研究論文

# 정반의 지지조건이 용접 면외변형에 미치는 영향

박정웅* · 고대은* · 신용택* · 이해우* · 이재원*

## Effects of the Support Condition on Out-of-plane Deformation by Welding

J.U.Park*, D.E.Ko*, Y.T.Shin*, H.W.Lee* and J.W. Lee*

**Key Words** : Welding deformation(용접변형), Out-of-plane deformation(면외변형), Transient out-of-plane deformation(과도면외변형), Support condition (지지조건), Flame straightening(교정)


## Abstract

In thin plate welding, welding deformation is produced in special form like buckling distortion, which is different from one in thick plate welding, large quantitatively, and has complicated form. Therefore, a particular countermeasure to prevent the welding deformation in manufacturing process is requested. Otherwise it takes more time to straighten the welding deformation than to fabricate a steel structure newly and in case of failing to straighten the welding deformation in beginnings of the flame straightening process, even if the flame straightening is completed, the appearances is not good and sometimes even refabrication is needed.

To minimize these problems, In this present paper, the effects of the condition of support pin on out-of-plane deformation produced by thin plate Butt welding is investigated through experiment and the countermeasure to prevent the welding deformation is suggested.


## 1. 서 론

용접부는 용접열원에 의해 급속가열 · 급속냉각의 열사이클을 받으며, 열원의 이동과 함께 온도장이 변화함으로써 용접부에 불균일한 온도분포가 생성되어 열팽창 · 수축이 구속을 받아 결과적으로 용접변형과 잔류응력이 발생한다. 또한 그 크기는 용접조건과 내적 · 외적구속의 정도에 따라 결정된다. 이와 같이 용접에 의해 발생되는 변형, 잔류응력은 구조물의 제작시의 조립정도, 미관, 좌굴강도, 피로강도[1~3] 등에 큰 영향을 미치는 중요한 요인이 되고 있다.

특히 박판용접의 경우 용접변형의 형상이 후판의 용접변형과는 달리 좌굴변형[4~6]과 같은 특수한 변형이 발생되고 그 변형량이 클뿐만 아니라 형태도 복잡하게 발생하므로 제작시에 변형을 방지하기 위한 각별한 대책이 요구된다. 한편 일단 발생된 용접변형은 교정하는 것이 다시 제작하는 것보다 몇배의 작업시수가 소요되는 경우도 있으며, 교정작업에 있어서도 초기단계에서 변형을 교정하는데 실패하는 경우 최종 교정완료 후에도 미관이 좋지 않아 재제작을 필요로 하는 경우도 발생한다. 이러한 변형을 방지하기 위한 대책으로

※ 1999년 4월 3일 접수
* 정회원, 삼성중공업 조선플랜트연구소 용접도장연구파트
# 박정웅 : park982@samsung.co.kr

는 지금까지 용접 입열량의 최소화, 변형방지용 Stiffener 보강, 구속법 그리고 역변형법[7~8] 등이 알려져 있다.

본 연구에서는 정반의 지지조건이 박판의 Butt용접시 발생되는 면외변형에 미치는 영향에 대해 실험을 통하여 고찰하였고, 용접중과 냉각과정에서 생기는 과도 면외변형을 측정하여 용접에 의해 생기는 변형의 생성과정을 밝혔다. 또한, 이를 토대로 제작현장에서 비교적 쉽게 적용할 수 있는 용접변형을 최소화하는 방안 및 제작시 정반설치의 주의점에 대해 논한다.

## 2. 실험방법

강재의 두께와 정반의 지지조건을 변화시켜 용접중에 발생하는 과도변형과 용접에 의해 발생하는 잔류 면외변형을 측정하였다. 이하 본 실험에서 사용한 구체적인 측정방법 및 용접조건에 대해 설명한다.

### 2.1 시험편의 치수 및 용접조건

시험편의 크기는 폭 3000(mm), 길이 3000(mm)이고 두께가 8, 10(mm)인 정사각형 강판에 대해 부재의 중앙부를 Butt용접하였다. 용접부 형상은 Fig. 1과 같고 특히 두께가 10mm인 경우는 1Pass로 완전용입 할 수 있도록 개선를 주었다. 용접조건은 두께별로 Table 1에 나타내었다. 용접법은 FAB편면 자동용접이며, 와이어는 H-14(4.8Φ), 플럭스는 S705EF, 백킹재는 BS-300을 사용하였다.

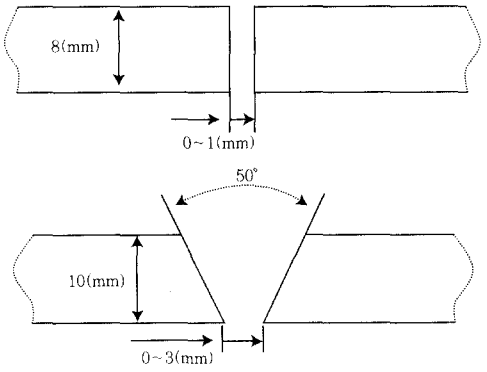


**Fig. 1** Groove type.

**Table 1** Welding condition

| Thickness (mm) | Current (A) | Voltage (V) | Speed (cm/mim) | Heat input (kJ/cm) |
|---|---|---|---|---|
| 8 | 790 | 37 | 47 | 37 |
| 10 | 930 | 35 | 44 | 44 |

### 2.2 측정위치 및 방법

Fig. 2는 과도 면외변형, 초기변형 그리고 잔류 면외변형을 측정한 위치를 보여주고 있다. 과도변형의 측정은 용접 시단부로 부터 500, 1500(mm) 떨어져 있는 곳에서 용접선 직각방향으로 200(mm) 곳에 각각 한 개의 다이얼 게이지를 부착하여 용접중에 변화하는 과도 변형과 용접완료 후 냉각과정에서 발생하는 과도변형을 시간의 경과에 따라 계측하였다.

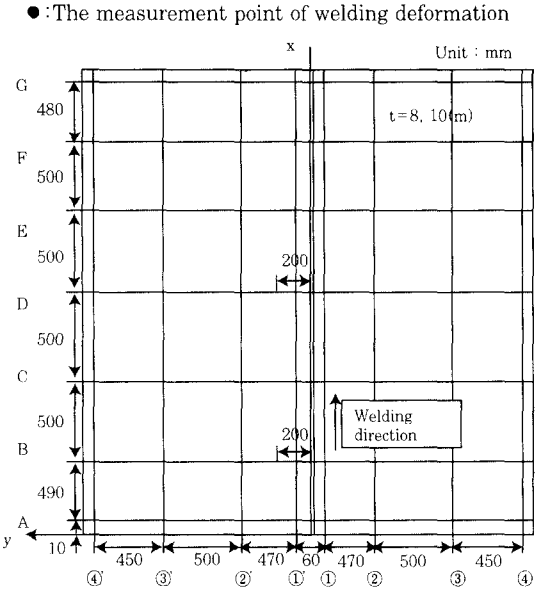


**Fig. 2** The measurement point of deformation.

초기변형의 측정은 먼저 가접후 지지핀을 고정시킨 다음 측정하고자 하는 부분을 마킹하였다. 그리고 초기변형을 측정하고자 하는 곳의 양단에서 일정 높이를 갖는 마그네틱 베이스를 올려 놓고 실로 연결한 후, 실로 부터 강판간의 거리를 측정하였다. 또한 잔류 면외변형은 용접후 강재의 온도가 실온이 되었을 때 초기변형을 측정하는 방법과 동일하게 측정하였다(Fig. 3 참고).

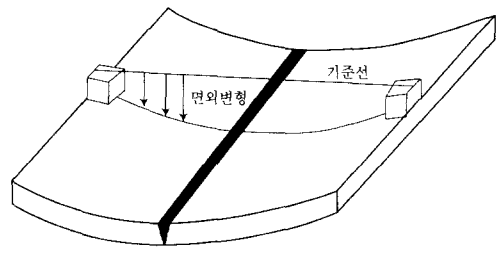


**Fig.3** Measure of Out-of-plane deformation.

### 2.3 정반의 지지조건

정반의 지지조건은 Fig. 4 에 보여주고 있다. Type 1은 일반적인 현장조건과 유사하게 정반의 지지핀 간격을 가로, 세로 각각 1000(mm)로 설치하였고, Type 2는 Type 1의 지지조건에 용접부 아래에 지지핀을 하나 추가하여 지지핀 간격을 500(mm)로 하였다. 또한 Type 3은 용접시 · 종단부의 처짐을 방지하기 위해 Type 1에 용접부 시 · 종단부에 각각 하나의 지지핀을 세웠고, Type 4는 용접변형을 최소화하기 위한 가장 이상적인 정반의 지지상태로서 평탄한 정반 위에 강재를 올려놓고 용접하는 조건으로 하였다. 주판 두께가 8mm인 경우는 용접변형을 최소화를 위해 현장에 최대한 적용 가능한 지지조건 Type 2를 설정하였고, 주판 두께가 10mm인 경우는 전체적인 변형

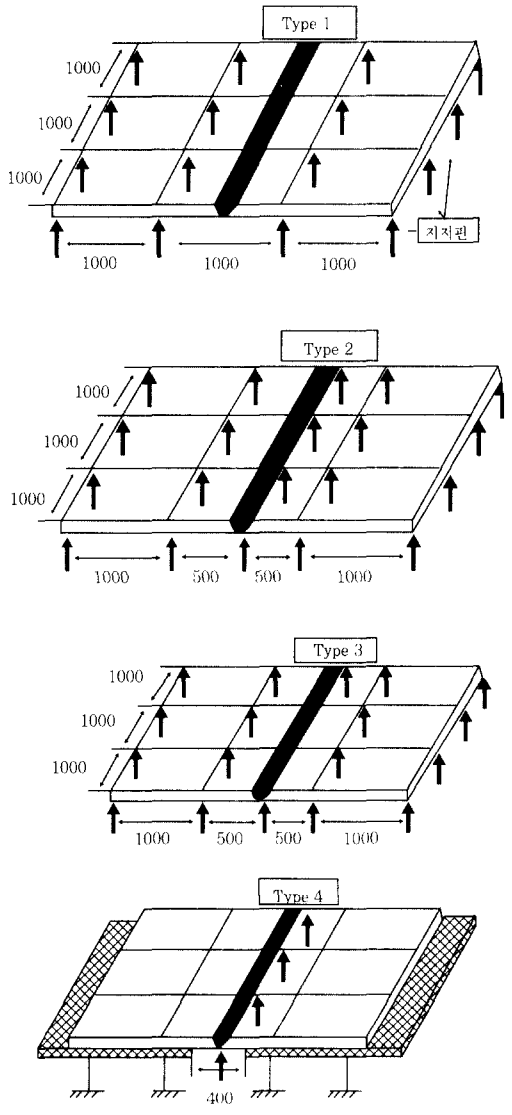


**Fig. 4** The condition of support pin.

보다는 단부의 처짐변형이 문제되므로 이를 방지할 목적으로 지지조건 Type 3을 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 면외변형

3.1.1 두께가 8(mm)인 경우

강판의 두께가 8(mm)인 경우 용접에 의해 발생한 면외변형( = 잔류변형 - 초기변형 )중 용접선 직각방향의 면외변형을 Fig. 5, 용접선 방향의 면외변형을 Fig. 6 에 보여주고 있다.

결과에 의하면 용접선 직각방향의 면외변형은 용접선으로부터 ±500(mm)이상 떨어져 있는 부분은 정반의 지지조건에 의해 영향을 거의 받지 않으나, 용접부 근방에서는 정반의 지지조건에 의해 면외면형이 크게 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 현장조건과 유사한 Type 1의 경우 용접중앙부는 변형이 작게(약 2mm) 발생하여 그 영향이 작으나 용접 시 · 종단부에서는 처짐변형 (약 15mm)이 발생했다. 또한 용접선 아래면에 지지핀을 설치한 Type 2 의 경우 중앙부는 Type 1에 비해 변형이 더 크게(약 4mm) 발생하였으나 용접 시 · 종단부는 Type 1에 비해 변형이 작게(약 6mm) 발생하였다. 따라서 전체적으로 Type 1의 정반 지지조건보다 Type 2의 정반 지지조건이 용접에 의해 발생하는 면외변형이 작다고 말할 수 있다. 한편, 용접선 방향의 면외변형의 경우는 용접선에서 떨어져 있는 부분의 면외변형은 Type 1, 2 모두 비슷한 경향을 보이고 있으나 용접부 근방에서는 Type 2의 변형보다 Type 1의 변형이 더 크게(약 9mm) 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 한편 용접 시 · 종단부의 처짐은 두개의 정반조건 모두 처짐변형이 발생하였으나 크기를 보면 Type 1이 5(mm)정도로 크게 발생하였다.

이상으로 부터 Type 1은 용접부 아래에 지지핀이 설치되어 있지 않아 용접면외변형이 자유롭게 생성되었으나 Type 2는 용접부 아래 부분에 지지핀이 설치되어 있어 아래방향으로 발생하는 변형을 억제함으로서 결과적으로 작은 용접변형이 발생하여 Type 2의 정반상태가 변형방지에 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 정반지지조건에 의해 용접부 근방의 면외변형은 영향을 받으나 용접부로부터 떨어져 있는 부분은 영향을 받지 않았다.

3.1.2 두께가 10(mm)인 경우

강판의 두께가 10(mm)인 경우 용접에 의해 발생한 면외변형( = 잔류변형 - 초기변형 )중 용접선 직각

방향의 면외변형을 Fig. 7, 용접선 방향의 면외변형을 Fig. 8 에 보여주고 있다.

결과에 의하면 Type 1과 Type 4 는 정반의 지지상태가 용접에 의한 면외변형에 영향을 거의 주지 않은 것을 알 수 있다. 그러나 현장 정반조건에서 발생하는 용접시 · 종단부 처짐을 방지하기 위해 단부에 지지핀을 설치한 Type 3 은 단부의 처짐은 어느 정도 작게 발생하였으나 그 변형이 용접부로 부터 떨어진 부분에 최대 12(mm)정도로 발생하여 전체적인 변형이 크게 발생하였다. 따라서 강판의 두께가 10(mm)이면 자체

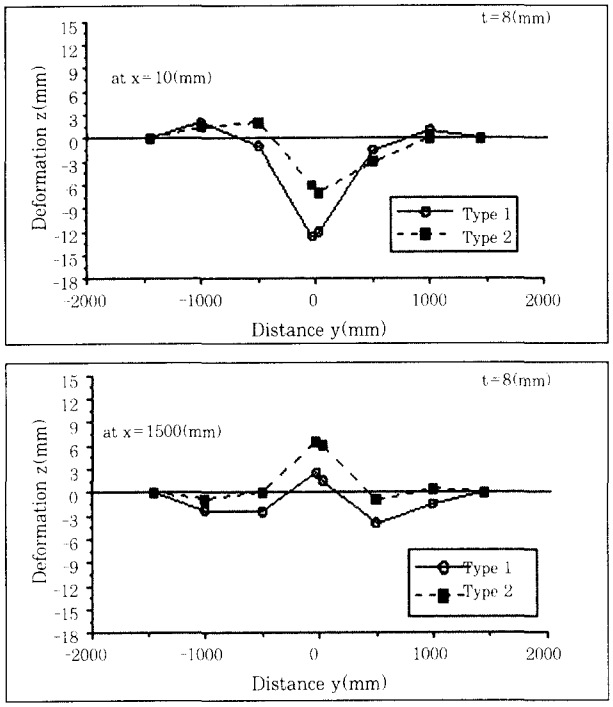


**Fig. 5** Out-of-plane deformation perpendicular to the weld line(t=8mm).

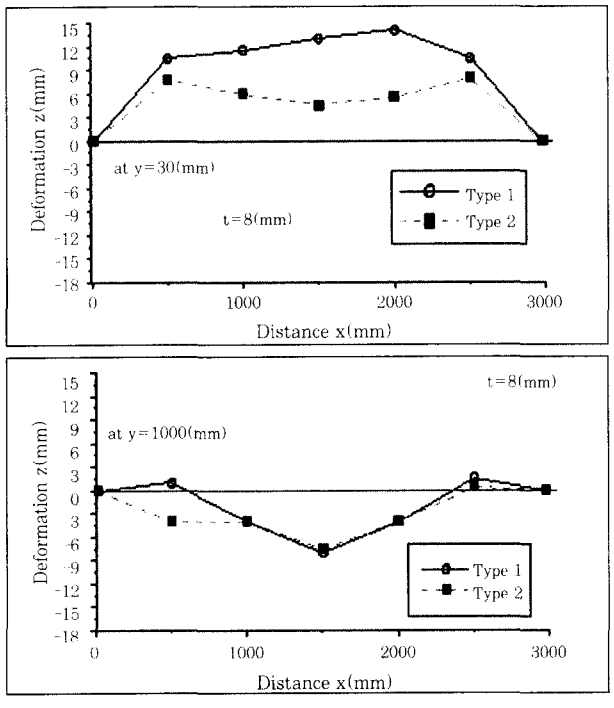


**Fig. 6** Out-of-plane deformation along weld line ( t=8mm).

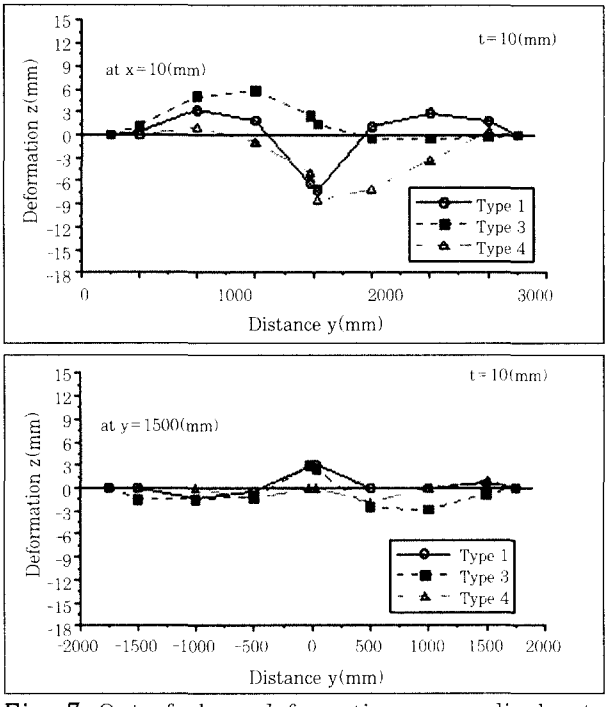


**Fig. 7** Out-of-plane deformation perpendicular to the weld line(t=10mm).

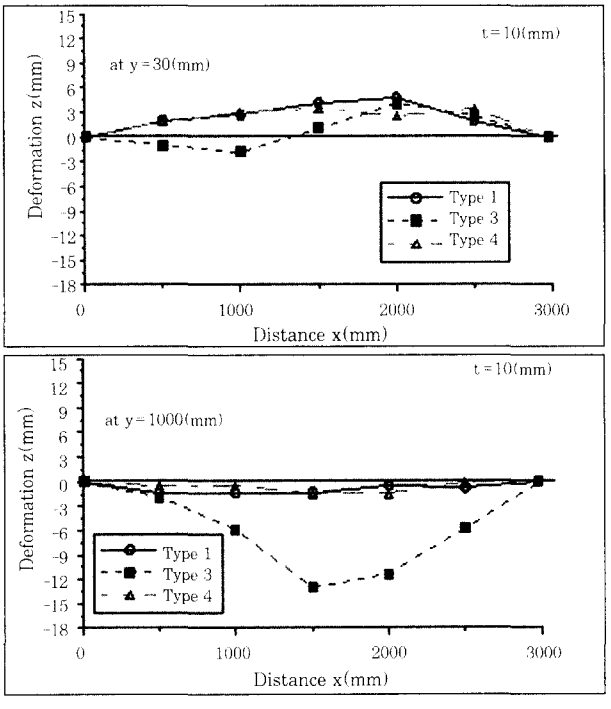


**Fig. 8** Out-of-plane deformation along weld line ( t=10mm).

의 강성에 의해 변형을 억제할 수 있지만 불균일한 정반의 지지조건이 변형을 더 크게 유발시키는 경향이 있으므로 정반의 지지조건을 설치하는데 세심한 주의가 필요하다.

이상으로부터 용접 면외변형은 주판의 두께와 정반의 지지조건에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 특히, 박판 용접시 발생하는 변형에 영향을 미치는 것은 용접 후 냉각과정에서 발생하는 압축응력이다. 그러나 본 연구에서는 주판의 두께에 따라 입열량이 동일하므로 압축응력도 거의 비슷하다고 생각된다. 이러한 경우 용접변형은 용접 후 압축응력이 작용할 때 주판의 과도 면외변형의 크기에 의존한다. 또한 과도 면외변형은 정반의 지지조건에 의존하는데 정반의 두께가 8(mm)인 경우 정반의 지지조건이 Type 2의 경우 용접부 이면에 지지핀이 설치되어 있어 용접 중의 과도 면외변형을 억제하므로 결과적으로 용접변형이 현장지지핀 조건보다 작게 발생하였다.

### 3.2 과도 면외변형

3.2.1 두께가 8(mm)인 경우

용접을 시작하여 강판의 온도가 실온이 될 때까지 발생하는 과도 면외변형을 강판의 두께가 8, 10(mm)인 경우에 대해 각각 Fig. 9, 10 에 보여주고 있다.

결과에 의하면 강판의 두께가 8(mm)인 경우 정반의 지지조건에 관계없이 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 중앙부(x=1500mm)의 과도변형은 용접종료 시간을 기점으로 변형이 반대로 일어났고, 용접 시단부로부터 500(mm) 떨어져 있는 면외변형은 용접열원이 중앙부에 도착했을 때 최대 면외변형을 생성한 후 점점 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 용접 중에 중앙부가 위로 볼록한 용접변형 현상이 일어나는 것은 용접된 부분의 열팽창이 용접되지 않은 부분이 구속하므로 변형하기 쉬운 면외방향으로 변형이 발생하기 때문이다. 또한, 냉각과정에서는 용접 중 발생한 팽창에 의한 변형이 수축하면서 용접중에 발생된 변형과는 반대로 변형이 발생한다. 이러한 수축변형은 용접부의 수축력과 강판의 자체강성이 힘의 평형이 이루어질 때 변형이 완료된다. 만약, 용접 입열량에 비해 강판의 강성이 작을 경우에는 냉각과정에서 생긴 수축잔류응력에 의해 좌굴변형과 같은 형태로 나타난다.

면외변형의 크기를 보면 Fig. 7, 8 에서는 면외변형이 크게 차이가 있으나 과도 면외변형은 정반조건에 관계없이 변형량이 비슷하게 나타나고 있다. 그 이유는 용접완료 직후 과도변형을 모식적으로 나타낸 Fig. 11 에서 알 수 있는 것과 같이 최대 면외변형의 발생위치가 다르기 때문이다. 즉, Type 1 인 경우 과도 면외변형이 최고에 달하는 부분이 용접시단부로 부터 2500(mm)인 곳에서 나타나면서 싸인 1 파와 근사한 형태로 발생하였고, Type 2 인 경우 용접 시단부로부터 1500(mm) 떨어져 있는 곳에서 최대 과도 면외변형이 발생하면서 싸인 1/2 파와 유사한 변형이 발생하여 정반의 지지조건에 의해 최대 면외변형의 발생위치가 다르기 때문이다.

3.2.2 두께가 10(mm)인 경우

두께가 10(mm)인 경우 정반의 조건에 관계없이 거의 동일한 과도변형이 발생되었다. 단, 용접 시단부로부터 500(mm) 떨어져 있는 최대 면외변형의 발생시점이 강재의 두께가 8(mm)인 경우와는 달리 용접완료시간을 기준으로 반대방향으로 발생하고 있다.

이상의 결과를 종합하면 과도 면외변형의 생성모드는 두께에 관계없이 비슷하나 용접 시단부로부터 500(mm) 떨어져 있는 변형의 크기는 두께가 10(mm)의 경우가 작게 발생되었다. 그리고 잔류면외변형은 두께가 10(mm)인 경우는 냉각이 완료되면 거의 본래의 위치로 되돌아오지만 두께가 8(mm)인 경우는 용접시단부로부터 500(mm)인 면외변형은 기존

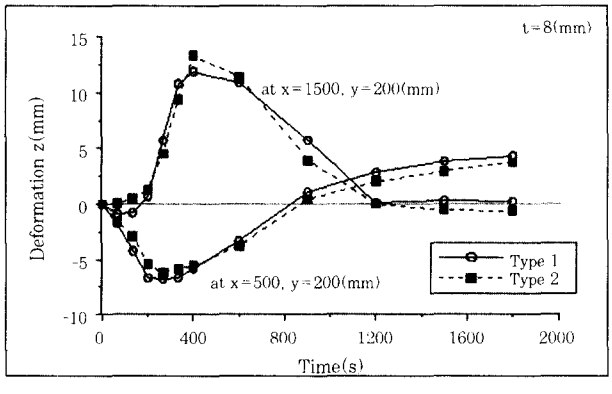


**Fig. 9** Transient out-of-plane deformation (t=8mm).

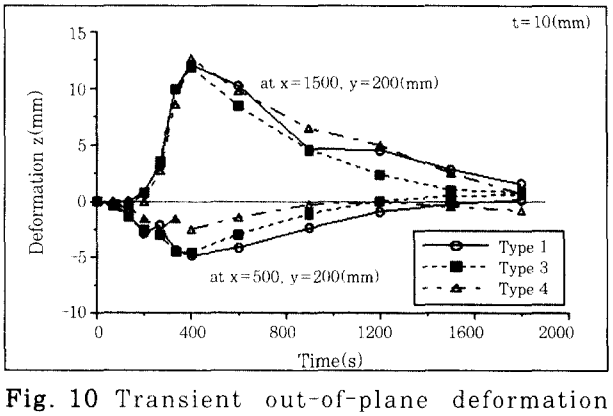


**Fig. 10** Transient out-of-plane deformation (t=10mm).

의 위치보다 4(mm)정도 위에 발생되었다. 따라서 면외변형의 측정결과에서도 확인된 것과 같이 두께가 10(mm)인 경우보다 8(mm)인 경우가 면외변형이 크게 발생한다.

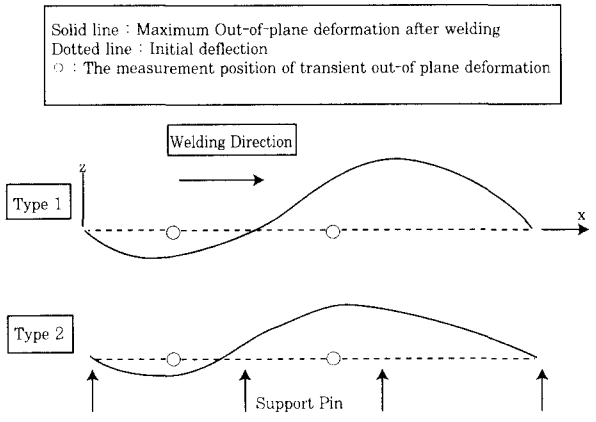


**Fig. 11** The Maximum Position of out-of-plane deformation

## 4. 결 론

박판의 Butt 용접시 정반의 지지조건이 용접 면외변형에 미치는 영향에 대한 실험적 연구로부터 용접 면외변형은 정반의 지지조건에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

본 논문의 주요 결론은 다음과 같다.

1) 용접부 근방의 지지핀 간격을 1000(mm)로 했을 때 보다 500(mm)로 설치했을 때 면외변형이 작게 발생하였으며 용접부로부터 떨어져 있는 부분은 정반의 지지조건에 거의 영향을 받지 않는다.

2) 정반의 지지조건을 불규칙적으로 설치하는 경우 자체강성으로 변형이 발생하지 않은 부재라 할지라도 변형이 크게 발생한다(두께 10mm, Type 3의 경우).

3) 잔류 용접변형은 용접 중 발생하는 과도 면외변형에 크게 영향을 받는다. 즉, 과도 면외변형이 크면 클수록 용접 변형이 크게 발생한다.

4) 용접 중 발생하는 과도 면외변형은 정반의 지지간격에 영향을 받아 최대 면외변형의 발생위치 및 모드가 다르게 나타난다. 최대 면외변형의 발생위치는 현장조건과 같이 지지핀 간격이 1000(mm)인 경우 용접 시단부로부터 2500(mm)에서, 지지핀 간격이 500(mm)인 경우는 용접 시단부로부터 1500(mm)에서 발생했다.

## 참 고 문 헌

1. 藤田譲, 吉田宏一郎 : 構造物の塑性設計(その4), 殘留力を有する板,の不安定現象について, 日本造船協會論文集, 第115 (1964), pp.106
2. 佐藤邦彦 : 溶接構造要覽, 黒木出版社 (1988), pp.159~169
3. Nelson,D.V., Effects of Residual Stress on Fatifue Crack Propagation, ASTM STP, Vol.776 (1982), pp.172
4. 渡 正紀, 佐藤邦彦 : 溶接力學とその 用, 朝倉書店, 照和40年, pp.408~411
5. 渡 正紀, 佐藤邦彦 : ビード溶接による薄板の座屈變形に關する研究, 日本溶接學會誌, 第27卷 第6 (1958), pp.313
6. 藤田, 野本, 寺井, 松井, 木下 : 薄板構造物の溶接變形に關する研究, 日本造船協會論文集, 第142 (1977), pp.182~190
7. 佐藤, 上田, 藤本 : 溶接全書3- 溶接變形 · 殘留 力, 産報出版, (1994), pp.204~213
8. 日本溶接學會編 : 溶接要覽(改訂3版), 丸善株式會社, 照和52年, pp.159~164