

# Pile-up 현상이 제거된 마이크로 인덴테이션 가공기술 Micro Indentation Machining Technology Without Pile-up Effect

\*#전은채<sup>1</sup>, 제태진<sup>1</sup>, 윤재성<sup>1</sup>, 최두선<sup>1</sup>

\*#E. c. Jeon(jeonec@kimm.re.kr)<sup>1</sup>, T. J. Je<sup>1</sup>, J. S. Yoon<sup>1</sup>, D. S. Choi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 나노공정장비연구실

Key words : Micro-indentation machining, Pile-up, Optical component

## 1. 서론

LED BLU (Light Emitting Diode Backlight Unit)가 탑재된 LCD (Liquid Crystal Display) TV 제품은 2000년대 중반부터 LCD업계의 기술과시용으로 출시되었으며, 2009년 Edge형 LED BLU를 사용한 슬림형 LCD TV가 출시되면서 생산량이 폭발적으로 증가하고 있다. 최근에는 3D TV도 출시되면서 LED BLU 제품은 더욱 각광받고 있다. 기존의 BLU는 선광원의 일종인 CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp)을 광원으로 사용하였으나 LED BLU는 점광원인 LED를 사용하는 것이 특징이다. LED의 광효율이 매년 증가하고 있지만 업계의 지속적인 원가하락 압력에 의해 같은 LED를 사용하여도 더 높은 휘도를 얻을 수 있는 광학부품에 대한 수요는 더욱 높아지고 있다. 광효율을 높이기 위해 대부분의 광학부품 표면에는 특정 형상의 패턴이 사용되고 있다. 가장 대표적인 패턴으로는 그림 1(a)의 프리즘 패턴이 있으며 그림 1(b)와 같이 이를 응용한 패턴들이 많이 있다. 이러한 프리즘 패턴은 정면휘도를 높여주는 장점이 있으나 측면에서 디스플레이를 보았을 때 휘도가 급격히 떨어지는 시야각 문제를 발생시키는 단점이 있다. 또한 기존의 선광원인 CCFL에 적합화된 선형 패턴이기 때문에 점광원인 LED에 최적화되어 있지 않다는 단점도 있다. 이를 개선하기 위해서 그림 2와 같이 마이크로렌즈어레이를 활용한 광학필름이 개발되었다. 그러나 이러한 마이크로렌즈어레이를 사용한 제품은 렌즈가 필름 상에 무작위로 배열되는 등의 렌즈 분포에 대한 제어가 쉽지 않다는 단점이 있다. 또한 점광원이 BLU에 사용될 경우에는 점광원이 있는 부위와 없는 부위의 휘도차가 극명하게 나타나기 때문에 광균일도를 향상시키기 위해서는 점광원 부분에 다른 부분에 비해 패턴을 집중화시키는 '비연속 복합패턴'의 가공이 필요하다. 그러나 현재까지 개발된 기술들은 양산성을 고려하여 선형 또는 구형의 연속적인 패턴만 가공이 가능하여 '비연속 복합패턴' 가공이 불가능하다. 이에 점광원에 최적화된 비연속 복합패턴을 가진 광학부품 제조를 위한 가공방법으로 '마이크로 인덴테이션 가공'을 본 연구에서는 제안하였다.

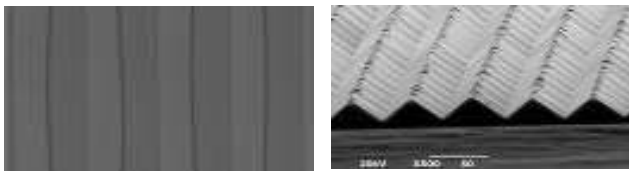


Fig. 1 (a) Prism pattern (b) Modified prism pattern

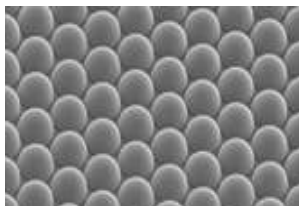


Fig. 2 Micro-lens array pattern

## 2. 마이크로 인덴테이션 가공기술

마이크로 인덴테이션 기술은 원래 소재의 경도를 측정하는 방법으로 널리 사용되어 왔다[1]. 특정형상의 압입자를 사용하여 소재에 하중을 인가하였다가 제거할 때 소재에 발생하는 압흔의 크기를 측정함으로써 경도를 측정한다. 또한 하중을 인가하고

제거할 때 하중 및 변위의 연속적인 변화를 측정하여 경도 이외에도 탄성계수[2] 및 인장물성[3] (항복강도, 인장강도 등)을 측정하기도 한다. 마이크로 인덴테이션 시험을 통해 발생하는 압흔의 형상은 압입자 모양과 같기 때문에 압입자의 형태를 변화시키면 구, 사각피라미드, 삼각피라미드, 원기둥 등 다양한 형상의 복합 패턴을 만들 수 있다. 금형 상에 음각 형태로 압흔이 남기 때문에 이를 성형할 경우 마이크로렌즈어레이 형태의 제품을 제조할 수 있다. 또한 압흔의 밀도를 사용자가 원하는대로 조절할 수 있기 때문에 비연속적인 패턴 가공도 가능하다. 따라서 '비연속 복합패턴'의 가공에 적합한 기술이다.

그러나 마이크로 인덴테이션 가공을 할 때 압흔 주변에는 그림 3과 같은 'pile-up' 현상이 발생한다. 이 현상은 소재의 소성변형 시 압입자에 의해 밀려난 재료들이 압흔 주변에 쌓이는 현상으로 특히 금속소재에서 많이 발생된다. 일반적으로 금형소재로 사용되는 구리, 니켈, 황동 등의 소재에서도 관찰되는 현상이다. Pile-up 현상이 발생한 상태에서 광학부품을 성형하게 되면 pile-up의 모양이 그대로 광학부품에 전사되게 되므로 정확한 패턴형상 제어가 불가능하게 된다. 따라서 pile-up 현상을 제거한 상태로 가공이 이루어져야 한다.

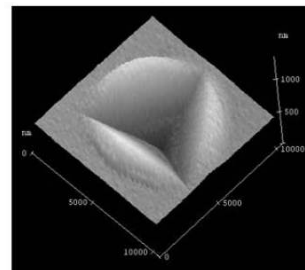


Fig. 3 Pile-up phenomenon around residual indentation

## 3. Pile-up 현상의 원인 및 제거방안

앞서 밝힌 바와 같이 pile-up 현상은 압입자가 소재를 파괴하면서 발생하는 소성변형으로 인해 소재가 압흔 주변에 쌓이는 현상이다. 금속소재의 소성변형시 부피의 변화량은 0가 되므로 [4] 압흔형성으로 인해 소실된 부피가 pile-up에 의해 수렴된다고 보면 된다. 이론적으로는 부피의 변화량이 0이어야 하기 때문에 pile-up된 소재의 부피가 압흔의 부피와 동일하여야 하며, 같은 크기의 압흔이 발생되었다면 소재에 관계없이 pile-up된 소재의 부피도 같아야 한다. 그러나 실제로는 완벽하게 비압축성인 소재는 없기 때문에 소재의 특성에 따라 pile-up의 양이 달라진다.

Cheng 등의 연구[5]에 따르면 소재의 가공경화지수(n)가 작을수록, 항복강도(Y)와 탄성계수(E)의 비가 낮을수록 pile-up 현상이 심해진다. 그림 4에서  $h_c/h$ 는 접촉깊이( $h_c$ )와 압입깊이( $h$ )의 비로 이 값이 1보다 클 때 pile-up 현상이 발생된다. 금형에 사용되는 금속소재들의 Y/E값의 범위가 0.001 내외인 점을 감안할 때 가공경화지수 값이 pile-up 현상에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

가공경화지수는 금속재료의 소성변형시 응력( $\sigma$ )-변형률( $\epsilon$ ) 곡선을  $\sigma = K\epsilon^n$ 로 수치화하였을 때 지수에 해당하는 값으로 인장시험에서 얻어지는 인장곡선에서의 인장변형률과 같은 값을 갖는다. 인장변형률이 클수록 금속소재의 연성이 좋다는 것을 의미한다. 즉 가공경화지수 값이 클수록 연성이 좋으며 pile-up 현상이 적게 발생한다는 것을 알 수 있다. 금속소재의

연성을 좋게 하는 방법으로 널리 사용되는 것이 ‘풀림 (annealing)’이다. 대체로 소재를 수백℃에서 수 시간동안 둔 뒤 서서히 냉각시키면 소재 내부에 영겨있던 전위(dislocation)들이 풀리면서 소재의 연성이 높아진다. 본 연구에서는 이점에 착안하여 풀림처리를 통해 pile-up 현상을 제거할 수 있는지를 확인하였다.

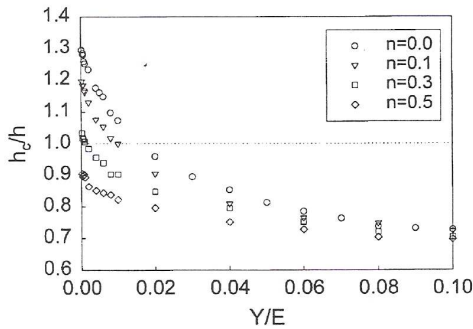


Fig. 4 Degree of pile-up varied by material properties [5]

#### 4. 실험 및 결과

본 연구에서는 금형소재로 널리 사용되는 구리와 황동소재를 사용하였다. 원래 금형에 구리가 사용될 때는 구리를 도금공정을 통해 사용하지만 실험에 사용할 정도의 두께를 얻기 힘들기 때문에 순동 시편을 실험에 사용하였다. 황동소재는 구리함량 60%, 아연함량 40%인 Muntz metal을 사용하였다. 두 소재 모두 기존에 금형제작을 위해 사용하는 것과 동일한 시편을 준비하였다. 풀림처리에서 가장 중요한 조건은 풀림온도이다. 문헌조사 등을 통해 구리와 황동의 풀림온도를 각각 600℃와 575℃로 선정하였다. 각각의 온도에서 2시간 정도를 유지시킨 후 노냉을 통해 냉각시켰다. 만약 노냉이 아닌 담금질(quenching)로 냉각시킬 경우에는 연성이 감소할 수 있기 때문에 유의하여야 한다.

Table 1 Annealing conditions

	Cu	Brass
Temperature (℃)	600	575
Time (h)	2	2.5
Cooling method	Furnace cooling	Furnace cooling

풀림처리를 하지 않은 시편과 한 시편에 대해 (주)프론틱스사의 압입시험기인 AIS3000을 사용하여 마이크로 인텐테이션 실험을 수행하였다. 사용한 압입자는 직경 500μm의 구형 압입자를 사용하였다. 압입깊이를 10μm에서 100μm까지 변화시키면서 압흔 크기를 다양하게 변화시켰다. 마이크로 인텐테이션 실험을 통해 형성된 압흔을 광학현미경으로 관찰하여 pile-up 현상의 발생 여부를 확인하였다.

그림 5(a)는 풀림처리를 하지 않은 구리소재의 압흔사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 압흔 주변의 소재가 심하게 소성변형되어 있는 것을 알 수가 있다. 또한 압흔의 크기가 400μm인데 반해 변형된 영역의 크기는 950μm에 이르고 있다. 압흔 크기의 두 배가 넘는 영역에서 심한 변형이 발생되었기 때문에 정밀한 렌즈형태의 패턴 제작이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 또한 하나의 압흔을 가공하면 최소한 압흔 크기의 2배 이상의 거리를 두고 다음 패턴을 가공하여야 하기 때문에 렌즈어레이를 만드는 것이 거의 불가능하다. 이에 반해 풀림처리를 한 구리소재는 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 압흔 주변을 확대해서 관찰하여도 압흔 주변에 변형 현상이 전혀 없으며 압흔의 경계가 명확하게 드러나고 있다.

이러한 현상은 황동소재에서도 동일하게 발생하였다. 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 풀림처리를 하지 않은 황동소재에서도 압흔 주변에 매우 심한 소성변형이 관찰되었으며 그 크기도 압흔의 두 배 이상의 크기였다. 이에 반해 풀림처리를 한 황동소재에서는 압흔 주변에 아무런 소성변형이 관찰되지 않았으며 압흔

의 경계도 매우 깨끗하게 형성되었다. 이를 통해 구리와 황동에서 마이크로 인텐테이션 가공기술을 사용하여 pile-up 현상을 제거한 상태로 렌즈 어레이와 같은 ‘비연속 복합패턴’을 가공할 수 있는 가능성을 확인하였다. 추후에는 구형 압입자 뿐만 아니라 최근 광학부품에서 수요가 높아지고 있는 피라미드형상에 대해서도 실험을 수행할 계획이며 비연속 복합패턴이 가공된 금형을 사용하여 광학부품을 성형할 예정이다.

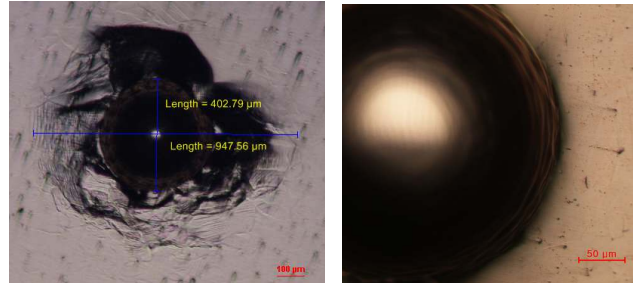


Fig. 5 Residual indentations on (a) Not annealed Cu (b) annealed Cu

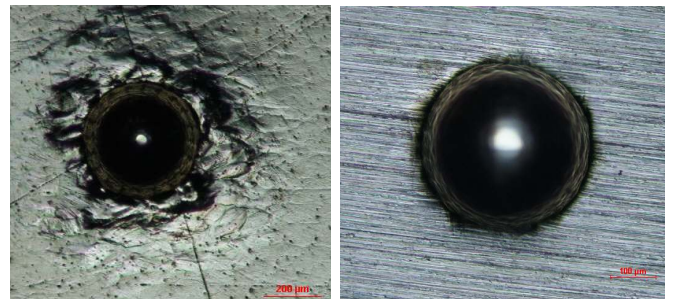


Fig. 6 Residual indentations on (a) Not annealed Brass (b) annealed Brass

#### 5. 결론

본 연구에서는 최근 수요가 높아지고 있는 비연속 복합패턴을 가진 광학부품 제조를 위한 마이크로 인텐테이션 가공기술을 개발하기 위해 불필요한 소성변형현상인 pile-up 현상을 제거하는 기술을 개발하였다. 금형에 많이 사용되는 구리 및 황동에 대해 풀림처리를 통해 압흔 주변에 발생하는 pile-up 현상이 사라짐을 확인하였고, 이를 바탕으로 마이크로렌즈어레이 등의 비연속 복합패턴이 가공된 광학부품을 제조할 예정이다.

#### 후기

본 연구는 한국기계연구원 자체사업 및 일반사업의 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. KS B 0811, "금속재료의 비커스 경도시험방법", 한국표준협회, 2008.
2. Oliver, W. C. and Pharr, G. M., "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," J. Mater. Res., 7(6), 1564-1583, 1992.
3. Jeon, E. c., Kim, J. Y., Baik, M. K., Kim, S. H., Park, J. S. and Kwon D., "Optimum Definition of True Strain Beneath a Spherical Indenter for Deriving Indentation Flow Curves," Mat. Sci. and Eng. A, 419, 196-201, 2006.
4. Dieter, G. E., "Mechanical Metallurgy," McGraw Hill, 1988.
5. Cheng, Y. T. and Cheng, C. M., "Effects of 'Sinking in' and 'Piling up' on Estimating the Contact Area Under Load in Indentation," Phil. Mag. Let., 78, 115-120, 1998