

자동차 외판의 미세면굴곡 거동의 수치해석적 평가

박춘달*, 정완진**, 김병민#

A Numerical and Experimental Study of Surface Deflections in Automobile Exterior Panels

Chun Dal Park*, Wan Jin Chung** and Byung Min Kim#

ABSTRACT

Surface deflections have a great effect on the external appearance of automobiles. Usually, they are occurred on large flat panels containing sudden shape changes and of very small size about $\pm 30\sim 300\mu\text{m}$. Since the current numerical method is not sufficient for predicting these defects, the correction of these defects still depends on trial and error, which requires a great deal of time and expense. Consequently, developing the numerical method to predict and prevent these defects is very important for improving cosmetic surface qualities. In this study, an evaluation system that can analyze surface deflections using numerical simulation and a visualization system are reported. To calculate the surface deflections numerically, robust algorithms and simulation methodologies are suggested and to visualize them quantitatively, the curvature variation algorithm is proposed. To verify the developed systems, the experimental die of the handle portion of exterior door is analyzed. The results showed that the experimental and simulational visualization are in good agreement. Compensation methods to correct the surface deflections are also tested. The evaluation system proposed in this paper could be used to predict and minimize the occurrence of surface deflections in die manufacturing.

Key Words : surface deflection(미세면굴곡), handle portion of exterior door panel(외판 도어 손잡이), springback simulation(스프링백 해석), visualization of surface deflection(미세면굴곡 가시화), curvature(곡률), scanned data(스캐닝 데이터)

1. 서론

최근 자동차의 성능과 더불어 외판 품질의 중요도가 점점 증가하고 있는 추세이다. 차체 외판 품질에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로는 미세면굴곡 불량이며, 이는 파단, 주름, 치수정도 불량

등과 함께 프레스 성형 부품에 있어서의 대표적인 불량 현상이다. 미세면굴곡이란 차체 외판 도어 자물쇠 고정 형상 주위와 같이 자동차 차체 외판의 형상 급변부에서 주로 발생하며 그 크기도 약 $\pm 30\sim 300\mu\text{m}$ 정도로 매우 작기 때문에 정량적으로 평가하기가 대단히 어렵다. Fig. 1 은 자동차 차

☞ 접수일: 2006 년 4 월 14 일; 게재승인일: 2006 년 7 월 11 일

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 서울산업대학교 금형설계학과

교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과

E-mail bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3074

체 외판 도어 자물쇠 고정 형상에서의 미세면굴곡을 나타내었다. 그리고 Fig. 2 는 굴곡의 발생 위치에 따른 분류를 나타내었다. Fig. 2 에서 알 수 있듯이 미세면굴곡은 주로 평탄한 영역에서 급격한 형상변화가 있을 경우에 발생한다.¹ 미세면굴곡이 가장 심각하게 발생하는 부위는 차체 외판 도어 자물쇠 고정 형상 주위이며 발생 원인으로서는 불규칙한 소재 유입에 따른 압축 응력의 발생, 성형 완료 후 형상 주위에서의 불규칙한 탄성 회복량 그리고 평탄부와 형상부의 강성 차이에 따른 성형 완료 후의 스프링백량의 차이 등에 의해 발생한다.²

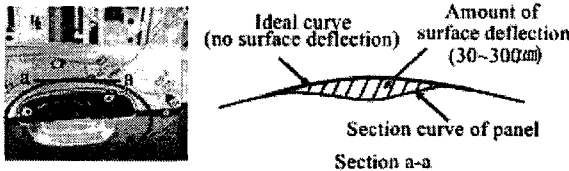
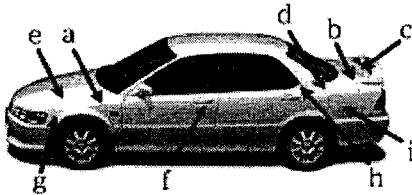


Fig. 1 An example of surface deflections around the handle portion of the exterior door panel



Classification	symbol	Location
flat area under punch	a	wheel arch
	b	trunk lid corner
	c	truunk lid character line
saddle type area	d	bottom of rear pillar in side panel
wall area	e	fender and roof
emossing area	f	handle area of door
	g	head lamp
	h	corner of window
bending area	i	fuel cover mounting area

Fig. 2 Classifications of surface deflections according to the shapes of the autobody panels

미세면굴곡 현상의 발생 메커니즘 및 대책기술의 확립을 용이하게 하기 위해서는 정량적 측정

및 평가 방법이 요구된다. 종래의 미세면굴곡의 평가는 주로 숙련된 검사자의 육안 검사에 의해 이루어져, 측정하는 사람에 따라 차이가 발생하는 문제와 이를 정량적으로 나타내는데 어려움이 있었다.

그리고 미세면굴곡은 발생 원인이 다양하고 측정이 어려운 특징 때문에 금형 제작 경험이 풍부한 숙련자라 할지라도 발생 여부를 사전에 예측하기는 대단히 어려우며, 또 일단 발생한 미세면굴곡에 대해서는 수정이 대단히 힘들다. 현실적으로 양산용 외판 금형 제작에 있어서 금형 품질 육성 기간의 50~60% 정도는 미세면굴곡 불량률 해결하는데 소요되고 있는 실정이다.

미세면굴곡 현상에 대한 이론적, 실험적 연구는 박판재 성형 연구자들에 의해서 많은 연구가 수행되었다. Yoshida M.² 등은 차체 외판 도어 자물쇠 고정 형상을 단순화시켜 모델화한 시험 금형을 제작하여, 성형시의 인장력 분포 및 부가 장력 적용 여부가 미세면굴곡에 미치는 영향을 실험하였다. Matsui M.³ 등은 요시다 버클링 테스트를 통하여 박판재에 대한 주름 발생과 성장의 거동을 연구하였다. 즉, 요시다 시험편에 단축인장, 크기가 다른 이축인장 등의 외력 조건을 부가하여 각각의 인장 조건에 따른 굴곡 거동을 평가하였다. 그리고 Usuda M.⁴ 등은 요시다 시험편 및 얇은 각형 금형을 이용하여 여러 가지 소재에 대한 미세면굴곡 발생 거동을 시험하였다. 또 Hayashi H.⁵ 는 알루미늄 강판을 이용한 차체 외판 도어 모델 성형을 통하여 블랭크 홀딩력 등의 성형인자가 미세면굴곡에 미치는 영향도를 평가하였다. 미세면굴곡의 가시화에 대한 연구로서는 Liu L.⁶ 등이 카메라를 이용한 광학적 방법으로 획득한 이미지를 평판에 전사시켜, 굴절된 형상으로부터 미세면굴곡을 가시화 하였다. 그러나, 이러한 대부분의 연구는 상사 모델을 통한 미세면굴곡 발생 거동을 연구한 것인데, 최근의 요구는 금형 제작 이전에 불량률의 정도를 예측하고, 대책을 강구함으로써 실제 금형에서의 불량률을 최소화하고, 고품질의 부품을 생산하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 미세면굴곡을 수치해석적 방법으로 시뮬레이션 하기 위한 방법론과 이를 가시화하기 위한 정량화 알고리즘에 대해 보고한다. 수치해석적 방법에 있어서는 스프링백 해석의 효율성을 향상시키기 위한 알고리즘을 제안하였으며, 정량화 방법으로는 곡률 변화를

추적하여 굴곡을 평가하는 방법을 제안하였다. 제안한 시스템의 신뢰성을 평가하기 위해 자동차 차체 외판 도어 금형을 이용하여 미세면굴곡 해석과 정량화를 실시하였고, 그 결과를 실험결과와 비교하였다.

그리고 미세면굴곡을 최소화하기 위한 방법으로서 예측된 굴곡량만큼을 역보정하여 최종적으로 면을 평탄화시키는 보정치 적용법을 시험하였다.

2. 미세면굴곡 정량화 시스템

최근의 박판 성형 해석 기술은 급속한 컴퓨터 성능의 향상에 힘입어 차체 프레스 부품 중에서 가장 크기가 큰 판넬 사이드 아우터도 실시간 내에 해석과 결과 검토가 가능하게 되었다. 그리고 각종 멤버류 등에서 가장 문제가 되는 스프링백 예측도 가능하여 금형 제작상의 중요한 프로세스로 자리 잡았다. 그러나 미세면굴곡 발생 여부를 해석적 방법으로 예측하기 위한 연구는 많지 않은데 그 이유는 미세면굴곡과 같은 복잡한 변형 형상에 대해, 성형과정과 후변형을 정확하게 계산하기 위한 알고리즘의 미흡과 미세면굴곡이 매우 작은 크기의 불량 현상으로서 실제 해석을 완료하고도 이를 정확하게 가시화 할 수 있는 후처리 방법이 개발되지 않았기 때문이다. 본 연구에서는 기존의 성형 해석 소프트웨어를 바탕으로 미세면 굴곡을 정확하게 계산할 수 있는 해석 알고리즘의 개발과 미세면굴곡을 정량적으로 분석할 수 있는 가시화 시스템을 개발하였다.

2.1 미세면굴곡 해석

미세면굴곡은 차체 외판 도어과 같이 강성이 비교적 약한 판넬에서 주로 발생하기 때문에 앞에서 말한 바와 같이 스프링백에 매우 민감하다. 따라서, 미세면굴곡을 정확히 예측하기 위해서는 스프링백 해석이 중요하다. 본 연구에서 사용된 셸 요소(shell element)는 Zhu⁷ 등에 의해 제안된 6 자유도 요소이며, 기본적으로 Belytschko 등이 제시한 수식에서 발전한 셸요소이다. 이 요소는 1 점 적분을 유지하면서도 면내 굽힘 등의 변형특성을 크게 향상시켜 스프링백 해석에 적합하며, 동일한 적분 점을 가지는 요소를 사용함으로써 성형해석과 스프링백 해석이 연속될 경우 오차를 최소화하면서 성형 해석을 수행할 수 있는 잇점이 있다.⁸

불안정성이 발생하면 선형화된 유한요소 방정식의 강성행렬은 한계점(limit point)에서 특이점(singularity)이 발생하여 Newton-Raphson 방법에 의한 해를 얻을 수 없다. 또, 박판재가 성형후 금형으로부터 취출되었을때 주름이 발생할 수 있으므로 이러한 현상을 스프링백 해석시 고려할 수 있어야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 호-길이방법(arc-length method)을 적용하였으며, 선형화된 평형방정식은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$g(P, \lambda) = \mathbf{q}_i(\mathbf{p}) - \lambda \mathbf{q}_{ef} = 0 \quad (1)$$

여기서, \mathbf{q}_i 는 변위 \mathbf{p} 의 함수인 내력, \mathbf{q}_{ef} 는 외력 벡터, 그리고 스칼라 λ 는 하중계수이다. 이를 증분식으로 다시 표현하면 아래와 같다.

$$(\Delta \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{p} + \Delta \lambda^2 \psi^2 \mathbf{q}_{ef}^T \mathbf{q}_{ef}) - \Delta l^2 = 0 \quad (2)$$

여기서, Δ 는 증분량을 나타낸다. 하중과 변위의 비를 나타내는 파라미터 ψ 를 정의하는 방법에 따라 호-길이 방법은 여러 가지로 변형될 수 있으며 본 연구에서는 일반화 변위법(generalized displacement method)을 적용하였다.

일반적으로 미세면굴곡은 비교적 크고 평탄한 형상에서 아주 미세한 변형으로 나타나기 때문에 굴곡이 예상되는 부위에 대해서는 이를 정확히 표현하기 위해 충분히 작은 크기로 유한요소 모델링을 하여야 한다. 미세면굴곡의 반주기(half wave length) 10mm 를 넘기 때문에 최종 블랭크의 요소 크기가 1mm 내외면 적당하다고 판단된다.

Table 1 Comparison of the conditions for the simulation of general forming and surface deflection of an exterior door panel

	No. of Element (Min. size)		Forming velocity(m/s)	
	Initial	Last	Holding	Forming
Forming analysis	17,552 (8mm)	108,590 (2mm)	2	10
Surface deflection analysis	73,696 (4mm)	220,180 (1mm)	1	2

Table 1 은 차체 외판 도어의 경우에 있어, 마

세면굴곡을 해석하기 위한 모델링 조건을 일반 포밍 해석의 경우와 비교하여 나타내었다.

해석과정은 포밍 해석과 스프링백 해석을 수행한 후, 미세면굴곡이 예상되는 영역을 선택하여 국부영역 스프링백 해석을 수행한다. 국부영역 스프링백 해석은 미세면굴곡을 정확히 해석하기 위해 미소하게 잔류하는 응력을 제거하기 위해 수행한다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 각각 해석 과정과 차체 외판 도어의 해석 예를 나타내고 있다.

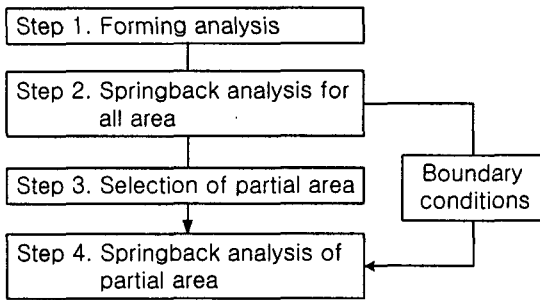


Fig. 3(a) Procedures of surface deflection analysis

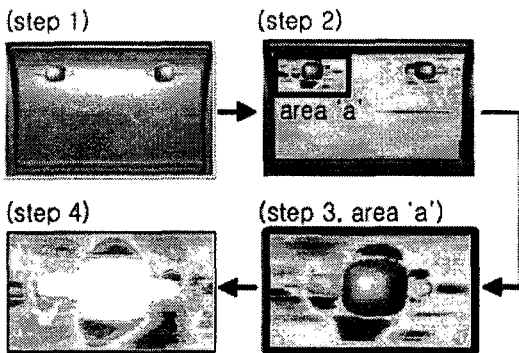


Fig. 3(b) Example of surface deflection analysis for automotive door panel

2.2 미세면굴곡 정량화 알고리즘

앞에서 언급하였듯이 미세면굴곡은 눈으로도 인식하기 어려울 정도로 그 양이 미소하다. 금형을 직접 제작하는 현장에서는 숙련자의 눈과 손으로 혹은 연마숫돌을 이용하여 표면에 스크래치를 발생시켜서 굴곡의 발생 유무 및 정도를 평가한다. Fig. 4는 자동차 차체 외판 도어 자물쇠 고정 형상 주위의 미세면굴곡을 평가하기 위해 연마숫돌을

이용하여 스크래치를 생성시킨 예이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 매우 작은 입사각을 통하여 판넬 표면으로 들어온 빛이 미세면굴곡 부위의 매우 작은 형상 차이에 의해 난반사하는 것을, 경험이 풍부한 숙련자가 판단하여 합격 여부를 판정하는 것이다. 이러한 육안 검사는 작업자의 숙련도 차이 및 정량화의 어려움 등의 문제점을 안고 있다.

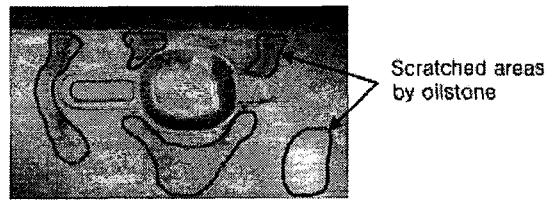


Fig. 4 Example of surface deflection scratched by ilstone for exterior door panel

미세면굴곡의 정량화를 위한 방법으로 곡률계를 이용한 단면 프로파일 분석법이 있다. 이 방법은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 곡률계를 판넬 위에 설치한 후 일정한 스패ن 만큼 이동하면서 접촉 측정 단자로부터 단면 형상 프로파일을 얻는다 얻어진 단면 형상 프로파일의 2차 미분을 함으로써 단면의 곡률변화를 평가할 수 있다.

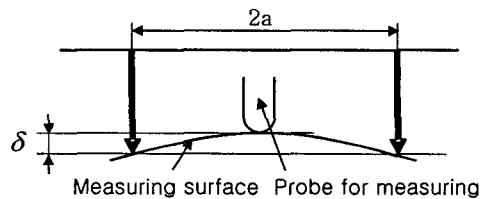


Fig. 5 A method for measuring of surface deflection using dial gauge

이를 수식으로 설명하면, 곡률은 Fig. 5에 의해 (3)으로 표현된다.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2\delta}{a^2 + \delta^2} \approx \frac{2\delta}{a^2} \quad (3)$$

일반적으로 단면 프로파일이 $y=f(x)$ 로 표현될 경우 임의의 점에 있어서의 곡률은

$$\frac{1}{\rho} = \frac{-f''(x)}{[1 + \{f'(x)\}^2]^{3/2}} \quad (4)$$

이다. 이때 단면 프로파일의 변화가 완만할 경우에는 $f'(x) \ll 1$ 로부터 곡률은 2 차 미분계수와 거의 일치한다. 따라서 단면 프로파일의 2 차 미분계수로부터 곡률의 변화를 파악하여 미세면굴곡을 평가한다.

광학식 카메라를 이용한 방법도 개발되었는데 광원으로부터 조사된 빛이 피사체에 반사되어 되돌아오는 광도를 분석하는 방법이나 특수한 홀로그램 스크린을 이용하는 방법으로 개발되었다. 이러한 방법은 광도의 차이에 의해 미세면굴곡을 표현하므로 굴곡의 유무나 위치 등의 정보는 획득할 수 있으나 정량화하기에는 어려움이 있다.

본 논문에서는 미세면굴곡의 정량화 및 가시화를 위해 변곡점 알고리즘을 제안하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 다이얼 게이지 등으로 측정된 곡률이 미세면굴곡을 가장 잘 묘사하며, 작업자의 육안검사 방법과 좋은 상관성을 가지므로 변곡점에 의한 미세면굴곡 정량화는 타당한 방법이다. 변곡점을 이용한 미세면굴곡 계산 방법은 유한요소 해석 결과의 분석뿐 아니라 실험 결과로부터 얻은 스캐닝 데이터도 분석할 수 있다. Fig. 6 은 가시화 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있다.

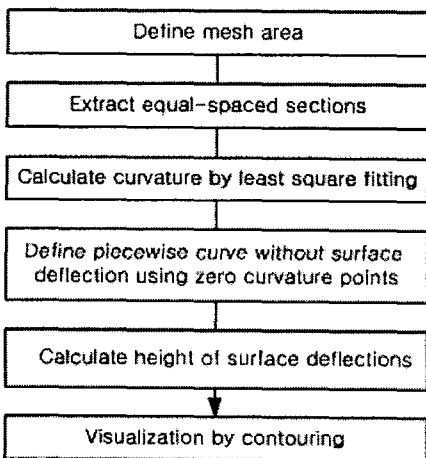


Fig. 6 Flowchart of the visualization algorithm

부분영역에 대한 미세면굴곡 해석을 수행한 뒤, 미세면굴곡이 예상되는 부위로부터 일정한 간격으로 단면을 추출한다. 굴곡을 잘 표현하기 위해서는 많은 수의 단면이 필요하지만, 1mm 간격으로 단면을 추출한 경우가 합리적인 결과를 나타내었다. 추출된 단면에 대한 계산의 효율성을 위해 1mm 간격으로 데이터를 샘플링함으로써 단면을 스무딩한다. Fig. 7 은 단면 추출 방법과 스무딩 과정을 도식적으로 나타내고 있다.

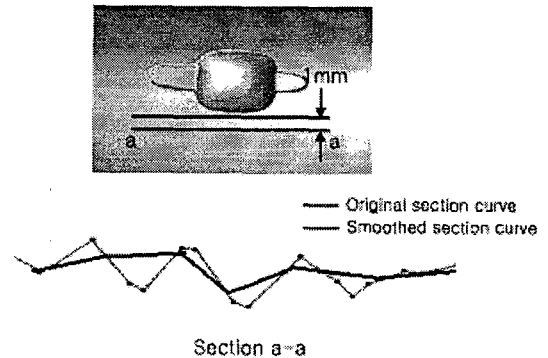


Fig. 7 Extraction and smoothing of section curves

스무딩 처리가 완료된 단면에 대해 변곡점을 탐색하는 순서는 다음과 같다. 먼저, 스무딩된 단면 데이터로부터 곡률을 계산한다. 일반적으로 해석결과 및 실험결과로부터 얻은 단면 프로파일에는 많은 노이즈를 포함하고 있기 때문에 단면 데이터를 그대로 미분하여 곡률을 계산하기에는 적합하지 않다. 곡률은 최소자승원(least square circle)을 구함으로써 계산할 수 있다. 즉, 주어진 점 (x_i, z_i) 를 최적화하기 위한 원을 구하기 위해 (a, b) 를 원의 중심, r 을 반경이라고 하면, 최소화 함수 G 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$G(a, b, r) = \sum_{i=1}^N ((x_i - a)^2 + (z_i - b)^2 - r^2)^2 \quad (5)$$

따라서, 위의 식(5)로부터 r 을 구하여 단면 프로파일을 따라 곡률을 계산한다. 최소자승원을 구하기 위한 스패 길이는 곡률측정기로 사용되는 다이얼게이지의 측정방법¹에 의해 결정할 수 있다. 일반적으로 스패 길이가 길어지면 곡률은 노이즈에 둔감해지고 반대로 스패 길이가 짧아지면 민감

해지기 때문에 적당한 스펠 길이의 결정이 필요하다. 노이즈 필터링 방법의 적용은 곡률의 계산 전에 단면 프로파일의 노이즈를 제거하는데 유용한 방법이다.

이러한 방법으로 가시화된 곡률을 이용하여 미세면굴곡을 표현할 수 있다. 즉, 곡률의 계산 및 가시화를 통한 정량화 방법은 미세면굴곡의 발생 위치와 발생량을 평가하는데 매우 효율적이다. 또 곡률의 부호를 고려함으로써 굴곡의 오목영역(concave)과 볼록영역(convex)을 분별할 수 있다. 그러나 곡률의 크기만으로는 미세면굴곡을 정량화할 수 없다. 따라서, 미세면굴곡의 양을 정의하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 즉, 오목영역과 볼록영역이 포함된 단면 프로파일에는 반드시 곡률이 영(zero)인 점들이 존재하고, 이러한 점들을 찾아 순서대로 연결하여 얻은 곡선을 미세면굴곡이 없는 이상적인 곡선이라고 간주한다. 그리고 원래의 단면 프로파일로부터 이상곡선까지의 수직 거리를 미세면굴곡의 높이로 간주한다. 이러한 정량화 과정을 각각 1mm 간격으로 선택한 모든 단면 프로파일에 적용하여 굴곡을 3 차원적으로 가시화 및 정량화한다. 마지막으로 계산된 곡률과 굴곡 높이를 해석 결과상에 등고선 형태로 표현함으로써 미세면굴곡의 가시화와 정량화가 완료된다.

Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 각각 단면 프로파일을 따라 변곡점을 찾는 방법과 미세면굴곡의 정량화 방법을 나타내고 있다.

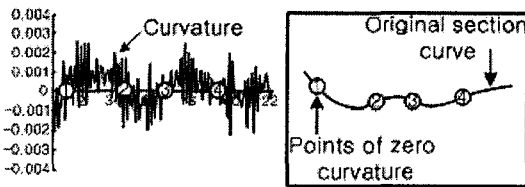


Fig. 8(a) Search method of curvature variation points

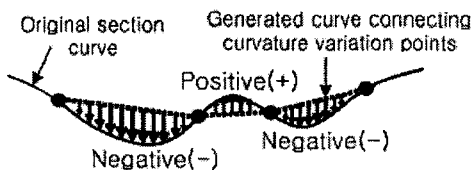


Fig. 8(b) Definition of quantifying of surface deflection

3. 미세면굴곡 정량화 시스템 검증

3.1 시스템의 정도 평가

개발된 미세면굴곡 평가 시스템의 정도를 평가하기 위해 차체 외판 도어 자물쇠 고정부를 대상으로 실험과 해석을 실시하였다. 실험에서 사용된 소재는 고장력강판의 일종인 SPRC340MPa급 BH강판으로서 Table 2에 재료물성치를 나타내었다

Table 2 Material properties of specimen(SPRC340-BH)

YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	n	r
240	354	37.1	0.19	1.61

Fig. 9는 FRONT DOOR OTR의 핸들부 주위에 발생하는 미세면굴곡을 분석한 결과이다. 미세면굴곡을 가시화시키기 위해 현장 작업자가 주로 사용하는 방법인 연마숫돌로 스크래치를 발생시킨 실험결과(Fig. 9(a)), 스캐닝 장비를 이용하여 측정된 결과를 이용하여 정량화시킨 측정 결과(Fig. 9(b)) 그리고 미세면굴곡 해석을 통하여 얻은 결과를 정량화시킨 해석 결과(Fig. 9(c))를 각각 비교하였다. 그리고 Fig. 9(d)에서는 측정 결과와 해석 결과의 차이를 그래프로 나타내었다.

실험결과인 경우 연마숫돌로 스크래치를 발생시킬 때 스크래치가 발생한 부분은 굴곡의 볼록영역(convex)이고 굽히지 않은 부분은 굴곡의 오목영역(concave)이라 판단한다. 따라서 실험결과와 측정 및 해석 결과를 비교하였을 때, 대체로 같은 위치에서 볼록영역과 오목영역이 발생함을 알 수 있다. 따라서 제안된 방법에 의한 미세면굴곡 해석은 실험 결과의 미세면굴곡 발생을 정성적으로 잘 예측한다고 판단된다. 또 미세면굴곡 해석의 정도를 평가하기 위해 측정 결과와 해석 결과에 있어, 같은 위치에서의 미세면굴곡량을 정량적으로 평가하였다. Fig. 9(d)에서 알 수 있듯이 대체적으로 해석 결과와 실험 결과가 잘 일치한다. 다소의 차이가 발생하는 이유는 측정에 사용된 레이저 스캐너의 정밀도 문제와 성형해석에서의 수치해석적 오차가 그 원인이라고 판단된다. 따라서 제안된 해석 방법은 미세면굴곡 예측에 매우 효과적이며, 개발된 정량화 시스템은 미세면굴곡을 정성적뿐만 아니라 정량적으로 잘 묘사하고 있어, 미세면굴곡의 발생 양상을 미리 예측하고 이를 설계에 적용하여 미세면굴곡 불량을 최소화할 수 있다고 판단된다.

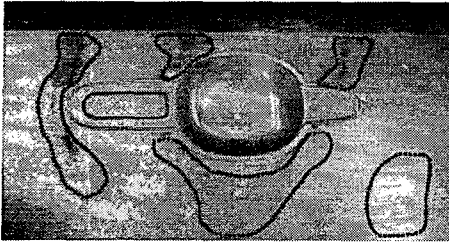


Fig. 9(a) Result of experimental panel (by oilstone)

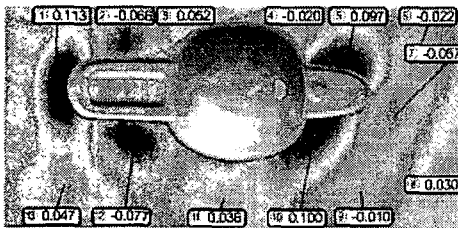


Fig. 9(b) Result of measuring method (by scanning)

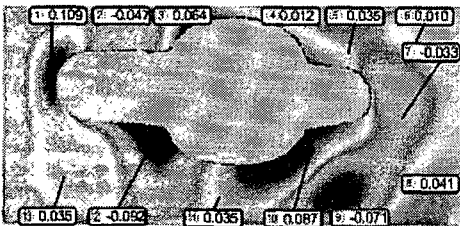


Fig. 9(c) Result of analysis method (by analysis)

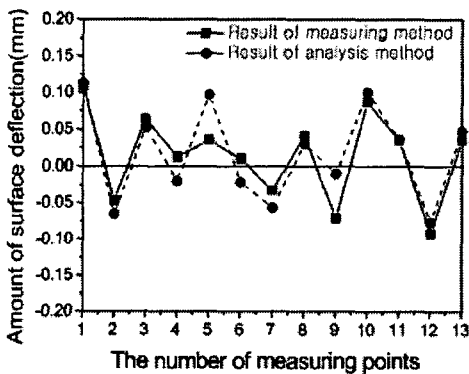


Fig. 9(d) Comparison of results between measuring and analysis method

3.2 보정에 의한 실패널 적용 결과 분석

미세면굴곡은 급격하게 변하는 형상이 있는 경

우에는 피할 수 없는 불량이다. 이러한 불량을 해결하는 방법으로는 영향인자를 최적화하여 미세면 굴곡을 최소화시키는 방법과 미세면굴곡 발생을 사전에 예측하고, 예측된 양에 대해 보정치를 적용함으로써 최소화하는 방법이 있다. 보정치 적용이란 예측된 굴곡량 만큼을 역으로 적용함으로써 최종적으로 평탄한 형상을 얻는 방법이다. 보정치 적용의 가능성을 평가하기 위해 양산용 차체 외판 도어 금형을 이용하여 시험하였으며 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

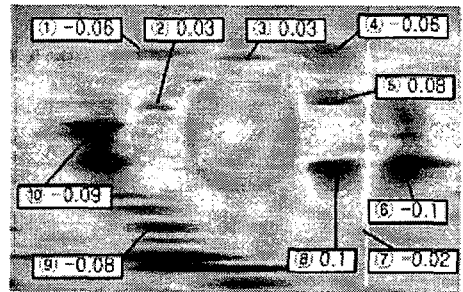


Fig. 10(a) Surface deflections before compensation

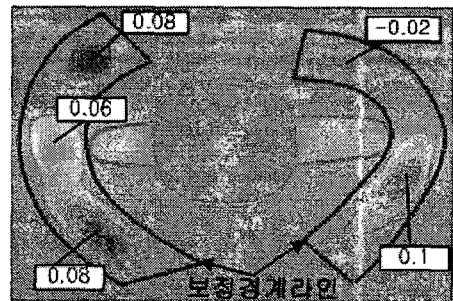


Fig. 10(b) Compensation method and modeling

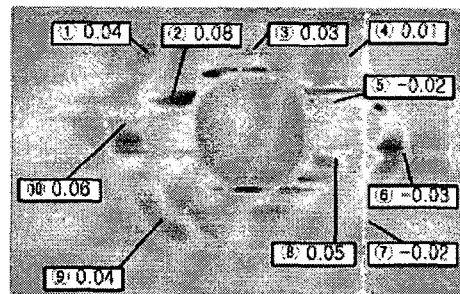


Fig. 10(c) Surface deflections after compensation

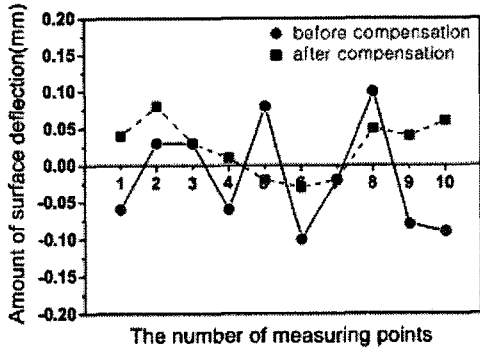


Fig. 10(d) A graph for the effect of compensation

해석 결과에서, 보정치 적용전에는 다소 큰 미세면굴곡이 발생하였으나 보정치를 적용한 후에는 현저히 저하되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 성형 해석을 이용하여 미세면굴곡을 정량적으로 해석하고 이를 설계에 반영함으로써 금형 제작 기간을 획기적으로 단축하고 완성 제품의 외관 품질도 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차 외관에 발생하는 미세면굴곡을 예측하고 정량화하는 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템을 이용하여 실금형에 적용한 결과, 미세면굴곡을 정량적 및 정성적으로 평가할 수 있었다. 시스템의 정도 평가를 위해 고전적인 실험 결과, 측정결과 그리고 해석결과를 그리고 해석결과를 각각 비교하여 평가하였는데, 굴곡의 발생 위치에 있어서 유사한 결과를 나타내었다. 그리고 측정 결과와 해석 결과의 비교로부터 정량적으로도 유사한 결과가 얻어졌다. 따라서 금형 설계 단계에서 미세면굴곡을 예측하고, 결과를 반영함으로써 효율적인 금형제작이 가능하다고 판단된다.

또 미세면굴곡의 해결 방안으로서 보정치 적용 방법에 대한 가능성을 평가한 결과, 예측된 굴곡량을 금형 형상에 역보정함으로써 기존의 미세면굴곡이 많이 제거되어 면품질이 향상되는 결과를 확인할 수 있었다. 따라서, 본 시스템은 보정에 의한 미세면굴곡 최소화 방법으로도 적용이 가능하다고 판단된다.

향후에는 제품형상, 소재의 종류, 성형력, 성형속도 등 미세면굴곡 발생에 영향을 미치는 여러 가지 설계변수와 공정변수에 대한 연구를 통하여,

미세면굴곡을 최소화할 수 있는 성형조건을 정립하는 것이 요구된다.

참고문헌

1. Nakagawa, N., "Handbook of Ease or Difficulty in press forming," National Center of Manufacturing Science 2nd edition, Ed. by The Japan Sheet Metal Forming Research, Japan, 1997.
2. Yoshida, M. and Shimomura, T., "A study of Surface Deflection Around the Handle Portion of an Automotive Door-Outer Panel Using a Model Die," Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 24, No. 275, pp. 1260-1267, 1983.
3. Matsui, M. and Iwata, N., "Initiation and Growth of Buckles of Square Steel Sheets by Diagonal Biaxial Tension," Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 24, No. 275, pp. 1268-1273, 1983.
4. Usuda, M., Hayashi, H., Oue, T. and Oikawa, H., "Classification and Analysis of Surface Deflection due to Elastic Recovery," Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 24, No. 275, pp. 1274-1281. 1983.
5. Hayashi, H., Hirata, M., Hira, T. and Yoshida, K., "Buckling Behavior of a Square Specimen in the Diagonal Tensile Test (Yoshida Buckling Test and Its Application 1)," Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 24, No. 275, pp. 1298-1304. 1983.
6. Liu, L., Sawada, T. and Sakamoto, M., "Evaluation of the Surface Deflections in Pressed Automobile Panels by an Optical Reflection Method," Journal of Material Processing Technology, Vol. 103, pp. 280-287, 2000.
7. Zhu, Y. and Zacharia, T., "A New One-point Quadrature, Quadrilateral Shell Element with Drilling Degrees of Freedom," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 136, pp. 165-203, 1996.
8. Chung, W. J., "A Finite Element Analysis of Springback in Sheet Metal Forming," Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineering-A, Vol. 23, pp. 2197-2208. 1999.