

# 용접 구조물의 피로수명 향상 기법 (I)

## - 용접 연결부의 설계 -

김 용·이보영

### Methods for Fatigue Strength Improvement of the Weld Structure (I)

#### - Design of Welded Joints -

Yong Kim and Bo-Young Lee

## 1. 서 론

최근에 기계 및 구조물의 대형화, 경량화 됨에 따라 사용조건 및 사용 환경이 가혹해지고 설계조건이 엄격해지면서 기계 구조물에서의 피로손상 사례가 많이 발견되고 있다. 이에 따라 오래전부터 많은 연구자들에 의해서 용접 구조물의 수명향상 방안이 연구되어 왔으며 그 결과 다양한 기술이 제안되었다. 또한 국제용접학회에서는 스틸과 알루미늄 용접 구조물의 피로강도 향상 방안에 대해 규정하였으며 본 기고에서는 AWS D1.1 강구조용접코드<sup>1)</sup> 및 IIW Recommendation<sup>2)</sup>에 규정된 내용을 바탕으로 2회에 걸쳐 용접부의 설계 및 수명향상기법에 대해 간략하게 설명하고자 한다. 본회에서는 첫째로 용접부의 안전설계 방안에 대해 기술하였다.

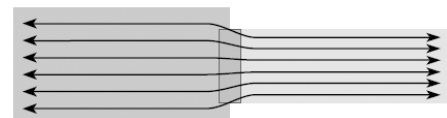
## 2. 용접 설계

용접 구조물의 피로손상에서 파손의 발생점은 일반적으로 용접 덧살이나 필렛용접의 토우부 또는 구멍이나 개구의 필릿부 등과 같이 기하학적으로 형상이 급변하는 곳이다. 발생에 기여하는 하중은 오작동 및 설계조건을 초과한 반복하중, 예기치 못했던 열응력의 반복, 부식에 의한 판 두께의 감소에 따른 응력의 증가, 설계시 고려하지 못했던 잔류응력의 중첩 등이다<sup>3)</sup>. 이러한 피로 손상을 방지하기 위해서는 설계 단계에서부터 많은 검토가 이뤄져야 한다.

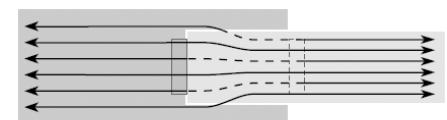
용접 설계(design in welding)란 기계 또는 구조물 기타 각종 설비를 용접을 이용하여 제작하는 경우 그 제품이 사용 목적에 적합한 기능을 충분히 발휘하고 또한 염가로 될 수 있도록 재료, 형상, 크기라든지 그 밖의 모든 것을 결정하는 것이다<sup>4)</sup>. 용접은 금속 접합법의

총아로써 그 우수성이 인정되고 있다고 해도 용접성이 나쁜 재료를 선정했다면 용접은 결국 그 성능이 나쁠 수 밖에 없으며 용접구조물은 열을 수반한 야금학적 변화를 조직 내부에 가져올 뿐 아니라 잔류응력의 존재로 인해 노치부에 취성파괴가 생길 확률이 높다. 따라서 이러한 결점을 보완하기 위하여 이음의 형상이나 용접 홈의 형상이 결정되어야 하며, 용접구조물의 특성에 따른 용접법의 채택과 열의 집중과 열변형을 감소하기 위한 최적의 용접 순서가 검토되어야 한다.

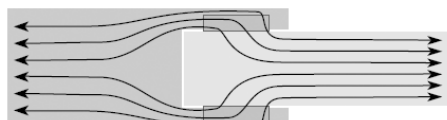
Fig. 1에는 용접설계에 있어 대표적으로 사용되는 맞대기 및 필렛용접 이음부에서의 힘의 전달에 대해 도식



(a) 맞대기용접이음



(b) 전면 필렛용접이음



(c) 측면 필렛용접이음

Fig. 1 용접이음부에서의 힘의 전달

하였다. 필렛 용접이음부 또한 맞대기이음부와 같이 보기에는 매우 단순해보이나 용접부 단면을 기준으로 보면 기하학적으로 복잡한 형상을 하고 있다. 이에 따라 용접부에서의 응력 흐름은 맞대기 이음에 비하여 복잡하며 루트부나 토우부에 커다란 응력집중이 생겨 이음강도는 맞대기 이음에 비해서 일반적으로 떨어진다.

우선 맞대기 용접 이음의 응력에 대해 살펴보면, 주기적인 응력을 받는 부위에 대해 용접 설계자는 항상 응력의 균일한 분포와 편심(eccentricity) 응력에 대하여 반드시 고려하여야 하며 이를 통해 응력집중을 최소화시켜야 한다. Fig. 2는 이를 고려한 맞대기 용접 이음부재에서의 용접설계 개선 사례를 나타낸 것으로서 급격한 두께 변화를 피하고 모따기(chamfering)나 테이퍼 형상으로 설계를 변경시켰다. 한편 AWS D1.1에서도 균열과 점진적인 피로파괴를 발생시킬 수 있을 만큼의 큰 진동수와 규모의 주기하중을 받기 쉬운 구조물의 연결부에 대해 두께 완화 경사가 1:2.5를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 토우부의 응력집중에서는 붙임 각도 $\theta$ 나 도우부의 반경 R 등이 영향을 주며 그것들의 피로강도에 미치는 영향은  $\theta$ 가 크게 될 수록 또는 R이 작게 될 수록 응력집중은 심하게 되고 피로강도의 저하는 크다는 것을 항상 고려하여야 한다(Fig. 3 및 Fig. 4 참조).

한편 필렛이음에는 Fig. 1(b) 및 (c)와 같이 용접선과 하중방향과의 관계로 부터 전면필렛이음과 측면필렛이음이 있고, 또는 하중을 전달하는 이음과 전달하지 않은 이음이 있다. 이 중 Fig. 1(b)와 같이 전면 필렛 용접이음 구조에서는 편심 하중으로 인해 Fig. 5와 같이 용접 이음부 끝단에서 모멘트가 발생하게 된다. 이의 영향을 최소화하기 위해 AWS D1.1에서는 이음부의 처짐을 충분히 구속시켜야 하는 것을 제외하고는

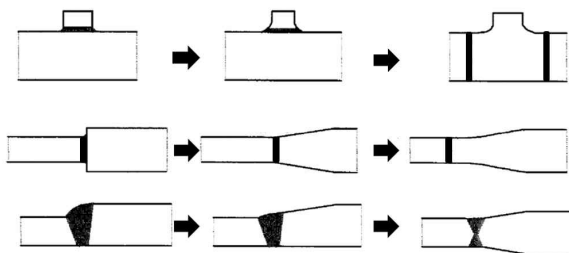


Fig. 2 이종두께 맞대기 이음부의 응력집중 완화방법

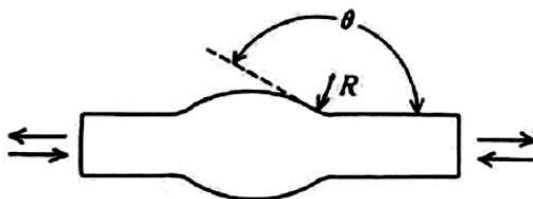


Fig. 3 맞대기 이음부의 단면변화와 피로강도의 관계

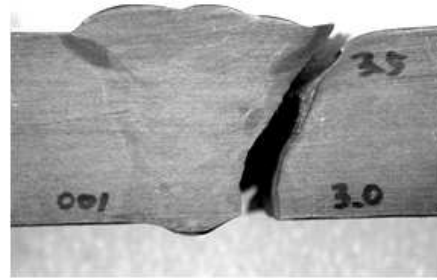


Fig. 4 맞대기 이음부의 국부 응력집중에 의한 파괴

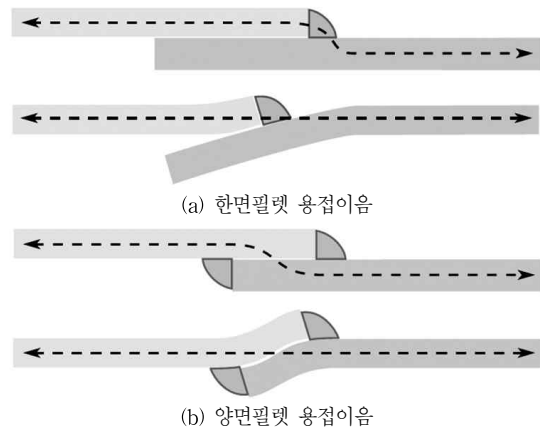


Fig. 5 전면 필렛용접 이음에서의 편심작용

Fig. 5(b)와 같이 양면필렛으로 용접하도록 규정하고 있으며 최소 겹침 길이는 둘 중 얇은 부재두께의 5배, 최소 25mm 이상이어야 한다고 명시하였다.

또한 필렛의 사이즈에 따라서도 피로수명이 달라지는데, 필렛의 사이즈가 작은 경우에는 루트부로부터 파괴가 발생하고, 사이즈 크게 될수록 루트부의 집중응력은 작게 되기 때문에 동일 응력에 관해서 수명이 점점 길게 된다. 더욱이 사이즈가 크게 되면 필렛 토우부의 응력 집중이 크게 되고 파괴발생지점이 루트부로부터 토우부로 이동한다. 이와 같은 조건하에서는 필렛의 사이즈가 크게 되더라도 이제는 피로수명은 길게 되지 않고 설계상의 이득은 없다. 충분한 필렛용접 사이즈를 확보하여 필렛용접의 토우부에서 파괴가 일어나는 경우에는 맞대기이음의 설계방안과 같이, 필렛의 각도를 서서히 하고 토우반경을 크게 하면 피로강도는 개선될 수 있다.

마지막으로 Fig. 1(c)와 같이 측면 필렛용접 이음부의 경우 용접 길이를 어느 정도 길게 하면 피로강도는 쉽게 개선될 수 있다. AWS D1.1에서는 측면 필렛용접부의 최소 용접 길이를 규정하였는데 이는 Fig. 6과 같이 용접부의 길이(L)가 최소한 연결되는 강재의 폭(D) 이상이어야 하며 그 수직거리는 200mm를 초과하여서는 안되며 또한 두 부재의 두께 차이는 16배를 초

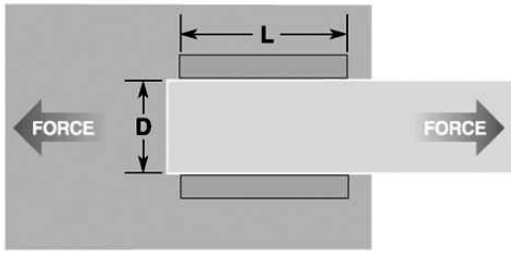


Fig. 6 측면 필렛용접이음부의 설계 규정

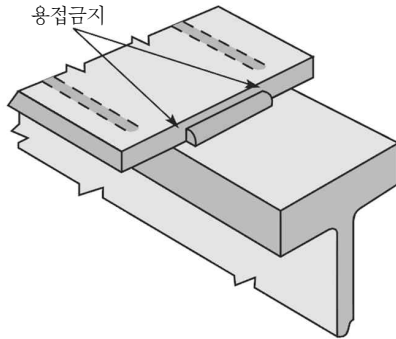


Fig. 7 공통접촉평면 반대면상의 필렛용접부 설계규정

과할 수 없다.

또한 Fig. 7과 같이 단부연결부의 겹치기 이음부에서 주기적인 하중에 따른 좌굴 또는 파손을 방지하기 위해 측면 및 전면 용접부를 동시에 사용하는 경우 공통평면의 반대면에 형성시킨 필렛용접부는 양 용접부에 공통으로 접촉하고 있는 모서리에서 용접을 중단시켜야 한다. 그 이유는 모서리 위치에서의 연속적인 비드형상을 만들기 어려우며 또한 그 위치에서의 언더컷 결함이 발생할 확률이 매우 높기 때문이다<sup>4)</sup>.

이와 같이 용접 구조물의 설계를 하게 되면 AWS 설계 코드를 참조하여 강도계산을 행하지 않고 미리 정해진 규정에 따라 치수를 결정하거나 또는 식 (1)을 사용, 선형 용접부의 허용응력을 계산하여 필렛용접부의 치수를 결정할 수 있다.

$$F_v = 0.30F_{EXX}(1.0 + 0.50\text{Sin}^{1.5}\theta) \quad (1)$$

여기서,  $F_v$ 는 허용응력을 나타내며,  $F_{EXX}$ 는 용접부의 등급번호(최소규정강도)를 나타낸다. 마지막으로  $\theta$ 는 용접부와 하중 간 각도를 나타내며 Fig. 6의 경우  $\theta$ 는 0이 된다(전면 필렛용접이음의 경우 90°). 이에 따라 최종적으로 Fig. 6과 같이 양 측면 필렛용접부의 경우 필요한 최소 필렛치수(leg length)  $S$ 는 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$F = F_v(A) = F_v(2\text{welds})(L)(0.707)(S) \quad (2)$$

### 3. 제 언

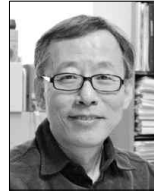
이상과 같이 용접부 피로수명 향상을 위해서는 설계 단계에서부터 용접에 관한 정확한 지식과 충분한 경험이 있어야 한다. 아무리 좋은 재료와 숙련된 기술자가 동원된다고 해도 용접 설계가 잘못된 경우에는 용접시 공이 어려워지며 작업 공정수가 늘어나서 필요 이상의 경비가 초과 지출됨은 물론 용접부의 기계적 성질이 나빠지게 되기 때문이다.

### 참 고 문 헌

1. ANSI/AWS D1.1-94 Structural Welding Code-Steel, AWS, 1998
2. IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminum Structure, IIW Commission XII, 2001
3. 대한용접학회편 : 용접·접합편람(1st Edition), 대한용접학회, 1998, 410-421 (in Korean)
4. Duane K. Miller, Designing Welded Lap Joints, Welding Innovation 18-3, 2011



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



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