

겉보기 응력 개념에 기반한 공구각에 따른 비절삭저항 변화 분석

전은채^{*#}, 최환진^{*}, 이규민^{*}, 이윤희^{**}, 제태진^{*}, 김정환^{*}, 최두선^{*}

(*KIMM, **KRIS, #KIMM)

Analysis on Specific Cutting Resistance Variation by Tool Angles Based on a Concept of Representative Stress

Eun-cha Jeon^{*#}, Hwan-Jin Choi^{*}, Kyu-Min Lee^{*}, Yun-Hee Lee^{**}, Tae-Jin Je^{*},
Jeong-Hwan Kim^{*}, Doo-Sun Choi^{*}

(Received 3 January 2014; received in revised form 18 February 2014; accepted 11 March 2014)

ABSTRACT

In the past, prism patterns have been linear triangular shapes with a 90° angle; however, new micro prism patterns having acute angles or obtuse angles have recently been the subject of demand in the display, lighting and photovoltaic industries. Micro-cutting experiments for micro-prism patterns having 60°, 90°, and 120° angles on an electroplated Ni mold were performed and it was found in this study that the specific cutting resistance increased with a decrease in the tool angles (prism pattern angles). The cause of this variation had been thought to be the increase of the ploughing force due to tip rounding and the friction force due to the edge effect. However, the depth of the cut was large enough that it was possible to neglect these effects. Therefore, this study introduced the concept of representative stress of indentation. The measured stress was varied according to the indentation depth even though the tested specimens were identical; the varied stress was termed the representative stress. According to indentation theory, the strain that the Ni mold experienced increased with a decrease in the tool angle. Based on the stress-strain relationship, higher strain means higher stress and higher specific cutting resistance. Therefore, the specific cutting resistance was higher at smaller tool angles that had higher strain and stress.

Key Words : Specific Cutting Resistance(비절삭저항), Tool Angle(공구각), Representative Stress(겉보기 응력), Indentation(압입)

1. 서 론

과거 90도 프리즘형상으로 대표되던 광학패턴의 형상은 디스플레이, 조명, 태양광 등의 산업이 발전함에 따라 90도가 아닌 예각, 둔각 프리즘형상도 요구되고 있다^[1]. 또한 패턴의 크기도 점점 미세화되어 과거 100 μ m 이상을 가공하여야 했으나 현재는 24 μ m가 양산^[2]되고 있으며, 더 작은 크기를 가공하는 기술들도 개발 중에 있다. 프리즘 패턴 각도가 다양해지고 패턴 크기가 작아

* Dept. of Nanomanufacturing Technology, Korea Institute of Machinery and Materials

Corresponding Author :

Dept. of Nanomanufacturing Technology, KIMM

E-mail : jeonec@kimm.re.kr

** Div. of Industrial Metrology, Korea Institute of Standards and Science

침에 따라 미세 프리즘 패턴 가공 시에 공구와 소재 사이에서 발생하는 현상에 대한 이해가 더욱 필요해진다. 특히 미세 버 발생, 크기 효과 등이 중요하며, 이러한 현상들을 이해하기 위해서는 가공 시의 절삭력의 변화에 대한 연구가 필수적이다. 또한 절삭력에 대해 물리적 의미를 부여하고 소재의 특성과 연관시키기 위해서는 비절삭저항(specific cutting resistance)에 대한 조사도 같이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 프리즘 패턴의 각도 변화에 따라 마이크로 절삭 시에 비절삭 저항의 변화를 평가한 후 변화메커니즘을 규명하는 연구를 수행하였다.

2. 비절삭저항 이론

비절삭저항(K_s)은 식 (1)과 같이 정의되며 Fig. 1에서 보는 바와 같이 절삭 시에 측정되는 절삭력과 공구의 각도에 따른 절삭면적을 통해 구할 수 있다. 물리적 의미는 절삭을 할 때 공구가 느끼는 소재의 저항인데, 수식적으로 풀어보면 절삭 시 소재를 제거하기 위해 단위체적 당 필요한 에너지, 즉 비절삭에너지(specific cutting energy)와 같다. 또한 단위가 응력(stress)과 동일하기 때문에 소재의 강도(strength)와도 관계가 있다.

$$K_s = \frac{F_c}{A} \quad (1)$$

(F_c : 절삭력, A : 절삭면적)

기존 연구들을 통해 절삭면적이 감소하면 비절삭저항이 증가하는 현상은 발견^[3]되었으며 이 원인에 대해서는 Tip rounding에 의한 압괴력(ploughing force)의 증가^[4,6] 또는 가공되는 소재 내의 전위(dislocation) 변화^[7]로 해석되고 있다. 그리고 패턴 각도와 관련이 깊은 공구각과 절삭력 간의 상관관계에 대한 조사는 일부 존재하지만 비절삭저항과의 상관관계에 대한 연구는 많지 않다.

3. 실험방법

공구각에 따라 비절삭저항의 변화를 측정하기

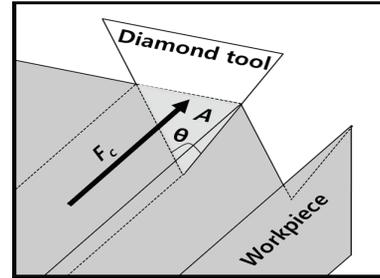


Fig. 1 A schematic diagram of micro-cutting

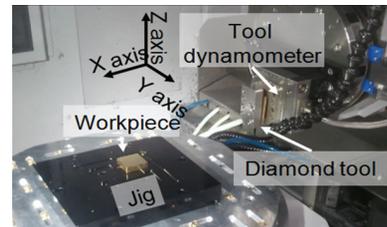


Fig. 2 A photo of an experimental system

위해서 60°, 90° 그리고 120°의 공구각을 갖는 다이아몬드 공구를 준비하였다. 각각의 공구를 사용하여 Fig. 2와 같이 UVM-450C(Toshiba Machine)에서 가공깊이가 25 μ m의 프리즘 패턴을 가공하였고 가공 중에 공구동력계를 사용하여 절삭력을 측정하였다. 가공속도는 6,000mm/min으로 설정하였다. 소재는 사전 실험을 통해 가공 후 표면상태가 우수한 니켈 도금 시편을 선정하여 사용하였다. 절삭면적은 가공깊이와 공구형상 간의 기하학적 관계를 이용하여 계산하였다. 측정된 절삭력과 계산된 절삭면적을 식 (1)에 대입하여 비절삭저항을 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 비절삭저항의 변화

본 실험을 통해 공구각에 따라 측정된 절삭력을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 공구각이 증가함에 따라 절삭력이 증가하였다. 이는 가공깊이가 모두 동일하기 때문에 공구각이 증가하면 공구와 소재가 접촉하는 면적, 즉 절삭면적이

증가하기 때문에 발생하는 현상이다. Kronenberg는 절삭력과 절삭면적, 인장강도 간에 식 (2)와 같은 관계가 있음을 제시하였다^[3].

$$F_c \propto A \cdot \frac{\sqrt[2]{\sigma_c}}{\sqrt[2]{b}} \quad (2)$$

(σ_c : 인장강도, b : 상수)

여기서 상수 b 는 소재에 따라 결정되는데 본 연구에서 사용된 도금된 니켈 소재 값은 기존에 제시되어 있지 않다. 본 연구에서 상수 b 값을 직접 구하기 위해서는 두 가지 공구각에서 얻어진 절삭력과 절삭면적을 식 (3)에 대입하면 된다. 세 가지 공구각에 대해서 실험을 수행하였기 때문에 총 3가지 조합에 대해 계산하여 각각의 경우에서의 b 값을 계산하여 Table 1에 나타내었다. 기존 문헌에 따르면 강(steel)의 경우에 b 값은 약 1.36에서 7.2에 이르기까지 다양한 값으로 나타난다^[3]. 본 연구에서 구한 값은 1.81에서 4.37의 값으로 일정한 값은 아니지만 범위는 기존 연구와 대비하여 크게 벗어나지 않는다. 그러나 상수임에도 불구하고 경우에 따라 값이 다르게 나온 점은 기존의 Kronenberg 식에서 고려하지 못한 인자들이 존재하며, 소재 물성이 아닌 절삭력만으로는 공구각에 따른 가공특성의 변화를 나타낼 수 없음을 의미한다.

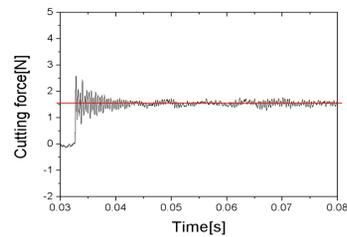
절삭력보다 소재의 물성을 잘 반영할 수 있는 비절삭저항을 식 (1)을 통해 계산하여 60도, 90도 그리고 120도에서 각각 4296, 3168 그리고 2790 (N/mm²)의 값을 구하였고, 이를 Fig. 4에 나타내었

$$b = \frac{\log\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{\log\left(\frac{F_{c1}}{F_{c2}} \cdot \frac{A_1}{A_2}\right)} \quad (3)$$

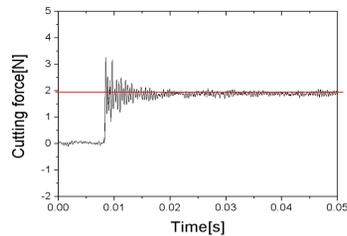
(θ : degree, F_c : N, A : *10⁻⁴mm²)

Table 1 Calculated constant b of Kronenberg equation

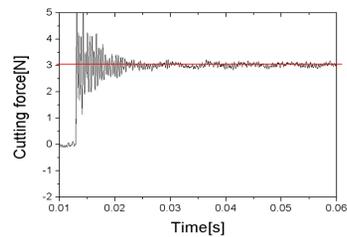
Θ_1	Θ_2	F_{c1}	F_{c2}	A_1	A_2	b
60	90	1.55	1.98	3.61	6.25	1.81
60	120	1.55	3.02	3.61	10.8	2.56
90	120	1.98	3.02	6.25	10.8	4.37



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Graphs of cutting force of (a) 60°, (b) 90° and (c) 120° (tool angle)

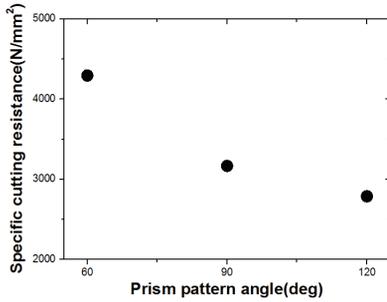


Fig. 4 Variation of specific cutting resistance by prism tool angle

다. 이때 사용한 절삭력과 절삭면적은 Table 1에 나타난 각 공구각에 대한 절삭력과 절삭면적 값과 동일하다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 비절삭저항은 공구각이 증가함에 따라 점차 감소하는 양상을 나타냈다. 공구각만 다를 뿐 소재, 가공속도, 가공깊이, 공구 소재 등 모든 조건이 동일함에도 불구하고 소재가 절삭될 때 나타나는 저항 또는 에너지가 달라진다는 것은 공구각에 따라 공구에 전달되는 절삭력의 구성성분 비율이 달라지거나 절삭 가공 시 소재가 나타내는 특성이 달라진다는 것을 의미한다. 여기서 절삭력의 구성성분 비율의 변화는 앞서 서술한 바와 같이 Tip rounding 또는 가공면의 Edge effect에 의한 압피력의 증가로, 소재의 특성 변화는 겉보기 강도(representative strength)의 증가로 생각할 수 있다. 이에 본 연구에서는 이들 원인들에 대해 논의하고 기존의 압피력 변화 이외에 겉보기 강도 관점에서의 비절삭저항 변화를 고려하였다.

4.2 압피력과 Edge effect

절삭과정에서 발생하는 절삭력은 소재를 제거하는데 소요되는 힘과 공구와 소재가 접촉하는 면에서 공구가 소재를 긁으면서 발생하는 힘으로 나눌 수 있다. 비절삭저항은 소재를 제거하는데 필요한 단위 부피 당 에너지이기 때문에 전체 절삭력에서 공구가 소재를 긁는 힘 성분을 제거한 뒤 계산하는 것이 원칙이다. 특히 Fig. 5와 같이 공구가 이상적으로 날카롭지 않기 때문에 필연적으로 생기는 Tip rounding 현상에 의해서 발생하는 소재를 긁는

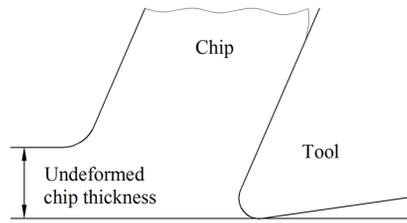


Fig. 5 A schematic diagram of tip rounding

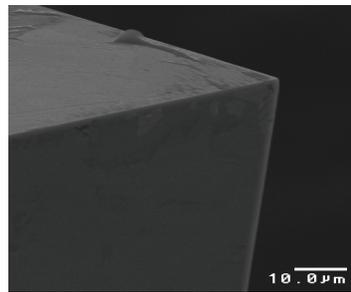


Fig. 6 A SEM photo of the used single-crystal diamond tool having 90° angle

힘(압피력)은 절삭깊이가 작을수록 전체 절삭력에서 차지하는 비율이 높아지며 이로 인해 치수효과(size effect)가 발생^[4-6]하는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 공구는 단결정 다이아몬드 공구로서 Fig. 6에서 보는 바와 같이 Tip rounding에 의해 손실된 깊이와 Tip rounding 영역의 폭이 모두 1μm 이내이다. 또한 절삭깊이를 25μm로 설정하여 25μm 깊이의 프리즘 패턴을 단 1회의 절삭으로 가공함으로써 Tip rounding 효과를 최소화하였다. 따라서 Tip rounding에 의한 압피력 효과는 본 연구에서는 미미하다고 판단하였다.

공구가 소재를 긁는 힘은 Tip rounding 부분에서 발생하는 힘 이외에도 공구와 소재가 맞닿는 Edge 부분에서도 발생한다. 특히 공구각이 작아짐에 따라 절삭면적 대비 Edge의 비율이 높아진다. 공구각과 절삭깊이를 θ 와 h 라 하였을 때 기하학적인 관계에 의해 Edge 길이는 $0.5h/(\cos(\theta/2))$ 이고 절삭면적은 $2h^2\tan(\theta/2)$ 로 나타난다. 본 연구에서 사용한 공구각에서 같은 절삭깊이일 때 Edge 길이와 절삭

면적의 비율은 1.73:1.22:1(60°:90°:120°)이기 때문에 이 힘이 전체 절삭력에서 차지하는 비율도 높아질 것으로 예상할 수 있다. 그러나 공구와 소재 간의 마찰에 의한 Edge effect를 분석하기 위해 별도로 수행한 연구^[8]에서 Tip rounding이 거의 없는 사각공구를 사용하여 마이크로채널의 깊이를 달리 하며 절삭력 및 비절삭저항을 측정하였을 때 Edge 길이의 비율이 증가함에도 불구하고 비절삭저항이 감소하였다. 간략하게 실제 데이터를 소개하면 종횡비가 0.2일 때 약 1,500N/mm²였던 비절삭저항이 종횡비가 1.0에서 약 1,800N/mm² 그리고 1.7에서 약 2,050N/mm²으로 계속 증가하였다. 이 실험은 절삭깊이가 변수인 점이 본 연구와는 다르지만 패턴 형상의 세로와 가로비, 즉 종횡비(aspect ratio)가 증가함에 따라 비절삭저항이 증가하였다는 공통점이 있다. 즉, 두 실험에서 종횡비와 비절삭저항은 비례하였으나, Edge effect는 실험에 따라 비절삭저항과의 관계가 일정하지 않았다. 따라서 Edge 길이의 비율이 증가하는 것만으로는 공구각의 변화에 따른 비절삭저항의 변화를 설명하기 어렵다.

4.3 겉보기 응력

앞서 설명한 바와 같이 기존에 알려진 원인들만으로는 공구각의 변화에 따른 비절삭저항의 변화를 설명하는 것이 충분하지 않다. 이에 본 연구에서는 기존에 압입시험(indentation test) 분야에서 사용되는 겉보기 응력 개념을 도입하였다. 압입시험은 특정한 형상을 갖는 압입자를 이용하여 소재를 눌렀다가 떼 후 남아 있는 압흔의 크기를 측정하여 경도(hardness)를 측정하는 시험법이다. 압입자의 형상은 크게 각진 압입자와 둥근 압입자로 나누어지며, 각진 압입자는 삼각 또는 사각피라미드 형상(Berkovich, Vickers), 콘 형상이 대표적이고, 둥근 압입자는 구 형상(Brinell)이 대표적이다. 최근에는 단순히 압입자로 눌렀다 떼는 것에서 발전하여 하중을 인가하고 제거하는 동안에 소재에 가해지는 하중과 압입자의 이동변위를 연속적으로 측정하여 경도 이외에도 탄성계수^[9,10], 인장물성^[11,12]을 구하는 계장화압입시험이 제시되어 널리 사용되고 있다. 압입시험은 국부적으로 매우 큰 소성변형을 일으키며 소재를 절개하는 현상을 일으키기 때문에

절삭가공 시에 소재가 겪는 현상과 매우 유사하다. 단, 절삭가공은 수평방향으로 소재를 변형시키는데 반해 압입시험은 수직방향으로 소재를 변형시키는 점이 다르다. 그러나 일반적인 금속소재는 방향성이 심하지 않기 때문에 동일한 현상으로 간주하여도 무방하며, 심지어 방향성이 있다 하더라도 절대적인 값을 연계시키지 못할 뿐 소재 특성 변화의 경향성은 동일하다. 따라서 압입시험에서 제시된 변형이론을 절삭가공에 적용하여도 무방하며 기존 연구에서도 절삭가공에 압입이론을 적용한 사례^[13]가 있다.

과거에 가장 널리 사용된 압입시험법은 구형압입자를 사용하는 Brinell 경도 시험법이였다. 압입자의 형상을 가공하기가 비교적 쉽고 압입시험이 가장 많이 사용되었던 철강소재에 적용하기 쉬웠기 때문이다. 그러나 Brinell 경도 시험법은 동일한 소재에 시험을 하더라도 압입하중(압입깊이)이 달라지면 경도값이 달라지는 치명적인 문제점을 가지고 있었다. 비록 Brinell 경도값이 물리적 의미가 없어서 단위도 없는 값이지만, 이 값을 물리적 의미가 있는 응력(stress)로 환산하여도 압입깊이에 따라 응력이 변하는 것은 동일하였다. 이 응력이 소재의 강도(strength)와 연관이 있음은 자명한 일이므로 동일한 소재가 시험 조건에 따라 다른 강도를 나타내는 것이었다. 이에 연구자들은 이를 겉보기 응력(representative stress)이라고 정의하였고, Brinell 경도 시험법의 경우에는 압입깊이에 따라 소성변형량이 달라지는 것이 원인으로 생각하였다. 이 겉보기 응력과 소재의 강도와 관계를 소성구속인자(plastic constraint factor)로 연관시켰고, 일축인장시험에서 얻어진 응력-변형률 관계(stress-strain curve)를 통해 이 겉보기 응력에 해당되는 변형률을 구하는 연구결과가 1951년에 처음 제시^[11]되었다. 따라서 Brinell 경도 시험법의 경우에는 압입깊이에 따라 겉보기 변형률(representative strain)이 변하고, 이로 인해 겉보기 응력이 변함으로써 소재가 나타내는 강도 특성이 압입깊이에 따라 변하게 된다. 이러한 현상은 프리즘패턴과 유사한 형상을 갖는 뾰족한 압입자에서도 발생한다. 같은 형상각을 갖는 압입자에서는 압입깊이에 따라 유사한 경도값이 나오지만 형상각이 달라지면 경도값이 달라

진다.

위에서 설명한 바와 같이 압입깊이(구형압입자) 또는 형상각(뾰족한 압입자)에 따라 겉보기 변형률과 겉보기 응력이 달라지는 점에 착안하여 일축인장시험을 통해서 구하던 응력-변형률 곡선을 압입시험만으로 구하는 연구들^[11,12]이 수행되었다. 이러한 연구들의 핵심 중 하나는 압입깊이와 형상각에 따른 변형률을 정의하는 것이다. 따라서 기존 연구들을 바탕으로 공구각의 변화에 따른 변형률의 변화를 살펴보면 절삭가공 시 소재가 나타내는 특성(겉보기 응력) 변화를 알 수 있으며 이로 인한 비절삭저항의 변화도 설명할 수 있다.

4.4 공구각과 각진 압입자의 변형률

본 연구의 프리즘 패턴은 각진 압입자와 형상이 매우 유사하다. 각진 압입자를 사용하면 하중과 압입깊이에 무관하게 일정한 경도 값이 나오기 때문에 Vickers hardness가 매우 널리 사용되고 있다.

Tabor^[14]는 Vickers 압입자로 측정된 경도를 변형률 0.08에 해당하는 응력으로 환산할 수 있다고 주장하였다. 또한 Milman^[15]은 여기에서 더 발전하여 Fig. 7과 같은 형상의 각진 압입자의 각도(γ)와 변형률 간의 관계를 식 (4)와 같이 제시하였다.

$$\epsilon = -\ln(\sin(\gamma_1)) \quad (4)$$

이 식에 Vickers 압입자의 각도인 136°의 반각인 68°를 대입하면 0.076의 변형률이 얻어지며 이는 앞서 Tabor가 제시한 값인 0.08과 유사하다. 식 (4)의 함수는 순감소함수이기 때문에 각도가 작을수

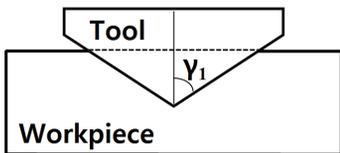


Fig. 7 A schematic diagram of hardness test using a pointed indenter having half angle of γ

록 높은 변형률을 얻게 된다. 또한 각도가 작을수록 종횡비는 커지므로 종횡비와 변형률이 비례하게 된다. 이 관계식에 본 연구에서 사용한 공구각을 대입하면 0.693, 0.347, 0.144의 변형률을 얻을 수 있다. 60°일 때의 변형률이 가장 높으며 각도가 커질수록 변형률이 작아짐을 알 수 있다. 즉 공구각이 작을수록 소재는 더 큰 변형률을 느끼게 되며 이에 따라 금속소재의 경우에는 가공경화현상으로 인해 가공을 하기 위해서는 높은 응력이 필요하다^[16]. 높아진 응력이 비절삭저항에 반영되어 공구의 각도가 작을수록 비절삭저항은 커지고 각도가 커지면 비절삭저항은 작아지게 된다.

4.5 공구각과 둥근 압입자의 변형률

압입시험에서의 변형률 연구는 각진 압입자보다 둥근 압입자, 특히 구형 압입자에서 활발히 이루어졌다. 앞서 서술한 바와 같이 각진 압입자는 압입깊이 및 하중이 달라도 동일한 변형률을 나타내기 때문에 경도가 일정한 장점이 있지만, 이로 인해 소재의 응력-변형률 곡선을 유도하기 위해서는 여러 종류의 압입자를 사용하여야 하는 단점이 있다.

이에 반해 구형 압입자는 압입깊이에 따라 Effective angle이 달라지기 때문에 식 (4)의 관점에서 보는 바와 같이 변형률이 계속 변한다. 따라서 압입 깊이에 따른 변형률과 그때 소재가 느끼는 Representative stress를 정의한다면 응력-변형률 곡선을 유도할 수 있으며 궁극

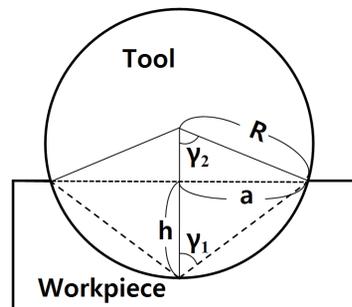


Fig. 8 A schematic diagram of hardness test using a spherical indenter having radius of R

Table 2 Calculated strain varied by tool angle

Tool angle	60°	90°	120°
Tabor	0.17	0.14	0.10
Kwon	0.24	0.14	0.08

적으로는 항복강도, 인장강도 등을 구할 수 있다. 구형 압입자를 이용하여 변형률을 구하는 방법은 크게 두 가지로 Fig. 8의 기하학적인 관계를 이용하여 Sine 함수를 기반으로 한 식 (5)와 같은 Tabor 변형률^[11]과 Tangent 함수를 기반으로 한 식 (6)과 같은 Kwon 변형률^[12]이 있다.

$$\epsilon = 0.2 \cdot \sin\gamma_2 = 0.2 \cdot \frac{a}{R} \quad (5)$$

$$\epsilon = 0.14 \cdot \tan\gamma_2 = 0.14 \cdot \frac{a}{R-h} \quad (6)$$

두 변형률 정의 모두 소재의 변형된 형상을 Fig. 7과 같이 삼각형의 각도로 표현하여 이 각도와 변형률을 연계하였으며, Fig. 8에서 보는 바와 같이 본 연구에서 가공한 프리즘 패턴의 형상각(γ_1)에 대응되는 구형 압입각(γ_2)는 식 (7)과 같은 관계를 갖는다. 이를 통해 계산된 변형률을 Table 2에 나타내었다. 구형 압입자를 이용한 변형률에서도 앞서의 각진 압입자의 변형률과 마찬가지로 각도가 작을수록 큰 변형률을 나타내었다. 또한 종횡비가 클수록 변형률이 커지는 것도 동일하다. 따라서 각진 압입자의 경우와 마찬가지로 작은 각도의 패턴을 절삭할 때 비절삭저항이 높게 나타나게 된다.

$$\gamma_2 = 180^\circ - 2\gamma_1 \quad (7)$$

4.6 소재의 변형률에 따른 응력 변화도 평가

앞서 서술한 바와 같이 프리즘 패턴의 각도가 작을수록, 종횡비가 클수록 소재가 느끼는 변형률이 커지는 것은 자명하다. 그런데 만약 소재의 응력-변형률 곡선에서 변형률의 증가에 따른 응력의

변화량이 매우 작다면 걸보기 응력의 변화량도 매우 작아지므로 비절삭저항의 변화도 미미할 것이다. 응력-변형률 곡선에서 변형률의 증가에 따른 응력의 변화량을 정량적으로 나타내는 지표가 가공경화지수(work-hardening exponent)이다. 가공경화지수는 일축인장시험을 통해 얻어진 응력-변위곡선의 소성변형부분을 식 (8)과 같이 수식화하였을 때 얻어지는 지수(n)이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 가공경화지수가 큰 곡선(II 곡선)은 작은 곡선(I 곡선)에 비해 동일한 변형률 변화(ϵ_1 에서 ϵ_2)에서 더 큰 응력 변화($\Delta\sigma_{II} > \Delta\sigma_I$)를 나타내게 된다. 따라서 가공경화지수가 클수록 변형률 변화가 동일하여도 응력 변화와 비절삭저항의 변화가 크다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (8)$$

(K : 응력계수)

그런데 본 연구에서 사용한 도금된 니켈소재는 두께가 300 μ m에 불과하여 일축인장시험 시편을 제작하기 불가능하다. 이에 앞서 4.5절에 서술한 바와 같이 계장화 압입시험을 이용하여 본 소재의 가공경화지수를 평가하였다. 일반적으로 박막 소재의 특성을 평가할 때는 두께의 1/10 이하의 압입 깊이로 시험을 하여야 하므로^[17] 반지름 50 μ m 구형 압입자를 사용하여 30 μ m 두께로 실험을 실시하였다. 사용한 장비는 AIT-U(Frontics, Inc.)로 압입시험

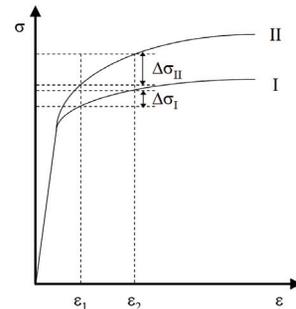


Fig. 9 A schematic diagram of two stress-strain curves having different work-hardening exponent

중에 하중과 압입깊이를 실시간으로 측정된 뒤 표준규격^[18]에 제시된 방법에 의거하여 가공경화지수를 계산할 수 있다. 동일한 실험을 5회 실시하였으며, 이를 통해 0.291의 가공경화지수를 얻을 수 있었다. 일반적인 철강 소재들이 0.0~0.3의 값을 갖는 것을 감안할 때 매우 높은 가공경화특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 따라서 소재가 느끼는 변형률의 변화에 따라 소재가 나타내는 길보기 응력의 변화도 클 것으로 예상할 수 있으며, 이로 인해 공구각 60°일 때의 비절삭저항이 120°일 때에 비해 약 1.5 배일 정도로 큰 비절삭저항의 변화가 발생한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 공구각에 따른 비절삭저항의 변화를 평가하고 그 원인을 분석하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 공구각이 작을수록 같은 가공깊이에서 절삭력은 작아지지만 절삭가공에 대한 소재의 저항을 의미하는 비절삭저항은 커진다.
- (2) 압입시험에서 정의되는 변형률은 공구각이 작을수록 그리고 중형비가 커질수록 증가하기 때문에 소재가 나타내는 길보기 응력이 증가하여 절삭에 필요한 비절삭저항도 증가하게 된다.
- (3) 가공경화지수를 통해 공구각에 따른 비절삭저항 변화정도를 나타낼 수 있으며 본 연구에 사용된 니켈 도금 소재는 일반 강 대비 높은 가공경화지수를 갖고 있어서 비절삭저항의 변화도 심한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부 “100nm~100 μ m 나노복합구조물 응용제품 생산을 위한 금형가공 및 에너지 100%절감 성형시스템 개발” 및 “자원절약형 고중형비형상 공정기술 기반구축사업”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Je, T. J., Choi, D. S., Jeon, E. c., Park, E. S., and Choi, H. J., "Trends of Flat Mold Machining Technology with Micro Pattern", J. Korean Soc. of Manuf. Proc. Eng., Vol. 11 No. 2, pp. 1-6, 2012.
2. "3M Optical Systems Vikuiti Brightness Enhancement Film II (BEF II)" (2014) <http://www.3m.com>(accessed 24, Feb., 2014)
3. 서남섭, 절삭가공학, 동명사, pp. 62-66, 2010.
4. Nakayama, K., and Tamura, K., "Size Effect in Metal-cutting Force", J. Eng. for Ind., Vol. 90, pp. 119-126, 1968.
5. Lucca, D. A., Seo, Y. W. and Komanduri, R., "Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultraprecision Machining", Annals of the CIRP, Vol. 42, pp. 83-86, 1993.
6. Kim, K. W., Lee, W. Y., and Sin, H. C., "A Finite-element Analysis of Machining with the Tool Edge Considered", J. Mater. Proc. Tech., Vol. 86, pp. 45-55, 1999.
7. Shaw, M. C., Metal Cutting Principles, Oxford Science Publications, Oxford, pp. 197, 1997.
8. Choi, H. J., Jeon, E. c., Kim, H. H., Kim, C. E., Je, T. J., and Shin, B. S., "Analysis of Specific Cutting Resistance according to Aspect Ratio in Micro Channel Machining", Proc. of the KSMPE Autumn Conf., pp. 160, 2013.
9. Doerner, M. F., and Nix, W. D., "A Method for Interpreting the Data from Depth-sensing Indentation Instruments", J. Mater. Res., Vol. 1, pp. 601-609, 1986.
10. 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., Vol. 7, pp. 1564-1583, 1992.
11. Tabor, D., Hardness of Metals, Clarendon Press, Oxford, pp. 2, 1951.

12. 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", Mater. Sci. and Eng. A, Vol. 419, pp. 196-201, 2006.
13. Dinesh, D., Swaminathan, S., Chandrasekar, S., and Farris, T. N., "An Intrinsic Size-effect in Machining due to the Strain Gradient", Proc. 2001 ASME Inter. Mecha. Eng. Cong. and Expo., pp. 197-204, 2001.
14. Tabor, D., "A Simple Theory of Static and Dynamic Hardness", Proc. of the Royal Society A, Vol. 192, pp. 247-274, 1948.
15. Milman, Y. V., Galanov, B. A., and Chugunova, S. I., "Plasticity Characteristic Obtained through Hardness Measurement" Acta Metall. Mater., Vol. 41, pp. 2523-2532, 1993.
16. Dieter, G. E., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company, pp.139, 1988.
17. Gamonpilas, C., and Busso, E. P., "On the Effect of Substrate Properties on the Indentation Behaviour of Coated Systems", Mater. Sci. and Eng. A, Vol. 380, pp. 52-61, 2004.
18. ISO/TR 29381:2008, "Metallic materials - Measurement of Mechanical Properties by an Instrumented Indentation Test - Indentation Tensile Properties", ISO, 2008.