

공 학 석 사 학 위 논 문

블라스트 처리된 면외거셋
용접이음부의 피로수명 평가



2010년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토목공학과

손 형 우

공 학 석 사 학 위 논 문

블라스트 처리된 면외거셋
용접이음부의 피로수명 평가

지도교수 이 동 욱

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2010년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토목공학과

손 형 우

손형우의 공학석사 학위논문을 인준함.

2010년 2월 25일



주 심 공학박사 국 승 규 인

위 원 공학박사 이 환 우 인

위 원 공학박사 이 동 욱 인

목 차

그림 목차	iii
표 목차	v
ABSTRACT	vi
1. 서 론	1
2. 피로파괴 기초이론	4
2.1 피로파괴의 기초	4
2.1.1 반복하중과 피로설계곡선	4
2.1.2 피로수명	7
2.1.3 S-N선도	8
2.2 피로강도에 미치는 영향인자	9
2.2.1 응력비가 피로강도에 미치는 영향	9
2.2.2 응력집중이 피로강도에 미치는 영향	10
2.2.3 용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향	11
2.2.4 용접이음부의 피로강도	13
2.3 용접연결부의 피로설계기준	19
2.3.1 도로교설계기준의 피로설계기준	19
2.3.2 각국의 피로설계기준	22
2.4 압축잔류응력	25
2.4.1 잔류응력의 개념 및 영향	25

2.4.2 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력	26
3. 피로시험	28
3.1 시험체 제작	28
3.2 시험방법	31
3.3 용접토우부 비드형상 및 잔류응력 측정	34
3.3.1 용접토우부 비드형상 측정	34
3.3.2 응력집중계수	37
3.3.3 잔류응력 측정	39
3.4 피로시험결과	43
4. 해석적 평가	45
4.1 용접부 기하학적 형상이 피로한도에 미치는 영향	46
4.1.1 용접이음부 기하학적 형상이 피로수명에 미치는 영향	46
4.1.2 용접이음부 기하학적 형상이 피로한도에 미치는 영향	48
4.2 잔류응력이 피로한도에 미치는 영향	50
5. 결 론	53
참고문헌	55
감사의 글	59

그림 목차

- 그림 2.1 피로시험에서 이용되는 응력과 시간의 관계
- 그림 2.2 하중재하 조건과 응력비 R
- 그림 2.3 S-N선도
- 그림 2.4 응력비가 피로한계에 미치는 영향
- 그림 2.5 용접이음부의 응력집중 영향
- 그림 2.6 용접잔류응력의 영향(모식도)
- 그림 2.7 용접결함
- 그림 2.8 플레이트거더 주거더에 포함된 이음의 예
- 그림 2.9 이음의 구분등급에 대한 피로설계곡선
- 그림 2.10 웨브와 플랜지의 종방향 맞대기용접의 피로강도 등급
- 그림 2.11 수직보강재 단부의 피로강도 등급
- 그림 2.12 수직보강재 단부와 거셋 플레이트를 웨브에 연결하는 필렛용접의 피로강도 등급
- 그림 2.13 덧판을 가지는 주판의 응력분포
- 그림 2.14 피로설계곡선
- 그림 2.15 LRFD 트럭설계의 차량하중모형
- 그림 2.16 쇼트볼 재료의 충돌에 의해 발생하는 잔류응력의 형태
- 그림 2.17 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력분포
- 그림 3.1 시험체 형상 및 치수
- 그림 3.2 정현파(Sine Wave)
- 그림 3.3 인장피로시험 전경
- 그림 3.4 용접토우부의 기하학적 형상 측정
- 그림 3.5 비드접선각도와 곡률반경 분포특성

그림 3.6 응력보정계수

그림 3.7 게이지 부착 위치

그림 3.8 잔류응력 측정

그림 3.9 잔류응력 측정후의 시험체 전경

그림 3.10 잔류응력 측정 결과

그림 3.11 S-N 곡선



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 블라스트 처리조건

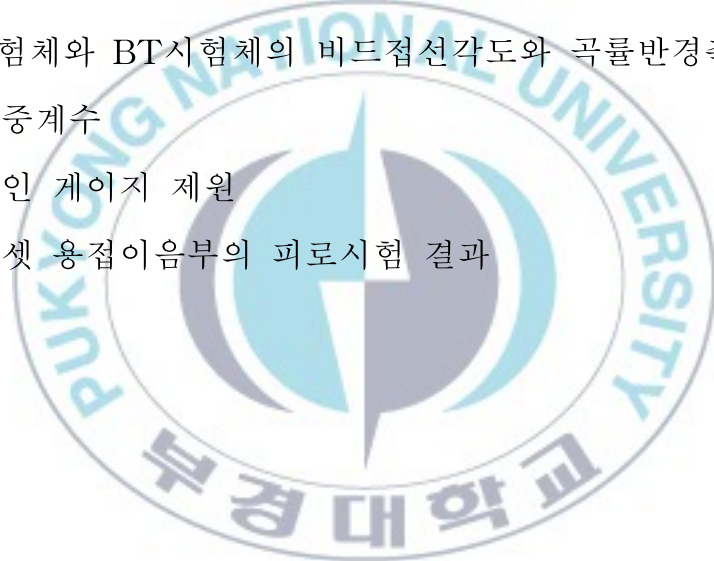
표 3.5 면외거셋 용접이음부의 피로시험 자료

표 3.6 AW시험체와 BT시험체의 비드접선각도와 곡률반경측정결과

표 3.7 응력집중계수

표 3.8 스트레인 게이지 제원

표 3.9 면외거셋 용접이음부의 피로시험 결과



Fatigue Life Evaluation of Blast Surface Treated Out-of-Plane Gusset Welded Joints

Hyung-Woo Son

Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Since the late 1980s, the blast treatment has become an important process in the manufacturing of steel structures in Korea, its purpose is to remove the impurities on the surface of steel material and to enhance the adhesiveness of coating. Even though the blast treatment has been generalized, its influence on the fatigue behavior of welding joints has not been considered. In the fatigue test with the blast treated out-of-plane gusset welded joint, it is proved that the fatigue strength has increased by the blast treatment, and it is mainly because of the geometric shape improvement of welded toe and the residual compressive stress introduction. So, it is necessary to evaluate the correlation between the blast treatment condition and the residual compressive stress quantitatively.

To study the geometric shape change of welded toe, the flank angle and the curvature radius as well as the change of residual stress were measured along with the blast treatment(BT). The flank angle showed little change, and the curvature radius increased by 15% for BT specimen compared with the as-welded(AW) specimen. It was found that the tensile residual stress was reduced and the residual compressive stress was introduced near the toe by the blast treatment.

To evaluate the effect of blast surface treatment on fatigue behavior of

welded joints, the fatigue tests were carried out on two types of out-of-plane gusset fillet welded joints, as-welded specimens and blast-treated specimens. The fatigue tests results showed that over 67% increase in fatigue limit was obtained by using blast treatment but in high stress range there was no significant difference in fatigue limit between the as-welded and blast-treated specimen. Mathematical Interpretation was applied to assess effect of stress concentration and residual stress on fatigue limit of out-of-plane gusset welded joints.



1. 서 론

용접이음부의 피로강도는 용접구조물의 내구성에 영향을 미치며, 용접이음을 실시하지 않은 구조물에 비해 매우 낮은 편이다. 용접이음부의 피로강도가 낮은 이유는 주로 용접이음부 부근에 대한 인장잔류응력(tensile residual stress)과 응력집중(stress concentration)에 의한 영향으로 알려져 있다.⁽²²⁾ 일반적으로 용접이음부에는 응력집중과 잔류응력이 존재하며 이것은 완전히 제거 되어질 수 없다. 용접구조물의 피로강도를 향상시키는 대표적인 가장 용이하게 적용할 수 있는 방법으로는 그라인더 처리, 해머피닝 등과 같은 기계적인 방법이나 TIG Dressing과 같은 재용접에 의한 후처리방법이 있으며, 이러한 방법들은 대상 구조상세의 용접부 단면형상을 매끄럽게 처리하여 용접토우부에서의 국부적인 응력집중을 완화시켜 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.⁽²⁵⁾

필렛 용접이음부의 피로강도 향상에 대한 연구방법 중 후처리에 의한 피로강도 향상에 대한 연구로써, 국외의 경우 P.J. Haagensen은 Toe Grinding과 Hammer Peening의 조합을 통해 용접 연결부의 피로강도를 약 50~140% 향상시킬 수 있음을 보였고,⁽²⁵⁾ S J Maddox는 Hammer Peening을 통해 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도가 약 200% 상승 하였음을 보였으며⁽²⁶⁾, Kengo Anami, Chitoshi MiKi는 하중비전달형 필렛 용접부에 TIG Dressing, 1~3Pass Hammer Peening을 실시하여 용접 그대로-TIG Dressing-1pass Hammer Peening-3pass Hammer Peening순

으로 피로강도가 향상됨을 보였다.⁽²⁷⁾

국내연구로는 임청권 등이 필렛용접이음으로 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 보였다.⁽⁷⁾ 홍성욱 등은 하중비전달형 필렛용접부를 대상으로 Grinding을 실시하여 2×10^6 회 피로강도가 약 15% 상승함을 보였으며,⁽¹¹⁾ 정영화 등은 TIG Dressing을 실시하여 피로강도가 약 11% 상승함을 보였다.⁽⁴⁾ 임청권 등은 부분용입한 필렛용접이음부와 보통의 필렛용접이음부에 Grinding, 1~3pass Hammer Peening을 실시하여 1~2등급의 피로강도가 향상을 얻을 수 있음을 보였다.⁽⁷⁾

한편, 용접부의 형상제어를 통한 피로강도 향상에 대한 연구로 Nguyen 등은 잔류응력과 용접부 형상이 맞대기 용접 연결부의 피로 수명에 미치는 영향을 조사하였는데 용접부 형상제어에 의한 맞대기 용접의 피로강도 향상은 용접토우부의 곡률반경을 증가시키거나 프랭크각을 감소시킴으로써 얻을 수 있다고 하였다.⁽²⁸⁾ 서정관 등은 하중비전달형 필렛용접부의 용접부 형상제어를 통해 피로강도를 향상시킬 수 있음을 보였다.⁽⁹⁾

강교량의 피로내구성 평가는 ASSHTO, JSSC, IIW등과 같이 각 나라에서 규정되어 있는 피로설계지침인 피로설계 S-N곡선을 따르고 있다. 이러한 피로설계곡선은 재료를 가공하지 않고 그대로 사용하여 용접이음한 그대로의 시험체를 사용하고 있다.

1980년대 후반부터 국내 강구조물의 제작단계에서 블라스트 표면처리는 강재 표면의 이물질 제거 및 도장시 도료의 부착성 증대를 위해 실시되는 공정 중 하나이다. 이와 같이 블라스트 처리가 일반화되어 있지만, 용접이음부의 피로강도에 미치는 영향은 피로설계지침에 고려되지 않은 실정이

다. 면외거셋 용접이음의 블라스트 처리 유무에 따른 피로시험에서는 블라스트 처리를 실시한 시험체의 피로강도가 증가하였고, 이는 주로 블라스트 처리에 의한 용접토우부 기하학적 형상의 개선과 압축잔류응력의 도입에 의한 것으로 밝혀졌다.⁽¹⁾ 이러한 결과에서 기하학적 형상이 개선되고 압축잔류응력이 크게 발생할수록 피로강도 향상을 기대할 수 있고, 블라스트 처리조건과 피로강도와의 상관관계를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 용접 그대로의 시험체와 블라스트 처리한 면외거셋 용접이음 시험체에 대한 피로시험을 실시하였으며, 피로시험에 따른 결과값을 이용하여 용접부 기하학적형상이 피로수명에 미치는 영향, 용접부 기하학적형상이 피로한도에 미치는 영향, 용접부 압축잔류응력이 피로한도에 미치는 영향을 각각 평가해 보도록 하겠다.



2. 피로파괴 기초이론

강 구조물의 용접이음부 부근에 생기는 균열은 허용응력보다 훨씬 작은 응력이 반복하여 발생하는 것이 많다. 이와같이 재료의 파괴는 허용응력을 초과하는 하중에 의해서 뿐만 아니라 허용응력보다 훨씬 낮은 응력의 반복적인 작용에 의해서도 발생하며, 이 현상을 피로파괴(fatigue failure)라고 한다.

2.1 피로파괴의 기초

2.1.1 반복하중과 피로설계곡선

재료 및 구조부재의 피로특성 평가는 보통 단조로운 반복하중으로 피로 시험을 실시한다. 구조부재의 시험에서는 하중 자신에도 의미가 있지만 피로도 국부적인 응력 및 변형률의 조건에서 일어나므로 반복하중을 응력 및 변형률로 변화하여 시험 결과를 정리하는 것이 보통이다.

피로 시험에서 이용되는 응력과 시간의 관계를 그림 2.1에 나타낸다. 응력의 임의의 최대값으로부터 다음의 최대값까지, 또는 임의의 최소값으로부터 다음의 최소값 까지가 1회의 반복 횟수이다. 응력의 변화는 다음의 6가지의 양 가운데 2개를 이용해서 나타낼 수 있다. 일반적으로 응력의 변화는 응력범위 $\Delta\sigma$ 와 응력비 R 로 나타내는 경우가 많다⁽¹⁸⁾.

최대응력 : $\sigma_{\max}$

최소응력 : $\sigma_{\min}$

평균응력 : $\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{max}}{2}$

응력범위 : $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

응력진폭 : $\sigma_{amp} = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$

응 력 비 : $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

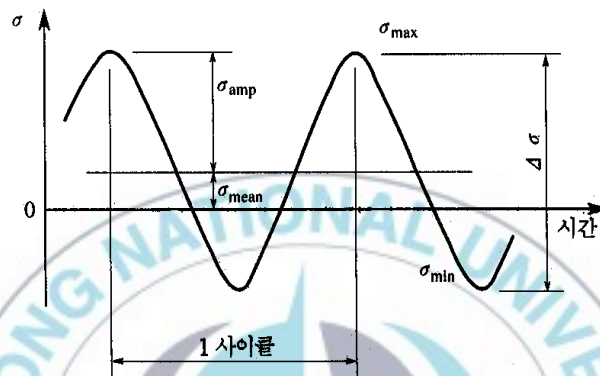


그림 2.1 피로시험에서 이용되는 응력과 시간의 관계

응력파형의 예를 그림 2.2에 나타낸다. 그림에서 나타낸 바와 같이 $R = -1$ 인 경우, 즉 최소 압축 응력과 최대 인장 응력이 동일한 경우를 완전 양진(完全 兩振)이라고 하고 $R = 0$ 인 경우, 즉 최소 응력이 0일 때를 완전 편진(完全 片振)이라고 한다. 그리고 $0 < R \leq 1$ 인 경우, 즉 최소 인장 응력이 0보다 클 때를 불완전 편진(不完全 片振)이라고 한다.

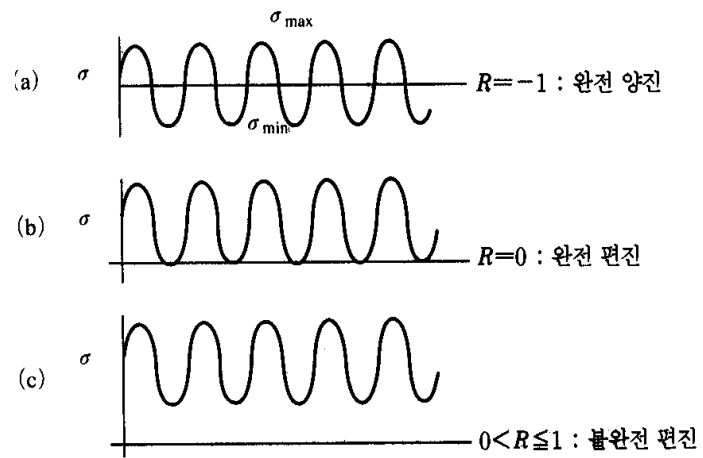


그림 2.2 하중재하 조건과 응력비 R



2.1.2 피로수명

강구조물이 반복하중을 받으면 금속의 결정 조직내에 미끄럼이 생겨 경화가 일어나고 표면의 결정에 미시적인 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 정의되고 있다.⁽¹⁰⁾

(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. 미시적인 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) 균열전파수명 N_p (propagation life: $N_p = N_f - N_i$)

균열이 발생하고 나서 시험편이 파단할 때까지의 반복횟수를 말한다.

2.1.3 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 피로 한(Fatigue limit)이라 한다. 그 이하의 응력범위이면 수명이 무한대인 것을 의미한다. 알루미늄합금 등 대부분의 재료에서는 피로한은 나타나지 않고 파선과 같은 경사가 완만하게 되면서 하향을 계속한다. 강교량부재에 뾰족한 노치가 있으면 피로한은 나타나지 않는다. 곡선상에서 어떤 수명에 대한 응력의 범위 및 진폭을 읽을 수가 있고 N사이클의 수명에 대한 응력의 범위 ΔS_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.⁽¹⁰⁾

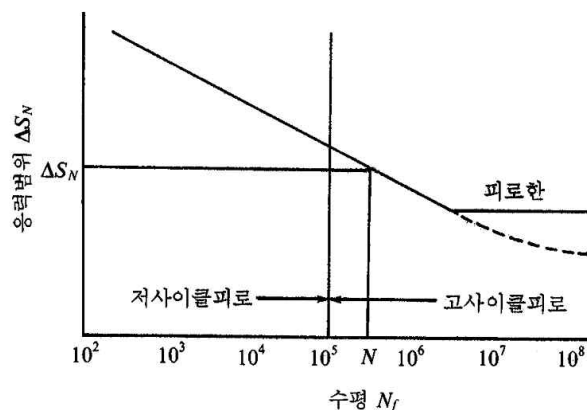


그림 2.3 S-N선도

2.2 피로강도에 미치는 영향 인자

2.2.1 응력비가 피로강도에 미치는 영향

용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향은 응력비가 피로강도에 미치는 영향으로 귀착할 수 있다. 무한히 먼 방향에서 일정 인장을 받는 편축 균열이 존재하는 반무한판의 경우에 피로균열진전법칙에서 응력비는 그다지 영향을 미치지 않지만, 응력비가 커지게 됨에 따라 피로 한계가 저하하고 S-N곡선이 긴 수명 영역에서 보다 유효하게 된다. 그림 2.4에서와 같이 피로강도는 응력비가 커지게 됨에 따라 저하한다.⁽¹⁸⁾

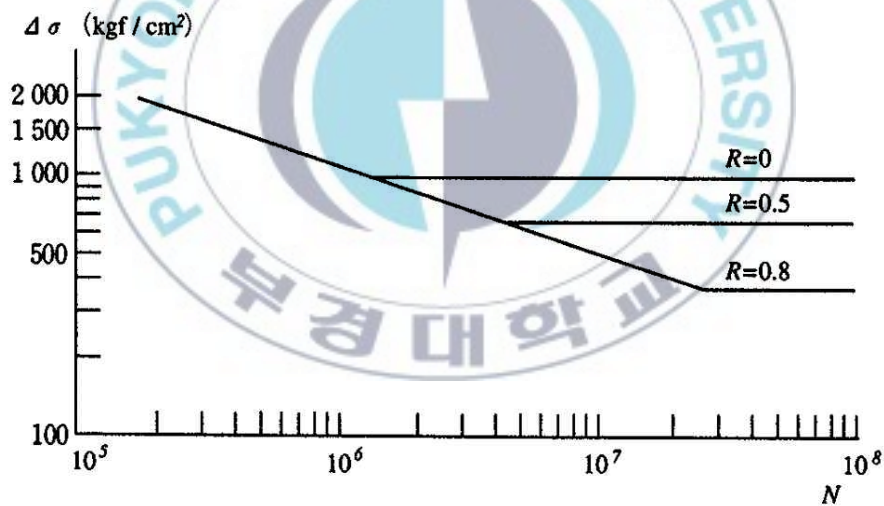


그림 2.4 응력비가 피로 한계에 미치는 영향

2.2.2 응력집중이 피로강도에 미치는 영향

강재의 피로강도는 표면이 평활한 경우 인장강도가 높을수록 높게 되는 경향이 있다. 그러나 강재 표면에 노치나 용접비드 등의 형상이 변하는 응력집중부가 존재하면 이곳에서 집중적으로 피로균열이 발생하기 때문에 피로강도가 저하하게 된다.⁽²²⁾

강교량과 같이 여러 부재가 용접에 의해 연결되어 있는 구조의 피로강도는 이음부의 구조적인 응력집중이나, 용접 자체의 국부적인 응력집중에 의해 지배되기 때문에 부재강도의 영향을 거의 받지 않는 경우가 많다. 그림 2.5에는 용접이음부의 응력집중의 영향을 나타낸 것이다. 균열기점이 되는 용접토우부에 작용하는 응력은 공칭 휨응력과 비교하여 ① 이음전체의 힘에 흐름의 불연속성에 의존하는 구조적인 응력집중, ② 용접부 근방의 용접비드형상에 의존하는 국부적인 응력집중의 영향을 높게 받는다.

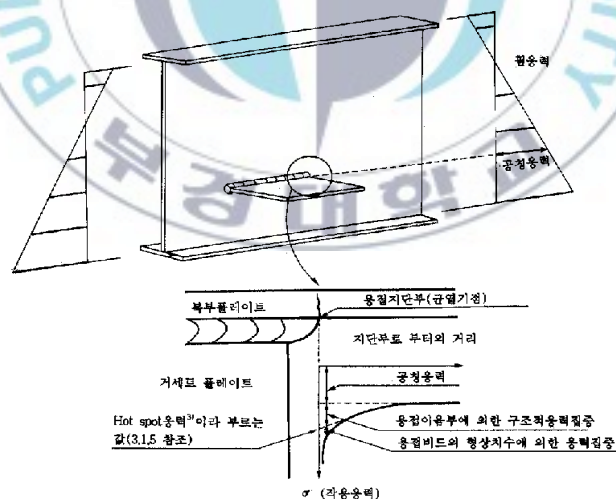


그림 2.5 용접이음부의 응력집중 영향

2.2.3 용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향

피로는 인장응력의 반복에 의해 발생하나 외력으로서 압축응력만이 작용하는 부위에서도 인장잔류응력이 존재하면 피로균열이 발생하는 경우도 있다. 그림 2.6과 같이 용접부에는 용접시공 시 냉각과정에서 통상 항복점에 가까운 인장응력이 내부응력으로서 잔류하게 되는데, 이러한 용접부에 압축응력이 작용하면 용접부의 내부응력과 중첩된 인장응력이 반복적으로 작용하게 된다.⁽²²⁾

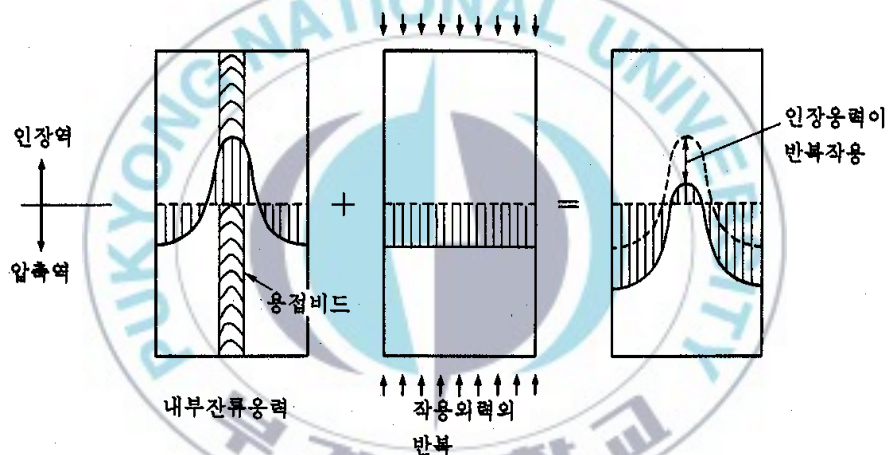


그림 2.6 용접잔류응력의 영향(모식도)

일반적으로 소형 시험체에서 주어진 피로강도는 실물 크기의 보 시험편에서 주어진 피로강도보다 크게 된다. 이러한 이유는 소형시험편의 용접이음부에서 생기는 인장잔류응력은 실물 크기의 보 시험체의 용접이음부에서 발생하는 인장잔류응력만큼 크지 않기 때문이다. 따라서 소형시험편 용접이음부의 응력비는 실물 크기의 보 시험체의 용접이음부의 응력비보다 작게 된다. 2.2.1 절에서 설명한 바와 같이 응력비가 낮은 피로시험에서 주어진 피로강도는 실물 크기의 보 시험편에서 주어진 피로강도보다

크다. 따라서 소형 시험편에서 주어진 피로강도는 실물 크기의 보 시험편에서 주어진 피로강도보다 크게 된다. 그러므로 소형시험편에서 주어진 피로 강도는 실제 교량의 피로 강도를 안전측으로 평가하지 않는다⁽¹⁸⁾.

또, 용접이음에 그림 2.7에 나타낸 바와 같이 용접결함, 그리고 용접형상의 기하학적인 불연속 등에 의해 응력집중이 발생하여 피로강도를 저하시킬 수 있다⁽¹⁸⁾.

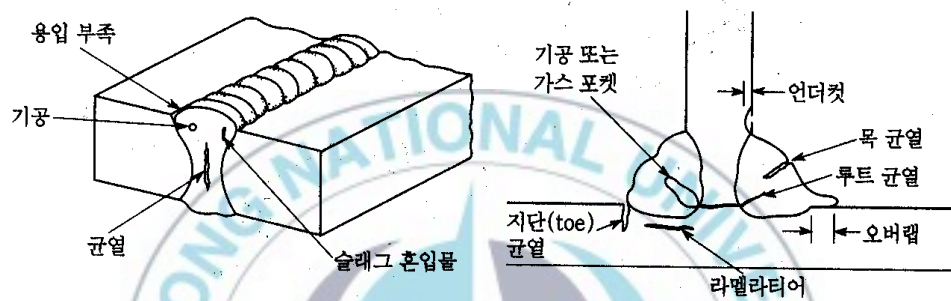


그림 2.7 용접 결함

2.2.4 용접이음부의 피로강도

용접이음의 피로강도는 일반적으로 이음부에 작용하는 응력범위(S_r)와 이음의 수명(N_f)을 사용하여 다음 식 2.1과 같이 이음 형식별로 정리할 수 있다.⁽²²⁾

$$S_r^m \cdot N_f = C \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

(단, C : 이음 형식별로 일정함, $S_r >$ 피로한도)

일본의 구조물 피로설계지침에서는 강구조물 용접이음의 경우, m 을 3으로 통일해서 부여하고 있다⁽³⁶⁾. 또, 이음별 피로강도를 정리하는데 일반적으로 200 만회 피로강도(반복 수 200 만회에서 이음이 파단에 이르는 응력범위)가 사용되고 있다. 200 만회라는 회수는 S-N 선도를 표현하기 위한 대표치의 하나로서 생각하여야만 하는데, 이것은 용접이음의 경우에는 응력집중의 영향에 의해 피로한도가 200 만회 피로강도보다 낮게 되는 경우가 많기 때문이다. 강재의 용접개소는 그림 2.8에 나타낸 것과 같이 여러 이음의 형태로 분류하여 나타낼 수 있다.

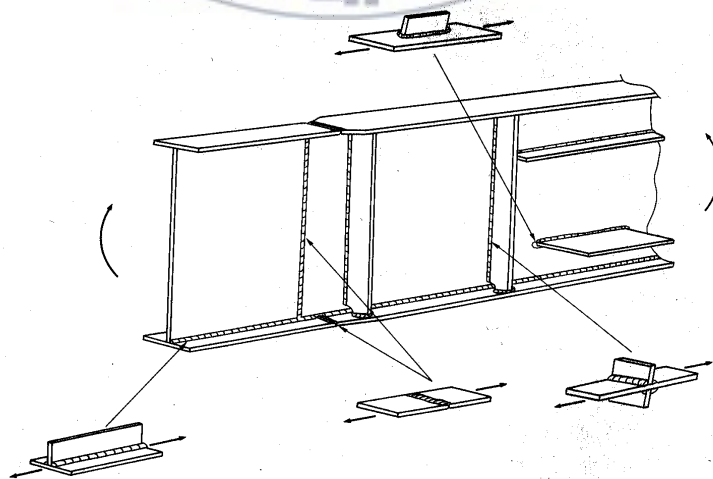


그림 2.8 플레이트거더 주거더에 포함된 이음의 예

강교에 존재하는 주된 구조상세에 대한 피로강도 등급을 그림 2.9 에 나타낸다. 피로강도 등급은 JSSC 피로설계 지침의 규정을 따른 것이며⁽³⁶⁾, 피로 균열 근처에 나타낸 기호 $\leftrightarrow$ 는 구조역학에 의해 구해진 공칭응력의 작용방향을 나타내며, 부재 밖에 나타낸 화살표는 하중 작용 방향을 나타낸다.

일반적으로 동일 용접조건에서도 치수 형상이나 용접조건 등이 달라지면 그 피로강도도 달라지므로 여기에 나타낸 등급은 이음 형식별로 각종 영향을 고려하여 하나의 안전측으로 설정된 값이다.



그림 2.9 이음의 구분 등급에 대한 피로설계곡선

용접 이음에는 용접결함이나 기하학적인 불연속, 또는 방향에 따라 응력집중이 발생한다. 따라서 용접이음의 피로균열은 이들 응력집중이 발생하는 영역에서 잘 발생한다.

그림 2.10에 나타낸 바와 같이 웨브와 플랜지가 종방향 맞대기 용접(응력의 작용 방향에 평행한 맞대기 용접)에 대해서는 피로강도 등급 C가 적용됨을 나타낸다

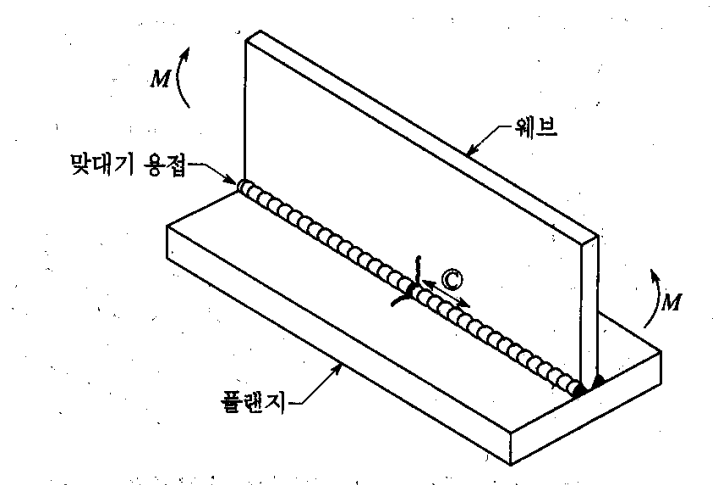


그림 2.10 웹과 플랜지의 종방향 맞대기용접의 피로강도 등급



그림 2.11에 나타난 바와 같이 수직보강재를 웨브 또는 플랜지에 연결하는 필렛용접(응력의 작용 방향에 직각)에 대해서는 피로강도 등급 E가 적용된다.

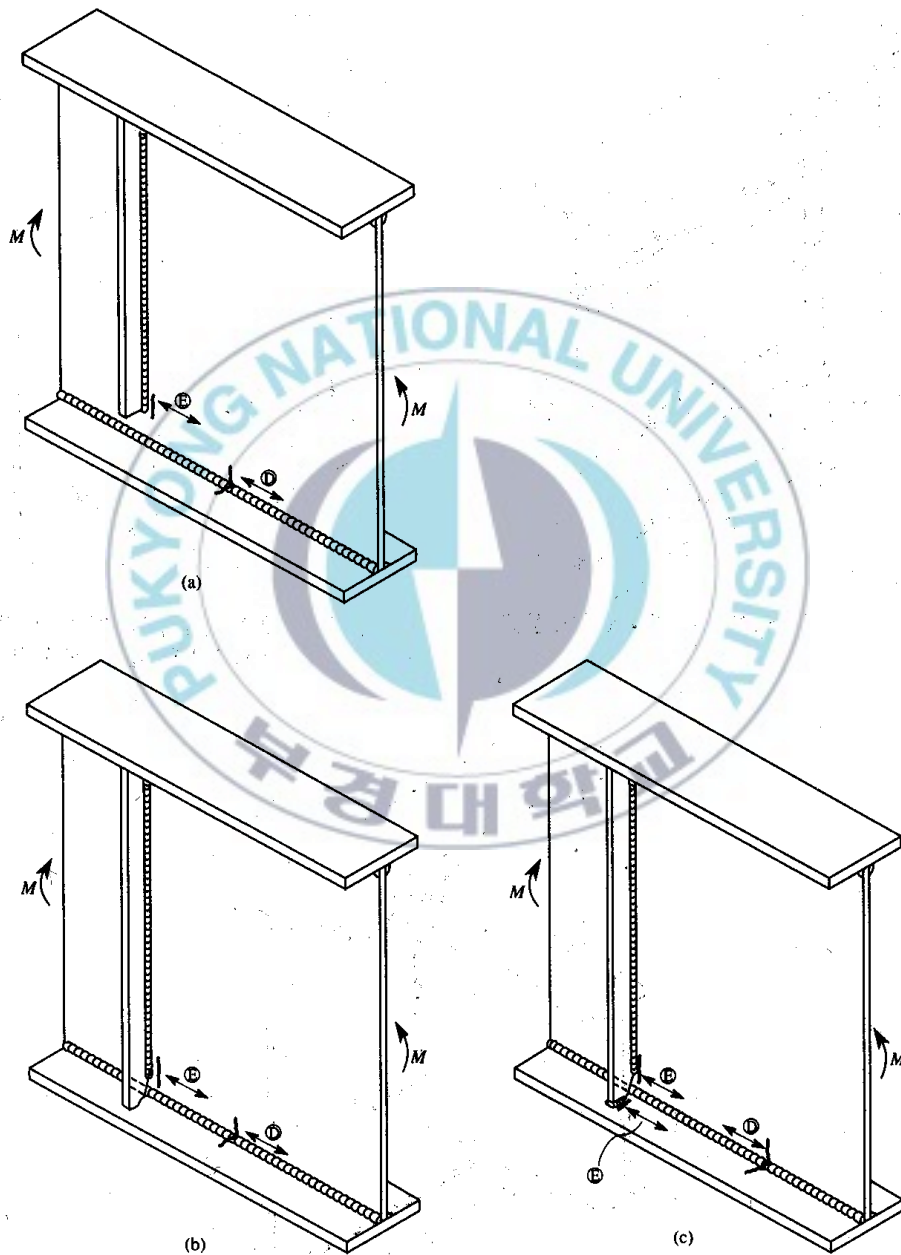


그림 2.11 수직 보강재 단부의 피로강도 등급

수평보강재를 웨브에 연결하는 필렛용접의 피로강도 등급을 그림 2.12 (a)에 나타낸다. 수평 보강재의 단부(응력의 작용 방향에 직각)에 대해서는 피로강도 등급 G가 적용되며, 단부로부터 떨어진 부분(응력의 작용 방향에 평행)에 대해서는 피로강도 등급 D가 적용된다.

또한 거셋 플레이트를 웨브에 연결하는 필렛용접의 피로강도 등급을 그림 2.12 (b)에 나타낸다. 거셋 플레이트 길이에 따라 거셋 플레이트 단부(응력의 작용 방향에 직각)의 피로강도 등급이 달라진다. 즉,

$l \leq 100\text{mm}$ 인 거셋 플레이트에 대해서는 피로강도 등급 F가 적용되며,

$l > 100\text{mm}$ 인 거셋 플레이트에 대해서는 피로강도 등급 G가 적용된다.

단부로부터 떨어진 부분(응력 작용 방향에 평행)에 대해서는 거셋의 길이에 관계없이 피로강도 등급 D가 적용된다.

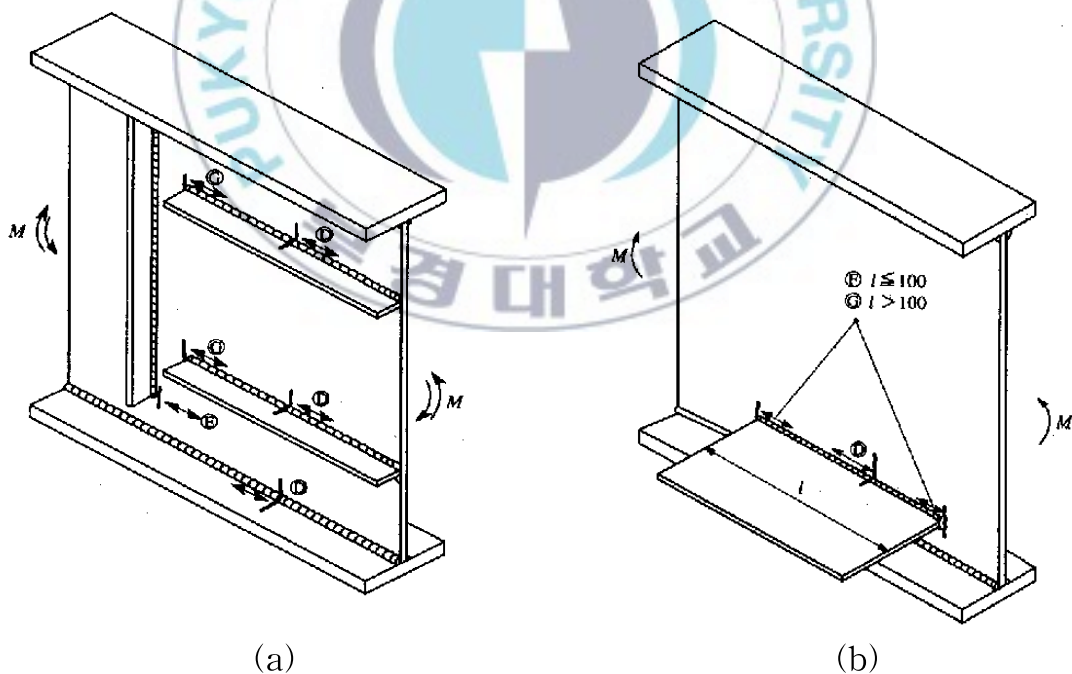


그림 2.12 수평보강재 단부와 거셋 플레이트를 웨브에 연결하는 필렛용접의 피로강도 등급

이와 같이 수평 보강재 단부, 거셋 플레이트 단부에서는 낮은 피로 강도 등급 G가 주어져 있는데 그 이유는 그림 2.13에 나타낸 바와 같이 하중의 작용 방향에 평행하게 덧판이 주판(主板) 표면에 필렛용접으로 연결되는 경우, 이 이음의 전체적인 구조 상세에 기인하여 주판에 발생하는 응력은 덧판 위치에서 공칭응력보다 커지게 된다. 이 응력 증가에 따라 덧판 단부의 피로강도 등급은 낮아지게 된다.

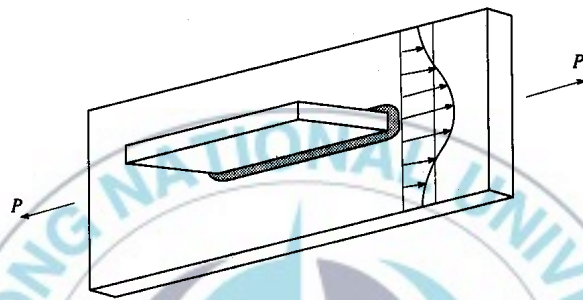


그림 2.13 덧판을 가지는 주판의 응력 분포

2.3 용접연결부의 피로설계기준

강교량의 피로파괴를 방지하기 위해 각국에서는 설계기준에 피로설계조항을 두고 있다. 현재 피로설계조항을 제시하고 있는 기준으로는 국내의 도로교설계기준⁽²⁰⁾과 미국의 AASHTO LRFD시방서⁽²⁹⁾ 이외에도 일본강구조협회의 피로설계지침인 JSSC⁽³⁶⁾, 유럽의 EUROCODE No. 3⁽³⁰⁾, 영국의 BS 5400의 Part 10⁽³¹⁾ 등이 있다.

2.3.1 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 다음 식 (2.2)과 같다.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \dots\dots\dots (2.2)$$

$\sigma_{\max}$: 최대응력

$\sigma_{\min}$: 최소응력

도로교설계기준의 본 조항에서는 구조상세범주와 반복회수에 따른 허용 피로응력범위와 작용하중에 의한 최대응력범위의 반복회수를 산정하는 기준에 대하여 다음과 같이 규정하고 있다.⁽²⁰⁾

(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.⁽²⁰⁾

표 2.1 허용피로응력범위

상세 범주	다재하경로 구조 ¹⁾				단재하경로 구조 ²⁾			
	허용응력범위, f_{sr} (MPa) ³⁾							
	10만회	50만회	200만회	200만회 이상	10만회	50만회	200만회	200만회 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 ⁴⁾			84 ⁴⁾	77 ⁴⁾
D	196	112	70	49	154	91	56	35
E ⁵⁾	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 부분용접한 덮개판을 사용하지 않는다.

(2) 하중회수

설계시 최대응력범위의 반복회수는 교통량과 하중조사 및 특별한 고려사항이 없는 경우에는 표 2.2에 따른다고 규정하고 있다. 또한 허용피로응력은 활하중이나 풍하중을 포함하는 하중조합에 대해 적용되며, 사하중과 풍하중의 조합에 따른 응력반복회수는 특수한 경우를 제외하고는 10만회로 한다고 규정하고 있다.⁽²⁰⁾

표 2.2 설계응력 반복횟수

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

2.3.2 각국의 피로설계기준

일본강구조협회의 [강 구조물의 피로설계 지침·동해설](약칭 JSSC 피로 설계 지침)에서는 다음 그림 2.14과 같이 S-N곡선을 규정하고 있다⁽³⁶⁾.

그림에서 보는 바와 같이 변동응력에 대해 일정 진폭응력과 동일한 피로수명도를 적용하지만, 피로한계응력 범위를 일정 진폭응력보다 매우 낮게 제한하고 있다. 이는 변동 진폭응력의 경우, 일정 진폭응력보다 높은 피로손상을 일으킨다는 점을 반영한 것이다.

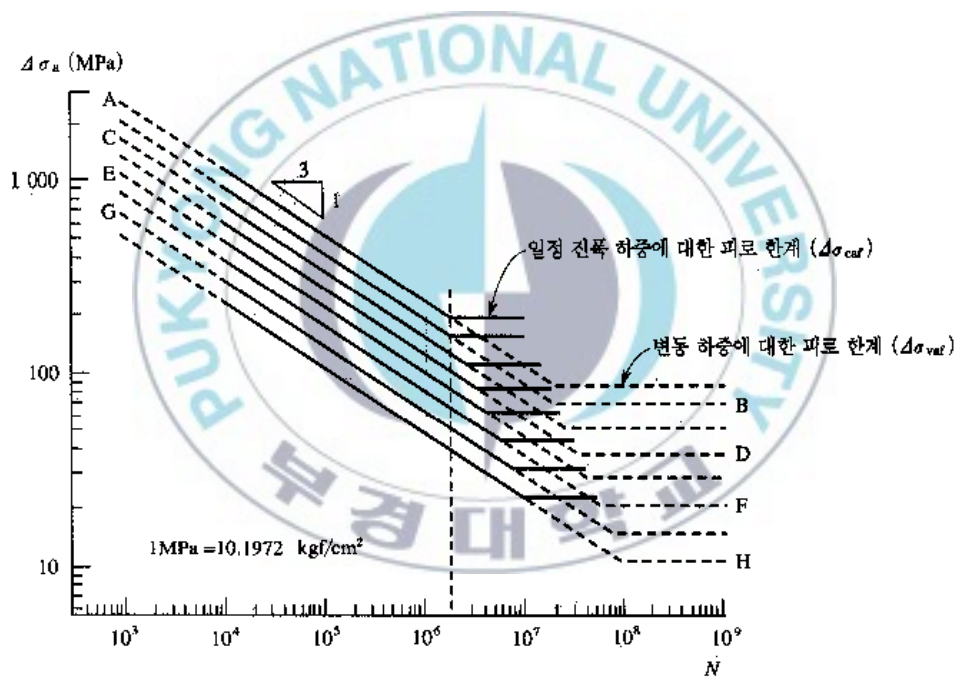


그림 2.14 피로설계 곡선

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 75

년으로 가정함으로써 이 동안의 예상트럭 교통량을 반영하는데 보다 합리적인 설계법을 채택하고 있다.⁽²⁹⁾ 그림 2.15는 LRFD 트럭설계의 차량하중 모형이다.



그림 2.15 LRFD 트럭설계의 차량하중 모형

유럽의 EUROCODE에서는 피로설계를 위한 하중모형을 5종류로 제시하여 그 중 하나를 선택해 사용할 수 있도록 하였고, 강교량 부재의 구조상세에 대한 피로등급은 실물 대 모형 실험결과를 바탕으로 피로강도 곡선의 등급으로 정하였다.⁽³⁰⁾

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.⁽³¹⁾



2.4 압축잔류응력

2.4.1 잔류응력의 개념 및 영향

잔류응력(residual stress)이란 주위 환경과 열적인 평형 상태에 있으면서 외부에서 작용하는 하중이 없을 때 기계 구조물에 내재하는 잠금된 응력(locked-in stress)을 말한다. 잔류응력은 내부응력(internal stress) 또는 자체응력(self stress)이라고도 한다. 이 잔류응력은 매우 변화 변화 무쌍한 특성을 지니고 있지만 외부에 하중을 가해 생긴 응력과 마찬가지로 실제응력이며, 구조적 보존에 미치는 영향도 실제적이다. 주조, 압연, 성형, 기계 가공, 용접, 몰딩 등 거의 모든 기계 공정에서 가공물의 내부에 잔류응력을 발생시킨다. 이러한 잔류응력은 풀림(annealing)과 같은 후처리에 의해 제거 또는 약화시킬 수 있다. 그러나 이러한 후처리 공정으로 가능하지 않을 때가 많다.⁽¹⁹⁾

잔류응력은 구조물의 신뢰성에 중요한 영향을 미친다. 구조물에 해로운 영향을 주기도 하고, 이로온 영향을 미치기도 한다. 이러한 잔류응력의 영향은 상호 관련된 여러 가지 요소들과 복잡하게 얽히어 나타난다. 잔류응력과 작용 응력의 부호, 크기, 방향, 분포상태가 중요한 인자들이다. 작용 하중이 정적하중인지, 피로하중인지, 아니면 둘을 포함한 하중인지가 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 물론 사용한 재료의 형태가 연성인지 취성인지, 정적특성과 피로특성이 어떠한지 등도 매우 큰 영향을 미친다.⁽¹⁹⁾

잔류응력의 이로온 예로는 작용응력과 잔류응력의 중첩으로 하중을 받는 부재를 강화시킬 수 있다. 일반적으로 가장 흔한 파손 형태는 인장응력에 의한 파손이라고 볼 수 있다. 따라서 사용 중에 높은 인장응력을 받는 표면에 압축잔류응력을 발생시키므로 부재를 강화시킨다.⁽¹⁹⁾

2.4.2 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력

한 개의 쇼트볼이 재료의 표면을 타격할 때의 재료 표면을 그림 2.16에 나타낸다. 쇼트볼이 투사되는 타격 에너지는 재료의 소성변형으로 에너지가 전이된다. 재료의 표면은 움푹하게 들어가게 되며, 재료의 조직은 표면을 따라서 늘어나면서 국부적인 소성변형을 일으키게 된다. 소성변형된 영역에서는 압축잔류응력층이 생성되며, 이 때 늘어난 표면층을 늘어나기 전의 상태로 복원하려는 힘이 작용하게 된다. 표면층에서는 압축잔류응력이 생성되며, 내부에는 인장응력이 작용하여 평형상태를 이루게 된다.⁽¹⁹⁾



그림 2.16 쇼트볼과 재료의 충돌에 의해 발생하는 잔류응력의 형태

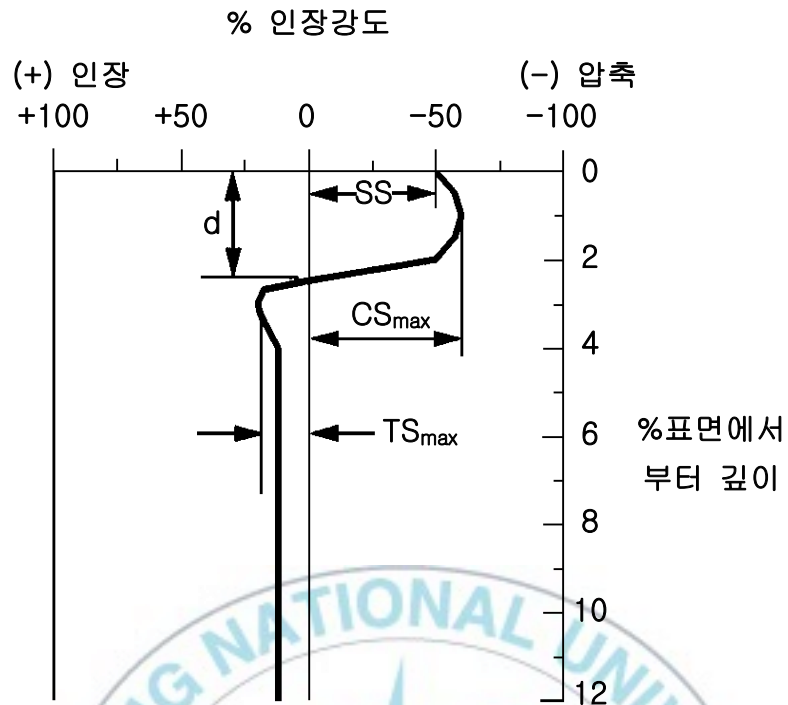


그림 2.17 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력 분포

압축잔류응력은 소성변형 영역과 탄성변형량에 의해 조절되며 일반적으로 인장강도의 약 50% 정도에 이르게 된다. 잔류응력층에 대한 일반적인 형태는 그림 2.17와 같다. 여기서 표면응력은 SS, 최대 압축응력은 CS_{max} , 압축잔류응력이 인장력으로 변하는 지점까지의 깊이를 d , 최대 인장응력의 값을 TS_{max} 로 나타내었다.⁽¹⁹⁾

3. 피로시험

3.1 시험체 제작

대상 시험체는 현재 강교량에 널리 사용되고 있는 용접구조용강재인 SM490B로 제작하였으며, 시험체 형상 및 치수는 그림 3.1과 같고, 사용강재의 화학적 성분 및 기계적 성질은 각각 표 3.1 및 표 3.2에 나타낸다. 폭 80 mm, 두께 10 mm, 길이 800 mm인 모재에 두께 10 mm, 길이 150 mm인 면외거셋을 반자동용접법인 FCAW(flux core arc welding)을 이용해서 모재양면에 필렛용접치수 6 mm로 부착하였고, 용접조건은 표 3.3과 같다.

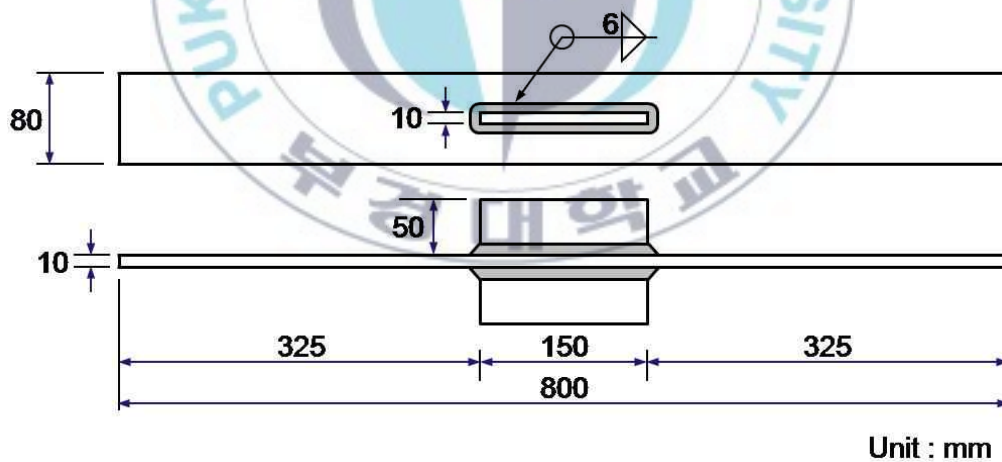


그림 3.1 시험체 형상 및 치수

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

표 3.1 화학성분

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

표 3.2 기계적 성질

강 종	기 계 적 성 질		
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)
SM490B	325	490	25

표 3.3 용접조건

용접법	용접봉 규격	전압 (Volt)	전류 (Amp)	용접 속도 (mm/s)
FCAW	Dual Shield 7100(E71T-1)	28	265	4.6

표 3.4 블라스트 처리조건

종류	연마재 입경 (mm)	블라스트 후 표면의 거칠기(μm)
그릿 블 라스트	쇼트볼 : 1.0 (30%) 그릿 : 0.7 (70%)	60

이와 같이 용접된 시험체를 강교 제작업체에서 현재 제작되고 있는 강교량과 동일한 조건으로 블라스트 처리를 실시하였고, 표 3.4에 블라스트 처리 조건을 나타낸다. 시험체명은 용접 그대로의 시험체를 AW(As-welded), 블라스트 표면처리를 실시한 시험체를 BT(Blast-treated)로 하였다. 블라스트 처리 시험체는 1회로 횟수를 제한하여 블라스트 처리를 실시하였다. 여기서 1회는 강교량 제작업체가 도장 전 실제로 실시하고 있는 블라스트 처리 정도로 정의한다.



3.2 시험방법

본 연구에서는 용접 그대로의 시험체와 블라스트 처리를 실시한 총 2종류의 면외거셋 용접이음 시험체에 대한 피로시험을 실시하여, 강교 도장용 블라스트 처리조건에 따른 용접이음의 피로거동을 검토하였다. 블라스트 처리조건에 따른 피로강도 향상 정도를 정량적으로 평가하기 위해서 ± 250 kN 용량의 전기유압식 피로시험기를 이용해 그림 3.3와 같이 인장 피로시험을 실시하였다. 피로시험시 작용하중은 그림 3.2와 같이 정현파(Sine Wave)의 일정진폭하중을 부하하였으며, 응력범위($\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$)는 75~200 MPa의 범위이며, 하한치 하중은 10 kN으로 고정하였다. 하중재하속도는 시험기기의 능력을 고려하여 응력범위의 크기에 따라 3~7 Hz로 하였다. 시험체의 파괴에 대한 최대반복횟수는 천만회까지 하였다. 표 3.5는 피로시험 결과를 나타낸다.

또한 균열발생위치 및 초기균열크기를 측정하기 위하여 다이마킹(dye marking)도 실시하였고, 피로균열발생 및 성장 과정을 정량적으로 평가하기 위해 일정 반복횟수마다 최대하중을 고정시키고 반복하중의 진폭을 반감시켜 비치마크(beach mark)를 도입하였다.

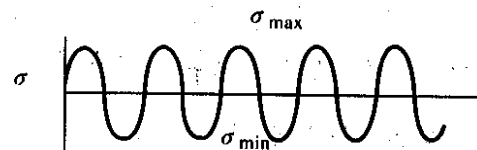


그림 3.2 정현파(Sine Wave)



그림 3.3 인장피로시험 전경

표 3.5 면외거셋 용접이음부의 피로시험 자료

Category of specimen		$P_{\max}$ (kN)	$P_{\min}$ (kN)	Area (mm ²)	ΔP (kN)	$\Delta \sigma$ (MPa)
AW	1	130	10	798.00	120	150
	2	119	10	807.80	109	135
	3	171	10	806.43	161	200
	4	151	10	805.50	141	175
	5	81	10	796.05	71	90
BT1	1	131	10	806.60	121	150
	2	119	10	805.00	109	135
	3	111	10	806.25	101	130

3.3 용접토우부 비드(bead)형상 및 잔류응력 측정

3.3.1 용접토우부 비드형상 측정

피로시험을 실시하기에 앞서 블라스트 표면처리 횟수에 따른 용접토우부에
서의 기하학적 형상 변화를 파악하기 위해 2개의 동일한 시험체에 대해 블라스
트 처리시마다 인상재로 토우부의 형상을 채취하였다. 채취한 고무형상을 시험
체 길이 방향으로 1mm 간격의 7등분으로 절단하고 각 절단면을 사진촬영을
하였다. 각각의 사진파일을 CAD에서 확대하여 그림 3.4과 같은 방법으로 용접
비드접선각도와 용접토우부의 곡률반경을 측정하였다.

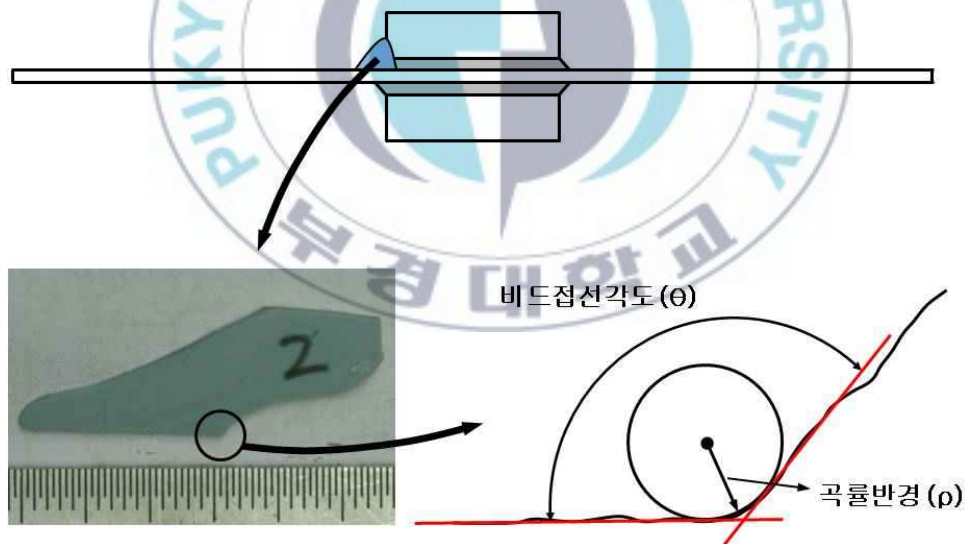


그림 3.4 용접토우부의 기하학적 형상 측정 방법

블라스트 처리횟수에 따른 두 시험체에 대해 용접토우부에서의 용접비드 접선각도와 곡률반경의 측정결과는 그림 3.5와 표 3.6과 같다. 측정결과, 처리횟수에 따른 비드접선각도는 0.61% 이하로 거의 변화가 없었으며, 곡률반경은 AW 시험체에 비해 BT가 약15%로 점차적으로 증가하였다.

블라스트 처리횟수에 따라 용접토우부의 곡률반경이 점차적으로 증가하였기 때문에 용접토우부에서 국부적인 응력집중이 저하되어 이러한 결과로부터 처리횟수가 증가할수록 피로강도가 향상될 것이라고 예상하였다. 이러한 예상결과를 수학적으로 계산해보겠다.

표 3.6 AW시험체와 BT시험체의 비드접선각도와 곡률반경 측정 결과

구분	AW		BT	
	비드접선각도 (°)	곡률반경 (mm)	비드접선각도 (°)	곡률반경 (mm)
평균값	133.77	0.54	133.32	0.62
표준편차	3.58	0.24	3.15	0.17
최대값	156.0	2.00	160.0	2.04
최소값	116.0	0.27	124.0	0.41

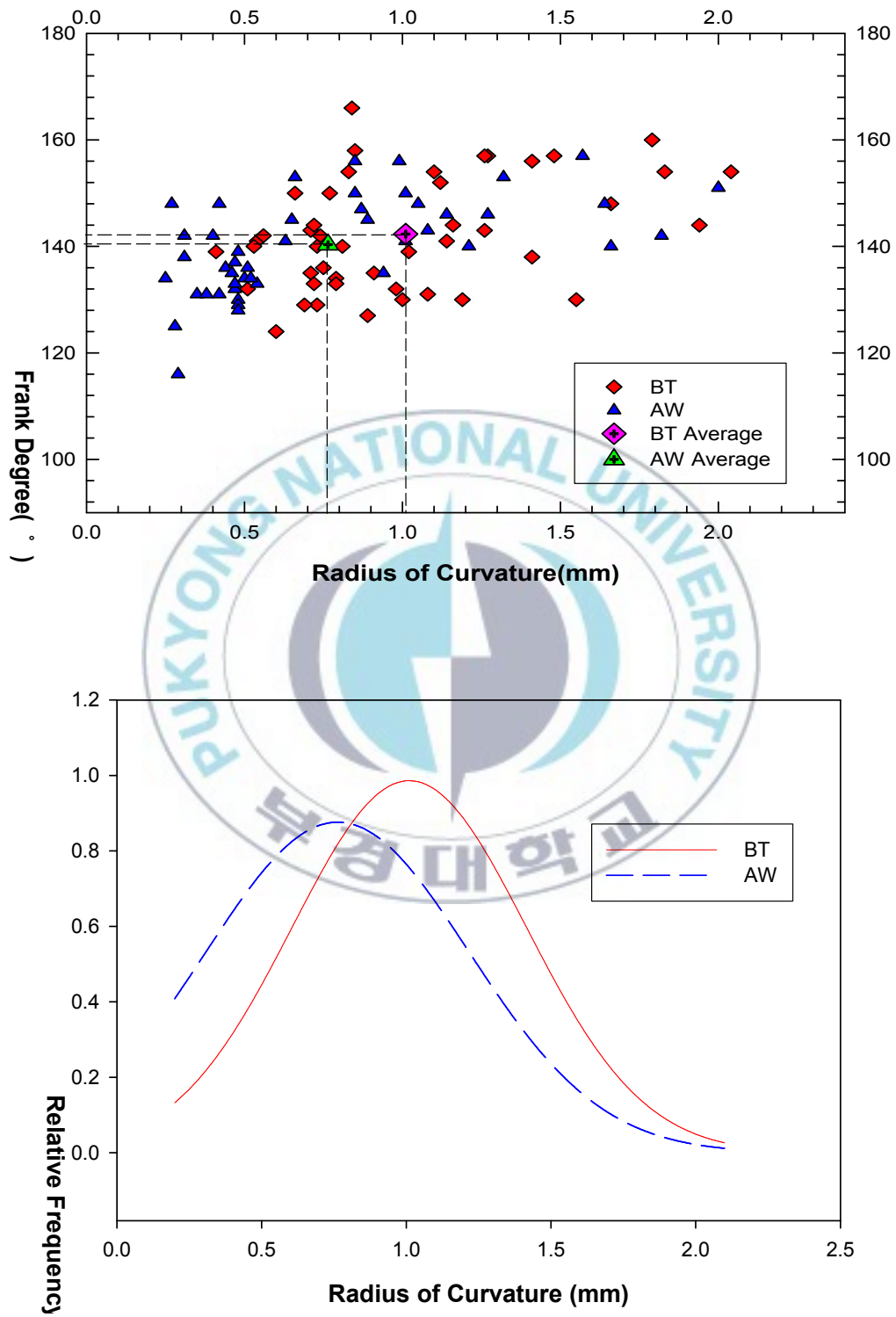


그림 3.5 용접비드의 접선각도와 곡률반경 분포특성

3.3.2 응력집중계수

3.3.1의 기하학적 형상 측정결과로부터 블라스트 처리횟수가 증가할수록 피로강도가 향상될 것이라고 예상하였다. 이러한 예상을 바탕으로 기하학적 형상측정결과 값을 사용하여 아래의 식 (3.1)으로 표현될 수 있는 면외 거셋 용접이음부의 응력집중계수(K_t)를 구하였다.

AW 시험체와 BT 시험체의 용접비드 곡률반경(r)은 평균값을 사용하여 응력집중계수를 산정하였으며, 응력집중계수의 값은 표 3.7과 같다.

$$K_t = -1.115 \log \frac{r}{t} + 0.5370 \log \frac{L}{t} + 0.1384 \log \frac{h}{t} + 0.2848 \log \frac{e}{t} + 0.6801 \quad \cdot \cdot \quad (3.1)$$

여기서, r : 용접토우부의 곡률반경 L : 거셋의 길이

h : 거셋의 높이 e : 거셋의 두께

t : 모재의 두께

그림 3.6은 면외거셋용접부를 포함한 응력집중계수(K_t)를 산정하는 영향인자를 나타낸 그림이며, 표 3.7은 형상측정값과 응력집중계수(K_t)값을 나타낸다. 용접이음부의 종류에 따라 응력집중계수 산정식은 달라질 수 있다.

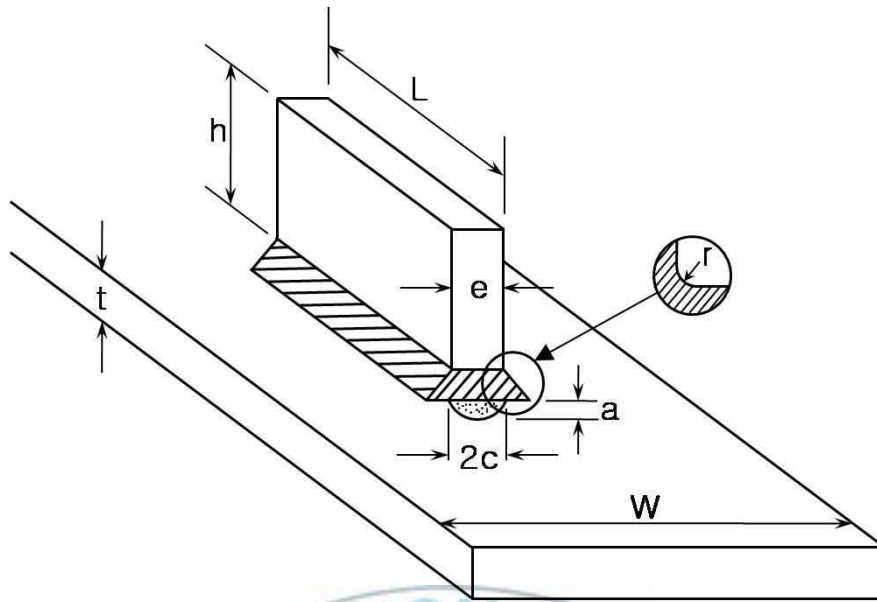


그림 3.6 응력보정계수

표 3.7 형상측정값과 응력집중계수(K_t) 산정값

	r	L	h	e	t	K_t
AW	0.5422	150	50	10	10	2.8199
BT1	0.6249	150	50	10	10	2.7511

블라스트 처리에 의해 응력집중계수는 AW시험체에 비해 BT1이 약 2.5%가량 감소한 것을 표3.7로부터 확인할 수 있다. 블라스트 처리에 의해 용접토우부의 곡률반경 증가와 응력집중계수 감소로부터 피로강도의 증가가 예상된다.

3.3.3 잔류응력 측정

용접이음부에서는 잔류응력이 항상 존재하며, 쇼트피닝에 의해 강재의 표면에는 압축잔류응력이 도입된다고 알려져 있고,⁽¹⁹⁾ 이러한 사실은 블라스트 처리유무에 따른 피로시험에서 블라스트 처리에 의해서도 용접토우부 부근에 압축잔류응력이 도입이 됨을 알 수 있다.⁽¹⁾ 이에 블라스트 처리횟수에 따른 압축잔류응력 도입의 변화를 알아보기 위해 각 시험체에 대해 절단법으로 잔류응력을 측정하였다. 스트레인 게이지는 일축 변형률 게이지를 사용하였다. 표 3.8은 스트레인게이지의 제원을 나타낸다. 그림 3.7과 같이 일축 변형률 게이지를 토우부로부터 2mm 떨어진 위치에 부착하여 두께 방향으로 절단 후, 각각의 게이지에 근접한 위치에 길이방향으로 절단하였고 마지막으로 게이지가 부착된 표면에서 두께방향으로 2mm 떨어진 위치에서 모재 표면과 평행한 방향으로 절단을 실시하며 변형률을 측정하였다. 잔류응력은 반복하중이 작용하게 되면 증가 또는 감소하게 되므로²⁾ 피로시험에 사용하지 않은 시험체를 사용하였으며, 시험체 절단 시 발생할 수 있는 온도변화에 의한 측정오차를 최소화하기 위해 가능한 수동으로 절단하였다.

표 3.8 스트레인 게이지 제원

Type	Gauge length (mm)	Gauge factor (%)	Gauge resistance (Ω)
FLK-1-11-1L	1	2.11 ± 1	119.8 ± 0.5

그림 3.8은 시험체의 잔류응력 측정 전경을, 그림 3.9은 잔류응력 측정 종료 후의 시험체의 전경을 각각 나타낸다.

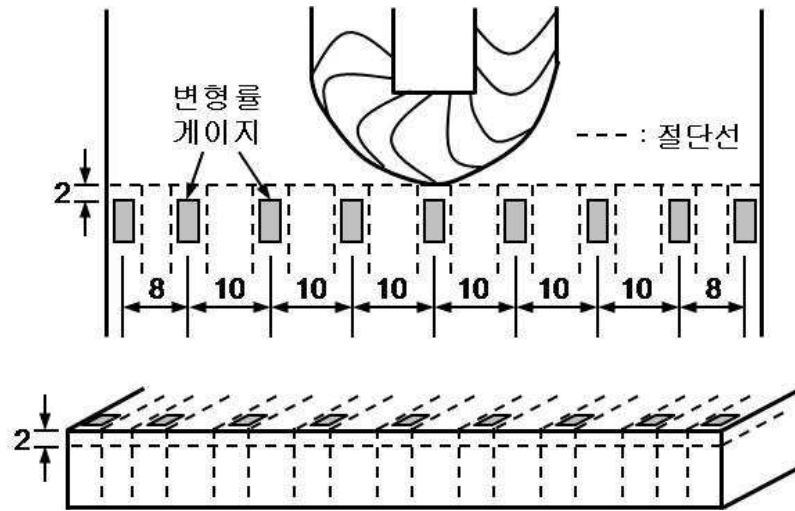


그림 3.7 게이지 부착 위치

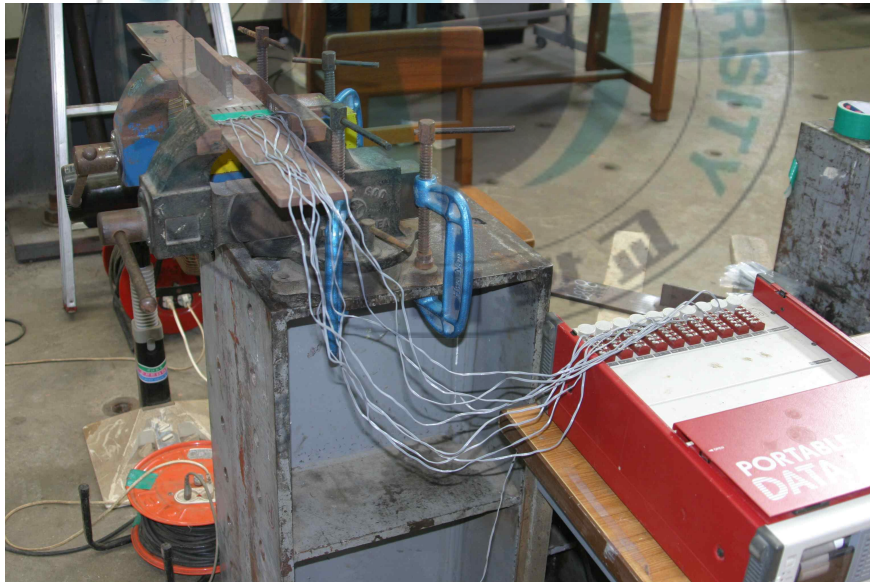
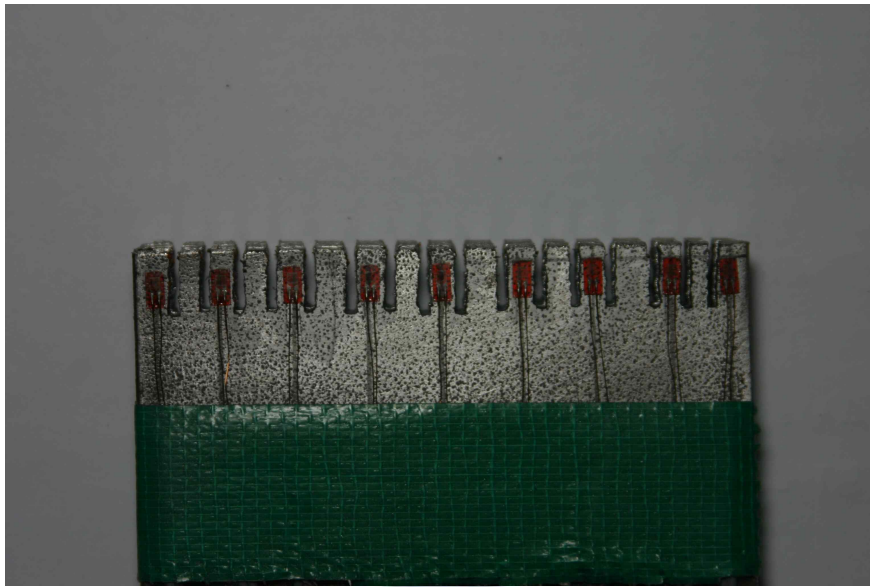
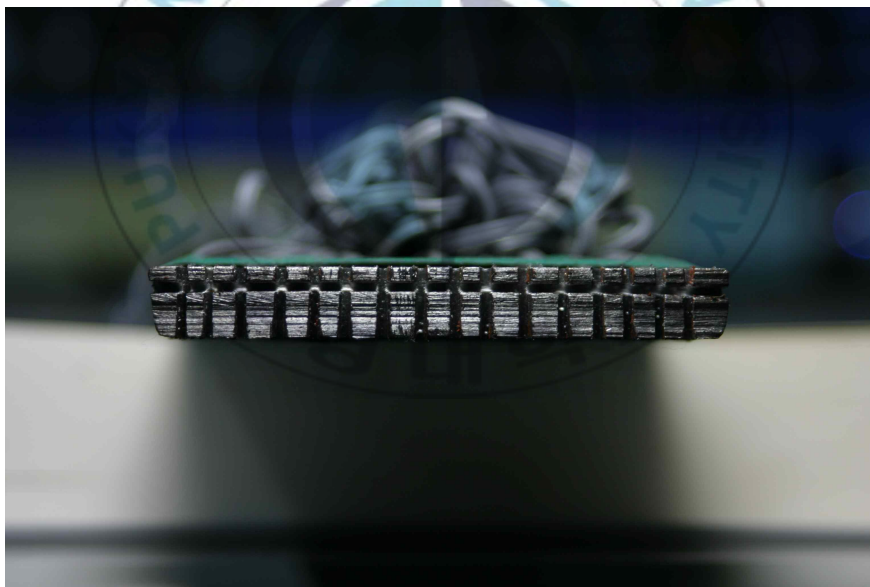


그림 3.8 잔류응력 측정 전경



(a) 두께 및 길이방향으로 절단 후의 시험체 전경



(b) 모재와 평행한 방향으로 절단 후의 시험체 전경

그림 3.9 잔류응력 측정 후의 시험체 전경

블라스트 처리횟수에 따른 시험체의 잔류응력 측정결과를 나타내면 그림 3.10과 같다. 측정결과 BT시험체의 경우 용접토우부 부근에서 약 30 MPa의 압축잔류응력이 도입됨을 알 수 있었다. 이러한 압축잔류응력의 도입은 피로균열의 발생수명을 둔화 시킨다고 알려져 있다(Nussbaumer 등, 2001).⁽³⁶⁾ 측정결과로부터 BT 시험체에 압축잔류응력이 도입되어 피로수명이 증가할 것이라는 것을 예상할 수 있다

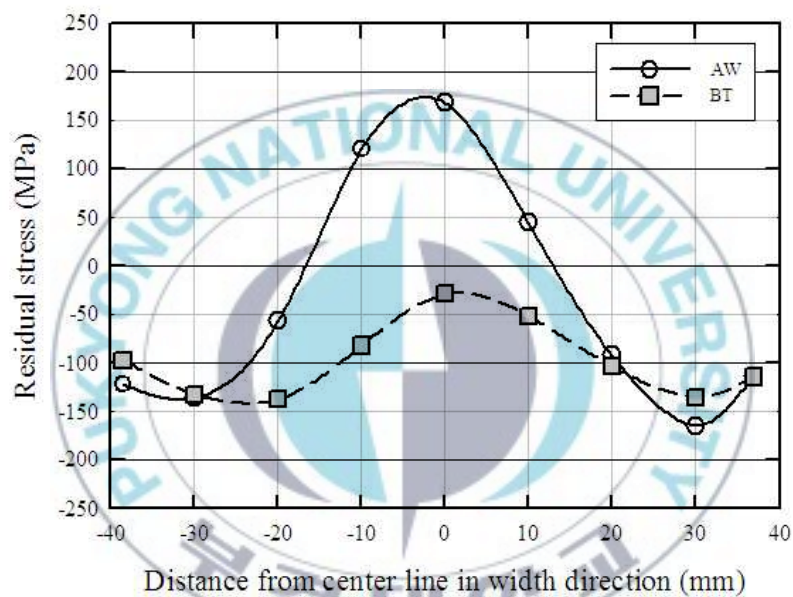


그림 3.10 잔류응력 측정 결과

3.5 피로시험결과

본 연구에서 실시한 면외거셋 용접이음부 시험체에 대한 인장 피로시험의 결과는 표 3.9와 같고 S-N 곡선을 그림 3.11에 나타내었다.

표 3.9 면외거셋 용접이음부의 피로시험 결과

Category of specimen		$\Delta\sigma$ (MPa)	Fatigue life (Cycles)	Comment
AW	1	150	444,000	
	2	135	456,000	
	3	200	144,000	
	4	175	180,000	
	5	90	1,890,000	
BT	1	150	576,000	
	2	135	973,000	
	3	130	1,205,000	

시험체 모두 JSSC에서 규정하는 피로설계 곡선 G등급을 상회하였으며, E등급 및 D등급에 상응하는 결과가 나와 국내외 피로설계기준에서 규정하고 있는 피로강도 등급을 만족하였다.

그림 3.11의 S-N곡선의 결과와 같이 면외거셋 용접이음의 피로수명은 고응력범위(150MPa 이상)에서는 블라스트 처리횟수와 관계없이 거의 동일하였지만, 저응력범위(150MPa 이하)에서는 응력범위가 낮아질수록 AW보다 BT의 피로수명이 증가함을 알 수 있었다.

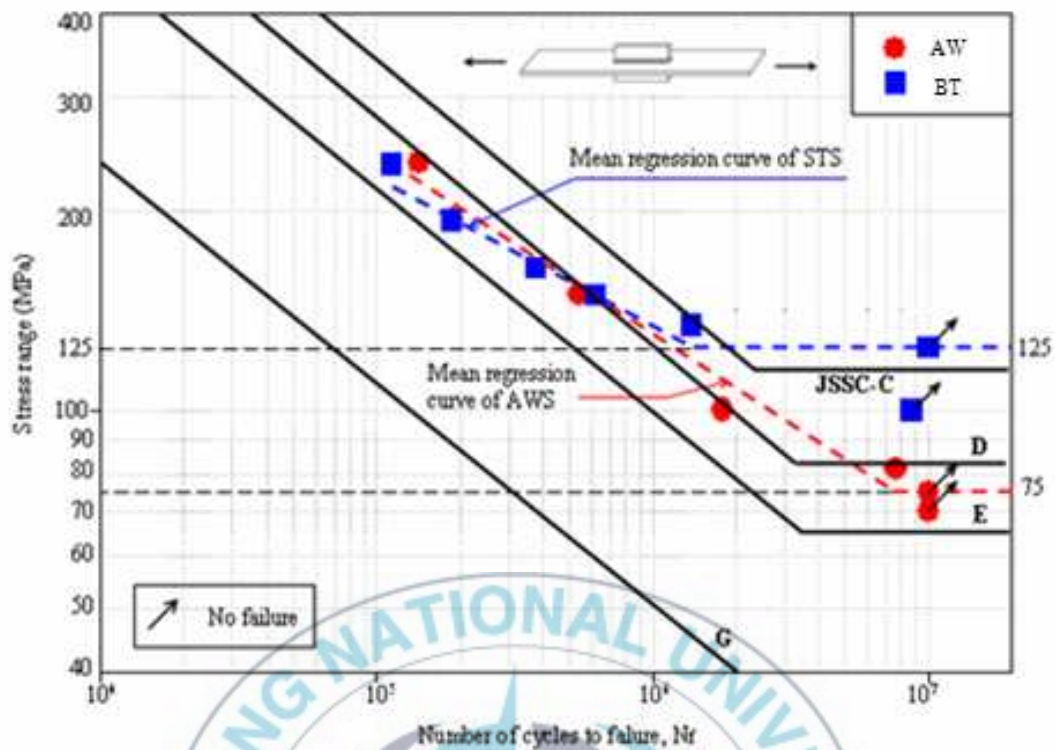


그림 3.11 S-N 곡선

피로한도를 비교해보면 AW에 비해 BT1는 약 1.7배 정도 증가하였다. 기하학적 형상 측정 및 압축잔류응력 측정과 피로시험 결과를 비교해 보면, 블라스트 처리에 의한 피로수명 증가는 기하학적 형상 개선보다는 용접토우부의 압축잔류응력 도입이 피로수명에 영향을 미치는 주요인자라고 생각한다. 이와 같은 내용은 뒤에 해석적 평가에서 다시 설명한다.

4. 해석적 평가

피로수명은 잘 알려진 식 (4.1)로 예측할 수 있다.⁽²³⁾

$$N_f = N_i + N_p \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.1)$$

여기서, N_i 와 N_p 는 각각 피로균열발생수명과 피로균열전파수명이다. 시험체에 하중이 반복하여 작용할 경우에도 용접부와 같이 응력집중이 심한 곳에서 균열이 발생되고, 이러한 균열이 진전하여 부재를 파단시킨다.⁽²³⁾

구조부재의 피로강도에 영향을 미치는 변수로는 응력(하중), 구조 부재의 기하학적 형상과 외부 환경요인 등이 있다. 본 논문에서는 용접부 기하학적 형상이 피로한도에 미치는 영향과 압축잔류응력이 피로한도에 미치는 영향, 두 가지를 비교해 수치적으로 어느 요소가 피로한도에 큰 영향을 미치는지를 비교·검토하였다.

4.1 용접부 기하학적 형상이 피로한도에 미치는 영향

4.1.1 용접이음부 기하학적 형상이 피로수명에 미치는 영향

용접이음부재에서 토우부의 곡률반경과 비드 접선각은 용접부의 기하학적형상을 나타내는 요소이다. BT시험체와 AW시험체에서 토우부의 곡률반경과 비드 접선각은 표 3.6에 나타나 있으며, 표에서 용접이음부의 비드 접선각과 곡률반경이 커지면 응력집중은 감소한다. 따라서 용접이음부에 블라스트 표면처리를 실시하면 토우부의 곡률반경이 커지고 응력집중이 감소되어 시험체의 피로강도가 증가함을 예상할 수 있다.⁽³⁵⁾

피로균열 진전속도 다음과 같이 정의된다.⁽³⁶⁾

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

여기서, ΔK 는 응력확대계수, C 와 m 은 피로균열 진전속도와 응력확대계수 범위의 관계를 나타내기 위한 상수이다.⁽³⁶⁾

식 (4.2)에서 초기균열 a_i 부터 a_f 까지 균열을 전파하는데에 필요한 하중반복횟수, 즉 피로수명 N_p 는 다음 식 (4.3)과 같다.⁽³⁶⁾

$$N_p = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{A(\Delta K)^m} \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

식 (4.3)에서 응력확대계수는 식 (4.4)와 같다.

$$\Delta K = F_e F_s F_t F_g \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad \dots \dots \dots (4.4)$$

여기서 F_e , F_s , F_t 는 각각 균열형상, 균열표면, 플레이트의 두께와 폭에 대한 수정계수이며 F_g 는 응력구배에 대한 수정계수이다. 각각의 계수를 차례대로 구해보면,⁽³³⁾

균열형상에 대한 수정계수 F_e , F_s , F_t , F_g 는 각각 식 (4.5), 식 (4.6), 식

(4.7), 식 (4.8)과 같다.

$$F_e = \frac{1}{E(k)}, E(k) = \sqrt{1 + 1.464\left(\frac{a}{b}\right)^{1.65}} \quad \dots \dots \dots (4.5)$$

$$F_s = 1.12 - 0.12\left(1 - \frac{a}{b}\right) \quad \dots \dots \dots (4.6)$$

$$F_t = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4) \sqrt{\sec\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)}, \lambda = \frac{a}{t} \quad \dots \dots (4.7)$$

$$F_g = \frac{K_t}{1 + \frac{a_c^q}{d}} = \frac{K_t}{Q} \quad \dots \dots \dots (4.8)$$

$$a_c = \frac{a}{t}, d = 1.158, q = 0.6051$$

식(4.3)의 피로수명(N_p)에 대해 BT시험체와 AW시험체를 비교하고, 식 (4.8)을 대입하면 식 (4.9)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{N_{p,BT}}{N_{p,AW}} &= \frac{\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(F_{g,BT}F_eF_sF_t\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m}}{\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(F_{g,AW}F_eF_sF_t\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m}} = \frac{\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{(F_{g,BT}F_eF_sF_t\sqrt{\pi a})^m}}{\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{(F_{g,AW}F_eF_sF_t\sqrt{\pi a})^m}} \\ &= \frac{\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\left(\frac{K_{t,BT}}{Q}F_eF_sF_t\sqrt{\pi a}\right)^m}}{\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\left(\frac{K_{t,AW}}{Q}F_eF_sF_t\sqrt{\pi a}\right)^m}} \quad \dots \dots \dots (4.9) \end{aligned}$$

앞에서 구한 각각 균열형상, 균열표면, 플레이트의 두께와 폭에 대한 수정계수들은 응력구배에 대한 수정계수를 제외하고는 AW와 BT시험체가 모두 동일하므로 다음 식 (4.11)과 같다.

$$\frac{N_{p,BT}}{N_{p,AW}} = \left(\frac{\frac{1}{K_{t,BT}}}{\frac{1}{K_{t,AW}}} \right)^m \times \frac{\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\left(\frac{1}{Q} F_e F_s F_t \sqrt{\pi a} \right)^m}}{\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\left(\frac{1}{Q} F_e F_s F_t \sqrt{\pi a} \right)^m}} = \left(\frac{K_{t,AW}}{K_{t,BT}} \right)^m \quad \cdot \cdot (4.11)$$

다음의 식 (4.11)을 피로수명의 비에 표3.7에 나타낸 응력집중계수(K_t)를 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{N_{p,BT}}{N_{p,AW}} = \left(\frac{2.82}{2.75} \right)^{2.75} = 1.07 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.12)$$

여기서, $m=2.75$ 는 JSSC강구조물의 피로설계지침에서 주어진 상수 값이다.⁽³⁶⁾

식 (4.12)에서 BT시험체와 AW시험체의 피로수명을 비교하면, BT시험체가 약 7%정도 피로수명이 증가한 것을 알 수 있다.

4.1.2 용접이음부 기하학적 형상이 피로한도에 미치는 영향

용접이음부 기하학적 형상이 피로한도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 응력확대계수에 대한 식 (4.4)를 AW시험체 및 BT시험체에 대해 다시 쓰면 각각 식 (4.13) 및 식 (4.14)와 같다.

$$\Delta K_{th,AW} = F_{g,AW} F_e F_s F_t \Delta \sigma_{Limit,AW} \sqrt{\pi a} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.12)$$

$$\Delta K_{th,BT} = F_{g,BT} F_e F_s F_t \Delta \sigma_{Limit,BT} \sqrt{\pi a} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.13)$$

균열형상, 균열표면, 플레이트의 두께와 폭에 대한 수정계수 및 응력확대계수범위(ΔK_{th})는 동일하므로 식 (4.13) 및 식 (4.14)는 식(4.15)와 같다.

$$F_{g,AW} \Delta \sigma_{Limit,AW} = F_{g,BT} \Delta \sigma_{Limit,BT} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.15)$$

또한 식 (4.15)에 응력구배에 대한 수정계수 식(4.8)을 대입하면 식 (4.16)과 같다.

$$\frac{K_{t,BT}}{Q} \Delta\sigma_{Limit,BT} = \frac{K_{t,AW}}{Q} \Delta\sigma_{Limit,AW} \quad \dots \dots \dots (4.16)$$

식 (4.16)에 표 3.7에 나타낸 응력집중계수를 대입하면 표 (4.17)과 같다.

$$\frac{\Delta\sigma_{Limit,BT}}{\Delta\sigma_{Limit,AW}} = \frac{F_{g,AW}}{F_{g,BT}} = \frac{K_{t,AW}}{K_{t,BT}} = \frac{2.81}{2.75} = 1.02 \quad \dots \dots \dots (4.17)$$

식 (4.17)에서 알 수 있는 바와 같이 BT시험체와 AW시험체의 피로한도를 비교한 결과, BT시험체가 약 2%정도로 증가한 것을 알 수 있다. 따라서 용접토우부의 기하학적 형상은 피로한도에 그다지 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.



4.2 잔류응력이 피로한도에 미치는 영향

블라스트 처리된 시험체의 압축잔류응력은 피로균열발생수명과 피로균열전파수명을 높여준다. 이러한 압축잔류응력이 피로거동에 미치는 영향을 증명하기 위해서 유효응력과 응력확대계수를 사용하였다. 최소유효응력($\sigma_{\min,eff}$)과 최대유효응력($\sigma_{\max,eff}$)을 식으로 표현하면 식 (4.17), (4.18)과 같다.⁽³⁴⁾

$$\sigma_{\min,eff} = \sigma_{\min} + \sigma_r \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.18)$$

$$\sigma_{\max,eff} = \sigma_{\max} + \sigma_r \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.19)$$

여기서, σ_r 은 압축잔류응력을 나타낸다.⁽³⁴⁾

최소유효응력($\sigma_{\min,eff}$)가 0보다 적으면 피로균열이 진전하지 않기 때문에, 유효응력의 범위($\Delta\sigma_{eff}$)는 다음 식 (4.20), (4.21), (4.22)와 같다.⁽³⁴⁾

$$\Delta\sigma_{eff} = \sigma_{\max,eff} \quad \sigma_{\min,eff} \leq 0 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.20)$$

$$\Delta\sigma_{eff} = \sigma_{\max,eff} - \sigma_{\min,eff} \quad \sigma_{\min,eff} > 0 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.21)$$

$$\Delta\sigma_{eff} = 0 \quad \sigma_{\min,eff} < 0 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.22)$$

식(4.20), (4.21), (4.22)에서 유효응력범위($\Delta\sigma_{eff}$)가 응력범위($\Delta\sigma$)보다 작거나 같아야 피로균열이 발생하지 않으므로 균열이 발생하지 않은 상태에서의 ΔK_{th} 는 식 (4.14)와 식(4.15)와 같다.

$$\Delta K_{th,AW} = F_{g,AW} F_e F_s F_t \Delta\sigma_{Limit,AW} \sqrt{\pi a} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.14)$$

$$\Delta K_{th,BT} = F_{g,BT} F_e F_s F_t \Delta\sigma_{Limit,BT} \sqrt{\pi a} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.15)$$

식 (4.14)와 식(4.15)를 다시 정리하면

$$\frac{\Delta K_{th,AW}}{F_{g,AW} \Delta\sigma_{Limit,AW}} = 1 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.23)$$

$$\frac{\Delta K_{th,BT}}{F_{g,BT} \Delta\sigma_{Limit,BT}} = 1 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.24)$$

식 (4.23)과 식(4.24)는 같으므로 다시정리하면,

$$\frac{\Delta K_{th,AW}}{F_{g,AW}\Delta\sigma_{Limit,AW}} = \frac{\Delta K_{th,BT}}{F_{g,BT}\Delta\sigma_{Limit,BT}} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.25)$$

“강구조의 피로설계지침·동해설”을 참조하면 ΔK_{th} 는 다음과 같다.⁽³⁶⁾

$$\Delta K_{th,AW} = (\Delta K_{th} + 4.0) \times (0.9 - R_{Limit,AW}) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.26)$$

$$\Delta K_{th,BT} = (\Delta K_{th} + 4.0) \times (0.9 - R_{Limit,BT}) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.27)$$

식 (4.26)와 (4.27)을 식 (4.25)에 대입하여 풀면 식 (4.28)과 같다.

$$\frac{(\Delta K_{th} + 4.0) \times (0.9 - R_{Limit,AW})}{2.82 \times \Delta\sigma_{Limit,AW}} = \frac{(\Delta K_{th} + 4.0) \times (0.9 - R_{Limit,BT})}{2.75 \times \Delta\sigma_{Limit,BT}} \quad \cdot \cdot (4.28)$$

$$\frac{(2.9 + 4.0) \times (0.9 - 0.143)}{2.82 \times 75} = \frac{(2.9 + 4.0) \times (0.9 - \frac{\sigma_{min,eff}}{\sigma_{max,eff}})}{2.75 \times (\sigma_{max,eff} - \sigma_{min,eff})} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.29)$$

$$\frac{(2.9 + 4.0) \times (0.9 - 0.143)}{2.82 \times 75} = \frac{(2.9 + 4.0) \times (0.9 - \frac{\sigma_{min,BT} - \sigma_r}{\sigma_{max,BT} - \sigma_r})}{2.75 \times (\sigma_{max,eff} - \sigma_{min,eff})} \quad \cdot \cdot (4.30)$$

한편, 식(4.8)에 나타난 최소유효응력($\sigma_{min,eff} = \frac{P}{A} = \frac{10000N}{800mm} = 12.5kN$) 및 식

(4.25)에 나타난 $\Delta\sigma_{eff} = \sigma_{max,eff} - \sigma_{min,eff}$ 는 식 (4.31)과 같다.

$$\sigma_{min,eff} = \sigma_{min} - \sigma_r = 12.5 - 30 = -17.5MPa \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.31)$$

$$\Delta\sigma_{Limit,BT} = \sigma_{max,eff} - \sigma_{min,eff} = \sigma_{max,eff} = \sigma_{max,Limit,BT} - \sigma_r \quad \cdot \cdot (4.32)$$

식 (4.31)과 (4.32)을 식 (4.30)에 대입하면,

$$\frac{(2.9 + 4.0) \times (0.9 - 0.143)}{2.82 \times 75} = \frac{(2.9 + 4.0) \times (0.9 - \frac{\sigma_{min,Limit,BT} - \sigma_r}{\sigma_{max,Limit,BT} - \sigma_r})}{2.75 \times (\sigma_{max,Limit})} \quad \cdot \cdot (4.32)$$

$$\frac{(2.9 + 4.0) \times (0.9 - 0.143)}{2.82 \times 75} = \frac{(2.9 + 4.0) \times (0.9 - \frac{12.5 - 30}{\sigma_{max,Limit,BT} - \sigma_r})}{2.75 \times (\sigma_{max,Limit,BT} - \sigma_r)} \quad \cdot \cdot (4.33)$$

식 (4.33)을 풀면 $\sigma_{\max, Limit, BT} - \sigma_r = 108 MPa$ 가 되고, 여기서 $\sigma_{\max, Limit, BT}$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_{\max, Limit, BT} = 108 + \sigma_r = 108 + 30 = 138 MPa \quad \dots \dots \dots (4.35)$$

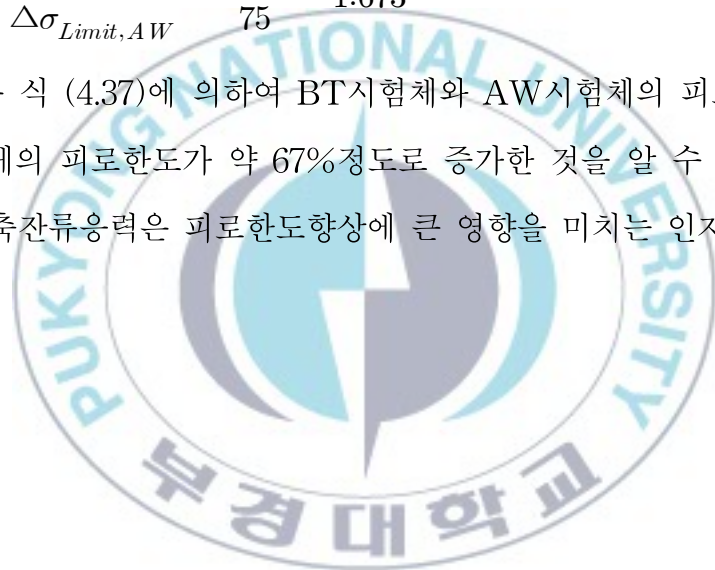
$\Delta\sigma_{Limit, BT}$ 값을 구하기 위해 $\sigma_{\max, Limit, BT} - \sigma_{\min, Limit, BT}$ 를 하면 식 (4.36)이다.

$$\Delta\sigma_{Limit, BT} = 138 - 12.5 = 125.5 MPa \quad \dots \dots \dots (4.36)$$

AW시험체에 비해 BT시험체의 피로한도 증가값을 비교하기 위해 $\Delta\sigma_{Limit, BT}$ 에서 $\Delta\sigma_{Limit, AW}$ 값을 나눠주면

$$\frac{\Delta\sigma_{Limit, BT}}{\Delta\sigma_{Limit, AW}} = \frac{125.5}{75} = 1.673 \quad \dots \dots \dots (4.37)$$

다음과 같은 식 (4.37)에 의하여 BT시험체와 AW시험체의 피로한도를 비교한 결과, BT시험체의 피로한도가 약 67%정도로 증가한 것을 알 수 있다. 따라서 용접토우부의 압축잔류응력은 피로한도향상에 큰 영향을 미치는 인자라는 사실을 알 수 있었다.



5. 결 론

본 연구에서는 면외거셋 용접이음부를 대상으로 용접 그대로의 시험체와 블라스트 처리를 실시한 시험체에 대한 피로시험을 실시하였다. 용접 그대로의 시험체와 블라스트 처리를 실시한 시험체의 기하학적 형상과 압축잔류응력을 측정한 값을 사용하여 기하학적 형상과 압축잔류응력이 용접부 피로한도에 어떤 영향을 미치는지에 대해 수학적 해석을 통하여 증명해 보았다. 본 연구로 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 블라스트 처리된 면외거셋 용접이음부는 피로한도가 약 67%정도 증가하였다.
- (2) 피로수명은 블라스트 처리를 한 시험체의 경우 고응력범위에서 용접그대로의 시험체에 비해 거의 차이가 없었으나 저응력범위에서는 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 해석적 평가에 의한 결과는 시험결과와 일치하며 압축잔류응력은 피로수명향상에 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있었다. 한편, 용접 토우부의 기하학적 형상의 향상은 면외거셋 용접 이음부의 피로수명에 그다지 큰 영향을 미치지 않는다.
- (4) 블라스트 처리 효과가 해석적 평가에 의해 확실하게 증명되었으므로 실제 강교량 제작에서도 블라스트 처리 효과의 적용에 관하여 논의할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 윤태석, Le Van Phuoc Nhan, 김인태, 이동욱 (2007), 블라스트 처리가 면외 거셋 용접이음부의 피로거동에 미치는 영향, 대한토목학회 2007년도 정기 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp.3854-3857.
- (2) 정영수, 김광진, 이동욱, 김인태 (2008), 블라스트 처리가 하중비전달형 십자필렛용접이음의 피로거동에 미치는 영향, 2008년 학술대회발표집, 제 19권 1호, 한국강구조학회, pp.127-130.
- (3) 홍성욱, 경갑수, 장동일 (2000), 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도 향상법에 관한 연구(1)-그라인딩 처리에 따른 영향, 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집(I), pp.353-356.
- (4) 정영화, 경갑수, 홍성욱, 김익겸, 남왕현 (2000), 하중비전달형 필렛접부의 피로강도 향상법에 관한 연구(2)-TIG 처리에 따른 영향, 대한토목학회 2000년도 학술발표회 논문집(I), pp.373-377.
- (5) 정영화, 경갑수, 홍성욱, 남왕현, 장동회 “선상가열이 면외거셋 용접이음부의 피로특성에 미치는 영향”, 한국강구조학회학술발표논문집, 한국강구조학회, pp.325-331, 2002.
- (6) 임청권, 박문호 (1998), 용접상세의 변화에 따른 용접이음부의 잔류응력에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제10권, 4호, pp.709-720.
- (7) 임청권, 박문호 (1999), 필렛용접이음부의 후처리에 따른 피로강도 향상 메커니즘의 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제11권, 3호, pp.319-327.
- (8) 임청권, 박문호 (2000), 강교량 필렛용접이음부의 루트부 피로파괴 방지,

한국강구조학회 논문집, Vol.12, No.3, pp.231-238.

(9) 서정관, 정장영, 강성원, 백점기, 이제명 (2003), 용접부 형상을 고려한 피로특성 평가, 대한용접학회 춘계학술대회 개요집, VG40, pp. 278-280.

(10) 한국강구조학회 (1995), 강구조편람, 제2권 강구조의 접합, 한국강구조학회, pp.118-227.

(11) 홍성욱, 경갑수, 최동호, 용환선 “용접지단부의 후처리에 따른 하중비 전달형 필렛용접부의 피로특성”, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제12권, 6호, pp.701-713, 2000.

(12) 배두병 “면내 거셋 용접연결부의 피로강도”, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 6호, pp.629-637, 2003.

(13) 최동호, 최항용, 하정훈, 박연수 “면외거셋형 고강도강(POSTEN80)의 피로균열진전 해석”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제22권, 제1A호, pp.123-130, 2002.

(14) 경갑수 (2008), 강교의 용접 및 품질관리, 2008년 학술대회발표집, 제 19권 1호, 한국강구조학회, pp.573-621.

(15) 이찬호, “기하학적 형상을 고려한 필렛용접 접합부의 피로거동에 관한 연구”, 중앙대학교 대학원, 석사학위논문, 2004.

(16) 김추용 (2006), 압축잔류응력이 피로특성에 미치는 영향에 관한 연구, 경상대학교 대학원, 석사학위논문

(17) 이승호 (1999), 특수가공기의 2단 쇼트피닝 가공이 자동차용 스프링 강 의 피로특성에 미치는 영향, 단국대학교 대학원, 박사학위논문.

(18) 大倉一郎 著 경갑수, 김학수, 채원규 공역 (1998), 강교의 피로, 도서출판 건설도서.

(19) 정성균, 이승호 (2001), 쇼트피닝 加工概論, 도서출판 세화.

(20) 건설교통부, 도로교설계기준, 2000.

- (21) 장동일, “구조공학에서의 파괴와 피로”, 동명사, pp. 231-251, 1999.
- (22) 일본도로협회 저, 박정웅, 박연수, 경갑수 공역 (2004), 강교의 피로와 보수보강, 구미서관.
- (23) 장승필, 박영석, 김남희, 강구조공학, 도서출판 영지문화사, 2003.
- (24) S.J.Maddox (1991), Fatigue strength of welded structures, Second Edition, Abington Publishing.
- (25) P.J. Haagenzen, “The Effects of Grinding and Peening on the Fatigue Strength of Welded T-Joints”, International Institute of Welding(IIW) Document, X III-1510-93, 1993.
- (26) S.J. Maddox, “Fatigue Of Steel Fillet Welds Hammer Peened under Load”, IIW Document, X III-1690-97
- (27) Kengo Anami, Chitoshi Miki, “Fatigue Strength of Welded Joints Made of High-strength Steels”, Prog. Struct. Engng Mater. 3pp.86-94, 2001.
- (28) 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.
- (29) American Association of Standard Highway and Transportation Officials, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2007.
- (30) Commission of the European Communities, EUROCODE No. 3 Part 1, Chapter 9, *Design of Steel Structure*, 1990.
- (31) British Standard Institution, BS 5400 Part 10, *Code of Practice for Fatigue*, 1980.
- (32) Charles G. Salmon, "Steel structures : Design and behavior", Fourth Edition

- (33) P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, *Residual Stress, Part 1 - Measurement Techniques and Part 2 - Nature and Origins*, Materials Science and Technology, ISSN0267-0836, April 2001, Vol.17, pps355-375
- (34) A. Nussbaumer and D. Imhof, *On the Practical Use of Weld Improvement Methods*, John Wiley & Sons, Ltd., Program Structure Engineering Mater., Vol.3, pp.95-105, 2001.
- (35) S. J. Maddox, *Fatigue Strength of welded Structures*, second edition, EWIEdison Welding Institute, Abington Publishing, 1991.
- (36) 日本鋼構造協會, 鋼構造物の疲勞設計指針・同解説, 技報堂出版, 1994.



감사의 글

강구조연구실과 인연을 맺은 지 3년이란 시간동안 무사히 결실을 맺은 것에 한없이 기쁨을 느끼며, 지금까지 저에게 아낌없는 사랑과 도움을 주신 분들께 미약하나마 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 논문을 완성하기까지 부족한 제자를 하늘만큼이나 넉넉한 마음으로 지도편달과 격려를 아끼지 않으신 이동욱 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 바쁜 일정 속에서도 부족한 제자의 논문을 세심하게 조언해 주시고 심사해 주신 국승규 교수님, 이환우 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 재학기간동안 무언의 꾸지람과 너그러운 마음으로 토목인의 긍지를 가르쳐 주신 이종출 교수님, 손인식 교수님, 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 이영대 교수님, 김명식 교수님, 정진호 교수님, 김수용 교수님, 정두희 교수님, 이상호 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 그리고 항상 연구실에 아낌없는 관심과 사랑을 베풀어주신 신소재공학부 서원찬 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

논문이 완성되기까지 강구조연구실의 선배로서 친동생처럼 걱정해 주고 격려와 도움을 주신 민수 선배님, 재원 선배님, 영표 선배님, 창희 선배님, 대성 선배님, 창민 선배님, 성민 선배님, 용교 선배님, 지훈 선배님, 창승 선배님, 민철 선배님, 태석 선배님, 상우 선배님, 원식 선배님 그리고 동기 현영이형에게도 감사의 마음을 전합니다. 또한 부족하고 어린 저를 언제나 선배로 존중해준 태원이형, 재진이형, 상복이, 선호에게도 고마움을 전합니다. 어렵고 힘든 때에 항상 곁에서 힘이 되어준 동기 영화형, 현우형, 호준이형, 태훈이형, 민정이형, 창우형에게도 고마운 마음을 전합니다.

학부시절부터 대학원시절까지 늘 저와 함께하며 5년 동안 친형처럼 저를 늘 챙겨준 래혁이형에게 고마움을 전합니다.

마지막으로 잘해준 것도 없고 부족한 형이지만 자신의 신체의 일부를 준 피를 나눈 저의 동생과 항상 아프고 말썽만 피우고 부족했던 저를 여기까지 키워주신 어머니, 항상 무관심 한 듯 저의 의견을 지지해준 아버지께 한없는 존경과 눈물어린 감사의 인사를 드리며, 은혜에 보답하고자 이 논문을 받칩니다.

