

# 등가 S-N 선도 모형에서의 굴착기 연료탱크 마운팅부 내구수명 예측 신뢰성 향상 방안 연구

이성원\*, 정진욱\*\*, 김성재\*\*.#

\*동아대학교 기계교육과, \*\*동아대학교 기계공학과

## A Study on Improving Reliability of Durability Life Estimation for Excavator Fuel Tank Mounting Using Equivalent S-N Curve Method

Sung-Won Lee\*, Jin-Wook Jeong\*\*, Seong-Jae Kim\*\*.#

\*School of Mechanical Education, Donga UNIV., \*\*School of Mechanical Engineering, Donga UNIV.

(Received 08 January 2021; received in revised form 01 February 2021; accepted 17 February 2021)

### ABSTRACT

It is challenging to estimate the fatigue life of construction equipment consisting of a welded joint using field structure test owing to the uncertainty of the S-N curve. IIW recommends different S-N curves for various welded joint types. However, there is no way to define an appropriate curve considering complex design shape and strain gauge characteristics. This paper proposes an equivalent S-N curve method based on the relationship between IIW effective notch stress and virtual stress using finite element analysis. Moreover, a case study was conducted for the excavator fuel tank. The proposed method is expected to enhance accuracy and consistency in calculating the fatigue life for the welded structure of construction equipment.

**Key Words :** Welded Structure(용접 구조물), Equivalent S-N Curve Method(등가 S-N 선도법), Durability Life Estimation(내구 수명 예측), Fuel Tank(연료 탱크)

## 1. 서 론

건설 현장이나 석산 등에서 많은 작업이 이루어지는 굴착기의 경우 작업 중 가혹한 진동과 충격 하중이 빈번히 발생하기 때문에, 각 부품마다 정해진 목표 내구 수명을 확보하기 위해 해석이나 시험

등 다양한 검증이 이루어지고 있다. 특히 굴착기 연료탱크는 파손이 발생할 경우 연료의 누유로 인해 화재가 발생하여 운전자의 안전에 큰 위험이 될 수 있으며, 탱크의 수리가 완료될 때까지 장비를 사용할 수 없는 고장 시간(down time)으로 인해 비용의 증가와 작업 일정의 차질을 유발하기 때문에 설계 시 내구 수명에 대한 정확한 검증을 필요로 한다.

굴착기는 제품 개발 단계에서 실차구조시험의 스

# Corresponding Author : sjkim641@dau.ac.kr

Tel: +82-51-200-7647, Fax: +82-51-200-7656

트레인게이지에서 측정된 응력값으로 내구 수명을 예측하고 이것을 설계에 반영하여 모델을 개선하게 되는데, 국제용접협회 (International Institute of Welding; IIW) 에서 제안하는 핫스팟응력법(hot spot stress method)과 유효노치응력법(effective notch stress method)의 경우 Strain gauge 측정의 한계 때문에 공칭응력법(nominal stress method)을 적용하여 평가하는 경우가 대부분이다. 이 때에 충분한 실험 데이터 기반을 바탕으로 각각의 평가 부위마다 적합한 S-N선도가 결정되어 있는 경우에는 신뢰성 높은 수명 예측이 가능하겠지만, 그렇지 않은 경우에는 엔지니어의 판단에 따라 하중의 방향과 용접 조인트의 형상에 다르게 적용되는 S-N선도를 임의로 적용하게 되고, 이에 따라 결과의 신뢰성도 낮아지고 엔지니어마다 결과의 일관성도 없게 된다.

이러한 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 유효노치응력과 공칭응력법의 상관관계를 고려한 등가 S-N선도법을 제안하였고, 이를 실제 구조시험 결과에 적용하여 연료탱크 마운팅 부위의 내구 수명을 정량적으로 예측하고 실험결과와 비교함으로써 등가 S-N선도법이 유효함을 확인하고자 한다.

## 2. 배경 이론

모재부에 대한 피로 수명 예측은 재료 마다의 물성치, S-N선도 등을 참고하여 해석 및 테스트로 평가하는 방법이 보편화되어 있지만, 판재간 용접으로 결합되는 굴착기 와 같은 건설기계 구조물의 경우 모재부와는 다른 피로 수명 평가 방법을 필요로 한다. 이에 따라 용접부 피로 수명 평가에 대해서 많은 연구가 이루어져 왔는데, 정안균 등은 굴착기의 내구 수명 평가에 와이블함수를 적용하여 통계학적으로 파손율을 계산하였고<sup>[1]</sup>, 강현석 등은 가상진동내구시험법을 개발하고 이를 굴착기 부품의 피로 수명 평가에 적용하였다<sup>[2,3,4,5,6]</sup>. 이재영 등은 진동내구해석을 통해 굴착기 연료탱크의 내구성을 평가하는 방법을 연구하였고<sup>[7,8]</sup>, 신성우 등은 LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics) 방법으로 굴착기 부품의 용접부 피로 수명 계산 방법을 연구하였다<sup>[9]</sup>. 한영곤 등은 용접부 형상에 따른 굴착기 하부 프레임의 피로수명에 대하여 연구하였고<sup>[10]</sup>, 박성훈

등은 용접 각도와 타입에 따른 내구 영향도에 대해 연구하였다<sup>[11,12]</sup>. 구병준 등은 용접 후 열처리와 잔류응력이 피로수명에 미치는 영향에 대해 연구하였고<sup>[13]</sup>, 이대형 등은 FSI(Fluid Structure Interaction) 방법을 활용하여 굴착기 오일탱크의 내구성 개선 방법을 연구하였다<sup>[14]</sup>. 이희중 등은 굴착기 부품의 내구시험을 설계 하는 방법에 대하여 연구하였고<sup>[15,16]</sup>, 안영동 등은 등가구조응력법을 이용한 건설기계 용접 구조물의 수명평가 방법에 대하여 연구하였다<sup>[17,18]</sup>.

기존 연구 사례들을 보면 용접부 피로 수명 평가에 대해 해석적 평가 방법이 가장 활발하게 이루어져왔고, 용접부 형상에 대한 영향과 내구시험의 설계 방법 등에 대해서도 다양한 연구가 이루어져 왔지만, 실차 구조시험에서 예측되는 내구 수명의 신뢰성을 높이기 위한 연구는 그동안 많이 연구되지 않았다. 이로 인해 실차 시험에서 목표 수명을 만족하는 결과를 얻었음에도 불구하고 장비가 판매된 후 빠른 시간에 피로 파손이 발생하기도 한다. 그래서 본 연구에서는 국제용접협회의 가이드라인을 바탕으로 해석과 시험을 융합하여 굴착기 실차 구조시험의 피로 수명 예측의 신뢰성을 높이는 방안 에 대하여 연구하였다.

국제용접협회에서는 Fig.1과 같이 공칭응력법, 핫스팟응력법 그리고 유효노치응력법을 제안하고 있다<sup>[19,20]</sup>.

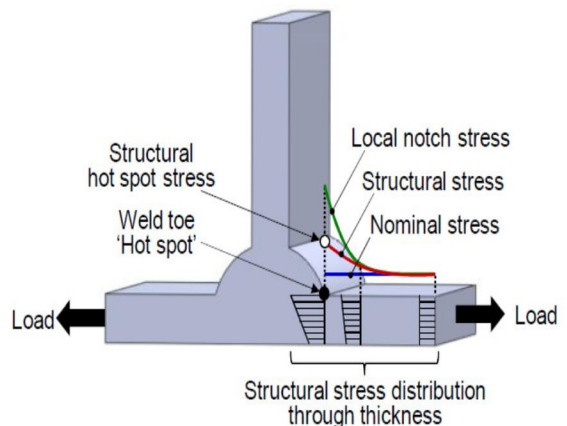


Fig. 1 Stress defined by the different fatigue evaluation approach

국제용접협회에서는 FATx로 S-N선도를 표현하는데, 이는 2.3% 파손 확률로 2,000,000 cycle 수명을 가지는 응력 Range x를 나타낸다.

공칭응력법의 경우 Fig. 2와 Fig. 3에 보이는 것처럼 용접 조인트의 형상과 하중 조건에 따라 S-N 선도를 적용하여 피로 수명을 계산하게 되는데, 시편에 대한 이상적인 피로 시험의 경우 S-N선도의 결정이 용이하지만, 실제 장비에서처럼 형상과 하중 양상이 복잡한 경우 적합한 S-N선도를 구하기 위한 추가적인 작업을 필요로 한다.

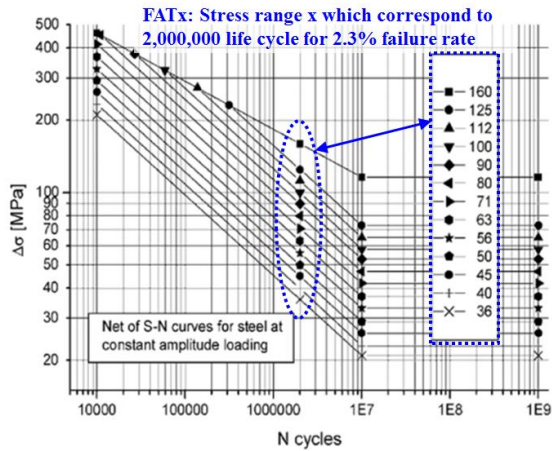


Fig. 2 Fatigue resistance S-N curves for steel, normal stress

No.	Structural Detail	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.	FAT AL.
400	Cruciform joints and/or T-joints			
411		Cruciform joint or T-joint, K-butt welds, full penetration, weld toes ground, potential failure from weld toe. Single sided T-joints and cruciform joints without misalignment	80 90	28 32
412		Cruciform joint or T-joint, K-butt welds, partial penetration, potential failure from weld toe. Single sided T-joints and cruciform joints without misalignment	71 80	25 28
413		Cruciform joint or T-joint, fillet welds or partial penetration K-butt welds, potential failure from weld toe. Single sided T-joints and cruciform joints without misalignment	63 71	22 25
414		Cruciform joint or T-joint, fillet welds or partial penetration K-butt welds including toe ground joints, potential failure from weld root. For a/t ≤ 1/3	36 40	12 14

Fig. 3 Fatigue resistance values for T joints, nominal stress

No	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel	FAT Alu.
1		Butt joint	As welded, NDT	100	40
2		Cruciform or T-joint with full penetration K-butt welds	K-butt welds, no lamellar tearing	100	40
3		Non load-carrying fillet welds	Transverse non-load carrying attachment, not thicker than main plate, as welded	100	40
4		Bracket ends, ends of longitudinal stiffeners	Fillet welds welded around or not, as welded	100	40
5		Cover plate ends and similar joints	As welded	100	40

Fig. 4 Fatigue resistance S-N curves for steel, hot spot stress

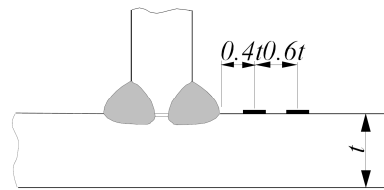


Fig. 5 Example of hot spot stress location, T joint

$$\sigma_{hs} = 1.67 \times \sigma_{0.4t} - 0.67 \times \sigma_{1.0t} \quad (1)$$

핫스팟응력법은 용접 끝단부에서 판 두께 대비 특정 거리만큼 떨어진 위치에서의 응력 값을 기준으로 외삽법을 통해 계산하는 방법으로, 공칭응력법과 비교하여 용접 끝단부의 응력 증가 영향을 고려하여 핫스팟 응력이 계산된다는 특징이 있다. 이에 따라 FAT36~FAT160 정도의 넓은 S-N선도 분포를 가지는 공칭응력법에 비해 핫스팟응력법에서는 Fig. 4에 나타난 것처럼 FAT90~FAT100 정도의 좁은 S-N 선도로 수명 계산이 가능하기 때문에 하중 방향과 지오메트리 형상에 의한 오차를 줄일 수 있다는 장점이 있지만, 공칭응력법에 비해 계산이 복잡하고 시간이 더 오래 걸리는 단점이 있다.

국제용접협회에서 제시하는 2 reference points 방법을 이용하면 Fig. 5와 식 (1)에 나타난 것처럼 용접 끝단부에서 0.4T와 1.0T만큼 떨어진 위치에서의 응력값으로 핫스팟응력을 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 내구 수명을 예측하게 된다.

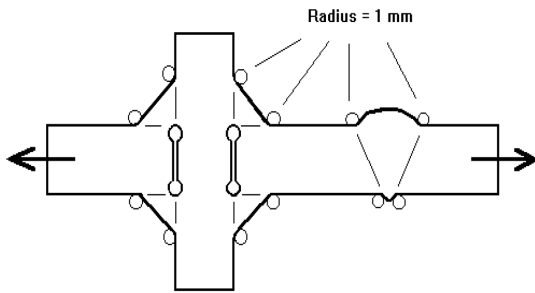


Fig. 6 Modeling of effective notch method

유효노치응력법은 Fig. 6에 보이는 것처럼 용접 끝단부에 라운드 형상의 이상적인 모델을 적용하여 직접 응력을 읽는 방법으로, 스트레인 게이지로의 측정이 불가능하기 때문에 해석을 통해서만 평가가 가능하다. 용접 토우 부위 평가만 가능한 공칭응력법과 핫스팟응력법과 달리 용접 루트 부위도 평가가 가능하다는 장점이 있지만, 모델 구성과 평가 시간이 가장 많이 소요된다는 단점이 있다.

굴착기와 같이 두꺼운 판재의 용접 구조물로 이루어지는 건설기계의 경우 주로 1mm 반지름의 모델과 FAT225를 적용하여 피로 수명을 평가하게 된다.

### 3. 등가 S-N선도법을 활용한 굴착기 연료탱크 마운팅부의 피로수명 예측

#### 3.1 굴착기의 실차 구조내구시험 절차

Fig. 7에 나타난 것처럼 구조 시험을 통해 굴착기 용접부 수명 평가를 하기 위해서는 먼저 테스트 장비와 테스트 조건에 대한 정의가 필요하다. 다음으로 경험적으로 지정해 놓은 평가 위치 또는 해석을 통해 응력이 높게 발생하는 부위 등에 용접 토우에서 특정 거리 (5mm~10mm) 만큼 떨어진 거리에 스트레인게이지를 부착하는 것이 일반적이다.

스트레인게이지 부착 작업이 완료되면 장비 시험이 진행되는데, 장비의 목표수명만큼 시험을 하기에는 과도한 비용과 시간이 소요되기 때문에, 특정 시간 동안의 시험 데이터를 바탕으로 목표

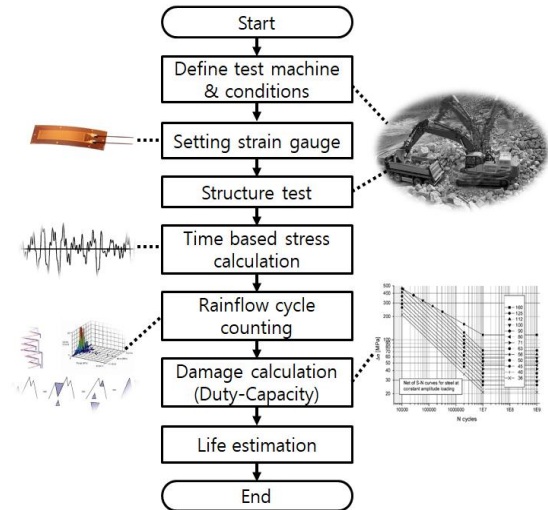


Fig. 7 General process of excavator field structure test

수명에서의 데미지만큼 스케일링하여 평가하거나 가속 시험을 진행하기도 한다. 시험이 완료되면 스트레인게이지에서 측정된 응력 range의 횟수와 분포 등을 Rainflow cycle counting을 통해 분석하여, 데미지를 계산하고 수명을 평가하게 된다. 이때 굴착기의 피로 내구 수명을 Cycle이 아닌 작업 시간으로 평가하기 위해 Duty-Capacity 방법으로 데미지를 계산한다.

#### 3.2 등가 S-N선도의 정의

데미지를 계산하여 수명을 평가하기 위해서는 연료탱크의 해당 용접부에 대한 S-N선도의 정의가 필요한데, 이상적인 S-N선도의 정의가 가능한 시편 시험과 달리 실차 시험에서는 용접 구조물의 형상이 복잡하기 때문에 FAT36에서 FAT160의 넓은 분포를 나타내는 공칭응력법에서 적합한 S-N선도를 정의하기가 어렵다. 하나의 S-N선도로 평가가 가능한 유효노치응력법을 적용할 경우 모든 용접 조인트 형상에 대해 FAT225로 평가가 가능하다는 장점이 있지만, 스트레인게이지 특성상 용접 끝단부 노치에서의 응력 측정이 불가능하기 때문에 적용이 어렵다.

하지만 시험이 아닌 해석의 경우 게이지 위치에

서의 응력과 유효노치응력을 동시에 계산할 수 있는데, 이를 이용하여 식 (2)와 같이 해석과 시험에서의 게이지 응력과 유효노치응력의 관계를 정의할 수 있으며, 이 때에 식 (3)에 나타난 것처럼 해석에서의 유효노치응력과 게이지응력의 비율을 용접부의 응력집중계수  $K_{weld}$ 로 정의할 수 있다.

$$\sigma_{\text{virtual gauge}} : \sigma_{\text{effective notch}} = \sigma_{\text{test gauge}} : \sigma_{\text{test notch}} \quad (2)$$

$$K_{weld} = \sigma_{\text{effective notch}} \div \sigma_{\text{virtual gauge}} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{test notch}} = \sigma_{\text{test gauge}} \times K_{weld} \quad (4)$$

즉 식 (4)에 나타난 것처럼, 시험의 스트레인게이지에서 측정되는 응력에 응력집중계수  $K_{weld}$ 만큼 곱해주면 시험에서의 유효노치응력을 계산할 수 있게 되고, 이를 유효노치응력의 S-N선도를 나타내는 FAT225를 적용하여 피로 수명을 평가를 할 수 있다. 하지만 시험에서는 노치부 응력이 아닌 스트레인게이지에서의 응력 측정되므로, 스트레인게이지에서 측정된 응력을 직접적으로 평가가 가능하도록 식 (5)와 같이 계산되는 등가 S-N선도를 제안하였다.

$$FAT(EQV) = FAT225 \div K_{weld} \quad (5)$$

즉 응력 비가 크면 시험의 스트레인게이지에서 측정된 응력이 작더라도 용접부 피로 파손에 직접적인 영향을 미치는 용접 끝단부에 큰 응력이 발생할 수 있는데, 엔지니어의 판단에 따라 다르게 S-N선도를 결정하던 기존의 방법에 비해 제안된 방법에서는 해석에서의 용접부 응력집중계수 효과가 적용된 하나의 등가 S-N선도가 결정된다.

### 3.3 해석 응력을 활용한 등가 S-N선도 결정

해석을 통해 유효노치응력과 가상게이지에서의 응력 값을 비교하여 등가 S-N선도를 정의하였고, 실차 시험에서 측정된 응력 데이터에 대하여 Duty-Capacity 방법을 통해 수명을 예측하였다.

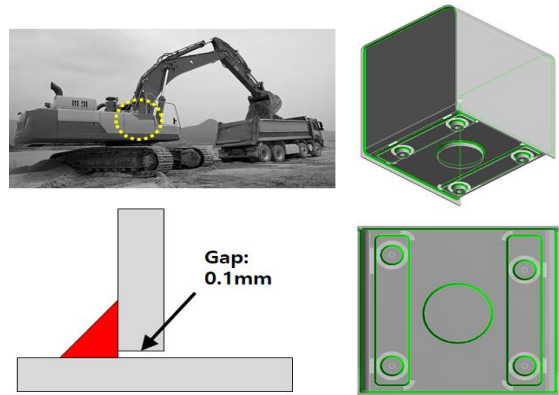


Fig. 8 Welded joint modeling for fuel tank

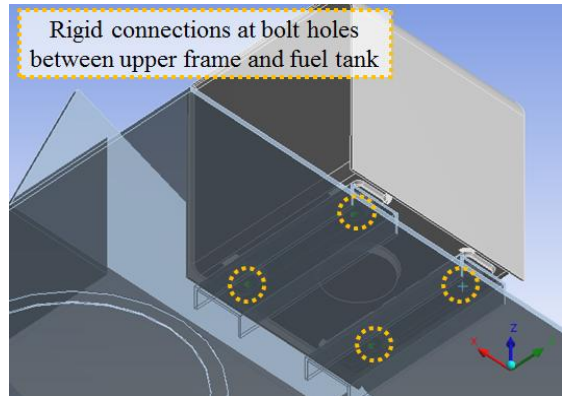


Fig. 9 Rigid connections between fuel tank and upper frame

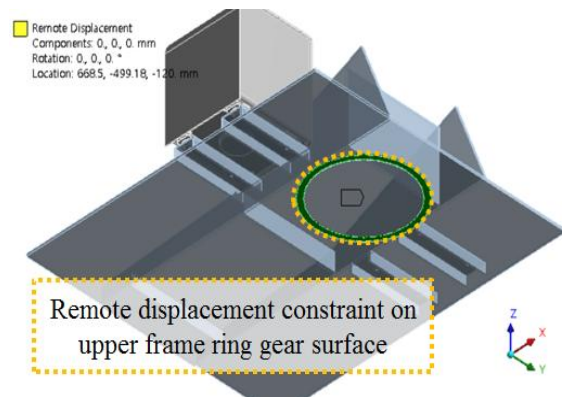


Fig. 10 Mechanical constraint on upper frame ring gear surface

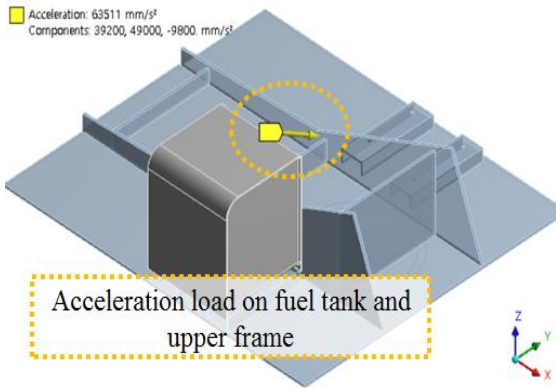


Fig. 11 Acceleration load condition

구조해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 연료탱크는 Fig. 8에 나타난 것처럼 판재간 용접으로 접합되어 있으며, 판재 사이에는 0.1mm 간격의 갭을 적용하였고, Fig. 9에 보이는 것처럼 연료탱크와 상부프레임을 결합하는 볼트 구멍을 리지드로 연결하였다. Fig. 10에 표시된 것처럼 상부프레임의 링기어 위치의 자유도를 구속하였고 Fig. 11에 나타난 것처럼 가속도 하중을 적용하였다.

유한요소모델의 경우 상부프레임에 50mm, 연료탱크에 8mm 크기로 요소를 생성하였다. 용접 노치부에는 Table 1의 국제용접협회 유효노치응력범 가이드라인에 따라 0.25mm의 메쉬 사이즈를 적용하였고, 4개 요소 레이어를 가지는 Quadratic 타입의 요소를 적용하였고 Fig. 12와 같이 요소를 생성할 수 있었다.

Table 1 IIW recommendations for element sizes

Element Type	Relative size	Size for r=1mm	No. of elements over 45 deg arc
Quadratic (with mid-side nodes)	$\leq r/4$	$\leq 0.25\text{mm}$	$\geq 3$
Linear	$\leq r/6$	$\leq 0.15\text{mm}$	$\geq 5$

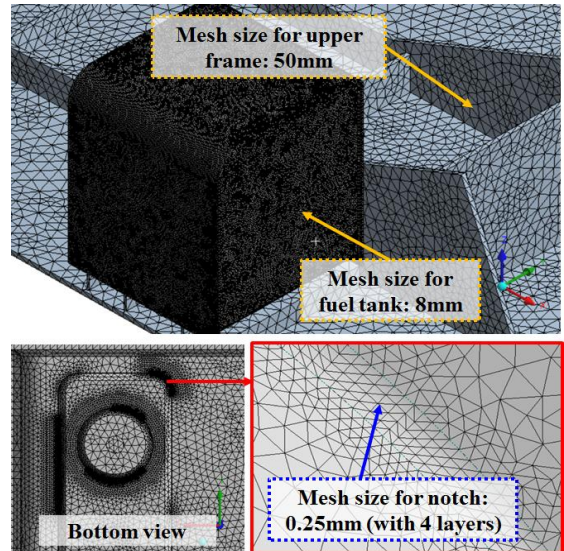


Fig. 12 Finite element model

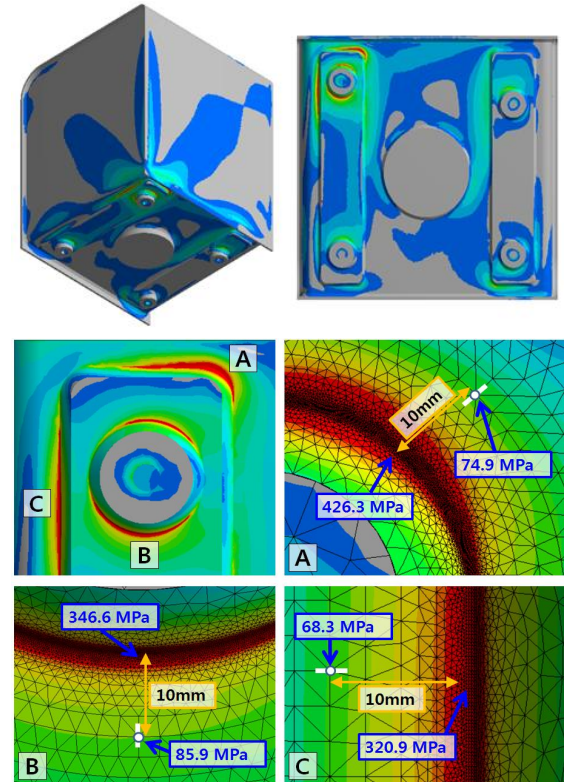


Fig. 13 Stress analysis result of excavator fuel tank

Table 2 Analysis result and equivalent FAT value

Location	Stress (MPa)		FAT (EQV)
	Effective notch	Virtual gauge	
A	426.3	74.9	39.5
B	346.6	85.9	55.7
C	320.9	68.3	47.9

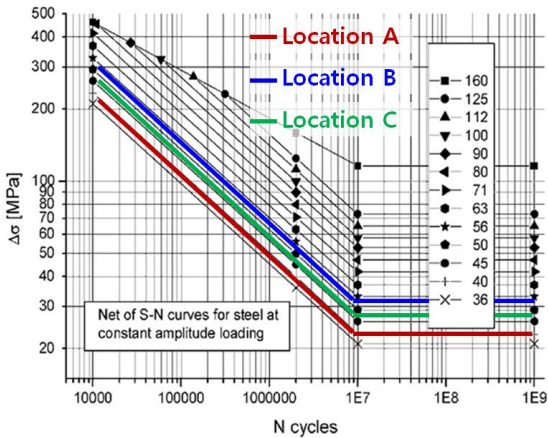


Fig. 14 Equivalent S-N curve for the location A, B and C

해석 결과 연료탱크 마운팅 부위에서 최대응력이 발생하였고, 작업 현장에서 주로 파손이 발생하는 위치와 경향이 일치함을 확인하였다. 가상 게이지에서의 응력을 평가하기 위해 Fig. 13에 나타난 것처럼 실제 실차시험에서 측정되는 스트레인게이지 위치와 일치하도록, 용접 Toe에서 10mm 떨어진 위치에서 동일한 방향으로 해석응력을 계산하였고, Table 2과 Fig. 14에 응력 결과와 등가 S-N선도를 정리하였다.

### 3.4 Duty-Capacity 방법을 활용한 피로수명 예측

식(6), 식(7) 그리고 식(8)에 나타난 식을 이용하여 연료탱크 마운팅 부위의 수명을 계산하였다.

$$\text{Duty(hour)} = r_{\text{fac}} \times \sum_i (R_i \times x_i^m) \quad (6)$$

$$\text{Capacity} = 2,000,000 \times \text{FAT(EQV)}^m \quad (7)$$

$$\text{Life(hours)} = \text{Capacity} \div \text{Duty(hour)} \quad (8)$$

식(6)의 Duty는 실차 시험의 스트레인게이지에서 측정된 과도응력으로부터 계산된다. 굴착기의 경우 scratching, digging and dumping, rock loading, traveling, leveling 등의 복합 작업이 이루어지고 각 작업의 모드에 따라 응력의 양상이 다양하게 발생하는데, 본 논문에서는 Fig. 15에 나타난 것처럼 연료탱크 파손이 발생한 작업장에서 30분 정도 작업 동안 측정된 A, B, 그리고 C 부위의 응력 값으로 피로 수명을 계산하였다.  $r_{\text{fac}}$ 는 1시간 동안의 Duty로 변환시키기 위한 스케일 값,  $R_i$ 는 Rainflow cycle counting에서 계산된 특정 응력 range의 횟수를,  $x_i$ 는 응력 range를 나타낸다.  $m$ 은 S-N선도에서 나타나는 지수 값을 의미하는데, 국제용접협회 가이드라인에 따라 3을 적용하였다.

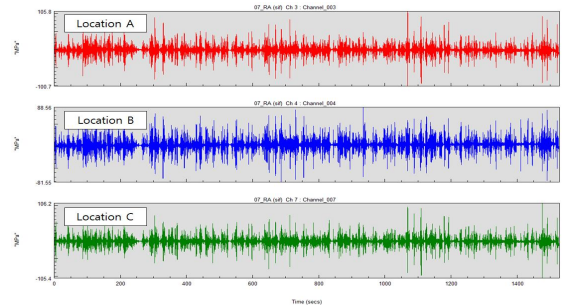


Fig. 15 Measured test stress for the location A, B and C

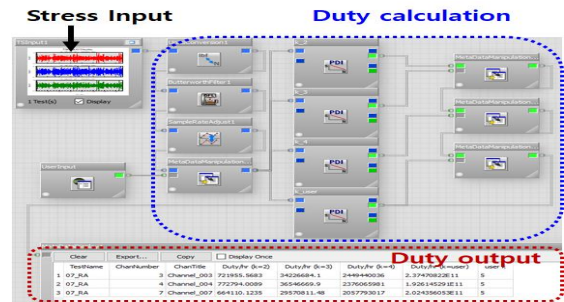


Fig. 16 Duty calculation using nCode design life

**Table 3 Estimated life using equivalent S-N curve**

Location	Capacity (MPa <sup>3</sup> )	Duty (MPa <sup>3</sup> /hour)	Est. Life (hours)
A	1.24E+11	3.42E+07	3,610
B	3.47E+11	3.65E+07	9,489
C	2.20E+11	2.96E+07	7,428

Duty 계산은 Fig. 16에 나타난 것처럼 상용 데이터프로세싱 프로그램인 nCode design life 제품을 사용하였고, 등가 S-N선도법을 활용한 연료 탱크의 A, B 그리고 C 부위의 예상 수명은 Table 3에 정리하였다.

### 3.5 실파손 경향과의 비교

해당 모델의 경우 제품 개발 단계에서는 A, B 그리고 C 위치에 일괄적으로 FAT63을 적용하여 평가하였고, 이 때에는 Table 4에 보이는 것처럼 모든 부위에서 13,000시간이 넘는 내구 수명이 예측되어 목표수명 6,000시간을 만족하는 것으로 확인되었다. 하지만 Fig. 17에 보이는 것처럼 장비가 판매되고 난 후 연료탱크 A 위치에서의 실 파손율은 약 2.6%, 평균 파손시간이 4,150시간으로 조사되었고 기존의 방법으로는 파손 원인을 분석할 수 없었다. 하지만 본 논문에서 제안된 등가 S-N선도법을 적용하였을 때에는 취약부의 위치가 일치하였고, 피로 수명 예측 시간도 3,610시간(2.3% 파손 확률)로 실 파손 시간인 4,150시간(2.6% 파손 확률)와 경향성이 있음을 확인하였다.



**Fig. 17 Real failure cases**

**Table 4 Estimated life using previous approach**

Location	Capacity (MPa <sup>3</sup> )	Duty (MPa <sup>3</sup> /hour)	Est. Life (hours)
A	5.00E+11	3.42E+07	14,611
B	5.00E+11	3.65E+07	13,684
C	5.00E+11	2.96E+07	16,912

## 4. 결론

본 연구에서는 등가 S-N선도법을 적용하여 실차 구조시험에 수명을 평가할 수 있는 방법론을 제시하였다. 그리고 Duty-Capacity 방법을 이용해 굴착기 연료 탱크 마운팅 부위에 대해 수명을 계산하여 기존의 방법과 결과를 비교하고, 실 파손과의 경향성을 파악한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 기존의 국제용접협회 공칭응력법을 적용하여 내구 수명을 평가했을 때에는 A 부위에서 14,611시간, B 부위에서 13,684시간, 그리고 C 부위에서 16,912시간으로 내구 수명이 예측되어 모든 부위에서 목표 수명을 달성하였고 그 중에서 B 부위가 가장 취약하다고 확인하였는데, 실제 파손은 A 부위에서 4,150시간으로 확인되어 취약부 위치와 실 파손 시간 모두에서 재현이 되지 않는 것을 확인하였다.
2. 본 논문에서 제안한 등가 S-N선도법을 적용하였을 경우 A 부위에서 3,610시간, B 부위에서 9,487시간, 그리고 C부위에서 7,428시간으로 내구 수명이 예측되었고, A 부위에서 4,150시간에 발생한 실 파손과 비교하였을 때에 취약부 위치와 실 파손 시간 모두 경향이 잘 재현되는 것을 확인하였다.
3. 등가 S-N선도법을 통해 실차 구조시험에서 연료 탱크 마운팅부의 적합한 S-N선도를 찾는 시간과 비용을 줄일 뿐만 아니라, 결과의 신뢰성과 일관성을 확보할 수 있었고, 내구 시험 평가 신뢰성 향상을 통해 재시험 비용과 시간을 절약할 수 있을 것이라 기대한다.
4. 본 논문에서 평가되었던 연료 탱크 외에도 어태치먼트, 상부프레임, 하부프레임, 언더캐리지, 카울프레임 등 판매간 용접 결합으로 구성되는 굴착기 구조물의 다른 파트들에도 등가 S-N선도법



의 적용이 가능한지 추후 깊이 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2021년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0002092, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)

## REFERENCES

1. Jung, A. K., Ko, Y. H., Kim, J. H., Kang, J. M., "Statistical Durability Design Methodology for Construction Equipment," KSME Spring Conference Proceedings, pp. 303-311, 2002.
2. Kim, S. H., Kang, H. S., "Development for Virtual Vibration Testing Methodology in the Construction Equipment Industry," KSNVE Spring Conference Proceedings, pp. 100-101, 2015.
3. Kim, S. H., Kang, H. S., "Development for Virtual Vibration Testing Methodology in the Construction Equipment Industry-II," KSNVE Fall Conference Proceedings, pp. 790-791, 2015.
4. Kang, H. S., Kim, S. H., Jung, A. K., "A Study on the Virtual Vibration Testing Methodology of Components for the Construction Equipment Industry," KSAE Fall Conference Proceedings, pp. 694-696, 2016.
5. Kang, H. S., Kang, J. M., Jung, A. K., Lee, J. O., "Radiator Design for Vibration of Construction Equipment," KSNVE Fall Conference Proceedings, pp. 431-432, 2010.
6. Kang, H. S., Kang, J. M., Jung, A. K., Lee, J. O., "Random Vibration Analysis of Handrail for Construction Equipment," KSNVE Spring Conference Proceedings, pp. 586-587, 2010.
7. Lee, J. Y., Baek, S. M., Lee, H. J., "The study on Durability Evaluation for Fuel Tank Mount of Excavator," KSAE Spring Conference Proceedings, pp. 1230-1230, 2017.
8. Wang, J. Y., Cho, K. C., Park, H. K., Nam, S. I., "The Evaluation of the Structural Durability using Virtual Durability Analysis Techniques for Tanks on Large Size Excavators," KSME Fall Conference Proceedings, pp. 900-902, 2014.
9. Shin, S. W., Jung, A. K., Kang, J. M., Yang, C. H., "Linear Elastic Fracture Mechanics Application on Excavator's Attachment," KSAE Spring Conference Proceedings, pp. 1,058-1,062, 2006.
10. Han, Y. G., "A Study for Failure Rate Estimation of Lower Frame in Excavator upon Welding Specification," A Thesis for a Master's degree, Changwon National University, Republic of Korea, 2016.
11. Park, J. H., Han, C. W., Jung, S. B., Park, S. H., "Role of Bavel Angle Influenced on the Fatigue Life of Butt-welded Joints," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 22, No. 2, pp. 141-147, 2014.
12. Chung, H. R., Choi, D. H., Oh, S. H., Cha, S. H., Son, J. H., "Study of Durability Effects according to Welding Bead End Type," KSAE Fall Conference Proceedings, pp. 536-540, 2019.
13. Goo, B. C., Seo, J. W., Lee, C. W., Kwon, S. J., "Effect of Postweld Heat Treatment and Welding Residual Stress on Fatigue Life of SM490A," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 22, No. 6, pp. 448-455, 2019.
14. Lee, D. H., Park, H. K., Nam S. I., "The Improved Oil Tank Structural Health for Middle Size Excavator," KSME Fall Conference Proceedings, pp. 895-897, 2014.
15. Lee, H. J., Jung, S. H., Baek, S. M., Sohn, K. H., "A Design of the Accelerated Life Test Method for the Swing Post of Small Excavator Based on Flexible Munti-Body Dynamic Analysis," KSME Fall Conference Proceedings, pp. 1,866-1,867, 2016.
16. Kwak, J. H., Kang, J. M., Kim, B. J., "A Study on the Design of Durability Test for Excavator

- Travel Device by Field Measurement," KSME Fall Conference Proceedings, pp. 491-494, 2012.
17. An, Y. D., Park, B. H., Kwak, S. K., "Research on Fatigue Life Prediction of excavator welds considering shear loading using Equivalent structural stress method," KSAE Fall Conference Proceedings, pp. 1,334-1,338, 2019.
18. Kim, C. G., Lee, S. H., Kim, Y. J., "Fatigue Life Assessment of Welding Structure in Construction Equipment using Structural Stress Method," KSME Fall Conference Proceedings, pp. 184-185, 2015.
19. Hobbacher, A., Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, International Institute of Welding, 2008.
20. Fricke, W., Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structure, International Institute of Welding, 2008.