

용접부 파괴인성(CTOD) 시험시 균열면 형상에 미치는 local compression의 영향

An Effect of Local Compression on Shape of Crack Plane in Crack Tip Opening Displacement(CTOD) Test of Weldment

한 종 만*, 강 중 규**, 김 광 석***

* 대우조선공업(주)

** 대우조선공업(주)

*** 대우조선공업(주)

1. 서 론

대형 구조물의 안전성 문제에서 가장 중요시 되는 것은 취성파괴로 이는 notch가 존재하는 고장력 재료가 인장강도가 낮은 재료에 비해 훨씬 낮은 응력에서도 파괴가 일어나는 현상이나 통상 취성파괴를 일으키지 않는 연성재료라 할지라도 가혹한 사용조건, 예를 들어 저온환경에서 파괴를 일으키는 것을 말한다. 대형 구조물의 접합은 주로 용접으로 이루어지는데 일반적인 용접부는 slag inclusion, porosity, undercut, incomplete fusion 등의 결함들을 갖고 있을 가능성이 높다. 이러한 결함은 하중을 받는 경우에 응력집중이 생기는 notch로 작용하여 파괴의 원인이 되므로 용접부에 대한 취성 파괴 안전성 평가는 대형 구조물 제작에 있어 필수적이며 이를 위해 파괴역학의 한 parameter인 CTOD값이 많이 사용되고 있다.

CTOD 시험은 시험 후의 유효성 판단 등이 필요한 까다로운 시험으로 보통 많은 시간과 노력이 요구되는 시행 착오를 거쳐 시험결과가 유효성을 갖도록 하는 시험이다. 본 연구에서는 파괴인성시험에서 시험전, 후의 유효성 판단기준인 예균열의 형상과 파괴인성(CTOD)값 중에서 예균열 형상에 큰 영향을 미치는 인자를 규명하고 그 영향을 연구하여 효율적인 시험방법을 구현하고자 하였다.

2. 본 론

그림 1에 나타낸 CTOD 시험 절차에서 어려운 점은 시험 후의 유효성 판단으로 이는 피로균열면의 유효성과 기준이 되는 CTOD값의 만족여부로 나눌 수 있다. CTOD값은 시험 초기에 정해지는 고정된 값으로 용접방법이나 재료에 영향을 받으므로 이를 통한 조정이 가능하나 피로균열면의 유효성은 시행착오를 통한 방법만이 제시되어 시험중에 많은 어려움을 주기도 한다.

피로균열면의 유효성은 CTOD시험을 위해 생성시키는 피로균열 선단의 모양이 BS나 ASTM과 같은 규격에서 정한 기준을 만족해야 하는 것으로 그림 2에 보인 것과 같이 시편 폭(B)을 균일하게 8등분하고 시편 끝단에서 균열선단까지 시편두께 방향으로 겹 9개의 균열길이 중 최대인 것과 최소인 것의 차이가 식 (1)로 계산된 균열 평균길이의 10%를 넘지 않아야 함을 말한다. 이러한 균열 선단의 불균일은 시편 길이방향 잔류응력의 폭방향 불균일 분포에 기인한다. 일반적으로 후판의 다층 용접인 경우에 있어서 잔류응력은 그림 3에서 보는 것과 같은 분포를 갖는다. 특히, 그림 4에 나타낸 것과 같이 일반적으로 많이 사용하는 T-L형 시편의 경우에는 균열의 진전 방향이 시편의 두께 방향이므로 길이 방향의 잔류응력이 지배적인 요소가 된다. 이 시편의 경우, 시편 두께방향으로 표면쪽에는 인장 잔류응력이 중심부에는 압축 잔류응력이 존재하게 되므로 그림 5에서와 같이 내부의 균열은 진전하지 못하고 표면쪽의 균열만이 진전하는 형상이 된다. 이러한 문제는 두께와 상관없이 비교적 얇은 판에서도 발생하며 실험에 큰 어려움을 준다.

균열 선단의 유효성을 만족시키기 위한 여러가지 시도의 결과로 잔류응력의 영향을 없애는 여러가지 방법이 제시되었는데 BS나 ASTM 등에 따르면 표 1과 같은 방법의 사용이 가능하다. 그러나 Code에서 제시하는 방법은 그 명확한 양의 정의가 없고 시행착오를 통한 실험을 요구하여 CTOD시험은 많은 노력과 시간을 투입하고도 만족된 결과를 얻지 못하는 경우가 종종 있다.

Code에서 제시되는 유효 균열면을 얻기위한 방법은 3가지였으나 공통된 방법이 local compression

이며 문헌을 토대로 High-R ratio의 방법이나 reverse bending의 방법은 효율적인 방법으로 사용하기에 어려운 점이 많다고 판단되어 local compression법에 대한 활용법만을 살펴보았다.

Local compression법은 용접 시 발생한 두께 방향의 잔류응력을 표면 압축 시 발생하는 응력으로 응력의 평형을 맞추는 방법이다. 그림 3(c)와 같이 길이방향 잔류응력은 표면에 인장, 중앙부에 압축 잔류응력으로 이 응력들은 시험편 표면에 잔류변형이 생길 정도의 local compression이 가해지면, 응력 상태가 변화한다. 이러한 잔류응력 분포의 변화에 대한 검증은 실험을 통한 방법과 유한요소 해석을 통한 방법이 있겠지만 본 연구에서는 실험을 통해 검증하는 방법은 많은 제약이 따르므로 유한요소 해석을 통한 방법을 통해 검증을 시도하였다.

잔류응력을 고려한 local compression의 유한요소해석은 많은 시간을 요구하므로 먼저 local compression이 시편에 어떤 응력변화를 갖게 하는지에 대해 검토하여 그 적용가능성을 검토하였다. 초기 잔류응력이 없는 시험편의 외부에 local compression을 가했을 경우의 유한요소해석 수행결과를 예로 그림 6에 나타내었다. 시편형상이 대칭이므로 1/4크기의 3차원 모델을 이용하였고 시편 두께방향으로 지름 30mm의 dimpler로 압축을 가하여 0.1 ~ 0.5mm까지 늘렸을 경우에 대해 탄소성 해석을 수행하였다. Rigid surface로 구현된 dimpler를 시편 두께 방향으로 누르는 양을 크게 함에 따라, 시편의 중앙부에 인장 응력값이 증가하고 표면에서는 압축응력의 양이 커짐을 알 수 있었다. 이 결과를 통해 용접으로 인해 발생한 인장 잔류응력부에는 local compression에 의한 압축 잔류응력이 압축 잔류응력부는 인장 잔류응력이 발생되어 응력을 균일하게 해주는 효과가 있을 것으로 예상되었다. 그림 7에는 용접부에 대한 인장 및 압축응력에 대한 대수적인 합인 효과에 대해 표현해 보았다. 용접으로 인한 잔류응력이 local compression으로 인한 잔류응력과 합쳐져서 두께 방향으로 어느 정도 균일한 응력분포를 가지게 될 것이라고 예상되었다. 이를 토대로 잔류응력을 가지는 시편에 compression을 가했을 경우의 유한요소 해석을 수행하였다. 그 결과, 그림 8과 같이 용접 잔류응력이 compression에 의해 변화하다가 spring back에 의해 안정화됨을 알 수 있었다. 그림 9에 notch를 따라 두께 방향 응력변화 분포를 나타내었는데, 그림 7에서 가정한 것과 같이 초기 잔류응력의 반대부호만큼의 local compression을 가했을 경우의 결과와 대수적인 합으로 가정한 결과가 유사하게 나타났으며, 이때 결정된 compression양을 시편에 가한 결과 그림 10의 (b)와 같은 유효한 균열면을 얻을 수 있었다.

3. 결 론

CTOD시험의 어려운 문제중의 하나인 예균열의 유효성은 Code에서 제시하는 잔류응력 제거방법의 하나인 local compression을 통해서도 시행착오를 거쳐야 하는 어려운 문제이다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위한 방법의 하나로 유한요소 해석을 통해 compression양을 정하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- a. CTOD시험을 위한 잔류응력 제거 방법 중 하나인 local compression을 탄소성 유한요소 해석으로 구현하였다.
- b. 해석 후 결정된 compression양을 시편에 가한 결과 유효한 균열면을 얻을 수 있었다.
- c. 유한요소해석을 통한 compression양의 조절은 시간과 노력을 절약하는 유용한 방법이 될 것으로 판단된다.

4. 참 고 문 헌

- 1) 700MPa high yield strength steel HAZ and weld metal CTOD in 50mm weldments, 1993 OMAE Vol.III-B, Material Engineering
- 2) Evaluation of critical COD in weldments, T.Kanazawa, S.Machida, Y.Niimura, J.Kobayashi, Y.Hagiwara
- 3) CTOD testing and analysis the present state of the art, TWI
- 4) Study of methods for CTOD testing of weldments, S.Machida, T.Miyata, M.Tooyosada, Y.Hagiwara
- 5) Effects of residual stress on brittle fracture testing, Michael R.Hill, Tina L. Panontin fatigue and fracture mechanics Vol.29 ASTM STP 1332

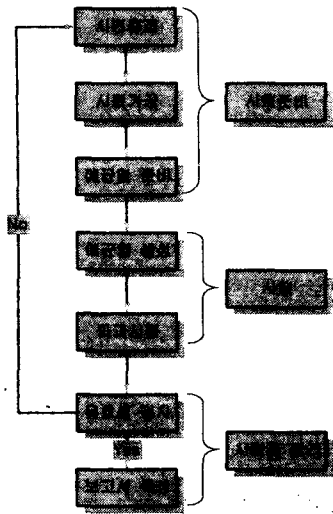


그림 1 CTOD수행 절차

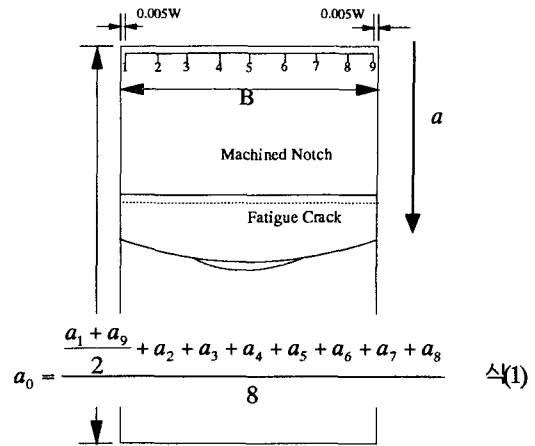


그림 2 균열면 유효성 검사 기준

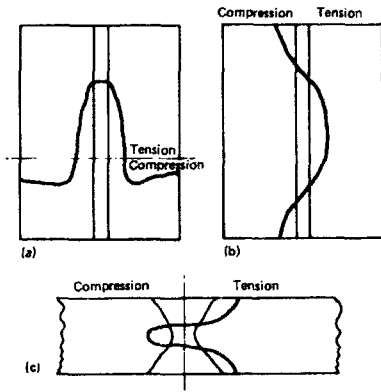


그림 3 용접시에 발생하는 잔류응력 분포

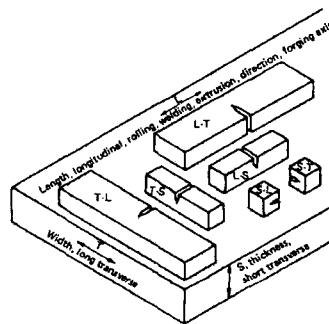


그림 4 균열면 방향에 대한 정의

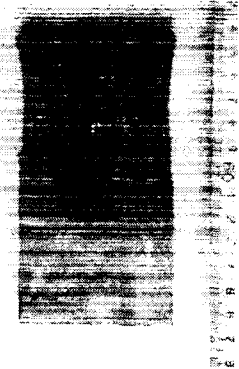


그림 5 CTOD 시편 파단면

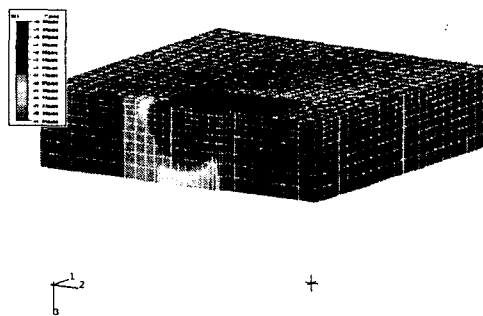


그림 6 Local compression 후의 길이방향 응력분포

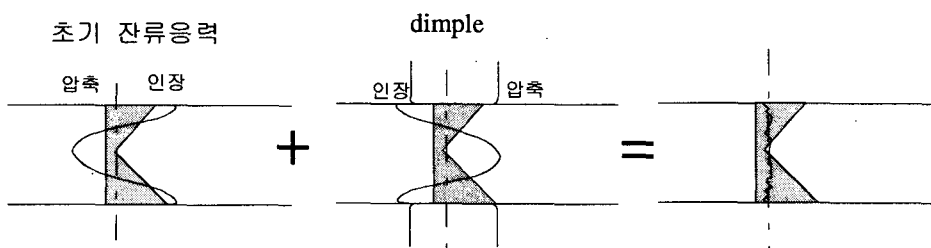
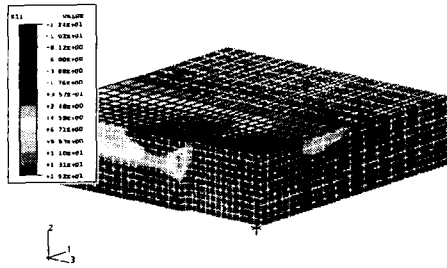
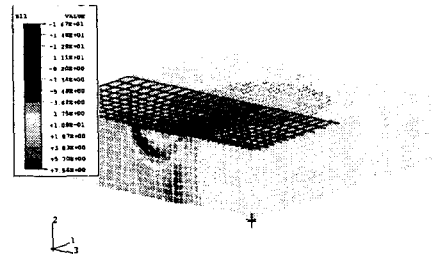


그림 7 Local compression에 따른 용접부 잔류응력변화



(a) compression중의 잔류응력 변화



(b) compression된 이후의 응력분포

그림 8 compression에 따른 응력변화

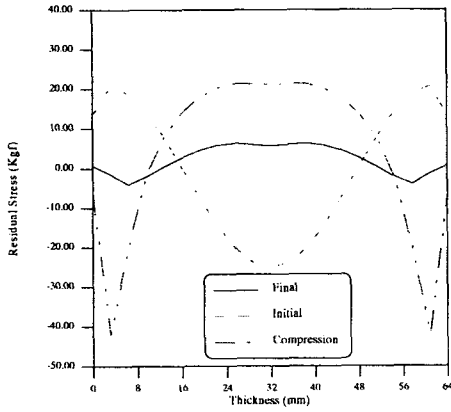
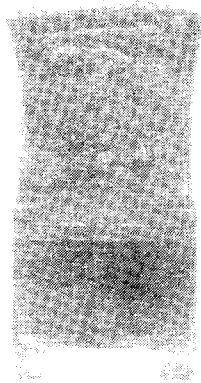


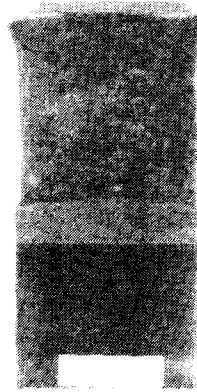
그림 9 compression 전후의 잔류응력 분포

표 1 잔류응력의 영향을 없애는 방법

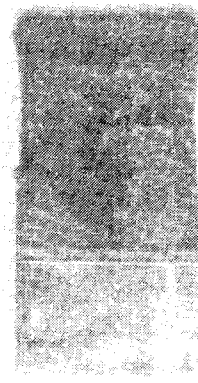
Code	BS	ASTM
방법 1	Local compression	Local compression
2	Reverse bending	
3	High R-ratio	



(a) Over dimple



(b) Valid



(c) Under dimple

그림 10 compression양에 따른 균열면 형상