

## 판재 변형을 자동측정시스템의 발전

김두수\* · 김형종\*\*

# Recent Development of Automated Strain Measurement System for Sheet Metal Parts

D. S. Kim and H. J. Kim

### Abstract

It is reasonable to use the stereo vision and image processing technique to digitize 3D coordinates of grid points and to evaluate surface strains on a sheet metal parts. However, this method has its intrinsic problems such as the difficulty in enhancement of bad images, inevitable error due to digital image resolution of camera and frame grabber, unreliability of strains and thickness evaluated from coarse grid on the corner area with large curvature, and the limitation of the area that can be measured at a time. Therefore, it is still hard to measure strain distribution over the entire surface of a medium- or large-sized stamped part at a time even by using an automated strain measurement system. In this study, the curvature correction algorithm based on the grid refinement and the geometry assembling algorithm based on the global error minimization (GEM) scheme are suggested. Several applications are presented to show the reliability and efficiency of these algorithms.

**Key Words** : Image Processing, Surface-Strain Measurement, Curvature Correction, Geometry Assembling

### 1. 서론

화상처리와 스테레오 비전 기술을 이용하여 자동으로 판재성형 제품의 곡면변형을 측정하는 방법은 약 10년 전 Vogel<sup>(1)</sup> 등에 의하여 상용화된 이래 지속적인 보급과 발전을 이루어왔다<sup>(2-4)</sup>. 변형을 분포를 측정하는데는 격자간의 연결성을 인식하기 쉬운 정사각형격자를 사용하

는 것이 편리한데, 변형률은 격자점들의 3차원 좌표로부터 계산되기 때문에 판재면의 곡률은 고려하기 어렵다. 따라서 성형 전 초기격자의 크기가 곡률을 잘 표현하지 못할 정도로 크면 이로부터 측정되는 곡면변형률과 두께 값은 상당한 오차를 포함하게 된다. 반면, 곡률을 잘 표현할 수 있을 정도로 작은 크기의 격자를 사용할 경우 카메라와 프레임그래버의 제한된 해상도 때문에 측정오

\* 강원대학교 대학원

\*\* 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

차가 커지거나, 그렇지 않으면 오차를 줄이기 위하여 충분히 확대해서 촬영해야 하므로 같은 측정 면적에 대하여 더 많은 회수의 측정이 필요하게 된다. 따라서 현실적으로 적당한 크기의 격자를 사용하면서 곡률을 적절히 보정하는 방법이 필요하다.

한편, 크기가 작고 형상이 간단한 실험실 수준의 성형 제품도 전체 영역을 한꺼번에 신뢰할 만한 정확도로 측정하는 것은 어려운 일이다. 더욱이 상용화된 제품으로도 측정하기 힘든 큰 제품의 경우에는 특별히 관심 있는 영역만 국부적으로 측정할 수밖에 없는 실정이다.

본 연구에서는 곡률보정(curvature correction)을 위하여 원래 격자 주변의 실제 형상을 잘 근사하는 곡면 상에 가상의 격자점들을 생성하여 격자를 세밀하게 나누는 요소세분화 알고리즘을 고안하였다. 또한, 각각의 부분 측정영역을 전체형상으로 조립하는 과정에서 오차가 누적·전파되는 문제를 가진 기존의 형상조립 방법<sup>(5)</sup>을 개선하여 조립시의 전체오차를 최소화하는 알고리즘을 개발하고, 이를 큰 판재성형 제품의 3차원 형상과 곡면변형을 분포의 측정에 보다 편리하고 정확하게 응용할 수 있도록 제작한 고정도 이송장치(X-Y-θ 테이블)<sup>(3,4)</sup>와 통합하였다. 한편, 고가의 이송장치가 없는 경우에도 소프트웨어적으로 형상조립을 처리할 수 있는 알고리즘을 개발하고 응용 예를 통하여 본 시스템의 유용성을 검증하였다.

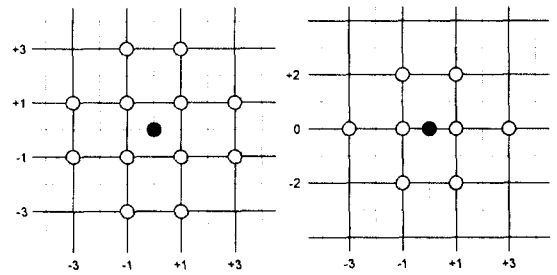
## 2. 이론

### 2.1 요소세분화

측정한 격자점들의 좌표를 조정점(control point)으로 하여 곡면을 정의한다면, 곡면이 격자점을 지나지 않을 때 격자점의 좌표를 곡면에 가까이 변경(곡면평활화; surface smoothing)하거나, 곡면이 격자점을 지나도록 한 후 곡면을 따르는 격자점을 생성하여 요소망을 재정의(요소세분화; mesh refinement)하는 방법을 통해 전체 형상을 더욱 부드럽게 표현할 수 있다. 곡면은 컴퓨터 그래픽스를 비롯한 여러 분야에서 활발히 연구, 적용되어 왔으나 현재 연구된 곡면은 사각 격자를 사용할 경우 대부분  $N \times M$  과 같이 일정한 형태로 정의된 좌표들의 집합을 그 조정점으로 사용하므로 임의의 측정좌표들로부터 곡면을 형성해야 하는 본 장비에 적용하기에는 무리가 있다. 본 연구에서는 불규칙적인 경계를 가진 측정 좌표로부터 현재 기준격자점 주변의 자유곡면을 표현할 수 있는 방법을 고안하였다.

주변 격자점들로부터 현재 격자점의 좌표를 측정오차의 요철을 상쇄하는 방향으로 변경시키는 곡면평활화<sup>(4)</sup>와는 달리 기준격자점 위치 ( $i=j=0$ )를 비워 놓고 주변 격자망으로부터 6개 이상의 자료점을 확보하면, 주변 격자들로 이루어지는 곡면 상에 존재하는 새로운 절점을 생성할 수 있다. 이때, 자료점의 적절한 위치와 개수의 선택이 중요하게 된다.

본 연구에서는 기준격자의 중심에 해당하는 점을 생성하기 위하여 Fig. 1(a)에 회색으로 표시한 주변 12개의 자료점을 사용하였으며, 격자의 변의 중심점을 생성하는



(a) center of an element (b) edge of an element

Fig. 1 Data points used for the mesh refinement procedure

데는 이웃 격자와의 연속성을 고려하여 Fig. 1(b)에 표시된 자료점들을 선택하였다. 이 방법은 6개 이상의 자료점만 주어진다면 주변 격자점의 배치가 Fig. 1과 다르더라도 해를 구하는 데에는 문제가 없으므로, 곡률이 크거나 형상이 심하게 변형된 부분만 선택적으로 세분화할 수 있으며 정확도를 유지하면서도 불필요하게 격자 수를 늘이지 않을 수 있다.

### 2.2 전체오차의 최소화

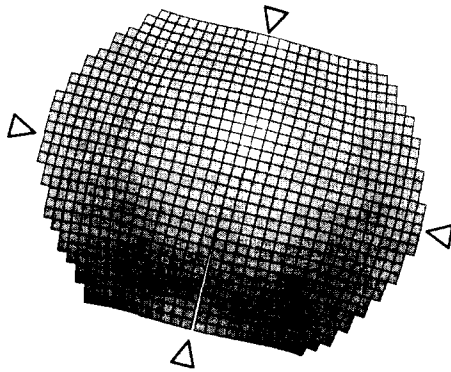
Fig. 2는 한계둠높이 시편을 4개 영역으로 나누어 측정한 후 형상조립 알고리즘에 따라 합친 모습으로, '▽'로 표시한 위치가 각 영역의 경계를 나타낸다. Fig. 2(a)에서 이들 경계 중 하나가 최대 0.5mm 정도 벌어져 있는데, 이는 형상조립을 연속적으로 반복할 경우 오차의 전파나 누적을 야기할 수 있음을 보여준다<sup>(5)</sup>. 따라서 인접한 두 영역간의 변환관계를 각각 구하는 것보다 궁극적으로 전체적인 오차를 최소화하는, 모든 부분영역의 전체좌표계에 대한 변환관계를 구하는 것이 바람직하다. 전체오차를 최소화하기 위한 오차함수는 다음 식으로 정

의할 수 있다.

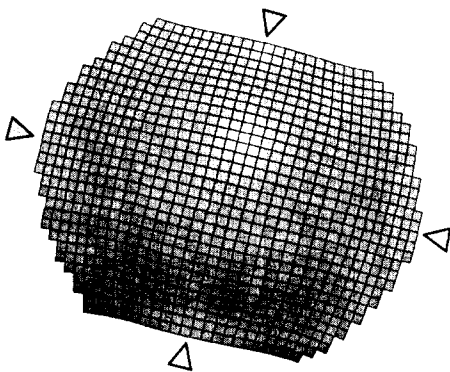
$$E = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{N_{ij}} \| (T^i + R^i x_k^i) - (T^j + R^j x_k^j) \|^2$$

여기서  $M$ 은 부분영역의 개수,  $N_{ij}$ 는  $i$ 번째 부분영역과  $j$ 번째 부분영역의 공유격자점 개수,  $x$ 는 공유격자점의 좌표,  $T, R$ 은 각각 병진 및 회전 변환, 그리고 이들에 붙은 위첨자  $i$ 와  $j$ 는 부분영역 번호를 의미한다.

Fig. 2(b)는 이 방법에 따라 구한 변환관계를 사용하여 조립한 모습으로, 오차의 누적 현상이 현저히 개선되어 완전한 형상조립이 이루어졌음을 볼 수 있다.



(a) mismatch due to error accumulation



(b) eliminated mismatch

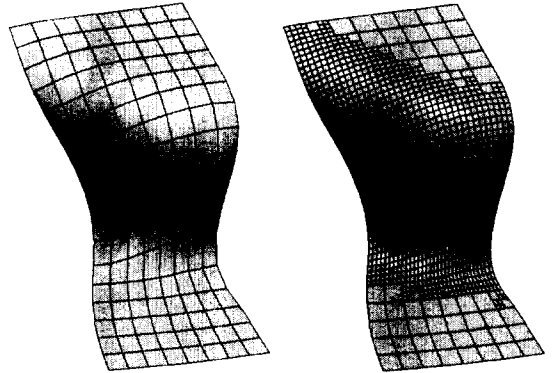
Fig. 2 Effect of the global error minimization

### 3. 응용

#### 3.1 요소세분화

Fig. 3의 (a)는 직사각 컵 디프드로잉 시편의 한 모서리 부분의 원래 격자이며, (b)는 각 요소의 곡률, 편심,

사다리꼴 형상, 기울어짐 등을 고려한 선택적 요소세분



(a) original geometry (b) two-level refinement

Fig. 3 Results of the adaptive mesh refinement

화(adaptive mesh refinement)를 2회 거듭 적용한 모습이다. 곡률부 형상을 보다 정확하게 표현하였을 뿐 아니라 세분화 대상 요소의 주변 경계의 형상에 상관없이 필요한 부분에만 선택적으로 적용되었음을 확인할 수 있다.

#### 3.2 전체오차의 최소화

전체오차 최소화 알고리즘의 적용 효과와  $X-Y-\theta$  이송 테이블 사용의 효율성을 검증하기 위하여 직사각 컵 디프드로잉 시편의 표면을 16 개의 부분영역 (컵 벽 및 플랜지부 12 개, 컵 바닥부 4 개)으로 나누어 측정된 후 전체형상으로 조립하였다. Fig. 4(a)는 각 부분영역 간의 좌표계 변환 정보를  $X-Y-\theta$  테이블의 엔코더로 입력 받은 그대로 사용하여 조립한 것이며, (b)는 전체오차 최소화 알고리즘을 적용하여 재조립한 것이다. 카메라 보정(calibration) 시에 정의되는 전체좌표계와 이송장치 좌표계 간의 상대변환관계를 구하는 과정에서 발생하는 오차와 엔코더 입력 데이터의 오차 등으로 인하여 전체오차 최소화 이전에는 각 부분영역 사이에 약간씩 어긋나는 현상(mismatch)이 나타나나, 전체오차 최소화를 통하여 이러한 문제를 거의 해결할 수 있었다. 특히, 네 모서리 부분의 주변형률 분포가 거의 대칭적으로 나타나는 점으로 미루어 본 형상조립 알고리즘이 충분한 신뢰성과 재현성을 가진 측정결과를 주는 사실을 확인할 수 있다.

Table 1은 앞서 정의한 오차함수의 값을 전체오차 최소화 전후와  $X-Y-\theta$  테이블 사용 여부에 따라 각각 계산한 결과를 비교한 것이다. 전체오차 최소화 알고리즘의 적용으로 오차함수 값이 현저히 감소하여 격자 크기

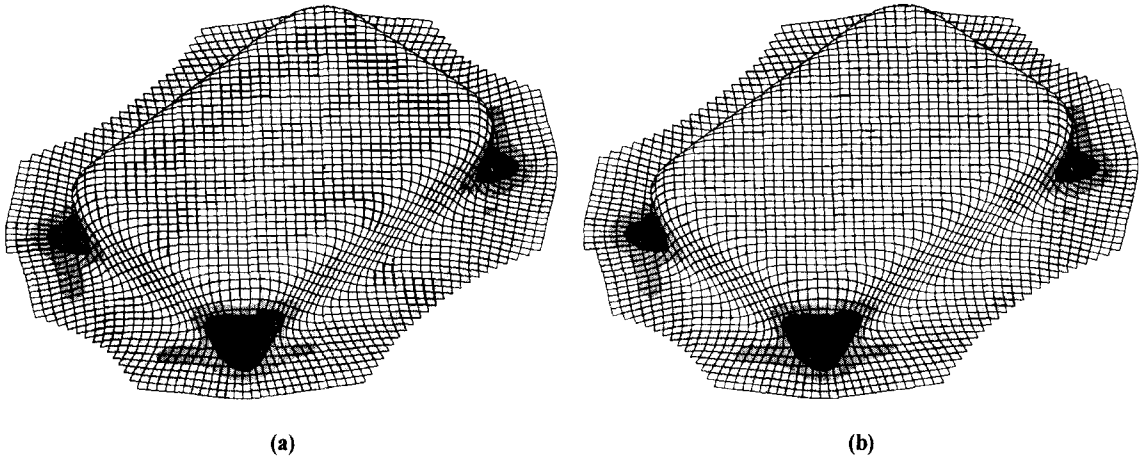


Fig. 4 Major strain distribution over a rectangular cup (a) before and (b) after global error minimization

(3×3 mm)와 부분영역의 개수 등을 고려할 때 매우 정확한 형상조립이 이루어졌음을 확인할 수 있다. 또한, 고가의 이송 테이블 장치가 없는 경우에도 공통 격자점 대응을 수작업으로 처리한 후 전체오차 최소화를 적용하면 거의 비슷한 수준의 정확도로 형상조립이 가능하다. 실제 부분영역의 수가 수십 개 정도인 경우에는 공통 격자점 대응을 수작업으로 처리하는데 소요되는 시간이 30~40 분 정도이므로 본 알고리즘이 충분히 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 1 Estimation of the global error

	Global Error (mm)	X-Y-θ Table	
		Not Used	Used
Before GEM	Mean	0.397	0.303
	Max.	1.426	0.843
After GEM	Mean	0.084	0.084
	Max.	0.264	0.268

#### 4. 결론

형상이 복잡하거나 크기가 큰 판재성형 제품의 3차원 형상과 곡면변형을 분포를 편리하고 정확하게 측정할 수 있도록 기능을 향상시킨 '자동곡면정보분석시스템'을 개발하였다. 이는 화상처리 기술을 기초로 개발한 기존의 변형을 측정 시스템에 곡률 보정, 화상 중첩, 요소망 인식, 형상 조립 등 새로운 응용 알고리즘과 고정도 이송장치(X-Y-θ 테이블)를 통합한 것이다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 곡면 평활화 방정식을 사용하여 경계가 불규칙적인 경우에도 곡면을 잘 나타낼수 있는 요소세분화 알고리즘을 적용함으로써 비교적 큰 격자망으로도 모서리의 곡률을 매끄럽게 표현할 수 있었다.
- (2) 대상물 전체 표면을 여러 영역으로 나누어 측정 후 이들을 조합하는 알고리즘을 적용할 때 모든 부분영역 간의 변환관계에 대한 오차 때문에 발생하는 어긋남 현상(mismatch)을 전체오차 최소화 방법을 적용하여 극소화함으로써 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있었다.
- (3) 중·대형 제품을 손쉽게 측정하기 위하여는 고정도의 X-Y-θ 이송 테이블을 갖추는 것이 바람직하나, 이러한 고가 장비가 없는 경우에도 약간의 수작업을 감수하면 역시 같은 수준의 정확도를 가진 형상 조립이 가능함을 확인하였다.
- (4) 전체오차 최소화 알고리즘을 통하여 구해지는 각 부분영역 간의 정밀한 변환관계를 응용하면 역으로 이송장치가 가지는 오차를 평가·보정할 수 있다.

#### 참고 문헌

- (1) J. H. Vogel and D. Lee, 1989, "Computerized Method of Determining Surface Strain Distributions in a Deformed Body", US Patent No. 4,969,106
- (2) CamSys Inc., 1995, ASAME Reference Manual, Ver. 3.8
- (3) 한상준, 김영수, 김형중, 오수익, 1998, "화상처리법을 이용한 곡면변형을 측정 시스템의 개발", 한국소

성가공학회논문집, 제7권 제6호, pp.575~585

- (4) 김두수, 김형중, 1999, “비전을 이용한 곡면변형률 측정법의 정확도 및 정밀도 향상에 관한”, 한국소성가공학회논문집, 제8권 제3호, pp.294~305.
- (5) 김두수, 김형중, 1999, “비전을 이용한 중·대형 판재 성형 제품의 곡면변형률 측정 알고리즘 개발”, 한국소성가공학회 '99 춘계학술대회 논문집, pp.269~272.
- (6) 김두수, 2000, “비전을 이용한 3차원 형상 및 곡면변형률 측정 시스템의 개발”, 강원대학교 대학원, 석사학위논문.