



김 판 영 | 현대중공업 건설장비연구소 수석연구원 | e-mail : projjang@hhi.co.kr

피로는 하중이 반복됨에 따라 균열이 발생하고 진전하여 마침내 파단에 이르게 되는 현상으로 강 구조물 고장의 원인 중 70% 이상을 차지하고 있다. 이 글에서는 기본적인 피로수명 평가방법에 대하여 살펴보고 이를 바탕으로 용접구조물의 피로안전도를 평가하는 기술에 대하여 정리하여 보았다.

성능적인 이상이나 누유와 같은 고장과 달리 항복, 좌굴, 파단과 같은 구조적인 고장은 일순간에 기계의 작동을 멈추게 하는 치명적인 고장이다. 여기서 파단의 경우 일반적으로 일정량 이상의 점진적인 균열진전에 이어 갑작스럽게 발생하는 경향이 있다. 일을 힘과 거리의 곱이라는 현대적인 개념으로 정의한 프랑스의 수학자이자 기계공학자인 폰슬레는 1839년 이러한 점진적인 균열진전 현상을 피로(fatigue)라고 명명하였고 이것이 피로연구의 시작이 되었다. 그 뒤 1870년에 독일의 빌러는 작용하는 하중의 변화량에 지수적으로 비례하는 손상량이 차츰 누적된다는 피로손상 모델을 제시하였는데 이는 모든 피로평가의 기초가 되었다.

기계 구조물도 사람과 같이 반복되는 하중변화에 의해 손상이 누적된다는 사실은 일견 흥미롭기도 하지만 일정 수명 이상을 보장해야 하는 용접 구조물 설계자에게는 피로는 풀어야만 하는 숙제이다. 용접구조 피로에 대한 연구의 시작은 세계대전과 깊은 관련이 있다. 이전에는 주로 리벳이음으로 제작되던 선박의 수요가 폭증함에 따라 보다 효과적인 방법이 필요하게 되었고 이를 계기로 용접기술이 선박건조에 사용되었고 2차 세계대전을 거치면서 비약적으로 발전하게 되었다. 그러나 그 당시 용접구조의 피로에 대한

인식의 부재로 피로에 의한 파단이 속출하게 되어 영국을 중심으로 용접부 피로에 관한 연구가 본격화 된 것이다. 이러한 이유로 초창기 용접부 피로의 연구는 선박구조 전문가들과 선급들이 주도하게 되었으며 이후 여기서 정립한 기술들이 파손에 따른 위험비용이 훨씬 큰 대형 해양구조물에도 적용되면서 한층 발전하게 되었다.

이 글에서는 유한한 피로수명을 가지는 용접 구조물의 피로수명 평가를 위하여 사용되는 기본적인 방법을 소개하고 이 과정에서 합리적인 결과를 얻기 위하여 필수적으로 고려해야만 하는 사항들을 개념적으로 살펴보고자 한다.

## 피로수명 평가방법

일정 수준 이상의 하중에 의해 유발되는 항복이나 좌굴에 의한 손상(damage)이 바로 한 번 만에 구조물의 기능을 상실하게 하는 고장(failure)으로 이어지는 것과는 달리 피로에 의한 손상은 상당히 작은 하중범위(range)에 의해서도 유발되며 하중범위가 반복됨에 따라 점차적으로 누적되어 점진적으로 균열을 진전시키는 것으로 파악되고 있다. 따라서 피로평가는 기본적으로 하중범위의 반복수(number of cycles) 영역에

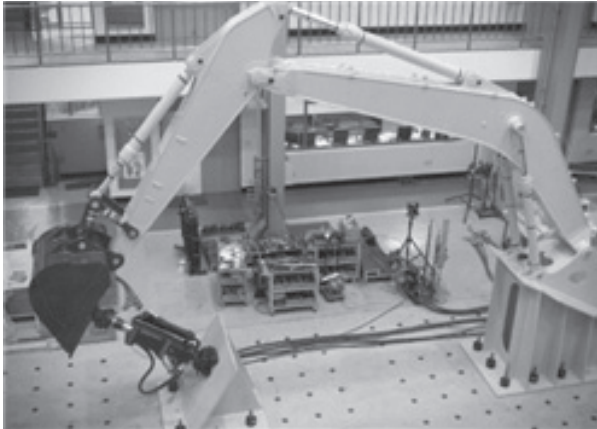


그림 1 굴착기 작업장치의 피로시험 예

서 이루어진다. 즉, 특정 기간 동안 하중범위가 작용하는 반복수  $n$ 과 이 하중범위에 대하여 구조물이 견디는 반복수  $N$ 의 비율( $n/N$ )을 일반적으로 피로손상률( $d$ )로 정의하고 이 피로손상률이 1.0에 도달하는 시간을 피로수명으로 평가하는 것이다. 일반적으로  $n$ 은 실구조물에 대한 필드계측을 통하여 얻어지며,  $N$ 은 시험물(시편 또는 부분적인/축소된 실구조물)에 대한 피로시험을 통하여 얻어지게 된다.

작용하는 하중이력이 변동진폭인 경우에는 특정한 방법을 이용하여 유효한 하중범위들을 추출하고 추출된 하중범위들 각각에 대하여 피로손상률( $d$ )을 구한 후, 이들을 선형적으로 누적하여 총 피로손상률( $D$ )을 구하게 된다. 이러한 피로손상률 계산에서  $n$ 과  $N$ 을 적절히 대응시키기 위해서는 먼저 실구조물에 작용하는 하중범위와 시험물에 작용하는 하중범위를 대응시키는 합리적인 기준이 요구된다. 일반적으로 응력, 변형률, 응력확대계수가 사용되는데, 응력, 변형률을 사용하는 방법을 각각 S-N,  $\epsilon$ -N 방법이라 하고 응력확대계수를 사용하는 방법을 선형과피역학적(Linear Elastic Fracture Mechanics) 방법이라 지칭한다.

S-N 방법은 응력의 수준이 비교적 낮고 주기가 짧아 피로수명이 긴 고사이클 하중에 대하여 적용되며,  $\epsilon$ -N 방법은 그 크기가 상대적으로 크고 주기가 긴 저사이

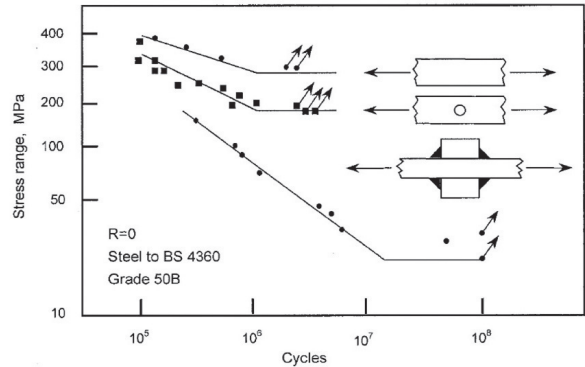


그림 2 용접구조와 다른 구조의 수명비교

클 하중에 대하여 적용된다. 근본적으로 피로손상은 전단 변형과 관련되어 있어  $\epsilon$ -N 방법이 보다 정확하지만 응력의 크기가 작아 탄성범위에 있는 경우 응력과 변형률 사이에 선형비례관계가 성립하므로 평가하기 편리하고 오랜 기간 동안 사용되어 온 관계로 용접부에 대한 시험 데이터와 참고 자료를 쉽게 구할 수 있는 S-N 방법은 용접구조물의 피로수명 평가에 가장 많이 사용되고 있다.

### 용접부 피로수명 평가

용접부가 일반 모재부에 비하여 피로수명이 짧은 것은 크게 용접결함, 잔류응력, 응력집중 등의 원인에 기인한다. 용접부의 끝단(toe)에 부재 깊이 방향으로 균열처럼 존재하는 용접결함(intrusion)은 초기균열로 작용하여 피로수명을 단축시키고 인장잔류응력은 평균응력수준을 높임으로써 피로수명을 단축시킨다. 한편, 응력집중현상은 용접 끝단부(toe)에서의 피로응력을 증폭시켜 피로수명을 단축시키는데, 이러한 응력집중현상은 용접부 존재에 따라 유발되는 구조적 불연속과 언더컷(undercut)이나 용접결함(intrusion)에 의해 형성되는 노치(notch)에 의해 복합적으로 유발되는 것으로 파악되고 있다. 용접결함과 응력집중 현상에 의하여 그림 2에 보이는 바와 같이 횡방향으로

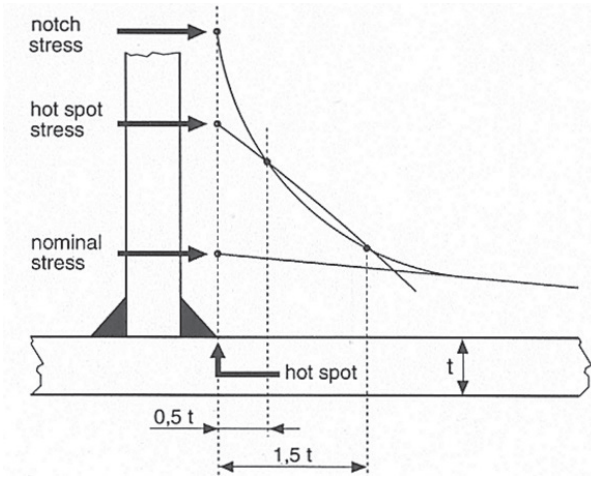


그림 3 공칭응력, 집중응력, 노치응력의 구분

하중을 받는 용접부의 경우 일반 평판과 구멍이 있는 평판보다 같은 하중범위에 대하여 훨씬 더 수명이 짧은 결과를 보여주고 있다.(구조적 불연속에 의한 응력 집중 정도는 평판에 구멍이 있는 경우의 응력집중 정도와 동일한 것으로 알려져 있다.)

따라서 S-N 방법에서 기준으로 사용되는 피로응력을 고려하는 응력집중 현상의 범위에 따라 공칭응력(nominal stress), 집중응력(hot spot stress), 노치응력(notch stress)으로 구분하고 공칭응력에 기하학적 불연속에 따른 응력집중효과만 고려한 것을 집중응력, 여기에 노치효과까지 고려한 것을 노치응력으로 정의하고 있다.

여기서 집중응력이나 노치응력은 피로손상이 우려되는 피로취약부(hotspot) 위치에서 개념적으로만 정의된 가상의 값으로 합의된 방법에 따라 계산된다. 기준 피로응력으로 공칭응력을 사용할 경우 공칭응력에는 용접부 형상이 고려되어 있지 않으므로 용접부 형상별로 응력범위와 수명의 관계인 S-N 선도가 필요하게 되고 복잡한 구조물에서는 공칭응력을 산정할 수 없는 어려움이 있어 근간에는 주로 집중응력이 사용되어 왔다. 이 집중응력의 계산에 주로 hotspot에서

판 두께의 0.5배 1.5배 떨어진 위치에서의 응력을 이용하여 선형적으로 외삽(extrapolation)하여 구하는 방법을 적용하고 있다. 따라서 용접부에 의한 구조적 불연속에 의한 응력집중만을 고려하고 있기 때문에 용접부에 하중이 전달되는 형태에 따라 몇 가지 S-N 선도가 필요하게 되고 근본적으로 용접 뿌리부(root)에서의 평가는 불가능한 한계가 있다.

최근 이러한 한계 극복하고 S-N선도를 단일화 하고 뿌리부의 평가도 가능하게 하기 위하여 노치응력을 피로응력으로 사용하는 방법이 대두되었다. 이 경우 구조적 불연속과 노치에 의한 응력집중효과를 합성하여 피로노치 계수(Kf: fatigue notch factor)로 정의하게 된다. 이 피로노치계수는 원칙적으로 노치가 없는 경우의 피로수명과 노치가 있는 경우의 피로수명의 비를 의미하는 것이었는데, 이를 응력적 관점에서 재정의 한 것이다. 이 계수는 FEM(Finite Element Method)과 같은 응력해석만으로는 구할 수 없는 값인데, 그 이유는 피로현상이 재료 표면뿐만 아니라 깊이 방향에 걸쳐 일정한 크기의 부피에 분포하는 응력들의 복합적인 작용과 관련이 있는 반면 응력집중에 의한 응력은 표면에서만 아주 높고 깊이 방향으로 갈수록 지수적으로 감소하는 분포이기 때문이다. 또한 노치응력이 항복을 초과할 경우 소성에 의하여 응력수준이 감소하기 때문이기도 하다.

이와 같이 해석적으로 피로노치계수를 산정하기 어려운 문제를 해결하기 위한 대안으로 유효노치응력방법(effective notch stress approach)이 제안되기에 이르렀다. 이 방법은 FEM을 이용하여 특별히 고안된 상황에서의 노치응력이 노치에서의 피로현상을 대표할 수 있다는 가정에 근거하는 것으로 노치형상을 그대로 모델링하여 구조해석할 경우 노치응력이 상당히 높게 평가될 수 있는 점을 회피하기 위하여 노치부에 1mm 반지름을 가지는 형상을 인위적으로 삽입하여 현실적인 수준의 노치응력을 구하고 이를 기준응력으로

로 사용하는 것이다.

마침내 유효노치응력방법을 사용하여 용접부의 끝단과 뿌리부 모두에서 피로수명을 평가를 할 수 있는 수준에까지 이르렀으나 기본적으로 응력범위에 지수적으로 비례하여 발생하는 손상이 순서에 관계없이 선형적으로 누적된다는 모델을 사용하고 있기 때문에 하중순서효과에 의해 유발되는 균열진전 지연이나 가속에 대한 부분과 용접부를 따라 분포하는 미세균열들이 성장하나 어느 순간에 합쳐지는 현상 등을 설명하기에는 충분하지 않다. 이를 고려할 수 있는 대안으로 파괴역학적 방법이 연구되고 있으나 아직 실용화되고 있지는 못한 형편이다.

### 맺음말

용접 구조물 설계단계에서 피로수명 평가를 위하여

S-N방법을 이용하는 경우 합리적인 평가를 위해서는 적절한 기준 피로응력을 선정하는 것이 중요한데, 대상 구조물의 복잡도와 요구되는 정확도에 따라 공칭응력, 집중응력, 유효노치응력 중 적절히 선정하여야 할 것이다. 일단 기준 피로응력이 선정되면 이에 따라 합당한 S-N 선도 및 응력해석방법을 일관성 있게 적용하여야 할 것이다.

S-N선도의 경우 그 동안 여러 기관에서의 다각적인 시험을 통하여 얻어진 약 97.5% 신뢰도를 가지는 설계선도를 사용하는 반면, 작용하중의 경우에는 대상 제품별로 각각 실차계측을 통하여 확률분포를 산정하고 이로부터 적절한 신뢰도를 가지는 손상등가하중을 추출하여야 하기 때문에 이 부분의 불확실성이 피로수명평가의 신뢰도에 상당한 영향을 미치게 되고 따라서 최근에는 이러한 부분에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.



### 기계용어해설

#### 용액침투법(Infiltration Process)

소결금속의 기공이나 섬유다발의 틈새에 모세관현상이나 진공흡수로 용융금속을 침투시키는 방법.

#### 인화점(인화온도; Inflammation Point)

인화성 물질이 가열되어 불꽃 또는 화염 등으로 연소될 수 있을 정도의 가스를 발생시킬 수 있는 온도.

#### 관성(Inertia)

물체는 그 상태를 지속하려는 성질을 갖고 있으므로, 정지되어 있는 물체에 외력을 가하여도 그 외력에 거역하는 힘이 생기는 것.

#### 초기압력(Initial Pressure)

상태 변화의 최초의 압력으로, 증기 사이클에서는 터빈 입구의 증기압력, 내연기관 사이클에서는 압축 초의 압력.

#### 인플레이션 성형(Inflation Molding)

폴리에틸렌의 필름을 만들 경우, 고리모양의 구멍을 가진 다이로부터 용융 폴리에틸렌을 압출하여 통모양의 필름을 만드는 플라스틱 성형법의 일종.

#### 영향선(Influence Line)

보에서 예를 들면, 지지반력이나 특정 위치에서 휨 등이 부하의 작용위치로 인하여 어떻게 변화하는가를 표시한 곡선.

#### 적외선(Infrared Rays)

눈에는 보이지 않지만 적색 가시광선보다 파장이 길고 열선이라 불릴 만큼 열작용이 크며 산란율이 작은 전자파.