연구논문

T형 강관 용접 이음부의 잔류응력 생성기구에 관한 연구

장경호* · 장갑철** · 경장현** · 이은택***

*중앙대학교 공과대학 건설환경공학과
**중앙대학교 토목공학과 대학원
***중앙대학교 공과대학 건축학과

A Study on the Production Mechanisms of Residual Stress in Welded T-joint of Steel Pipe Member

Kyong-Ho Chang*, Gab-Chul Jang**, Jang-Hyun Kyung** and Eun-Taik Lee***

*Dept. of Civil & Environmental Eng, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea
**Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea
***Dept. of Architecture, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

Abstract

Steel members have advantages of resisting torsion and axial compression. In design, residual stresses at the welded joint of T-shape steel pipes are one of the most important points to be considered. In this paper, characteristics of residual stresses of welded joints are clarified by carrying out 3D non-steady heat conduction analysis and 3D thermal elastic-plastic FE-analysis. According to the results, the production mechanism of residual stresses at the welded joint of T-shape steel pipe is clarified.

In this paper, circumferential stresses depended on thermal histories but axial and radial stresses were more dependent on geometrical shape than thermal histories. Residual stresses in the axial direction on the lower part of pipe member were tensile, controlled by geometrical shape. However, in case of middle part, residual stresses in all the directions were controlled by thermal histories.

* Corresponding author : changkor@cau.ac.kr (Received May 16, 2003)

Key Words : Steel pipe member, Welded T-joint, Residual stress

1. 서 론

최근 새로운 구조용 강재의 개발, 강구조물의 거동에 관한 해석기법 등 비약적인 기술의 발전으로, 신개념 강합성교량으로서 강관트러스 합성형교가 건설되고 있으며, 도시 상하수도, 지하 매설관과 같은 원통형 쉘구조물이 적용되고 있다. 강관 트러스 합성형교는 보강재가 필요하지 않은 원형 강관으로 제작되어 부재 단면 및 주형높이가 감소함으로서 투시성이 양호하며 미관적으로 우수한 경량구조물이 된다.

강관트러스 합성형교의 설계에 있어서 가장 중요한 과제중의 하나는 용접 이음부의 설계이다. 강관 트러스의 T형 이음부는 완전용입 용접으로 제작된다. 이음부 설계시에는 잔류응력의 분포를 정확히 파악해야 한다[1]. 강관 용접 이음부에 발생한 잔류응력은 구조물의 내하력 및 내진성능을 저하시키며 파괴를 유발할 수 있으므로 구조물 설계 시 강관의 잔류응력은 반드시 고려되어야 한다[2,3].

용접 이음부의 잔류응력의 분포는 열이력 및 기하학적형상의 변화에 의해 복잡한 분포를 보이고 있다. 그러므로, 용접 이음부의 잔류응력을 정확히 파악하기 위해서는 역학적 특성 및 생성 기구를 명확히 하는 것이 대단히 중요하다[4].

본 연구에서는 강관 트러스, 배관구조물 등에 적용되는 강관 부재의 T형 용접 이음부를 대상으로 수치해석을 수행하였다. 실제 용접조건을 재현하기 위해 실험을 통해 검증된[5] 3차원 비정상 열전도해석 및 3차원 열탄

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

소성 해석을 수행하였으며 해석을 통하여 T형 강관 용접 이음부의 잔류응력의 분포를 파악하였다.

수치해석 결과인 잔류응력의 분포를 통하여 T형 강관 용접 이음부의 잔류응력 생성에 기여한 인자를 파악 및 분석하여 일반화함으로써 잔류응력 생성 기구를 명확히 하였다.

2. 해석조건

2.1 해석 모델 및 용접 조건

T형 강관 용접 이음부의 잔류응력 생성 기구를 밝히기 위하여 저자가 개발한 8절점 Solid 요소를 이용한 3차원 비정상 열전도 해석 및 열탄소성 해석[6,7]을 수행하였다. 수치해석을 수행하기 위한 모델은 Fig. 1에 나타낸 것과 같다. 해석 모델의 형상은 1300mm (길이) × 300mm (외경) × 10mm (두께) 의 강관과 500mm (길이) × 300mm (외경) × 10mm (두께)의 강관이 중앙에서 T형으로 접합되어 있다. 용접은 1Pass 그루부 완전용입 용접을 수행한 것으로 가정하였으며 이때의 용접조건은 Table1과 같다. 응력이 집중되는 용접 이음부에서의 Fig.2와 같이 mesh를 세밀하게 하였다. 이때, 경계조건은 양단 단순지지 조건을 가정하였으며 잔류응력 생성기구를 정확히 파악하기 위하여 수평부재(member 1)의 상연(upper part)과 중간지점 (middle part), 하연(lower part) 및 수직부재(member 2) 이음부 선단에서의 잔류응력을 주목하였다.(Fig. 1) 모재는 일반 구조용 탄소강관인 SPS400을 사용하였으며 그 물성치는 Table 2와 같다. 3차원 열탄소성 해석에서는 재료의 물리정수 (밀도, 비열, 열전달계수, 열전도율 등) 및 기계적 제성질 (선팽창계수, 포아송비, 인장강도, 탄성계수 등)의 온도의존성을 고려하였다.(Fig. 3, 4)

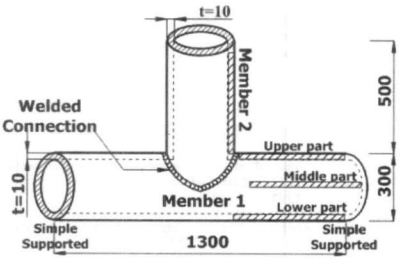


Fig. 1 Analysis model

Table 1 Welding conditions

Voltage	Current	Speed	Efficiency	Heat input
28V	720A	6mm/sec	0.9	1200(J/㎟)

Table 2 Material properties

Base metal	Yield stress	Tensile stress
SPS400	240MPa	400MPa

2 온도분포

3차원 비정상 열전도 해석을 수행하여 시간에 따른 온도이력을 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 5, 6에 나타내었다. Fig. 5는 용접완료시 온도분표를 나타내고 있

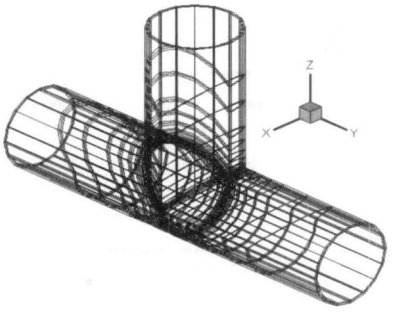


Fig. 2 Mesh of solid elements

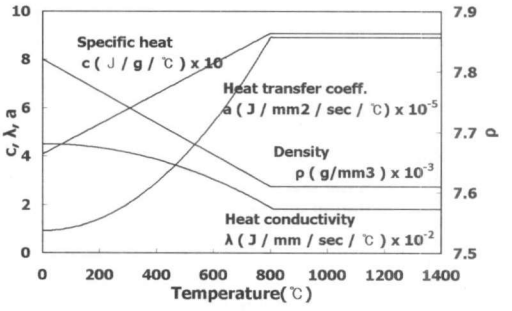


Fig. 3 Physical Constants

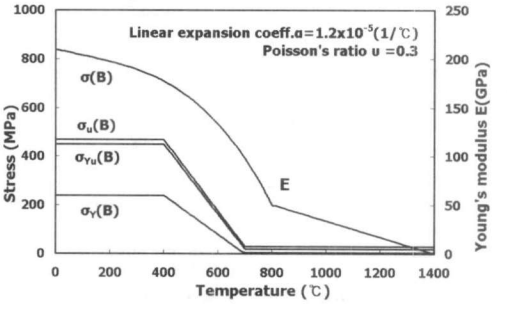


Fig. 4 Mechanical properties of base metal(SPS400)

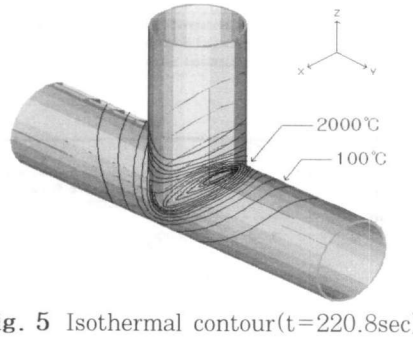


Fig. 5 Isothermal contour(t=220.8sec)

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

으며 Fig. 6은 용접시작점에서의 온도이력을 나타낸 것이다. 용접을 시작할 때 온도가 상승한 후 냉각되었으며 용접 완료시 다시 상승하는 온도이력을 나타내고 있다.

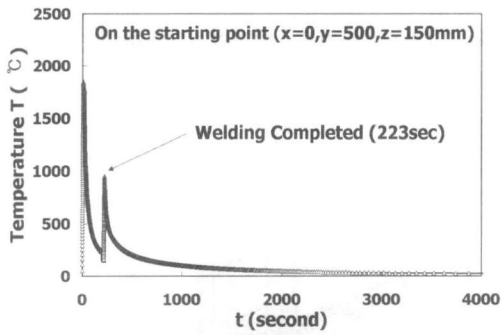


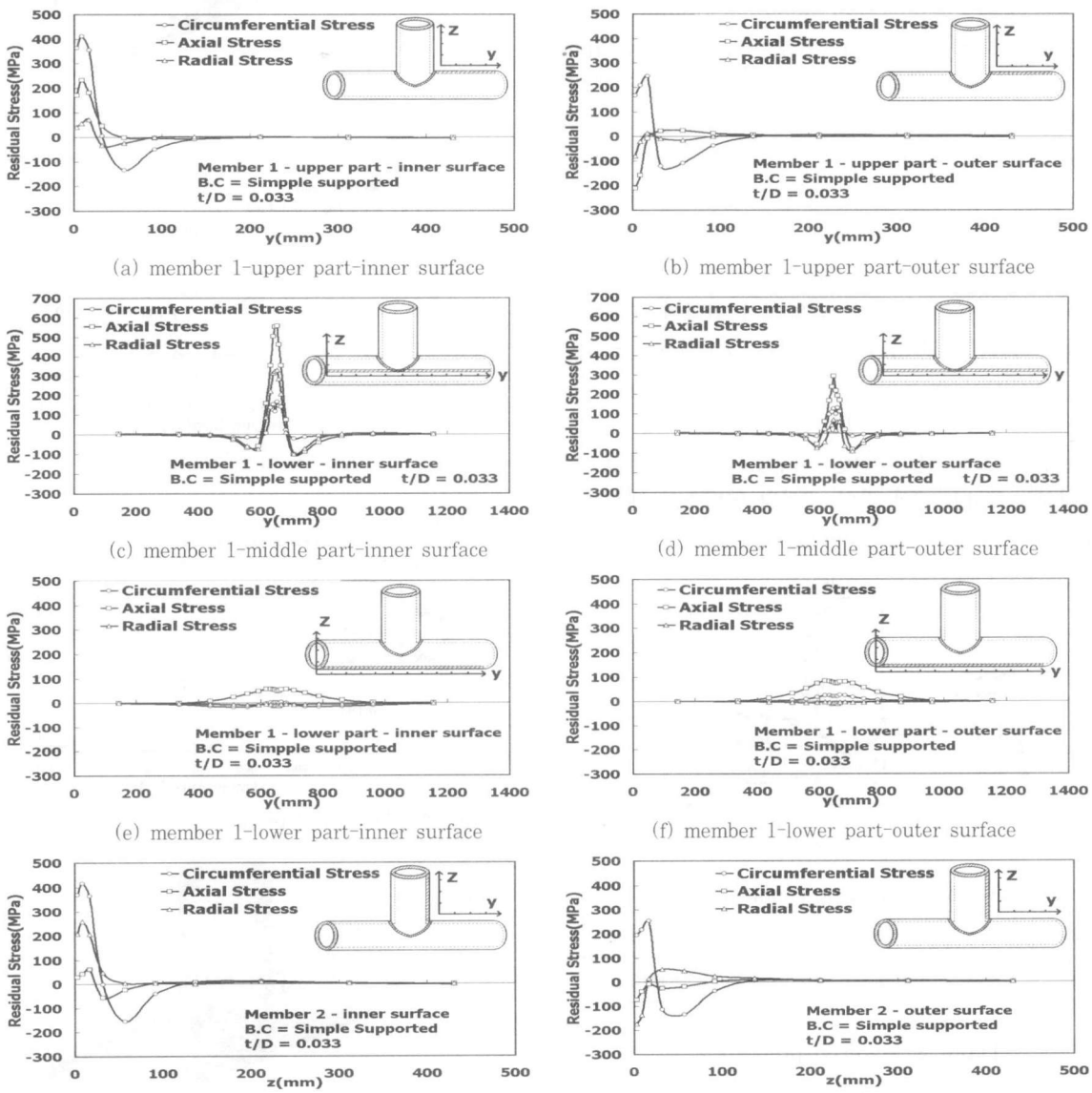
Fig. 6 Thermal history on the starting point

3. T형 강관부재 용접 이음부의 잔류응력분포와 생성기구

3.1 수평부재(Member 1)의 잔류응력 분포

3차원 비정상 열전도 해석을 수행하여 온도이력을 파악였으며, 이 온도이력을 이용한 3차원 열탄소성해석을 수행하여 강관 부재의 잔류응력분포를 구 하였다.

Fig. 7(a)~(f)는 수평부재의 내·외측 잔류응력분포를 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 수평부재 상연의 내측 잔류응력 분포로 용접 이음부 선단에서는 모든 응력성분이 인장을 나타냄을 알 수 있다. 용접 이음부 선단 외측 잔류응력 분포(Fig. 7(b))의 경우 원주방향 응력은 내측과 동일하게 인장을 나타내고 있으나 축방향과



(a) member 1-upper part-inner surface
(b) member 1-upper part-outer surface
(c) member 1-middle part-inner surface
(d) member 1-middle part-outer surface
(e) member 1-lower part-inner surface
(f) member 1-lower part-outer surface
(g) member 2-inner surface
(h) member 2-outer surface

Fig. 7 Distribution of residual stress

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

두께방향 용접 이음부 선단에서의 잔류응력은 내측과 다르게 압축응력이 발생함을 알 수 있다. 이러한 잔류응력분포는 T형 강관 이음부의 용접에 의한 온도이력의 영향으로 수평부재 내측 모든 응력성분은 인장응력이 작용하나 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 수평부재 상연 외측의 경우 원주방향을 제외한 축방향과 두께방향 잔류응력이 열수축에 의한 기하학적 형상변화의 영향을 받아 압축응력이 나타남을 알 수 있다. 원주방향 잔류응력의 경우 내·외측 모두 열이력의 영향을 받아 인장응력을 나타내고 있으나 내·외측 기하학적형상변화에 의해 내측 잔류응력(411 MPa)이 외측 잔류응력(230MPa)보다 상대적을 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(c), (d)는 수평부재 중간부분 요소들의 잔류응력을 나타내고 있다. 이음부 부근(중간지점)에서의 잔류응력은 내·외측 모두 인장응력을 나타내고 있다. 용접 이음부에서 멀어질수록 압축응력을 보이다가 점차 0으로 수렴하여 역학적인 평형상태를 나타내고 있다. 이와 같은 잔류응력분포는 판의 용접선 직각방향 잔류응력 분포[8]와 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉, 수평부재 중간요소의 잔류응력은 기하학적 형상변화의 영향이 적고 용접에 의한 열이력에 의해 지배받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(e),(f)는 수평부재 하연의 내·외측 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 축방향 및 원주, 두께방향 응력은 내·외측 모두 인장응력은 나타내고 있으며 원주방향 과 두께방향응력은 상대적으로 매우 작은 값을 보이고 있다. 수평부재 하연에서의 잔류응력분포는 Fig.8에 보이는 바와 같이 기하학적 형상 변화의 영향을 받아 외측 축방향 응력이 내측(58MPa)보다 상대적으로 큰 인장응력(83MPa)을 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 수직부재(Member 2)의 잔류응력 분포

수직부재의 잔류응력 분포를 Fig. 7(g), (h)에 보이고 있다. 용접 이음부에서의 잔류응력분포는 내측에서는 모든 응력성분이 인장이며 외측에서는 원주방향응력만 인장이며 축방향과 두께방향응력은 압축을 나타내고 있다. 이와 같은 잔류응력 분포는 수평부재 상연에서와 동일한 분포로 수직부재의 용접 이음부 선단에서의 잔류응력 생성기구가 수평부재의 상연에서의 생성기구와 동일하다는 것을 알 수 있다. 즉, 용접에 의한 열이력이 영향을 받아 외측 원주방향 응력과 내측 모든성분의 응력이 인장을 나타내지만, 열수축에 의한 기하학적 형상의 영향을 받아 외측 두께방향과 축방향 잔류응력이 압축을 나타내고 있다.

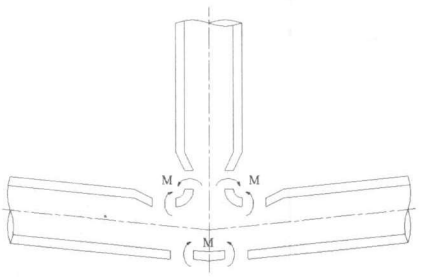


Fig. 8 Geometric deformation of T-shape steel pipe

3.3 용접 잔류응력 생성 기구

Fig. 7에 나타난 것과 같이 용접 이음부 선단(수평부재의상연과 수직부재)에서의 잔류응력 분포는 내측의 경우 모든 응력성분은 인장을 외측에서는 원주방향응력성분을 제외한 축방향과 두께방향응력은 압축을 나타내고 있다. 이러한 잔류응력 분포는 T형 강관 용접 이음부의 용접선 방향으로 정성적으로 동일하다. 이는 용접선 방향의 원주방향응력 성분은 용접에 의한 열이력에 의하여 잔류응력이 생성되지만 두께 방향과 축방향 잔류응력은 Fig. 8에 보인 바와 같이 기하학적 형상의 변화에 지배되어 내측과 외 측이 각각 다른 응력분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

이러한, 기하학적 형상 변화에 의한 내·외측 잔류응력의 차이는 수평부재의 하연의 축방향 응력성분에서도 발견이 된다. 그 외 수평부재의 응력성분들 은 용접에 의한 열이력에 의해 지배됨을 알 수 있다.

4. 잔류응력 생성기구의 타당성 검토

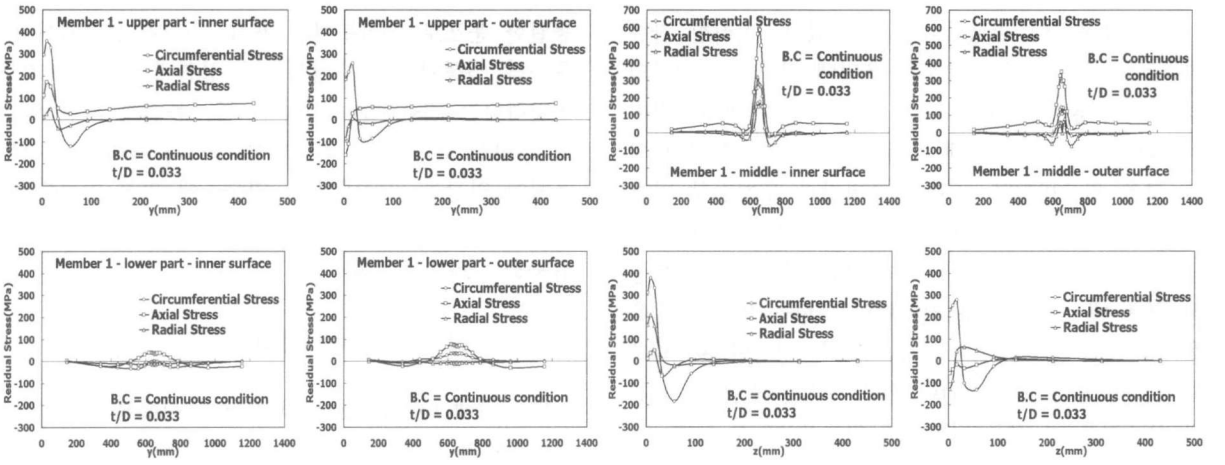
본 연구에서 밝힌 T형 강관부재 이음부의 잔류응력 생성기구의 타당성을 검토하기 위하여 경계조건 및 t/D 비의 변화에 따른 해석을 수행하였다.

4.1 경계조건(B·C) 및 두께/직경(t/D)비의 영향

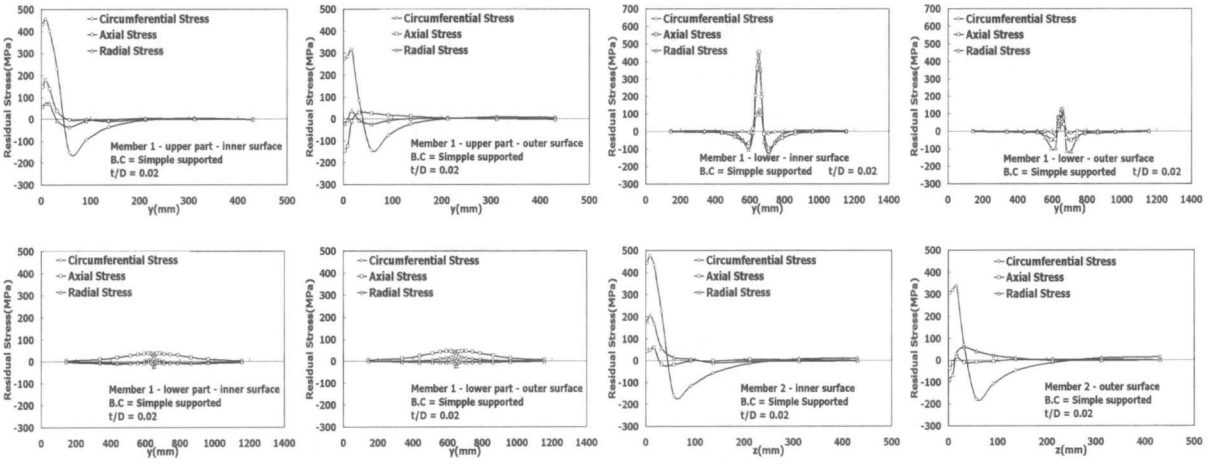
생성기구의 타당성을 검증하기위해 동일한 용접조건하에 경계조건을 양단단순지지가 아닌 수평부재의 y 축방향을 고정으로 하여 해석을 수행하였다. 또한, t/D비의 영향을 고려하기 위하여 두께를 고정하고 직경을 500mm (t/D=0.02)와 250mm (t/D=0.04)로 변화시켜 해석결과를 비교하였다.

Fig. 9은 경계조건 및 t/D비의 변화에 따른 수평부재 상연에서의 내·외측 잔류응력분포를 나타내고 있다. 3절의 결과와 동일하게 내측의 경우 모든 방향의 응력성분이 인장을 나타내며 외측의 경우 원주방향을 제외한 나머지 응력성분이 압축을 나타내고 있다. 이러한 잔류응력분포는 정량적인 측면에서 3절에서 제시한

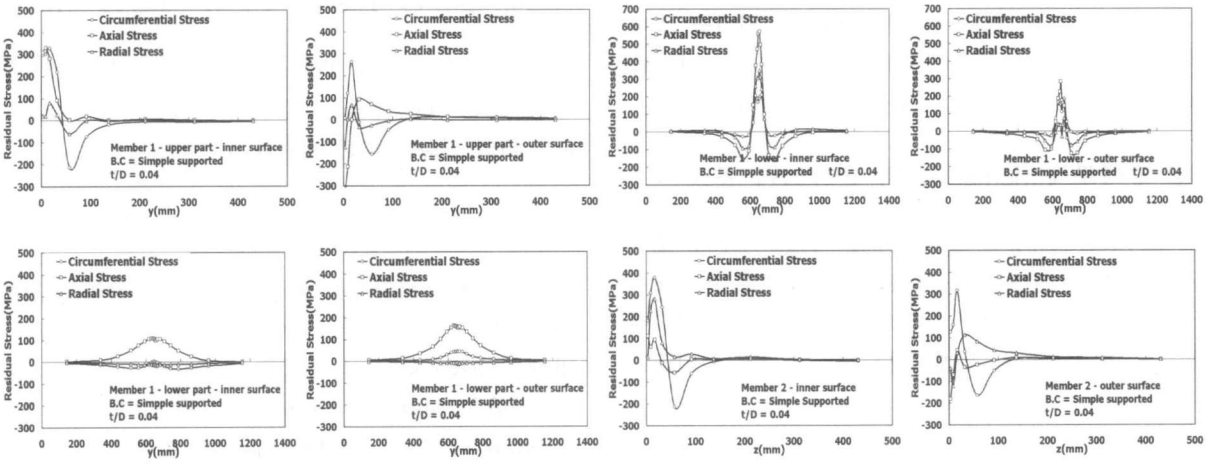
Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.



(a) In case of y-direction fixed condition(horizontal member)



(b) t/D = 0.02



(c) t/D = 0.04

Fig. 9 Distribution of residual stress according to change of B.C and t/d ratio

해석결과와 절대치의 차이는 있으나 정성적인 측면에서는 동일한 잔류응력분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 수평부재 중간지점, 하연 및 수직부재의 잔류응력의 분포 또한 3절의 결과와 정량적인 측면에서 동일한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.(Fig. 9 (c)~(h))

이와 같은 해석결과로 부터 경계조건 및 형상변화에 따른 정량적 차이는 존재하나 T형 강관용접부의 잔류응력의 생성기구는 변함이 없음을 알 수 있다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

5. 결 론

본 연구에서 3차원 비정상 열전도 해석 및 열탄소성 해석을 수행하여 T형강관 용접 이음부의 잔류응력의 분포를 파악하였으며 이 결과를 토대로 잔류응력 생성 기구를 명확히 하였다. 또한, 경계조건 및 t/D비의 영향을 분석하여 잔류응력 생성기구의 타당성을 검증하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 강관 부재가 T형으로 용접 접합되었을 때, 수평부재의 상연 내측에서는 모든 응력성분은 인장을 나타낸다. 그러나 외측의 경우 열수축에 의한 기하학적 형상의 변화로 인하여 축방향응력과 두께 방향응력은 압축성분이 발생된다.

2) 수평 부재의 하연에서는 용접시 기하학적 형상변화의 영향으로 축방향응력(83MPa)이 최대 응력이 된다.

3) 수평부재의 중간요소의 잔류응력 분포는 열이력에 의해 지배된다.

4) 수직부재의 용접선단에서의 잔류응력는 수평부재 상연과 정성적으로 동일한 분포을 보이고 있다. 이는 용접선방향의 잔류응력 생성은 열이력보다는 열 수축에 의한 기하학적 형상의 변화에 더 지배되기 됨을 알 수 있다.

5) T형 강관 파이프의 잔류응력 생성기구의 타당성을 검증하기 위하여 경계조건과 t/D비의 변화에 따른 잔류응력을 검토하였으며 그 결과 잔류응력 생성기구는 변함이 없음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2003학년도 중앙대학교 학술연구지원에 의한 것입니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Seok Ku Su : New Concept of Steel-Concrete Composite Bridge, Development and issue of Steel Bridge, POSCO WorkShop(2001), 71-93 (in Korean)
2. Kyong Ho Chang : Characteristics of Out-of-Plane Deformation and Residual Stress Generated by fillet welding, Proceeding of KSSC(1999), 194-198 (in Korean)
3. Kyong Ho Chang, Sung Chul Yang and Jun Geun Han : Production Mechanism of Residual Stress Generated by Multi - Pass Welding of the Steel Pipe, 7th IWS, Vol (2001) ,1107-1112
4. Kyong Ho Chang and Sung Chul Yang : The Behavior of Stress in buried Steel Pipe Welding joint, conference of KSCE(2000), 293-296 (in Korean)
5. Kyong Ho Chang, Sung Chul Yang and Jae Hoon Kang : Production Mechanism of Residual Stress Generated by Multi - Pass Welding of the Steel Pipe, Journal of KSSC, 13-4(2001), 327-335 (in Korean)
6. Kyong Ho Chang, You Chul Kim, Horikawa : Characteristics of Out-of-plane Deformation and Residual Stress Generated by Fillet Welding, TRANSACTION OF JWRI, **27-1** (1998) pp69-74
7. Kyong Ho Chang, You Chul Kim, Horikawa : Production Mechanism of Out-of-Plane Deformation in Fillet Welding, TRANSACTION OF JWRI, Vol.27 **No.2** (1998) 107-113 1998.12.1
8. Kyong Ho Chang and Jin Hyung Lee : the Behavior of Stress in Welding Joint Ccomposd of Different Kind steel, proceeding of KSSC(2000), 194-198 (in Korean)

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.