

굴삭기 버킷 용접부의 피로수명에 관한 연구 A Study on Fatigue Life of Weld Method for Excavator Bucket

박경동 · 정재욱
K. D. Park and J. W. Jung

Key Words : Fatigue Life(피로수명), Excavator(굴삭기), Fatigue Crack Propagation(피로균열특성), Fatigue Limit(피로한도)

Abstract : An attachment part of the construction equipment frequently claimed from the crack occurrence that takes especially at the bucket. therefore we execute the fatigue examination and changes the welding method at the same materials. we executed a fatigue crack propagation experiment and got the conclusions at the normal temperature and Frequency 10Hz. We carried out butt welding for structure steel of SM490A and make three kinds of specimen of different weld method each.

The fatigue limit of CASE 1 was determined to the low than CASE 2, CASE 3. the CASE 2 putting the interval of the 2mm creates back plate and make fatigue limit to high.

Bead shapes and weld surfaces shape influence on fatigue life of materials. Specially, the crack growth becomes starting point that gap of back-plate and boundary surface of bead . It is confirmed by fracture showing on this study.

1. 서 론

인간은 환경을 극복하는 데 있어서 그 시대의 인간의 지혜와 사용가능한 자재와 도구로서 필요한 기계장비를 고안해서 사용했다. 건설공사에 기계장비를 사용한 우리나라의 역사는 조선시대에 성읍 축조에서 볼 수 있다. 1794년에서 1796년까지 2년 반에 걸쳐 완성한 수원성은 지브 크레인과 같은 기중기를 사용했으며, 처음으로 현대식 중장비를 사용한 것은 일제 때 수력발전용 댐 건설에서 볼 수 있다. 1926년에 부전강 댐을 시작으로, 1937년에 착공한 수풍댐에 이르기까지 댐 공사에는 콘크리트 배치플랜트, 크러셔, 스크린 플랜트, 케이블, 파워셔블, 콤프레서, 착암기, 기관차 등을 사용하였다.¹⁾

이처럼 오래전부터 인간은 필요에 의해 많은 건설기계들을 개발하고 사용해 오면서 다양한 문제점들을 발견하게 되었다. 그 중에서도 갑작스러운 기계의 파손이 큰 문제점으로 인식되어져서 외국의

경우, 피로파손에 대한 많은 연구를 수행하여 설계자들이 유용하게 사용할 수 있는 규격들을 하나하나 제정해 왔다. 일본 강구조협회의 피로설계지침, 유럽의 ENV규격과 같이 미국, 독일, 일본 등은 피로설계를 위한 규정들을 국가적인 사업으로 진행하였다. 그러나 국내의 경우, 약 100여년 동안 수많은 건설공사에 기계장비들을 써왔음에도 불구하고 피로파손에 대한 체계적이고 종합적인 규정들을 찾아보기 힘들며, 주로 외국의 자료를 활용하는 수준에 그치고 있다.²⁾

본 연구에서는 국내 건설기계 중 특히 굴삭기의 구조용강으로 많이 사용되고 있는 SM490A를 대상으로 용접방법을 달리한 시험편을 제작하여 피로시험을 수행하였다. 용접은 맞대기(BUTT)용접을 하였는데, 맞대기 용접부는 미용착부가 생기기 쉽고 피로하중이 가해지는 경우 미용착부 선단에서 균열 발생과 진전이 용이해져 부재의 안전성이 급격히 저하되는 치명적인 위험성을 내포하고 있다.³⁾

이처럼 피로하중 하에서 각각 시험편의 S-N선도를 산출하여 현재 산업현장에서 문제점으로 지적되고 있는 굴삭기 버킷의 용접부에 대한 피로수명을 구하여 작업성의 효율증대와 산업현장에서의 안전에 기여하고자 한다.

접수일 : 2004년 12월 16일
박경동(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : parkkd@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1592
정재욱 : 부경대학교 기계공학부

2. 실험장치 및 방법

2.1 모재 및 용접재

본 연구에 사용된 시험편은 건설기계 중 굴삭기 구조용 강으로 쓰이는 SM490A이며, 이 재료와 Weld Metal과 Filler Metal의 화학적 성분은 Table 1, 3와 같고, Table 2는 기계적 성질이다.

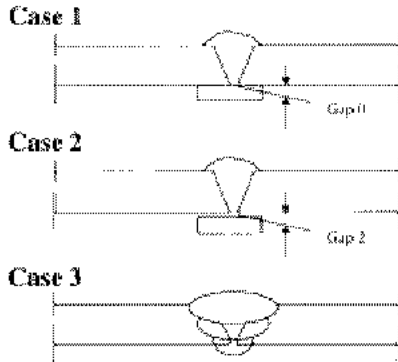


Fig. 1 Specimen of 3case



Fig. 2 Dimension of specimen (unit:mm)

본 시험편은 Fig. 1과 같이 3가지 경우로 나누어 제작되었으며, Fig. 2는 시험의 형상과 치수를 나타내었다. 3가지 경우 모두 맞대기용접을 실시하였으며, 용접방법에 따른 피로한도를 알아보기 위해 Case 1의 경우 백비드가 형성되지 않도록 백플레이트

트(Back plate)와의 Gap이 0이 되게 하였으며, Case 2는 백비드가 형성되게끔 백플레이트와 시험편 사이에 2mm의 Gap을 주었다. Case 3는 육성용접법을 실시하였는데, 이면에 원패스 용접 후 가우징을 실시하고 나머지 부분은 육성용접 하였다.

2.2 시험장치 및 방법

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기 (Instron 8821S, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용 하중 파형은 정현파(사인파)로 하고 주파수는 10Hz로 하였으며, 피로균열진전 사이클 측정은 시험기에 연결된 컴퓨터로 측정하였다. 본 실험은 ASTM E 466에 따라 실험하였으며 Fig. 3은 전기유압서보 피로시험기이다.

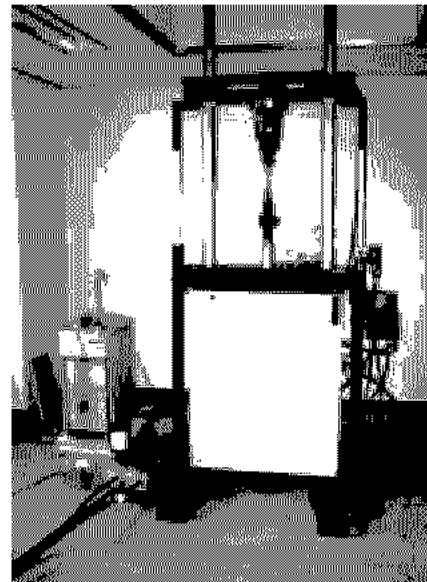


Fig. 3 Apparatus of fatigue test machine (Instron, 8821S)

Table 1 Chemical composition of base metal

Element(wt.%)					
C	Si	Mn	P	S	Nb
0.15	0.50	1.54	0.031	0.033	0.03

Table 2 Mechanical properties of base metal

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
327	490	25

Table 3 Chemical composition of filler metal

Element(wt.%)					
C	Si	Mn	P	S	Nb
0.09	0.44	0.98	0.01	0.01	-

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기에 의해 주파수는 10Hz, 피로균열 사이클 측정은 연결된 컴퓨터에 의해 상온에서 각각의 시험편을 실험하였다. Fig. 4는 실험중인 시험편의 모습이다.

S-N선도를 통해 피로한도를 구하기 위하여 각각의 시험편의 응력을 항복강도를 기준으로 판단되지 않을때까지 일정%(항복강도기준)로 낮추었다. 피로 시험은 2,000,000 cycle을 초과하거나 시험편의 완전한 파단이 일어날 경우 멈추도록 설정하였다.



Fig. 4 Testing specimen

3. 시험결과 및 고찰

3.1 응력과 사이클 수의 관계

Fig. 5~Fig. 8은 각각의 시험편에 대해 응력점감법을 사용하여 대응하는 사이클을 측정하는 것이다.

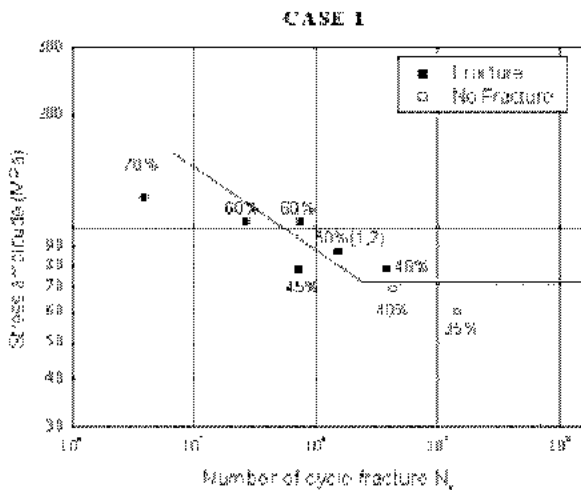


Fig. 5 S-N curve of case 1

백플레이트에 Gap이 없는 Case 1의 경우 응력이 약 72.24MPa 일 때 더 이상 파괴가 일어나지 않는 피로한도로 보이며, 백플레이트에 2mm의 Gap을 주

어 백비드가 발생하게 용접한 Case 2의 경우는 응력이 약 80.55MPa 일 때, 그리고 이면에 용접후 나머지를 육성용접한 Case 3의 경우는 약 79.95MPa일 때가 피로한도로 보아진다.

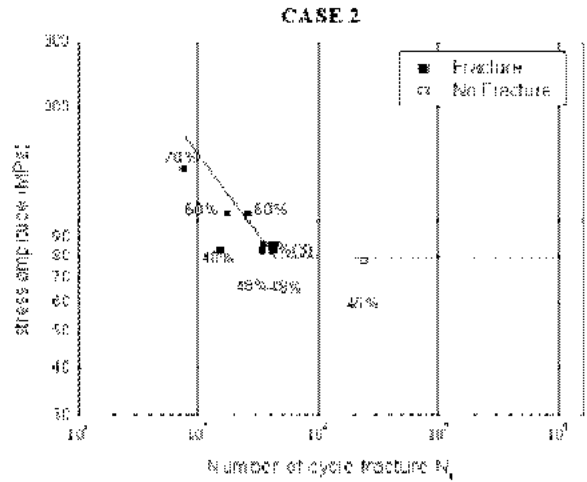


Fig. 6 S-N curve of case 2

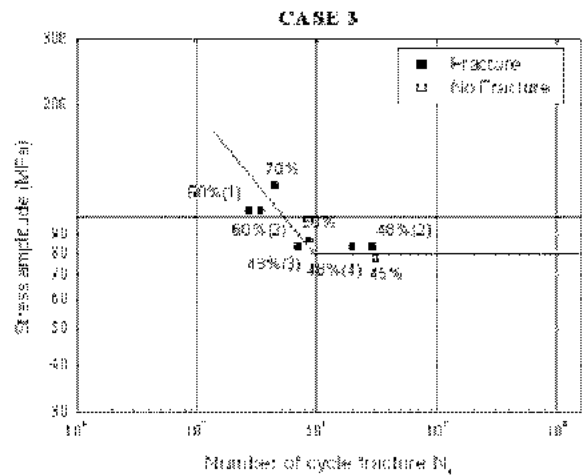


Fig. 7 S-N curve of case 3

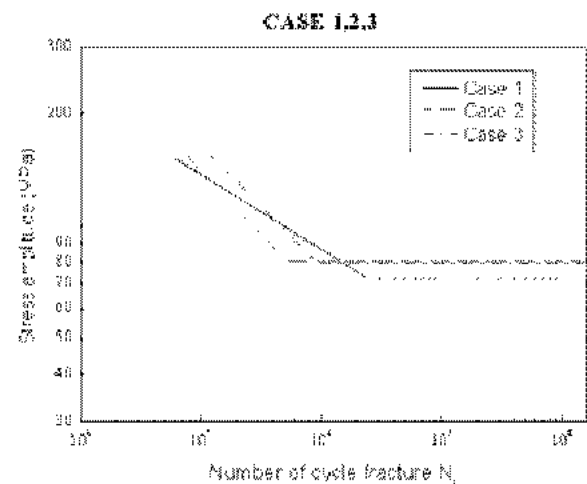


Fig. 8 Comparative S-N curve of case 1,2,3

3가지 경우의 시험편 모두항복응력의 약 48% 부근에서 피로한도가 발생하였으며, Case 1의 경우는 Case 2와 Case 3의 경우보다 낮은 것을 알 수 있는데, 이것으로 미루어 보아 용접방법에 따라 피로한도에 차이가 있는 것을 알 수 있었으며, 백플레이트에 2mm의 Gap을 주어 백비드가 생성되게 한 Case 2와 이면에 초충용접한 뒤 나머지를 육성용접한 Case 3의 경우는 거의 차이가 없었다. 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Fatigue limit of case 1,2,3

Case	Case 1	Case 2	Case 3
Fatigue limit (MPa)	72.24	80.55	79.95

3.2 응력에 따른 피로수명 고찰

Table 5는 각 시험편에 대한 Fracture 응력구간, 즉 피로한도 이상의 응력구간을 저, 중, 고 구간으로 나누어 각 구간에 해당하는 응력에 대한 사이클 수를 측정하여 비교한 것이다. 저응력 구간은 각 시험편 항복응력의 50%, 중간응력 구간은 각시험편 항복응력의 60%, 고응력 구간은 각 시험편 항복응력의 70%일때를 기준으로 비교하였다. Fig. 8은 그 값을 도시한 것이다.

Fig. 9를 통해 알 수 있듯이 저응력 구간에서는 Case 1 > Case 3 > Case 2 의 순으로사이클이 나타났고, 중응력 구간에서는 Case 3 > Case 1 > Case 2의 순으로 나타났으며, 고응력 구간에서는 Case 3 > Case 2 > Case 1 의 순으로 사이클이 나타났다.

Table 5 Compare stress with cycle by case

Case	Case 1 (Cycle)	Case 2 (Cycle)	Case 3 (Cycle)
High Stress (70%-121.22MPa)	38,692	77,037	248,445
Middle Stress (60%-103.778MPa)	269,993	173,717	344,130
Low Stress (50%-86.357MPa)	1,484,749	350,033	869,746

피로한도는 Case 2와 Case 3가 비슷한 결과치를 보이나 일단 균열이 시작되면 균열초기를 제외한 나머지 응력구간에서는 Case 3의 용접법이 가장 좋은 사이클 수명을 나타내었고 Case 2와 Case 1을

비교하면 Case 2의 경우는 고응력 구간에서, Case 1의 경우는 저응력 구간에서 사이클 수명이 더 우수한 것으로 판단된다.

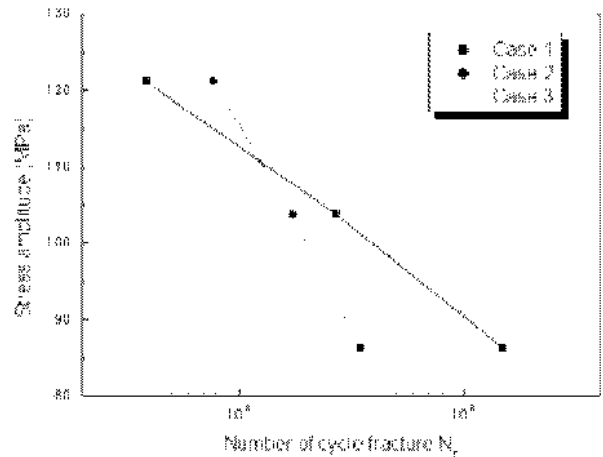


Fig. 9 Relation between stress and cycle by case

3.3 균열길기와 사이클 수의 관계

Fig. 10~12는 항복강도의 70%, 60%, 50%를 대상으로 각 시험편의 피로균열진전길기와 사이클과의 관계를 도시하였다. 주파수는 10Hz로 진행하였으며, 균열길이는 100,000 Cycle 마다 측정하였다. 각 시험편은 상온에서 동일재료(SM490A)를 사용하였으며, 각각 용접방법을 달리하여 실험하였다.

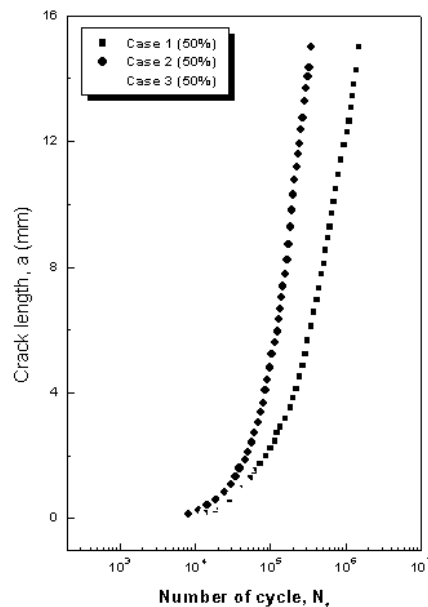


Fig. 10 Relation between crack length and cycle

50%일 때 피로균열진전길이가 10mm지점에서 하중 횟수는 Case 1의 경우 N=692,925회, Case 2의 경우 N=196,684회, Case 3의 경우 N=403,784회로써 Case

1 > Case 3 > Case 2의 순으로 피로수명이 증가함을 알 수 있다. 60%일 때는 Case 1의 경우 $N=1,799,063$ 회, Case 2의 경우 $N=1,203,612$ 회, Case 3의 경우 $N=2,308,840$ 회로써 Case 3 > Case 1 > Case 2의 순으로 피로수명이 증가하였다. 70%일 때는 Case 1의 경우 $N=23,823$ 회, Case 2의 경우 $N=44,645$ 회, Case 3의 경우 $N=951,104$ 회로써 Case 3 > Case 2 > Case 1의 순으로 증가하였다.

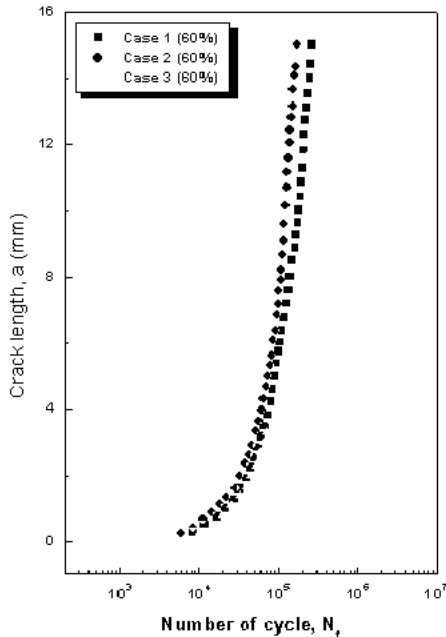


Fig. 11 Relation between crack length and cycle

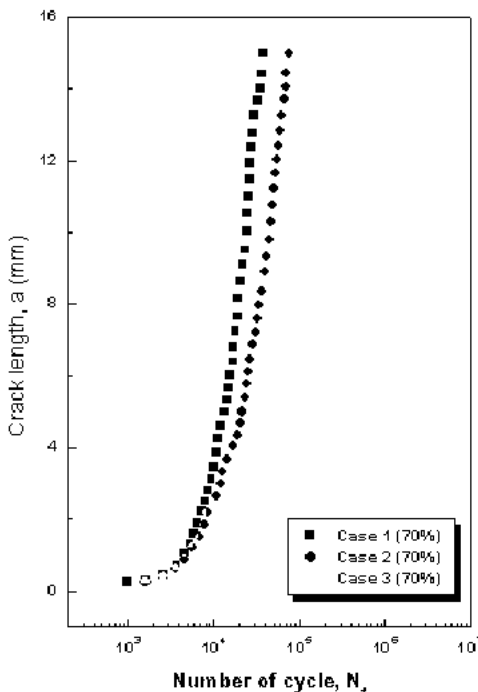


Fig. 12 Relation between crack length and cycle

3가지 경우 모두 초기에는 균열진전의 양상이 유사하게 나타나지만, 하중횟수가 106을 넘어서면서 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 Case 1의 경우는 백플레이트를 대고 용접을 하였으나 Gap을 0으로 하였기때문에 백비드가 형성되지 못했고, Case 2는 백비드가 형성되었으며 Case 3의 경우는 이면(異面)에 1차 용접을 실시한 것이 백비드의 역할을 한다고 볼 수 있으므로, 용접시 백비드의 유무가 용접재의 피로수명에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.4 비드형상 및 표면상태의 영향

단면의 모양이 급변하는 부분에서는 그렇지 않은 부분에 비해 응력이 높아진다. 이것을 응력집중이라고 하는데, 주로 재료의 노치부분에 많이 발생한다. 시험편이 하중을 받게 되면 가장 먼저 응력집중이 되는 노치부위에서 균열이 발생한다.⁶⁾

본 시험편의 형상에서는 노치를 주지 않고 대신에 단면적을 감소(시험편 Modify)시켜 실험하였기 때문에 이 부분을 중요하게 다루지 않았다. 다만, 파괴된 시험편을 보게 되면 용접방법에 상관없이 거의 모든 시험편이 백비드 부근의 열영향부에서 균열이 시작된 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 13과 같이 백비드의 용입불량이나 비드면과 모재면의 모서리가 하나의 노치역할을 하여 발생된 것으로 판단된다.

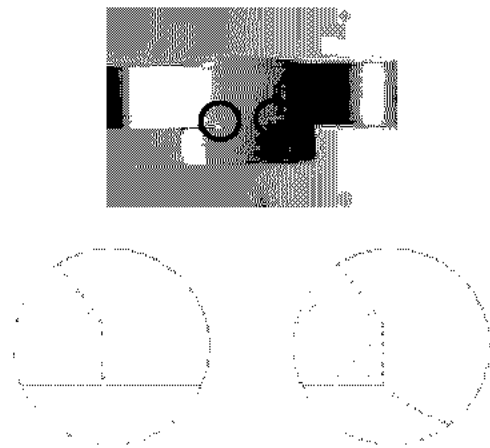


Fig. 13 Notch part of specimen

특히 Case 3의 경우 이면에 용접하면서 발생된 비드가 식으면서 주위에 인장잔류응력을 발생시켜 피로균열진전에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.5 파단면 특성

Fig. 14 ~ Fig. 17은 각각의 Case에 대한 시험편 파단모습이다. 대부분의 시험편이 백비드가 형성된 부근에서 균열이 시작되었음을 알 수 있으며, 시작된 균열은 용접부를 관통하여 인장방향의 수직방향으로 진행되었다.

백비드 쪽에서 균열이 시작된 것은 용입불량으로 인한 가능성이 크다고 생각되며, 미처 용입되지 못한 부분이 노치로 작용하여 균열이 시작되었거나 백비드 쪽의 열영향부가 용접열로 인해 인장잔류응력이 발생한 것이 원인으로 판단된다.



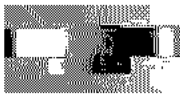



Specimen	Before test	After test
Case 1		
Case 2		
Case 3		

Fig. 14 Fracture part of case 1,2,3




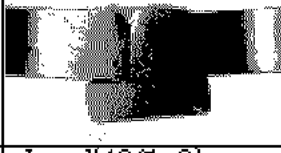
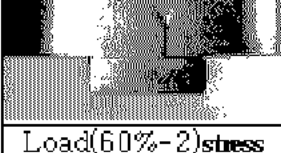



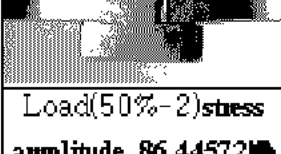

	
Load(70%) stress amplitude 121.3497MPa	Load(48%-1) stress amplitude 82.95336MPa
	
Load(60%-1) stress amplitude 103.8879MPa	Load(48%-2) stress amplitude 82.95336MPa
	
Load(60%-2) stress amplitude 103.8879MPa	Load(45%) stress amplitude 77.72136MPa
	
Load(50%-1) stress amplitude 86.44572MPa	Load(40%) stress amplitude 68.99697MPa
	
Load(50%-2) stress amplitude 86.44572MPa	Load(35%) stress amplitude 60.2661MPa

Fig. 15 Fracture part of case 1

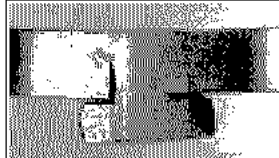





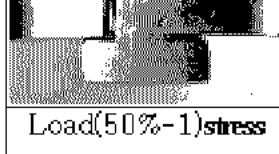



	
Load(70%) stress amplitude 121.3497MPa	Load(50%-3) stress amplitude 86.44572MPa
	
Load(60%-1) stress amplitude 103.8879MPa	Load(48%-1) stress amplitude 82.95336MPa
	
Load(60%-2) stress amplitude 103.8879MPa	Load(48%-2) stress amplitude 82.95336MPa
	
Load(50%-1) stress amplitude 86.44572MPa	Load(48%-3) stress amplitude 82.95336MPa
	
Load(50%-2) stress amplitude 86.44572MPa	Load(48%-4) stress amplitude 82.95336MPa

Fig. 16 Fracture part of case 2

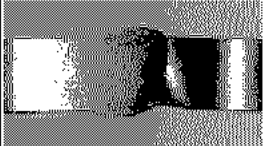





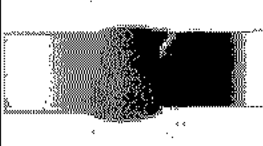


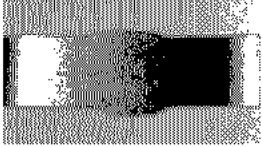
	
Load(70%-2)stress amplitude 121.3497MPa	Load(60%-1)stress amplitude 103.8879MPa
	
Load(60%-2)stress amplitude 103.8879MPa	Load(50%-1)stress amplitude 86.44572MPa
	
Load(50%-2)stress amplitude 86.44572MPa	Load(48%-1)stress amplitude 82.95336MPa
	
Load(48%-2)stress amplitude 82.95336MPa	Load(48%-3)stress amplitude 82.95336MPa
	
Load(48%-4)stress amplitude 82.95336MPa	Load(45%)stress amplitude 77.72136MPa

Fig. 17 Fracture part of case 3

4. 결 론

건설장비(굴삭기)의 어태치먼트 부분, 특히 버킷(Bucket)에 균열발생으로 인한 잦은 클레임(Claim)이 걸려서 동일재료에 용접법을 달리하여 피로시험을 실시, 용접 방법에서 균열발생의 원인을 찾고자 하였다. 용접 구조용강 SM490A를 맞대기용접하고, 각각의 용접법을 달리한 3가지 종류의 시험편에 주파수 10Hz로 상온에서 피로크랙전파시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Fig. 5~8의 응력(S)-사이클(N) 선도에서 Case 2와 Case 3의 경우는 피로한도가 각각 80.55MPa, 79.95MPa로 비슷한 수치를 나타내지만, Case 1의 경우는 피로한도가 현저히 낮은 약 72.24MPa로 나

타났다. 따라서 Case 1의 용접방법 보다는 Case 2나 Case 3의 용접방법을 사용하는 것이 재료의 수명을 높이는 데 좋을 것으로 판단된다.

- 2) 응력 S와 사이클수 N, 크랙길이 a와 사이클수 N과의 관계를 통해 피로한도는 Case 2가 가장 높게 나타났으며 SM490A를 용접시 Case 2의 용접방법을 사용하는 것이 가장 안정적일 것으로 판단된다. 단 균열진전에 있어서는 Case 3가 균열진전 지연효과가 가장 좋은 것으로 확인되었다. 이는 용접 잔류응력의 영향이라고 생각되며, 차후에 좀더 자세한 연구가 필요한 부분이라 하겠다.
- 3) 비드형상 및 용접표면 상태도 재료의 피로수명에 영향을 미치는데, 특히 Case 1과 Case 2의 경우와 같이 백플레이트와의 간격이나 Case 3의 경우와 같이 비드와 표면의 경계면은 노치의 역할을 하여 피로균열의 시작점이 된다. 본 실험에서도 이와 같은 요인들이 작용한 것으로 생각된다. 이것은 파단면 관찰을 통해 확인할 수 있다.

참고 문헌

1. 권기태, 2002, "건설기계와 시공", 동명사, pp. 11~20.
2. 구병춘, 김재훈, 양승용, 서정원, 정홍채, 2004, "SM490A 용접 이음부의 피로시험 및 수명예측", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, p. 879.
3. 한승호, 신병천, 이웅, 최전호, 2003, "고장력 강판 부분용입 맞대기 용접부의 피로균열진전수명평가", Journal of KWS, Vol. 21, No. 1.
4. 석동현, 김지현, 한태진, 1998, "건설기계 공학, 동진출판사", pp. 437~444.
5. 방명성, 차영철, 박종진, 2002, "신편 재료시험법", 원창출판사, p. 139.
6. 김창주, 1993, "금속기계 재료시험", 학문사, p. 351.
7. ASTM Standard, 1998, E466.
8. 장동일, 정경섭, 한민구, 1992, "파괴역학, 원창출판사", pp. 119~121.
9. R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, H. O. Fuchs, 2001, "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Sons, Inc., pp. 196~205.
10. 이용복, 김호경, 정진성, 1999, "피로해석의 기초", pp. 99~125.
11. H. Liebowitz, 1971, Fracture. Vol. III.

12. 小林英男, 1993, "破壞力學", 東京, 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135.
13. 김재훈, 1989, "기계구조용재료의 피로균열진전 거동에 관한 연구", 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16.