

저소음 다이아몬드톱의 절삭소음특성에 관한 연구

A study on the Cutting Noise Characteristics of Low-Noise Diamond Saw

김경훈†·변서봉*·정기정**

K. H. Kim, S. P. Byun and K. J. Jung

Key Words : Construction Noise(건설 소음), Diamond Saw(다이아몬드톱), Cutting Noise(절삭 소음), Stress Concentration(응력 집중)

ABSTRACT

An experimental and numerical approach has been carried out to characterize the noise and the safety of circular diamond saw with chinks by laser-cutting. The sound pressure level of a circular diamond saw with chinks was measured when cutting workpieces. Therefore, frequency analysis results show us that the sound level was reduced as position of chinks approach to out-diameter. But the safety of circular diamond saw was lower due to the stress concentrated at the edge of chinks while cutting workpieces. FEM analysis was used for safety evaluation with the variation position of chinks. The noise characteristics of circular diamond saw were also estimated during cutting test.

1. 서 론

다이아몬드공구(diamond tools)는 인조 다이아몬드를 지립(grit)으로 사용하는 공구로서 천연석(stone), 콘크리트(concrete) 및 웨이퍼(wafer) 등과 같은 난삭재를 가공하는데 사용되는 공구이다. 특히 석재류 절단을 목적으로 하는 공구를 다이아몬드 쏘(diamond saw)라 명칭하며 가장 일반적인 형태가 원형 쏘(circular saw) 타입이다. 원형 다이아몬드 쏘는 원판 형태의 스틸코어(steel core) 외부에 금속분말(metal powder)과 인조 다이아몬드(synthetic diamond)를 혼합소결 하여 완성한 세그먼트(segment)를 스틸코어에 용접하여 제작한다.

원형 다이아몬드 쏘는 건설 및 도로 공사현장 등에서 주로 사용하며 화강암-대리석 등의 천연석 가공에도 적용되며 다이아몬드 쏘의 절삭특성상 큰 소음을 유발하게 된다. 회전운동을 통하여 피삭재를 절삭하는 원형 다이아몬드 쏘는 일반적으로 원판 지름에 비하여 두께치수가 적은 판의 형상을 가지며 일반적으로 고주파에서 발생하는 소음도가 총

체적인 소음도 대부분을 기여한다. 환경부 자료에 따르면 접수된 민원의 77% 이상이 공사장 소음민원이었으며 최근 몇 년간 민원 증가율도 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 2006. 01. 01이 개정/시행된 국내 소음/진동규제법의 주요내용 중에서 소음발생건설기계에 콘크리트 절단기가 포함되었다. 이미 유럽국가 및 일부 선진국에서는 저소음 제품 사용이 큰 폭으로 증가하는 추세이다. 본 연구는 건설 및 도로공사 현장에서 사용하는 원형 다이아몬드 쏘의 소음 특성 분석을 통하여 최적화된 저소음 다이아몬드 쏘 설계에 관한 것이다. 소음을 저감시키는 인자로는 chink 위치에 따른 절삭소음을 측정하고 특성을 분석하였다. 일반적으로 소음을 저감시키는 방법으로는 스틸코어를 더욱 얇게 제작하여 2매 이상의 스틸코어를 스팟용접(spot welding)하여 제작한 샌드위치타입(sandwich type)이 있으며, 스틸코어의 특정위치에 여러 형상의 chink를 가공한 후 제진재를 삽입하는 디텐소타입(detenso type)이 대표적이다. 하지만 이와 같이 제작한 스틸코어를 사용한 원형 다이아몬드 쏘는 강성에 취약하게 되어 절삭시 발생하는 외부하중에 심한 변형을 초래하여 작업안전성에 영향을 미치며 또한 가공불량 및 끼임(jam) 현상이 발생하게 된다. 이러한 이유로 위와 같이 제작된 소음저감을 목적으로 하는 원형 다이아몬드 쏘는 적용분야에 많은 제약을 가지게 되어 한정적으로 사용되어지고 있다.

† 비회원, 신한다이아몬드공업(주)

E-mail : kimkh@shinhandia.co.kr

Tel : (032) 820-3722, Fax : (032) 858-1335

본 연구에서는 chink 위치 변화에 따른 소음특성을 실험적으로 평가하고, chink 위치 변화에 따른 안전성 평가를 위한 요소법(FEM)을 수행·평가하여 저소음 제품의 최적설계방법을 제시하고자 한다.

2. 소음도 및 파손 이론

2.1 원형 다이아몬드 쏘의 파손조건

스틸코어에 과다한 응력이 작용하여 항복강도를 초과하면 스틸코어의 특정부위에 균열(crack) 또는 소성변형(plastic deformation)이 발생하여 손상 된다. 스틸코어에 균열(crack)은 생기지 않았지만, 손상을 입은 경우 Mises의 항복조건을 고려하여 해석한다. Mises의 항복조건을 주응력의 향으로 나타낸 등가응력 σ_e 는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2]} \quad (1)$$

여기서 σ_Y 는 항복응력이고 σ_i 는 주응력을 나타낸다. $\sigma_e = \sigma_Y$ 이면 항복이 발생하며, 2축 응력일 때 다음 식과 같이 표시된다.

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (2)$$

저소음 다이아몬드 쏘는 기하학적인 특성상 응력집중(stress concentration)에 의하여 슬롯(slot) 및 chink에서 파손이 종종 발생하게 된다.

2.2 소음도 계산 방법

등가소음도 L_{eq} (equivalent sound level)는 연속적으로 발생하는 소음에너지를 평균해서 얻은 값을 대수 변환하여 구하며 다음식과 같이 표시된다.

$$L_{eq}[dB(A)] = 10 \left[\log \left\{ \sum_{i=0}^n (f_i 10^{L_i/10}) \right\} \right] \quad (3)$$

여기서 f_i 는 소음 지속시간율이고 L_i 는 소음도이다. (A)는 청감보정회로를 나타낸 것으로 사람이 느끼는 청감과 유사한 모양으로 측정신호를 변환하는 특성이다. 옥타브밴드 별 소음도의 합산은 다음 식과 같이 표시된다.

$$SPL = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{W_o} \right) \quad (4)$$

여기서 $W_i/W_o = 10^{SPL_i/10}$ 과 같이 나타낸다.

3. 실험

3.1 시험용 다이아몬드 쏘의 형상 및 치수

Fig. 1(a)는 습식(wet)조건에서 사용하는 저소음 원형 다이아몬드 쏘를 나타낸 것으로서 기본적으로 스틸 코어

Table 1 Dimension of diamond saw for cutting test

| 구분 | 치수 | 지름 (mm) | 두께 (mm) | 슬롯깊이 (mm) | 세그먼트 수 (pcs) |
|----|------|---------|---------|-----------|--------------|
| | 스틸코어 | 습식 | 382 | 2.2 | 21.5 |
| | 건식 | 216 | 1.7 | 11.5 | 16 |
| 구분 | 치수 | 길이 (mm) | 두께 (mm) | 높이 (mm) | 접합면곡률 (R) |
| | 세그먼트 | 습식 | 40 | 3.2 | 10.0 |
| | 건식 | 40 | 2.4 | 7.3 | 108 |

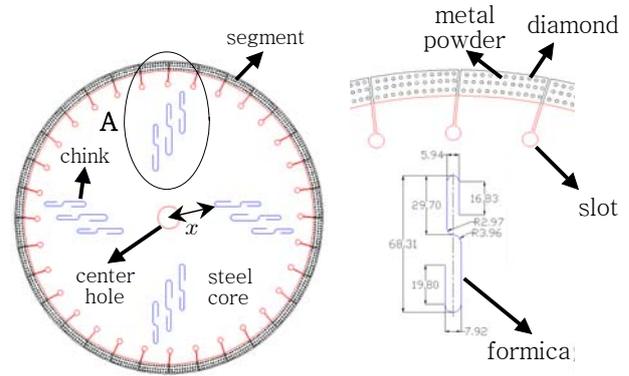


Fig. 1 Shape and dimension of a low-noise diamond saw

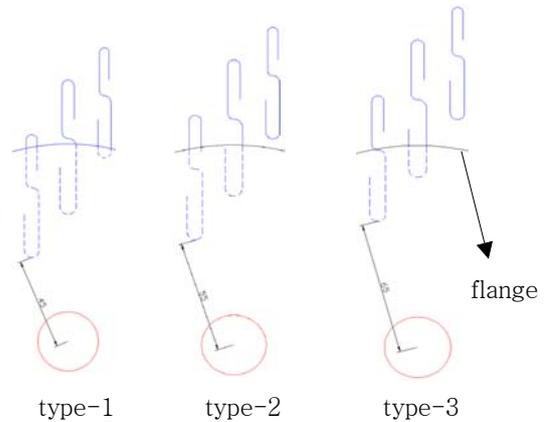


Fig. 2 Separate to type as a function of chink position

(steel core)와 세그먼트(segment)로 구성된다. 각 항목별 치수는 table 1에 나타내었으며, chink의 치수는 fig. 1(b)에 습식용 다이아몬드 쏘에 대하여 나타내었으며 건식(dry)용은 나타낸 치수에서 56% scale을 적용하였다.

3.2 시험용 다이아몬드 쏘 제작

3.2.1 습식(wet) 다이아몬드 쏘 제작

세그먼트는 Co 90%와 Ni 10%를 혼합(mixing)한 금속 분말(metal powder)과 다이아몬드를 재혼합하여 성형·소결(sintering)하여 스틸코어에 레이저용접을 이용하여 접합하

였다. 스틸코어 중앙부의 S형상이 chink로서 레이저를 사용하여 컷팅하고 가공부위에 합성수지계열의 한 종류인 포마이카(formica)를 충전하여 제작하였다. Chink 위치 변화에 따른 소음특성을 측정하기 위하여 fig. 2에 나타난 중심으로부터 chink 까지의 거리 x 를 45, 55, 65 mm로 변화하여 type 1~3으로 제작하였으며 점선으로 표시한 부분이 만주(flange) 체결시 chink가 만주에 의하여 덮여지는 부분이고 실선으로 표시한 부분이 노출되는 부분이다.

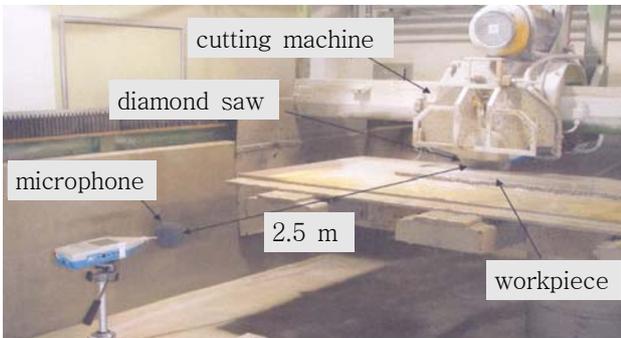
3.2.2 건식(dry) 다이아몬드 소 제조

건식용 다이아몬드 소는 전체적인 치수가 작기 때문에 가공 중심으로부터 chink 까지의 거리 x 를 30, 35, 40 mm로 변화하여 type #1~#3으로 제작하였고 이외 조건은 습식용과 동일하게 제작하였다. 하지만 냉각수가 공급되지 않은 상태에서 사용하게 되므로 열방출 및 칩배출을 용이하게 하기위하여 슬롯간의 간격을 1 mm 증가 시켰다. 건식용 만주의 크기는 $\varnothing 40$ 이며 3가지 type 모두 기계에 체결시 chink가 노출된다.

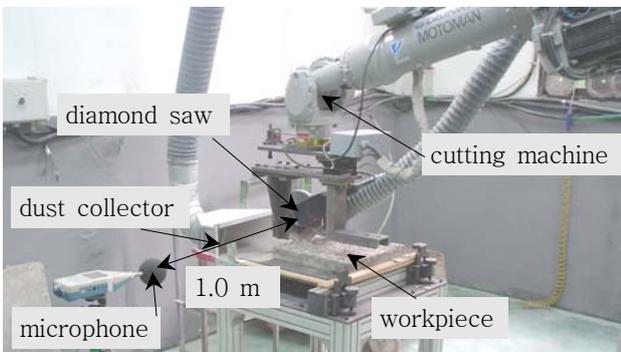
4. 실험 방법

4.1 소음 측정 방법

습식조건 피삭재(workpiece)는 국내에서 양산되는 화강암(granite)을 사용하였으며 피삭재 단면적의 치수는 1500



(a) 습식조건 절삭시험 전경



(b) 건식조건 절삭시험 전경

Fig. 3 Sound level measurement method for cutting test

Table 2 절삭 소음도 측정시험 외부조건 설정

| 구분 \ 조건 | 동력 (HP) | 이송속도 (m/min) | 운전속도 (RPM) | 만주치수 (mm) |
|---------|---------|--------------|------------|-----------|
| 습식(wet) | 30.0 | 2.0 | 1,600 | 200 |
| 건식(dry) | 2.7 | 0.9 | 3,600 | 40 |

mm \times 30 mm이며 건식조건 피삭재는 콘크리트(cured concrete)을 사용하였고 단면적 치수는 350 mm \times 40 mm이며 세부 실험조건은 table 2에 나타내었다.

습식(wet)조건에서 소음도 측정시 마이크로폰(microphone)의 위치는 다이아몬드 소에서 수평으로 2.5m 떨어진 지점에 설치하였으며 fig. 3에 시험전경을 나타내었다. 절삭시 소음도를 30초간 측정하였고 overall 등가소음도(L_{eq})와 1/3 옥타브밴드 스펙트럼(1/3 octave band spectrum)을 구하였다. 건식조건에서는 소음도 측정시 수평으로 1m 떨어진 지점에 마이크로폰을 설치하였고, 절삭시 소음도를 10초간 측정하였다.

최초 다이아몬드 소와 피삭재가 접촉하는 순간 일시적으로 소음도는 커지므로 충분히 절입이 된 이후 소음도를 측정하였다. 본 시험에서 사용한 소음계는 RION社에서 제조한 NA-27이다.

4.2 소음 측정 결과

위와 같은 조건에서 절삭시 발생하는 소음도를 측정한 결과를 fig. 4에 나타내었다. 절삭시 발생하는 소음도 측정에 앞서 다이아몬드 소의 무부하시의 구동 소음도를 측정하였으며 습식용은 74.1dB 건식용은 100.4 dB 이었다. 배경소음도의 차이가 발생하는 이유는 측정거리가 상이하여 음원의 거리감쇠에 의한 영향 및 회전기계의 배경음(background noise)이 다른 이유 때문이다.

절삭시 발생하는 소음도 측정결과를 살펴보면 습식조건의 경우 chink 위치가 스틸코어 중심에서 멀어질수록 소음도 감소 효과가 커지는 경향을 나타내었으며, type-3은 type-1에 비하여 등가소음도가 3.1 dB 감소하는 것으로 나타났다. 또한 주파수별 분석결과 fig. 5에 나타난 것처럼 약 3,000 Hz 이하에서 소음도 변화는 미비하였으나 3,000 Hz 이상에서 소음도 감소효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

건식조건의 경우 fig. 6에 나타난 것처럼 chink 위치 변화에 따른 소음도 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 주파수별 분석결과도 type #1~#3 모두 거의 일치하는 것으로 나타났다. 습식조건의 경우 만주의 크기가 $\varnothing 200$ 이므로 fig. 2에 나타난 것처럼 chink의 노출도가 상이하게 되나, 건식 조건은 치수의 영향 및 만주의 크기가 $\varnothing 40$ 이므로 chink를 간섭하지 않기 때문에 나타난 결과로 추정된다.

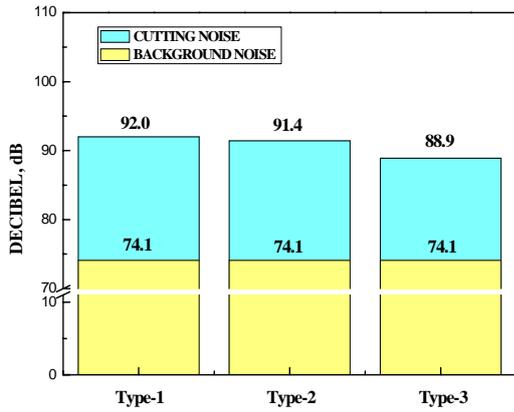


Fig. 4 Sound level measurement result of diamond saw with variation chink(wet)

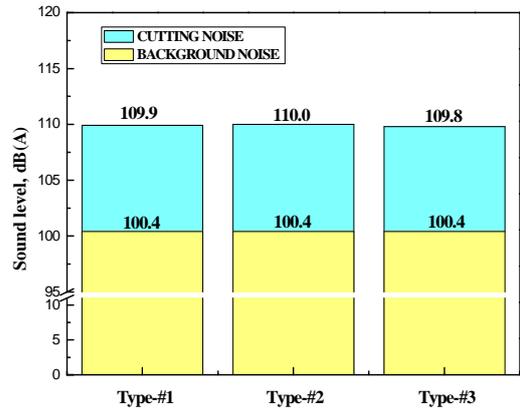
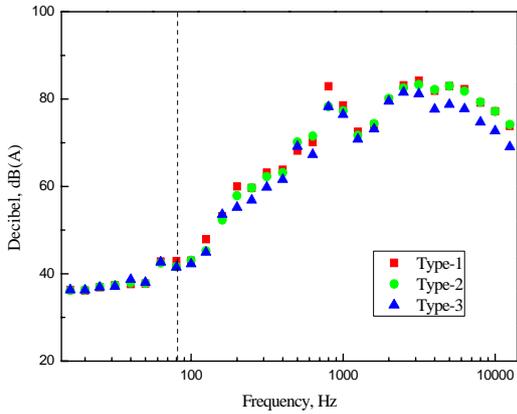
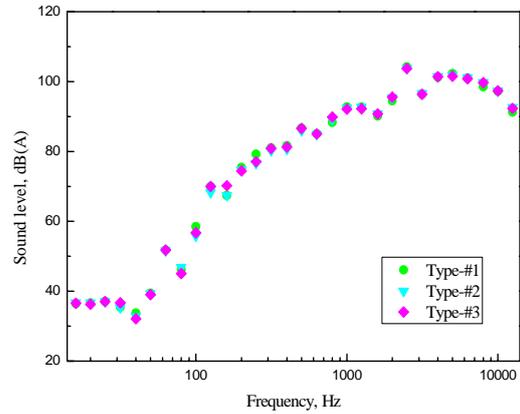


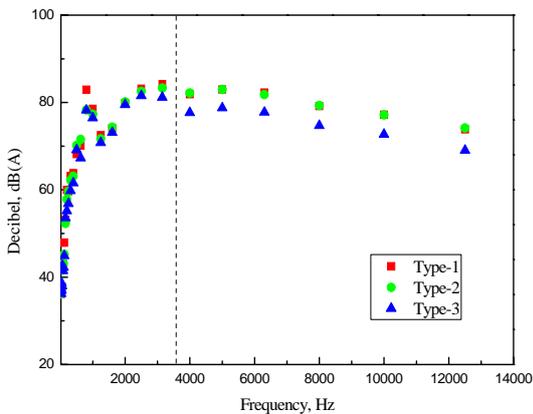
Fig. 6 Sound level measurement result of diamond saw with variation chink(dry)



(a) Logarithm scale analysis

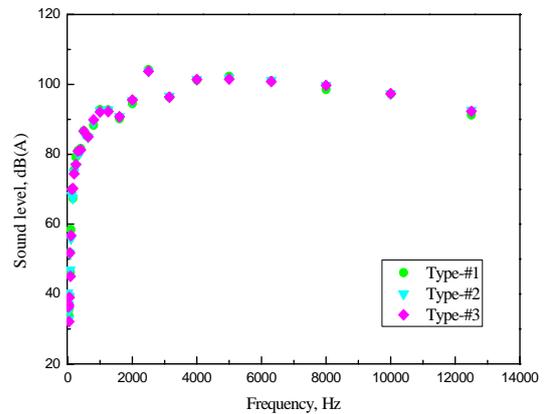


(a) Logarithm scale analysis



(b) Linear scale analysis

Fig. 5 Sound level measurement result as a function of frequency(wet)



(b) Linear scale analysis

Fig. 7 Sound level measurement result as a function of frequency(dry)

Table 3 Material properties of FEM analysis

| Material properties | Density ρ (10^3kg/m^3) | Young's modulus E(GPa) | Poisson's ratio ν |
|---------------------|--|---------------------------|--------------------------|
| Steel core | 7.85 | 205 | 0.29 |
| Segment | 8.80 | 211 | 0.32 |
| Chink | 0.50 | 7.00 | 0.35 |

5. 유한요소해석

5.1 해석모델

원형 다이아몬드 쏘의 chink 위치 변화에 의한 강성 및 안전성 해석을 위한 해석모델은 모델링 상용화 프로그램인 Solidworks를 사용하였으며, 유한요소해석 프로그램은 Algor를 사용하였으며 fig. 8에 나타낸 다이아몬드 쏘의 앞서 습식조건에서 시험하였던 다이아몬드 쏘를 모델링 한 이후 하중 및 구속조건을 나타낸 그림이다. 만주가 체결되어지는 중공부는 완전구속 하였고 절삭깊이를 조사하여 세그먼트에 외측에 면하중(surface load) $P=1.2kN$ 을 적용하였다. 해석에 사용된 재료의 물리적성질은 table 3에 나타내었다.

5.2 해석결과

Fig. 9는 Fig. 8에 A부분을 확대한 것으로 슬롯과 chink 부분의 응력분포를 나타낸 것이다. Type1 및 Type 3 모두 슬롯에서 두드러진 응력집중(stress concentration) 현상이 발생하였고 가장 취약한 부분으로 나타났다. 하지만 type 3에서의 응력분포는 type 1보다 chink에 응력집중현상이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Type-1 및 type-3의 슬롯과 chink 부분의 최대응력을 폰 미세스 응력(Von Mises stress)으로 table 4에 나타내었으며 fig. 9에 표시하였다. 슬롯에서의 응력 증가율은 2%였지만 chink에서의 증가율은 68%로 크게 나타났다. 앞서 기술한 것과 같이 chink는 레이저를 이용하여 가공하므로 가공면에 많은 결함(flaw)이 존재하게 되나 경제적 이유에 의하여 연마

Table 4 다이아몬드 쏘의 응력집중 해석결과

| 조건 | Von mises stress, σ (MPa) | percent age (%) | Von mises stress, σ (MPa) | percent age (%) |
|--------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| | slot(A,A') | | chink(B,B') | |
| Type-1 | 28.71 | 100.0 | 12.24 | 100.0 |
| Type-3 | 29.29 | 102.0 | 20.61 | 168.3 |

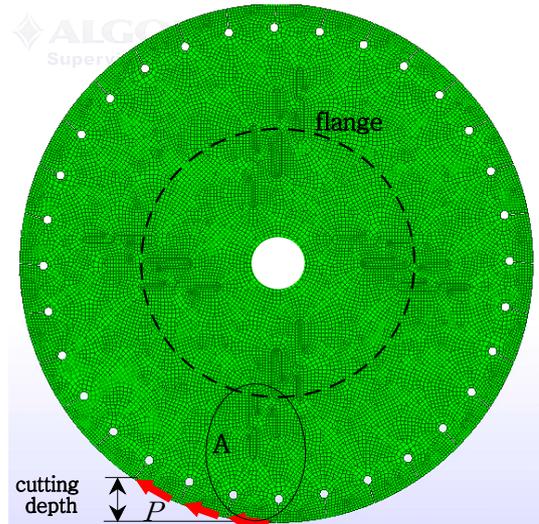


Fig. 8 FEM analysis model of diamond saw

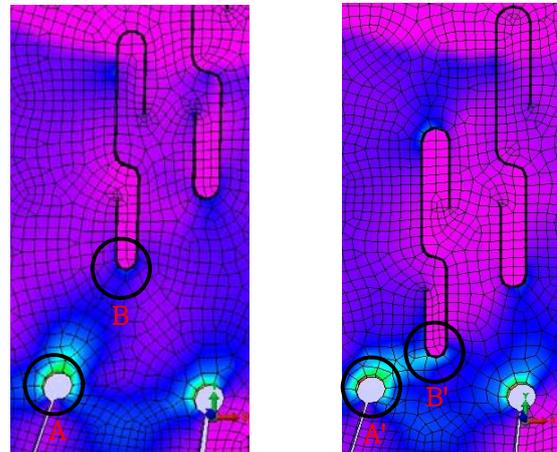


Fig. 9 Stress distributions analyzed by FEM

(grinding) 공정은 하지 않기 때문에, 이러한 미세결합부에 응력이 집중되어 항복강도(yield strength) 이하에서도 크랙(crack) 발생으로 인한 파손이 일어날 수 있다.

6. 결론

저소음 원형 다이아몬드 쏘의 소음 및 안전성 특성을 파악하여 최적설계를 이루고자 실험적 및 해석적 시도를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스틸코어의 중심으로부터 외측으로 chink 위치 변화에 따른 소음도 측정결과 만주가 chink를 간섭하고 있을 경우 소음도 감소는 적게 나타나는 것으로 나타났다.

(2) Chink 노출도에 따라서 소음도 주파수별 분석 결과는 저주파 대역에서 소음도 감소는 미비하였고 고주파 대역에서 소음도 감소가 큰 것으로 나타났다.

(3) 응력해석결과 스틸코어 slot과 chink 부분에 응력이 집중되었으며, chink 위치가 외측으로 변화하면 slot 보다는 chink에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(4) 만주의 크기가 작아서 chink가 모두 노출되면 절삭소음에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(5) 원형 다이아몬드 쓰는 소음감소 효과와 안전성은 반비례 관계를 나타내고 있으므로 기계 및 피삭재 등의 조건변화에 따라서 최적설계가 가능하다.

후 기

본 연구는 환경부에서 시행하는 ‘차세대 핵심환경 기술개발사업의’의 지원으로 수행하였음.

참 고 문 헌

- (1) 윤승원, 지원호, 우종혁. 2004. “원형 다이아몬드톱의 저소음 생크”. 추계학술발표회 논문집. 한국정밀공학회. pp. 729~731.
- (2) H. Y. Wu, W. B. Lee,, C. F. Cheung and S. To., 2005. "Computer Simulation of Single-point Diamond Turning Using Finite Element Method". Material Processing Technology. 167. pp. 549~554.
- (3) 이규성 외 7명. 1999. “소음·진동 공학” 형성출판사. pp. 409~475.
- (4) 강대준., 이우석., 이재원., 홍준기. 2005. “건설기계류 소음·진동 특성”. 한국소음진동공학회논문집. 제15권 제6호. pp. 645~651.
- (5) Antoniomaria. Di. Ilio. and Antonio Togna. 2003. "A theoretical wear model for diamond tools in stone cutting". Machine tools & Manufacture. 43. pp. 1171~1177.