

# 주축모터전류신호를 이용한 원통 연삭시 가공 상태 평가에 관한 연구

송지복\*, 이은상\*\*, 김남훈\*\*\*

## A Study on the Evaluation of Machining States in the Cylindrical Plunge Grinding using the Current Signals of a Spindle Motor

Ji Bok Song\*, Eun Sang Lee\*\*, Nam Hun Kim\*\*\*,

### ABSTRACT

This paper describes the machining characteristics of cylindrical plunge grinding. The study investigates the process using the current signals of a spindle motor through a hall sensor. Grinding experiments were conducted under various conditions such as wheel speeds, workpiece speeds and infeed rates with a conventional vitrified bonded wheel. Analyzing the current signal of the spindle motor, a relationship between current signals and the metal removal rate in terms of the infeed rate is induced. It was also shown that a hall sensor has similar capabilities in evaluation of grinding behavior compared to the AE signals, which are useful for monitoring the grinding process.

**Key Words** : Cylindrical plunge grinding(원통 연삭), Current signal(전류신호), Metal removal rate(금속제거량), Vitrified bonded wheel(비트리파이드 연삭 스톨), AE signal(AE 신호)

### 1. 서론

연삭 가공은 다른 가공법에 비해 능률적으로 고정도의 표면 거칠기를 만족시키므로 공작물의 최종 마무리 작업에 사용된다. 그러나 연삭가공은 다른 가공과는 달리 동일한 가공조건에서도 재현성을 얻기가 힘들고, 트러블 발생시 복잡한 파라메타들간의 직접적인 상관관계의 규명뿐만 아니라 상호간의 정량화에도 또한 여러 가지 어려움이 있다. 따라서 최적의 연삭 조건 설정과 연삭가공의 트러블 해결을 위한 연구가 오래 전부터 광범위하

게 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup> 최근에는 컴퓨터와 센싱 기술의 발달로 획득한 데이터를 분석하여 AI(Artificial Intelligence)모델에 적용한 연구가 진행되고 있다.<sup>(2)</sup>

연삭 가공시의 연삭저항은 스톨의 마멸, 연삭열, 그리고 표면에 직접적인 영향을 미치므로 연삭작용을 연구하는데 있어 중요한 의미를 가진다. 이와 관련한 기존의 연구를 살펴보면, 샤르피 임팩트 테스트 장치로 파괴인성을 측정하여 연삭저항과의 관계를 조사한 연구<sup>(3)</sup>, 공작물과 연삭스톨의 접촉 면적 변화에 따른 법선 연삭저항에 관한 연구<sup>(4)</sup>, 다이아몬드 싱글-입자 실험에서 공구동력

\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소  
\*\* 세종대학교 기계공학과  
\*\*\* 부산대학교 대학원

계를 이용한 연삭저항 측정을 통하여 입자 형태의 효과에 관한 연구<sup>(5)</sup>등이 이루어졌다. 그러나 원통 연삭 가공시 연삭저항의 직접적인 측정은 측정기의 설치가 곤란하여 이 분야에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 홀센서를 이용하여 원통 연삭시 발생하는 주축모터전류신호를 획득하고 컴퓨터에서 신호 처리한 후 다양한 가공 조건 즉, 슷돌 회전속도, 공작물 속도, 절입량(Infeed rate), Spark-Out 시간에 따른 변화특성을 조사하여 연삭저항과의 상관관계를 연구하였으며, 금속 제거량을 측정하여 주축모터전류신호와 비교함으로써 연삭상태에 대한 감시 및 평가방안을 모색하였다. 그리고, 홀센서를 이용한 연삭 상태의 감시가 신뢰성이 있음을 검증하기 위해 AE 센서를 이용하여 획득된 신호를 분석하여 금속 제거량과의 관계를 비교함으로써 본 연구의 타당성을 확인하였다.

## 2. 연삭저항

원통 연삭시의 연삭저항은 연삭중에 슷돌에 저항하는 힘을 의미하며 원통의 접선방향으로 작용하는 접선연삭저항( $F_t$ )과 수직 방향으로 작용하는 수직연삭저항( $F_n$ )으로 분류된다. 원통 연삭시의 연삭저항은 비연삭 에너지나 저항비율 등으로 추정할 수 있다. 비연삭에너지는 단위 칩 제거를 제거할 때 소비되는 에너지로 식 (1)로 정의된다.

$$u = \frac{F_t \cdot V_s}{V_w \cdot b \cdot V_f} \quad (1)$$

$u$  : specific energy

$F_t$  : tangential grinding force component

$b$  : wheel width

$V_s$  : wheel speed

$V_w$  : workpiece speed

$V_f$  : infeed rate

식 (1)에서 연삭저항( $F_t$ )은 공작물 속도와 연삭폭 그리고 절입량에 비례하며, 슷돌 회전 속도에 반비례함을 알 수 있다.

## 3. 연삭 실험

### 3.1 실험장치의 구성요소

#### (1) 주파수 인버터

스틀 회전속도 변화에 따른 주축모터전류신호를 측정하기 위해서 사용된 인버터(HYDRIVE-V, HYUNDAI)는 직류를 교류로 변환하는 정지형의 변환기로서, Fig. 1에서와 같이 가변주파 인버터 내부에는 컨버터부와 인버터부로 구성되어 있다. 컨버터부는 교류전원을 일단 직류전원으로 전환하고, 인버터에서 직류전원을 필요한 주파수의 교류로 변환시켜 모터로 보낸다.

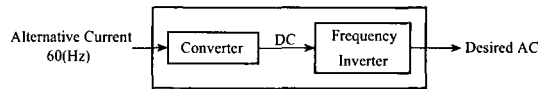


Fig. 1 Principle of Inverter

Fig. 2는 주파수 인버터를 장착하여 예비 실험한 슷돌 회전속도를 나타내고 있으며, 주파수의 증가에 따라 슷돌 회전속도(RPM)는 비례적으로 증가하고 있다.

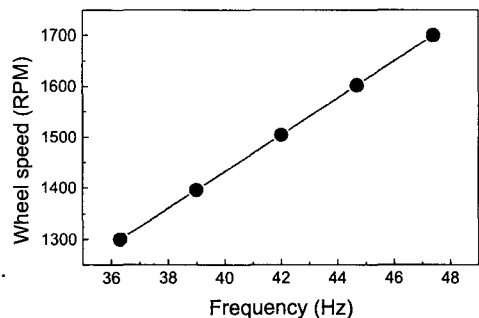


Fig. 2 Wheel speed in accordance with frequency

#### (2) 홀센서

전자 유도 현상에 의해 전류신호를 전압신호로 바꿔주는 센서로서, 정류상태에 따라 변화하는 전류를 검출하기 위해 사용된다. H-A050A가 사용되고 50A의 전류를 4V로 변환해주며, 최고 응답속도는 10 $\mu$ s이다.

#### (3) 오실로그래픽 레코더

홀센서로부터 획득한 주축모터전류신호를 실시간으로 기록하면서 저장하기 위한 장치로 내부에는 아날로그필터, 12-비트의 분해능을 갖는 A/D

컨버터등 신호획득에 필요한 장치들로 구성되어 있다.

(4) 연삭시편 및 연삭숫돌

실험에 사용된 연삭시편은 금형 단조품으로 사용되고 있는 SCM4로 연삭가공폭을 23mm로 실험의 편의를 위해 여러 단으로 제작하였다.

사용된 연삭숫돌은 WA계 연삭숫돌로서 입도(60), 결합도(K), 조직(7), 결합제(V), 직경 350mm, 폭 25mm이다.

3.2 실험장치 및 방법

3.2.1 주축모터전류 획득 실험

홀센서를 이용하여 주축모터전류신호를 측정하기 위한 실험에 사용된 원통 연삭기는 주축 모터 동력이 3.7kW이고, 숫돌의 회전 정격속도가 1710rpm인 만능 연삭기(Toyoda. Co.)이다. 실험 장치의 개략도는 Fig. 3에 도시되어 있다.

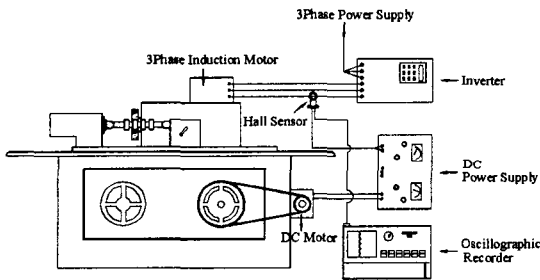


Fig.3 Schematic of experimental set-up

매 연삭 실험에 앞서 0.02mm깊이로 드레싱을 하고 시험편의 가공 부위를 예비 연삭한 후, 공작물 속도를 20~50RPM으로, 숫돌 회전속도는 1400~1700RPM으로, 절입량은 2.5~30 $\mu$ m/rev로 변화시켜 습식실험(Soluble oil, 30:1)을 행하였다.

주축모터전류신호는 인버터에서 나오는 3상 권선중 한 권선에 홀센서를 장착하여 샘플링 주기를 1kHz로 설정하여 획득하였다.

주축모터전류신호의 변화에 따른 금속제거량의 측정을 위해서 시험편의 기준면을 정삭 및 여러 번의 spark-out을 통해서 정도를 높인 후, 디지털 마이크로미터(Mytutoyo, 0.001mm)로 가공 전후의 직경을 측정하여 체적의 변화량을 계산한 후 가공 시간에 따라 구분하였다.

표면 거칠기(Ra)는 연삭방향으로 표면 거칠기 측정기를 사용하여 각각 3회 측정 후 그 평균값을 구하였다.

3.2.2 AE신호 획득 실험

주축모터전류신호를 이용하여 연삭가공의 가공상태를 평가하는 실험의 신뢰성 여부를 검증하기 위해 연삭가공의 감시 및 평가방법으로 일반적으로 사용하는 AE기법을 이용하여 신호를 획득하고 분석하였다.

연삭 가공 중에 발생하는 AE 신호를 획득하기 위해서 심압대의 끝단에 그리스를 이용하여 AE 센서를 부착하였고, 응답 주파수 특성이 넓은 주파수 범위에서도 균일한 감도를 나타내는 광대역 센서를 사용하였다. 센서에서 전단증폭기(1220A (PAC))로 입력되는 신호는 100~1200KHz의 대역 통과 필터를 거치고, 증폭비가 60dB인 앰프를 통하여 증폭하였다. 획득된 신호의 처리는 12비트의 분해능을 갖는 A/D변환기(Gagescope CS1012)를 사용하여 AE 센서에서 얻어진 전기적 신호를 디지털화하여 컴퓨터에 저장하고, 재료의 파괴인성치와 균열진전량의 특성을 잘 나타내는 AE 에너지를 구하기 위해 신호분석을 실시하였다. AE 실험을 위한 장치도는 Fig. 4에 도시되어 있다.

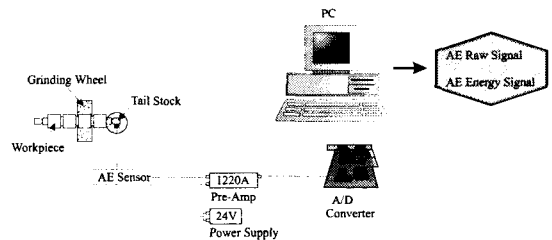


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 가공조건에 따른 주축모터전류신호특성

금속제거량의 측정에 앞서 다양한 가공조건에서의 모터전류신호의 특성을 예비 실험을 통하여 확인하였다. 먼저 숫돌 회전속도와 절입량에 따른 주축모터전류신호의 특성을 Fig. 5에 나타내고 있다. 주축모터전류신호의 변화특성을 확인하기 위해 각 가공조건에서 획득된 주축모터전류신호의

평균 전류값을 나타내었다. 그 결과를 살펴보면, 슷돌 회전속도의 증가에 따라 주축모터전류값은 감소하고, 절입량의 증가에 따라 주축모터전류값이 증가하고 있다. 이러한 결과는, 연삭 저항은 연삭 슷돌의 회전 속도가 증가할수록 감소하는 특성이 있고, 연삭 슷돌의 회전속도 증가비보다 연삭 저항의 감소비가 크기 때문에 실험과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로 주축모터전류값은 식 (1)에서와 같이 연삭 저항의 변화에 따른 연삭 슷돌의 회전속도와 연삭동력의 변화 경향과 상응하는 것이다.

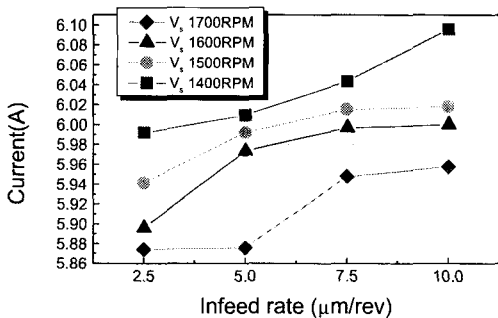


Fig. 5 Current characteristics in accordance with grinding conditions ( $V_s=30\text{RPM}$ )

Fig. 6은 슷돌 회전속도 1700RPM과 1500RPM에서 공작물 속도를 변화시키면서 실험한 결과이다. 공작물의 속도 변화에 따른 주축모터전류신호는 약간 증가하고 있으나, 연삭저항에 미치는 영향이 절입량에 비해 매우 적으므로 공작물의 속도를 높게 하는 것이 가공 능률적인 측면에서 효과적이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 슷돌 회전속도 1700RPM과 1500RPM에서의 공작물의 미소 형상을 CCD카메라로 촬영한 예를 나타낸 것이다. 1700RPM에서는 표면의 산과 골의 분포가 조밀하고 규칙적인 반면에, 1500RPM에서는 산과 골 사이의 간격이 넓고 불규칙적인 현상을 나타내었다.

#### 4.2 절입량에 따른 금속제거량의 특성

앞선 실험결과에서 나타나는 것과 같이 주축모터전류신호의 특성은 절입량의 변화에 따라 그 특성을 쉽게 구분할 수가 있었다. 금속제거량의 특성을 파악하기 위한 실험조건은 슷돌 회전속도

1700RPM에서 절입량을 변화시키면서 64초동안 가공하였다. 획득된 주축모터전류신호의 크기는 RMS값을 이용하여 나타내었고, RMS는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2)$$

$x_i$ :  $i$ 번째의 주축모터전류신호,  $N$ : 데이터 수

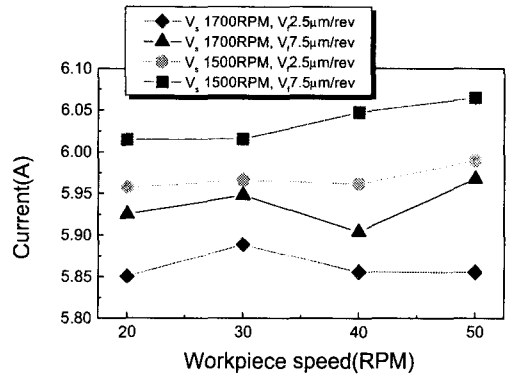


Fig. 6 Current characteristics in accordance with workpiece speed

Conditions	Micrographs of surface	
Vs=1700 (RPM)		
	Vf=2.5(μm/min)	Vf=7.5(μm/min)
Vs=1500 (RPM)		
	Vf=2.5(μm/min)	Vf=7.5(μm/min)

Fig. 7 Micrographs of surface in accordance with grinding conditions

Fig. 8은 주축모터전류신호의 원신호와 RMS 변환된 신호의 파형을 나타낸 것이다. 절입량이 30μm/min인 경우 가공시간에 따라 RMS변환된 신호의 파형은 0~10초구간은 급격히 상승하다가 감소하며, 10~30초구간은 미소하게 감소하며, 30

초 이후 구간은 신호 파형의 변화량이 거의 없다. 0~10초구간은 연삭저항이 절입량에 의해서 급격하게 증가하면서 많은 금속제거가 이루어지는 구간이며, 10~30초구간은 금속제거를 마무리하는 구간이다. 마지막구간은 공작물의 표면 상태를 완성하기 위한 spark-out 구간이다. 그러므로 주축모터전류신호는 일반적인 연삭 주기를 잘 나타내고 있다.

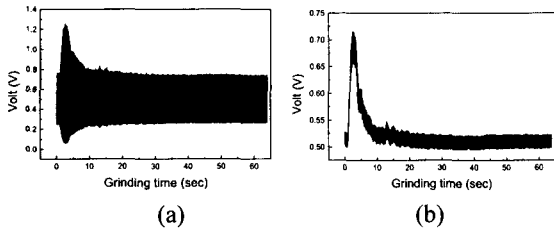


Fig. 8 Motor current raw signal(a) and RMS converted signal(b)

Fig. 9는 연삭가공시간에 따른 주축모터전류신호의 파형을 절입량에 따라 분류한 것이다. Fig. 9에 나타난 것과 같이 각각의 신호파형에서 절입량의 증가에 따라 연삭저항이 증가하기 때문에 주축모터전류 신호값이 증가하고 있다. 따라서 주축모터전류신호를 이용한 연삭가공의 상태 평가가 가능함을 알 수 있다.

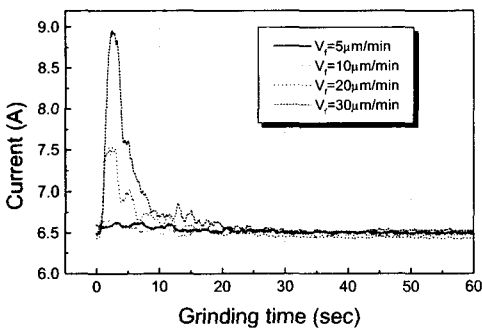


Fig. 9 Current characteristics in accordance with grinding time ( $V_s=1700\text{RPM}$ ,  $V_w=30\text{RPM}$ )

Fig. 10은 시험편에 단차를 형성하여 가공한 후 표면 거칠기 측정기로 측정된 예를 나타낸다. 슷들의 설정 절입량을  $20\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 하고, 60초 동안 가공한 결과, 실제 절입 깊이는  $16\mu\text{m}$ 로, 가공 오차가  $4\mu\text{m}$ 이다. 절입량과 실제 절입깊이가 차이

나는 것은 연삭가공시 발생하는 공작물과 슷들의 탄·소성변형에 의한 것이다.

Fig. 11은 가공된 표면의 표면 거칠기를 중심선 평균거칠기를 이용하여 측정된 결과의 출력물이다. 절입량이  $30\mu\text{m}/\text{min}$ 인 경우 표면 거칠기 값이 다소 높게 나타나고 있는데, 이러한 결과는 과도한 절입량에 의해서 칩의 배출이 원활하지 못하여 슷들표면에 눈메움현상(loading)이 발생하기 때문이다.

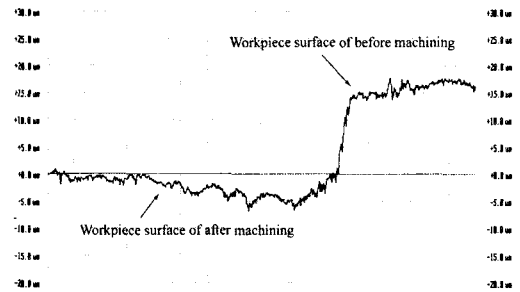


Fig. 10 Profile of the workpiece surface ( $V_s=1700\text{RPM}$ ,  $V_w=30\text{RPM}$ ,  $V_f=20\mu\text{m}/\text{min}$ )

Ra( $\mu\text{m}$ )	Profile of Surface
0.3452 ( $V_f=5\mu\text{m}/\text{min}$ )	Modified profile 18.88 $\mu\text{m}$ / -18.88 $\mu\text{m}$ / 399.9 $\mu\text{m}$ / 2.881 $\mu\text{m}$
0.3885 ( $V_f=10\mu\text{m}/\text{min}$ )	Modified profile 18.88 $\mu\text{m}$ / -18.88 $\mu\text{m}$ / 406.6 $\mu\text{m}$ / 2.881 $\mu\text{m}$
0.4422 ( $V_f=20\mu\text{m}/\text{min}$ )	Modified profile 18.88 $\mu\text{m}$ / -18.88 $\mu\text{m}$ / 408.6 $\mu\text{m}$ / 2.881 $\mu\text{m}$
0.6015 ( $V_f=30\mu\text{m}/\text{min}$ )	Modified profile 18.88 $\mu\text{m}$ / -18.88 $\mu\text{m}$ / 409.1 $\mu\text{m}$ / 2.881 $\mu\text{m}$

Fig. 11 Surface roughness of workpiece ( $V_w=1700\text{RPM}$ )

절입량에 따른 슷돌표면 사진의 예를 Fig. 12에 나타내고 있다. Fig. 12에서 나타난 것과 같이 절입량이 30 $\mu\text{m}/\text{min}$ 인 경우 슷돌표면의 기공에 부착된 칩의 분포가 많이 나타나는 눈매움현상을 보이고 있으므로 연삭가공시 표면에 나쁜 영향을 미치게 된다.

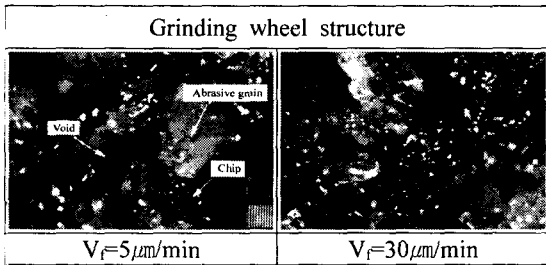


Fig. 12 Micrographs of grinding - wheel structure

### 4.3 주축모터전류신호와 금속제거량과의 관계

Fig. 13은 주축모터전류신호와 금속제거량과의 관계를 나타낸 것이다. Spark-out시간에 따라 주축모터전류신호는 급격히 감소하는 반면 금속제거량은 지수함수적으로 감소하는 경향을 알 수 있다. 그러나 가공 초기의 주축모터전류값과 금속제거량을 비교해 볼 때 주축모터전류신호를 이용한 금속제거량의 예측이 가능함을 알 수 있다.

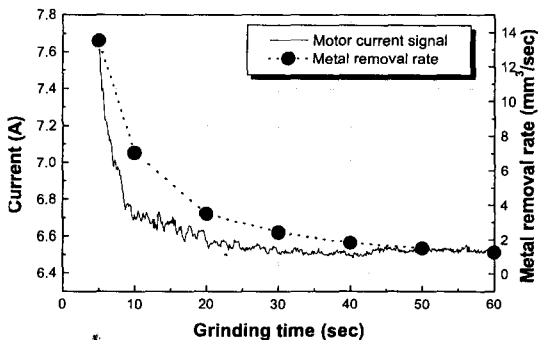


Fig. 13 Relationship between spindle motor current signal and metal removal rate ( $V_s=1700\text{RPM}$ ,  $V_w=30\text{RPM}$ ,  $V_f=30\mu\text{m}/\text{min}$ )

### 4.4 AE신호를 통한 금속제거량의 평가

주축모터전류신호의 신뢰성 검토를 위한 실험

으로 AE기법을 사용하였다. T.G. Bifano는 AE 신호처리법중 AE에너지는 금속제거의 메카니즘에서 민감하게 변화한다는 사실을 밝히고 있다<sup>(6)</sup>. AE에너지는 신호 파형이 일정시간 내에서 가지는 에너지를 말하며, 식(3)과 같이 정의된다.

$$U = \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt \quad (3)$$

여기서 U는 시간  $t_1$ 에서  $t_2$ 까지의 에너지를 나타내며, V는 시간 t에 대한 파의 진폭이다.

Fig. 14는 실험을 통하여 획득된 AE 원신호와 에너지를 각각 나타내고 있다. AE 에너지 신호는 원래의 AE신호에서 돌발신호가 나타나면, 그 최대값이 매우 높게 나타나므로 연삭가공 상태에 대한 정보를 제공해 주고 있음을 알 수 있다.

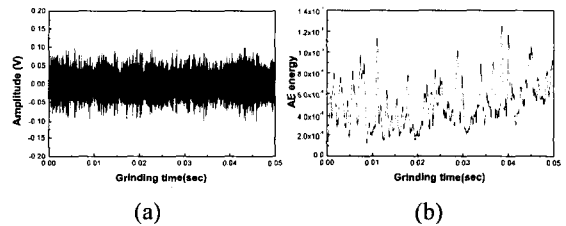


Fig. 14 AE raw(a) and energy(b) Signal ( $V_s=1700\text{RPM}$ ,  $V_w=30\text{RPM}$ )

Fig. 15는 절입량에 따른 AE 에너지의 변화 거동을 나타내는 것이다. 절입량의 증가에 따라 AE 에너지의 값이 상승하므로 AE에너지의 변화에 따라 연삭가공의 상태를 감시하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 AE에너지는 주축모터전류신호의 신뢰성 평가를 위한 적절한 방법임을 알 수 있다.

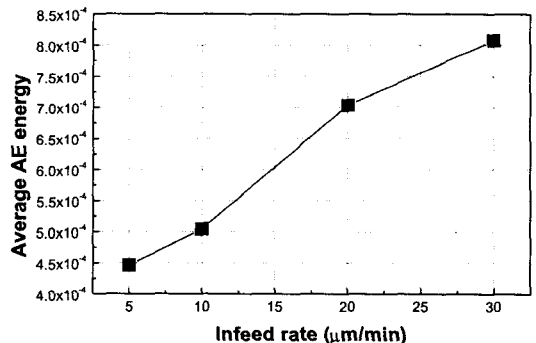


Fig. 15 AE energy characteristic in accordance with infeed rate ( $V_s=1700\text{RPM}$ ,  $V_w=30\text{RPM}$ ,)

Fig. 16은 연삭 가공시간의 변화에 따른 금속 제거량과 AE에너지값의 변화를 나타내는 것이다. AE에너지의 그래프 경향은 금속제거량의 변화 곡선과 대부분의 구간에서 일치하고 있다. 앞선 실험 결과인 주축모터전류신호와 비교해 볼 때 AE 에너지를 통한 금속제거량의 예측 및 감시가 다소 용이함을 알 수 있으나, AE센서를 통한 감시는 원통 연삭가공시 연삭유의 공급, 센서 위치 설정에 따른 문제점등이 있기 때문에 홀센서를 통한 연삭상태의 평가방법이 실용적이라 할 수 있다.

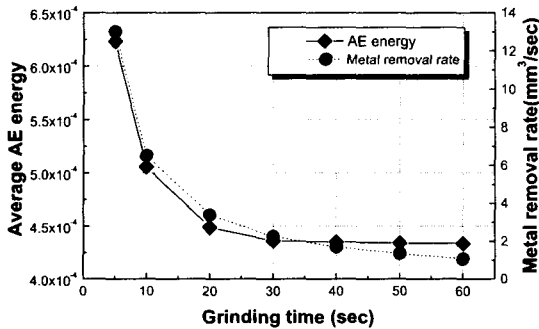


Fig. 16 Relationship between AE energy and metal removal rate ( $V_s=1700RPM$ ,  $V_w=30RPM$ ,  $V_f=30\mu m/min$ )

### 5. 결론

주축모터전류신호를 이용한 연삭가공의 가공 상태를 평가하는 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주축모터전류신호는 슷돌 회전속도의 증가에 따라 주축모터 전류값이 감소하고, 절입량과 공작물 속도의 증가에 따라 주축모터전류값이 증가하므로 연삭 가공시 연삭저항의 정성적인 특징을 반영한다.
- (2) 주축모터전류신호와 금속제거량과의 관계를 비교해본 결과 연삭 가공초기의 주축모터전류신호에 따른 금속제거량의 변화경향이 유사하므로 주축모터전류신호를 이용하여 인프로세스로 금속제거량의 예측이 가능하다.
- (3) 주축모터전류신호의 신뢰성 평가를 위한 방법으로 AE 기법을 사용한 실험에서 주축모터전류신호와 AE 에너지의 금속제거율에 대한 그래프 경향이 유사하므로, 실용적인 측면에

서는 주축모터전류신호를 이용하는 것이 AE 센서의 산업현장 적용시의 단점을 보완하므로 효율적이다.

### 참고문헌

1. S. Malkin., "On-line Optimization for Internal Plunge Grinding," Annals of the CIRP, Vol. 45, pp. 287-292, 1996.
2. W. Brian Rowe., "Application of Artificial Intelligence in Grinding," Annals of the CIRP, Vol. 43, pp. 521-530, 1994.
3. I. Fukumoto., "An Evaluation of Grinding Force by The Fracture Toughness of Carbon Steel," J. Mach. Tools. Manufac, Vol. 29, No. 3, pp. 433-439, 1989.
4. M. Younis., "A New Approach to Development of a Grinding Force Model," Trans. ASME, Vol. 109, pp. 306-313, 1987.
5. T. Matsuo., "Effect of Grain Shape on Cutting Force in Superabrasive Single-Grit Tests," Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 323-326, 1989.
6. T. G. Bifano and Y. Yi., "Acoustic Emission as an Indicator of Material-Removal Regime in Glass Micro-Machining," J. Precis. Eng., Vol. 14, No. 4, pp. 219-228, 1992.