

고속태핑에서 AE센서를 이용한 소구경 탭의 파손감시의 가능성 연구

이돈진[#], 김선호^{*}, 안중환^{**}

Feasibility Study on Monitoring of Small-Diameter Tap Breakage with AE Sensor in High-Speed Tapping

Don Jin Lee[#], Sun Ho Kim^{*}, Jung Hwan Ahn^{**}

ABSTRACT

This paper deals with the possibility of tap breakage detection by AE sensor. AE signals in the tapping were not seldom generated in low speed but reflected the tapping process exactly in high speed. Using AE raw signals sampled in 500kHz, AE RMS and AE count rate was computed in software. When the converting time of AE RMS is less than 10ms, we could distinguish between normal cutting and tap breakage. And AE count rate was more exact when the converting time is greater than 1ms. When two methods were compared to each other, AE count rate was more accurate.

Key Words : Breakage Monitoring(파손감시), AE Sensor(AE 센서), High-Speed Tapping(고속 태핑)

1. 서론

태핑 작업은 탭을 사용하여 나사를 가공하는 공정으로서 가장 좋은 나사를 가공하는 것이 태핑의 목적이며 기계가공 중에서 어려운 가공의 하나이다. 태핑 작업은 대부분의 경우 절삭 공정 중 가장 마지막으로 이루어지며 태핑시 작업조건의 불량이나 칩 배출이 원활하지 못할 경우, 드릴링과 태핑 가공 축의 불일치 등의 이유에 의해 탭의 파손이나 가공된 나사의 확대, 축소 또는 뭉그러지는 트러블이 발생하게 된다. 그 중에서도 가공 중 탭이 파손되면 제품 자체를 못 쓰게 되며, 이후의 가공에서 탭 파손의 검출이 되지 않을 경우 시간 및 비용 면

에서 많은 손실을 초래하게 된다. 최근 눈부시게 발전하고 있는 IT 산업의 핵심 제품인 노트북 컴퓨터, HDD, 휴대폰, PDA 등에서는 3mm이하의 소구경의 태핑 작업을 많이 필요로 한다. 예를 들면, 3.5" HDD의 경우 약 20개 정도의 M3 나사의 태핑작업을 필요로 한다. 또한 IT제품의 경우 절대적인 생산량이 많기 때문에 생산성을 향상시키기 위한 고속화가 필수적이다. 이러한 요구를 반영하여 최근 10,000rpm까지 태핑 작업이 가능한 고속 태핑머신이 개발되었다.¹ 그러나 이런 고속화와 소구경 탭의 사용은 가공 중 탭의 파손확률을 급격하게 높게 된다. 따라서 가공 중에 일어나는 탭의 파손을 검출하는 일은 생산성의 향상에 있어서 가장 중요한

접수일: 2003년 3월 29일; 게재승인일: 2003년 7월 11일

[#] 교신저자: 부산대학교 지능기계공학과

E-mail: djlee6@pusan.ac.kr, Tel: (051) 510-3087

^{*} 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

^{**} 부산대학교 기계공학부

핵심기술 중의 하나로 반드시 해결되어야 하는 과제이다.

일반적으로 공구 파손을 검출하기 위한 방법은 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 대별된다. 직접적인 방법은 터치 프루브(Touch probe)나 와이어(Wire)에 의해 직접적으로 탭의 파손유무를 확인하는 방법으로 온라인상에서의 측정이 어려운 등의 문제점을 가지고 있다. 간접적인 방법으로는 AE센서, 전류센서, 진동센서, 동력계등과 같은 여러 가지 센서를 사용하여 가공 중에 일어나는 다양한 신호의 급격한 변화를 이용하는 방법들이다^{2,4}. 이러한 방법들은 선삭이나, 밀링 및 드릴링 등에서 다양한 연구자들에 의해 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 태핑은 밀링이나 선삭과 같은 일반적인 다른 가공 방법들에 비하여 상대적으로 복잡한 절삭구조를 가지기 때문에 탭의 상태를 모니터링하는 연구는 그다지 이루어지지 않았다. Yamaoka⁵는 내부센서(전류센서)를 사용하여 M4정도의 탭까지 모니터링할 수 있음을 보여 주었고, 이 돈진⁶ 등은 탭 상태모니터링하기 위하여 마찰력을 고려한 태핑 토크를 모델링하였다. 또, Y. B. Chen⁷ 등은 공구 동력계를 사용하여 태핑 프로세서를 진단하고자 하였다.

본 연구에서는 소구경 탭의 고속태핑에서 AE센서가 탭 파손 검출에 적용할 수 있는지를 알아보기 위하여 고속태핑머신에서 M3탭으로 AI7075를 대상으로 실험하고 그 가능성을 평가하였다.

2. AE에 대한 이론적 고찰

AE란 고체재료의 변형이나 파괴에 의한 탄성에너지의 급격한 방출의 결과로 나타나는 탄성응력파이며 신호의 주파수는 통상적으로 100kHz-1MHz의 초음파영역이다. 일반적인 AE의 발생원인은 재료 내의 국부적인 과도한 불안정성이라고 볼 수 있으며 물질계는 국부적으로 불안정한 조건하에 있으며 전체가 불안정한 상태로 되기 전에 에너지가 가장 낮은 상태로 진행하려고 하기 때문에 여러 가지 국부적인 동적운동을 초래하며 따라서 재료내부 구조가 변화되어 소성변형을 일으킨다. AE는 전파되는 경로에 구조상의 결함이 있으면 산란되고 진행경로를 따라서 매질의 변화에 의한 굴절과 경계면에서의 다중반사등에 의하여 상당한 변형을 일으킨다.

이런 모든 요소들은 파의 진폭약화, 상의 변화, 굴절 및 반사 등을 통하여 원 파형을 상당히 변화시키므로 마지막 파형은 무질서하게 나타나게 되므로 파의 발생원에 대한 확인은 어려운 과제이다. AE는 트랜스듀서(Transducer)에 의해 전기적인 신호로 변환될 수 있다. 트랜스듀서에 의해 얻어진 AE신호는 몇 가지 방법에 의해 해석될 수 있다. AE count율은 단위시간당 기준치를 넘는 신호의 개수를 말하며 보통 기준치는 잡음정도에 의해 정해지므로 이에 따라 AE count율도 달라진다. AE RMS(Root Mean Square)법은 측정된 전기신호를 에너지로 환산한 것을 말하며 연속형 AE를 발생시키는 금속절삭에 관한 해석에 있어서 가장 적당한 방법이다. 수학적으로 RMS는 어떤 주기에 대하여 신호의 제곱평균의 제곱근이며 다음의 식으로 표시된다.

$$AE_{RMS} = \left[\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} V(t)^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

이외에, 측정된 AE의 최고전압을 의미하는 AE의 진폭, AE 근원의 강도와는 관계없이 개수와 관계되는 AE event율, 그리고 AE 신호 속에 포함된 고유한 진동수 성분을 분석하는 AE 진동수 분포법 등이 있다^{3,4}.

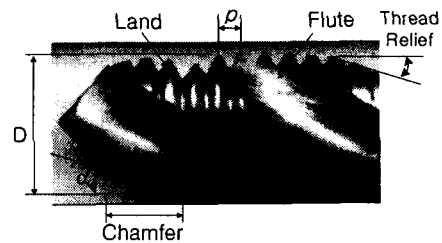


Fig. 1 Photograph of a spiral tap

3. 태핑의 절삭기구

탭에 의한 암나사의 절삭은 칙퍼부의 나선모양으로 늘어선 불완전 산의 절삭날에 의해 이루어지며 각 절삭날은 탭의 회전과 함께 소정의 절입량씩 분담하여 절삭을 하고 칙퍼부 전체에서 완전한 나선산을 형성한다. 완전나사부는 원칙적으로 절삭을 하지 않고 이미 완성된 나선산과 어울려서 탭 자신

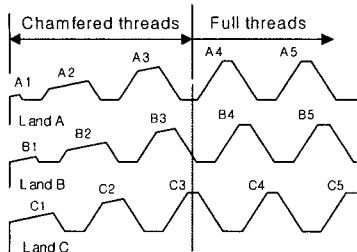


Fig. 2 Cross-sections of threads along each land

을 안내하는 역할을 한다. Fig. 1은 3개의 플루트와 랜드를 가지는 고속태핑용 동기형 스파이럴 탭의 형상을 보여주고 p 와 D 는 각각 나사피치와 직경을 나타낸다. Fig. 2는 각 랜드별로 연속된 절삭날의 단면을 보여준다. 나사 절삭 과정을 살펴보기 위해 편의상 첫 번째 날의 절삭높이가 가장 작은 랜드(Land)로부터 차례로 A, B, C라 하면, $A_1-B_1-C_1-A_2-\dots-A_n-B_n-C_n$ 순으로 절삭이 이루어지며 플루트를 통해 칩이 배출된다. 그리고 Land A의 첫 번째 날인 A_1 날은 직접적인 절삭이 일어나지 않고 나사내기 구멍에 대한 안내 역할을 하게 되고 챔퍼부 마지막 날인 B_3 의 절삭날이 가공을 끝내게 되면 C_3 날부터는 완전한 나사산이 형성된다. 완전나사부에서는 챔퍼부에서 절삭된 완전 나사산의 나사에 들어가서, 안내 날이 되면서 나사 가공을 마무리한다. Fig. 3은 이런 절삭과정을 바탕으로 M3 탭에 대한 개략적인 절삭토크의 시뮬레이션을 보여준다⁵. 챔퍼부 구간에서는 각 절삭날이 절삭에 들어갈 때마다 단계적으로 절삭토크가 상승하고 완전나사부가 절삭에 들어가기 시작하면 마찰에 의한 영향으로 절삭토크가 완만하게 증가함을 볼 수 있다. 후방가공에서는 이미 절삭된 나사를 빠져나오기 때문에 절삭은 일어나지 않고 마찰에 의한 토크만 발생함을 알 수 있다.⁶

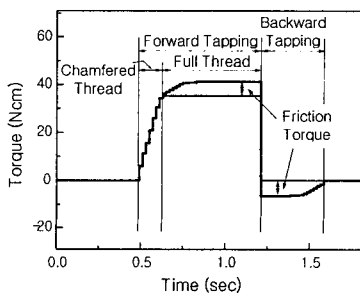


Fig. 3 Simulated tapping torque

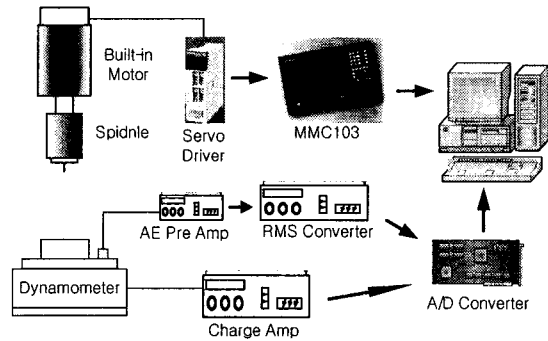


Fig. 4 Experimental setup

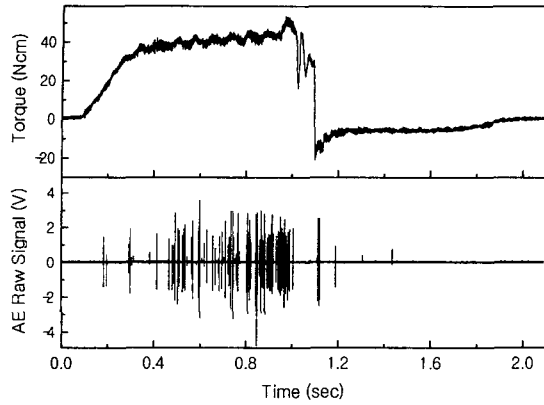
4. 실험 및 실험결과

4.1 실험장치

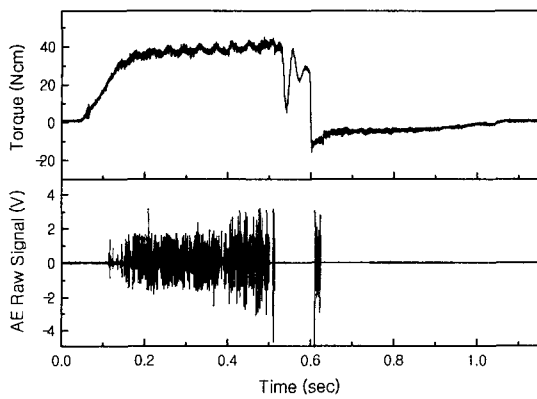
고속태핑에서 AE센서가 탭 파손검출에 적용될 수 있는지를 알아보기 위해 A17075를 대상으로 M3 동기형 스파이럴 탭(HS-AL-SFT)을 사용하여 최대 30,000rpm까지 회전가능하며, 10,000rpm까지 태핑이 가능한 동기형 빌트인(built-in) 스피들 모터와 개방형 NC 제어기인 Siemens사의 840D를 채용한 고속 태핑머신에서 실험하였다.¹ Fig. 4는 실험장치의 셋업을 보여준다. 태핑토크는 베드위에 설치된 공구동력계(Kistler-9272)를 통해 측정되었다. AE 센서는 실제적인 작업환경을 고려하여 시편을 고정하는 바이스에 설치하였다. 프리앰프와 RMS변환기를 거친 AE 신호와 공구동력계의 절삭토크 신호는 A/D변환기를 통해 측정하였고 동시에 MMC103의 서보트레이스(Servo Trace)기능을 사용하여 스피들과 Z축의 현재 위치와 속도를 구하였다. 실험에 사용된 AE센서는 125kHz-750kHz의 대역폭을 가지는 Nano30모델을 사용하였다.

4.2 AE 원신호 특성

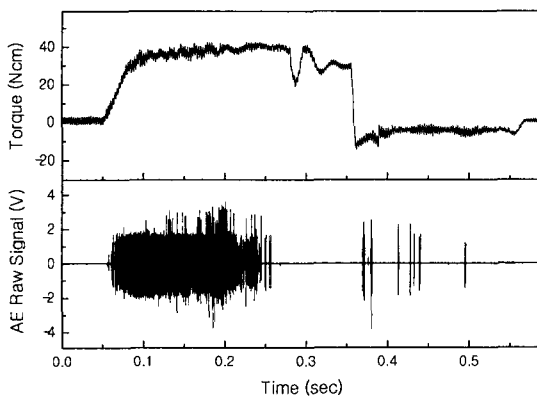
AE센서가 고속태핑에서 어떤 신호특성을 보이는지를 알아보기 위해 태핑속도를 1000rpm에서 8000rpm까지 변경시키면서 절삭하고 500kHz로 AE 원신호를 획득하였다. Nano30의 대역이 125kHz에서 750kHz이므로 정확한 샘플링을 위해서는 1.5MHz 이상의 고속으로 샘플링해야 하지만, 일반적으로 절삭신호는 500kHz이하에 존재하기 때문에 나이퀴스트 주파수에 의해 1MHz정도로 샘플링할 필요가 있다. 그러나 실험에서 미리 1MHz와 500kHz로 샘플



(a) 1000rpm



(b) 2000rpm



(c) 6000rpm

Fig. 5 AE raw signals at various tapping speed

링한 신호를 서로 비교한 결과 큰 차이를 보이지 않았기 때문에 실용적인 데이터 처리를 위하여 500kHz로 샘플링 하였다. Fig. 5는 각각 1000, 2000,

6000rpm의 속도로 태핑한 경우의 토크신호와 AE 원신호를 나타낸다. 먼저, Fig. 5(a)의 1000rpm의 경우 챔퍼부와 완전나사부에 걸쳐서 약간의 돌발 신호를 제외하고는 AE 신호가 거의 없음을 알 수 있다. 후방가공부에서는 절삭기구에서 언급했듯이 이미 생성된 나사산을 그대로 빠져나오기 때문에 절삭은 거의 일어나지 않으므로 칩의 절단에 의해 발생하는 것으로 예측되는 돌발신호를 제외하고는 거의 신호가 없다는 것을 알 수 있다. 2000rpm의 Fig. 5(b)를 보면 Fig. 5(a)와는 달리 챔퍼부에서는 AE 신호가 거의 없으나 완전나사부에서는 어느 정도 AE 신호가 나오는 것을 볼 수 있으며, 후방가공에서는 1000rpm의 경우와 같이 칩 절단에 의한 AE 신호가 발생하는 것을 볼 수 있다. 6000rpm의 Fig. 5(c)를 보면 완전나사부뿐만 아니라 챔퍼부에서도 AE 신호가 잘 나오는 것을 볼 수 있으며 후방가공에서도 약간의 돌발성 AE가 발생하고 있는데 이는 고속절삭으로 인한 칩의 절단이나 마찰로 인하여 발생된다고 생각된다. 이런 결과로 볼 때 AE 센서는 저속보다는 고속에서 절삭과정을 더 잘 반영하는 것으로 생각된다.

4.3 탭 파손과 AE 원신호의 특성

먼저, 탭의 파손이 일어날 경우 AE 신호가 어떻게 나타나는 지를 알아보기 위해서 인위적으로 탭 파손이 일어나기 위한 조건을 만들었다. 일반적으로 밀링의 경우 절삭 깊이나 피드레이트(Feedrate)를 조정함으로써 공구에 걸리는 절삭력을 증가시키거나 인위적으로 공구에 손상을 줌으로써 공구파손이 쉽게 일어나도록 한다. 그러나 태핑의 경우는 사용되는 공구가 정해지는 경우 절삭과정에 변동을 줄 수 있는 요소는 태핑속도 외에는 존재하지 않는다. 그러나 태핑속도를 변경하여도 Fig. 5의 각 경우에서 알 수 있듯이 절삭력은 거의 변하지 않기 때문에 탭의 파손을 일으킬 수는 없다. 태핑은 스피들이 1회전 할 때마다 Z축이 1피치만큼 추종함으로써 나사가 생성되고, 이 때 발생하는 Z축과 스피들 간의 추종오차를 동기오차라 한다. 전방가공에서는 날이 생성되면서 진행하기 때문에 동기오차가 증가하여도 절삭력이 과도하게 증가하지 않지만 후방가공에서는 이미 만들어진 나사를 빠져나오기 때문에 동기오차가 있으면 탭의 모든 날에 절삭력이 걸리게 되므로 탭 전체적으로 절삭력이 과도하게 증가하게 된다. 그래서 본 연구에서는 태핑의

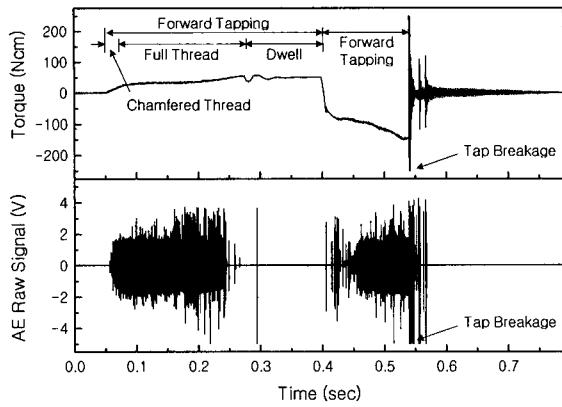


Fig. 6 AE raw signal at tap breakage

동기오차에 가장 큰 영향을 미치는 Z축 서보계의 피드포워드게인을 조정함으로써 동기오차를 증가시키고 결과적으로 탭 파손에 이르르게 하였다. Fig. 6은 Z축의 피드포워드 게인을 1.00에서 0.94로 변경한 후 6000rpm으로 태핑한 경우의 절삭토크와 AE 원신호를 나타낸다. 전방 가공의 경우에는 Fig. 5의 경우와 비교하였을 때 완전나사부의 후반부에

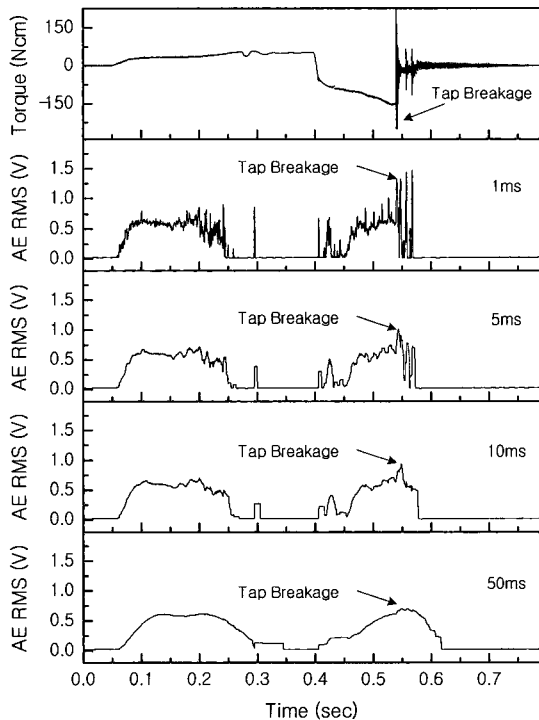


Fig. 7 AE RMS at various converting time

서 약간의 토크증가를 제외하고는 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 후방가공에서는 동기오차로 인해 탭이 빠져나오는 순간부터 절삭력이 급격하게 커진 후 점차적으로 증가하다가 파손에 이르게 되는 것을 알 수 있다. AE 원신호를 보면 탭 파손이 일어나기 전에는 신호레벨이 약 $\pm 3.5V$ 정도에 머무르고 있으나 파손이 발생한 경우 (-) 방향으로 포화가 됨을 알 수 있다. AE신호를 이용한 공구파손을 검출하는 다른 연구들에 의하면 공구의 파손이 일어날 경우 AE의 평균레벨이 높아지기도 하고 파손되는 순간에는 AE의 진폭이 크게 상승한다고 알려져 있으며, 태핑역시 비슷한 양상을 보인다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 측정된 AE 원신호로부터 AE RMS와 AE count율을 이용하여 탭 파손의 검출이 가능한지를 확인하고자 하였다.

4.4 AE RMS를 이용한 탭 파손의 검출

Fig. 7은 탭 파손이 일어난 경우의 절삭토크 신호와 AE 원신호를 500kHz로 샘플링한 후 소프트웨어적으로 RMS를 구한 결과를 보여준다. 가장 위쪽의 그래프는 절삭토크를 나타내고 아래쪽의 그래프는 각각 RMS 변환주기가 1ms, 5ms, 10ms, 50ms인 경우를 나타낸다. Fig. 6의 AE 원신호를 보면 탭 파손에 의해 발생된 AE의 포화된 신호의 지속시간이 너무 짧기 때문에 RMS 변환주기가 50ms인 경우 정상적인 가공이 일어난 경우와 파손이 일어난 경우를 거의 구분할 수 없음을 알 수 있다. 10ms와 5ms에서는 어느 정도 구분을 할 수 있지만 실용적으로 사용할 수 있는 정도는 아닌 것으로 생각된다. 그러나 1ms에서는 정상적인 절삭과 파손으로 인한 신호의 레벨이 두 배 정도로 크게 차이가 나기 때문에 이를 이용하면 파손의 검출이 가능할 것으로 생각된다. 그러나 일반적으로 RMS 변환주기를 1ms이하로 하게 될 경우 노이즈에 의한 영향 또한 크게 나타나기 때문에 이를 처리하기 위한 별도의 신호처리 기법이 요구된다.

4.5 AE Count율을 이용한 탭 파손의 검출

Fig. 8은 RMS의 경우와 동일한 신호를 이용하여 정상가공 신호와 파손신호를 구분할 수 있는 쓰레스홀드(Threshold)값을 결정하고 이 값보다 큰 신호를 대상으로 일정한 시간동안 신호의 개수를 카운트한 경우를 나타낸다. 쓰레스홀드 값은 반복실험에 의한 결과 Fig. 6에서와 같이 정상 절삭의 경

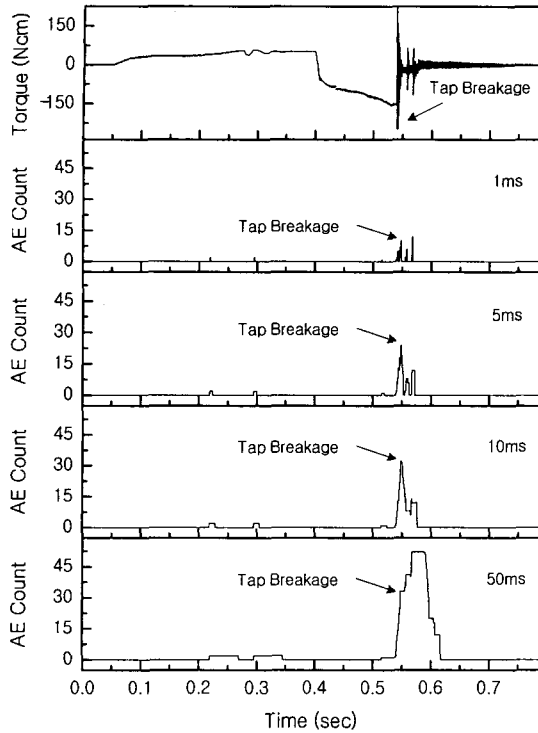


Fig. 8 AE count rate at various converting time

우 AE원신호의 레벨은 약 1.8V이고, 칩의 절단이나 노이즈 등에 의한 신호는 약 3.5V, 그리고 파손이 일어난 경우에는 5V로 포화가 일어났기 때문에 노이즈에 의한 영향을 제거하기 위해 4.5V로 하였다. Fig. 8에서 1ms동안 계산한 경우를 보면 어느 정도 정상적인 가공의 경우와 구분이 가능하지만 정상적인 가공의 경우와 파손이 일어난 경우의 신호의 개수차가 그리 크지 않기 때문에 정확한 구분은 힘들 것으로 생각된다. 그러나 5ms이상의 경우에는 정상적인 가공과 확연한 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 소구경 탭의 고속태핑에서 AE 센서가 탭 파손의 실시간 검출에 적용가능성을 알아보기 위해 고속태핑머신에서 M3탭을 대상으로 절삭실험을 수행하였다. 태핑 시에 발생하는 AE 원신호를 분석한 결과 저속보다는 고속에서 AE가 유용함을 알았다. 탭 파손 시에 발생하는 AE 원신호를 500kHz로 샘플링한 데이터를 사용하여 소프트

웨어적으로 AE RMS와 AE count율을 구한 결과 정상가공과 탭이 파손된 경우를 정확하게 구분할 수 있었다. 그러므로 AE 센서는 고속 태핑에서 소구경 탭의 파손의 검출에 적용가능 할 것으로 생각된다. 그러나 AE 신호를 500kHz이상으로 샘플링하고 신호처리하기 위해서는 고속의 DSP 신호처리 기술이 요구되므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Kim, S. H., Kim, D. H., Kim, S. M., Lee, D. J., Lee, S. K., Ahn, J. H., Lee, S. G., "Development and Evaluation of Ultra High-Speed Tapping Machine," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 11, pp. 221-227, 2002.
2. Kim, H. Y., Ahn, J. H., "Study on Prediction of Drill Breakage Using Spindle and Z-Axis Motor Currents," J. of the KSPE, Vol. 16, No. 7, pp. 101-108, 1999.
3. Kang, M. S., Choi, S. J., Park, H., "A Study on the Investigation of AE During Orthogonal Metal Cutting," KSME, Vol. 10, No. 6, pp. 906-915, 1986.
4. Youn, J. W., Yang, M. Y., Park, H. Y., "A Study on Detection of Cutting Tool Fracture by Dual Signal Measurements," KSME, Vol. 16, No. 4, pp. 707-722, 1992.
5. Yoshinori Yamaoka, Yoshiaki Kanino, Yasuhiko Suzuki, Akimitsu Nagae, Toshiyuki Muraki, "High Speed, High Productive Tapping by Intelligent Machine Tools(1st Report)," JSPE, Vol. 66, No. 12, pp. 1922-1926, 2000.
6. Lee, D. J., Kang, J. W., Jeon, H. B., Kim, S. H., Ahn, J. H., "Modeling of High-speed Tapping Torque Considering Friction Force," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 11, pp. 67-73, 2001.
7. Choi, M. S., Song, J. B., "On Tap Geometry and Characteristics of Torque in High Speed Tapping," J. of the KSPE, Vol. 13, No. 8, pp. 139-145, 1996.
8. Chen, Y. B., Sha, J. L., Wu, S. M., "Diagnosis of the Tapping Process by Information Measure and Probability Voting Approach," J. of Eng. Ind., Vol. 112, No. 11, pp. 319-325, 1990.