

## 실시간 용접변형 계측을 위한 시스템에 관한 연구

정재원\* · 김일수\*† · 김인주\*\*\* · 손성우\* · 심지연\*\*\*

\*목포대학교 기계공학과

\*\*목포대학교 기계조선해양공학부

\*\*\*한국생산기술연구원 친환경부품소재센터

### A Study on System for Real-time Measurement of Welding Distortion

Jae-won Jeong\*, Ill-Soo Kim\*\*,\*†, In-Ju Kim\*\*\*, Sung-Woo Son\* and Ji-Yeon Shim\*\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo National University, Mokpo 534-729, Korea

\*\*Div. of Mechanical Engineering & Naval Architecture & Marine Engineering

Mokpo National University, Mokpo 534-729, Korea

\*\*\*Environmentally Materials & Components Center, KITECH, Cheonan 330-825, Korea

†Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received May 19, 2009 ; Revised June 16, 2009 ; Accepted August 31, 2009)

#### Abstract

Welding deformation during the assembly process is affected by not only local shrinkage due to rapid heating and cooling, but also root gap and misalignment between parts to be welded. Therefore, the prediction and control of welding deformation have become of critical importance. In this study, it was focused on the development of the 3-axis apparatus for real-time measurement of the welded deformation. To achieve the objective, a D-H algorithm has been carried out to check the behavioral and performance evaluation for the developed robot. The sequence experiments were taken the base materials of 400×200×4.5mm plate for butt welding. The real-time experimental measurements are in good agreement with the measured results.

Key Words : GMA(Gas Metal Arc) Welding, Welding distortion, CATIA Simulation, D-H Algorithm

#### 1. 서 론

현재 국내외 조선소에서 건조되고 있는 모든 대형 선박은 블록 건조공법에 의해 생산되고 있다. 선체 블록은 판 부재 간의 연결을 위한 맞대기용접, 판 부재에 보강재를 부착하기 위한 필릿용접으로 조립되는데, 각 용접 조립작업은 필연적으로 용접변형을 수반하고 조립단계의 진행에 따라 변형은 계속 누적된다. 용접공정은 국부적인 가열에 의해 두 물체를 접합하는 것이 일반적이며, 구조물에 국부적인 가열은 열응력을 발생시키고, 발생한 열응력은 열변형을 생성한다<sup>1)</sup>. 이러한 열변형이 용접공정이 완료된 후에 영구적으로 남아있는 변형을 용접변형이라 정의한다. 용접공정을 이용한 강구조물의

제작에서 발생한 용접변형은 구조물의 치수를 변화시키거나, 용접 후 조립공정을 어렵게 만들기 때문에 교정과 같은 추가적인 재작업 공정을 요구하기도 한다. 현재 이러한 변형을 제어하기 위하여 다양한 정도관리 작업을 수행하고 있으나, 정도관리 기법의 역학적 특성이 충분히 검증되지 않은 상태에서 숙련공의 경험에 의존하여 시공되는 관계로 그 효과가 일관되지 못하며, 어떤 경우 오히려 시공 부위의 응력특성을 악화시키는 주요 원인이 되고 있다. 따라서 블록의 조립과정에 따라 발생하는 용접변형을 측정하고, 예측할 수 있는 해석적인 방법의 개발은 매우 중요한 일이다<sup>2)</sup>.

용접변형의 예측에 관해서는 많은 공학자들에 의해 연구가 이루어져 왔으며 실제 3차원 구조물의 용접변형을 예측할 수 있는 실용적인 방법도 제시되고 있다<sup>3)</sup>.

이러한 방법은 유한요소법을 이용하고 있는데 이는 모델링, 요소생성 및 해석의 단계를 기본으로 하고 있다. 또한 용접 변형량을 예측 및 교정하고 이를 방지하기 위한 연구의 필요성이 제기되었고, 유한요소법에 의한 I형 빔의 용접변형에 관한 연구를 시작으로 일련의 연구들이 진행되었다. Sasayama<sup>4)</sup>는 단순보 이론을 이용하여 용접각장에 따른 종굽힘 변형량을 예측하였다. Okerblom<sup>5)</sup>은 열탄소성 해석을 이용하여 종굽힘 변형량을 예측하는 간이식을 제시하였고 실험을 통해 그 신뢰성을 확인하였다. Tsuji<sup>6)</sup>는 열탄소성 해석을 통해 띠판(strip plate)의 단부를 용접했을 때 발생하는 변형량을 계산하고 이를 실험에 의해 얻어진 변형량과 비교·분석을 통하여 개발 시스템의 현장 적용성을 확인하였다. Masubuchi<sup>7)</sup>는 T형 알루미늄 부재에 대해 1차원 열탄소성 해석을 수행하여 최종변형을 구하고 이를 실험과 비교·분석하였다. Akoi<sup>8)</sup>는 Tsuji<sup>6)</sup>의 연구결과를 기초로 해석과 실험을 통해 변형에 영향을 주는 인자를 분석하여 간이식을 제시하였다.

하지만 위에서 언급한 대부분의 연구가 용접변형의 해석 및 제어기법과 관련된 분야에 집중되어 왔으며, 용접공정 전 변형량을 예측하고, 이를 최소화하기 위한 기술적 방법들이 제시 되었을 뿐 용접 중 실시간으로 용접변형을 계측하고 모니터링 하는 기술에 대한 연구는 활발하게 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 강 구조물의 용접작업 중 발생하는 용접변형을 실시간으로 계측할 수 있는 3축 장치의 개발을 수행하였으며 이를 위하여 두 가지 방법의 운동학적 해석과 CATIA를 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 이를 용접실험에 적용하여 개발된 장치의 측정성능을 평가하였다.

## 2. 용접변형 계측장치 개발

### 2.1 이론적 배경 및 운동학적 분석

용접변형 계측용 3축 장치의 설계를 위하여 공간상의 한 점을 표시함에 있어 3차원 좌표계 사용은 필수적이다. 공간상에서 한 고정점과 또 다른 이동점에 대한 거리를 측정하기 위해서 구면좌표계가 적합하다. 즉, 구면좌표계에서는 원점으로부터 거리  $r$ 과 원통 평면으로부터 점까지의 각도  $\phi$ , 정사영면에서 각도  $\theta$ 가 측정되면 공간상의 한 점의 벡터를 계산할 수 있다. 이와 같이 공간상의 공간좌표에서 변환이 가능하다는 점을 고려하여 Fig. 1과 같은 상대좌표계를 이용하여 공간상의 한 점의 위치를 파악할 수 있으며 이는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

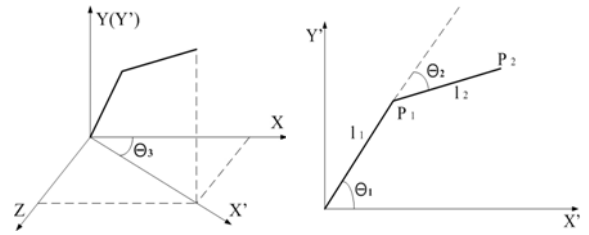


Fig. 1 Coordinate system for design of apparatus

$$\begin{aligned}
 P_x &= \cos\theta_3 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \cos\theta_1 \\
 P_y &= l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \sin\theta_1 \\
 P_z &= \sin\theta_3 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + l_1 \sin\theta_1
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

상기 식에서 Link의  $l_1$ 과  $l_2$ 는 고정된 값이고  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 는 엔코더로부터 측정되는 절대각도 값이다. 즉, 3개의 정밀 절대 값 형태의 엔코더와 2개의 링크길이만 측정하면 배관의 거동을 3차원 좌표 값을 계산할 수 있다. 용접변형 계측장치의 설계 개념도는 Fig. 2와 같으며, 3차원의 변형을 측정하기 위하여 3개의 엔코더를 이용하였다.

설계된 변형계측 장치의 기구학적 움직임을 규명하고 이를 확인하기 위해서 운동학적 분석을 수행하였다. 위에서 언급한 공간상 한 점의 변위를 측정하는 원리로부터 확인할 수 있는 장치의 형상을 이용한 분석과 더불어 D-H 알고리즘을 이용한 운동학적 분석을 실시하였다.

D-H(Denavit-Hatenberg) 규약은 매니퓰레이터의 각각 다른 조인트의 좌표를 정렬하는 방법으로 각 링크 좌표계의 운동학적 변수를 설정한 후 이를 동차변환 행렬로 취하는 단계를 거쳐 분석을 실시하게 된다.

먼저 정 운동학 분석(forward kinematics)을 위하여 Fig. 3에서 나나낸 바와 같이 D-H 규약에 의한 매니퓰레이터의 조인트 좌표와 변수를 설정하는데 이는 완전한 동차변환 행렬의 수립을 위한 4개의 변수(조인트 각도  $\theta$ , 조인트 거리  $d$ , 링크의 길이  $a$ , 링크의 회전각  $\alpha$ ) 정의를 포함한다. 그리하여 각 좌표의 변환행렬을 연산하면 식(2)와 같이 공간상의 한 점 P에 대한 수식을 도출할 수 있다.

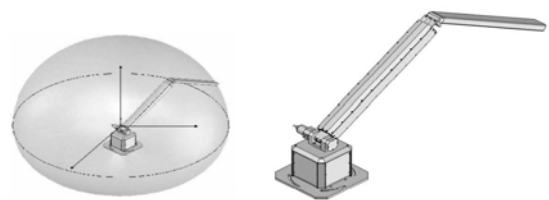
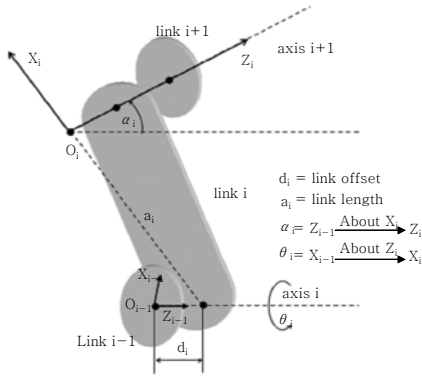


Fig. 2 Conceptual model for design of apparatus



**Fig. 3** Schematic of the adjacent axes with the appropriately assigned reference frames for determining the D-H parameter

$$\begin{aligned}
 P_x &= a_3 C_1 C_2 C_3 - a_3 C_1 S_2 S_3 + a_2 C_1 C_2 \\
 P_y &= a_3 S_1 C_2 C_3 - a_3 S_1 S_2 S_3 + a_2 S_1 C_2 \\
 P_z &= a_3 S_2 C_3 + a_3 C_2 S_3 + a_2 S_2
 \end{aligned} \tag{2}$$

where,  $C_i = \cos(\theta_i)$ ;  $S_i = \sin(\theta_i)$ , ( $i = 1..3$ )

역 운동학 분석(inverse kinematics)는 엔드 이펙터(end effector)의 포지션과 방위가 주어졌을 때 각 조인트의 각을 구하는 방법이며 이를 통하여  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ 를 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \text{Atan2}(P_y, P_x) + \text{Atan2}(0, \pm 1) \\
 \theta_2 &= \text{Atan2}(K, \pm \sqrt{R^2 - K^2}) - \text{Atan2}(B, A) \\
 \theta_3 &= \text{Atan2}(S_3, C_3)
 \end{aligned} \tag{3}$$

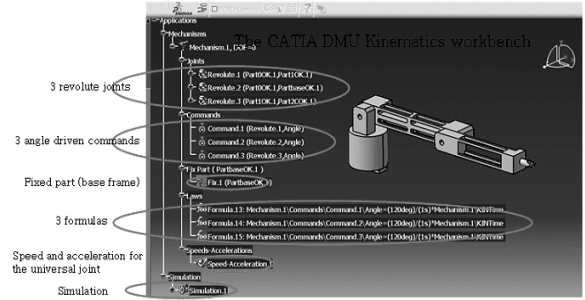
### 2.2 CATIA를 이용한 시뮬레이션

설계된 용접변형 계측장치의 구동을 확인하고 조립 및 간섭현상을 검토하기 위하여 3차원 범용 설계 프로그램인 CATIA V5를 이용하여 장치 설계 및 시뮬레이션을 수행하였다.

베이스 프레임, 링크 0, 링크 1, 링크 2 등 4개의 부분에 대한 각각의 모델을 생성하고 각 원점을 구속한 후, 3개의 회전 조인트에 대한 디지털 목업(Digital Mock-Up : DMU)을 수행한 뒤 시뮬레이션으로부터 얻어진 값을 확인하였다.

Fig. 4는 설계된 계측장치 기구부에 대하여 디지털 목업을 수행하는 화면을 나타내며, Fig. 5는 시뮬레이션을 수행하기 위한 회전 조인트, 고정부(베이스 프레임) 등의 모델생성 조건을 설정하는 화면을 나타낸다.

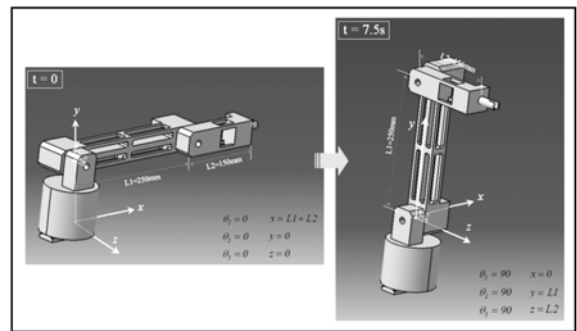
본 연구에서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 계측장치의 각 축이 모두 0° 일 때를 시작으로 모든 축의 각도



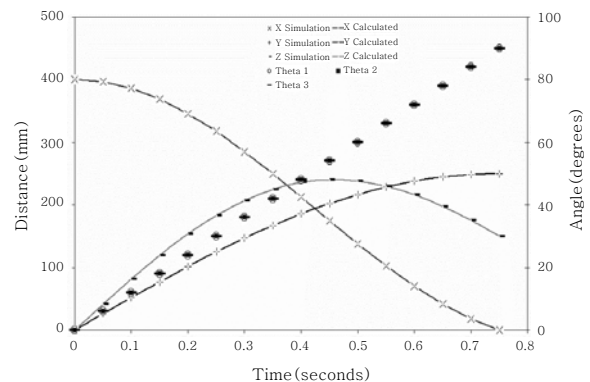
**Fig. 4** The CATIA DMU Kinematics workbench



**Fig. 5** Simulation with Laws icon in the tool bar



**Fig. 6** Process of CATIA simulation



**Fig. 7** Comparison between simulated and calculated results

가 직각을 이룰 때까지 7.5초 동안의 움직임을 시뮬레이션 하였으며, 이를 통하여 얻어진 각 축 방향으로의 거리를 기준으로 한 결과값을 도출하고자 하였다. Fig. 7은 운동학적 분석으로부터 계산된 값과 CATIA 시뮬레이션으로부터 얻어진 값을 비교한 그래프를 나타내며 두 값이 잘 일치함을 보여준다.

### 3. 용접 실험

개발된 용접변형 계측장치의 변형의 측정 성능평가를 위하여 용접실험을 실시하였다. 개발된 3축 계측장치, 데이터 통신모듈, 그리고 모니터링 시스템을 통합하여 용접 중 발생하는 변형을 계측하기 위한 전체 시스템을 구성하였다. 각 지점의 변형량을 계측하기 위하여 3축 계측장치 2대를 용접 시험편의 양 끝단에 설치하고 3개의 엔코더로부터 측정된 변위 데이터를 RS-232 케이블을 통하여 각각의 송신부로 전달하게 되고, 이는 무선통신 방식을 이용하여 하나의 수신부로 받아들여진 뒤, 모니터링 PC의 화면을 통하여 실시간으로 측정되는 변형 데이터를 관찰하였다. Fig. 8은 본 연구의 실험구성을 나타낸 개요도이다.

본 연구에서는 400×200×6mm 과 400×200×4.5mm의 두 가지 용접 시험편을 준비하여 4가지 case 별로 맞대기(Butt) 용접을 실시하였다. 용접은 500A급 일반 CO<sub>2</sub> 용접기를 이용하였으며 사용된 시험편은 용접용 압연강재인 SM490A이다. 용접 시작부와 끝부분에 각각 계측장치 A와 B를 설치하고 직선 캐리지와 레일을 사용하여 용접을 수행하였으며 본 실험에 사용된 용

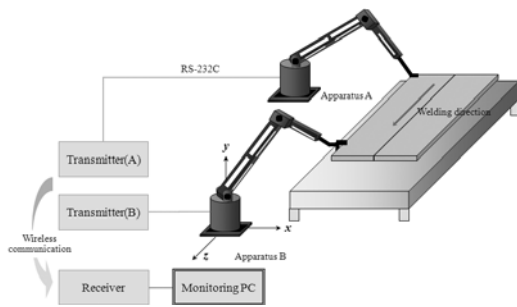


Fig. 8 Schematic diagram for experiment

Table 1 Welding conditions for this study

Parameter	Value
Welding Current(A)	200
Arc Voltage(V)	25
Welding Speed(cm/min)	29
Shielding Gas Flow(l/min)	18
Wire Diameter(mm)	1.2

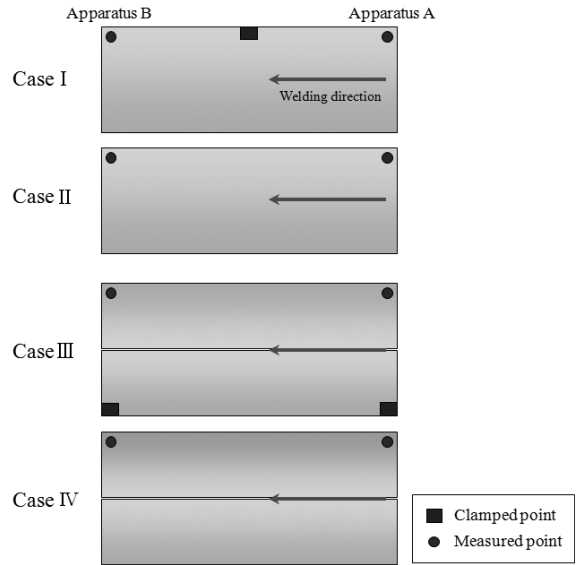


Fig. 9 The clamped and measured point

접조건은 Table 1과 같다.

용접공정의 특성상 시험편의 구속위치에 따라 발생하는 변형의 양이 크게 달라지므로 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 4가지의 시험편 고정위치를 선정하여 실험을 실시하였다. 용접이 완료된 후 자연냉각방식에 의하여 용접부를 냉각시켰으며, 각 축의 변형량 모니터링을 통하여 변형이 완전히 소멸될 때까지 측정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

앞서 기술한 4가지 Case에 대하여 두 대의 계측장치로부터 측정된 각 축(x, y, z)의 변형량을 비교·분석하였다. 변형의 측정 주기는 50ms로 설정하였다.

Figs. 10~11은 계측장치의 설치점 중간부를 고정 한 상태에서의 비드 온 플레이트(bead-on-plate)용접에 대한 측정결과를 나타낸다. 용접 시작점 부근에 설치된 장치 A와 용접 끝단부에 설치된 장치 B에 의해 측정된 변형특성이 많은 차이를 보임을 알 수 있었다. 용접이 시작되는 시점인 약 15초 지점에서 A점 부근의 변형이 급격하게 발생되며 B점 부근에서는 용접시작 약 50초 후부터 변형이 발생하여 시간이 지남에 따라 서서히 감소함을 확인 할 수 있었다.

Figs. 12~13은 아무런 구속조건을 적용하지 않은 시험편에 발생한 변형측정의 결과를 나타내며, Case I에 비하여 모든 축에 대하여 큰 폭의 변형량이 관찰되었다.

또한 Figs. 14~15는 계측장치 설치점의 반대편 두 지점을 고정한 상태에서의 맞대기 용접에 대한 변형계측 결과를 나타낸다. 비드 온 플레이트 용접실험과 다소 비슷한 변형 양상을 보이거나 전반적으로 큰 변형량이

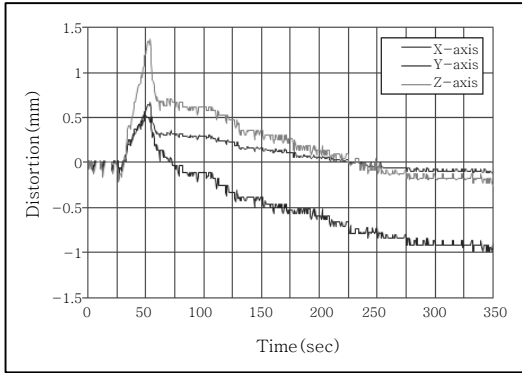


Fig. 10 Result of measured by apparatus A (Case I)

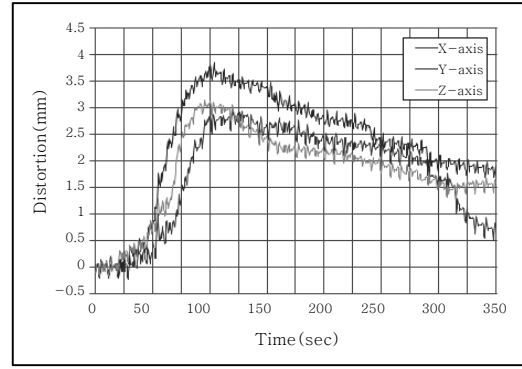


Fig. 14 Result of measured by apparatus A (Case III)

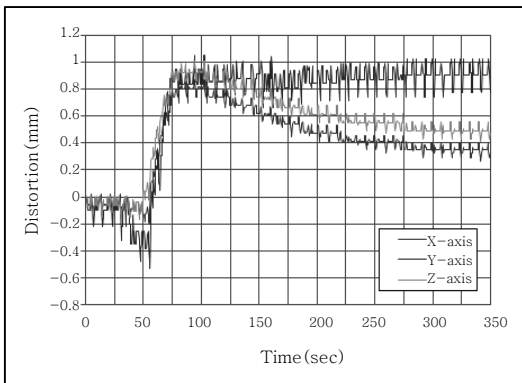


Fig. 11 Result of measured by apparatus B (Case I)

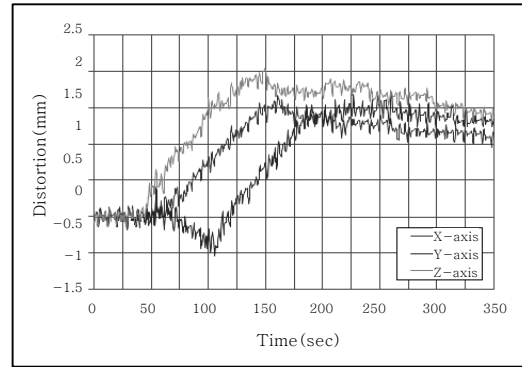


Fig. 15 Result of measure by apparatus B (Case III)

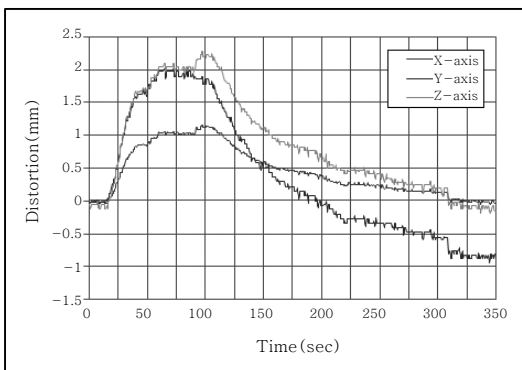


Fig. 12 Result of measured by apparatus A (Case II)

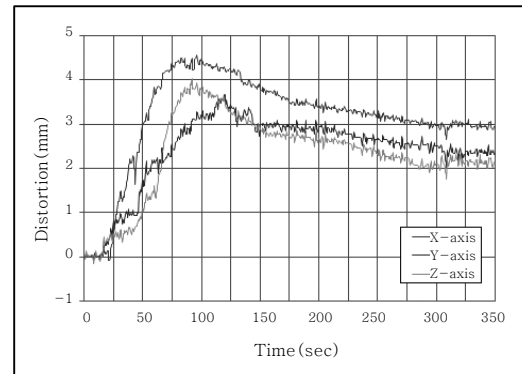


Fig. 16 Result of measured by apparatus A (Case IV)

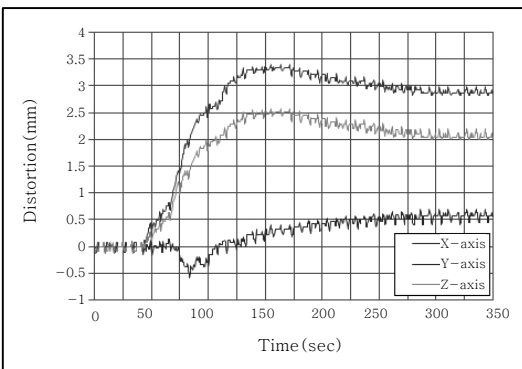


Fig. 13 Result of measured by apparatus B (Case II)

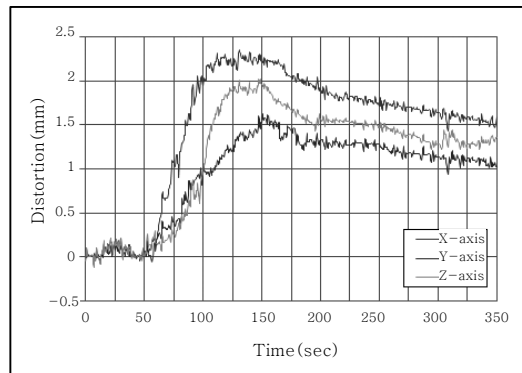


Fig. 17 Result of measured by apparatus B (Case IV)

계측됨을 확인하였다. 동일한 방법으로 아무런 구속이 없는 조건에서의 맞대기 용접실험에 대한 계측결과를 Figs. 16~17에 나타내었다. 본 실험에 적용한 4가지의 Case 중 가장 큰 변형량을 보임을 알 수 있었으며, 시험편의 수직방향 즉, y축 방향으로의 최종적인 각 변형량은 A와 B 지점에서 각각 약 2.3mm와 1.0mm 임을 확인하였다.

2 가지 시험편의 4 가지 구속조건에 대하여 변형 측정 성능 평가를 위한 용접실험을 실시한 결과, 시험편의 서로 다른 구속조건에 따라 변형의 양상이 서로 상이함을 관찰하였고, 용접 중 발생하는 3차원적인 미세 변형 측정에 있어 개발된 변형계측 장치가 대체로 정확한 계측 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 강 구조물의 용접작업 시 발생하는 용접변형을 실시간으로 측정할 수 있는 3축 계측장치를 개발하였으며, 유효성을 입증하기 위하여 이를 용접실험에 적용하여 변형계측 성능평가를 실시함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 용접 시 발생하는 3차원적인 변형을 측정할 수 있는 시스템의 설계를 위하여 두 가지 방법의 운동학적 해석을 실시하고 3축 계측장치의 개념설계를 수행하였다.

2) 장치의 기구학적 움직임을 확인하고 간섭을 검토하기 위하여 CATIA를 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 운동학적 분석 결과와 비교함으로써 설계된 계측장치의 유효성을 입증하였다.

3) 개발된 변형계측 장치의 성능 평가를 위하여 두 대의 장치를 4가지 case 맞대기(butt) 용접실험에 적용함으로써 대체로 우수한 변형계측 성능을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. K. Masubuchi : Analysis of welded structures-Residual stresses, distortion, and their consequences. Pergamon Press, Oxford. (1980)
2. P. Michaleris and A. DeBicari : Prediction of welding distortion. *Welding Journal* **76-4** (1997), 172-179
3. S. I. Seo, and C. D. Jang : A study on the prediction of deformations of welded ship structures, *Journal of ship production*, **15-2** (1999)
4. Y. Sasayama, K. Masubuchi and S. Moriguchi, : Longitudinal Deformation of a Long Beam due to Fillet Welding, *Welding Journal*, **34** (1955)
5. N. O. Okerblom : The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures, Her Majesty's Stationery Office, (1958)
6. I. Tsuji and K. Yamaguchi : Distortion and Shrinkage Stresses in Edge Welding of Beams, *Journal of the Western Society of Naval Architects of Japan*, **42** (1967)
7. K. Masubuchi and V. J. Papazoglou : Analysis and control of Distortion in Welded Aluminum Structures, *SNAME Transaction*, **86** (1978)
8. H. Aoki, K. Nagai, H. Kuwajima and M. Watanabe : Estimation of Welding Deformations for Actual Plate Girders, *Journal of the Japanese Welding Society*, **50-10** (1981)
9. M. Watanabe and K. Satoh : Fundamental study on buckling of thin steel plate due to bead-welding. *J. Japan Weld. Soc.* **27-6** (1959), 13-20
10. K. Satoh and T. Terasaki : Effect of welding conditions on residual stress distributions and welding deformation in welded structures materials. *J. Japan Weld. Soc.* **45-1** (1976), 42-53
11. K. Terai, S. Matsui and T. Kinoshita : Study on Prevention of Welding Deformation in Thin-Skin Plate Structures. *Kawasaki Technical Review* **61** (1976), 61-66
12. Q. Guan, R. H. Leggatt and K. W. Brown : Low stress, non-distortion (LSND) TIG welding of thin-walled structural elements. *The Welding Institute Research Report Abington, Cambridge, U.K.* **374** (1988)