

불규칙적인 격자망을 이용한 생체 연조직의 곡면변형률 측정

이준식* · 김기홍* · 김형종**†

* 강원대학교 대학원 융합시스템공학과, ** 강원대학교 기계의용공학과

Measurement of Surface Strain on Soft Biological Tissues Using Irregular Grid Pattern

Jun Sik Lee*, Ki Hong Kim* and Hyung Jong Kim**†

* Dept. of Convergence System Engineering, Graduate School, Kangwon Nat'l Univ.

** Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received February 26, 2013 ; Revised May 21, 2013 ; Accepted May 21, 2013)

Key Words: Surface Strain Measurement(곡면변형률 측정), Soft Biological Tissue(생체 연조직), Irregular Grid(불규칙적인 격자망), Swine Joint Capsule(돼지 관절막), Human Knee Skin(인체 무릎 피부)

초록: 본 연구에서는 광학적 방법으로 곡면변형률을 측정하고자 할 때, 소재 표면이 임의의 곡면이거나 요철이 많은 경우, 부식이나 오염으로 표면이 불량한 경우, 그리고 고무나 폼, 생체 조직 등과 같이 규칙적인 격자망을 인쇄하기 어려운 경우에도 적용할 수 있는 자동 곡면변형률 측정시스템 ‘ASIAS-bio’를 개발하였다. 이 시스템은 시편의 재질과 표면상태, 격자 패턴과 크기, 격자 마킹 방법, 변형 정도 등 측정 조건에 관계없이 사용이 가능한 것이 특징이다. 우선 그 신뢰성을 평가하기 위하여 금속판재 성형제품의 변형률 분포를 상용 장비로 측정한 결과와 비교하였다. 또한, 돼지 어깨 관절막, 인체 무릎 피부 등 연질 생체 조직의 변형 측정에 적용함으로써 본 시스템의 유용성을 확인하였다.

Abstract: In this study, an automatic surface-strain measurement system called “ASIAS-bio” has been developed. This system can be used even in cases in which it is very difficult to apply a regular grid pattern necessary for measuring surface-strain, such as curved or uneven surfaces; surfaces damaged by corrosion or contamination; or soft materials such as rubber, foam, and biological tissues. This system works independently of the measurement conditions including the material and its surface condition, grid pattern and size, grid marking method, and degree of deformation. A comparison between the strain distributions of the sheet metal parts measured by using this system and those obtained by a commercial system showed that this system was sufficiently reliable. In addition, the deformation of the swine joint capsule and human knee skin was measured by using this system to demonstrate its usefulness.

1. 서론

곡면변형률(surface strain)은 금속판재의 성형이나 플라스틱 재료의 블로성형(blow forming)에서와 같이 두께가 얇은 소재를 가공할 때 발생하는 면내변형률(in-plane strain)을 뜻하거나, 벌크(bulk) 소재를 성형할 때 표면에서 발생하는 변형률을 뜻한다. 일반적으로 곡면변형률은 소재 표면에 규칙적으로 표시한 격자 패턴의 변형 전·후 형상의 기하학적 차이를 다양한 방법으로 측정하고 일련의

데이터 처리과정을 통하여 계산하는데, 그 이론적 배경은 널리 알려져 있고 이미 상용화된 장비들도 있다.⁽¹⁻³⁾ 특히, 화상처리 기술을 바탕으로 하는 광학식 측정법은 최근 카메라 관련 장비의 급속한 발전에 힘입어 정확도와 신뢰성에 있어서 획기적인 진보를 보이고 있다.

광학식 측정 기술의 특성상 변형률 계산의 기준이 되는 점들 또는 선소(line element)들을 변형 전 소재의 표면에 표시해야 하는데, 이 작업에는 보통 일정한 크기와 모양의 규칙적인 격자 패턴을 인쇄하거나 부식시키는 방법을 사용한다. 그러나 소재 표면이 평면이나 원주면과 같은 단순한

† Corresponding Author, khjong@kangwon.ac.kr

©2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

형상이 아닌 임의의 곡면이거나 요철이 많은 경우, 부식이나 오염으로 표면이 불량한 경우, 또는 고무나 플라스틱, 생체 조직과 같은 연질 소재의 경우 등에는 규칙적인 격자망을 인쇄하는 데 어려움이 많다.

한편, 스프레이 같은 도구로 잉크를 분무하여 확률적 패턴 인식(stochastic pattern recognition) 방법으로 변형 정보를 계산하는 광학식 3차원 변형 분석시스템도 이미 상용화되어 있으며,⁽⁴⁾ 비교적 높은 정확도와 해상도를 가지고 있어 규칙적인 격자망을 인쇄하기 어려운 재료에도 활용이 가능한 경우가 많다. 그러나 장기, 피부, 근육, 관절막 등 생체 연조직(soft tissue)과 같이 표면 접촉이 어려운 재료나, 고온 환경 또는 대변형으로 인하여 도포한 패턴이 박리되는 경우에는 여전히 적용이 어려울 뿐만 아니라, 변형 도중 패턴의 추적이 가능한 범위 내에서 점진적이고 연속적인 측정이 반드시 필요하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 측정 대상의 형상과 표면상태, 재료, 격자망 형태 등에 대해 자유로운 ‘ASIAS-bio’ 시스템을 개발하였다. 먼저 본 시스템의 정확성과 신뢰성을 검증하기 위하여 고가의 상용 장비인 ARGUS⁽²⁾로 동일한 대상을 측정한 결과와 비교하였다. 또한, 돼지 어깨 관절막, 인체 무릎 피부 등 연질 생체 조직의 변형을 측정에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

2. ASIAS-bio 시스템

2.1 격자점 인쇄

Fig. 1은 곡면변형을 측정에 많이 사용되는 격자망 패턴들을 보여준다. 변형 전 소재 표면에 정사각형, 원 또는 점 모양의 격자를 인쇄하거나 부식시키는 방법에는 전기-화학적(electro-chemical) 방법, 광-화학적(photo-chemical) 방법, 실크스크린(silk-screen) 방법 등 여러 가지가 있다.

ASIAS-bio 시스템에서는 이러한 규칙적인 격자 패턴과 인쇄 방법을 적용하기 어려운 경우에도 불규칙적인 격자망을 사용하여 측정이 가능하도록 하였다. 여기서 불규칙적인 격자망이라 함은 표점 간의 거리가 불균일하지만 패턴이 구조적인(structured) 격자망과 패턴 자체가 비구조적인(unstructured) 격자망을 모두 포함하나, 편의상 전자를 선택하는 경우가 많다. 측정대상의 크기, 해상도, 표면 상태 등을 고려하여 보통 지름 1 mm 내외의 점들을 2~10 mm 간격으로 시편 표면에 표

시하나, 측정 대상이 클 때는 지름과 간격을 더 크게 할 수도 있다. Fig. 2는 규칙적인 격자망의 인쇄가 어려운 몇 가지 재료에 불규칙적으로 정렬된 격자점들을 유성 펜 또는 수술용 펜으로 직접 표시한 사례를 나타내었다.

2.2 화상 처리 및 요소망 구성

수동으로 표시한 격자점들은 크기와 모양, 간격이 일정하지 않으므로, Fig. 3에 나타난 과정과 같이 원시 화상으로부터 각 격자점을 포함하는 직사각형 영역에 대한 이치화(thresholding) 처리를 거쳐 그 격자점의 도심(centroid)을 구하고, 이들을 절점으로 하는 사각형(또는 삼각형) 요소망을 구성한다. 단계 (1)은 측정 영역과 카메라 보정용 격자판을 함께 촬영한 원본 이미지이며, (2)는 도심을 구하기 위하여 각 격자점의 영역을 표시한 것이다. (3)은 격자점 영역에서 도심을 구한 이미지, 그리고 (4)는 이 도심들을 이어 요소망을 구성한 이미지를 나타낸다. 특히, 보정 격자는 화소 미만(sub-pixel) 단위까지 좌표를 측정함으로써 카메라 보정(camera calibration)의 정확도를 극대화하였다.

2.3 3차원 좌표 측정

스테레오비전 기술로 3차원 좌표를 계산하기 위해서는 측정영역을 적어도 두 방향에서 촬영한 화상이 필요하다. 따라서 2.2절의 과정은 변형 전·후에 각각 좌·우 두 방향으로부터 촬영한 모든 원시 화상에 대하여 실시한다.

이제 Fig. 4와 같이 좌·우 화상의 동일한 절점들을 정합(corresponding)시킨 후 카메라 보정 과정을 거치면 절점들의 3차원 좌표를 계산할 수 있다.

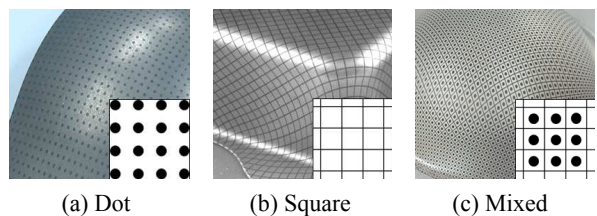


Fig. 1 Regular grid patterns being frequently used

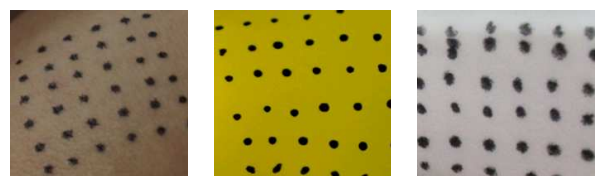


Fig. 2 Samples of irregular structured grid patterns

카메라 보정은 렌즈의 초점거리나 왜곡계수 등 카메라 고유의 광학적 특성과, 절대좌표계와 화상 좌표계와의 기하학적 관계를 구하기 위한 절차로, 3차원 좌표를 알고 있는 복수(보통 수십 개)의 점이 표시된 보정판을 사용하여 수행하는 것이 보통이다. 이에 관한 상세한 내용은 저자들의 선행 연구에 기술되어 있다.⁽⁵⁾

이 과정을 거쳐 생성한 요소망은 필요한 경우 Fig. 5와 같이 인접한 부분들과 하나의 영역으로 합체(assembly) 할 수도 있다.

2.4 곡면변형률 계산

앞에서 기술한 방법으로 절점들의 3차원 좌표를 측정 후 대변형 이론에 따른 연산 과정을 통하여 곡면변형률을 계산한다.⁽⁶⁾ 곡면변형률을 측정할 때 3차원 공간 상에서 사각형 요소는 평면이 아닌 비틀린 면 요소로 존재할 확률이 크므로 이러한 문제점을 간단히 해결하기 위해 ASIAs-bio 시스템에서는 Fig. 6(a)와 같이 사각형 요소를 2 개의 균일변형률삼각형(constant strain

triangle) 요소로 분할하여 처리하였다. 사각형의 대각선을 기준으로 2 개의 삼각형으로 분할하는 방법은 2 가지 선택이 가능하나, 대각선 분할 방향에 따라 변형률 분포에 다소의 차이가 나타날 수 있다. 본 연구에서는 이러한 방향성을 제거하기 위하여 두 대각선을 기준으로 분할된 총 4 개의 삼각형에 대하여 각각 변형률을 계산하고, 그 면적가중(area-weighted) 평균값을 그 사각형의 도심에 부여하였다.

Fig. 6(b)와 같이 3차원 공간 X-Y-Z 상의 한 삼각형 요소 $\triangle OAB$ 가 $\triangle O'A'B'$ 으로 변형되었다고 할 때, 변형 전·후에 각각 삼각형의 세 꼭지점의 3차원 좌표로부터 세 변의 길이를 계산함으로써 삼각형과 동일한 2차원 평면 x-y 상으로 손쉽게 좌표계 변환을 취할 수 있다. Fig. 6(c)는 이 변환을 나타내는 개념도이며, 임의로 선택한 한 변 OA를 x 축 상에 두고 꼭지점 B를 제1 또는 제2 사분면에 위치하도록 한 것이다. 이 변환은 순수한 강체회전(rigid body rotation)이므로 변형률에는 영향을 미치지 않는다. 이 때 x-y 평면상의 점 $B(x,y)$ 와 $B'(x',y')$ 의 좌표는 다음과 같다.

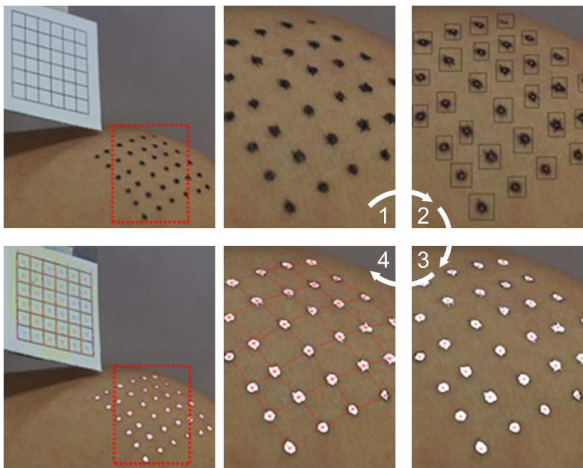
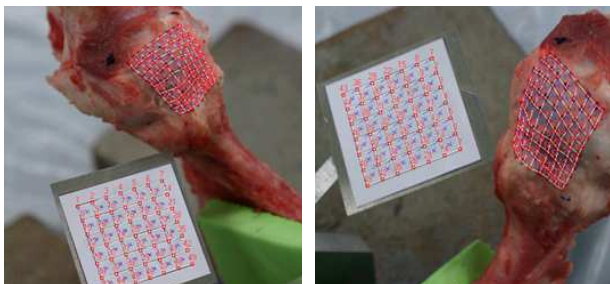


Fig. 3 Procedure of the image processing and mesh construction



(a) Left image (b) Right image

Fig. 4 Image correspondence from two views

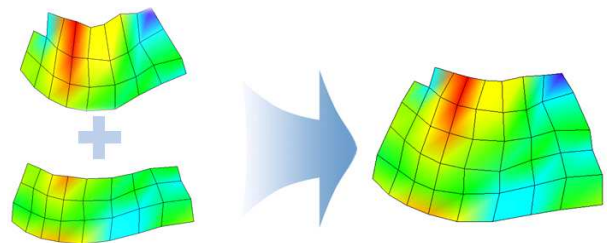
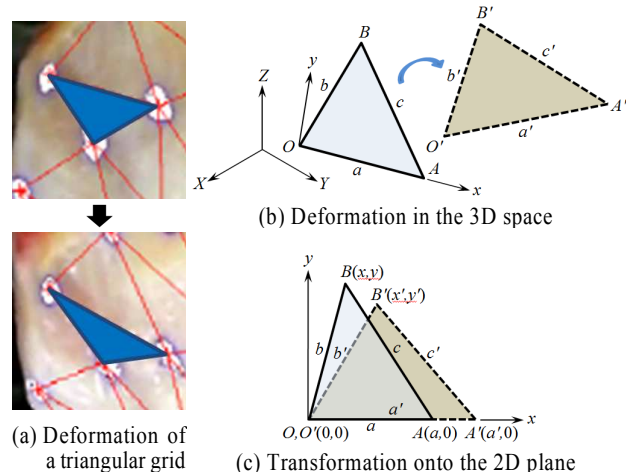


Fig. 5 Geometry assembling of adjacent areas



(a) Deformation of a triangular grid

(b) Deformation in the 3D space

(c) Transformation onto the 2D plane

Fig. 6 Coordinate transformation of a triangular grid from the 3D space onto the 2D plane

$$\begin{aligned} x &= \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2a}, & y &= \sqrt{b^2 - x^2} > 0 \\ x' &= \frac{a'^2 + b'^2 - c'^2}{2a'}, & y' &= \sqrt{b'^2 - x'^2} > 0 \end{aligned} \quad (1)$$

대변형 문제에 흔히 사용되는 Green-Lagrange 변형률텐서 \mathbf{E} 는 변형구배텐서(deformation gradient tensor) \mathbf{F} 로부터 얻어진다. 즉,

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{F}^T \mathbf{F} - \mathbf{I}) \quad (2)$$

여기서 \mathbf{I} 는 항등텐서(identity tensor)이다.

Fig. 6(c)에서 2개의 선소(line element) 벡터 $\overline{OA} = (a, 0)$ 와 $\overline{OB} = (x, y)$ 가 각각 $\overline{OA'} = (a', 0)$ 와 $\overline{OB'} = (x', y')$ 으로 변형되었다고 할 때, 변형구배텐서 \mathbf{F} 는 이들 사이의 기하학적 관계로부터 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a' & x' \\ 0 & y' \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} a & x \\ 0 & y \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} a' & x' \\ 0 & y' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & x \\ 0 & y \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{a'}{a} & \frac{ax' - a'x}{ay} \\ 0 & \frac{y'}{y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하면 변형률텐서 \mathbf{E} 의 성분들은 다음과 같이 삼각형 요소의 변 길이와 꼭지점 좌표로 표시된다.

$$\begin{aligned} E_{xx} &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a'}{a} \right)^2 - 1 \right] \\ E_{yy} &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{ax' - a'x}{ay} \right)^2 + \left(\frac{y'}{y} \right)^2 - 1 \right] \\ E_{xy} &= E_{yx} = \frac{1}{2} \left[\frac{a'}{a} \left(\frac{ax' - a'x}{ay} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

주변형률과 부변형률은 변형률텐서의 변환법칙에 따라 식 (6)으로 구해지며, 이들을 다시 진변형률로 표시하면 식 (7)과 같다.

$$E_1 = \frac{E_x + E_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{E_x - E_y}{2} \right)^2 + E_{xy}^2} \quad (6)$$

$$E_2 = \frac{E_x + E_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{E_x - E_y}{2} \right)^2 + E_{xy}^2}$$

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2} \ln(2E_1 + 1) \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{2} \ln(2E_2 + 1)$$

ASIAS-bio 시스템의 검증과 활용을 기술한 다음의 두 장에서 주변형률은 모두 식 (7)의 진변형률로 나타내었다. Fig. 7은 곡면변형률 측정 과정 전체를 요약하여 나타낸 순서도이다.

3. ASIAS-bio의 검증

ASIAS-bio 시스템의 정확성과 신뢰성을 평가하고자 상용 시스템 ARGUS와 동일한 시편에 대해 측정된 결과를 비교하였다. ARGUS는 높은 정확도와 편의성을 갖춘 고가의 장비로, 정사각형 패턴으로 배열된 규칙적인 점 격자망만을 사용하며, 주로 판재성형 제품의 곡면변형률을 측정하는데 활용된다.⁽⁷⁾ ASIAS-bio 시스템의 신뢰성 검증을 위한 적절한 비교 대상으로 판단된다.

3.1 성형한계도 시험

Fig. 8의 사진과 같이 AZ31B 마그네슘 합금판재를 대상으로 성형한계도 시험을 실시하고 ARGUS와 ASIAS-Bio 시스템을 사용하여 변형률 분포를 측정 후, 변형이 크게 발생한 4군데의 위치에서 측정값을 비교하였다. 두 시스템으로 측정된 주변형률의 전체적인 분포 양상은 유사하게 나타났으며, Table 1에 나타낸 바와 같이 네 점에서의 측정값의 상대오차는 평균 3.3%, 최대 5.3% 정도로, 본 시스템의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

ASIAS-Bio는 2.4절에서 언급한 바와 같이 각 요소의 도심에서 하나의 변형률 값을 계산하며, 절점에서의 변형률은 그 절점을 둘러싸고 있는 주변 요소들의 변형률을 면적가중(area-weighted) 평균한 값으로 취한다. 이러한 요소 및 절점 변형률 계산 방법에서 두 시스템 간의 차이가 있을 수 있으며, 이는 결국 측정값의 편차를 유발하는 한 요인이 될 수 있다.

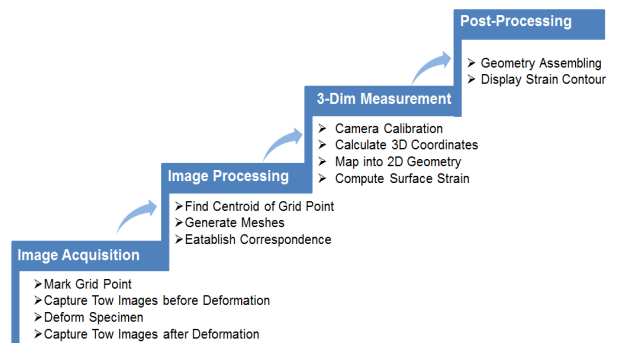


Fig. 7 Surface strain measuring procedure

3.2 원형컵 디프드로잉 성형

SGCD-1 강판에 ARGUS가 인식할 수 있는 규칙적인 점 패턴을 인쇄하여 지름 50 mm의 원형컵 디프드로잉 성형을 하였다. Fig. 9는 성형 후 ARGUS와 ASIAs-bio로 각각 측정한 주변형률 분포를 비교한 그림으로, 전체적인 분포 양상과 크기가 비교적 유사한 것을 보여준다.

4. ASIAs-bio의 활용

ASIAs-bio 시스템에 대한 신뢰성 검증을 바탕으로 돼지 견관절막과 인체 무릎 피부에 대한 변형률을 측정하였다. 서론에서 언급했듯이 장기, 피부, 근육, 관절막 등 생체 연조직은 규칙적인

Table 1 Comparison of major strains measured by ASIAs-bio with those measured by ARGUS

Location	Major Strain (True)		Relative Error (%)
	ARGUS	ASIAs-bio	
Point 1	0.525	0.537	2.3
Point 2	0.605	0.637	5.3
Point 3	0.595	0.617	3.7
Point 4	0.575	0.587	2.1
Average			3.3

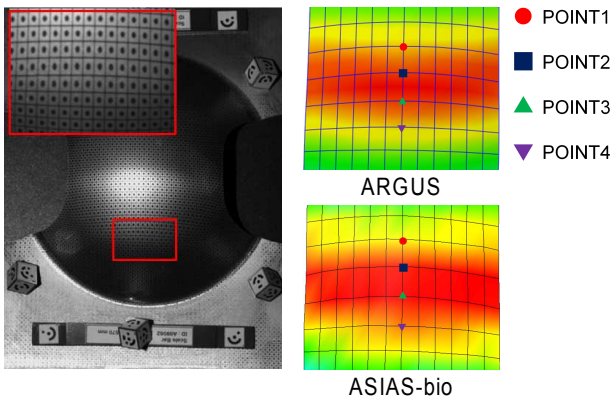


Fig. 8 Major strain of a stretch-formed Mg alloy sheet measured by ARGUS and ASIAs-bio

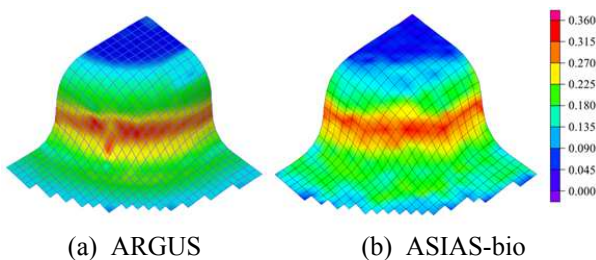


Fig. 9 Major strain of a deep-drawn steel part measured by ARGUS and ASIAs-bio

격자망을 인쇄할 수 없기 때문에 변형률 측정값을 비교·검증할 다른 장비나 방법을 찾을 수 없었다.

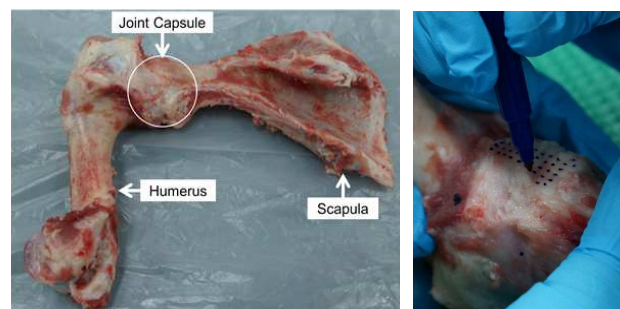
4.1 돼지 견관절막 변형 측정

체중 등 여러 가지 면에서 인체와 가장 유사한 특성을 가지고 있는⁽⁸⁾ 돼지 사체의 앞다리 어깨 부위를 해부하여 근육과 힘줄, 인대 등을 제거한 후, 견갑골(scapula)을 전용 고정 지그에 장착하고 상완골(humerus)에 운동에 따른 관절막(joint capsule)의 변형을 측정하여 생역학적 연구에 필요한 데이터를 얻고자 하였다. Table 2는 시험에 사용된 돼지 사체의 정보를 나타내며, Fig. 10(a), (b)는 각각 해부된 견관절부 검체의 모습과 관절막 부위에 수술용 펜으로 격자를 마킹하는 장면이다. 돼지 관절막의 크기, 표면 상태, 마킹 펜(수술용)의 굵기, 측정 해상도 등을 고려하여 지름 1 mm 정도의 점들을 2~3 mm 간격으로 9×9 개 마킹하였다.

실험대에 견고하게 설치된 지그에 견갑골을 볼트로 고정하고, 상완골의 운동 전 중립위치(neutral position)로부터 0~30°의 굴곡운동 범위에서 관절을 감싸고 있는 관절막의 후방(posterior) 영역을 측정하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 운동(변형) 전·후에 각각 좌·우 두 방향에서 보정판과 함께 촬영한 화상을 얻은 후, 앞서 설명한 절차에 따라 곡면변형률을 계산하였다.

Table 2 Information of the swine carrion

Age	12 months
Sex	female
Weight	94 kgf
Diagnosis	none



(a) Shoulder joint anatomy (b) Grid marking

Fig. 10 Photographs of a swine test specimen and grid marking

Fig. 12는 최종적으로 구해진 주변형률의 분포를 원시 화상 위에 겹쳐 나타낸 것이다. 그림 왼쪽 중앙 부근에서 0.4에 가까운 최대값을 보이고 있다.

4.2 인체 무릎 피부 변형 측정

피부 변형을 측정하여 활용하는 분야는 의학, 미용, 애니메이션뿐만 아니라 의복이나 용품 디자인 영역까지 폭넓게 확산되고 있다. 피부 변형에 대한 올바른 이해는 인체의 해부학적 지식과 인

체의 운동에 대한 역학적 지식을 필요로 한다. 특히, 헬스케어나 경기력 향상을 위한 생체신호 모니터링 의복과 질환치료나 근육보강을 위한 압박복 등 기능성 의복의 디자인에는 피부와의 밀착성을 좌우하는 인체의 형상 특징과 움직임에 따른 피부 변형 특성의 3차원적 분석이 더욱 요구된다. 그러나 이 분야에서의 변형률 측정기술은 대부분 2차원 패턴 설계를 목적으로 연구되고 있으며, 피부에 원형 도장을 찍은 후 3차원 스캐닝을 통하여 변형을 계산하는, 원형격자해석(circle grid analysis)과 유사한 방식을 사용하므로 변형률의 분포를 측정하는 데는 어려움이 있다.⁹⁾

본 연구에서는 ASIAs-bio를 사용하여 20대 남자(키 174 cm, 몸무게 75 kg)의 무릎 부위 피부 변형을 측정하였다. Fig. 13과 같이 무릎을 완전히 편 자세를 기준 상태(0°)로 하여 4~5 mm 간격으로 7×8 개의 점을 점선 원으로 표시한 영역에 마킹한 후, 45°, 90° 및 135°의 3 단계로 무릎을 구부렸을 때 각각 변형률 분포를 측정하였다.

Fig. 14는 주변형률의 분포를 실물 사진에 겹쳐 나타낸 그림으로, 구부림 각도에 따라 변형 부위의 위치와 정도가 약간씩 달라지며, 45° 이상 구부렸을 때 측정 영역의 중심부 근처에서 최대 주변형률 값이 0.7을 약간 상회하는 것을 보여주고 있다.

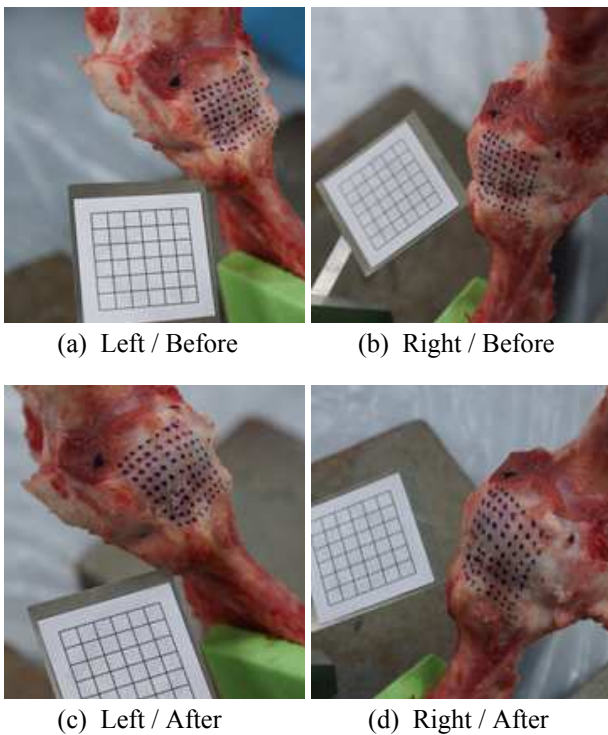


Fig. 11 Original left and right images before and after deformation

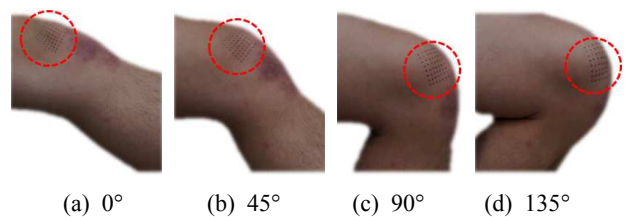


Fig. 13 Deformation of skin due to knee bending

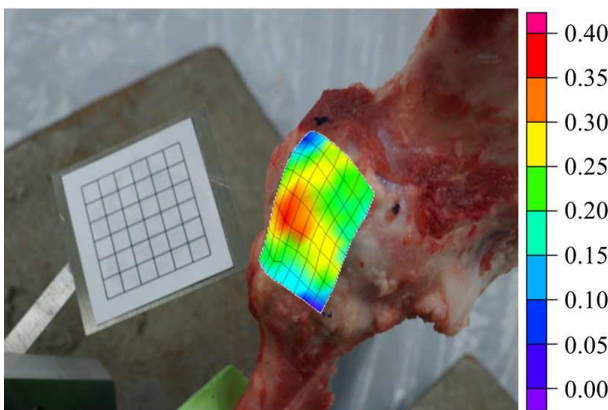


Fig. 12 Major strain distribution on the swine joint capsule measured by ASIAs-bio

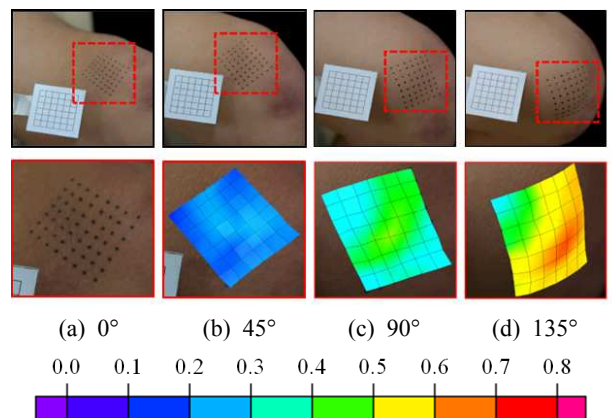


Fig. 14 Distribution of major strain on knee skin

4. 결 론

본 연구에서는 컴퓨터 비전 기술을 응용한 변형률 측정방식에서 규칙적인 격자망을 인쇄(또는 도포)하기 어려운 경우에도 적용할 수 있는 자동 변형률측정시스템 'ASIAS-bio'를 개발하고, 판재성형 제품과 생체 연부조직의 변형률 측정에 적용함으로써 그 신뢰성과 효율성을 검증하였다. 개발한 시스템은 시편의 재질과 표면상태, 격자 패턴과 크기, 격자 인쇄(마킹) 재료, 변형 정도 등 조건에 제한이 없다는 것이 가장 큰 장점이라 할 수 있다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 불규칙적으로 배열된 점들의 도심을 절점으로 하는 삼각형 요소망을 구성하고, 스테레오 비전 및 카메라 보정 기술을 응용하여 변형 전·후 절점들의 3차원 좌표를 측정 후 2차원 평면으로 변환함으로써 간단히 곡면변형률을 계산하는 알고리즘을 개발·적용하였다.

(2) 고가의 상용 장비로 측정한 결과와의 비교를 통하여 개발된 시스템의 정확성과 신뢰도를 검증하였다.

(3) 개발된 시스템은 시편의 재질과 표면상태, 격자 패턴과 크기, 격자 마킹 재료, 변형 정도 등 모든 조건에 대해 제한이 없어 표면형상이 임의의 곡면인 경우나 부식 또는 오염으로 표면이 불량한 경우 등에도 적용이 가능하다.

(4) 인체와 비슷한 성질을 가지고 있는 돼지 어깨의 관절막과 인체 무릎의 변형을 측정하는데 적용하여 본 시스템의 유용성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아

수행된 연구임 (No. 2009-0087787).

참고문헌

- (1) ASAME, ASAME Technology LLC, <http://asametech.com>.
- (2) ARGUS, GOM mbH., <http://www.gom.com>.
- (3) Grid Analyzer, FMTI Systems, Inc., <http://www.fmtisystems.com>.
- (4) ARAMIS, GOM mbH., <http://www.gom.com>.
- (5) Kim, H. J., Kim, D. S. and Kim, H. Y., 2000, "Improvement of the Stereo Vision-Based Surface-Strain Measurement System for Large Stamped Part," *Trans. Materials Processing*, Vol. 9, No. 4, pp. 404~412.
- (6) Kim, H. J., Lee, M. G., Kim, G. H. and Choi, J. H., 2011, "Non-Contact Type 3-D Measuring Method and Surface Strain Measurement Method Using the Same," *Korean Intellectual Property Office*, Application No. 10-2011-0073281.
- (7) Seo, Y., Hyun, H. C., Lee, H. and Kim, N., 2011, "Forming Limit Diagrams of Zircaloy-4 and Zirlo Sheets for Stamping of Spacer Grids of Nuclear Fuel Rods," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 8, pp. 889~897.
- (8) MacKenzie, D. A., Hullett, D. A. and Sollinger, H. W., 2003, "Xenogeneic Transplantation of Porcine Islets: an Overview," *Transplantation*, Vol. 76, No. 6, pp. 887~891.
- (9) Park, H. J., Wo, Y. J. and Hong, K. H., 2010, "3D Measurement of Skin Deformation for the Design of a Tight-fitting Torso Pattern," *Journal of Korean Society of Clothing and Textiles*, Vol 34, No. 11, pp. 1824~1835.