

研究論文

熔接이음부 形狀變化에 따른 後熱處理時의 力學的 特性에 關한 研究

방한서* · 강성원** · 김기성*** · 김종명**** · 노찬승****

A Study on the Mechanical Characteristics by the Change of Bevel Angle of Welding Joint during PWHT

H. S. BANG*, S. W. GANG**, G. S. Kim***, J. M. KIM**** and C. S. RO****

Keywords : Post Welding Heat Treatment(용접후열처리), Thermal-Elasto-Plasto-Creep Analysis(열 · 탄 · 소성 · 크립해석), Welding Residual Stress Relief(용접잔류 응력제거), Creep-Strain(크립 변형도), Isoparametric-Element(아이소파라메트릭 요소)

Abstract

In order to define the effects on shapes of welding joint, during Post Welding Heat Treatment (PWHT), we have carried out numerical analysis on the several test pieces by using computer program which was based on thermal-elasto-plastic-creep theories for the study. And then, welding residual stresses after PWHT were measured same test-pieces to compare with the results of numerical analysis.

The main results obtained from this study is as follows :

- 1) The distribution modes of welding residual stresses are same on the all test pieces after and during PWHT by the both sides (measurement and numerical analysis).
- 2) The mechanical difference for change the thickness of plate and bevel angle are not appeared
- 3) In a mechanical point of view (like material quality test, welding deformation etc.), minimum bevel angle (40°) is more suitable than maximum bevel angle (70°).

* 정회원, 조선대학교 선박해양공학과

** 정회원, 부산대학교 조선해양공학과

*** 비회원, 인하대학교 선박해양공학과

**** 학생회원, 조선대학교 대학원 선박해양공학과

이 연구는 1995년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임 (과제번호 : 93-0200-03-01-3)

1. 서 론

최근 급속한 산업의 발달로 인하여 각종 플랜트, 선박 및 산업기기 등의 대형화 추이에 따라 후판의 사용이 증대되고 있는 실정이다.

이들 후판은 다층다패스의 용접으로 인하여, 잔류응력의 분포가 보다 복잡한 양상을 나타내며, 또한 재질의 열화를 수반하고 있다. 따라서, 용접부의 잔류응력 및 재질의 열화는 구조물의 신뢰성 및 안전성을 현저히 저하시키므로, 종종 잔류응력의 제거 및 재질의 연화를 목적으로 응력제거 후열처리를 행하고 있는 실정이다.

그러므로, 본 연구에서는 판두께 및 용접개선각의 크기가 후열처리에 미치는 역학적 현상을 파악하여 용접이음부의 최적 및 최소개선각을 규명하고자 하였다.

따라서, 본 연구를 수행하기 위하여 평면변형 열탄소성크립해석 이론을 유한요소식으로 정식화한 후, 아이소파라메트릭(Isoparametric) 4절점 요소를 이용하여 자체 개발된 수치해석용 컴퓨터 프로그램을 사용하여, 용접이음부 형상변화를 고려한 각시험편에 대하여 수치시물레이션을 수행하여 상당크립변형도, 크립변형도 누적, 용접후열처리시의 잔류응력, 상당잔류응력 등의 크기 및 분포와 발생기구를 규명하여, 최적 용접이음부 형상에 대한 근거를 마련하고자 하였다.

또한, 실제작된 6종류의 시험편에 대하여 수치해석과 동일한 조건으로 후열처리를 실시하였고, 후열처리시의 잔류응력을 실제측하여 그 타당성을 입증하였다. 그 결과 용접부의 두께 및 개선각의 변화에 따른 역학적 제특성을 규명하여, 용접이음부 형상의 최소화 및 최적화의 이론적 근거를 제안하였다.

2. 수치해석 모델 및 시험편 선정

2.1 시험편 선정 및 조건

시험편의 크기는 길이(L)=700mm, 폭(B)=400mm로 하였으며, 두께(10mm, 20mm, 30mm) 및 개선각(최소40°, 최대70°)을 변화시킨 6종류의

시험편을 대상으로 수치해석 및 후열처리 실험을 수행하였다. 시험편 재료는 용접구조물 중 가장 일반적으로 사용하고 있는 연강(SS41)을 선택하였다. 또한, 용접방법은 Submerged-Arc용접(다층다패스)을 실시하였으며, 용접입열량 및 용접조건은 본 연구의 전단계에서 기재된 바 있는 「후판 용접이음부의 열분포 특성에 관한 연구」와 동일한 조건으로 수행하였다.

수치시물레이션 및 후열처리시험 조건은, 후열처리중에 새로운 열응력이 발생되지 않도록 하기 위해, 試驗體全體가 일정하게 온도가 上昇하도록 維持速度를 100℃/h로 하였고, 維持溫度는 600℃에서 1시간으로 하였다. 또한, 400℃이하의 온도역에서는 크립변형도(Creep Strain)가 너무나 적어서 400℃이하에서는 크립변형도가 발생하지 않는 것으로 하였다. 더우기 용접급속, 열영향부 및 모재의 크립속도는 전부 동일하게 취급하였다.

2.2 CREEP 해석 이론 및 모델

수치해석용 모델은 Fig. 1에 나타내었으며, 역학적 대칭성을 고려하여 반폭에 대하여 수치해석을 수행하였다. 경계조건은 무한판으로 가정한 역학조건을 고려하여 자유롭게 팽창 및 수축할 수 있도록 하여 기준점에서 쏘자유도를 구속하였고, X=0, Y=200mm의 단부에서는 X방향의 변위만 구속하였다. 또한, 평면변형 열탄소성Creep 수치해석에서의 초기응력은 평면변형 열탄소성 수치해석시의 용접잔류응력을 사용하였다.

평면변형 熱彈塑性 크립해석에서 사용한 크립法則은 아래 식에 나타내었다.

- (1) 천이크립法則(변형도 경화법칙) : 遷移크립速度가 定常크립速度보다 클 경우 사용

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = 32m A^{1/m} \bar{\sigma}^{m-1} (\bar{\epsilon}^c) \{\sigma\}$$

- (2) 정상크립法則 : 천이크립속도가 정상크립속도보다 작게 된 後에 사용

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = 32\beta \sigma \{\sigma\}$$

여기서, $\{\dot{\epsilon}^c\}$: 크립변형속도,
 $\bar{\epsilon}^c$: 상당크립변형도, $\{\sigma\}$: 편차응력,

$\bar{\sigma}$: 재료의 상당응력, A, M, V, β, n : 물리적 정수이다.

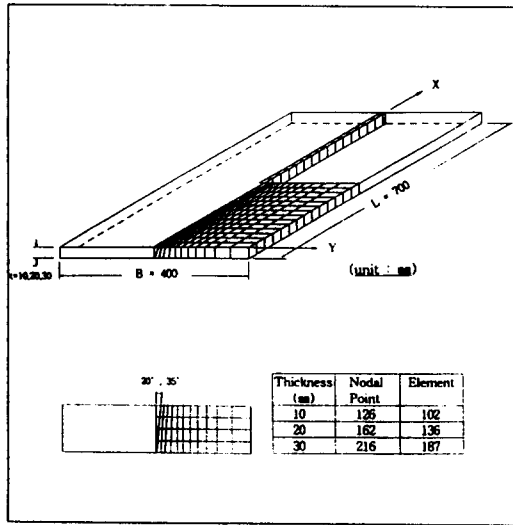


Fig. 1 FEM Model for Welding Residual Stress

3. 열탄소성 및 열탄소성Creep 수치해석 결과

두께 및 용접이음부의 홈 형상을 변화시킨 6종류의 시험편에 대하여 자체 개발된 평면변형 열·탄·소성·Creep 해석용 컴퓨터 프로그램을 사용하여 수치시물레이션을 수행하였다. 이들 해석 결과에 대한 역학적 특성(크립변형도 누적, PWHT 시의 잔류응력등)을 각 시험편별로 분석하여, 각각에 대한 열·탄·소성 해석시와 후열처리시의 역학적 특성을 아래와 같이 규명하였다.

평면변형 열탄소성 해석은 크게 두께 및 개선각의 형상변화에 따른 용접잔류응력의 분포형태와 잔류소성변형도의 분포양상 및 크기에 주안점을 두고 고찰하였고, 평면변형 열탄소성creep 해석은 두께 및 개선각의 변화에 따른 후열처리시의 잔류응력과 creep변형도 누적 및 완화과정에 주안점을 두고 고찰하였다.

3.1 두께변화에 따른 고찰

개선각의 형상 및 크기는 일정하게 유지하고, 두께를 $t=10, 20$ 및 30mm 로 변화시켰을 경우의 열탄소성해석시와 열탄소성creep해석시의 결과에 대해, 시험체 상표면에서 두께방향으로 $z=1.5\text{mm}$ 떨어진 지점에서 고찰해 보았다.

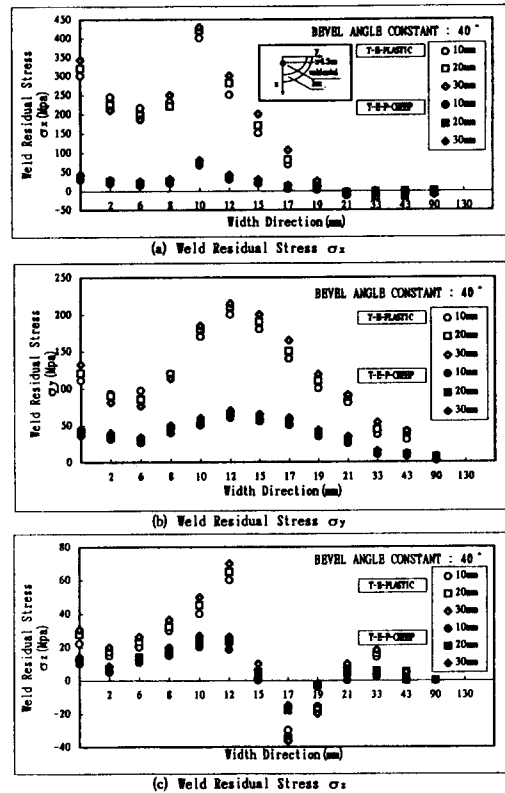


Fig. 2 Distribution of residual stress T-E-Plastic Simulation and during PWHT (Bevel angle constant: 40°)

Fig.2 (a), (b), (c)는 개선각을 40° 로 일정하게 하고, 두께를 변화시켰을 때의 용접폭향(y방향)으로의 열탄소성해석 및 열탄소성creep해석(후열처리)시의 용접잔류응력의 각 방향성분(σ_x, σ_y 및 σ_z)을 도시한 것이다.

먼저, 열탄소성해석 결과를 보면, 용접잔류응력 성분들은 두께변화에 따라 일정한 분포형상을 나

타내었으며, 그 차도 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한, 열탄소성creep해석 결과에 대해 고찰해보면, 두께변화에 따라 용접후열처리시의 잔류응력성분의 분포형태도 동일한 양상을 나타내고 있고, 잔류응력의 완화양상을 보면, 각 성분 모두 응력완화 곡선의 분포양상은 거의 변화하지 않으면서 완화되었다. 크기를 각 성분별로 비교해 보면 σ_x 성분의 응력완화 정도는 매우 크게 나타났으나, σ_y 및 σ_z 성분의 완화 정도는 그 크기가 그다지 크지 않았으며, $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다. 또한, 개선각을 70°로 일정하게 유지하고 두께를 변화시켰을 경우도 동일한 결과를 나타내었다.

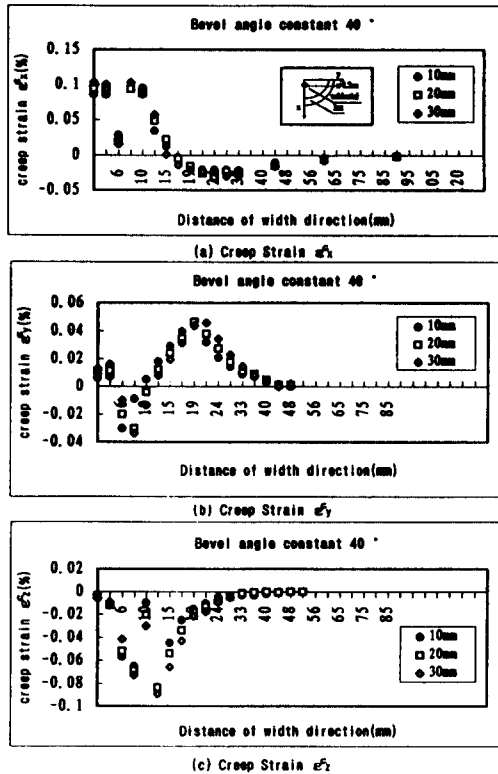


Fig. 3 Distribution of creep strain during PWHT (Bevel angle constant : 40°)

Fig. 3 (a), (b), (c)는 개선각이 40°로 일정하고, 두께가 $t=10\text{mm}$, 20mm 및 30mm 로 변화할 때의 열탄소성creep해석시의 크립변형도 성분의 누적을

나타낸 것이다. 그림에서 도시한 바와 같이 시험편 폭방향(y방향)으로의 크립변형도 누적성분들 (ϵ_x , ϵ_y 및 ϵ_z)이 모두 두께의 변화에 따라 분포형상의 변화도 발생하지 않았으며, 그 차도 거의 발생되지 않음을 알 수 있다. 또한, 후열처리 수치해석 중에는 소성변형도는 발생하지 않았다.

3.2 개선각 변화에 따른 고찰

두께를 일정 ($t=20\text{mm}$) 하게 유지하고, 개선각을 40°에서 70°로 변화시켰을 경우, 해석한 결과에 대해 고찰해 보았다.

먼저, 상부에서 두께방향으로 $z=1.5\text{mm}$ 떨어진 지점에서 용접폭방향으로 열탄소성해석시와 열탄소성creep해석(후열처리)시의 용접잔류응력 성분들의 형상, 크기 및 완화양상에 대해 고찰해 보았다.

Fig. 4 (a), (b), (c)는 두께가 20mm이고, 개선각이 40°에서 70°로 변화할 때의 용접잔류응력성분 (σ_x , σ_y 및 σ_z)들의 분포양상을 용접폭방향(y방향)으로 도시한 것이다. 열탄소성해석 결과 개선각의 변화에 따른 분포양상은 동일하였으며, 그 크기의 대차도 거의 발생되지 않았다. 또한, 각 방향의 성분들의 크기를 비교해 보면, $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났으며, 이는 각 방향의 역학적 구속력의 차에 기인한 결과라 사료된다. 또한, 후열처리시의 해석 결과를 보면, 잔류응력 분포는 양시편이 공히 같은 양상을 나타내고 있으며, 특히, 길이방향(σ_x)의 잔류응력성분의 완화가 다소 크게 나타났으며, 폭방향의 용접잔류응력 성분(σ_y) 및 두께방향의 응력성분(σ_z)은 양시편 모두 절대크기도 작지만, 완화정도도 크지 않았다. 또한, 열탄소성해석 결과와 비교해 보면, 개선각의 변화에 따른 분포양상의 변화는 거의 발생하지 않았으며, 열탄소성해석시 발생한 용접잔류응력 성분 중 용착침속 및 HAZ에서의 압축성분은 σ_x 및 σ_y 성분은 크게 완화되었으나, σ_z 성분의 완화정도는 적게 나타났다.

또한, 개선각의 변화에 따른 후열처리시의 잔류응력 성분들의 완화정도를 크기순으로 나타내면, $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다.

Fig. 5 (a), (b), (c)는 두께가 20mm이고, 개선각이 40°에서 70°로 변화할 때의 크립변형도 누적성분 (ϵ_x , ϵ_y 및 ϵ_z)의 분포양상을 용접폭방향(y방향)으

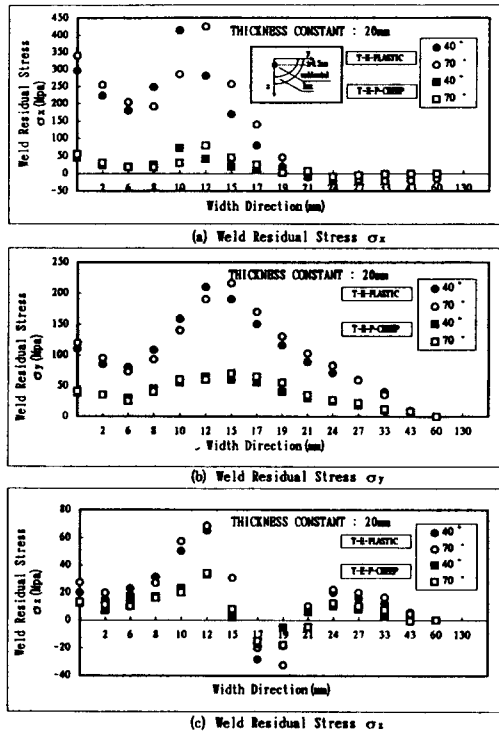


Fig. 4 Distribution of residual stress T-E-Plastic Simulation during PWHT (Thickness constant : 20mm)

로 도시한 것이다. 그림에서 주목하여 보면, 두께 방향성분인 ϵ_z 값이 큰 음의 값을 나타내고 있는데, 이러한 양상을 나타내는 이유는 역학적 구속력이 길이 및 폭방향에 비해 두께방향이 매우 작으므로 일정체적을 유지하기 위한 조건을 만족하기 위해 발생된 것이라고 사료된다. 또한, 10mm 및 20mm의 해석 결과에서도 두께방향의 응력성분인 σ_z 성분은 음의 값을 나타냈다.

Fig.6 (a), (b)는 두께가 20mm이고, 개선각이 40°에서 70°로 변화할 때의 상당응력 분포를 후열처리 전과정을 통해 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 40° 및 70° 모두 용접후열처리 초기에서의 응력 완화정도는 용착금속 및 HAZ(열영향부)에서 뚜렷하게 나타난다. 그러나, 용착금속 및 HAZ, 모재사이의 응력차가 없어진 후에는 거의 전영역에 걸쳐 일정하게 응력이 완화됨을 나타내고 있다.

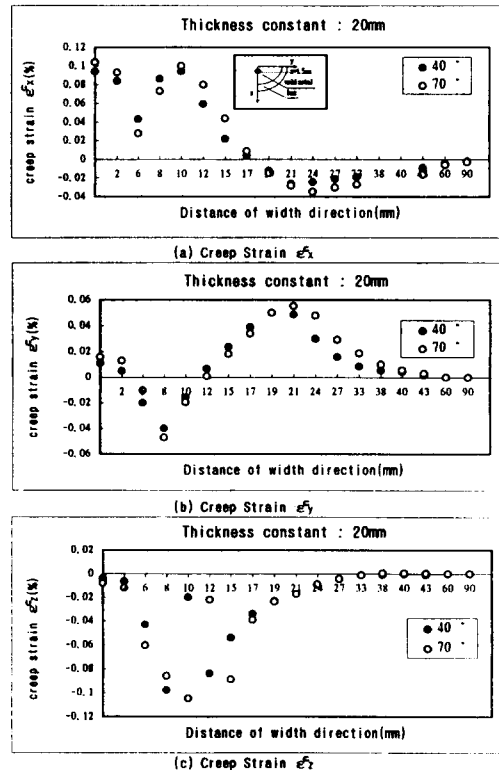


Fig. 5 Distribution of creep strain during PWHT (Thickness constant : 20mm)

4. 열탄소성Creep 수치해석 및 후열처리의 응력계측 결과

본 절에서는 수치시뮬레이션 및 후열처리후의 잔류응력 계측 결과를 비교해 보았다. 후열처리의 잔류응력의 계측은 수치시뮬레이션을 통하여 응력이 급격히 변하는 주목점에 1축(다축: gauge wire 10개, type: FYV-1-1) 및 2축 게이지를 사용하여 계측하였고, 이 계측점은 용접후 잔류응력을 측정했던 계측점과 동일한 위치에 선정(참고. 14)하였다.

Fig. 7 (a), (b)는 두께가 20mm이고, 개선각이 40° 및 70° 일 때 용접폭방향(y방향)으로의 용접후 열처리의 잔류응력성분(σ_x, σ_y)을 나타낸 것이다.

그림에서 도시한 바와 같이 개선각의 변화에 따

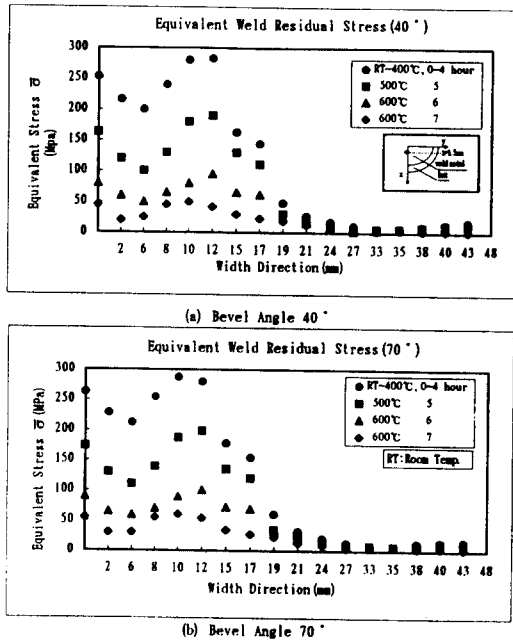


Fig. 6 Distribution of stress Through Width Direction during PWHT (Thickness : 20mm)

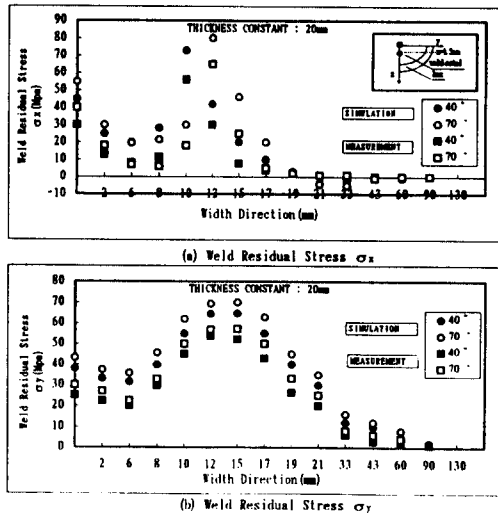


Fig. 7 Distribution of residual stress T-E-P-Creep Simulation & Measurement Value during PWHT (Thickness constant : 20mm)

른 잔류응력의 완화형상 및 완화도는 차이가 발생되지 않았으며, 해석치 및 측정치도 그 완화형상이 일정하게 나타났으나, 수치해석치가 측정치에 비해 다소 크게 나타났다. 이러한 이유는, 수치해석치는 상표면에서의 열전달 효과를 고려하여 두께방향으로 $z=1.5mm$ 떨어진 지점을 고려하였고, 계측치는 표면에서의 응력치를 측정하였기 때문에 발생하는 수치적 오차에 기인한 결과라 사료된다.

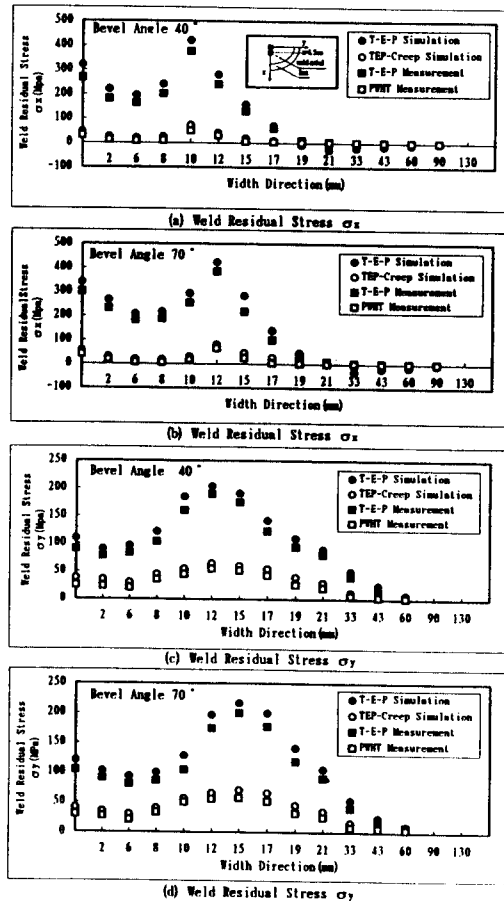


Fig. 8 Distribution of residual stress T-E-Plastic Simulation, T-E-P-CREEP Simulation, T-E-P Measurement & PWHT Measurement (Thickness constant : 20mm)

Fig. 8 (a), (b), (c) 및 (d)는 평면변형 열탄소성해석, 용접잔류응력 측정 및 평면변형 열탄소성

creep 해석과 후열처리시의 응력계측치를 두께가 20mm, 개선각이 40°에서 70°로 변화할 때를 예들 들어 용접폭방향(y방향)으로 나타내었다. (a), (b)는 용접선 길이방향(αx) 성분, (c), (d)는 용접선 폭방향(αy) 성분을 나타내었다.

그림에서 주목하여 보면, 개선각의 변화 및 수치해석치와 측정치에 따라 용접잔류응력치와 후열처리시의 응력치는 동일한 분포양상을 나타내고 있으며, 용접선 길이방향성분인 αx 성분이, 폭방향 성분인 αy 보다 역학적 구속력이 차이로 인해 쏠결과에 걸쳐 크게 나타남을 보이고 있다. 그러나, 도시한 바와 같이 개선각의 변화에 따른 역학적 차이점은 동일하게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1) 후열처리시의 잔류응력의 분포형상은 후열처리전과 수치해석 및 계측을 통하여 동일한 분포양상을 나타냈다.

2) 두께변화에 따른 후열처리시의 잔류응력의 완화정도는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다.

3) 개선각의 변화에 따른 후열처리시의 잔류응력의 완화정도는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다.

4) 크립변형도 성분 중 판두께방향 성분인 ϵ_x^c 성분은 큰 음의 값을 나타냈다.

5) 두께 및 개선각의 변화에 따른 역학적 차이점은 수치해석 및 계측 결과 동일하게 나타났다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 용접후열처리시의 용접이음부 형상변화(두께 및 개선각)에 따른 역학적 차이점은 동일하며, 이들 결과에 의하여 최적 용접이음부 형상은 개선각이 40°일 때라고 사료된다.

參 考 文 獻

1. Bang Han-Sur 外, "Mechanical Behavior during SR-treatment of Welding Residual Stress Through Thickness, Trans. of JWRI, Vol. 19, No. 2 (1990)
2. Y. Ueda, K. Fakada ; Application of Finite Element Method for Analysis on Process of Stress Relief Annealing, Journal of J. W. S., 44-11 (1975), 902-908
3. R. A. Swift ; The Mechanism of Stress Relief Cracking in 21/4Cr-1Mo Steel, Weld. J, Vol. 50, 5 (1971), 195-201
4. A. J. A. Parlanc ; Residual Stresses in Thick Weldments A Review of Contemporary Measurement Techniques, The Welding Institute, Abington, Cambridge, England, Aug. 1977
5. Y. Ueda, K. Nakacho ; An Estimating Method of Reduction of Welding Residual Stress Relief Annealing(I), 1-2(1983), 174-182
6. T. Naiki, Y. Yamazaki, Y. Manago, H. Okabayas ; Stress Relief Cracking in Heat-Affected Zone(I), Journal of Japan Welding Society, 33권 9호(1964), 710-717
7. K. J. Bathe ; Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall(1982)
8. S. Kanazawa, K. Yamato, T. Takeda, K. Hasimoto ; Study of Reheat Cracking in Weld-ment(I), Journal of Japan Welding Society, 44-10(1975), 791-798
9. A. Kumar, "Stability Theory of Structures", McGRAW-HILL Publishing Company Limited, pp. 15-55 (1985)
10. Bone. P. M, "Measurement of Displacement, Strains and Stress by Holography", London, pp. 81-98
11. Z. Daley, P. D. Hibbert, "Computation of Temperature in Actual Weld Design", America Welding Journal, Vol. 54, No. 11, pp. 385-392 (1975)
12. Atsushi Seto, Isao Soya, Yoichi Tanaka, "Enhancement and Thickness Effect of Strength in Steel Joints with Improved Weld", 日本造船學會論文集, 第172號, pp. 617-626
13. 上田 外, "厚板補修溶接部の力學的特性", 日本溶接學會論文集, 第4券, 第3號, pp. 533-539 (1986)

14. 房漢瑞 外; 熔接이음부의 형상最適化에 關한 研究, 大韓熔接學會 發表, 10(1994)
15. 房漢瑞, 金裕哲; 有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元 非定常 熱傳導解析, 大韓熔接學會誌, 9-2(1991), 37-43
16. 房漢瑞; 厚板熔接部의 力學的 特性, 大韓熔接學會誌, 10-4(1992), 250-258
17. 佐藤, 鋼構造物の溶接低溫割れ感愛性の評價について, JSSC, 3(1967), 23號
18. 佐藤, 向井, 豊田; 溶接工學, 理工學社
19. 福田敬二: 殘留應力測定一般理論と3次元熔接殘留應力測定法開發に關する研究, 大阪大學提出學位論文(1980)
20. 寺崎俊夫, “構造用材料の溶接殘留應力 溶接變形におよぼす溶接諸條件の影響に關する研究”, 昭和51年5月, 博士學位論文集, pp. 1-30
21. Y. Fujita, T. Nomoto, “熱彈塑性 問題에 關한 研究”, 日本造船學會論文集, 第130號, pp. 323-330 (1971)
22. Yukio Ueda, Keiji Nakacho, Yu Chul Kim, “溶接殘留應力の解析と測定の材料力學(數值解析入門)”, 日本溶接學會誌 第55卷 第6號, pp. 336-348