研究論文

熔接이음부의 形象 最適化에 關한 硏究

방 한 서* · 강 성 원** · 김 종 명*

A Study on the Optimization of Shape of Weld Joints

H. S. Bang*, S. W. Kang** and J. M. Kim*

Key Words : Thermal-Elasto-Plastic (열탄소성), Plane-Deformation (평면변형) Welding Bevel Angle (용접개선각), Multi-layer Multi-pass (다층다패스) Optimization, Minimization (최적화, 최소화), Equivalent Stress (상당응력) Welding Residual Stress (용접 잔류응력), Welding Residual Plastic-Strain (용접 잔류 소성변형률)

Abstract

Welding is one of the most important and popular joining techniques employed in structures. In spite of, weld designs depend on the rules and regulations. Moreover, the study to optimize a shape of welding joint not may be sufficient and systematic on the theoretical and experimental sides.

Therefore, in this study, a computer program based on thermal elasto-plastic theory is developed for optimizing (minimizing) shape of weld joints. By the results, study is made on the characteristics of the distributions of welding residual stresses and plastic strains, and their production mechanisms. Also, various kinds of tests are carried out to find out mechanical characteristics due to shape of weld joints.

As a result of this optimization (minimization) of weld joints, the productivity and the reliability will be improved.

※ 1996년 10월 14일 접수
이 연구는 1995년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임. (과제번호: 93-0200-03-01-3)
* 정회원, 조선대학교 선박해양공학과
** 정회원, 부산대학교 선박해양공학과

1. 서 론

용접구조물을 제작할 때 용접개선각은 강판의 두께에 따라 각종 규정이나 규칙(KS, JIS, DIN 및 LR, ABS, KR등)에 의거하여 일정하게 규정되어 있지만, 각종 규정 및 규칙에 의하여 정하여진 개선각도에 대한 이론 및 실험결과와 작업조건을 고려한 체계적인 연구결과가 미흡한 실정이다.[1,2,3,4,5] 따라서, 용접이음부의 역학적 특성을 보다 과학적인 이론 및 실험의 결과를 통하여 최적용접이음부의 형상을 규명하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

따라서, 용접열원의 크기 및 분포를 열하중으로 하여 용접체에 발생하는 용접잔류응력 및 용접잔류 소성변형률 등을 정확도 높게 해석하고, 이들의 결과를 분석하여 최종적으로 용접이음부의 최적형상을 도출하고자 하였다.

본 연구에서는, 용접잔류응력을 정확도 높게 해석하기 위하여 열탄소성 이론을 도입하였으며, 이들을 유한요소식으로 정식화한 후, 아이소파라메트릭(isoparametric) 3 또는 4절점 요소를 이용하여 수치해석용 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 또한, 시험편을 제작하여, 단면절단법으로 계측한 측정값과 프로그램의 해석결과를 비교검토하여 본 프로그램의 타당성을 검증하였다.

최종적으로는, 개발된 프로그램을 사용하여 각종 시험편에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하여 용접잔류응력, 상당응력, 및 용접잔류 소성변형률등의 크기, 분포 및 발생기구를 규명하고 아울러 잔류응력을 계측하였으며 또한, 시험편에 대하여 성능검사 및 조직검사를 실시하여 최적 용접이음부의 형상에 대한 이론적 및 실험적 근거를 체계적으로 제시하고자 하였다.

2. 열탄소성 이론의 유한요소법의 정식화

열응력 문제에서는 맨 처음 연속체의 비정상 열전도문제, 즉 시간과 함께 시시각각 변화하는 온도분포를 구하여야만 한다.[6,7,8] 이 온도변화에 따라 열 변형률(thermal strain)이 변화하기 때문이며, 이것을 바로 초기변형률로 취급한다.

더우기, 각 요소를 구성하는 재료의 물리적 성질이 온도에 따라 변화하므로 이들의 영향을 고려한 절점력과 절점 변위의 관계식을 작성하여야 한다. 따라서, 판의 용접잔류응력에 대한 가장 일반적인 해석을 위하여 재료의 등방성을 고려하여 탄성 및 소성 전영역에 걸쳐 재료상수의 온도의존성을 고려하였다. 또한 소성역에서는 선형등방 경화법칙을 고려한 Von-Mises의 항복조건을 항복함수로 사용하였고, 사용요소는 isoparametric 4절점 요소를 사용하였으며, 변형율 및 응력의 관계를 소성 유동(plastic flow)이론에 기본하여 증분형으로 나타내었다.

2.1 평면변형 열탄소성 문제에 대한 기본식

재료의 물리적 성질의 온도의존성을 고려하여, 응력증분에서의 영향을 일괄하여 $(C)dT$ 라고 하면, 다음과 같이 쓸수있다.[9]

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon\} - [C]dT$$

$\{d\sigma\}$: 응력증분, $[D^e]$: 탄성매트릭스

$\{d\varepsilon\}$: 변형율증분

재료의 물리적 성질이 온도에 따라 변화하므로, 이들의 영향을 고려한, 절점력과절점변위와의 관계에서는 물체력을 무시하고, 假想일의 定理에 따라 要素의 等價절점력의 증분 $\{dF\}$ 는

$$\{dF\} = [K]\{dU\} - \{dL\}$$ 이 되고,

$\{dU\}$: 변위증분

용접에서 처럼 외력이 전혀 작용하지 않을 경우의 平衡條件式은 아래와 같이 된다.

$$\Sigma[K]\{dU\} - \Sigma\{dL\} = \Sigma\{dF\} = 0$$

따라서, 다음과 같이 최종적인 유한요소식이 구하여 진다.

$$\Sigma[K]\{dU\} = \Sigma\{dL\}$$

여기서,

$[K]=\int_v [B]^T [D][B]\,dV$: 요소의 강성 매트릭스

$\{dL\}=\int_v [B]^T [C]\,dTdV$: 등가절점력 이다.

3. 모델선정 및 수치해석 조건

시험편의 크기는 길이(L)=700mm, 폭(B)=400mm로 하였으며, 두께(10mm, 20mm, 30mm) 및 개선각(최소각 40°, 최대각 70°)을 변화시킨 6종류의 시험편을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 또한 용접방법은 Submerged Arc 용접을 수행하였으며, 재질은 연강을 선택하였고, 용접순서는 Fig. 1과 같다. 수치해석용 모델은 Fig. 2에 나타내었으며, 역학적 대칭성을 고려하여 반폭에 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.

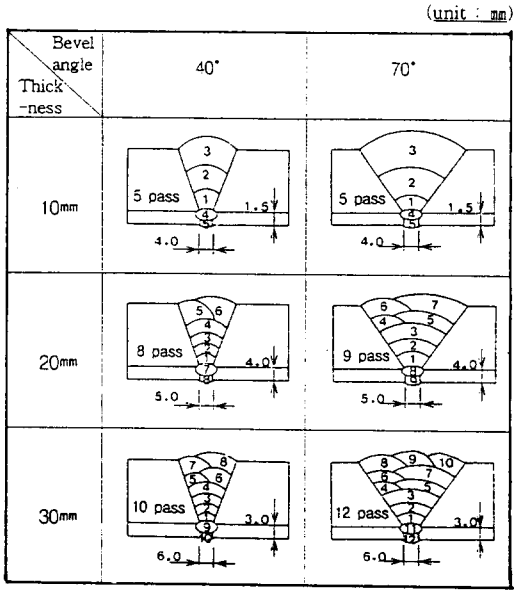
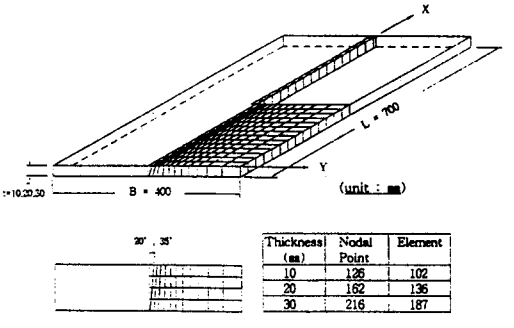


Fig. 1 Welding sequence of test specimens



Thickness (mm)	Nodal Point	Element
10	126	102
20	162	136
30	216	187

Fig. 2 FEM model for welding residual stress

4. 연구결과

4.1 수치해석 결과 고찰

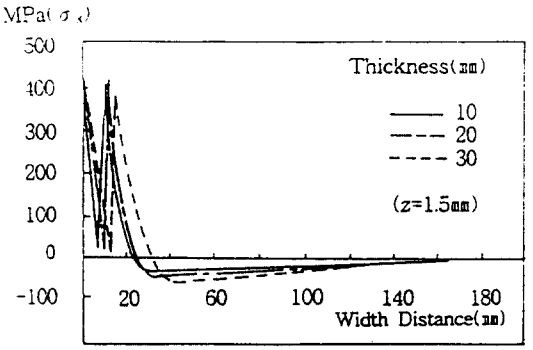
두께 및 용접이음부의 홈 형상을 변화시킨 6종류의 시험편에 대하여 자체개발된 평면변형열탄소성 컴퓨터 프로그램을 사용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 이들 해석 결과에 대한 역학적 제현상(용접잔류응력 및 용접잔류 소성변형률등)을 각 시험편별로 분석하여 각각에 대한 역학적 특성을 아래와 같이 규명하였다.

4.1.1 판 두께의 변화에 따른 영향

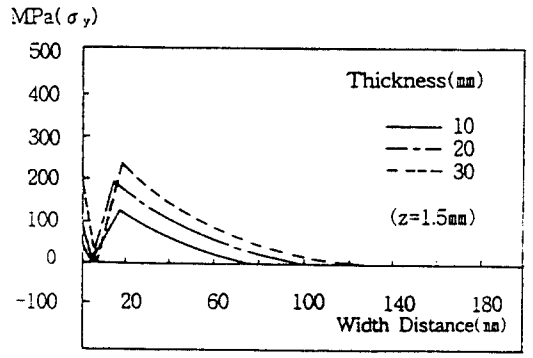
먼저 Fig. 3 (a), (b), (c)는 개선각이 40°로 일정하고, 두께가 t=10, 20 및 30㎜로 변화할 경우 시험체 상표면에서 z=1.5㎜떨어진 지점에서 용접 폭방향으로의 용접잔류응력 성분의 분포 및 크기를 나타낸 것이다. 10㎜는 실선, 20㎜는 일점쇄선, 30㎜는 점선으로 나타내었다. 그림에서 주목하여 보면, 용접잔류응력 성분(σ_x, σ_y 및 σ_z)모두 두께의 변화에 따라 응력성분의 분포형태는 동일한 양상을 나타내고 있고, 그 크기의 차이는 거의 발생되지 않음을 알 수 있다. Fig. 4 (a), (b)는 개선각이 40°이고, 두께가 변화할때 용접잔류 소성변형률 성분을 나타낸것이다. 10㎜의 경우는 실선, 20㎜는 일점쇄선, 30㎜는 점선으로 표시하였다. 도시한 바와 같이 용접잔류 소성변형률 성분(ε_x^p, 및 ε_y^p)의 분포양상 및 크기도 두께의 변화에 따라 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

이상의 결과를 고찰하여보면 잔류응력의 분포 및 크기는 소성변형도률의 크기 및 분포에 비례함

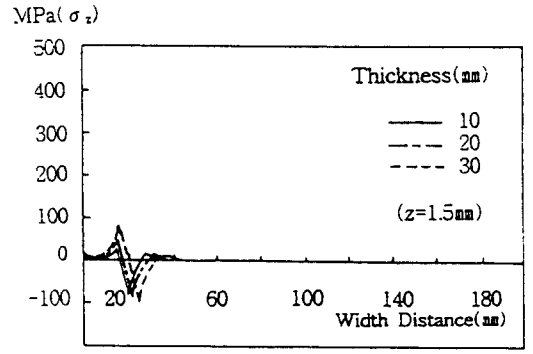
을 알수 있으며, 나아가 각시험편(판두께10, 20, 30㎜)의 용접잔류응력 분포 및 크기가 거의 일정한 것은 시험편의 폭 및 길이에 비하여 판두께의 변화에 따른 강성의 변화가 상대적으로 적기 때문인 것으로 생각된다.



(a) Welding residual stress σ_x

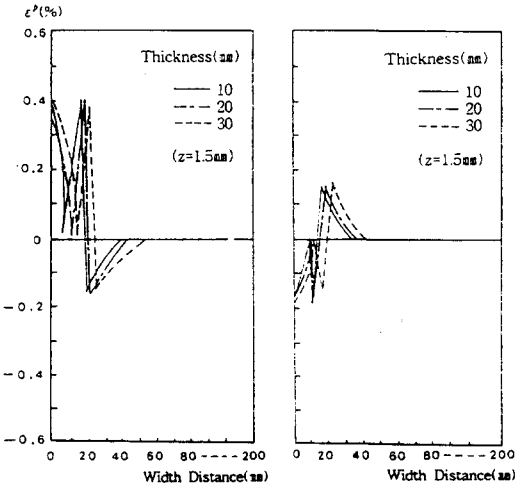


(b) Welding residual stress σ_y



(c) Welding residual stress σ_z

Fig. 3 Distribution of welding residual stresses along y-direction in bevel angle 40°



(a) Plastic-strain ε_x^p (b) Plastic-strain ε_y^p

Fig. 4 Distribution of welding residual plastic-strains along y-direction in bevel angle 40°

4.1.2 이음부 개선형상 변화에 따른 영향

두께를 일정하게 하고, 개선각을 40°에서 70°로 변화시켰을 경우, 해석결과를 고찰하여 보았다. 먼저, 상부에서 두께방향으로 z=1.5㎜ 떨어진 지점에서 용접폭방향으로의 용접잔류응력 및 소성변형도의 분포양상과 크기에 대해 고찰해 보았다. Fig. 5는 두께가 20㎜일때 개선각의 변화에 따른 용접잔류응력의 분포도이다. 도시한바와 같이 잔류응력분포는 양시편이 공히 같은 양상을 나타내고 있으며, 특히, 개선각이 70°인 경우가 열영향부에서 인접한 모재에서 길이방향(σ_x)의 용접잔류응력성분이 다소 크게 나타났으며, 또한, 폭방향의 용접잔류응력 성분(σ_y) 및 두께방향의 응력성분(σ_z)은 양시편 모두 절대크기도 작지만, 분포형태도 거의 일정하게 나타났다. 그러나, 개선각이 증가하면 응력성분의 분포형상이 그림에서 보는바와 같이 용접 폭방향을 따라 모재방향으로 이동하는 양상을 보이고 있다. 이러한 분포형태를 나타내는 이유는 개선각이 증가함에 따라 용착금속이 차지하는 영역이 폭방향으로 증가함에 기인한 것이라 사료된다. 또한, 용접폭방향으로 10㎜정도의 지점에서 압축을 나타내는 이유는 다층패스용접을 고려하였으므로 마지막 패스의 용착금속에서 나타나는 주변 금속에 기인한 불규칙한 현상 때문이라고

사료된다. 즉 기 용접시 발생된 잔류응력이 마지막 패스가 수행되어지면 온도상승(700℃ 이상 영역)에 의하여 기 발생된 잔류응력이 해방되어 마지막 패스의 냉각시 새롭게 잔류응력이 만들어지기 때문이라 고 생각된다. Fig. 6은 두께가 20㎜일 때 개선각의 변화에 따른 용접 잔류소성변형도를 도시한 것이다. 도시한 바와 같이 용접 잔류소성변형도 성분(ε_x^p, ε_y^p, ε_z^p)을 보면 양시험편 모두 크기 및 분포도가 일정하였으며, 그 크기는 $\varepsilon_x^p > \varepsilon_y^p \geq \varepsilon_z^p$ 순으로 나타났다. 또한, 10㎜ 및 30㎜의 경우도 동일한 양상을 나타내었다.

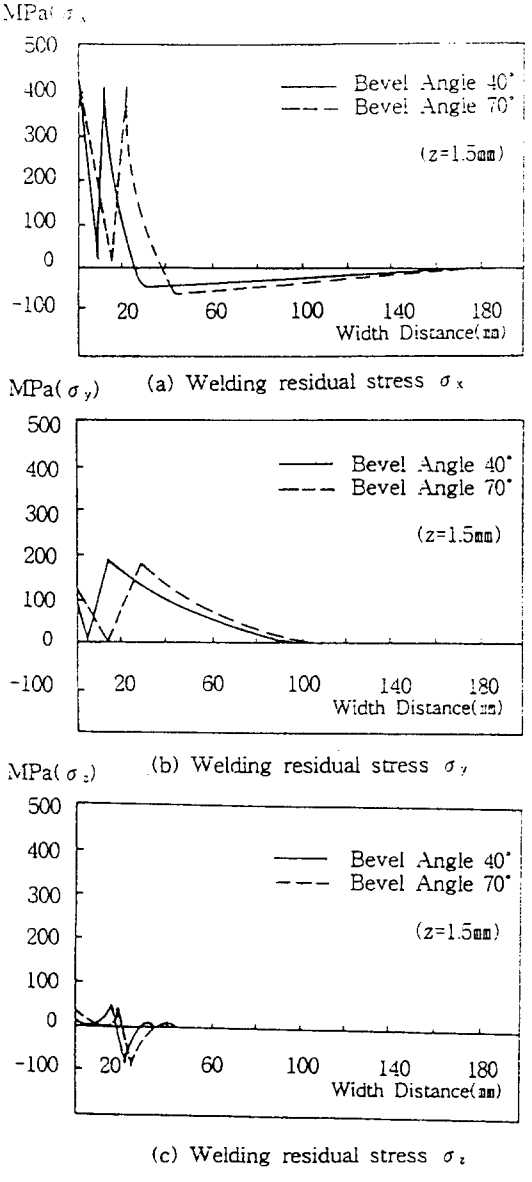


Fig. 5 Comparison of cwelding residual stresses on the bevel angle 40° and 70° with thickness 20mm

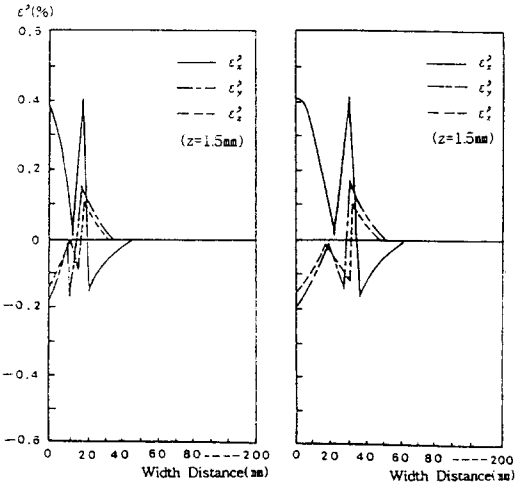


Fig. 6 Comparison of welding residual plastic-strains on the bevel angle 40° and 70° with thickness 20mm

4.2 殘留應力 測定結果 考察

4.2.1 計測 位置

용접잔류응력 측정은 계측 결과의 신뢰성을 가장 보장할 수 있는 단면절단법에 의하여 측정하였다. 계측위치 선정은 Fig. 7에 나타난바와 같이 수치해석 결과에 따라 측정점을 선정하였으며, 용접선의 길이 및 폭 방향에 대하여 계측하였다. 응력이 급격히 변화하는 지점에서는 다축(1축 : 계측간거리 1㎜ 7개)스트래인게이지를 사용하였으며, 그 이외의 지점에서는 2축 스트래인 게이지를 사용하였다.

4.2.2 計測 結果

두께 변화

Fig. 8는 개선각이 40°로 일정하고 판두께가 변화할 때의 용접 폭방향으로의 용접잔류응력 σ_x 및

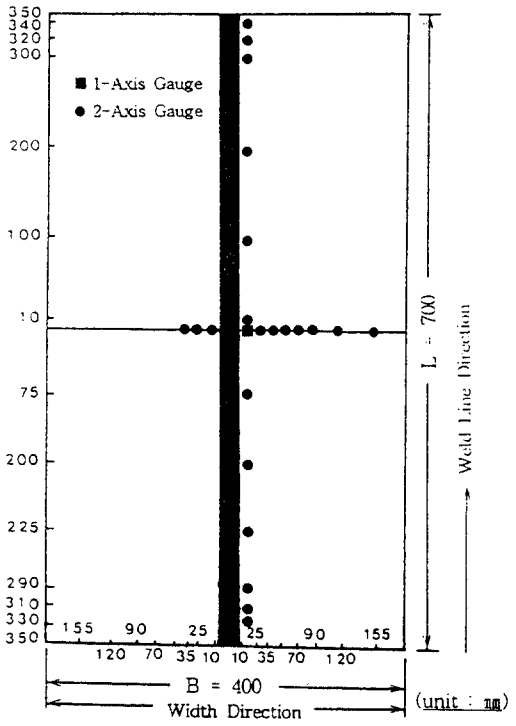


Fig. 7 Measurement points of welding residual stresses

σ_y의 분포도이고, Fig. 9는 용접선 길이방향의 용접잔류응력 성분의 분포도이다. 그림에서 주목하여 보면, 두께의 변화에 따른 용접 폭방향 및 길이방향의 용접잔류응력 측정치는 두께가 두꺼울수록 다소 높게 측정되었으나, 두께의 변화에 따른 다른 특성은 보이지 않았다.

개선각 변화

Fig. 10은 판두께가 10mm일 경우의 개선각 40° 및 70°일 때, 용접 폭방향 및 길이방향의 σ_x 및 σ_y의 분포도이다. 이들을 고찰하여 보면 먼저, 양 시험편에 존재하는 σ_x 및 σ_y는 용접이음부에서 최대값이 발생하고, 모재방향으로 가면서 점차 감소됨을 알 수 있다.

더우기, 용접이음부 형상에 대하여 고찰하여 보면, 그림에서 나타난 바와 같이 잔류응력 분포형상은 양시험편 공히 같은 양상을 보이나 응력크기는 개선각이 70°일 때가 40°일 때보다 조금 크게 나타남을 알 수 있다. 결과적으로 각 응력성분(σ_x 및 σ_y)

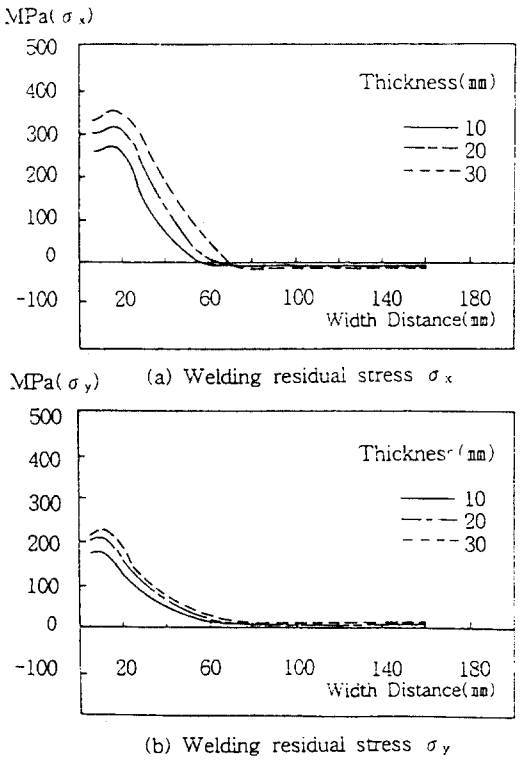


Fig. 8 Distribution of welding residual stresses along y-direcrion with bevel angle 40°

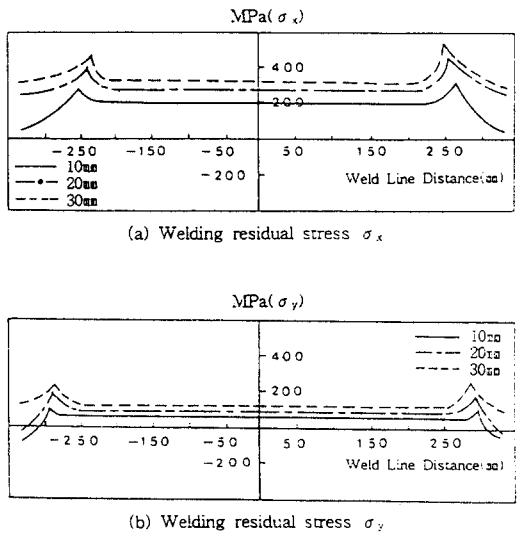
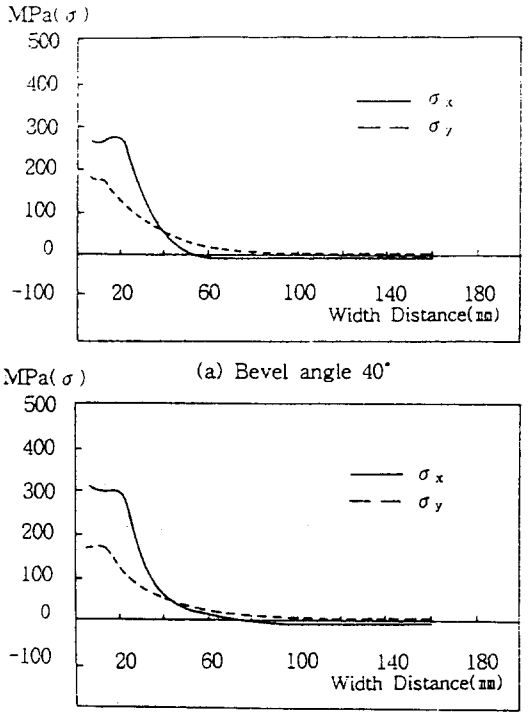


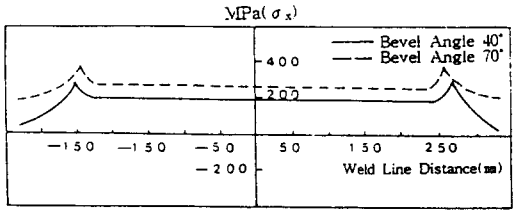
Fig. 9 Distribution of welding residual stresses along x-direcrion with bevel angle 40°

모두 개선각이 클수록 응력이 다소 크게 발생하였으며, 응력차이는 그다지 크지 않았다.



(a) Bevel angle 40°

(b) Bevel angle 70°



(c) Welding residual stress σ_x

Fig. 10 Welding residual stesses along x, y-direction with thickness 10mm

4.3 性能 試驗 結果 考察

4.3.1 性能 試驗片

용접 성능시험편은 용접시단과 종단부에서 각 10㎜씩을 삭제한 후, 각 시험편당 인장시험편(1개), 굽힘시험편(2개), 충격시험편(12개)을 6종류의 시험편에서 채취하여, 총 108개의 시험편에 대하여 실시하였다.

인장 및 굽힘시험은 최대하중 50ton의 시험기를 사용하였고, 충격시험은 Charpy충격시험기를 사용하였으며, 시험온도는 Dry ice와 알콜을 사용하여 -20℃에서 10분간 유지한후 충격시험을 실시하였다.

4.3.2 性能試驗 結果

용접이음부에 대하여 실시한 인장, 굽힘, 충격시험 결과는 다음과 같다. 인장시험을 실시한 결과 인장하중에 의한 파단위치는 각 시험편 모두 열영향부에서 인접한 모재부에서 발생하였으며, 모재와 동등한 강도를 얻을 수 있었고, 개선각의 변화에 대한 차이점은 없었다. 또한 굽힘시험 결과, 용착금속, 열영향부 등에서 균열이 발생하지 않았으며, 40°의 개선각에서도 만족한 용착금속을 얻을 수 있음을 확인하였다. 충격시험 결과에서 보면, 개선각이 클수록 입열량이 크기 때문에 충격치는 저하됨을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 주요 수치해석 결과 및 시험결과는 아래와 같다.

1) 두께를 일정(10, 20 및 30㎜)하게 하고, 개선각을 40°에서 70°로 변화시켰을 경우, 용접잔류응력 분포는 양시편이 공히 같은 형상을 나타내었고, 특히 개선각이 70°인 경우가 HAZ에 인접한 모재에서 길이방향(σ_x)의 용접잔류응력 성분이 다소 크게 나타났으며, 그외의 영역에서는 크기 및 분포의 차가 거의 없었다.

2) 폭방향의 용접잔류응력(σ_y) 및 두께방향의 용접잔류응력(σ_z)은 양시편 모두 길이 방향성분(σ_x)에 비해 그 절대크기도 작지만, 분포형태도 거의 일정하게 나타났다.

3) 용접잔류 소성변형률(ε_x^p, ε_y^p 및 ε_z^p)은 양시험편 모두 크기 및 분포도가 일정하였으며, 그 크기는 $\varepsilon_x^p > \varepsilon_y^p \geq \varepsilon_z^p$ 순으로 나타났다.

4) 용접잔류응력 측정치 각 성분의 분포양상이 수치해석 결과와 동일하였다.

5) 측정에 의한 용접잔류응력치가 수치해석치보다 절대크기가 다소 적게 나타났다.

6) 인장, 굽힘 및 충격시험 결과는 개선각의 변화에 따른 차가 발생하지 않았다.

參 考 文 獻

1. Y. C. Kim, T. Yamakita, H. S. Bang, Y. Ueda, "Mechanical Characteristics ofRepair Welding in Thick Plate", 日本溶接學會論文集, 第6券, 第1號, pp. 53-59 (1988)
2. Yukio Ueda, Keiji Nakacho, "Simplifying Analysis and Experimental Me-thods of Multipass Welding Stress in Very Thick Plates Based on Special Characteristic of its Production Mechanism", 日本溶接學會論文集, 第2券, 第1號, pp. 75-82
3. Z. Daley, P. D. Hibbert, " Computation of Temperature in Actual Weld Design", America Welding Journal, Vol. 54, No. 11, pp. 385-392 (1975)
4. 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
5. 寺崎俊夫, "構造用材料の溶接殘留應力 溶接變形におよほす溶接諸條件の影響に關する硏究", 昭和51年5月, 博士學位論文集, pp. 1-30
6. 房 漢 瑞, "有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元非定常熱傳導解析", 大韓造船學會誌, 第27券 第4號, pp. 44-50 (1990)
7. 房漢瑞, 金鍾鳴, "厚板鋼構造物 熔接이음부의 열분포 특성에 관한연구" 대한용접학회 제13권 제1호, pp. 138-144 (1995)
8. Y. Fujita, T. Nomoto, "熱彈塑性 問題에 關한 硏究", 日本造船學會論文集, 第130號, pp. 323-330 (1971)
9. 房漢瑞, "厚板熔接部의 力學的 特性", 大韓熔接學會誌, 第10券, 第4號 pp. 250-258 (1992)
10. Yukio Ueda, Keiji Nakacho, Yu Chul Kim, " 溶接殘留應力の解析と測定の材料力學(數値解析入門)", 日本溶接學會誌 第55券 第6號, pp. 336-348
11. 矢川元基 外1人, "有限要素法による熱應力・クリ-フ°・熱傳導解析", (株) サイエソス, pp. 115-134 (1985)
12. K. J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, pp. 14-88 (1986)
13. G. Dhatt, "The Finite Element Method Displayed", John and Sons Inc, pp. 20-65 (1982)
14. Koichi Masubuchi, Masayoshi Arita, "溶接中の熱應力について", 日本造船學會論文集, 第130號, pp 203-218
15. 豊田政男, "熔接にあり熱部近方うける熱ひす"み履歷と殘留應力°殘留ひす"み", 日本造船學會論文集, pp. 284～291 (1976)
16. A. Kumar, "Stability Theory of Structures", McGRAW-HILL Publishing Company Limited, pp. 15-55 (1985)
17. Bone. P. M, "Measurement of Displacement, Strains and Stress by Hologrraphy", London, pp81-98
18. 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)
19. Bang Han-Sur 外, "Mechanical Behavior during SR-treatment of Welding Residual Stress Through Thickness, Trans. of JWRI, Vol. 19, No. 2 (1990)