

## 측정 데이터 이용한 자동차 외판 미세굴곡 추적 사례 연구

정연찬<sup>1</sup> · 이상현<sup>2</sup> · 장대순<sup>3</sup> · 박상철<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, <sup>2</sup>케이브이테크놀로지, <sup>3</sup>아주대학교 산업공학과

### Measured Data based Inspection for Unintended Deflections in Automotive Outer Panels

Yun Chan Chung<sup>1</sup>, Sang Heon Lee<sup>2</sup>, Dae Soon Chang<sup>3</sup>, and Sang Chul Park<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology

<sup>2</sup>KV Technology

<sup>3</sup>Department of Industrial Engineering, Ajou University

Received 2 November 2012; received in revised form 30 January 2013; accepted 3 March 2013

#### ABSTRACT

This paper proposes an approach to detect unintended deflections in an automotive outer panel. Conventionally, the detection of unintended deflections has been performed by experienced works, and it requires much amount of time and efforts. The motivation of this work is to reduce such efforts by providing an automated detection methodology. For the detection of unintended deflections, we make use of the measured data from an optical scanner which can be considered as a Z-map data. The proposed approach consists of four major steps; 1) measured data acquisition for an automotive outer panel, 2) identification of shape features, 3) removal of shape features, and 4) detection of unintended deflections via curvature analysis.

**Key Words:** Automotive outer panel, Inspection, Measured data, Unintended deflections

## 1. 서 론

최근 제품의 심미성이 중요해짐에 따라서 휴대폰 부품, 귀금속 등 소형제품뿐 만 아니라 자동차와 같은 대형 제품에서도 심미성 향상에 대한 요구사항이 급격히 증대하고 있다. 특히 자동차의 경우 주행성능과 같은 고유기능이 여전히 중요하지만, 최근 많은 소비자들이 자동차 외관품질에 예전 보다 더 많은 무게를 두고 있다. 자동차의 외관

은 주로 철판들로 이루어져 있으며, 대부분 유려한 자유곡면 형상을 포함하고 있다. 과거 자동차 품질의 핵심이 주행기능(엔진, 미션) 및 내구성에 있었다면, 최근에는 외관 품질의 우수성이 경쟁의 핵심을 차지하고 있다. 외관의 표면(surface) 품질이 구매자의 첫 인상을 좌우하기 때문이다.

자동차의 외관의 재료는 일반적으로 철판이며, 다이와 펀치(Die & Punch)로 구성되는 프레스 공정으로 제작이 된다<sup>[1]</sup>. 결국 다이와 펀치가 자동차 외관의 형상을 결정하는데, 스프링백(Spring back)과 같은 여러 문제로 인해 원하는 외관 형상을 얻기가 쉽지 않다. 일반적으로 초기 금형을 만들어

<sup>†</sup>Corresponding Author, scpark@ajou.ac.kr  
©2013 Society of CAD/CAM Engineers

3개월 이상의 수작업 후에 비로소 원하는 형상을 얻게 된다. 이러한 과정에서 가장 어려운 점은 육안으로 판단이 어려운 미세굴곡과 같은 곡면 결함을 찾아내는 일이다. 미세굴곡과 같은 결함을 수작업으로 찾는 일은 많은 시간과 노력을 요할 뿐 아니라 30년 이상의 경력이 요구되는 일이다. 더욱 심각한 문제는 실제 생산에서 이러한 외관 품질은 일반적으로 경험이 많은 작업자에 의해 매우 주관적으로 판단된다는 것이다. 특히 부드러운 자유곡면 형상에서 의도하지 않은 미세 굴곡이 차체 외관 품질저하에 큰 영향을 미칠 수 있다.

이 연구에서 추적하려는 굴곡 결함은 자동차 외관의 프레스 성형 과정에서 발생하는 미세굴곡으로 한정한다. 자동차 외관의 미세굴곡은 주로 아주 넓고 부드러운 형상에 작은 형상이 있을 때 발생한다. 예를 들면 문짝에서 손잡이 부근이 대표적이다. 또 연료 주입구 부근, 트렁크나 뒷문의 변호판 자리 부근 등이다. 이 연구의 대상이 되는 미세굴곡은 깊이 방향으로 수십 마이크로미터보다 작고, 넓이는 대략 50 mm보다 작아서 숙련자가 아니면 쉽게 판별이 어려운 미세한 굴곡이다. 특히 도장하지 않은 상태의 판재이기 때문에 더욱 판별이 어렵다.

미세 굴곡의 발생원인은 매우 다양하며 현실적으로 양산용 자동차 외관 금형 제작에 있어서 금형 품질 육성기간의 절반 이상이 미세 굴곡 불량을 해결하는데 소요되고 있는 실정이다<sup>[1,2,7]</sup>. 이러한 의도하지 않은 미세 굴곡에 관한 기존 연구는 주로 미세 굴곡이 일어난 곡면상의 영역을 찾아내는 문제에 집중되고 있다. 과거에는 자동차 외관에 국한되지 않고, 일반적인 자유곡면 형상에서 곡률을 분석하여 곡률의 불연속 현상 등을 이용하여 품질상의 문제가 되는 영역을 찾아내는 연구가 많이 수행되었다<sup>[4,6]</sup>. 이러한 연구들은 곡률의 변화를 효율적으로 가시화하거나<sup>[6]</sup>, 바람직하지 않게 곡률이 변화 하는 부분을 찾아내거나<sup>[5]</sup>, 그리고 곡률 변화를 기반으로 곡면의 품질을 평가<sup>[4]</sup>하는 문제들을 다루고 있다. 자동차 외관을 대상으로 하는 미세굴곡에 관한 연구들은 반사선(reflection line)을 생성하여 추적<sup>[1]</sup>하거나, 포밍해석 및 스프링백 해석을 통해 미세 굴곡을 수치해석적으로 평가하거나<sup>[7]</sup>, 또는 자동차 외관의 측정데이터에서 곡률을 분석<sup>[2]</sup>하는 연구들이 있다. 이러한 다양한 기존연구에도 불구하고 여전히 자동차 외관의 의

도하지 않은 미세 굴곡 추적은 많은 어려움을 가지고 있으며, 아직도 현장에서는 숙련자의 시각 및 감각에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 비접촉 광학식 측정기를 이용하여 자동차 외관을 측정된 측정데이터를 활용한다. 비접촉 광학식 측정기는 Solutionix사의 Rexcan3 모델을 사용하였다. Fig. 1은 광학식 측정기의 구성을 보여주고 있으며, Fig. 2에서는 실제 자동차 외관의 측정과정을 보여준다. 본 연구에서는 사용된 측정기는 1280 × 960 픽셀의 CCD를 사용하였고 4100 mm × 300 mm 영역을 한번에 측정할 수 있다. Z-방향 최대 분해능은 10 마이크로 미터이다.

일반적으로 미세 굴곡은 평탄하고 부드러운 영역에서 발생하며 복잡한 특징형상을 가지는 형상부는 미세 굴곡 발생지역이 아니다. 따라서 본 연구에서는 측정데이터에서 우선 특징형상을 가지는 형상부를 추적하여 제거한다. 그리고 형상부가 제거된 나머지 부분에 대하여 곡률 분석을 수행하여 미세굴곡을 추적하고자 한다. 본 연구의 전체적인 흐름은 Fig. 3과 같다.

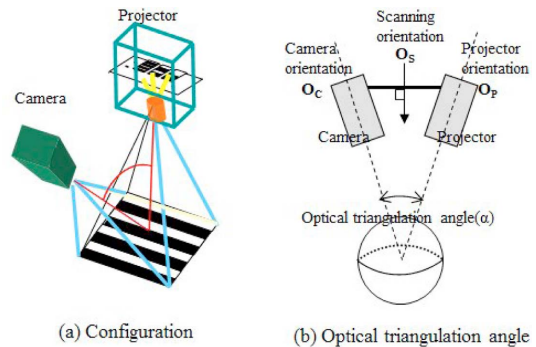


Fig. 1 Mechanism of an optical scanner



Fig. 2 Scanning of an automotive outer panel

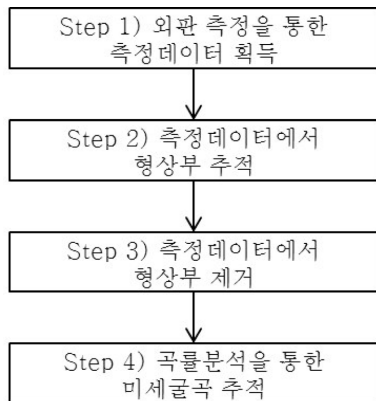


Fig. 3 Proposed approach to find unintended deflections

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 획득된 측정데이터 특징을 고려하여 외판 측정데이터에서 형상부를 찾아내고 제거하는 방법을 설명한다. 3장에서는 형상부가 제거된 상황에서 넓고 평탄한 부위에서 곡률 분석을 통해 미세 굴곡을 찾아내는 방법을 설명한다. 마지막으로 결론 및 요약은 4장에서 설명한다.

## 2. 형상부 추적 및 제거

이미 언급했듯이 본 논문에서는 비접촉 광학식 측정기에서 얻어진 데이터를 대상으로 하며 Fig. 4에서 얻어진 측정데이터를 보여주고 있다. 얻어진 측정데이터를 측정방향에서 보면 가로, 세로 일정한 격자에 Z 값이 있는 형식으로, 일반적으로 많이 알려진 Z-map<sup>[3]</sup>과 유사하다. 비접촉 광학식 측정데이터의 이러한 특성은 측정시스템에 따라 조금씩 다를 수는 있지만 대개 CCD 이미지의 픽셀 데이터로 3차원 좌표를 계산하기 때문이다. 특히

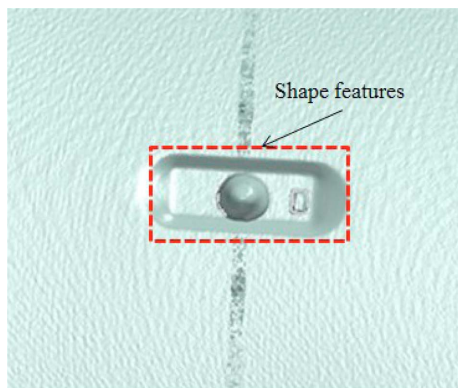


Fig. 4 Scanned data of an automotive outer panel

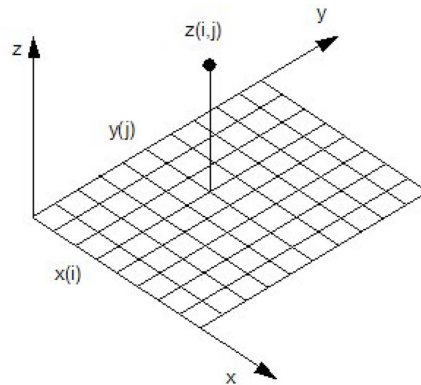


Fig. 5 Z-map data

본 연구에서 다루는 자동차 외판 형상은 전체적으로 부드럽고 평탄하기 때문에 Fig. 5와 같은 Z-map 형태의 데이터를 얻을 수 있다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 자동차 외판의 측정데이터에는 미세 굴곡이 존재할 수 있는 평탄하고 부드러운 부분과 특징형상들이 밀집된 형상부로 나뉘어 질 수 있다. 형상부와 같은 경우는 의도된 형상이므로 미세 굴곡을 찾는 대상이 아니며 오히려 추후 곡률 분석에서 혼란을 일으킬 여지가 많으므로 곡률 분석 이전 단계에서 형상부 영역을 찾고 제거하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 이러한 형상부를 신속하게 찾기 위해서 읍셋 방법을 적용하고자 한다. 간결한 설명을 위하여 이차원 곡선의 경우를 예로 들어 설명하고자 한다. Fig. 6(a)에서 보여지는 곡선 M1을 우리가 획득한 Z-map 데이터의 절단면이라고 가정하도록 하자. M1을 바깥쪽(normal 방향)으로 읍셋하게 되면 Fig. 6(b)와 같이 M2 곡선을 얻을 수 있다. 이때 읍셋의 양은 형상부를 구성하는 특징형상의 크기에 따라 달라질 수 있다. 얻어진 M2 곡선을 다시 반대 방향으로 읍셋하면 Fig. 6(c)에서 보는 것과 같이 곡선 M3를 얻을 수 있다. 그리고 마지막으로 원래 절단면 곡선인 M1과 M3을 비교하면 평탄하고 부드러운 부분은 일치하는 반면 형상의 변화가 급격한 형상부에서는 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

이러한 방법을 Z-map에 적용하면 쉽게 형상부 영역을 추출할 수 있게 된다. Z-map의 3차원 읍셋에 관한 것은 이미 연구<sup>[4]</sup>되었으며 효율적인 알고리즘도 알려져 있다.

이를 3차원 측정데이터에 응용하면 우선 측정데

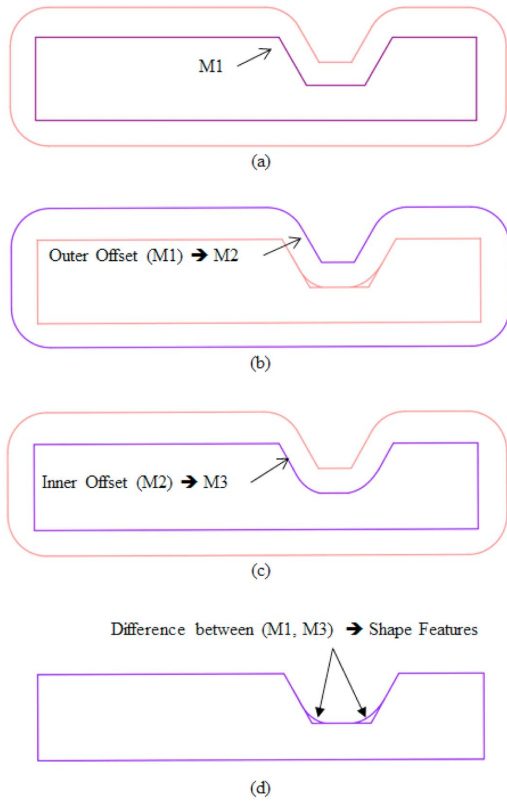


Fig. 6 Proposed method to detect shape features

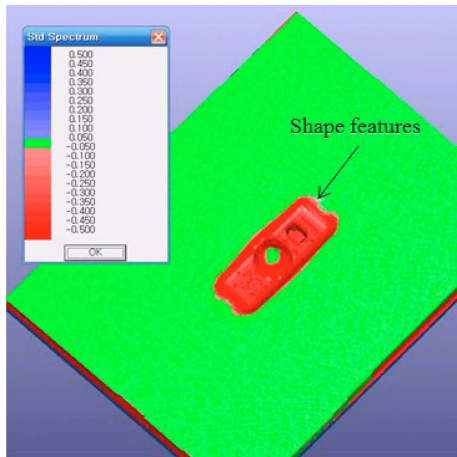


Fig. 7 Shape feature for the example shown in Fig. 4

이터를 두 차례 읍셋을 수행한다. 첫 번째는 곡면의 normal vector 방향으로 읍셋하고 그 후 반대 방향으로 읍셋하게 된다. 이렇게 두 차례 읍셋을 한 측정데이터와 원래 측정을 통해 얻어진 데이터를 비교하여 차이가 나는 부분을 추적한다. 이 때 평탄하고 부드러운 부분은 차이가 나지 않지만 급

격한 형상 변화가 있는 부분은 많이 차이를 보이게 된다. 이러한 영역을 추적하여 형상부로 인지하고 이를 제거해 주면 추후 곡률 분석에서 혼란을 미리 방지할 수 있게 된다. Fig. 7은 실제 측정 데이터에 대해서 이러한 방법을 적용하여 형상부를 인지한 것을 보여주고 있다.

### 3. 곡률 분석을 통한 미세 굴곡 추적

측정 데이터에서 형상부로 인식된 부분을 제거하고 나머지 영역인 평탄하고 부드러운 부분에 대해서만 곡률 분석을 수행한다. 곡률 분석을 위해서 측정 데이터가 정의하는 곡면 위의 어떤 점에서 곡률을 계산할 수 있어야 한다. 측정 데이터는 이산 자료(discrete data)이며 많은 노이즈를 포함하기 때문에 국부적인 연속성(local continuity)에 기초한 일반적인 곡면의 곡률 계산 방법을 적용할 수는 없다. 곡률과 관련된 기초적인 개념을 살펴보고 이 연구에서 시도한 방법을 소개한다.

일반적으로 곡면의 부드러움 혹은 굽어진 정도는 가우시안 곡률(Gaussian curvature)로 평가된다. 가우시안 곡률은 두 개의 주 곡률(principal curvatures)의 곱으로 얻어지며, 두 개의 주 곡률은 정규 곡률(normal curvature)의 최소값과 최대 값이다. 정규 곡률은 곡면 위 해당 점의 법선과 접선을 포함하는 평면과 곡면의 교차 곡선(intersection curve)의 곡률이다[Choi 1997]. 결국 개념적으로는 곡률 계산을 위해서 법선과 접선의 계산이 필요하다. 이산 자료인 측정 데이터의 어떤 점에서 접선과 법선을 안정적으로 계산하기는 쉽지 않다. 그래서 이 연구에서는 측정 데이터가 정의하는 곡면을 특정한 평면으로 자른 단면 곡선의 곡률을 계산한다.

단면 곡선을 생성할 평면의 방향은 사용자가 지정한다. 미세 굴곡을 검사하려는 대상물인 자동차 외관 곡면은 대개 방향성(principal direction)이 있으며, 사용자는 쉽게 그 방향성을 판별할 수 있다. 방향성이 불분명한 곡면의 경우에는 여러 방향을 시도하면서 미세 굴곡이 가장 잘 드러나는 방향을 선정한다. 대상 곡면의 곡률이 작은 방향을 선정하면 상대적으로 미세한 곡률의 변화를 쉽게 감지할 수 있다. 곡률이 크고 변화가 심한 방향을 선정하면 의도된 굴곡(형상)과 의도하지 않은 굴곡(결함)을 판별하기 어렵다.

단면 평면이 정해지면 평면과 측정 데이터의 단



면 곡선을 얻을 수 있다. 얻어진 단면 곡선도 노이즈가 많아서 연속 기하학을 적용하기 어렵다. 그래서 단면 곡선을 점열 곡선(point sequence curve)으로 얻은 후 점열을 원으로 근사(approximation)하여 곡률 반경을 얻는다.

이 연구에서는 곡률을 계산하려는 점의 주변 점들을 원으로 근사하여 곡률 반경을 계산한다. 이때 근사 구간을 결정하는 방법에 따라 다양한 곡률 반경 계산 방법이 있다. 첫 번째 방법은 근사 구간을 일정한 값으로 결정하고 해당 구간의 점들로 원을 근사한다. 이때 근사 오차는 무시되며 해당 구간의 점들을 최적의 원을 근사한다. 근사 구간이 너무 짧으면 노이즈를 상쇄할 수 없고 지나치게 길면 근사 오차가 커지면서 미세 굴곡을 판별할 수 없다. 최적의 근사 구간 길이는 측정 장치와 측정면의 특성에 따라 다르다. 사용자가 근사 구간을 조절하면서 그 결과를 육안 관찰하면 최적의 구간을 파악할 수 있다. 그러나 이 방법은 자동화에 난점이 있다.

곡률 반경 계산의 두 번째 방법은 근사 구간이 가변적이며 기준 근사 오차를 만족하는 최대 근사 구간에서 원을 근사한다. 먼저 해당 점 주변의 최소 점들로 원을 근사하고 근사 오차를 계산한다. 근사 오차가 기준 오차보다 작으면 근사 구간을 조금 확장하고 다시 계산한다. 근사 구간을 계속 확장하다가 근사 오차가 기준을 초과하면 확장을 중단한다. 이 방법은 근사 구간이 불확정이고 순차적으로 구간을 늘려가면서 계산하기 때문에 컴퓨터 계산량이 많지만 최근의 컴퓨터 성능으로는 큰 어려움이 없다. 기준으로 사용할 최적 근사 오차는 측정 장치의 측정 정밀도와 매우 밀접한 관계를 가진다. 본 연구에서는 기준 근사 오차를 고정하고 근사 구간을 가변으로 설정한 두 번째 방법을 사용하였다.

일정한 점열을 하나의 원으로 근사하는 방법은 Kasa의 방법<sup>[10]</sup>을 사용하였다. 일반적인 원의 근사는 오류의 제곱을 최소화하는 기준을 사용한다. 즉, N개의 점이 주어질 때 식 (1)을 만족하는 원의 반경 R을 찾는다.

$$\min \sum_{i=1}^N (R_i - R)^2 \tag{1}$$

이때

$$R_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2}$$

$(x_i, y_i)$ 는 i번째 점의 x, y 좌표값이다. N은 근사하려는 점의 개수이며 3보다 크거나 같다. 그리고  $(a, b)$ 는 근사된 원의 중심점 좌표값이다. 그러나 식 (1)은 해석적인 방법으로 해를 얻기 어렵다. Kasa는 식 (2)와 같이 수정된 최소제곱법을 제시하였다.

$$\min \sum_{i=1}^N (R_i^2 - R^2)^2 \tag{2}$$

Kasa가 제시한 방법은 해석적인 방법으로 해를 얻을 수 있으며, 그 결과도 이 연구에서 활용하기에 충분하였다. 원을 근사하는 다양한 방법론은 Rusu 등의 연구에서 찾을 수 있다<sup>[9]</sup>.

Fig. 8에서 기준 근사 오차 값에 따라 근사되는 원호가 달라짐을 알 수 있다. Fig. 8은 x축의 스케일을 압축해서 미세 굴곡을 확대한 그림으로, 표시된 원호의 가장 큰 반경은 1528 mm이며, 가장 작은 반경은 758 mm다. 오른쪽 아래로 길게 늘어진 곡선이 근사하려는 점열 곡선이다. Fig. 9의 단면의 방향은 Fig. 9의 가로축이며, 전체 곡면의 곡률은 거의 0에 가깝고 그림에서 초록색으로 표시되어 있다. Fig. 9의 Concave deflection과 Convex deflection은 곡률의 미세한 변화 부분을 표시하고 있다. 굴곡형상은 곡률의 근거해서 판단할 수 있다.

본 연구에서 사용한 곡률 계산 방법은 근사 오차를 고정하고 근사 구간을 가변으로 설정하기 때문에 계산량이 많다. Intel Core i5 CPU에서 300개의 점으로 구성된 점열곡선의 모든 점에서 곡률반경을 계산하는데 대략 20초의 계산시간을 보였다.

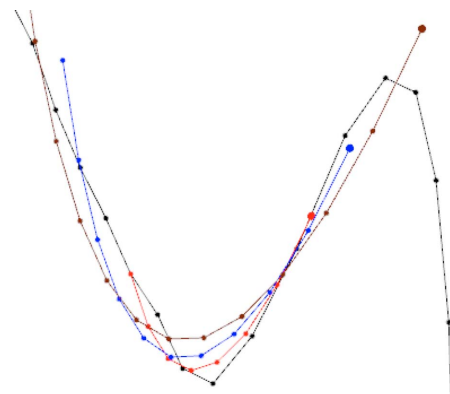


Fig. 8 Curvature computation for detecting unintended deflections

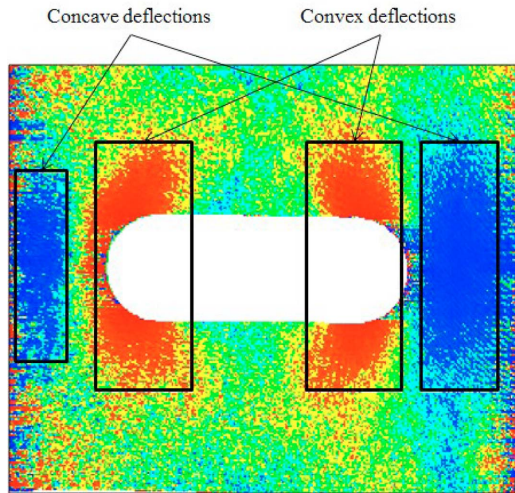


Fig. 9 Unintended deflections for the example shown in Fig. 4

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자동차 외관에서 발생하는 미세 굴곡 불량을 찾을 수 있는 방법을 제안하였다. 자동차 외관 금형에서 발생하는 불량은 그 크기와 종류가 매우 다양하여 설계 형상과 결합 형상을 완벽하게 구분하는 것은 지극히 어렵다. 그러나 완만하고 방향성이 뚜렷한 곡면에 존재하는 미세 굴곡의 경우는 작업자의 수작업 검사 노력과 시간을 줄이는 것이 가능하다. 본 논문에서 제안된 방법은 비접촉 광학식 측정기에서 얻어진 데이터를 사용하였으며 크게 4개의 단계로 이루어진다; 1) 측정데이터 획득, 2) 형상부 추적, 3) 형상부 제거, 그리고 4) 곡률분석을 통한 미세 굴곡 추적.

이 연구의 중요한 기여는 측정데이터에서 형상부의 추적 및 제거 그리고 나머지 평탄한 영역에서 곡률 반경 계산을 위해 기준 근사 오차 개념을 도입이다. 기준이 되는 근사 오차 개념을 도입을 통해 사용자가 큰 어려움 없이 일관성 있는 곡률 분석이 가능해졌다.

곡면의 방향성과 무관한 곡률 분석을 위해서는 곡면의 주 곡률을 계산하는 것이 바람직하다. 탐색 방법을 도입하면 주 곡률의 계산은 가능할 것

으로 생각된다. 그리고 측정 데이터의 노이즈 제거를 위해 다양한 필터를 사용한 결과의 분석도 매우 필요한 연구로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 중소기업청 산학연 협력사업 (C0031184 & C0003579)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Choi, I. J. and Lee, H. W., 1997, Efficient Generation of Reflection Lines to Evaluate Car Body Surfaces, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 2(3), pp. 133-141.
2. Chung, Y. C. and Lee, S. H., 2006, A Case Study of Digital Inspection of Subtle Dents on Automotive Outer Panels, *2006 Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers Conference*, South Korea, pp. 499-504.
3. Choi, B. K. and Jerard, R. B. 1998, *Sculptured Surface Machining*, Kluwer.
4. Eichhorn, A., Girimonte, D., Klose, A. and Kruse, R., 2005, Soft Computing for Automated Surface Quality Analysis of Exterior Car Body Panels, *Applied Soft Computing*, 5, pp. 301-313.
5. Hoscheck, J., 1984, Detecting Region with Undesirable Curvature, *Computer Aided Geometry Design*, 1, pp. 183-192.
6. Pottmann, H., 1989, Visualization Curvature Discontinuities of Free-form Surfaces, *Proceedings of Eurographics 89 Conference*, pp. 529-536.
7. Park, C. D., Chung, W. J. and Kim, B. M., 2006, A Numerical and Experimental Study of Surface Deflections in Automobile Exterior Panels, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 23(9), pp. 134-141.
8. Choi, B. K. 1991, *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier.
9. Corneliu Rusu, Marius Tico, Pauli Kuosmanen, Edward J. Delp, 2003, Classical Geometrical Approach to Circle Fitting – Review and New Developments, *Journal of Electronic Imaging* 12(1), 179-193.
10. Kasa, I., 1976, A Circle Fitting Procedure and Its Error Analysis, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 25, pp. 8-14.



**정 연 찬**

1989년 한양대학교 산업공학과 학사  
 1991년 KAIST 산업공학과 석사  
 1996년 KAIST 산업공학과 박사  
 1998년 다이플러크라이슬러 연구원  
 1991년~2002년 큐빅테크 수석 연구원  
 2010년 Johns Hopkins University Visiting Professor  
 2004년~현재 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 부교수  
 관심분야: CAD/CAM, 생산기술 자동화



**이 상 현**

1997년 울산대학교 산업공학과 학사  
 1999년 울산대학교 산업공학과 석사  
 1999년~2004년 (주)큐빅테크 선임 연구원  
 2004년~2006년 (주)솔루션닉스 책임연구원  
 2006년~현재 케이브이테크놀로지(주)  
 관심분야: CAD/CAM/CAE/CAI, Virtual Engineering



**장 대 순**

2012년 아주대학교 산업공학과 학사  
 2012년~현재 아주대학교 산업공학과 석사과정  
 관심분야: Manufacturing System Modeling & Simulation, Digital Manufacturing System, CAD/CAM, CAPP



**박 상 철**

1994년 한국과학기술원 산업공학과 학사  
 1996년 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 2000년 한국과학기술원 산업공학과 박사  
 2004년~현재 아주대학교 산업정보시스템공학부 부교수  
 관심분야: Digital Manufacturing System, CAD/CAM, CAPP, Manufacturing System Modeling & Simulation