

## 박판 변형률 측정 오차의 보정에 관한 연구

차지혜\* · 김영탁#

(2004년 4월 12일 접수)

### Study on the Compensation of Strain Measurement Error in Sheet Metals

J. H. Cha and Y. T. Keum

#### Abstract

In the sheet metal forming operations, the strain measurement of sheet panel is an essential work which provides the formability information needed in die design, process design, and product inspection. To measure efficiently complex geometry strains, the 3-dimensional automative strain measurement system, which theoretically has a high accuracy but practically has about 3~5% strain error, is often used. For eliminating the strain error resulted in measuring the strains of formed panels using an automated strain measurement system, the position error calibration method is suggested, which computes accurate strains using the grids with accurate nodal coordinates. The accurate nodal coordinates are calculated by adding the nodal coordinates measured by the measurement system and the position error found using the multiple regression method as a function of the main error parameters obtained from the analysis of strain error in a standard cube. For the verification, the strain distributions of square and dome cups obtained from the position error calibration method are compared with those provided by the finite element analysis and ASAME.

**Key Words** : Sheet Metal Forming, Strain Error Compensation, Strain Measurement, Position Error Calibration Method, ASAME, Strain Calibration

#### 1. 서론

박판성형에 있어서 판재의 변형률 측정은 금형 설계, 공정설계, 제품 검사 등에 필요한 실험적 자료를 얻는데 필수적인 작업이라 할 수 있다. 현재 가장 널리 보급되어 있는 3차원 변형률 측정 장치는 이론적으로는 고정도의 측정이 가능하나 3차원 좌표를 정확히 측정하는 것이 용이하지 않고, 대형판재의 경우는 변형률을 측정하는데 막대한 시간과 노력이 필요한 문제점이 있다.

비접촉식 혹은 광학식 3차원 측정기술은 지난 수십년간 국내외에서 지속적으로 고안, 개선되어 왔다. Tsai 는<sup>(1)</sup> TV 카메라를 이용한 머신비전의 3차원 카메라 보정법을 제안하였으며, 이 방법은 비교적 정확하게 측정이 가능하여 오늘날에도 많이 사용되고 있다. Manthey 와 Lee 는<sup>(2-3)</sup> 비전을 기반으로 한 측정시스템으로 박판 표면에 사각 그리드 표시가 된 표면 변형률을 측정하였다.

Lee등은<sup>(4-5)</sup> 화상처리를 이용해 변형률을 자동적으로 얻는 기술을 개발하여 측정시스템을 상용

\* 한양대학교 일반대학원 정밀기계공학과  
# 교신저자: 한양대학교 CPRC 기계공학과

화하였으며, 상용화된 자동변형률 측정시스템의 결과를 FEM해석과 비교하여 정확성을 검증하였다. 김형중 등은<sup>(6-9)</sup> 화상처리법을 이용하여 곡면 변형률 측정의 알고리즘을 제안하고 3차원 곡면 변형률 측정 시스템을 개발하여 변형률 측정에서 오는 비전 센서의 오차 보정을 위한 연구를 수행한 바 있다.

박판 표면에 소성 변형이 일어난 부분의 변형률을 측정하기 위하여 자동 변형률 측정 장치(AS-AME: Automated Strain Analysis and Measurement Environment)가<sup>(10)</sup> 일반적으로 사용된다. 자동 변형률 측정 장치는 원형이나 사각형의 그리드가 에칭된 박판표면의 변형률을 3차원 CCD카메라로 측정하여 박판표면의 변형률 분포를 가시화시켜주는 장치로, 변형 전후의 그리드 크기의 차이로 변형률을 계산한다. ASAME는 그리드의 3차원 좌표를 결정하기 위하여, 2개 이상의 다른 각도에서 촬영한 그리드 이미지들을 2차원화하고, 2차원화된 좌표와 테이블 회전 각도 그리고 카메라 위치로부터 3차원 좌표를 계산한다.

ASAME는 시편 변형 부분의 그리드 패턴을 촬영하는 CCD 카메라, 그리드 패턴을 각기 다른 각도로 촬영할 수 있는 회전 테이블, CCD 카메라의 조정 위치와 회전 테이블의 회전 각도를 정밀 측정하여 컴퓨터 데이터 신호로 변환하는 인코더, 그리고 읽어 들인 변형 데이터를 분석하여 변형률을 계산하는 소프트웨어로 구성되어 있다. (Photo 1 참조)

본 연구에서는 ASAME로 측정한 변형률의 오차를 보정하기 위하여 표준 큐브를 제작하고, 변형률을 측정할 때 영향을 주는 주요 인자들을 표준큐브의 변형률을 측정하여 얻은 다음, 이 주요 인자들을 변수로 그리드 절점 위치 보정식을 다중 회귀법으로 구하고 정확한 위치 좌표를 갖는 절점들로 구성된 그리드로부터 정확한 변형률을 계산하였다.

## 2. 변형률 오차 인자

본 연구는 자동 변형률 측정 장치를 이용하여 변형률 측정 시 나타나는 오차를 근본적으로 제거하는데 그 목적이 있다. 변형률은 카메라에서 인식한 에칭된 그리드의 좌표 값으로부터 계산되기 때문에 정확한 측정좌표의 기준을 만들어 주어야 한다.

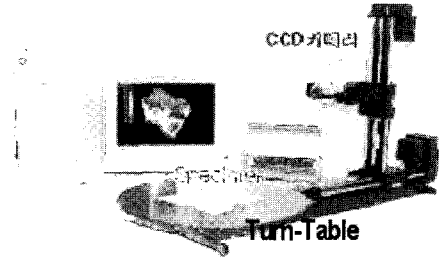


Photo 1 Automated Strain Analysis and Measurement Environment (ASAME)

이를 위해 먼저 가로 x 세로 x 높이의 치수가 각각 40mm x 40mm x 40mm인 표준 치수 큐브를 만들고 5mm간격으로 두께 0.1mm의 선으로 그리드 표시를 하였다. (Fig.1 참조) 그리고 변형을 가하지 않은 상태의 표준 치수 큐브를 측정하였을 때 나타나는 장치의 시스템 오차를 변형률 오차라 하고 이것을 합성각도, 카메라 높이, 카메라 이동거리, 회전 테이블의 회전각도, 그리드의 크기를 변수로 하여 측정하였다

### 2.1 합성각도

카메라에서 받아들인 두 이미지의 사이 각, 즉 합성각도에 따른 변형률 오차를 알아보기 위하여 합성각도에 따른 주변형률을 여러 상황에서 측정하였다. 특히 여러 카메라 높이에서 합성각도에 따른 주변형률의 오차를 Fig.2에 나타 내었다.

Fig.2의 실험결과에 의한 합성각도와 주변형률 오차의 관계는 식(1)과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{major} = a_0(c + a_1)^2 + a_2 \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 두 이미지의 합성각도이고,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ 는 실험치를 최소자승법으로 피팅하여 얻은 상수들이다.

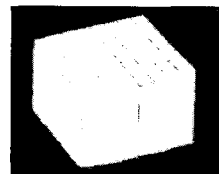


Fig. 1 Standard cube for calibrating the strains measured by ASAME

### 2.2 카메라 높이

Fig. 3은 카메라 높이에 따른 주변형률의 오차를 카메라 이동거리에 따라 측정한 것이다. 여기서 카메라 높이는 카메라가 수직으로 시편 쪽으로 이동한 거리이다. Fig. 3에서 보여 주는 실험 데이터를 바탕으로 변형률 오차와 카메라 높이의 관계를 식(2)와 같이 표시하면,

$$\epsilon_{major} = b_0 h + b_1 \quad (2)$$

여기서  $h$  는 카메라 높이이고,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  는 실험치로부터 구해지는 상수들이다.

### 2.3 카메라 거리

다음은 카메라가 시편으로부터 수평으로 이동한 거리, 즉 카메라 거리에 따른 주변형률의 오차를 여러 조건에서 측정하였다. 여러 합성각도를 고려한 카메라 거리에 따른 주변형률 오차가 Fig. 4와 같이 측정되었다. 실험 데이터에 기초한 카메라 거리와 변형률 오차의 관계는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{major} = c_0 d + c_1 \quad (3)$$

여기서  $d$  는 카메라 이동거리이고,  $c_0$  와  $c_1$  는 각각 실험치를 피팅하여 구할 수 있다.

### 2.4 그리드 크기

Fig. 5는 그리드 크기에 따라 측정된 주변형률의 오차를 나타낸다. 변형률 측정에 사용된 정사각 그리드 들은 한변이 10mm, 5mm, 3mm로 선두께가 0.3mm이었다. 동일한 영역의 변형률을 측정 하더라도

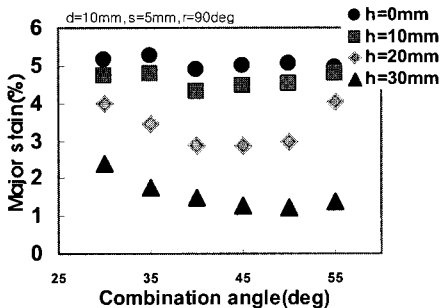


Fig. 2 Major strains associated with combination angles in various camera heights

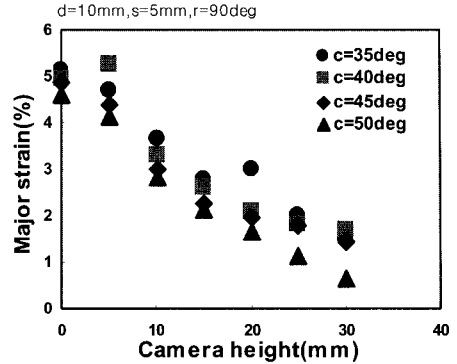


Fig. 3 Major strains associated with camera heights in various combination angles

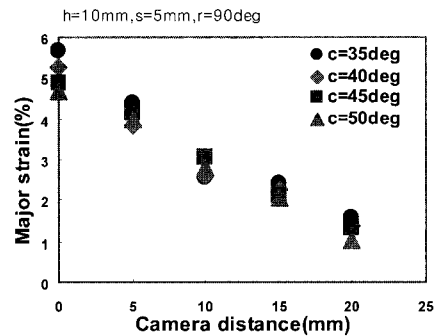


Fig. 4 Major strains associated with camera distances in various combination angles

측정영역을 사용한 그리드로 분할하여 변형률을 계산하기 때문에 그리드 크기에 따라 변형률이 달리 나타난다. Fig. 5의 실험 데이터로부터 그리드 크기와 변형률 오차의 관계는 식(4)와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{major} = d_0 s + d_1 \quad (4)$$

여기서  $s$  는 카메라 이동거리이고,  $d_0$  와  $d_1$  은 각각 실험치로부터 계산되는 상수들이다.

### 2.5 회전테이블 회전각도

Fig. 6은 회전테이블의 회전 각도를 달리하여 주변형률의 오차를 다양한 합성각도에서 측정한 결과이다. 여기서 회전각도란 회전테이블을 이동시킨 각도이다. 실험데이터에 의하여 식(5)는 회전 테이블의 회전각도와 변형률 오차의 관계를 나타낸다.

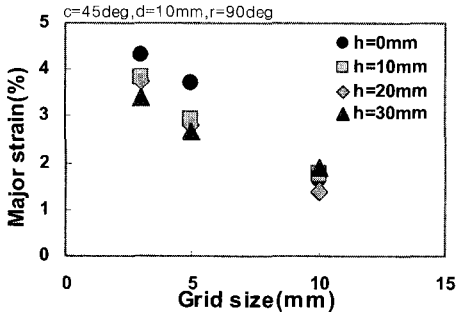


Fig. 5 Major strains associated with grid sizes in various camera heights

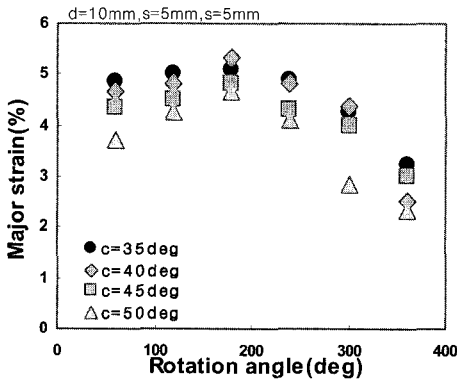


Fig. 6 Major strains associated with rotation angles in various combination angles

$$\epsilon_{major} = e_0(r + e_1)^2 + e_2 \quad (5)$$

여기서  $r$  은 회전테이블의 회전각도이고,  $e_0$ ,  $e_1$ , 그리고  $e_2$  는 실험치로부터 구해지는 상수들이다.

### 2.6 종합

식(1), 식(2), 식(3), 식(4), 그리고 식(5)로 표현되는 변형률 오차 영향 인자들이 변형률에 미치는 영향력을 알아보기 위해 다중회귀법 (multiple regression method)으로 오차인자들을 변수로 주변형률을 다음과 같이 나타내었다.

$$\epsilon_{major} = 0.0001349c^2 - 0.183c - 0.732h - 1.4707d - 0.0324s - 2.4273r^2 + 0.156r + 0.257 \quad (6)$$

여기서  $c$ 는 합성각도,  $h$ 는 카메라 높이,  $d$ 는 카메라 이동거리,  $s$ 는 그리드 크기,  $r$ 은 회전 테이블의 회전각도이다

식(6)으로부터 5개 인자 중에 카메라 높이 $h$ , 카메라 이동거리 $d$ , 회전테이블의 회전각도 $r$ 가 변형률에 크게 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다. 이로서, 위치오차를 보정하기 위하여 카메라 높이  $h$ , 카메라 이동거리 $d$ , 그리고 회전 테이블의 회전각도 $r$ 의 3개 보정인자를 위치 보정 인자로 사용할 수 있음을 알았다.

### 3. 위치 오차 보정

변형률 측정데이터를 바탕으로 카메라 높이, 카메라 위치, 회전테이블의 회전각도가 변형률에 영향을 미치는 주요 인자임을 알았고, 위 인자들을 변수로 하여 자동 변형률 측정 장치에서 인식한 큐브 그리드 절점의 좌표와 실제 좌표와의 오차를 각각  $x$  좌표,  $y$  좌표, 그리고  $z$  좌표로 나누어 2절에서와 같은 방법으로 다중 회귀법을 이용하여 함수로 나타내고 측정한 그리드 절점의 좌표를 정확히 얻을 수 있는 위치 보정식을 구하였다.

따라서 이 위치 보정식으로부터 얻은 오차 보정치와 자동변형률 측정 장치로 계속된 좌표를 합산하면 정확한 그리드 절점의 좌표를 얻을 수 있다. 이로서 정확한 위치 좌표를 갖는 절점들로 구성된 그리드는 정확한 변형률을 계산케 한다.<sup>(11)</sup>

#### 3.1 x 좌표 오차보정

임의로 지정한 한점의  $x$  좌표와 자동변형률 측정 장치로부터 인식된  $x$  좌표와의 차이를  $x$  축 방향의 오차로 정의하고, 이  $x$  축 방향의 오차  $er(x)$ 를 2절에서 구한 오차 보정 인자들을 변수로 하여 다중 회귀법으로 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} er(x) = & -2.408 \times 10^{-7} r^2 + 9.4 \times 10^{-5} r + 2.48 \times 10^{-5} h^2 \\ & - 1.184 \times 10^{-3} h + 2.1 \times 10^{-5} d^2 - 5.932 \times 10^{-4} d \\ & + 0.003418 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $r$ 은 회전테이블의 회전각도,  $h$ 는 카메라 높이, 그리고  $d$ 는 카메라 이동거리이다.

#### 3.2 y 좌표 오차보정

$x$  좌표 오차와 마찬가지로 자동변형률 측정 장치로 인식된  $y$  좌표와 임의로 지정한  $y$  좌표와의 차이를  $y$  축 방향의 오차로 정의하고, 이  $y$  축 방향의 오차  $er(y)$ 를 오차 보정 인자들을 변수로 다중 회귀법으로 구하면 다음과 같다.

$$er(y) = -1.236 \times 10^{-7} r^2 + 5.9 \times 10^{-5} r + 2.67 \times 10^{-5} h^2 - 1.42 \times 10^{-3} h + 2.57 \times 10^{-5} d^2 - 2.38 \times 10^{-3} d + 0.003642 \quad (8)$$

여기서  $r$  은 회전테이블의 회전각도,  $h$  는 카메라 높이,  $d$  는 카메라 이동거리이다.

### 3.3 z 좌표 오차보정

x좌표 오차와 y좌표 오차의 보정과 마찬가지로 자동변형을 측정 장치로부터 인식된 z 좌표와 임의로 지정한 z 좌표와의 차이를 z 축 방향의 오차로 정의하고, 이 z 축방향의 오차  $er(z)$ 를 오차 보정 인자들을 변수로 다중 회귀법으로 구하면 다음과 같다.

$$er(z) = -5.67 \times 10^{-8} r^2 + 3.38 \times 10^{-5} r + 1.75 \times 10^{-5} h^2 - 3.06 \times 10^{-4} h + 2.42 \times 10^{-4} d^2 + 3.73 \times 10^{-3} d - 0.0198 \quad (9)$$

여기서  $r$  은 회전테이블의 회전각도,  $h$  는 카메라 높이,  $d$  는 카메라 이동거리이다.

## 4. 검 증

본 연구에서 제안하는 위치 오차 보정법을 검증하기 위하여 3 절에서 구한 위치 오차 보정식을 사용하여 성형된 사각컵과 돔컵의 변형률을 구하고 정밀 측정용 줄자를 이용한 측정치와 유한요소 해석치 그리고 ASAME 측정치를 서로 비교하였다.

### 4.1 사각 컵

Fig. 7은 성형된 사각 컵의 1/4에 대한 주변형률 분포를 나타낸 그림이며, Fig. 8은 Fig. 7에서 보여주고 있는 한 요소에서의 주변형률을 실제 측정치, 유한요소 해석, 자동변형을 측정, 보정식으로 구해 비교한 그림이다. 보정식에 의해 계산된 변형률 오차는 자동변형을 측정장치의 측정치 보다 평균 1.81% 작고, 유한요소 해석 결과보다 평균 0.69% 크며 실제 측정치 보다 평균 1.58% 큼을 알 수 있었다.

### 4.2 돔 컵

Fig. 9는 돔 컵 1/4의 주변형률 분포를 나타낸 그림이며, Fig. 10은 주변형률을 실제 측정치, 유한

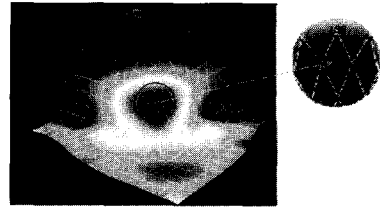


Fig. 7 Major strain distribution of the square cup and an element the strain will be compared

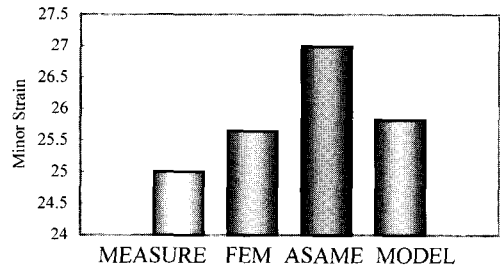


Fig. 8 Comparison of major strain in the element shown in Fig.7 among measurement (MEASURE), FEM analysis(FEM), ASAME measurement (ASAME), and current calibration (MODEL)

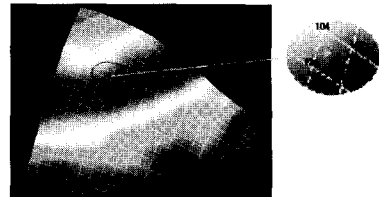


Fig. 9 Minor strain distribution of the dome cup and an element the strain will be compared

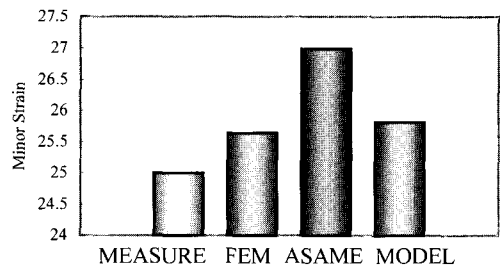


Fig. 10 Comparison of minor strain in the element shown in Fig.9 among measurement (MEASURE), FEM analysis(FEM), ASAME measurement (ASAME), and current calibration (MODEL)

요소 해석, 자동변형률 측정, 그리고 보정 식으로 구해 비교한 그림이다. 보정식에 의해 계산된 변형률 오차는 자동변형률 측정장치의 측정치보다 평균 2.8%작고, 유한요소 해석 결과 보다 평균 0.93%크며 실제 측정치 보다 평균 0.82%크게 평가되었다.

이상의 검증을 통하여 제안한 위치 보정식은 자동변형률 측정장치에서 측정한 측정치를 보정하여 측정치보다 정확하게 변형률을 제공함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 자동변형률 측정 장치를 사용하여 변형률을 측정했을 때 나타나는 오차를 보정하기 위하여 여러 실험 조건에서 변형률을 측정하여 변형률 오차에 영향을 미치는 주요 인자들을 찾고 이들을 매개 변수로 하여 위치 보정식을 구성하였으며, 성형된 시편에 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 이러한 일련의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 합성각도, 카메라 이동거리, 카메라 높이, 그리드 크기, 회전테이블의 회전 각도를 고려하여 변형률을 측정한 결과, 카메라 이동거리, 카메라 높이, 회전테이블의 회전각도가 비교적 변형률에 영향력을 크게 미치는 인자이다.

(2) 카메라 거리, 카메라 높이, 그리고 회전 테이블의 회전 각도를 변수로 위치오차를 구하고 자동변형률 측정 장치로 측정한 물체의 좌표와 위치오차의 합산으로 정확한 그리드 절점의 좌표를 구한다.

(3) 성형 시편에 위치보정식을 적용하여 비교한 결과, 유한요소 해석결과와 실제 측정치에 매우 근접하여 자동 변형률 측정 장치로부터 측정한 변형률보다 측정 오차가 현저히 저감 되었다.

## 참 고 문 헌

(1) R. Y. Tsai, 1987 "A Veratile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision

Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses" IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323 ~ 344.

- (2) M. I. Kapij, D. W. Manthey, and D. Lee, 1993 "The Development of Knowledge Based Systems to Solve Metal Stamping Problems," Best Manufacturing Solutions: Proceedings of the PMA Technical Symposium, Vol. 3, pp. 67 ~ 76.
- (3) D. W. Manthey, R. M. Bassette, and D. Lee, 1993 "Comparison of Different Surface Strain Measurement Techniques Used for Stamped Sheet Metal Parts," Proceedings of International Body Engineering Conference (IBEC) : Body Assembly & Manufacturing, September 21~23, pp. 106 ~ 111.
- (4) D. W. Manthey, R. M. Pearce, and D. Lee, 1995 "Portable 3D Data Acquisition Technology for Computer Image Generation Visual Databases", Final Report for SBIR Phase I Contract No. N61339-94-C-0058, Naval Air Warfare Center Training Systems Division (NAWCTSD).
- (5) D.W. Manthey, E.M. Hitchcock, D.A. Prinn, and D. Lee, 1997 "Innovations in Video Acquisition and Processing Methods for Visual Databases", Proceedings of the 19th Annual Interservice/ Industry Training Systems and Education Conference, pp. 543 ~ 553.
- (6) 김영수, 김형중, 1997 "화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정에 관한 연구(II)", 한국 소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 142 ~ 146
- (7) 김형중, 김두수, 2000 "중·대형 판재성형 제품의 곡면변형률 측정을 위한 스테레오 비전 시스템의 개선", 한국소성가공학회지 Vol.9, No.4, pp. 404 ~ 412
- (8) 김형중, 2000 "판재 변형률 자동측정시스템의 발전", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.129 ~ 133.
- (9) 김형중, 1999 "비전을 이용한 중·대형 판재성형 제품의 곡면 변형률 측정 알고리즘 개발", 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 269 ~ 272.
- (10) Camsys Inc., ASAME Reference Manual, 1998.
- (11) 차지혜, 박판성형 변형률 측정 오차 보정에 관한 연구, 공학석사 학위 논문, 한양 대학교, 2002.