

다른 광택을 가진 우레탄 아크릴 코팅 소재의 긁힘 거동 및 정량적 평가

정원영 · 원종일[†]

동국대학교 안전공학과

(2013년 1월 29일 접수, 2013년 2월 26일 수정, 2013년 2월 27일 채택)

Mar Behavior and Quantitative Evaluation of Urethane-Acrylate Coatings with a Different Gloss

Won-Young Jung and Jong-Il Weon[†]

Department of Safety Engineering, Dongguk University, 707 Seokjang-dong, Gyeongju, Gyeongbuk 780-714, Korea

(Received January 29, 2013; Revised February 26, 2013; Accepted February 27, 2013)

초록: 다양한 광택을 지닌 우레탄-아크릴 코팅 표면에 일정 하중을 부하하여 긁힘 거동 및 긁힘 시인성을 조사하였다. 비교적 낮은 응력이 코팅 표면에 부하될 수 있도록 면 접촉이 가능한 스크래치 팁을 이용하여, 코팅 표면에 긁힘 손상을 생성시켰다. 생성된 긁힘 손상을 기존 평가법인 광택도 및 휘도 변화량으로 평가 시, 광택도가 동일한 코팅 표면은 일정 하중이 증가함에 따라 광택도와 휘도 변화량이 증가됨을 확인하였다. 하지만, 이 평가법들은 광택이 서로 다른 시험편들의 긁힘 손상을 비교·평가하기에는 부적합하였다. 왜냐하면, 측정값과 긁힘 시인성이 서로 일치하지 않은 결과를 보였기 때문이다. 본 연구에서는 코팅 표면의 긁힘 손상을 정량적으로 평가할 수 있을 뿐 아니라, 코팅 표면에 무차원화된 광택도 및 휘도의 증가는 긁힘 시인성의 증가로 이어지는 상관관계를 설명할 수 있는 새로운 긁힘 평가법을 제안하였다.

Abstract: Mar behavior and visibility were investigated by applying a constant load to various gloss-coated urethane-acrylate surfaces. Using a area-contact scratch tip which can apply a relatively low stress level to the coated surfaces, the mar damages were generated on the surfaces. When evaluating the mar-induced damage by means of delta-gloss (ΔG) and delta-luminance (ΔL) with existing test methodologies, an increase in constant load on the same gloss-coated surface leads to an increase in ΔG and ΔL . However, these are not suitable for evaluating and comparing the surface damages of different gloss-coated samples because of a disagreement between the measured values and the mar visibility. It is shown that new mar test assessment proposed in this work not only can be used to quantitatively evaluate the mar damage, but also accounts for the correlation that the increases of the normalized gloss and luminance on coated surfaces correspond with an increase in the mar visibility.

Keywords: mar, scratch, gloss, luminance, visibility.

서 론

최근 소비자들은 자동차, 핸드폰, 디지털 음향기기, 액정 TV 등의 제품을 구매할 때, 제품의 기능적 측면뿐 아니라, 표면의 외관 즉, 미적 품질도 고려하는 성향을 보이고 있다. 이러한 제품 표면에 미세한 변형 혹은 손상이 있을 경우, 초기 표면의 외관에 대한 만족도 및 감성 품질(aesthetic quality)은 현저히 감소될 것이다. 일반적인 표면 손상의 예로는 휘어짐(warping), 흠(chips), 균열(crack) 그리고 운동하는 물체와 마찰에 의한 스크래치(scratch) 혹은 긁힘(mar) 등이 있다.¹⁻⁶

일반적으로 다른 물체와 마찰에 의해 소재 표면에 생성되는 표면 손상 중에서 인간의 시각으로 감지(perception)될 수 있는 변형을 스크래치(scratch)로 정의한다. 즉, 소재 표면에 영구 변형된 홈(groove)이 발생한 것을 의미한다. 이런 손상은 임계 하중 이상에서 발생되며, 백화(whitening)⁷ 또는 절단(cutting)⁸ 현상이 시작되는 임계점(critical point)이다. 반면, 긁힘은 인간의 눈으로 인식하기 어려운 아주 미세한(subtle) 표면 손상을 의미한다.^{1,3} 그러나 긁힘의 양이 증가하여 긁힘 다발(group)을 형성하거나, 다른 각도에서 관찰 시 표면 손상이 인식될 수도 있다. 즉, 이런 표면 손상은 스크래치에 비해 상대적으로 낮은 수준의 하중에서 발생된다.³ 긁힘 손상도 스크래치 손상과 마찬가지로 사용자의 감성적 만족도를 감소시키는 원인이 된다. 예를 들어, 자동차 세차과정에서 브러시에

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jiweon@dongguk.ac.kr

의해 보닛 등 차체에 생성된 표면 손상이 이에 해당된다.

플라스틱 및 코팅 소재는 금속과 세라믹 소재에 비해 경량화, 비용 절감 및 친환경적 측면의 장점을 지니고 있어 산업 제품에 널리 사용되고 있다. 하지만, 이들 소재를 제품에 적용 시, 우선 고려될 사항 중의 하나는 표면 건전성(surface integrity)이라 할 수 있다. 이러한 표면 손상 즉, 긁힘과 스크래치 손상을 평가하기 위해, 다양한 산업체 평가 방법(지엠사의 GMW 14688,⁹ 포드사의 BN 108-13, 및 크라이슬러사의 LP-463DD-18-01) 등이 사용되고 있다. 하지만, 이들 시험법은 표면 손상에 대한 정량적인 평가를 제공하지 못하고, 단순히 합격 혹은 불합격(pass or fail)을 판단하는 근본적인 한계를 지니고 있다. 그리고 비교적 최근 들어 두 개의 국제 표준(ISO 19252:2008과 ASTM D7027-05)이 개발되어, 기존의 산업체 규격 보다는 표준화된 평가법을 제공하고 있지만, 여전히 스크래치 및 긁힘 손상을 정성적으로 측정하는 부분과 몇 가지 기술적 문제점을 가지고 있다는 것이 보고되고 있다.^{2,10}

소재 표면을 코팅함으로써 여러 가지 추가 기능(표면 경도, 마찰 · 마모 저항성 및 사용 수명의 증가)을 부여할 수 있다.¹¹⁻¹⁶ 실제로, 가전제품의 외장재, IT 기기 케이스 및 자동차 내장재에 고 광택 코팅을 적용함으로써 표면 건전성을 부가할 뿐 아니라, 미적 · 감성적 품질도 향상시킬 수 있다. 이러한 코팅 소재의 표면 신뢰성은 주로 긁힘 손상과 연관이 있다. 앞서 언급된 바와 같이, 코팅 소재의 표면 긁힘 손상을 평가하기 위한 다양한 평가법이 존재하지만 아직 미흡한 부분이 많은 실정이다. 예를 들어, 산업체에서 보편적으로 사용되는 방법은 연필경도시험법(ASTM D 3363)이다. 이 시험법은 준비된 연필을 이용하여 표면 손상을 생성 후, 지우개로 지우게 된다. 그 이후 사람의 눈을 이용하여 정성적인 합격 혹은 불합격 판정을 하게 된다. 그러나 이 방법은 연필심의 날카로움 정도, 접촉각도 및 실험자의 주관적인 판단 등으로 인하여 시험 결과가 달라질 수 있다. 따라서 정량적이고 재현성 있는 평가가 어렵다는 문제점을 가지고 있다.¹

본 연구에서는 긁힘 표면 손상을 유도할 수 있는 스크래치 팁을 이용하여, 다양한 광택을 지닌 우레탄-아크릴 코팅 소재의 긁힘 거동을 고찰하고자 한다. 그리고 고분자 코팅 소재의 긁힘 저항성을 정량적으로 평가하는 새로운 평가방법 및 이에 대한 유효성을 검증하고자 한다. 또한 긁힘 손상과 관련있는 물리적 인자(광택도, 휘도)를 제안하고, 이들 인자들과 긁힘 시인성과의 상관관계를 규명하고자 한다.

실 험

재료. 실험에 사용된 시험편의 기재(substrate)는 검정색의 polycarbonate/acrylonitrile butadiene styrene(PC/ABS)을 사용하였다. 준비된 PC/ABS 기재는 현재 가전제품 및 IT기기 등에 널리 사용되는 고분자 소재로서, 시험편은 150×100×3 mm³

Table 1. Virgin Gloss and Luminance of Test Specimens

Specimen	Gloss	Luminance	Remark
B 100	92±0.3	3.9±0.0	High gloss group
B 70	77±3.9	8.5±0.7	
B 50	57±1.4	14.9±0.1	
B 30	34±1.2	19.3±0.2	Low gloss group
B 10	21±0.2	21.7±0.1	

의 크기로 준비되었다. 시험편 표면에 우레탄-아크릴수지(urethane-acrylate)를 스프레이 건(spray gun)으로 도포 후 UV 경화시켰다. 하도 코팅(under coat)은 약 8~10 µm, 상도 코팅(top coat)은 약 30~35 µm 두께로 조절하였다. 특히 상도 코팅 시, 다른 광택도를 가진 표면을 만들기 위해 소광제(fumed silica)의 양을 조절하여 표면 광택도를 조절하였다. 모든 시험편은 SSCP사로부터 제공받았다. 시험편은 총 다섯 종류로, 초기 광택도 값에 따라 B100, B70, B50, B30, B10으로 명명하였다. 긁힘 손상 생성 전 측정된 시험편의 초기 광택도와 휘도는 Table 1과 같다.

긁힘 및 스크래치 실험. 긁힘 손상을 생성하기 위해 제작된 스크래치 팁(tip)은 15 mm의 직경(diameter)으로, 코팅 표면과 면 접촉(area-contact)이 가능하도록 제작되었다. 팁의 바닥면에 양면테이프(double-sided tape)를 이용하여 특정 거칠기(600 grit)를 갖는 샌드페이퍼(sandpaper)를 부착하였다. 실험 전 스크래치 팁의 바닥면에 시험편 표면과 정확히 면 접촉이 되도록 교정(calibration)을 하였다. Figure 1은 사용된 스크래치 팁의 개략도를 보여준다.

긁힘 및 스크래치 실험은 CETR사의 UMT-2 스크래치 장비를 이용하여 상온에서 수행하였다. 긁힘 길이는 60 mm로 설정하고, 긁힘 폭이 45 mm가 되도록 세 번 연속하여 긁힘 실험을 진행하였다. 스크래치 팁의 이동 속도는 1 mm/s로 고정하였다. 먼저 시험편 표면에 긁힘 손상이 생성되는 일정 하중을 결정하기 위해, 예비 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 10과 20 N의 일정 하중으로 긁힘 손상을 유도하였다.

긁힘 손상 생성 전과 후 시험편 표면을 HP사의 SCANJET

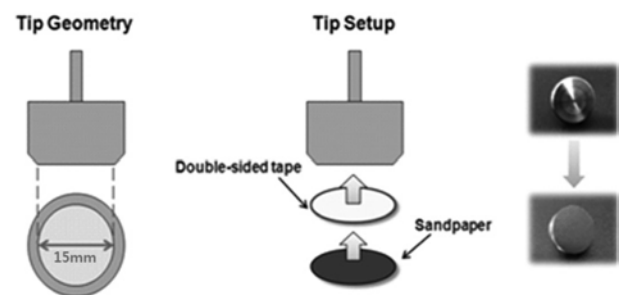


Figure 1. Schematic of scratch tip geometry proposed for mar testing.

G4050 평판 스캐너를 이용하여 디지털 이미지화 하였다. 스캔 해상도는 600×600 dpi이고 24-비트 컬러 모드에서 측정하였다.

광택도 측정. 소재 표면의 광택도(gloss)를 측정하기 위해 Konica-Minolta사의 Multi Gloss-268 Plus 광택계를 이용하였다. 광택도가 서로 다른 시험편을 동일한 조건에서 측정하기 위해, 측정 각도를 60°, 측정 면적을 9×15 mm²로 고정하였다. 최소 다섯 번 이상을 측정한 후 평균값과 표준편차를 얻었다.

산업체에서 통용되고 있는 ΔG -측정법은 광택이 있는 소재 표면의 손상 정도를 서로 비교·평가하기 위한 평가법이다. 식(1)과 같이 표면의 광택 변화량(ΔG)을 측정한다.

$$\Delta G = G_m - G_v \quad (1)$$

여기서, G_m : 굽힘 발생 후 표면 광택도, G_v : 굽힘 발생 전 표면 광택도

휘도 측정. 소재 표면의 휘도(luminance)를 측정하기 위해 Konica-Minolta사의 Multi CM-3700d 분광측색계를 사용하였다. 분광측색계를 다음의 조건으로 세팅 후 측정하였다. 직경 25.4 mm의 측정경(aperture), D/8°의 광학 구조(optical geometry) 및 D65 확산 조명의 조건으로 설정하였다.¹⁹ 여기서, 측정 모드는 정반사광과 확산반사광 모두를 포함하는 SCI(specular component included) 방식과 확산반사광만을 포함하는 SCE(specular component excluded) 방식을 각각 측정하였다. 최소 다섯 번 이상을 측정한 후 평균값과 표준편차를 계산하였다.

ΔL -측정법은 굽힘 생성 전과 후의 휘도 변화량(ΔL)을 얻기 위해 산업체에서 보편적으로 사용되고 있다.^{17,18} 즉, 식 (2)와 같이 측정한다.

$$\Delta L = L_m - L_v \quad (2)$$

여기서, L_m : 굽힘 발생 후 표면 휘도, L_v : 굽힘 발생 전 표면 휘도. 각각의 휘도(L)는 SCE 모드에서 측정된 값이다.

표면 거칠기 측정. 소재 표면의 거칠기(roughness)를 측정하기 위해 HIROX사의 KH8700 디지털 현미경을 이용하였다. 측정배율을 350배 확대한 후, 측정 길이를 800 μ m로 설정하였다. 측정 길이에 대한 표면 거칠기의 평균값(R_a)으로 나타내었다.

결과 및 토론

광택도 및 휘도 변화. Figure 2는 각각 10과 20 N의 일정 하중을 부하하여 초기 광택이 다른 우레탄-아크릴 코팅 표면에 굽힘 손상을 생성시킨 대표적인 이미지를 보여준다. 일정 하중이 증가함에 따라 다섯 시험편 모두에서 굽힘 손상이 증가함을 관찰할 수 있다. 이러한 표면 손상의 인지는 굽힘에 의한 홈 주변에서 일어나는 빛의 산란의 정도에 의존한다.¹³ 굽힘 손상에 대한 광택도의 효과는 다음 절에서 설명하고자 한다.

Figure 3은 다섯 종류의 우레탄-아크릴 코팅 소재에 굽힘 손상을 생성 후, 표면 광택도의 변화량(ΔG)과 휘도의 변화량(ΔL)을 나타내고 있다. 같은 광택을 지닌 코팅 소재는 일정 하중이 10에서 20 N으로 증가함에 따라 ΔG 와 ΔL 값이 증가하였다. 준비된 다섯 종류의 시험편 모두에서 동일한 결과를 보인다. 좀 더 자세히 관찰하여 보면, 코팅 소재의 초기 광택도가 높을수록 ΔG 값이 커지는 경향을 볼 수 있다. 즉, 다섯 종류의 시험편 중 고 광택군에 속하는 B100과 B70 시험편은 같은 일정 하중 조건하에서 굽힘 손상이 생성되더라도, 저 광택군에 속한 B30과 B10 시험편에 비해 더욱 큰 표면 손상이 생성된 것처럼 보인다. 휘도의 변화량(ΔL)도 앞서 설명한 광택도의 결과와 거의 유사한 경향을 보인다.

그러나 이러한 결과는 사람이 인지하는 표면 손상정도로 정의되는 ‘시인성(visibility)’과 비교하면 흥미로운 점이 발견된다. 결론적으로 앞선 결과들(ΔG 와 ΔL)과 시인성은 서로 일치하지 않음을 알 수 있다. 굽힘 손상을 디지털 이미지화한

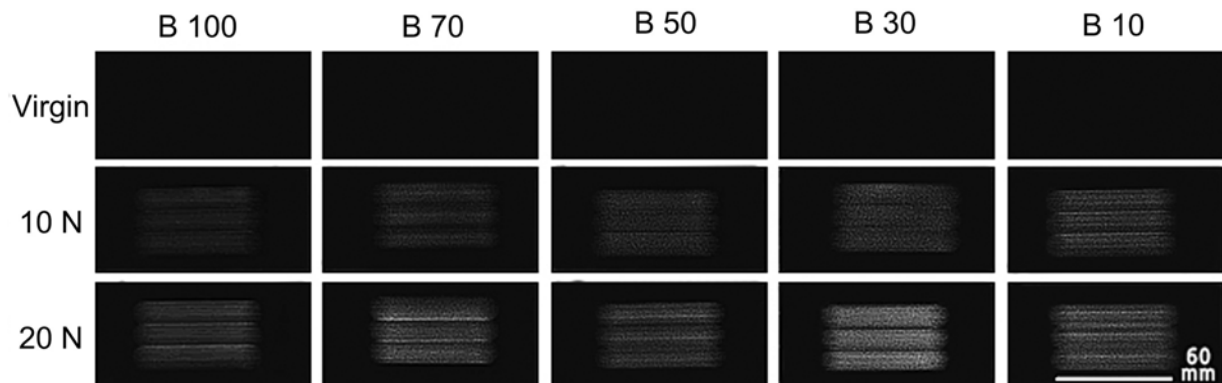


Figure 2. Optically scanned images of mar-induced urethane-acrylate coated surfaces based on a constant load mar test of 10 and 20 N using an area-contact tip where the sand paper of 600 grit is attached.

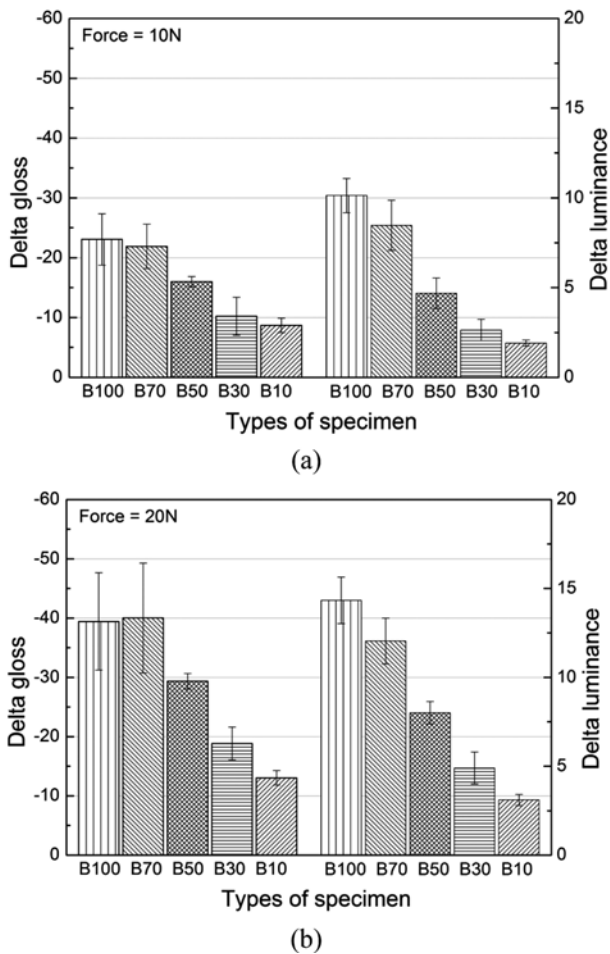


Figure 3. Delta-gloss and delta-luminance of the mar-induced urethane-acrylate coated surfaces with constant normal loads: (a) 10 N; (b) 20 N.

Figure 2에서 나타나듯이, 시인성 관점에서 긁힘 손상 정도를 평가하면, 광택도가 다른 다섯 종류의 시험편에서 큰 차이는 없어 보이지만, 고 광택군에서 오히려 표면 손상 정도가 작아 보인다. 물론 시인성 평가법은 다소 관찰자의 주관적 성향이 포함된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 본 연구에서는 열 명 이상의 관찰자를 통해 결과의 유효성을 검증하였다. 일반적으로, 긁힘 및 스크래치 손상을 평가할 때, 소재 표면 자체의 손상 정도와 더불어, 그 손상 정도를 인간이 어떻게 인지하는가에 대한 시인성 관점도 매우 중요한 요소 중에 하나이다.^{3,10,17,18} 예를 들어, 표면 손상이 아무리 심각하더라도, 주변 환경 혹은 배경에 기인하여 사람들이 손상 정도를 인지하지 못한다면, 이는 긁힘 혹은 스크래치 손상이 생성되었다고 말할 수 없기 때문이다.

현재까지 코팅 소재의 긁힘 손상 평가 시, 일반적으로 광택도 및 휘도의 변화량을 측정하고 있다. 동일한 광택도와 휘도를 지닌 시험편은 기존의 평가 방법인 ΔG -측정법 혹은 ΔL -

측정법으로 평가가 가능할 것으로 사료된다. 하지만, 본 연구에서와 같이 다양한 광택도와 휘도를 갖는 시험편을 서로 비교·평가할 경우, 기존 평가법을 그대로 적용한다면 정확한 긁힘 손상을 측정하기 어려워 보인다. 특히 고 광택 시험편을 평가할 때, 이런 문제점은 더 커질 것으로 판단된다. 즉, 이들 결과값과 시인성의 결과가 상반되는 결과를 초래하게 된다. 광택도, 휘도 및 시인성간의 근본적인 상관관계를 이해하고 이들 결과가 상호 일치함을 설명할 수 있는 연구가 선행되어야 할 것이다. 따라서 광택도, 휘도 및 시인성의 상관관계를 모두 만족시킬 수 있는 새로운 평가법이 요구된다.

ΔG -측정법 및 ΔL -측정법의 개선. 임의의 물체에 발생하는 표면반사(surface reflection)는 경면반사(specular reflection)와 확산반사(diffuse reflection)로 구성된다. 즉, 식 (3)과 같이 총 반사율(ρ_{total})은 표면에서 일어나는 경면반사율과 확산반사율의 합으로 정의된다.¹⁸

$$\rho_{total} = \rho_{specular} + \rho_{diffuse} \quad (3)$$

일반적으로 경면반사는 주변 광원(light source)에 의한 입사광(incident light)의 파장 크기보다 더 매끄러운(smooth) 표면(혹은 고 광택 표면)에서 주로 일어난다. 하지만, 표면 거칠기가 증가할수록(혹은 광택도가 감소) 경면반사는 급격히 감소하게 되고 확산반사가 상대적으로 증가하면서 주요 성분을 차지하게 된다.¹ 따라서 총 반사율은 항상 일정하게 유지된다. 만약, 소재 표면에 긁힘 혹은 스크래치가 생성되었다고 가정한다면, 인간의 시각은 표면 손상 전·후의 표면 반사율의 차이를 인지하여 표면 손상 여부를 판정하게 될 것이다. 왜냐하면 인간은 오직 산란된 빛만 인지할 수 있기 때문이다.¹⁸

광택도 및 휘도 측정 방법에서 나타나듯이, 다양한 광택도 및 휘도를 가진 시험편의 긁힘 손상을 평가하기 위해서 그들의 변화량 값을 측정하면 긁힘 시인성과 일치하지 않는 문제점이 있다. 이런 문제점의 원인을 알아보고자 한다.

첫째, 광택계를 이용한 표면의 광택도를 측정 시, 경면반사 성분만을 이용하여 측정한다. Figure 4는 일정 하중의 증가에 따른 광택이 다른 다섯 시험편의 광택도의 변화 추이를 나타낸다. 이런 변화의 추이를 자세히 살펴보면, 고 광택 시험편의 경우, 저 광택 시험편에 비해, 같은 하중 조건에서 긁힘 손상 생성 시, 정반사광량이 크게 감소하여 광택도 변화량이 크게 나타난다. 하지만, 이 값은 표면 손상 부위 자체의 변화량을 나타내는 값일 뿐, 주변 비 손상 부위와의 시인성 관계를 설명하지 못한다. 인간의 시인성은 손상 부분과 주변 배경 등과 같은 다양한 조건과 연계성을 가지며 손상 정도를 인지하게 된다. 따라서 주변 배경 및 조건에 영향을 받지 않도록 무차원화(normalization)할 필요가 있다. 식 (4)와 같이, 식 (1)을 비 손상 부위의 광택도 값(G_v)으로 나누어 줌으로써 무차원화시킬 수 있다.¹

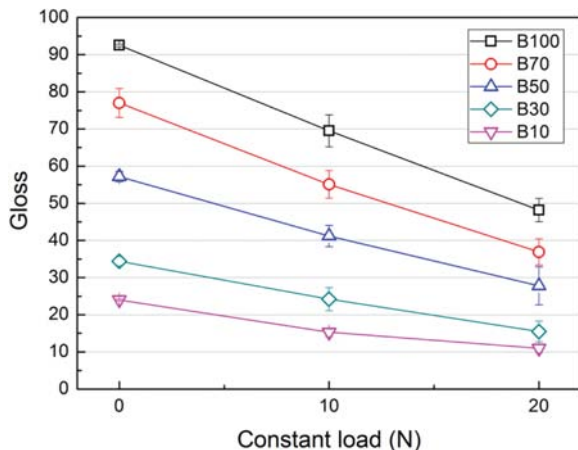


Figure 4. Change in gloss for the mar-induced urethane-acrylate coated surfaces with respect to constant loads.

$$\% G_{\text{norm}} = \frac{\Delta G}{G_v} \times 100 \quad (4)$$

여기서, % G_{norm} : 무차원화된 광택도

둘째, 일반적으로 분광측색계를 이용하여 소재 표면의 해당 휘도값을 얻기 위해, SCE 모드로 설정 후 측정하게 된다. SCE 모드는 적분구의 빛 덩(light trap)을 열어 경면반사광을 제거하고 확산반사광만을 이용하여 측정하게 된다. 이럴 경우, 고 광택인 시험편은 저 광택에 비해, 초기 확산반사 광량(light intensity)이 작아지게 된다. Figure 5는 일정 하중의 증가에 따른 광택이 다른 다섯 시험편의 휘도의 변화 추이를 나타낸다. 휘도의 변화 추이도, 앞선 광택도 변화와 같이, 같은 하중에 의한 미세한 굽힘에도 고 광택 시험편들은 확산반사 광량이 저 광택 시험편보다 훨씬 큰 변화량을 가지게 된다. 이 또한 굽힘 손상을 평가 시, 주변 배경과의 연관성을 고려하지 않고 있는 문제점이 있다. 따라서 식 (2)도 임의의 값으로 무차원화하는 것이 필요하다. 하지만, 식 (4)와 같이 초기 휘도 값으로 휘도 변화량을 나누는 것은 문제가 있어 보인다. 왜냐하면, 고 광택의 경우 저 광택과 비교하면, 휘도 변화량이 상대적으로 크고, 초기 휘도값은 작은 값을 가진다. 즉, 큰 휘도 변화량을 작은 초기 휘도 값으로 무차원화하면 그 결과 값이 더 커지는 문제가 발생한다.

여기서, 좀 더 광학적 관점에서 관찰해 보면, 휘도 변화량은 겉으로는 확산반사 광량의 차이처럼 보이지만, 실제 경면 반사 광량의 차이에서 비롯되었다고 볼 수 있다. 즉, 총 반사량의 관점을 고려해야 한다. 식 (2)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$L_m - L_v = L_m^{\text{diffuse}} - L_v^{\text{diffuse}} \quad (5)$$

총 반사량은 항상 일정하므로,

$$(L_m^{\text{specular}} + L_m^{\text{diffuse}}) - (L_v^{\text{specular}} + L_v^{\text{diffuse}}) = 0 \quad (6)$$

$$L_m^{\text{diffuse}} - L_v^{\text{diffuse}} = -(L_m^{\text{specular}} - L_v^{\text{specular}})$$

식 (6)을 L_v^{specular} 로 무차원화 하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{-(L_m^{\text{specular}} - L_v^{\text{specular}})}{L_v^{\text{specular}}} \times 100 \quad (7)$$

여기서, $L_v^{\text{specular}} = L_v^{\text{SCI}} - L_v^{\text{SCE}}$ 이므로, 식 (8)과 같이 정리된다.

$$\% L_{\text{norm}} = \frac{\Delta L}{[L_v^{\text{SCI}} - L_v^{\text{SCE}}]} \times 100 \quad (8)$$

여기서, % L_{norm} : 무차원화된 휘도, L_v^{SCI} 는 SCI 모드에서 측정된 굽힘 생성 전 휘도, L_v^{SCE} 는 SCE 모드에서 측정된 굽힘 생성 전 휘도

식 (4)를 이용하여 굽힘 생성 전·후의 광택도 변화량(ΔG)을 무차원화된 광택도로 표현하여 Figure 6의 왼쪽에 나타내었다. 일정 하중이 10에서 20 N으로 증가함에 따라 굽힘 손상이 증가하였다. 이는 Figure 2의 결과와 같은 경향을 보인다. 하지만, 광택도가 다른 시험편의 결과를 보았을 때, Figure 6은 Figure 3의 결과와 상반된 굽힘 저항성(mar resistance)을 보인다. 즉, 고 광택군 시험편이 저 광택군 시험편보다 다소 우수한 굽힘 저항성을 관찰할 수 있다. 이는 앞서 관찰된 굽힘 시인성정도도 잘 일치함을 보인다. 또한 굽힘 손상 정도를 백분위로 나타냄으로써, 좀 더 정량적이고 수치화된 굽힘 손상을 나타내는 지표(index)로써 상호 비교·평가가 가능함을 알 수 있다.

그리고 식 (8)을 이용하여 굽힘 생성 전·후의 휘도 변화량(ΔL)을 무차원화된 휘도로 표현하여 Figure 6의 오른쪽에 나타내었다. 앞서 설명한 무차원화된 광택도의 결과와 유사

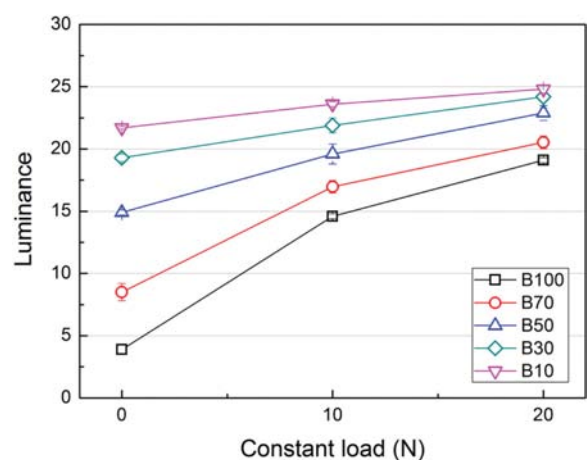


Figure 5. Change in luminance for the mar-induced urethane-acrylate coated surfaces with respect to constant loads.

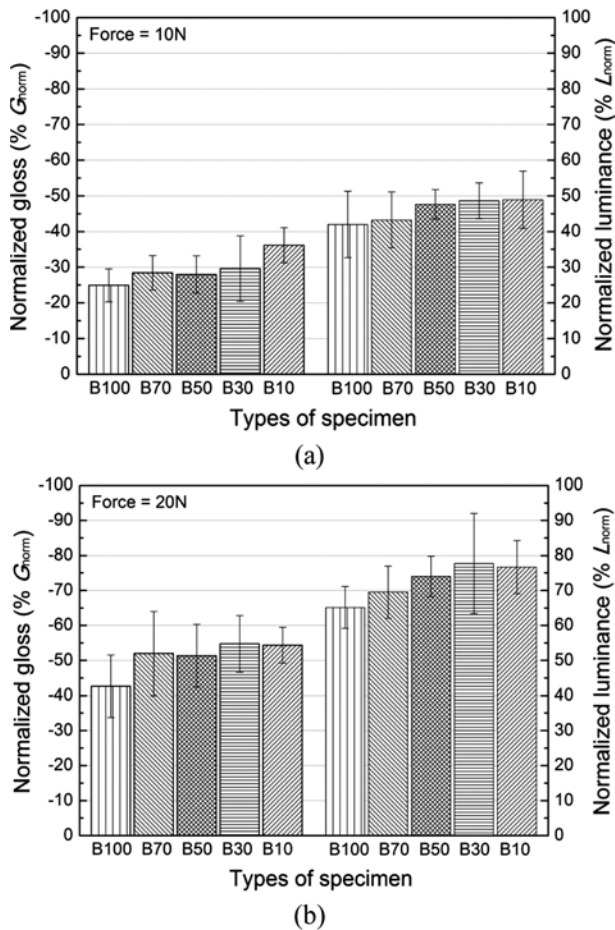


Figure 6. Normalized gloss and luminance of the mar-induced urethane-acrylate coated surfaces with constant normal loads: (a) 10 N; (b) 20 N.

한 결과로써, 일정 하중이 증가함에 따라 긁힘 손상은 증가하였고, 고 광택군이 우수한 긁힘 저항성을 가진다.

광택도, 휘도, 및 시인성의 상관관계 규명. 긁힘 시인성은 소재 표면에 미세한 흠의 생성에서부터 비롯된다. 흠이 성장하여 흠 다발을 이루거나 스크래치 손상으로 발전하게 된다.¹⁹⁻²¹ 이러한 흠과 흠 다발은 빛을 반사하거나 산란하게 되어 인간은 표면 손상을 인지할 수 있게 된다. 최근 관련 문헌에¹ 의하면, 일정한 광택도를 지닌 우레탄-아크릴을 코팅한 소재 표면에서 다림질 효과(ironing effect)가 있음을 제시하였다. 다림질 효과란 비교적 낮은 하중에서 발생하는 현상으로, 다소 거칠기가 있는 표면이 스크래치 팁에 의해 눌러져 미세한 흠을 만들며, 다림질하듯 표면이 더욱 매끄럽게 되는 것을 말한다. 이때 초기 광택도(주변배경)보다 광택도가 증가하는 흥미로운 결과를 보인다. 이러한 광택도 증가(경면반사율 증가)도 인간의 눈으로 인지되어 긁힘 손상으로 분류되고 있다. 이와 같이 표면 손상의 시인성은 주변 배경과 손상 부위에서의 확산 및 경면반사율의 변화와 연관이 있음을 알 수 있다.

Figure 7은 고 광택 및 저 광택 시험편의 긁힘 손상 발생 시 표면 반사율, 광택도 및 휘도의 변화를 설명한 개략도이다. 초기 광택도가 높다는 의미는 표면이 거울(mirror)처럼 경면반사율이 높고 확산반사율이 상대적으로 낮다고 볼 수 있다.^{1,18} 따라서 초기 휘도값도 낮을 것이다. 이러한 차이는 표면 형상 즉, 표면 거칠기의 차이에서 기인한다. Figure 8은 긁힘 손상 생성 전, 시험편의 초기 표면 거칠기를 보여준다. 즉, 표면 거칠기가 증가하면 빛의 확산 반사가 증가하여 광택도가 떨어지는 반면 휘도는 커진다. 즉, 표면 거칠기는 광택도와는 반비례하고, 휘도와는 비례관계가 있음을 알 수 있다.

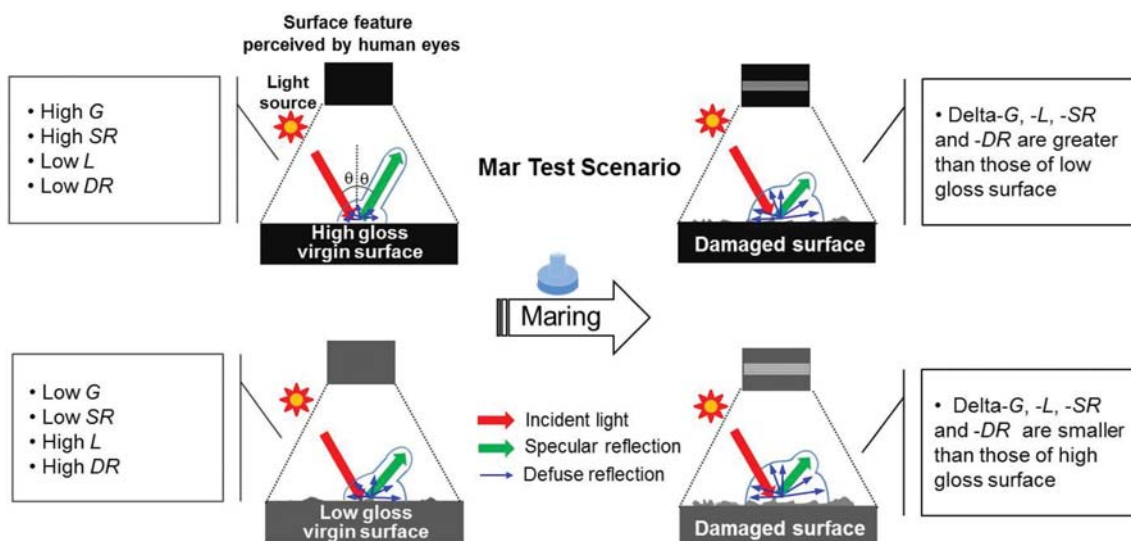


Figure 7. Schematic diagram of the visual perception of mar-induced surface deformation on high gloss and low gloss coatings: G=gloss, L=luminance, SR=specular reflection, DR=diffuse reflection.

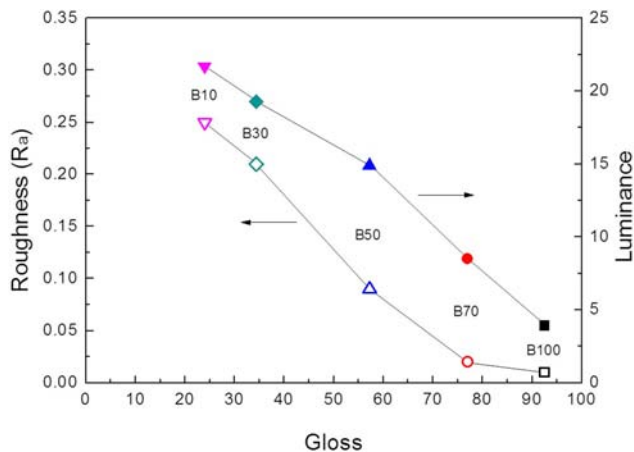


Figure 8. Roughness, gloss and luminance values of the virgin urethane-acrylate coated surfaces.

고 광택군의 시험편의 경우, 표면을 샌드페이퍼를 이용하여 문지르게 되면 급격한 광택의 감소(경면반사율 감소), 휘도의 증가(확산반사율 증가)를 초래하게 된다. 이런 물리량의 변화(ΔG 와 ΔL)는 고 광택군 시험편이 저 광택군 시험편에 비해, 비교적 큰 값을 가진다. 이런 단순 물리량을 가지고 코팅 소재 표면의 긁힘 저항성을 평가하는 것은 적당하지 않다고 판단된다. 왜냐하면, 긁힘 시인성은 표면 손상 그 자체만으로 평가되는 것이 아니라, 주변 환경 즉, 배경, 광원, 측정 각도, 광택, 휘도, 색상, 표면 조도 등 여러 가지 요인의 영향을 받기 때문이다. 따라서 이런 조건들에 의해 영향을 받지 않도록 무차원화함으로써, 물리량이 아닌 재료 물성(material property)으로써 정량적이고 재현성 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 다른 광택도와 휘도를 지닌 코팅 소재들의 긁힘 손상 정도를 동시에 비교·평가할 수 있을 것이다.

결 론

가전제품 및 IT 기기의 케이스에 많이 사용되는 우레탄-아크릴 코팅 표면의 긁힘 거동을 조사하였다. 광택계 및 분광색측계를 이용하여 코팅 표면의 긁힘 손상을 평가하였다. 본 연구를 통해서 광택도, 휘도 및 시인성의 상관관계를 광학적 측면에서 설명하였다. 또한 긁힘 손상을 정량적으로 평가할 수 있는 무차원화된 광택도(% G_{norm}) 및 휘도(% L_{norm}) 등의 재료 물성을 제시하였다. 즉, 긁힘 시인성의 증가는 무차원화된 광택도 및 휘도의 증가로 표현 될 수 있음을 확인하였다. 따라서 인간이 느끼는 감성과 광학 장비를 이용한 평가법이 상호 만족하는 정량적 긁힘 저항성 평가법을 제안하였다.

감사의 글: 본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업(412-112-011)” 및 지식경제부 화학소재원천기술 개발 사업의 일환인 “화학소재정보은행 구축사업”의 지원을 받았기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. I. Weon, *Macromol. Res.*, **20**, 1002 (2012).
2. J. I. Weon, I. H. Cho, S. Y. Song, J. B. Lee, K. Y. Choi, S. G. Lee, and J. H. Lee, *Macromol. Res.*, **18**, 610 (2010).
3. R. L. Browning, M. M. Hossain, J. Li, and H.-J. Sue, *Tribol. Int.*, **44**, 1024 (2011).
4. T. W. Seo and J.-I. Weon, *J. Mater. Sci.*, **47**, 2234 (2012).
5. S. Kwak, D. I. Noh, H. J. Chun, Y. M. Lim, Y. C. Nho, J. W. Jang, and Y. B. Shim, *Macromol. Res.*, **17**, 603 (2009).
6. K.-W. Baek, S.-G. Lee, J. H. Lee, K.-Y. Choi, and J.-I. Weon, *Polym(Korea)*, **33**, 273 (2009).
7. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine, ASTM D7027 (2005).
8. International Standard Organization, Plastics. Determination of Scratch Properties, ISO 19252 (2008).
9. General Motors World Spec, Scratch and Mar Resistance, GMW 14688 (2007).
10. J.-I. Weon, S.-Y. Song, K.-Y. Choi, S.-G. Lee, and J. H. Lee, *J. Mater. Sci.*, **45**, 2649 (2010).
11. R. L. Browning, G. T. Lim, A. Moyse, H.-J. Sue, H. Chen, and J. D. Earls, *Surf. Coat. Technol.*, **201**, 2970 (2006).
12. J. E. Pickett, D. A. Gibson, and M. M. Gardner, *Polym. Degrad. Stab.*, **93**, 1597 (2008).
13. V. L. Houerou, C. Gauthier, and R. Schirrer, *J. Mater. Sci.*, **43**, 5747 (2008).
14. C. M. Seubert, M. E. Nichols, V. A. Cooper, and J. L. Gerlock, *Polym. Degrad. Stab.*, **81**, 103 (2003).
15. T. Nguyen, J. Martin, and E. Byrd, *J. Coat. Technol.*, **75**, 37 (2003).
16. T. Nguyen, J. Martin, E. Byrd, and N. Embree, *Polym. Degrad. Stab.*, **77**, 1 (2002).
17. P. Liu, R. L. Browning, H.-J. Sue, J. Li, and S. Jones, *Polym. Test.*, **30**, 633 (2011).
18. H. Jiang, R. L. Browning, M. M. Hossain, H.-J. Sue, and M. Fujiwara, *Appl. Surf. Sci.*, **256**, 6324 (2010).
19. H. Jiang, R. Browning, and H.-J. Sue, *Polymer*, **50**, 4056 (2009).
20. E. Moghbelli, R. L. Browning, W. J. Boo, S. F. Hahn, L. J. E. Feick, and H.-J. Sue, *Tribol. Int.*, **41**, 425 (2008).
21. K. Friedrich, H.-J. Sue, P. Liu, and A. A. Almajid, *Tribol. Int.*, **44**, 1032 (2011).