

## 최대 칩두께를 이용한 소블레이드에서 칩핑과정의 역학적 모델링

김경우\*, 김우순\*, 최현민\*, 김동현\*\*

### Kinematics Modeling of the Chipping Process at Saw Blade using the Maximum Chip Thickness

Kyong-Woo Kim\*, Woo-Soon Kim\*, Hyun-Min Choi\*, Dong-Hyun Kim\*\*

#### ABSTRACT

In order to establish the optimum process parameters and diamond saw blade composition for machining natural stone, the chip formation process and the wear process must be understood. Diamond saw blade is one of the most effective, versatile, and extensively used methods of processing rock and other hard materials, such as granite, marble, concrete and asphalt. For many years, it has been known that chip thickness is one of the most significant in the understanding of the sawing process, and other variables such as force and power have been correlated with it.

In this study, mathematical relations of a material chipped by a single grit of the saw blade will be undertaken. The material chipping geometries have been mathematically defined and derived as maximum chip thickness.

#### 1. 서론

산업의 여러분야에 회전 다이아몬드 소 블레이드의 이용은 더욱 광범위하게 되었으며, 주된 적용분야는 자연석 가공, 도로 건설, 건축 등이다. 건물 장식에 대한 자연석 이용은 세계적으로 증가하고 있다. 이것은 부분적으로 환경적인 영향을 반대하는 것같이, 재료의 우수한 특성과 자연석의 경도와 장식적인 가치 때문이다. 주로 자연석 제품은 바닥과 벽을 장식하기 위한 다양한 크기의 타일이다. 이와 같은 목적을 위해 특별히 개발된 석재가공기계와 공구에 의해 원석으로부터 절단하여 원하는 형상의 타일을 얻게 된다.

석재 가공 산업에 있어서, 회전 다이아몬드 소 블레이드와 와이어 쏘는 체석장에서 경한 암석을 제거하기 위해 사용되었으며, 제거된 암석을 절단하기

위하여 사용되었다. 다이아몬드 공구는 여러 가지 잇점이 있지만 여러 가지 제한점들이 여전히 존재한다.

회전 다이아몬드 소 블레이드의 절삭가공역학에 대한 기본적인 연구를 할 필요가 있다. 회전 다이아몬드 소 블레이드 연구의 주된 과제 중에 하나는 다이아몬드 절삭 과정을 해석적으로, 수치적으로, 그리고 실험적으로 특성화하는 것이다. 다이아몬드 소 블레이드의 최적한 선택과 다이아몬드 소 블레이드의 사용은 또한 절단 모드, 블레이드의 외주 속도, 절단 깊이, 이송속도, 가공 조건, 피삭체를 포함하는 내부적인 많은 상호관계 인자에 서로 밀접한 관계가 있다. 위와 같은 많은 내부인자의 해석적이고, 수치적이며 실험적인 연구를 통하여 절단가공비용을 낮출 뿐만 아니라, 유도되어진 수치적인 관계의 최적화를 통하여 절삭가공에서 발생하는 절삭력을 낮출 수 있다.

본 연구에서는 회전 다이아몬드 소 블레이드의 단입자에 의해 형성된 재료의 칩을 수학적 관계를 이용하여 다루게 되며, 칩핑 형상의 수학적인 단지

\* 원광대학교 대학원 기계공학과

\*\*원광대학교 기계공학부

가공변수에 근거해서만 유도되어질 것이다. 유도된 칩형 형상변수는 연삭 분야에 대한 과거의 연구에서 칩 두께는 임의의 지수에 의한 칩-절삭력 관계에 비례한다는 것을 이용하여 유도하게 된다.

## 2. 본 론

### 2.1 다이아몬드 쏘 블레이드의 절단 시스템

최적 절단 가공을 위하여 절단 시스템의 구성 요소를 이해하여야 한다. 절단 시스템은 절삭 기계(강성, 구조적 안전성, 가공 조건의 수용 능력), 피삭재(자연석이기 때문에 다양한 구성 성분, 모양, 크기), 다이아몬드 쏘 블레이드(다이아몬드 모양과 크기, 다이아몬드 집중도, 메탈-본드 조직의 경도) 등으로 구성된다.

본 연구에서 사용한 피삭재는 화강암이다. 위에서 언급된 것처럼, 절단 시스템의 3요소는 상호작용을 하며 서로 영향을 미친다.

원형 다이아몬드 쏘 블레이드는 크게 다이아몬드 세그먼트와 블레이드 코어 두가지 성분으로 구성된다. 다이아몬드 세그먼트는 U.S Mesh size로 80/100~18/20인 다이아몬드 미립자들을 금속 매트릭스 결합체에 분산시켜 이루어진 합성재료이다. 금속 매트릭스 재료는 코발트, 청동, 텅스텐 카바이드 등을 포함한다. 일반적으로, 다이아몬드 세그먼트들은 통상적으로 20~50mm 범위의 길이를 갖는 계단모양으로 제조되었다. 다이아몬드 세그먼트는 각 세그먼트 사이에 홈이 있고 몇 밀리미터의 두께치를 갖는 얇은 강 블레이드 코어의 외주에 수직으로 놓여있다. 홈의 원주거리에 세그먼트 길이를 더하면 세그먼트 피치의 값이 된다. 블레이드 직경은 일반적으로 200mm에서 3m의 범위에 있다<sup>(1)</sup>.

Fig. 1은 다이아몬드 블레이드에 의한 일반적인 절삭과정을 나타내고 있다. 절단깊이, 블레이드 직경, 피삭재 속도, 다이아몬드 블레이드의 외주속도, 다이아몬드 블레이드 외주를 따라 측정된 첫 번째 입자와 두 번째 다이아몬드 입자사이의 원주거리 등의 변수들은 칩형상에 직접적 관계를 가지고 있다.

### 2.2 칩형성 과정

칩형성은 공구를 이용함으로써 피삭재료를 분쇄하

는 가공을 포함하는 모든 가공과정으로 나타내어질 수 있다. 이러한 칩형성 과정은 모든 재료에 대하여 일반적이다. 화강암 절단에 있어서, 세그먼트 표면상의 다이아몬드 미립자는 피삭재 표면의 스크래칭, 스폴링, 크랙을 통해 재료를 제거한다. 가공과정동안 칩형성은 피삭재료의 변형과 분리를 수반한다는 것을 관찰할 수 있다.

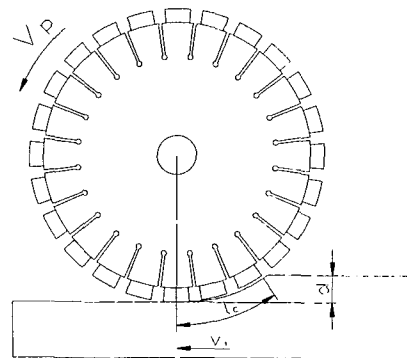
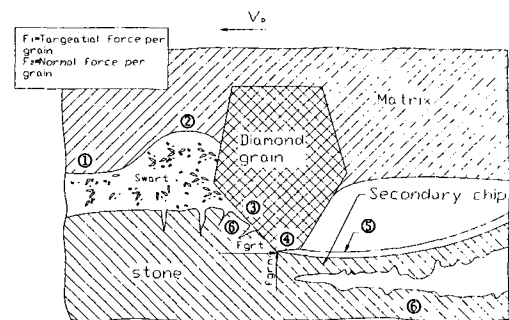


Fig. 1 Diamond blade cutting system

단순한 절인 형상에 기초한 모델은 Fig.2에서 나타내듯이 두 가지 메카니즘으로 칩형성과정을 나눌 수 있다<sup>(2)</sup>.



- ① Friction between swarf and matrix
- ② Matrix erosion by swarf and chips
- ③ Primary chipping zone
- ④ Friction between stone and grain
- ⑤ Plastic deformation
- ⑥ Elastic deformation

Fig. 2 Mechanical interaction between circular saw blade and workpiece when sawing stone

칩형성은 결정 크기와 강도같은 석재 재료의 물리적 특성, 다이아몬드 결정과 재료사이의 힘, 암석에서의 응력 분포, 회전 소 블레이드-피삭재 인터페이스에서의 온도 등 다양한 인자에 의해 결정되어진다.

칩형성 과정에 대응하는 것은 다이아몬드 세그먼트와 피삭재 표면에 발달된 복잡한 압축 응력과 전단 응력이다. 이러한 응력들은 소 블레이드, 다이아몬드 세그먼트, 피삭재 전체에 분포되어 있고, 일반적으로 작은 표면 접촉 면적 때문에 절삭 표면근처에서 꽤 크다.

Fig. 2에서처럼 절삭 가공에 수반되는 결정앞부분에서의 응력은 접선 전단력에 의해서 발생한다. 이 영역에서는 인장응력과 압축응력을 포함한다. 이와 같은 메카니즘을 1차 칩형성으로 나타낸다. 파편(swarf)는 결정 측면과 결정 앞면의 흠을 통하여 빠져나오게 된다<sup>(3)</sup>.

암석이 극한 응력을 넘어 탄성특성을 보이는 동안, 암석이 절단되기 전에 임의의 최소 칩두께를 초과할 것이 틀림없다. 다이아몬드 아래에 하중을 가하는 것은 변형된 피삭재료 때문이다. 하중이 제거될 때, 탄성회복은 취성과파괴에 기인한 임계인장응력을 수반한다. 인장 응력에 의해 영향을 받는 이런 매카니즘은 두 번째 칩 형성을 나타낸다<sup>(3)</sup>.

이와 같은 칩 형성과정에서 발생한 파편(swarf)은 냉각수에 의해 제거된다.

### 2.3 칩두께의 수학적 모델링

많은 연구자들에 의하면, 다이아몬드 절단 작업을 하는 동안 기계적 가공에 영향을 주는 결정 인자는 칩두께 변수에 의해 특징지어지는 칩 형성이다<sup>(4)</sup>. 칩 두께 변수는 요구되는 접착제 강도의 영향에 따라 입자상의 접촉 응력을 결정하기 때문에 중요하다. 연삭가공에 있어서 제거되는 재료의 단위 체적당 에너지 손실, 즉 비에너지는 최대 칩 두께의 함수임을 알 수 있다.

칩의 호길이,  $l$  은 첫 번째 입자에 의해 정의되어지며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l = \frac{D}{2} \sqrt{\left(\frac{4d}{D}\right) - \left(\frac{4d^2}{D^2}\right)} \quad (1)$$

$$= \frac{D}{2} \sqrt{\frac{4d}{D} \left(1 - \frac{d}{D}\right)}$$

여기에서,  $D$ 는 원형 소 블레이드의 직경이고,  $d$ 는 절단깊이이다.

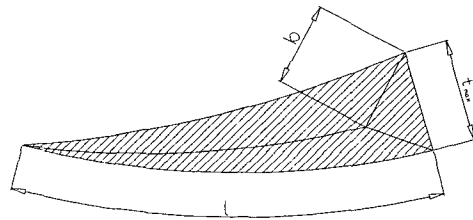


Fig. 3 Schematic of chip geometry

$d/D \ll 1$ 이라 가정하면, 두 번째 항은 이전의 1점 절삭 이론에서 무시되었다. 하지만, 정확한 칩 두께를 얻기 위하여 고려되어야 한다.

재료제거율  $Z$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Z = d \cdot W \cdot T \quad (2)$$

여기에서,  $W$ 는 절삭폭이고,  $T$ 는 피삭재 속도이다.

(2)식을 다시 쓰면 다음 식과 같다.

$$Z = V \cdot N \quad (3)$$

여기에서,  $N$ 은 단위시간당 칩의 개수이고,  $V$ 는 단일 칩 체적이다.

Fig.4에서 나타낸 것과 같은 모양일 때, 칩 체적은 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$V = \frac{1}{6} \cdot A \cdot l = \frac{1}{6} \cdot b \cdot t_{\max} \cdot l \quad (4)$$

여기에서,  $A$ 는 최대 칩두께에서 단면적이고,  $b$ 는 칩의 폭을 나타낸다.

$$N = W \cdot v \cdot C \quad (5)$$

여기에서,  $v$ 는 소블레이드의 속도이고,  $C$ 는 세그먼트 외면상의 단위 면적당 실제 입자의 갯수를

의미한다.

따라서, 식(4)와 (5)를 (3)에 대입하면,  $Z$  방정식은 다음과 같다.

$$Z = \frac{1}{6} b \cdot t_{\max} \cdot l \cdot N \quad (6)$$

$$= \frac{1}{6} b \cdot t_{\max} \cdot \left[ \frac{D}{2} \sqrt{\frac{4d}{D} \left(1 - \frac{d}{D}\right)} \right] \cdot [W \cdot V \cdot C]$$

그리고, 식(2)와 (6)으로부터 유도함으로써,  $t_{\max}$  방정식은 다음과 같이 구하여졌다.

$$t_{\max} = \sqrt{\frac{6T}{v \cdot R \cdot C} \sqrt{\frac{d}{D-d}}} \quad (7)$$

여기에서,  $R$ 은 하나의 입자에 대해서 깊이에 대한 폭의 비를 나타낸다.

식(7)을 살펴보게 되면, 다이아몬드 결정에 가해지는 힘과 가공조건간의 관계를 나타낸 것이다. 방정식 (7)은 절단공정중의 고려하여야 할 모든 인자를 취하였으며, 원형 소 블레이드상의 다이아몬드 결정에 의해 절단되는 칩두께  $t_{\max}$ 과의 관계를 나타낸다. 여기에서 칩두께  $t_{\max}$ 은 피삭재 이송속도  $T$ 의 제공근에 비례하고 다이아몬드 블레이드의 원주속도  $v$ 의 제공근에 반비례함을 알 수 있다. 또한, 칩두께  $t_{\max}$ 은 절단깊이  $d$ 에 비례하고 소 블레이드 직경  $D$ 에 반비례한다. 그러나, 이를 좀 더 완전히 이해하기 위해서는 다이아몬드 부하와 칩두께  $t_{\max}$ 간의 관계가 밝혀야 한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 최대 칩두께에 대한 관계이론

이전의 1점 절삭 이론에 있어서, 연삭가공(또는 절단가공)에서의 칩 절단 형상은 길고, 가느다란 삼각형으로 고찰되었다. 더욱이, 접촉각  $\theta_{\max}$ 이 작게 고려되었기 때문에 미변형 칩 길이  $l_c$ 는 대략 현의 길이와 같도록 고려되었었다. 이와 같은 근사방법에 기초하여 미변형 칩길이  $l_c$ 는 다음과 같이 쓸 수 있

다.

$$l_c = \sqrt{DH} \quad (8)$$

Backer 등<sup>(5)</sup>과 Pai<sup>(6)</sup>는 칩의 형상을 삼각형으로 가정하였으며 미변형 칩길이  $l_c$ 를 이용하여 최대 칩두께  $t_{\max}$ 에 대한 방정식을 다음과 같이 단순화하여 정의하였다.

$$t_{\max} = \frac{2v_T \lambda}{v_P} \sqrt{\left(\frac{h}{D}\right) - \left(\frac{h}{D}\right)^2} \quad (9)$$

$h/D \ll 1$ 로 가정하였기 때문에 2차 항은 무시할 수 있어서 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$t_{\max} = \frac{2v_T \lambda}{v_P} \sqrt{\left(\frac{h}{D}\right)} \quad (10)$$

Backer 등과 Pai에 의해 계산된 입자 간격  $\lambda$ 를 이용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{1}{Cw_c} = \frac{1}{Cr(t_{\max}/2)} \quad (11)$$

Reichenbach 등<sup>(7)</sup>에 의해 잘 알려진 최대칩두께 방정식은 다음과 같다.

$$t_{\max} = \sqrt{\frac{4v_T}{v_P \cdot C \cdot r} \sqrt{\frac{h}{D}}} \quad (12)$$

여기에서,  $w_c$ 는 평균칩폭이고,  $r$ 은 단일 입자에 의해 생성되는 굵힘의 깊이당 폭의 비를 의미한다.

$t_{\max}$ 에 대한 등식을 유도하기 위한 교차법은 체적 연속점을 이용하여 얻을 수 있다. 단일칩의 체적은 (a) 칩의 형상을 길고 가느다란 삼각형이라고 가정함으로써 구할 수 있고, (b) 단위시간당 생성되는 칩의 개수에 의해서 재료제거율을 분할함으로써 구하는 두가지 방법이 있다.

(a)와 (b)의 방법에 의해서 개발된 관계식에 의해서  $t_{\max}$ 에 대한 식은 식(12)와 동일하게 정의될 수 있다<sup>(8)</sup>.

### 3.2 개선된 모델의 비교

개선된 모델을 이전 연구자들에 의해 정립된 모델과 비교하기 위하여, 최대칩두께 방정식을 정리하여 다시 썼다. 이전의 모델들은  $h/D \ll 1$ 로 가정하였기 때문에 식(1)의 2차항을 무시하였다. 그러나, 본 연구에서는 식(1)의 2차항은 개선된 모델에 의해 정의된  $t_{max}$ 을 계산하기 위하여 이용되었다. 이전 모델과 개선된 모델을 비교하기 위하여 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

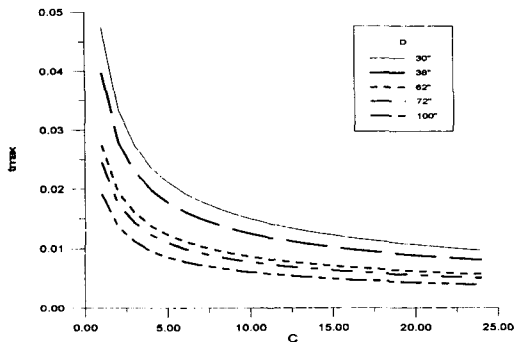


Fig. 4 The depth of cut to blade diameter ratio  $h/D$  as a function of the maximum chip thickness for diamond saw blade of variable diameter

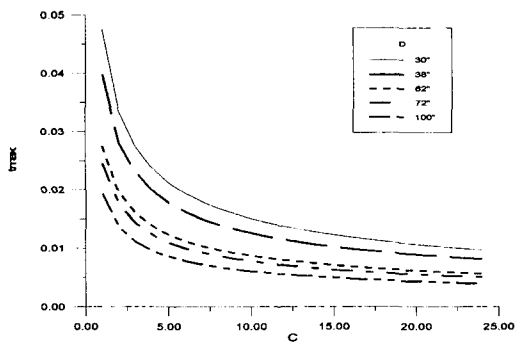


Fig. 5 The depth of cut to blade diameter ratio  $h/D-d$  as a function of the maximum chip thickness for diamond saw blade of variable diameter

Fig. 4와 Fig. 5는 다양한 직경의 다이아몬드 소블레이드에 대하여  $h/D$ 와  $h/D-d$ 에 대한 최대 칩두께의 함수로서 출력된 값들을 비교하여 보여주고 있다. 이 그래프는 실제 가공비를  $h/D$ 와  $h/D-d$ 의 모든 범위를 포함한다. 깊이-직경비는 0~0.35의 범위를 갖는 그래프의 가로좌표이다. 두가지 모델에 있어서,  $h/D-d$  또는  $h/D$ 가 증가함에 따라서 최대 칩두께도 증가한다. 이러한 곡선은 특히 상한  $h/D-d$ 범위에서 개선된 모델에 대한 최대 칩두께가 이전 모델보다 약간 큼을 보인다. Fig. 6 과 Fig. 7은 이송과 회전수(rpm)에 대하여  $C$ 에 대한 최대 칩두께의 함수로서 그래프를 나타내고 있다.

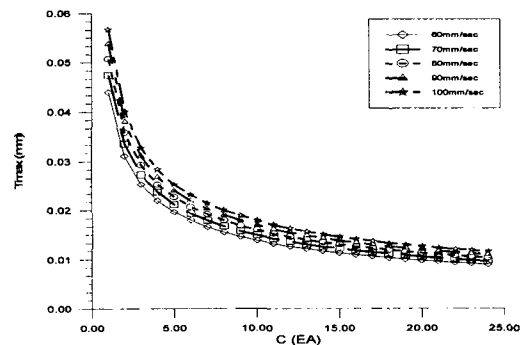


Fig. 6 Number of action grit per unit area as a function of the maximum chip thickness for feed

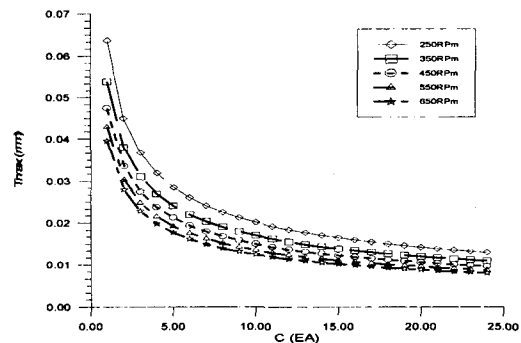


Fig. 7 Number of action grit per unit area as a function of the maximum chip thickness for RPM

#### 4. 결 론

원형 다이아몬드 소블레이드에서 최대 칩두께를 이용한 칩핑과정의 역학적 모델링에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서는 칩형성 형상을 수치적으로 규정하였으며, 최대 칩 두께로 정의하였다.

2) 최대 칩두께에 대한 방정식은 깊이-직경변수 즉  $h/D-d$ 만의 함수로 유도되었다.

3) 최대칩두께  $t_{max}$  은  $h/D-d$ 가 증가함에 따라 증가한다. 특히, 직경이 증가하면 최대칩두께는 감소한다. 반대로 절단깊이가 증가하면 최대칩두께의 크기는 증가한다.

#### 참고문헌

1. GE Superabrasive, Application of Superabrasive and Superabrasive Tool, 1999.
2. Tönshoff, H.K. and Asche, J., Wear of Metal-Bond Diamond Tools in the Machining of Stone, Industrial Diamond Review, pp.7-13, 1997.
3. W. Ertingshausen, Zerspanung Von granit mit

Diamanttrenn-schleifscheiben (Cutting Granite with Diamond Abrasive Blade), doctoral thesis, Tu Hannover, 1984.

4. Brecker, J.N, and Shaw, M.C, Measurement of the Effective Number of Cutting Points in the Surface of a Grinding Wheel, Proceedings of the International Conference on Production Engineering, Tokyo, Japan, pp.740-745, 1974.

5. Backer, W.A.R, Marshall, E.R, Shaw, M.C, The Size Effect in Metal Cutting, Transactions of the ASME, Vol.74, Jan, pp.61-71, 1952.

6. Pai, D.M, A Fundamental Study of the Diamond Sawing of Rock, Ph. D. Dissertation, Arizona State University, May, 1987.

7. Reichenbach, G.S, Mayer, J.E, Kalpakcioglu, S., and Shaw, M.C, The Role of Chip Thickness in Grinding, Transactions of the ASME, Vol.78, May, pp.847-859, 1956.

8. Tönshoff, H.K. and Warnecke, G., Research on Stone Sawing, Advances in Ultrahard Materials Applications Technology, P.Daniel, Hornbeam, ed., England, Vol.1, pp.36-49, 1982.