각 19개이며, 그 중 실험 장비의 셋팅 및 실험 하중 구간을 정하기 위한 예비 실험에 사용된 것을 제외하고 15개의 시험편을 실험에 사용하였다. 또한, 육안으로 관찰하

Fig. 1 Dimensions of butt type specimens

Fig. 2 Butt type specimens and strain gauge attachment

Table 3 Welding conditions of the butt welding

Current	430 A
Voltage	37 V
Speed	30 cm/min
Wire size	1.2mm
Pass welding	3 Pass
Direction of welding	Backhand
Welding materials	AWS A5.18 ASME SFA-5.18 ER70S-G
Method	Mix gas welding Ar:CO ₂ (8:2)

여 용접상태가 양호한 것들 중 하나를 선택하여 스트레인게이지 실험에 사용하였다.

2.2 실험 장비 및 방법

피로시험은 최대 하중용량이 10 ton인 폐쇄 유압 회로 방식의 MTS (Material Test System, Model 809)를 사용하여 수행하였다. 실험 장비에 사용된 4점 굽힘 피로시험용 지그는 자체 제작하였으며, 실험 장비와 지그의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 피로 시험은 시험편에서 완전 파단이 발생할 때까지 수행하였고, 2.0×10^6 cycle을 재료의 피로한도로 정의하여 그 이상의 수명은 런아웃(run-out)으로 판단하였다.

또한, 선행 조사 결과 실제 굴삭기 사용 중 상하부 프레임에 가장 큰 영향을 주는 하중의 형태는 굽힘력이었고, 그에 따라, 이를 실험에 반영하기 위하여

Fig. 3 MTS testing machine

4점 굽힘 피로실험을 실시하였다. 시험편에 가해지는 응력은 시험편을 단순 판재형상으로 가정하여 계산하였고, 실험은 5 Hz, 응력비(Stress Ratio)는 0.1인 sine 함수 형태의 하중을 가하였으며, 하중제어방식으로 진행하였다.

2.3 실험 결과

맞대기 이음 용접에서 개선 각도가 40° (A type)와 30° (B type)로 서로 다른 경우에 대한 피로시험 수행 후에, 각각 15개의 유효 데이터를 얻었다. 이에 대한 피로수명선도(S-N curve)를 Fig. 4에 나타내었으며, Fig. 5에 피로실험 후의 시험편 파단 모습을 나타내었다. 피로수명선도는 semi-log scale로 나타내었고, 가해진 응력은 sinusoidal 프로파일의 최대값으로 정의하였다. 피로한도는 A type에서 287 MPa, B type에서 268 MPa로 나타났다.

용접부에서의 기공, 혼입물, 미세 크랙 등과 같은 용접 불량량의 존재를 파악하기 위하여, 금속현미경을 이용하여 용접부 단면 사진을 검사하였다. 두 시험편 모두 이러한 용접 불량은 발견되지 않았고, 버트 용접에 따른 수지 구조를 확인할 수 있었다(Fig. 6, 7).

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석 방법

본 연구에 사용한 맞대기 이음 용접 시험편은 백플레이트를 채용하여 제작하였으며, 용접 토우부에서도 일정 크기의 곡률반경이 존재한다. 따라서, 기존의 연구들에서 적용한 것과 동일하게 용접시험편

Fig. 4 Comparison of fatigue test results between A type and B type

Fig. 5 Fatigue crack in the specimen

Fig. 6 Fractography observed on the cross section of welding area for the A type specimen

을 단순한 판재형상으로 가정하여 시험편에 부과되는 응력을 계산한다면, 이러한 형상들에 의한 응력 집중현상을 무시하게 되므로 정확한 응력-수명 관계를 예측할 수 없는 결과를 초래할 수 있다.

Fig. 7 Fractography observed on the cross section of welding area for the B type specimen

이에 본 연구에서는 더욱 정확한 피로 강도 예측과 A, B type의 피로한도가 차이가 나는 원인을 보다 정확히 규명하기 위하여 유한요소해석(ANSYS13)을 통하여 응력 분포를 조사하였다. 유한요소해석 수행을 위하여, 먼저 인벤터(Inventor2011)를 사용하여 시험편을 3D 모델링하였고, 연강으로 용접된 부위의 비드형상을 ISO 규정에 맞도록 구현하였다(Fig. 8(a)). 용접 토우부와 백플레이트부에서 발생하는 응력집중현상을 보다 정확히 표현하기 위하여, 용접 토우부와 백플레이트부를 모재와 분리하여 구성하였다. 또, 실제 실험에서 가해진 하중조건을 해석에서 부과하기 위하여, 실험 장비의 액추에이터에 부착된 지그가 시험편에 하중을 가할 때, 고정된 지그에서 반력이 나타나도록 하중조건을 설정하였다(Fig. 8(b)). 용접부와 모재, 용접부와 백플레이트 사이에는 서로 고정되어 있는 경계조건(bonded condition)을 주었고, 백플레이트와 모재 사이에는 마찰이 없는 경계조건(frictionless condition)을 주었다. Fig. 8(b)는 위에서 설명한 하중 및 경계조건을 보여주고, 점선으로 표기된 부분은 대칭 경계조건을 나타낸다. 대칭 경계조건을 이용하여서 1/4모델로 해석영역을 축소하였고, 이는 해석자원이 절약되어서 보다 효과적인 유한요소해석 수행을 가능하게 한다. 유한요소모델을 구축하기 위하여 Fig. 8(a)에서

(a) 3-Dimensional (3D) model

(b) Boundary conditions

(c) Finite element (FE) model

Fig. 8 3D and FE models and boundary conditions

Table 4 Comparison of FEA results

Name	Value
Density	7,850 kg/m ³
Poisson's ratio	0.3
Young's modulus	200 GPa
Yield strength	370 MPa
Tensile strength	540 MPa

나타낸 시험편의 3D 모델로부터 6면체요소를 사용하여 메쉬를 생성하였으며, 그 결과 전체 생성된 절점(node)과 요소(element)의 수는 각각 약 17만개와 4만개이다(Fig. 8(c)). 유한요소해석에 사용된 재료의 물성은 Table 4에 나타내었다.

3.2 유한요소해석 결과

유한요소해석 결과, 14 kN의 하중에서 시험편에

Fig. 9 Stress of A and B type specimens without a back-plate and a toe region (14kN load)

Fig. 10 Stress of A and B type specimens without a back-plate and a toe region (14kN load)

Table 5 Comparison of FEA results

Type	A			B		
Load [kN]	14	17	20	14	17	20
σ [MPa]	289	351	414	289	352	414
σ_{max} [MPa]	620	753	886	651	790	930
K_t	2.14			2.25		

strain gauge를 부착한 곳의 응력(σ)은 Fig. 9와 같이 A, B type 둘 다 약 289 MPa로 유사하게 나타났다. 이는 시험편을 단순 판재형상으로 가정하여 부과되는 응력을 계산했을 때의 값인 288 MPa과 거의 동일하며, 또한 스트레인게이지실험에서 획득한 값인 291 MPa과도 거의 일치함을 알 수 있다(Table 5).

하지만 용접 토우부와 백플레이트의 형상에 초점을 맞춰 구조 해석을 수행한 결과, 14 kN의 하중 하에서 구조물에 발생한 최대응력(σ_{max}) 값은 Fig. 10과 같이 A type에서는 620 MPa, B type에서는 651 MPa 나타났다. 이는 해석 결과 중, 스트레인게이지가 부착된 위치에서 계산된 응력 값의 2.14배, 2.25배이며, 이는 응력집중계수(Stress Concentration Factor) K_t 가 A type은 2.14, B type은 2.25라는 것과 동일하다. 또한, 20 kN, 17 kN의 하중에 대하여도 해석을 수행하였는데, 그 결과 3개의 하중 하에서 응력집중계수의 평균값이 A type에서는 2.14, B type에서는 2.25

로 나타났다(Table 5).

14 kN의 하중에서 구조물의 형상에 따른 응력집중현상으로 인해 발생한 응력 중 가장 큰 응력은 백플레이트와 용접 토우부 사이에서 발생하였으며, 용접부의 개선 각도가 40°에서 30°로 감소함에 따라 31 MPa 정도 증가하였다.

또한, Table 4에서와 같이 개선 각도에 감소할 때, 구조물에서 부과되는 최대응력(σ_{max})은 증가하는 경향을 보였다. 하지만, 더 정확하게 응력 집중현상에 대해 파악하기 위해서는 해석 결과 에서 나타난 응력집중이 가장 크게 일어나는 부에 스트레인게이지를 부착하여 실험을 진행한 후, 실험에서 얻은 응력 값과 해석을 통해 얻은 응력 값을 비교해볼 필요가 있다.

4. 결 론

- 1) A type 시험편의 피로한도가 287 MPa로 B type 시험편의 피로한도인 268 MPa보다 약 7% 높게 측정되었다. 이는 두 시험편이 서로 다른 베벨각으로 용접되었기 때문에, 용접부와 백플레이트 부 사이에서 응력집중의 크기가 달라질 수 있고, FEM 해석 결과 또한 B type 시험편에서 발생하는 최대 응력 값이 A type 시험편보다 약 5% 높은 결과를 보였다. 또한, 개선 각도가 다르면 초층의 텐드라이트의 성장 방향이 변하게 되는데, 이런 용착부에서의 결정 성장방향이 피로 측면에서의 크랙의 생성 및 진행 방향에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 파악하기 위해, 금속 현미경으로 용접부의 단면을 조사하였으나, 해상도의 한계로 인하여 용접 불량량의 유무만 파악할 수 있었다.
- 2) 두 S-N선도에서 결정계수(R^2)의 값이 A type에서는 0.9565로 B type에서는 0.9891로 측정되었다. 이는 B type의 스캐터링(scattering)이 더 작게 나타난 것을 의미한다. 용접부의 단면을 관측한 결과 A, B type 시험편 모두 기공, 혼입물, 미세 크랙 등과 같은 용접 불량량을 가지고 있지 않았다. 따라서, 이와 같은 스캐터링 현상의 감소는 용접의 개선 각도가 40°에서 30°로 감소함으로써 인하여 모재와 용접봉이 접하는 면적, 즉 용착부의 단면적이 감소하여 각변형의 정도가 줄어들어 더

작은 잔류 응력을 가진 균일한 형상의 시험편이 제작되었기 때문에 발생한 현상으로 판단된다.

본 연구결과는 버트 용접 시에 피로수명을 충족할 수 있는 V-groove 개선 각도를 선정하기 위한 기초자료로서 활용될 수 있으며, 용접 구조물의 신뢰성 확보로 인하여 V-groove의 개선 각도를 감소시킬 수 있게 됨에 따라 용접 자재 소모의 감소, 작업속도 개선 등에 따른 약 6%의 용접 구조물 생산성 향상 효과도 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) Y. S. Kim, "The Present and Future of the Welding and Joining Technology," KWJS Annual Conference Proceedings, pp.1-6, 2010.
- 2) H. D. Do, S. W. Kang, J. H. Han, S. M. Kim and M. H. Kim, "Fatigue Assessment in accordance with Back Plate of Butt Welded Specimens," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.46, No.1, pp.24-30, 2009.
- 3) R. I. Stephens, A. Fatemi and R. R. Stephens, Metal Fatigue in Engineering, 2nd Edn., Wiley, New York, 2001.
- 4) Y. T. Yoo, Y. S. Oh, K. B. Ro, H. J. Shin and K. Im, "Decrease of Porosity and Cracking in the cw Nd:YAG Laser Welding of SM45C," Journal of the KSPE, Vol.20, No.10, pp.65-73, 2013.
- 5) C. Y. Won and G. S. Kim, "Welding Processes and Principle," Journal of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.4, No.2, pp.14-19, 1999.
- 6) I. Masumoto, T. Shinoda and K. Suzuki, "Fatigue Strength of Welded Joints by CO₂ Welding," Journal of Japan Welding Society, Vol.45, No.10, pp.62-69, 1976.
- 7) J. H. Song and H. Lee, "The Effect of Ultrasonic Impact Treatment (UIT) for Fatigue Life of Weldment," Transactions of KSAE, Vol.18,

- No.6, pp.38-45, 2010.
- 8) W. Perret, R. Thater, U. Alber, C. Schwenk and M. Rethmeier, "Approach to Assess a Fast Welding Simulation in an Industrial Environment-application for an Automotive Welded Part," Int. J. Automotive Technology, Vol.12, No.6, pp.895-901, 2011.
- 9) J. Y. Choi, Microstructure of Weld and Fatigue Strength, Gold, Seoul, pp.1-50, 2005.
- 10) R. Chae and G. Chae, Weld Engineering, Donghak, Seoul, pp.69-79, 2006.
- 11) H. Oh, Y. Cha, S. Seo and D. Kim, Welding Inspection(AWS D1.1), Wonchang, Incheon, Korea, pp.67-79, 1997.
- 12) Y. S. Choy, Y. J. Kim and H. S. Woo, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Behaviour in Butt Weldment (I)(Experimental Study)," Journal of the Korean Welding Society, Vol.6, No.4, pp.27-34, 1988.
- 13) International Standard, ISO 5817, 2nd Edn., USA, 2003.
- 14) C. Han, J. Lee, J. H Song, H. Lee and S. Park, "Role of Post Weld Treatment Methods in the Improvement of Fatigue Life for T-type Welded Structures Made by SM 50A Steel," Journal of the KSPE, Vol.29, No.3, pp.307-312, 2012.