



## 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

햄머피닝처리에 의한 용접이음부의  
피로수명 연장에 관한 연구



2011년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

송 태 원

공 학 석 사 학 위 논 문

햄머피닝처리에 의한 용접이음부의  
피로수명 연장에 관한 연구

지도교수 이 동 욱

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2011년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

송 태 원

송태원의 공학석사 학위논문을 인준함.

2011년 2월 23일



주 심 공학박사 국 승 규 인

위 원 공학박사 장 희 석 인

위 원 공학박사 이 동 욱 인

## 목 차

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 그림 목차                      | iii |
| 표 목차                       | v   |
| ABSTRACT                   | vi  |
| 1. 서 론                     | 1   |
| 1.1 연구배경 및 목적              | 1   |
| 1.2 연구범위 및 방법              | 4   |
| 2. 피로파괴                    | 5   |
| 2.1 피로파괴의 기초               | 5   |
| 2.1.1 반복하중과 수명             | 5   |
| 2.1.2 피로파괴의 파면 특징          | 7   |
| 2.1.3 피로수명                 | 9   |
| 2.1.4 S-N선도                | 10  |
| 2.1.5 피로균열성장               | 11  |
| 2.1.6 표면처리                 | 17  |
| 2.1.7 용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향 | 19  |
| 2.2 용접연결부의 피로설계기준          | 24  |
| 2.2.1 도로교설계기준의 피로설계기준      | 24  |
| 2.2.2 각국의 피로설계기준           | 27  |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 3. 피로시험                    | 28 |
| 3.1 시험체 제작                 | 28 |
| 3.2 햄머피닝                   | 32 |
| 3.3 시험방법                   | 33 |
| 3.4 용접토우부 기하학적형상 및 압축응력 측정 | 36 |
| 3.4.1 용접토우부 비드형상 측정        | 36 |
| 3.4.2 압축응력 측정              | 39 |
| 4. 피로시험 결과                 | 47 |
| 4.1 피로균열 발생과 진전거동          | 47 |
| 4.2 피로수명                   | 50 |
| 5. 결 론                     | 54 |
| 참고문헌                       | 55 |
| 감사의 글                      | 59 |

## 그림 목차

- 그림 2.1 반복하중
- 그림 2.2 평균응력과 평균응력을 나타내는 파라미터
- 그림 2.3 교량강상판 트라프리브의 피로파면
- 그림 2.4 S-N선도
- 그림 2.5 응력비가 피로한계에 미치는 영향
- 그림 2.6 플레이트 거더에서 생기는 용접 잔류 응력의 분포
- 그림 2.7 2점 재하의 반복하중을 받는 플레이트 거더
- 그림 2.8 완전 편진에 대한 응력  $\sigma_m$ 과 변형의 관계
- 그림 2.9 완전 양진에 대한 응력  $\sigma_m$ 과 변형의 관계( $\Delta\sigma_m < \Delta\sigma_Y$ 의 경우)
- 그림 2.10 완전 양진에 대한 응력  $\sigma_m$ 과 변형의 관계( $\Delta\sigma_m \geq \Delta\sigma_Y$ 의 경우)
- 그림 3.1 양측면외거셋 시험편 형상 및 치수
- 그림 3.2 시험체 용접 전경
- 그림 3.3 시험체 열변형 억제 전경
- 그림 3.4 햄머피닝 장비
- 그림 3.5 햄머피닝 방법
- 그림 3.6 피로시험 전경
- 그림 3.7 용접토우부의 기하학적 형상 측정
- 그림 3.8 비드접선각도와 곡률반경 분포
- 그림 3.9 곡률반경 정규분포
- 그림 3.10 압축응력 측정 전경
- 그림 3.11 게이지 부착위치 전경
- 그림 3.12 게이지 부착위치
- 그림 3.13 시험중 햄머피닝 처리 전경

그림 3.14 동적 측정장비로 측정한 압축응력

그림 3.15 정적 측정장비로 측정한 압축응력

그림 4.1 비치마크 생성 일례

그림 4.2 피로 파단면( $\Delta\sigma=200$  MPa)

그림 4.3 a-N선도( $\Delta\sigma=200$  MPa)

그림 4.4 용접토우부의 햄머피닝 전·후의 현미경 사진

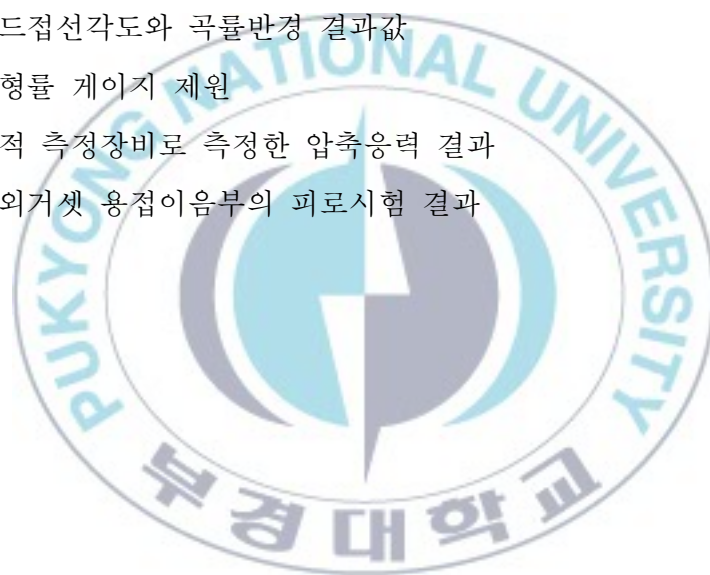
그림 4.5 S-N 곡선

그림 4.6 평균회귀곡선



## 표 목차

- 표 2.1 허용피로응력범위
- 표 2.2 설계응력 반복횟수
- 표 3.1 화학성분
- 표 3.2 기계적 성질
- 표 3.3 용접조건
- 표 3.4 면외거셋 용접이음부의 피로시험 자료
- 표 3.5 비드접선각도와 곡률반경 결과값
- 표 3.6 변형률 게이지 제원
- 표 3.7 정적 측정장비로 측정한 압축응력 결과
- 표 4.1 면외거셋 용접이음부의 피로시험 결과



**A Study on Extending Fatigue Life of Welded Joints  
by using Hammer Peening Treatment**

Tae-Won Song

Department of Civil Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University

**ABSTRACT**

Fatigue damages are beginning to make their appearance as major deteriorations in steel bridges because high strength steels were frequently used welded connections were mainly adopted through weight minimization of steel bridges. The study on the method for reduction of stress concentration in weld bead toes and for introduction of compressive residual stresses as the method for improvement of fatigue strength according to post-process of weld bead toes is actively in progress.

In this paper, fatigue tests were carried out on out-of-plane gusset welded joints and the effect of the hammer peening on the fatigue strength was studied.

To apprehend the geometric shape change of welded toe according to the hammer peening treatment, the flank angle and the curvature radius were measured along with the change of residual stress. As the measurement result of geometric shape, the flank angle showed little change, and the curvature radius increased by 40% when compared with the as-welded specimen. As the measurement result of residual stress, it was found that the tensile residual stress was reduced and the residual

compressive stress was introduced near the toe by the hammer peening treatment.

As the result of fatigue test, the hammer peening specimens showed extending fatigue lifespan with the as-welded specimen in the respective stress range. The fatigue lifespan of hammer peening specimen were about 5 times in 200 MPa stress range, about 3 times in 150 MPa stress range and about 5 times in 100 MPa stress range as high as that of as-welded specimen.



# 1. 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

현재 공용중인 강교량에 발생하는 열화손상으로는 피로와 부식을 들 수 있는데, 최근 사용강재의 강도가 증가하고 교량의 경량화 추세에 따라 용접접합형식의 강교량의 건설이 증가함에 따라 부식보다는 피로가 강교량에 있어서 주된 열화현상으로 대두되고 있다.

용접이음의 피로강도는 용접구조물의 내구성에 영향을 미치며, 용접이음을 하지 않은 강판에 비해 매우 낮다. 용접이음부의 피로강도가 낮은 이유는 용접이음부 부근의 인장잔류응력(tensile residual stress)과 응력집중(stress concentration) 때문이다. 거셋용접이음부에서의 응력집중과 잔류응력은 불가피한 결과이며, 그것은 완전히 제거 되어질 수 없기 때문에 용접부 후처리를 강구하지 않으면 안 된다.

일반적으로 피로강도를 향상시키는 방법으로는 크게 용접지단부의 형상을 개선시킴으로써 용접지단부의 응력집중계수를 저감시키는 방법과 용접부에서의 인장잔류응력을 완화시키거나 압축잔류응력을 도입하는 방법이 있다. 대표적이면서도 가장 용이하게 적용할 수 있는 방법으로는 그라인더 처리, 햄머피닝 등과 같은 기계적인 방법이나 TIG Dressing과 같은 재용접에 의한 후처리방법이 있으며, 이러한 방법들은 대상 구조상세의 용접부 단면형상을 매끄럽게 처리하여 용접토우부에서의 국부적인 응력집중을 저하시켜 피로강도를 향상시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 방법들은 용접부의 형상(용접비드의 향상, 결함의 제거), 잔류응력

상태(인장잔류응력의 제거, 압축잔류응력의 도입) 및 용접이음부의 환경적인 조건들을 향상시킨다.

필렛 용접부의 피로강도 향상에 대한 연구방법 중 후처리에 의한 피로강도 향상에 대한 연구로, 국외의 경우 P.J. Haagensen<sup>(14)</sup>은 Toe Grinding과 Hammer Peening의 조합을 통해 용접 연결부의 피로강도를 약 50~140% 향상시킬 수 있음을 보였고, S J Maddox<sup>(15)</sup>는 Hammer Peening을 통해 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도가 약 200% 상승하였음을 보였으며, Kengo Anami, Chitoshi MiKi<sup>(16)</sup>는 하중비전달형 필렛용접부에 TIG Dressing, 1~3Pass Hammer Peening을 실시하여 용접 그대로-TIG Dressing-1pass Hammer Peening-3pass Hammer Peening순으로 피로강도가 향상됨을 보였다.

국내연구로는 임청권<sup>(34)</sup>등이 필렛용접 이음으로 된 종리브 십자 시험체를 대상으로 TIG Dressing, 1~3pass Hammer Peening을 실시해 용접 그대로의 시험체, TIG Dressing, 1pass Hammer Peening, 1pass Hammer Peening+Grinding, 3pass Hammer Peening의 순으로 피로강도가 향상됨을 보였고, 홍성욱<sup>(19)</sup>등은 하중비전달형 필렛용접부를 대상으로 Grinding을 실시하여  $2 \times 10^6$ 회 피로강도가 약 15% 상승함을 보였으며 정영화<sup>(20)</sup>등은 TIG Dressing을 실시하여 피로강도가 약 11% 상승함을 보였다. 임청권등은 부분용입한 필렛용접이음부와 보통의 필렛용접이음부에 Grinding, 1~3pass Hammer Peening을 실시하여 1~2등급의 피로강도가 향상을 얻을 수 있음을 보였다.

한편, 용접부의 형상제어를 통한 피로강도 향상에 대한 연구로 Nguyen<sup>(17)</sup>등은 잔류응력과 용접부 형상이 맞대기 용접 연결부의 피로 수명에 미치는 영향을 조사하였는데 용접부 형상제어에 의한 맞대기 용접의 피로강도 향상은 용접토우부의 곡률반경을 증가시키거나 프랭크각을 감소

시킴으로써 얻을 수 있다고 하였다. 서정관<sup>(35)</sup> 등은 하중비전달형 필렛용접부의 용접부 형상제어를 통해 피로강도를 향상시킬 수 있음을 보였다.

강교량의 피로내구성 평가는 ASSHTO<sup>(1)</sup>, BS5400<sup>(2)</sup>, EUROCODE<sup>(3)</sup>, JSSC<sup>(4)</sup> 등과 같이 각 나라에서 규정되어 있는 피로설계지침인 피로설계 S-N곡선을 따르고 있다. 이러한 피로설계곡선은 원판을 그대로 사용하여 용접한 용접 그대로의 시험체를 사용하고 있다.

기존의 용접이음의 피로거동 연구로는 본 연구실에서 수행한 면외거셋용접이음의 피로시험<sup>(5)(6)</sup>을 들 수 있다. 본 연구에서는 햄머피닝을 처리하였을 경우 피로수명 향상을 확인하기 위하여 피로시험을 실시하였다. 선행연구의 면외거셋용접이음의 피로시험과 본 연구의 햄머피닝 처리 피로시험을 비교하여 피로수명 연장을 확인 하고 실제 강교의 유지 및 보수에 햄머피닝의 적용을 제시하고자 한다.



## 1.2 연구범위 및 방법

본 연구에서는 선행연구의 용접 그대로의 시험체 피로수명과 햄머피닝처리를 한 시험체에 대한 피로시험을 실시하고 비교하여 용접이음의 피로거동을 검토하고자 한다. 본 연구에서는 피로시험, 압축응력 측정 및 용접토우부에서의 비드접선각도와 곡률반경 측정이 포함된다.

햄머피닝을 실시 전·후에 인상재로 토우부의 형상을 채취하여 용접비드접선각도와 용접토우부의 곡률반경을 측정하여 햄머피닝에 따른 용접토우부의 기하학적 형상 변화를 알아보려고 하였다. 그리고 햄머피닝에 따른 압축응력 도입의 변화를 알아보기 위해 시험전 동적측정장비에 의한 스트레인측정, 시험중 정적측정장비에 의한 스트레인측정으로 압축응력을 측정하였다.

햄머피닝에 따른 피로강도 향상 정도를 정량적으로 평가하기 위해서  $\pm 1000$  kN 용량의 전기유압식 피로시험기를 이용해 인장피로시험을 실시하였다. 피로시험시 작용하중은 정현파의 일정진폭하중을 이용하였으며, 응력범위는 100~200 MPa의 범위에서 시험을 실시하였고, 하한치 하중은 10 kN으로 고정하였다. 시험체의 파단에 대한 최대반복횟수는  $10^7$  회까지 실시하였다. 하중재하속도는 응력범위의 크기에 따라 5~7 Hz 정도로 하였다. 또한 다이마킹(dye marking)을 실시하여 균열발생위치 및 초기균열크기를 측정하고자 하였고, 일정 반복횟수마다 최대하중을 고정시키고 반복하중의 진폭을 반감시켜 비치마크(beach marking)를 도입하여 피로균열 발생 및 성장 과정을 정량적으로 평가하고자 하였다.

## 2. 피로파괴

사용하는 동안의 기계부품 및 구조물의 용접부 부근에 생기는 균열은 작은 하중이 반복하여 발생하는 것이 많다. 이렇게 재료의 파괴는 극한강도를 초과하는 응력에 의해서 뿐만 아니라 극한강도보다 낮은 응력의 반복적인 작용에 의해서도 발생하며, 이 현상을 피로파괴(fatigue failure)라고 한다.

### 2.1 피로파괴의 기초

#### 2.1.1 반복하중과 수명

재료 및 구조부재의 피로특성의 평가로서는 보통 그림 2.1과 같은 단조로운 반복하중으로 피로시험을 실시한다. 하중  $P$ 의 특성을 나타내는 파라미터로서 그림에 표시한 최대하중  $P_{\max}$ , 최소하중  $P_{\min}$ , 하중진폭  $P_r = (P_{\max} - P_{\min})/2$ , 하중범위(load range)  $\Delta P$  또는  $P_R = 2P_r$ , 평균하중  $P_m = (P_{\max} + P_{\min})/2$ , 하중비(load ratio)  $R = P_{\min}/P_{\max}$  등이 있다. 구조부재의 시험에서는 하중 자신에도 의미가 있지만 피로도 국부적인 응력 및 변형률의 조건에서 일어나므로 반복하중을 응력  $S$  및 변형률  $\epsilon$ 으로 변환하여 시험결과를 정리하는 것이 보통이다.

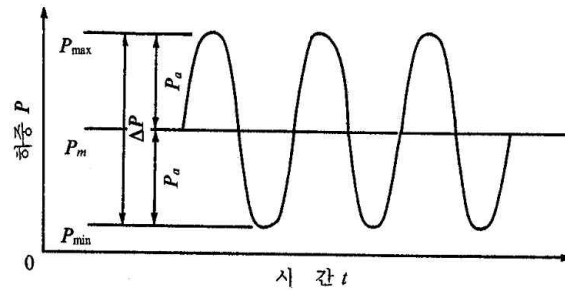


그림 2.1 반복하중

가장 중요한 파라미터는  $\Delta S(\Delta \epsilon)$ 이고, 다음으로 평균응력의 영향도 크다. 평균응력을 나타내는 파라미터로서는 응력비  $R = S_{\min}/S_{\max}$  및 진폭비  $A = S_m/S_e$ 가 이용된다. 응력파형의 예를 그림 2.2에 나타내며,  $R \geq 0$ 를 편진(片振),  $R < 0$ 를 양진(兩振)이라 한다. 그림속의 (a)는 부분편진, (b)는 완전편진( $R=0$ ), (c)는 양진, (d)는 완전양진( $R=-1$ ), (e)는 압축의 완전편진, (f)는 압축편진을 나타낸다.

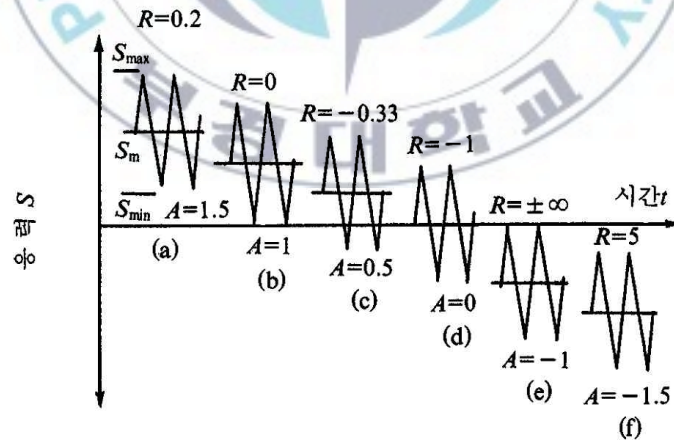


그림 2.2 평균응력과 평균응력을 나타내는 파라미터

### 2.1.2 피로파괴의 파면 특징

재료의 종류, 부재의 응력집중도, 파괴시의 하중조건, 환경에도 의존하지만 피로파괴의 파면은 육안으로 용이하게 식별할 수 있는 것이 많다. 균열발생부의 파면은 적고, 육안으로는 매끈하고 무특징이지만 파면의 대부분을 차지하는 균열전파부는 그림 2.4<sup>(18)</sup>에 나타내는 바와 같이 패각모양(貝殼模様) 혹은 비치마크(beach mark)라 부르는 피로파면 특유의 무늬모양이 잘 나타난다. 무늬모양의 선은 어느 시점에서 균열의 선단을 나타내고, 응력사이클의 인장응력성분이 클수록 균열의 성장이 빠르기 때문에 장치의 기동정지 등 부하의 변동마다 성장속도의 변화 및 정류(停留:성장정지)가 일어나기 때문에 선의 간격이 조밀하게 생긴 것이 비치마크이다.

이 비치마크는 하중 변화와 진동수 변화 등에 의해서 균열 정지 기간 동안 생긴 파단면의 산화 때문에 생긴다. 또 어느 지점에서 발생한 균열이 다른 쪽으로 진전하면 그 경계는 타원 모양이 형성되고 이들 파단면의 특징을 이용하여 균열의 시작점을 추측할 수 있다. 피로파괴는 응력이 집중하게 되는 노치나 금속 조직 중에 있는 비금속 개재물 등의 결함에서부터 일반적으로 시작된다.

응력 사이클에 압축성분이 있으면 파면이 맞부딪혀서 비치마크가 나타나지 않는 것도 있다. 실제 구조물에서는 기름 및 수분의 침투에 의한 더럽혀짐 및 산화에 의하여 무늬모양이 되는 것도 있다. 최종적인 파면은 연성파괴 및 취성파괴를 일으킨 곳이고 분명히 전파면과 다르게 나타난다. 이들 특징으로부터 비치마크를 역으로 찾아 피로파괴의 기점을 알아내는 방법은 파괴시의 원인 조사에 자주 이용된다.



그림 2.3 교량강상판 트라프리브의 피로파면



### 2.1.3 피로수명

반복하중을 받으면 우선 금속의 결정 조직내에 미끄럼이 생겨 연화 및 경화가 일어나고 표면의 결정에 미세적인 피로균열이 형성된다. 그 균열은 반복하중에 의해 성장 즉 전파하여 가시균열(可視龜裂)이 되고 결국 파단한다. 이러한 현상이 일어날 때까지의 반복수를 피로수명 또는 수명이라 하며 다음과 같이 정의하는 수명이 잘 이용되고 있다.

(1) 균열발생수명  $N_i$  (number of cycles to crack initiation)

새로운 균열이 형성되든지 별도의 원인으로 생긴 균열 등의 응력집중부로부터 피로균열이 성장을 개시할 때까지의 반복횟수. 균열발생의 정의로서는 균열길이가 0.2 ~ 0.5mm가 된 시점을 가리키는 것이 많다. 미세적인 길이를 채택하는 경우도 있고 실구조물에서는 더욱 큰 균열길이를 채택하는 것도 있다.

(2) 파단수명  $N_f$  (number of cycles to failure)

시험편이 파단할 때까지의 반복횟수. 균열이 어느 정도 전파하여 시험편의 하중 부담능력이 한계치보다도 저하하였다고 인정되는 시점 및 취성파괴를 일으키는 한계균열 길이에 도달하는 시점을 채택하는 것도 있다. 단순히 수명이라고 할 때는  $N_f$ 를 가리키는 것이 많다.

(3) 전파수명  $N_p$  (propagation life :  $N_p = N_f - N_i$ )

균열이 발생하고 나서 시험편이 파단할 때까지의 반복횟수.

## 2.1.4 S-N선도

재료 및 구조부재의 피로시험 결과로부터 횡축에 수명을, 종축에 응력의 범위, 진폭, 최대치 등을 잡아 플롯하고 회귀곡선을 만들어 정리한다. 이것을 S-N선도라 부른다. S-N선도는 그림 2.3에 나타내는 바와 같이 양축 모두 대수를 이용하고 직선으로 정리하는 것이 많다. 강철등 제한된 금속재료에서는  $2 \sim 5 \times 10^6$ 사이클 이상의 수명에서는 곡선이 수평이 된다. 이때의 응력범위 및 진폭을 피로한도 또는 피로한이라 한다. 그 이하의 응력범위이면 수명이 무한대인 것을 의미한다. 알루미늄합금 등 대부분의 재료에서는 피로한은 나타나지 않고 파선과 같은 경사가 완만하게 되면서 하향을 계속한다. 강에서도 뾰족한 노치가 있으면 피로한은 나타나지 않는다. 곡선상에서 어떤 수명에 대한 응력의 범위 및 진폭을 읽을 수가 있고 N사이클의 수명에 대한 응력의 범위  $\Delta S_N$ 은 N사이클의 시간강도(fatigue strength at N cycles)라 한다. 수명이 짧은 경우와 매우 긴 경우의 현상이 다르고 그 사이에 현상이 급격하게 천이(遷移)하지는 않지만 편의상  $10^5$ 사이클을 경계로 하여 그 이하인 수명의 영역을 저사이클피로, 그 이상인 수명의 영역을 고사이클피로라 한다.

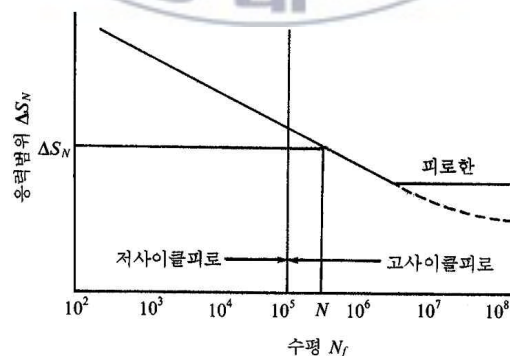


그림 2.4 S-N선도

### 2.1.5 피로균열성장

균열을 갖고 있거나 초기단계부터 균열이 성장하는 구조부재의 수명은 하한계 균열성장률에 의해 지배된다고 할 수 있다. 그러므로, 내하력시험이나 비파괴시험을 실시하여 공용에 앞서서 허용가능한 균열의 상대적 크기와 분포에 관한 정보를 파악하는 것으로 구조물의 수명을 추정할 수 있다. 그러나 이러한 시험은 보통 실제의 균열 크기를 평가하는 것보다는 발견할 수 없는 불연속면의 크기에 대한 상한계를 결정하기 위해 사용되며, 이러한 상한계는 시험의 최대분해능력에 의해 좌우된다. 따라서, 구조부재의 최소피로수명을 결정하기 위해서는 적용된 시험방법에 의해 발견할 수 없는 가장 큰 결함이 이 부재에 포함되고 있다고 가정하는 것이 합리적이다.

이와같이 구조부재들의 수명은 종국적으로 재료의 피로균열 성장거동에 의해 결정되므로, 구조부재들의 최소피로수명을 예측하고 안전조사기간을 설정하기 위해서는 피로균열성장률을 이해하는 것이 필요하며, 이러한 피로균열성장 연구에 대해서 가장 좋은 접근방법은 파괴역학 개념에 기초하는 것이다. 대부분의 피로균열성장시험은 일정진폭변동하중하에서 피로균열을 갖고 있는 시험체를 사용하여 실시한다. 이 피로시험에서는 균열 길이의 점진적인 증가를 측정하고, 균열증가에 따른 하중반복횟수를 기록하여 그림 2.5와 같이 하중반복의 전체횟수  $N$ 과 그에 따른 균열 길이  $a$ 로서 그래프에 나타내는 것이 일반적이다.

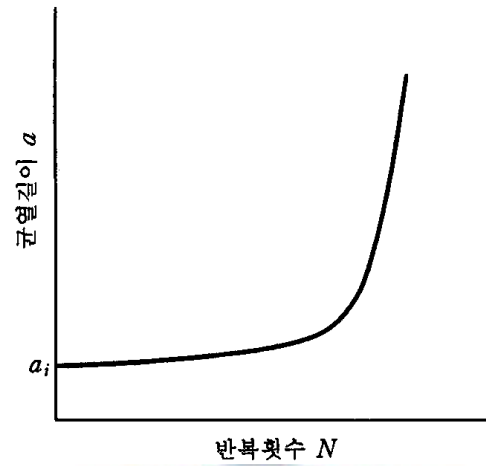


그림 2.5 일정진폭하중하에서의 피로균열 성장 곡선의 개략도

그림 2.6의 반복하중변동폭의 증가가 동일한 기하학적 형태를 갖는 시험체의 피로수명을 단축시키는 것을 나타내고 있다. 또, 그림 2.7에서와 같이 고정된 일정진폭변동하중을 받는 시험체의 피로수명은 초기균열의 길이가 증가할수록 짧아짐을 확인할 수 있다. 그러므로, 임의의 일정진폭 반복응력하에서의 대부분의 피로수명은 균열길이가 매우 작을 때 길어진다.  $N$ 과  $a$ 에 관한 여러 형태의 관계곡선은 반복하중의 크기를 변화시키거나 초기균열의 크기를 변화시키는 것에 의해 얻을 수 있다. 이들 곡선들에 있어서  $\Delta K_I$ 이 균열길이와 반복하중 크기의 변화효과를 고려한 하나의 변수이므로 데이터가 하중반복횟수당의 균열성장률  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K_I$ 에 의해 표현될 때 하나의 곡선으로 나타낼 수 있다.

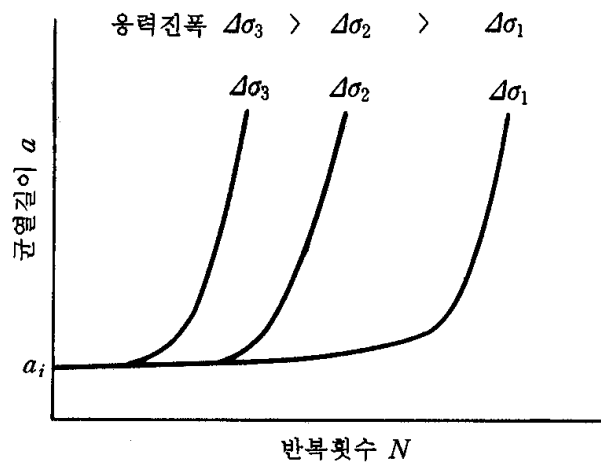


그림 2.6 반복하중 크기가 균열성장에 미치는 영향

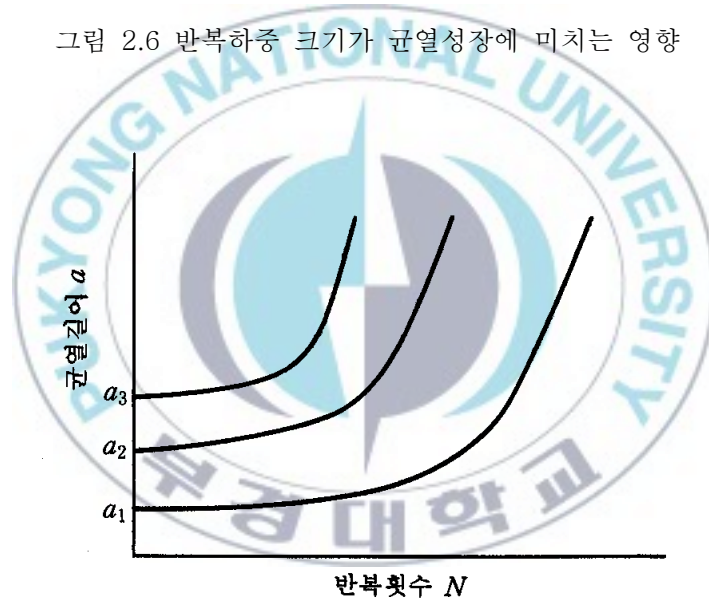


그림 2.7 초기균열 길이가 균열성장에 미치는 영향

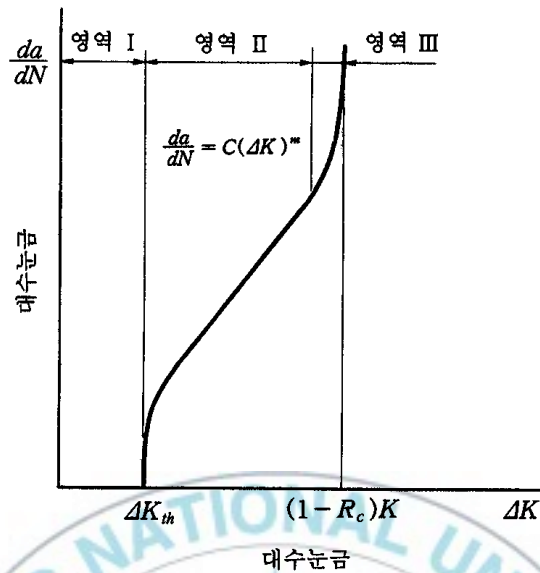


그림 2.8 강제에서의 피로균열성장의 개략도

일반적으로 피로균열성장 데이터는 하중반복횟수당의 피로균열성장률  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\sqrt{K_I}$ 의 관계를 대수 그래프에 나타내는 것이 가장 일반적이다. 강제의 피로균열 성장거동은 그림 2.8과 같이 3개의 영역으로 나눌 수 있다. 영역 I에서의 거동은 ‘피로 하한값’을 나타내는 것으로 작용되는 반복응력 범위에 대한 응력확대계수범위가 하한값  $\sqrt{K_{th}}$  이하인 경우, 반복응력하에서는 균열이 성장하지 않는다. 영역 II는  $\sqrt{K_{th}}$  이상의 응력확대계수범위를 받는 경우에 발생하는 피로균열성장거동을 나타내는 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\sqrt{K})^m \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서,  $a$  : 균열길이

$N$  : 반복횟수

$\Delta K$  : 응력확대계수의 범위

$C, m$  : 상수

영역 III에서 단위 반복횟수당 피로균열성장은 영역 II에서 예측되는 피로균열성장속도 보다 더 크게 나타난다. 시험결과에 의하면, 이 영역에서 완전인장하중(즉,  $\Delta K = K_{\max}$ )하에서 피로균열 성장률이 가속시키는 균열선단변위  $\delta_T$ 의 특정값과 그에 따른 응력확대계수값  $\Delta K_T$ 로 다음과 같이 주어진다.

$$\delta_T = \frac{K_T^2}{E\sigma_s} = 0.04\text{mm} \dots\dots\dots (2.2)$$

여기서  $K_T$  : 피로균열성장의 가속이 시작될 때의 응력확대계수 크기

$E$  : 탄성계수

$\sigma_s$  : 항복강도(0.2% offset) (자료에 따르면  $K_T$ 는  $\sigma_s$ 보다는 항복강도와 인장강도의 평균값으로 나타내어지는 유동응력  $\sigma_f$ 를 사용할 때 더 정확히 예측될 수 있음을 알 수 있다.)

영역 II에서 영역 III으로의 천이를 결정하는 피로균열성장의 가속은 파괴면에 피로 줄무늬를 남기는 하한계 균열확장 메커니즘과 연성파단 메커니즘의 중첩에 의해 기인한 것으로 나타난다. 이 연성파단은 균열선단에서의 변형률이 임계값에 도달할 때 발생하므로 영역 II에서 영역 III으로의 피로균열성장률 천이는  $K_{\max}$ 과 응력비  $R$ 에 의존한다. 식 (2.2)는 피

로균열성장률 변화의 발생에 따른 응력확대계수값  $K_T$  (완전인장에 대해서는  $\infty K_T$ )를 구하는 데 사용되며, 임계파괴인성값  $K_{Ic}$  또는  $K_{IIc}$ 는 식 (2.2)로 계산된  $K_T$  값보다 더 큰 값을 가지는 천이개시에 대응하는  $K_T$  값은, 그림 2.8의 영역 II에서 영역 III으로의 천이점에 대응된다. 피로균열성장률의 가속은 재료의  $K_{Ic}$  또는  $K_{IIc}$ 가  $K_T$ 보다 작을 때, 임계응력확대계수  $K_{Ic}$  보다 약간 낮은 응력확대계수값에서 발생한다.



## 2.1.6 표면 처리

재료 표면 위에 자국, 흠, 그리고 기계 가공흔적들은 부재의 기하학적 특성으로 인하여 이미 존재하고 있는 응력에 응력집중을 부가시킨다. 고강도강과 같은 균일하며 미세한 결정립으로 구성된 재료는 주철과 같이 조대화된 결정립으로 된 재료보다 거친 표면마무리에 의하여 더 큰 영향을 받는다.

피로균열은 거의 항상 자유표면에서 시작하기 때문에, 표면처리는 피로수명에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 표면처리는 도금처리, 열처리, 기계적 처리로 구별될 수 있다. 이 모든 경우에 피로수명에 대한 영향은 주로 잔류응력에 기인한다.

잔류응력을 검토하기 위하여 다양한 굽힘모멘트를 받고 있는 노치 없는 보를 고려한다(그림 2.9). 굽힘모멘트의 이력은 그림 2.9d와 같다. 재료가 탄성-완전소성(elastic-perfectly plastic)이라고 가정하면 보의 맨 위 표면에서의 응력이력은 그림 2.9e와 같다.

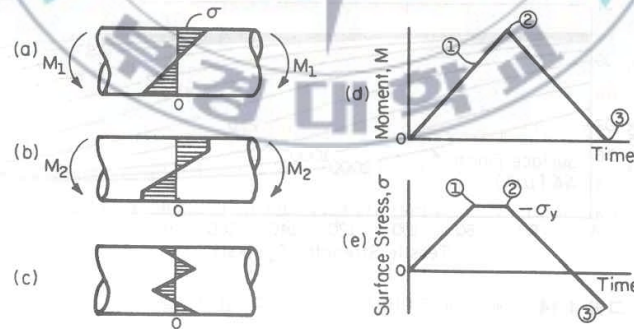


그림 2.9 굽힘하의 노치가 없는 보의 잔류응력

잔류응력의 다른 예는 그림 2.10에서와 같이 축하중하의 노치가 있는 부재이다. 하중이력은 초기 과대인장하중 이후의 완전양진 반복하중(fully

reversed cycles load)을 포함하고 있다(그림 2.10d).

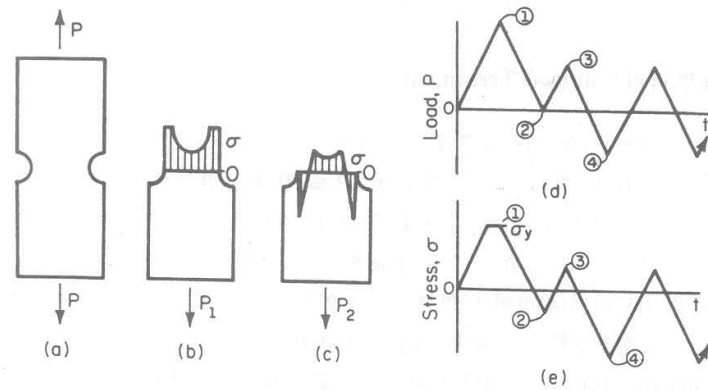


그림 2.10 축하중의 노치가 있는 부재의 잔류응력

하중이 완전히 역전되는 동안 노치선단에서의 응력은(여기서 피로균열이 시작할 것이다) 어떤 압축응력값을 기준으로 주기적으로 변화한다. 노치선단 재료의 잔류응력은 같은 크기의 외부에서 작용하는 압축평균응력과 같은 효과를 가지며 이것은 주어진 교번응력 수준에서 수명을 증가시킬 것이다. 이와 같은 사항은 작용하중 때문에 생기는 평균응력이 아니라 노치가 있는 부재의 잔류평균응력임을 명시하여야 한다.

### 2.1.7 용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향

용접잔류응력이 피로 강도에 미치는 영향에 대해 플레이트 거더의 피로 시험을 이용하여 설명한다. 플레이트 거더에서 발생하는 용접잔류응력 분포를 모식적으로 그림 2.11에 나타낸다. 분포 형상은 필릿 용접 근방에서 인장 응력으로 되며, 필릿 용접에서 떨어진 곳에서 압축 응력으로 된다. 잔류 응력은 외적 구속이 아니고 외력이 작용하지 않은 상태에서는 그 자신으로 평형이 된다.



그림 2.12에 나타낸 바와 같이 용접 잔류 응력이 존재하는 플레이트 거더가 2점 재하의 반복 하중을 받는 경우를 생각한다. 웨브와 하부 플랜지를 연결하는 필릿용접의 피로 균열을 일으키는 응력은 구조 역학에 의해서 산정된 하부 플랜지 응력으로 다음 식으로 주어진다.

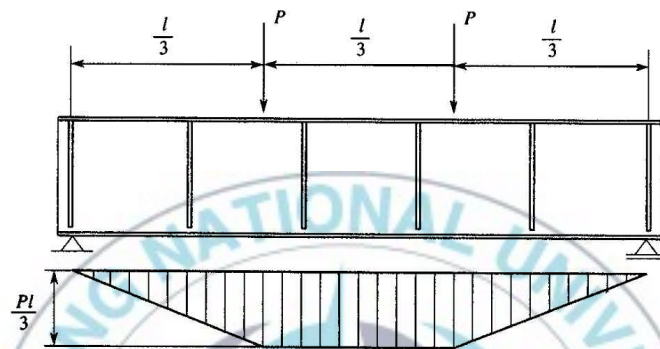
$$\sigma_w = \frac{P l}{3 W} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서,  $\sigma_x$  : 하부 플랜지 응력

$P$  : 재하 하중

$l$  : 플레이트 거더의 지간 길이

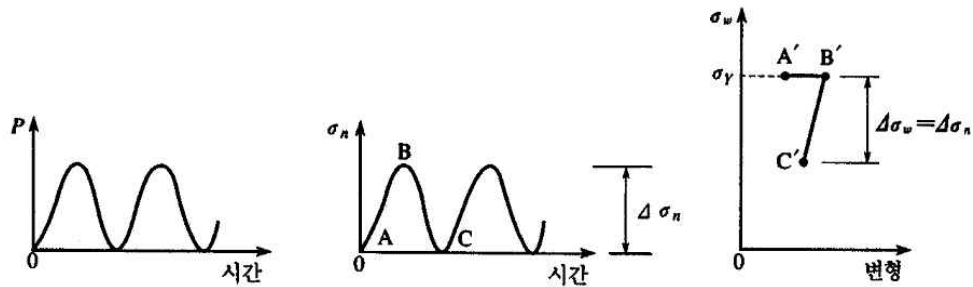
$W$  : 플레이트 거더의 단면 계수



휨 모멘트

그림 2.12 2점 재하의 반복 하중을 받는 플레이트 거더

그림 2.13 (a)에 나타낸 바와 같이 하중이 완전 편진으로 주어진 경우를 생각한다. 이 경우 그림 2.13 (b)에 나타낸 바와 같이 하부 플랜지에 발생하는 공칭 응력  $\sigma_x$ 도 완전 편진으로 되므로 그 응력비  $R_x$ 은 0이다.



(a)  $P$ 와 시간의 관계      (b)  $\sigma_n$ 과 시간의 관계      (c)  $\sigma_w$ 와 변형의 관계

그림 2.13 완전 편진에 대한 응력  $\sigma_w$ 와 변형의 관계

필렛 용접 위치의 하부 플랜지의 인장 잔류 응력이 항복 응력  $\sigma_Y$ 에 도달한 것으로 가정한다. 이때 그림 2.13 (b)에 나타낸 공칭 응력  $\sigma_n$ 의 변화에 대한, 필렛 용접 위치의 하부 플랜지 응력  $\sigma_w$ 와 변형의 관계는 그림 2.13 (c)에 나타낸 바와 같이 된다. 하중이 재하되지 않았을 때의  $\sigma_n$ 는  $\sigma_Y$ 와 동일하다. A에서 B까지  $\sigma_n$ 이 변화할 때  $\sigma_w$ 는  $\sigma_Y$ 를 유지한 채 변형이  $A'$ 에서  $B'$ 로 증가한다. B에서 C까지  $\sigma_n$ 이 변화할 때  $\sigma_w$ 는  $B'$ 에서  $C'$ 로 변화한다. 이후의  $\sigma_n$ 의 변화에 대해  $\sigma_w$ 는  $B'$ 와  $C'$ 사이를 변동한다.  $\sigma_w$ 의 응력 범위  $\Delta\sigma_w$ 는  $\sigma_n$ 의 응력범위  $\Delta\sigma_n$ 과 동일하다. 즉,

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_n \quad (2.2)$$

그리고 응력  $\sigma_w$ 의 응력비  $R_w$ 는 다음 식으로 주어진다.

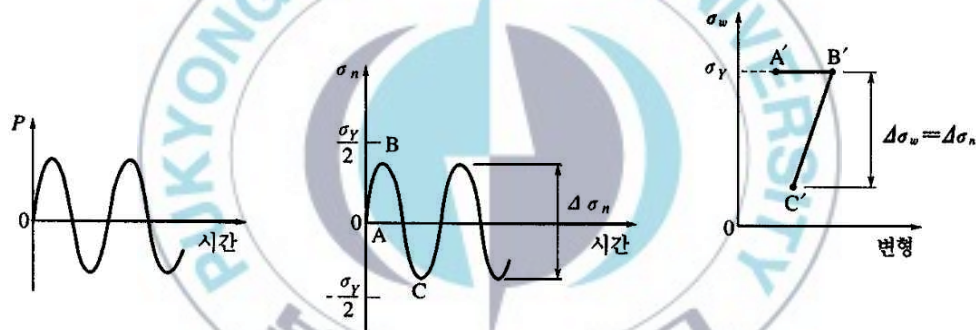
$$R_w = \frac{\sigma_Y - \Delta\sigma_w}{\sigma_Y} = 1 - \frac{\Delta\sigma_w}{\sigma_Y} \quad (2.3)$$

공칭 응력의 응력비  $R_n$ 이 0이더라도 필렛 용접 위치의 응력비  $R_w$ 는 0보다 크다.

다음에 그림 2.14 (b)에 나타낸 바와 같은 완전 양진의 경우를 생각한다. 단, 공칭응력  $\sigma_n$ 의 진폭은  $\sigma_Y/2$ 보다 작은 것으로 한다. 이 경우  $\sigma_w$ 은

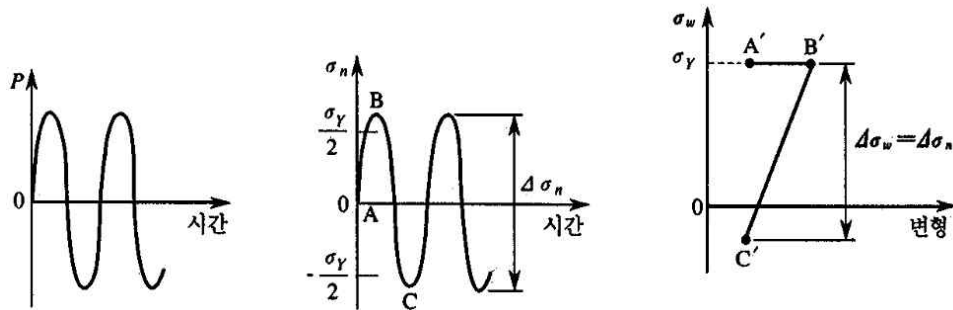
압축응력으로 되는 부분이 발생하는데 그림 2.14 (c)에 나타낸 바와 같이 필릿 용접 위치의 하부 플랜지 응력  $\sigma_w$ 는 응력의 전체 부분이 인장 응력 상태로 된다.  $\sigma_w$ 의 응력 범위와 응력비는 각각 식(2.2)와 식(2.3)으로 주어진다.  $\sigma_w$ 의 응력비  $R_w$ 은 -1이지만  $\sigma_w$ 의 응력비는 0보다 크다.

일반적으로 압축 응력은 균열면을 닫으므로 피로 균열의 진전에 기여하지 않는다. 따라서 압축 응력 부분을 제거하여도 좋으리라고 생각하기 쉽다. 그러나 피로 균열이 존재하는 위치에서는 용접에 의한 인장 잔류 응력 때문에 응력의 전체 부분이 인장 응력 상태에 있다. 그래서 그 응력 범위는 공칭응력의 압축응력을 포함한 범위와 동일하다.



(a)  $P$ 와 시간의 관계 (b)  $\sigma_n$ 과 시간의 관계 (c)  $\sigma_w$ 와 변형의 관계  
그림 2.14 완전 양진에 대한 응력  $\sigma_w$ 와 변형의 관계( $\Delta \sigma_n < \Delta \sigma_y$ 의 경우)

완전 양진에서 공칭 응력  $\sigma_w$ 의 진폭이  $\sigma_y/2$ 를 초과하는 경우에는 그림 2.115 (c)에 나타낸 바와 같이  $\sigma_w$ 의 일부가 압축 응력으로 된다. 그러나 이 경우도  $\sigma_w$ 의 응력 범위로서  $\sigma_w$ 의 압축 응력을 포함한 응력 범위  $\Delta \sigma_w$ 을 이용하면 피로 수명을 안전측으로 평가할 수 있다.



(a)  $P$ 와 시간의 관계      (b)  $\sigma_n$ 과 시간의 관계      (c)  $\sigma_w$ 와 변형의 관계  
그림 2.15 완전 양진에 대한 응력  $\sigma_w$ 와 변형의 관계( $\Delta\sigma_n \geq \Delta\sigma_Y$ 의 경우)

강교 부재의 용접 이음부의 응력 상태는 식(2.2)와 식(2.3)으로 나타낼 수 있다. 용접 이음부의 응력 범위는 공칭 응력의 응력 범위에 동일하고 응력비는 용접에 의한 인장 잔류 응력 때문에 공칭 응력의 응력비보다 높게 된다.

일반적으로 소형 시험체에서 주어진 피로 강도는 실물 크기의 보 시험편에서 주어진 피로 강도보다 크게 된다. 이것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 소형 시험편의 용접 이음부에서 생기는 인장 잔류 응력은 실물 크기의 보 시험체의 용접 이음부에서 발생하는 인장 잔류 응력만큼 크지 않다. 따라서 소형 시험편의 용접 이음부의 응력비는 실물 크기의 보 시험체의 용접 이음부의 응력비보다 작다. 앞의 절에서 서술한 바와 같이 응력비가 낮은 피로 시험에서 주어진 피로 강도는 응력비가 높은 피로 시험에서 주어진 피로 강도보다 크다. 따라서 소형 시험편에서 주어진 피로 강도는 실물 크기의 보 시험편에서 주어진 피로 강도보다 크게 된다. 소형 시험편에서 주어진 피로 강도는 실제 교량의 피로 강도를 안전측으로 평가하지 않는다.

## 2.2 용접연결부의 피로설계기준

강교량의 피로파괴를 방지하기 위해 각국에서는 설계기준에 피로설계조항을 두고 있다. 현재 피로설계조항을 제시하고 있는 기준으로는 도로교설계기준과 미국의 AASHTO LRFD시방서 이외에도 일본강구조협회의 피로설계지침, 유럽의 EUROCODE No. 3, 영국의 BS 5400의 Part 10, 그리고 독일의 DIN 18 809 등이 있다.

### 2.2.1 도로교설계기준의 피로설계기준

도로교설계기준의 허용응력설계법 피로설계기준은 미국 AASHTO 시방서의 피로설계기준을 그대로 채택한 것으로, 응력-수명 기법을 이용한 선형피로손상도에 근거하여 부재등급별로 사용기간중에 예상되는 응력범위의 반복회수에 따른 허용피로응력범위를 제시하고 있다. 여기서 응력범위는  $\Delta\sigma$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.4)$$

$\sigma_{\max}$  : 최대응력

$\sigma_{\min}$  : 최소응력

도로교설계기준의 본 조항에서는 구조상세범주와 반복회수에 따른 허용피로응력범위와 작용하중에 의한 최대응력범위의 반복회수를 산정하는 기준에 대하여 다음과 같이 규정하고 있다.

(1) 허용피로응력범위

어떠한 경우에도 반복응력을 받는 부재나 이음부의 최대응력이 기본허용응력의 범위를 초과하지 않아야 하며, 발생하는 응력범위도 표 2.1에 규정된 구조상세별 반복회수에 따른 허용피로응력범위를 초과하지 않아야 한다고 규정하고 있다. 또한 허용피로응력범위는 표에서 보는 바와 같이 단재하경로 구조와 다재하경로 구조로 구분하여 제시하고 있다.

표 2.1 허용피로응력범위

| 상 세<br>범 주      | 다재하경로 구조 <sup>1)</sup>                       |      |       |                  | 단재하경로 구조 <sup>2)</sup> |      |                  |                  |
|-----------------|----------------------------------------------|------|-------|------------------|------------------------|------|------------------|------------------|
|                 | 허용응력범위, $f_{\text{fat}}$ (MPa) <sup>3)</sup> |      |       |                  |                        |      |                  |                  |
|                 | 10만회                                         | 50만회 | 200만회 | 200만회<br>이상      | 10만회                   | 50만회 | 200만회            | 200만회<br>이상      |
| A               | 442                                          | 260  | 168   | 168              | 351                    | 203  | 168              | 168              |
| B               | 344                                          | 203  | 126   | 112              | 274                    | 161  | 112              | 112              |
| B'              | 274                                          | 161  | 101   | 84               | 218                    | 126  | 77               | 77               |
| C               | 250                                          | 147  | 91    | 70               | 196                    | 112  | 70               | 63               |
|                 |                                              |      |       | 84 <sup>4)</sup> |                        |      | 84 <sup>4)</sup> | 77 <sup>4)</sup> |
| D               | 196                                          | 112  | 70    | 49               | 154                    | 91   | 56               | 35               |
| E <sup>5)</sup> | 154                                          | 91   | 56    | 31               | 119                    | 70   | 42               | 16               |
| E'              | 112                                          | 64   | 40    | 18               | 84                     | 49   | 28               | 9                |
| F               | 105                                          | 84   | 63    | 56               | 84                     | 63   | 49               | 42               |

주 : 1) 한 부재의 파괴로 인하여 전체적인 파괴가 일어나지 않도록 한 구조물

2) 한 부재의 파괴만으로 전체 구조가 붕괴되는 구조물

3) 응력범위는 최대응력과 최소응력과의 대수차를 의미한다.

4) 거더 복부판과 플랜지의 수직보강재 용접의 경우

- 5) 단재하경로 구조물의 경우 플랜지의 두께가 2cm 이상이면 부분 용접한 덮개판을 사용하지 않는다.

## (2) 하중횟수

설계시 최대응력범위의 반복회수는 교통량과 하중조사 및 특별한 고려 사항이 없는 경우에는 표 2.2에 따른다고 규정하고 있다. 또한 허용피로 응력은 활하중이나 풍하중을 포함하는 하중조합에 대해 적용되며, 사하중과 풍하중의 조합에 따른 응력반복회수는 특수한 경우를 제외하고는 10만회로 한다고 규정하고 있다.

표 2.2 설계응력 반복횟수

| 도로의 종류              | 주부재(종방향) |      | 윤하중을 받는 횡방향<br>부재와 상세부 |
|---------------------|----------|------|------------------------|
|                     | 트럭하중     | 차선하중 | 트럭하중                   |
| 고속도로, 국도 등<br>주간선도로 | 200만회    | 50만회 | 200만회 이상               |
| 기타도로                | 10만회     | 10만회 | 50만회                   |

### 2.2.2 각국의 피로설계기준

일본강구조협회의 피로설계지침에서는 변동응력에 대해 일정진폭응력과 동일한 피로수명도를 적용하지만, 피로한계응력범위를 일정진폭응력보다 매우 낮게 제한하고 있다. 이는 변동진폭응력의 경우, 일정진폭응력보다 높은 피로손상을 일으킨다는 점을 반영한 것이다.

미국 AASHTO에서는 1994년 LRFD 설계기준을 제정하면서 새로운 피로설계기준을 제시하였다. 과거의 AASHTO 피로설계기준에서 일일평균 트럭교통량(대/일)을 개략적 분석으로 실제 트럭교통량의 변화에 따른 피로손상의 정도를 정확하게 반영하지 못하였으나, 도로교의 사용기간을 75년으로 가정함으로써 이 동안의 예상트럭 교통량을 반영하는데 보다 합리적인 설계법을 채택하고 있다.

유럽의 EUROCODE에서는 피로설계를 위한 하중모델을 5종류로 제시하여 그 중 하나를 선택해 사용할 수 있도록 하였고, 강교량 부재의 구조상 세에 대한 피로등급은 실물 대 모형 실험결과를 바탕으로 피로강도 곡선의 등급으로 정하였다.

영국의 BS 5400의 Part 10에서는 4축 단일차량으로 표준피로하중에 대해 스펙트럼을 규정하여, 이에 의한 누적피로손상을 피로설계에 이용하도록 하였으며, 설계자가 피로파손의 위험성을 고려하여 피로설계 수명을 변경할 수 있도록 규정하고 있다.

### 3. 피로시험

#### 3.1 시험체 제작

햄머피닝처리가 용접이음부의 피로강도에 미치는 영향을 조사하기 위해 피로시험을 실시 하였다. 시험체는 현재 강교에서 널리 사용하고 있는 플레이트거더교와 강박스거더교의 웹과 수평보강재에서 형상화 하였다. 그림 3.1은 시험체의 형상화를 나타낸다. 본 연구에 사용한 시험체는 현재 강교량에 널리 사용되고 있는 용접구조용 강재인 SM490B로 제작하였으며, 시험체의 형상 및 치수는 그림 3.2에서와 같다. 폭 80 mm, 두께 10 mm, 길이 800mm인 모재에 두께 10 mm, 길이 150 mm, 높이 50mm인 면외거셋을 반자동용접법인 FCAW(flux core arc welding)을 이용하여 모재의 양측에 필렛용접치수 6 mm로 부착하였다.

면외거셋 양단에는 돌림용접을 실시하였으며, 거셋의 각 단부에서는 피로균열이 발생 할 것으로 예상되기 때문에 용접의 시점과 종점을 두지 않도록 제작하였다.

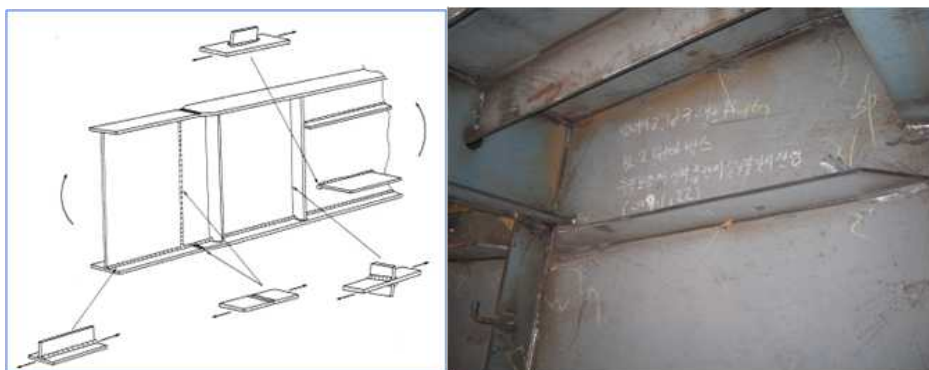


그림 3.1 시험체의 형상화

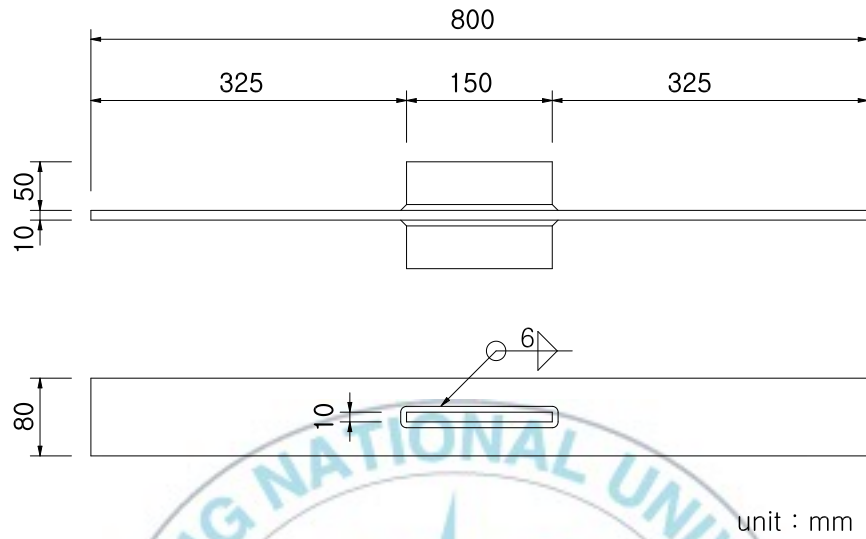


그림 3.2 양측면외거셋 시험체 형상 및 치수

표 3.1 화학성분

| 강 종    | 화 학 성 분 (%) |      |      |       |       |
|--------|-------------|------|------|-------|-------|
|        | C           | Si   | Mn   | P     | S     |
| SM490B | 0.15        | 0.16 | 0.91 | 0.019 | 0.009 |

표 3.2 기계적 성질

| 강 종    | 기 계 적 성 질     |               |            |               |
|--------|---------------|---------------|------------|---------------|
|        | 항복강도<br>(MPa) | 인장강도<br>(MPa) | 연신율<br>(%) | 탄성계수<br>(GPa) |
| SM490B | 322           | 456           | 25         | 206           |

표 3.3 용접조건

| 사용 용접법 | 용접봉의 품명                     | 용접 전압<br>(V) | 용접 전류<br>(A) | 용접 속도<br>(cm/min) |
|--------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------------|
| FCAW   | Dual Shield<br>7100(E71T-1) | 28           | 265          | 27.6              |

이와 같이 제작된 시험체를 사용하였다. 그림 3.3에는 시험체 용접 전경을 나타내고, 그림 3.4에는 열변형을 억제하기 위한 클램프 체결 전경을 나타낸다.

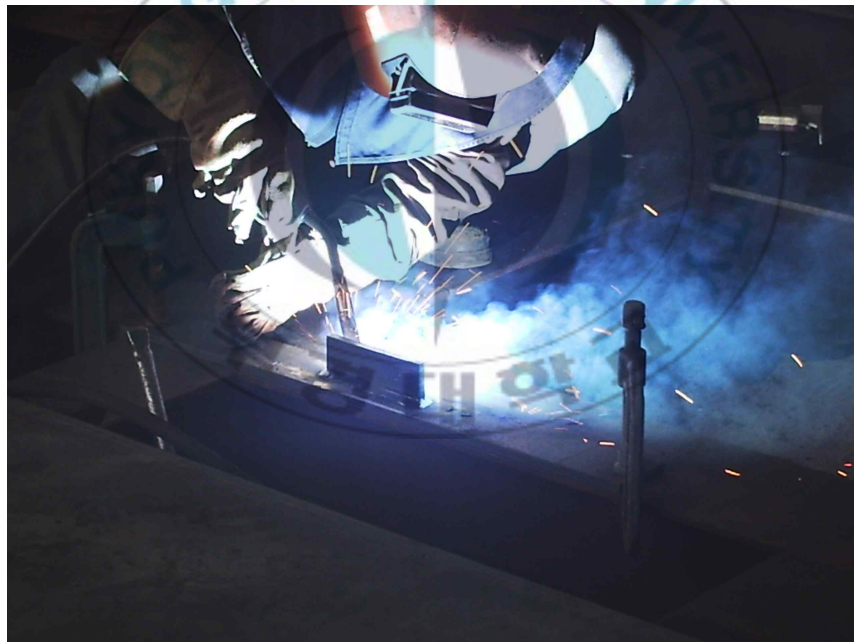


그림 3.3 시험체 용접 전경



그림 3.4 시험체 열변형 억제 전경

### 3.2 햄머피닝

햄머피닝을 할 도구는 그림 3.5에 나타난다. 시험체에 햄머를 가할 부분은  $4 \times 5$  mm의 크기로 가공을 하고, 고주파 열처리를 실시하였다. 공기압 0.5~0.6 MPa, 타수 90 Hz로 처리 실시한다. 햄머피닝 방법은 그림 3.6에 나타난다.

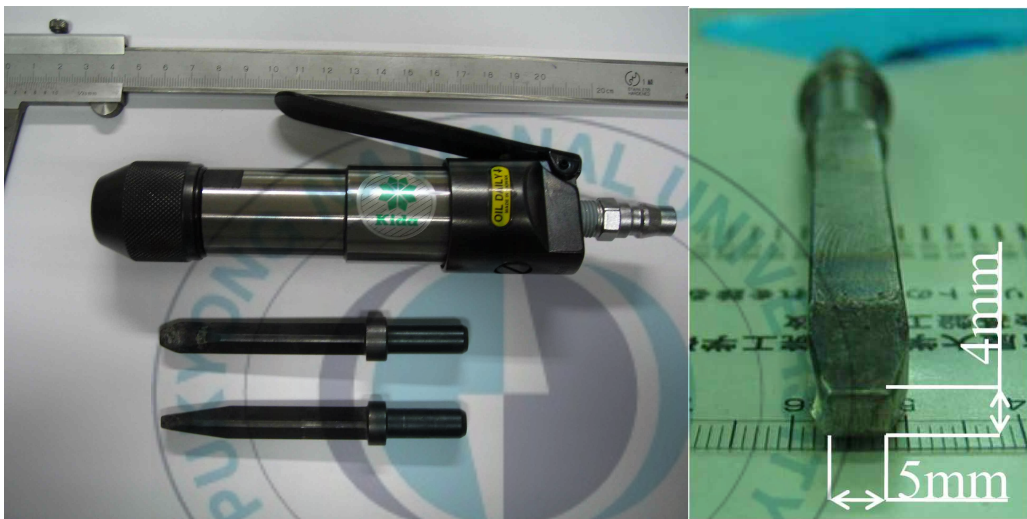


그림 3.5 햄머피닝 장비

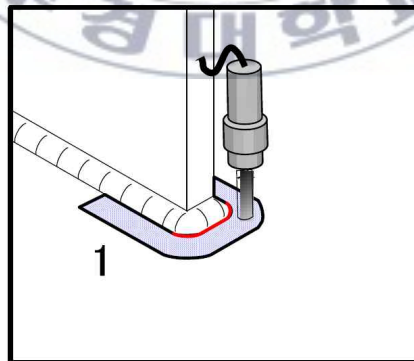


그림 3.6 햄머피닝 방법

### 3.3 시험방법

본 연구에서는 면외거셋 용접이음부를 대상으로 피로시험한 선행연구의 용접그대로의 시험체(AW)<sup>(5),(6)</sup>의 피로시험과 기존 피로수명의 50% 시점에서 햄머피닝한 시험체(HP)에 대한 피로시험을 실시하고 비교하여 햄머피닝 효과에 대한 피로거동을 검토하였다. 햄머피닝 효과에 대한 피로강도 향상 정도를 정량적으로 평가하기 위해서  $\pm 1000$  kN 용량의 전기유압식 피로시험기를 이용해 그림 3.7 과 같이 인장 피로시험을 실시하였다. 피로시험시 작용하중은 정현파(Sine Wave)의 일정진폭하중을 이용하였으며, 응력범위( $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ )는 100~200 MPa의 범위에서 시험을 실시하였고, 하한치 하중은 10 kN으로 고정하였다. 하중 재하속도는 응력범위의 크기에 따라 5~7 Hz 정도로 하였다. 용접그대로의 시험체(AW) 24개는 선행연구의 값을 사용하였고, 햄머피닝 효과확인 시험체(HP) 4개의 파괴에 대한 최대반복횟수는 천만회까지 하였다. 표 3.4는 피로시험 자료를 나타낸다.

피로균열 발생위치 및 초기균열의 크기를 측정하기 위해서 다이마킹(Dye marking)을 실시하였고, 피로균열발생 및 성장 과정을 정량적으로 평가하기 위해 일부 시험체에는 최대하중을 고정시키고 반복하중의 진폭을 반감시켜 비치마크(Beach Marking)을 도입하였다. 비치마크에 소요된 반복횟수는 피로수명 산정에 포함하지 않았다.



그림 3.7 피로시험 전경

표 3.4 면외거셋 용접이음부의 피로시험 자료

| Category of specimen | Specimen No. | P <sub>max</sub> (kN) | P <sub>min</sub> (kN) | Area (mm <sup>2</sup> ) | ΔP (kN) | Δσ (MPa) | 비고               |
|----------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------|----------|------------------|
| AW                   | 1            | 210                   | 10                    | 800                     | 200     | 250      | 선행 연구<br>(5),(6) |
|                      | 2            | 200                   | 10                    | 800                     | 190     | 238      |                  |
|                      | 3            | 197                   | 10                    | 800                     | 187     | 234      |                  |
|                      | 4            | 170                   | 10                    | 800                     | 160     | 200      |                  |
|                      | 5            | 170                   | 10                    | 800                     | 160     | 200      |                  |
|                      | 6            | 166                   | 10                    | 800                     | 156     | 195      |                  |
|                      | 7            | 164                   | 10                    | 800                     | 154     | 193      |                  |
|                      | 8            | 150                   | 10                    | 800                     | 140     | 175      |                  |
|                      | 9            | 131                   | 10                    | 800                     | 121     | 151      |                  |
|                      | 10           | 130                   | 10                    | 800                     | 120     | 150      |                  |
|                      | 11           | 130                   | 10                    | 800                     | 120     | 150      |                  |
|                      | 12           | 126                   | 10                    | 800                     | 116     | 145      |                  |
|                      | 13           | 118                   | 10                    | 800                     | 108     | 135      |                  |
|                      | 14           | 118                   | 10                    | 800                     | 108     | 135      |                  |
|                      | 15           | 110                   | 10                    | 800                     | 100     | 125      |                  |
|                      | 16           | 91                    | 10                    | 800                     | 81      | 100      |                  |
|                      | 17           | 90                    | 10                    | 800                     | 80      | 100      |                  |
|                      | 18           | 89                    | 10                    | 800                     | 79      | 98       |                  |
|                      | 19           | 82                    | 10                    | 800                     | 72      | 90       |                  |
|                      | 20           | 75                    | 10                    | 800                     | 65      | 81       |                  |
|                      | 21           | 70                    | 10                    | 800                     | 60      | 75       |                  |
|                      | 22           | 70                    | 10                    | 800                     | 60      | 75       |                  |
|                      | 23           | 66                    | 10                    | 800                     | 56      | 70       |                  |
|                      | 24           | 65                    | 10                    | 800                     | 55      | 70       |                  |
| HP                   | 1            | 170                   | 10                    | 800                     | 160     | 200      | 본 연구             |
|                      | 2            | 170                   | 10                    | 800                     | 160     | 200      |                  |
|                      | 3            | 130                   | 10                    | 800                     | 120     | 150      |                  |
|                      | 4            | 90                    | 10                    | 800                     | 80      | 100      |                  |

### 3.4 용접토우부 기하학적 형상 및 압축응력 측정

#### 3.4.1 용접토우부 비드형상 측정

피로시험에 앞서 햄머피닝 처리 유무에 따른 시험체(이하, 용접그대로의 시험체 AW, 햄머피닝 실시한 시험체 HP로 표기함) 용접토우부에서의 기하학적 형상변화 정도를 측정하기 위해서 라텍스고무(인상재)를 이용하여 용접토우부의 형상을 그림 3.8에서 나타낸 바와 같이 형상을 채취하였다. 채취한 고무형상을 시험체 길이 방향으로 1 mm 간격의 7등분으로 절단하고 50배 확대 현미경으로 촬영하였다. 각각의 촬영된 파일을 CAD프로그램을 이용하여 비드접선각도와 용접토우부의 곡률반경을 측정하였다.

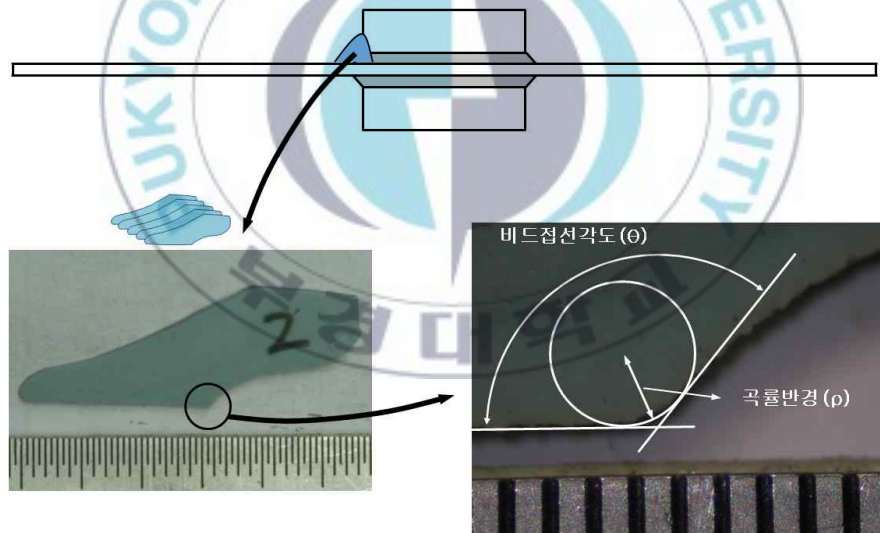


그림 3.8 용접토우부의 기하학적 형상 측정

피로시험에 사용된 각 시험체의 비드접선각도와 곡률반경의 측정결과를 그림 3.9에 곡률반경 정규분포를 그림 3.10에 각 시험체별 평균값과 표

준편차를 표 3.5에 나타내었다. 햄머피닝 전·후를 비교하면 비드접선각도는 0.51%, 곡률반경은 40.36% 증가하였다. 이로써 용접토우부에 햄머피닝을 실시함으로 인해 용접부의 비드형상이 햄머피닝을 실시하기 전의 시험체에 비해 용접토우부에서 국부적인 응력집중이 저하되어 피로강도가 향상될 것으로 예상하였다.

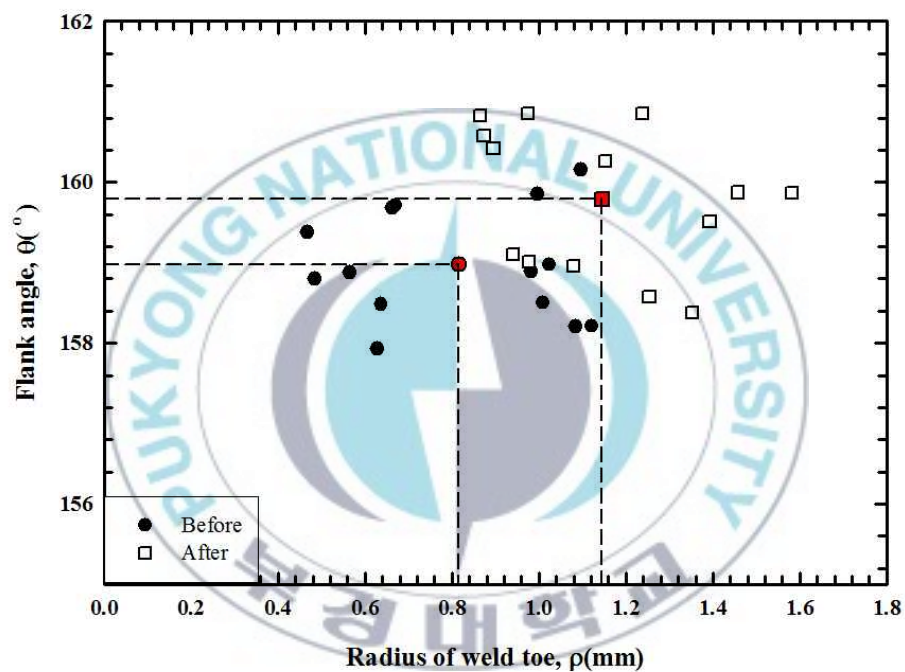


그림 9 비드접선각도와 곡률반경 분포

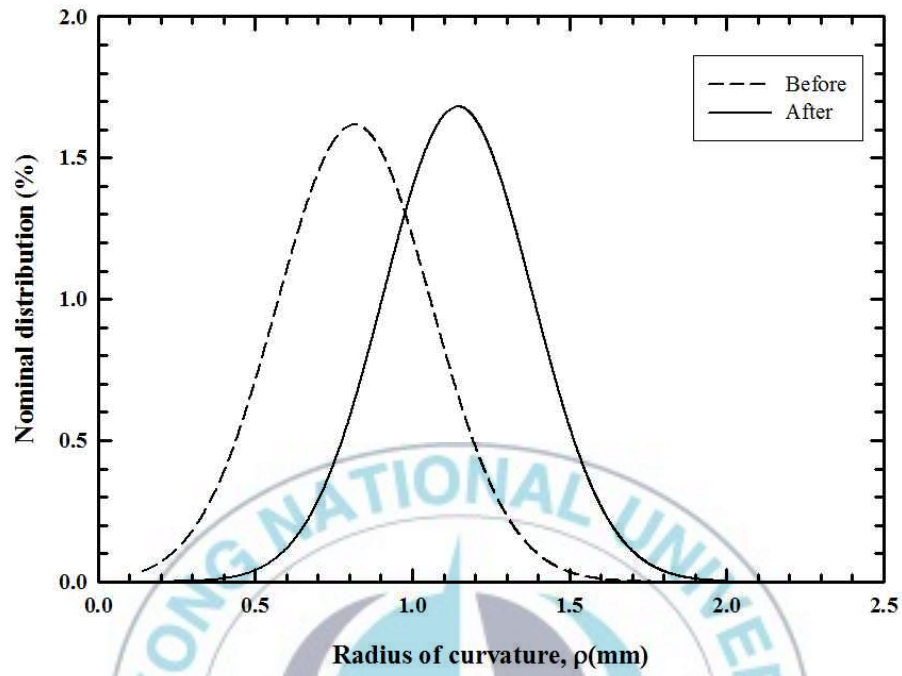


그림 3.10 곡률반경 정규분포

표 3.5 비드접선각도와 곡률반경 결과값

| 구분   | 피닝전     |          | 피닝후     |          |
|------|---------|----------|---------|----------|
|      | 접선각도(°) | 곡률반경(mm) | 접선각도(°) | 곡률반경(mm) |
| 평균값  | 158.98  | 0.816    | 159.79  | 1.146    |
| 표준편차 | 0.688   | 0.247    | 0.874   | 0.237    |

### 3.4.2 압축응력 측정

용접이음부에서 햄머피닝을 실시 할 때 피닝에 의해 강재의 표면에서는 압축응력이 도입된다고 추정하였다. 이에 햄머피닝에 의해 용접토우부에 압축응력의 변화를 정량화 하기 위해 토우부에서 15 mm 떨어진 거리에 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다. 사용한 일축 변형률 게이지 제원은 표 3.6과 같다.

본 연구에서는 피로시험전에 동적변형률 측정기를 이용해 무인장상태에서의 햄머피닝에 의한 압축응력 측정과 피로시험중에 정적변형률 측정기를 이용해 인장상태에서의 햄머피닝에 의한 압축응력을 측정하였다. 그림 3.11는 압축응력 측정 전경을 나타내고 그림 3.12, 3.13은 게이지 부착위치 전경 및 부착위치를 나타낸다. 그림 3.14는 햄머피닝 전경을 나타낸다.

표 3.6 변형률 게이지 제원

| Type        | Gauge length<br>(mm) | Gauge factor<br>(%) | Gauge resistance<br>( $\Omega$ ) |
|-------------|----------------------|---------------------|----------------------------------|
| FLA-5-11-1L | 5                    | 2.11 $\pm$ 1        | 119.8 $\pm$ 0.5                  |



그림 3.11 압축응력 측정 전경

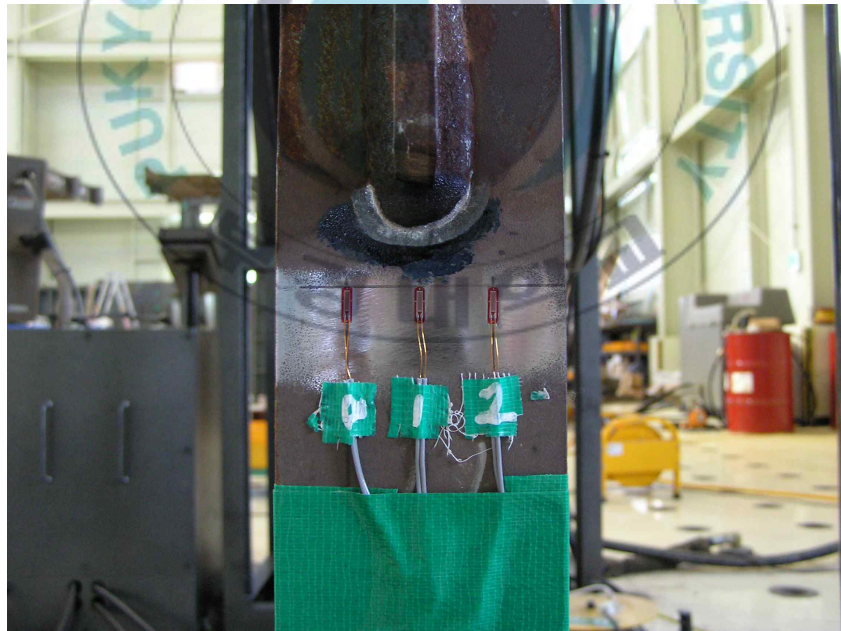


그림 3.12 게이지 부착위치 전경

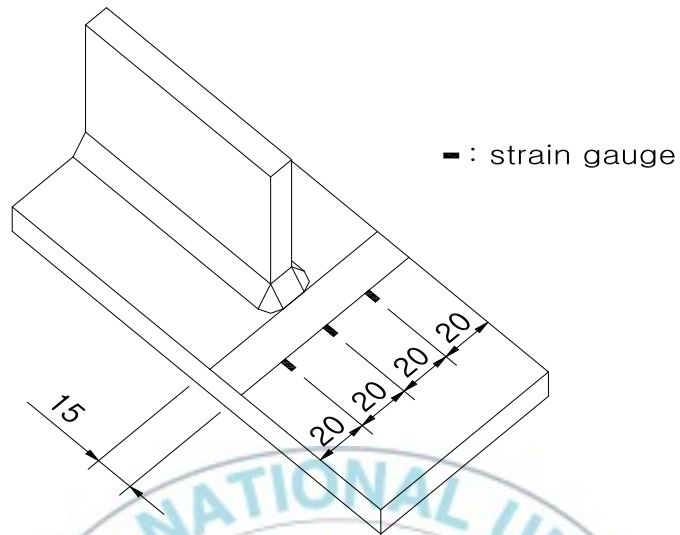


그림 3.13 게이지 부착위치





그림 3.14 시험중 햄머피닝 처리 전경

피로시험전 동적변형률 측정장비에 의한 응력측정 결과는 그림 3.15에 나타난다. 동적측정은 피로시험을 하기전에 무응력 상태에서 햄머피닝을 하며 초당 1000회의 속도로 응력을 측정하였다. 이때 햄머피닝의 횟수는 모든 시험에서 동일하게 왕복 10회로 하였다. 이때의 압축응력은 최대 100 MPa이 도입되었고, 측정 시간이 지나도 87.98 MPa의 값으로 수렴하는 것을 확인 할 수 있었다.

피로시험중의 정적변형률 측정장비에 의한 응력측정 결과는 그림 3.16

와 표 3.7에 나타난다. 압축응력은 응력범위 200 MPa(피로수명의 80%에서 피닝처리), 200 MPa(피로수명의 50%에서 피닝처리), 150 MPa(피로수명의 50%에서 피닝처리), 100 MPa(피로수명의 50%에서 피닝처리)에서 각각 32.13 MPa, 43.05 MPa, 59.43 MPa, 53.34 MPa이 도입되었다. 이 중 최대압축응력은 응력범위 100 MPa인 시험체에서 53.34 MPa의 압축응력이 도입됨을 알 수 있었다. 측정 결과로부터 응력범위가 낮은 곳에서의 햄머피닝 효과가 높은 응력범위보다 피로수명 향상에 더 큰 효과가 있을 것으로 추정할 수 있다.

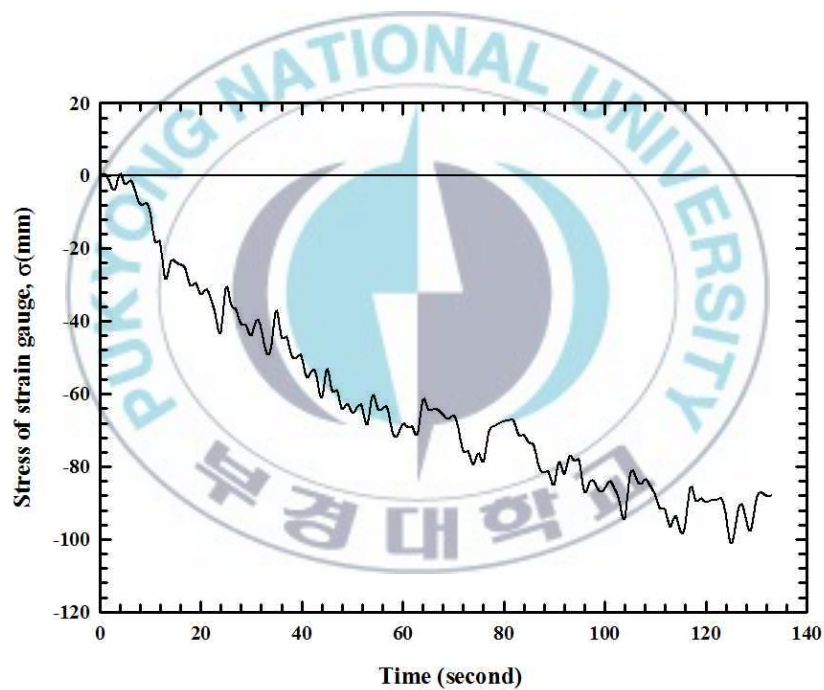
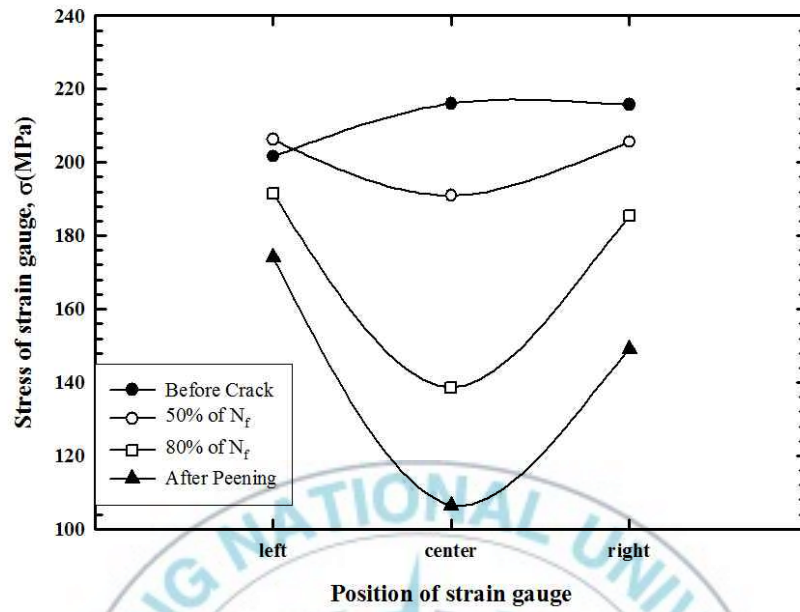
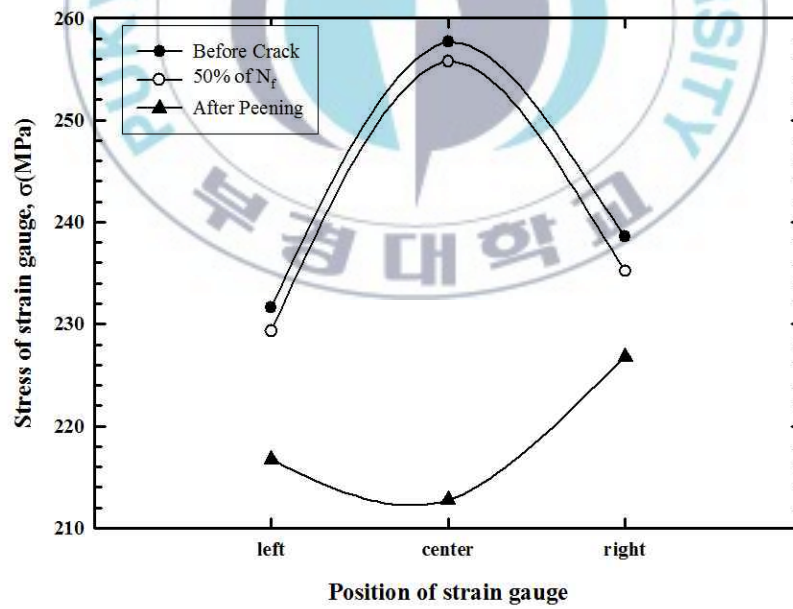


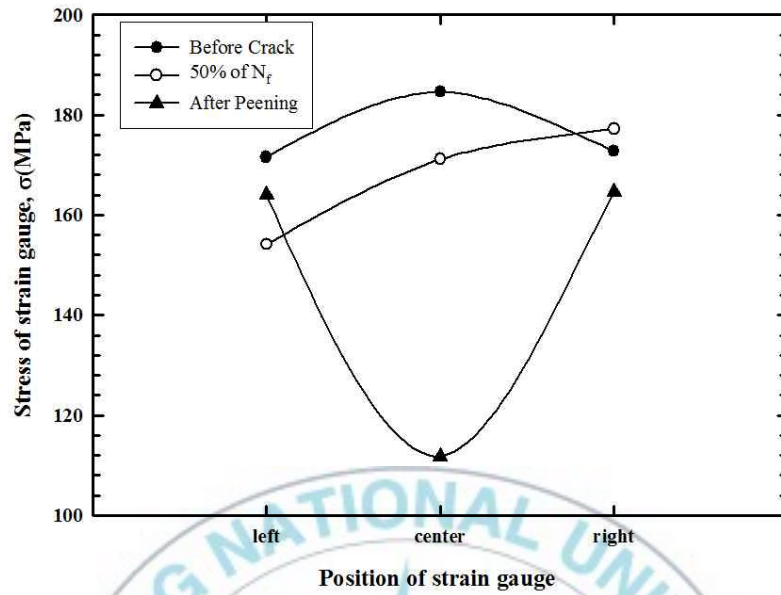
그림 3.15 동적 측정장비로 측정한 압축응력



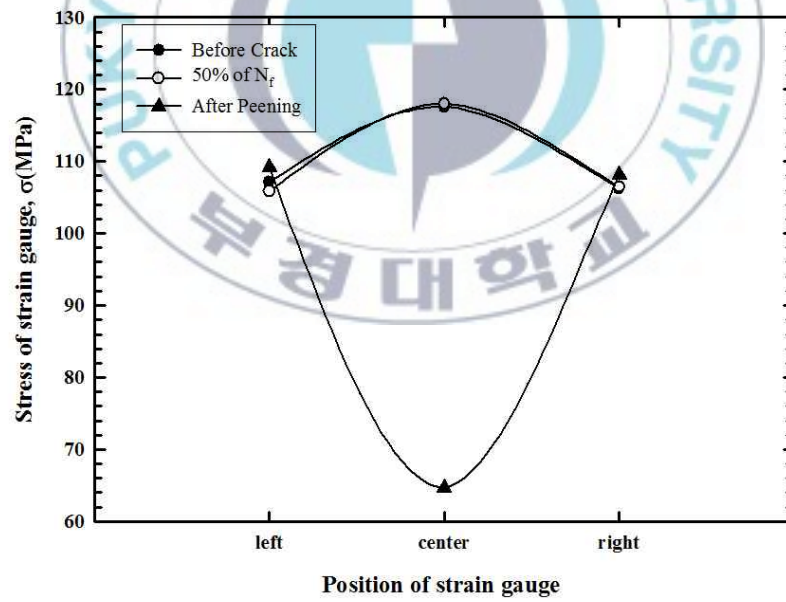
(a)  $\Delta\sigma=200$  MPa, 피로수명의 80%에서 햄머피닝



(b)  $\Delta\sigma=200$  MPa, 피로수명의 50%에서 햄머피닝



(c)  $\Delta\sigma=150$  MPa, 피로수명의 50%에서 햄머피닝



(d)  $\Delta\sigma=100$  MPa, 피로수명의 50%에서 햄머피닝

그림 3.16 정적 측정장비로 측정한 압축응력

표 3.7 정적 측정장비로 측정한 압축응력 결과

| 응력범위<br>(MPa) | 햄퍼닝 전 응력<br>(MPa) | 햄퍼닝후 응력<br>(MPa) | 도입 압축응력<br>(MPa) |
|---------------|-------------------|------------------|------------------|
| 200           | 138.60            | 106.47           | 32.13            |
| 200           | 255.78            | 212.73           | 43.05            |
| 150           | 171.15            | 111.72           | 59.43            |
| 100           | 118.02            | 64.68            | 53.34            |



## 4. 피로시험 결과

### 4.1 피로균열 발생 및 진전거동

피로시험 종료 후 균열 발생과 진전 상황을 쉽게 조사 할 수 있도록 본 연구에서는 일정 진폭 인장 피로하중이외에 일정한 반복 횟수마다 최대하중을 고정시키고 반복하중의 진폭을 반감시켜 비치마크(Beach marking)가 남도록 하였다. 그림 4.1은 비치마크를 생성시키기 위한 응력재하 그래프의 일례를 나타낸다. 본 연구에서는 응력범위 200 MPa에서 비치마크를 도입하여 균열 진전을 확인하였다. 시험체의 피로균열 발생 및 성장 특성을 조사하기 위한 피로시험후의 파단면을 나타내면 그림 4.2와 같다. 균열은 면외거셋용접이음부의 토우부에서 발생하였으며, 균열형상은 반타원형을 유지하며 진전하여 파단하였다.

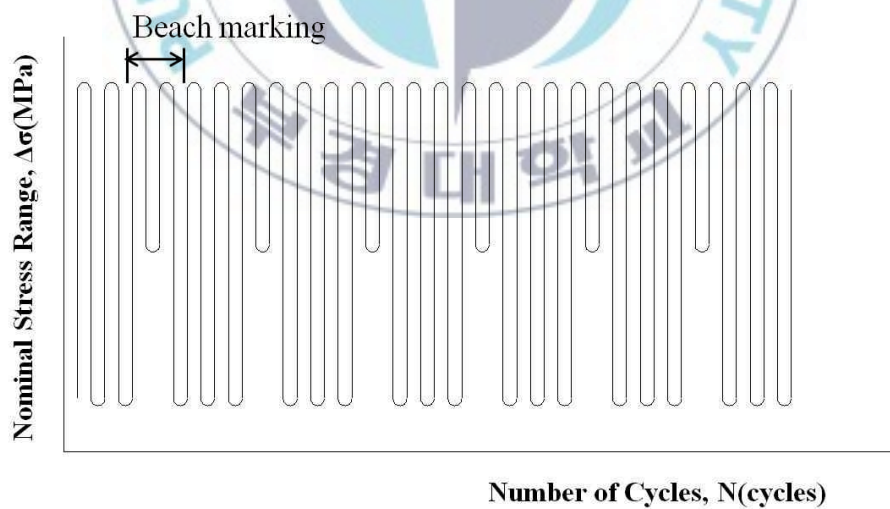


그림 4.1 비치마크 생성 일례



(a) AW시험체 피로 파단면( $\Delta\sigma=200$  MPa)



(b) HP시험체 피로 파단면( $\Delta\sigma=200$  MPa)

#### 그림 4.2 피로 파단면

파단면에 나타난 비치마크로부터 추정된 균열깊이에 대한 반복횟수를 정리하여 AW시험체와 비교하면 그림 4.3과 같으며, 균열 후 AW시험체와 HP시험체의 비교하였을 때 햄머피닝 후 a-N선도의 기울기가 AW시험체

에 비해 작은 것을 알 수 있다. 이는 햄머피닝이 균열진전을 억제하는 효과가 있다는 것을 알 수가 있다. 용접토우부의 햄머피닝 전·후의 현미경 사진은 그림 4.4에 나타내었다.

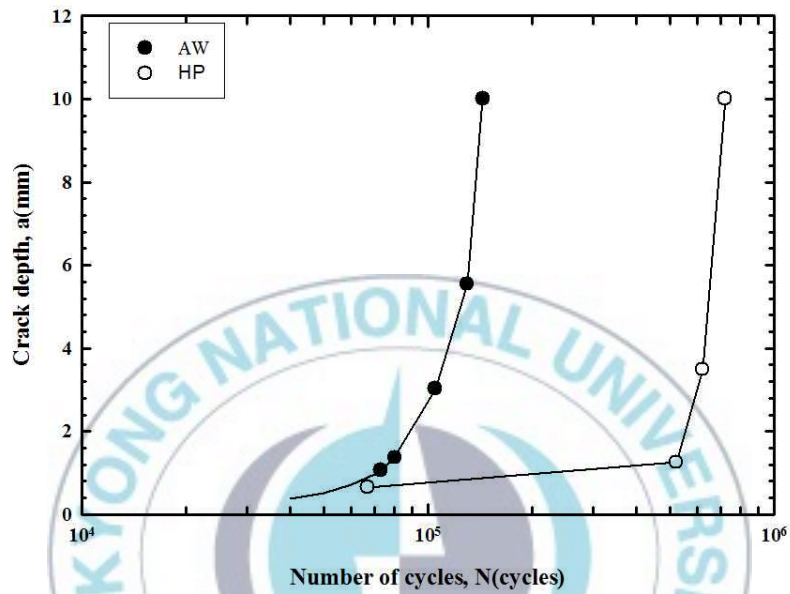


그림 4.3 a-N선도( $\Delta\sigma=200$  MPa)



(a) 햄머피닝전 현미경 사진



(b) 햄머피닝후 현미경 사진

그림 4.4 용접토우부의 햄머피닝 전·후의 현미경 사진

## 4.2 피로수명

본 연구에서 실시한 면외거셋 용접이음부 시험체에 대한 인장 피로시험 (선행연구)과 햄머피닝시험의 결과는 표 4.1과 같고 S-N선도는 그림 4.5에 나타내었다. 그리고 도로교설계기준에서 규정하고 있는 용접이음의 피로설계곡선도 나타내었다. 또한 최소 자승법을 이용해 AW시험체와 HP시험체의 평균회귀곡선과 평균  $\pm 2s$  (s:표준편차)의 신뢰구간을 그림 4.6에 나타내었다.



표 4.1 면외거셋 용접이음부의 피로시험 결과

| Category of specimen            | Specimen No. | $\Delta\sigma$ (MPa) | Fatigue life (Cycles) | Comment    |
|---------------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|------------|
| AW <sup>(5),(6)</sup><br>(선행연구) | 1            | 250                  | 84,000                |            |
|                                 | 2            | 238                  | 141,800               |            |
|                                 | 3            | 234                  | 136,820               |            |
|                                 | 4            | 200                  | 140,000               |            |
|                                 | 5            | 200                  | 144,000               |            |
|                                 | 6            | 195                  | 188,500               |            |
|                                 | 7            | 193                  | 184,500               |            |
|                                 | 8            | 175                  | 180,000               |            |
|                                 | 9            | 151                  | 406,000               |            |
|                                 | 10           | 150                  | 444,000               |            |
|                                 | 11           | 150                  | 543,000               |            |
|                                 | 12           | 145                  | 543,000               |            |
|                                 | 13           | 135                  | 456,000               |            |
|                                 | 14           | 135                  | 1,150,000             |            |
|                                 | 15           | 125                  | 1,121,000             |            |
|                                 | 16           | 100                  | 2,700,000             |            |
|                                 | 17           | 100                  | 1,788,500             |            |
|                                 | 18           | 98                   | 1,788,500             |            |
|                                 | 19           | 90                   | 1,890,000             |            |
|                                 | 20           | 81                   | 7,614,000             |            |
|                                 | 21           | 75                   | 10,000,000            | No Failure |
|                                 | 22           | 75                   | 10,000,000            | No Failure |
|                                 | 23           | 70                   | 10,000,000            | No Failure |
|                                 | 24           | 70                   | 10,000,000            | No Failure |
| HP<br>(본연구)                     | 1            | 200                  | 118,500               |            |
|                                 | 2            | 200                  | 721,844               |            |
|                                 | 3            | 150                  | 1,538,062             |            |
|                                 | 4            | 100                  | 10,000,000            | No Failure |

표 4.2 햄머피닝 시점과 피로수명 향상비

| 시험체 | 응력범위 (MPa) | 기존 피로수명 (cycles)(A) | 피닝시점 (cycles)   | 피로수명 (cycles)(B) | 피로수명 향상비(B/A) |
|-----|------------|---------------------|-----------------|------------------|---------------|
| 1   | 200        | 140,000             | 112,000 (80%)   | 118,500          | 효과없음          |
| 2   | 200        | 140,000             | 70,000 (50%)    | 721,800          | 5.16          |
| 3   | 150        | 460,000             | 230,000 (50%)   | 1,538,000        | 3.34          |
| 4   | 100        | 2,000,000           | 1,000,000 (50%) | 10,000,000       | 5.00          |

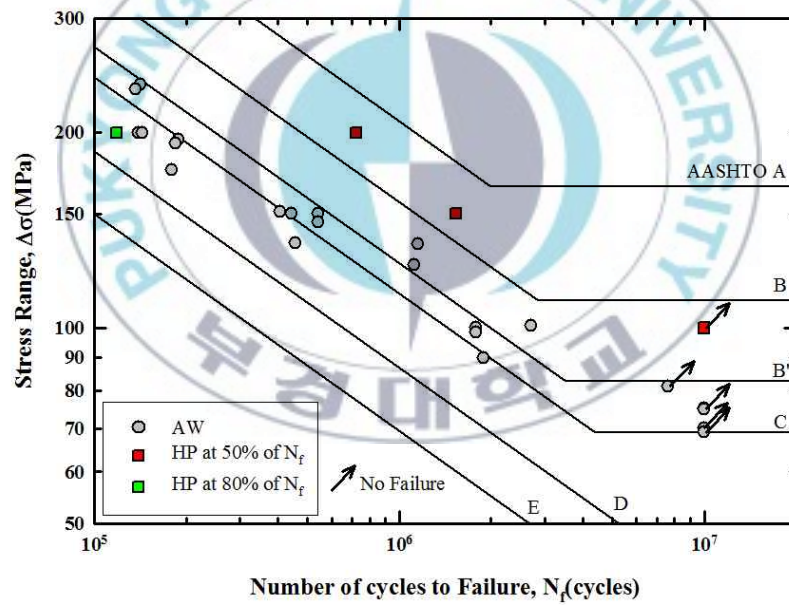


그림 4.5 S-N 곡선

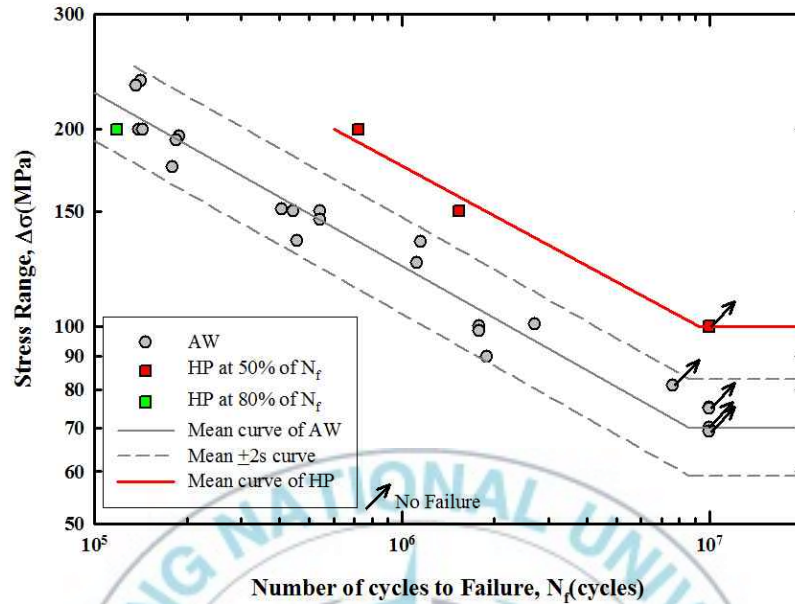


그림 4.6 평균회귀곡선

시험체 모두 도로교설계기준에서 규정하는 피로설계 곡선 D등급을 상회하여 피로강도 등급을 만족하였다. 그림 4.5의 S-N곡선의 결과와 같이 선행연구의 AW시험체 보다 본연구의 HP시험체의 피로수명이 응력범위 200 MPa 에서는 5.16배, 150 MPa 에서는 3.34배, 100 MPa 에서는 5 배이상 증가하였다. 응력범위 100 MPa 에서는 반복횟수 1000만회까지 피로파괴가 발생하지 않았다. 이때를 피로한계로 보았고 용접그대로의 시험체의 피로한계 70 MPa에 비해 햄머피닝 처리 시험체의 피로한계 100 MPa는 약 1.43배 증가하였다. 피로수명이 이처럼 증가한 것은 용접토우부에 햄머피닝을 하면 곡률반경과 접선각도가 증가하여 응력집중이 줄어들었고, 토우부에 압축응력이 생겼기 때문으로 여겨진다. 선행연구에서 기하학적 형상 측정 및 압축잔류응력 측정과 피로시험 결과를 비교해 보면, 피로수명 증가는 기하학적 형상 개선보다는 용접토우부의 압축잔류응력 도입이 피로수명에 영향을 미치는 주요인자라고 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 햄머피닝이 면외거셋 용접이음부의 피로거동에 미치는 영향을 검토하기 위한 첫 단계로서 햄머피닝을 실시한 시험체의 피로시험을 실시하였다. 선행연구의 용접그대로 시험체의 피로시험과 본 연구의 햄머피닝을 실시한 시험체의 피로시험을 비교하여 피로거동의 차이를 검토하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 주요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 시험체의 용접토우부에서의 기하학적 형상을 나타내는 비드접선각도와 곡률반경은 햄머피닝 처리를 할 경우에 평균비드접선각도가 0.51% 증가하고, 평균곡률반경은 40.36% 증가하는 것을 알 수 있었다.

(2) 용접토우부 부근의 압축응력을 측정된 결과 햄머피닝을 실시 할 경우 정적측정에서는 피로시험 중 응력범위 200 MPa일 경우 압축응력은 43.05 MPa, 150 MPa일 경우 59.43 MPa, 100 MPa일 경우 53.34 MPa이 도입되었고, 동적측정에서는 87.98 MPa이 도입되었다.

(3) 피로수명은 햄머피닝을 실시 할 경우 응력범위 200 MPa에서 5.16배, 150 MPa에서 3.34배 증가하였고, 응력범위 100 MPa에서는 시험체가 1000만회에서 파단되지 않았고 피로수명은 5배 증가하였다.

(4) 면외거셋 용접이음부의 햄머피닝에 의한 피로한계는 70 MPa에서 100 MPa로 1.43배 증가하였다.

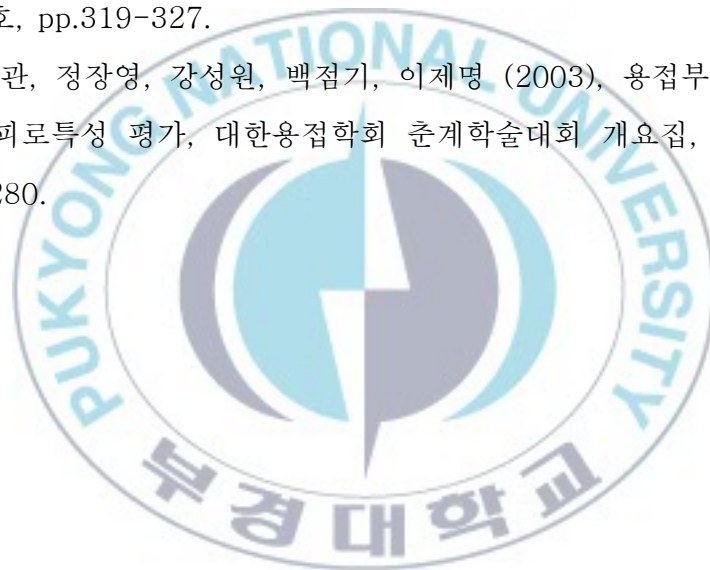
## 참 고 문 헌

- (1) American Association of Standard Highway and Transportation Officials(1998), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.
- (2) British Standard Institution(1980), BS 5400 Part 10, Code of Practice for Fatigue.
- (3) Commission of the European Communities(1990), EUROCODE No.3 Part 1, Chapter 9, Design of Steel Structure.
- (4) Japanese Society of Steel Construction (JSSC) (1995) Fatigue Design Recommendations for Steel Structures.
- (5) 윤태석, Le Van Phuoc Nhan, 김인태, 이동욱 (2007), 블라스트 처리가 면외거셋 용접이음부의 피로거동에 미치는 영향, 대한토목학회 2007년도 정기 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp.3854-3857.
- (6) 김상우, 정원식, 이동욱, 김인태 (2008), 강교 도장용 블라스트 처리 조건에 따른 면외거셋 용접이음부의 피로거동, 대한토목학회 2008년도 정기 학술대회 논문집, pp.1275-1278.
- (7) 정원식 (2008), 도장용 블라스트 처리에 따른 강교량 용접이음부의 피로시험, 부경대학교 대학원, 석사학위논문.
- (8) Le Van phuoc Nhan (2009), Effect of surface Blast Treatment on Fatigue Behaviour of Out-of-Plane Gusset Welded Joints, 부경대학교 대학원, 박사학위논문.
- (9) 김인태, Le Van Phuok Nhan, 김광진, 이동욱 (2008), 강교 도장용 블라스트 처리가 면외거셋 용접이음의 피로거동에 미치는 영향, 강구조학회 논문집, pp.583-584.
- (10) 레반폭난, 손형우, 정동만, 김인태, 이동욱 (2009), 블라스트 처리된

- 면외거셋 용접이음부의 피로수명향상에 대한 해석적 평가, 2009년 한국강구조학회 학술대회 발표집, pp.79-80.
- (11) 레반폭난, 조현영, 정동만, 김인태, 이동욱 (2009), 압축잔류응력을 고려한 면외거셋 용접이음부의 피로균열 진전수명 예측, 2009년 한국강구조학회 학술대회 발표집, pp.77-78.
- (12) 정영수, 김광진, 이동욱, 김인태 (2009), 블라스트 표면처리에 의한 용접이음의 피로강도 향상, 2009년 한국강구조학회 학술대회 발표집, pp.81-82.
- (13) 정영수, 김광진, 이동욱, 김인태 (2008), 블라스트 처리가 하중비전달형 십자필렛용접이음의 피로거동에 미치는 영향, 2008년 학술대회 발표집, 제 19권 1호, 한국강구조학회, pp.127-130.
- (14) P.J. Haagensen, "The Effects of Grinding and Peening on the Fatigue Strength of Welded T-Joints", International Institute of Welding(IIW) Document, XIII-1510-93, 1993.
- (15) S.J. Maddox, "Fatigue Of Steel Fillet Welds Hammer Peened under Load", IIW Document, XIII-1690-97
- (16) Kengo Anami, Chitoshi Miki, "Fatigue Strength of Welded Joints Made of High-strength Steels", Prog. Struct. Engng Mater. 3pp.86-94, 2001.
- (17) Nguyen, T.Ninh and M.A., Wahab, "The Effect of Residual Stress and Weld Geometry on The Improvement of Fatigue Life", Journal of Materials Processing Technology, 48 (1995) pp.581-588, 1995.
- (18) 李東郁 (1986), 橋梁鋼床版におけるトラブリブ溶接継手の疲勞強度向上法に關する基礎的研究, 日本大板大學 博士學位論文.

- (19) 홍성욱, 경갑수, 장동일 (2000), 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도 향상법에 관한 연구(1)-그라인딩 처리에 따른 영향, 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집( I ), pp.353-356.
- (20) 정영화, 경갑수, 홍성욱, 김익겸, 남왕현 (2000), 하중비전달형 필렛 접부의 피로강도 향상법에 관한 연구(2)-TIG 처리에 따른 영향, 대한 토목학회 2000년도 학술발표회 논문집( I ), pp.373-377.
- (21) 정영화, 경갑수, 홍성욱, 남왕현, 장동휘 (2002), 선상가열이 면외거셋 용접이음부의 피로특성에 미치는 영향, 한국강구조학회학술발표논문집, 한국강구조학회, pp.325-331.
- (22) 한국강구조학회 (1995), 강구조편람, 제2권 강구조의 접합, 한국강구조학회, pp.118-227.
- (23) 홍성욱, 경갑수, 최동호, 용환선 (2000), 용접지단부의 후처리에 따른 하중비전달형 필렛용접부의 피로특성, 한국강구조학회논문집, 제12권 6호, 한국강구조학회, pp.701-713.
- (24) 배두병 (2003), 면내 거셋 용접연결부의 피로강도, 한국강구조학회 논문집, 제15권 6호, 한국강구조학회, pp.629-637.
- (25) 최동호, 최항용, 하정훈, 박연수 (2002), 면외거셋형 고강도강 (POSTEN80)의 피로균열진전 해석, 대한토목학회논문집, 제22권 제 1A호, 대한토목학회, pp.123-130.
- (26) 경갑수 (2008), 강교의 용접 및 품질관리, 2008년 학술대회발표집, 제 19권 1호, 한국강구조학회, pp.573-621.
- (27) 大倉一郎 著, 경갑수, 김학수, 채원규 공역 (1998), 강교의 피로, 도서출판 건설도서.
- (28) 정성균, 이승호 (2001), 쇼트피닝 加工概論, 도서출판 세화.
- (29) 건설교통부 (2000), 도로교설계기준.

- (30) 장동일 (1999), 구조공학에서의 파괴와 피로, 동명사, pp.231-251.
- (31) 일본도로협회 저, 박정웅, 박연수, 경갑수 공역 (2004), 강교의 피로와 보수보강, 구미서관.
- (32) 일본강구조협회 저, 김세영 번역 (2000), 강구조물의 피로설계지침·동해설, 과학기술.
- (33) 장승필, 박영석, 김남희 (2003), 강구조공학, 영지문화사.
- (34) 임청권, 박문호 (1999), 필렛용접이음부의 후처리에 따른 피로강도 향상 메커니즘의 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제11권, 3호, pp.319-327.
- (35) 서정관, 정장영, 강성원, 백점기, 이제명 (2003), 용접부 형상을 고려한 피로특성 평가, 대한용접학회 춘계학술대회 개요집, VG40, pp. 278-280.



## 감사의 글

강구조연구실과 인연을 맺은 지 학부 3학년 시절부터 해서 벌써 3년이  
란 시간이 지났습니다. 지금까지 저에게 아낌없는 사랑과 도움을 주신 분  
들께 미약하나마 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 논문을 완성하기까지 지도편달과 격려를 아끼지 않으신 지도교수  
이신 이동욱 교수님과 부산대학교 김인태 교수님께 진심으로 감사를 드립  
니다. 그리고 바쁜 일정속에서도 부족한 제자의 논문을 세심하게 조언해  
주시고 심사해 주신 장희석 교수님, 국승규 교수님께 깊은 감사를 드립니다.  
아울러 재학기간동안 무언의 꾸지람과 너그러운 마음으로 토목인의  
증지를 가르쳐 주신 토목공학과 교수님들께도 깊은 감사를 드립니다. 그  
리고 항상 연구실에 아낌없는 관심과 사랑을 베풀어주신 신소재공학부 서  
원찬 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

논문이 완성되기까지 강구조연구실의 선배로서 친동생처럼 걱정해 주고  
격려와 도움을 주신 민수선배, 재원선배, 영표선배, 창희선배, 대성선배,  
창민선배, 성민선배, 용교형, 창승형, 민철형, 태석형, 복상형, 원식형, 상  
우형, 형우, 현영 그리고 동기 재진이에게도 감사의 마음을 전합니다. 또  
한 부족한 저를 언제나 많이 도와준 상은선배, 상복이, 상현이, 호명이,  
민기, 의성이, 부산대학교 영수, 창희, 정우형, 용열형, 홍주에게도 고마움  
을 전합니다. 어렵고 힘든 때에 항상 곁에서 힘이 되어준 동기 석준이,  
정민형, 재엽이, 일묵이, 그리고 든든한 힘이 되어준 친동생 지현이에게도  
고맙다라는 말을 전합니다.

마지막으로 자신의 건강보다는 부족한 자식을 위해 믿음과 사랑으로 보  
살펴주시고 희망의 꿈을 심어주신 아버지, 어머니의 은혜에 보답하고자  
이 논문을 바칩니다.