

음향방출을 이용한 코팅공구의 마멸검출

맹민재*, 정준기**

Wear Detection of Coated Tool Using Acoustic Emission

Min-Jae Maeng*, Joon-Ki Chung**

Abstract

Turning experiments are conducted to investigate characteristics of acoustic emission due to wear of the coated tool. The AE signals are obtained with a sensor attached to tool holder side. Tool states are identified with scanning electron microscopy and optical microscopy. It is demonstrated that the AE signals provide reliable informations about the cutting processes and tool states. Moreover, tool wear can be detected successfully using the AE-RMS.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Coated Tool(코팅공구), Tool Wear(공구마모), Tool Holder(공구홀더)

1. 서 론

선삭 가공중에 공구의 마멸, 칩핑 및 파손 등으로 비정상 절삭상태의 발생을 자동적으로 감지하기 위한 연구는 절삭과정의 자동화, 제품의 고품질화 및 원가절감의 관점에서 볼 때 대단히 중요하다. 음향방출(Acoustic Emission, AE)은 물체의 소성변형 혹은 미소파괴에 의한 에너지의 급속한 방출로부터 발생하는 일종의 탄성파로서 물체의 표면에 AE센서를 장착함으로써 감지할 수 있다. 비파괴 분야에서 널리 이용되고 있는 AE측정법은 다른 방법에 비하여 측정이 비교적 용이하며 반응성이 우수하기 때문

에 공구마멸 및 파손감시에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ Iwata와 Moriwaki⁽¹⁻²⁾는 절삭중 측정된 AE신호와 공구마멸 사이에는 밀접한 상관관계가 있으며, 특히 주파수분석을 통해 공구마멸의 증가와 함께 AE스펙트럼 강도가 증가한다는 내용을 발표하였다. Inasaki⁽⁴⁾등은 전파정류 후에 고주파여파를 거친 AE진폭과 공구의 측면 마멸 및 파손관계를 비교·검토하였다. AE진폭은 절삭조건중 주로 절삭속도에 영향을 받으며, 측면마멸과 정비례 관계가 있다고 보고하였다.

초경공구에 세라믹을 피복 시킨 코팅공구는 우수한 내마멸성, 고속절삭의 가능성 때문에 오늘날 많이 사용되고

* 동서울대학 기계공학부(mjmaeng@dsc.ac.kr)
** 홍익대학교 기계공학과

있다. 코팅공구는 초경공구와는 다른 마멸기구에 의해 마멸이 되므로 코팅공구의 마멸과 AE신호와의 관계에 대해 연구가 진행되고 있다. Chubb와 Billigham⁵⁾에 의하면, 경사면에서의 TiC코팅층 마멸은 경사면에서의 열균열에 의해서 발생되고, TiC코팅의 마멸에 따라 표면에 노출된 WC-Co기질의 마멸은 확산 마멸기구에 의해서 발생된다. 측면마멸은 경사면에서 관찰되는 열균열의 밀도가 현저하게 기계적 마멸기구가 지배한다고 제시하였다. Moriwa-ki⁶⁾등에 의하면 세라믹 코팅공구의 마멸 초기에는 돌발형의 AE-RMS신호를 발생시키며, 경사면마멸이 진행되면서 코팅층이 제거될수록 AE-RMS신호는 돌발형에서 연속형으로 변화한다. 이 실험적 관찰은 코팅층의 재질에 따라 AE신호 형태가 다르게 나타남을 추정할 수 있다. AE신호의 진폭은 절삭조건, 공구와 공작물과의 접촉상태, 측정장비의 민감도에 따라 달라진다. Somasundaram과 Raman⁷⁾에 의하면 AE-RMS신호는 코팅재료, 절삭속도, 이송속도의 영향을 받으며, 고속절삭이나 미소한 이송속도는 코팅재료에 따른 AE-RMS신호의 차이가 미미하다고 보고하였다. 최근 들어 공구수명 향상 및 고속절삭을 위해 코팅공구의 사용이 일반화되고 있다. 그러나 공구마멸에 따른 AE신호에 대한 연구는 주로 비코팅공구를 대상으로 수행되어 왔으며, 코팅공구에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2적층, 3적층 코팅공구를 이용하여 절삭속도 및 코팅재질에 따른 공구수명과 마멸상태를 관찰한다. 코팅공구의 마멸에 따른 하부 코팅층의 표면노출이 AE신호에 미치는 영향을 관찰하고, AE신호의 특징적 변화를 파악하여 선삭 공정중에 공구마멸을 자동으로 감지할 수 있는 방안을 도출하는 것이다.

2. 실험장치의 구성 및 방법

2.1 실험장치 구성

Fig. 1은 선삭 가공중에 AE신호를 검출하기 위해 CNC 선반(Tongil H. I. TSL-6)에 부착한 실험장치의 구성을 보여준다. AE센서(PAC-R15)는 공구홀더의 측면에 설치하였다. 기타 실험장치는 전치증폭기(PAC-1220A), AE신호 처리장치(LOCAN 320-AT), 충전증폭기(Kistler-5019A) 등이다. 절삭공구는 대한중석(주)에서 제조한 2적층코팅인서트 KT200(WC-Co/TiC/Al₂O₃), 3적층코팅인서트 KT150(WC-Co/TiC/Al₂O₃/TiN), 공작물은 일반구조용탄소강(SM45C)을 사용하였다. 공구의 마멸폭은 광학현미경(Mitutoyo-TYP BI-5)으로 측정 및 촬영하였다.

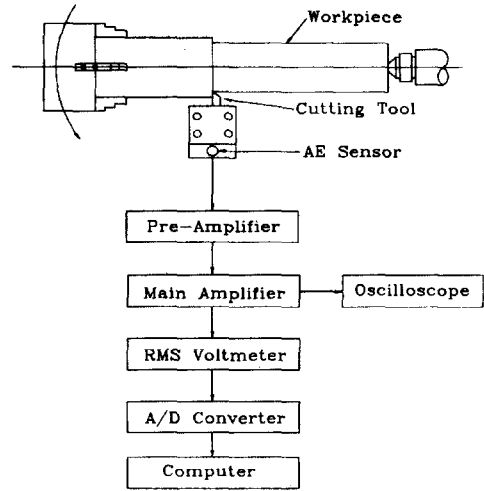


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

2.2 실험방법

실험은 2단계로 수행되었다. 첫 단계에서는 시편을 선반의 척에 설치하고 가능한 진동을 줄이기 위해 십압대로 지지하였다. 센서는 AE발생원에 가깝게 부착하는 것이 바람직하나 칩에 의한 직접적인 영향을 피하기 위하여 공구홀더의 끝에 기계적인 침식을 이용하여 AE신호를 처리하였다. 두 번째 단계에서는 공구의 측면마멸폭, 날끝면마멸폭은 200배 배율로, 경사면마멸폭은 100배의 배율로 공구현미경을 이용하여 측정 및 촬영하고, 각 절삭조건에 대하여 4회의 실험에서 얻은 마멸폭의 평균값을 사용하였다.

Fig. 2는 공구면에 발생하는 거시적 마멸형태를 보여준다. 실험은 6가지의 절삭조건, 즉 절삭속도 V=197, 253,

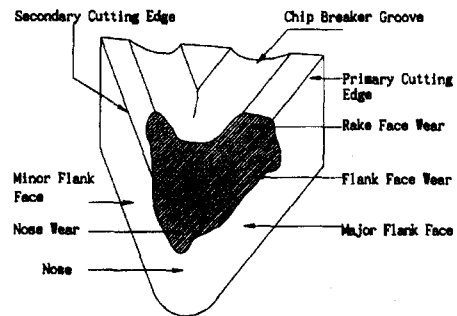


Fig. 2 Typical wear pattern and terminology

317m/min, 이송속도 $f=0.32\text{mm/rev}$, 반경방향 절삭깊이 $d=1.2$ 에 대하여 수행되었다. 코팅공구의 코팅층 구성과 두께, 즉 KT200 : ($\text{Al}_2\text{O}_3(1\mu\text{m})$, $\text{TiC}(5\mu\text{m})$), KT150 : ($\text{TiN}(1\mu\text{m})$, $\text{Al}_2\text{O}_3(4\mu\text{m})$, $\text{TiC}(6\mu\text{m})$)이다.

2.3 신호처리

AE센서에서 검출된 신호는 전치증폭기에서 40dB 증폭하고 주파수 영역 100-300kHz에서 여과한 후 AE신호처리장치에 입력하였다. 입력된 AE신호를 신호처리장치내의 주증폭기에서 20dB 증폭한 후 0.1 μs 간격으로 검출하였다. 검출된 AE신호가 50ms 동안에 경계값(threshold value) 100mV를 통과하는 에너지 양을 검출하여 AE-RMS로 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭속도와 공구마멸과의 관계

Fig. 3은 절삭속도 317m/min일 때 2적층 코팅공구의 측면, 날끝면, 경사면에서의 절삭시간에 따른 마멸폭의 진행과정을 보여준다. 절삭시간 30초 뒤에는 칩브레이커 홈의 끝에서 약간의 마멸폭이 나타나고 측면과 날끝면에서는 Al_2O_3 층의 이탈에 따른 TiC층의 국부적 표면 노출이 관찰된다. 절삭이 진행될수록 마멸폭이 진행되는데 절삭시간 2분 30초 뒤에는 경사면과 칩브레이커 홈의 경계에서 Al_2O_3 층이 제거되고 TiC층이 나타난다. 여유면과 날끝면에서도 Al_2O_3 층이 제거되어 부절삭날에서도 TiC층이 나타나 일정한 마멸폭으로 진행된다. 절삭시간 6분 30초 뒤에 여유면에서는 일정한 마멸폭을 유지하지만 날끝면에서는 빠른 속도로 성장하고 불규칙해진다. 칩브레이커 홈에서도 마멸이 나타나 Al_2O_3 층이 제거된다. 마지막 절삭 단계에서는 부절삭날에서 마멸이 우세하게 나타나고 경사면에서도 마멸폭이 급격히 진행된다. 측면마멸폭에 비해 날끝면마멸폭이 우세하게 일어나고 치핑이 일어나 절삭날이 무디어 진다. 절삭속도 197, 253m/min에서 절삭시간에 따른 공구마멸은 317m/min 절삭조건하에서도 정성적으로 유사한 결과를 얻었으며, 미소한 차이는 마멸 진행속도가 빠르게 나타났다. 절삭속도 317m/min 절삭조건에서 얻은 결과만을 아래에 제시하였다.

Fig. 4는 절삭속도가 317m/min일 때 3적층 코팅공구의 측면, 날끝면, 경사면에서의 절삭시간에 따른 마멸폭의 진행과정을 보여준다. 절삭 초기에는 2적층 코팅공구와 비슷하게 경사면과 칩브레이커 경계에서 마멸이 약간 나타

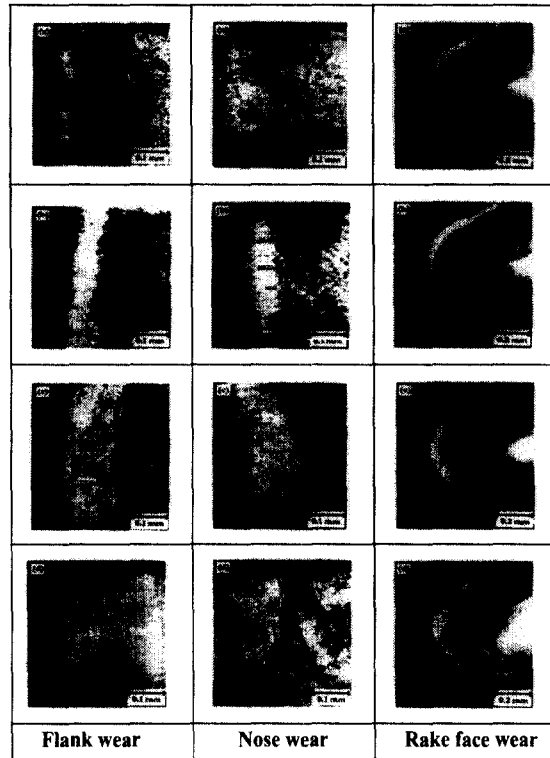


Fig. 3 Tool microscope showing the progression of flank wear, nose wear, and rake face wear at cutting times of 0.5, 2.5, 6.5, and 10.5min in KT200 at V=317m/min

나고, 측면과 날끝면에서는 TiN층의 마멸에 따른 Al_2O_3 층의 표면노출은 발생하지 않는다. 마멸이 진행되어 절삭시간이 3분 45초경의 경사면과 칩브레이커 홈 경계에서 마멸이 우세하게 일어나 TiN층과 Al_2O_3 층이 제거되고 TiC층이 나타나서 경사각이 증가한다. 측면과 날끝면에서 절삭시간 9분 45초경 경사면과 칩브레이커 경계에서 마멸폭이 급증하기 시작한다. 마지막 절삭단계에서는 전체적으로 마멸폭이 급격히 증가하고 절삭날에서 치핑이 많이 나타난다.

Fig. 5는 절삭시간에 따른 2적층 및 3적층 코팅공구의 측면마멸폭 변화를 보여준다. KT200에서 절삭속도 197m/min일 때 초기 마멸단계를 지나 마멸폭이 0.2mm까지는 일정하게 성장하고 그 이후부터 마멸폭이 급증하기 시작한다. 절삭속도 253m/min에서도 비슷한 경향을 나타낸다. 그러나 절삭속도 317m/min의 고속절삭에서는 측면마멸폭이 0.15mm이후부터 급작 마멸단계가 시작된다.

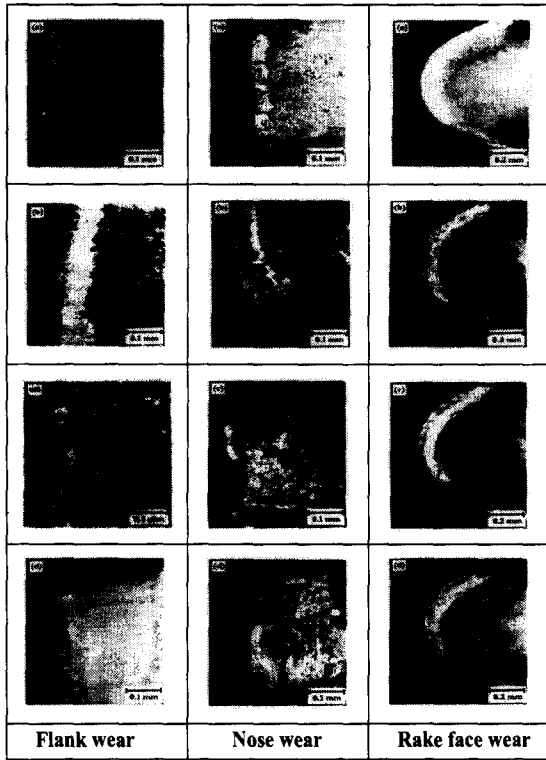


Fig. 4 Tool microscope showing the progression of flank wear, nose wear, and rake face wear at cutting times of 0.75, 3.75, 9.75, and 15.75min in KT150 at V=317m/min

KT150의 경우 절삭속도 317m/min에서는 절삭시간에 따른 측면마멸폭이 초기 마멸단계를 지나 0.25mm까지 일정하게 증가하지만 그 이후부터는 측면마멸폭이 급증함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 절삭시간에 따른 날끝면마멸폭의 변화를 나타낸다. KT200에서는 절삭속도에 대하여 날끝면마멸폭 약 0.15mm까지는 측면마멸폭과 유사한 경향을 나타내고, 그 이후부터는 마멸폭이 비교적 빠르게 진행된다. KT150에서는 날끝면마멸폭 약 0.3mm까지 절삭시간에 따라 일정하게 증가하지만 0.3mm이후부터는 급증하기 시작한다.

Fig. 7은 절삭시간에 따른 경사면마멸폭의 변화를 나타낸다. KT200에서 절삭시간 약 5분까지는 절삭속도에서의 경사면마멸폭이 비슷한 경향으로 증가하고, 그 이후부터 절삭속도 197, 253m/min에서는 경사면마멸폭이 완만하게 증가하지만 절삭속도 317m/min에서는 마멸폭이 급증한다. KT150에서 절삭속도 197m/min일 때 경사면마

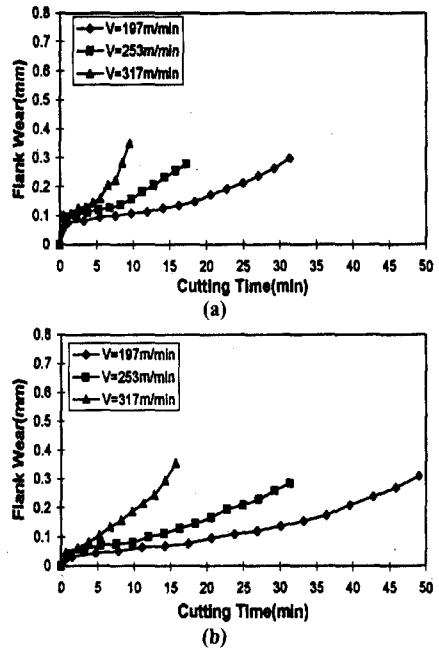


Fig. 5 Variation of flank wear with cutting time in : (a) KT200, and (b) KT150

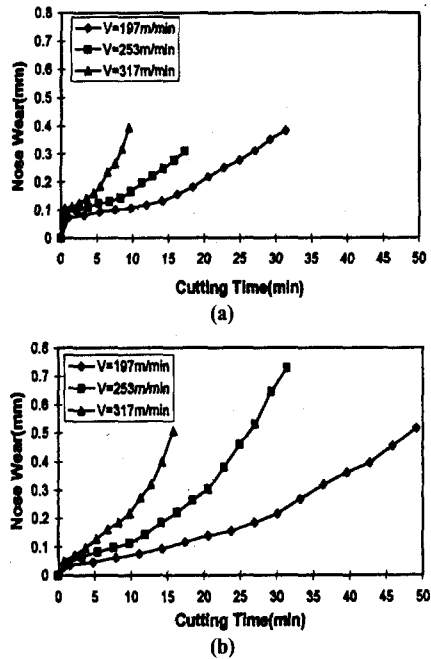
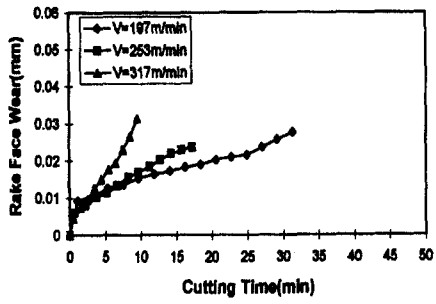
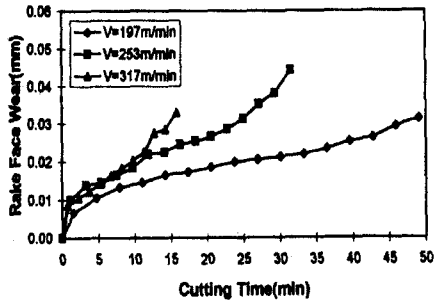


Fig. 6 Variation of nose wear with cutting time in : (a) KT200, and (b) KT150

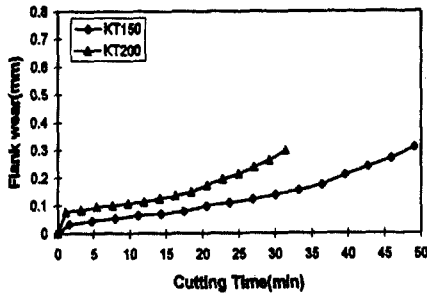


(a)

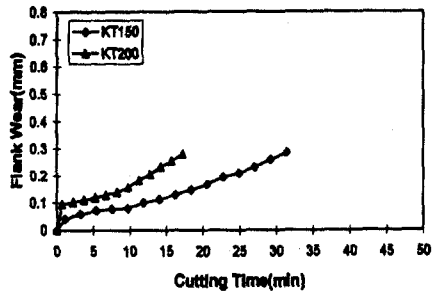


(b)

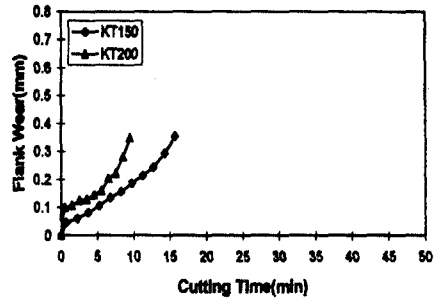
Fig. 7 Variation of rake face wear with cutting time in : (a) KT200, and (b) KT150



(a)

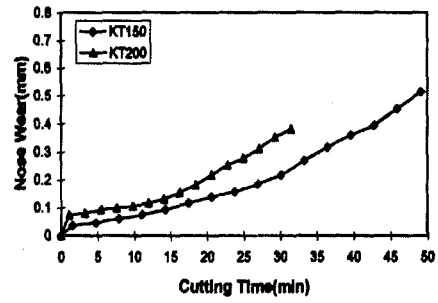


(b)

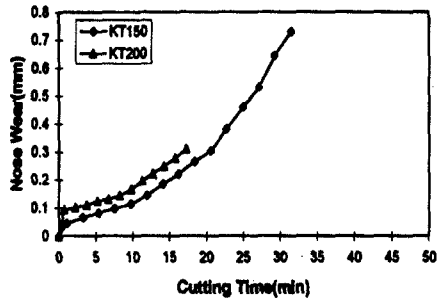


(c)

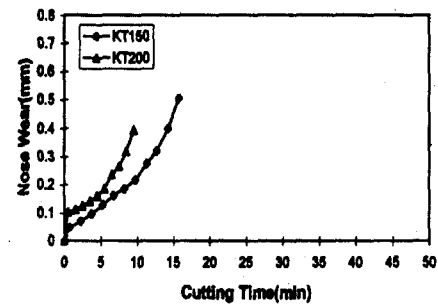
Fig. 8 Variation of flank wear with cutting time at : (a) V=197, (b) 253, and (c) 317m/min



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Variation of nose wear with cutting time at : (a) V=197, (b) 253, and (c) 317m/min

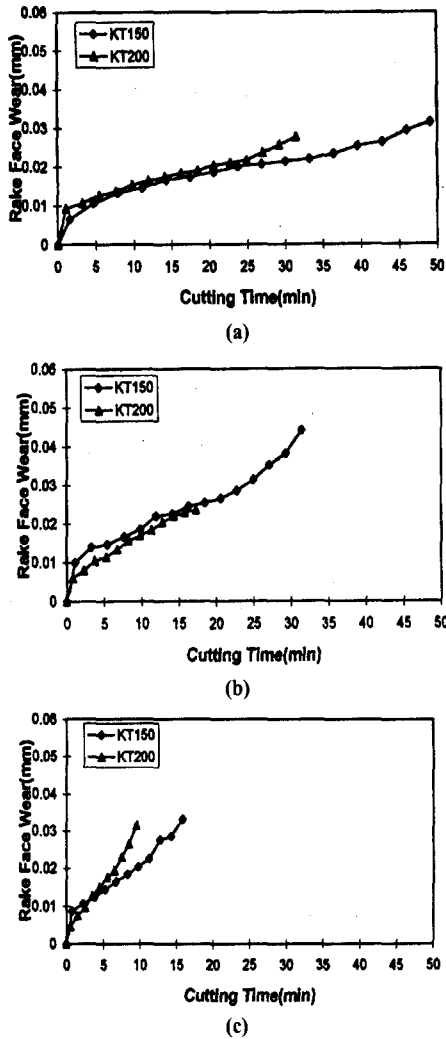


Fig. 10 Variation of rake face wear with cutting time at : (a) V=197, (b) 253, and (c) 317m/min

면마멸의 경우 절삭속도 197m/min에서는 2적층 및 3적층 코팅공구 경사면마멸폭의 증가가 비슷한 크기, 비슷한 형태로 변화하지만, 절삭속도 253, 317m/min에서는 절삭초기에 KT150공구의 경사면마멸폭이 KT200공구의 경사면마멸폭 보다 크게 변화하고, 절삭시간 4분 이후부터 KT200공구는 경사면마멸폭이 더 크게 증가한다.

면마멸의 경우 절삭속도 197m/min에서는 2적층 및 3적층 코팅공구 경사면마멸폭의 증가가 비슷한 크기, 비슷한 형태로 변화하지만, 절삭속도 253, 317m/min에서는 절삭초기에 KT150공구의 경사면마멸폭이 KT200공구의 경사면마멸폭 보다 크게 변화하고, 절삭시간 4분 이후부터 KT200공구는 경사면마멸폭이 더 크게 증가한다.

면마멸의 경우 절삭속도 197m/min에서는 2적층 및 3적층 코팅공구 경사면마멸폭의 증가가 비슷한 크기, 비슷한 형태로 변화하지만, 절삭속도 253, 317m/min에서는 절삭초기에 KT150공구의 경사면마멸폭이 KT200공구의 경사면마멸폭 보다 크게 변화하고, 절삭시간 4분 이후부터 KT200공구는 경사면마멸폭이 더 크게 증가한다.

4.2 절삭속도와 AE-RMS와의 관계

Fig. 11은 절삭속도 197, 253, 317m/min에서 KT200, KT150 코팅공구의 절삭시간에 따른 AE-RMS의 변화를 나타낸다.

Fig. 11(a)에서 절삭속도 197m/min의 경우 0.166V의 초기값에서 절삭시간에 따라서 0.266V까지 거의 일정하게 증가한다. 절삭속도 253m/min의 경우 0.213V의 초기값에서 절삭시간에 따라 약간의 진동을 하면서 0.299V까지 증가한다. 절삭속도 317m/min의 경우 0.259V의 AE-RMS 초기신호에서 0.281V까지 증가하다 경사각의 증가로 인해 0.256V까지 감소한 다음 0.306V까지 급증한다. 절삭속도가 커질수록 AE-RMS의 변화가 심각한 요동을 하면서 증가한다.

Fig. 11(b)에서 절삭속도 197m/min일 때 0.207V에서 시작하여 거칠던 공구표면이 매끄러워지고 TiN층이 약간씩 떨어져 나가 Al₂O₃층이 노출되면서 0.199V에서 안정되고, 절삭시간 10분 후부터는 0.415V까지 서서히 증가하여 최종단계에 도달한다. 절삭속도 253m/min의 경우 초기 AE-RMS는 0.228V에서 시작하여 0.208V까지 감소하여 안정되고, 절삭시간 15분 부터는 0.285V까지 완만하게 증가하다가 미소한 요동을 하면서 최종단계에 도달한다. 절삭속도 317m/min일 때 초기 AE-RMS는 0.262V에서 시작하여 절삭속도 197, 253m/min에서 나타났던 AE-RMS 변화와는 다르게 초기에 급격한 증가를 한다. 경사면과 칩브레이커 홈 사이에서는 심한 마멸에 의해 0.3~0.32V사이로 급격한 요동이 진행되면서 전체적으로 안정되다가 여유면과 날끝면마멸폭의 성장과 더불어 0.38V까지 증가한다. 절삭속도 197, 253m/min일 때 절삭시간에 따른 AE-RMS의 변화와 비교했을 때, 절삭속도 317m/min의 고속절삭에서는 코팅층 재질이 AE-RMS에 미치는 영향은 비교적 적고, 절삭속도에 영향을 받은 경사각의 변화가 AE-RMS에 가장 크게 작용을 한다. KT200, KT150 코팅공구의 초기 AE-RMS신호, 즉 절삭속도 V=197m/min일 때 AE-RMS 초기신호의 차이는 3적층 코팅공구가 0.041V로 크다가 절삭속도 253m/min

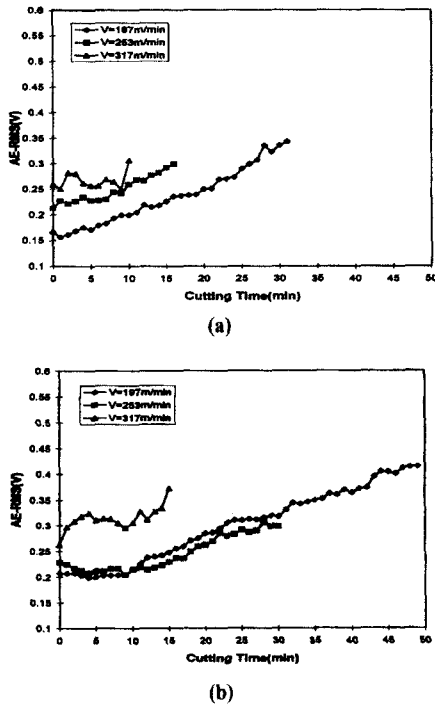


Fig. 11 Variation of AE-RMS signals with cutting time in :
(a) KT200, and (b) KT150

에서는 0.015V로 작아지고 절삭속도 317m/min에서는 0.004V로 차이가 거의 없어진다. 이 결과는 TiN층이 Al_2O_3 층보다 강력한 AE신호를 발생시키며, 코팅재질의 차이에 의한 AE-RMS의 차이는 절삭속도가 증가할수록 작아진다.

4. 결론

본 연구에서는 2적층 코팅공구인 KT200과 3적층 코팅공구인 KT150의 코팅층 재질 차이를 이용하여 197, 253, 317m/min 절삭속도에서 선삭실험을 수행하여 공구 마멸 및 AE-RMS신호의 변화를 비교·분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 절삭시간에 따라 마멸폭을 측정된 결과 초기, 균일 속도, 급작 마멸단계로 구분할 수 있고, 절삭속도 $V=197m/min$ 에서는 균일속도 마멸단계가 가장 길며 절삭속도가 증가할수록 균일속도 마멸단계가 감

소한다. 측면폭마멸, 날끝면마멸폭은 절삭속도에 비례했으나 2적층 코팅공구의 경사면마멸은 $V=197, 253m/min$ 에서 비슷한 형태로 진행되었고 $V=317m/min$ 에서 비교적 급증한다.

- (2) 3적층 코팅공구의 경사면마멸폭은 절삭속도 $V=197m/min$ 에서 절삭시간에 따라 마멸폭이 균일하지만, $V=253, 317m/min$ 에서는 절삭시간에 따라 마멸폭이 불규칙하다. 각각 절삭속도에 따라 KT200, KT150 공구의 측면폭마멸, 날끝면마멸은 일정한 차이를 유지하며 마멸이 진행되지만, 절삭초기의 경사면마멸은 절삭속도가 증가할수록 3적층 코팅공구의 마멸이 우세하게 일어나고, 그 이후부터는 2적층 코팅공구의 경사면마멸이 급증한다. 결과적으로 TiN층은 절삭속도가 증가할수록 상대적으로 내마멸성이 감소하여 경사면에서 마멸이 가장 우세하게 일어난다.
- (3) 절삭속도에 대하여 3적층 코팅공구의 측면폭마멸, 날끝면마멸은 2적층 코팅공구보다 0.05mm정도 후에 급작마멸이 시작되고, 경사면마멸은 2적층 코팅공구에 비해 0.005mm정도 늦게 급작 마멸단계가 시작된다.
- (4) KT200, KT150공구의 AE-RMS값을 절삭시간에 따라 측정된 결과 절삭속도 $V=197, 253m/min$ 에서는 비교적 선형적으로 증가하지만 $V=317m/min$ 에서는 절삭초기에 0.04~0.05V정도 증가하다가 칩브레이커 홈과 경사면 경계에서 마멸이 우세하게 일어나 초기 AE-RMS값 정도로 감소하고, 절삭 마지막 단계에서는 모든 면에서 마멸이 급격히 일어나기 때문에 AE-RMS값이 0.3~0.37V정도로 증가하여 절삭가공을 계속하기 불가능한 단계가 된다.
- (5) 2적층, 3적층 코팅공구의 초기 AE-RMS값은 절삭속도가 증가할수록 코팅층 재질이 AE-RMS값에 미치는 영향은 감소한다.
- (6) 코팅공구는 공구수명 최종 단계에서 AE-RMS신호의 특성적 변화를 이용하면 공구마멸을 효과적으로 검출할 수 있다.

참고 문헌

- (1) Iwata, K., and Moriwaki, T., "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear", Annals of the CIRP, Vol.

- 26, No. 1, pp. 21~26, 1977.
- (2) Moriwaki, T., "Detection for Cutting Tool Fracture by Acoustic Emission Measurement", *Annals of the CIRP*, Vol. 29, No. 1, pp. 35~40, 1980.
 - (3) Inasaki, I., Aida, S., and Fukuoka, S., "Monitoring System for Cutting Tool Failure Using an Acoustic Emission Sensor", *JSME*, Vol. 53, pp. 523~528, 1987.
 - (4) Inasaki, I., Kojima, K., and Miyake, R., "Monitoring of Turning Process with Acoustic Emission Signals", *JSME*, Vol. 52, No. 474 pp. 289~292, 1986.
 - (5) Chubb, J. P., and Billingham, J., "Coated Cutting Tools of Wear Mechanisms in High Speed Machining", *Transactions of the ASME*, Vol. 61, pp. 283~293, 1980.
 - (6) Moriwaki, T., and Tobito, M., "A New Approach to Automatic Detection of Life of Coated Tool Based on Acoustic Emission Measurement", *ASME*, Vol. 112, No. 3, pp. 212~218, 1990.
 - (7) Somasundaram, S., and Raman, S., "Acoustic Emission Studies while Machining with Coated Tools", *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 21, pp. 83~94, 1993.
 - (8) 이승일, 맹민재, 정준기, "엔드밀 변위에 의한 공구 파손검출", *한국공작기계학회*, Vol. 8, No. 2, pp. 100~107, 1999.