

## 평면이방성을 고려한 사각엠보싱 공정의 미세면굴곡에 대한 연구

김진학<sup>1</sup> · 정완진<sup>#</sup>

### A Study on the Surface Deflection in Rectangular Embossing Considering Planar Anisotropy

J. H. Kim, W. J. Chung

(Received July 3, 2013 / Revised August 22, 2013 / Accepted September 3, 2013)

#### Abstract

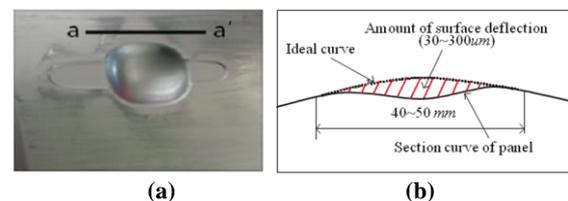
Recently, numerical predictions of surface deflection based on curvature analysis have been developed. In the current study, a measure of surface deflection is proposed as the maximum variation of curvature difference between the panel and the tool in order to account for surfaces that have high curvature. The current study focused on the assessment of accuracy for the surface deflection prediction with the consideration of planar anisotropy. As an example, a shallow rectangular drawn part with rectangular embossing was considered. In terms of the proposed surface deflection measure, the maximum variation of curvature difference, the prediction with a planar anisotropic model shows better correspondence with experiment than the one using a normal anisotropic model.

**Key Words** : Surface Deflection, Curvature Analysis, Embossing Process, Planar Anisotropy

#### 1. 서 론

최근 혁신적인 외관 디자인에 대한 선호도 증가와 함께 차량 경량화를 위한 고강도강판의 사용 증가에 따라 차체 외관 품질문제가 심화되고 있다. 이에 따라 미세면굴곡 문제를 해결하는 것이 중요한 기술과제로 인식되고 있다.

미세면굴곡이란 Fig. 1(a)와 같이 차체 외관 도어 핸들부 주위와 같은 외관의 형상 급변부에서 주로 발생하며, Fig. 1(b)와 같이 실제 단면 곡선과 이상 곡선의 오목볼록의 낙차가  $\pm 30 \sim 300 \mu m$  정도인 미세한 주름을 말한다. 미세면굴곡 현상의 발생 메커니즘을 이해하고 대책기술을 확립하기 위해서는 굴곡의 정도를 정량적으로 평가하는 것이 선행되어야



**Fig. 1 (a) Experimental panel containing surface deflections (b) definition of surface deflection**

하나, 크기가 매우 작기 때문에 어려움이 있다.

지금까지 미세면굴곡 측정은 연마 스톨에 의한 스크래치 검사, 스킨면 문지르기, 빛의 난반사를 통한 굴곡평가 등이 있다[1]. 이러한 검사방법은 측정자의 감각에 의존하는 만큼 사람에 따라 차이가 발생하며, 정량적으로 평가하는 것 또한 어렵다.

1. 서울과학기술대학교 일반대학원 제품설계금형공학과  
# Corresponding Author : Dept. Mechanical System Design Engineering,  
Seoul National University of Science & Technology,  
E-mail : wjchung@seoultech.ac.kr

현재까지 미세면굴곡의 발생 메커니즘을 설명하기 위한 연구들이 수행되어 왔다. Yoshida 등[2]은 차체 외판 도어 핸들부 형상을 단순화한 시험용 금형을 제작하여 프레스 성형 시 인장응력과 수직방향의 부가 인장응력이 미세면굴곡 발생에 미치는 영향을 연구하였다. Matsui 등[3]은 요시다 버클링 시험을 통하여 판재에 다축인장 및 이축인장의 외력조건을 부가하였을 때 발생하는 미세면굴곡의 거동을 연구하였다. Liu 등[4]은 광학적 반사기법을 이용하여 차체 외판에 발생하는 미세면굴곡을 측정하였다. Zhenzhong 등[5]은 성형된 판넬과 금형면 사이의 곡률차이를 제공한 결과가 미세면굴곡의 발생크기와 잘 대응된다는 사실을 실험을 통하여 증명하였다. Sawata 등[6]은 유한요소법을 적용하여 차체 외판 도어 핸들부에서 발생하는 미세면굴곡을 예측하였으며, Anderson 등[7]은 동적 외연적 유한요소법을 적용하여 이중 곡률을 가지는 판넬에서 발생하는 미세면굴곡을 성형 해석 및 스프링백 해석을 통하여 예측하였다. Park 등[8]은 미세면굴곡을 수치해석적으로 시뮬레이션 하기 위한 방법론과 이를 정량화하는 연구를 수행하였다. 최근 Chung 등[9]은 수직이방성을 고려한 곡률에 의한 미세면굴곡 평가시스템을 개발하였으며, 실험을 통해 곡률분석기법의 평가 가능성을 확인하였다. 그리고 Kim 등[11]은 사각엠보싱 공정에서 발생하는 미세면굴곡에 대하여 곡률에 의한 미세면굴곡 평가시스템을 활용하여 요소 모델에 따른 판넬의 곡률변화를 가시화하였으며, 실험과 비교하여 곡률평가의 정확성을 검증하였다.

본 연구에서는 사각엠보싱 공정에서 발생하는 미세면굴곡에 대하여 평면이방성을 고려하여 성형 해석 및 스프링백 해석을 수행하였다. 스프링백 해석 결과를 곡률분석 평가시스템에 적용하여 판넬의 곡률변화를 가시화하였으며, 그 결과를 기존에 수행한 연구에서 수직이방성 모델의 해석 결과 및 실험 결과와 비교하여 평면이방성 모델의 적합성을 분석하였다.

## 2. 곡률분석에 의한 미세면굴곡 평가

성형된 판넬의 곡률차이는 관능(시각)평가치와 좋은 상관관계를 가지고 있다고 알려져 있다[1]. 하지만 이러한 결과는 판넬의 곡률변화만을 고려하기 때문에 판넬의 곡률이 매우 작은 평면에 가까운 상

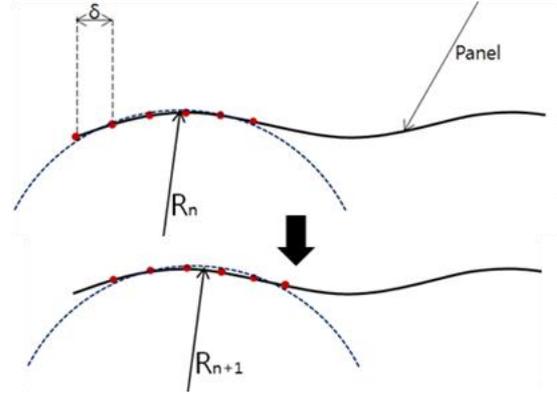


Fig. 2 Procedure to calculate a curvature

황에서만 유효하다.

이전 연구에서 곡률을 정량적으로 평가하기 위해 곡률차이에 의한 평가 방법이 제안되었다[9]. 이 방법은 스프링백 후의 금형과 판넬의 곡률 차이로 정의되며, 이 때 금형은 CAD 데이터에 근거하여 가공되기 때문에 곡률의 변화가 크지 않으므로 미세면굴곡이 없는 곡면이라고 근사적으로 가정할 수 있다.

곡률분석에 의한 미세면굴곡 예측 절차는 다음과 같다. 먼저 미세면굴곡이 예상되는 영역을 선정하고, 금형과 판넬로부터 미세면굴곡 측정 방향과 평행한 단면들을 추출한다. 다음으로 최소제곱법을 이용하여 금형과 판넬의 곡률을 계산하고, 가시화한다.

곡률은 Fig. 2와 같이 최소자승원을 구하여 계산된다. 최소자승원은 최소제곱법을 이용하여 각각의 샘플로부터 원을 추정하고, 모든 샘플에 부합하는 원을 찾는다.  $s(x_i, z_i)$ 는 원을 찾기 위한 샘플의 좌표로서 원을 추정하는데 활용된다.  $(a, b)$ 는 원의 중심이 되고,  $r$ 은 원의 반지름이 된다.

판넬의 임의의 한 단면에서 곡률반경을 순차적으로 계산하는 식은 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(a, b, r) = \sum_{i=1}^N ((x_i - a)^2 + (z_i - b)^2 - r^2)^2 \quad (1)$$

점간 거리와 스팬의 길이가 주어지면 측정점 전후로 1/2 스팬의 길이에 대해 등간격의 점간 거리 간격으로  $N$  개의 점을 배치하게 되고, 이 점들을 샘플로 사용하여 최소자승원에 의한 곡률반경을 계산하게 된다.

일반적으로 스팬이 길 경우 곡률 변화에 둔감한 경향을 보이고, 스팬이 짧을 경우 노이즈에 민감한 경향을 보인다.

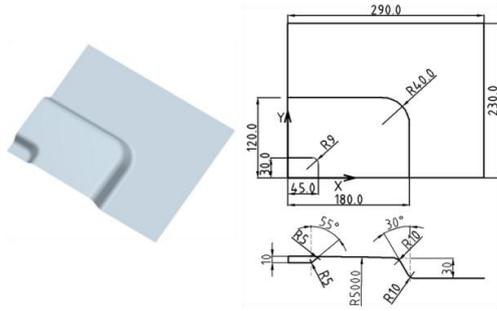


Fig. 3 A quarter geometry of a rectangular embossing

Table 1 Rankford value

| $r_0$ | $r_{45}$ | $r_{90}$ | $r_{avg}$ |
|-------|----------|----------|-----------|
| 1.86  | 1.15     | 2.28     | 1.61      |

### 3. 미세면굴곡 예측을 위한 유한요소해석

미세면굴곡 예측을 위한 실험 예제로 사각 엠보싱 모델을 고안하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 사각엠보싱 모델의 1/4 형상이다. 드로잉 깊이는 30mm 이고, 내측 엠보싱 깊이는 10mm이다. 내측 엠보스 코너 반경은 9mm이며, 구배각은 55°이다. 수평 방향으로 5000mm의 곡률 반경을 가지며, 수직 방향으로 그에 상응하는 곡률 반경을 가진다.

성형 해석 및 스프링백 해석에 LS-DYNA3D를 사용하였으며 해석의 정확도를 향상시키기 위해 두께 방향의 적분점은 11개를 사용하였다. 마찰 계수는 0.125를 적용하였으며, 블랭크 홀딩력은 140TON을 적용하였다. 평면이방성을 고려하기 위해 Hill의 2차 항복 방정식을 사용하였으며, 등방 경화성 조건을 가정하였다. 사용된 소재는 SPRC340 0.7t이며, 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 663.46(0.015141 + \bar{\epsilon}_p)^{0.26628} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Table 1 에 수직이방성 모델과 평면이방성 모델의 이방성 계수를 나타내었다.

해석 수행 시 금형의 하강 속도가 중요하게 작용한다. 따라서 금형의 하강 속도(1000mm/s, 100mm/s) 변화에 따른 미세면굴곡의 변화를 알아보기 위해 실험을 수행하였다.

스프링백 해석 후의 판넬 형상에 대하여 곡률을 평가하였으며, 5.2절에서 선택한 10mm의 스팬을 기준으로 측정하였다. Fig. 4에 금형의 하강 속도에 따른

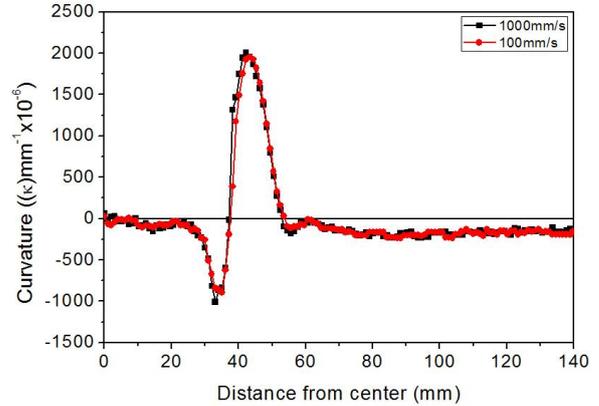


Fig. 4 Maximum curvature variation according to tool velocity

Table 2 Comparison of maximum curvature variation according to tool velocity (mm<sup>-1</sup>x10<sup>-6</sup>)

|           | Max. | Min.  | Variation |
|-----------|------|-------|-----------|
| 1000 mm/s | 2003 | -1011 | 3014      |
| 100 mm/s  | 1952 | -892  | 2844      |

최대 곡률변화량을 도시하였으며, Table 2에 곡률의 최대값, 최소값 및 최대변화량을 나타내었다. 최대 곡률변화량은 금형의 하강 속도가 1000mm/s에서 100mm/s로 변화할 때 5.6% 감소하였다.

금형의 하강 속도에 따른 해석시간은 큰 차이를 보였다. 해석시간은 금형의 하강 속도가 1000mm/s에서 100mm/s로 변화하였을 때 561.5% 상승하였다.

금형의 하강 속도 변화에 따른 최대 곡률변화량의 정확도 및 해석시간을 종합하여 본 연구에서는 1000mm/s를 미세면굴곡을 평가하기 위한 금형 하강 속도로 선정하였다. 해석은 쿼드코어 3.5GHz, 16GB 램의 사양을 가진 컴퓨터에서 수행되었다.

해석 수행 시 미세면굴곡 평가를 위한 금형과 판넬의 메쉬 사이즈 선정은 매우 중요하다. 금형의 CAD 모델은 기울기가 연속적이지만 메쉬로 변환하게 되면 이산화 과정에서 요소 사이에서 기울기가 불연속이 되며, 메쉬 사이즈가 커지면 기울기의 불연속이 더 커져서 해석결과에 나쁜 영향을 미치게 된다. 판넬의 메쉬 또한 미세면굴곡 해석결과에 큰 영향을 미친다. 따라서 톨 메쉬(4mm, 2mm, 1mm, 0.5mm) 및 블랭크 메쉬(2mm, 1mm, 0.5mm) 변화에 따른 미세면굴곡의 변화를 알아보기 위해 실험계획법에 의한 완전요인배치 실험을 수행하였다

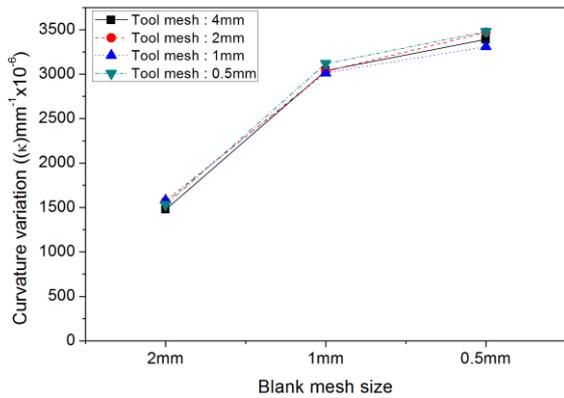


Fig. 5 Maximum curvature variation according to tool and blank mesh size

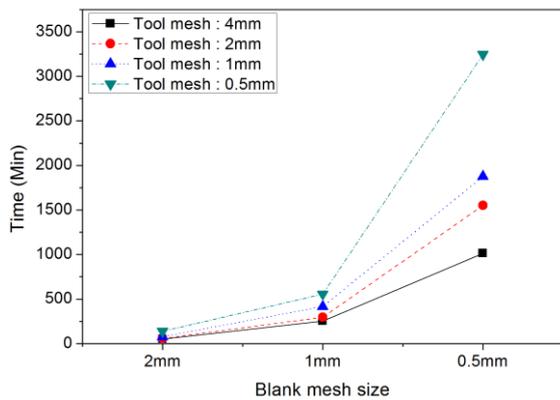


Fig. 6 Computation time according to tool and blank mesh size

스프링백 해석 후의 판넬 형상에 대하여 곡률을 평가하였으며, 5.2절에서 선택한 10mm의 스펠을 기준으로 측정하였다. Fig. 5에 툴 메쉬 크기와 블랭크 메쉬 크기에 따른 최대 곡률변화량을 나타내었다. 툴 메쉬의 크기는 최대 곡률변화량에 큰 영향을 미치지 않으나 블랭크 메쉬는 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 툴 메쉬가 1mm일 경우 최대 곡률변화량은 블랭크 메쉬가 2mm에서 1mm로 변화할 때 90.8% 급격히 상승하였으나 1mm에서 0.5mm로 변화할 때 12.7% 상승하여 상승 폭이 크게 감소하였다.

Fig. 6에 해석시간의 변화를 도시하였다. 해석 시간은 툴 메쉬가 1mm일 경우, 블랭크 메쉬가 2mm에서 1mm로 변화할 때 446.1% 증가하였고, 1mm에서 0.5mm로 변화하였을 경우에는 351.8% 증가하였다. 툴 메쉬 또한 해석시간에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.

메쉬 크기 변화에 따른 최대 곡률변화량의 정확도 및 해석시간을 종합하여 본 연구에서는 툴 메쉬 1mm, 블랭크 메쉬 1mm를 미세면굴곡을 평가하기 위한 메쉬 크기로 선정하였다.

#### 4. 사각엠보싱 실험

##### 4.1 사각엠보싱 금형 성형실험

Fig. 7은 실험을 위해 제작한 금형의 상형과 하형이다. 금형 가공시 수작업에 의한 오류를 최소화하기 위하여 CAM 가공단계에서 0.3mm의 tool pitch를 적용하였으며, 사상작업을 최소화하였다. 엠보스 부는 성형 시 진공 압착현상을 제거하기 위하여 에어홀을 가공하였으며, 소재의 밸런스를 조절하기 위해 맞춤핀을 설치하였다.

실험에 사용된 프레스는 유압으로 1000TON의 가압 능력을 가진다. 성형 시 블랭크 홀딩력은 공압으로 140TON을 적용하였으며, 블랭크 홀딩력은 쿠션핀에 의해 블랭크 홀더에 전달된다. Fig. 8은 프레스에 설치된 블랭크 홀더와 쿠션 핀의 모습이다.

실험에 사용된 판넬은 부식방지를 위한 적정량의 오일이 표면에 존재하기 때문에 그 이외의 특별한 윤활은 고려하지 않았다. Fig. 9은 성형 후의 블랭크이다.



(a) Upper die (b) Lower die

Fig. 7 Upper and lower die

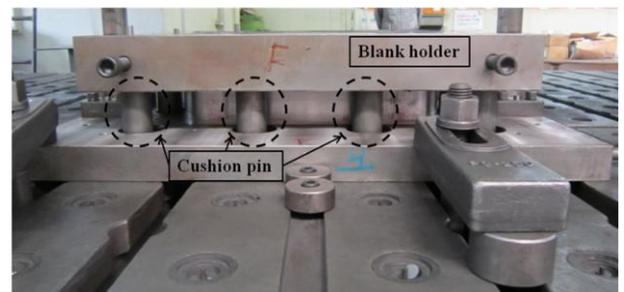


Fig. 8 Blank holder and cushion pin



Fig. 9 Blank after forming



Fig. 11 Measurement of blank shape by CMM

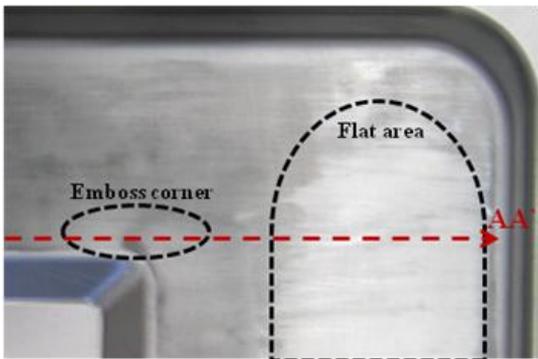


Fig.10 Scratched panel by stoning

4.2 미세면굴곡 발생 영역 평가

오일 스톤을 이용한 스크래치 검사를 통하여 미세면굴곡 발생 영역을 확인하였다. Fig. 10은 스크래치 후의 판넬로서, 미세면굴곡 발생 영역을 2개의 영역으로 구분하였다. 엠보싱코너 부위는 압축응력과 스프링백의 영향으로 볼록한 형태의 미세면굴곡이 나타나며, 장축방향의 평탄부위는 스프링백에 의한 면 처짐에 의해 오목한 형태의 미세면굴곡이 발생하게 된다.

4.3 미세면굴곡 평가를 위한 형상 측정

실험한 2장의 판넬과 금형에 대하여 1 $\mu$ m의 분해능을 가지는 CMM (Coordinate Measuring Machine) 3차원 측정기를 이용하여 미세면굴곡 발생부 표면의 좌표를 측정하였다. 내측 엠보스 원점을 기준으로 Fig. 10의  $y=35mm$ 인 AA' 단면과 상하 대칭을 고려하여  $y=-35mm$ 인 단면에 대하여 형상을 측정하였으며, 측정 결과를 이용하여 최대 곡률변화량을 계산하였다. Fig. 11은 CMM 3차원 측정기를 통하여 좌표를 측정하는 모습이다.

Table 3 Comparison of draw-in (mm)

|                          | X-axis | Y-axis |
|--------------------------|--------|--------|
| Normal anisotropic model | 7.89   | 11.08  |
| Planar anisotropic model | 7.57   | 11.39  |
| Experiment               | 5.35   | 13.05  |

5. 결과 및 고찰

5.1 소재 유입량 비교

수직이방성 모델과 평면이방성 모델 및 실험 블랭크의 소재 유입량을 Table 3에 나타내었다. 소재의 유입량이 최대한 해석과 실험이 일치하는 마찰계수를 선정하였으며 0.125의 마찰계수가 가장 부합하는 결과를 보였다. 이 때 해석과 실험의 최대 오차는 수직이방성 모델의 경우 1.97mm이고, 평면이방성 모델의 경우 1.66mm로, 평면이방성 모델이 실험과 더 근접하는 결과를 보인다.

5.2 스펬에 따른 최대 곡률변화량 비교

노이즈를 최소화하면서 최대 곡률변화량을 잘 포착할 수 있는 적절한 스펬을 설정하는 것이 중요하다. AA' 단면을 따라 스펬의 변화에 따른 평면이방성 모델을 이용한 해석결과의 최대 곡률변화량을 Fig. 12에 나타내었다.

5mm의 스펬을 적용할 경우 노이즈 발생 및 곡률이 과대 측정되는 결과가 나타났으며 20mm의 스펬을 적용할 경우에는 노이즈는 거의 없으나 곡률의 변화를 민감하게 감지하지 못한다. 본 연구에서는 10mm의 스펬을 해석과 실험의 비교분석에 활용하기로 하였다.

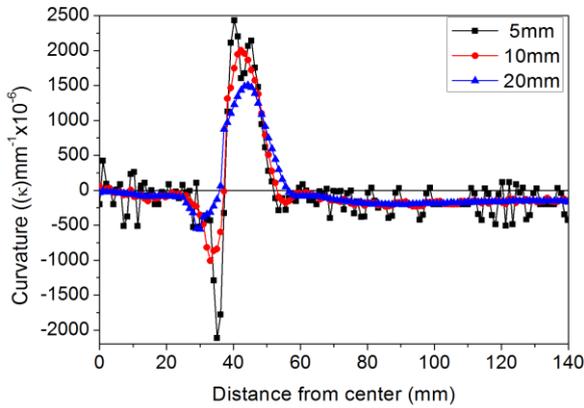


Fig.12 Comparison of curvature by planar anisotropic model according to span

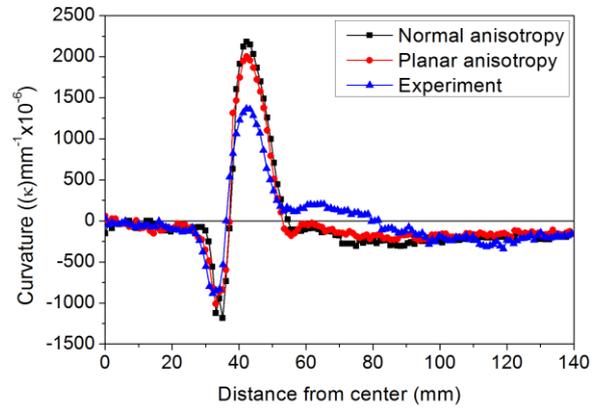
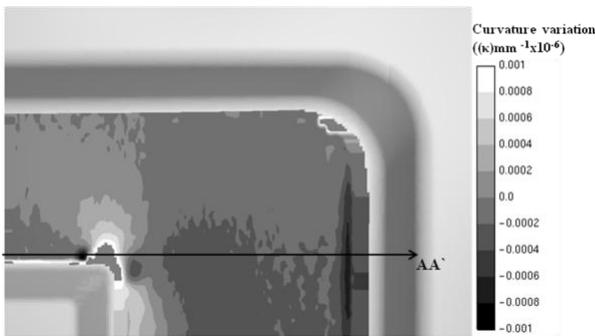
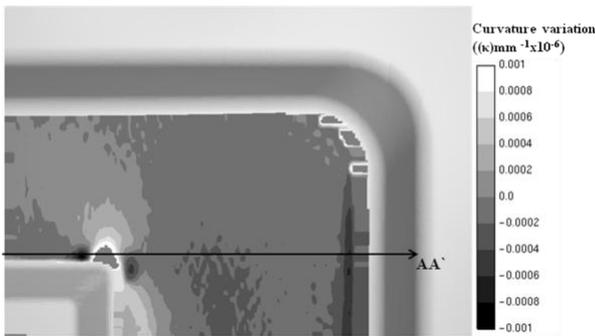


Fig.14 Comparison of curvature between analyses and experiment



(a) Normal anisotropic model



(b) Planar anisotropic model

Fig.13 Contour of maximum curvature variation between anisotropic models

5.3 최대 곡률변화량 비교

Fig. 13에서 해석 데이터의 최대 곡률변화량을 도시하였으며, Fig. 14에서 AA' 단면에서의 수직이방성 모델과 평면이방성에 따른 최대 곡률변화량을 실험결과와 비교하여 그래프로 나타내었다. 실험 및 해석 결과의 곡률 계산 시 10mm의 스패를 적용하였다.

평면이방성 모델의 경우 내측 엠보스 코너의 (-)

Table 4 Comparison of maximum curvature variation between analyses and experiment (mm<sup>-1</sup> × 10<sup>-6</sup>)

|                          | Max. | Min.  | Variation |
|--------------------------|------|-------|-----------|
| Normal anisotropic model | 2184 | -1185 | 3369      |
| Planar anisotropic model | 2003 | -1011 | 3014      |
| Experiment               | 1366 | -885  | 2251      |

곡률 값이 실험과 잘 일치하며, (+) 곡률 값은 차이를 보이고 있으나, 수직이방성 모델에 비하면 실험과의 차이가 작음을 알 수 있다. Table 4에 수직이방성 모델과 평면이방성 모델 및 실험 블랭크의 곡률의 최대값, 최소값 및 최대변화량을 비교하여 나타내었다.

6. 결론

본 연구에서는 곡률분석 기법을 활용한 미세면굴곡 평가시스템을 활용하여 사각엠보싱 공정에서 발생하는 미세면굴곡에 대하여 연구하였다. 평면이방성 모델을 고려한 해석을 수행하고 미세면굴곡 예측의 정확성에 대하여 수직이방성 모델 해석 결과 및 실험 결과와 비교분석하였다. 소재의 유입량과 미세면굴곡의 측정지표인 최대 곡률변화량의 측정에서 스패의 영향에 대하여 고찰하였다. 평면이방성 모델에 의한 예측이 소재 유입량 및 최대 곡률변화량의 측면에서 수직이방성 모델에 비해 실험과 더 부합하는 결과를 얻을 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- [1] K. Yoshida, 1993, Handbook of Ease or Difficulty in Press Forming, National Center for Manufacturing Science, Japan.
- [2] M. Yoshida, T. Shimomura, 1983, A Study of Surface Deflection Around the Handle Portion of an Automobile Door-Outer Panel Using a Model Die, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 24, No. 275, pp. 1260~1267.
- [3] M. Matsui, N. Iwata, 1983, Initiation and Growth of Buckles of Square Steel Sheets by Diagonal Biaxial Tension, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 24, No. 275, pp. 1268~1273.
- [4] L. Liu, T. Sawada, M. Sakamoto, 2000, Evaluation of the Surface Deflections in Pressed Automobile Panels by an Optical Reflection Method, J. Mater. Process. Technol., Vol. 103, No. 2, pp. 280~287.
- [5] S. Zhenzhong, Y. Yuying, 2006, A Study of Surface Deflection in Pressed Automobile Panels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 180, No. 1-3, pp. 53~59
- [6] T. Sawata, L. Liu, 1998, Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications, edited by J. Huetink, F. P. T. Baaijens, Balkema, pp. 863~868.
- [7] A. Anderson, 2005, Proc. NUMISHEET 2005.(eds, L. M. Smith, F. Pourboghra, J. W. Yoon, T. B. Stoughton), AIP, Detroit, Michigan, USA, Vol. A, pp. 113~118.
- [8] C. D. Park, W. J. Chung, B. M. Kim, 2007, A Numerical and Experimental Study of Surface Deflections in Automobile Panels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 187~188, pp. 99~102.
- [9] W. J. Chung, W. S. Kim, J. H. Kim, T. H. Seo, T. C. Jung, 2011, Proc. NUMISHEET 2011. (eds, K. Chung, H. N. Han, H. Huh, F. Barlat, M. G. Lee), AIP, Seoul, Korea, pp. 1072~1077.
- [10] C. O. Lee, K. S. Park, B. C. Park, Y. W. Lee, 2004, Algorithms for Stylus Instruments to Measure Aspheric Surfaces, Research Report Series, KAIST, Daejeon, Korea.
- [11] W. S. Kim, J. H. Kim, W. J. Chung, 2012, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., May, Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 278~280.