

# 압입하중-변위곡선 분석을 통한 폴리머 소재의 절삭표면상태 예측에 관한 연구

전은채<sup>\*#</sup>, 김재현<sup>\*\*</sup>, 제태진<sup>\*</sup>

## Prediction of State of Cutting Surfaces of Polymers by Analysis of Indentation Load-depth Curve

Eun-Chae Jeon<sup>\*#</sup>, Jae-Hyun Kim<sup>\*\*</sup>, Tae-Jin Je<sup>\*</sup>

(Received 24 April 2011; received in revised form 9 July 2011; accepted 8 August 2011)

### ABSTRACT

UV imprinting process can manufacture high-functional optical components with low cost. If hard polymers can be used as transparent molds at this process, the cost will be much lower. However, there are limited researches to predict the machinability and the burr of hard polymers. Therefore, a new method to predict them by analyzing load-depth curves which can be obtained by the instrumented indentation test was developed in this study. The load-depth curve contains elastic deformation and plastic deformation simultaneously. The ratio of the plastic deformation over the sum of the two deformation is proportional to the ductility of materials which is one of the parameters of the machinability and the burr. The instrumented indentation tests were performed on the transparent molds of the hard polymers and the values of ratio were calculated. The machinability and the burr of three kinds of hard polymers were predicted by the ratio, and the prediction was in agreement with the experimental results from the machined surfaces of the three kinds of hard polymers.

**Key Words** : Machinability(절삭성), Burr(버), Cutting(절삭), Indentation Load-Depth Curve(압입하중-변위곡선), Instrumented Indentation Test(계장화압입시험)

### 1. 서 론

디스플레이 및 조명은 빛을 내는 광원과 그 빛의 특

성을 조절하는 광학부품으로 구성되며 제품에 따라 휘도 또는 조도 값이 다르고 동일한 전력에 의해서 발생되는 빛의 양(광효율)이 다르다. 과거에는 광원의 종류에 따른 광효율 변화가 중요하게 여겨졌다. 그러나 점차 디스플레이 분야와 조명 분야에서 LED가 주요 광원으로 부각되고 있기 때문에 광원에 따른 광효율 변화의 중요성은 낮아지고 있다. 따라서 동일한 광원을 사용하더라도 광효율을 더 높일 수 있는 광학부품의

\* 한국기계연구원 나노공정장비연구실

# 교신저자 : 한국기계연구원 나노공정장비연구실

E-mail : jeonec@kimm.re.kr

\*\* 한국기계연구원 나노역학연구실

중요성이 높아지고 있다.

더 높은 광효율을 얻기 위해서 패턴 형상이 점점 세밀해지고, 제품 원가 경쟁이 심해짐에 따라 임프린팅 공정이 효과적인 광학부품 제조방법으로 부각되고 있다. 임프린팅 공정은 폴리머 소재 표면에 UV 경화 레진을 도포한 후 Fig. 1과 같이 패턴의 역상이 가공된 투명한 금형으로 UV 경화레진을 누른 상태에서 UV를 조사하여 광학패턴을 제조하는 방법이다. 이 공정은 높은 정밀도의 패턴 제조가 가능하며 생산 시간이 짧고 생산원가가 낮다는 장점을 가지고 있다.

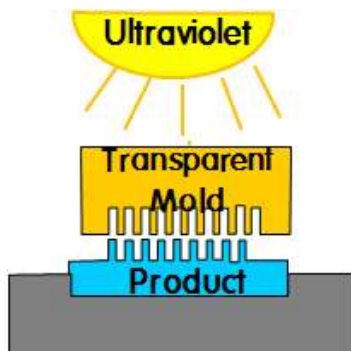


Fig. 1 A schematic diagram of UV imprinting process

임프린팅 공정에서는 자외선 조사를 위해 금형이 투명하여야 하기 때문에 투명한 소재에 패턴을 복제한 소프트 금형을 주로 사용한다. 그러나 복제 과정에서 패턴의 형상이 달라지고 소프트 금형의 강성이 약해서 오래 사용하지 못하는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서 투명하면서도 강성을 갖는 폴리머 소재를 직접 가공하여 임프린팅 공정용 금형으로 사용하려는 시도가 있다<sup>[1]</sup>. 투명한 소재를 직가공하여 금형으로 사용한다면 복제 시 발생하는 정밀도 저하의 문제도 없고 강성이 있기 때문에 금형의 수명도 늘어나게 된다. 그러나 폴리머 소재는 금속 소재에 비해 절삭 가공에 대한 경험이 적고 최적화가 이루어져 있지 않아서 폴리머 소재 별 절삭성 및 burr 발생량에 관한 비교연구가 부족하다. 이에 본 연구에서는 UV 임프린팅 공정용 투명 금형에 사용이 가능한 폴리머 소재들에 대해 절삭성 및 burr 발생량을 예측하는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 이론적 분석

### 2.1 절삭성 및 burr 발생정도의 지표

절삭성은 피삭성이라고도 하며 절삭가공 시 절삭 저항이 작고, 공구의 마모가 적으며, 절삭속도를 크게 할 수 있고, 가공면의 조도가 작을 때 절삭성이 좋다고 한다<sup>[2]</sup>. 이처럼 실제로 절삭가공을 하면서 절삭저항을 측정하고 가공을 완료한 후 공구와 가공면의 상태를 관찰하여야만 알 수 있는 특성이다. 그러나 모든 소재에 대해 절삭가공을 수행하여 절삭성을 평가하는 것은 절삭가공 이전의 경면가공 등을 포함하여 지나치게 많은 시간을 요구하며 적지 않은 비용을 필요로 한다.

직접 절삭가공을 하지 않고 절삭성을 예측할 수 있는 몇 가지 재료 물성 중 하나가 연성이다<sup>[2]</sup>. 특히 burr의 발생량은 연성이 높을수록 많아진다. 연성은 재료가 파괴되기 전까지 얼마나 잘 변형되는지의 지표로서 어닐링 (소둔) 열처리 등을 통해 동일한 성분의 소재라도 그 특성을 달리할 수 있다. 따라서 열처리에 대한 이력을 정확히 알지 못할 때는 단순히 소재의 성분만으로 기존에 알려진 자료를 사용하여 연성을 예측하여서는 안되며 별도의 시험을 통해 연성을 평가하여야 한다.

가장 일반적인 연성 평가법은 일축인장시험이다. 일축인장시험은 시편이 파괴될 때까지 길이방향으로 잡아당기는 시험법이다. 이를 통해 진응력-진변형률 (True stress-True strain) 곡선을 얻게 된다. 이때 네킹이 발생하는 시점의 변형률 값인 인장변형률( $\epsilon_u$ )이 연성의 정량적인 지표가 된다<sup>[3]</sup>.

일축인장시험법은 시험규격에 규정된 특정 형상의 시편이 가공되어야 하고, 시험에 사용된 시편이 파괴되기 때문에 시험에 사용한 시편을 금형에 다시 이용하는 것은 불가능하다. 따라서 시험에 사용된 소재와 금형에 사용되는 소재가 완벽하게 동일하여야 의미가 있다. 금속의 경우에는 일부 특수한 경우를 제외하면 동일하다고 가정할 수 있지만, 폴리머의 경우에는 제조 방법에 따라 동일한 모노머 (monomer)로 구성된 소재여도 물성이 상이하며 방향성이 강하기 때문에 물성이 다를 가능성이 매우 높다. 또한 점성에 의해 일축인장시험 결과의 재현성

도 금속 소재에 비해 매우 낮다. 이에 폴리머 소재의 경우에는 금형 자체를 사용하여 연성을 평가하여야 하지만, 앞서 밝힌 바와 같이 일축인장시험에 사용한 시편은 파괴되어 금형으로 사용할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 폴리머 금형의 연성을 직접 평가할 수 있으며 평가 후 금형으로 재사용이 가능한 시험법이 필요하다.

## 2.2 계장화압입시험

계장화압입시험 (Instrumented indentation test)은 압입경도시험을 개선한 시험법으로 특정한 형상의 압입자를 사용하여 재료를 누르면서 하중과 압입깊이를 동시에 측정한다. 이를 통해 얻어진 데이터를 압입하중-변위곡선(indentation load-depth curve)라고 부르며, 이 곡선을 분석하여 경도, 항복강도, 인장강도, 파괴인성, 잔류응력 등을 평가할 수 있다<sup>[4,5]</sup>. 시험이 끝난 후에도 수백  $\mu\text{m}$ 에서 수십  $\text{nm}$ 의 크기의 압흔만 남는 비파괴 시험법이기 때문에 시험에 사용한 재료를 금형으로 사용할 수 있다. 따라서 소재의 연성을 평가할 수 있다면 폴리머 소재의 절삭성 및 burr 발생량평가에 적합한 시험법이다. 과거에는 압입경도와 가공 시 발생하는 chip의 최소두께의 상관관계에 관한 연구들<sup>[6,7]</sup>과 가공소재의 표면상의 압입경도의 불균일을 가공성 예측에 고려하여야 한다는 연구<sup>[8]</sup>는 있었으나, 계장화압입시험과 절삭성을 직접적으로 연관시킨 연구는 거의 없었다.

앞서 2.1장에서 밝힌 바와 같이 연성을 정량적으로 표현할 수 있는 재료 특성은 인장변형률이다. 금속 소재의 경우에는 계장화압입시험을 이용하여 인장변형률을 구하는 방법이 제시되어 있으나<sup>[9]</sup>, 폴리머의 경우에는 재료의 변형 메커니즘이 다르기 때문에 금속에서의 방법을 적용할 수 없다. 이에 본 연구에서는 연성을 정량적으로 평가할 수 있는 새로운 지표를 제시하였다.

연성은 소재가 소성변형을 얼마나 많이 할 수 있는지를 의미하며, 전체 변형에서 소성변형이 차지하는 정도를 의미한다. 즉, 전체 변형량 중에서 소성변형이 차지하는 비중이 높을수록 연성이 높아진다. 앞서 설명한 바와 같이 Fig. 2와 같은 압입하중-변위곡선은 소재를 누름에 따라 변화하는 하중과 압입깊이를 측정된 곡선이다. 하중을 인가한 후 하중을 제

거할 때, 소재의 소성변형에 의해 인가곡선과 제거곡선이 서로 다르게 된다. 하중이 인가되고 있을 때 (loading)는 탄성변형과 소성변형이 모두 발생을 하지만, 하중을 제거할 때(unloading)는 탄성변형만 회복되고 최종적으로는 소성변형이 남는다.

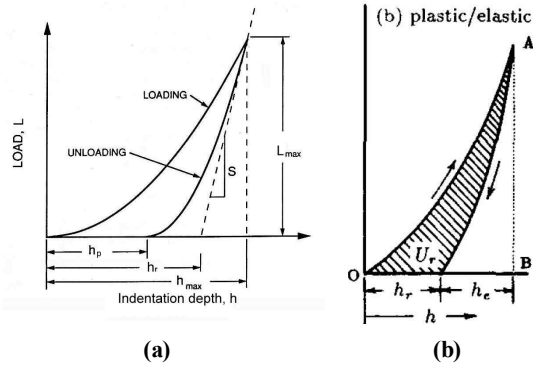


Fig. 2 Schematic diagram of (a) an indentation load-depth curve and (b) energy consumption associated with plastic deformation<sup>[10]</sup>

이러한 개념을 바탕으로 Sakai<sup>[10]</sup>는 Fig. 2(b)와 같이 압입하중-변위곡선의 내부의 면적을 압입 시 발생된 소성변형에 사용된 에너지라고 정의하였다. 만약 탄성변형만 있는 경우에는 하중인가곡선과 하중제거곡선이 중첩되기 때문에 소성변형에 사용된 에너지가 0이 된다. 일반적으로 Fig. 2(b)와 같이 면적을 정확하게 계산하는 것이 어렵기 때문에 하중인가곡선과 하중제거곡선을 모두 직선으로 가정하여 삼각형의 넓이로 계산하는 방법이 사용된다. 따라서 소성변형에너지를 간략하게 표현하면 식 (1)과 같다.

$$U_r = \frac{1}{2} L_{\max} \cdot h_p \quad (1)$$

앞서 연성이 전체 변형에서 소성변형이 차지하는 비율을 의미하므로 식 (1)을 전체 에너지로 나누면 식 (2)와 같이 되므로 결국 식 (2)의 값이 연성과 비례함을 알 수 있다. 따라서 R 값이 연성을 비례하고 대표하는 값이라고 가정할 수 있으며, R 값이 작을수록 절삭성이 좋을 것을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 R 값을 사용하여 폴리머 소재의 연성을 측정

하였고, 이를 통해 절삭성 및 burr 발생량을 예측하였다.

$$ductility = R = \frac{h_p}{h_{max}} \quad (2)$$

### 3. 실험 방법

UV 임프린팅 공정을 위한 투명 금형 소재로서 Polycarbonate(PC), Polymethyl Methacrylate(PMMA) 그리고 Polyvinyl chloride(PVC)의 3개 소재를 선택하였다. 이들 소재는 광학부품으로 널리 사용되고 있어서 구하기 쉬우며 투명도가 높은 소재이다. 이들 소재를 30×30×15mm 크기로 절단하였으며 광학패턴을 가공할 표면은 구형 공구를 이용하여 평탄화 작업을 수행하였다.

계장화압입시험은 소재에 최소한의 압흔을 남기기 위하여 가장 낮은 하중을 인가할 수 있는 ‘나노인덴터’인 MTS 사의 ‘Nano Indenter XP’를 사용하여 수행하였다. 식 (2)의 두 변수 중 실험을 통해 제어가 가능한  $h_{max}$  값을 모든 시편에서 5,000nm로 동일하게 설정하였다. 사용한 압입자는 Berkovich 압입자로 삼각피라미드 형태이다. Berkovich 압입자를 사용하면 압입깊이가 5,000nm일 때 압흔의 크기가 약 35 $\mu$ m이며 탄성회복을 감안하면 이보다 더 작게 된다. 따라서 광학패턴이 가공될 면에 시험을 하여도 되며, 만약 약을 대비해서 옆면에 실험을 수행할 수도 있다. 각 소재 당 5번의 계장화압입시험을 반복하였다. 이를 통해 얻어진 압입하중-변위곡선들을 분석하여 식 (2)의 R 값을 구하였다.

식 (2)의 R 값과 실제 절삭성 및 burr 발생량을 비교하기 위하여 계장화압입시험을 수행한 시편에 공구형상각 0°, 공구폭 60 $\mu$ m인 단결정 다이아몬드공구를 사용하여 절삭가공을 수행하였다. 절삭가공을 위해 초정밀 리니어모터로 구동되며 스트로크는 X, Y, Z축 900×900×100mm이고 0.5 $\mu$ m의 반복 정밀도를 갖는 초정밀 플래이너 가공시스템을 사용하였다. 가공이 완료된 후 각 시편의 표면을 SEM으로 관찰하여 식 (2)의 R 값과 절삭성 및 burr 발생량의 상관관계를 확인하였다.

## 4. 실험 결과 및 토의

### 4.1 소재 별 압입하중-변위곡선

나노인덴터를 이용하여 계장화압입시험을 하면 매우 작은 영역을 시험하기 때문에 소재의 흔적을 거의 남기지 않는 장점이 있지만 시험기 주변 환경(온도, 습도, 진동 등)에 의해 시험결과가 왜곡되기 쉬운 문제점이 있다. 따라서 최소 3번 이상 동일 시험을 반복한 후 압입하중-변위곡선의 재현성이 높은지 확인하여야 한다. 본 연구에서 각 소재 별로 5회 실시한 실험에서 측정된 압입하중-변위곡선들은 Fig. 3과 같이 서로 구분이 되지 않을 정도의 높은 재현성을 나타내었다. 이를 통해 시험기 주변 환경에 의한 실험데이터 왜곡이 없었음을 확인하였다.

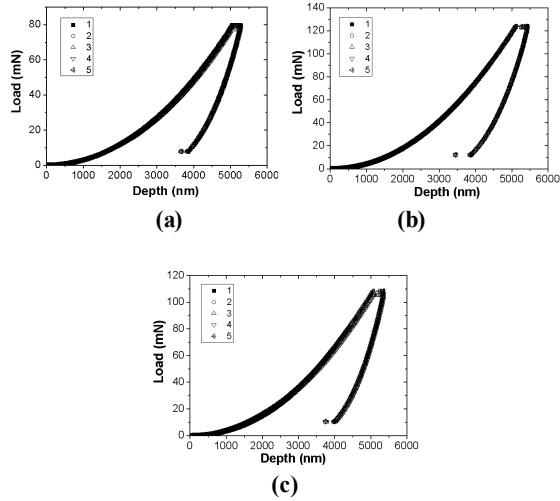


Fig. 3 Five indentation load-depth curves of (a) PC, (b) PMMA and (c) PVC

### 4.2 압입하중-변위곡선 분석을 통한 절삭성 및 burr 발생정도 예측

각 소재에 대해 얻어진 압입하중-변위곡선을 분석하여  $h_p$ 와  $h_{max}$  값을 구한 뒤 식 (2)에 따라 R 값을 계산한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 각 소재별로 압입하중-변위곡선의 재현성이 매우 높았기 때문에 표준편차로 나타낸 error bar의 범위가 매우 좁게 나타나서 각 소재별 R 값의 유의성이 있는 것으로 확인

되었다. R 값은 PMMA가 가장 낮았고, 다음으로 PVC, PC 순으로 나타났다. 이를 통해 PMMA의 절삭성이 가장 우수하고 burr 발생량이 가장 적을 것으로 예측되었다. 특히 PMMA는 다른 두 소재들에 비해 월등히 낮은 값을 나타내어 확연히 우수한 절삭성과 적은 burr 발생량을 보일 것으로 예상되었다.

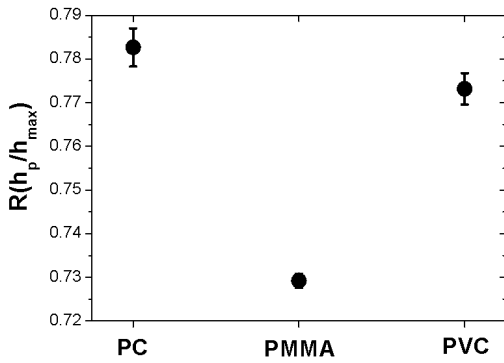
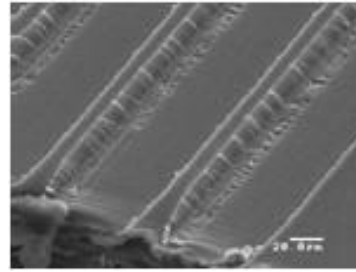


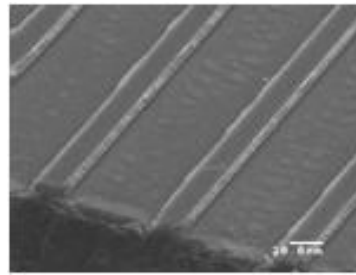
Fig. 4 R values of PC, PMMA and PVC

### 4.3 절삭가공을 통한 절삭성 및 burr 발생 정도 검증

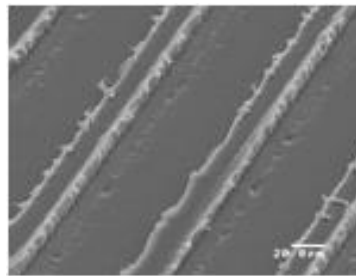
앞서 3장에서 밝힌 바와 같이 계장화압입시험을 수행한 세 가지 소재의 투명 금형에 대해 절삭가공을 수행하였다. 절삭가공에서 발생할 수 있는 가공 상태에 대한 변수를 없애기 위해 모든 가공조건은 세 가지 소재에서 동일하게 하였다. 가공된 표면을 SEM으로 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. PMMA에서는 burr 발생이 매우 적었고 전체적인 절삭표면 상태가 매우 우수하였다. 이에 반해 PC와 PVC는 burr가 발생하였으며, 특히 PC의 경우에는 burr 발생량도 많고 절삭표면 상태도 불량하였다. 가공깊이 및 가공속도에 따라서 burr 발생량의 경향이 달라질 수 있으므로 가공속도를 50, 100, 200, 400mm/s로 달리하고 각각에 대해 가공깊이를 2, 4, 6, 10 $\mu$ m로 변경하였을 때도 동일한 양상이 나타났다. 심지어는 가공속도가 빨라질수록, 가공깊이가 깊어질수록 소재 별 burr 발생량의 차이는 더욱 심해졌다. Fig. 5의 결과는 이들 변수들의 중간 값인 가공속도 200mm/s와 가공깊이 6 $\mu$ m일 때의 결과를 나타낸 것이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Machined surfaces of (a) PC, (b) PMMA and (c) PVC<sup>[1]</sup>

이러한 burr 발생량 및 절삭성은 앞서 4.2절에서 식 (2)의 R 값을 통해 예측한 경향과 정확히 일치하였다. 따라서 비록 소재의 수가 세 가지로 한정되어 있으나 압입하중-변위곡선 분석을 통해 절삭성 및 burr 발생량을 예측할 수 있는 가능성을 확인하였다. 추후에는 폴리머 소재의 종류를 늘리고, 일반적으로 금형에 널리 사용되는 금속 소재로 소재의 범위를 확대하며, burr 발생량을 정량적으로 평가하여 R 값과의 관계를 정량적으로 비교하는 연구를 수행할 계획이다.

## 5. 결 론

폴리머 투명 금형의 절삭성 및 burr 발생량을 예측하기 위하여 계장화압입시험에서 얻어지는 압입하중-변위곡선을 분석하였으며 실제 가공결과와의 비교를 통해 다음의 결론을 얻었다.

1. 연성이 낮은 소재에서 우수한 절삭성 및 적은 burr 발생량이 관찰된다.
2. 연성은 계장화압입시험의 압입하중-변위곡선의 소성변형을 나타내는 최종압입깊이  $h_p$ 와 전체변형을 나타내는 최대압입깊이  $h_{max}$ 의 비인 R 값을 사용하여 예측할 수 있으며, R 값은 연성과 비례한다.
3. PC, PMMA, PVC의 세 가지 소재에 대해 R 값을 통해 연성이 PC>PVC>PMMA 순으로 예측되었다.
4. 세 가지 소재에 수행한 절삭가공의 결과 절삭표면이 PMMA>PVC>PC 순으로 우수하여 R 값을 통해 예측된 결과와 일치하였다.
5. 이를 통해 폴리머 투명 금형의 절삭성 및 burr 발생량을 압입하중-변위곡선의 분석을 통해 예측할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 주관 전략기술개발사업 “마이크로 기능성 초정밀 핵심요소부품 제조기반 기술 개발”의 일부 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Choi H. J. et al. "Analysis of Machining Characteristics for Micro Pattern of Transparent Polymer Panel using Diamond Cutting Tool and its Application", Proc. of the KSMPE Spring Conf., pp. 45-46, 2010.
2. 서남섭, "절삭가공학", 동명사 pp. 160, 2010.
3. Dieter, G. E., "Mechanical Metallurgy", McGraw Hill, pp. 290, 1988.
4. Oliver W. C., Pharr G. M. "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation

- Experiments", J. Mater. Res., Vol. 7, pp. 1564-1583, 1992.
5. Jeon E. c., Kim J. Y., Baik M. K., Kim S. H., Park J. S. Kwon D. "Optimum Definition of True Strain Beneath a Spherical Indenter for Deriving Indentation Flow Curves", Mat. Sci. and Eng. A, Vol. 419, pp. 196-201, 2006.
6. Filiz S., Conley C. M., Wasserman M. B., Ozdoanlar O. B. "An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills", Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, pp. 1088-1100, 2007.
7. Yuan Z. J., Zhou M., Dong S. "Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining", J. Mater. Proc. Tech., Vol. 62, pp. 327-330, 1996.
8. Boschetto A., Quadrini F. Squeo E. A. "Extracting local mechanical properties of steel bars by means of instrumented flat indentation", Measurement, Vol. 44, pp. 129-138, 2011.
9. KS B 0950, "금속 재료의 계장화 압입 시험 - 압입 인장 물성 평가", 한국표준협회, 2008.
10. Sakai M. "Energy Principle of the Indentation-induced Inelastic Surface Deformation and Hardness of Brittle Materials," Acta Metallurgica et Materialia, Vol. 41, pp. 1751-1758, 1993.