

비전을 이용한 곡면변형률 측정의 정확도 및 정밀도 향상에 관한 연구

김두수* · 김형종**

(1999년 1월 28일 접수)

A Study on the Improvement of Accuracy and Precision in the Vision-Based Surface-Strain Measurement

D. S. Kim and H. J. Kim

Abstract

A vision-based surface-strain measurement system has been still improved since the authors developed the first version of it. New algorithms for the subpixel measurement and surface smoothing are introduced to improve the accuracy and precision in the present study. The effects of these algorithms are investigated by error analysis. And the equations required to calculate 3D surface-strain of a shell element are derived from the shape function of a linear solid finite-element. The influences of external factors on the measurement error are also examined, and several trials are made to obtain possible optimal condition which may minimize the error.

Key Words : Computer Vision, 3D Surface-Strain, Subpixel Measurement, Surface Smoothing, Error Analysis

1. 서 론

판재성형의 제반 과정, 즉 제품 개발, 금형 및 공정 설계, 제품 검사, 유한요소 공정해석 결과의 검증 등에 필수적으로 요구되는 3차원 형상 및 곡면변형률 측정은 1980 년대에 들어 컴퓨터 비전과 화상처리 기술이 응용되면서 새로운 방향으로 발전하기 시작하였다. Shedin 등⁽¹⁾, Harvey 등⁽²⁾, Miyoshi 등⁽³⁾이 각각 비전 기술을 이용한 변형률 측정장치를 개발하였으나, 이들은 한 번에 한 개의 변형률 값만 측정할 수 있는 한계가 있었다. Lee 등은 두 방향의 화상으로부터 한 영역의 변형률을 한꺼번에 자동

으로 측정할 수 있는 시스템을 개발하여 상용화하였으며,⁽⁴⁻⁵⁾ 측정값의 오차 요인을 분석하고 정확도를 향상시키기 위한 연구를 계속하고 있다.⁽⁶⁻⁷⁾ 국내에서도 몇몇 대학과 연구소, 산업체에서 고가의 외국산 장비를 도입하여 연구에 활용하고 있으나, 측정 결과의 정확도와 정밀도, 그리고 측정 범위나 편의성 등과 관련하여 개선의 여지가 많은 실정이다. 최근에는 이에 대한 독자적이고 진보된 연구가 추진되고 있다.⁽⁸⁻⁹⁾

비전을 이용한 3차원 좌표 측정 방법에서의 주된 오차 요인은 카메라 보정(calibration) 과정에서 구한 보정 인자와 화상처리 과정에서 구한 2차원 화상좌표의 부정확

* 강원대학교 대학원
** 강원대학교 기계공학과

합, 그리고 3차원 좌표 계산을 위한 화상정합(image matching) 알고리즘의 오차 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 2차원 화상좌표의 정확한 추출을 위한 화소미만 단위 측정(subpixel measurement) 및 3차원 곡면 데이터의 개선을 위한 곡면 평활화(surface smoothing) 알고리즘을 개발하였으며, 선형 육면체 유한요소의 형상함수를 이용하여 3차원 곡면변형률을 계산하는 식을 유도하였다. 이 새로운 알고리즘들을 자체 개발한 "자동곡면정보분석 시스템(Automated Surface Information Analysis System: ASIAS)"⁽⁶⁾에 응용하여 변형률 측정 결과의 정확도와 정밀도 향상에 기여하는 효과를 조사하였다. 또한, 실제 측정 작업에서 시스템 외적 조건들이 정확도에 미치는 영향을 분석하여 최적 조건을 찾고자 하였다.

2. 이 론

Fig.1은 비전 기술을 이용한 곡면변형률 측정 절차를 나타낸 것이다. 화소미만 단위의 2차원 절점좌표 측정은 카메라 보정 과정과 3차원 좌표 계산 과정 전에 각각 수행되며, 곡면 평활화는 3차원 좌표 계산 후에 적용한다.

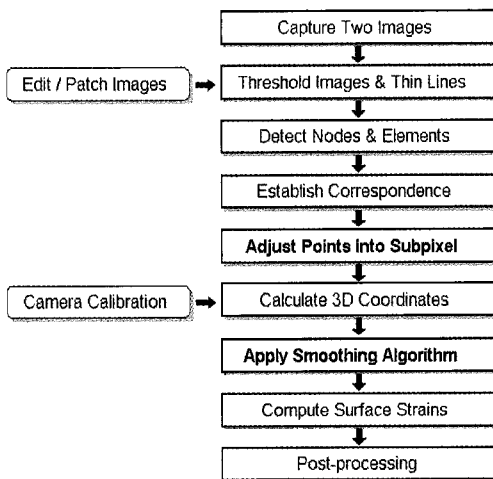


Fig. 1 Strain measuring procedure

2.1 화소미만단위좌표측정

3차원 형상 정보는 판재 표면에 인쇄된 격자(요소)들의 연결관계와 격자점(절점)들의 3차원 좌표에 포함되어 있으며, 이들 정보는 두 방향에서 촬영한 화상을 정합시킴으로써 얻어진다. 그러나 컴퓨터 화상좌표의 처리는 화소

수, 즉 정수 단위로 이루어지므로, 이로부터 3차원 좌표를 구할 때 정확도에 근본적인 한계를 가지게 되며, 결국 변형률 계산 결과의 주요 오차요인이 된다. 따라서, 카메라와 프레임그래버(frame grabber)의 제한적인 해상도를 극복하기 위하여 화소미만 단위, 즉 실수 단위의 좌표를 처리할 수 있는 알고리즘이 필요하게 된다. 주로 윤곽선 검출(edge detection)의 정확도를 높이기 위하여 개발된 방법으로서 명암도의 구배(gradient)를 이용하는 방법, 면함수 근사법(surface fitting), 2차 미분법 등 여러 가지가 문헌⁽¹⁰⁻¹²⁾에 소개되어 있으나, 이러한 방법으로 변형된 격자망의 변형률을 측정하고자 할 때 특히 격자점 근처의 명암도 분포로부터 화소미만 단위의 좌표 추출을 안정적으로 수행하기 어려운 문제점이 있다.

Fig.2는 본 연구에서 사용한 화소미만 단위 좌표 측정 알고리즘의 개념도이며, 그 과정은 다음과 같다.

(1) 세션화 및 화상 정합 과정을 거쳐 구해진 요소망 연결관계를 이용하여 교정하고자 하는 절점 주위의 영역을 정의한다. 영역의 크기는 10×10 화소 정도에서 30×30 화소 정도까지 절점 사이의 거리에 따라 적절히 선택한다.

(2) 가로 및 세로 방향으로의 명암도 분포를 각각 Bezier 곡선으로 근사한 후 중앙차분법(central difference method)과 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 극소점을 찾는다. Bezier 곡선은 세션화된 화상의 골격선 주변 화소들로 구성하며, Newton-Raphson 반복법의 초기치는 이 골격선 상의 화소 좌표로 한다. Bezier 곡선은 다항식 등 다른 근사 함수에 비하여 극소점의 위치가 선분의 중점에 정확하게 위치하는 장점이 있다.

(3) 절점 주변의 연결관계를 고려하여 극소점들이 두 격자선 중 어느 쪽에 포함될 것인지 판별한다. 이 때 절점과 너무 가깝거나 인접 절점과의 연결선으로부터 너무 멀리 떨어진 극소점들은 다음의 곡선 근사(curve fitting) 과정에 포함시키지 않는다.

(4) 최소자승법(least square method)을 사용하여 두 격자선의 골격을 형성하는 극소점들을 각각 2차식으로 근사한 후, 두 근사 곡선의 교점을 실수 단위로 계산하여 이 절점의 새 좌표로 한다.

(5) 필요한 경우 (4)에서 구한 좌표를 초기치로 하여 화소미만 단위 좌표 측정을 반복한다. 특히, 측정 영역의 가장자리나 모서리에 있는 절점들의 경우에 2~3 회 반복 적용하면 매우 효과적이다.

Fig.3은 카메라 보정용 알루미늄 블록⁽⁶⁾의 한 평면에 정

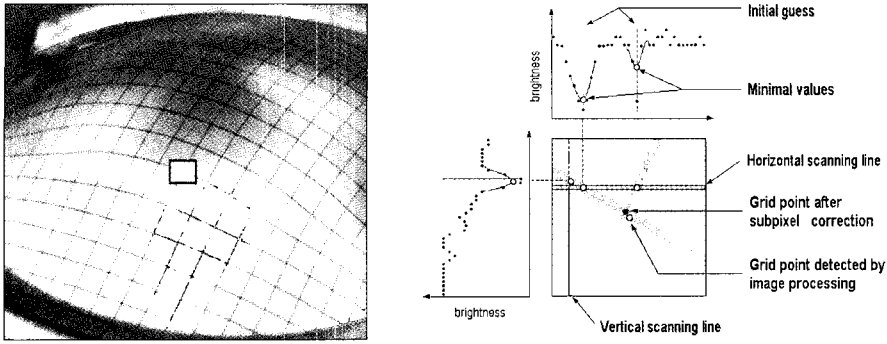


Fig. 2 Schematic diagram of the subpixel measurement

밀하게 새긴 5×5 mm 격자망의 3차원 좌표를 측정하여 평면에 수직인 방향(z-축)의 좌표값을 50배 또는 500배 확대한 그림이다. Fig.3(b)는 이 알고리즘을 적용함으로써 z-좌표의 측정 오차가 1/10 이하로 감소한 효과를 보여준다.

2.2 곡면 평활화

비전을 이용한 3차원 좌표의 측정에서 특히 깊이(depth) 방향, 즉 카메라 광축 방향으로의 오차는 다른 방향에 비하여 10 배 정도 커서 가장 큰 오차요인이 되므로 어떤 방법으로는 보정해야 할 필요가 있다. Fig.3에서 보는 바와 같이 화소미만 단위 측정으로 오차수준이 상당히 감소하였으나, 표면의 굴곡은 여전히 개선할 필요가 있음을 알 수 있다. 평활화 과정에서는 모든 절점의 3차원

좌표를 인접한 주변 절점 좌표들의 가중평균값으로 수정함으로써, 측정과정의 여러 오차요인으로 인한 표면 형상의 요철이 감소되어 부드러운 곡면을 형성하게 된다.

Fig.3(c)는 화소미만 단위 측정 후 선형 평활화 알고리즘(4,5)을 적용한 결과이며, 1 회의 적용만으로 상당한 평탄화 효과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 그러나 이 알고리즘은 3.2절에서 후술하는 바와 같이 주변 절점들의 x, y, z 좌표가 선형적으로 가중되어 횡수를 거듭할수록 절점들이 등간격으로 재배열되면서 결국 평면에 수렴하는 특성을 지니고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 자유표면의 표현에 적합한 2차형의 평활화 식을 제안하였다. 이에 대한 상세한 설명은 부록 1에 첨부하였다. Fig.3(d)는 이 알고리즘을 적용한 결과이며, 지그와 같이 측정 대상이 평면일 경우에는 선형 평활화 결과와 큰 차이

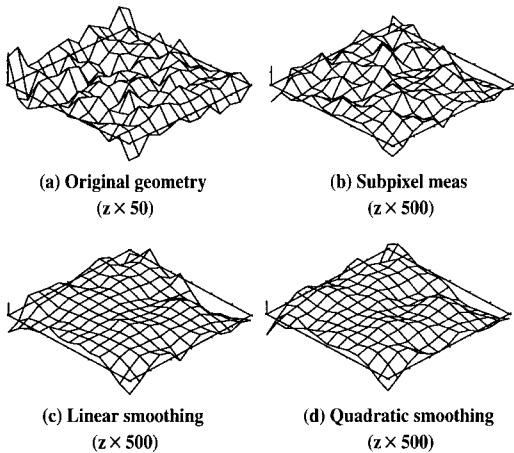


Fig. 3 Visualization of the subpixel measurement and smoothing effect

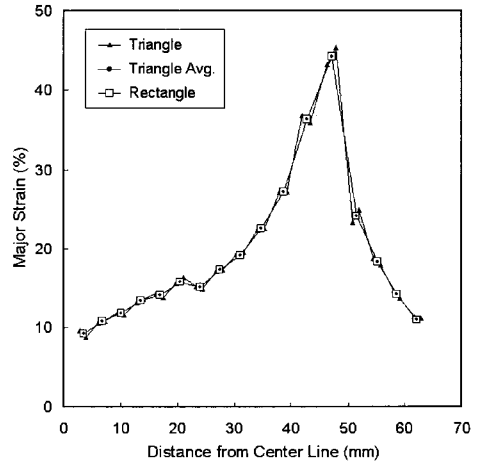


Fig. 4 Comparison of the strain calculation methods

가 없음을 알 수 있다.

2.3 곡면변형률 계산

Sowerby 등⁽¹³⁾은 균일 변형을 가정한 삼각형 셀 요소에 대하여 Cauchy-Green 변형텐서를 이용한 변형률 계산식을 유도한 바 있으며, 이 식은 3차원 자유곡면의 대변형률 계산을 필요로 하는 많은 연구^(4~9)에서 사용되어 왔다. 그러나 이 방법은 판재성형 실험에서 널리 이용되고 있는 정사각형 격자망의 변형률을 계산하는 경우, 사각형 요소를 대각선으로 분할하여 각 삼각형 영역의 변형률을 균일한 것으로 가정하므로 근본적인 오차요인을 가지게 된다. 이로 인하여 변형률 분포를 등고선(contour) 또는 단면 분포(section plot)로 나타낼 때 필연적으로 오차가 발생하며, 이를 없애기 위하여 또 다시 적당한 평활화 작업을 수행하여야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 셀 요소대신 두께를 가진 선형 육면체 유한요소의 형상함수에서 두께 방향의 자연좌표(natural coordinate) $t = 0$ 인 면을 판재 면과 일치하는 것으로 생각하여, 이 면 상에서 선형적으로 분포하는 변위장으로부터 곡면변형률을 계산하는 식을 유도하였다. 상세한 유도 과정은 부록 2에 설명하였다.

Fig.4는 Sowerby 등의 삼각형 요소에 대한 식과 본 연구에서 제안한 사각형 요소에 대한 식을 각각 이용하여 한계돔높이(limiting dome height: LDH) 시편의 주변형률을 계산하고 그중 한 격자열을 따른 분포를 비교한 것이다. 한 방향의 대각선으로 분리한 삼각형 요소의 경우에 변형률 분포 곡선이 진동을 보이는 반면, 두 방향의 대각선으로 나눈 삼각형 4 개의 평균을 취한 것은 매끈한 분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 유도한 식을 사용한 경우는 평균값을 취한 후자의 경우와 거의 완전히 일치하는 결과를 보였다.

3. 실험 및 오차 분석

앞에서 설명한 새로운 알고리즘들과 기 개발한 변형률 측정 시스템의 내적·외적 인자들이 3차원 좌표 및 변형률 측정 결과의 정확도에 미치는 영향을 정량적으로 조사하고, 최적 측정 조건을 구하기 위한 실험과 오차 분석을 실시하였다. 오차 분석을 위한 측정 대상으로는 카메라 보정용 알루미늄 블록 표면에 와이어 방전가공기를 이용하여 $5(\pm 0.01)$ mm 간격과 0.1 mm 굵기로 세긴 정사각형 격자망을 사용하였다.⁽⁸⁾ 이 평면의 변형률은 모두 0으로

간주할 수 있으므로, 측정 영역 내 모든 요소들의 주·부 변형률에 대한 평균값과 최대값을 오차지표(error measure)로 정의하였다. 또한, 3×3 mm 격자를 가진 한계 돔높이 성형 시편을 대상으로 평활화 알고리즘들의 장단점 분석을 위한 실험과, 측정의 재현성 및 정밀도 조사를 위한 반복 실험을 수행하였다.

3.1 화소미만 단위 측정

Fig.5는 보정면의 주변형률 분포를 나타낸 것이다. 화소미만 단위 측정으로 주변형률 오차가 $-4.0 \sim +4.0\%$ 에서 $-0.1 \sim +0.3\%$ 으로 상당히 낮아졌음을 알 수 있다.

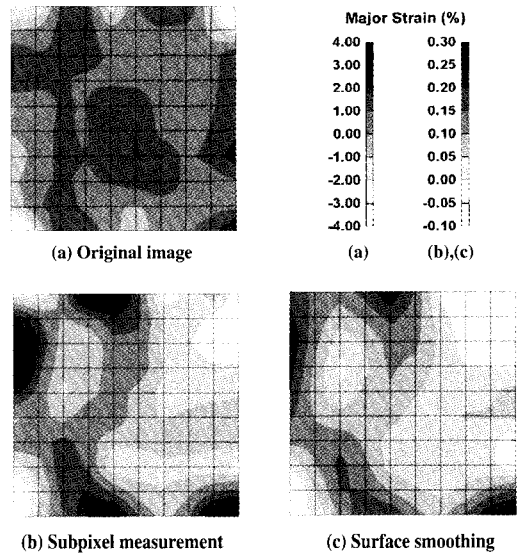


Fig. 5 Reduction in error by the subpixel measurement and smoothing algorithm

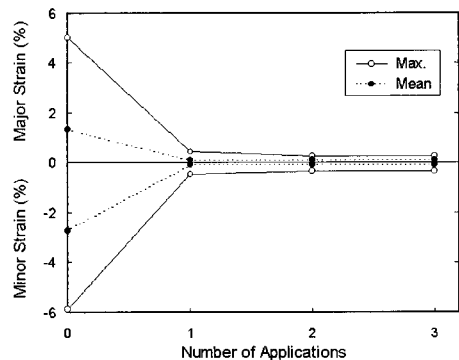


Fig. 6 Effect of multiple applications of the subpixel measurement

Fig.6은 화소미만 단위 측정 알고리즘의 적용 횟수에 따른 오차지표들의 변화를 나타낸다. 1 회의 적용으로 오차 수준을 1/10 정도로 감소시킬 수 있으며, 보정면과 같이 격자의 모양이 심하게 변형되어 있지 않은 경우는 2 회 이상 반복하여도 오차 감소의 효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 이 알고리즘은 측정 대상에 새겨진 격자의 선명도, 격자선 폭 및 조명 상태에 따라 효과가 달라질 수 있으며, 격자의 개수와 격자점 사이의 거리에 따라 실행시간에 차이가 난다. 보정면을 대상으로 한 이후의 실험은 모두 1 회의 화소미만 단위 측정을 수행한 것이다.

3.2 곡면 평활화

Fig.5(c)는 화소미만 단위 측정 후 2차식 평활화를 적용함으로써 주변형률 오차를 다시 -0.05~+0.25 % 정도로 감소시킬 수 있음을 보여주고 있다.

Fig.7은 평활화의 적용 횟수에 따른 효과를 나타낸 것

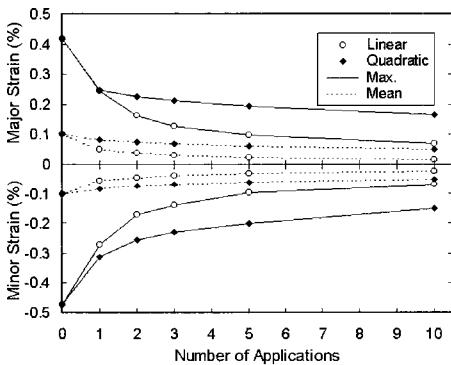


Fig. 7 Effect of multiple applications of the surface smoothing

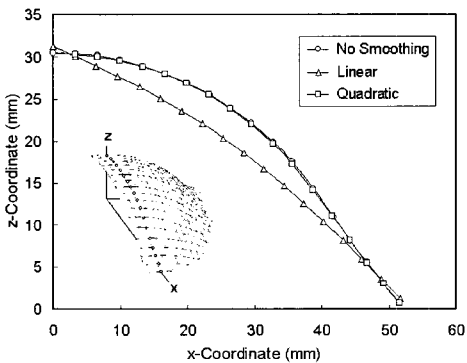


Fig. 8 Flattening of the profile by excessive linear smoothing

이다. 본 실험에 사용되고 있는 보정면과 같이 모든 격자선이 직선으로 이루어진 경우에는 1~2 회의 적용으로 오차 수준이 1/2 정도로 떨어지는 것을 알 수 있다. 특히 선형 평활화의 경우 수십 회까지 반복 적용하여도 계속 감소한다. 그러나 성형된 판재는 보통 자유곡면 형상을 가지므로 선형 평활화를 필요이상 반복 적용하면 절점들이 등간격으로 재배치되어 평면에 가까워지므로 오히려 측정오차가 증가하게 된다.

Fig.8은 그 예로서 한계돔높이 성형 시편에 대해 선형 및 2차식 평활화 알고리즘을 각각 100회 적용한 후 단면을 따른 윤곽선 형상을 도시한 것으로, 선형 평활화를 적용했을 때는 상당히 직선화된 반면 2차식 평활화는 원래의 형상과 거의 차이가 없음을 보여주고 있다. 따라서 평활화는 1~2 회 정도만 적용해야 오차가 확대되지 않는 범위 내에서 좋은 효과를 기대할 수 있으며, 3차원적인 형상을 가진 시편을 측정할 때에는 2차식 평활화를 적용하는 것이 바람직하다. 이후의 실험은 모두 1 회의 2차식 평활화 알고리즘을 적용하였다.

Fig.9에는 각 평활화 알고리즘에 따라 한계돔높이 시편의 주변형률 분포를 계산한 결과가 비교되어 있다. 특히 네깅이 발생한 위치에서, 선형 알고리즘과 2차식 마름모(rhombus) 알고리즘의 경우 평활화 처리를 하지 않은 경우에 비하여 6 % 정도 작은 값을 나타내나, 2차식 정사각형 알고리즘의 경우는 거의 비슷한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 실시한, 네깅부를 가진 많은 시편들의 측정에서 공통적으로 이러한 차이를 볼 수 있었다. 따라서 국부적인 변형률 집중이 있는 경우에는 그 부근의 내

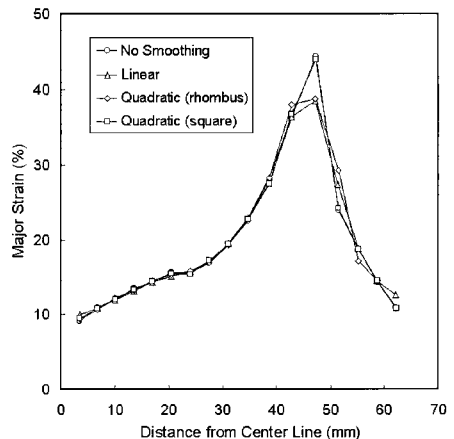


Fig. 9 Comparison of the smoothing algorithms

부격자점들에 대한 평활화 과정에서 자료점을 선택할 때 기본 마름모 영역대신 3×3 정사각형 영역의 격자점을 사용하는 것이 바람직한 것으로 보인다(부록 1 참조).

3.3 측정의 정밀도

한 시편에 대하여 변형률 측정의 전과정을 여러 번 반복했을 때 얻어진 측정값들의 편차(deviation)는 곧 측정 시스템의 정밀도와 밀접한 관계를 가진다. 편차는 모든 격자에 대하여 각각 계산되며, M 개의 격자에 대하여 주변형률을 N 번 측정하였을 때, j 번째 측정에 대한 평균편차와 최대편차는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$\sigma_{avg}^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^M |\epsilon_i^{(j)} - \bar{\epsilon}_i|}{M} \quad (1)$$

$$\sigma_{max}^{(j)} = \text{Max} |\epsilon_i^{(j)} - \bar{\epsilon}_i|, 1 \leq i \leq M \quad (2)$$

여기서 $\epsilon_i^{(j)}$ 는 격자 i 에 대한 주변형률의 j 번째 측정값이며, $\bar{\epsilon}_i$ 는 격자 i 에 대한 주변형률 측정값의 평균으로 $\bar{\epsilon}_i = \left(\sum_{j=1}^M \epsilon_i^{(j)} \right) / N$ 이다.

Table 1 은 화소단위 측정 미만 및 곡면 평활화 알고리즘을 선택적으로 적용하여 한계돔높이 성형 시편의 229 개 격자 영역의 주변형률을 4 회 측정하였을 때 얻어진 평균편차와 최대편차를 비교한 것이다. 화소미만 단위 측정을 내부 격자점과 가장자리 격자점에 대해 각각 1 회 ("1/1 time") 적용한 경우의 최대 편차는 각각 3 회 ("3/3 times") 적용한 경우보다 5 배 정도 크다. 이는 본 연구에서 사용한 화소미만 단위 측정 알고리즘의 특성상 변형이 심한 모서리 부분의 격자점이 1 회의 적용만으로는 정확하게 교정되지 않기 때문이다. 그러므로 일반적인 성형 시편의 측정 시 내부 점에 대하여는 1 회, 가장자리 점에 대하여는 3 회 ("1/3 times") 적용하는 것이 실행속도와 정확도 양면에서 만족한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이 방법으로 화소미만 단위 측정을 적용하여 3 차원 좌표를 구한 후 여러 가지 평활화 알고리즘을 각각 적용하였을 때의 평균편차와 최대편차를 Table 1 의 오른쪽 쪽에 표시하였다. 어느 경우나 평활화 처리를 하지 않았을 때에 비하여 더 좋은 결과를 보이며, 편차의 감소효과만으로 볼 때는 선형 알고리즘이 가장 우수한 것으로 나타났다. 그러나 전술하였듯이 자유곡면으로 성형된 시편에 대하여는 2차식 마름모 또는 2차식 정사각형 알고리즘을 선

택적으로 사용하는 것이 바람직하다.

Table 1 Deviation in the major strain of an LDH specimen measured several times

Dev.	Trial No.	Orig. Image	Subpixel Measurement			Surface Smoothing		
			1/1 time	3/3 times	1/3 times	Linear	Quad (◇)	Quad (□)
Avg.	1	1.05	0.19	0.16	0.15	0.12	0.13	0.14
	2	0.89	0.10	0.10	0.09	0.05	0.05	0.08
	3	0.86	0.13	0.12	0.11	0.05	0.06	0.09
	4	0.87	0.13	0.13	0.13	0.10	0.10	0.11
Max.	1	5.46	3.83	0.52	0.47	0.39	0.39	0.42
	2	6.36	1.28	0.50	0.41	0.29	0.40	0.40
	3	3.92	1.28	0.50	0.40	0.20	0.29	0.34
	4	4.06	1.28	0.70	0.71	0.37	0.47	0.59

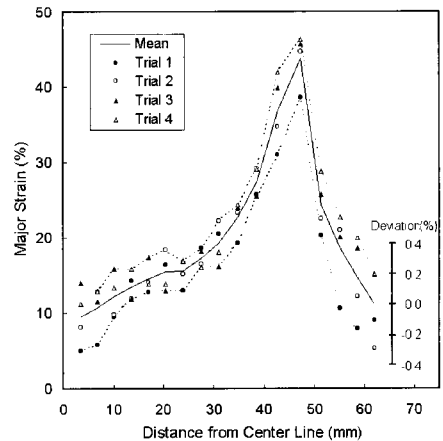
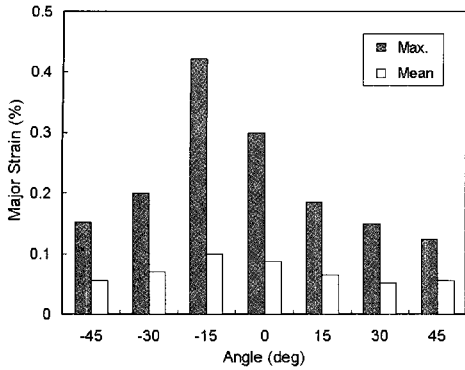
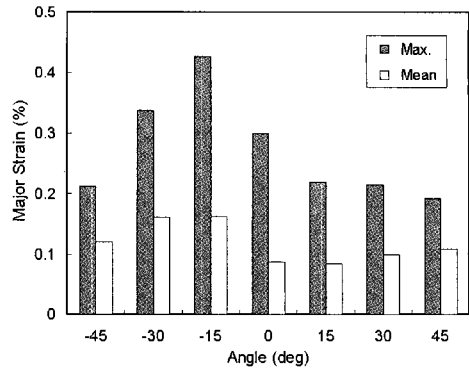


Fig. 10 Section distribution of the deviations of measured values

Fig.10은 이러한 최적의 알고리즘(1/3회의 화소미만단위 측정, 2차식 정사각형 평활화)을 적용하여 4 회 측정된 주변형률과 그 평균값을 한 줄의 격자열을 따른 분포로 나타낸 것이다. 비교를 용이하게 하기 위하여 평균값의 분포만 세로좌표축의 눈금에 맞게 표시하고, 각 측정값의 분포는 평균값과의 편차를 그래프 속의 눈금처럼 20 배 확대하여 표시하였다. 위치에 따라 4 가지 측정값간의 편차가 다르지만 전체적으로 ±0.3 % 범위 안에 있어 상당히



(a) Each plane used for calibration of itself



(b) The plane in the 0° - direction used for calibration

Fig.11 Camera calibration error in the measurement of a plane

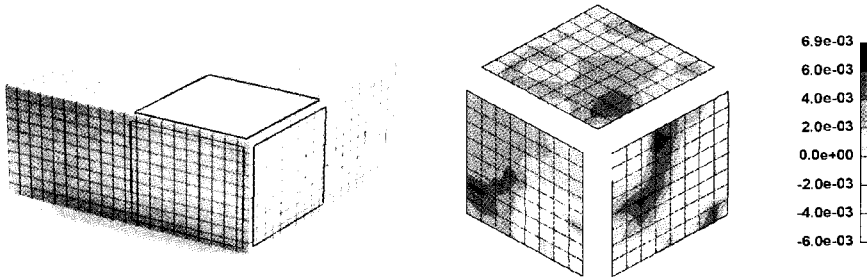


Fig. 12 Camera calibration error in the measurement of a 3-D surface

정밀한 측정 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

3.4 카메라 보정

본 연구에서는 Tsai^[4]가 고안한 카메라 보정법을 응용하였다. 이 방법은 동일 평면 위의 보정점들만을 이용하여도 이 평면 위에 있지 않는 점들에 대한 보정이 상당히 정확하게 이루어진다고 알려져 있다.

Fig.11은 보정용 블록을 기준위치로부터 -45° 부터 +45° 까지 15° 간격으로 회전시키면서 오차(주변형률)를 분석한 것이다. Fig.11(a)는 각 방향에 대하여 측정하고자 하는 평면 그 자체를 보정면으로 사용한 것이며, (b)는 기준방향(0° 방향)에 대해서만 카메라 보정만 수행하고 그 정보를 다른 각도의 평면 측정에 그대로 적용한 것이다. 두 경우 모두 평균값 0.2%미만, 최대값 0.5%미만의 비슷한 오차수준을 나타내어, 이 알고리즘이 보정면과 동일한 평면의 격자에 대하여 매우 좋은 보정 능력을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig.12는 블록의 윗면을 보정면으로 하고 이 면과 좌우

측면을 포함한 세 면의 변형률을 측정된 결과로서, 주변형률 분포가 ±0.7%이하인 양호한 오차수준을 보이고 있다. 따라서 본 알고리즘이 보정면 상에 있지 않은 점들의 3

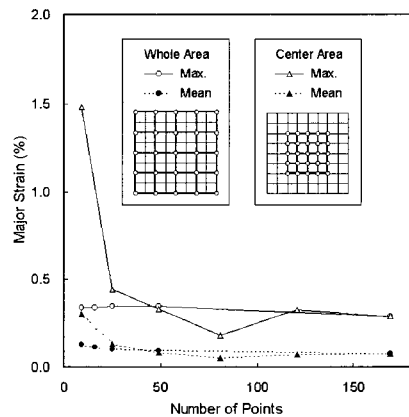


Fig. 13 Influence of the area and the no. of points used for calibration on error

차원 좌표 측정에도 상당히 정확한 결과를 주는 것을 확인할 수 있다.

한편, 카메라 보정에 사용된 보정점 개수 및 보정영역 크기와 오차 분포와의 상관관계를 Fig. 13에 도시하였다. 그림 설명에서 "whole area"는 화상 전체영역에서 등간격으로 보정점을 선택한 것을 의미하며, "center area"는 화상의 가운데에서 1 격자 간격으로 필요한 보정점 개수 만큼 선택한 것을 뜻한다. 보정영역의 크기가 충분하면 그 내부의 보정점 개수는 오차수준에 거의 영향을 미치지 않으나, 보정영역의 크기가 전체 화상 크기에 비하여 작을 때는 상당한 오차를 유발한다는 것을 알 수 있다.

3.5 카메라 촬영 각도

Fig.14는 두 카메라 광축 사이의 각에 따른 오차 변화를 나타내며, Fig.15는 두 카메라 광축의 중심선과 측정면이 이루는 각에 따른 오차 변화를 보여주고 있다. 카메라

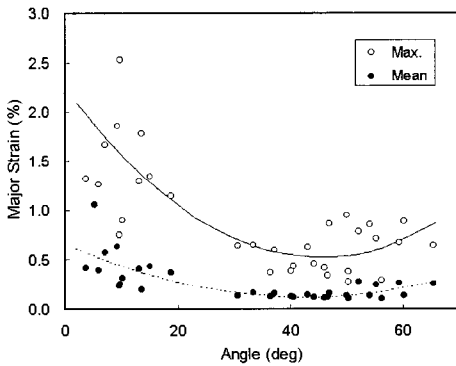


Fig. 14 Optimum angle between the optical axes of two cameras

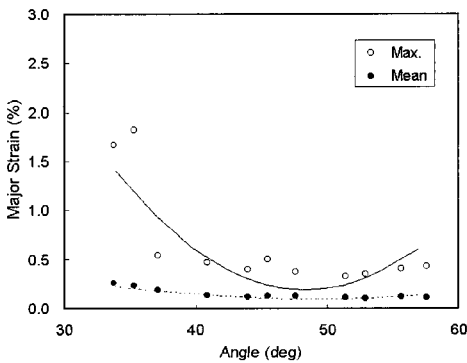


Fig. 15 Optimum angle between the optical axis and the surface to be measured

사이의 상대각도는 40~60°, 측정 면과 카메라의 각도는 50° 부근일 때 오차가 최소화되는 것으로 나타났다. 오차 분석을 위한 지금까지의 모든 실험은 이 각도 범위에서 실시한 것이다.

3.6 격자 크기

격자 크기는 작을수록 측정 오차의 발생 확률이 상대적으로 높아져 분포 곡선의 진동이 생기는 경향이 있으나, 네킹과 같은 국부적인 변형을 잘 나타낼 수 있어 일반적으로 주변형률의 최대값이 더 높게 평가되고, 그 위치도 더 정확하게 관찰할 수 있다. Fig.16은 한계돔높이 시편에 2, 3, 4, 5 mm 등 4 가지 크기의 격자를 인쇄하고 성형 후 중심으로부터의 거리에 따른 변형을 분포를 측정한 것이다. 격자 크기에 따라 최대값의 크기뿐만 아니라 그 위치도 상당히 다른 것을 알 수 있다. 세로축에 표시된 주변형률은 각 격자(요소)의 중심에서 평가한 값을 그 요소의 대표값으로 취한 것이며, 가로축은 시편 중심으로부터 표면을 따라 요소 중심까지 측정한 거리를 나타내므로, Fig.17에 나타난 것처럼 동일한 지점에 네킹이 발생하더

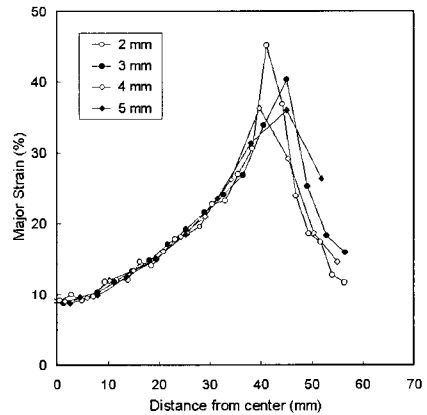


Fig. 16 The effect of the grid size on the strain evaluation

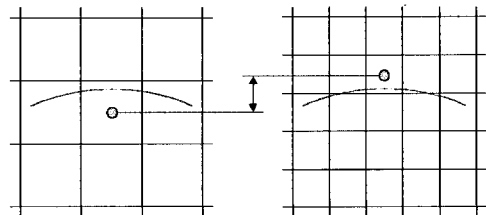


Fig. 17 Schematic diagram showing grid size effect

라도 그 영역을 포함한 요소의 크기와 위치에 따라 최대값이 나타나는 지점에 차이가 날 수 있다. 따라서 변형을 측정 위한 격자 크기의 선택은 시편 및 측정영역의 크기와 국부적인 변형의 집중 여부 등을 고려해서 결정하여야 할 것이다.⁽¹⁵⁾

4. 결 론

컴퓨터 비전 기술을 응용한 3차원 곡면변형을 측정 시스템의 정확도와 정밀도를 향상시킬 수 있는 새로운 알고리즘들을 제안하고 그 적용 효과를 검증하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 화상 좌표를 화소미만 단위의 실수 값으로 측정하는 알고리즘을 고안하여 그 효과를 검증한 결과 오차수준을 1/10 이하로 감소시킬 수 있으며, 특히 측정 영역의 가장자리나 모서리 절점에 2~3 회 반복 적용하면 더욱 효과적임을 확인하였다.

(2) 2차식의 새로운 곡면 평활화 알고리즘을 적용함으로써 기존의 선형 평활화 알고리즘이 나타내는 직선화 또는 평탄화 현상이 없이 오차수준을 1/2 정도로 감소시킬 수 있었다. 또한, 네킹부 근처에서는 평활화 과정에 필요한 자료점의 선택 영역을 축소함으로써 국부적인 변형 집중을 잘 표현할 수 있음을 밝혔다.

(3) 두께를 가진 선형 육면체 유한요소의 형상함수를 이용하여 3차원 곡면변형을 계산하는 식을 유도하였다. 이 식은 균일 변형률의 삼각형 셀 요소에 대한 식(13)을 적절히 가중평균하는 방법⁽⁴⁻⁹⁾보다 더욱 간편하고 정확하게 곡면변형을 평가할 수 있음을 보였다.

(4) 한 평면 위의 점들을 이용한 카메라 보정법을 적용함으로써 같은 평면 내의 점들뿐만 아니라 임의의 3차원 공간 점들에 대하여도 우수한 보정 정보를 얻을 수 있었다. 또한, 보정점 개수보다는 보정영역의 크기가 측정값의 오차에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

(5) 두 카메라 광축사이의 상대각도는 40~60°. 측정면과 카메라 광축사이의 각도는 50° 부근일 때 오차가 최소화되는 것으로 나타났다.

(6) 격자 크기는 작을수록 측정오차가 커질 확률이 높고 변형을 분포 곡선의 진동이 생기는 경향이 있으나, 반면에 네킹과 같은 국부적인 변형을 관찰할 때는 일반적으로 주변형률의 크기와 발생 위치를 더 정확하게 표현할 수 있다. 따라서 격자 크기는 측정영역의 크기와 국부적인 변형 여부 등을 고려하여 적절히 선택하여야 한다.

(7) 기 개발한 비전 시스템에 (1)~(3)의 새로운 알고리즘들을 보완함으로써, 변형이 없는 보정면의 경우 주변형률 오차 $\pm 0.4\%$ 미만의 정확도로 측정할 수 있었으며, 한계둠높이 성형 시편을 4 회 반복 측정하여 주변형률 최대편차 $\pm 0.6\%$ 미만의 정밀도를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) E. Schedin and A. Melander, 1986, "The Evaluation of Large Strains from Industrial Sheet Metal Stampings with a Square Grid", J. of Applied Metalworking, Vol. 4, pp.143~156.
- (2) D. N. Harvey, 1984, "Optimizing Patterns and Computational Algorithms for Automated, Optical Strain Measurement in Sheet Metal", Proc. of the 13th Biennial Congress, Melbourne, Australia, IDDRG, pp. 403~414.
- (3) A. Miyoshi, A. Yoshioka and G. Yagawa, 1988, "Strain Measurement of Structures with Curved Surfaces by Means of Personal Computer-Based Picture Processing", Engineering with Computers, Vol. 3, pp. 149~156.
- (4) J. H. Vogel and D. Lee, 1989, "An Automated Two-View Method for Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces", J. of Materials Shaping Technology, Vol. 6, No. 4, pp. 205~216.
- (5) CamSys Inc., 1995, ASAME Reference Manual, Ver. 3.8.
- (6) D. Manthey and D. Lee, 1995, "Recent Developments in a Vision-Based Surface Strain Measurement System", JOM, Vol. 47, No. 7, pp. 46~49.
- (7) H. J. Kim and D. Lee, 1996, "Further Development of Experimental Methods to Verify Computer Simulations", Proceedings of the 3rd NUMISHEET Conference, pp. 316~323.
- (8) 한상준, 김영수, 김형종, 오수익, 1998, "화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정 시스템의 개발", 한국소성가공학회는논문집, 제7권 제6호, pp. 575~585.
- (9) 정재윤, 황창원, 허만성, 김낙수, 1997, "화상처리법을 이용한 판재의 변형률 측정(II)", 한국소성가공학회 '97 추계학술대회 논문집, pp. 147~152.
- (10) P. D. Hyde and L. S. Davis, 1983, "Subpixel

Edge Estimation", Pattern Recognition, Vol. 16, No. 4, pp. 413~420.

- (11) E. P. Lyvers, O. R. Mitchell, M. L. Akey and A. P. Reeves, 1989, "Subpixel Measurement Using a Moment-Based Edge Operator", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 12, pp. 1293~1309.
- (12) R. M. Haralick and L. G. Shapiro, 1993, Computer and Robot Vision, Addison-Wesley.
- (13) R. Sowerby, J. L. Duncan and E. Chu, 1986, "The Modelling of Sheet Metal Stamping", Int. J. Mech. Sci., Vol. 28, No. 7, pp. 415~430.
- (14) R. Y. Tsai, 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.
- (15) 전기찬, 1993, 박판금속의 성형, 반도체출판사, pp. 179~181.

부록 1. 곡면 평활화

평활화 알고리즘은 변형된 곡면 위의 격자점들의 좌표가 변형 전 좌표에 대한 매끈한 함수(smooth function)로 표현할 수 있다는 가정을 바탕으로 한다. 격자점들의 원래 좌표는 등간격이므로 곡면에 근사한 선형 함수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.^(4,5)

$$x'_{ij} = a_0 + a_1i + a_2j \tag{A1}$$

여기서 i 와 j 는 Fig. A1에 표시한 바와 같이 평활화 알고리즘을 적용하여 좌표를 수정하고자 하는 점, 즉 기준격자점(reference point)에 원점을 두고 격자 간격을 단위(1)로 하는 국부좌표계를 나타낸다.

식 (A1)의 선형 평활화는 본문에서 설명한 바와 같이 격자점들을 등간격으로 재배열하는 효과를 가지므로 궁극적으로 곡면이 평탄화되는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 2차형 평활화 함수를 제안하였다.

$$x'_{ij} = a_0 + a_1i + a_2j + a_3i^2 + a_4ij + a_5j^2 \tag{A2}$$

식 (A2)에 포함된 6 개의 계수 a_0, a_1, \dots, a_5 는 좌우 화

상으로부터 기하학적으로 계산된 좌표 x_{ij} 와 평활화 곡면 위로 수정하고자 하는 좌표 x'_{ij} 에 대하여 최소자승오차법 (least squares error method)을 적용함으로써 구할 수 있다. 이때 오차함수 E 는 다음과 같이 정의된다.

$$E = \sum_{ij} (x_{ij} - x'_{ij})^2 \tag{A3}$$

E 를 최소화하기 위하여 6 개의 계수에 대해 각각 편미분하면 다음과 같은 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sum 1 & \sum i & \sum j & \sum i^2 & \sum ij & \sum j^2 \\ \sum i & \sum i^2 & \sum ij & \sum i^3 & \sum i^2j & \sum ij^2 \\ \sum j & \sum ij & \sum j^2 & \sum i^2j & \sum ij^2 & \sum j^3 \\ \sum i^2 & \sum i^3 & \sum i^2j & \sum i^4 & \sum i^3j & \sum i^2j^2 \\ \sum ij & \sum i^2j & \sum ij^2 & \sum i^3j & \sum i^2j^2 & \sum ij^3 \\ \sum j^2 & \sum ij^2 & \sum j^3 & \sum i^2j^2 & \sum ij^3 & \sum j^4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_{ij} \\ \sum ix_{ij} \\ \sum jx_{ij} \\ \sum i^2x_{ij} \\ \sum ijx_{ij} \\ \sum j^2x_{ij} \end{pmatrix} \tag{A4}$$

Fig. A1은 이 연립방정식을 풀기 위하여 사용되는 격자점, 즉 오차함수의 정의에 포함되는 자료점(data point)을 유형별로 나타낸 것이다. 검은 색 원으로 표시된 기준격자점 ($i=j=0$) 주위에 흰색 원으로 표시된 자료점들이 선택되어 있다. 6 개의 미지 계수에 대한 유일 해를 구하기 위하여는 6 개이상의 자료점이 필요하며, 6 개의 자료점을 사용했을 경우 x'_{ij} 의 값은 x_{ij} 와 같게 된다. 자료점의 선택은 Fig. A1에 표시된 것과 같이 기본적으로 기준격자점을 중심으로 대각선의 길이가 4인 마름모 영역 내에 있는 격자점으로 하나("2차식-마름모" 알고리즘), 이 마름모 내의 격자점이 6 개이하인 경우에는 영역을 확대하여 충분한 자료점을 확보한다. 특히, Fig. A1(c)와 같이 기준격자점이 측정영역의 모서리에 있을 때는 기본 마름모 안의 격자점이 최대 6 개밖에 되지 않으므로 필연적으로 마름모 밖의 ◎로 표시된 격자점을 추가해야 한다. 한편, 네깅부나 파단부의 국부적인 변형을 잘 나타내기 위해서는 근처의 내부 격자점들에 대하여 기본 마름모 영역의 13 개 격자점 중 ⊗로 표시된 4 개를 제외한 3×3 정사각형 영역의 9 개 격자점을 사용하는 것("2차식-정사각형" 알고리즘)이 바람직한 것으로 보인다(Fig.9 참조).

본 알고리즘에서는 행렬방정식 (A4)를 한번 풀어서 기준격자점의 좌표 x'_{00} 만 수정하므로 실제로는 6 개의 계수

를 모두 구할 필요 없이 $a_0 (=x'_{00})$ 만 구하면 된다. 이 a_0 값을 기준격자점의 새로운 x 좌표로 하고, y 및 z 좌표도 같은 방법으로 수정한다. 측정영역 내의 모든 격자점을 기준격자점으로 하여 각각 평활화 알고리즘을 적용한다.

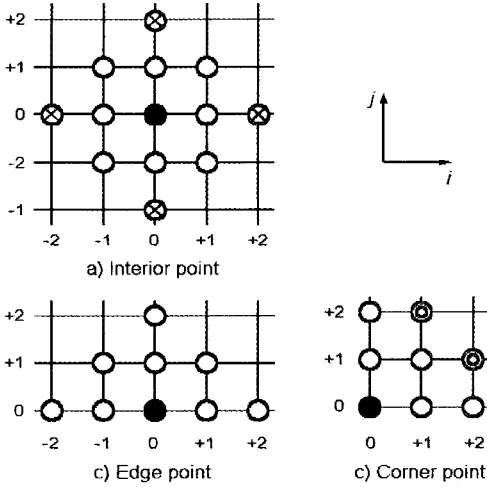


Fig. A1 Data points involved in the smoothing equation

부록 2. 곡면변형률의 계산

Fig. A2 에 도시한, 8 개의 절점 $1^u, 1^t, \dots, 4^u, 4^t$ 을 가지는 육면체 요소 내의 한 점 P에서의 변위 성분 u 는 자연좌표계(natural coordinate system) r, s, t 에 대한 선형 형상함수(shape function)를 사용하여 절점변위 u_i^U 및 $u_i^t (i=1,2,3,4)$ 를 선형 보간함으로써 구할 수 있다. 즉,

$$u = u(r,s,t) = \frac{1}{8} [(1+r)(1+s)(1+t)u_1^u + (1+r)(1+s)(1-t)u_1^t + (1-r)(1+s)(1+t)u_2^u + (1-r)(1+s)(1-t)u_2^t + (1-r)(1-s)(1+t)u_3^u + (1-r)(1-s)(1-t)u_3^t + (1+r)(1-s)(1+t)u_4^u + (1+r)(1-s)(1-t)u_4^t] \quad (A5)$$

변위 성분 v 와 w 에 대하여도 식 (A5)와 같은 형태의 보간식이 적용된다.

Fig. A2 에서 변형률을 계산하고자 하는 판재 면은 회색으로 표시되어 있으며, 두께를 가진 8 절점 입체요소의 $t=0$ 면과 항상 일치하는 것으로 생각한다. 이 면 위의 절

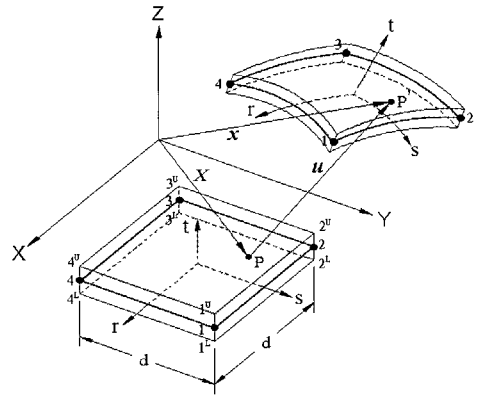


Fig. A2 Schematic diagram of the surface-strain calculation

점변위는

$$u_i = \frac{u_i^U + u_i^t}{2}, \quad i = 1,2,3,4 \quad (A6)$$

이므로, 판재면 내의 변위장은 $t=0$ 면 위의 절점변위들로 표시된다. 즉,

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{4} [(1+r)(1+s)u_1 + (1-r)(1+s)u_2 + (1-r)(1-s)u_3 + (1+r)(1-s)u_4] \\ v &= \frac{1}{4} [(1+r)(1+s)v_1 + (1-r)(1+s)v_2 + (1-r)(1-s)v_3 + (1+r)(1-s)v_4] \\ w &= \frac{1}{4} [(1+r)(1+s)w_1 + (1-r)(1+s)w_2 + (1-r)(1-s)w_3 + (1+r)(1-s)w_4] \end{aligned} \quad (A7)$$

이 면에 대한 Green-Lagrange 변형률은 다음과 같이 변위 성분의 편미분 항들로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial X} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial X} \right)^2 \right] \\ E_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial Y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial Y} \right)^2 \right] \\ E_{xy} &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X} + \frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X} \frac{\partial v}{\partial Y} + \frac{\partial w}{\partial X} \frac{\partial w}{\partial Y} \right] \end{aligned} \quad (A8)$$

변형 전의 요소(격자)는 한 변의 길이가 d 인 정사각형이며, 편의상 각 변이 X, Y 축과 평행한 것으로 가정하면, Jacobian 행렬은 다음과 같이 대각행렬로 주어진다.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial r} & \frac{\partial Y}{\partial r} \\ \frac{\partial X}{\partial s} & \frac{\partial Y}{\partial s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix}, \quad J = \frac{d}{2} \quad (\text{A9})$$

기준좌표계 (X, Y)와 자연좌표계 (r, s)사이의 관계는

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial X} \\ \frac{\partial}{\partial Y} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial r} & \frac{\partial Y}{\partial r} \\ \frac{\partial X}{\partial s} & \frac{\partial Y}{\partial s} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{pmatrix} \quad (\text{A10})$$

이므로, 변위 성분 u 를 편미분하면 다음과 같이 절점변위들의 항으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial X} &= \frac{1}{J} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{J} \left[\frac{u_1 - u_2 - u_3 + u_4}{4} + \frac{u_1 - u_2 + u_3 - u_4}{4} s \right] \\ \frac{\partial u}{\partial Y} &= \frac{1}{J} \frac{\partial u}{\partial s} = \frac{1}{J} \left[\frac{u_1 + u_2 - u_3 - u_4}{4} + \frac{u_1 - u_2 + u_3 - u_4}{4} s \right] \end{aligned} \quad (\text{A11})$$

절점변위는 변형 전후의 절점좌표의 차이로 나타낼 수 있다.

$$u_i = x_i - X_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (\text{A12})$$

식 (A12)를 식 (A11)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial X} &= A_3 s + A_4 + 1 \\ \frac{\partial u}{\partial Y} &= A_3 r + A_2 \end{aligned} \quad (\text{A13})$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_2 &\equiv (x_1 + x_2 - x_3 - x_4) / 4J \\ A_3 &\equiv (x_1 - x_2 + x_3 - x_4) / 4J \\ A_4 &\equiv (x_1 - x_2 - x_3 + x_4) / 4J \end{aligned}$$

같은 방법으로 변위 성분 v 와 w 의 편미분을 구하여 식 (A8)에 대입하면 변형 후의 절점좌표 값들로부터 Green-Lagrange 변형률 성분을 계산하는 식을 얻을 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} E_{XX} &= \frac{1}{2} \left[(A_3 s + A_4)^2 + (B_3 s + B_4)^2 + (C_3 s + C_4)^2 - 1 \right] \\ E_{YY} &= \frac{1}{2} \left[(A_3 r + A_2)^2 + (B_3 r + B_2)^2 + (C_3 r + C_2)^2 - 1 \right] \\ E_{XY} &= \frac{1}{2} \left[(A_3 r + A_2)(A_3 s + A_4) + (B_3 r + B_2)(B_3 s + B_4) \right. \\ &\quad \left. + (C_3 r + C_2)(C_3 s + C_4) \right] \end{aligned} \quad (\text{A14})$$

여기서

$$\begin{aligned} A_j &\equiv (x_1 - x_2 - x_3 - x_4 + 2x_j) / 4J \\ B_j &\equiv (y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + 2y_j) / 4J, \quad j = 2, 3, 4 \\ C_j &\equiv (z_1 - z_2 - z_3 - z_4 + 2z_j) / 4J \end{aligned}$$

Green-Lagrange 변형률 성분으로부터 주변형률과 부 변형률을 구하는 식의 유도 과정은 참고문헌^(4,13)과 같다.