

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

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

조선대학교 방한서, 부산대학교 강성원, 인하대학교 김기성
조선대학교 대학원 *김종명, 노찬승

1. 서론

최근 용접구조물의 대형화 추세에 따라 용접이음부의 형상도 두께 및 개섩각의 차에 따라 다양하게 변화하고 있는 실정이다. 특히, 이러한 용접이음부를 가진 구조물의 용접잔류응력의 크기와 분포는 매우 다양하며, 이런 구조물들이 원자로, 가스터빈, 발전소의 보일러관 등과 같이 고온에서 사용되어지면 단시간의 항복강도보다 훨씬 작은 하중에서도 상당한 속도로 변형이 일어나며, 장기간 하중을 받으면 결국 파괴가 발생한다. 그러므로, 용접잔류응력의 완화를 목적으로 용접후열처리(Post Welding Heat Treatment)가 폭넓게 수행되어 지고 있다. 따라서, 용접이음부의 개섩형상 변화에 따른 용접후열처리(PWHT)시의 역학적 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 용접후열처리시의 역학적 특성(Creep Strain누적 및 열처리후의 잔류응력)을 규명하기 위해 평면변형 열탄소성크립해석 이론을 유한요소식으로 정식화 한 후, 아이소파라메트릭(Isoparametric) 4절점 요소를 이용하여 자체개발된 수치해석용 컴퓨터 프로그램을 사용하여, 용접이음부 형상변화를 고려한 각시험편에 대하여 수치시뮬레이션을 수행하여 상당크립변형도, 크립변형도, 용접후열처리후의 잔류응력, 상당잔류응력 등의 크기 및 분포와 발생기구를 규명하여, 최적용접이음부 형상에 대한 근거를 마련하고자 하였다. 또한, 평면변형 열탄소성Creep해석은 평면변형열탄소성 해석 결과에 의한 용접잔류응력을 초기응력으로하여 수행하였다.

2. Creep 모델선정 및 수치해석 조건

시험편의 크기는 길이(L)=700mm, 폭(B)=400mm로 하였으며, 두께(10mm, 20mm, 30mm) 및 개선각(40°, 70°)을 변화시킨 6종류의 시험편을 대상으로 수치해석을 수행하였다.

또한 용접방법은 Submerged-Arc 용접을 수행하였으며, 입열량 $Q=27\text{kJ/cm}$, 열효율 $\eta=0.9$, 용접속도 $v=30\text{ cm/min}$ 으로 하였다.

수치해석용 모델은 Fig. 3에 나타내었으며, 역학적 대칭성을 고려하여 반쪽에 대하여 수치해석을 수행하였다. 경계조건은 무한판으로 가정한 역학조건을 고려하여 자유롭게 팽창 및 수축 할 수 있도록 하여 기준점에서 전자유도를 구속하였고, X=0, Y=200mm의 단부에서는 X방향의 변위만 구속하였다.

또한, 평면변형 열탄소성Creep수치해석에서의 초기응력은 「Butt 용접이음부의 형상 최적화」의 결과에서 도출한 평면변형 열탄소성 수치해석시의 용접잔류응력을 사용하였다.

3. 평면변형 열탄소성 및 평면변형 열탄소성Creep해석 결과

두께 및 용접이음부의 홀 형상을 변화시킨 6종류의 시험편에 대하여 자체개발된 평면변형 열탄소성Creep 컴퓨터 프로그램을 사용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 이들 해석 결과에 대한 역학적 특성(크립변형도, PWHT후의 잔류응력등)을 각 시험편별로 분석하여, 각각에 대한 열탄소성 해석시와 후열처리후의 역학적 특성을 아래와 같이 규명하였다.

3.1 평면변형 열탄소성 해석 결과

평면변형 열탄소성 해석에서 구해진 개선각이 40°로 일정하고, 두께가 t=10, 20 및 30mm로 변화할 경우 시험체 상표면에서 $z=1.5\text{mm}$ 떨어진 지점에서 용접 폭방향(y방향)으로의 용접잔류응력 성분의 분포 및 크기를 Fig.4에 나타내었고, 용접잔류 소성변형도를 Fig.5에 나타내었다. 또한, 두께를 일정하게 하고, 개선각을 40°에서 70°로 변화시켰을 경우의 용접잔류응력 분포 및 잔류소성 변형도 분포를 Fig.6 및 Fig.7에 나타내었다. 여기에서 구하여진 용접잔류응력을 초기 용접잔류응력으로하여 두께 및 개선각의 변화를 고려한 각각의 시험편에 용접후열처리를 수행하는 것으로 하였다.

3.2 평면변형 열탄소성 creep 해석 결과

3.2.1 두께변화에 의한 해석 결과

Fig. 8 (a),(b),(c)는 개선각이 40° 로 일정하고, 두께가 $t=10, 20$ 및 30mm 로 변화할 경우 시험체 상표면에서 $z=1.5\text{mm}$ 떨어진 지점에서 용접 폭방향으로의 용접후열처리 후의 잔류응력 성분의 분포 및 크기를 나타낸 것이다.

그림에서 주목하여 보면, 용접잔류응력 성분(σ_x, σ_y 및 σ_z) 모두 두께의 변화에 따라 용접후열처리후의 잔류응력성분의 분포형태는 동일한 양상을 나타내고 있고, 그 크기의 차도 거의 발생되지 않음을 알 수 있다.

잔류응력 성분의 완화양상을 열탄소성 해석시의 용접잔류응력 성분의 분포도인 Fig.4와 비교해 보면 각 성분(σ_x, σ_y 및 σ_z) 모두 응력완화 곡선의 분포형상은 거의 변화하지 않으면서 완화된 것이다. 그 크기를 비교해 보면 σ_x 응력완화 정도는 매우 크게 나타났으나, σ_y 및 σ_z 성분의 완화 정도는 그 크기가 많지 않았다. 응력완화 정도의 크기를 각 성분별로 비교해 보면 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다.

Fig. 9 (a),(b)는 개선각이 일정하고, 두께가 $t=10, 20$ 및 30mm 로 변화할 때 용접 폭 방향으로의 크립변형도 성분의 누적을 나타낸 것이다.

3.2.2 개선각 변화에 의한 해석 결과

두께를 일정하게 하고, 개선각을 40° 에서 70° 로 변화시켰을 경우, 해석결과를 고찰하여 보았다.

먼저, 상부에서 두께방향으로 $z=1.5\text{mm}$ 떨어진 지점에서 용접폭방향으로 후열처리후의 잔류응력완화 및 크립변형도 성분의 누적에 대해 고찰해 보았다. Fig. 10은 두께가 10mm , Fig. 11은 20mm , Fig. 12는 30mm 일때 개선각의 변화에 따른 용접후열처리(응력제거 열처리)후의 잔류응력완화의 분포도이다. 도시한바와 같이 잔류응력분포는 양시편이 공히 같은 양상을 나타내고 있으며, 특히, 길이방향(σ_x)의 잔류응력성분의 완화가 다소 크게 나타났으며, 또한, 폭방향의 용접잔류응력 성분(σ_y) 및 두께방향의 응력성분(σ_z)은 양시편 모두 절대크기도 작지만, 완화정도도 크지 않았다. 도시한 것을 Fig. 6과 비교해 보면 개선각의 변화에 따른 분포 양상의 변화는 거의 발생하지 않았으며, 완화정도는 σ_x 가 가장 나타났다. 또한, 열탄소성 해석시 발생한 용접잔류응력 성분중 용착금속 및 HAZ에서의 압축성분은 σ_x 및 σ_y 성분은 크게 완화되었으나, σ_z 성분의 완화정도는 적게 나타났다. 개선각의 변화에 따른 후열처리후의 잔류응력 성분들의 완화정도를 크기순으로 나타내면, $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다.

Fig.13, Fig. 14, 및 Fig. 15은 두께가 각기 $10, 20$ 및 30mm 일때 개선각의 변화에 따른 잔류소성변형도를 도시한 것이다.

4. 결론

본 연구에서 얻어진 주요 수치해석 결과는 다음과 같다.

- 1) 후열처리 후의 잔류응력의 분포형상은 후열처리전과 동일한 분포양상을 나타냈다.
- 2) 두께 변화에 따른 후열처리시의 잔류응력의 완화정도는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다.
- 3) 개선팅각의 변화에 따른 후열처리시의 잔류응력의 완화정도는 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 순으로 나타났다.

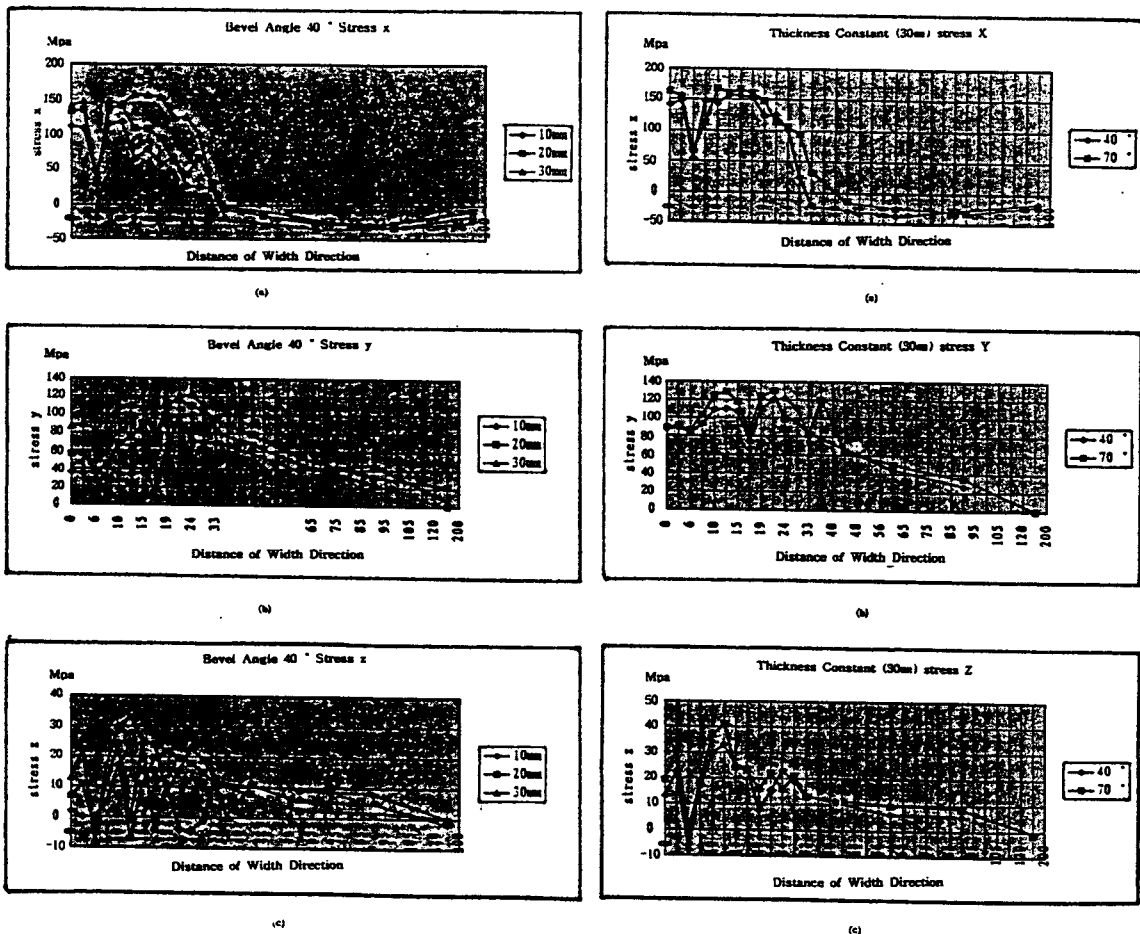


Fig.8 Distribution of Stress relaxation with bevel angle 40° Fig.12 Distribution of Stress relaxation with thickness 30mm

参 考 文 献

- 1) R.A.Swift ; The Mechanism of Stress Relief Cracking in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel, Weld.J, Vol.50,5 (1971), 195-201
- 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) A.J.A. Parlane : Residual Stresses in Thick Weldments A Review of Contemporary Measurement Techniques, The Welding Institute, Abington, Cambridge, England, Aug. 1977
- 4) Y.Ueda, K.Nakacho ; An Estimating Method of Reduction of Welding Residual Stress Relief Annealing(I), 1-2(1983), 174-182
- 5) 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
- 6) K. J. Bathe : Finite Element Procedures in Engineering Analysis,Prentice-Hall(1982)
- 7) S.Kanazawa, K.Yamato, T.Takeda, K.Hasimoto ; Study of Reheat Cracking in Weldment(I), Journal of Japan Welding Society, 44-10(1975), 791-798
- 8) A.Kumar, "Stability Theory of Structures" ,McGRAW-HILL Publishing Company Limited pp.15-55 (1985)
- 9) Bone. P. M, "Measurement of Displacement, Strains and Stress by Holography", London, pp81-98
- 10) Bang Han-Sur 外, "Mechanical Behavior during SR-treatment of Welding Residual Stress Through Thickness, Trans. of JWRI, Vol.19, No.2 (1990)
- 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学的特性", 日本溶接學會論文集, 第4巻, 第3號, pp.533-539 (1986)
- 14) 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
- 15) 房漢瑞 ; 厚板熔接部의 力学的 特性, 大韓熔接學會誌, 10-4(1992), 250-258
- 16) 佐藤, 鋼構造物の溶接低温割れ感受性の評價について, JSSC, 3(1967), 23號
- 17) 佐藤, 向井, 豊田 ; 溶接工学, 理工學社
- 18) 福田敬二 : 残留應力測定一般理論と3次元熔接残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)
- 19) 寺崎俊夫, "構造物材料の溶接残留應力・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
- 20) Y.Fujita, T.Nomoto, "熱弾塑性 問題에 關한 研究", 日本造船學會論文集, 第130號, pp.323-330 (1971)
- 21) Yukio Ueda, Keiji Nakacho, Yu Chul Kim, "溶接残留應力の解析と測定の材料力學(數値解析入門)", 日本溶接學會誌 第55巻 第6號, pp.336-348
- 20) 失川元基 外1人, "有限要素法による熱應力・クリープ °・熱傳導解析", (株)サイエンス, pp.115-134 (1985)