

본 논문은 1996년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

## 오스템퍼링 처리한 구상흑연주철의 AE신호에 의한 절삭공구 손상의 검출에 관한 연구

전태옥\*, 박흥식\*, 이광영\*\*, 예규현\*\*\*

### Detection of the Cutting Tool's Damage by AE Signals for Austempered Ductile Iron

Tae-Ok Jun\*, Heung-Sik Park\*, Kwang-Young Lee\*\* and Gyoo-Hyeon Ye\*\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, three different types of commercial tools - P20, NC123K and ceramic - have been used to cut austempered ductile iron(ADI). In the austempered condition the materials are hard, strong and difficult to machine. Thus, we selected a optimum tool material among three different types of used tools in machining of austempered ductile iron. It was used acoustic emission(AE) to know cutting characteristic for selected tool and investigate characteristic of AE signal according to cutting condition and relationship between AE signal and flank wear land of the ceramic tool.

The obtained results are as follows : (1) The ceramic tool among three different types of tools is the best in machining austempered ductile iron. (2) In case of ceramic tool, the amplitude level of AE signal(AE rms) is mainly affected by cutting speed in cutting condition and it is proportional to cutting speed. (3) There have been the relationship of direct proportion between the amplitude level of AE signal and flank wear land of the tool. (4) It was observed that the value of AErms was only affected by cutting speed. Therefore it is possible to in-process detection of ceramic tool's wear in case the initial value of AErms at each cutting speed decided.

**Key Words** : ADI(오스템퍼링한 구상흑연주철), Acoustic Emission(탄성응력파), Flank Wear Land(플랭크마멸폭), In-process Detection(인프로세스 검출)

#### 1. 서론

종래 주철재료는 그 조형성 및 주조성이 우수하여 다양한 기계 부품에 사용되어 왔지만, 강에 비하여 기계적

강도와 인성이 부족한 결점을 가지고 있었다. 이 점을 개선하기 위하여 양호한 주철의 조형성에 고강도, 고인성의 요구에 충족할 수 있는 오스템퍼링 한 구상흑연주철(Austempered Ductile Iron, ADI)이 개발되어 이

\* 동아대학교 기계공학과  
\*\* 경상대학교 선박기계공학과  
\*\*\* 창원전문대학 기계설계과

제까지 단강제품으로 제조되어 왔던 자동차 부품인 front suspension의 ball joint, socket, ring gear 및 pinion gear를 비롯하여 각종 산업기계 부품 및 압연롤 등에도 사용되기 시작하여 오늘날 기계공업 분야에서 주목을 모으고 있다.<sup>(1,2)</sup>

ADI재는 기지조직이 베이나이트(bainite)와 잔류오스테나이트(retained austenite)로 구성되어 있기 때문에 같은 조성을 가진 일반의 구상흑연주철에 비하여 연성과 인성의 감소 없이 강도를 2배로 증가시킬 수 있다.<sup>(3,4)</sup> 그러나 ADI재는 그 강도 특성이 향상된 반면에 2차 가공성 즉, 피삭성에 대하여서는 아직 많은 문제점을 가지고 있어 적절한 가공 지침이 주어지지 않고 있는 실정이다. 특히 ADI재는 경도가 높아 절삭가공시 톱니형 칩이 발생하는 소입각과 유사한 특성을 가지므로 적절한 공구재료의 선택과 공구마멸 및 파손 등에 대한 정보는 아직 명백히 제시되어 있지 않고 있다.<sup>(5,6)</sup>

따라서 본 연구에서는 3종류의 공구재료 즉, P20, NC123K 및 세라믹공구를 사용하여 ADI재의 절삭시 최적 공구재료를 선정하고, 이 공구의 마멸 특성을 알기 위하여 고체가 소성변형 또는 파괴시 재료 내부에 축적된 에너지가 발산할 때 발생하는 탄성응력파(Acoustic Emission, AE)를 사용하였다. 절삭장에서 얻어지는 AE 신호는 공구마멸의 In-process 검출에 유용하게 이용되므로 이를 통하여 각 절삭조건에 따른 AE신호 특성과 공구의 플랭크 마멸폭을 측정하고자 하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험재료

본 실험에 사용한 실험재료는 Mg을 첨가한 일반의 구상흑연주철 용탕에 순도 99.9%인 Cu와 Ni 및 Fe-60% Mo를 첨가하여 용해한 후 Y형 생사형에 주입하여 직경 60mm, 길이 160mm의 환봉시료를 얻었으며, 이의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical compositions of ADI(wt.%)

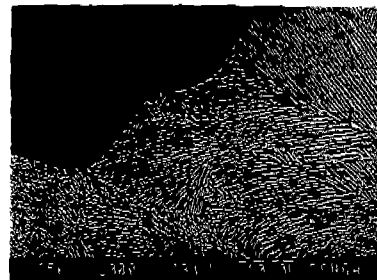
C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Ni	Mg
3.52	2.50	0.35	0.02	0.02	0.26	0.21	0.7	0.04

오스테퍼링 처리를 위하여 염욕로를 사용하였으며, 열처리에 사용한 염은 55%NaCl-45%KCl의 중성염을, 저온영역에서는 55%KNO<sub>3</sub>-44.8%NaNO<sub>2</sub>의 저용점염을

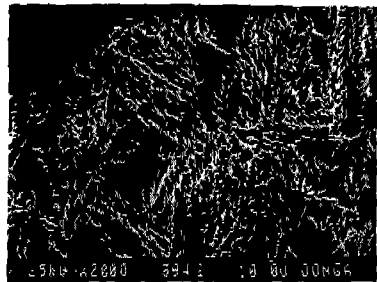
사용하였다.

구상흑연주철의 오스테퍼링 처리에 있어서는 오스테나이트화 하기 위한 가열이 필요하며, 이 온도의 범위는 일반적으로 850~900℃가 적당하다<sup>(7,8)</sup>고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 오스테나이트화 온도를 900℃로 하고 기지조직 내의 탄소량이 평행에 도달할 수 있게 하기 위하여 1시간 30분 동안 유지한 후, 오스테퍼링 온도 370℃에서 2시간 동안 유지시켜 급랭시켰다. 여기서 오스테퍼링 온도를 370℃로 한 것은 이 온도 부근에서 연성 및 강도적 성질에서 우수한 특성을 나타내기 때문이다.<sup>(9)</sup>

Fig. 1은 구상흑연주철의 오스테퍼링 처리 전과 후의 현미경 조직을 나타낸 것으로 (a)의 오스테퍼링 전의 현미경 조직에서 기지조직은 페라이트(ferrite)가 형성되어 있고 그 주위에는 미세한 퍼얼라이트(pearlite)와 탄화물 입자가 존재하고 있다. 그리고 오스테퍼링 온도가 370℃의 현미경 조직인 (b)에서는 흑연 주위에 미세한 침상의 하부베이나이트와 조대한 침상 및 판상의 상부베이나이트가 형성되어 있으며 기지조직내 잔류오스테나이트도 함유되어 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 실험에 사용한 바이트는 시판의 P20(1402Hv), 코우티드 초경 NC123K(1442Hv) 및 흑 세라믹(1992 Hv)의 3종류를 사용하였다.



(a) Not austempered



(b) Austempered

Fig.1 Scanning electron micrograph of test materials

Table 2는 오스텝퍼링 온도 370℃에서 열처리한 ADI 재료의 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 2 Mechanical properties of ADI

Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (Hv)
125	4.4	408

2.2 실험방법

Fig. 2는 본 실험에 사용한 실험장치의 개요도를 나타낸 것이다. 무단변속이 가능한 범용선반에서 재료의 외주길이 방향으로 절삭 실험을 행하였다. 그리고 공구마멸의 In-process 검출을 위하여 공구생크 후부에 공진주파수 1MHz의 AE-905S형 AE sensor를 부착하고 여기서 발생된 AE 신호를 전치증폭기 및 AE-922형 디스크리미네이터에서 총 60dB 증폭하고, 100KHz~1MHz의 밴드 패스 필터로 처리한 후 반파정류한 포락선검파 파형을 데이터레코더에 저장함과 동시에 디지털오실로스코프(LeCroy 9310)로 파형 관찰을 하였다. 그리고 이 디지털오실로스코프를 이용하여 20ks/s의 샘플링 레이트 (sampling rate)로 AE 신호 전압의 RMS 값을 측정하였으며, 이때 얻어진 AE신호 파형의 예를 Fig. 3에 나타내었다. 또 공구현미경으로 바이트의 플랭크마멸 폭을 측정하고, 주사전자현미경(S.E.M.)을 사용하여 공구마멸을 조사하였다.

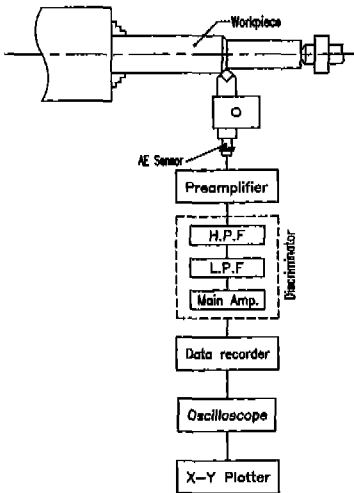


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 3은 본 실험에 사용한 공구의 형상과 실험 조건을 나타낸 것이다.

Table 3 Cutting condition

Tool angle	(-5, -6, 6, 5, 15, 15, 0.8)
Cutting speed	50~200 (m/min)
Depth of cut	0.5, 1.0 (mm)
Feed	0.05~0.4 (mm/rev)

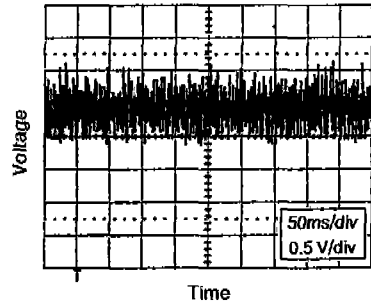


Fig.3 Wave form of AE signals.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공구마멸 특성

ADI의 절삭에 있어서 우선 공구재료에 따른 플랭크마멸 폭을 알기 위하여 절삭속도를 변화시켜 3종류의 공구재료에 대한 마멸폭을 조사하였다. Fig. 4는 절삭깊이  $t$ 와 이송  $f$ 를 각각 0.5mm 및 0.20mm/rev로 일정하게 하고 피삭재의 길이(120mm)방향으로 5회 가공한 후 절삭속도  $V$ 에 따른 플랭크마멸 폭  $V_f$ 를 나타낸 것이다.

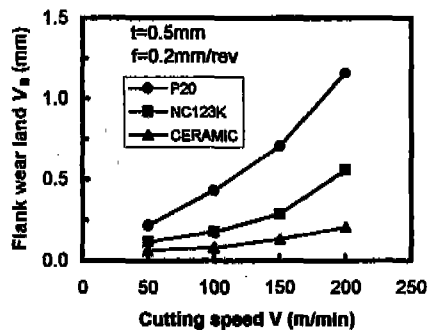


Fig. 4 Variation of the flank wear land on the cutting speed

그림에서 처럼 절삭속도가 증가함에 따라 3종류 공구의 플랭크마멸 폭은 증가하지만, 특히 초경공구인 P20의 마멸폭은 절삭속도의 변화에 따라 거의 비례적으로 상승하고 있다. 또한 코팅한 초경공구인 NC123K는 절삭속도가 150 m/min 이상에서의 마멸폭은 크게 변화하지만 세라믹 공구의 경우는 절삭속도의 변화에도 관계없이 마멸폭이 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다.

본 실험에 사용한 ADI는 그 기지조직의 대부분이 고경도를 가지는 침상 및 판상의 하부베이나이트로 구성되어 있기 때문에 P20의 경우는 절삭속도가 증가할수록 칩과 공구재료 사이의 마찰열에 의한 확산반응으로 크레이터 마멸을 증가시키고 또한 인선부가 고온고압에 의한 소성 변형으로 공구파손이 조속히 일어나기 때문이라고 생각된다. 그러나 세라믹 공구의 경우에는 TiC을 함유한 알루미늄 베이스 세라믹으로 알루미늄의 우수한 내마멸성과 TiC의 높은 인선강도 및 내열충격성으로 P20과 NC123K의 경우보다 우수한 마멸특성을 나타내고 있지만 세라믹의 공구수명을 플랭크마멸 폭  $V_b = 0.25$  mm로 볼 때 절삭속도의 영향은 크다고 생각된다.

Fig. 5는 절삭속도 200 m/min, 절삭깊이 0.5 mm 및 이송량 0.2mm/rev에서 5회 가공 후 세라믹공구의 (a) 경사면, (b) 주연면 및 (c) 부연면의 공구 결손상태를 나타낸 것이다. 피삭재는 고강도의 ADI이므로 (a) 경사면의 nose부는 높은 열응력에 의한 고온으로 인하여 결손되어 있고, (b)와 (c)의 여유면에는 기계적 마멸에 의한 굽힌 흔적이 플랭크마멸 폭 하부까지 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 여유면 edge부의 마멸은 응착된 ADI의 미세한 칩의 일부가 edge부에 부착하여 가공경화되고 이것이 탈락할 때 공구재의 일부가 함께 제거된 결과라고 생각된다.

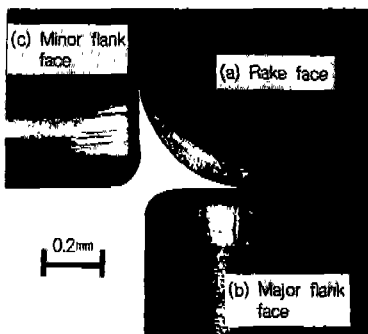


Fig.5 Photograph of worn tool(CERAMIC)

Fig. 6은 절삭속도를 150 m/min, 절삭깊이를 0.5mm로 일정하게 하고 이송량  $f$ 의 변화에 따른 3종류 공구의 플랭크마멸 폭을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 7에는 이송량의 변화에 따른 코팅한 초경 NC123K공구에 의하여 발생된 칩 형태를 (a)  $f = 0.05$  mm/rev 와 (b)  $f = 0.20$  mm/rev 로 구분하여 표시하였다.

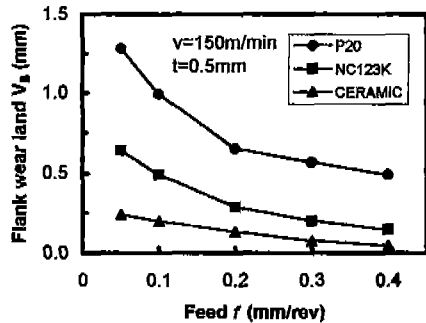
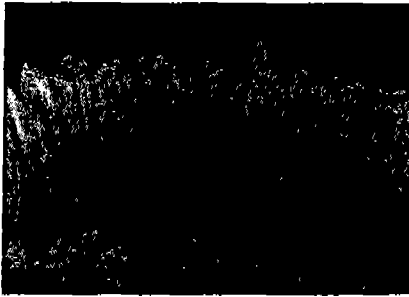


Fig. 6 Variation of the flank wear land on the feed rate.

Fig. 6에서 이송량이 증가할수록 3종류 공구 모두 플랭크마멸 폭은 전반적으로 감소하지만, P20과 NC123K의 경우가 세라믹공구보다 그 경향이 크며, 특히 이송량이 0.05mm/rev와 0.20mm/rev사이에서 플랭크마멸의 감소율이 크다는 것을 알 수 있다.

이송량이 증가할수록 플랭크마멸 폭이 전반적으로 감소하는 것은 일정한 절삭조건에서 동일 절삭량을 절삭할 경우 이송속도가 증가할수록 총 절삭거리가 감소하는데 기인한다고 생각된다. 이것은 Fig. 7에서 이송량이 작은 (a)의 칩은 톱니형 연속형 칩을, 이송량이 (b)인 경우에는 균열형 칩이 발생된 것에서도 이송량의 증가에 따른 공구마멸의 감소 경향을 알 수 있다고 생각된다.

그리고 P20과 NC123K의 경우 이송량이 0.05mm/rev 와 0.20mm/rev 사이에서 플랭크마멸의 감소율이 크게 나타나는 것은 Fig. 7의 (a)와 같은 연속형 칩을 발생시키는 이송량이 적은 구간에서는 소성변형으로 형성된 칩에 축적된 절삭열의 영향이 공구에 크게 작용하고 또한 절삭면적이 작기 때문에 피삭재의 전단면 주위에 형성되는 가공경화된 층을 절삭하는 절삭시간이 증가하기 때문이라고 생각된다. 그러나 세라믹의 경우에는 이송속도의 증가에도 불구하고 큰 변화를 보이지 않고 있다는 것을 나타내고 있다. 이상에서 처럼 ADI의 절삭시 공구재료는 세라믹공구가 우수하다는 것을 알 수 있다.



(a)  $f=0.5$  mm/rev



(b)  $f=0.20$  mm/rev

Fig.7 Photo. of the chip shape for coated carbide tool(NC123K)

### 3.2 절삭조건에 따른 AE신호 진폭레벨

Kannatey-Asibu<sup>(10)</sup>는 절삭가공에 있어서 AE신호의 에너지량을 AE 발생원의 일량으로 해석하고, 에너지 척도로써 AE 신호 진폭레벨을 AE 교류파의  $AE_{rms}$ 로 나타내고 다음과 같이 정의하였다.

$$AE_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt} \quad (1)$$

여기서  $V(t)$  : 시간함수,  $\Delta T$  : 평균 시간이다.

본 연구에서는 절삭조건의 변화에 따라 세라믹공구의 AE신호 진폭레벨을 알기 위하여 공구의 플랭크마멸 폭  $V_b$ 를 "0"이라고 가정할 수 있는 초기상태의 공구를 사용하였다.

Fig. 8은 세라믹공구로서 이송량을 0.1 mm/rev로 일정하게 하고 절삭속도  $V$ 를 50, 100, 150 및 200 m/min로 단계적으로 변화시켰을 때 절삭깊이  $t$ 에 따른 AE 신호 진폭레벨  $AE_{rms}$ 의 크기 변화를 나타내었다. 여기서  $AE_{rms}$ 의 크기는 절삭개시점에서 0.5초 동안의 AE신호 진폭레벨을 측정 한 것이다.

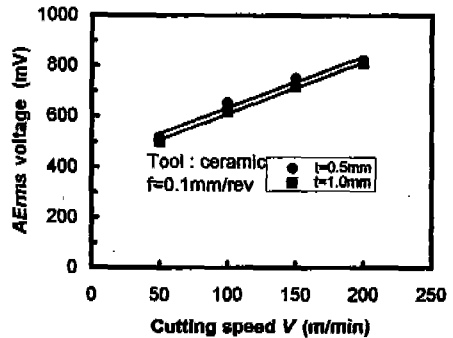


Fig. 8 Variation of the  $AE_{rms}$  voltage according to cutting speed.

그림에서처럼 절삭깊이 변화에 관계없이 절삭속도의 증가에 따라 AE신호 진폭레벨은 거의 직선적으로 상승하며 절삭깊이  $t$ 가 0.5 mm의 경우가 1.0 mm보다  $AE_{rms}$ 가 조금 높게 나타나고 있지만 그 크기 변화는 극히 작다는 것을 알 수 있다. 이 실험은 공구가 거의 마멸하고 있지 않는 상태에서 행하고 있으므로 AE 신호의 주된 발생원으로서 절삭중 피삭재의 전단변형을 영역과 칩과 경사면, 여유면과 피삭재의 접촉영역으로 생각된다. 절삭속도가 AE 신호에 크게 영향을 미치는 것은 절삭속도를 변화시키면 변형 영역 크기의 변화는 적지만 절삭속도의 증가에 따라 변형율속도가 크게 증가하기 때문이라고 생각된다. 이러한 현상은 금속의 인장시험의 경우에서도 AE신호 진폭레벨은 변형율 속도의 영향을 크게 받는다는 것이 명확하게 되어 있다. 그리고 칩과 경사면, 여유면과 피삭재의 접촉영역에 대해서 보면 여기서 발생하는 AE신호는 마찰에 의한 것으로 생각되며, 마찰속도는 절삭속도에 비하여 數分の 1이 되므로 이 영역에서 발생하는 AE신호는 피삭재의 전단변형율에서 발생하는 AE신호에 대하여 진폭레벨은 낮고 무시할 수 있다고 생각된다. 그러나 AE신호는 절삭깊이의 변화에는 거의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 절삭깊이를 0.5 mm로 일정하게 하고 이송량  $f$ 를 단계적으로 변화시켰을 때의 절삭속도에 따른  $AE_{rms}$ 를 나타낸 것이다.

각 절삭속도에서 이송량이 단계적으로 증가하여도 AE신호는 이송에는 거의 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 절삭성의 관점에서 볼 때 절삭깊이와 이송량이 증가할수록 절삭저항이 증가하게 되고 이에 따라 AE신호는 크게 되리라 생각되

지만 Fig. 8과 Fig. 9의 결과에서 AE 신호는 절삭깊이와 이송량에 무관하다는 것을 나타내 주고 있다. 이것은 피삭재의 전단변형을 영역에 대하여 생각해 보면 절삭깊이와 이송량을 변화시킨 경우 변형을 영역은 크게 변화하지만  $AErms$ 는 거의 변화하지 않는 것에서 변형을 영역의 크기는 AE 신호에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 나타내 주고 있다. 이것은 小島<sup>[12]</sup>의 연구에서도 초기 플랭크마멸 폭이 작은 공구의 경우에는 절삭깊이와 이송량의 변화에 따른 AE 신호의 크기는 변화없이 일정하게 나타난 것과 일치하고 있다.

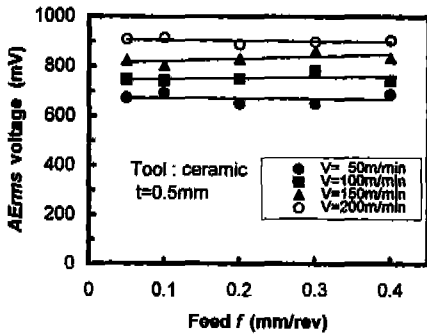


Fig. 9 Variation of the  $AErms$  voltage according to feed rate.

이상과 같이 절삭조건에 따른 AE 신호의 변화는 주로 절삭속도에 의해서만 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 AE에 의한 플랭크마멸의 In-process 검출

플랭크마멸 폭에 대한 AE 신호와의 관계를 이용하여 플랭크마멸의 In-process 검출을 위하여 플랭크마멸 폭이 서로 다른 공구를 사용하여 AE 신호를 검출하였다.

Fig. 10에는 절삭깊이  $t$  를 0.5 mm, 이송량  $f$  를 0.1 mm/rev로 일정하게 하고, 세라믹공구의 플랭크마멸 폭을 각각 달리하였을 때의 각 절삭속도에 따른 AE 신호를 나타내었다.

그림에서 처럼 AE 신호 진폭레벨은 절삭속도가 증가할수록 크고, 플랭크마멸 폭  $V_B$  와는 거의 직선적인 관계를 가지며, 또한  $AErms$  에 대한 근사직선의 기울기도 절삭속도가 증가할수록 상승하고 있다. 그림에서  $V_B$  와  $AErms$  의 사이에는 좋은 상관관계를 가지며, 절삭속도가 증가할수록 AE 신호는 공구마멸의 영향을 민감하게 받는다는 것을 알 수 있다. 이처럼 절삭속도의 변화에 따라 플

랭크마멸이 진행한 공구의  $AErms$  와의 관계를 알기 위하여 Fig. 11에는 Fig. 10과 동일한 절삭조건에서 절삭속도의 변화에 따른 플랭크마멸 폭  $V_B$  와  $AErms$  와의 비, 즉 slope  $A$ 를 나타낸 것이다.  $A$ 는 절삭속도의 증가와 함께 직선적으로 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

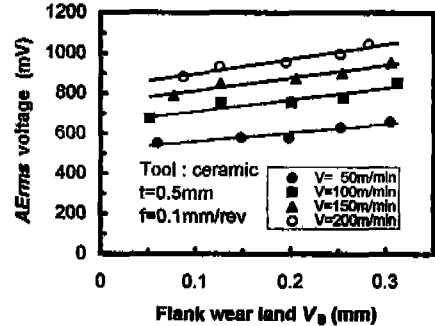


Fig.10 Variation of the  $AErms$  voltage according to flank wear land.

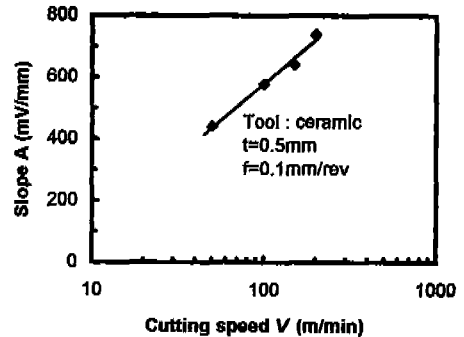


Fig. 11 Relation between cutting speed and slope.

이상의 결과에서 AE 신호 진폭레벨  $AE(v)$ , 플랭크마멸 폭  $V_B$  그리고 절삭속도  $V$  와의 사이에는  $AE(v) = f(V_B, V)$  라는 관계가 얻어진다. 따라서 절삭조건 중에서 절삭속도  $V$  를 임의로 결정하면 Fig. 8에서 처럼  $V_B \approx 0$  일 때의  $AE(v)$ 가 구해지고 Fig. 10에 나타난 근사직선의 절편  $B$ 를 구할 수 있다. 그리고 Fig. 11의 절삭속도에 따른 기울기  $A$ 를 구하면 공구마멸과 AE 신호와의 사이에는 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_B = \left\{ \overline{AE}(v) - B \right\} / A \quad (2)$$

따라서 위의 관계식을 이용하게 되면 ADI재료의 절삭시

발생되는 AE 신호를 검출하여 세라믹공구 마멸에 대한 In-process 검출이 가능할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

오스테퍼링 한 구상흑연주철(ADI)의 절삭시 최적 공구 선정과 절삭과정에서 발생하는 AE 신호를 이용하여 공구 마멸에 대한 In-process 검출을 위하여 플랭크마멸 폭, 절삭속도, 이송 및 절삭깊이를 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 오스테퍼링한 구상흑연주철의 절삭시 공구재료는 세라믹이 가장 우수하며 이송력의 변화에 따라 칩 형태는 톱니형의 연속형 칩에서 균열형 칩으로 변화한다.
2. 세라믹 공구의 경우 AE 신호 진폭레벨 *AErms* 는 절삭조건 중에서 주로 절삭속도에만 영향을 크게 받으며, 절삭속도의 증가와 함께 거의 직선적으로 상승한다.
3. *AErms*와 플랭크마멸 폭과의 사이에는 정비례 관계를 가지며 그 증가율은 절삭속도와 함께 직선적으로 상승한다.
4. 각 절삭속도에서 *AErms* 값을 구하면 세라믹공구마멸에 대한 In-process 검출이 가능하며 이를 통하여 플랭크 마멸폭  $V_B$  를 추정할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. J.Hanchi and B.E.Kiamcki, "Acoustic Emission Monitoring of the Wear Process", wear, 145, pp.1~27, 1991.
2. M.Johansson, "Austenitic-Bainitic Ductile Iron", AFS Trans., 85, pp.117~122, 1977.
3. J.F.Rouns and K.B.Rundman, "On the Structure and Properties of Austempered Ductile Cast Iron", AFS Trans., 91, pp.815~840, 1984.

4. I.R.Pashby, J.Wallbank and F.Boud, "Ceramic Tool Wear when Machining Austempered Ductile Iron", Wear, 162-164, pp.22~33, 1993.
5. 小田哲, 宮近幸逸, 小出降夫, 會見賢一, "齒車の曲げ疲労損傷のAE特性", 日本機械學會論文集(C編), 58卷, 551號, pp.2219~2225, 1992.
6. K.Shintani, H.Koto, Y.Funmura and A.Yamamoto, "Cutting Performance of CBN Tools in Machining of Austempered Baintic Spheroidal Cast Iron", JSPE, 56, 12, pp. 2261-2266, 1990.
7. Voigt, R.C. and Loper, R.JR., "Austempered Ductile Iron-Process control and Quality Assurance", J.Heat Treating, Vol.3, No.4, pp.291~309, 1984.
8. Blackmore, P.A. and Harding, R.A., "The Effect of Metallurgical Process Variables on the Properties of Austempered Ductile Iron", J.Heat Treating, Vol.3, No.4, pp.301~325, 1984.
9. 박홍식, "오스테퍼링 한 저합금 구상흑연주철의 기계적 성질 및 마멸특성에 관한 연구", 한양대 박사학위논문, 1989.
10. Elijah Kannatey, Jr. and D.A.Dornfeld, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", Trans. ASME. Ser. B. 10. 3, 330, 1981.
11. 三輪祐司, "アコースティックエミッションによる工具損傷のインプロセス検出", 日本機械學會論文集(C編), 47, 424, pp.1680~1689, 1981.
12. 小島浩二, 稻崎一郎, 三宅亮一, "アコースティックエミッションを利用したプロセスの監視", 日本機械學會論文集(C編), 52, 474, pp.799~805, 1986.