

SM 50A 강으로 제작된 T-형 용접형상의 용접후처리 방법이 피로수명 증가에 작용하는 역할

Role of Post Weld Treatment Methods in the Improvement of Fatigue Life for T-type Welded Structures Made by SM 50A Steel

한창완¹, 이재훈¹, 송준혁¹, 이현우¹, 박성훈^{1,✉}
Changwan Han¹, Jae-Hoon Lee¹, Junhyouk Song¹, Hyunwoo Lee¹ and Seonghun Park^{1,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)
✉ Corresponding author: paks@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2330

Manuscript received: 2011.8.30 / Revised: 2011.10.4,10.20 / Accepted: 2011.11.7

This study aims to investigate the effect of the post weld treatments on the fatigue life of T-type welded structure made by a SM50A 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. T-type test specimens were prepared by the CO2 welding of rolled steel plates (SM50A steel) with a thickness of 10 mm at a welding speed of 30 cm/min and these T-type welded specimens were further treated by UIT (Ultrasonic Impact Treatment) and/or toe-grinding post welding treatment methods. In order to investigate improvements on the fatigue life of the samples. 3-point bending fatigue tests were conducted with a stress ratio of $R=0.1$ under a cyclic loading environment at a frequency of 5 Hz, via a hydraulic fatigue testing machine (± 100 kN, MTS 809). The tests were performed at room temperature. The fatigue life of UIT specimens was approximately 25 times longer than that of as-welded specimens at a stress amplitude of 281 MPa, while toe-grinding specimens exhibited 4.15 times longer fatigue life. The current results could provide important guidelines to determine the proper post weld treatment methodologies of T-type welded parts for excavators with a satisfactory fatigue life although under severe operating conditions.

Key Words: Ultrasonic Impact Treatment (UIT), Toe-grinding (토우 그라인딩), Fatigue Life (피로수명), SM 50A Steel (SM 50A 강), T-type Welded specimen (T 형 용접시편),

기호설명

σ_{\max} : Maximum stress
 σ_{\min} : Minimum stress
 σ_y : Yield strength
 σ_f : Tensile strength
El : Total elongation
R : Stress ratio (P_{\min}/P_{\max})
UIT : Ultrasonic Impact Treatment

1. 서론

일반적으로 기계부품 또는 구조물을 설계 및 제작할 경우 피로하중에 대한 강도와 수명을 고려하고, 평가하는 것은 널리 알려져 있다.^{1,2}

구조물의 용접부 및 피로 손상이 예상되는 부위의 피로 수명을 향상시키기 위하여 그라인딩, 슛피닝, 햄머피닝 등 다양한 표면처리 방법이 사용되고 있고,³ 용접부를 깨끗하게 다듬는 toe-

grinding 작업은 피로강도를 향상시키는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 이는 토우 그라인딩에 의한 용접부 결함제거 효과 및 토우부 형상을 변화 시킴에 따라 응력집중을 줄이는 효과 때문이다.^{4,6} 그리고 최근에는 용접 구조물에 UIT 기법도 적용되고 있다. UIT 기법은 용접 변형률을 줄이고, 인장 잔류응력을 감소시키는 작용을 하며, 용접구조물에서 발생하는 응력집중 현상을 완화시키고 압축 잔류응력을 발생시켜 피로수명 향상에 효과적인 것으로 알려져 있다.^{7,9}

구조물의 피로강도, 수명 및 신뢰성 평가에 관련된 실험은 지속적으로 이루어지고 있지만, 용접 토우부의 후처리에 따른 피로강도 향상 효과에 대한 자료는 부족한 실정이다.

기존에 수행했던 연구에서는 표준 시험편 형상이 아닌 실제 굴삭기 암의 용접 구조물 형상을 반영한 box 형 시험편을 제작하여 피로시험을 실시하였으며, Fig. 1 은 기존에 수행한 box 형 시험편을 나타내었으며, box 형 시험편의 치수는 Fig. 2 에 나타내었다. 그러나 box 형 시험편을 이용한 시험에서는 내부적 결함과 외부형상의 불연속 조건을 파악하기 어렵고, 크랙이 용접된 부위의 다양한 지점에서 발생하여 일관성 있는 피로수명 결과를 확인할 수가 없다.¹⁰ 이는 용접부위가 광범위 해짐에 따라서 시험편 제작시에 용접 결함이 예측할 수 없는 특정부위에 발생할 가능성이 크고, 시험편의 형상 또한 용접에 의한 수축이나 뒤틀림에 의해서 형상의 비대칭이 나타날 수 있기 때문이다.

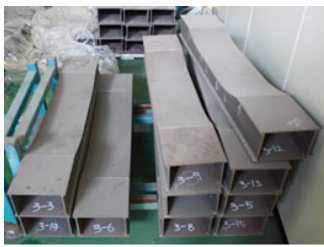


Fig. 1 Box Type specimen

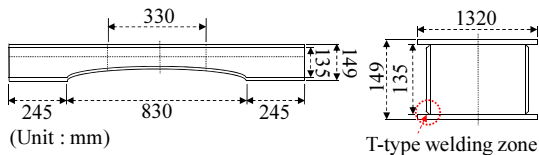


Fig. 2 Dimensions of box type specimen

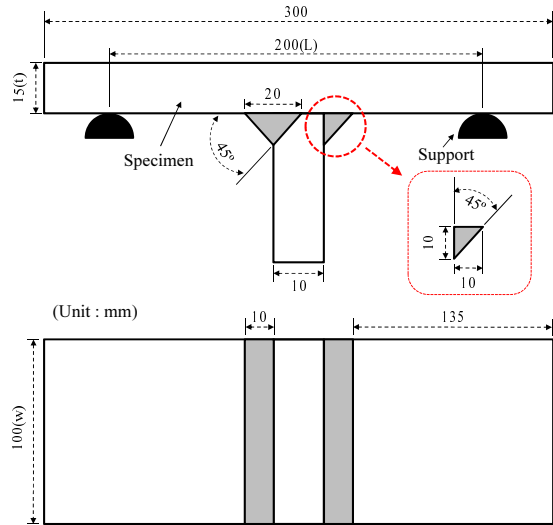
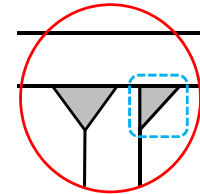
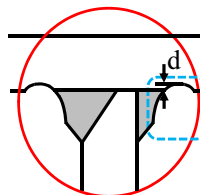


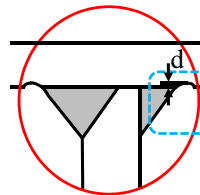
Fig. 3 Sample dimensions



(a) As-welded



(b) Toe-grinding



(c) Ultrasonic impact treatment (UIT)

Fig. 4 Post weld treatments

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

Material	C	Si	Mn	P	S
SM50A	~ 0.20	~0.55	~ 0.60	~0.035	
	σ_y (MPa)	σ_t (MPa)		El(%)	
	325~	490~610		17~	

Table 2 Welding conditions of the fillet weldment

Current	Voltage	Speed	Method
430A	37V	30cm/min	Mix gas welding

Table 3 Conditions of toe-grinding treatment

Plate thickness [mm]	10
Treated groove depth [mm]	0.6
Speed [rpm]	30000
Air pressure [bar]	6
Travel speed [mm/sec]	20

따라서 본 연구에서는 건설기계용 굴삭기의 용접 구조물에 적용할 수 있는 용접후 표면처리방법들을 보다 정확하면서도 정량적으로 비교/분석하기 위하여, 굴삭기 구조물에 사용되고 있는 대표적인 용접부의 형상인 T 형상 용접 표준시험편을 제작하고 toe-grinding 과 UIT 기법을 적용하여 피로 시험을 실시하였다.

본 연구에서는 기존의 연구^{7,8}와 달리, 실제 굴삭기에 사용되는 재질인 SM 50A 강을 이용하였으며, 적용된 toe-grinding 과 UIT 기법 또한 굴삭기 제조 현장에서 이용되는 처리 방법을 이용하였다. 따라서 굴삭기 제작시에 프레임 부의 설계 수명을 예측하고, 그 결과를 바탕으로 굴삭기 설계 및 제조현장에서 지침서로 이용될 수 있다. 또한, 기존의 연구^{7,8}에서 피로수명한도를 2×10^6 사이클로 설정한 것에 반하여, 이 연구에서는 실제 굴삭기 제조 및 설계에서 적용되는 피로수명한도 기준인 3×10^6 사이클 이상일 때를 런아웃으로 판단하였다.

제작된 굴삭기 맞춤형 시험편의 피로시험을 통하여 굴삭기 프레임 제조에 있어서 용접 토우부에 대한 toe-grinding 과 UIT 기법에 의한 피로강도 및 피로 수명 증대효과를 파악하였다.

2. 시험편 제작

본 연구에 사용된 시험편의 재료는 건설용 중장비에 적용되는 용접 구조용 압연강인 SM 50A 이며, 피로시험을 실시하기 위하여 10mm 의 SM50A 판재를 Fig. 3 과 같이 T 형상의 표준 시험편으로 용접 제작하였다.¹¹

SM 50A 의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1 과 같고, 시험편의 용접조건은 Table 2 에 나타나

었다.

Fig. 4 는 실험을 실시한 각 시험편의 형상을 나타낸다. 여기서 Fig. 4(a)의 as-welded 의 경우, 기본적인 필릿 용접부 형상을 후처리 하지 않은 시험편이다. 그리고 as-welded 시험편에 대하여 각각 toe-grinding 과 UIT 기법을 적용한 시험편의 최종 형상이 Fig. 4(b)와 (c)에 각각 나타나있다.

Fig. 4 에 나타나는 toe-grinding 의 경우 Table 3 과 같은 방법으로 토우부의 형상을 가공/변경하였다. 그리고 UIT 처리 시험편의 경우, 초음파 영역에 해당하는 약 27,000 Hz 의 주파수의 충격을 토우부에 가하여 국부적인 소성변형을 통하여 토우부 표면의 형상과 물성에 변화를 주었다. Fig. 5 와 Table 4 는 각각 UIT 처리에 사용된 장비와 세부적인 UIT 처리 방법을 나타내고 있다.



Fig. 5 Ultrasonic Impact Treatment equipment

Table 4 Ultrasonic Impact Treatment conditions

Treated groove depth [mm]	0.5
UIT indenter end diameter [mm]	3
Carrier vibration of transducer [kHz]	27
Ultrasonic vibration amplitude/power [$\mu\text{m}/\text{W}$]	30/1000
Ultrasonic impact frequency [kHz]	350
Rebound amplitude of ultrasonic impact [mm]	1.5
Press force	Up to 2.5
Treatment speed [cm/min]	42
Groove roughness [μm]	≤ 25

3. 피로 시험 방법

본 연구에서는 피로시험을 위하여 최대용량 10 ton 인 MTS 809 를 사용하였으며, Fig. 6, 7 은 각각 이번 시험에 사용한 시험장비와 시험편 및 지

그를 보여주고 있다. 지그 형상에서 받침점과 하중점의 형상과 크기가 모두 동일하게 반원($r=15\text{ mm}$) 형상으로 제작하였고, T 형상 시험편과의 접촉부에 마찰저항을 최대한 줄이기 위해서 매끈하게 가공하였다.

시험 방법은 3 점 굽힘 시험으로 시험편을 좌우 편향되지 않도록 놓고 받침점 사이 거리의 1/2 점(중앙)에서 하중(P)을 가하여 굽힘 응력을 발생시켰다. 굽힘 하중에 대한 시험편 중앙부의 최대 응력은 $(1.5 \times P \times L / (w \times t^2))$ 와 같이 계산하였다.(Fig. 3 참조) 피로하중 부하조건으로 가진주파수는 5Hz의 정현파로 하였고, R 은 0.1 을 적용하였다. 피로 시험은 시험편이 완전 파단될 때까지 실시하였고, 피로 한도 기준을 3×10^6 사이클로 설정하고 이 이상의 사이클에서는 런아웃(run-out)으로 판단하여 S-N 선도를 분석하였다.



Fig. 6 MTS fatigue testing device

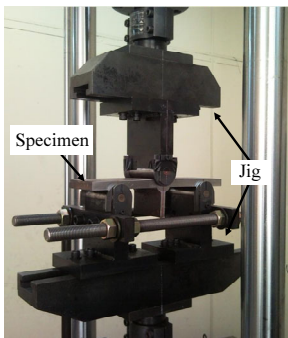


Fig. 7 3-point bending jig

4. 피로시험 결과

As-welded 시험편과 toe-grinding, UIT 기법이 처

리된 시험편에 대하여 피로 시험을 수행하였으며, 그 수량은 각각 15, 13, 7 개이다. Table 5 는 피로 시험에서 각 시험편의 반복 응력에 따른 싸이클을 나타내고 있다.

여기서, as-welded 와 비교하여 281MPa 의 반복 응력 하에서, 용접 토우부에 UIT 기법을 적용한 경우 약 25 배, toe-grinding 의 경우 약 4.15 배 정도의 피로수명 향상효과를 보였다. Fig. 8 에 실험결과를 semi-log S-N 선도로 나타내었다.

Table 5 Fatigue test results

As-welded		Toe-grinding		UIT	
Amp. [MPa]	Cycles	Amp. [MPa]	Cycles	Amp. [MPa]	Cycles
352	109,713	352	350,257	352	623,616
328	133,979	328	464,717	352	783,742
328	149,965	328	664,462	328	1,197,340
305	209,429	305	670,922	328	1,404,110
281	289,944	305	750,130	316	2,660,560
258	363,390	281	1,078,700	305	3,000,000
258	372,908	281	1,329,208	281	3,000,000
234	483,324	258	1,537,259		
234	491,175	258	1,760,883		
211	782,155	234	1,901,594		
211	792,894	234	1,949,205		
188	1,016,279	211	2,700,420		
188	1,030,970	199	3,000,000		
164	1,875,667				
152	2,200,000				

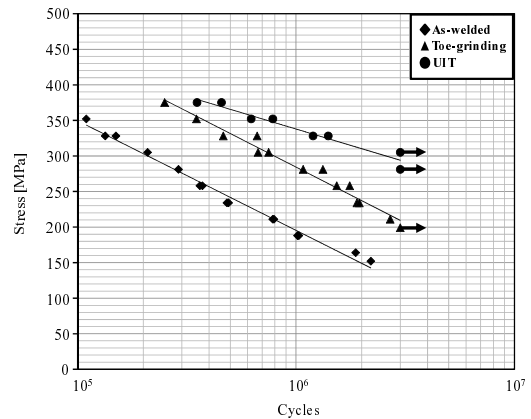


Fig. 8 Fatigue experimental results of the post weld treatment specimens

UIT의 경우 모든 시험편 및 하중 조건에서 as-welded, toe-grinding에 비하여 우수한 수명을 나타냈다. As-welded의 경우 전 구간에서 가장 짧은 피로수명을 나타냈다.

결과적으로, toe-grinding은 as-welded보다 높고 UIT보다는 짧은 피로수명을 나타냈다. 그리고, 짧은 사이클 수준에서는 toe-grinding과 UIT의 수명 차이가 긴 사이클에 비하여 작았다. 그러므로 짧은 반복 응력이 부과되는 상태의 긴 사이클 영역에서 UIT의 피로수명 증대 효과가 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 건설기계용 굴삭기에 사용되는 재질과 동일한 SM 50A 재질을 이용한, T형 시험편의 용접 토우부를 as-welded, toe-grinding, UIT 기법을 적용한 경우에 대한 피로시험을 실시하여서, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 용접 토우부에 UIT 기법을 적용한 경우 as-welded와 비교하여 281MPa의 반복 응력 하에서, 약 25배, toe-grinding의 경우 약 4.15배 정도의 피로수명 향상효과를 나타냈다.

2) Toe-grinding의 경우 as-welded와 비교하였을 때, 전 반복응력 구간에서 피로수명 향상 효과가 나타났으며, 이는 그라인딩에 의하여 용접 토우부 형상을 곡면으로 변화시킴에 따라서 노치효과가 감소되었기 때문으로 보인다. 노치효과 감소는 토우부의 응력집중을 줄여 주어서 실제 토우부에 발생하는 반복응력 폭을 감소시켰을 것으로 판단된다.

3) UIT 기법이 적용된 시험편이 toe-grinding이 적용된 경우보다 더 큰 피로수명 향상효과를 나타내었다. UIT의 경우에도 toe-grinding과 마찬가지로 토우부의 형상을 곡면으로 만들어 일정 부분 노치를 감소시키는 효과를 가지고 있다. 하지만 UIT가 toe-grinding보다 훨씬 긴 피로수명을 나타낼 수 있었던 이유는 UIT 기법이 실시될 때, 토우부에 가해지는 충격에 의하여 토우부의 표면에 소성에 의한 재료의 경화와 압축 잔류응력이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

4) 짧은 사이클 수준에서는 toe-grinding과 UIT의 피로수명 차이가 긴 사이클에 비해 적게 나타났다. 하지만 짧은 반복응력이 부과되는 긴 사이클 영역에서는 UIT의 피로수명 증대 효과가 더

크게 나타났다. UIT 기법을 적용하는데 따른 비용은 toe-grinding보다 높고, 실험결과, 짧은 사이클에서는 toe-grinding과 UIT는 차이가 비교적 적으므로 비용대비 효과를 고려할 때 이용가능할 것으로 판단된다.

본 연구결과는 설계 피로수명을 충족할 수 있는, 적절한 용접부의 표면처리 방법을 선택하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

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

참고문헌

- Maddox, S. J., "Fatigue Strength of Welded Structures, 2nd Edition," Abington Publishing, pp. 17-37, 1991.
- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. and Fuchs, H. O., "Metal Fatigue in Engineering, 2nd Edition," John Wiley & Sons, Inc., pp. 401-427, 2001.
- Haagensen, P. J. and Maddox, S. J., "Specifications For Weld Toe Improvement by Burr Grinding, TIG dressing and Hammer Peening for Transverse Welds," International Institute of Welding Document, Commission XIII, Working Group 2, 2001.
- Almar, A., "Fatigue Handbook," TAPIR, pp. 259-285, 1985.
- Lee, H., Kim, J. and Kim, H., "The Static Overload Effect Estimations on Fatigue Strength by The Measurement of Local Strain Variation at The Weldment Toe," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 59-66, 2001.
- Bergan, P., Lotsberg, I., Fricke, W., Francois, M. und Pisanski, H., "Overview of the FPSO : Fatigue Capacity JIP," Proceeding of the 18th International Conference on OMAE, Vol. 3, pp. 411-418, 2002.
- Statnikov, E. S., Muktepavel, V. O. and Blomqvist, A., "Comparison of Ultrasonic Impact Treatment (UIT) and Other Fatigue Life Improvement Methods," Welding in the World, Vol. 46, No. 3-4, pp. 20-32, 2002.
- Galtier, A. and Statnikov, E. S., "The Influence of

- Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Behaviour of Welded Joints in High-Strength Steel,” *Welding in the World*, Vol. 48, No. 5-6 , pp. 61-66, 2004.
9. Lihavainen, V. M., “A Novel Approach for Assessing the Fatigue Strength of Ultrasonic Impact Treated Welded Structures,” Ph.D Thesis, Department of Mechanical Engineering, Lappeenranta University of Technology, 2006.
 10. Song, J. H. and Lee, H., “The effect of Ultrasonic Impact Treatment(UIT) for fatigue life of weldment,” *Trans. of Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 18, No. 6, pp. 38-45, 2010
 11. Connor, L. P., “Welding Handbook, 8th Ed.,” American Welding Society, Vol. 1, pp. 152-153, 1987.