



저작자표시-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.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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](#)

2013年 8月  
석사학위논문

마찰교반법에 의한 맞대기 용접부의  
피로강도 향상에 관한 연구

조선대학교대학원

토목공학과

조병철

# 마찰교반법에 의한 맞대기 용접부의 피로강도 향상에 관한 연구

Development of fatigue strength improvement using  
friction stir processing on butt welded joints

2013년 8월 23일

조선대학교 대학원

토목공학과

조병철

# 마찰교반법에 의한 맞대기 용접부의 피로강도 향상에 관한 연구

지도교수 박 정 응

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 4월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

조 병 철

# 조병철의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 박길현 (인)

위 원 조선대학교 교수 김대현 (인)

위 원 조선대학교 교수 박정웅 (인)

2013년 5월

조선대학교대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.2 기존 연구동향 .....	2
제 2 장 기존 피로강도 향상법 .....	4
2.1 용접후처리기술의 분류 .....	4
2.2 피로강도 향상기법 .....	6
2.2.1 토우 그라인딩 .....	6
2.2.2 TIG 드레싱 .....	10
2.2.3 워터 제트 부식 기술 .....	11
2.2.4 플라즈마 드레싱 .....	12
2.2.5 햄머 피닝 .....	13
제 3 장 FSP 피로강도 향상법 .....	14
3.1 FSP에 의한 피로강도 향상법 개요 .....	14
3.2 마찰교반처리의 형상조건 .....	15
3.2.1 실험조건 .....	15
3.2.2 비드 형상 결정을 위한 유한요소해석 .....	17

3.2.3	마찰교반처리의 비드형상 및 조직 .....	20
3.2.4	마찰개질부 정도 .....	23
제 4 장	피로시험 .....	27
4.1	시험편 종류 및 특성 .....	27
4.2	피로시험 조건 및 방법 .....	28
4.3	피로시험 결과 .....	29
제 5 장	응력집중계수에 의한 피로강도 평가 .....	34
5.1	유한요소해석 .....	34
5.1.1	해석에 미치는 파라미터의 영향 .....	34
5.1.2	유한요소크기의 영향 .....	35
5.1.3	피로시험편의 유한요소해석 .....	36
5.2	실험에 의한 응력집중계수 도출 .....	44
5.2.1	핫스팟응력 (Hot Spot Stress, HSS) 과 구조응력 (Structural stress, SS) .....	44
5.2.2	간이계산법에 의한 응력집중계수 도출 .....	48
5.3	고찰 .....	51
제 6 장	결론 .....	55
부 록	.....	56

참 고 문 헌 ..... 63

감사의 글 ..... 66

## 표 목 차

Table.1 개선 방법의 조건 .....	7
Table.2 버 그라인딩과 디스크 그라인딩의 장점 및 단점 .....	10
Table.3 조선용강판 EH47의 화학조성 및 재료의 물성치 .....	16
Table.4 조선용강판 EH47의 FSW 조건 .....	16
Table.5 As-welded 와 FSW 해석 결과 .....	19
Table.6 Tool 형상 치수 .....	20
Table.7 시험편 수량 및 하중 조건 .....	25
Table.8 표면개질 피로실험 결과 .....	32
Table.9 용접부에 곡률반경으로부터 미치는 영향 .....	35
Table.10 요소크기에 따른 응력집중계수(Kt) .....	36
Table.11 피로시험과 유한요소해석 결과 .....	43
Table.12 핫스팟응력 및 응력확대계수(SCF) .....	46
Table.13 구조응력( $\sigma_s$ ) 및 응력확대계수(SCF) .....	48
Table.14 응력집중부의 곡률반경 및 응력집중계수값(Kt) .....	51

## 그 립 목 차

Fig.1 다양한 용접후처리기술의 분류 .....	5
Fig.2 토우그라인딩 방법 및 개선 형상 .....	6
Fig.3 버 그라인딩의 허용 치수 .....	7
Fig.4 그라인딩 적용에 따른 피로수명 향상 .....	8
Fig.5 버 그라인딩의 적용에 대한 기본적인 용접의 세부사항 .....	9
Fig.6 TIG 드레싱 전후 필렛 용접부 단면비교 .....	11
Fig.7 TIG 드레싱 유무에 따른 피로수명 비교 .....	11
Fig.8 용접후처리 방식에 따른 피로수명 향상 비교 .....	13
Fig.9 마찰 교반 용접 .....	14
Fig.10 마찰교반용접 처리 및 Tool형상 .....	15
Fig.11 해석 모델 .....	17
Fig.12 경계조건 및 물성치 .....	18
Fig.13 모델 응력 분포 .....	19
Fig.14 이동속도와 회전속도에 따른 비드 형상 .....	21
Fig.15 마크로와 마이크로 조직 .....	22
Fig.16 경도의 측정위치 .....	23
Fig.17 모재의 마크로 및 마이크로 조직 .....	24
Fig.18 입자 사이즈 .....	25
Fig.19 모재의 경도값 .....	26
Fig.20 시험편 형상 및 치수 .....	27
Fig.21 FSP처리한 시험편 .....	27
Fig.22 피로실험 모습 .....	28
Fig.23 2-1-1 시험편 .....	30
Fig.24 2-1-2 시험편 .....	31
Fig.25 피로시험 결과 .....	32

Fig.26 용접집중부 해석 .....	34
Fig.27 유한요소해석 모델링 및 경계조건 .....	35
Fig.28 요소크기에 따른 응력집중계수(Kt) .....	36
Fig.29 2-1-1 시험편의 유한요소해석 .....	37
Fig.30 2-1-2 시험편의 유한요소해석 .....	38
Fig.31 3-2-1 시험편의 유한요소해석 .....	39
Fig.32 3-2-2 시험편의 유한요소해석 .....	40
Fig.33 5-1-1 시험편의 유한요소해석 .....	41
Fig.34 5-1-2 시험편의 유한요소해석 .....	42
Fig.35 스트레인 게이지 부착 위치 .....	45
Fig.36 시험편 스트레인 게이지 부착 .....	45
Fig.37 구조응력추정을 위한 예 .....	47
Fig.38 비드형상 측정 위치 .....	49
Fig.39 비드형상 측정 .....	50
Fig.40 응력집중 요소들의 비교 .....	53
Fig.41 토우부의 응력분포 .....	54

# **ABSTRACT**

## **Development of fatigue strength using friction stir processing on butt welded joints**

**Jo, Byung Chul**

**Advisor : Prof. Park, Jeong Ung, Ph.D**

**Department of Civil Engineering**

**Graduate School of Chosun University**

Welding process is commonly used for making a steel bridge, mechanical part, pressure vessel, aircraft, ship and ocean jacket. The welded structures have the parts of stress concentration because of a geometrical shape and it will result in a one of the reason of fatigue failure. Fatigue failure of welded joints is caused by the stress concentration from the action of the stress repeatedly at the shape of the weld bead.

Existing researches are frequently suggesting a method of an enhancing the fatigue strength by improving the part on weld toe. There are several typical and easy ways to improve a fatigue level on the welding joints and the methods are as followed: Grinder process, TIG(Tungsten inert gas welding) process, Hammer Peening process. The smoothing treatments of cutting or grinding weld bead and spatters is known for giving positive impacts on enhancing fatigue level. By grinding the weld toe changing the shape part by reducing the stress concentration is effective in improving the fatigue strength.

This research used a method of FSP(Friction stir processing) which is originally came from FSW(Friction stir welding), one of the welding processes. Fatigue strength of FSW verified a improving the fatigue

strength by improving a structural shape and microstructure at welding joint (Kim Heungju, 2011). Firstly, we set the appropriate FSP process condition by changing a moving speed and speed of rotation of the tool and tilted angle in various ways to get a proper FSP tool shape and microstructure for suitable butt welding.

We have tested for fatigue experiment on a test specimen treated by FSW and as-welded one(welded one but not treated for a surface smoothing) as followed by the process conditions from the first step. Lastly, stress concentration factor value which largely affect to fatigue strength was calculated and contemplated by hot-spot stress method, structural stress, simple calculation and FEA(finite element analysis).

Keywords : as-welded, weld bead, FSP, hot-spot stress, structural stress

# 제1장 서론

## 1.1 연구 배경 및 목적

강교량을 비롯한 기계 부품, 압력용기, 항공기, 선박, 해양 재킷 등의 구조물은 거의 용접이음으로 이루어져 있으며 이러한 구조물들은 기하학적 형상변화에 따라 높은 응력집중이 발생되고 이것이 피로 파괴의 한 원인이 된다. 용접 연결부의 피로는 응력의 반복작용에 의해 발생하며 노치나 용접비드 등의 형상이 급변하여 응력집중부로부터 피로균열이 발생하여 피로강도가 극단적으로 저하된다(경갑수 등, 1998).

용접이음부의 토우부를 개선시켜 피로강도를 향상시키는 방법이 기존 연구에서 많이 제안이 되고 있다. 용접집중부의 피로강도를 향상시키는 대표적인데 가장 용이하게 적용할 수 있는 방법으로는 그라인더 처리, TIG(Tungsten inert gas welding)처리, 햄머 피닝 등 다양한 표면처리 방법 등이 사용되고 있으며, 이들 중 용접비드나 스파터를 절삭 혹은 그라인딩 작업을 통해 매끈하게 다듬는 작업은 피로강도를 향상시키는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 그라인딩에 의한 용접 토우부의 형상을 변화시킴에 따라 응력집중을 감소시켜 피로강도를 향상시키는데 효과가 있다.

본 연구에서는 용접부 접합프로세스 중 하나인 FSW(Friction stir welding)법을 변형한 FSP(마찰표면개질, Friction stir processing)법을 이용하여, 용접부의 구조적 형상과 마이크로 조직을 개선하여 피로강도를 향상시키는 새로운 피로강도향상법을 실험에 의해 검증하였다(김홍주, 2011). 이를 위해 먼저 맞대기용접부에 알맞은 FSP tool의 형상과 적절한 금속조직을 얻기 위한 tool의 이동속도, tool회전속도, tilted angle을 다양하게 변화시켜 적절한 FSP 가공조건을 설정하였다. 이렇게 결정된 가공조건으로부터 FSW 처리된 피로시험편과 as-welded(표면처리를 하지 않은 용접상태) 시험편에 대해 피로실험을 실시하였다. 또한 피로강도에 영향을 미치는 응력집중계수를 핫스팟 응력법, 구조응력법, 간이계산법 그리고 유한요소해석에 의해 도출하고 이를 고찰하였다.

## 1.2 기존 연구동향

용접구조물의 피로강도를 향상시키는 대표적이면서 가장 용이하게 적용할 수 있는 방법의 하나로는 그라인더 처리, 해머피닝 등과 같은 기계적인 방법과 TIG dressing 등과 같은 재용접에 의한 후처리 방법이 있다. 이러한 방법들은 대상 구조상세의 용접부 단면형상을 매끄럽게 처리하여 용접지단부에서의 국부적인 응력집중이나 잔류응력의 영향을 저하시켜 피로강도를 향상시키는 효과가 있는 것으로 알려져있다(Maddox, 1991). 국외에서는 용접연결부의 피로강도를 개선하기 위한 목적으로 후처리를 실시하여 피로강도의 향상을 시도한 연구가 다수 발표되고 있다. Maski Isao 등(1982)은 SS41강의 용접연결부에 대한 피로시험을 통하여 햄머피닝(hammer peening)에 의한 용접지단부의 가공경화현상이 용접연결의 피로강도를 향상시키는 것으로 보고하였다. Yagi 등(1991)은 해양 구조물용 강재의 판두께 10~80 mm의 십자연결 및 T연결에 대해 피로강도 개선효과를 포함한 각종 연결을 대상으로 판두께 효과에 대한 연구에서 포함한 각종 연결을 대상으로 판두께 효과에 대한 연구에서 판두께가 두꺼울수록 개선처리에 의한 피로강도의 상승률이 크나, 단면의 profile 및 지단연마의 경우는 피로강도의 판두께 효과에 의한 차이가 나타나지 않는다고 발표하였다.

Ono 등(1991, 1992)은 용접지단부가 피로강도에 미치는 영향에 대한 일련의 연구에서 profile 처리, 지단연마 처리 모두 평균 피로강도는 상승하나, 지단처리를 실시하여도 비드 지단에 언더컷이 남아 있는 경우에는 피로강도가 저하하고 수명 편차도 커지게 되기 때문에 피로강도는 언더컷 저부의 결함을 완전히 제거하는 것이 가장 중요하다고 보고하였다. Seto 등 (1993)은 필렛 T자연결에서도 TIG 처리는 피로강도를 크게 향상시키며, 또한 개선처리는 주로 균열발생수명에 대한 피로강도를 향상시키는 것으로 보고하였다. Hutota Syojiro 등(1990)은 고강도강의 하중 비전달형 십자 필렛용접연결에 대해 용접지단부에 TIG 처리를 실시하고 피로시험을 실시한 결과, TIG 처리 시험편의 피로한도는 as-welded 시험편에 비하여 2.7배 상승한다고 보고하였다. 한편, Hutota Syojiro 등(1991)은 루트부에 용입불량을 갖는 하중 비전달형 필렛용접연결의 지단부에 TIG 처리 후 최대응력기준법에 의한 피로시험을 실시하였다. 그 결과 루트파괴는 TIG 비드부의 응력집중률을 약 1.6 이하로 낮추며, 또한 지단부 처리에 의한 피로강도 향상은 루트부의 결함에 의한 루트파괴가 일어나지 않는 한 as-welded 시험편의 피로강도의 약 2배 정도가 한계가 되는 것으로 보고하였다. 기설 강교량의 보수·

보강법에 비하여 우수하며, 특히 동종의 균열이 다수 발생한 경우의 보강방법으로도 유효한 것으로 보고되고 있다(Iwasaki, 1989)(강성원 등, 2005).

국내의 연구결과로는 홍성욱 등(2000)은 하중 비전달형 필렛용접부를 순수휨 상태에서 피로시험한 결과, 그라인더 처리 및 TIG 처리에 의해 200만회 피로강도가 향상되었으며, 필렛용접부의 응력집중계수는 곡률반경과 비드접선각의 영향을 받는 것으로 보고하였다. 임청권 등(1999)은 필렛용접 이음으로 된 종리브 십자 시험체를 대상으로 피로실험을 실시한 결과, 피로균열수명은 해머피닝 후 시험체에서 각각 증가하는 현상을 나타내는 것으로부터, 용접 후 처리를 실시한 경우에 피로강도가 향상되는 것을 밝혔다. 한편 장동일 등(1995)은 필렛용접 지단부의 곡률반경과 접선각의 상관관계를 규명하고, 지단부의 형상이 피로균열의 발생과 피로강도에 미치는 영향이 큰 것을 밝혔다. 또한 김성훈 등(2002)은 고강도강의 하중 비전달형 십자연결부의 피로특성을 평가하고 판두께 효과와 정적강도 의존성을 확인하였으며, 정영화 등(2000)은 순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부의 지단부를 TIG 처리하는 것에 의해 피로강도가 약 11% 향상되는 것으로 보고하였다(이승용 등, 2008).

기존 피로강도 향상법은 비드의 형상변화만을 개선시키거나 Tig처리와 같이 형상 개선을 위해 새로운 열응력을 발생시켜, 용접토우부에 해로운 잔류응력을 부과하는 등의 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 피로강도향상법의 문제점을 보완시킬 목적으로 FSW법의 특징인 저 입열에 의한 금속조직의 개선과 형상개선을 동시에 만족시킬 수 있는 방법을 새롭게 제안하고 피로실험에 의해 검증하고자 한다.

## 제2장 기존 피로강도 향상법

### 2.1 용접후처리기술의 분류

오래전부터 구조물의 안전성을 확보하고 피로수명을 최대화하기 위한 많은 연구자들의 노력에 의해 Fig.1과 같이 다양한 용접후처리기술이 개발되었다. 이는 크게 용접비드 선단의 기하학적 형상을 개선하는 방법과 압축잔류응력을 유도하는 방법으로 구분될 수 있다. 이중 형상 개선방법으로는 그라인딩, 재용융 기법 및 특수용접기법으로 또 다시 구분된다. 우선 그라인딩방법의 경우 비드 선단에 대한 기계적 가공방법으로서 이들 공정은 처리 방법이 비교적 간단하며 큰 개선효과를 보여줄 뿐만 아니라 육안 상 쉽게 판단이 가능한 장점이 있는 반면 부식으로부터 대비되어야 하며, 작업 시 많은 소음과 먼지를 유발할 뿐만 아니라 형상에 따라 가공 툴의 접근성에 대한 제약이 발생한다.

용접 토우 형상 개선을 위해 적용되는 재용융기법의 경우 또한 큰 개선 효과를 기대할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 정영화 된 형상을 반복적으로 개선하여야 하는 경우 용접 공정과 같이 복합적인 자동화가 가능하지만, 수동으로 작업 시에는 일정 수준 이상의 기량이 요구되는 단점이 있다.

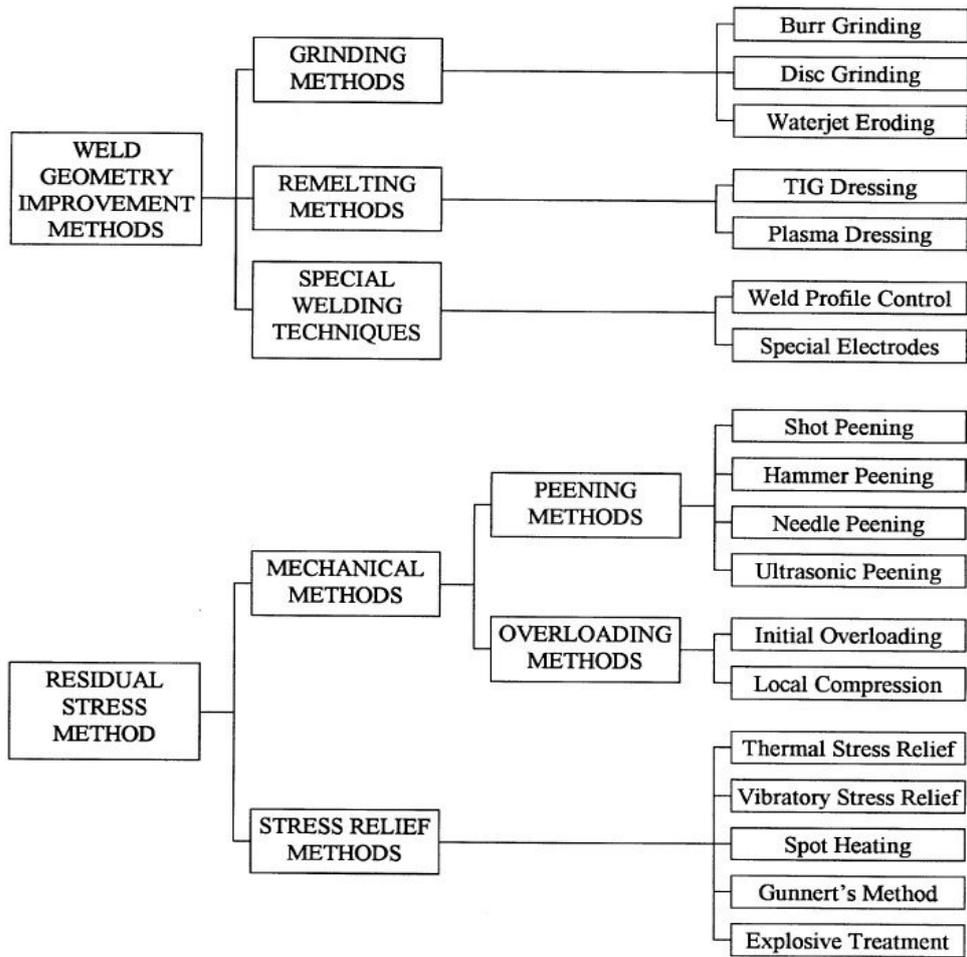


Fig.1 다양한 용접후처리기술의 분류(김용 등, 2012)

형상 개선방안 중 마지막 방법으로는 특수 용접기법이 있는데 이는 용접 시공 시 비드형상을 요구사항대로 구현함으로써 응력집중을 피하는 방법이다. 이 경우는 특별한 후처리를 통해 이뤄지는 방법은 아니므로 시간이 절약되는 이점이 있지만, 용접 토우의 결함이 제거 되지 않고 남아 있는 경우가 발생할 수 있다.

두 번째 방법으로써 압축잔류응력을 인가하는 방법은 피닝, 과부하처리(overloading treatment) 및 응력제거(stress relief)방법으로 구분된다. 이중 피닝 기법은 또한 우수한 개선효과를 볼 수 있는 장점과 특히 고강도강에서 그 효과가 두드러지는 이점이 있는 반면에 저주기피로(고하중) 조건에서는 적합하지 않다. 또한 최대 압축하중이 수반

된 다양한 진폭의 하중조건에서는 그 효과가 점차 소멸되는 단점이 있다.

과부하처리 및 응력제거 기법 또한 저주기피로 환경에서는 그 효과가 크지 않으며, 대표적인 응력제거 방법인 후열처리(PWHT) 방법은 열영향부의 연화와 조직의 안정, 잔류응력의 완화 등의 장점이 있지만 소재에 따른 온도 처리 범위가 존재하며, 조건이 맞지 않을 경우 모재의 성능저하 및 재균열이 발생할 가능성이 있다. 이상과 같이 다양한 용접후처리기술 중 보다 효과적인 적용을 위해 IIW Recommendation에서는 그라인딩, TIG 드레싱 및 피닝 기법을 제안하였으며, 본 기고에서는 이들 공정에 대해 자세히 살펴보았다(김용 등, 2012).

## 2.2 피로강도 향상기법

### 2.2.1 토우 그라인딩

토우그라인딩은 버 그라인더 또는 디스크 그라인더를 이용하여 용접 토우부를 연마하는 기계적 가공방법으로 그 목적은 피로에 유해한 슬래그, 언더컷 등의 용접비드 선단의 결함을 제거함과 동시에 형상 완화에 따른 국부적 응력집중을 피하는데 있다. Fig.2 는 토우그라인딩 방법으로서 버 그라인딩과 디스크 그라인딩 공정을 설명하였으며, 가공 후 용접 형상 변화에 대해 나타내었다. IIW에서는 그라인딩 깊이는 최소 0.5mm 이상으로 할 것을 추천하고 있으며, 최대 2mm 또는 모재 두께의 7% 이하로 가공할 것을 제안하고 있다.(김용 등, 2012)

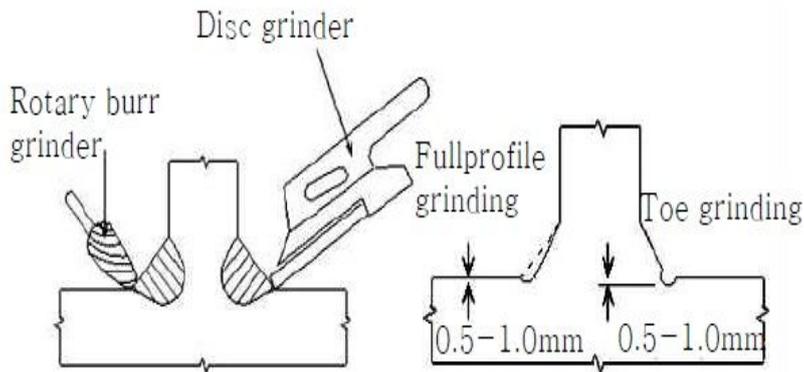
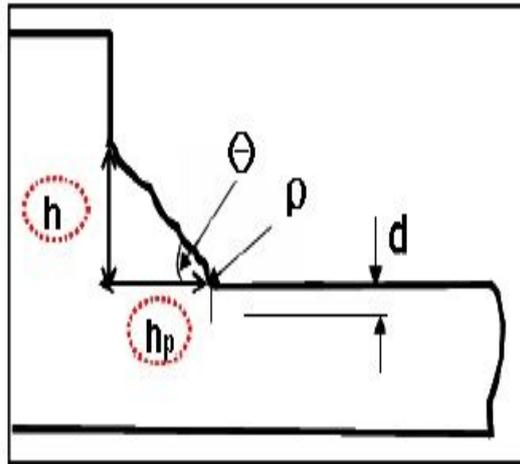


Fig.2 토우그라인딩 방법 및 개선 형상(김용 등, 2012)

버 그라인딩은 15,000 과 40,000 rpm 사이의 회전속도로 고속 공압, 유압 또는 그라인더를 사용하여 수행된다. 용접부의 표면을 그라인딩하여 표면결함을 제거하고 베이스 플레이트로 용접 금속을 혼합 가공을 하여 응력집중을 감소시킨다. 그라인딩 과정이 완비된 시설에서 약 1m/hr의 속도로 수행할 수 있다. Table 1 과 Fig.3에서는 IIW recommendation에서 규정한 버 그라인딩방법과 허용치수를 각각 나타내었다. 이렇게 규정하는 이유는 하중적용 단면적의 과다한 감소는 가공한 면에서 파괴를 일으킬 위험성이 크기 때문이다(KJ. Kirkhope et. al, 1999).

Table 1. 개선 방법의 조건(김명현 등, 2008)

Thickness of Plate	Diameter of Tip	Speed	Air pressure	Travel speed
10~50mm	10~25mm	15000~40000 rpm	5~7 bar	15~20 mm/sec



Burr grinding
• t= 10~15mm : Minimum Depth (d)=0.5mm
• t > 15mm : Minimum Depth (d)=1.0mm
• Maximum Depth (d)=2.0mm or 5%t
(t: plate thickness)

Fig.3 버 그라인딩의 허용 치수(김명현 등, 2008)

한편 Fig.4는 강재의 종류 및 그라인딩 공정 적용에 따른 피로수명의 향상 정도를 나타내는 것으로,  $N > 10^6$ 의 고피로 수명 영역에서 피로향상에 특히 유리한 것으로 나타났으며,  $2 \times 10^6$ 사이클에서는 소재 및 적용 공정에 따라 최소 50~200%까지 피로수명이 향상 되었다(김용, 2012).

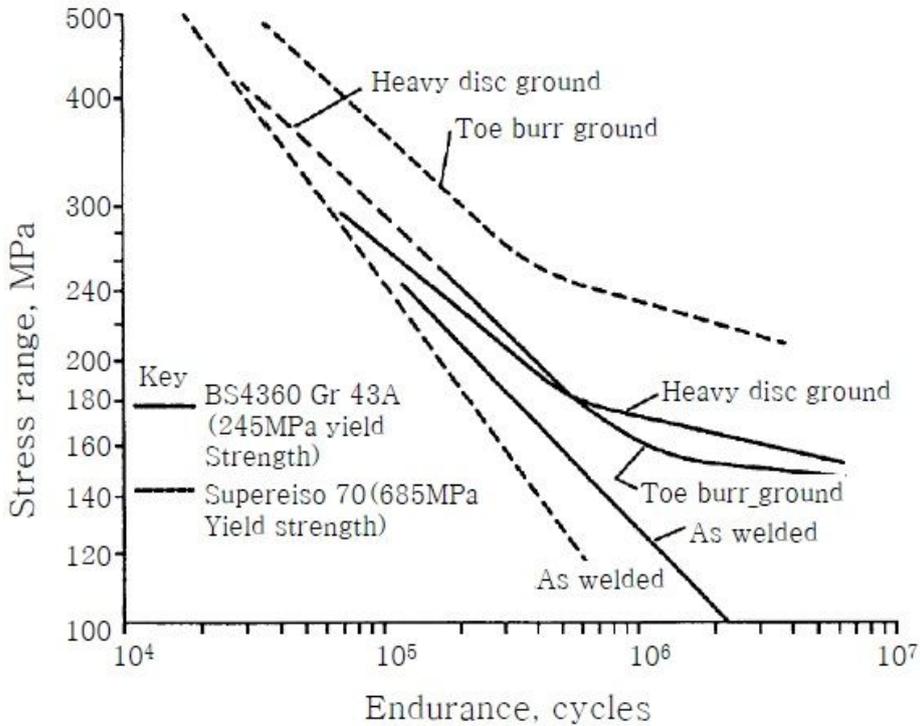


Fig.4 그라인딩 적용에 따른 피로수명 향상(KJ. Kirkhope et. al, 1999)

버 그라인딩은 Fig.5에서 보는 바와 같이 용접부에 대하여 횡 방향으로 작용하는 하중을 받을 경우에 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 용접부에 대하여 하중이 종 방향으로 작용했을 경우에는 버 그라인딩이 용접부의 횡방향으로 슛돌 흠을 생성시킴으로서 초기 크랙(Initial)을 발생시킬 수 있는 균열의 원인으로 작용할 수 있다(장용원, 2005). 따라서 용접 방향과 평행한 방향으로 하중을 받는 용접 이음부에 대하여 버 그라인딩을 권하지 않고 있다. 또한 상대적으로 많은 시간이 소모될 뿐 아니라 소음 및 분진이 심하며, 디스크 그라인딩의 경우 기량에 따라 효과 정도 편차가 심하며 표면에



Table 2. 버 그라인딩과 디스크 그라인딩의 장점 및 단점(박성완, 2008).

Method	장 점	단 점
<b>Burr grinding</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grinding 방법 중 가장 효과적이다.</li> <li>- 장비를 손쉽게 구할 수 있다.</li> <li>- Disc grinding 보다 쉽게 배울 수 있다.</li> <li>- 필렛 용접부에 좋다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 매우 느리다.</li> <li>- 유지비용이 비싸다.</li> <li>- 품질을 유지하기 어렵다.</li> </ul>
<b>Disc grinding</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Burr grinding에 비교해서 아주 빠르다.</li> <li>- 넓은 영역도 가능하다</li> <li>- 장비를 손쉽게 구할 수 있다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 피로향상이 Burr grinding에 비해서 낮다.</li> <li>- 결과의 scatter가 크다.</li> <li>- 장비의 크기로 인해 사용이 제한된다.</li> </ul>

## 2.2.2 TIG 드레싱

TIG dressing은 아크 열원을 사용하여 용접 토우부를 재용융시키는 공정으로서 토우그라인딩과 마찬가지로 선단의 결함을 제거함과 동시에 비드 선단과 모재사이 이음부를 매끄럽게 하는데 그 목적이 있다. 또한 TIG dressing은 용가재의 공급 없이 재사용접으로 진행하며, C-Mn강과 같이 고탄소 함량을 가진 소재의 경우 재용융으로 인한 템퍼링 및 열영향부 정도 향상 효과도 기대할 수 있다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 작업자의 기량과 작업 준비 조건, 입열량 및 기타 공정 변수 등에 매우 민감할 뿐만 아니라 비용 및 시간적인 측면에서 불리하다.

Fig.6은 드레싱 전후 필렛 용접부의 단면을 비교한 것으로 IIW에서는 텅스텐 전극봉의 표준 위치를 토우부에서 0.5~1.5mm 사이에 위치할 것을 제안하였다. 만약 선단과 너무 가까울 경우 또 다른 형태의 노치 또는 토우가 발생할 우려가 있다. 한편, Fig.7은 TIG dressing 적용에 약 50% 정도의 상승효과가 나타났으며 전 주기영역에서 보다 우수한 결과를 확인할 수 있다(김용, 2012).

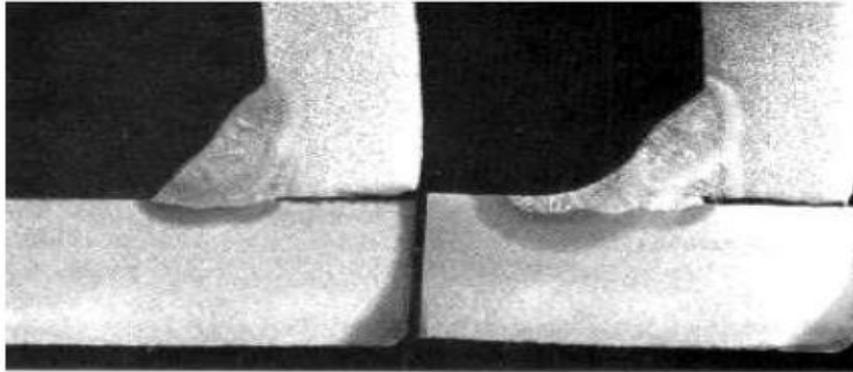


Fig.6 TIG 드레싱 전후 필렛 용접부 단면비교(김용 등, 2012)

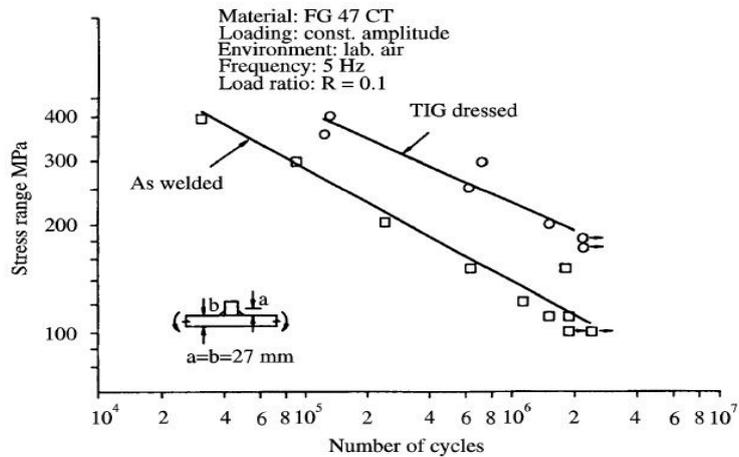


Fig.7 TIG 드레싱 유무에 따른 피로수명 비교(김용 등, 2012)

### 2.2.3 워터 제트 부식 기술

워터 제트 부식 기술은 고압의 물을 분사하는 것을 말하며, 이는 용접에 연마 입자가 포함되어 있다. 연마 입자는 용접 표면 물질을 침식하고 언더컷 슬래그 함유 등의 용접 토우 영역을 제거 할 수 있다. 피로 강도의 결과 개선을 위한 물리적 메커니즘은 다른 용접 토우부 처리와 비슷하다. 즉, 용접 토우부 각도는 베이스 플레이트의 부드러운 변화를 제공하기 위해 감소되고 용접 토우부의 함유물과 언더컷들은 용접 토우부의

응력 집중의 감소의 결과로 제거된다. 해리스에 의해 보고된 이 기법은 연삭, TIG 또는 드레싱 플라즈마와 같은 다른 토우부 드레싱 처리보다 더 빨리 적용 될 수 있으며 비용이 훨씬 더 선택적이다. 침식의 속도는 그라인딩을 위한 0.5~2.5 m/h (1.5~8 ft/h)과 TIG 드레싱을 위한 0.9 m/h (3 ft/h)과 비교하여 20~46 m/h (65~150 ft/h)로 기록 되어 진다. 그러나 이 빠른 침식의 속도는 비교적 짧은 시간에 너무 많은 물질을 제거할 위험이 있기 때문에 특별한 운영자 교육과 관리가 필요하다. 장비를 구하기가 어려우며 부식을 제어하기가 어렵다. 또한 물의 정화와 연마제 입자의 적용에 한계가 있다(KJ. Kirkhope et. al, 1999).

## 2.2.4 플라즈마 드레싱

플라즈마 드레싱은 TIG 드레싱과 유사하나 주된 차이점은 TIG 드레싱에 사용되는 열보다 약 2배의 높은 열을 사용하는 것이다. 더 높은 열을 투입하는 것은 용접 물질과 베이스 플레이트 사이의 더 많은 변화에서 결과 된 더 큰 용접부를 산출한다. 또한 더 큰 용접부는 이 과정을 용접 토우부의 상대적인 전극의 위치에 덜 자극적이게 한다. 그리고 플라즈마 드레싱으로부터 획득된 피로 주기의 향상이 일반적으로 TIG 드레싱 특히, 더 높은 철의 강도에서 크게 작용한다는 사실이 Haagensen에 의해 발견되어 졌다. TIG와 플라즈마 드레싱의비용은 상대적으로 저렴하다. 그러나 무겁고 불필요한 장비 및 접근성은 사용을 제한 할 수 있으며, 모재와 용접배를 주의해서 깨끗이 할 필요가 있다(KJ. Kirkhope et. al, 1999).

## 2.2.5 햄머 피닝

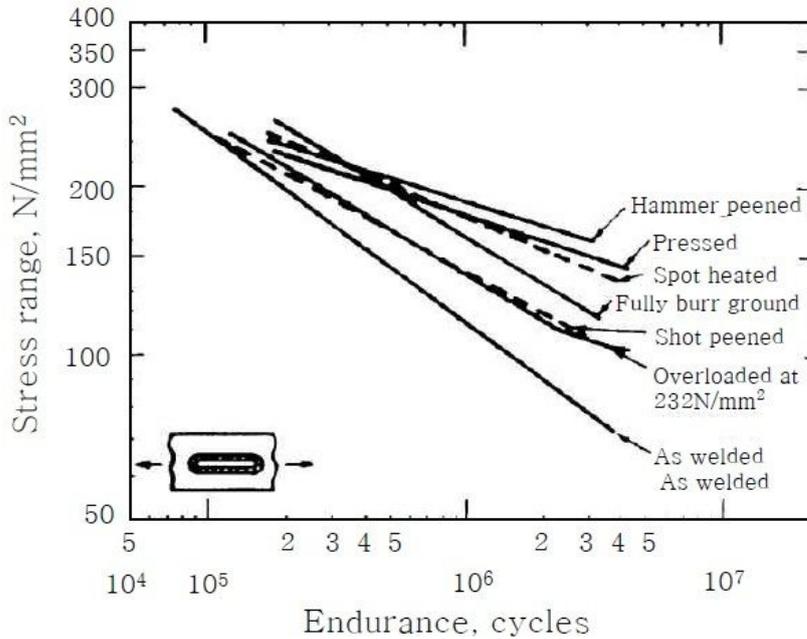


Fig.8 용접후처리 방식에 따른 피로수명 향상 비교(김용 등, 2012)

압축잔류응력의 대표적인 유도방법인 해머피닝은 인장 잔류응력이 크게 작용하는 용접부 표면에 냉간가공으로 소성변형을 일으켜 압축응력을 발생시키는 방법이다. 분당 수천회의 가격을 가하여 용접비드 선단에 잔류응력을 발생시키는 효과는 물론 적절한 작업공정으로 비드 선단의 기하학적 형상도 개선할 수 있어 용접부 피로수명을 크게 연장할 수 있다.

Fig.8은 해머피닝 공정 및 이에 따른 토우부 단면 개선형상을 보여준다. 평균적으로 개선된 토우부의 반경은 1.5~2mm 사이이며, 압입 깊이는 0.05~0.6mm로 나타난다. 해머피닝 공정은 대략 4회의 공정 반복을 통하여 압흔 깊이가 0.5~0.6mm 정도 발생한 조건에서 최적의 향상 효과가 발생한다고 알려져 있으며, Fig.8과 같이 여러 용접후처리 방식과 비교하여 고주기피로 영역으로 갈수록 피로 향상효과가 가장 탁월하게 나타난다(김용 등, 2012). 그러나 소음과 작업자가 받는 피로 등의 주된 이유로 폭 넓게 적용되는데 장애가 되고 있다(최광윤, 2013).

## 제3장 FSP 피로강도 향상법

### 3.1 FSP에 의한 피로강도 향상법 개요

마찰교반 프로세스(Friction Stir Process)은 1991년 영국 TWI(The Welding Institute)에서 개발되어 폭 넓게 사용되는 용접방법이다(김환태, 2007). 마찰교반용접의 원리는 Fig.9와 같이 회전하는 공구(tool)의 핀(Pin, Probe)을 접합부에 삽입시키고, 모재와 공구 솔더 부의 마찰에 의해 마찰열이 발생하게 되면, 회전하는 공구를 용접선을 따라 전진시켜 두 부재를 용접하게 된다. 이때 모재에 삽입된 핀에 의해 연화된 모재는 교반되어 핀의 후부로 밀리면서 용접이 이루어진다. 본 용접법은 전기적 에너지가 필요없고 입열량이 일반 용접법에 비해 60%정도이므로 이에 따른 열변형 및 잔류응력의 발생이 적어 기계적 성질이 향상되는 특징이 있다. 또한 용접부는 용융이 되지 않아 미세한 압출조직이 남게 되어 금속의 조직도 일반 용접부 보다 매우 양호하다. Fig.10 에서는 핀(Pin, Probe)의 형상을 적절히 변경시켜, 용접 토우부의 형상을 부드럽게 하고 토우부의 조직을 개선시켜 피로강도를 향상시키고자 한다.

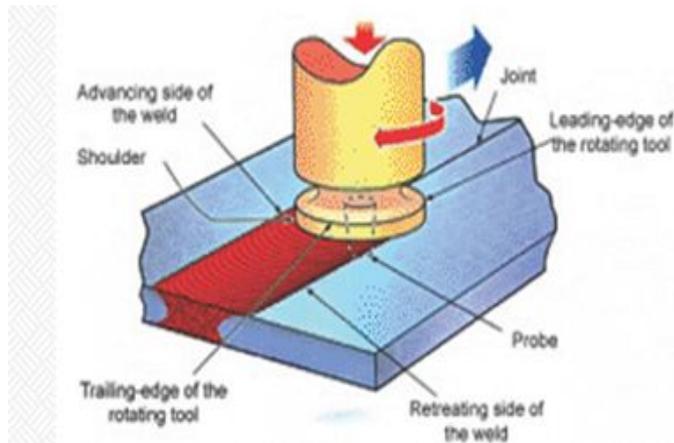
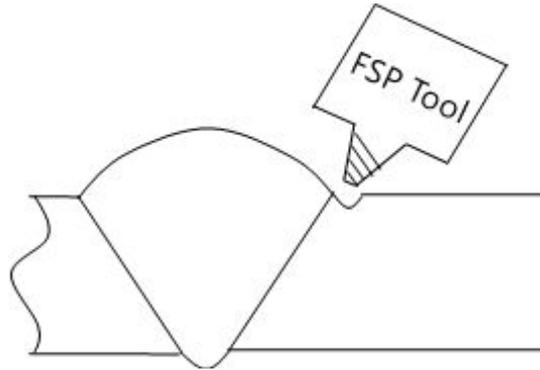
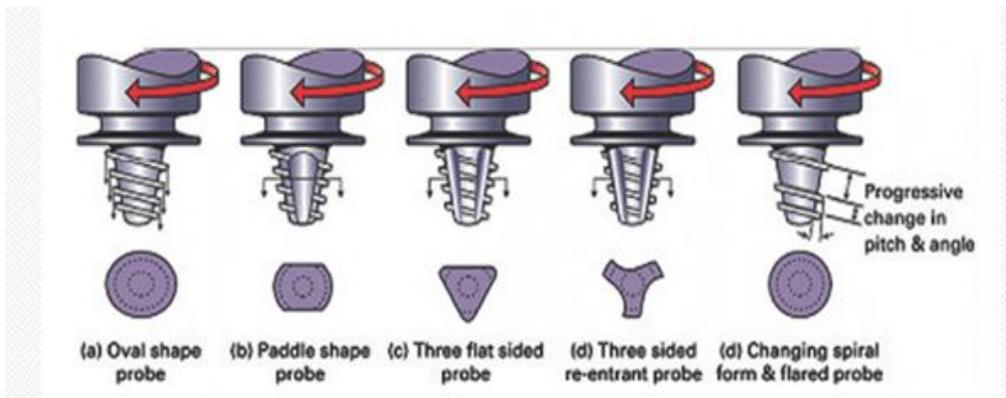


Fig.9 마찰 교반 용접(김홍주, 2011)



(a) 마찰교반용접 처리



(b) Tool 형상

Fig.10 마찰교반용접 처리 및 Tool형상

## 3.2 마찰교반처리의 형상조건

### 3.2.1 실험조건

실험에 사용한 강재는 조선용강 YP390MPa급으로 Table 3에 화학조성과 재료의 물

성치값을 보여주고 있다. 부재의 두께는 25mm 이고 최적의 공정인자를 도출하기 위해 Table 4에 보여주고 있는 것과 같이 이동속도, tool회전속도, tilted angled을 변화시켜 실험을 실시하였다. 또한 Table 5의 tool의 형상은 Shoulder diameter는 6~12mm이고, Shoulder angle은 1~5° 이고, Pin diameter는 2~4mm, pin length 는 1.5~2mm 이다.

Table 3. 조선용강판 EH47의 화학조성 및 재료의 물성치(김홍주, 2011)

Materials	Chemical composition (wt%)					
	C	Mn	Si	P	S	others
EH47 Steel	≤0.1	≤2.0	≤0.6	≤0.05	≤0.05	Al, Nb, V, Ti, Cu, Cr, Ni, Mo, B
	Mechanical properties					
	Tensile Strength (MPa)		Yield Strength (MPa)		Elongation (%)	
	540		390		21	

Table 4. 조선용강판 EH47의 FSW 조건(김홍주, 2011)

Spindle speed (rpm)	Travel speed (mm/min)	Tilted angle (deg.)	Inert gas shield	Used welding tool
500~2000	300~1800	0~3	-	WC-CO

### 3.2.2 비드 형상 결정을 위한 유한요소해석

용접피로시험편으로 사용한 피로시험편에 대해 as-weld 용접시험체와 용접부 비드 토우부 마찰교반개질한 시험체에 대해 비교검토를 하기위해서 유한요소해석을 실시하였다. 해석은 비선형해석 전문 프로그램인 MSC.Marc를 사용하였다.

Fig.11은 해석에 사용한 모델을 보여주고 있으며 FSP모델의 토우부는 표면 개질을 하여 흠이 있는 것을 보여주고 있다. 두께는 25mm 이고, 2차원 쉘 요소를 사용하였다. Fig.12에서 경계 조건은 일면 고정이고 타단을 균일하게 인장응력이 280MPa이 되도록 하였으며, 용접 집중부에 작용하는 최대의 응력과 단면적당의 응력과의 비율을 나타내는 응력집중계수(Kt)를 산출하였으며 식(1)과 같다. 또한, 탄소성해석이며 사용한 재료의 기계적 물성치는 탄성계수E=205.3(GPa), 포와송비는 0.3이다.

$$Kt = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $\sigma_{\max}$  = 노치부의 최대응력  
 $\sigma_n$  = 응력집중이 없는 것으로 계산한 공칭응력

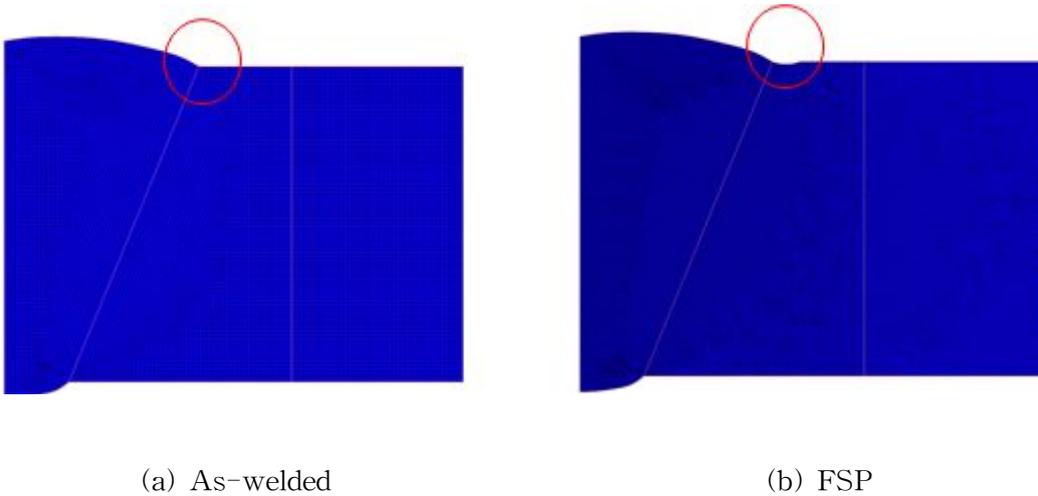
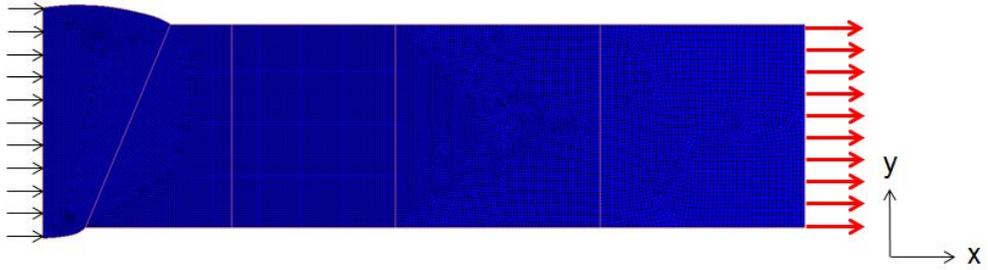
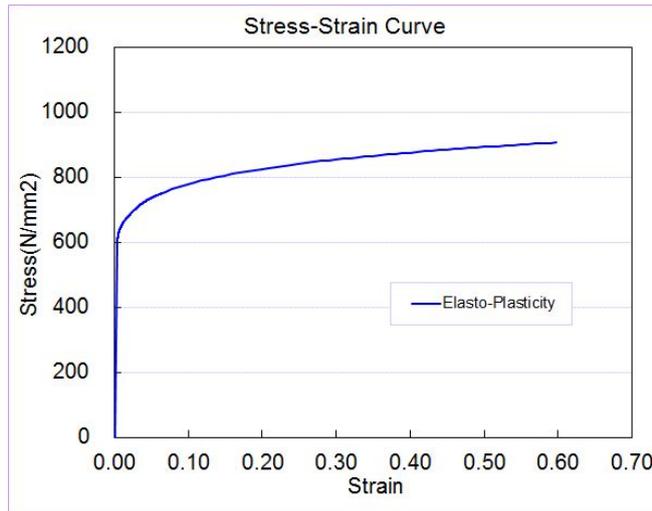


Fig.11 해석 모델



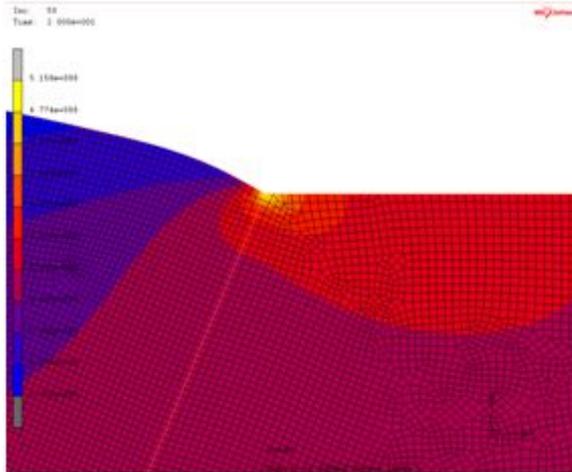
(a) 경계 조건



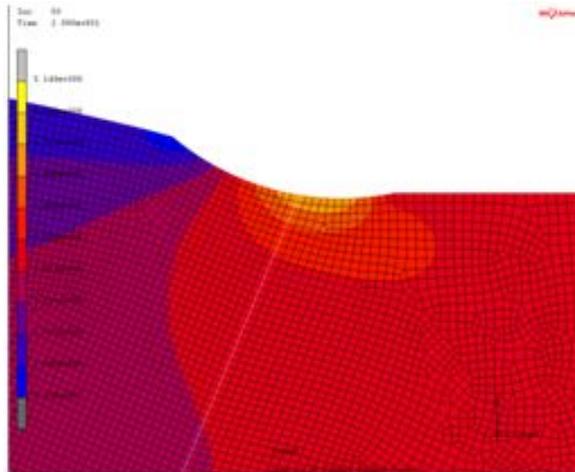
(b)탄소성 해석

Fig.12 경계 조건 및 물성치

Fig.13은 유한요소해석결과로부터 응력분포를 보여주고 있다. 모든 모델은 용접비드 토우부에서 응력집중이 발생하는 것을 알 수 있다. Table 5는 용접부의 응력집중계수를 보여주고 있다. 마찰교반에 의해 토우부 형상을 개선한 용접모델에서 as-weld부 보다 더 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 용접부 형상에 의한 응력집중계수가 감소하여 피로강도를 향상시킬 것으로 예상 된다.



(a) As-welded



(b) FSP

Fig.13 모델 응력 분포

Table 5. As-welded 와 FSW 해석 결과

	TL(Kt)	TR(Kt)	BL(Kt)	BR(Kt)
<b>As-weld</b>	2.24	2.05	1.80	1.99
<b>FSW</b>	1.78	1.17	1.69	1.48

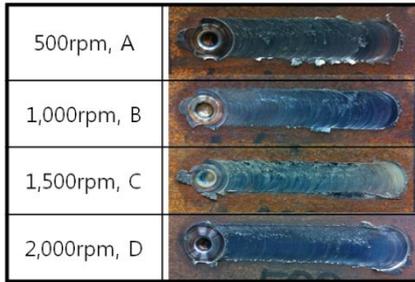
### 3.2.3 마찰교반처리의 비드형상 및 조직

Table 6. Tool 형상 치수(김홍주, 2011)

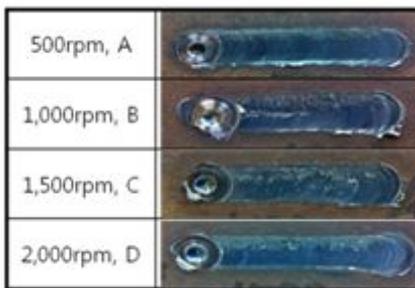
	Shape	Shoulder size	Pin size (Top)	Pin size (Bottom)	Pin depth
A		ø12	ø4	ø3	2mm
B		ø10	ø5	ø4	2mm
C		ø6	ø3	ø2	1.5mm
D		ø6	X	X	X

Fig.14 는 적절한 가공조건을 결정하기 위해 Table 6의 tool형상, 이동속도, tool회전속도를 변화시켜 평판위에 FSP처리한 표면을 보여주고 있다. 표면의 형상으로부터 이동속도는 60mm/min에서 tool회전속도는 500rpm이 FSP가공조건으로 선정하였다.

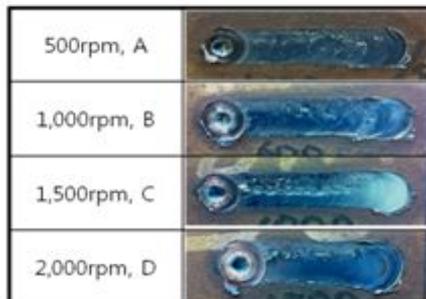
따라서 선정된 조건에서 Fig.15 는 마크로단면으로부터 모재, HAZ부, 개질부의 마이크로조직을 보여주고 있다. 모재조직에 비해 개질부의 조직이 미세하게 형성되어 진 것을 알 수 있다.



(a) 이동속도 60mm/min

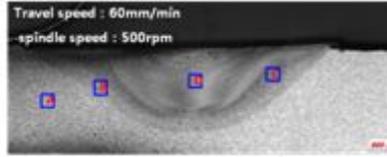


(b) 이동속도 180mm/min

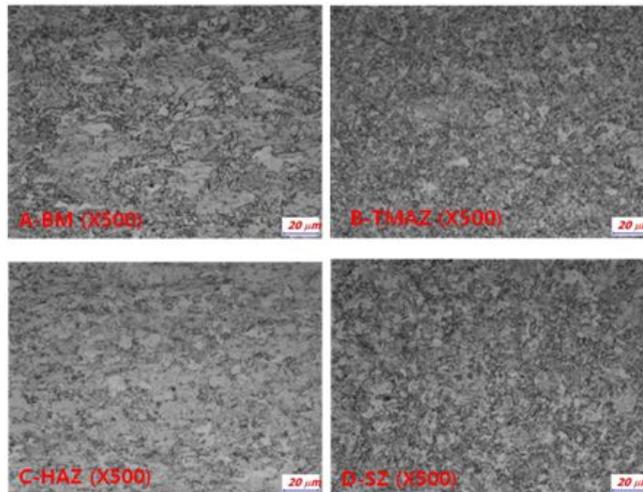


(c) 이동속도 300mm/min

Fig.14 이동속도와 회전속도에 따른 비드 형상(김홍주, 2011)



(a) 측정위치와 마이크로단면



(b) 마이크로조직

Fig.15 마크로와 마이크로조직 (60mm/min, 500rpm)(김홍주, 2011)

### 3.2.4 마찰개질부 경도

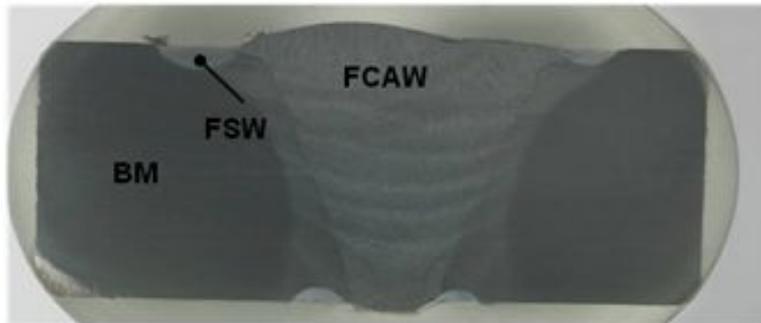


Fig.16 경도의 측정위치(김홍주, 2011)

Fig.16은 용접 개질부의 마크로 단면이고 단면에서는 모재(BM), 개질부(FSW) 그리고 FCAW 이음부를 보여주고 있다. Fig.17은 최적의 가공조건 이동속도 60mm/min 이고, 회전속도 500rpm의 모재, FSW, FCAW부의 매크로 및 마이크로 조직을 보여주고 있다. 세 조직을 비교하면, 모재의 조직에 비하여 FSP에 의해 개질된 부분의 조직이 미세하며, 조직의 미세화에 따라서 인성 및 강도가 향상 될 것으로 판단 된다. 피로성능에 영향을 주는 요인은 여러 가지가 있으나, 형상의 영향 즉 응력집중의 영향을 많이 받게 되며, 본 연구에서는 FSP에 의한 형상 및 조직을 개선하여 피로성능을 향상하고자 하였다. 조직의 미세화 등 조직만의 영향에 의해서 피로성능의 향상 정도를 파악하기는 본 연구의 범위에서는 다소 무리가 있었다. 하지만 Fig.17의 조직 비교에서 알 수 있듯이 기존의 용접부(HAZ)에 비하여 FSP에 의하여 페라이트 및 펄라이트 조직이 미세화됨을 관찰 할 수 있었으며, 그러한 조직 미세화의 영향이 피로성능을 향상 시키는데 기여 하였을 것으로 판단 한다.

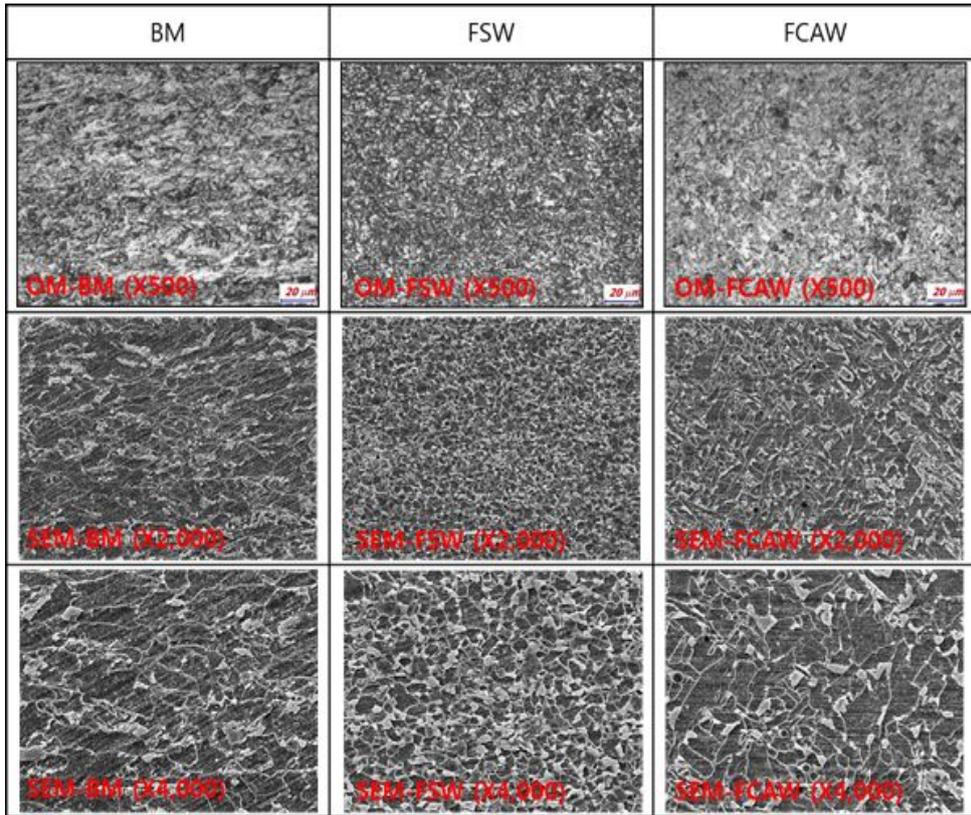


Fig.17 모재의 마크로 및 마이크로 조직(김홍주, 2011)

Fig.18은 대표적으로 이동속도 60mm/min이고, 회전속도 500 rpm의 모재, FSW, FCAW부의 grain size 을 보여주고 있다. 각 부분에 대해 5개소의 대표부분을 측정 후 평균값은 Base metal 부에서는 ferrite 계가  $19.03\mu\text{m}^2$  이고, Pearlite 계가  $6.32\mu\text{m}^2$  였고, FSW부분에서는 ferrite 계가  $6.83\mu\text{m}^2$  이고, Pearlite 계가  $1.54\mu\text{m}^2$  였고, FCAW 부분에서는 사이즈는 ferrite 계가  $12.28\mu\text{m}^2$  이고, Pearlite 계가  $5.21\mu\text{m}^2$  이다.

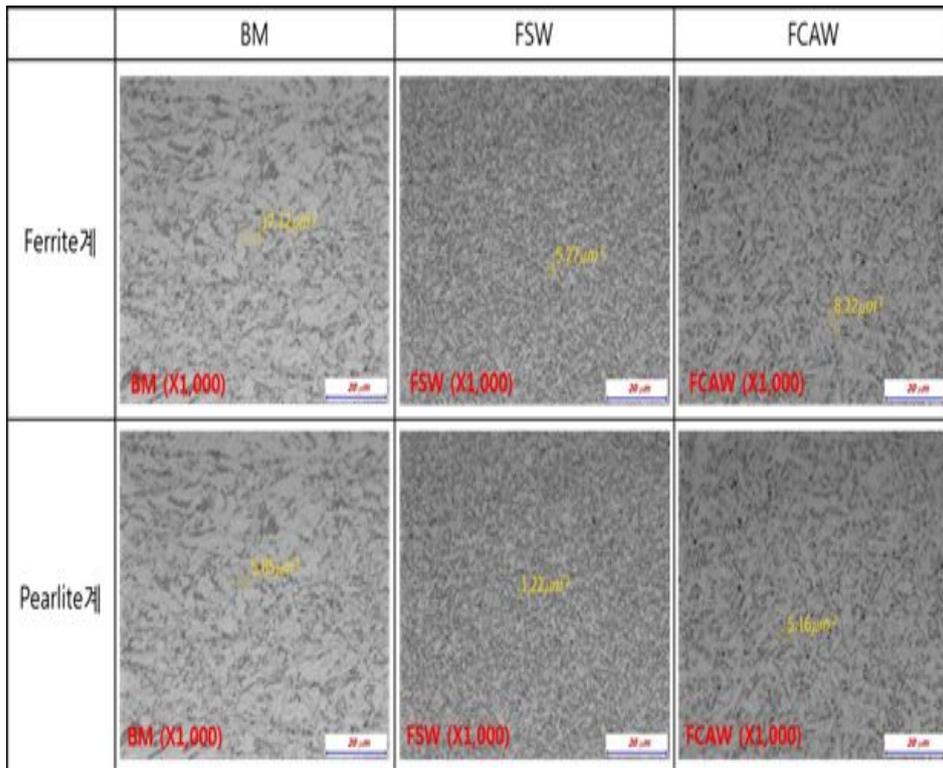
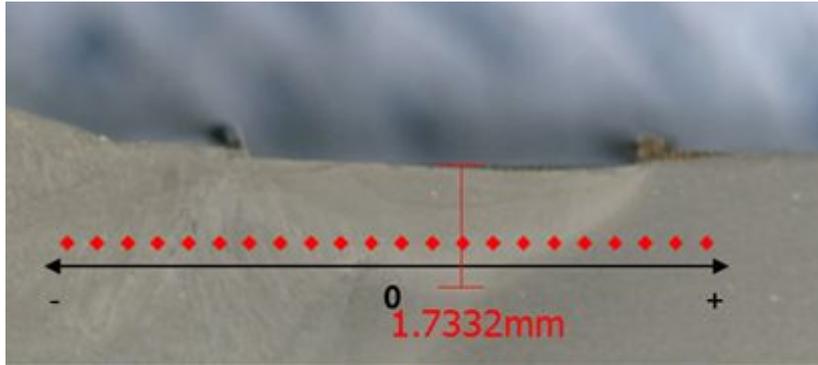
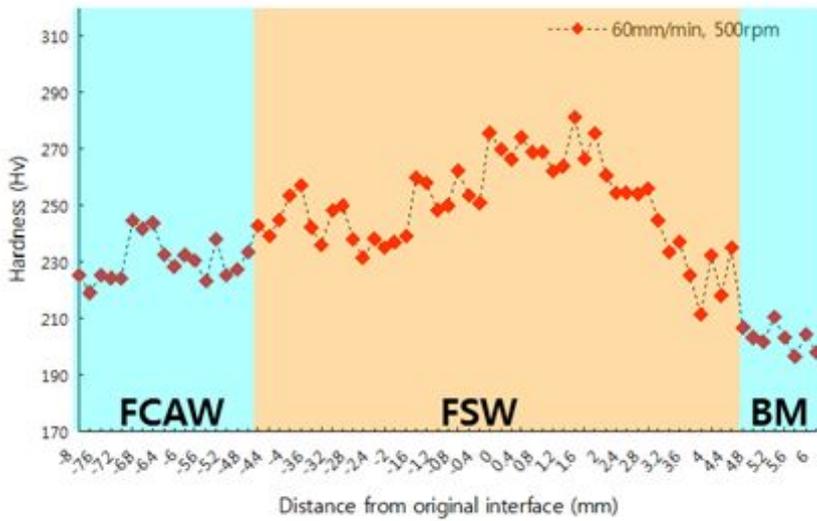


Fig.18 입자 크기(김홍주, 2011)

Fig.19는 마찰교반부로부터 깊이 1.73mm 에서의 모재, FSW부, FCAW부의 경도값을 보여주고 있다. Base metal 부에서는 평균 210 Hv, FSW 영역에서는 평균 230~300 Hv, FCAW영역에서는 210~250 Hv 로 분포되었다. FSW에서 경도값이 크게 나타나는 것은 소성유동에 의해 grain size 가 미세화되어서 이다. FSP처리된 영역에서 다소 경도가 높게 분포 하지만 선급률을 포함 각종 규격에서 규정하고 있는 조건은 만족 하고 있다. 이처럼 조직의 미세화의 FSP처리시에 표면에 발생하는 열의 영향으로 경화 현상이 나타나게 되어서 표면에서 발생하게 되는 피로균열의 발생을 억제 시키는 효과를 나타 낼 수 있다. 따라서 피로성능의 향상에 영향을 줄 수 있다고 할 수 있다.



(a) 경도의 측정 위치(김홍주, 2011)



(b) 원래의 인터페이스에 따른 경도(김홍주, 2011)

Fig.19 모재의 경도값

## 제4장 피로시험

### 4.1 시험편 종류 및 특성

본 연구에서 사용된 시험체의 형상은 Fig.20과 같이 두께는 25mm이고, 전체 폭은 100mm이며 전체길이는 약 430mm이다. 시험체의 중앙 평행부는 폭 50mm 이고 길이 100mm가 되도록 제작하였다. 맞대기 피로시험체는 피로강도 향상을 위한 맞대기 용접부 토우부에 FSP 처리 하였다. Fig.21은 FSP처리한 시험편 형상을 나타내고 있다.

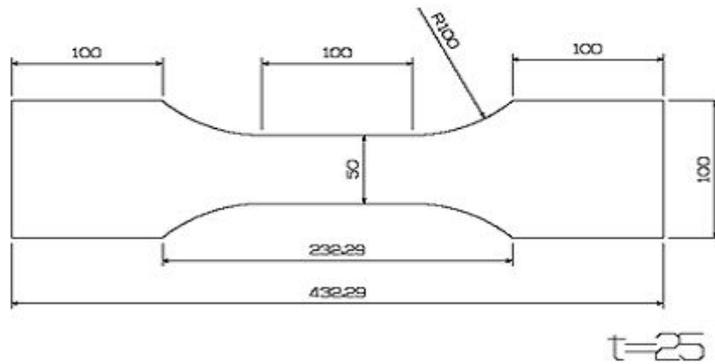


Fig.20 시험편 형상 및 치수



Fig.21 FSP 처리한 시험편

## 4.2 피로시험 조건 및 방법

본 연구에서 사용한 피로 시험기 Fig.22는 축 인장/압축에 대해 최대용량  $\pm 50\text{ton}$ 이고 유압서브에 의해 구동되며, 실험은 하중제어방식에 따라 4~6Hz로 하였고, 하중부하조건은 편진 인장진폭이고  $R=0.1$ 로 실시하였다.

시험조건은 예비실험을 통해 도출한 tool type은 A, 이동속도는 60mm/min, 회전속도는 500rpm 인 조건에서 피로실험은 Table 7과 같이 총 9개이고 하중조건은 3영역(240, 260, 280MPa)에서 실시하였다.



Fig.22 피로시험 모습

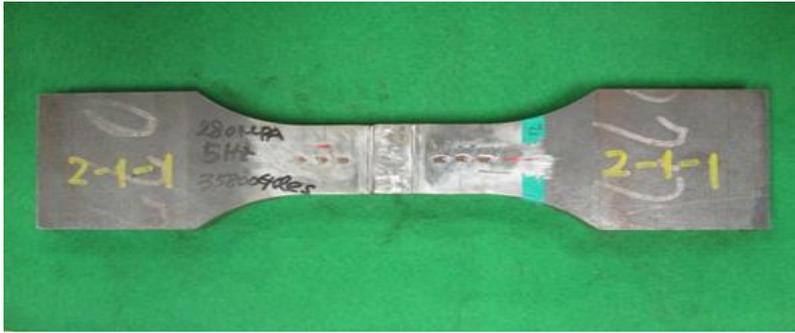
Table 7. 시험편 수량 및 하중 조건

시험체명	두께(t) (mm)	폭(B) (mm)	응력 (MPa)	R	수량 (EA)
2-1-(1)	25	50	280	0.1	1
2-1-(2)			240	0.1	1
2-1-(3)			260	0.1	1
3-2-(1)			280	0.1	1
3-2-(2)			260	0.1	1
3-2-(3)			240	0.1	1
5-1-(1)			280	0.1	1
5-1-(2)			260	0.1	1
5-1-(3)			240	0.1	1

### 4.3 피로시험 결과

시험에 사용된 시험편의 파단모습(윗면, 측면, 피로 파단면)을 Fig.23과 Fig.24에 보여주고 있으며 나머지 시험편들은 부록에 첨부되어 있다. 피로균열의 시작은 대부분의 시험편에서 이면 또는 전면 토우부를 기점으로 균열이 시작하여 파괴에 도달 되었다.

Table 8은 마찰교반 표면개질한 시험편의 피로강도결과와 as-welded 시험편의 결과를 보여주고 있다. Table 8에서 보여주고 있는 것과 같이 총 9개의 시험편 중 2개의 시험편을 제외하고는 모두 이면 비드로부터 피로균열이 시작되어 HAZ부를 진전하다가 결국 파괴된 것을 알 수 있다.



(a) 윗 면



(b) 측 면



(c) 피로 파단면

Fig.23 2-1-1 시험편



(a) 윗 면



(b) 측 면



(c) 피로 파단면

Fig.24 2-1-2 시험편

Table 8. 표면개질 피로실험 결과

시험체명	두께(t) (mm)	폭(B) (mm)	응력(MPA)	Hz	파단횟수(n)	파단위치
2-1-(1)	25	50	280	4	35,800	BR
2-1-(2)			240	5	60,400	BR
2-1-(3)			260	6	55,300	BL
3-2-(1)			280	4	26,200	BR
3-2-(2)			260	5	33,400	BR
3-2-(3)			240	6	82,500	TL
5-1-(1)			280	4	26,885	BR
5-1-(2)			260	5	45,466	TR
5-1-(3)			240	6	59,300	BR

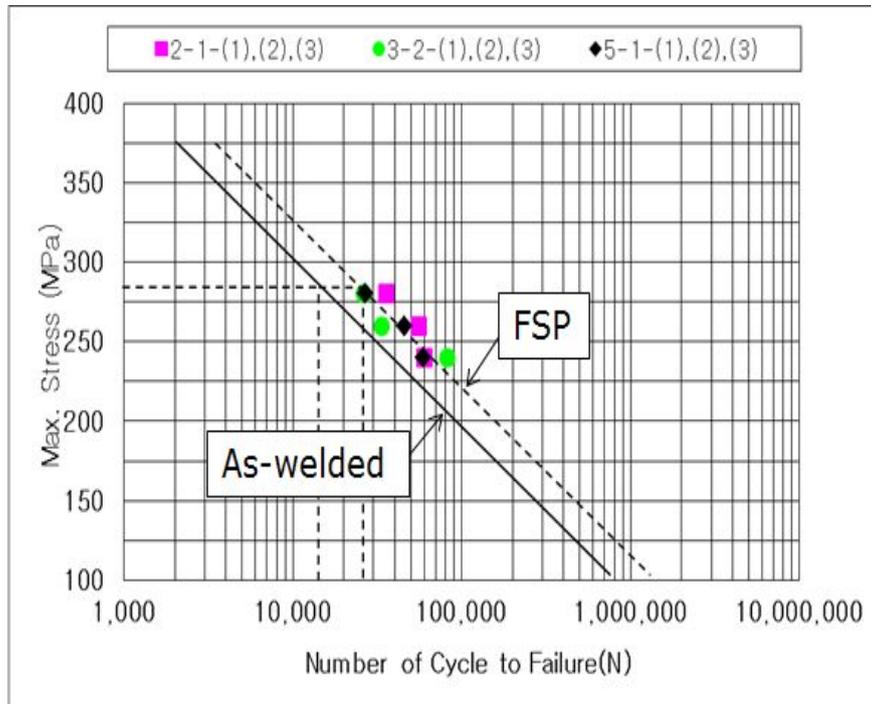


Fig.25 피로시험 결과

또한 Fig.25는 피로실험결과를 그래프로 보여주고 있으며, 이때 as-welded 실험결과는 직선이며 ◆, ●, ■ 는 각각의 하중조건에서의 FSP에 의해서 개선된 시험편의 피로시험 결과를 나타낸 것이다. 동일한 응력레벨에서 3번의 반복시험을 실시 하였으며, 서로 다른 3종류의 응력레벨에서 실시 하였다. 통상 S-N 선도는 14~16개의 시험결과로 그래프를 그리지만, 본 연구에서는 FSP 기술의 피로성능향상에 적용 가능성을 평가하는 실험으로 S-N 곡선의 경사부에 해당하는 응력레벨에서만 실험을 실시 하였다. Fig.25에서와 같이 기존의 용접이음부에 비하여 FSP에 의해서 용접비드 toe부의 형상을 개선하여 응력집중을 제어한 시험편의 피로성능이 향상됨을 알 수 있었다. 피로수명의 향상 정도는 본 연구에서 적용한 강재의 설계하중(250MPa)을 기준으로 할 때 약 50%정도가 향상됨을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 제안하고 있는 마찰교반에 의한 피로강도향상법은 용접부 피로수명을 향상시키는데 효과적인 것으로 판단된다.

## 제5장 응력 집중계수에 의한 피로강도 평가

### 5.1 유한요소해석

#### 5.1.1 해석에 미치는 파라미터의 영향

응력 집중부에서의 파라미터는 Fig.26과 같이 해석을 통하여 토우부로 인한 곡률반경이 얼마나 영향이 미치는지 알 수 있다. 다른  $\theta$ ,  $h$ ,  $l$ ,  $t$ 는 일정하며 곡률반경만을 변경하였을 경우 응력 집중부에 미치는 영향은 Table 9와 같이 1mm를 기준으로 0.5mm 일 때, 11%가 증가하였으며, 2.4mm, 4.81mm, 7.21mm 일 경우 각각 13%, 26%, 32%가 감소한 것을 볼 수 있다.

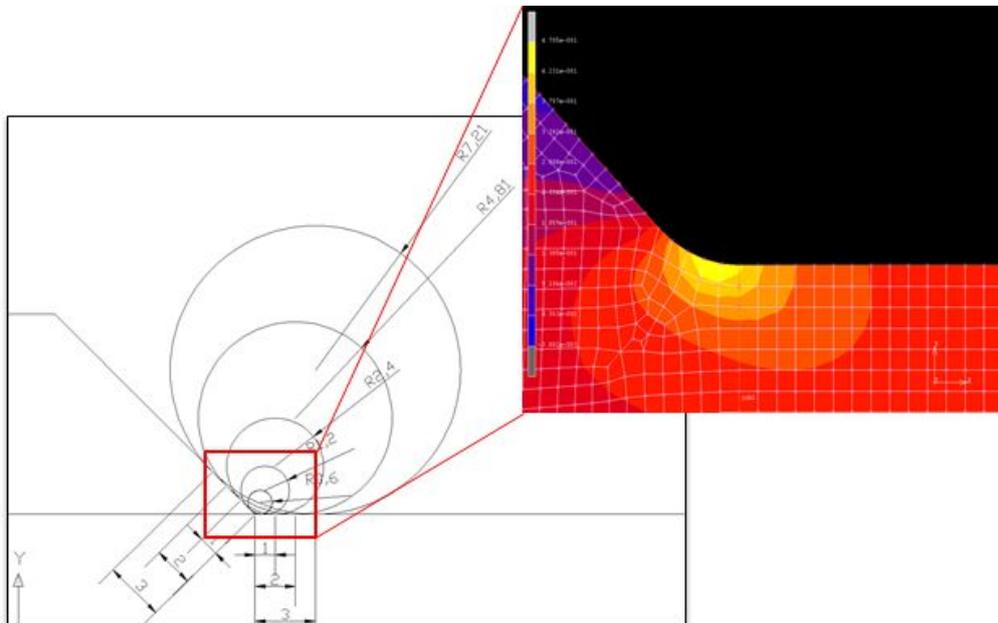


Fig.26 용접 집중부 해석

Table 9. 용접부에 곡률반경으로부터 미치는 영향

$\rho$ (mm)	$\Theta$ (degree)	h (mm)	l (mm)	t (mm)	Kt	%
0.5	135	10	29.94	25	2.36	11
1	135	10	29.94	25	2.1	0
2.4	135	10	29.94	25	1.81	13
4.81	135	10	29.94	25	1.56	26
7.21	135	10	29.94	25	1.44	32

### 5.1.2 유한요소크기의 영향

피로시험편의 모델링을 Fig.27에서 보여주고 있다. 또한 유한요소 망 크기에 따른 응력의 차이를 Table 10과 Fig.28에서 보여주고 있다. 유한요소 망 크기에 따라 응력집중계수(Kt)는 민감한 반응이 보이는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 유한요소 망 길이(가로/세로)를 0.1mm/2mm 로 일정하게 수행하였다.

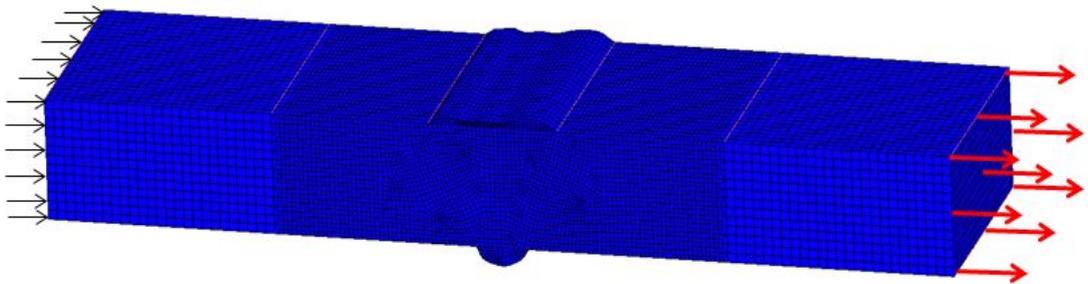


Fig.27 유한요소해석 모델링 및 경계조건

Table 10. 요소크기에 따른 응력집중계수(Kt)

Mesh size(mm)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Kt	1.75	1.64	1.56	1.48	1.42

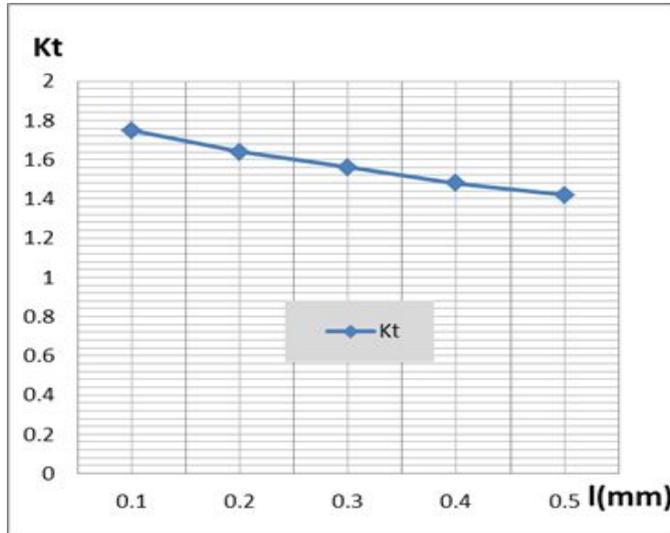
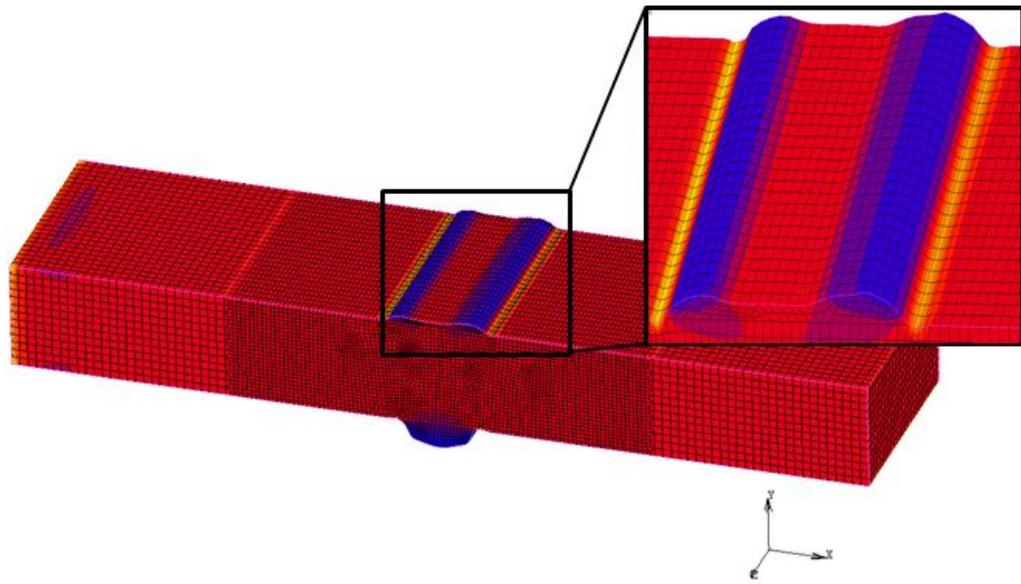


Fig.28 요소크기에 따른 응력집중계수(Kt)

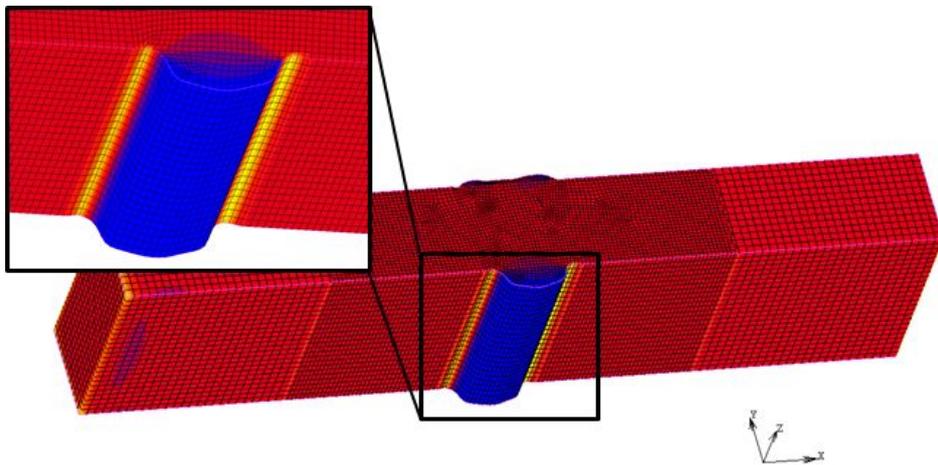
### 5.1.3 피로시험편의 유한요소해석

본 연구에서는 6개의 피로시험편으로부터 유한요소해석을 하였다. 각각 Fig.29~ Fig.34은 FSP를 한 모델링 및 해석을 보여주고 있다. 해석은 모델링의 파단부분을 기준으로 3D모델로 해석을 하였다. 또한 Table 11에서는 응력집중부의 파단면을 보여주고 있다.

따라서, 피로시험결과와 유한요소해석의 결과를 비교한 결과 피로균열발생 위치가 일관성이 있다는 것을 보여주고 있다.

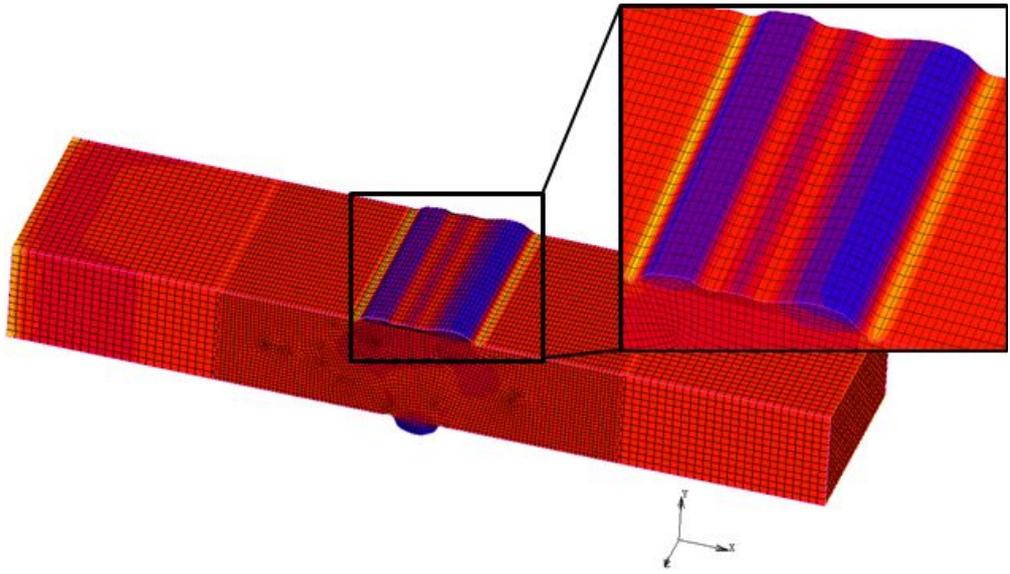


(a) 윗 면

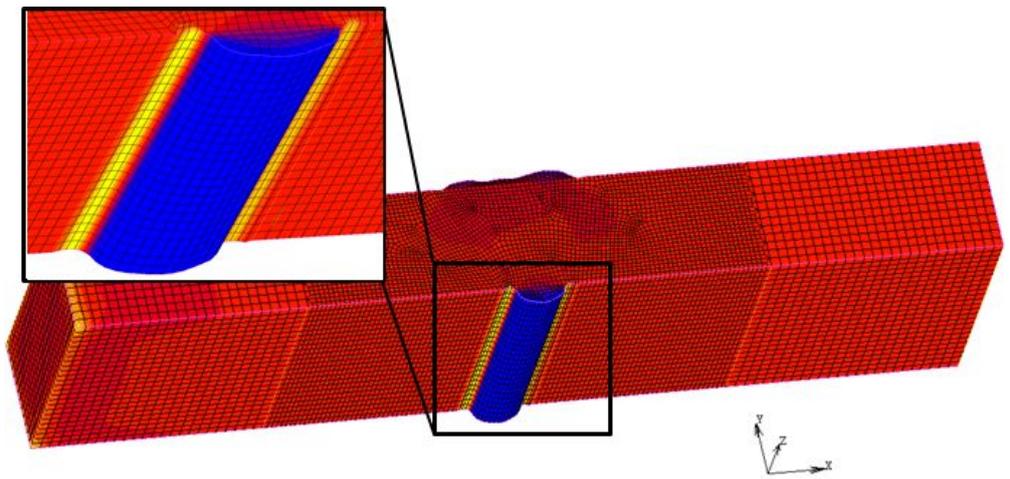


(b) 아래 면

Fig.29 2-1-1 시험편의 유한요소해석

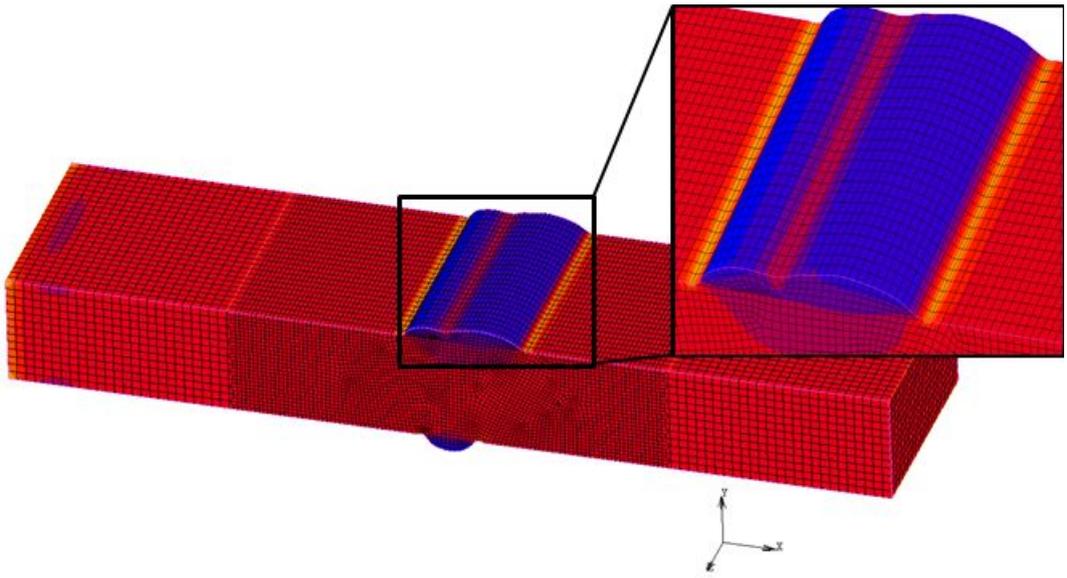


(a) 윗 면

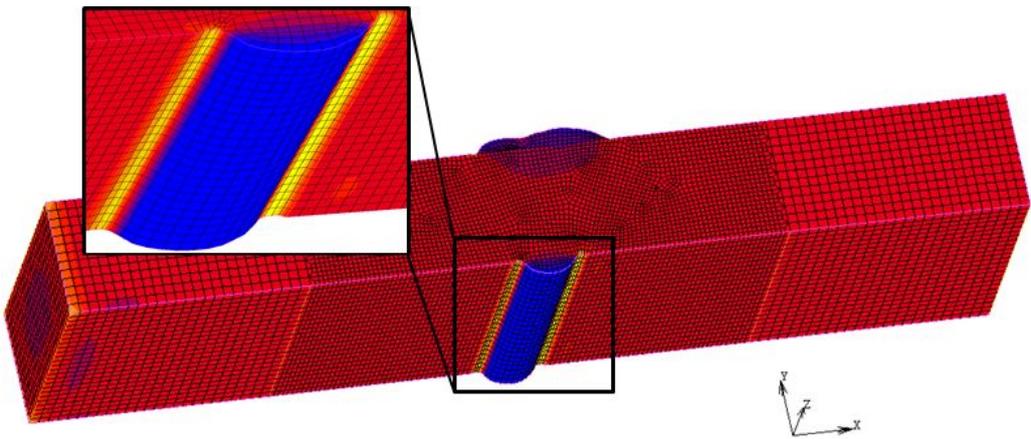


(b) 아래 면

Fig.30 2-1-2 시험편의 유한요소해석

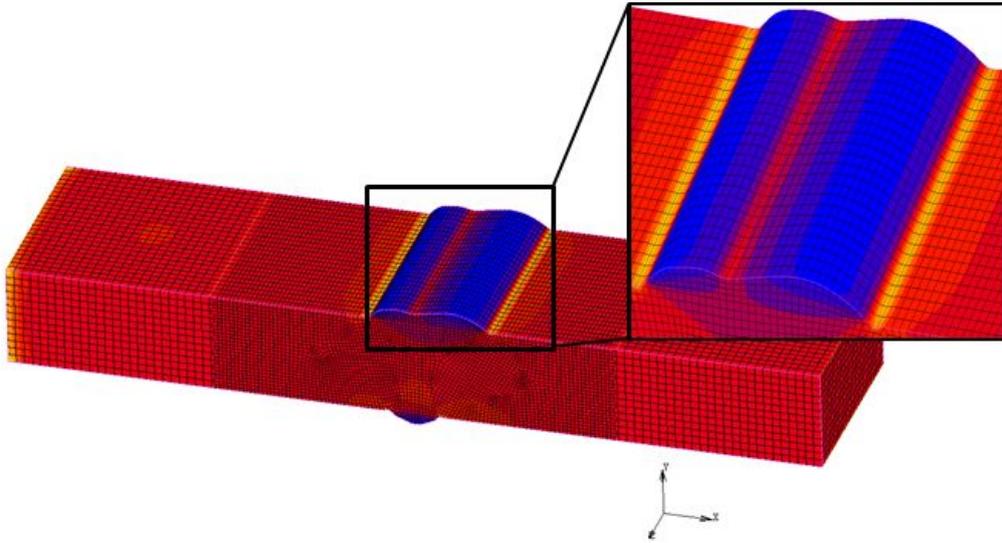


(a) 윗 면

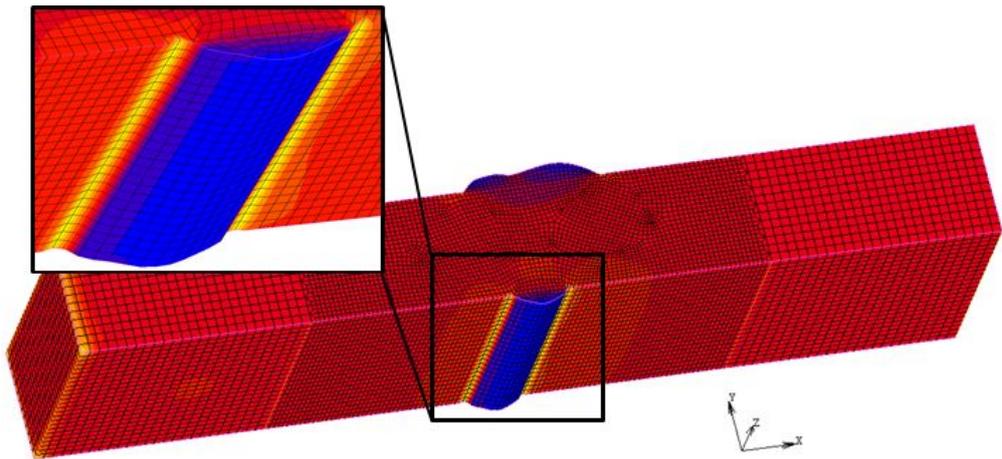


(b) 아래 면

Fig.31 3-2-1 시험편의 유한요소해석

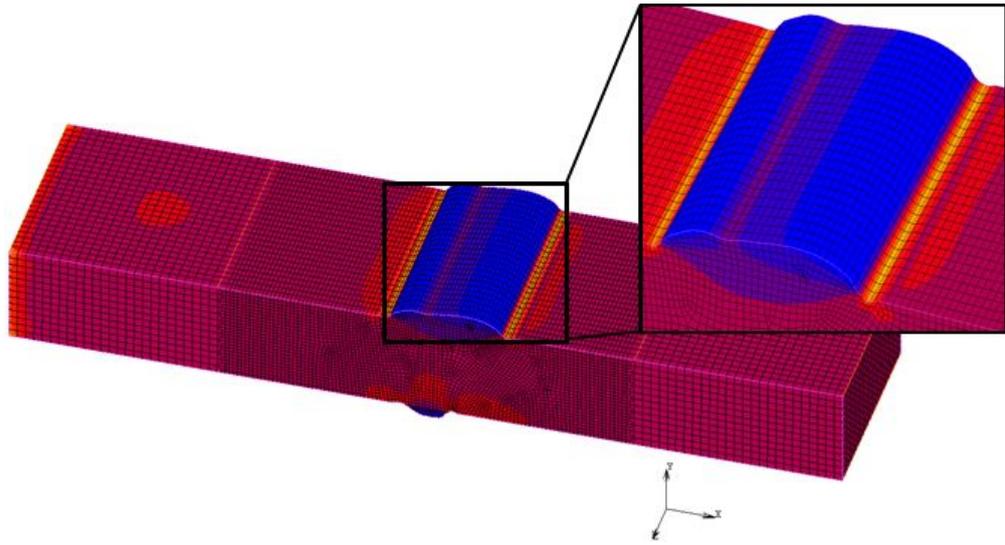


(a) 윗 면

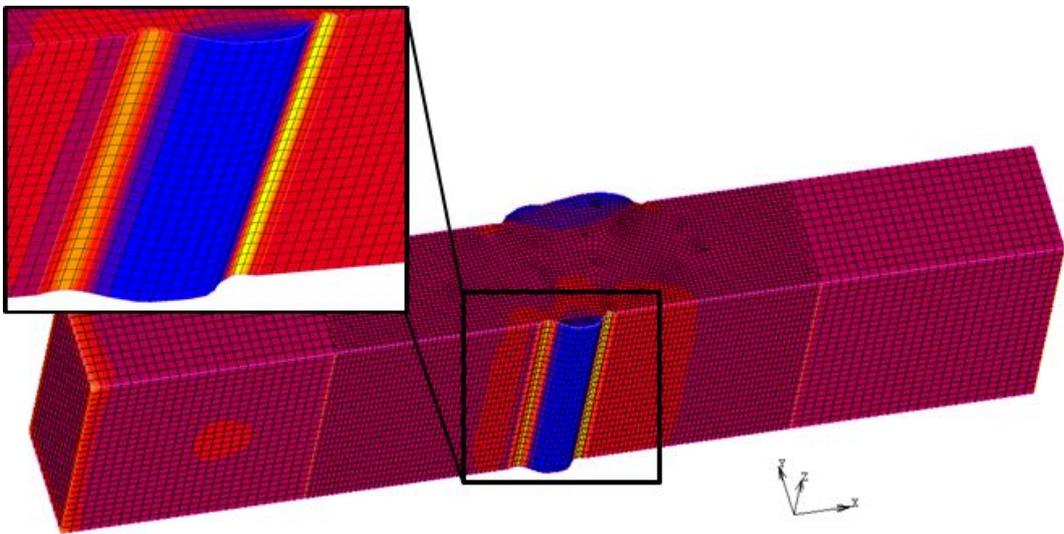


(b) 아래 면

Fig.32 3-2-2 시험편의 유한요소해석

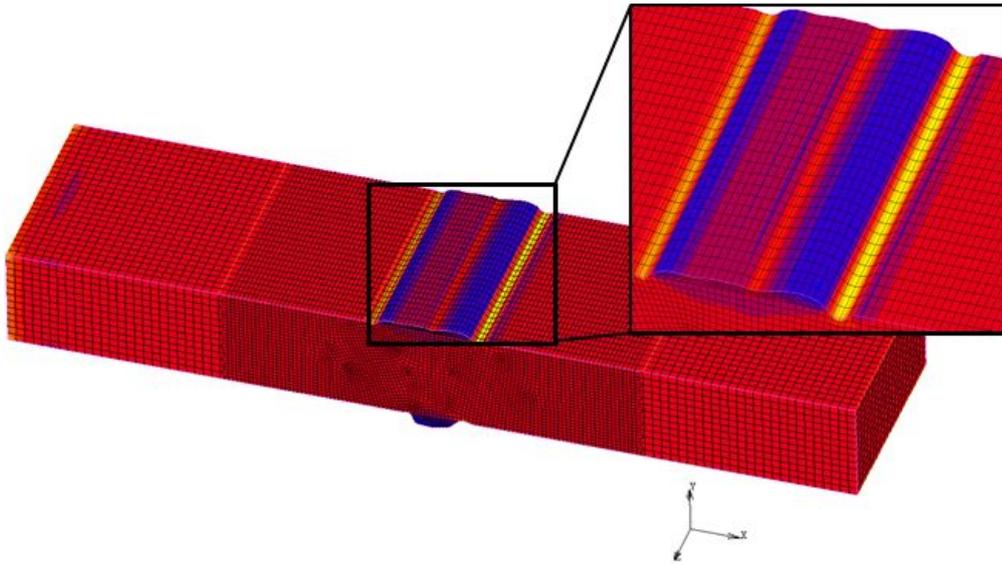


(a) 윗 면

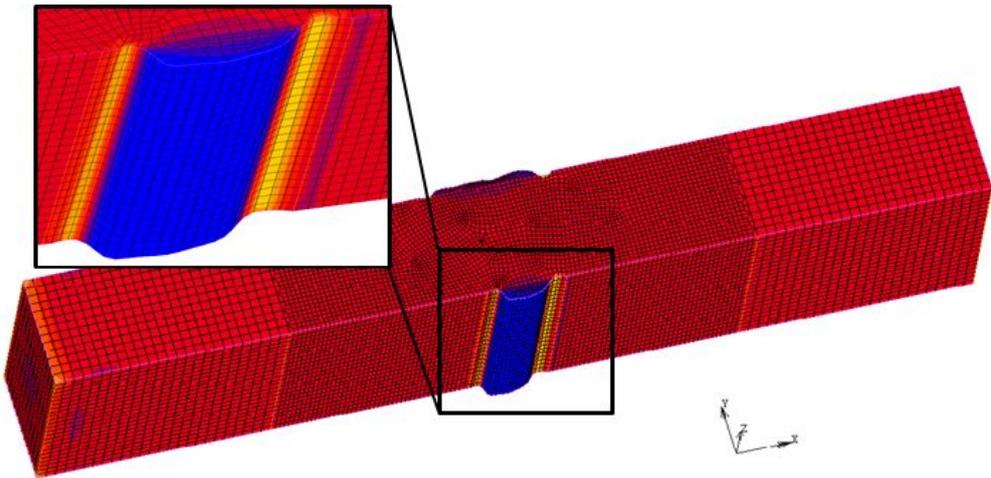


(b) 아래 면

Fig.33 5-1-1 시험편의 유한요소해석



(a) 윗 면

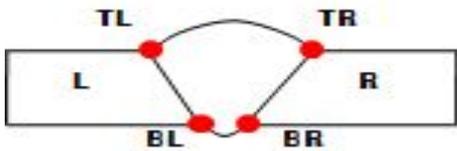


(b) 아래 면

Fig.34 5-1-2 시험편의 유한요소해석

Table 11. 피로시험과 유한요소해석 결과

시험체	위 치	Kt	파단면
2-1-(1)	*TL	1.947	BR
	**TR	1.794	
	***BL	2.069	
	****BR	2.219	
2-1-(2)	TL	1.623	BL
	TR	1.509	
	BL	1.949	
	BR	1.789	
3-2-(1)	TL	1.667	BR
	TR	1.640	
	BL	1.859	
	BR	1.911	
3-2-(2)	TL	1.667	BR
	TR	1.640	
	BL	1.859	
	BR	1.911	
5-1-(1)	TL	1.895	BR
	TR	1.959	
	BL	1.825	
	BR	2.350	
5-1-(2)	TL	1.776	TR
	TR	2.239	
	BL	1.876	
	BR	1.862	



\*TL : Top Left

\*\*TR : Top Right

\*\*\*BL : Bottom Left

\*\*\*\*BR : Bottom Right

## 5.2 실험에 의한 응력집중계수 도출

### 5.2.1 핫스팟응력(Hot Spot Stress, HSS) 과 구조응력(Structural stress, SS)

시험편 9개중 6개의 시험편을 대상으로 hot-spot stress와 structural stress 을 측정하기 위해 Fig. 35와 같이 토우부 끝단으로부터 일정거리에 1축 2mm 스트레인 게이지를 부착하였다. 구조응력을 계산하기 위해서는 부재의 표면과 뒷면에 스트레인 게이지를 부착해야한다. 그러나 뒷면 비드의 구조응력은 표면 비드의 간섭에 의해 스트레인 게이지를 부착할 수 없어 상부의 구조응력만 측정하였다.

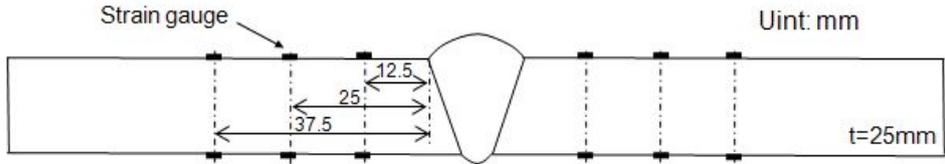
Hot-spot stress는 구조물에 있어서 균열이 주로 불연속부나 용접부에서 발생하는 것에 기인하기 때문에 토우부로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 외삽법(extrapolation)을 이용하여 구하였다. Hot-spot stress를 구하는 방법에는 ①부재두께(t)의 0.4t와 1t의 위치에서 응력을 외삽하는 방법, ②부재두께(t)의 0.5t와 1.5t의 위치에서의 응력을 외삽하는 방법 그리고 ③부재두께(t)의 0.5t의 위치에서 응력값을 사용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 두 번째 방법인 Niemi의 방법을 적용하여 식(2)를 이용하여 hot-spot stress를 구하였다.

본 연구에서는 Niemi의 방법을 적용하여 식(2)를 이용하여 핫스팟응력을 구하였다.

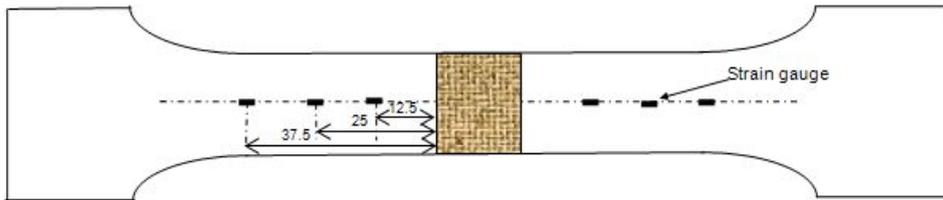
$$\sigma_{HS} = 1.5\sigma_1 - 0.5\sigma_2 \quad \text{식(2)}$$

여기서,  $\sigma_1 = 0.5t$ 에서의 응력이고,  $\sigma_2 = 1.5t$ 에서의 응력을 나타낸다. Fig.36은 용접토우부로부터 12.5mm, 37.5mm 떨어진 위치에 부착을 한 것을 보여주고 있다(강성원 등, 2005)

Table 12는 핫스팟응력( $S_{ha}$ )을 계산한 결과와 응력확대계수(SCF)를 보여주고 있다.



(a) 측 면



(b) 윗 면

Fig.35 스트레인 게이지 부착 위치

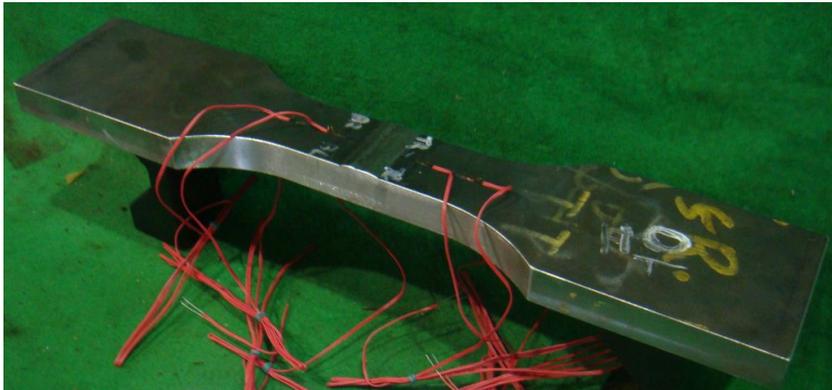


Fig.36 시험편 스트레인 게이지 부착

Table 12. 핫스팟응력 및 응력확대계수(SCF)

시험체	위치	Shs (0.2Fy/0.5Fy) (MPA)	SCF (0.2Fy)	SCF (0.5Fy)
2-1-(1)	L	235.641/396.3708	2.017	1.357
	R	164.4342/333.396	1.408	1.142
2-1-(2)	L	230.3931/397.5027	1.973	1.361
	R	162.7878/329.4858	1.394	1.128
3-2-(1)	L	122.3481/286.8852	1.048	0.982
	R	116.8944/299.9535	1.001	1.027
3-2-(2)	L	128.625/295.0143	1.101	1.010
	R	124.4061/296.7636	1.065	1.016
5-1-(1)	L	140.0469/306.8478	1.199	1.058
	R	118.6437/285.3417	1.016	0.977
5-1-(2)	L	136.4454/306.5391	1.168	1.050
	R	109.5885/272.3763	0.938	0.933

구조응력(Structural stress,  $\sigma_s$ )은 막응력(membrane,  $\sigma_m$ )과 굽힘응력(bending stress,  $\sigma_b$ )으로 구성된다. Fig.37과 같은 용접 토우부에서의 응력분포는 용접 토우부 끝단에서 최대이며, 두께방향으로 단순 감소하는 분포를 보인다. Fig.36에서 용접 토우부 끝단(A-A)의 구조응력( $\sigma_s$ )은 스트레인 게이지가 부착된 단면(B-B, C-C)의 측정값을 이용하여 식(3), 식(4)을 통해서 B-B단면 및 C-C단면의 막응력과 굽힘응력을 계산하여 구할 수 있다(강성원 등, 2005).

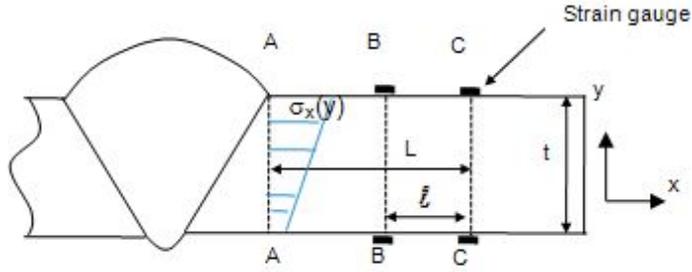


Fig.37 구조응력측정을 위한 예

$$\sigma_m^B = \frac{1}{2}(\sigma_T^B + \sigma_B^B), \sigma_m^C = \frac{1}{2}(\sigma_T^C + \sigma_B^C) \quad \text{식(3)}$$

$$\sigma_b^B = \frac{1}{2}(\sigma_T^B - \sigma_B^B), \sigma_b^C = \frac{1}{2}(\sigma_T^C - \sigma_B^C) \quad \text{식(4)}$$

여기서  $\sigma_T^B, \sigma_B^B, \sigma_T^C, \sigma_B^C$  는 각각 B-B단면, C-C단면에서의 상/하 응력측정값을 나타낸다. 각각의 단면에서 계산된 막응력 및 굽힘응력과 용접 토우부 끝단에서의 거리를 바탕으로 비례식을 적용하여 용접부 끝단(A-A)의 막응력 및 굽힘응력을 식 (5), (6)을 통해 구할 수 있다.

$$\sigma_m^A = \sigma_m^B + \frac{L}{l}(\sigma_m^C - \sigma_m^B) \quad \text{식(5)}$$

$$\sigma_b^A = \sigma_b^B + \frac{L}{l}(\sigma_b^C - \sigma_b^B) \quad \text{식(6)}$$

최종적으로, 용접토우부 끝단(A-A)에서의 구조응력( $\sigma_s$ )은 다음과 같이 막응력( $\sigma_m$ ) 및 굽힘응력( $\sigma_b$ )의 합으로 추정할 수 있다.

$$\sigma_s^A = \sigma_m^A + \sigma_b^A \quad \text{식(7)}$$

Table 13 는 측정 스트레인으로부터 식(3)~식(7)을 이용하여 구한 구조응력을 보여주고 있다.

Table 13. 구조응력( $\sigma_s$ ) 및 응력확대계수(SCF)

시험체	위치	$\sigma_m^A$ (0.2Fy/0.5Fy)	$\sigma_b^A$ (0.2Fy/0.5Fy)	$\sigma_s^A$ (0.2Fy/0.5Fy)	SCF (0.2Fy)	SCF (0.5Fy)
2-1-(1)	L	147.867 /333.396	74.3967 /80.4678	222.264 /413.864	1.903	1.417
	R	141.4875 /320.019	125.8467 /128.625	267.3342 /448.644	2.289	1.536
2-1-(2)	L	157.437 /338.438	79.6446 /86.3331	237.0816 /424.7712	2.030	1.455
	R	138.6063 /326.0901	133.2555 /124.8177	271.8618 /450.9078	2.328	1.544
3-2-(1)	L	38.4846 /297.381	93.639 /25.5192	132.1236 /322.900	1.131	1.106
	R	192.7317 /421.5813	-80.9823 /-138.606	111.7494 /282.975	0.957	0.969
3-2-(2)	L	34.8831 /290.075	92.7129 /23.976	127.596 /314.0508	1.092	1.076
	R	53.6109 /286.1649	56.9037 /1.3377	110.5146 /287.5026	0.946	0.985
5-1-(1)	L	103.517 /294.809	22.638 /31.5903	126.1554 /326.3988	1.080	1.118
	R	105.987 /297.4839	-1.2348 /-23.9757	104.7522 /273.5082	0.897	0.937
5-1-(2)	L	108.457 /291.824	22.8438 /34.7802	131.3004 /326.6046	1.124	1.119
	R	125.7438 /303.2463	-12.5538 /-21.095	113.19 /282.1518	0.970	0.966

## 5.2.2 간이계산법에 의한 응력집중계수 도출

용접이음부의 피로균열 발생점인 용접 토우부의 형상에 따라 응력집중계수가 변화하기 때문에 토우부의 형상을 관찰하기 위해서 표면과 뒷면에 치과용 실리콘고무(Putty)를 이용하여 토우부를 포함한 비드 전체의 형상을 인상하였다. 인상된 putty를 비드길이 방향으로 5mm 간격으로 절단하여 20배 확대 투시경에서 비드의 형상을 확대한 후 Fig.38의 비드 폭(bead width(L, mm)), 비드높이(bead hight(h, mm)) 및 곡률 반경(toe

radius( $\rho$ , mm)과 프랭크 각(flank angle( $\theta$ , °)을 측정하였다. Fig.39는 시편 2-1-1의 윗면과 아랫면의 용접부 비드형상과 측정값을 보여주고 있다. 비드형상의 측정은 총 9개의 시험편 중 6개를 측정하였다. 측정된 비드형상으로부터 응력집중계수 값( $K_t$ )을 구하기 위해 식(8)을 사용하였다(S. Yoshida 등, 1978).

$$K_t = 1 + f(\theta)(\alpha_1 - 1) \quad \text{식(8)}$$

여기서,

$$\alpha_1 = 1 + c \left[ \left( \frac{1}{2.8\Delta_1 - 2} \right) \cdot \frac{h}{\rho} \right]^\beta$$

$$f(\theta) = \frac{1 - \exp[-0.90\sqrt{\Delta_2}(\pi - \theta)]}{1 - \exp(-0.45\pi\sqrt{\Delta_2})}$$

$$\beta = 0.65 - 0.1\exp\left(\frac{-0.63 \cdot l}{t}\right)$$

$$c = 1 - 0.48\exp\left(\frac{-0.74 \cdot l}{t}\right)$$

$$\Delta_1 = (2h + t)/t$$

$$\Delta_2 = \Delta_1/2$$

$t$ : thickness

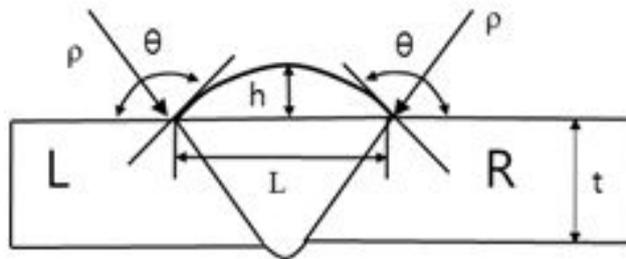
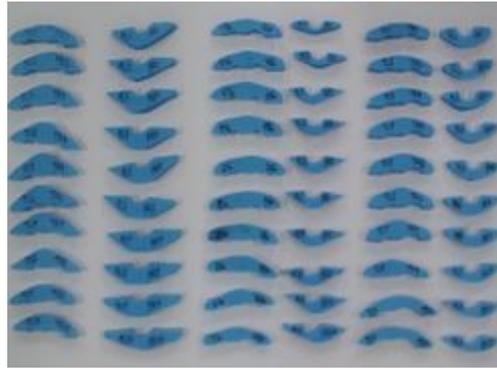
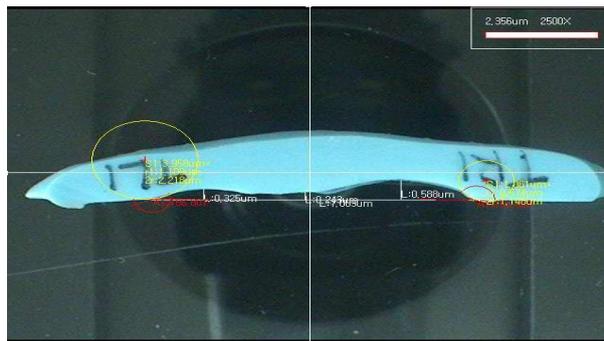


Fig.38 비드형상 측정 위치



(a) 비드형상 측정 예



(b) 비드형상 측정 예(2-1-1 앞면)



(c) 비드형상 측정 예(2-1-1 뒷면)

Fig.39 비드형상 측정

Table 14. 응력집중부의 곡률반경 및 응력집중계수값(Kt)

시험체	곡률반경 및 Kt	TL	TR	BL	BR
2-1-(1)	$\rho$ (mm)	2.90	2.90	1.65	1.84
	Kt	1.209	1.198	1.460	1.462
2-1-(2)	$\rho$ (mm)	2.11	2.63	1.91	1.71
	계산값	1.357	1.270	1.521	1.557
3-2-(1)	$\rho$ (mm)	2.76	2.50	2.50	1.84
	계산값	1.334	1.338	1.473	1.539
3-2-(2)	$\rho$ (mm)	2.57	1.97	2.24	1.71
	계산값	1.476	1.591	1.488	1.630
5-1-(1)	$\rho$ (mm)	3.62	3.22	2.43	2.37
	계산값	1.410	1.440	1.353	1.445
5-1-(2)	$\rho$ (mm)	2.17	1.97	2.50	2.83
	계산값	1.324	1.425	1.422	1.379

또한 Table 14에서는 응력집중부의 곡률반경과 응력집중계수값(Kt)의 결과를 나타내며 곡률반경이 작을수록 응력집중계수값(Kt)이 크게 나오는 것을 보여주고 있다.

### 5.3 고찰

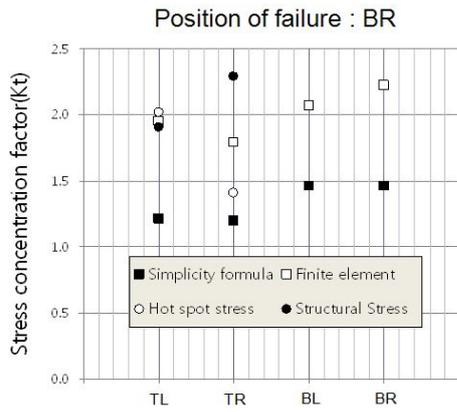
스트레인 게이지를 이용해 계산된 hot-spot stresses을 Symbols ●로 Fig.40에서 보여주고 있다. 결과에 의하면 hot-spot stress와 Structural stress는 전체적으로 응력집중계수는 작고, 시험편 2-1-1의 TR(Top Right)을 제외하고 매우 유사한 값을 보여주고 있다. 그러나 스트레인게이지를 이용한 측정 방법은 5.3.1절의 Fig.37을 보면 알 수 있는 것과 같이 시험편의 중앙부의 값만 측정되고, Fig.41과 같이 FSP피로시험편은 용접 토우가 완만한 곡률을 가지고 있어 응력이 감소되어 hot-spot stress와 structural stress에 의해서는 정확한 토우부의 응력을 예측할 수 없는 문제점이 있다.

따라서 보다 정확한 응력집중계수값을 계산하기 위해서는 유한요소해석과 간이식을 이용한 피로균열이 발생하는 부위의 응력집중계수를 계산하여 고찰할 필요가 있다.

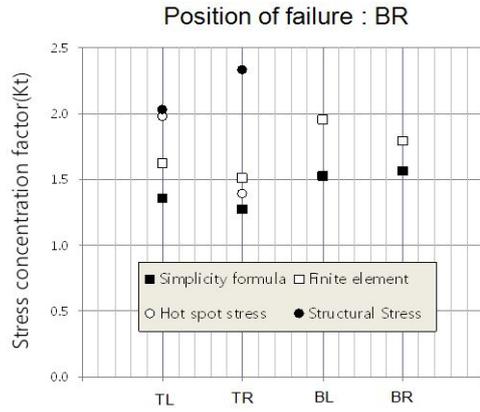
FSP시험체의 응력집중계수를 비드형상에 의한 간이식과 유한요소해석에 의해 계산하고 비교하였다. 6개의 시험편의 비드형상으로부터 응력집중계수를 계산하여 Fig.40에 Symbols ■로 보여주고 있다. 계산한 응력집중계수 값은 약간의 차이는 있지만 전체적으로 약 1.5정도 발생하였다. 또한 피로실험시험체의 피로균열의 시작점의 응력집중계수 값이 전체적으로 크게 발생하였다. 유한요소해석에 의한 응력집중계수를 구하기 위해 간이계산에서와 같이 비드형상을 인상한 putty 로부터 비드형상을 측정하여 사용하였다. 그리고 피로시험체로부터 피로균열이 시작하는 부분의 putty형상으로부터 비드형상의 치수를 측정하여 모델링하였다.

해석은 간이식을 이용한 시험체와 같이 총 6개의 시험체에 대해 실시하였고, 해석조건은 3.2.2절과 같다. 유한요소해석을 실시하여 계산된 응력집중계수를 Fig.40에 Symbols □로 표시하였다. 결과에 의하면 표면의 응력집중계수는 1.509~2.239이고, 뒷면의 응력집중계수는 1.789~2.35 사이의 값이 나타났다. 실험에 의해 피로균열의 시작점의 응력집중계수 값이 전체적으로 크게 나타났다. 간이해석과 유한요소해석에 의한 응력집중계수 값은 전체적인 경향은 비슷하나 유한요소해석의 값이 전체적으로 약 30%정도 더 크게 발생하였다.

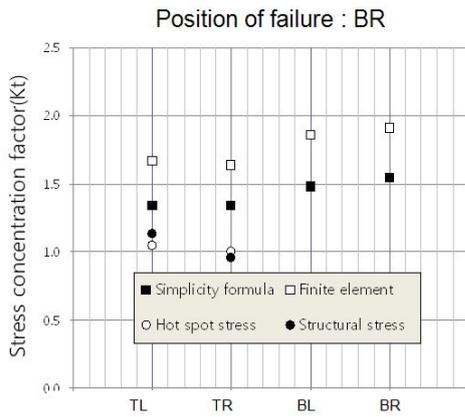
이러한 해석결과로부터 FSP와 같은 토우부의 응력집중계수는 유한요소해석에 의해 계산하는 것이 타당하다고 판단된다.



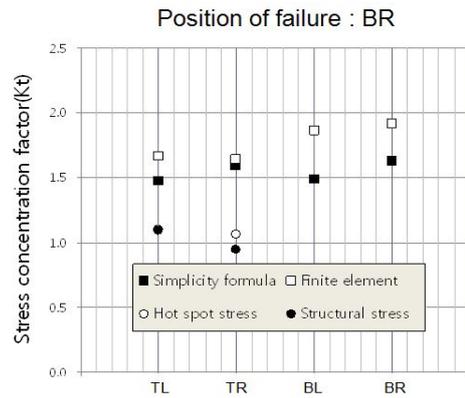
(a) 2-1-1



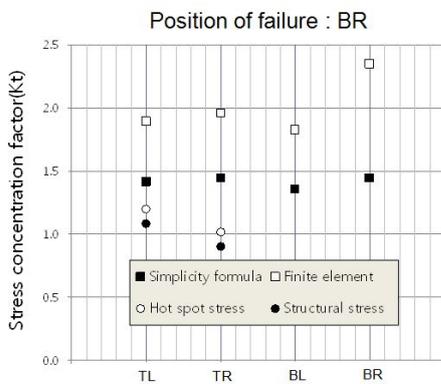
(a) 2-1-2



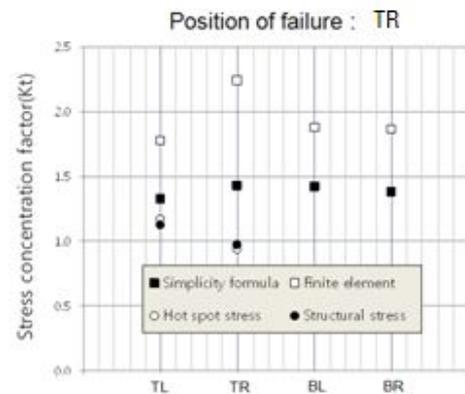
(a) 3-2-1



(b) 3-2-2

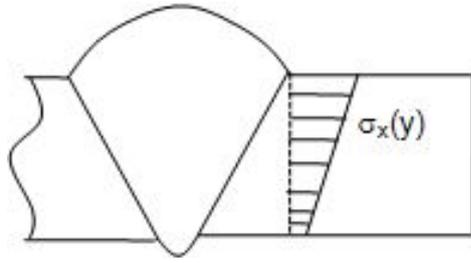


(a) 5-1-1

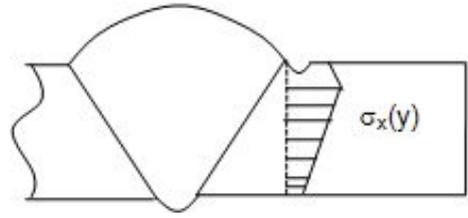


(b) 5-1-2

Fig.40 응력집중 요소들의 비교



(a) As-welded



(b) FSP

Fig.41 토우부의 응력분포

## 제6장 결 론

본 연구에서는 맞대기 용접부의 피로강도를 향상시키는 새로운 피로강도향상법에 대해 피로실험을 실시하였다. 또한 그 피로시험편에 대한 응력집중계수 값을 구하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 기존의 피로강도향상법을 보완한 새로운 피로강도향상법인 FSP(마찰표면개질, Friction stir processing)방법에 대해 피로강도를 평가 하였다.

2) 마찰교반용접(FSW)을 응용한 피로강도향상을 위한 최적의 마찰교반용접기의 tool 형상과 이동속도, tool회전속도를 변화시켜 가공조건 및 tool형상을 도출하였다.

3) 맞대기용접부에 대해 마찰교반개질법(FSP)를 적용한 피로실험결과에 의하면 설계하중(250MPa)을 기준으로 할 때 as-welded 시험편에 비하여 FSP처리된 용접부의 피로시험편의 피로수명이 약 50% 정도 향상 되었다.

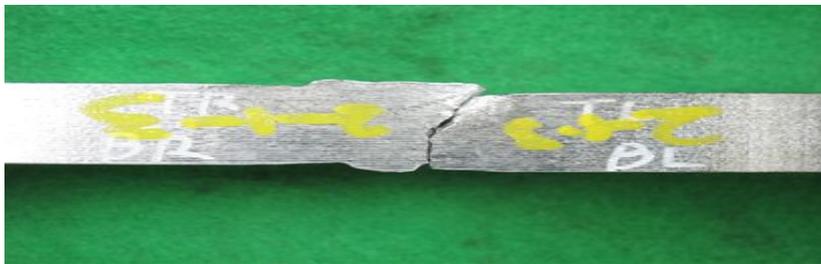
4) Hot-spot stress 와 Structural stress법에 의한 응력집중계수 계산은 스트레인 게이지를 이용해 시험편 중앙부의 측정값을 외삽법에 의해 계산하고 또한, 간이식은 비드 형상 정보만을 이용하여 응력집중계수를 계산한다. 그러나 FSP시험편은 용접 토우가 완만한 곡률을 가지고 있어 응력이 감소되기 때문에 정확한 토우부의 응력집중값을 예측할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 그러나 유한요소해석은 구조물의 전체형상으로부터 응력집중계수값을 계산하기 때문에 정확한 응력집중계수 값을 계산 할 수 있었다. 또한 그 응력집중계수 값은 실험에 의해 균열발생위치에서 크게 발생하고 있어 적절한 피로강도를 평가하고 있다고 평가된다.

## 부 록

본 연구에서는 총 9개의 시험편을 피로시험하였다. 본문에서는 2개의 시험편을 보여 주었으며 부록에서 나머지 7개의 시험편을 보여주고 있다.



(a) 윗 면



(b) 측 면



(c) 피로 파단면

2-1-3 시험편



(a) 윗 면



(b) 측 면



(c) 피로 파단면

3-2-1 시험편



(a) 윗 면



(b) 측 면



(c) 피로 파단면

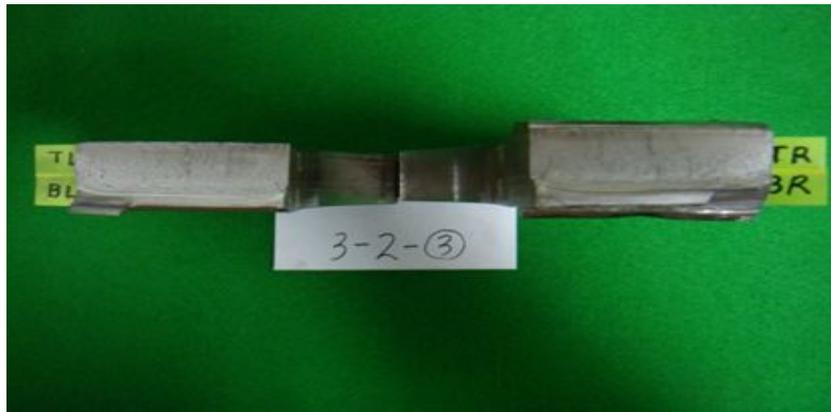
3-2-2 시험편



(a) 윗 면



(b) 측 면



(c) 피로 파단면

3-2-3 시험편



(a) 윗 면



(b) 측 면



(c) 피로 파단면

5-1-1 시험편



(a) 윗 면



(b) 측 면



(c) 피로 파단면

5-1-2 시험편



(a) 윗 면



(b) 측 면



(c) 피로 파단면

5-1-3 시험편

## 참 고 문 헌

- 1)경갑수, 김학수, 채원규,“강교의 피로”,도서출판 건설도서,1998.
- 2)김석훈, “필렛용접부의 피로수명평가를 위한 구조응력 기법의 실험적 검증”,부산대학교 조선해양공학과 공학석사 학위논문, 2005
- 3)김성훈, 배두병, 최준혁, “고강도강 하중비전달형 +자용접연결부의 피로강도”, 한국강구조학회논문집,한국강구조학회, 제14권, 제3호, pp.453-461, 2002
- 4)김면형, 강민수, 강성원,“함정용 배전반 용접부의 용접후처리 방법에 의한 피로강도 증대효과에 관한 연구”, 대한용접·접합학회지 제26권 제4호, 2008
- 5)김 용, 이보영, “용접 구조물의 피로수명 향상 기법(Ⅱ) 용접후처리방법”,기술강좌, 대한용접·접합학회지 제3권 제2호, 2012
- 6)김환태, “최신기술:21세기의 용접기술-마찰교반용접(Friction Stir Welding)”, Vol.355 No104~110, 2007.
- 7)김홍주, “포스코 강제 FSW 성능평가 및 실용화 기술 개발”, RIST 포항산업과학연구원 신금속연구본부, 2011
- 8)박성완, “Ultrasonic Impact Treatment(UIT) 기법을 적용한 용접 구조물의 피로 수명 개선에 관한 연구”, 부산대학교 기계공학과 공학석사 학위논문, 2008.
- 9)이승용, 경갑수,“용접 후처리에 의한 필렛용접부의 피로강도 향상에 관한 연구”, 대한조선학회논문집,제28권 제5호, pp.665-672, 2008.
- 10)임청권, 박문호, 장준호, “필렛용접부의 후처리에 따른 피로강도 향상 메커니즘의 연구”, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제11권, 제3호,pp.319-327, 1999
- 11)장동일, 김대영, “강부재의 필렛용접 및 횡방향 홈용접 연결부의 피로강도 및 지단부형상의 영향”, 한국강구조학회논문집,한국강구조학회, 제7권, 제2호, pp.205-213, 1995
- 12)장용원,“용접부 그라인딩에 의한 피로강도 증대효과의 구조응력 기법적 고찰”,부산대학교대학원 조선해양공학과 공학석사 학위논문, 2005
- 13)정영화, 경갑수, 홍성욱, 김익겸, 남왕현, “TIG처리에 따른 하중비전달형 필렛용접부의 피로특성”, 한국강구조학회논문집,한국강구조학회, 제12권,제5호, pp617-628, 2000

- 14)최광윤, “피로수명 향상을 위한 토우 그라인딩(Toe Grinding)의 적합형상 연구, 울산대학교 자동차선박기술대학원 생산기술 공학석사학위논문, 2013
- 15)홍성욱, 경갑수, 최동호, 용환선, “용접지단부의 후처리에 따른 하중 비전달형 필렛 용접부의 피로특성”, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제12권, 제6호, pp.701-713, 2000
- 16)Iriki-Junkichi, Machida SeuMui, Domita Yasumichu, Matoba-Masaaki, Yukiya Isao, “용접부 피로강도에 관한 두께에 대한 평가”, 일본조선학회논문교제집, 제169호, pp. 301-309.,1991
- 17)Iwasaki Masanori, Natoli Tooroo, Hukasawa Makoto, Delada Hiromasa, “강교의 피로손상 사례와 보수 보강대책. 횡천 교량 기술 정보”, No. 18, pp. 1-17, 1989
- 18)K.J. Kirkhope et. al, “Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review. Marine Structure 12, 1999, 447-474
- 19)K.J. Kirkhope et. al, “Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 2: review. Marine Structure 12, 1999, 447-496
- 20)Maski-Isao, Tanaka Gazuo, Iwata Hidenobu, Hasegawa Yoshi, “연강 용접부의 험머 피닝이 피로 강도 향상에 미치는 영향”, 일본용접학회논문교제집, 제51회, 제7호,
- 21)Maxddox, S.J, “Fatigue Strength of Welded Structures. 2nded.,abington, 1991
- 22)Ono Syoichi, Shizuka Osamu, Kumakura Yasusi, “용접지단부의 형상이 피로강도에 미치는 영향(제1부)-비드 지단의 응력집중과 피로 파괴”, 일본조선학회논문교제집, 제170호, pp. 693-703, 1991
- 23)Ota Shojiro, Asahi Ooyake, Otani Makoto, “단처리에 의한 하중 비전달 십자형 필렛용접부 파괴”, 일본용접학회논문교제집, 제9회, 제2호, pp.228-294, 1991
- 24)Ota Shojiro, Asahi Ooyake, Otani Makoto, “필렛용접 지단부의 TIG용접에 의한 피로강도의 향상”, 일본용접학회논문교제집, 제8회, 제2호, pp. 255-261, 1990
- 25)Ono Syoichi, Shizuka Osamu, Kumakura Yasusi, “용접지단부의 형상이 피로강도에 미치는 영향(제2부)-언더컷의 허용기준”, 일본조선학회논문교제집, 제171호, pp.385-393, 1992
- 26)Seto Atsusi, Yukii Isao, Tanaka Yoichi, “다양한 용접부를 개선한 피로손상의 피로강도 향상과 두께 효과의 검토”, 일본조선학회논문교제집, 제172호, pp.617-625, 1993

27)S. Yoshida, M. Inagaki, M. Kanao, E. Sasaki, M. Nihei, M. Kamakura,"Effect of size and Frequency on Fatigue Properties of SM50B Butt Welded Joint, 용접학회지, Vol.47, No9, pp.627-632, 1978

## 감사의 글

본 논문을 마치면서 많은 분들의 도움과 깊은 관심에 감사의 마음을 전하고자 합니다. 먼저 논문을 쓰면서 많은 도움과 격려를 해주시고 좋은 논문이 될 수 있게 해주신 박정웅 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 정말 석사과정동안에 부족한 저를 채찍으로 지도해주시고 격려도 많이 해주신 이 가르침을 잊지 않으며 사회생활에 큰 밑거름으로 사용되도록 하겠습니다. 그리고 논문 총 책임자를 해주시고 보다 깊은 심사를 해주신 박길현 교수님과 좋은 논문이 될 수 있도록 조언과 격려를 해주신 김대현 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 대학원 과정에서 공부를 할 수 있도록 가르침을 주신 김운중 교수님, 김성홍 교수님, 이원희 교수님, 박상준 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 항상 따뜻한 격려와 응원을 해주신 양승현 교수님 그리고 학부 때부터 학문을 잘 가르쳐 주신 김영균 교수님, 김선학 교수님, 황선하 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고 대학원생활을 같이 재미있게 하고 많이 도와주며 힘든 시기에 학교에서 가장 많이 옆에 있어 주었던 승민이형, 신대운, 장문석, 이동훈에게 고마움을 전합니다. 대학교4년을 함께 하고 대학원을 진학해서 성공해보자고 한 내 동기 김경면, 이인호에게도 정말 큰 힘이 되었음을 전하고 석사과정동안 선배로서 많이 도움을 주었던 경호형, 정원이형, 정환이형에게 깊은 감사를 드립니다. 논문과정을 하며 서로 격려를 해준 신규형, 전상주 그리고 많은 관심과 응원을 해준 이의준, 이태광, 차지승, 이경수, 임병주, 나재선, 홍욱이 후배들에게 고맙다라는 말을 하고 싶습니다.

영어와 일본어 때문에 힘들었는데 많이 도움을 주었던 내가 많이 사랑하는 인영이에게 고맙고 항상 내 편이 되주고 응원해줘서 고맙웠다. 그리고 인영이 친구 해진이 그리고 옆에서 같이 응원해준 수지, 민주, 서영이 너희에게 정말 고맙다. 항상 과거 그리고 현재에 나를 제일 잘 알며 큰 버팀목이 되준 가장 강한 팀 SF에게 항상 고맙다. 주장 조호근 그리고 이완규, 전지상, 박지선, 박종현, 김성운, 박종민, 박태석, 김라이, 정민수, 이영수 너희가 만약 옆에 없었다면 석사생활을 하면서 정말 힘들고 버티기 힘들었을 거라고 생각을 한다. 우리팀 SF에게 항상 파이팅이라고 말하고 싶고 모두 힘내자 라고 말을 전한다.

끝으로 어려운 생활에서도 건강과 잘되었으면 하는 진실 된 사랑으로 보살펴준 존경하는 부모님께 진심으로 깊은 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 부모님께서 바라는 평

범하고 행복한 사람으로 살아가겠습니다. 이 도움을 주신 모든 분들에게 다시 한 번 감사함을 잊지 않으며 겸손한 마음으로 상대방을 먼저 배려하는 사람으로 살아가겠습니다.