

## Local compression에 의한 CTOD 시편내의 용접잔류응력 재분포

주성민\* · 윤병현\* · 장웅성\* · 방한서\*\* · 방희선\*\*† · 노찬승\*\*\*

\*포항산업과학연구원 용접센터

\*\*조선대학교 선박해양공학과

\*\*\*조선이공대학 선박해양·기계공학과

### Redistributions of Welding Residual Stress for CTOD Specimen by Local Compression

Sung-Min Joo\*, Byung-Hyun Yoon, Woong-Seong Chang,  
Han-Sur Bang\*\*, Hee-Seon Bang\*\*,† and Chan-Seung Ro\*\*\*

\*Welding research center, RIST, Pohang 790-330, Korea

\*\*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun Univ., Gwangju 501-759, Korea

\*\*\*Dept. of Naval Architecture and Mechanics, Chosun College Univ. of Science and Technology,  
Gwangju 501-744, Korea

†Corresponding author : banghs@chosun.ac.kr

(Received July 24, 2009 ; Revised September 7, 2009 ; Accepted November 16, 2009)

#### Abstract

When conducting CTOD test, especially in thick welded steel plate, fatigue pre-cracking occasionally failed to satisfy the requirements of standards thus making the test result invalid.

Internally accumulated residual stress of test piece has been thought as one of the main reasons.

The propagation of fatigue crack, started from the tip of machined notch, which might have propagated irregularly due to residual stress field.

To overcome this kind of difficulty three methods to modify the residual stress are suggested in standard i.e. local compression, reverse bending and stepwise high-R ratio method.

In this paper not only multi pass welding but also local pre-compressing process of thick steel plate has been simulated using finite element method for clarifying variation of internal welding residual stress.

The simulated results show that welding residual stress is compressive in the middle section of the model and it is predominantly increased after machining the specimen. Comparing as-welded state all component of the welding residual stress changing to compressive in the tip of machine notch whereas residual stress of the outer area remain as tensile condition relatively. Analysis results also show that this irregular residual stress distribution is improved to be more uniformly by applying local compression.

Key Words : CTOD, FEM, local compression, pre-crack, welding residual stress

#### 1. 서 론

CTOD(Crack Tip Opening Displacement) 시험은 탄소성 파괴역학에 기초하여 재료의 파괴인성을 평가하는 방법 중의 하나이다.

소성변형을 수반하는 균열선단의 개구 변위의 개념으

로 재료의 파괴현상을 기술하려는 노력은 1960년대부터 본격화 되어 시험법 제정<sup>1,2)</sup>으로 이어졌다.

이 시험법은 실제 사용두께를 시험 대상으로 하고, 샤르피 충격 시험에서와 같은 기계 가공된 노치가 아니라 피로에 의해 발생시킨 실제 균열을 삽입하여 인성을 평가함으로써 보다 현실에 가까운 환경에서의 실용적인 결과를 도출하고자 하는 특징이 있다.

후물재의 용접 시편의 시험, 특히 열영향부에서의 CTOD 시험에서는 기계 노치 선단에서 발생시키는 피로 예균열(fatigue pre-crack)의 진전 정도가 시험편 폭에 걸쳐 불균일하게 되어, 규격에서 정한 적합 범위를 벗어나는 경우가 종종 발생한다. 이러한 문제점은 본시험까지 모두 종료하고 나서야 파단면 관찰을 통해서만 식별이 가능하므로 피로 예균열을 적합하게 생성시키는 것은 매우 중요한 과정이다.

기계노치 선단에서부터의 피로 예균열 진전이 폭에 걸쳐 균일하지 못하게 되는 것은 내부의 용접잔류응력의 분포가 균일하지 못한 것이 주요 원인이다.

시험규격<sup>1)</sup>에서는 이러한 문제점을 방지할 목적으로 local compression, reverse bending, stepwise high-R ratio 방법으로 시험편의 내부 잔류응력 분포를 수정하는 단계를 적용할 수 있도록 하고 있다. 규격에서 제안된 잔류응력의 완화 방법들 중 노치선단의 잔류응력을 저감시키고 균일하게 하는데 local compression이 가장 효과적이라는 실험적 연구<sup>6)</sup>와 local compression에 의한 내부 잔류응력의 경감현상에 대한 2차원적인 해석적 시도가 있어 왔다<sup>7)</sup>.

본고에서는 다층용접 공정과 이후의 시편가공 및 local compression을 시험편에 작용시키는 과정을 3차원 탄소성 유한요소해석으로 모사하고 각 과정에서의 내부 응력 상태의 변화를 이해하고자 하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 다층용접해석

두께 65 mm인 강재의 다층용접공정을 상용 유한요소해석 프로그램<sup>8)</sup>을 이용하여 해석하였다.

Fig. 1에서와 같이 용착금속이 해당 패스의 용접 시에 생성되도록 하였다. 해석에 사용된 물성 값들은 온도의 함수로 해석에 적용하였다. 기하 경계조건은 모델

의 양단의 x, y, z방향 변위에 대한 자유도를 구속하였으며 열적 경계조건은 모델의 표면에 대기로의 열전달이 온도의 함수로 적용되도록 하였다. 구속조건은 양단 구속이며 입열은 이중 타원형 가우시안 체적 열원 모델<sup>3)</sup>을 이용하였다. 용접해석은 재료와 기하 비선형 해석으로 해석 옵션에 따라 차이가 있지만 대체로 장시간의 해석 시간이 필요하며 계산되는 데이터의 양도 방대하다. 3차원 모델의 다층 용접 해석이 바람직하지만 본고에서의 해석 대상은 단면이 길이방향으로 동일한 맞대기 자동 용접모델이므로 각 해석시간에서의 단면의 변형상태가 일정하게 유지된다는 가정 하에 4절점 solid generalized plain strain element를 이용하여 준 정상상태 영역에서의 2차원 해석으로 모사하였다<sup>4,5)</sup>.

최종 용접 잔류응력 분포는 Fig. 2와 같다. 이 2차원 해석결과를 형상 데이터와 함께 길이방향으로 맵핑시켜 Fig. 3과 같은 3차원의 모델을 생성하였다. 물론 시, 종단부의 응력과 변형상태는 현실과 차이가 있겠지만, 용접장이 충분히 긴 자동 용접된 시편의 중앙부에서 CTOD 시험을 절취하므로 시종단부의 역학적 상태는 고려의 대상이 아니다.

BS 7448의 시험편 형상은 BxB, Bx2B, compact

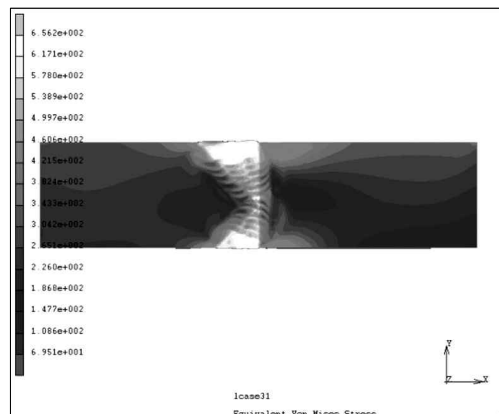


Fig. 2 Final welding residual stress distribution

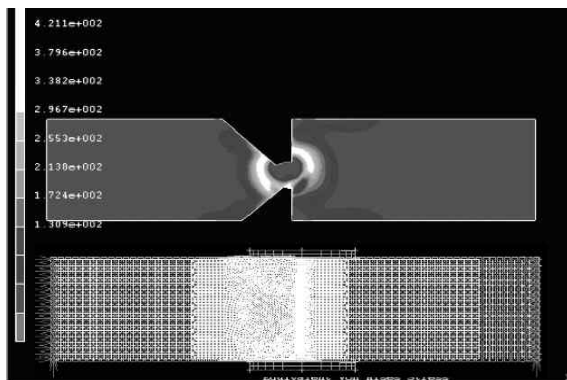


Fig. 1 Transient welding heat and stress simulation

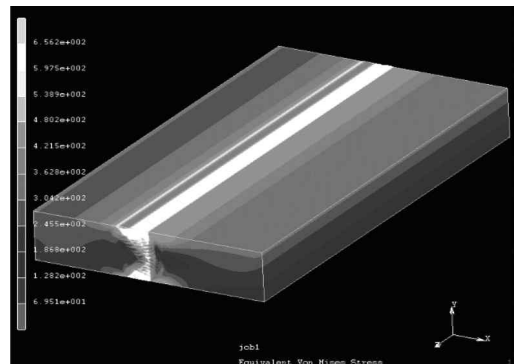


Fig. 3 Expanded 3D model

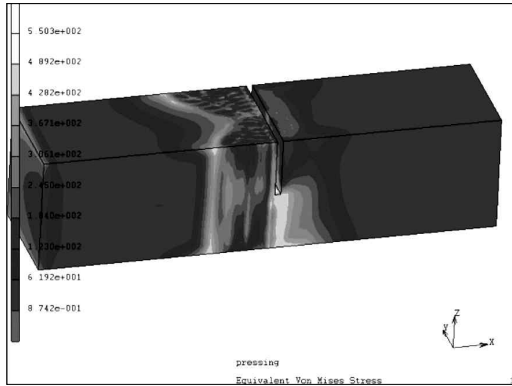


Fig. 4 Machined weldment model and redistributed welding residual stress

시편의 3가지가 있으며 수치 해석은 BxB 시편의 크기로 하였다. Fig. 3의 3차원 모델의 중심부를 CTOD 시편의 크기로 수치적으로 절단하였다.

3차원 모델의 표면으로부터의 마찰을 고려한 밀링 해석과 그에 따른 내부 역학적 상태에 미치는 영향은 본고의 해석목적에 고려하였을 때 미치는 영향이 적다. 따라서 해석의 경제성을 고려하여 BxB 크기의 시편 표면에 구속을 해방시키고 새로운 자유표면의 경계조건을 부여함과 동시에 CTOD 시험모델 이외의 요소들을 제거함으로써 절단을 모사하였다.

같은 방법으로 실제 시험편의 준비과정과 동일하게 시편의 중심에 기계노치를 생성시켰다. Fig. 4는 Fig. 3의 3차원 용접 시편을 시편가공하고 중심에 기계노치까지 가공한 후의 내부 잔류응력 분포이다. 구속도가 대폭 변함에 따라 최초의 용접 잔류응력은 3차원적으로 크게 재분포 되었다는 것을 알 수 있다.

### 2.2 local compressioning

용접된 시험편을 규격에서 정한 CTOD 시편크기로 절단하고 중심부에 노치를 만들고 다시 이 노치 선단에서부터 피로균열을 발생시켜야 비로소 시편의 준비단계가 완료된다.

이때 균열의 길이는 시험편 폭을 따라 등간격인 9 지점에서 측정하고, 임의의 두 지점에서의 균열길이 차이가 균열 평균길이의 10%이내이어야 적합한 것으로 판정된다.

피로 균열이 균일하게 발생되어야 함에도 불구하고 후물재의 용접부에서는 잔류응력의 영향으로 종종 불균일한 균열 성장이 발생된다. 이러한 문제를 방지하기 위해 Fig. 5와 같이 압자를 이용하여 가공이 완료된 CTOD 시편의 한 쪽 또는 양쪽에 local compression을 가하여 노치선단의 잔류응력을 경감시키고 불균일한

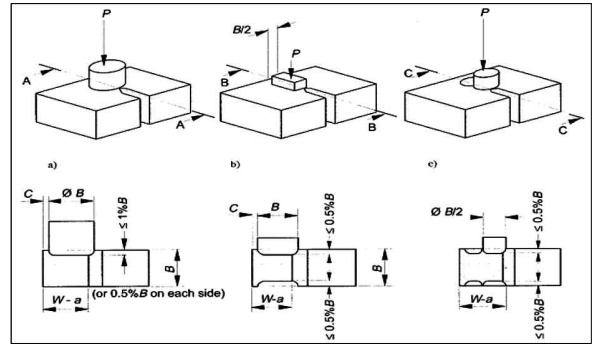


Fig. 5 Alternative local compression treatments<sup>1)</sup>

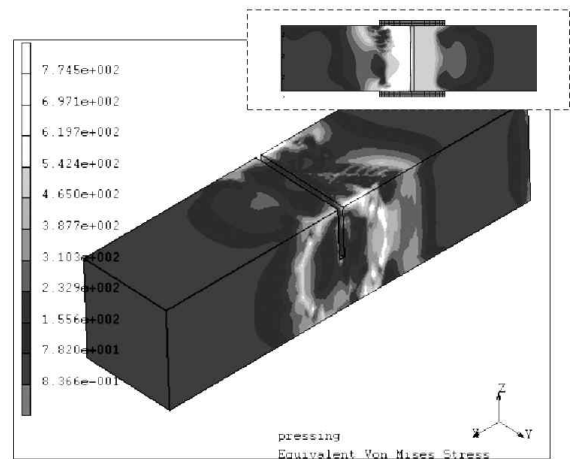


Fig. 6 Final redistributed welding residual stress by adding the local compression

내부 응력 분포를 고르게 할 수 있다. 규격에서 허용하는 최대 압입 깊이는 두께의 1%이다.

본고에서의 해석 범위는 피로균열을 생성시키는 전 단계까지이며 Fig. 4의 기계 노치까지 만들어진 CTOD 해석 모델에 Fig. 6의 상단 그림과 같이 local compression을 가하는 탄소성해석을 수행하였으며 이때 잔류응력은 다시 한 번 크게 재 분포되는 것을 알 수 있다.

### 3. 해석결과 및 고찰

최초 용접에 의해 발생된 모델 내부의 잔류응력은 용접 이후의 시편 가공단계와 local compression을 가하는 각각의 단계에서 구속도 변화 및 외력의 작용으로 크게 변화하게 되는 것을 알았다.

각각의 단계에서 각 성분별 용접잔류응력의 분포를 노치선단에서 시편 폭을 따라 Fig. 7~Fig. 10의 그래프로 도시하여 비교하였다.

각 그래프에서 x축은 시편의 단면 폭(65 mm)을 나타내고 y축은 상당응력과 각 성분별 잔류응력이다.

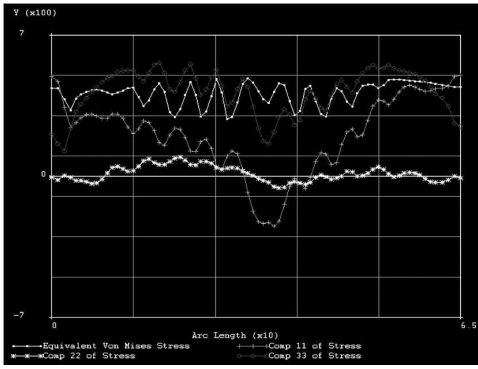


Fig. 7 Residual stress at as-welded state

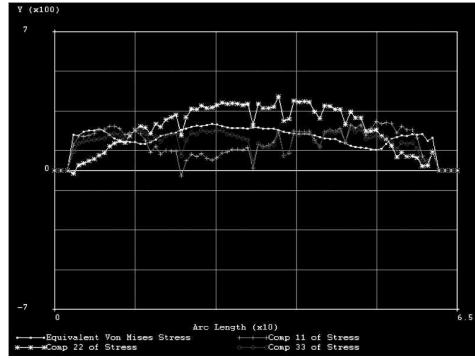


Fig. 9 Residual stress at machine notch tip after 0.5%B compression

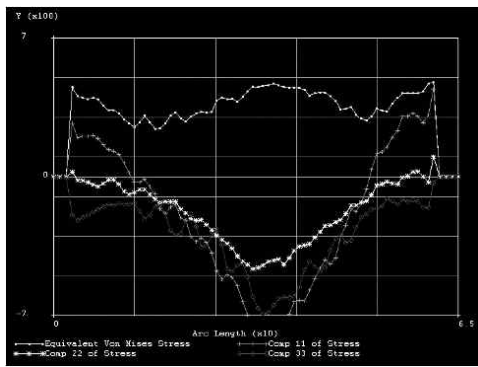


Fig. 8 Residual stress at machine notch tip after machining

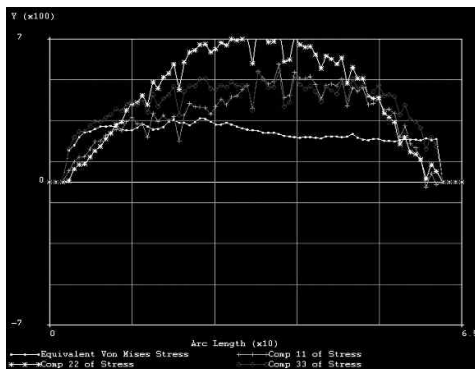


Fig. 10 Residual stress at machine notch tip after 1.2 %B compression

Fig. 7은 용접직후의 잔류응력 분포이며 이 상태에서 기계 노치를 포함한 BxB시편으로의 절단을 거치면서 노치선단에서의 폭에 걸친 응력분포는 중앙부가 압축으로 크게 변화되는 것을 알 수 있다. 시편 중앙부의 노치가공 후에 3점 굽힘 반복 하중으로 피로균열을 발생시킬 때 균열선단의 응력장이 균열의 개구방향에 대하여 압축응력으로 작용하면 이 응력은 균열성장에 대해 저항력으로 작용하고, 인장응력이 작용하면 반대로 피로균열 생성을 촉진시킬 것이다. 따라서 용접 후에 시편가공이 된 상태에서 피로균열을 생성시킨다면 중앙부의 균열진전이 시편 폭의 외측부보다 저하될 것으로 예상 할 수 있다.

Fig. 9는 시편의 양측에서 local compression을 모델 두께의 0.25%씩 가한 후에 같은 위치에서의 응력 분포이다. 절단 직후의 중앙부와 외측부의 응력분포 편차가 대폭 감소한 모습을 볼 수 있다.

Fig. 10은 규격에서 정한 최대 압축량을 초과하여 시편의 양 측에서 각각 모델 두께의 0.6%의 local compression 처리를 한 경우를 시뮬레이션 한 결과로 중앙부에서 오히려 인장응력이 우세하게 발달하고 있음

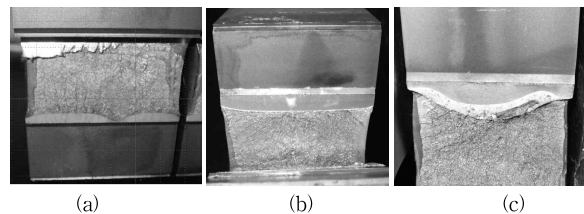


Fig. 11 Fatigue pre crack shape with various local compression amounts (a) Without pre-compression (b) optimum pre-compression (c) excessive pre-compression

을 볼 수 있다. 이러한 필요이상의 소성변형이 된 시편에 피로균열을 발생시키면 중앙부에서의 피로 균열 성장이 외측부에서보다 촉진 될 것으로 예상된다.

Fig. 11은 두께 65 mm의 후물재를 다층용접하고 해석 모델과 같은 방향과 위치에서 노치를 가공하여 CTOD 시험이 완료된 후의 단면 모습이다.

사진(a)는 용접시편 제작 후에 시편 가공을 하고 local compression 처리를 하지 않은 상태에서 시험한 경우이며 사진의 중앙부에 보이는 피로균열면을 살펴보면 중앙부에서 피로균열진전이 외측부보다 현저히 적은

모습을 볼 수 있다. 사진(b)는 local compression이 적정하여 피로균열 진전이 중앙부와 외측부에서 시험규격조건을 만족하는 범위에서 이루어진 것을 볼 수 있다. 사진(c)는 과도한 compression을 가한 경우로 중앙부에서의 피로균열 진전이 과하게 되어 결과적으로 규격범위를 벗어나 적합성을 만족하지 못하는 경우이다.

CTOD 시험을 수행할 때 경험적으로 판단하면 모재보다 용접시편의 경우에서 그리고 용접시편의 경우도 두께가 50 mm를 넘어 후물재가 될 수록 내부의 잔류응력을 포함한 역학적 불균일성이 증가하여 적합한 피로균열을 생성하기 곤란한 경우가 발생하는 경우가 있다.

시험 규격에서는 local compression의 상한값만을 규정하고 있고 시험자의 경험에 근거하여 압축량을 결정한다. 본고에서는 CTOD 시험절차와 동일하게 해석을 진행하여 용접된 상태와 절단, 그리고 가한 압축량의 정도에 따른 내부의 응력상태 변화를 유한요소해석을 이용하여 이해해보고자 하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 초기의 as-welded 상태에서의 내부의 응력상태는 CTOD 시험편 가공이 되면서 중앙부에 압축응력이 우세하게 재 분포된다.
- 2) local compression이 가하여 진후에 내부의 응력상태는 다시 한번 재 분포되며 가하는 압축정도에 따라서 노치 선단의 응력상태의 편차는 영향을 받는다.
- 3) CTOD 시험시에 본고에서와 같은 해석절차를 적정범위의 가압정도를 선정하는데 이용할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부가 지원하는 국가연구개발사업인 “차세대 초대형 구조물용 강재의 구조화 기술 개발” 사업에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

시험 준비와 진행에 도움을 주신 RIST 윤익찬 주임께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. British Standard 7448-Part 2: Method for Determination of KIC, critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials (1997)
2. American Society for Testing and Materials E1290: Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement (2007)
3. J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby : A new finite element model for welding heat sources, Metallurgical transactions B, 15-2 (1984), 299-305
4. H.S. Bang, S.M. Joo and H.S. Kim : A study on the numerical analysis of welding heat distribution of preflex beam, Journal of KSOE, 18-2 (2004), 52-57 (in Korean)
5. Y.C. Kim, T. Yamakita, H.S. Bang, Y. Ueda: Mechanical Characteristics of Repair Welds in a Thick Plate, Transactions of JWRI, 17-2 (1988) 417-425 (in Japanese)
6. H.S. Reemsynder, H.G. Pisarski and M.G. Dawes: Residual stresses and fatigue precracking techniques for weldment fracture toughness specimens Journal of Testing and Evaluation, 20-6, (1992), 416-423
7. J.M. Han, J.K. Kang, K.S. Kim: An Effect of Local Compression on Shape of Crack Plane in Crack Tip Opening Displacement (CTOD) Test of Weldment, Annual meeting of KWS, 2 (2000), 59-67 (in Korean)
8. MSC Software: “Volume A : Theory and user information”