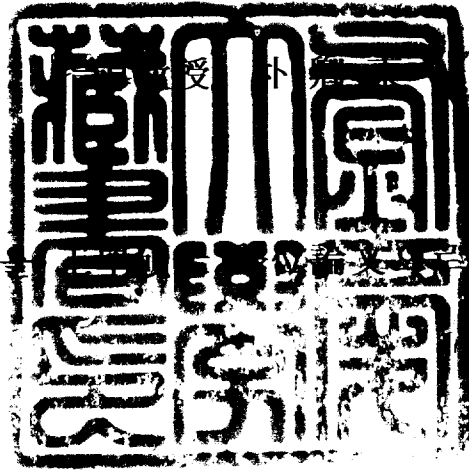


工學碩士學位論文

掘鑿機 Bucket 容接部の  
疲勞壽命에 關한 研究



이 論文을 提出함

2005年 2月

釜慶大學校大學院

機械工學科

鄭才旭

이 論文을 鄭才旭의 工學碩士  
學位論文으로 認准함

2004年 12月 23日

|   |   |    |       |
|---|---|----|-------|
| 主 | 審 | 教授 | 金 亨 資 |
| 委 | 員 | 教授 | 金 榮 大 |
| 委 | 員 | 教授 | 朴 卿 東 |



# 목 차

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 제 1 장 서 론 .....             | 1  |
| 제 2 장 이론적 배경 .....          | 3  |
| 2.1. 굴삭기의 개요 및 분류 .....     | 3  |
| 2.2. 굴삭기의 구조 및 기능 .....     | 5  |
| 2.3. 피로시험의 개념 및 목적 .....    | 8  |
| 2.4. 피로시험법 및 피로시험기 .....    | 10 |
| 2.4.1 피로시험법 .....           | 10 |
| 2.4.2 전피로영역 .....           | 12 |
| 2.4.3 피로시험기 .....           | 20 |
| 제 3 장 실험장치 및 방법 .....       | 23 |
| 3.1. 시험편 .....              | 23 |
| 3.2. 실험 장치 .....            | 25 |
| 3.3. 실험 방법 .....            | 26 |
| 제 4 장 실험결과 및 고찰 .....       | 27 |
| 4.1. 응력과 사이클 수와의 관계 .....   | 27 |
| 4.2. 응력에 따른 피로수명 고찰 .....   | 32 |
| 4.3. 균열길이와 사이클 수와의 관계 ..... | 36 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 4.4. 비드형상 및 표면상태의 영향 ..... | 40 |
| 4.5. 파단면 특성 .....          | 42 |
| <b>제 5 장 결 론</b> .....     | 46 |
| <b>참고문헌</b> .....          | 48 |
| <b>Abstract</b> .....      | 50 |
| <b>Nomenclature</b> .....  | 51 |
| <b>감사의 글</b> .....         | 52 |

## 제 1 장 서 론

인간은 환경을 극복하는 데 있어서 그 시대의 인간의 지혜와 사용가능한 자재와 도구로서 필요한 기계장비를 고안해서 사용했다. 기원전 3000~2500년에 건설된 피라미드는 나일강 상류 채석장에서 석재를 절단하여 나일강에서 뗏목으로 운반해 지브 크레인(jib crane)으로 육상에 인양해서 경사로를 이용하여 축조했으며, 지브 크레인을 움직이는 데는 인력을 사용했다.

건설공사에 기계장비를 사용한 우리나라의 역사는 조선시대에 성읍 축조에서 볼 수 있다. 1794년에서 1796년까지 2년 만에 걸쳐 완성한 수원성은 지브 크레인과 같은 기중기를 사용했으며, 처음으로 현대식 중장비를 사용한 것은 일제 때 수력발전용 댐 건설에서 볼 수 있다. 1926년에 부전강댐을 시작으로, 1937년에 착공한 수풍댐에 이르기까지 댐공사에는 콘크리트 배치플랜트, 크러셔, 스크린 플랜트, 케이블, 파워셔블, 콤프레서, 착암기, 기관차 등을 사용하였다.<sup>(1)</sup>

광복 후 정부는 1950년대 초 주한 미공병단으로부터 중고장비 40대를 이양받아 사용하게 되었고, 1955년에는 미국의 경제원조와 주한 미군 잉여장비 300대를 내무부가 인수하여 전후 복구 공사에 투입하였다. 1965년 건설부는 차관으로 불도저 200대를 도입하고, 대일 청구권 자금으로 각종 기계장비 404대를 도입해 소양강 댐공사와 기타 건설현장에 투입하여 기계화 시공이 태동하였다.<sup>(1)</sup>

이처럼 오래전부터 인간은 필요에 의해 많은 건설기계들을 개발하고 사용해 오면서 다양한 문제점들을 발견하게 되었다. 그 중에서도 갑작스러운 기계의 파손이 큰 문제점으로 인식되어져서 외국의 경우, 피로 파손에 대한 많은 연구를 수행하여 설계자들이 유용하게 사용할수 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.<sup>(2)</sup>

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

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

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 굴삭기의 개요 및 분류

굴삭기는 크레인의 프론트 어태치먼트를 개발한 건설기계로 엑스카베이터(Excavator)라고도 하며, 굴토 및 굴삭 작업과 토사 적재 작업에 사용하는 장비로 그 주요부의 구성은 상부 회전체, 하부 주행체 및 프론트 어태치먼트(작업장치) 등의 3부분으로 되어 있다. 또한 하부 주행체에 대하여 360°회전할 수 있는 상부 회전체는 셔블을 포함한 여러 가지 작업장치를 설치하여 사용할 수 있다. 굴삭기의 규격은 디퍼(버킷)의 용량( $m^3$ )으로 나타내는 것이 일반적이다.<sup>(4)</sup>

#### 2.1.1 굴삭기의 분류

##### (1) 주행장치에 의한 분류

###### 1) 크롤러식(무한 궤도식, 트랙식)

- ① 슈의 접지 면적이 넓기 때문에 접지압이 낮다.
- ② 습한 지역이나 모래, 부정지에서 작업이 용이하다.
- ③ 견인력이 크고 안정성이 높다.
- ④ 수중 통과 능력이 크다.
- ⑤ 상부 롤러까지 수중에서 작업이 가능하다.
- ⑥ 최대 속도가 11km/h로 기동성이 불량하다.



###### 2) 트랙식

- ① 차대 위에 굴삭기를 설치한 것으로 최대 속도가 50km/h로 기동성이 좋다.
- ② 넓은 작업장에서 유리하다.

③ 자체의 동력에 의해서 도로의 주행이 가능하다.

### 3) 타이어식(휠형식)

① 주행속도가 25~35km/h로 기동성이 양호하다.

② 이동시에 자체의 동력에 의해서 도로의 주행이 가능하다.

③ 평탄치 않은 작업 장소나 습지의 작업이 곤란하다.

④ 암석, 암반 작업시 타이어가 손상된다.

⑤ 견인력이 약하다.



### (2) 조작방식에 의한 분류

① 수동식 : 액추에이터가 손으로 조작하는 레버에 의해서 작업을 수행한다.

② 유압식 : 액추에이터가 유압에 의해서 작업을 수행하며, 특징은 다음과 같다.

㉠ 구조가 간단하다.

㉡ 프론트 어태치먼트의 교환이 쉽다.

㉢ 운전 조작이 쉽다.

㉣ 정비가 쉽다.

③ 공기식 : 액추에이터가 공기의 압력에 의해서 작업을 수행한다.

④ 전기식 : 액추에이터가 전기에 의해서 작업을 수행한다.

### (3) 기구에 의한 분류

① 기계 로프식 : 액추에이터의 작동이 와이어 로프에 의해서 작동한다.

② 유압식 : 액추에이터의 작동이 유압펌프, 유압모터, 유압실린더에 의해서 작동한다.

## 2.2 굴삭기의 구조 및 기능

굴삭기는 상부 회전체, 하부 주행체, 프론트 어태치먼트(작업장치)로 구성되어 있다.

### 2.2.1 프론트 어태치먼트(작업장치)

굴삭기의 프론트 어태치먼트는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 유압 실린더 붐, 암, 버킷으로 구성되어 유압 펌프에서 공급되는 유압이 각각의 유압 실린더에 공급되어 작업을 수행하게 된다.

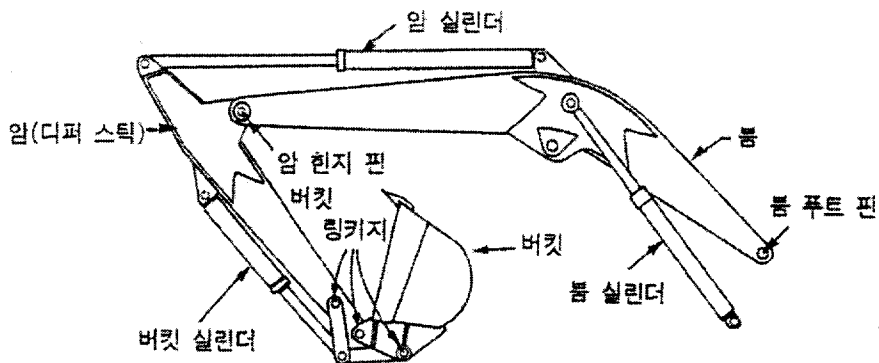


Fig. 1 Front attachment

### 2.2.2 상부 회전체

Fig. 2의 상부 회전체는 하부 주행체의 프레임이 스윙 볼 레이스에 결합되어 360°선회할 수 있으며, 앞쪽에는 붐이 설치되고 뒤쪽에는 굴삭기의 안전성을 유지하기 위하여 카운터 웨이트가 설치되어 있다. 또한 상부 회전체에는 기관, 조종장치, 유압탱크, 컨트롤 밸브, 유압 펌프, 선회장치 등이 설치되어 있다.

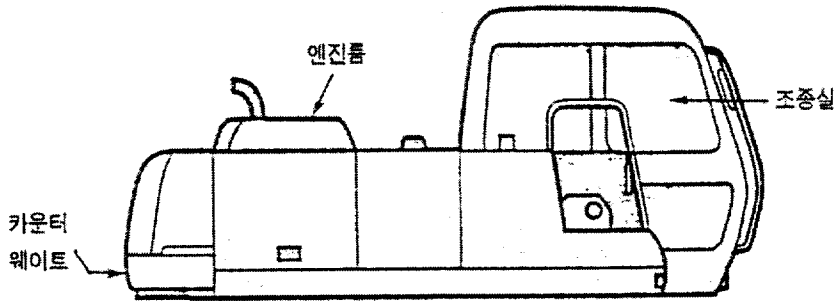


Fig. 2 Upper body of revolution

### 2.2.3 하부 주행체

Fig. 3의 하부 주행체는 상부 회전체와 프론트 어태치먼트 등의 하중을 지지함과 동시에 굴삭기를 이동시키는 장치이다. 굴삭기의 하부 주행체는 타이어식과 무한 궤도식이 주로 사용된다. 타이어식은 자동차와 같은 방법으로 기관의 동력이 전달되어 바퀴가 회전하여 이동하지만 무한궤도식은 주행 모터(유압모터)에 의해서 트랙을 회전시켜 이동된다.

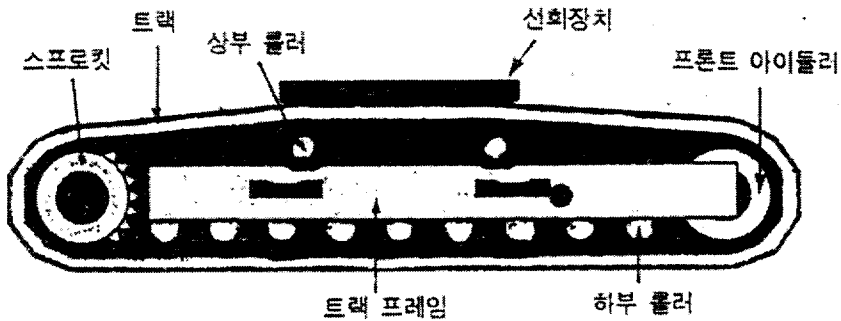


Fig. 3 Lower body of revolution

## 2.3 피로시험의 개념 및 목적

바늘은 1회만 굽히면 부러지지 않지만, 몇 번의 굽힘을 반복한 뒤에는 재질이 견고하고, 동시에 여리게 된다. 이와 같이 반복되는 부하에 의한 재질의 변화를 피로(fatigue)라고 한다. 그리고 어떤 한도까지 피로를 진행하면 파단한다. 이것이 피로파괴(fatigue fracture)이다. 실용재료는 완전 무결한 것이 아니라, 많거나 적거나 내부결함이나 불균질성, 또는 원자배열의 흐트러짐을 포함하고 있으며, 작은 응력이 있어도 완전한 탄성거동을 나타내지 않는다. 항복점 이하의 응력에서도 반복하여 부하하면 미시적으로 변형이 축적되어 재질의 변화가 일어난다. 이것이 피로의 기구이다.<sup>(5)</sup>

운동상태에 있는 기계는 사용시간이 경과함에 따라서 피로가 진행된다. 한편 기계부품은 사용중에 마모가 진행되고, 점차로 정도가 저해된다. 이것은 서서히 진행되므로 사고를 미연에 방지하는 것이 비교적 용이하다. 그러나 피로의 진행은 외형상의 변화를 거의 수반하지 않고, 따라서 파괴가 갑자기 일어나므로 큰 사고의 원인이 되는 것이 많다. 마모 및 피로파괴가 실제 기계부품의 파손 원인의 대부분을 차지하지만, 피로파괴에 대한 완전성의 확보는 기계설계상의 최대중요사항의 하나이다.

실용기계부품은 복잡한 변동응력을 받지만 단순반복응력하에서 피로하기 어려운 재료는 복잡한 응력의 반복 상태에서도 대체로 강하다고 생각되기 때문에 특별한 경우를 제외하고, 각종 재료의 피로강도의 평가는 단순한 반복응력에 대한 시험을 하여 정한다.

이처럼 피로 시험이란 일반적으로 금속의 피로특성을 정량화 하기 위한 시험으로써 재료가 어떤 응력 범위의 반복 하중을 받을 때 파단되는 회수를 구하여 피로 수명을 평가하는 것이다.

Table 1. A kind of evaluation for fatigue life

| <div> <div>방법</div> <div>조건</div> </div> | S-N<br>Approach      | $\epsilon$ -N<br>Approach | da/dN- $\Delta K$<br>Approach |
|------------------------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 적용수명                                     | 장수명<br>(약 $10^3$ 이상) | 단수명<br>(약 $10^3$ 이하)      | 전파수명                          |
| 해석조건                                     | 완전탄성변형               | 소성변형                      | LEFM                          |
| 균열유무                                     | 없음                   | 없음                        | 있음                            |

## 2.4 피로시험법 및 피로시험기

### 2.4.1 피로시험법(S-N 곡선)

단순반복하여 응력을 부하하는 데는 Fig. 4와 같이 평균응력이 0의 경우(보통 이것을 양진이라고 한다)나 최대응력 또는 최소응력의 한쪽이 0또는 일정값으로, 한방향의 힘만이 반복하여 가해지는 경우(편진) 등 각종 형식이 있으나 양진은 시험편의 치수변화가 일어나지 않으므로 양진시험을 하는 것이 가장 보편적이다.

세로축에 응력진폭(또는 최대응력) S를 취하고, 횡축에 피로 파단하기까지의 응력반복수 N을 취하여 Fig. 5와 같이 실험값을 정리한 것을 S-N곡선이라고 한다. 데이터가 될 수 있는 한 직선상에 오도록 N은 대수눈금으로 취하지만, S도 또한 대수눈금으로 취한 쪽이 편리할 때도 있다.

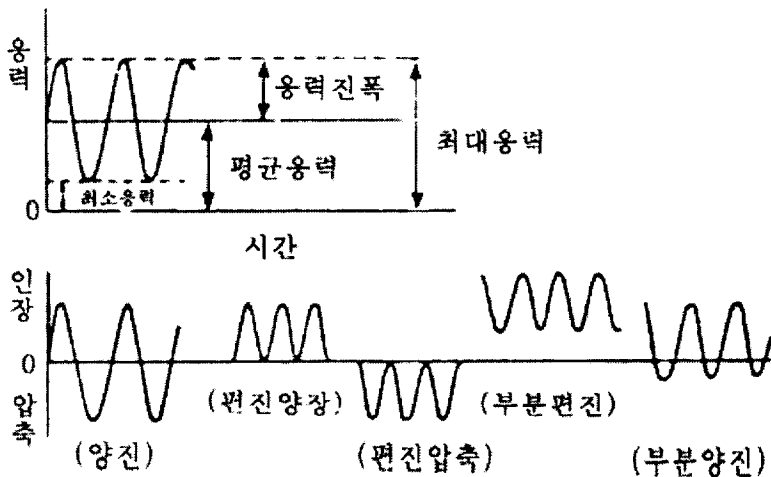


Fig. 4 Kind of simple repeated stress

Fig. 5의 예와 같이  $S$ 가 작을수록  $N$ 은 크지만, 어떤 한계의  $S$ 이하의 응력에서 급격히  $N$ 이 커지고, 파단은 사실상 일어나지 않게 된다고 생각되는 경우가 철강재료에서 종종 발견된다. 이 한계응력을 내구한(endurance limit) 또는 피로한도(fatigue limit)라고 한다. 철강재료 이외에는 명확한 피로한도를 나타내지 않는 경우가 많다. Fig. 5의 (b)는 모넬메탈(Ni-Cu합금)의  $S$ - $N$ 선도이다. 이와같은 경우는  $N$ 이  $10^8$  또는  $10^7$  이 되는  $S$ 를 내구한이라고 할 때가 많다. 또한 피로한도보다 높은 반복응력에서 지정된 횟수의 반복에 견디는 응력의 상한을 시간강도라고 하고 이것을  $\sigma_w(10^5)$ 와 같이 나타낸다. 피로한도, 시간강도의 총칭을 피로강도라고 한다. 반복응력을 받는 기계설계에 있어서는 피로한도 이상의 응력을 가하지 않도록 해야 하므로, 피로시험은 실용적으로 훨씬 중요하다.

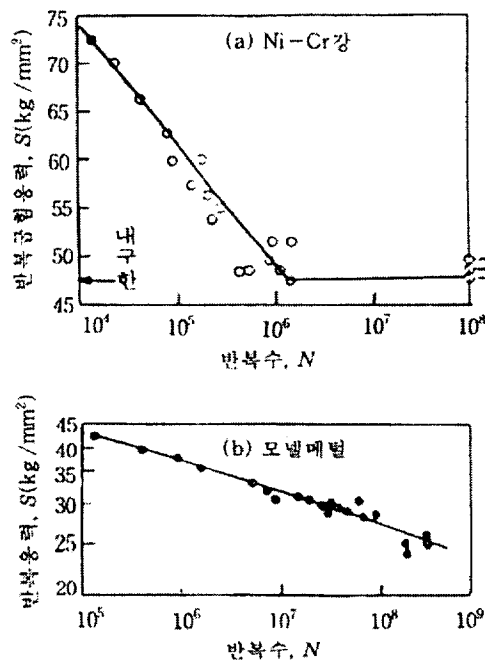


Fig. 5 Example of  $S$ - $N$  diagram

## 2.4.2 전피로영역

인장강도와 같은 정적 강도에서 피로한도까지의 응력범위에 이르는 완전 피로곡선을 개략적으로 나타내면 Fig. 6와 같이 많은 특징적 부분과 굴곡점이 있으나 주로 저사이클 피로영역과 고사이클 피로영역으로 구분되며 이들의 경계는 동적 항복점, 즉 피로시험에 의해 결정되는 항복점이다.

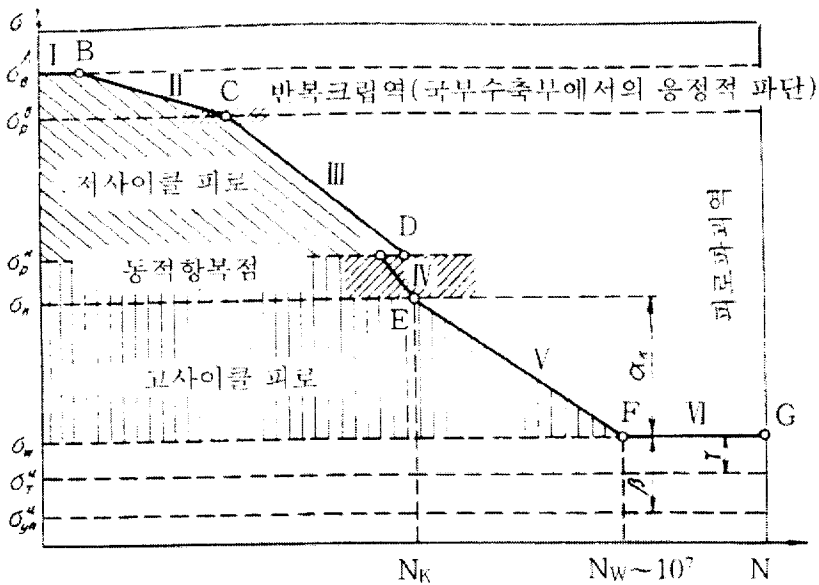


Fig. 6 Whole fatigue zone

저사이클 피로영역은 그림에서 ABCD인  $\sigma_B > \sigma_P^B \sigma_P^H$  응력범위이며 이런 응력의 작용하에서는 적용된 에너지가 최초 사이클로부터 미시균열 발생에 소비되고 이 영역에서는 한 사이클당 소성변형과 파괴까지의 반복수 간에 어떤 관계가 있다. 저사이클과 고사이클 피로인  $\sigma_P^H$ 와  $\sigma_K$ 의 응력 간에 피로파괴의 천이영역이 존재하며 여기서  $\sigma_P^H$ 는 동적 항복점과 같다고 본다. 천이영역 이하 응력에서의 피로파괴는 고사이클 피로영역 내에 들어가며 고사이클 피로영역 이하의  $\sigma < \sigma_w$ 에서는 무해

한 손상영역이 존재하고 이 영역 내에서는 반복항복점  $\delta_T^u$ 와 반복탄성한  $\sigma_{yn}^u$ 가 있다.

#### 가) 피로곡선의 굴곡점과 불연속점

저사이클에서 고사이클 피로로의 천이에 있어서 전 피로곡선 상에 몇 번 나타나는 굴곡점과 불연속점 중에서 우선 굴곡점이 존재하는 가능성에 대해 Weibull이 처음으로 밝혔으며 그는 피로곡선은 양대수 좌표에서 보통 하나의 직선으로 표시되나 다수 시험편에 의한 통계적 종합결과는 엄밀히 불연속점을 갖는 직선들의 집합이라 하였다. 또한 불연속점에 대해서는, 피로곡선의 불연속점과 굴곡점은 동일한 과정에서, 즉 어느 부하 사이클에서 초미시적 또는 미시적 크기의 균열이 생기는 정도의 응력에 달하면 소성변형과 파괴가 촉진되는 과정이 나타난다고 본다. 이것은 시험편의 온도 상승과 손상과정의 급격화를 수반하며 다른 한편에서는 경화과정의 격화(전위밀도 상승과 동적 변형시효에 의한 전위의 고착)를 수반한다. 이런 과정이 모두 곡선의 불연속이 되며 이에 따라 저사이클 피로와 전형적인 피로파괴 영역은 피로의 임계응력 부근 천이영역에 의해 연속성을 상실한다.

이상의 해석으로부터 다음과 같은 불연속점의 규칙성이 제안되고 있다.

- 1) 수명증가나 수명감소 쪽으로 이행하는 두 가지 형상의 불연속점이 존재한다.
- 2) 재료의 구조상태, 응력의 반복속도와 형식, 시험편형상, 시험온도 및 표면상태 등의 많은 인자가 불연속점의 원인이 된다.
- 3) 불연속점의 원인을 설명하는 많은 가설이 제시되었으며 그 예로 샤파린의 공공설, Williams의 표면층설, Mori 등의 조직변화설, 피로의 임계응력  $\sigma_K$ 에서 굴곡점이 나타난다는 설 및 응력상태 반복과 불연속점의 출현을 관계한 설 등이 있다.

4) 굴곡점이나 불연속점이 출현하는 응력수준은 그 피로한의 위치를 어느 정도 변화시킨다.

관찰된 굴곡점에 대한 수명이 102~106의 넓은 주기 범위에서 확인한 점을 고려하면 몇 가지 본질적으로 다른 굴곡점이나 불연속점이 존재한다는 결론에 달한다.

일반적인 경우, 전피로곡선에는 세 곳의 천이영역(불연속점, 굴곡점)이 나타난다.

첫 번째 위치는 Fig. 6에서 저사이클 피로영역 II와 III의 사이 점 C 부근이다. 여기서는 반복변형과 피로손상의 집적과정이 서로 영향을 미치며 국부수축에 피로균열이 나타난다. 이 천이구간의 폭은 재료 및 사이클형상에 따라 다르다.

두 번째 위치는 동적 항복점(점D) 부근에 존재하는 것으로 불연속점에 대응하는 반복수는 넓은 범위에서 변화하며 그 특성과는 별도로이다.

세 번째 위치는 동적 항복점과 일치하는 정도의 임계응력  $\sigma_K$  부근에 존재하며 그 이상에서는 최초 주기에서부터 초미시균열이 발생하고 표면층에서는 진행의 우세에 의해 피로의 잠복기가 존재하지 않는다. 이때의 초미시균열 수는 많지 않고 재료의 연화 경향은 아직 없다.

#### 나) 저사이클 피로영역

저사이클 피로영역은 Fig. 6에서 I, II, III의 세 부분으로 나누어지며 제I 영역인 응정적 파단부는 최초 부하사이클 또는 100회 이내에서 파단되는 점이다. 여기서 정적 인장강도에 대응하는 점 A와 이 수준에서의 반복수명 점 B와의 비교는 어렵다. 그것은 인장강도로서 국부수축형성부의 진파단응력이 아니고 시편의 초기 단명에 의한 최대 파괴응력을 취하고 있기 때문이다.

제II 영역인 반복 creep 부분에서는 소성변형의 축적이 반복수에 따라 연속적으로 증가함이 특징이다. 파괴는 응정적(凝靜的) 양상을 나타내

어 국부수축 형성을 수반하며 이 부분에서 파괴는 1회 부하에서의 파괴와 외견상 정도 차이는 없다. 그러나 국부수축부에서는 모두 피로균열 자리가 보이며 그 길이는 사이클형상, 시편형상 및 재료상태 등에 의해 결정된다. 경화하는 재료에서는 변형의 축적이 없어 반복 creep부가 없는 피로파괴부만 보인다.

제Ⅲ영역인 거시적 반복소성변형을 수반하는 피로파괴부에서는 반복 creep시 보다 소성변형의 수축이 적고 파괴에 앞서 피로균열이 생성된다. 이 변형과정에서 경화하는 재료는 응력이 증가하고, 연화하는 재료는 응력의 감소가 일어나며 최종 파단부가 시편 중심부에 있음이 저사이클 피로파단의 특징이다.

저사이클 영역에서 반복부하에 의한 재료의 거동에 관해서는 상세히 연구되어 왔으며 이를 열거하면 다음과 같다.

- 1) 반복경화와 연화의 해석
- 2) 정적 변형에서의 최대 변형과 반복 부하 하에서 재료의 거동 간 상호관계
- 3) 정적 부하시 재료의 기계적 특성에 미치는 반복 부하의 영향
- 4) 반복 부하에서의 파괴와 변형확대 에너지 량

위의 1), 2), 3)은 hysteresis loop에 의해 결정된 소성변형의 측정이거나 수학적 기술에 기초를 두며, 4)는 재료의 열역학적 특성에 기초를 두고 있다.

반복 부하와 정적 부하에 있어서 재료의 거동관계를 조사한 Manson과 Coffin은 각각 저사이클 피로에서의 소성변형폭( $\Delta \epsilon_p$ )과 파괴까지의 반복수( $N_f$ )간의 관계를 구하였다.

## 다) 고사이클 피로영역

$\sigma_K$  에서부터  $\sigma_W$ 까지의 응력범위에서 피로과정은 많은 기간과 단계로 나누어지며 일반적으로 tempering한 금속을 예로 들면 피로과정은 Fig. 7에서와 같이 조직과 물성변화에 따라 4단계로 나누어 볼 수 있다.

V-1 ; 결정격자의 왜곡이 일어나는 잠복기(0~3곡선)

V-2 ; 초미시균열 발생과 확대로 금속의 연속성이 상실되는 연화기  
(3~4곡선)

V-3 ; 임계 크기의 거시균열까지 균열 확대기(4~5곡선)

V-4 ; 최종 파단기(5~6곡선)

피로의 잠복기(V-1)은 경우에 따라 다시 세 단계로 구분된다.

### 1) 반복 미소향복단계(0~1곡선)

최초 주기에서 1곡선까지의 영역으로, 이 단계에서는 일반 기계적 성질은 변하지 않으며 전위밀도는 임계를 따라 증가하고 부결정립계에서는 새로운 전위가 발생하여 이에 따른 미시적 소성변형이 나타난다. 또한 주목할 만한 특징은 최초 부하사이클에서 결정립 크기의 표면층에 매우 격심한 소성변형을 보이며 이러한 원인규명은 일부 시도되고 있다.

### 2) 반복 항복단계(1~2곡선)

반복 항복단계의 초기는 거시적 변화, 즉 hysteresis loop의 폭이 현저히 증가함과 관련이 있다. 그러나 거시적 연화단계에서는 다시 아주 미미한 경화가 일어나며 이것이 연화속도를 감소시킨다. 이 때 재료 전체에서는 거시적 소성변형이 진행되고, 임계나 개재물 주위에서는 전위 밀도가 급격히 증가하며, 교차전위도 다수 발생한다. 표면층의 전위는 직선적으로 집적되며 경우에 따라서, 부하가 계속됨에 따라 피로 slip

band가 형성된다. 이 단계의 종료후에도 표면층에서는 큰 전위밀도가 유지된다.

### 3) 반복 경화단계(2~3곡선)

tempering 재의 반복경화 단계에 있어서는 전위밀도의 증가기간이 보다 길고 현저히 발달된 전위 cell 구조가 형성되고 표면층에서는 부동 slip band가 발달하여, 이 단계 최후에는 slip band에 최초의 초미시균열이 나타나기 시작하여 항복점과 순간적 탄성율은 증가하나 재료의 연성은 다소 감소한다. 전위구조 및 물리적, 기계적 특성이 변화하고 초미시균열 발생이 시작되며 피로과정 잠복기의 종료를 나타낸다.

### 4) 초미시균열 발생에서 거시적 크기까지의 확대단계(3~4곡선)

여기서는 표면의 부동 slip band 수가 서서히 증가하고 slip band에 존재하는 초미시균열이 합체되어 결정립 크기를 넘지않는 미시균열로 성장한다. 이러한 slip band에 인접한 영역에서는 동적 변형시효와 경화 과정이 일어나므로 그 후의 반복부하는 균열확대에 영향을 미치지 않는다. 이 시기는 불가역적 손상의 집적이 시작하는 때로 4곡선 근처에서 끝난다. 초미시균열의 발생과 확대시기는 부동 slip band상에서 slip band의 확대와 초미시균열의 확대에 의해 전위구조의 재편성이 일어나며 새로운 slip band가 발생함에도 불구하고 재료의 물리적, 기계적 특성 전체에는 다소의 변화밖에 미치지 않는다.

### 5) 임계 크기의 거시균열까지의 균열 확대단계(4~5곡선)

이 시기에서는 임계를 가로 지르는 미시균열이 발생하고 균열 선단에서 평면변형상태가 되는 조건이 일어나며 부하방향에 수직인 면 상을 미시균열이 전파하기 시작한다. 균열전파 단계에서는 파면에 줄무늬가 형성되며 균열은 평면변형조건에 있는 균열선단에서 낮은 응력확대계수치로 전파한다.

### 6) 최종 파단단계(5~6곡선)

피로균열의 불안정 성장에서 시작하며 최종 파단응력은 응력수준과 처음의 응력집중에 의존하지 않고 고유의 것이 있다고 본다. 최종 파단

강도는 진응력에 가깝다. 표면층의 전위밀도는 파괴에 이를 때까지 계속 변화하지 않으며 최종 파단은 균열개구가 임계치에 달할 때 갑자기 파단한다.

이상의 전피로영역에서 반복 부하응력의 크기에 따라 처음 전위 발생에서부터 최종 파단에 이르는 연속적 진행과정을 현상적으로 도시한 예를 보면 Fig. 7와 같다.

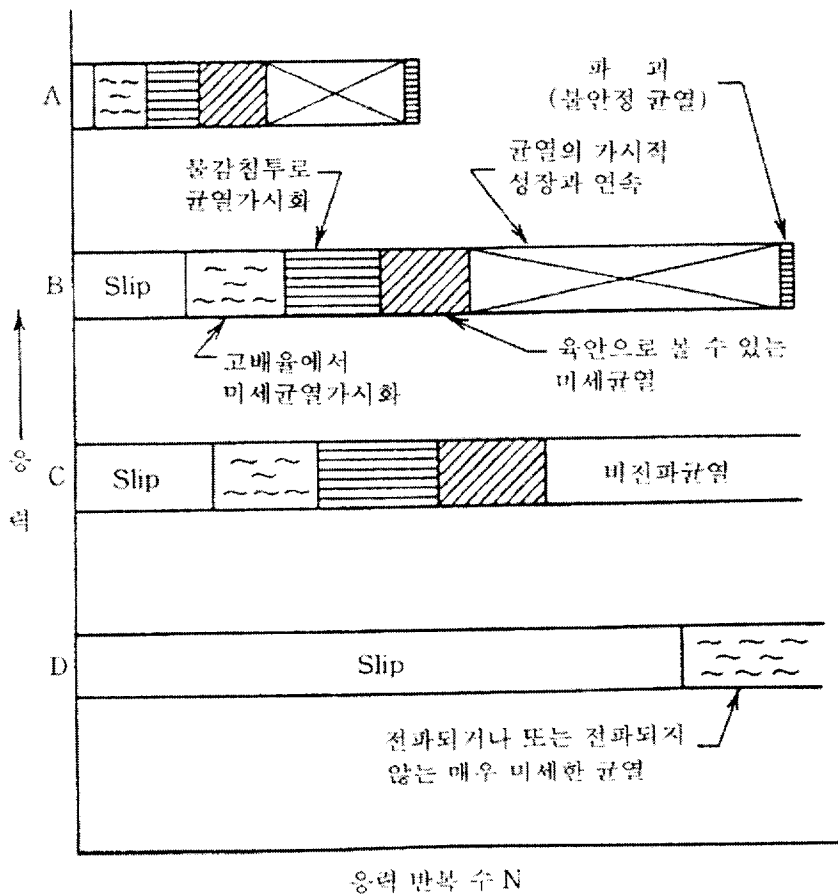


Fig. 7 Process of fatigue crack

시험법 및 시험편의 형상, 치수는 규정에 따라야 하며, 각각의 시험법은 아래의 규정에 따라 시험한다..

## ① BS

- BS. 3518 : 피로 시험 방법

Part 1 : 일반 원리

Part 2 : 회전 굽힘 피로 시험

Part 3 : 직접 응력 피로 시험

Part 4 : 비틀림응력 피로 시험

Part 5 : 통계의 응용

## ② ASTM

ASTM E206 : 피로 시험 및 자료의 통계적 처리에 관한 관련 용어 정의

**ASTM E466 : 금속 재료의 일정 진폭 피로 시험 방법**

ASTM E467 : 축방향 피로 시험기에서의 일정 진폭의 동적 하중 검증

ASTM E468 : 금속 재료의 일정 진폭 피로 시험 결과에 대한 정리

ASTM E513 : 일정 진폭 저주파 피로 시험에 관련된 용어 정리

ASTM E606 : 일정 진폭 저주파 피로 시험 방법

ASTM E739 : S-N 및  $\epsilon$ -N 피로 data의 통계적 해석 방법

### 2.4.3. 피로시험기

#### A. 반복응력의 종류에 따른 분류

- (a) 굽힘 : 실제의 피로파단은 반복되는 굽힘에 의해 일어나는 것이 많다. 환봉시험편의 경우는 회전굽힘, 각주, 편상시험편의 경우는 평면굽힘을 한다.
- (b) 비틀림 : 헬리컬 스프링이나 차축, 토션바 등은 반복 비틀림파단이 문제가 되며 실용상 중요하지만, 시험편의 장치기구가 복잡하기 때문에 그다지 많이 하지는 않는다.
- (c) 인장압축 : 이 형식의 피로파단이 일어나는 것은 실용상 비교적 적지만, 시험편 단면에서 응력구배가 거의 없으므로 기초적 연구용에 적합하다. 가느다란 선재나 박판 시험편에서는 압축과정에서 휘므로 편진인장시험을 하는 것이 많다. 예를 들면 실제의 경우에 가깝게 굽힘과 비틀림을 동시에 부하하도록 조합시켜 응력 시험을 하는 것도 있다.

#### B. 구동방식에 따른 분류

- (a) 기계식 : 크랭크 기구를 사용하거나, 중추를 회전시켜 원심력을 이용한다. 또한 환봉시험편에 굽힘하중을 가하면서 시험편을 회전시킨다. 회전굽힘 피로시험기는 이것에 속한다. 이 경우, 직경  $d$ 의 시험편 표면에서 최대 인장응력은

$$\sigma = 16PL/\pi d^3 \dots\dots\dots (1)$$

으로 주어진다. 전동기에서 축을 매분 1500~3000회전시킨다. 정지상태에서 큰 하중을 부하하면, 시험편이 휘므로 회전시키고 나서 서서히 부하해야 한다.

- (b) 유압식 : 대용량 피로시험기에 이 형식의 것이 많다. 진동수는 일반적으로 작다.

(c) 전자석 : 전자석에 흐르는 전류의 주파수를 조절함으로써, 시험편을 포함하는 시험기 본체의 고유진동수에 대응하는 진동하중을 주고, 공진상태로 하여 원하는 하중을 부하하는 경우가 많다. 먼저 상부의 핸들을 돌려 조절 스프링들을 상하시키고, 링 스프링을 통하여 시험편에 원하는 평균하중을 가한다. 전자석에 공진주파수의 교류를 흘리는 것에 의해 시험편에 진동하중이 주어진다. 이것에 따라서 역량계가 신축하고, 반사경이 최진진동하여 스케일 판상에 빛이 투영된다. 이것에 의해 최대 최소 하중을 읽어 들일 수 있다. 진폭의 제어는 빛의 폭이 너무 커지지 않도록 한다. 즉 빛이 넓게 광전관에 들어가면, 그 신호를 받아 전자석에 흐르는 전류가 작아지도록 회로를 설치해 놓는다. 또 고유 진동수는 중추의 무게를 증가시키면 작아진다.

이런 종류의 장치 이점은 (1)비교적 작은 입력의 반복에 의해 큰 부하를 가할 수 있다. (2)100Hz 정도의 고속진동을 주는데 적합하며, 단시간 시험이 가능하다. (3)차광판을 프로그램대로 움직이게 함으로써 복잡한 진폭변동을 시킬 수 있는 것 등이다. 한편 결점으로서 (1)대형 시험편에 의한 시험에 적합하지 않다. (2)큰 소음을 발생한다. (3)고온의 금속이나 스테인리스 강과 같이 감쇠능이 큰 재료에 대하여는 큰 입력이 필요하다는 것 등을 들 수 있다.

특수한 구동방식으로서 압축공기의 분사를 사용하는 방법도 있다. 공업적으로는 실제의 피로현상에 가깝게 하기 위한 장치를 연구하여 중폭 반복응력이나 변동응력을 가하여 실험을 하는 것이 있다.

앞절에서 설명한 것과 같이 피로시험은 반복응력  $S$ 와 파단까지의 반복수  $N$ 의 관계를 구하는 것이 많지만, 반복변형 진폭과 파단까지의 반복수의 관계를 구하는 것도 있다.

## 제 3 장 실험장치 및 방법

### 3.1 시험편

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

Table 2 Chemical composition of specimen(wt, %)

| Material   | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Nb   |
|------------|------|------|------|-------|-------|------|
| Base Metal | 0.15 | 0.50 | 1.54 | 0.031 | 0.033 | 0.03 |
| Weld Metal | 0.09 | 0.44 | 0.98 | 0.010 | 0.010 | -    |

Table 3 Mechanical properties of specimen

| Material   | Tensile Strength (MPa) | Yield Strength (MPa) | Elongation (%) |
|------------|------------------------|----------------------|----------------|
| Base Metal | 490                    | 327                  | 25             |
| Weld Metal | 540                    | 460                  | 31             |

본 시험편은 Fig. 8과 같이 3가지 경우로 나누어 제작되었으며, Fig. 9는 시험편의 형상과 치수를 나타내었다. 3가지 경우 모두 BUTT(맞대기) 용접을 실시하였으며, 용접방법에 따른 피로한도를 알아보기 위해 Case 1의 경우 백비드가 형성되지 않도록 백플레이트(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 육성용접하였다.

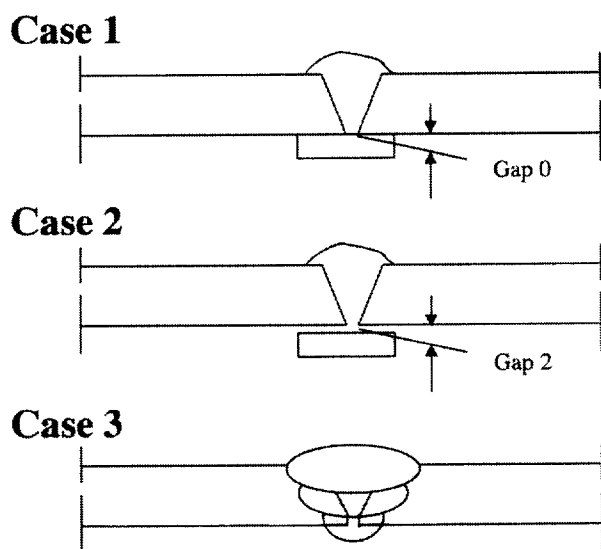


Fig. 8 Specimen of 3 case

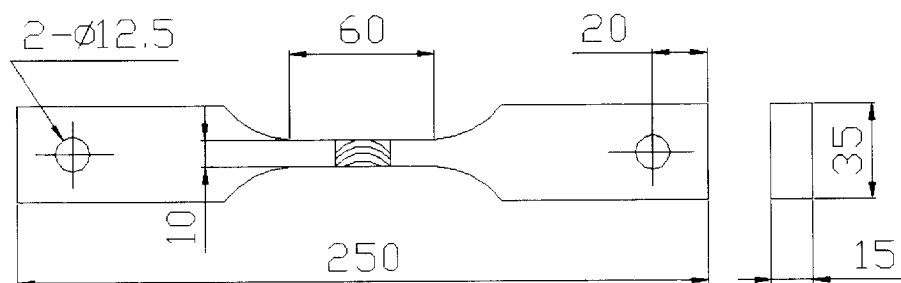


Fig. 9 Dimension of specimen(unit:mm)

### 3.2 실험장치

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. 10은 전기유압서보 피로시험기이다.

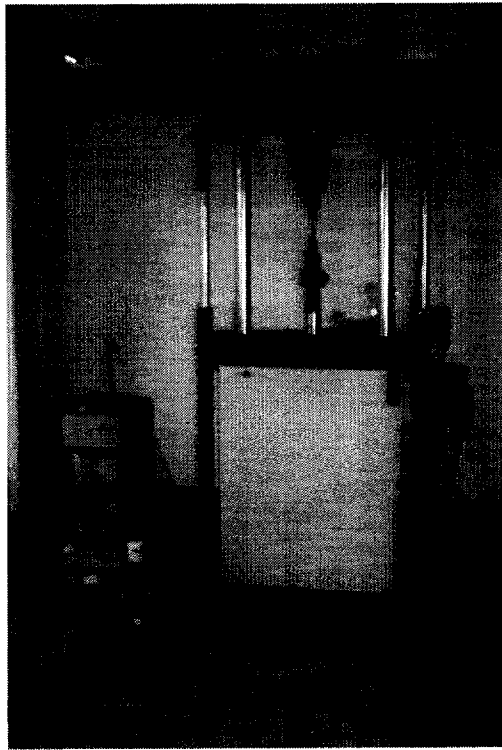


Fig. 10 Apparatus of fatigue test machine(Instron, 8821S)

### 3.3 실험 방법

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기에 의해 주파수는 10Hz, 피로균열 사이클 측정은 연결된 컴퓨터에 의해 상온에서 각각의 시험편을 실험하였다. Fig. 11은 실험중인 시험편의 모습이다.

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

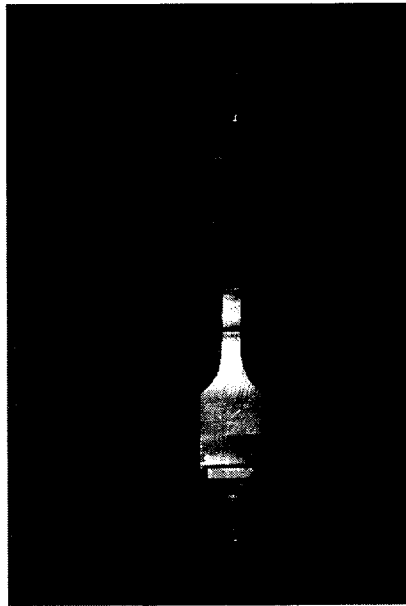


Fig. 11 Testing specimen

## 제 4 장 실험결과 및 고찰

### 4.1 응력과 사이클 수의 관계

Fig. 12~Fig. 15는 각각의 시험편에 대해 응력점감법을 사용하여 대응하는 사이클을 측정하였다.

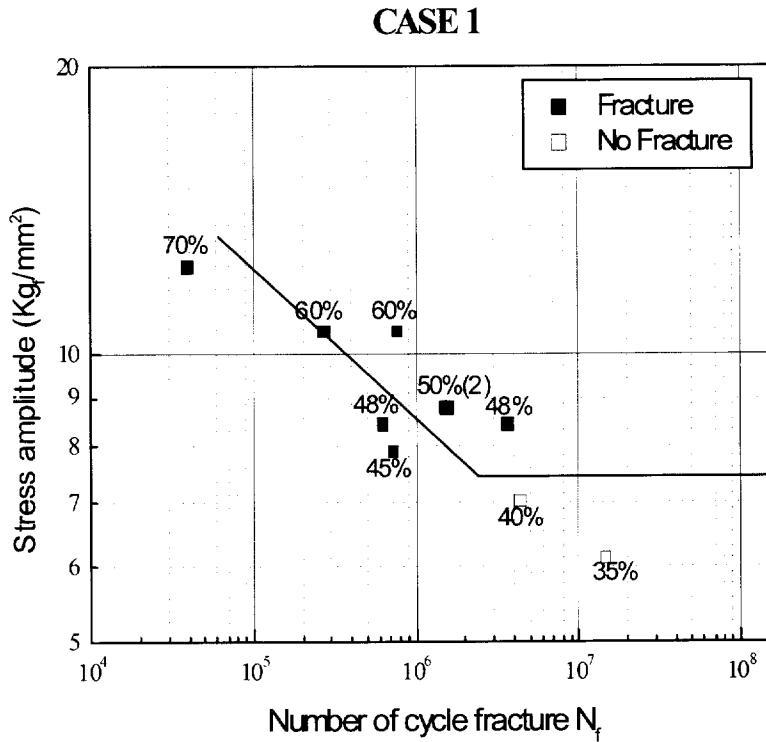


Fig. 12 S-N curve of case 1

## CASE 2

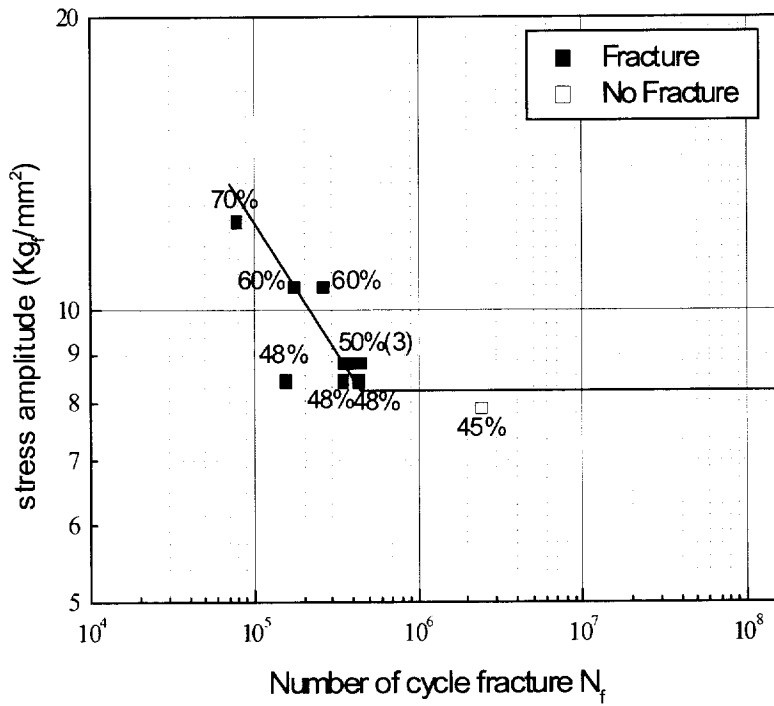


Fig. 13 S-N curve of case 2

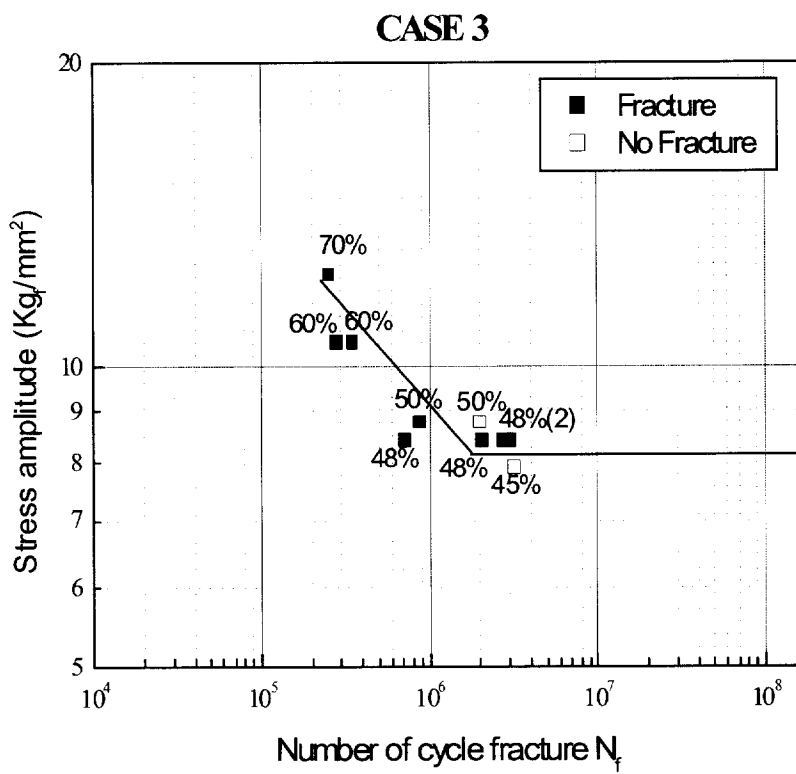


Fig. 14 S-N curve of case 3

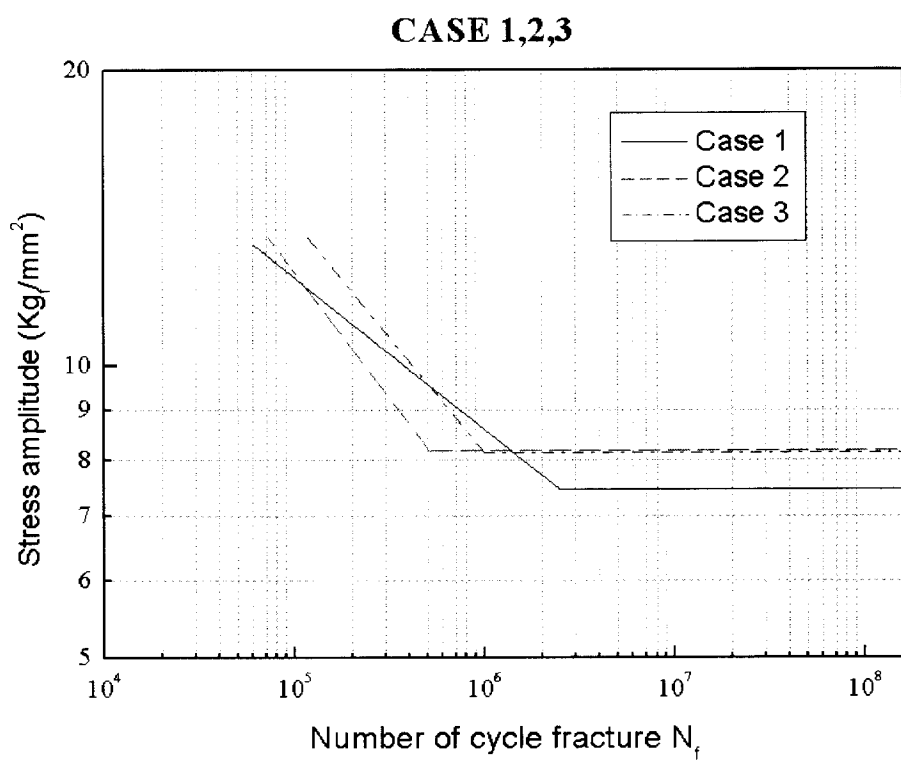


Fig. 15 Comparative S-N curve of case 1, 2, 3

백플레이트(Back plate)에 Gap이 없는 Case 1의 경우 응력이 약  $7.463\text{kg/mm}^2$  일 때 더 이상 파괴가 일어나지 않는 피로한도로 보아지며, 백플레이트에 2mm의 Gap을 주어 백비드가 발생하게 용접한 Case 2의 경우는 응력이 약  $8.241\text{kg/mm}^2$  일 때, 그리고 이면에 용접후 나머지를 육성용접한 Case 3의 경우는 약  $8.234\text{kg/mm}^2$  일 때가 피로한도로 보아진다.

3가지 경우의 시험편 모두 항복응력의 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 초층용접한 뒤 나머지를 육성용접한 Case 3의 경우는 거의 차이가 없었다. 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Fatigue limit of case 1,2,3

| Case \ Data | Fatigue Limit<br>( $\text{kg/mm}^2$ ) |
|-------------|---------------------------------------|
| Case 1      | 7.463                                 |
| Case 2      | 8.241                                 |
| Case 3      | 8.234                                 |

## 4.2 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 각 시험편 항복응력의 60%, 고응력 구간은 각 시험편 항복응력의 70%일때를 기준으로 비교하였다. Fig. 16, 17은 그 값을 도시한 것이다.

Table 5. Compare stress with cycle by case

| Case<br>Stress                         | Case 1<br>(Cycle) | Case 2<br>(Cycle) | Case 3<br>(Cycle) |
|----------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 고 응력 (70%)<br>12.37 kg/mm <sup>2</sup> | 38,692            | 77,037            | 248,445           |
| 중 응력 (60%)<br>10.59 kg/mm <sup>2</sup> | 269,663           | 173,717           | 344,130           |
| 저 응력 (50%)<br>8.812 kg/mm <sup>2</sup> | 1,484,749         | 350,033           | 869,746           |

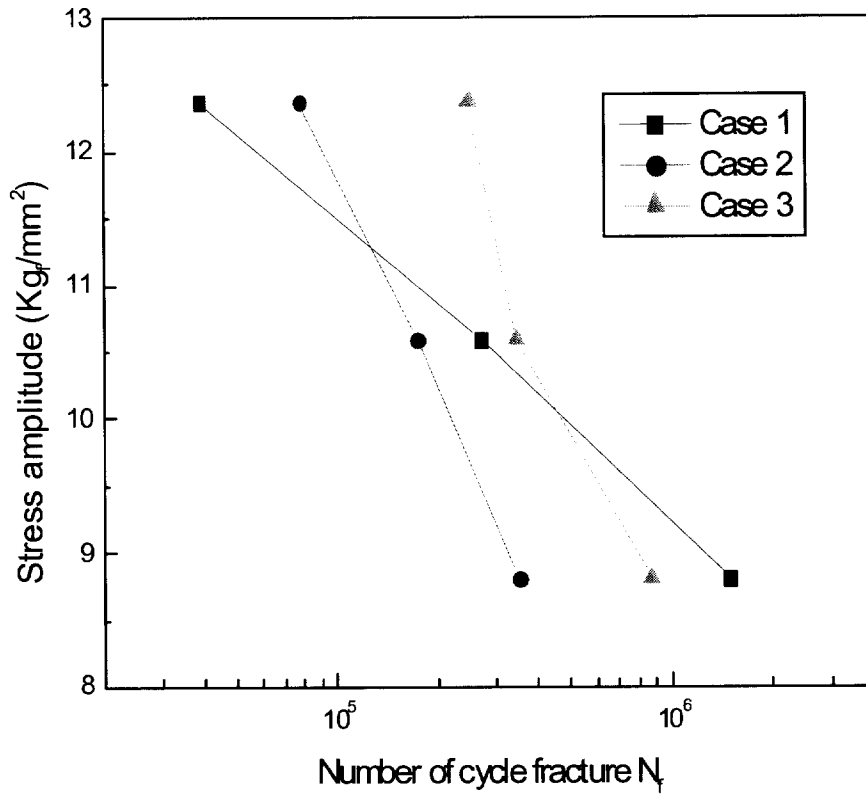
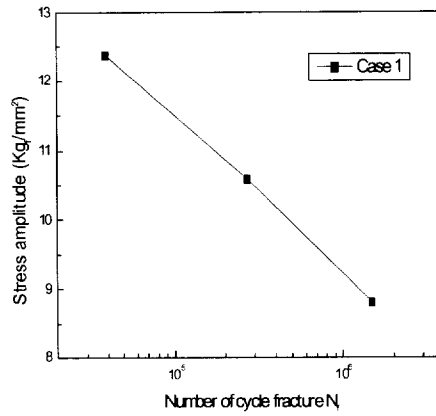
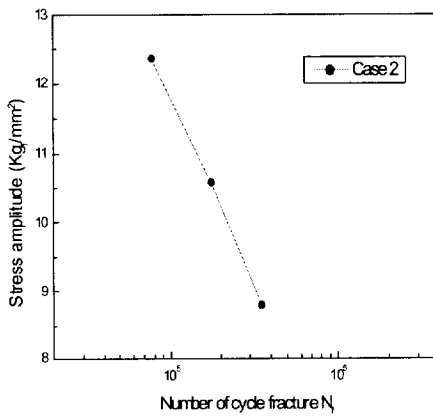


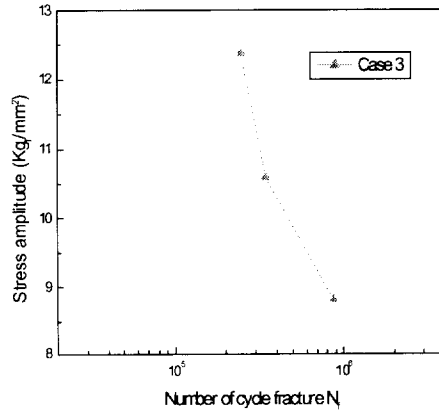
Fig. 16 Relation between stress and cycle by case



- Case 1 -



- Case 2 -



- Case 3 -

Fig. 17 Relation between stress and cycle by case

Fig. 16, 17을 통해 알 수 있듯이 저응력 구간에서는 Case 1 > Case 3 > Case 2 의 순으로 사이클이 나타났고, 중응력 구간에서는 Case 3 > Case 1 > Case 2의 순으로 나타났으며, 고응력 구간에서는 Case 3 > Case 2 > Case 1 의 순으로 사이클이 나타났다. 따라서 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.

### 4.3 균열길이와 사이클 수의 관계

Fig. 18~20은 항복강도의 70%, 60%, 50%를 대상으로 각 시험편의 피로균열진전길이와 사이클과의 관계를 도시하였다. 주파수는 10Hz로 진행하였으며, 균열길이는 100,000 Cycle 마다 측정하였다.

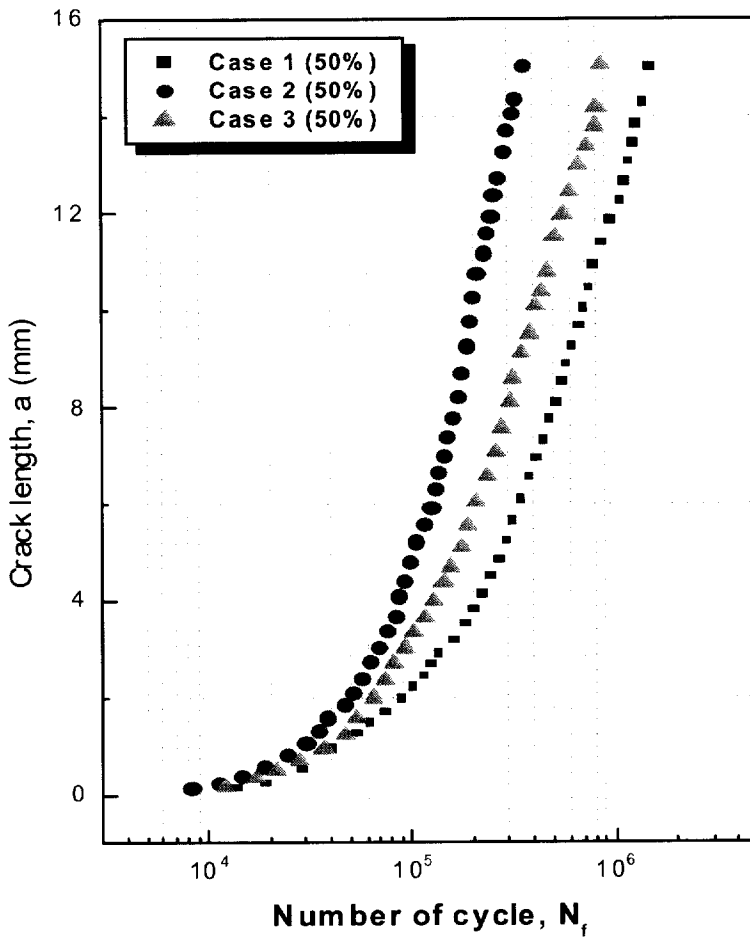


Fig. 18 Relation between crack length and number of cycle  
(50% of  $\sigma_y$ )

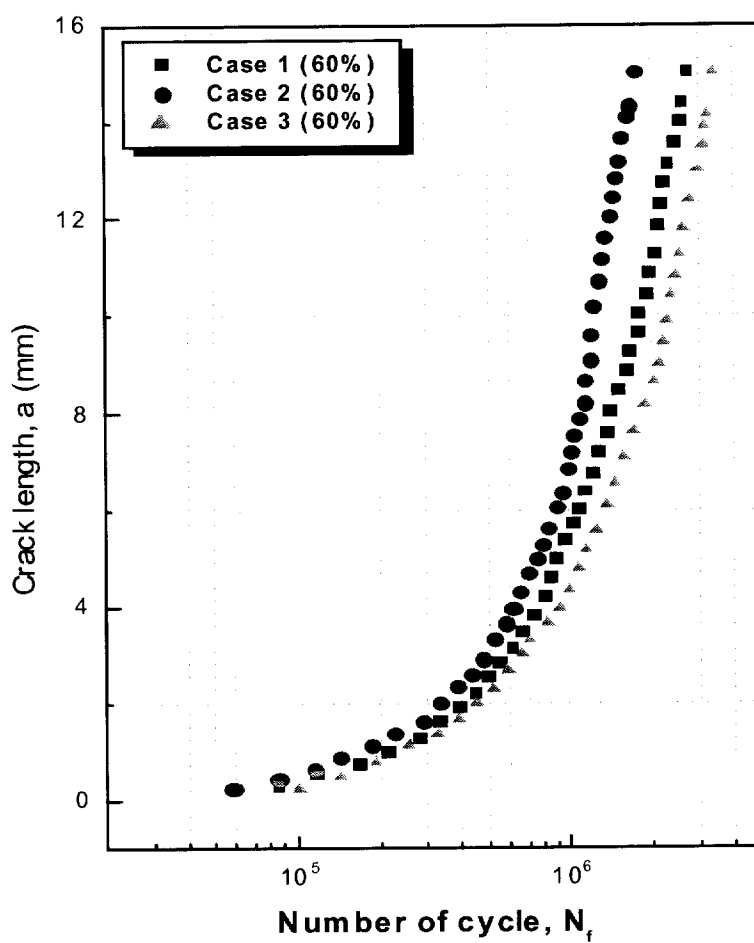


Fig. 19 Relation between crack length and number of cycle  
(60% of  $\sigma_y$ )

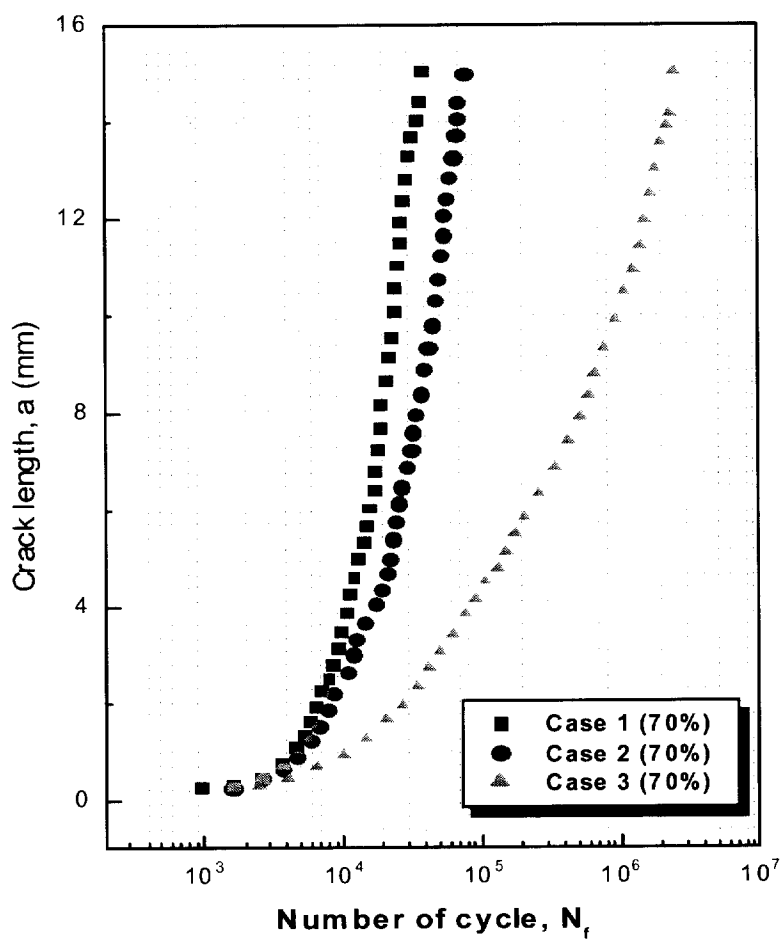


Fig. 20 Relation between crack length and number of cycle  
(70% of  $\sigma_y$ )

각 시험편은 상온에서 동일재료(SM490A)를 사용하였으며, 각각 용접 방법을 달리하여 실험하였다.

50%일 때 피로균열진전길이 10mm지점에서 하중횟수는 Case 1의 경우  $N=692,925$ 회, Case 2의 경우  $N=196,684$ 회, Case 3의 경우  $N=403,784$ 회로써 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.

3가지 경우 모두 초기에는 균열진전의 양상이 유사하게 나타나지만, 하중횟수가  $10^6$ 을 넘어서면서 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 Case 1의 경우는 백플레이트를 대고 용접을 하였으나 Gap을 0으로 하였기 때문에 백비드가 형성되지 못했고, Case 2는 백비드가 형성되었으며 Case 3의 경우는 異面에 1차 용접을 실시한 것이 백비드의 역할을 한다고 볼 수 있으므로, 용접시 백비드의 유무가 용접재의 피로수명에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

#### 4. 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 노치 부위에서 균열이 발생한다.<sup>(6)</sup>

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. 21과 같이 백비드의 용입불량이나 비드면과 모재면의 모서리가 하나의 노치역할을 하여 발생된 것으로 판단된다.

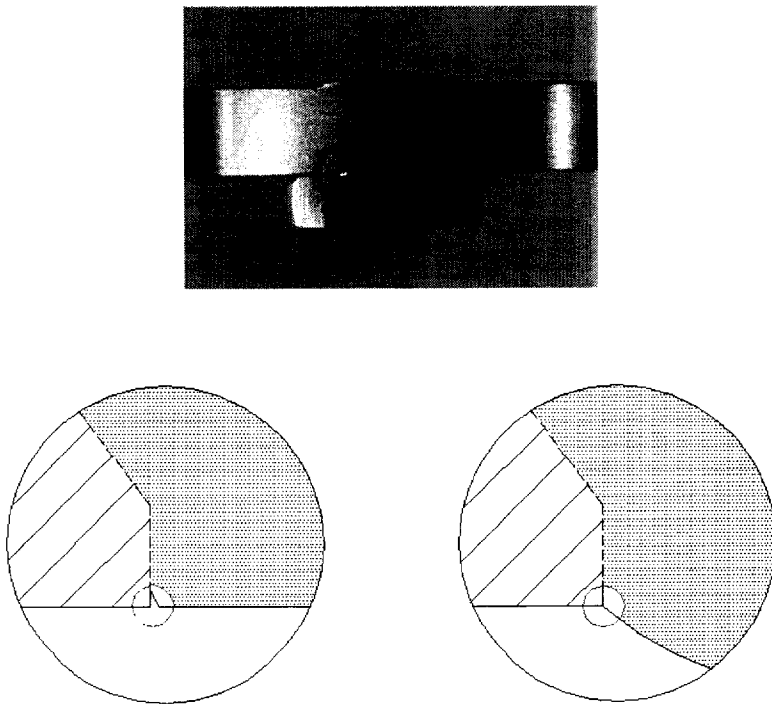


Fig. 21 Notch part of specimen

특히 Case 3의 경우 이면에 용접하면서 발생된 비드가 식으면서 주위에 인장잔류응력을 발생시켜 피로균열진전에 영향을 미친 것으로 판단된다. 용접 잔류응력에 관한 연구는 차후 연구과제로 남겨둔다.

## 4.5 파단면 특성

Fig. 22 ~ Fig. 25는 각각의 Case에 대한 시험편의 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.

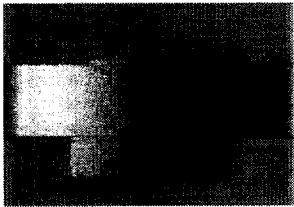
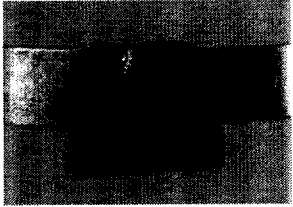
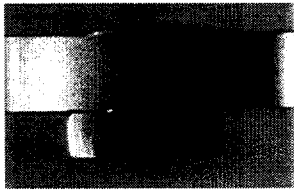
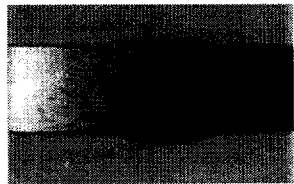
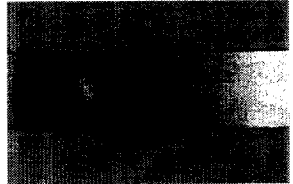
| Specimen | Before Test                                                                         | After Test                                                                           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Case 1   |   |   |
| Case 2   |  |  |
| Case 3   |  |  |

Fig. 22 Fracture part of Case 1, 2, 3

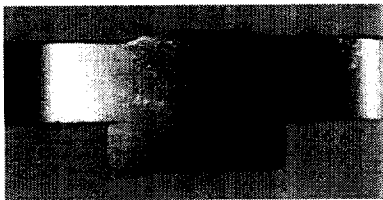
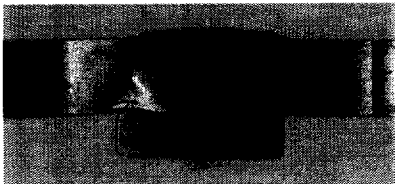
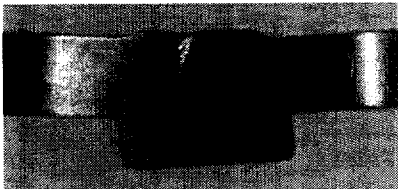
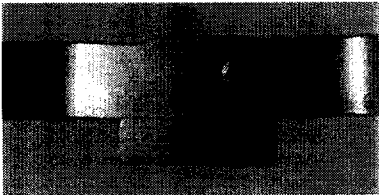
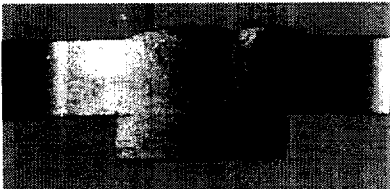
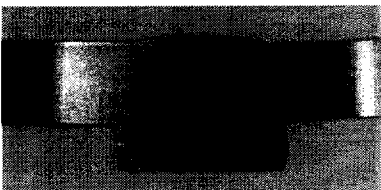
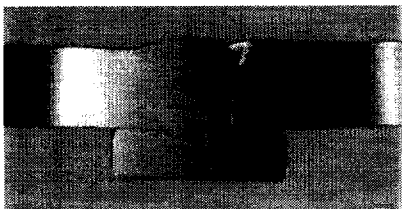
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| 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. 23 Fracture part of Case 1

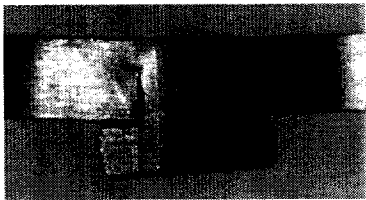
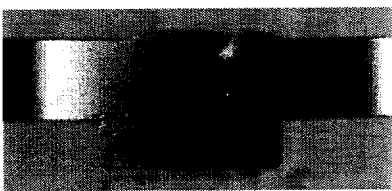
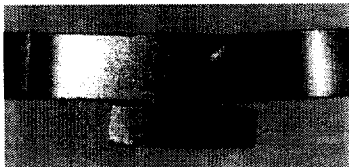
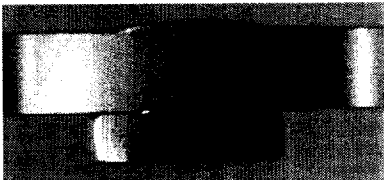
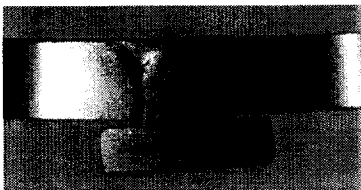
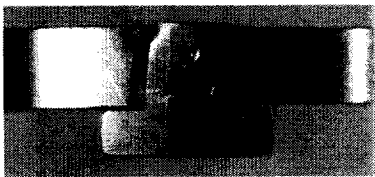
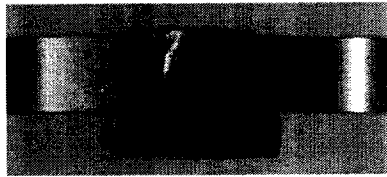
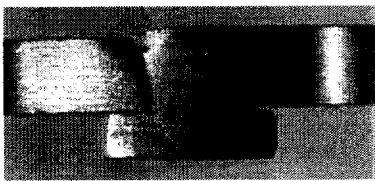
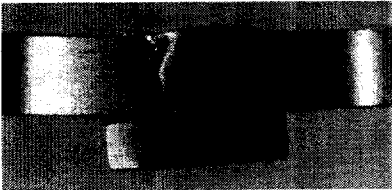
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| 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. 24 Fracture part of Case 2

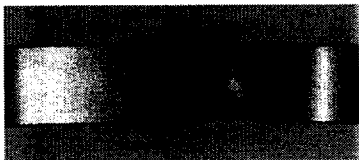
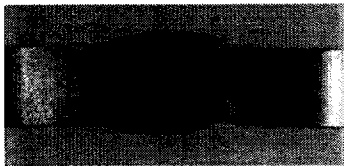
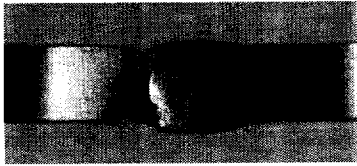
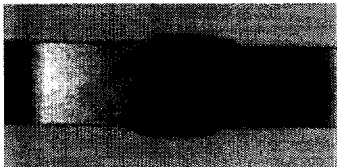
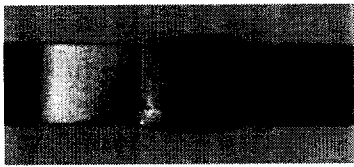
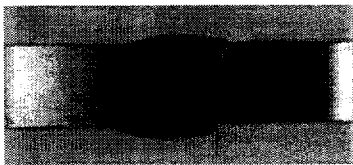
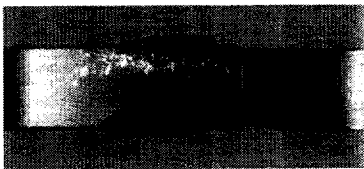
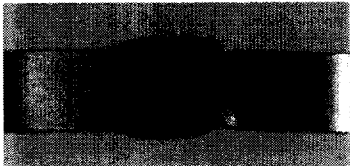
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| Load(70%)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. 25 Fracture part of Case 3

## 제 5 장 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 BUTT(맞대기)용접하고, 각각의 용접법을 달리한 3가지 종류의 시험편에 주파수 10Hz로 상온에서 피로크랙전파시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Fig. 12~15의 응력(S)-사이클(N) 선도에서 Case 2와 Case 3의 경우는 피로한도가 약  $8.2\text{kg}/\text{mm}^2$ 로 비슷한 수치를 나타내지만, Case 1의 경우는 피로한도가 현저히 낮은 약  $7.4\text{kg}/\text{mm}^2$ 로 나타났다. 따라서 Case 1의 용접방법 보다는 Case 2나 Case 3의 용접방법을 사용하는 것이 재료의 수명을 높이는 데 좋을 것으로 판단된다.
2. Fig. 18~20을 통해서도 알 수 있듯이 50%의 경우 용접방법에 상관없이 모든 시험편이  $10^5\text{cycle}$  구간을 넘어서면서 급격한 균열진전을 보이고 있으며 60%는  $10^6\text{cycle}$ 구간, 70%는  $10^4\text{cycle}$ 구간에서 급격한 균열진전을 보이고 있다. 피로균열은 열영향부에서 발생하여 용접부를 관통하게 되는데, 용접 후 용접부의 경도가 높아지게 되므로 취성의 영향으로 인해 급격한 균열진전이 나타나는 것으로 판단된다.
3. 응력 S와 사이클수 N, 크랙길이  $a$ 와 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.

4. 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.
5. 동일한 재료라고 할지라도 용접방법에 따라 피로한도가 다르게 나타남을 확인하였다. 이는 용접시 열에 의한 잔류응력이 용접방법에 따라 차이가 있기 때문으로 생각된다.

## ※ 참고문헌

- (1) 권기태, 건설기계와 시공, 동명사, pp. 11~20, (2002)
- (2) 구병춘, 김재훈, 양승용, 서정원, 정홍채, SM490A 용접 이음부의 피로시험 및 수명예측, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 879, (2004)
- (3) 한승호, 신병천, 이 웅, 최전호, 고장력 강판 부분용입 맞대기 용접부의 피로균열진전수명 평가, Journal of KWS, Vol. 21, No. 1, (2003)
- (4) 석동현, 김지현, 한태진, 건설기계 공학, 동진출판사, pp. 437~444, (1998)
- (5) 방명성, 차영철, 박종건, 신편 재료시험법, 원창출판사, pp. 139, (2002)
- (6) 김창주, 금속기계 재료시험, 학문사, pp. 351, (1993)
- (7) ASTM Standard, E466, (1998)
- (8) 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학, 원창출판사, pp. 119~121, (1992)
- (9) R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, H. O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, Inc., pp. 196~205, (2001)
- (10) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp. 99~125, (1999)
- (11) H. Liebowitz, Fracture. Vol, III, (1971)
- (12) 小林英男, 破壊力學, 東京, 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135, (1993)
- (13) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16, (1989)
- (14) 禹興植 외 2명, 재료파괴공학, 서울, 보성문화사, pp. 147~170, 265~273, (1993)

- (15) S. Han, B. Shin and J. Han, Fatigue Strength and Remaining Life in the Butt Welds Containing Penetration Defects, 5th Pacific Structural Steel Conference, Seoul, Korea, Oct, pp. 153~158, (1998)
- (16) D. H. Ekstrom and W. H. Munse, The Effect of Internal Weld Defects the Fatigue Behavior of Welded Connections, ICHRP No. 137, (1973)
- (17) Y. Paik and Y. Chang, Fatigue Life Assessment of Steel Bridge Butt Joint Weld with Defects, Journal of KWS, pp. 204~212, (2000)
- (18) F. V. Lawrence and Y. Tobe, Fatigue Crack Propagation Strength in Butt Welds Containing Penetration Defects, Welding Research Supplement, pp. 221~225, (1973)
- (19) L. W. Zachary and C. P. Burger, Stress Concentration in Double Welded Partial Joint Penetration Butt Welds, Welding Research Supplement, pp. 77~82, (1976)
- (20) 이수진, 금속재료 규격 데이터 북, 골드출판사, pp. 32~35, (2003)
- (21) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, 청문각, pp. 1~31, (1999)
- (22) 미택엔지니어링, 강릉대학교 금속공학과, 한국기계연구원, 금속손상 진단, 진영사, pp. 49~107, (2002)

# **A Study on Fatigue Life of Weld Method for Excavator Bucket**

**Jae-wook Jung**

**Dept. of Precision Mechanical Engineering,  
Graduate School of Pukyong National University**

## **Abstract**

An attachment part of the construction equipment Frequent claim from the crack occurrence takes especially at the bucket that the fatigue examination execution and changes the welding method at the same material. We executed a fatigue crack propagation experiment and got the conclusion following from the normal temperature to Frequency 10Hz and carried out butt a welding for structure steel of SM490A for 3kinds of specimen which does each weld methods differently.

The fatigue limit of CASE3 to weld a two faces of the specimen all generally is determined to the high but the case of CASE2 put the interval of the 2mm to actual with the back plate and to weld is high.

## Nomenclature

|                        |                                   |
|------------------------|-----------------------------------|
| $da/dN$                | : Fatigue crack growth rate       |
| $S$                    | : Stress                          |
| $\Delta K$             | : Stress intensity factor range   |
| $\Delta \varepsilon_P$ | : Plasticity transformation range |
| $P$                    | : Load                            |
| $L$                    | : Length of specimen              |
| $N_f$                  | : Repeat number of till fracture  |
| $\sigma_K$             | : Critical stress                 |
| $\delta_T^u$           | : Repeat yield point              |
| $\sigma_{yn}^u$        | : Repeat elasticity limit         |
| $\sigma_P^H$           | : Dynamic yield point             |
| $\sigma_w$             | : Time strength                   |

## 감사의 글

설레임을 안고 시작한 대학원 생활도 어느덧 마감할 시간이 다가왔습니다. 돌아보면 정말 살같이 빠른 시간들이었지만 많은 것을 배우고 느낀 시간들이었으며 배움의 끝은 없다는 것을 새삼 실감하기도 하였습니다.

논문이 완성되기까지 많은 분들의 도움이 있었지만, 먼저 본 연구를 수행하기까지 지도와 편달을 아끼지 않으신 지도교수 박경동 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 심사와 평가를 통해 논문의 완성도를 더욱 높여주신 김형자 교수님과 김영대 교수님께도 감사드립니다. 또 신뢰성 있는 논문 데이터를 위해 도움을 주신 공동실습관의 전태언, 홍순혁 선생님께도 감사드립니다.

처음 대학원 생활을 시작할 때 정말 아무것도 몰라 어려워하던 저를 불평한번 없이 가르쳐주고 배려해 주었던 노영석 조교님과 류찬욱 조교님에게도 깊이 감사드립니다. 그리고 대학원 동기로 들어왔으나 늘 형으로서 좋은 충고와 따뜻한 배려를 아끼지 않은 진영범 형과 항상 웃음으로 또 탁월한 일처리 능력으로 저의 대학원 생활을 즐겁고 편안하게 만들어 준 후배 안재필에게도 정말 고마움을 느낍니다. 또 여러 가지 어려운 일이 있을때마다 도움의 손길을 주신 여러 기계공학부 조교님들과 대학원생들에게도 감사드립니다. 이들이 있었기에 제가 대학원 생활을 무사히 즐겁게 보낼 수 있었습니다.

아들하나 잘 되기만 바라시며 추운날씨에도 일터에서 가정에서 수고하신 부모님께 정말 가슴깊이 감사드리며, 그 은혜 평생 잊지 않겠습니다. 그리고 늘 옆에서 사랑과 격려로 용기를 북돋아 준 사랑하는 유리자매에게도 고마움을 느낍니다.

마지막으로 이 모든 기쁨과 감사를 저의 영원한 동역자이자 친구이며 스승 되시는 하나님께 올립니다.