

## 다이아몬드 공구의 회전원판내 응력 분산을 위한 슬롯 위치의 최적화

박성일<sup>†</sup> · 이상진 · 변서봉 · 황성택  
신한다이아몬드공업(주) 중앙연구소

### Optimization of Slot Location for Stress Distribution in Rotating Disc of Diamond Tools

Sungil Park<sup>†</sup>, Sangjin Lee, Seopong Byun and Seungtaek Hwang

36B-10L Namdong Industrial Estate, 610-9 Namchon-dong, Namdong-gu,  
Shinhan Diamond Industrials Co. Ltd., Incheon 405-100

(2005년 5월 6일 받음, 2005년 8월 22일 최종수정본 받음)

**Abstract** The objective of this paper is to decide optimal of the slot angle to minimize stress concentration in rotating disc of diamond saw. The fracture phenomena of the slot are discussed by the theoretical and experimental approaches and then some recommendation are presented to prevent the fracture. The focus of this investigation is to evaluation the effect of the slot on stress distribution using optimum design technique and finite element method(FEM) analysis. Stress concentration of the slot with respect to the various parameter of the slot such position, size, number, rotation speed. From the experimental results, when the slot angle of diamond saw is located  $8^{\circ}$ ~ $12^{\circ}$  from rotating direction, the maximum equivalent stress reduces.

**Key words** Stress distribution, compliance, crack propagation, diamond disc saw, energy release rate.

#### 1. 서 론

산업의 발달로 고속 회전체가 증가함에 따라 회전원판의 안정성은 시스템 성능 관점에서 매우 중요한 요소이다. 최근 다이아몬드 원형 톱을 대상으로 한 손상평가 및 수명예측의 기술개발에 대한 관심이 고조되고 있고, 안전사용 및 경제적 운영의 필요에 따라 수명평가가 중요한 문제로 대두되고 있다. 다이아몬드 원형 톱은 원주방향에 대해 슬롯(slot)을 만들어 피삭재 절삭시 발생하는 절분 배출 및 충격 흡수하는 기능으로 제작하여 사용하고 있다. 그러나, 고속회전시 피삭재의 성질에 따라 다이아몬드 톱에 부하가 많이 걸리게 되면서 절삭시에 많은 진동의 발생으로 인해 슬롯부분에 응력 집중부가 존재하게 된다. 이로 인해, 피삭재 절삭 공정 중에 응력이 재료의 항복강도를 초과하게 되어 균열이 발생하고 결국에는 다이아몬드 원형 톱이 파손에 이르게 되어 막대한 재산 및 인명 피해가 발생하게 된다. 이러한 원인으로 인해 다이아몬드 원형 톱에서 발생하는 기계적 성질의 저하와 함께 균열에 의한 손상을 파괴역학적으로 규명할 수 있는 인자의 적용이 필요하다.

회전원판에 관한 연구로써 Carlin와 Appl, Dubois<sup>1)</sup>는

등근 톱날에서 초기 장력과 반경방향으로 평면응력이 집중된 휠에 대해 에너지 법을 이용하여 톱의 거동을 해석하였고, Tweed와 Rooke<sup>2)</sup>는 평면 변형을 조건에서 반경보다 작은 균열선단에서 회전원판에 대한 응력세기계수를 특이 적분형으로 유도하였다. 이러한 해석적 방법은 원형평판의 균열문제에 대해 회전체 형상 및 최종해의 계산에 의해 서로 다른 복잡한 형태로 표현되어 결과적으로 수학적 접근 방법에 의존하여야 하는 문제점을 내포하고 있다. 이를 해결하기 위해서 본 연구에서는 실질적으로 현장 적용을 위해 직경 343 mm 상크와 두께 7 mm의 다이아몬드 톱을 레이저 용접 공정을 통하여 SCM435 다이아몬드 원형 톱과 외부 하중에 따른 균열진전 시험을 위해서 인장시험편을 제작하여 파괴역학 실험을 실시하였다. 실험을 통해 최대응력에서의 컴플라이언스(compliance)를 측정하고 이를 에너지로 환산하여 균열 진전시 발생하는 에너지 방출률(energy release rate)에 의한 파괴역학 인자를 검토하였다. 또한, 피삭재 절삭시 발생하는 진동이 다이아몬드 원형 톱의 응력집중부에 미치는 영향을 검토하기 위해서 고유진동수를 측정된 주파수와 수치해석 결과로부터 얻은 주파수모드를 비교하였다. 유한요소 해석과 실험에서 구해진 결과를 토대로 절삭시 발생하는 슬롯부위의 응력집중으로 인한 파단 현상을 에너지 방출률에 따른 슬롯 각

<sup>†</sup>E-Mail : sipark@shinhandia.co.kr

의 최적화로 다이아몬드 원형 톱의 최적 설계조건을 제시한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험편의 형상 및 치수

원형평판의 고유진동수와 응력분포의 변화를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 SCM435 350 mm 다이아몬드 원형 톱을 제작하였다. 또한, 역학적으로 취급하기 위해서 가급적 시험편을 단순화하여 실제 치수보다 1/4의 슬롯의 크기로 Fig. 2와 같은 형상과 치수로 시험편을 제작하였다. 상크 재료의 기계적 물성치와 화학적 조성은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

### 2.2 시험편의 제작

SCM435 판재를 소정의 치수로 가공하고 슬롯 부위의

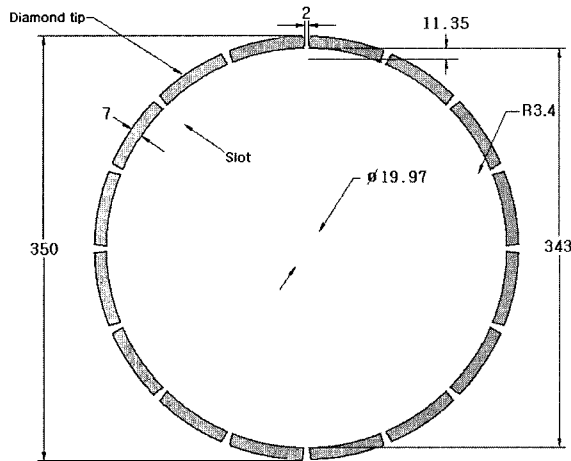


Fig. 1. Shape and dimension of diamond disc saw.

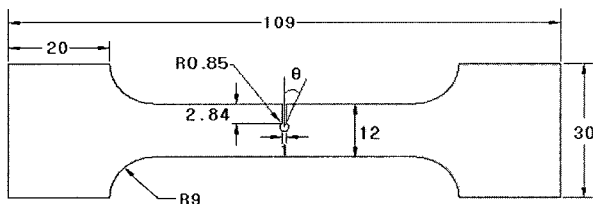


Fig. 2. Shape and dimension of tension specimen.

Table 1. Material properties of SCM435

Material properties	Young's modulus, E	Poisson ratio, $\nu$	Elongation
SCM435	210 GPa	0.3	18%

Table 2. Chemical composition of SCM435

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SCM435	0.36	0.26	0.73	0.018	0.011	0.13	0.99	0.17	0.20

제작은 펀칭(Punching)을 이용하였고, Co, Fe, Mn 등의 분말을 이용한 소결체로 다이아몬드 톱을 제작하였다. 소결 공정으로 완성된 다이아몬드 톱을 레이저 용접 공정을 통하여 다이아몬드 원형 톱을 완성하였다. 또한, 인장시험편은 소정의 치수로 밀링과 와이어 커팅을 이용하여 가공하였다. 슬롯 각을  $0^\circ \sim 20^\circ$  로 변화시켜가면서 펀칭 작업을 하여 시험편을 제작하였다.

### 2.3 특성시험

다이아몬드 원형 톱의 고유진동수와 모드 형상을 측정하기 위해서 Fig. 3과 같은 시스템을 구성하였다. 실험에 사용되는 시험편의 모달(modal) 모델을 제작하기 위해서는 다이아몬드 원형 톱을 기하학적으로 표현할 수 있는 충분한 노드로 구성하였다. 따라서, 원형 톱을 48점으로 등분하여 해석적 모달 주파수를 확인하고 모드 형상을 추출하기 위해서 다이아몬드 원형 톱 표면에 모래를 뿌린 후 가진기를 작동 시켜 특정 고유진동수의 모드 형상 관찰하였다. 실험적인 데이터는 낮은 주파수 (0~5 kHz)에서 모드형상을 파악하고 유한요소 해석 결과를 통하여 검증하고 교정하였다. 또한, 슬롯 부위의 응력분포를 구하기 위해서 SCM435로 제작한 인장시험편을 이용하여 슬롯부위에서 발생하는 균열진전 실험은 만능재료시험기(Hounsfield H10 KT)를 사용하여 변위제어 방식으로 하중속도는 0.1 mm/min 으로 하였다. 하중-하중점 변위선도는 X-Y 레코더를 사용하여 기록하였고, 하중점의 변위는 클립 게이지를 사용하였다. 이때, 발생하는 균열 진전 길이의 측정은 광학 현미경으로 100배 확대하여 측정하였다. 슬롯 각의 변화에 따라 제작된 시험편마다 실험에서 기록된 하중-하중점 변위선도로부터 각 균열 진전 길이에 대한 컴플라이언스를 구하였고, 이 컴플라이언스 값을 에너지로 환산하여 슬롯 각의 변화에 따라 발생하는 에너지 방출률을 계산하였다.

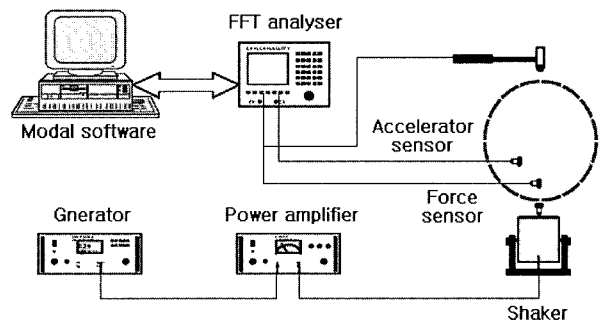


Fig. 3. Diagram for measurement of natural frequency.

2.4 회전원판에 작용하는 고유주파수

얇은 회전원판의 고유주파수 측정시 다음과 같은 가정을 고려하여야 한다. 먼저 원형평판은 두께가 지름의 1/10 보다도 작은 얇은 판으로 평평하며 일정한 두께를 갖고 균질의 등방성 재료로 구성되어진다. 또한, 평판은 파동변형을 통하여 변형하며 관성모멘트와 전단변형은 무시한다.

원형평판이 변형을 진행하는 동안 평판의 중앙면은 응력을 받지 않은 상태로 남아 있으며, 다른 모든점에서는 평면응력상태로 존재한다. 응력과 변형은 중앙면으로 부터의 거리에 비례하여 최대응력과 변형은 원판의 표면에 존재한다.

따라서, 원형평판의 고유진동수는 다음과 같다.

$$F_{ij} = \frac{S_{ij}^2}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Eh^3}{12m(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

여기서,  $S_{ij}$ 는 무차원 파라미터로서 일반적으로 평판에 있어서의 경계조건, 푸아송 비( $\nu$ )의 함수이고,  $m$ 은 단위 면적당 질량,  $h$ 는 평판의 두께를 나타낸다.

2.5 균열에서의 응력해석

균질재에서 Fig. 4와 같이 표면력이 자유인 경계조건을 갖는 균열선단의 응력은  $\theta=0$ 일 때 균열선단에서 거리  $r$ 인 경우 응력분포는 다음식과 같이 표시된다.<sup>3-5)</sup>

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\rho}{2r} \sin \frac{3\theta}{2} \quad (4)$$

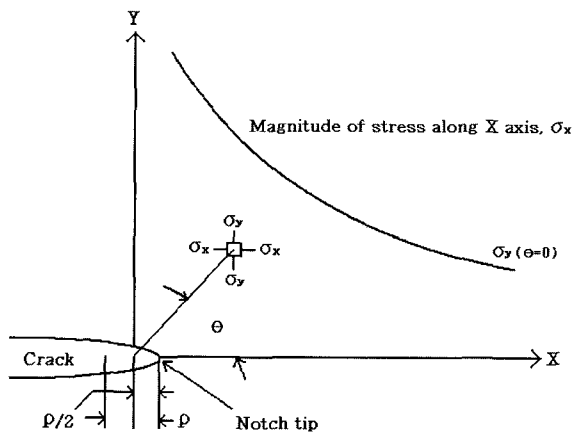


Fig. 4. Crack-tip stress field in the notch.

여기서,  $K_I$ 는 응력세기계수이고,  $r$ 은 균열선단으로 부터의 거리이다. 식 (2), (3), (4)를 사용하여 균열진전에 따른 슬롯 파단 각을 계산하였다.

2.6 균열진전에 따른 에너지 방출률

균질재 및 선형 탄성체의 파괴역학 인자는 일반적으로 응력세기계수가 사용된다. 응력세기계수는 균열선단 근방의 변위와 응력해석 결과를 이용하지만, 균열 선단에서 균열 진전시 진동 응력특이성이 발생하기 때문에 정말도 높은 응력해석을 하는 데는 많은 어려움이 있다. 그러나 에너지 방출률은 균열선단의 일정거리에서 하중점의 변위를 이용하기 때문에 실험에서 직접 측정된 컴플라이언스로부터 계산이 가능하다. 또한, 균열선단 근방에서 발생하는 진동 응력특이성도 상쇄되기 때문에 일반적으로 에너지 방출률이 적용되고 있다.

에너지 방출률은 컴플라이언스를 실험에서 직접 측정하여 구할 수 있다. 두께  $B$ , 균열길이  $a$ 인 탄성체에 정적하중  $P$ 가 작용하여 균열이  $da$ 만큼 진전하였을 때, 하중-하중점 변위선도에서 컴플라이언스  $C$ 와 변위  $\delta$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (5)$$

또한, 에너지 방출률  $G$ 와 컴플라이언스  $C$ 는 다음 식으로 표시된다.<sup>6)</sup>

$$G = \frac{dU}{dA} = \frac{1}{B} \frac{dU}{da} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (6)$$

여기서,  $dU$ 는 균열진전에 따른 탄성 변형률 에너지의 증분을 나타내고,  $dA$ 는 증분된 균열의 면적이다. 따라서, 본 연구에서는 식 (6)을 이용하여 균열진전에 따른 에너지 방출률을 구하였다.

2.7 유한요소해석

다이아몬드 원형 톱의 고유진동수와 슬롯 부분의 응력 분포를 해석하기 위한 과정은 다음과 같다.

수치해석을 통해 원형 톱의 고유진동수를 구한 다음 진동에 따른 슬롯에 미치는 영향과 슬롯의 크기 및 위치 각에 따른 응력분포를 살펴본 후, 설계변수의 범위를 설정하여 실험에서 구한 값과 비교 검토를 통하여 최적의 슬롯 각을 결정한다. 유한요소 해석은 4절점 6자유도를 갖는 쉘 요소를 사용하여 전체 형상을 간편화하기 위해서 실제 크기의 1/4로 모델링 하였으며, Fig. 5에 해석 모델을 나타내었다. 경계조건은 대칭경계 조건을 적용하였고, 원형 톱의 두께 방향은 고정하고 반경방향과 회전 방향은 자유롭게 이동할 수 있도록 설정하였다.

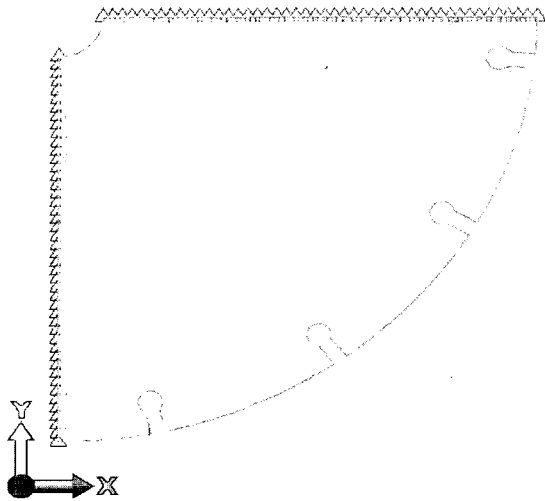


Fig. 5. Mesh shape for rotating disc of diamond saw.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 다이아몬드 원형 톱의 고유진동수

다이아몬드 원형 톱의 동적 문제를 완벽히 특성화시키기 위해 모달 실험과 유한요소 해석을 복합적으로 수행하였다.

Fig. 6은 모래를 이용한 모드 형상을 가시화하여 다이아몬드 원형 톱의 동특성을 구하기 위하여 모래 실험 방법에 의해 측정된 고유진동수와 모드형상을 유한요소법에 의한 수치해석 결과와 비교하였다. 고유진동수 1916 Hz에서 측정된 것으로 수치해석 결과와 잘 일치하고 슬롯 부분에 응력집중 현상이 발생하고 있다.

Fig. 7은 유한요소해석과 실험에 의해서 측정되어진 고유진동수와 변위의 관계를 나타내고 있다. 실험 데이터는 낮은 주파수 0~5 kHz에서 유한요소 해석 결과와 잘 일치하였다. 다이아몬드 회전 톱은 600~900 Hz에서 성분이 크게 나타나므로 고유진동수가 이 주파수를 피하여 설계하는 것이 가장 적합하다.

#### 3.2 다이아몬드 원형 톱의 컴플라이언스

Fig. 8은 실험에서 측정된 하중과 하중점의 변위를 사용하여 슬롯 각  $\theta=0^\circ$ 에서 컴플라이언스를 구한 후, 무차원 균열길이에 대해서 유한요소 해석 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 무차원 균열길이에 대한 컴플라이언스의 변화는 균열길이가 증가할수록 비례적으로 증가하고 유한요소 해석 결과와 잘 일치하였다. 또한, 파괴 모드 I 성분이 지배적으로 작용하고 변위에 비해 하중이 크게 작용하기 때문에 컴플라이언스가 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 9는 무차원 균열길이와 축 방향 최대 파괴응력의 관계를 나타낸 것이다. 균열길이가 증가할수록 축 방향 최대 파괴응력은 비례적으로 증가한다.

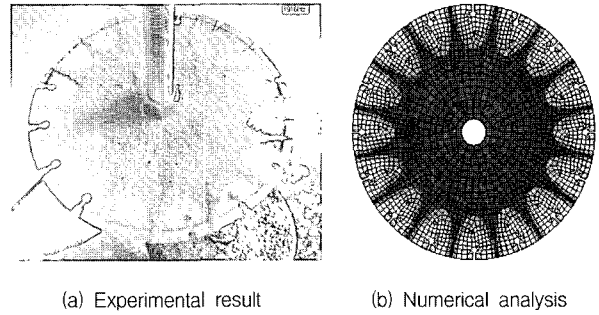


Fig. 6. Comparison of experimental with numerical analysis results. (Natural frequency: 1916 Hz)

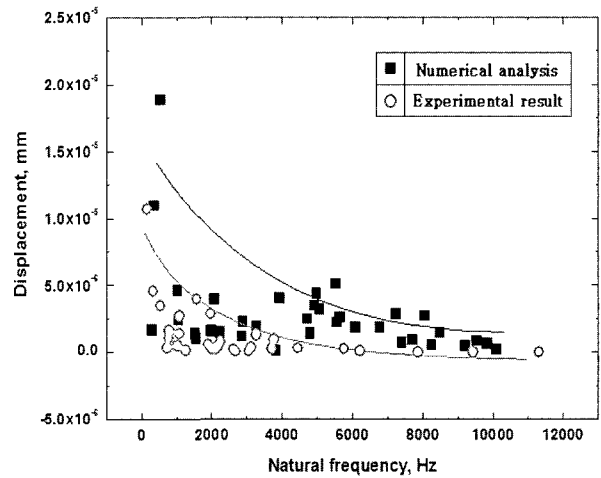


Fig. 7. Relation between natural frequency and displacement.

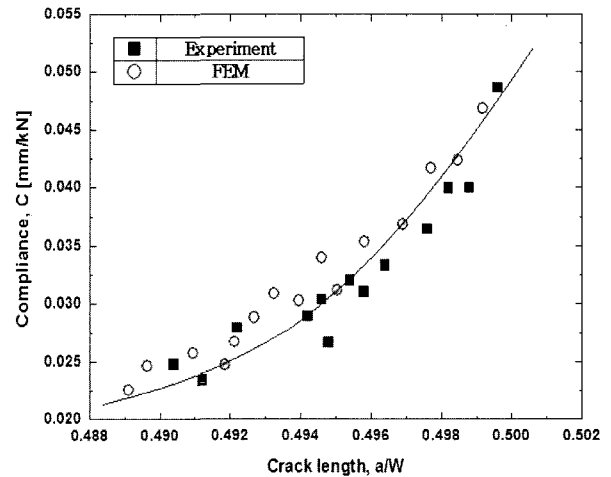


Fig. 8. Relation between compliance and crack length.

#### 3.3 다이아몬드 원형 톱의 에너지 방출률

다이아몬드 원형 톱에 대한 실험 결과인 Fig. 8의 컴플라이언스를 식 (6)에 대입하여 에너지 방출률을 슬롯 각의 변화에 따라 나타낸 것이다. 컴플라이언스를 균열 길이에 대하여 최소자승법을 이용하여 3차 근사식을 구

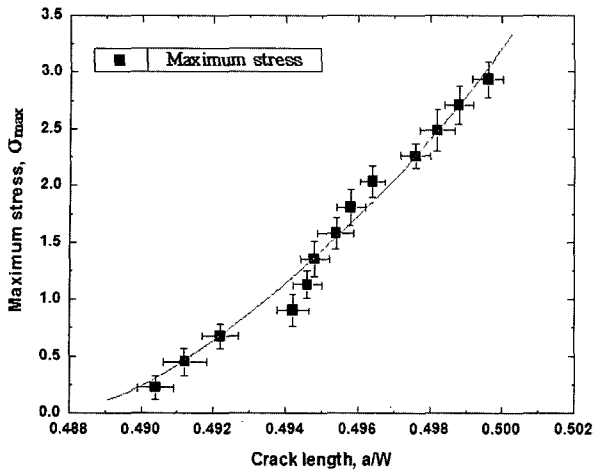


Fig. 9. Relation between maximum stress and crack length.

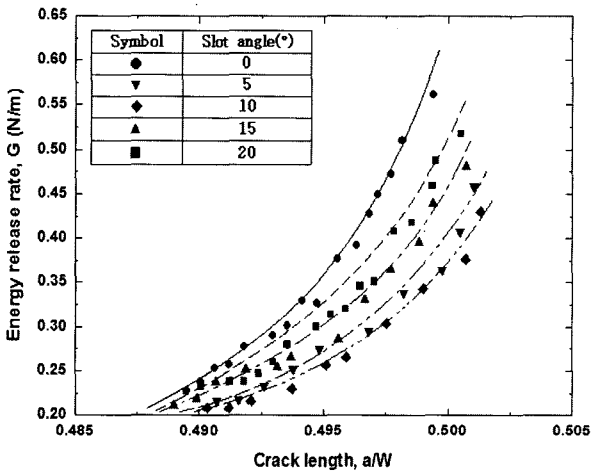


Fig. 10. Relation between maximum stress and crack propagation angle.

한 후, 이를 미분하여 식 (6)에서 구하였다.

Fig. 10은 무차원 균열길이에 대한 슬롯각의 변화에 따른 에너지 방출률을 나타낸 것이다. 균열길이가 증가할수록 에너지 방출률은 비례적으로 증가한다. 또한, 슬롯 각  $\theta=0^\circ$ 에서 가장 큰 에너지 방출률을 보이고  $\theta=5^\circ$ ,  $\theta=10^\circ$ 에서 낮은 에너지 방출률을 나타낸다. 이는 슬롯 각이 다이아몬드 원형 톱의 회전 진행방향에 대해  $5^\circ \sim 10^\circ$ 에서 응력 집중 현상이 적음을 나타내고 있다.

### 3.4 다이아몬드 원형 톱 슬롯부위의 파단

다이아몬드 원형 톱은 피삭재를 절삭시 회전하는 힘에 의해 회전방향으로 슬롯 부위에 큰 응력이 발생하게 된다. 이로 인해 다이아몬드 톱이 피삭재를 절삭하는 과정에서 피삭재를 통과한 다이아몬드 톱(②, ③)과 작업을 하고 있는 다이아몬드 톱(①) 사이의 슬롯 부분 중 가장 취약한 슬롯 부위에서 균열이 발생 및 진전으로 인해 결

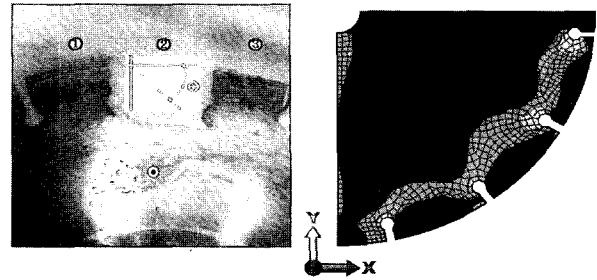


Fig. 11. FEM analysis result and fracture of diamond disc saw.

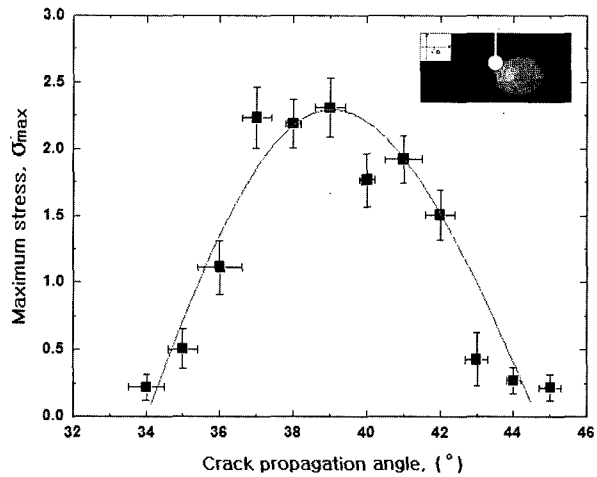


Fig. 12. Crack propagation angle of diamond disc saw.

국에는 파단에 이르게 된다. Fig. 11은 다이아몬드 원형 톱의 피삭재를 절단 후 슬롯 부위에서 발생하는 균열에 의해 파단된 형상과 파단 형상을 유한요소 해석한 결과를 보여주고 있다. Fig. 11의 균열진전에 의해 파단된 형상과 수치해석에 의해 나타난 결과는 잘 일치하고 있다.

Fig. 12은 다이아몬드 원형 톱의 피삭재 절삭시 슬롯 부위에서 발생하는 최대응력과 균열 진전 각을 나타낸 것으로 균열 진전 각도가  $37^\circ \sim 41^\circ$  부근에서 최대응력을 나타내고 있다. 즉, 다이아몬드 원형 톱의 작업시 회전방향에 대해 슬롯 부위에 응력이 집중되면  $37^\circ \sim 41^\circ$ 로 균열이 진전하여 파단에 이르게 된다.

Fig. 13은 Fig. 12에서 슬롯 부위에 집중되는 응력을 분산하고 다이아몬드 원형 톱의 안정화를 위하여 최적의 슬롯 각을 에너지 방출률로 나타내었다.  $0^\circ$  부근에서 에너지 방출률이 크게 나타나고 점차적으로 감소하다가  $10^\circ$  부근에서 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서, 회전방향의 슬롯 각을  $8^\circ \sim 12^\circ$ 로 하면 다이아몬드 원형 톱을 안정적으로 사용할 수 있는 최적의 범위이다.

## 4. 결 론

SCM435 350 mm 다이아몬드 원형 톱의 고유진동수를

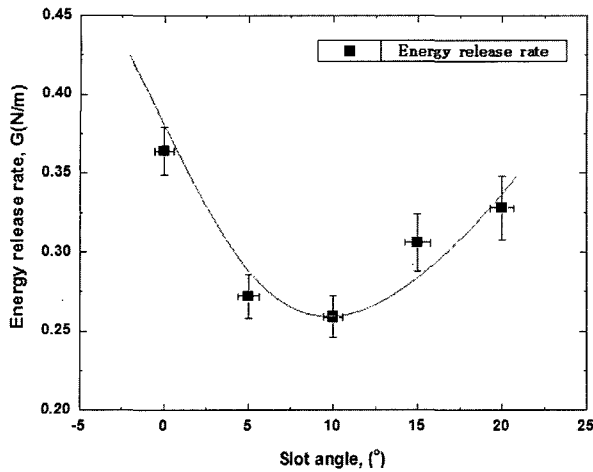


Fig. 13. Establishment of slot angle for diamond disc saw.

측정한 후, 슬롯 각의 변화에 따른 컴플라이언스와 에너지 방출률을 구하고, 응력집중에 따른 균열 진전 각과 에너지 방출률의 관계를 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

다이아몬드 원형 톱의 고유진동수는 낮은 주파수 0

~5 kHz에서 수치해석 결과와 잘 일치하였고, 균열진전의 형상에 따른 파괴 성분을 보면 파괴 모드 I 성분이 지배적으로 작용하고 변위에 비해 하중이 크게 작용하기 때문에 컴플라이언스가 상대적으로 작게 나타났다. 또한, 회전방향에 대해 슬롯부위에 응력이 집중되면 균열진전은 37°~41°로 파단에 이르게 된다. 따라서, 본 연구에서는 다이아몬드 원형 톱의 회전방향 슬롯 각에 대해 응력집중과 에너지 방출률이 감소하는 8°~12°로 설정하면 안정적으로 사용할 수 있는 최적의 범위이다.

### 참고 문헌

1. J. F. Carlin, H. C. Appl, R. P. Bridwell and R. P. Dubois, ASME Journal of Engineering for Industry, **37** (1975).
2. J. Tweed and D. P. Rooke, International Journal of Engineering for Science, **11**, 179 (1973).
3. J. R. Rice, Trans. ASME. J. Applied Mech., **55**, 98 (1988).
4. M. Isida, Engng. Fracture Mech., **14**, 549 (1981).
5. R. D. Gregory, Int. J. Fracture, **41**, 39 (1989).
6. I. R. Grosse, Engng. Fracture Mech., **441**, 807 (1993).