

중·대형 판재성형 제품의 곡면변형을 측정을 위한 스테레오 비전 시스템의 개선

김형종* · 김두수** · 김현영*
(2000년 3월 27일 접수)

Improvement of the Stereo Vision-Based Surface-Strain Measurement System for Large Stamped Parts

H. J. Kim, D. S. Kim and H. Y. Kim

Abstract

It is desirable to use the square grid analysis with the aid of the stereo vision and image processing techniques in order to automatically measure the surface-strain distribution over a stamped part. But this method has some inherent problems such as the difficulty in enhancement of bad images, the measurement error due to the digital image resolution and the limit of the area that can be measured at a time. Therefore, it is still hard to measure the strain distribution over the entire surface of a medium- or large-sized stamped part even by using an automated strain measurement system. In this study, several methods which enable to solve these problems considerably without losing accuracy and precision in measurement are suggested. The superposition of images that have different high-lightened or damaged part from each other gives much enhanced image. A new algorithm for constructing of the element connectivity from the line-thinned image helps recognize up to 1,000 elements. And the geometry assembling algorithm including the global error minimization makes it possible to measure a large specimen with reliability and efficiency.

Key Words : Stereo Vision, Image Processing, Surface-Strain Measurement, Image Superposition, Global Error Minimization, Geometry Assembling

1. 서 론

판재성형 제품의 변형률 측정은 변형 전 소재 표면에

일정한 크기와 모양의 격자를 인쇄하고 성형 후 변형된 형상을 측정하여 변형률을 계산하는 일련의 과정으로 이루어진다. '원형격자해석법'은 타원으로 변형된 특정 격

* 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부
** 강원대학교 대학원

자의 장축과 단축의 길이를 측정함으로써 용이하게 주변 형률과 부변형률을 구할 수 있어 국부적인 변형을 관찰 하는데 많이 쓰이고 있다. 그러나 판재면 전체의 변형 양상이나 변형률 분포를 측정하는 데는 격자간의 연결관계를 정의하기 쉬운 정사각형 격자를 사용하는 것이 더 편리하다. 본질적으로 격자들에 대한 3차원 정보를 필요로 하는 '정사각형격자해석법'을 가장 효율적으로 사용하는 방법은 컴퓨터 비전과 화상처리 기술을 응용하는 것이라 할 수 있다^(1~4). 이 방법은 수작업과 비교할 때 빠르고 정확한 변형률 측정이 가능할 뿐 아니라 대상물의 3차원 형상을 구할 수 있는 등 많은 장점이 있으나, 비전 시스템의 특성에 기인하는 몇 가지 한계를 가지고 있다. 하나는 조명 조건으로 카메라와 프레임그래버(frame grabber)를 통하여 얻어지는 화상의 질이 조명에 따라 민감하게 변하는 점이고, 또 하나는 화상처리법 자체가 화소 단위로 크기가 제한되어 있는 화상을 다룬다는 점이다. 이는 실제 물체를 이산적이고 유한하게 표현하기 때문에 정밀도는 물론 한 번에 측정할 수 있는 영역과 격자의 개수가 제한됨을 뜻한다.

크기가 작고 형상이 간단한 실험실 수준의 성형 제품이라 하더라도 1/2 또는 1/4 정도의 영역은 비교적 용이하게 측정할 수 있으나, 전체 영역을 한꺼번에 신뢰할 만한 정확도로 측정하는 것은 어려운 일이다. 더욱이 지금까지 상용화된 제품으로도 측정이 용이하지 않은 중·대형 제품의 경우에는 특히 중요한 국부 영역만 측정할 수밖에 없는 실정이다. 최근 성형공정 및 금형 설계에 많이 사용되고 있는 유한요소 해석과 같은 시뮬레이션의 결과도 실험 데이터와의 비교를 통하여 검증되어야 하나, 측정의 어려움으로 인하여 역시 지엽적이 될 수밖에 없다.

본 연구에서는 중·대형 판재성형 제품의 3차원 형상과 곡면변형률 분포를 보다 편리하고 정확하게 측정할 수 있는 고정도 이송장치($X-Y-\theta$ 테이블)와 몇 가지 용

용 알고리즘을 고안하고 이를 제작·구현하여 기존의 비전 장비와 통합함으로써 기능이 향상된 자동곡면정보분석시스템(Automated Surface Information Analysis System, ASIAS)^(1,2)을 완성하였다. 한편, 고가의 이송장치가 없는 경우에도 적용할 수 있는 알고리즘을 개발하고 응용 예를 통하여 본 시스템의 유용성을 검증하였다.

2. 알고리즘

2.1 화상 중첩

변형률 측정은 주로 반사율이 좋은 금속 판재에 대해 행해지므로, 획득한 화상에서 격자 인식이 가능한 영역은 조명의 위치, 종류 및 강도에 따라 Fig. 1(a), (b)와 같이 큰 차이를 보이게 된다. 이러한 현상은 측정 대상의 굴곡이 심할수록 더욱 두드러지며, 모든 측정 대상에 대해 만족할만한 화상을 얻는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 동일한 대상에 대하여 조명 조건을 다르게 하여 얻은 각 화상에서 화질이 양호한 부분만을 택하여 조합한다면 측정 가능 영역을 확대할 수 있다. 이 과정에서 평균, 논리합, 논리곱, 배타적 논리합 등과 같은 간단한 산술 및 논리 연산을 화소 단위로 적용한다면 단순히 화소를 대치하는 것보다 더 나은 결과를 기대할 수 있다. Fig. 1은 한계동높이 시편을 촬영한 것으로, (a)와 (b)는 조명을 과도하게 받은 영역과 격자 인식이 가능한 영역의 위치가 서로 다른 예를 나타내며, (c)는 이들 화상을 중첩하여 재구성함으로써 전체 영역의 격자 인식을 가능하게 한 것이다.

2.2 요소망 구성 알고리즘

격자점(grid point)은 세선화 과정을 거친 후 일정한 패턴을 가지는 교차점으로 변환된다. 이 교차점들은 3×3 화소 크기의 마스크를 통하여 전체 화상버퍼(image buffer)를 검색해 나가면서 마스크 중심화소 주위 영역

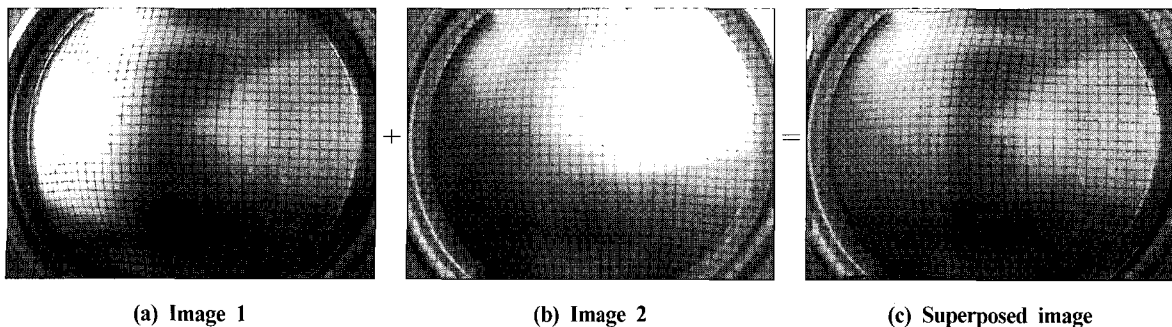


Fig. 1 An example of the image superposition

의 개수를 조사함으로써 판단할 수 있다. Fig. 2는 격자점 주위 마스크의 다양한 패턴을 보여준다. 중심화소 주위의 8개 화소 중 검은색 화소의 수가 2개일 경우는 선의 일부분, 3개이면 가장자리 격자점이거나 중심에 위치한 격자점이 세선화 과정에서 둘로 분리된 형태(Fig. 3)이며, 4개일 경우는 둘로 분리되지 않은 격자점으로 판단한다.

격자점의 3차원 좌표를 계산하기 위해서는 두 방향 화상에서 서로 대응하는 점을 인식해야 한다. 이러한 정합 과정은 요소망을 먼저 구성한 후 일정한 규칙을 따라 번호를 부여함으로써 이루어진다. 그러나 요소망을 구성하기 위하여 격자점 사이를 잇는 선분을 추적하는 일은 간단한 문제가 아니다. 실제 화상의 격자점은 Fig. 3에 나타난 것처럼 세선화 과정에서 두 개 이상의 교차점으로 분리되는 경우가 많기 때문에 교차점의 수가 항상 격자점의 수보다 많아 이를 처리하는 방안이 다시 요구된다. 본 연구에서는 이를 위한 두 가지의 요소망 구성 방법을 고안하였다.

2.2.1 선추출 후구성 방법

먼저 고정된 역치(threshold)에 의하여 모든 교차점 사이의 거리를 검사한 후 역치 내에 든 교차점들이 하나의 격자점을 구성한다고 가정하여 이들의 평균좌표를 가진 격자점을 추출한다. 다음에 Fig. 4와 같이 격자점 주위에 분리된 교차점을 포함할 수 있을 정도의 크기(7×7 ~ 11×11 화소)를 가진 커널을 씌운 후, 이들을 연결하는 선분을 추적하여 요소를 구성한다. 골격선이 커널과 교차하는 부분의 화소(Fig. 4에서 'o'으로 표시) 수는 1개 이상 존재할 수 있으므로 골격선 추적의 방향을 명확하게 판단하기 위하여 2중 커널을 사용하기도 한다⁽¹⁾. 이 방법은 직관적이면서도 대부분의 경우에 잘 적용되는 장점이 있으나, 교차점 사이의 거리가 커널이 중복될 정도로 가까워지면 요소망 구성이 불가능해지는 문제가 있다. 그러므로 교차점 사이에 충분한 거리(커널폭 × √2 화소)를 확보하기 위하여 확대 촬영을 해야 하며, 이러한 이유 때문에 실제로 인식할 수 있는 교차점의 개수는 최대 500 개 정도이다.

2.2.2 선구성 후추출 방법

선추출 후구성 방법의 문제를 해결하기 위하여 고안된 방법으로 커널에 의존하지 않는 특징을 가진다. 세선화된 화상에서의 모든 교차점을 일단 격자점이라 간주하여 요소를 구성하면 하나의 격자점이 두 개의 교차점으로 분리될 수 있으므로 하나의 요소를 구성하는 교차

점은 최소 3 개(모서리 격자)에서 최대 8 개(내부 격자)까지 존재하게 된다. 이렇게 임시로 구성된 요소에서 내부 교차점 사이의 거리를 계산하고, 가변 역치에 의하여 가까운 거리에 존재하는 2 개의 교차점을 평균하여 한 점으로 하고 교차점이 4 개 이하가 될 때까지 반복한다. Fig. 5는 이 방법을 적용하여 한계돔높이 시편으로부터 970 개의 격자점을 한 번에 추출해 낸 모습이다. 격자점 사이의 거리가 4 화소에 불과한 영역이 존재함에도 불구하고 성공적으로 요소망을 구성하였음을 알 수 있다.

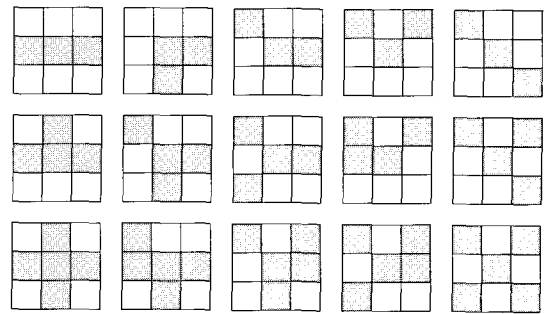


Fig. 2 Various 3×3 patterns around the grid points

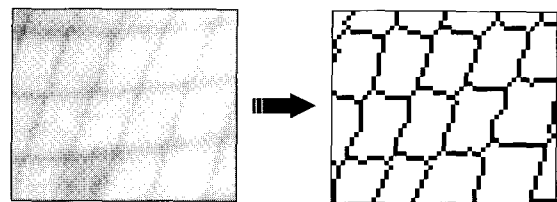


Fig. 3 Grid points some of which are divided into two points after line-thinning

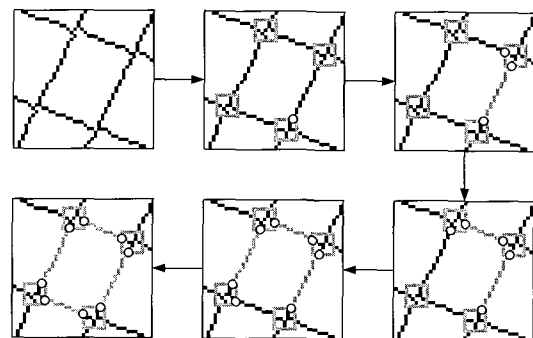


Fig. 4 Schematic diagram of the element establishing procedure using 7×7 kernel

2.3 측정 영역의 분할 및 조립

표면의 곡률이 완만하고 크기가 작은 시편은 한 번의 촬영으로 전체 영역을 측정할 수 있으나, 일부분을 확대하여 촬영하는 것에 비하여 측정값의 정확도는 떨어지게 된다. 이는 카메라의 투시각도나 시편에 대한 보정 블록의 상대적 크기 등 몇 가지 이유에 기인하는 불가피한 문제이다⁽²⁾. 더욱이 측정 영역 내에 곡률반경이 작은 모서리가 있을 경우, Fig. 6(a)처럼 오차를 최소화하기 위하여 두 카메라 사이의 각도를 크게 유지하려면 측정 가능한 영역, 즉 두 카메라로 공통적으로 촬영할 수 있는 영역이 좁아질 수밖에 없으며, (b)와 같이 넓은 공유면적을 잡기 위한 작은 카메라 각도에서는 필연적으로 측정 오차가 증가하게 된다. 따라서 대상물 전체 표면을 여러 영역으로 나누어 측정한 후 각각의 형상을 하나로 조립한다면 신뢰도를 유지하면서 전체적인 형상과 변형률 분포를 얻을 수 있게 된다.

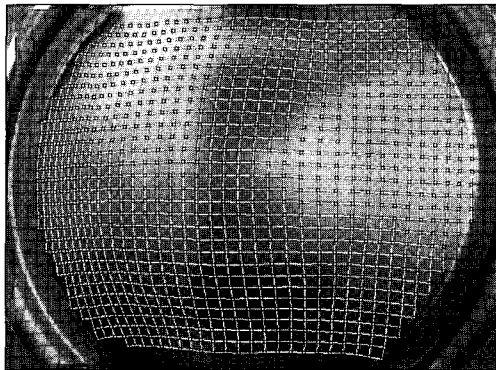
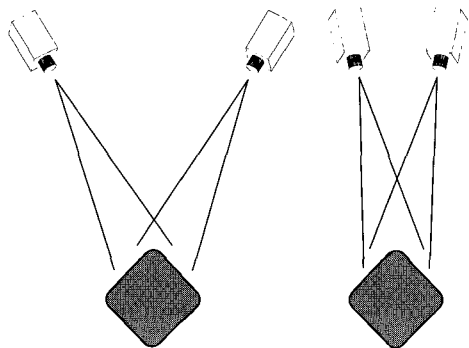


Fig. 5 Application of new algorithm for the element identification



(a) large angle (b) small angle
Fig. 6 Effect of the optical angle between two cameras

2.3.1 형상 조립

카메라보정(camera calibration)^(4,5)을 실시하여 전체 좌표계(X-Y-Z)를 정의하고, Fig. 7과 같이 대상물의 어떤 일부 영역을 측정한 후 카메라 위치와 초점은 고정한 채로 대상물을 적당히 움직여 인접 영역을 측정한다. 두 영역이 공유하는 격자점 $P_k (k=1, 2, \dots, N; N$ 은 공유격자점 수)에 대하여 대상물을 움직이기 전·후에 측정한 3차원 좌표를 각각 (x_k, y_k, z_k) 및 (x'_k, y'_k, z'_k) 라 하면, 두 좌표 사이의 변환 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$x'_k = T + R x_k \quad (1)$$

여기서 T, R 은 각각 병진변환행렬과 회전변환행렬을 나타낸다. R 은 다음과 같이 서로 독립인 3개의 오일러각(Euler angle) α, β, γ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

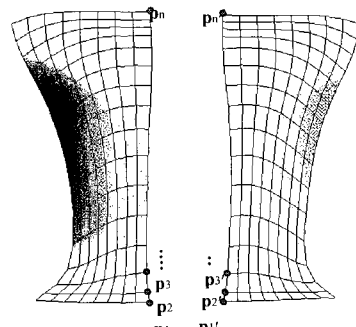
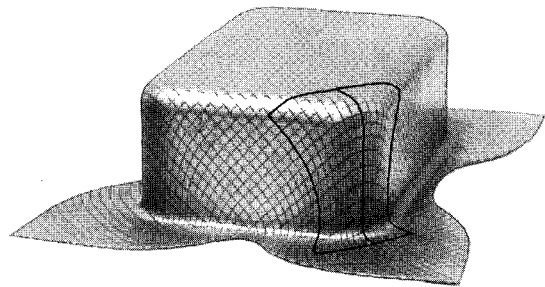


Fig. 7 Correspondency of the same points in two adjacent subregions

식 (1)로부터 두 좌표 사이의 변환관계를 결정하려면 $T_x, T_y, T_z, \alpha, \beta, \gamma$ 등 6개의 파라미터 값을 구해야 하며, 이론적으로는 일직선상에 존재하지 않은 3개의 공유격자점의 3차원 좌표값을 대응시킴으로써 이들을 모두 결정할 수 있다. 그러나 측정으로부터 얻어진 3차원 좌표는 근본적으로 오차를 포함하므로 3개 이상의, 가능한 많은 공유점들을 대응시켜 최소자승회귀(least square regression)의 개념으로 오차를 최소화하는 것이 바람직하다.

최소자승회귀법을 적용하기 위하여 다음과 같이 정의되는 오차함수 E 를 생각한다.

$$E = \sum_{k=1}^N \| \mathbf{x}'_k - (\mathbf{T} + \mathbf{R}\mathbf{x}_k) \|^2 \quad (3)$$

여기서 $\| \cdot \|$ 는 벡터노름(vector norm)을 표시하며, 이를 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \| \mathbf{x}' - (\mathbf{T} + \mathbf{R}\mathbf{x}) \|^2 \\ &= [x' - T_x - \cos \alpha \cos \beta x \\ &\quad - (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma) y \\ &\quad - (\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma) z]^2 \\ &+ [y' - T_y - \sin \alpha \cos \beta x \\ &\quad - (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) y \\ &\quad - (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) z]^2 \\ &+ [z' - T_z + \sin \beta x - \cos \beta \sin \gamma y - \cos \beta \cos \gamma z]^2 \end{aligned} \quad (4)$$

본 연구에서는 공개 최적화 패키지인 MINPACK⁽⁶⁾에

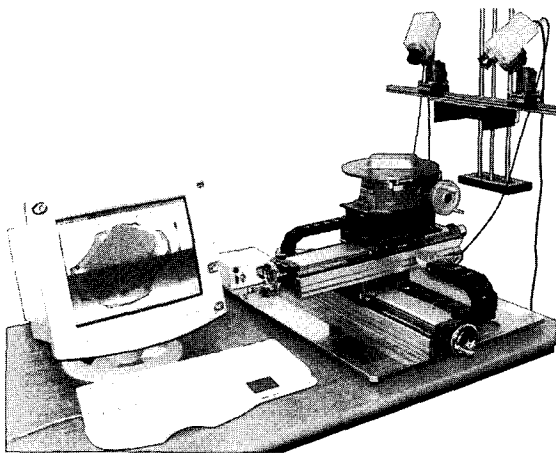


Fig. 8 Major components of ASIAS hardware system

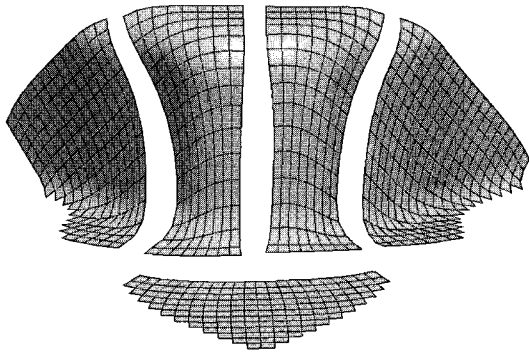
포함된 ‘수정 Levenberg-Marquardt 서브루틴’^(6,7)을 사용하여 식 (3)의 오차를 최소화하는 미지수 \mathbf{T}, \mathbf{R} 을 구하였다. 이는 ‘IMSL (International Mathematical and Statistical Library)’에 구현되어 있는 동일 목적의 서브루틴에 비하여 수렴속도와 안정성이 우수한 것으로 알려져 있다.

두 인접 영역을 촬영하기 위하여 대상물(또는 카메라)을 움직일 때 그 이동에 대한 3차원 정보(직선이동 및 회전이동)를 모를 경우에는 공유격자점들의 대응 작업을 전적으로 수동으로 처리해야 한다. 이러한 수작업을 최소한으로 줄이기 위하여 본 연구에서는 격자들의 상호 연결관계를 이용하여 인접한 두 영역의 공유점들 중에서 한 격자(요소)의 대각선상에 있는 두 점만 마우스로 선택하면 나머지 공유점들이 자동으로 대응되게 하는 알고리즘을 고안하고 프로그램으로 구현하였다. 또한, 대상물이 크고 분할영역의 수가 많을 경우에는 이 알고리즘을 적용하더라도 여전히 상당한 수작업이 필요한 문제를 해결하기 위하여, 측정 대상물의 직선이동 및 회전이동 값을 실시간으로 입력받아 이 정보로부터 공유점들을 완전 자동으로 대응시킬 수 있는 시스템을 구축하였다. Fig. 8은 이 시스템의 하드웨어 주요부 사진이다. 측정 대상물을 직경 300mm의 원판 위에 얹어놓고 수평면 상의 직선이송(500×300mm)과 수직축에 대한 회전이송(360°)을 자유롭게 가할 수 있는 X-Y-θ 테이블이 PC와 카메라 사이에 놓여있다. 직선 및 회전 이송량은 모두 4,000 펄스의 로터리엔코더(rotary encoder)를 통하여 PC로 입력되어 프로그램으로 바로 처리되며, 그 정밀도는 각각 0.0025mm 및 0.09°에 해당한다.

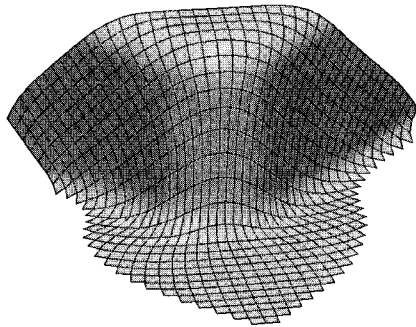
Fig. 9는 직사각 썸의 한 모서리 영역을 최적 카메라 각도를 유지한 상태에서 5개로 분할하여 촬영한 후 이상의 과정을 통하여 부분영역들 간의 변환관계를 구하고 형상을 조립한 모습이다.

2.3.2 전체오차의 최소화

Fig. 10은 한계높이 시편을 4개 영역으로 나눈 후 형상 조립 알고리즘에 따라 합친 모습으로, ‘▽’로 표시한 위치가 각 영역의 경계를 나타낸다. Fig. 10(a)에서 이들 경계 중 하나가 최대 0.5mm 정도 벌어져 있는데, 이는 형상 조립을 연속적으로 반복할 경우 오차의 전파나 누적을 야기할 수 있음을 보여준다. 따라서 인접한 두 영역간의 변환관계를 각각 구하는 것보다, 궁극적으로 전체적인 오차를 최소화하는, 모든 부분영역의 전체 좌표계에 대한 변환관계를 구하는 수치적 알고리즘이 필요하다. 전체오차의 최소화(global error minimization;



(a) Division into five subregions



(b) Assembled geometry

Fig. 9 Application of the geometry assembling

GEM)에 사용될 오차함수는 식 (3)을 확장함으로써 재정의할 수 있다. 즉,

$$E = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_{ij}} \| (T^i + R^i \mathbf{x}_k^i) - (T^j + R^j \mathbf{x}_k^j) \|^2 \quad (5)$$

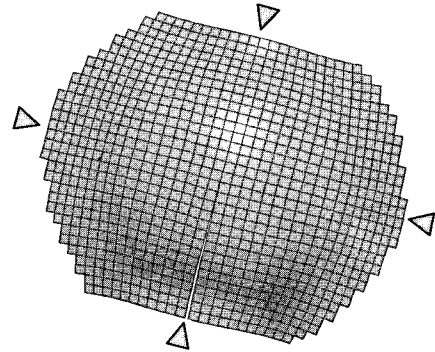
여기서 M 은 부분영역의 개수, N_{ij} 는 i 번째 부분영역과 j 번째 부분영역의 공유격자점의 개수이며, T, R, \mathbf{x} 에 붙은 윗첨자 i 와 j 는 부분영역 번호를 의미한다.

Fig. 10(b)는 이 방법에 따라 구한 변환관계를 사용하여 조립한 모습으로, 오차의 누적 현상이 현저히 개선되어 완전한 형상조립이 이루어졌음을 볼 수 있다.

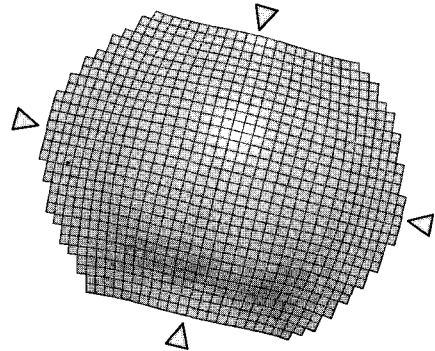
3. 응용

3.1 측정 영역의 분할

Fig. 11(a)는 전술한 화상 중첩 및 격자인식 알고리즘을 적용하여 한계돌출이 시편의 전체 영역을 한 번에 측



(a) Mismatch due to error accumulation



(b) Eliminated mismatch

Fig. 10 Effect of the global error minimization

정한 것이고, (b)는 전체를 4 개의 부분영역으로 나누어 측정 후 형상 조립 알고리즘을 사용하여 화상들간의 좌표 변환관계를 구한 후 조립한 것이다. 같은 시편을 측정하였음에도 불구하고 최대 주변형률 값이 2% 정도 차이가 나는 것을 알 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 측정 후 전체형상으로 조립하였다. Fig. 12(a)는 수작업으로 공유격자점을 인식시키고 2.3.1 절의 형상 조립 알고리즘을 적용한 결과인데, 오차의 누적에 의한 형상의 어긋남 (mismatch) 현상이 뚜렷이 나타나 있다. (b)는 각 부분영역 간의 좌표계 변환 정보를 $X-Y-\theta$ 테이블의 엔코더로 입력받은 그대로 사용하여 조립한 것으로, (a)와 같은 오차의 누적은 발생하지 않지만 각 부분영역이 약간씩

어긋나있는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 미세한 어긋남은 카메라 보정(calibration) 시 전체좌표계와 이송시스템좌표계 간의 상대변환관계를 구하는 과정에서 발생하는 오차와 엔코더 입력 데이터의 오차 등에 기인한다.

Fig. 12(c)는 (a) 또는 (b)의 단계에서 서로 다른 부분영역에 속한, 일정 거리 이내에 존재하는 격자점을 동일격자점이라 판단하고 전체오차 최소화 알고리즘을 적용한 결과이다. $X-Y-\theta$ 테이블을 사용하지 않은 경우나 사용

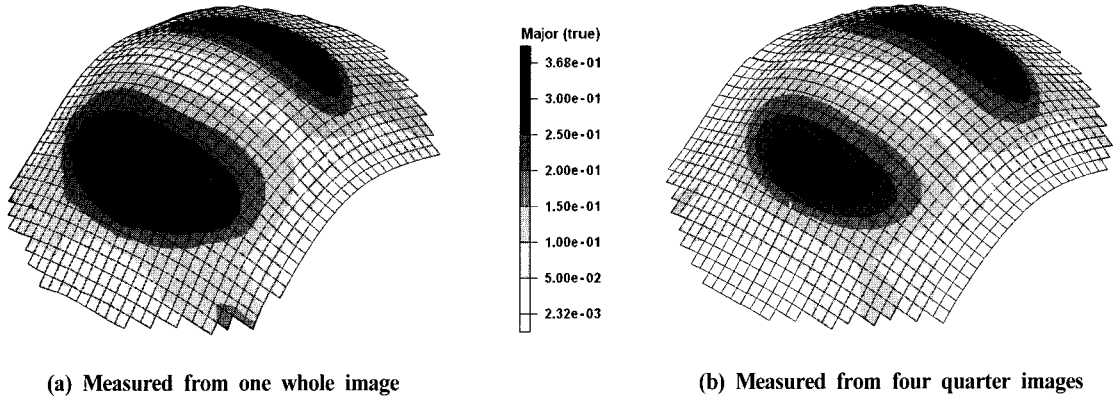


Fig. 11 Major strain distribution of an LDH test specimen

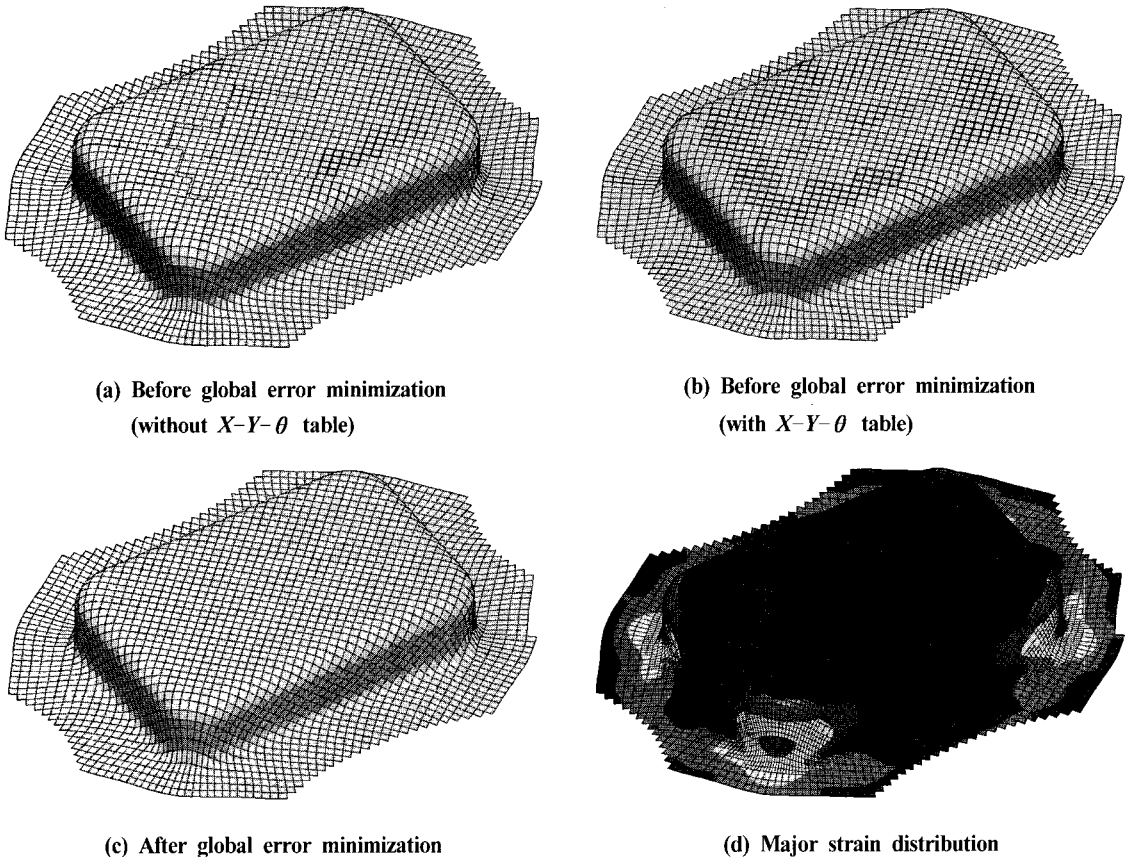


Fig. 12 Measurement of a rectangular cup drawing specimen

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

한 경우 모두 전체오차 최소화 알고리즘의 적용으로 같은 형상으로 수렴하며, 오차의 누적과 어긋남 현상이 해결되었음을 알 수 있다. Fig. 12(d)는 동일격자점들을 병합하고 곡률 보정(correction)의 수단으로 편차와 다이어깨부나 모서리부와 같이 곡률이 큰 부분에 대해 1회의 요소세분화(mesh refinement)⁽⁸⁾를 적용한 후 변형률을 재계산한 모습이다. 네 모서리 부분의 주변형률 분포가 거의 대칭적으로 나타난 점으로 미루어 본 형상조립 알고리즘이 충분한 신뢰성과 재현성을 갖춘 측정결과를 준다는 사실을 확인할 수 있다.

Table 1은 식 (5)에서 정의한 오차함수의 값으로, X-Y-θ 테이블 사용 여부에 따른 전체오차 최소화 전후의 결과를 비교한 것이다. 전체오차 최소화 알고리즘의 적용으로 오차함수 값이 현저히 감소하여, 격자 크기(3×3mm)와 부분영역의 개수 등을 고려할 때 매우 정확한 형상조립이 이루어졌음을 확인할 수 있다. 또한, 고가의 X-Y-θ 이송 테이블 장치가 없는 경우에도 공통격자점 대응을 수작업으로 처리한 후 전체오차 최소화를 적용하면 거의 같은 수준의 정확도로 형상조립이 가능함

을 알 수 있다. 실제 부분영역의 수가 수십 개 정도인 경우에는 공통격자점 대응을 수작업으로 처리하는데 소요되는 시간이 30~40 분 정도이므로 본 알고리즘이 충분히 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

3.3 대형 제품의 측정

Fig. 13은 총 14 개의 롤에 의하여 평판 소재를 원형 단면의 파이프로 성형하는 롤포밍(roll forming) 공정에서 7개의 롤을 통과한 소재의 1/2형상을 측정하는 것이다. 길이 2m 정도의 영역을 26개의 부분구간으로 나누어 측정 후 형상조립 알고리즘을 적용하였다. 이와 같이 길거나 큰 소재에는 격자를 인쇄할 때 한 번에 인쇄할 수 있는 면적의 한계 때문에 인접한 인쇄 영역 사이에 필연적으로 공백이나 중복이 발생하여 격자망의 연속성을 잃게 된다. 본 연구에서는 이 부분과 양쪽 인쇄영역을 모두 포함한 화상을 촬영해두었다가 각 영역을 따로 처리한 후에 이 화상을 이용하여 형상을 조립하는 방법을 사용하였다.

4. 결 론

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

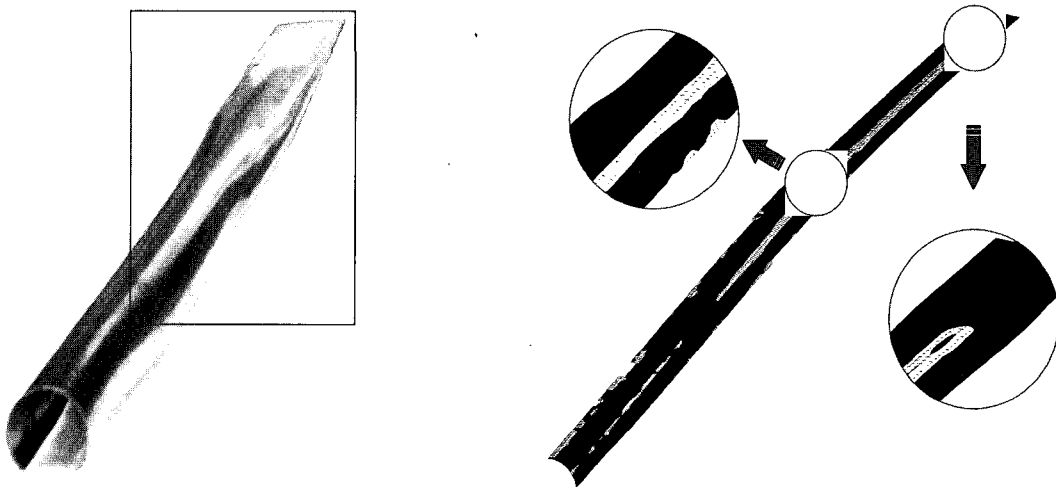


Fig. 13 Major strain distribution of a 2 m-long roll-formed pipe

하면 다음과 같다.

(1) 조명이나 노이즈의 영향을 서로 다르게 받은 초기 화상을 여러 개 중첩하고, 이에 대한 화상처리를 수행함으로써 한 번에 측정할 수 있는 영역을 확대할 수 있었다.

(2) 요소망 인식 알고리즘의 개선으로 1 회에 1,000 개 이상의 격자점을 추출할 수 있음을 확인하였다.

(3) 대상물 전체 표면을 여러 영역으로 나누어 측정한 후 이들을 조합하는 알고리즘을 적용함으로써, 전체 형상과 변형률 분포를 효율적으로 측정할 수 있었다. 또한, 형상을 조립할 때 모든 부분영역 간의 변환관계에 대한 오차 때문에 발생하는 어긋남 현상(mismatch)을 전체오차 최소화 방법을 적용하여 극소화함으로써 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

(4) 중·대형 제품을 손쉽게 측정하기 위해서는 고정도의 $X-Y-\theta$ 이송 테이블을 갖추는 것이 바람직하나, 이러한 고가 장비가 없는 경우에도 약간의 수작업을 감수하면 역시 같은 수준의 정확도를 가진 형상 조립이 가능함을 확인하였다.

(5) 전체오차 최소화 알고리즘을 통하여 구해지는 각 부분영역 간의 정밀한 변환관계를 응용하면 역으로 이송 장치가 가지는 오차를 평가·보정할 수 있다.

(6) 본 연구에서 구축한 시스템을 몇 가지 관제성형 제품의 변형률 측정에 응용함으로써 그 유용성과 신뢰성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 '98년도 과학기술기초 중점연구지원사업(기계공학연구 1998-018-E00046)의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 한상준, 김영수, 김형중, 오수익, 1998, "화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정 시스템의 개발", 한국소성가공학회논문집, 제7권 제6호, pp.575~585.
- (2) 김두수, 김형중, 1999, "비전을 이용한 곡면변형률 측정법의 정확도 및 정밀도 향상에 관한 연구", 한국소성가공학회논문집, 제8권 제3호, pp.294~305.
- (3) Vogel, J. H., and Lee, D., 1989, "An Automated Two-View Method for Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces", J. of Mat'l Shaping Tech., Vol.6, No.4, pp.205~216.
- (4) CamSys Inc., 1995, ASAME Reference Manual, Ver. 3.8.
- (5) Tsai, R. Y., 1987, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.4, pp.323~344.
- (6) Moré, J. J., Garbow, B. S., and Hillstom, K. E. 1980, User Guide for MINPACK-1, Argonne National Laboratory Report ANL-80-74.
- (7) W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, 1992, Numerical Recipes in C, 2nd Edition, Cambridge University Press, pp.683~688.
- (8) 김두수, 2000, "비전을 이용한 3차원 형상 및 곡면변형률 측정 시스템의 개발", 강원대학교 대학원, 석사학위논문.