

백색광 주사간섭법을 이용한 표면미세형상 측정과 그 적용

성용주[†] · 류정용 · 송봉근

(2004년 5월 9일 접수: 2004년 10월 29일 채택)

Application of White Light Interferometry Method for the Measurement of Surface Micro-structure of Paper Products and Prints

Yong-Joo Sung,[†] Jeong-Yong Ryu, and Bong-Keun Song

(Received on May 9, 2004: Accepted on October 29, 2004)

ABSTRACT

A white light interferometry (WLI) method for investigating surface micro-structure was introduced. Brief description of the principle of this method was provided. The surface structure of various samples, for example, a liner board paper, a pigment coated paper, a intaglio printed paper and a polymer laminated paper were tested and characterized with the WLI method. The data showed the WLI method provided very detailed information about surface topography, which were little affected by the surface condition such as color, opacity, roughness, etc. The data stitching mode of the WLI method could provide high spatial resolution over a large field-of-view, which made it possible to obtain the statistically valid results. Fast and high repeatability also made this method a promising way for investigating the surface micro-structure of paper products and prints.

Keywords : white light interferometry method, surface topography, roughness, surface micro-structure

• 한국화학연구원 펄프제지연구센터 (Pulp and Paper Research Center (PPRC), Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT), P.O. Box 107, Yusung, DaeJeon, 305-606, Korea)

[†] 주저자(Corresponding author) : E-mail : yosung@kRICT.re.kr

1. 서론

종이의 표면미세구조는 종이의 가공공정 뿐만 아니라 최종 품질에도 큰 영향을 미치는 대단히 중요한 인자의 하나로 인식되어 왔는데, 이러한 표면 구조의 특성은 코팅 시 코팅층 불균일의 원인이 되고, 인쇄불량 특히 오프셋 인쇄에서의 불균일한 잉크의 전이나 그라비아 인쇄에서의 missing dot 문제 등을 유발하여 최종 품질에 직접적인 영향을 미치게 된다. 또한 완성된 지제품의 광학적 특성 특히 광택도 등은 표면구조와 직접적인 관계가 있다는 것은 잘 알려져 있다.¹⁾ 더욱이 공정상에서 지류의 와인딩, 유통, 지류가공 공정이나 실제 인쇄 시 급지, 박스의 적층 등에 영향을 미치는 지류제품의 표면마찰계수도 표면구조와 직·간접적인 관계가 있다.²⁾ 따라서 품질 및 생산 공정의 최적화를 위해 표면구조에 대한 깊이 있는 연구가 요구되어 왔으며 특히 디지털 인쇄 등과 같은 새로운 인쇄기술의 도입 등에 인쇄기술의 발전과 함께 인쇄품의 고품질화와 다양한 기능성 겸비에 대한 요구가 커짐에 따라 표면구조에 대한 관심이 커져가는 실정이다.

이러한 표면미세구조의 중요성 때문에 그 특성을 적절히 측정하고 평가하기 위한 다양한 방법들이 개발, 적용되어 왔는데, 평가하는 방법에 따라, 그리고 표면구조를 어떻게 정의하는가에 따라 평가된 결과가 다를 수 있기 때문에 최종 목적에 가장 알맞은 측정 방법을 개발, 적용하여야 한다.³⁾ 제지 업계에서 현재 종이 표면 측정에 가장 널리 사용되고 있는 방법으로는 매끄러운 기준면을 일정한 압력으로 종이 표면에 압착한 후 종지와 기준면 사이로 지나가는 공기의 흐름 정도를 측정하여 간접적으로 표면의 평활도를 측정하는 air-leak methods를 들 수 있다. 이것은 종이의 표면이 평활할수록 공기의 흐름이 원활하지 않은 특징을 이용하는 방법으로 가해지는 압력이나 기준면의 크기, 또 측정되는 파라미터에 따라 Bekk tester, Gurley-Hill tester, Bendtsen tester, Sheffield tester, Parker Print-Surf tester 등 다양한 측정기기 및 방법들이 소개되어 왔다. 이 방법들은 측정이 간단하고 측정속도가 빠르기 때문에 현장에서의 품질관리 등에 범용적으로 많이 사용되고 있다. 특히 Parker

Print-Surf tester의 경우 측정되는 공기의 유속과 샘플 표면 거칠기와의 관계식을 바탕으로 결과 값을 종이표면의 거칠기 값으로 환산하여 제공하고 또 그 값의 정확도가 상대적으로 우수하기 때문에 인쇄용지 등의 거칠기 시험방법으로 가장 널리 사용되고 있다. 하지만 이러한 공기의 유동을 응용한 간접 표면 측정 방법의 경우 다공성 물질인 종이에 적용 시 종이내부로의 공기의 유동에 의해 측정값에 오차를 가져올 수 있고,⁴⁾ 표면구조에 대한 보다 자세한 정보 즉, 거칠음을 유발하는 불균일한 구조의 크기나 분포 등을 제시하기보다는 일정 면적에서의 단편적인 평균값만을 측정할 수 있기 때문에 표면구조에 대한 깊이 있는 분석에 제약이 있다.⁵⁾

이러한 단점들을 극복하기 위하여 표면구조의 프로파일을 직접 측정하는 방법들이 제안되었는데 대표적인 방법으로는 미세한 침이나 또는 레이저를 활용한 센서 등으로 표면의 프로파일을 측정하는 profilometry 법을 들 수 있다. 특히 많이 사용되는 Stylus profilometer 측정법은 사용되는 측정침의 크기 및 모양에 따라 다르지만(Perthometer, TalySurft, Alphastep, Surfctest) 마이크로미터 수준의 정밀도로 표면의 프로파일을 측정하고, X-Y 스테이지를 적용함에 따라 3차원적으로 표면구조를 표현하여 변이의 크기에 따른 분석 등 표면구조에 대한 좀더 다양한 정보를 얻어낼 수 있는 장점이 있다.⁶⁾ 그러나 이 방법은 접촉식 측정이기 때문에 데이터가 표면의 구조적인 특성 즉 표면의 유연성 등에 영향을 받기 쉽고 또한 측정후 측정침에 의한 표면의 마크가 발생함에 따라 표면구조와 다른 특성, 즉 인쇄적성 등과의 직접적인 상관관계를 평가하는데 어려운 단점들이 지적되어 왔다.⁷⁾ 이러한 문제점을 극복하기 위해 접촉 시 침대신에 광학침을 사용하는 방법들이 개발되어 적용되어 왔는데,⁸⁾ 이 광학침은 표면의 높이 방향에서의 정밀도는 대단히 뛰어난 반면 그 평면방향에서의 정밀도가 광학적인 한계로 다소 떨어지고 또한 각 포인트별로 하나씩 측정하기 때문에 넓은 면적을 측정하거나 통계적으로 유의한 만큼 충분한 시험결과를 확보하기 위해서는 그 측정시간이 상당히 소요되는 단점을 가지고 있다.

최근 들어 기존의 다양한 표면측정방법들이 가

지고 있는 단점들을 보완하면서 좀더 정밀하게 표면구조를 측정할 수 있는 방법들이 많이 개발되는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최근 주목받고 있는 백색광의 간섭무늬를 이용하는 WLI(White Light Interferometer)를 소개하고 종이표면구조 연구에의 적용가능성을 알아보려고 한다. 빛의 파동성을 응용한 이 방법은 반도체나 평판디스플레이 등의 전자 산업 등 좀 더 정밀한 표면 가공 부품의 미세표면구조를 검사하는데 널리 사용되고 있는데, 나노미터의 정밀도로 간단하고 빠르게 표면을 측정할 수 있어서 지류제품의 표면미세구조특성을 평가하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 본고에서는 측정원리 및 종이표면구조에의 적용가능성 등을 살펴보고자 하였다.

2. 백색광 간섭 표면 측정법

2.1 측정원리

백색광 간섭 표면 측정은 빛의 파동성이 유발하는 간섭현상(interference)을 이용하는 방법으로 그 기본원리는 Fig. 1에 설명된 바와 같다. 같은 광원에서 출발한 빛이 광분할기(beam splitter)에 의해 나뉘어지고, 이 두 빛이 서로 다른 광경로(optical path)를 이동하여 합쳐질 때 두 빛이 지난 거리차에 따라 간섭신호가 발생하게 되는데 이때의 간섭정도는 합성된 빛의 강도(intensity)로 정량화될 수 있다. 레이저 등의 단일파장의 단색광의 경우에는 가간섭 거리(Temporal coherence length)가

길지만 넓은 주파수 대역을 가지는 백색광의 경우에는 가간섭 거리가 수 마이크로미터 정도로 짧다. 따라서 Fig. 1의 오른쪽에서 보듯이 광위상차 수 마이크로미터 이내에서 광간섭강도가 Sinc함수의 형태를 띠게 된다. 이 광간섭강도는 빛을 조사하는 프로브와 측정점과의 거리에 의해 달라지게 되는데 측정점이 간섭 프로브의 초점면과 정확하게 일치하는 경우 가장 강한 간섭신호가 발생하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 카메라의 자동초점기능과 유사하게 프로브를 수 나노미터의 분해능을 가진 압전소자 (Piezo Electric Actuator)로 이동시키게 되면 각각의 화소점에서의 최대 광간섭강도를 나타내는 이동거리를 구할 수 있게 되는 것이다. 또한 실제 압전소자의 이동은 더 작은 범위에서 이루어지므로 Z-direction 정밀도는 0.1나노미터까지도 가능한 것으로 알려져 있다. 본 장비의 repeatability (10 nm)를 고려하여도 나노미터 수준에서의 미세형상 및 거칠기를 측정할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 각각의 화소에서의 높이에 대한 정보들은 전체 화소에서 동시에 저장되어 3D 프로파일 정보로 제공되어진다. 본 연구에서는 640×480개의 화소로 이루어진 CCD 센서를 기준으로 3차원 미세 형상을 평가하였다.

Fig. 2는 백색광 간섭 표면 측정기의 표면 거칠기 측정원리를 보여주는 실례이다. 50원권 주화의 양각된 글자('o' 부분)를 본 측정기를 사용하여 측정하였는데 실제 이미지로 보여주는 영상에서 백색광의 간섭무늬를 확인할 수 있다. 이러한 간섭무늬는 측정되는 범위 내에서 센서와 같은 거리를 가지는, 즉 표면 높이가 같은 부분에서 동시에 나타나게 된다

Fig. 2에서 설명되었던 백색광 간섭무늬를 바탕

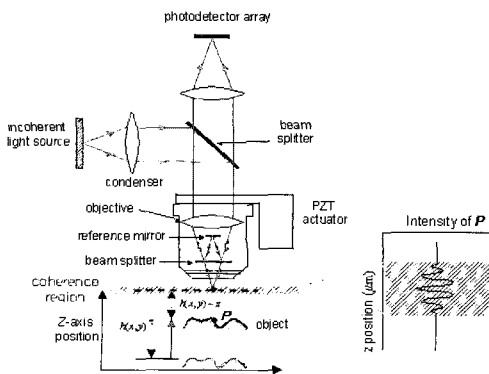


Fig. 1. Principle of white light interferometer method (Nano System Co., Ltd.).

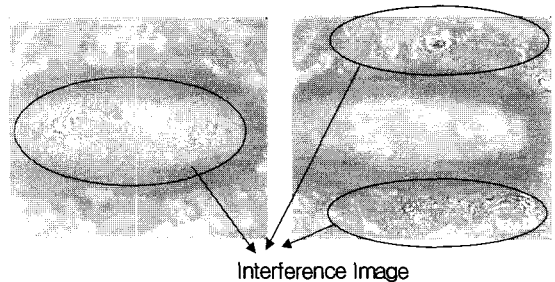


Fig. 2. Interference image on the surface of a coin.

으로 측정된 표면의 삼차원 미세구조는 Fig. 3과 같다. 약 30 마이크로미터의 깊이의 홈을 둘러싼 형태의 요철부위를 나타내고 있는데 라인 프로파일을 나타낸 Fig. 4에서 더욱 정확히 정량적으로 표면의 굴곡을 확인할 수 있다.

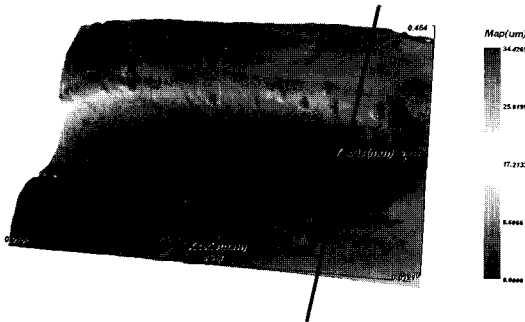


Fig. 3. The 3D profile obtained from the coin in Fig. 2.

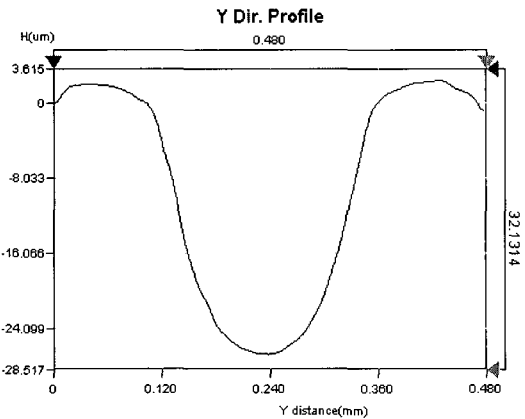


Fig. 4. Line profile of the coin in Fig. 3.

2.2 Stitching method

본 연구에 사용된 백색광 간섭 표면 측정기는 측정샘플의 성상에 따라 측정 정확도가 결정되는데 이에는 샘플 표면의 거칠기와 색 등 다양한 요인이 영향을 미친다. 너무 거친 종이 표면 즉 캘린더링이 되지 않은 상태의 종이 샘플의 경우에는 WLI 측정 장치의 가시도(visibility)가 낮은 이유로 즉, 간섭 신호의 선명도가 떨어지기 때문에 실제 데이터에 심한 노이즈가 발생하는 문제점이 있다. 특히, 이러

한 문제는 프로브에서 사용되는 렌즈의 배율이 낮을수록 더욱 조장되는데 만일 고배율의 렌즈 예를 들어 10배 이상의 고배율 렌즈를 사용하는 경우에는 이러한 노이즈를 상당부분 감소시킬 수 있다. 그러나 고배율의 렌즈를 사용하는 경우 상대적 FOV(Field of View)가 작아져서 실제 측정면적이 줄어드는 단점이 있다(0.640×0.48 mm). 이러한 단점을 극복하기 위해서 본 실험에 사용된 표면측정기의 경우 넓은 면적에 대하여 여러 개의 작은 이미지를 측정하고 그러한 각각의 이미지들을 합쳐서 큰 면적을 다시 구성하여 분석하는 Stitching Mode를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 골판지 표면지의 표면 평가

골판지 표면지의 표면 특성은 인쇄적성, 표면 마찰력, 골심지 등과의 접착 시 접착제의 도포량 등 다양한 품질특성에 직간접적인 영향을 미치게 된다. 하지만 골판지 표면지의 경우, 특히 인쇄용지와 비교해 매우 거친 표면을 가지고 있어서 범용의 표면특성평가 방법, 즉 기체의 흐름으로 간접적인 평가를 하는 방법으로 평가하기에는 그 거칠은 정도와 변이가 과도한 문제점이 있었다. 본 연구에서 적용

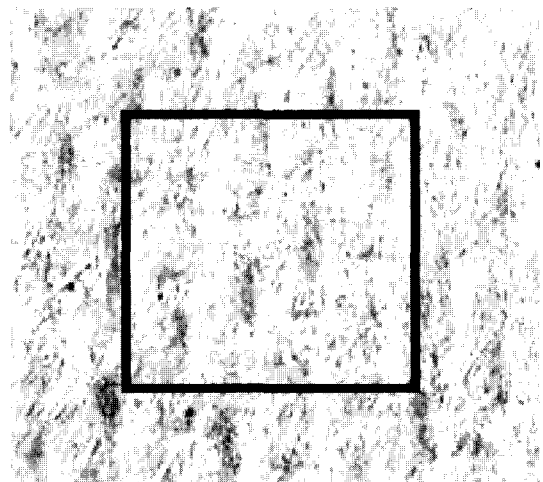


Fig. 5. The surface image of a liner board paper obtained with low angle illumination method.

된 백색광 주사간섭법은 이러한 거친 표면의 미세구조를 평가하는데 유용하였는데, 특히 일정 면적의 평균값을 제공해오던 간접측정 방법에 비해 각 부분에서의 변이와 펠트 또는 와이어 마크 등을 평가할 수 있는 삼차원 표면 프로파일을 얻을 수 있었다.

본 적용실험에서는 D사에서 제조된 라이너지의 이면을 측정하였는데 그 표면의 현미경 (10×) 이미지는 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 조명의 입사각을 낮추어 음영을 줌으로써 표면에서의 돌출부분 및 골 등을 더욱 뚜렷하게 발견할 수 있었다. 실제 표면에서 이러한 변이들의 실제 크기 등을 더욱 정확히 정량적으로 평가하기 위하여 표면의 삼차원 프로파일을 측정하였다.

Fig. 6는 Fig. 5에 나타난 라이너지 이면의 3차원 미세표면구조를 측정한 결과이다. 이를 통해서 표면에 두드러진 섬유유 위치 및 그 높이 등을 확인할 수 있었고 특히 규칙적으로 존재하는 와이어 마크의 계량적 평가가 가능한 것을 알 수 있었다.

Fig. 6의 표면미세구조 3D 프로파일 위에 도시되어 있는 라인상에서의 높낮이를 나타낸 라인 프로파일은 Fig. 7에 나타나 있다. 이러한 라인 프로파일을 통해 실제 표면구조에서의 높낮이 변이를 계량적으로 평가할 수 있는데 각 골 사이의 간격은 0.8 mm 정도이고 골의 깊이는 약 45 micrometer 인 것을 확인할 수 있었다. 이러한 정량적 분석을 통해 종이의 표면미세구조에 대한 더욱 정확한 정보를 확보할 수 있을 것으로 생각된다.

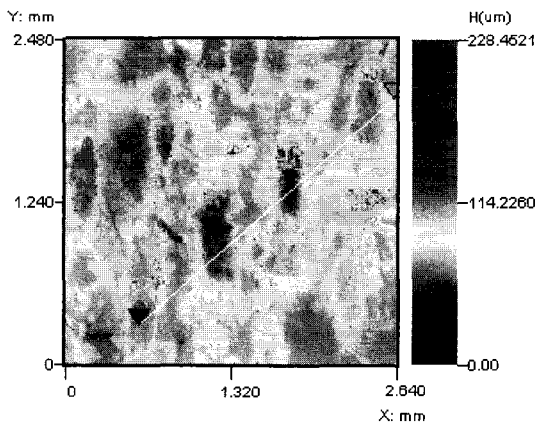


Fig. 6. The surface topography of a liner board paper in Fig. 5.

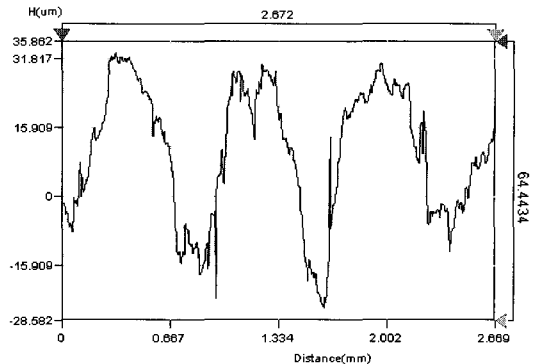


Fig. 7. Line profile of the 3D profile image in Fig. 6.

3.2 도공지의 표면 평가

인쇄용 아트지에서의 표면특성은 대단히 중요한 품질이며 실제로 표면구조에 대한 평가도 중요한 품질관리의 요소가 되어 왔다. 현재까지 이러한 아트지의 표면미세구조 평가는 변이를 가져오는 원인을 파악하기 위한 깊이 있는 분석 정보의 제공보다는 최종제품의 불량여부 평가에 치우친 소극적인 품질관리에 머물러 왔다. 실제 아트지 표면 미세구조에 영향을 미치는 원인으로서는 도공원지를 이루는 목재섬유들의 불균일한 분포와 도공안료의 응집 혹은 각 도공안료의 불균일한 분포를 들 수 있다. 특히 도공원지 지합의 변이와 그에 따라 안료 코팅 후 형성되는 불균일한 도공층, 그리고 뒤이은 캘린더링에 의한 도공층 변화 등의 복합적인 원인으로 국소지역에 따라서 표면 거칠기가 달라지는 문제점이 유발되는데 이것을 해결하기 위해서는 전체 아트지에서의 평균 거칠기가 아닌 각 부분별로 발생할 수 있는 거칠기 또는 표면미세구조의 변이에 대한 측정 방법으로 백색광 주사간섭법을 적용하는 시도가 유효할 것으로 기대되었다.

Fig. 8에는 인쇄용 아트지의 표면미세구조 3D 프로파일 이 나타나 있다. 실제 측정된 표면구조 데이터로 계산된 평균 Ra 값은 0.62 μm 로 대단히 낮은 거칠기 값을 가지고 있지만 표면구조 맵에서 볼 수 있듯이 2~3 μm 의 높이로 원지의 섬유가 코팅후 표면에서도 윤곽을 드러내 보이는 것이 확인되었다.

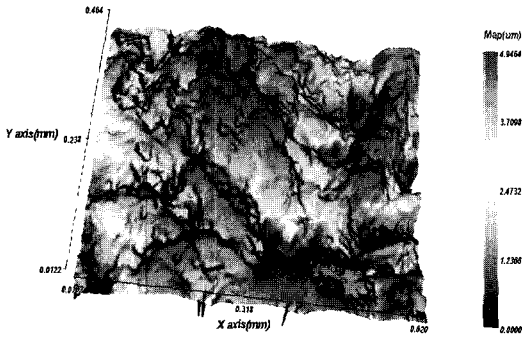


Fig. 8. 3D profile of a coated paper surface.

3.3 인쇄면에서의 면성 변화

인쇄된 면에서의 잉크도막의 두께 등은 최종 인쇄품질에 큰 영향을 끼치는 중요한 인자이다. 특히, 지폐 및 우표 등의 고급 인쇄물의 경우 인쇄물의 표면특성 및 인쇄된 면의 잉크도막특성 등의 평가는 더욱 중요하다 할 수 있겠다. 실례로 현재 사용되고 있는 천원지폐의 경우 다양한 방식으로 인쇄가 되는데 요판인쇄(Intaglio Printing)가 적용된 경우에는 인쇄면의 잉크가 돌출되는 특성을 가지게 된다. 이러한 경우에 잉크도막의 두께 등을 본 연구에 적용된 백색광 주사간섭법을 사용하여 평가하여 보았다.

Fig. 9는 본 실험에 사용된 천원지폐에서 요판인쇄 되었다고 판단되는 부분을 확대하여 나타낸 사진이다. 인쇄된 라인에서 잉크의 feathering 현상이 다소 보이기는 하지만 대체로 고른 인쇄농도를 확인할 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9 (b)의 표면미세구조를 측정한

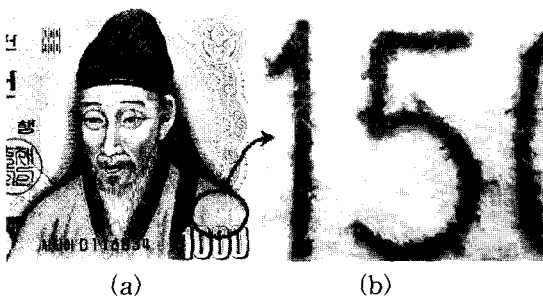


Fig. 9. The printed image of a thousand won note.

결과이다. 표면높이의 차이에서 확인할 수 있듯이 잉크 도막으로 인해 인쇄된 면은 대체로 약 10~20 µm의 두께로 불룩하게 튀어나와 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 이러한 인쇄부위 중 노란색으로 표시된 부분은 그다지 인쇄면이 도드라지지 못한 것을 발견할 수 있는데 Fig. 9. (b)에서 확인되는 바와 같이 같은 부위에서 잉크의 feathering이 상대적으로 심한 것을 확인할 수 있다. 즉, 전이된 잉크가 잉크 면에 고착되기 전 지폐원지의 표면으로 흩어짐으로써 인쇄면의 양각화가 저조한 것으로 생각된다.

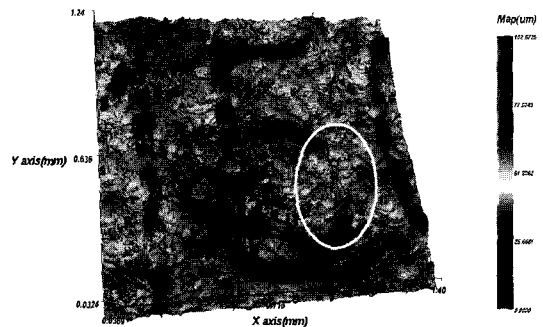


Fig. 10. 3D profile of the printed image in Fig. 9 (b).

3.4 고분자 라미네이트 코팅 표면

인쇄적성 및 표면성 개선을 위한 고분자 물질의 라미네이트 코팅은 책표지나 고급인쇄용지, 또는 이형지 등의 기능성 종이 등에 자주 적용되고 있는 방식이다. 이러한 라미네이트 코팅 표면은 제조 공정에서 건조 조건의 변화 등에 의해 표면의 특성이 다소 변화될 수 있는데, 예를 들어 고분자 필름의 수축 등에 의한 미세한 굴곡이 나타나는 현상을 들 수 있다. 이러한 고분자 필름의 굴곡은 표면 광택도를 평가한 Fig. 11 (a)를 통해 확인해 볼 수 있다. 특히 이러한 필름 코팅 표면의 간섭무늬 이미지에서 알 수 있듯이 실제 대단히 매끄러운 표면성을 가지고 있는 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 12는 전술한 필름 표면을 백색광 주사간섭법으로 측정하고 표면미세구조의 3차원적 형태를 맵으로 나타낸 결과이다. 앞서 Fig. 11의 (a)에서

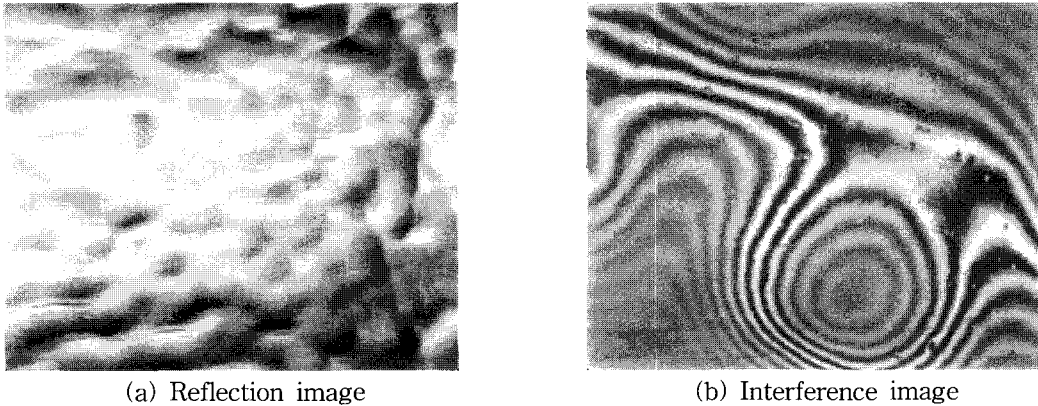


Fig. 11. The specularly reflected image of a laminate coated paper sample and the interference image of same area.

보여진 광택도의 변이를 가져올 수 있는 표면미세구조의 변이는 약 200~300 μm의 직경에 약 2~3 μm의 높이 또는 깊이를 가지는 굴곡들로 인해 기인하는 것을 알 수 있었다. 특히 각 미세표면 자체는 안료 코팅 (Fig. 8)이나 종이 표면 (Fig. 10)에 비해 상대적으로 보다 균일한 면을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

한 표면 거칠기의 변이를 평가할 수 있었다. 또한 양각인쇄된 인쇄면에서의 잉크도막을 평가하는데도 적절한 측정방법임을 확인하였다.

투명한 고분자 폴리머 라미네이트 용지의 경우 필름이 투명함에도 불구하고 표면의 미세구조를 평가하는데 어려움이 없었을 뿐만 아니라 광택도의 국부적 변이를 가져오는 투명필름의 미세구조의 변이를 확인할 수 있었다.

이러한 백색광 주사간섭법은 측정 해상도가 대단히 뛰어나고 속도가 상대적으로 빠르며 또한 측정이 간편하여 앞으로 다양한 종이, 인쇄 및 포장물질의 표면미세구조 평가에 용이하게 사용될 것으로 기대된다.

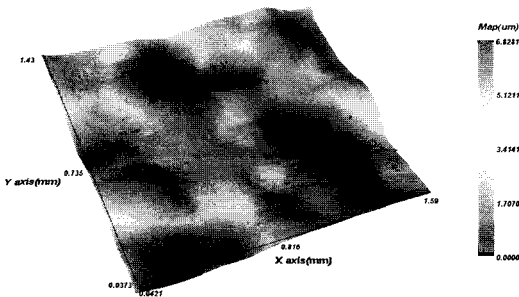


Fig. 12. 3D profile of the surface of a laminated coated paper in Fig. 11.

4. 결론

본 연구에서는 전자부품의 표면미세구조를 나노미터의 해상도로 검사하는 목적으로 개발되어진 백색광 주사간섭법을 종이제품, 인쇄물 및 코팅제품의 표면 평가에 적용하여 보았다. 표면이 거친 산업용지의 경우 각 목재섬유 및 와이어에 의한 표면의 마크를 확인할 수 있었고 아트지의 경우에는 미세

사 사

본 연구는 청정생산기술개발사업의 일환으로 한국생산기술연구원 국가청정생산지원센터의 지원으로 수행되었습니다.

인용문헌

1. Sung, Y.-J., and Keller, D.S., Evaluation of Gloss Variation with a Novel Method, *KTappi*, 34(2):73 (2002).
2. Inoue, M., Gurnagul, N., and Aroca, P., Static Friction Properties of Linerboard, *Tappi J.*, 73(2):81 (1990).
3. Margin, P. J., 1993 *Process and Product Quality*

- Conference, TAPPI PRESS, Atlanta, p.17.
4. Margin, P. J., and De Grace, J. H., An Analysis of the Accuracy of Measuring Paper Roughness with the Parker Print-Surf, International Printing and Graphic Arts/Testing Conference, TAPPI PRESS, p.125 (1984).
 5. Singh, S. P., Surface Characterization of Printing Papers, Doctoral Thesis, Swedish Pulp and Paper Research Institute, Sweden (1992).
 6. Kapoor, S. G., Wu, S. M., and Pandit, S. M., A new Method for Evaluating the Printing Smoothness of Coated Papers, Tappi J., 61(6): 71 (1978).
 7. Enomae, T., and LePoutre, P., Stylus Profilometry on Paper : Marking by the Stylus, Tappi J. 78(10):173 (1995).
 8. Wagberg, P., Optical Stylus Profilometry - A useful tool for paper surface characterization, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (1992).