

## 용접 구조물의 피로수명 향상 기법 (Ⅱ) - 용접후처리방법 -

김 용<sup>\*,†</sup> · 이 보 영<sup>\*\*</sup>

\*고등기술연구원 로봇생산기술센터

\*\*한국항공대학교 항공우주기계공학부

### Methods for Fatigue Strength Improvement of the Weld Structure (Ⅱ) - Post Weld Improvement Methods -

Yong Kim<sup>\*,†</sup> and Bo-Young Lee<sup>\*\*</sup>

\*Institute for Advanced Engineering

\*\*Korea Aerospace University

†Corresponding author : welding@iae.re.kr

#### 1. 서 론

일반적으로 용접 구조물의 피로강도는 용접부와 같은 기하학적 불연속부에 있어서의 응력집중에 의해 결정된다. 이때 응력집중은 구조적 형상에 의한 전체적인 요인 및 용접부 비드 등의 국부적인 요인의 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 기계 및 구조물의 80% 이상이 피로에 의해서 여러 가지 형태의 원인으로 파손되고 있다고 알려져 있다.

좀 더 구체적으로 구분하면, 용접부의 피로 수명을 저하시키는 원인으로는 앞서 설명한 바와 같이 구조적 불연속 및 용접변형에 의한 부정합(misalignment), 국부적 응력 집중의 영향, 언더컷, 블로우 홀, 개재물 등에 의한 용접결함 그리고 용접 인장 잔류응력의 영향 등 크게 네 가지로 구분될 수 있다. 피로파괴는 때때로 매우 위험한 결과를 초래하기 때문에 이를 방지하고 높은 수명시간을 확보하기 위해서는 설계-시공-후처리 각각의 단계에서 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다.

첫째로 용접연결부의 설계 단계에서는 진동 및 공명(resonance)이 발생하는 위치를 되도록 피하여 피로하중이 최소화될 수 있게 이뤄져야 하며, 부식 환경의 노출 최소화 및 응력집중계수를 낮게 설계하여야 한다. 둘째로 시공단계에서는 모재와 용가재, 용접공정의 올바른 선택, 시공 전 그루브 형상 및 표면 준비 등의 철저한 준수 및 작업자의 숙련도 검증 등의 사항이 요구

된다. 마지막으로 시공이 끝나면 적절한 후처리(post weld improvement)를 거쳐 최종적으로 피로강도를 향상시킬 수 있는데, 본회에서는 앞서 기고한 용접 연결부의 설계 방안에 이어 그 두 번째로 용접후처리 단계에서 실시할 수 있는 용접부 피로수명 연장기법에 대해 IIW Recommendation<sup>1)</sup>을 바탕으로 기술하고자 한다.

#### 2. 용접후처리기술의 분류

오래전부터 구조물의 안전성을 확보하고 피로수명을 최대화하기 위한 많은 연구자들의 노력에 의해 Fig. 1 과 같이 다양한 용접후처리기술이 개발되었으며, 이는 크게 용접비드 선단의 기하학적 형상을 개선하는 방법과 압축잔류응력을 유도하는 방법으로 구분될 수 있다<sup>1)</sup>. 이중 형상 개선방법으로는 그라인딩, 채용용 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 채용용기법의 경우 또한 큰 개선효과를 기대할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 정형화 된 형상을 반복적으로 개선하여야

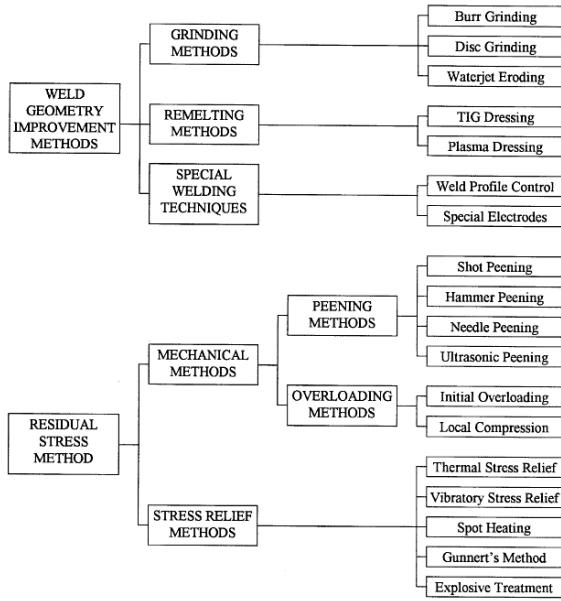


Fig. 1 다양한 용접후처리기술의 분류

하는 경우 용접공정과 같이 복합적인 자동화가 가능하지만, 수동으로 작업 시에는 일정 수준 이상의 기량이 요구되는 단점이 있다.

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 제거되지 않고 남아 있는 경우가 발생할 수 있다.

두 번째 방법으로서 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 수반된 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.

### 3. 피로강도 향상기법

#### 3.1 토우그라인딩(toe grinding)

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 피하는 데 있다. Fig. 2는 토우그라인딩 방법으로서 버 그라인딩과 디스크 그라인딩 공정을 설명하였으며, 가공 후 용접 형상 변화에 대해 나타내었다. IIW에서는 그라인딩 깊이를 최소 0.5mm 이상으로 할 것을 추천하고 있으며, 최대 2mm 또는 모재 두께의 7% 이하로 가공할 것을 제안하고 있다. 한편 Fig. 3은 강재의 종류 및 그라인딩 공정 적용에 따른 피로수명의 향상 정도를 나타내는 것으로,  $N > 10^6$ 의 고피로 수명영역에서 피로 향상에 특히 유리한 것으로 나타났으며,  $2 \times 10^6$  사이클에서는 소재 및 적용 공정에 따라 최소 50에서 200%까지 피로수명이 향상되었다. 그러나 버 그라인딩의 경우 상대적으로 많은 시간이 소모될 뿐 아니라 소음 및 분진이 심하며 디스크 그라인딩의 경우 기량에 따라 효과 정도 편차가 심하다. 게다가 표면에 발생한 스크래치에 의해 또 다른 노치결함을 유발하기도 한다.

#### 3.2 TIG 드레싱

TIG 드레싱은 아크 열원을 사용하여 용접 토우부를

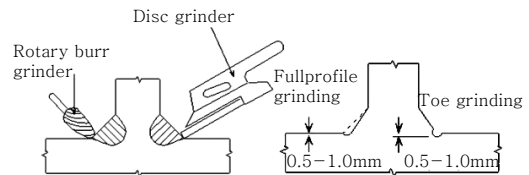


Fig. 2 토우그라인딩 방법 및 개선 형상

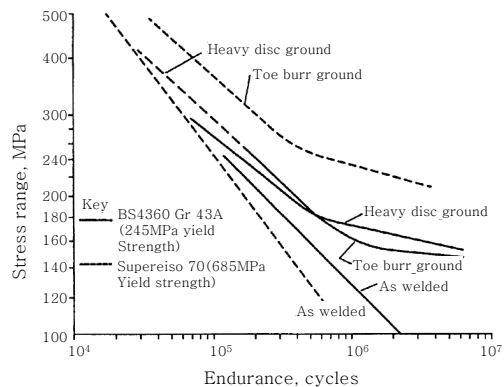


Fig. 3 그라인딩 적용에 따른 피로수명 향상

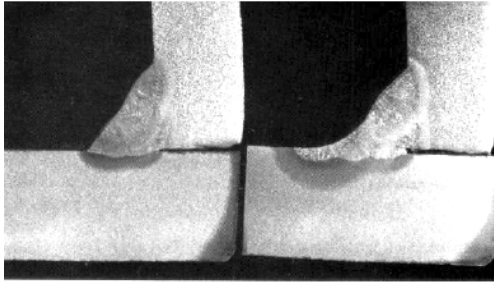


Fig. 4 TIG 드레싱 전후 필렛 용접부 단면비교

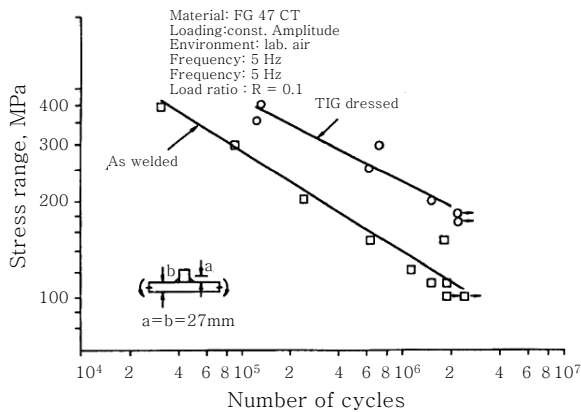


Fig. 5 TIG 드레싱 적용 유무에 따른 피로수명 비교

재용융시키는 공정으로서 토우그라인딩과 마찬가지로 선단의 결함을 제거함과 동시에 비드 선단과 모재사이 이음부를 매끄럽게 하는데 그 목적이 있다. 또한 TIG 드레싱은 용가재의 공급 없이 제살용접으로 진행하며, C-Mn강과 같이 고탄소 함량을 가진 소재의 경우 재용융으로 인한 템퍼링 및 열영향부 경도 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. 4는 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. 5는 TIG 드레싱 적용에 따른 수명 향상 정도를 비교한 것으로 2×10<sup>6</sup>사이클에서 약 50%정도의 상승효과가 나타났으며 전 주기영역에서 보다 우수한 결과를 확인할 수 있다.

### 3.3 해머피닝

압축잔류응력의 대표적인 유도방법인 해머피닝은 인

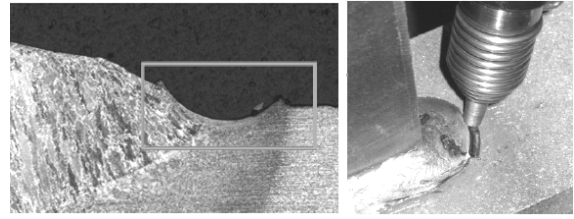


Fig. 6 피닝 공정과 용접 토우부 개선 단면 형상

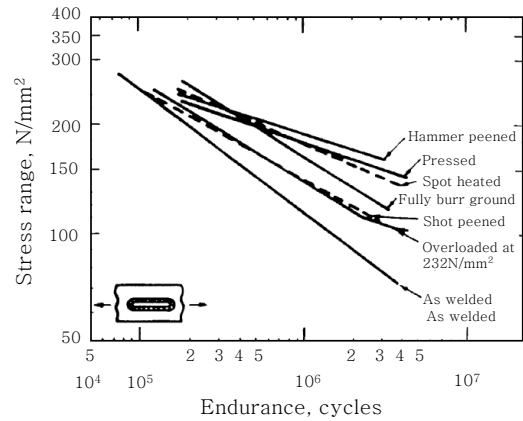


Fig. 7 용접후처리 방식에 따른 피로수명 향상 비교

장 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. 6은 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 향상효과가 발생한다고 알려져 있으며, Fig. 7과 같이 여러 용접후처리 방식과 비교하여 고주기피로 영역으로 갈수록 피로 향상효과가 가장 탁월하게 나타난다.

## 4. 제 언

이상과 같이 본 기고에서는 2회에 걸쳐 용접부 피로수명 향상기법에 대해 용접부 설계 및 용접후처리기술 단계에서의 요구사항 및 향상기법에 대해 기술하였다. 용접 구조물의 궁극적인 안전성 확보를 위해서는 단순히 피로역학적 측면 뿐 아니라 보다 종합적인 시각을 갖고 문제를 접근하는 것이 요구된다.

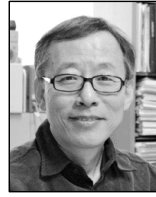
## 참 고 문 헌

1. IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminum Structure, IIW Commission XII, 2001



- 김 용
- 1979년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 용접가공
- e-mail : welding@iae.re.kr

2. K.J. Kirkhope et. al., Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review. Marine Structure 12, 1999, 447-474



- 이 보 영
- 1953년생
- 한국항공대학교 항공우주기계공학부
- 용접 및 생산공학
- e-mail : bylee@mail.hau.ac.kr