

ADI재의 드릴가공시 절삭저항 및 AE신호에 의한 공구마멸상태의 검출

유경곤*, 전태옥**, 박홍식**

Monitoring of Tool Wear Condition by Cutting Resistance and AE Signal in Drilling ADI Material.

Kyong-Kon, Yoo*, Tae-Ok Jun**, Heung-Sik Park**

ABSTRACT

For the purpose of monitoring the abnormal state in proportion to cutting in automatic production process, the 3 kinds of specimens different from mechanical properties by austempering through temperature variation were manufactured, and the effects of tool wear on thrust and AE RMS was analyzed with sequential drilling in in-process.

When the ADI specimens were drilled, the relationship of thrust and AE RMS with flank wear was studied through experiments, and it is confirmed that the reliable wear state is able to be monitored by using these signals.

It was shown that thrust and AE RMS increased slowly till flank wear reached to $V_b=0.25\text{mm}$, and they increased steeply over the value. The effective tool exchange time was able to be pre-estimated by using this fact. It was validated that the tool breakage was able to be detected on the real time by monitoring in in-process.

Key Words : Tool wear(공구마멸), AE RMS(음향방출의 실효값), flank wear(프랭크 마멸), Tool breakage(공구파손), ADI (오스템퍼처리한 구상흑연주철), Thrust(추력), real time monitoring(실시간 검출)

1. 서론

신뢰할 수 있는 공구마멸 센서의 개발이 공작기계의 자동화에 요체가 된다는 것은 잘 알려져 있다. Micheletti 등⁽¹⁾은 공구 마멸에 대한 센서의 포괄적인 조사를 하여 발표하였으며, 더욱이 센서 개발이 공구마멸 감시에 매우

중요하다는 결론을 내렸다. 여러 가지 센서 기술 중에서 AE에 의한 감시 기술이 그 민감성과 크기 그리고 비용 측면에서 상당히 유리하므로 많은 관심의 대상이 되고 있다. 따라서 Iwata 등⁽²⁾은 프랭크의 마멸량과 AE신호의 카운터 총수와의 관계를 찾아내어 공구의 이상상태 검출에 적용하고자 하였으며, Kakino 등⁽³⁾은 공구파손 발생

* 대구기능대학 메카트로닉스학과
** 동아대학교 기계공학과

시에 AE레벨이 급격히 증가 한다는 것을 발견하였다. 그 후 Sampath⁽⁴⁾, Inasaki⁽⁵⁾, Rangwala⁽⁶⁾, Matsumoto⁽⁷⁾, Rice⁽⁸⁾ 등의 많은 연구인에 의해서도 AE신호를 이용한 공구의 채털링(chatter), 마멸 및 파손에 따른 이상상태 검출에 대한 연구가 진행되었다. ADI 소재에 대한 절삭 가공 연구로는 藤田⁽⁹⁾, 小川⁽¹⁰⁾ 등에 의하여 ADI의 구상 화물의 영향에 따른 절삭성 연구를 진행하였으며, 新谷⁽¹¹⁾ 은 세라믹 공구를 이용한 ADI의 절삭특성에 대한 연구를 하였고, 藤田⁽¹²⁾에 의하여 ADI에 함유된 Si의 변화에 따른 드릴 절삭성에 대한 연구가 이루어 졌다. 복합센서에 의한 검출 방법으로 Dornfeld⁽¹³⁾는 절삭공정에서 다중센서를 이용한 절삭상태를 검출하였으며, Moriwakil⁽⁴⁾등은 절삭력 센서와 AE센서를 이용한 그 특성으로 이상상태를 진단하였다. 따라서 본 실험에서는 피삭재의 기계적 성질을 고려한 공구 마멸에 따른 신호 검출을 위하여 구상흑연주철을 오스테م퍼링한 각각의 ADI (Austempered Ductile Cast Iron)재를 이용하여 AE신호에 의한 공구의 마멸감시 뿐만 아니라 절삭저항까지 추출하여 상호 비교를 통하여 보다 신뢰성 있는 공구 마멸의 감시가 될 수 있도록 하였으며, In-process상태에서 적절한 공구 교환 시기를 결정할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

2. 시험편의 열처리 및 실험방법

2.1. 시험편 제작 및 열처리

구상흑연주철의 제조를 위하여 고주파유도 용해로에서 구상흑연주철용 선철 90%, 고철 10%를 용해온도 1500℃까지 승온하여 주입온도가 1360℃일 때 주입하여 제조하였다. 구상흑연주철의 조성은 Table 1과 같으며, 60×260×210mm의 크기로 Y-Block을 CO₂ 주형으로 주조하였다. 시험편 제작은 탕구부를 제거하여 절단한 후 60×20mm로 선삭가공하여 오스테م퍼링하였다. 오스테م퍼링 시에 사용된 혼합염으로는 고온용으로 BaCl₂를 70%, NaCl을 30%로 하여 처리하였고, 저온용으로는 KNO₃를 60%, NaNO₂를 40%로 하여 처리하였으며, 오스테나이트화는 먼저 급가열을 피하기 위하여 600℃로 15분간 유지한 후 다시 900℃로 40분간 처리한 후, 300, 350 및 400℃에서 60분간 오스테م퍼링하였다. Fig. 1은 (a)오스테م퍼링 전의 주조상태와 (b)오스테م퍼링 온도 300℃에서의 주사전자 현미경 조직사진을 나타낸 것이다. 그림에서 (a)의 주조상태에서 흑연은 구상으로 존재하며, 흑연 주위의 기지조직은 페라이트와 미세한 퍼얼라

이트가 존재하지만, (b)오스테م퍼링 온도 300℃의 경우에는 흑연 주위에 침상의 하부 베이나이트 조직으로 변태한 것을 볼 수 있다. 그리고 오스테나이트 온도를 증가시킬 수록 기지조직은 상부베이나이트를 가지는 것을 확인하였다.

Table 1 Chemical compositions of workpiece

Chemical Composition(%)					
T.C	Si	Mn	P	S	Mg
3.60	3.0	0.20	0.070	0.012	0.053



(a)AS CAST (B)ADI-A(300℃×60min)

Fig. 1 Microscopic picture of ADI for austempering temperature.

2.2. 실험 방법

드릴 절삭과정에서 발생하는 절삭저항 및 AE신호를 이용한 공구 마멸의 실시간 검출에 대한 정보를 얻기 위하여 본 실험에서는 머시닝센터(SAEIL, TNV-40A)를 사용하였으며, 절삭조건으로는 Table 2와 같다. 실험에 이용된 시험편은 오스테م퍼링 조건에 따라서 ADI-A: (300℃×60min), ADI-B: (350℃×60min), ADI-C: (400℃×60min)의 3종류의 시험편으로 구분하였으며 이들의 기계적 성질은 table 3과 같다. 시험편의 설치는 공구동력계를 머시닝센터의 테이블 위에 설치한 후 시험편 고정을 위한 3본척을 부착하였으며, AE센서는 시험편의 가장 근접거리인 3본척에 부착하였다. 절삭저항의 측정을 위하여 압전소자형 공구동력계 (Schweiz kistler, four component dynamometer 9272)를 이용하였으며, 공구동력계로부터 미소전류를 증폭하기 위하여 증폭기(Multichannel charge amplifier, kistler, Type 5019A)를 사용하였다. 증폭기로 증폭된 아날로그 신호는 A/D converter를 통하여 정량화된 데이터를 P/C에서 처리하였다. AE RMS의 측정은 공진주파수 1MHz인 AE센서(NF,AE-905-OP)이며, 센서에서 검출된 신호

Table 2 Drilling Condition

Drill	HSS, Twist Drill
Dimensions of drill	Ø4×54×83×118°
Feed rate (mm/rev)	0.1
Drilling speed (rpm)	2800, 3800
Drilling depth (mm)	12
Coolant	Dry

Table 3 Mechanical properties and volume fraction of work-piece

Materials	Temperature of Austempering (°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H _B)
AS CAST	0	480	8.8	194
ADI-A	300	1116	1.4	381
ADI-B	350	930	2.5	336
ADI-C	400	750	4.2	297

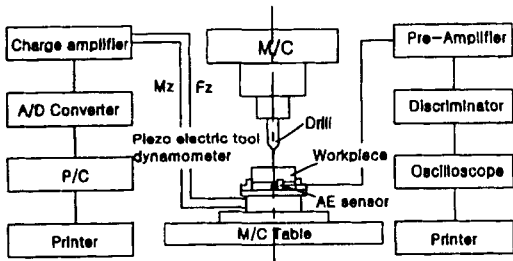


Fig. 2 Schematic diagram of experiment

를 Differential preamplifier(NF, AE-912, 40dB gain, 50k-2MHz bend width)를 통하여 Discriminator (NF, U-plot, 9502, level 50~99dB, 1dB steep)로 보내져 Digital oscilloscope (LeCroy 9310A)를 이용하여 신호의 파형을 분석하였다. 또한 드릴 프랭크 마멸량의 측정 및 촬영을 위하여 칼라영상현미경 (samsung, microworld,mw-200B1)을 사용하였으며, 개략도는 Fig.2와 같다.

실험은 점진적인 드릴가공에 따른 공구의 프랭크 마멸량 (V_B)을 측정하였고, 동시에 트러스터 및 AE RMS를 측정하여 공구마멸상태에 대한 각종 신호정보를 얻고자 하였으며, 이를 분석하여 공구의 적절한 교환시기를 찾고자 하였다. 드릴 프랭크 마멸폭의 측정기준으로는 외주부의 70%인 지점을 마멸의 기준으로 양날의 마멸폭을 평균하여 기록하였으며, 절삭저항의 정적성분인 트러스터

는 1회 가공에 따른 평균값을, 그리고 AE RMS는 드릴 코너부가 시험편에 드릴링하기 시작한 후 일정한 폭의 칩이 배출되기 시작했을 때부터의 계측값을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 구멍 가공 증가에 따른 영향

드릴의 마멸은 드릴과 공작물 사이의 고온, 고압으로 인한 주절삭날에 생기는 점진적인 변화이다. 공구 마멸에 영향을 미치는 인자로는 절삭조건, 공구의 재질 등 외에도 소재의 기계적 성질 등이 있으며, 특히 소재의 기계적 성질에 따른 공구 마멸 특성을 조사하기 위하여 기계적 성질이 다른 ADI-A, ADI-B, ADI-C 재료를 이용하여 드릴 직경 $d=4\text{mm}$ 인 공구로 심하게 마멸될 때까지 절삭 회전수 $N=2800\text{rpm}$, 이송속도 $f=0.1\text{mm/rev}$, 가공깊이 $h=12\text{mm}$ 의 일정한 절삭조건에서 순차적인 가공에 따른 드릴의 프랭크 마멸량을 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 상대적으로 높은 인장강도 및 경도를 갖는 ADI-A의 경우 구멍가공수 $n=1160$ 에서 프랭크 마멸 $V_B=0.3\text{mm}$ 에 달하였음을 알 수 있다. 그러나 시험편 ADI-B의 경우는 $n=1400$ 에서, ADI-C의 경우는 $n=1640$ 회 쯤에 프랭크 마멸 $V_B=0.3\text{mm}$ 에 달하였다. 이는 프랭크 마멸 인자의 경우 절삭조건 및 공구의 재질 외에도 시험편의 기계적 성질에 따라라도 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig.4는 기계적 성질이 비교적 우수하다고 판단되는 시험편 ADI-A를 이용하여 드릴가공회수 $n=50, 400, 1040, 1160$ 회 쯤 가공했을 때의 드릴 프랭크 마멸을 사진으로 나타내었다. 가공이 진행됨에 따라 프랭크 마멸,

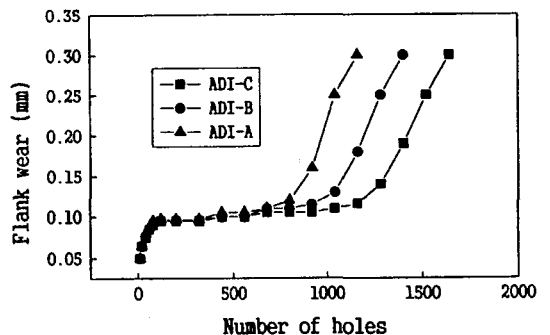
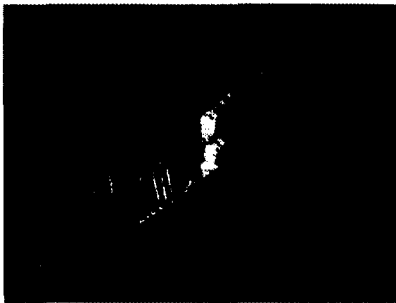


Fig. 3 Variation n flank wear with number of holes on each ADI (ADI-A, ADI-B, ADI-C, N=2800rpm, f=0.1mm/rev, d=4mm, h=12mm)



(A) 50th drilling



(B) 400th drilling



(C) 1040th drilling



(D) 1160th drilling

Fig. 4 Photo, of flank wear on drilling.
(ADI-A, N=2800rpm, f=0.1mm/rev, d=4mm, h=12mm)

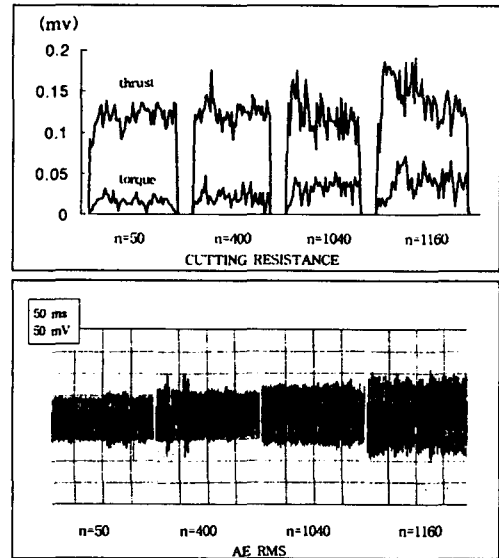


Fig. 5 Comparison of measured torque, thrust and AE RMS signals on drilling
(ADI-A, N=2800rpm, f=0.1mm/rev, d=4mm, h=12mm)

치질 마멸이 증가되는 현상을 볼 수 있다. Fig.5는 이때의 트러스터 및 AE RMS신호의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 구멍가공 초기단계인 n=50의 경우와 구멍가공 중기인 n=400에서는 트러스터 뿐만 아니라 AE RMS도 그 레벨 변화가 없이 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있으며, 또한 가공말기인 n=1040에서도 약간의 변화는 관찰되지만 그 레벨의 큰 변화는 보이지 않는다. 그러나 n=1160에서는 트러스터 뿐만 아니라, AE RMS 역시 레벨의 급격한 증가현상을 나타낸다. 따라서 드릴의 마멸에 따른 트러스터 및 AE RMS의 레벨은 드릴 마멸이 일정량 이상이 되어야만 급격한 변화가 있음을 알 수 있다.

Fig.6은 ADI-A재를 이용하여 프랭크 마멸이 $V_B=2.95\text{mm}$ 이상으로 공구교환시기 이상의 지속적인 가공으로 공구가 심하게 마멸되어 파손 직전의 트러스터 및 AE RMS신호와 그때의 드릴 인선과 파손 상태의 드릴을 사진으로 나타낸 것이다. 파손 순간 급속 간의 마찰로 인하여 심한 소음과 진동이 발생하였으며, 공구의 인선은 절삭 온도의 급격한 상승으로 인하여 완전히 파괴된 상태였다. 이때의 트러스터는 높은 레벨을 유지하였으며 절삭저항의 동적 성분인 트러스터 역시 심한 진폭을 이루었다. 또한 AE RMS도 급격한 발생원을 나타내는 것을 볼 수 있으며, 따라서 이 실험을 통하여 절삭저항 신호와 마찬가지로 AE

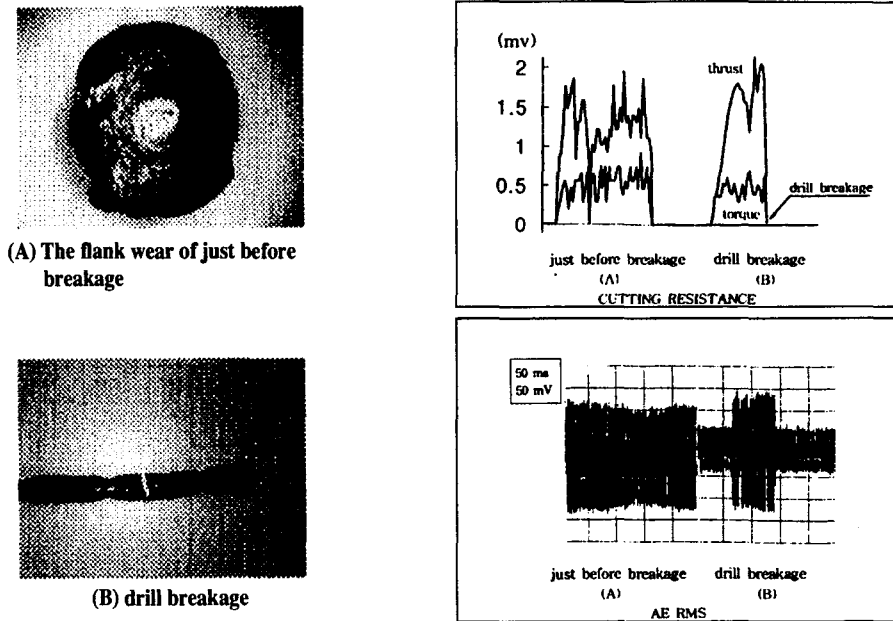


Fig. 6 The signals of Torque, thrust and AE RMS, and photo of drill breakage.
(ADI-A, N=2800rpm, f=0.1mm/rev, d=4mm, h=12mm)

RMS도 우수한 민감성을 가지는 것으로 판단된다.

절삭회전수의 변화에 따른 프랭크 마멸을 조사하기 위하여 Fig. 3의 절삭조건에서 ADI-A를 이용하여 절삭회전수 N=2800rpm와 N=3800rpm의 변화에 따른 구멍가공수의 증가에 대한 드릴의 프랭크 마멸량을 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서와 같이 N=2800rpm 비하여 N=3800rpm의 경우 절삭속도의 증가에 따른 마찰열의 상승으로 높은 절삭회전수 N=3800rpm의 경우 드릴의 프랭크 마멸이 보다 빨리 진행되는 것을 알 수 있다. 또한 프랭크 마멸과 AE RMS와의 상호관계를 비교 분석하기 위하여 동시에 AE RMS를 조사하여 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 AE RMS레벨은 회전속도에 따라서 그 차이가 있지만, 상호 완전한 경사를 유지하였다. 그러나 N=2800rpm의 경우 n=650에서, N=3800rpm의 경우는 n=950에서 부터 AE RMS값이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 절삭회전수의 차이는 곧 공구인선의 마찰열에 의한 프랭크 마멸 크기의 변화를 가져오게 되며, 따라서 AE RMS 레벨 차이는 프랭크 마멸의 크기로 인한 그 에너지의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 또한 프랭크 마멸이 급격히 증가하더라도

AE RMS 레벨은 프랭크 마멸의 성장과 같은 증가 현상을 보이지 않고 완만한 경사를 유지하였으며, 프랭크 마멸이 일정량 크기 이상으로 성장해야만 급격한 발생원이 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 ADI-A시험편을 이용하여 Fig.3 과 같은 절삭조건에서 점진적인 가공회수의 증가에 따른 프랭크 마멸과 그로 인한 트러스터 및 AE RMS 를 실험을 통하여 비교하였다. 가공수의 증가에 따른 점진적인 프랭크 마멸의 변화에 의하면 가공회수의 초기단계에서는 급격한 프랭크 마멸 현상이 나타났으며, 중기에서는 $V_B = 0.1\text{mm}$ 정도에서 완만한 증가량을 유지되다가 가공회수 830회 부근에서 부터 프랭크 마멸의 급격한 증가 현상을 볼 수 있으며, 결국 n=1160에서 프랭크 마멸 $V_B = 0.3\text{mm}$ 에 달하는 것을 알 수 있다. 가공회수에 따른 절삭저항의 정적성분인 트러스터는 공구 마멸의 성장에도 그 값이 완만하게 증가하였으며, n=1040에서부터 급격한 트러스터의 증가 현상을 보였다. AE RMS의 경우도 트러스터와 같이 프랭크 마멸의 성장에도 불구하고 AE RMS 레벨의 변화는 아주 완만한 값을 유지하다가 n=1040에서 AE RMS의 급격한 증가 현상을 볼 수 있다. 트러스터 및 AE

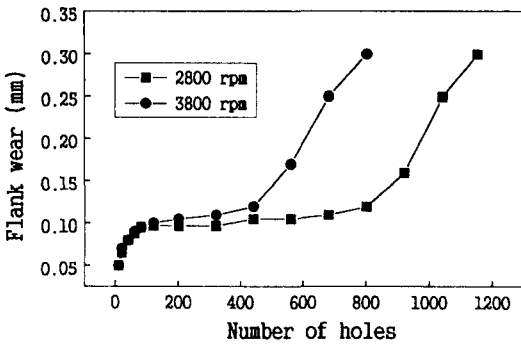


Fig. 7 Variation in flank wear with number of holes on ADI-A

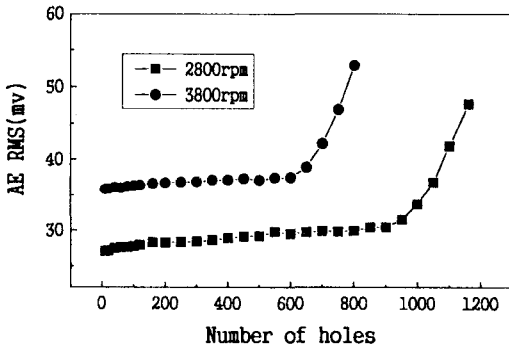


Fig. 8 Relation between AE RMS and number of holes (ADI-A, N=2800rpm, 3800rpm, f=0.1mm/rev, d=4mm, h=12mm)

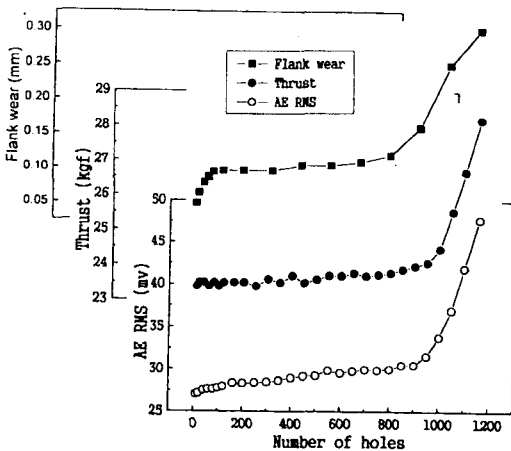


Fig. 9 Comparison of flank wear, thrust and AE RMS (ADI-A, N=2800rpm, f=0.1mm/rev, d=4mm, h=12mm)

RMS 신호는 프랭크 마멸이 일정량 이하인 경우 영향을 크게 미치지 못하나 프랭크 마멸량이 일정 수준 이상으로 성장하게 되면 이들은 우세한 발생원이 형성되는 것을 알 수 있다. 따라서 이와 같이 복합적인 신호에 의하여 보다 신뢰성 있는 공구 수명의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

전술한 바와 같이 프랭크 마멸이 일정량에 달했을 때 급격한 레벨의 증가 현상이 발생하는 것으로 보아 프랭크 마멸과 트러스터 및 AE RMS간에는 상호 임계값이 존재하는 것으로 판단되어 이를 조사하기 위하여 드릴을 임의적으로 V_B 를 0.05mm, 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm, 0.25mm, 0.3mm로 마멸시켜 Fig. 7의 절삭조건에서 트러스터 및 AE RMS 를 조사하여 Fig.10에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 트러스터 와 AE RMS 모두 절삭속도의 차이에 따른 상호 레벨의 차이가 존재함을 알 수 있으나 절삭속도에 상관없이 점진적인 프랭크 마멸의 증가에도 불구하고 그 값은 완만한 경사를 유지하였으며, 프랭크 마멸 $V_B=0.25mm$ 이상의 영역에서 이들 레벨은 급격히 증가하는 현상을 볼 수 있다. 따라서 프랭크 마멸의 증가에 따른 트러스터 및 AE RMS 레벨은 절삭속도에 무관하게 프랭크 마멸이 $V_B=0.25mm$ 이상의 영역에서 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 따라서 이 실험을 통하여 공구의 교환 시기를 $V_B=0.25mm$ 로 보는 것이 타당할 것으로 보이며, 이와 같은 현상을 이용하여 In-process상태에서 유효하게 공구 수명 예측을 위한 좋은 변수로서 적용이 가능하리라 생각된다.

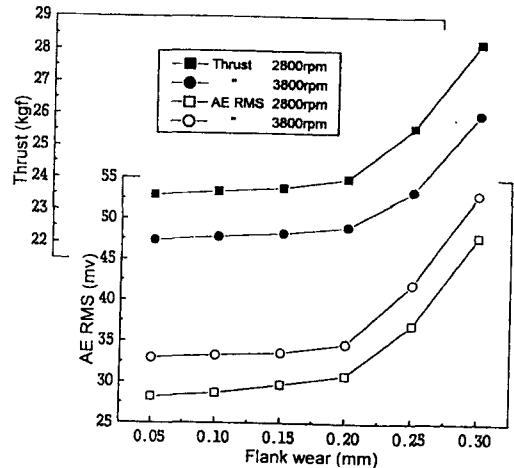


Fig. 10 Comparison of thrust and AE RMS (ADI-A, N=2800rpm, 3800rpm, f=0.1mm/rev, d=4mm, h=12mm)

결 론

자동생산공정에서 절삭가공 시의 이상상태 감시를 목적으로 피삭재의 기계적 성질을 고려한 구상흑연주철의 오스템프링시 온도 변화에 따른 3종류의 ADI (Austempered Ductile Cast Iron) 재를 이용하여 In-process 상태에서 순차적인 드릴가공으로 인한 공구 마멸이 트리스터 및 AE RMS에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ADI재의 드릴 가공 시 프랭크 마멸에 따른 트리스터 및 AE RMS간의 관계를 실험을 통하여 고찰하였으며, 이들 신호를 이용하여 신뢰성 있는 마멸상태 검출이 가능하다.
- 2) ADI재의 경우 프랭크 마멸이 $V_b=0.25\text{mm}$ 에 달할 때 까지는 트리스터 및 AE RMS는 완만한 증가 현상을 보였으며, 그 이상에서는 급격한 증가현상을 나타내었다. 이와 같은 현상을 이용하면 효과적인 공구교환시기의 예측이 가능하다.
- 3) 트리스터 및 AE RMS의 레벨을 In-process 상태에서 감시함으로써 공구 파손의 실시간 검출이 가능하다.

참 고 문 헌

1. Micheletti, G. F., Koenig, W., Victor, H. R., "In-process tool wear sensors for cutting operations," Annals of the CIRP, Vol. 25, No. 2, pp. 483-496, 1976.
2. Iwata, k., and Moriwaki, T., "An application of acoustic emission measurement to in-process sensing of tool wear," Annals of CIRP, Vol. 26, No. 1, pp. 21-26, 1977.
3. Kakino, Y., Chiong, L., and Kobayashi, M., "In-process detection of tool breakage by making use of acoustic emission," Journal of Japan Society of precision Engineering, Vol. 46, No. 3, pp. 344-349, 1980.
4. A. Sampath, S. Vajpayee, "Tool health monitoring using acoustic emission," INT. J. PROD. RES., vol. 25, No. 5, pp. 703-719, 1987.
5. Ichiro Inasaki, Shuhei Aida, Shihichiro Fukuoka, "Monitoring system for cutting tool failure using an acoustic emission sensor," JSME International Journal, vol. 30, No. 261, pp. 523-528, 1987.
6. Rangwala, S.S., Dornfeld, D. A., "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool condition Monitoring," Journal of the Eng. Ind., Vol. 112, pp. 219-228, Aug., 1990.
7. Yoichi Matsumoto, Ngun Tjiang, Bobbie Foote, Yngve Naerheim, "Tool wear monitoring using acoustic emission in the existence of chatter," INT. J. PROD. RES., vol. 28, No. 10, pp. 1861-1869, 1990.
8. J. A. Rice, S. M. Wu, "On the feasibility of catastrophic cutting tool fracture prediction via acoustic emission analysis," Transactions of the ASME, vol.115, pp.390-397, 1993.
9. 藤田武男, 關谷克彦, 北川亮三, 小池節法, 大城桂作, "ADI의 드릴被削性(第1報).熱處理および切削條件の影響," 日本精密工學會秋季學術大會論文集, pp. 361-362, 1993.
10. 小川 誠, 新井 實, 白神哲夫, "ADI의 드릴加工," 日本精密工學會秋季學術大會論文集, pp. 371-372, 1993.
11. 新谷一博, 加藤秀治, 谷外司, "ADI材의切削特性," 鑄物, 第63卷, 6號, pp. 523-527, 1991.
12. 藤田武男, 關谷克彦, 北川亮三, 小池節法, 大城桂作, "ADI의 드릴切削性(第2集), 黑鉛粒數의 影響," 日本精密工學會秋季學術大會論文集, pp. 363-363, 1993.
13. David A. Dornfeld, "In process recognition of cutting states," JAME International Journal, Vol. 37, No. 4, pp. 638-650, 1994.
14. Moriwaki, T., Mori, Y., "Recognition of Cutting State Based on Neural Network Sensor Fusion," JSPE Vol. 59, No. 5, pp. 779-784, 1993.