

강판의 초기不整이 용접변형·잔류응력에 미치는 영향

박정웅*

Effects of Initial Defects on Welding Deformation and Residual Stress

Jeong-Ung Park*

Key Words : Welding deformation(용접변형), Residual stress(잔류응력), Initial defect(초기부정), Non-conformable strain(부적합strain), FEM Anaysis(유한요소법 해석)

Abstract

The residual stress generated when the steel plates were produced, did not influence on the out-of-plane deformation and residual stress generated by welding. When the initial deflection shape was a concave(Type I), the out-of-plane deformation became the same shape as that of the initial deflection and its magnitude became small. When the initial deflection made a winding in the welding direction(Type II), the initial deflection remained. When the initial deflection made a winding perpendicular to the weld line(Type III), the out-of-plane deformation became large in the plate width. The initial deflection shape did not influence on residual stress and plastic strain produced by welding.

1. 서 론

용접에 의해 생기는 변형·잔류응력이 강구조물의 제작정도, 각종강도 등에 악 영향을 미치는 것은 일반적으로 널리 알려져 있는 사실이다. 따라서 용접전에 용접에 의해 생기는 변형·잔류응력을 예측하여 이를 제어, 또는 방지하는 시스템의 구축이 요구된다. 이러한 문제는 숙련된 기능인의 감소에 따른 근본적인 대책으로 용접구조물의 제작공정에서 해결하지 않으면 안될 중요한 과제이다.

본 연구에서는 운반(적재) 및 강판제조시 필연적으로 내재하는 초기부정(초기변형과 초기잔류응력)이 용접에 의해 생기는 변형·잔류응력에 미치는 영향을 고찰한다. 또한 본 연구를 위해 개발한 열탄소성 대변

형해석 프로그램의 신뢰성을 실험에 의해 검증한다.

이를 위해 먼저, 강판제조시의 초기부정을 재현한다. 초기부정은 부적합strain을 판전체에 무작위(Random)로 분포시켜 3차원고유응력해석을 통하여 구한 후, 3차원고유응력해석에 의해 구한 초기부정을 초기조건으로 하는 강판의 Butt용접을 열탄소성대변형해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한다. 그 해석 결과를 토대로 초기부정이 용접변형·잔류응력에 미치는 영향을 고찰한다.

2. 열탄소성 대변형해석 프로그램의 신뢰성 검증

본 연구에서 개발한 열탄소성 대변형해석 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위해 해석결과와 실험결과를 비교·검토한다. 한편 검증에 사용한 시험편은 결과의

※ 1999년 4월 28일 접수

* 정희원, 삼성중공업 조선플랜트연구소 용접도장파트
park982@samsung.co.kr

정확도를 높이기 위하여 초기변형을 가지고 있는 시험편을 사용한다.

2.1 실험방법

시험편의 촌법은 길이 $L=500(\text{mm})$, 폭 $B=500(\text{mm})$, 두께 $h=6(\text{mm})$ 이다. 한편 초기변형의 최대치는 약 $25(\text{mm})$ 이고 사용한 강재는 연강이다. 초기변형형상과 개선형상은 Fig. 1에 보여주고 있다. 초기변형은 기계적 굽힘가공에 의해 만들었고, 만들어진 두개의 장방향편에 대해 용접선상의 4곳을 약 $30\sim 50(\text{mm})$ 의 길이로 가접하였다.

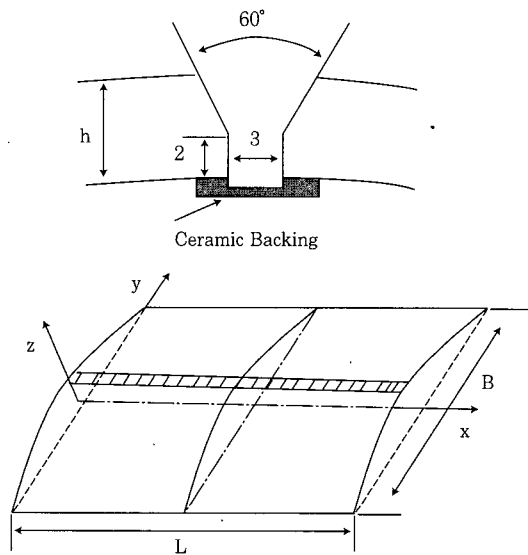


Fig. 1 Type of initial deflection and groove type.

용접은 시험편을 정반 위에 올려놓고 자동 MAG용접으로 아래보기용접을 실시하였다. 용접조건은 전압 $V=23(\text{V})$, 전류 $I=133(\text{A})$, 용접속도 $v=2(\text{mm/s})$ 이다. 실딩가스는 $\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$ 가스이고, 와이어는 YM-12, 직경은 $1.2(\text{mm})$ 이다. 한편 백킹재는 세라믹을 사용하였다.

실험에서는 온도이력, 초기변형, 용접에 의한 면외변형, 잔류strain을 측정하여 잔류응력을 추정하였다. 온도분포는 용접선 직각방향으로 시험편의 표면에 Thermo couple를 붙여 실시간으로 측정하였다. 또한, 초기변형, 면외변형은 시험편 표면에 측정위치를 마킹한 후 시험편을 4개의 편위에 올려놓고 위로부터 다이얼게이지로 3회 측정하여 평균값을 취하였다. 측정된 초기변형을 Fig. 2에 심볼로 나타내었다. 한편, 초기변형과 면외변형의 측정결과는 data의 정리를 쉽게 하기 위해 판의 끝단으로부터 $10(\text{mm})$ 내부에 있는

점을 기준으로 측정결과를 정리하였다. 잔류응력은 용접완료 후 시험편 중앙부로부터 용접선 직각방향으로 strain게이지를 표면과 뒷면에 붙여 응력완화법으로 측정하여 그 평균값으로부터 잔류응력을 환산하였다.

2.2 실험결과

먼저 온도이력의 측정결과와 일부를 Fig. 3에 실선으로 보여주고 있다. 측정위치는 용접선으로부터 거리가 $10, 50(\text{mm})$ 이다.

결과에 의하면 용접열원이 측정점에 근접하면 온도가 올라가서 그후 시간이 경과함에 따라 강판표면에서의 열전달과 강판 내부의 열전도에 의해 냉각되는 양상을 잘 보여주고 있다.

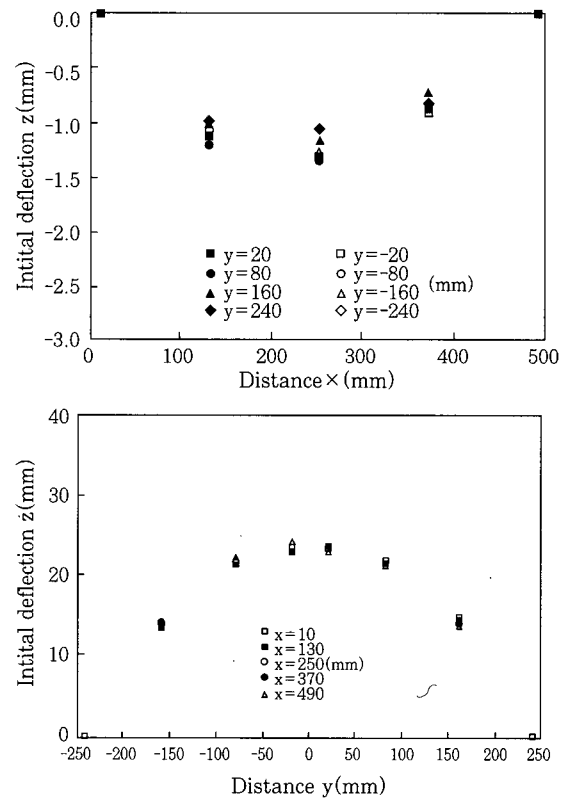


Fig. 2 Initial deflection.

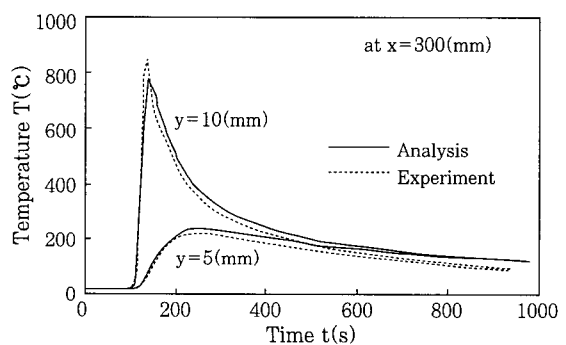


Fig. 3 Temperature distribution.

용접선방향의 면외변형의 측정결과를 Fig. 4(a)에, 용접선 직각방향의 면외변형은 Fig. 4(b)에 심볼로 나타내었다.

결과에 의하면 용접선방향의 면외변형은 초기변형보다 아래방향으로 발생하였고 크기는 용접선으로부터 멀어질수록 점점 작아지는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

용접선방향의 잔류응력은 Fig. 5에 심볼로 보여주고 있다. 결과에 의하면 잔류응력은 용접선 근방에서는 인장, 용접선으로부터 멀어질 수록 점점 작아져 $y=45(\text{mm})$ 에서는 압축응력이 발생하였다.

2.3 실험결과와 해석결과의 비교검토

2.3.1 해석모델 및 해석기법

해석모델은 Fig. 6과 같고 요소는 4절점 Isoparametric Shell요소를 사용하였다. 또한 본 프로그램은 미소변형보다 큰 대변형문제를 해석할 수 있는 기하학적 비선형과 재료가 탄성한계를 넘어 항복하여 소성역까지 해석할 수 있는 재료학적 비선형도 고려되었다. 비선형 해석시 필연적으로 발생하는 계산오차는 Newton-Raphson법을 이용하여 각 Step에서 허용오차(Error = 10E-4)의 범위 안에 들어올 때까지 계산을 반복해 수렴해를 구한 후 다음 Step을 계산

하였다.

용접입열량($Q=1223(\text{J}/\text{mm})$)은 실험에 사용한 용접조건을 식(1)에 대입하여 구한다.

$$Q = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v} \quad (\text{Joule}/\text{mm}) \quad (1)$$

여기서, η :용접효율(0.8), V :전압(V),
 I :전류(A), v :속도(mm/sec)

각 용착금속에 대한 단위 시간·체적당의 입열량(q)은 (2)식에 의해 계산된다. 또한 용접의 이동열원효과는 (2)식에서 구한 입열량(q)을 각 요소를 용접하는 데 걸리는 시간(t)동안 투여하였다.

$$q = \frac{Q \cdot l}{4.19 \cdot A \cdot l \cdot t} \quad (\text{cal}/\text{mm}^3 \cdot \text{s}) \quad (2)$$

여기서, l :용접길이(mm), $t := (l/v)$ 용접시간

개선형상은 용접부의 Macro 단면사진으로부터 I개 선으로 하였다. 비정상열전도해석에서는 재료의 물리 정수의 온도의존성¹⁾을, 열탄소성 대변형해석에서는 재료의 기계적제성질의 온도의존성¹⁾을 고려하여 해석하였다.

해석에 사용한 초기변형은 용접선방향은 직선이고,

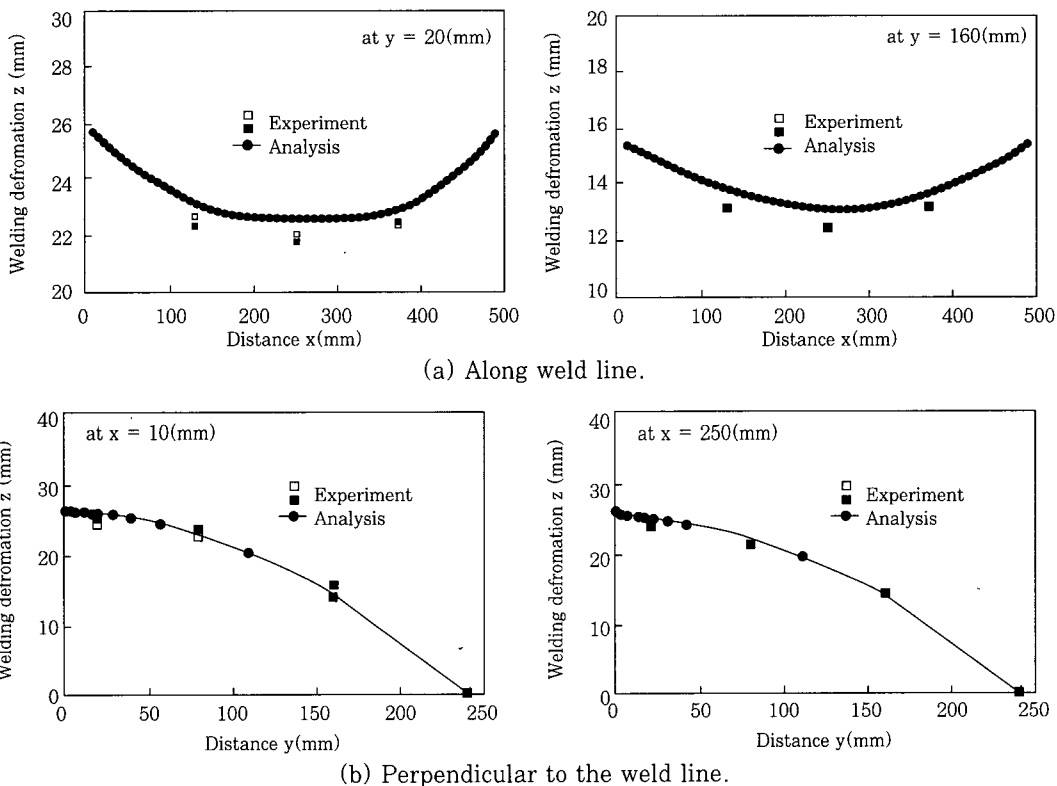


Fig. 4 Out-of-plane deformation by welding

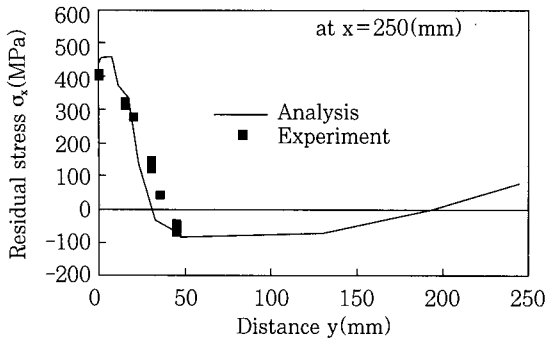


Fig. 5 Residual stress.

용접선직각방향은 Fig. 7에 보여주고 있는 것과 같이 실험에서 측정한 결과를 실선으로 근사하여 사용하였다.

2.3.2 온도분포

열원의 이동효과를 고려한 비정상열전도해석을 통해 구한 온도이력 중 실험에서 측정한 위치의 온도를 Fig. 3에 점선으로 보여주고 있다. 결과에 의하면 실험에서 측정한 결과와 해석에서 구한 결과가 잘 일치하고 있다.

2.3.3 면외변형

열탄소성대변형해석을 하여 구한 용접선방향의 면외변형 중 일부를 Fig. 4(a)에, 용접선직각방향의 면외변형을 Fig. 4(b)에 실선으로 보여주고 있다. 결과에 의하면 실험결과와 해석결과가 잘 일치하고 있다.

2.3.4 잔류응력

용접선방향의 잔류응력의 일부를 Fig. 5에 실선으로 보여주고 있다. 결과에 의하면 용접선 근방에서는 약 50(MPa)의 차이가 있으나 전체적으로 해석결과와 실험결과가 잘 일치하고 있다.

이상과 같이 본 연구에서 개발한 열탄소성 대변형해석 프로그램을 이용한 해석결과와 신뢰성을 검증하였다.

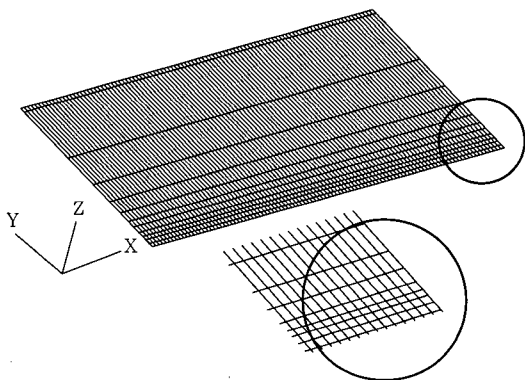


Fig. 6 Mesh division for Simulation.

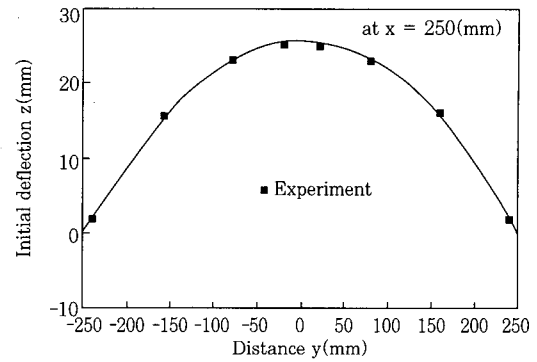


Fig. 7 Approximation of initial deflection for analysis.

3. 강판제조시의 초기부정

해석모델을 Fig. 8에 보여주고 있다. 강판의 치수는 길이 $L = 600(\text{mm})$, 폭 $B = 600(\text{mm})$, 두께 $h = 6(\text{mm})$ 이다. 강제 및 재료의 물리적 및 기계적특성의 온도의존성¹⁾을 고려하였다.

강판 제조시에 발생하는 초기변형, 초기잔류응력은 난수를 이용해서 부적합 strain을 판전체에 무작위로 분포시킨 후, 3차원고유응력해석에 의해 구했다. 3차원해석에서 구한 초기변형의 형상을 Fig. 9에, 초기잔류응력을 Fig. 10에 보여주고 있다. 한편, 부적합 strain의 크기는 초기변형의 크기²⁾가 5(mm), 초기잔류응력의 최대값³⁾이 50(MPa)이 되도록 범위를 규정하였다. 물론, 판의 초기상태에서는 초기잔류응력은 자기평형을 이루고 있다.

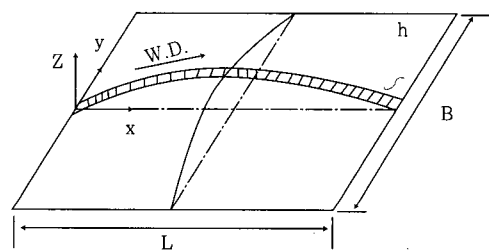


Fig. 8 Model for analysis.

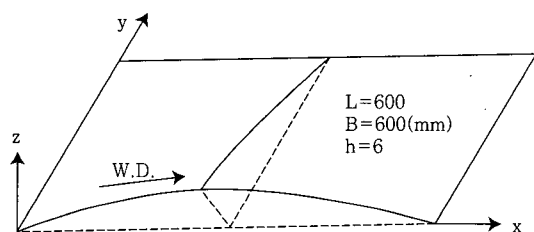


Fig. 9 Out-of-plane deformation by rolling.

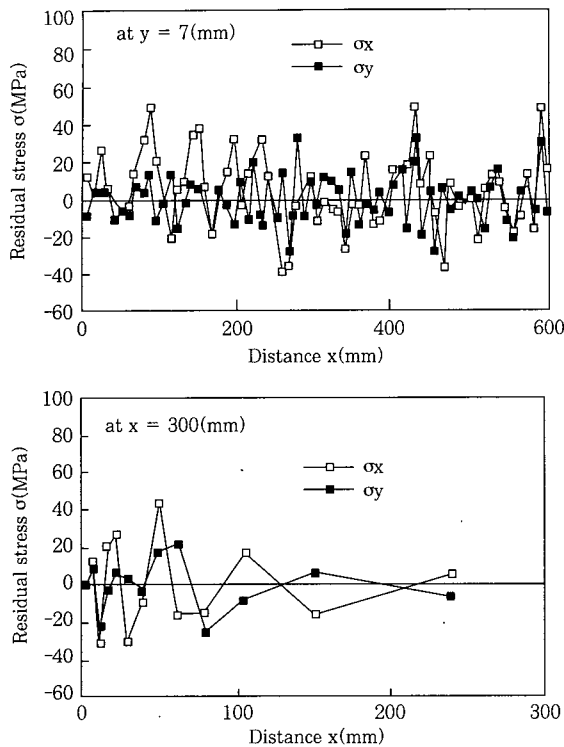


Fig. 10 Residual stress produced by rolling.

4. 초기 잔류응력이 용접에 의한 면외변형 · 잔류응력에 미치는 영향

여기서는 초기변형(Fig. 9)을 가지는 판의 Butt용접에서 초기잔류응력을 고려하는 경우(Fig. 10)와 무시하는 경우에 대해서 열탄소성 대변형해석을 수행하여 초기잔류응력이 용접에 의해 생기는 면외변형, 잔류응력에 미치는 영향을 조사하였다.

4.1 해석모델 및 온도분포

해석모델(Fig. 8)의 중앙부($y = 0\text{mm}$)의 x 방향으로 용접한다. 용접조건은 입열량 $Q = 900(\text{J/mm})$, 용접속도 $v = 3(\text{mm/s})$ 이고 개선은 I개선이다.

비정상 열전도해석에서 구한 온도분포의 일부를 Fig. 11에 보여주고 있다. 한편, 열탄소성 응력해석에서는 초기변형 형상에 관계없이 같은 온도이력을 사용하였다.

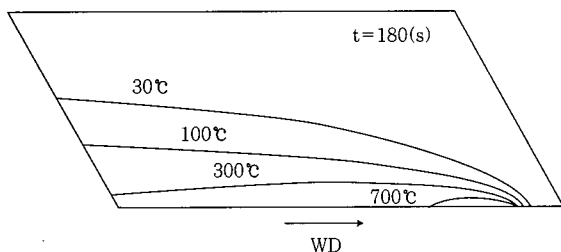


Fig. 11 Temperature distribution.

4.2 초기 잔류응력이 용접에 의한 면외 변형에 미치는 영향

열탄소성 해석결과를 Fig. 12에 보여주고 있다. 초기잔류응력의 유무에 관계없이 용접면외변위는 모두 잘 일치하고 있어, 초기잔류응력은 용접에 의해 생기는 면외변형에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

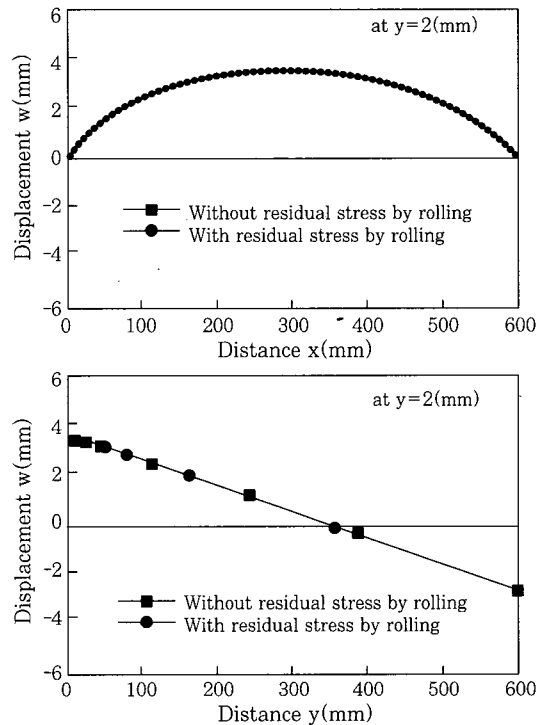


Fig. 12 Displacement in z-direction produced by welding.

4.3 초기 잔류응력이 용접에 의한 잔류 응력에 미치는 영향

Butt용접의 경우 용접선 직각방향으로는 거의 같이 수축하기 때문에 발생하는 용접선 직각방향의 응력성분 σ_y 은 작다. 따라서 용접선 방향(x -방향)만을 주목하였다.

용접선방향의 응력성분 σ_x 를 Fig.13에 보여주고 있다. 용접부 근방은 용접열에 의해 고온으로 가열되어 용융하기 때문에 초기잔류응력이 일단 해방된다. 그래서 응력은 온도냉각 과정에서 새롭게 생성되어 실온이 되었을 때 잔류응력으로 되기 때문에 용접부 근방은 초기잔류응력의 영향을 받지 않는다. 한편 용접부로부터 떨어져있는 부위의 잔류응력은 초기잔류응력의 영향을 그대로 받으나 초기잔류응력의 절대값이 작기 때

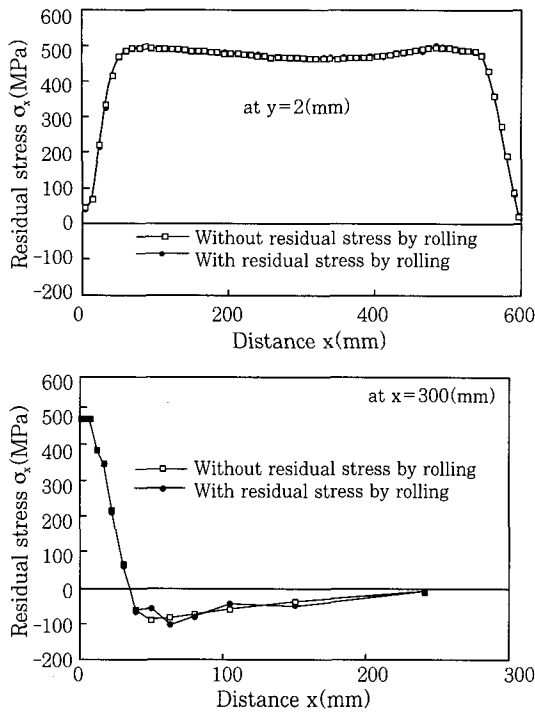


Fig. 13 Residual stress produced by welding

문에 결과적으로 영향은 없다고 말할 수 있다.

이상으로 강판제조시 발생하는 자기평형을 이루고 있는 초기잔류응력은 용접에 의해 발생하는 면외변형 및 잔류응력에는 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

5. 초기변형의 형상이 용접 면외변형, 잔류응력 · 소성변형에 미치는 영향

강판 제조시 필연적으로 내재하는 초기잔류응력은 용접에 의해 생기는 면외변형, 잔류응력에 영향을 주지 않음을 전장에서 확인하였다. 따라서 여기서는 초기잔류응력을 무시하고 초기변형의 형상을 변화시켜 초기변형의 형상의 차이가 용접에 의해 생기는 면외변형, 잔류응력 · 소성변형에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

5.1 초기변형의 형상이 용접 면외변형에 미치는 영향

초기변형의 형상은 Fig. 14에 보여주고 있는 3가지 Type이고, 초기변형의 최대크기는 $w_{max} = 5$ (mm)로 하였다.

초기변형형상(Type I, Type II, Type III)을 변화시켜 열탄소성 대변형해석에 의해 구한 용접선상 ($y=2$ (mm)) 및 판중양($x=300$ (mm))에 있어서의 면외변형(초기변형 + 면외변형)의 과도 및 잔류변형을 Fig. 15에 보여주고 있다.

결과에 의하면 용접에 의해 발생한 면외변형은 초기변형의 형상에 관계없이 용접시작 후 $t=180$ (s)까지는 초기변형을 크게 하는 쪽으로 변형이 일어나서 $t=180$ (s)에서 최대면외변형이 발생하고 이후 초기변형을 작게하는 쪽으로 변형이 발생하였다(Fig. 16 참조). 결과적으로 용접잔류면외변형의 크기는 Type I < Type II \approx Type III로 되었다. 초기변형의 형상이 다르면 전체적인 변형의 경향은 차이가 없지만 잔류면외변형의 절대치는 다르게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

용접선 방향의 면외변위(최대잔류변형과 초기변형의 차)에 주목하면 면외변위의 크기는 Type II < Type I < Type III의 순서로 되어 초기변형이 용접선방향으로 휘어져(Type II)있으면 용접열원의 진행과 함께 용접선 직각방향의 단면에 있어서 중립축을 중심으로 용접열원이 상 · 하로 이동하여 용접변형을 서로 상쇄시키므로 결과적으로 발생하는 면외변위는 작다. 이에 반해 용접선 직각방향으로 초기변형이 휘어져(Type III)있으면 용접면외변형을 유발시키는 용접선방향의 용접에 의한 팽창 · 수축과 용접선 직각방향의 단면에 있어서의 중립축간의 거리에 의해 발생하는 굽힘모멘트가 Type I과 Type II에 비해 크기 때문에 면외변형이 크게 발생하였다. 한편, 용접선 직각방향에 주목하면 초기변형 형상에 따라 변위의 발생경향이 다르며, Type III의 경우, Type I과 Type II와는 달리 용접선 직각방향의 초기변형을 유지하면서 면외변위가 크게

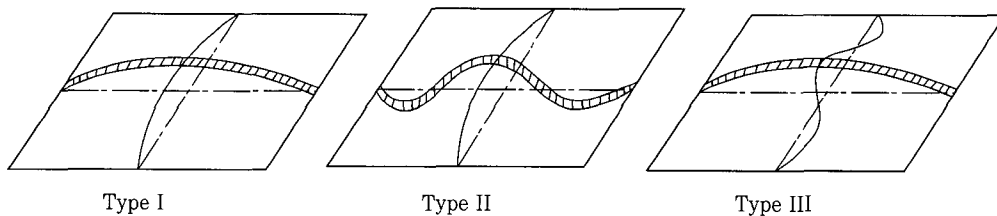


Fig. 14 Configurations of initial deflection

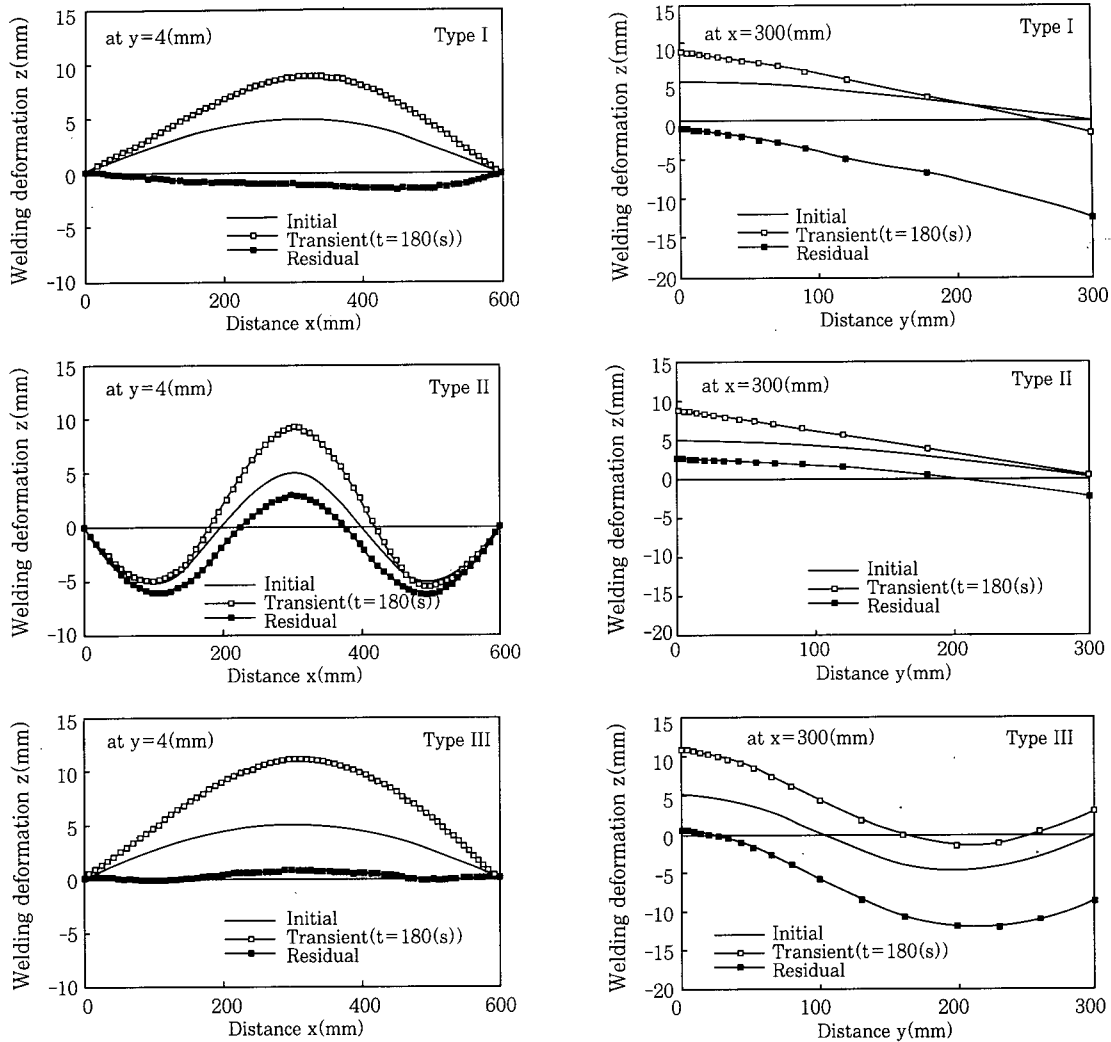


Fig. 15 Out-of-plane deformation produced by welding.

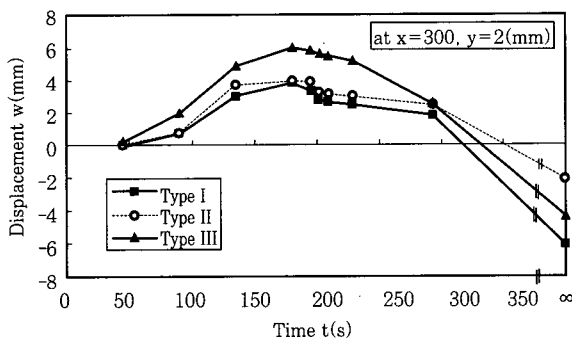


Fig. 16 Transient out-of-plane displacement at $x=300, y=2$ (mm)

발생했다. Type III과 같이 초기변형이 용접선 직각방향으로 휘어져 있으면 강판의 자체강성이 Type I과 Type II에 비해 크기 때문에 초기변형의 형상을 유지하면서 면외변형이 발생한다.

이상의 결과를 종합하여 보면, Type I의 경우, 잔류 면외변형의 형상은 초기변형의 형상과 같으나, 절대치

는 초기변형에 비해 작게 되었다. 이에 반해 Type II의 경우, 용접에 의해 생기는 면외변위는 작다. 그러나 초기변형이 그대로 잔류하여 결과적으로 면외변형은 크게 잔류하였다. Type III의 경우, 변형을 일으키는 굽힘모멘트가 크므로 면외로 변위가 크게 발생하여 결과적으로 잔류면외변형은 용접선 근방에서 작고, 판폭 방향의 내부에서는 크게되어 전체적으로 크게 잔류하는 것을 알 수 있다.

5.2 초기변형의 형상이 잔류응력·소성 변형에 미치는 영향

5.2.1 잔류응력

용접선방향의 응력성분 σ_x 를 Fig. 17(a)에 보여주고 있다. 잔류응력은 초기변형의 형상에 관계없이 거의 같은 분포를 하고 있다(과도상태의 경우에도 동일). 한편, 면외변위가 제일 작았던 Type II의 잔류응

력 σ_x 는 초기변형이 없는 경우의 σ_x 와 비슷한 분포로 나타났다.

5.2.2 소성변형

용접선 방향의 소성변형 ϵ_x 를 Fig.17(b)에 보여주고 있다. ϵ_x 는 용접부 근방에만 생성되며 초기변형 형상의 차이에 의한 영향은 받지 않는 것을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 초기변형 형상의 차이는 용접에 의해 생기는 잔류응력·소성변형에는 영향을 미치지 않았다.

6. 결 론

먼저 본 연구에서 개발한 열탄소성 대변형해석 프로그램의 신뢰성을 실험을 통해 검증하고, 검증된 프로그램을 이용하여 강판 제조시에 자기평형을 이루면서 내재하는 잔류응력이 용접에 의해 생기는 변형·잔류응력에 미치는 영향을 검토했다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

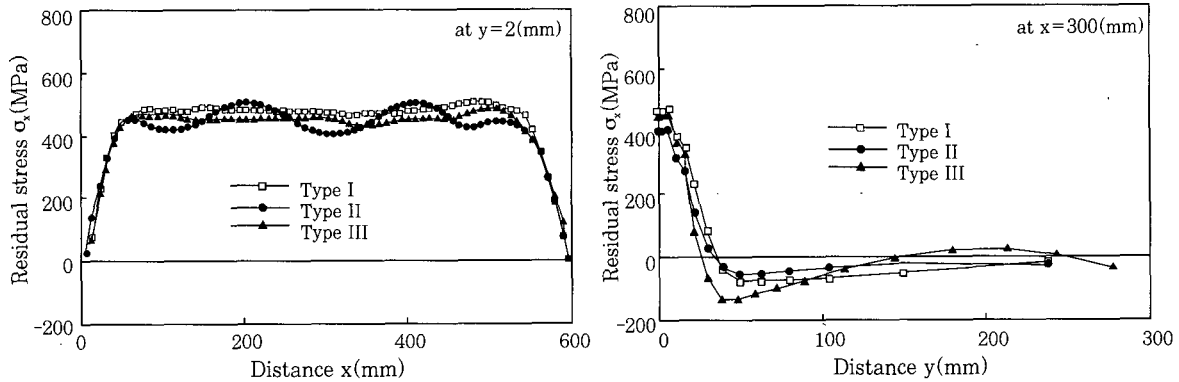
(1) 초기 잔류응력은 용접에 의해 생기는 면외변형에 영향을 주지 않는다. 한편, 용접에 의해 발생하는 잔류응력에 주목하면 용접부 근방은 초기 잔류응력의 영향

을 받지 않으나, 용접부로부터 멀리 떨어져 있는 강판의 내부에서는 초기 잔류응력은 용접에 의해 발생하는 잔류응력에 영향을 준다. 그러나 초기 잔류응력의 절대치가 작기 때문에 결과적으로 초기 잔류응력은 용접에 의해 발생하는 잔류응력에 영향을 주지 않는다.

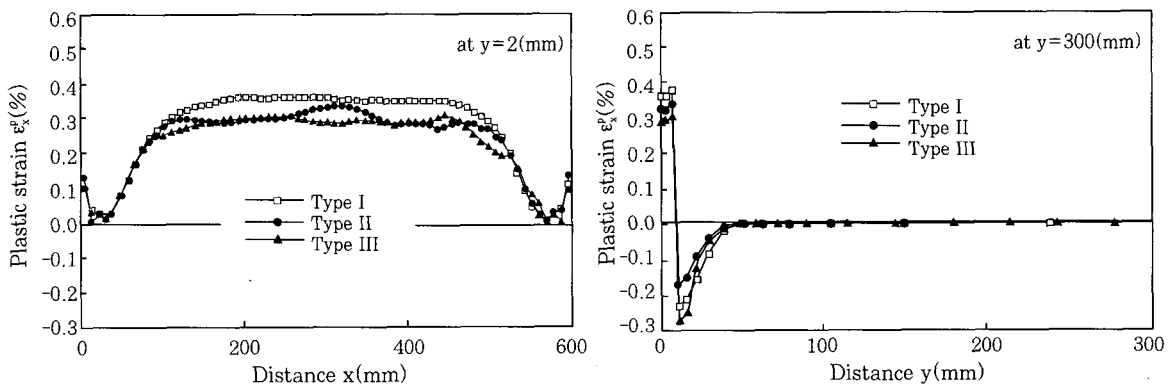
다음으로 초기변형의 형상이 용접에 의해 생기는 면외변형, 잔류응력·소성변형에 미치는 영향을 검토했다.

(2) 초기 변형형상의 차이는 용접에 의해 생기는 잔류면외변형에 크게 영향을 미친다. 초기변형 형상이 용접선방향과 용접선직각방향이 모두 같은 형태인 경우 (Type I), 면외변형은 초기변형과 같은 형상으로 잔류하며 변형량도 작다. 이에 반해 초기변형이 용접선 방향으로 휘어져있는 경우 (Type II)는 용접에 의해 발생하는 면외변위는 작으나 초기변형이 그대로 잔류하여 결과적으로 큰 면외변형이 잔류한다. 용접선 직각방향으로 초기변형이 휘어져있으면 (Type III) 변형을 일으키는 굽힘모멘트가 크므로 면외방향으로 가장 큰 변위가 발생하여 결과적으로 용접부 근방의 면외변형은 작게 발생하였고 판내부에서는 큰 면외변형이 잔류하였다.

(3) 초기변형의 형상은 용접에 의해 발생하는 잔류응



a) Residual stress.



(b) Plastic strain

Fig. 17 Distributions of residual stress and plastic strain.

력·소성변형에는 영향을 주지 않았다. 한편, 소성변형은 용접부 근방에만 생성되었다.

후 기

본 연구의 일부는 연구자가 일본 오사카대학에서 학위과정 중 수행한 것으로 오사카대학 접합과학연구소 Y. C. Kim, K. Horikawa 교수께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 金裕哲, 朴正雄, 掘川浩甫 : 面外變形·殘留應力に及ぼす溶接諸條件の影響, 日本鋼構造論文集, 第5卷第17號, pp.85~91, 1998
2. 眞態創, 河 實, 正岡孝治, 伊藤陸章 : 甲板パネルの壓崩強度に關する統計的性質について, 關西造船協會誌, 第214號, pp.145~156, 1990
3. 掘川浩甫, 石本憲司 : TMCP鋼の鋼橋への適用, 大阪大學溶接工學研究所提出研究報告, 1987