

자동차 외판 특징선의 시각적 분석을 위한 시편 제작방법

한주호^a, 정연찬^{b*}Methods of Making Samples for a Visual Experiment with
Feature Lines of Outer Automotive PanelsJuho Han^a, Yunchan Chung^{b*}^a Dept. of Product Design and Manufacturing Eng. Graduate School of Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea^b Dept. of Mechanical System Design Eng., Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	22	June	2015
Revised	6	August	2015
Accepted	11	August	2015

Keywords:

Automotive outer panel
Character line
Feature line
Geometric analysis
Experiment sample

ABSTRACT

A feature line is a visually noticeable creased line on outer automotive panels. Feature lines play an important role in creating a good impression of a car. Even though the manufacturing quality of feature lines is important, it is difficult to achieve the designed shape owing to the springback of sheet metal. The current study presents five methods of making samples that will be used in a visual experiment to discover a quality control quantitative manufacturing allowance for feature lines. Measurement and inspection methods for the samples are also presented. The results show that plunge machining is the most accurate way to make the desired shape, and that wrapping the machined surface with sheet film is an appropriate way to emulate the roughness and visual texture of the painted outer panels of a car.

1. 서론

자동차 외부 패널에는 피처라인(feature line), 캐릭터라인(character line), 벨트라인(belt line), 웨이스트라인(waistline) 등으로 불리는 다양한 형태의 선이 있다^[1]. 이 선들은 차체의 볼륨감, 역동성, 부드러움 등의 심미적인 역할을 하기 때문에 차체 외판에서 선들의 위치와 모양, 굽기 등은 차체 패널의 중요한 품질요소다. 각 선들의 명칭과 구분은 기하학적인 정의가 아니라 그 위치와 크기, 역할 등에 의해 정해지며 나라 혹은 제조 회사에 따라 서로 다르다. 이 연구에서는 주변부에 비해 현저히 작은 곡률반경 때문에 시각적으로 선처럼 보이는 차체 외판의 형상을 특징선(feature

line)이라고 정의하자. 그리고 엄밀한 의미에서는 2차원적인 선이 아니라 곡면이므로 곡면적인 성질을 명확히 표현하고자 할 때는 특징선 곡면(feature line surface)이라고 하자^[5,9].

자동차 외부 패널은 프레스 가공공정 중 하나인 스탬핑(stamping) 가공으로 만든다. 이 때 소성가공 특성상 탄성에 의해 굽힘량이 감소하는 스프링백(springback) 현상이 발생한다. 스프링백 현상 때문에 곡률반경이 작은 특징선을 정확히 성형하기 쉽지 않다^[2]. 그런데 특징선은 그 단면 형상의 크기가 전체 패널에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 성형 품질을 평가하기 위한 측정 및 검사가 어렵다. 기존의 차체 패널 제조 과정에서는 일반적으로 패널 전체 형상이 설계 형상과 부합하는지 검사한다. 그리고 줄무늬 패턴의

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6395

Fax: +82-2-976-5173

E-mail address: ychung@seoultech.ac.kr (Yunchan Chung).

반사 등으로 전체적인 곡률의 변화와 미세한 굴곡 등을 검사한다. 박출달 외 2명은 ‘자동차 외관의 미세면굴곡 거동의 수치해석적 평가’에서 자동차 외관에 발생하는 미세면굴곡을 예측하고 정량화하는 시스템을 개발하여 미세면굴곡을 정량적 및 정성적으로 평가할 수 있었다^[3]. 또한 최원창 외 1명은 ‘자동차 외관 특징선 곡면의 단면 형상 측정과 분석’에서 3차원 좌표 측정기(CMM)로 측정된 특징선 단면의 분석을 위해 정렬 방법을 제시하고, 예제를 통해 특징선 곡면이 설계 형상과 다르게 제조되는 것을 수치적으로 확인하였다^[5,9]. 그러나 자동차 외부 패널 성형 공정에서 특징선 곡면의 제조 품질 관리 사례 혹은 측정과 검사 등의 연구는 찾아 볼 수 없었다.

차체 패널 성형 공정에서 특징선의 제조 품질을 관리하기 위해서는 제조 품질의 평가를 위한 정량적인 제조허용공차와 측정 및 검사의 방법이 필요하다. 차체 외부 패널의 특징선 곡면은 기능적인 요소가 아니라 시각에 의존하는 심미적 요소다. 그래서 특징선 곡면의 정량적 제조허용공차를 설정하기 위해서는 특징선 곡면의 시각적 관능평가가 필요하다. 시각적 관능평가란 다양하게 제작된 특징선 시편을 피실험자가 시각적으로 차이를 구별할 수 있는지, 그 차이역은 어느 정도인지 알아보는 실험이다. 이 연구에서는 시각적 관능평가 실험에 사용할 특징선 곡면의 시편을 제작하고 분석하는 방법을 제시하고자 한다.

시각적 관능평가에 사용할 시편은 그 특성상 용도에 따라 다양하게 만들 수 있어야 하며^[10], 정확하고 정밀하게 만들어져야 한다. 그러나 특징선 곡면의 경우 단면의 높이가 작고, 주변부에 비해 곡률반경이 매우 작아서 정밀한 시편 제작이 쉽지 않다. 이 연구에서는 CNC 밀링, 와이어-EDM 그리고 3D 프린터를 이용하여 특징선 시편을 제작하는 5가지 방법을 제시하고, 시편 제작 결과를 측정 및 평가하여 정량적으로 비교 분석했다. 시편 제작 결과의 평가를 위해 특징선의 기하학적 분석 및 비교 방법을 제시했다.

2. 본 론

2.1 시편 설계 방법

특징선 곡면은 일반적으로 두 개의 평탄한 큰 곡면이 인접할 때 생기는 모서리를 일정한 곡률 혹은 가변적 곡률로 블렌딩한 곡면이다. 블렌드 곡면의 수직 단면은 원, 타원 그리고 2차 이상의 곡선으로 다양하게 표현할 수 있다. 주위 평탄부에 비해 작은 곡률반경^[11]으로 이루어진 블렌드 곡면은 마치 시각적으로 선처럼 보이게 된다. 특징선 곡면 양 쪽의 평탄부는 특징선 곡면에 비해 곡률이 매우 작기 때문에 시각적으로 평면처럼 느껴진다. 이 연구에서 제작할 특징선 곡면의 시편은 Fig. 1(a)에서 보듯이 양쪽의 평면과 가운데 특징선 곡면으로 구성된다.

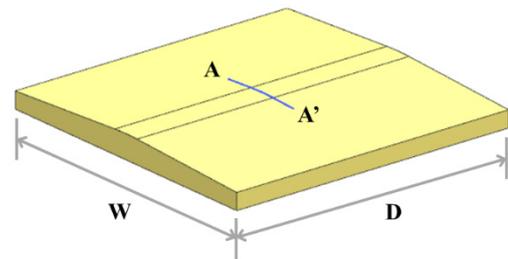
시편의 크기는 시편의 폭(W)과 길이(D)로 표현하자. 그리고 시편의 전체적인 모양은 Fig. 1(a)에서 보듯이 단면 곡선을 단면과 수직한 방향으로 단순 이동해서 얻어지는 스윕트 곡면(swept surface)이다. 스윕트 곡면을 위한 단순 이동 거리는 시편의 길이(D)에 해당한다. 스윕트 곡면을 위한 단면 곡선은 곡선부와 양쪽 직선으로 구성된다. 특징선 곡면의 단면에 해당하는 곡선부는 Fig. 1(b)와 같이 2차 곡선을 이용하여 표현하고, 양쪽 평탄부는 직선으로 표현한다. 2차 곡선을 이용하면 주위 평탄부와 특징선 곡면의 접선 연속을 쉽게 표현할 수 있으며, 특징선 곡면의 단면을 좀 더 일반적으로 표현할 수 있다. 2차 곡선은 양끝 점의 접선이 이루는 각도(θ)와 현의 길이(l) 그리고 부편 정도(ρ)로 표현할 수 있다. 2차 곡선의 표현식과 모델링의 자세한 내용은 참고문헌^[7]에서 찾아 볼 수 있다. 2차 곡선의 부편 정도는 식 (1)과 같이 계산된다. Fig. 1(b)에서 보듯이 식 (1)의 h 는 현에서 곡선의 가장 높은 점까지의 높이에 해당하며, H 는 양끝 점의 접선이 만나는 꼭지점까지의 높이이다.

$$\rho = h/H \tag{1}$$

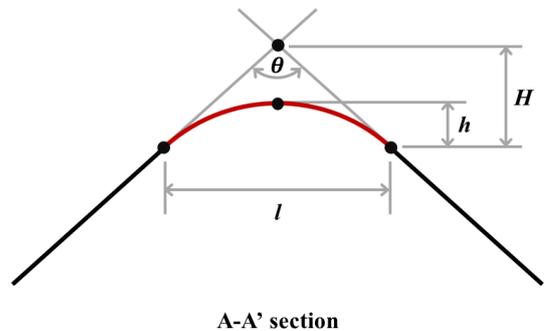
2.2 시편 제작 방법

2.2.1 형상 제작 방법

이 연구에서는 CNC 밀링과 와이어-EDM, 3D 프린터 등의 방법으로 시편 형상을 제작하고 각각의 방법을 비교하고자 한다.



(a) Solid model of the sample of the feature line surface



(b) Geometric attributes of the section profile of the feature line surface

Fig. 1 Feature line surface

CNC 밀링의 경우는 곡면가공, 플런지가공, 측면가공의 세 가지 절삭방법으로 시편 형상을 제작할 수 있다. CNC 밀링은 공구를 사용하여 공작물을 절삭하는 가공법으로 절삭 조건에 따라 공작물의 표면이 좌우된다. 공구의 휨을 고려하지 않으면, 공구의 날당 이송거리(feed/tooth)와 공구 경로 간격(path interval 혹은 step over)에 따라 가공면의 커슥(cusp) 높이가 정해진다. 커슥은 가공면에 생기는 요철(凹凸) 모양의 가공 흔적을 말하며 이는 표면 거칠기와 직결되는 수치다. 첫 번째 곡면가공 방법은 일반적인 곡면의 중삭 혹은 정삭 가공에 사용되며, Fig. 2(a)와 같이 볼엔드밀을 사용하여 스캐닝 방식으로 가공한다. 공구 직경과 공구 경로 간격, 공구의 분당 회전수, 그리고 이송속도에 의해 제작물의 표면이 결정된다. 일반적으로 날 당 이송으로 생기는 커슥은 경로 간격에 의해 생기는 커슥 높이에 비해 매우 작다. 공구의 휨 등을 무시하면 평면을 가공하는 경우 공구의 반경(R)과 공구 경로 간격(s)이 주어질 때 커슥 높이(h)는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$h = R - \sqrt{R^2 - (s/2)^2} \quad (2)$$

두 번째 플런지가공 방법은 Fig. 2(b)와 같이 평엔드밀을 사용하여 공구를 내리찍는 듯이 가공하는 방법이다. 공구 축 방향으로 절삭력이 작용하므로 공구의 휨이 적어서 가장 정밀하게 가공할 수

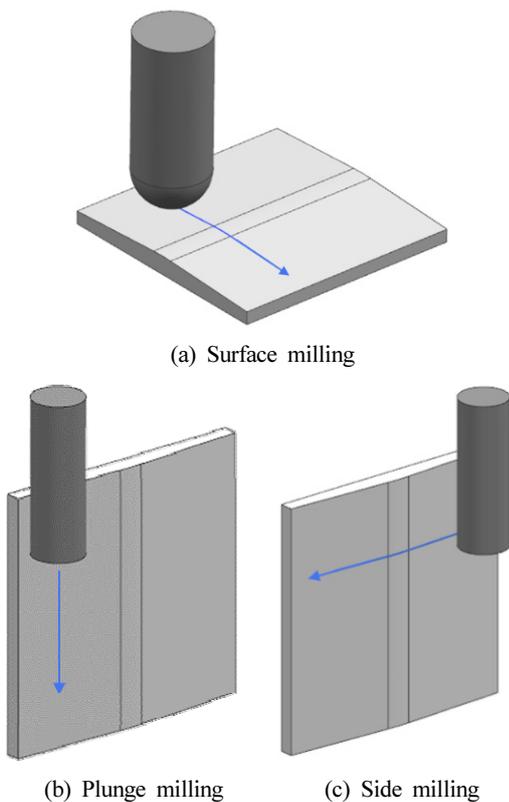


Fig. 2 Types of CNC machining for the samples

있을 것으로 예측된다. 이 방법은 날 당 이송에 의한 커슥은 없고, 경로 간격에 의한 커슥 높이가 식 (2)와 동일한 방법으로 결정된다. 세 번째 CNC밀링 가공 방법인 측면가공 방법은 Fig. 2(c)와 같이 공구의 옆 날로 가공 하는 방식이다. 공구 날의 접촉 면적이 많기 때문에 절삭성이 우수하지만, 공구의 휨으로 인한 미삭 혹은 과삭이 예상된다. 이 방식은 공구 직경과 날 당 이송거리에 의해 커슥 높이가 결정되며, 날 당 이송 거리를 s 로 두면 식 (2)를 이용해서 커슥 높이를 계산할 수 있다.

와이어-EDM은 지름이 가는 금속선 전극을 X, Y축 방향으로 이송하여 2차원 형상가공을 하는 장치이다. 일반적으로 와이어-EDM으로 작업한 공작물의 표면 거칠기는 방전시간에 비례하고 가공속도에 반비례하는 것으로 알려져 있다.

CNC 밀링과 와이어-EDM은 NC프로그램 작성, 공작물의 셋업, 기계조작 등의 숙련된 기술이 필요하다. 이에 반해 3D 프린팅 방식은 제작방법이 간단하고 쉽다. 3D 프린터는 재료를 한 층씩 쌓는 적층조형방식이기 때문에 적층 방향이 제작 결과물의 품질에 영향을 준다. 이 연구에서는 Fig. 3에서 보인 2가지 방향으로 적층을 시도할 수 있다.

2.2.2 표면 모사 방법

시각적 관능평가에는 시편의 물성보다 표면의 거칠기, 질감 등 표면 상태가 시각적 관능평가에 영향을 미치므로 실제 자동차 외부 패널과 유사한 표면 상태가 요구된다. 자동차 표면에 도료를 칠하는 도장공정은 전착(電着)에 의해 도료가 균일하게 도장된다. 이는 별도의 장비가 필요하며, 재료의 제한이 있다. 김성현 외 5명은 ‘자

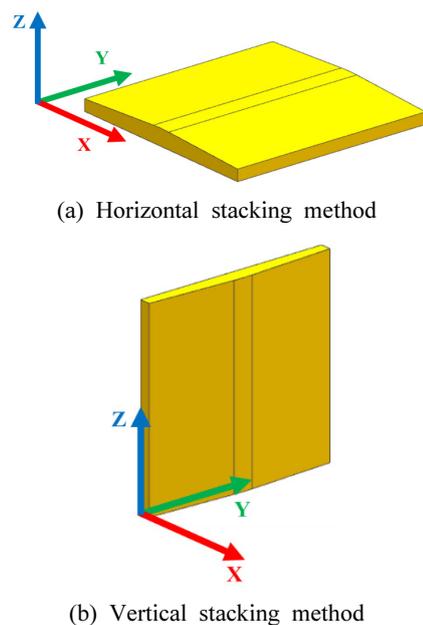


Fig. 3 Building directions of 3D printer

동차 미세 면 굴곡의 정량적 관능 평가' 연구에서 3D 프린터로 만든 시편을 실제 자동차 표면처럼 모사하기 위해 폴리싱 작업을 거친 뒤 플라스틱 프라이머 2회, 차량용 도색제 3회 그리고 광택제 1회를 도포하여 시편을 제작했다^[8]. 이 연구처럼 도색 스프레이를 이용하여 실제 자동차 도장 작업과 유사한 간이적인 표면 개선 방법이 있다. 그러나 폴리싱 작업은 대개 수작업에 의존하여 면의 일부를 제거하기 때문에 정밀한 치수의 시편 제작에는 적합하지 않다. 이 연구에서는 앞에서 제시한 방법으로 제작한 시편 형상에 폴리싱 작업 없이 차량용 래핑 필름을 부착하여 모사한다. 차량용 래핑 필름은 번거로운 도색 작업에 비해 간단하고 쉽게 자동차 외부 패널과 같은 표면을 표현 할 수 있다. 차량용 래핑 필름은 시각적으로 차량 도장면과 흡사하다. 그리고 연구에 사용할 래핑 필름의 거칠기도 실제 차량의 도장면과 유사함을 측정으로 알 수 있었다.

2.3 측정 및 분석 방법

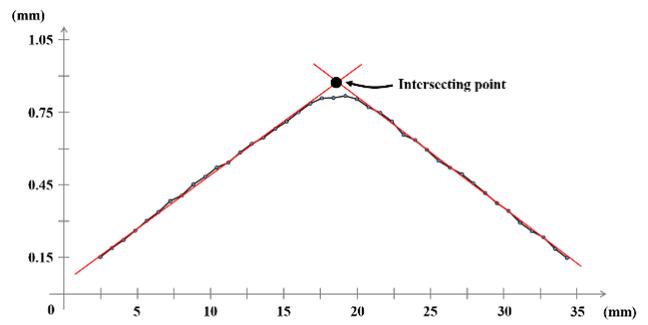
2.3.1 특징선 단면 형상 분석

특징선 곡면은 Fig. 1에서 보듯이 현의 길이, 부푼 정도 그리고 양끝 접선의 각도로 표현 할 수 있다. 그러나 측정 데이터에서 특징선 곡면의 시각적 두께에 해당하는 현의 길이와 부푼 정도 등의 기하학적 형상을 직접 분석하기는 쉽지 않다. Fig. 4는 3D 프린터로 제작한 시편을 3차원 좌표 측정기로 측정한 예다. 측정 데이터는 항상 노이즈가 포함되어 있어서 직선 혹은 곡선으로 근사를 해야 한다. 특히 노이즈가 포함된 측정점들의 곡률 계산은 더욱 어렵다. 그리고 평탄부와 곡선부의 경계가 불명확하기 때문에 현의 길이 혹은 곡선부의 부푼 정도 등의 측정이 불가하다. 그러므로 측정된 단면 형상을 토대로 형상 정확도를 분석하는 방법을 제안하고자 한다.

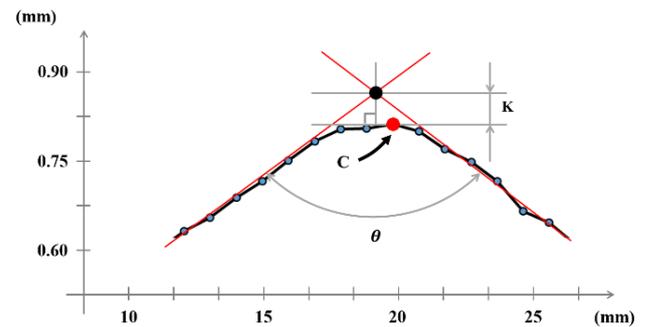
두 형상이 일치함을 확인하기 위해 두 개의 유사한 형상을 정렬하는 다양한 연구와 방법^[5,6,9]이 있다. 그러나 기존의 방법으로 특징선의 두 단면 형상을 정렬하기가 쉽지 않다. 특징선 단면의 형상이 매우 작을 뿐만 아니라 정렬과정에서 생기는 오차가 형상 분석에 영향을 주기 때문이다. 본 연구에서는 설계 단면과 측정 단면의 정렬 없이 단면 형상의 정확도를 분석하는 방법을 제안한다.

형상의 정렬 없이 특징선의 설계 단면과 측정 단면의 형상 정확도를 비교하기 위해 Fig. 4(b)와 같이 '특징선 곡면의 처짐 높이(K)'라는 개념을 제안한다. 특징선 곡면의 부푼 정도와 현의 길이 등은 평탄부와 곡면부의 경계가 명확할 때 계산할 수 있다. 그러나 실제 제작된 특징선 곡면의 측정 단면에서 평탄부와 곡면부의 경계를 명확히 알기는 불가능하다. 그러나 이 연구에서 제안하는 처짐 높이는 양쪽 평탄부를 직선으로 근사하면 쉽게 얻을 수 있는 값이다.

측정 데이터에서 처짐 높이를 구하기 위해 Fig. 4에서 보듯이



(a) Best fitting lines for the measured points



(b) Slack height of the feature line

Fig. 4 Analysis of the measured points

평탄부라 확인할 수 있는 곡선부 양쪽의 측정 데이터를 각각 직선으로 근사한다. 근사된 직선의 교차점과 각도는 쉽게 얻을 수 있으며, 근사된 두 직선의 교차점에서 측정 점까지의 최단 수직 거리가 특징선 곡면의 처짐 높이가 된다.

근사 직선은 측정 데이터와 얼마나 일치하는지 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 Norm of residuals로 평가하고자 한다. Norm of residuals는 근사된 직선과 데이터와의 평균 거리를 나타내는 값으로서 -1 ~ +1 사이의 값을 가진다. 즉 Norm of residuals 값이 0에 가까울수록 직선에 가깝다.

2.3.2 시각적 질감 평가 방법

가공한 시편의 표면은 육안 상으로 평탄하게 보일지라도 가공 방법이나 가공조건에 따라 가공물 표면에 요철(凹凸)이 불가피하게 발생한다. 본 연구에서는 시각적 관능시험에 쓰일 시편을 제작하는 것이기 때문에 그 목적에 따라 실제 자동차 외부 패널과 시각적으로 유사한 표면이 되어야 한다. 본 연구에서는 도색된 자동차 외부 패널과 유사한 시각적 질감을 갖는지 표면 거칠기를 측정하여 분석하고자 한다. 표면 거칠기 측정에서 여과굴곡곡선(waviness profile)을 보상하는 컷오프값(cut-off length)이 중요하다. 절삭 방법으로 제작한 시편의 경우는 공구의 경로 간격과 날당 이송량 때문에 발생하는 공구의 흔적을 고려하여 컷오프값을 결정한다. 3D 프린팅으로 제작한 시편의 경우는 기계의 해상도를 고려하여 컷오프값을 결정해야 한다.

3. 시편 제작 결과

3.1 시편 형상 모델링

상용 CAD 소프트웨어를 이용하여 특징선 시편을 모델링하였다. 시편의 폭과 길이는 각각 50 mm이며 Table 1은 본 연구에서 제작한 특징선 곡면의 설계요소를 정리하였다. 또한 특징선 단면 형상 측정요소 중 하나인 처짐 높이(K)를 기입하였다. 설계값은 실제 SUV차종의 휠 하우스 부근 특징선 곡면의 특성을 반영한 수치이다. 시편 형상의 모델링 결과는 Fig. 1(a)와 같다.

3.2 시편 제작

본 연구에서 사용한 CNC 밀링 기기는 STONIC社의 STONIC-35이다. Table 2는 절삭가공방법에 따라 가공조건, 제작시간 그리고 이론적 커슁 높이를 정리하였다.

와이어-EDM으로 시편 제작 시 사용한 기기는 Sodic社의 AG600L이다. 이 기기는 정밀도에 따라 와이어의 이송속도, 반복횟수 그리고 제작물의 표면 거칠기를 대략적으로 정할 수 있다. 시편 제작 시 가공조건은 이송속도 1.5 mm/min 그리고 3회 반복가공 조건으로 하였다.

3D 프린팅에 사용한 3D 프린터는 Objet Geometries社의 Polyjet Matrix 방식의 Connex500으로서 광경화성 수지에 빛을 조사하여 제품을 조형한다. 시편 제작에 사용된 주재료는 FullCure®850이고 보조재료는 FullCure®750이다. STL 파일로 변환할 때 삼각화 여유 공차(triangulation tolerance)는 0.001 mm로 한다. Connex500의 해상도는 X, Y축은 600 dpi (약 42

μm)이고 Z축은 1,600 dpi (약 16 μm)이다. Fig. 3과 같이 2가지 방향으로 시편을 만들 수 있는데, (b) 방법으로 제작하는 경우에는 특징선 단면이 해상도가 낮은 X, Y축에 의해 제작되기 때문에 형상의 정밀도가 낮을 것이라 짐작할 수 있다. 또한 적층 높이가 높아져 제작시간이 상대적으로 오래 걸리게 된다. 따라서 (a)와 같은 자세로 시편을 조형하였으며 대략 4분 30초의 시간이 소요되었다.

Fig. 5는 앞에서 설명한 방법으로 제작한 시편의 형상이다. Fig. 5에서 보듯이 CNC밀링으로 제작한 시편의 표면은 절삭방법에 따라 공구의 흔적이 남지만 표면은 매끈하게 느껴진다. 래핑 필름을 부착하지 않은 상태의 시각적 평가로는 CNC밀링을 이용한 3가지 방법이 가장 우수함을 알 수 있었다. 반면 와이어-EDM의 경우는 방전 시 생기는 탄화흔적으로 인해 표면이 거칠게 느껴졌다. 3D 프린팅의 경우는 적층 해상도 때문에 거친 면이 그대로 드러났으며, 특징선 곡면의 곡선부가 정밀하게 표현되지 않았음을 알 수 있었다.

Fig. 6은 래핑 필름을 부착한 시편의 모습이다. 표면모사에 쓰인 차량용 래핑 필름은 3M™社의 Scotchprint® Wrap Film 1080-G 12로써 필름의 두께는 약 0.1 mm이다. 래핑 필름을 부착

Table 1 Geometric data at section of feature line

	Symbol	Value
Chord length	l	5 mm
Height	h	0.081 mm
Angle	θ	174°
Deflection height of chord	K	0.049 mm

Table 2 Machining conditions for CNC milling

	Surface milling	Plunge milling	Side milling
Tool (2-flutes)	Ø16 Ball end mill	Ø20 Flat end mill	
Feed (mm/min)	1072	600	1200
Spindle (RPM)	4000		
Feed/Tooth (mm)			0.15
Step over (mm)	0.134	0.15	
Step down (mm)			5
Theoretical cusp (mm)	0.00028		

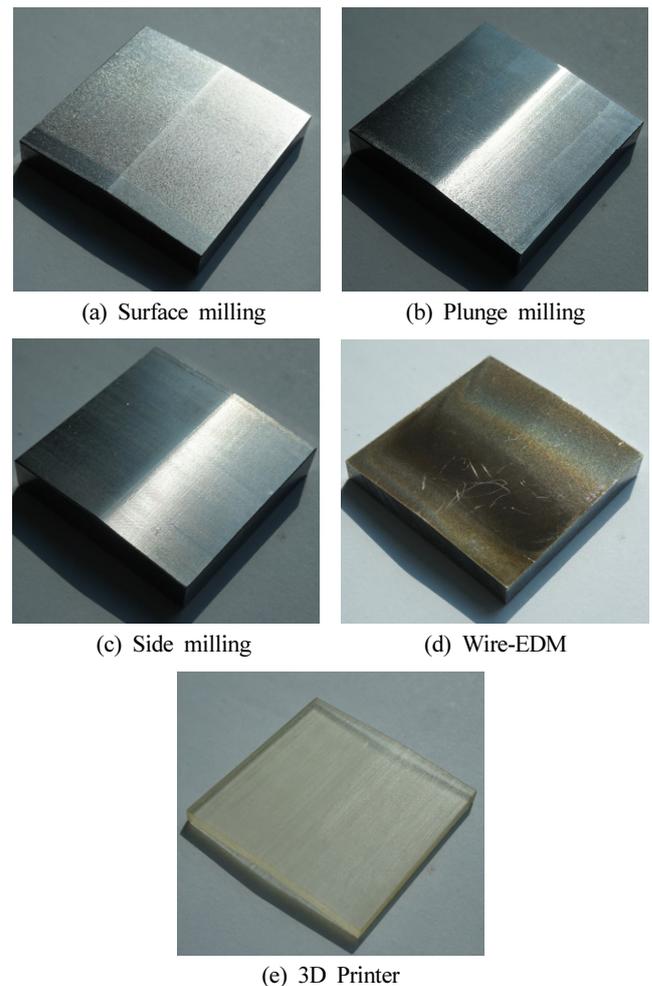


Fig. 5 Samples without wrapping film

한 결과의 시각적 평가는 3D 프린팅 방식을 제외하고는 모두 유사함을 알 수 있었다. 그림에서도 볼 수 있듯이 3D 프린팅 방식의 경우는 래핑 필름을 부착한 후에도 해상도로 인한 결이 드러났다.

3.3 제작 시편의 단면 측정 및 분석

정량적인 수치 비교를 위해 3차원 좌표 측정기를 이용하여 시편을 측정하였다. 사용한 3차원 좌표 측정기는 Mitutoyo社의 Beyond-Crysta C9106이다. 분해능은 0.0001 mm 이상이며 정밀도 E는 $(2.2+3L/1,000) \mu\text{m}$ 이내다.

특징선이 포함된 15 mm 구간을 0.5 mm 간격씩 점 데이터를 얻었다. 제작 한 시편을 본 연구에서 제안한 분석방법에 따라 측정요소인 처짐 높이(K)와 각도(θ)를 분석한 결과는 Table 3과 같다.

시편의 평탄부 각도는 5 가지 방법 모두 유사하지만 평탄부 각도의 미세한 변화가 처짐 높이에 큰 영향을 미치는 것을 고려한다면 플런지가공 방식이 가장 정확함을 알 수 있다. 곡면가공 방식과 측면가공 방식, 와이어-EDM 방식은 그 오차의 수준이 비슷하다. 그

러나 3D 프린팅 방식은 다른 방식에 비해 오차의 수준이 다름을 알 수 있다.

처짐 높이는 평탄부의 각도에 영향을 받는 값이다. 현의 길이와 부편 정도가 일정 할 때, 평탄부 각도가 기준보다 크면 처짐 높이가 작아지고, 기준보다 작으면 처짐 높이가 커지게 된다. 그리고 미세한 각도의 변화가 처짐 높이의 변화에 큰 영향을 준다. 즉, 와이어-EDM과 측면 가공 방식의 경우는 각도가 기준값에 비해 작아서 처짐 높이가 다소 크게 측정되었을 가능성이 있다. 그러나 곡면 가공 방식의 경우 평탄부 각도가 기준보다 다소 큼에도 불구하고 처짐 높이가 기준보다 크다. 따라서 실제로 곡선부가 조금 뭉개졌을 가능성이 있다.

결과적으로 평탄부의 각도와 처짐 높이를 기준으로 시편 제작 방식을 평가하면 측면가공과 플런지가공 방식이 상대적으로 우수하다. 특히 플런지가공 방식이 가장 우수한 결과를 보인다. 그러나 3D 프린팅 방식은 평탄부 각도가 기준과 상당히 다르며 가장 나쁜 결과를 보였다.

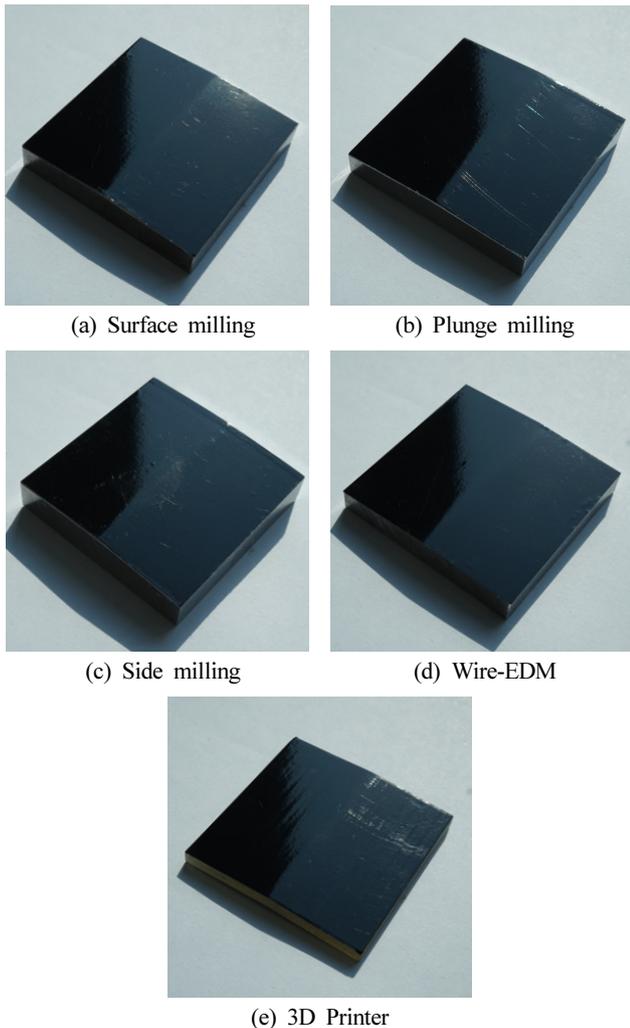


Fig. 6 Samples with wrapping film

3.4 표면 거칠기 측정 및 분석

표면 거칠기를 측정하기 위해 사용한 기기는 Mitutoyo社의 J-400이다. Stylus의 반경은 2 μm 이며 분해능은 0.000125 μm 이다. 자동차 래핑 필름을 부착하기 전·후로 나누어 Fig. 7과 같이 평면부의 표면 거칠기를 측정하였다. 이에 따라 얻은 결과는 아래

Table 3 Analysis of section profile of feature line surface

	R ²	Norm of residuals	Angle (θ)	K (mm)
Designed value			174.0000	0.0497
Curved surface milling	0.9999 0.9999	0.00155 0.00108	174.0297	0.0533
Plunge milling	0.9999 0.9999	0.00206 0.00234	174.0009	0.0513
Side milling	0.9999 0.9999	0.00460 0.00185	173.9780	0.0513
Wire-EDM	0.9999 0.9999	0.00513 0.00347	173.9495	0.0568
3D Printer	0.9985 0.9976	0.01934 0.01984	174.2066	0.0458

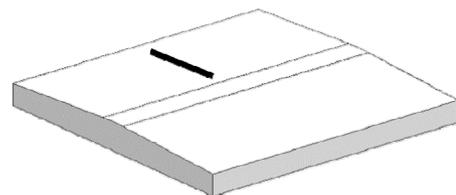


Fig. 7 Evaluation profile of the roughness test

의 Table 4와 같다. 표에서 모든 방식이 래핑 필름을 부착하면 표면 거칠기가 개선되며 그 결과가 유사함을 알 수 있다. 결과적으로 래핑 필름이 표면의 질감을 적절히 개선함을 알 수 있다. 절삭가공 방식과 와이어-EDM 방식으로 만든 시편은 래핑 필름을 부착한 경우 실제 자동차 외부 패널과 유사한 표면 거칠기를 나타냄을 표에서 알 수 있다.

3D 프린터로 만든 시편은 Fig. 6(e)에서 보듯이 래핑 필름을 부착하더라도 특유의 결이 시각적으로 드러나는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 3D 프린터의 표면은 높이가 크고 간격이 넓은 요철로 이루어진 것을 알 수 있다. 요철의 높낮이는 산술평균거칠기(Ra)로 확인할 수 있으며 요철간격은 요철평균간격(Sm)으로 확인할 수 있

Table 4 Measurement data of surface roughness

Automotive outer panels (E-VAL=1.25 mm, λc: 0.25 mm, λs: 2.5 μm)	Ra 0.07 μm Rz 0.50 μm	
Wrapping film (E-VAL=1.25 mm, λc: 0.25 mm, λs: 2.5 μm)	Ra 0.06 μm Rz 0.40 μm	
	Before wrapping	After wrapping
CNC milling (E-VAL=1.25 mm, λc: 0.25 mm, λs: 2.5 μm)	Ra 0.14 μm Rz 0.60 μm	Ra 0.07 μm Rz 0.40 μm
Wire-EDM (E-VAL=1.25 mm, λc: 0.25 mm, λs: 2.5 μm)	Ra 2.09 μm Rz 12.0 μm	Ra 0.07 μm Rz 0.40 μm
3D Printer (E-VAL=4.0 mm, λc: 0.8 mm, λs: 2.5 μm)	Ra 2.62 μm Rz 13.2 μm Sm 399.25 μm	Ra 0.24 μm Rz 1.30 μm Sm 522.67 μm

다. 3D 프린터로 만든 시편의 결 간격은 형상의 각도와 기계의 해상도를 고려하면 Fig. 8과 같이 305 μm로 짐작할 수 있다. 제작된 시편의 결 간격을 광학현미경으로 확인한 결과 결의 간격은 평균적으로 380 μm가 나왔다. 또한 표면 조도계로 측정된 Sm값은 400 μm가 나왔다.

즉 3D 프린터의 결은 해상도의 한계로 결이 뭉개지는 현상 때문에 이론적 값과 달리 400 μm의 요철평균간격을 가지게 된다. 이를 통해 3D 프린터로 만든 시편의 정밀도는 기계의 사양과는 달리 표현되는 것을 알 수 있다. 또한 래핑 필름 부착 시에는 결의 일부가 가려져 요철평균간격이 522 μm로 넓어지는 것을 알 수 있다. 그 중에서 높은 결들이 부착되어 시각적으로는 대략 3 mm 간격의 결로 느껴져 3D 프린터로 만든 시편은 사용하기 어렵다는 것을 알 수 있었다.

연구에서는 절삭가공의 경우 컵 높이를 0.28 μm로 맞춰 제작하였기 때문에 세 가지 방법 모두 유사한 Ra값이 나왔다. 가공 방법에 따라 컵 높이를 조절할 수 있는데, 컵 높이를 낮추면 표면 거칠기는 좋아지지만 제작시간이 길어지게 된다. 따라서 시편제작에 알맞은 컵 높이를 찾기 위해 절삭가공 중 측면가공으로 이론적 컵 높이를 2 μm와 5 μm로 높여서 제작해 보았다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 컵 높이 5 μm로 절삭가공된 시편은 래핑 필름을 부착하여도 시각적으로 컵 무늬가 드러났다. 본 연구에서 최적의 컵 높이를 확인하지는 않았지만 위의 간단한 실험을 통해 적정 컵 높이가 있다는 것을 알 수 있었으며 5 μm의 컵 높이는 적절하지 않음을 알 수 있었다.

4. 결론

이 연구에서는 CNC밀링, 와이어-EDM 그리고 3D 프린터를 이용하여 자동차 외관 특징선 곡면의 시편을 만드는 방법과 분석 방법을 제시하였다. 제시한 5가지 방법으로 형상을 제작하고 자동차 래핑 필름을 이용하여 실제 차량과 같이 시각적 질감을 모사하였다. 특징선 곡면은 곡률반경이 작고, 단면의 높이가 수 마이크로미터에 불과하기 때문에 시편을 정밀하게 만들기 어렵다. 제작된 시편의 분석을 위해 3차원 좌표 측정기로 얻은 단면 프로파일을 기하학적으로 분석하였다. 이 연구에서는 측정 데이터의 평탄부를 직선으로 근사하여 평탄부의 각도와 곡선부의 처짐 높이를 분석하는 방법을 제시했다. 이 연구에서 제시된 제작 방법으로 제작된 시편을 분석한 결과, CNC 밀링의 플러지가공 혹은 측면가공으로 제작하는 것이 가장 적절함을 알 수 있었다. 그리고 래핑 필름을 부착하면 실제 도색된 자동차 외관과 유사한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 그러나 컵 높이가 너무 크거나 3D 프린팅으로 제작된 시편처럼

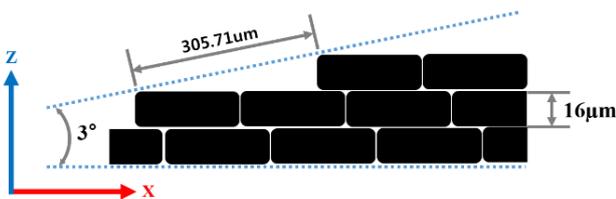
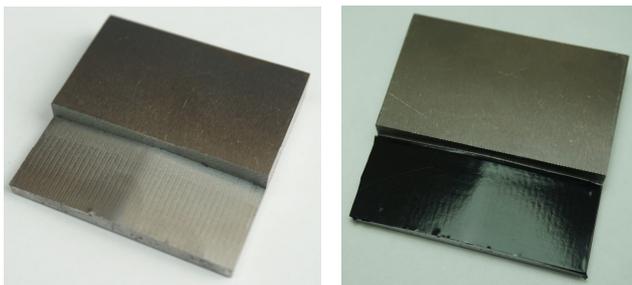


Fig. 8 Theoretical layers of 3D printing



(a) Sample without wrapping film (b) Sample with wrapping film

Fig. 9 Result of the sample with the cusp height of 5 μm

원래의 표면 거칠기가 과도하게 나쁜 표면은 래핑 필름을 부착하더라도 시각적 질감을 개선하는데 한계가 있었다.

결론적으로 CNC밀링 측면가공 혹은 플런지가공으로 2 μm 이하의 커셉 높이로 형상을 제작하고, 자동차용 래핑 필름을 부착하면 관능평가에 사용할 특징선 곡면의 시편을 제작할 수 있다. 시편 제작 시 제작시간을 고려한다면 측면가공을 특징선 형상의 정밀도를 고려하면 플런지가공을 선택해야 한다. 그리고 평탄부의 각도와 처짐 높이를 측정하고 비교하면 특징선 곡면의 제작 정확도를 평가할 수 있다. 이 연구에서 제시된 방법을 통해 다양한 형상의 특징선 곡면 시편을 제작할 수 있으며, 제작된 시편을 이용한 시각적 관능실험을 통해 특징선 곡면의 제작 허용 공차를 결정할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Lee, J. M., 2009, A Study on the Feature of Character Line on Automobile Brand, A Thesis for a Master, Kookmin University, Republic of Korea.
- [2] Karafillis, A. P., 1996, Tooling and Binder Design for Sheet Metal Forming Processes Compensating Springback Error, *Int. J. Machine Tools and Manuf.*, 36:4 503-526.
- [3] Park, C. D., Chung, W. J., Kim, B. M., 2006, A Numerical and Experimental Study of Surface Deflections in Automobile Exterior Panels, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 23:9 134-141.
- [4] Chung, W. J., Kim, W. S., Jung, H. Y., Seo, J. H., Jung, T. C., 2010, A Study on the Surface Deflection of Automobile Exterior Panel Curvature Analysis, *The Korean Society for Technology of Plasticity Semiannual*, 2010:5 257-258.
- [5] Choe, W. C., 2014, Measurement and Analysis of the Section Profile of the Feature Line Surface on Automotive Outer Panels, A Thesis for a Master, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology, Republic of Korea.
- [6] Oh, A. Y., Yi, E. G., Lee, C. Y., Kwon, S. O., Park, W., Chung, Y. C., 2013, Geometric Analysis of the Feature Line on Automotive Outer Panels, *Proc. 10th Trans. Mater. Process Mold Process Symposium, Kor. Soc. Tech. Plast.*, 84-89.
- [7] Choi, B. K., 1991, *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier, New York.
- [8] Kim, S. H., Lee, D. Y., Kim, S. M., Jung, M. A., Lee, J. H., Hwang, J. H., 2013, Qualitative Evaluation of Visually-perceived Surface Deflection for the Automobile Exterior Panels, *KSMTE Autumn Conference*. 362-362.
- [9] Choe, W. C., Chung, Y. C., 2015, Measurement and Analysis of the Section Profile for Feature Line Surface on an Automotive Outer Panel, *Transactions of Materials Processing*, 24:2 107-114.
- [10] Lee, Y. J., Jeong, M. A., 2008, A Basic Study on the Evaluative Factor of a Visual Image about the Pleat Pattern, *Journal of the Korean Society of Design Culture*, 14:3 347-356.
- [11] Lee, J. Y., Kim, M. J., Lee, S. S., Jeon, E. C., 2004, A Study on Curvature Radius Measurement Using Laser Interferometer, *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 13:6 34-40.