

정면밀링 가공시 발생하는 공구파손 검출에 관한 실험적 연구

서 재 형,* 김 성 일,** 김 태 영***

An Experimental Study on the Tool Failure Detection in the Machining by Face Milling

Jae-Hyung Seo,* Seong-Il Kim,** Tae-Young Kim***

ABSTRACT

This experimental study is mainly investigated on the mean cutting forces and AE(acoustic emission) parameters in order to detect and estimate the tool failure in the machining of SUS 304 by face milling. Mean cutting forces and AE parameters can detect the tool failure in face milling. Effective detection parameters are AE RMS, AE energy, AE count, AE duration, and z-direction mean cutting force. From the analysis of cutting tool failure detection, the tool failure of face milling is caused by sudden increasing of the cutting force.

Key Words : Tool Failure, AE(acoustic emission), Mean Cutting Force

1. 서 론

공작물이 회전하고 공구가 이송되는 선삭과는 달리 정면밀링에 있어서 공구의 마모 및 파손을 검출하고 제어하는 데는 공구회전과 다인공구라는 제약이 따르게 된다. 정면밀링의 경우 절삭인 절입(cutting edge entrance)시의 충격과 이탈(cutting edge exit)시의 급격한 에너지의 해방으로 인해 공구마모 및 파손이 돌발적으로 발생하고 이러한 공구의 돌발적인 파손은 공작기계 주축의 강성과 가공된 재료의 거칠기에 심각한 영향을 미치게 된다.

절삭공구의 파손에 관한 연구들을 살펴보면 N.H.

Cook⁽¹⁾은 공구파손이 돌발적이고 매우 급격하며 시간독립(Time independent) 특성을 나타내는 것을 지적하였고, J. Tlustý⁽²⁾는 짧은 시간 동안에 절삭력의 증가와 누적된 칩핑(chipping)으로 인해 파손(breakage)이 발생한다고 하였으며, M.S.Lan⁽³⁾ 등은 공구의 파손시 AE RMS의 증감을 통해 파손여부를 민감하게 감지할 수 있고 파손시는 상당한 돌발형(burst) AE 신호가 생성되며, 공구의 기하학적인 형상에 따라 공구파손시 절삭력의 수준이 변동되는 특성을 이용하여 파손을 검출하였다. 또한 I. Inasaki⁽⁴⁾ 등은 여유면 마모(flank wear)와 AE 신호 진폭(signal amplitude)의 관계를 규명하였고, 공구파손과 칩핑시 AE 신호의 증가를 확

* POSCO 기술연구소 시스템연구팀

** 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

*** 전북대학교 정밀기계공학과(정회원)

인하였다. T.Blum⁵⁾등은 AE RMS 값이 모든 AE인자의 거동을 함축적으로 표현할 수 있다고 생각하였으며 실험을 통해 여유면 마모와 AE 모우드의 관계 등을 규명하였다.

따라서 본 연구에서는 이제까지 선삭에 국한되어 연구되어 온 공구파손의 거동을 정면 밀링에서 고찰하고자 하였으며, 특히 오스테나이트계 스테인레스강인 SUS 304의 정면밀링 가공시 발생하는 공구의 파손을 신뢰성 있게 검출할 수 있음을 제시하고, 정면밀링시 측정되어진 공구마모 및 파손, 시편의 표면거칠기와 검출된 절삭력 성분, AE를 연계하여 제시된 검출인자가 공구파손의 고찰에 있어 신뢰성 있는 평가방법임을 밝히고자 하는 것이다.

2. 이론적 고찰

2.1 공구의 마모 및 파손

밀링공구의 손상에는 마모, 치핑, 파손, 열균열, 피로균열 등이 있으며 정면밀링에 있어서의 마모는 선삭과 거의 동일하나 단속절삭인 특성으로 인해 공구는 항상 가열과 냉각을 반복하기 때문에 온도 의존성이 높은 크레이터 마모(crater wear)의 발생은 적은 편이다. 밀링공구에 있어서 여유면 마모의 거동은 매우 복잡적이며 미소입자의 탈락에 따른 마모와, 공작물과의 용착과 분리의 반복에 의한 미소 치핑, 충격에 의한 손상등이 동시에 작용하여 여유면 마모를 발생시킨다.

2.2 정면밀링시의 절삭력과 AE

정면밀링은 절삭기구상 단속절삭이고 시간의 변화에 대해 절삭력의 거동을 기록하면 주기적인 유형이 나타난다. 단인절삭(fly cutting)의 경우에 있어서도 절삭시간에 대한 절삭력의 거동은 주기적 증감을 보이며 0 값을 중심으로 절삭력 신호들이 교번적으로 나타나게 된다. 선삭과 달리 정면밀링에서는 공구의 마모 및 파손의 여부에 따라 절삭력의 진폭이 크게 변하므로 절삭력의 거동을 특징지을 수 있는 절삭력 파라미터가 필요하다. 또한 단인절삭에서 비 절삭시간의 절삭력 성분들이 0 값을 가지게 되므로 실절삭행정(real cutting process)에 대응하는 절삭력 파라미터가 필요하다. 정면밀링시 공구파손과 더불어 절삭력이 크게 변화하게 되므로 이때 절삭력들의 평균값을 고찰하면 절삭력의 거동을 평가할 수 있다.

AE는 재료가 외부의 자극(external stimulus)에 종속되었을 때 재료에 의해 생성되는 음향파(acoustic wave)로 정의할 수 있고 평형상태로 복귀하려는 재료 자체의 노력에 의한 동적인 과정(dynamic process)에 의해 생성되어지는 것으로 인식된다.⁶⁾ AE는 다양한 기구에 의해 발생되며 여러 형태로 나타나게 되므로 이러한 AE의 성질을 특성화하기 위하여 AE RMS, count rate, duration, 신호진폭(signal amplitude), 신호에너지(signal energy), 신호상승시간(signal rised time) 등의 AE 파라미터들을 사용한다. Fig. 1은 AE 신호의 유형과 관련 파라미터의 형태를 나타내고 있다. AE RMS는 AE신호의 제곱평균의 제곱근 형태로 표현되며, 임의의 전기회로에 AC전압이 가해졌을 때 에너지의 분산을 DC전압이 가해졌을 때의 에너지의 분산과 같은 전압으로 변환한 것이다. AE count는 AE의 발생을 나타내는 하나의 지시척도로서 gain과 threshold의 값에 좌우되어 진다. AE duration은 돌발형 AE 신호를 감지 가능한 시간의 길이로서 정의되어지며 신호의 감지방법과 프리앰프 잡음 레벨(preamplifier noise level)에 의해 좌우되어진다.

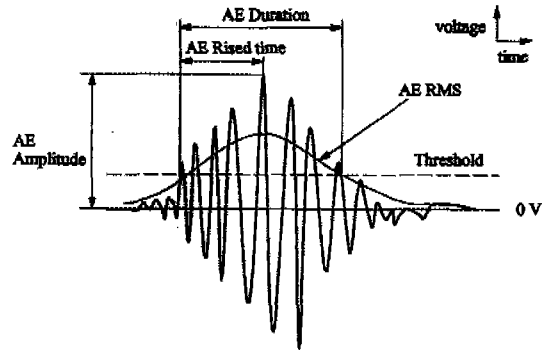


Fig. 1 The AE signal parameters

2.3 절삭가공시 공구파손의 검출

절삭가공시 공구의 파손 및 마모를 검출하는 방법으로는 절삭력 신호와 AE신호를 동시에 획득하여 신호들의 증감을 통해 공구의 마모 및 파손을 검출하는 연구가 진행되어 왔다.

E.N.Diei⁷⁾는 밀링 인서트에 임의의 홈(slot)을 가공하여 공구의 파손을 유도하기 위한 실험에서 절삭력과 AE RMS의 관계를 규명하였으며, 이중신호(dual

signal)로 마모 및 파손의 검출이 신뢰성 있는 검출기 법임을 제시하였다. M. S. Lan⁽⁹⁾은 선삭공구의 파손을 유도하고자 임의의 홈을 가공하고 절삭실험을 수행하여 절삭력과 RMS AE 신호, 공구파손의 경향을 연계하여 공구파손시 RMS AE 신호의 증가와 비절삭작용(non-cutting action)으로 인한 절삭력 레벨들의 증가 및 감소를 설명하였다.

정면밀링은 평면을 가공하기 때문에 선삭과는 달리 공구파손시 절삭력 레벨들이 파손과 동시에 급격히 감소하는 양상을 보이게 된다. 절삭력 성분들의 감소 원인은 공구파손으로 인해 절삭인의 일부가 탈락되어 가공을 위한 본래 물림깊이를 상실하는 비절삭작용이 발생되기 때문이며 AE 파라미터들 역시 급격한 공구파손으로 인한 충격과 에너지 해방으로 인해 증가하거나 분산되는 양상을 보이게 되므로 이러한 특성을 이용하여 공구파손을 검출한다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

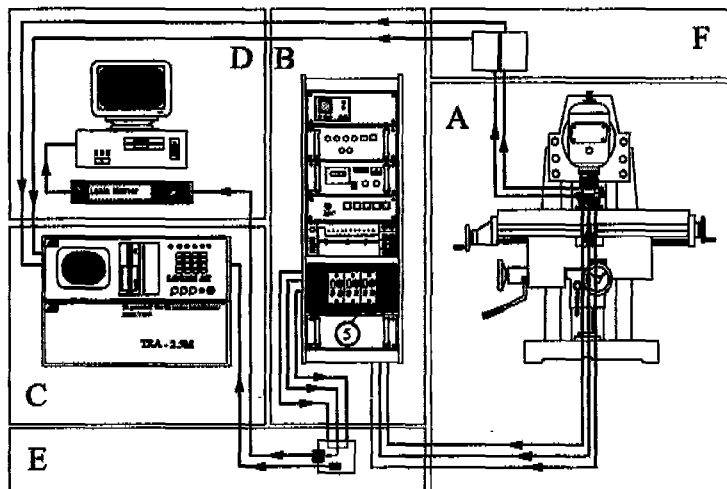
본 연구에서 사용한 절삭가공 재료는 오스테나이트계 스테인레스강인 SUS 304로서 절삭실험을 위하여 초기

에 150×55×10¹ mm의 규격으로 가공하였다. 인서트 는 P25등급의 SPKN 1203 EDTR로서 방전가공을 수행하여 공구면의 특정위치에 홈을 가공하였다.

사용한 정면밀링머신(face milling machine)은 주축의 회전수를 9단으로 변환할 수 있고 공작물의 이송 속도를 12단으로 변환할 수 있는 만능밀링머신(universal milling machine)이며, 정면밀링커터(face milling cutter)로는 대한중석의 M115SP04R-12를 사용하였다. 절삭력의 측정장치로는 공구동력계(KISTLER 9257A), 공구동력계에서 나온 절삭력 신호를 증폭하기 위한 charge amplifier(KISTLER 5001), 절삭력 데이터의 저장 및 분석을 위한 IBM-PC 486이 사용되었다.

AE 신호를 획득하고 분석하기 위한 AE 측정장비로서 LOCAN-AT를 사용하였으며 LOCAN AT자체의 threshold는 55 dB, gain은 30 dB로 정하였다. AE 센서(sensor)로는 공진형 광대역 센서를 사용하였고 100~300 kHz의 밴드패스필터(band pass filter)를 가지는 프리앰프를 사용하였다. Fig. 2에 절삭실험을 위한 실험장치의 세부적인 배치상태를 나타내었고 획득된 신호들의 처리과정을 보이고 있다.

Table 1에 실험을 위한 절삭조건을 나타내었으며,



A: Cutting Part B: Amplifying Part C: LOCAN-AT Part
 D: Cutting Force Acquisition Part E: Signal Terminal Part
 F: Pre-Amplifier

Fig. 2 The arrangement of cutting experiment apparatus

Table 1 The calculated maximum feed rate by the combination of feed speed and RPM

| RPM \ FEED | 370 | 715 | 1400 |
|--------------|-------|-------|-------|
| 41 mm/min | 0.111 | 0.057 | 0.029 |
| 87 mm/min | 0.235 | 0.122 | 0.062 |
| 187 mm/min | 0.505 | 0.262 | 0.133 |
| depth of cut | 0.3 | 0.4 | 0.5 |

절삭조건은 3개의 RPM과 3개의 feed speed에서 비례적인 관계를 갖도록 정하였고, 3개의 물림깊이를 사용하여 27개의 절삭면적 (feed speed×물림깊이)을 구성하였다. Table 내의 값들은 feed rate(mm/rev)를 나타낸다.

3.2 실험방법

절삭실험을 수행하기 위하여 정면밀링머신의 테이블 위에 공구동력계를 설치하고 SUS 304시편을 고정한 후 고진공그리스(high vacuum grease)를 도포한 채널-1(1st channel) AE 센서를 SUS 304시편에 부착하고 지그를 이용하여 시편에 고정하며 채널-2(2nd channel) AE 센서를 공구동력계위에 부착하였다.

절삭실험은 표면거칠기 해석과 절삭력 신호의 효율적인 획득 및 해석을 위해 단인절삭을 수행하였다. Fig. 3은 실험을 위한 SUS 304시편의 체결과 단인절삭의 형태를 나타낸다.

한번의 절삭실험 후 절삭력의 급변과 AE 신호의 변화부분을 고찰하고 만일 급격한 절삭력의 감소와 AE 신호들의 변화부분이 발견되었다면 공구의 파손이 발생하였다고 판단한다.

한번의 절삭실험이 종료될 때마다 인서트의 마모 및

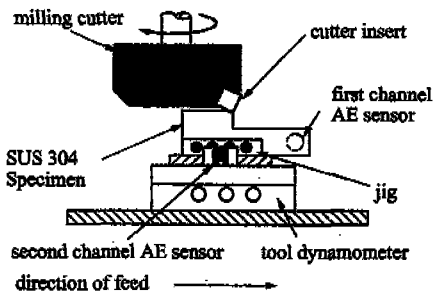


Fig. 3 Fly cutting and specimen clamping

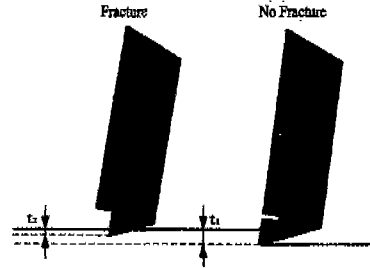


Fig. 4 Non-Cutting Action

파손정도를 윤곽투영기(profile projector)를 사용하여 측정하였고, 표면거칠기는 절삭 시작점에서부터 피드방향으로 각각 10mm, 40mm, 65mm 떨어진 위치의 피삭재폭 중앙부를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 정면밀링 인서트의 바절삭작용의 거동을 나타내고 있다. t_1 으로 설정되었던 물림깊이가 공구파손으로 인해 절삭인의 일부가 떨어져 나감으로 해서 t_2 로 변화하는 것을 나타낸다.

Fig. 5는 절삭조건이 RPM 715, feed speed 85 mm/min, 물림깊이 0.5 mm인 경우 공구 파손시의 z 방향 절삭력 성분의 거동을 나타낸다. 공구파손 이전까지 일정한 수준을 유지하던 절삭력은 파손과 함께 급격히 감소한다. 이것은 인서트 상에 가공한 홈부위가 파

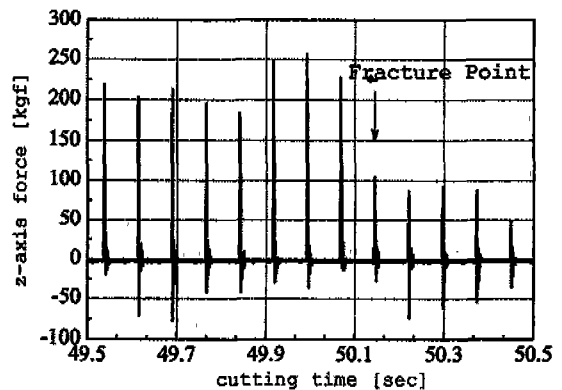


Fig. 5 The decrease of cutting force in the case of tool fracture (RPM=715, feed speed=87 mm/min, $a_p=0.5$ mm)

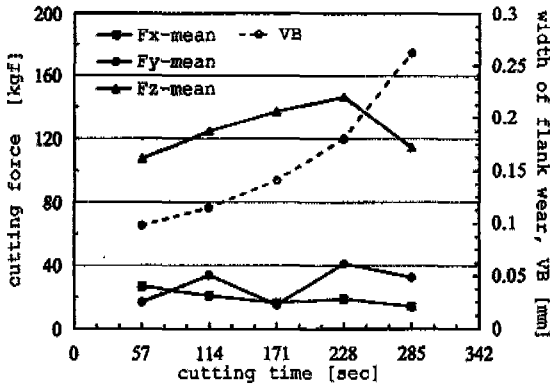


Fig. 6 The relation between cutting force and width of flank wear(RPM=370, feed speed 87 = mm/min, $a_p=0.3$ mm)

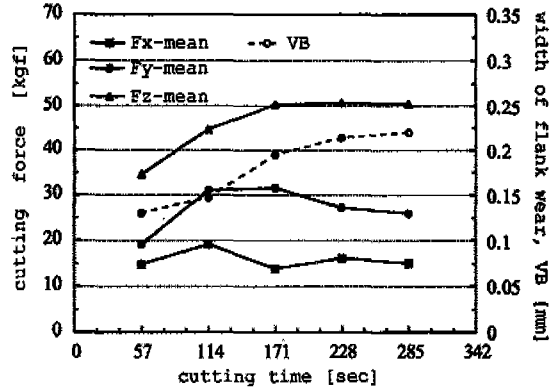


Fig. 8 The relation between cutting force and width of flank wear(RPM = 715, feed speed = 87 mm/min, $a_p=0.5$ mm)

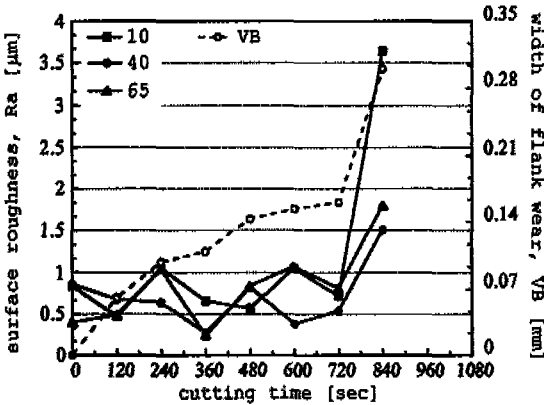


Fig. 7 The relation between surface roughness and width of flank wear(RPM = 370, feed speed = 41mm/min, $a_p=0.3$ mm)

손과 동시에 탈락되어 물림깊이가 변화되는 비절삭작용이 발생하기 때문이며 전체 절삭력 값들에 대한 급격한 절삭력 감소부의 영향을 평균값으로 고찰하면 공구파손의 거동을 평가할 수 있다.

Fig. 6은 절삭조건이 RPM 370, feed speed 87 mm/min, 물림깊이 0.3mm 인 경우 절삭시간에 대한 평균절삭력 성분들과 여유면 마모의 거동을 나타낸다. 공구는 228~285초 사이에서 파손되고, 여유면이 파손되면 평균절삭력들이 감소하는 거동을 보여준다.

Fig. 7은 절삭조건이 RPM 370, feed speed 41 mm/min, 물림깊이 0.3 mm, feed rate 0.111 mm/rev에서 측정위치별 표면거칠기(Ra)와 여유면 마모의 관계를

나타내고 있다. 공구의 파손이전까지 비교적 일정하였던 거칠기의 경향이 파손과 더불어 급격히 증가하는 것을 보여준다. 이러한 거칠기 증가의 원인은 홈 부위가 손상된 후 새로 생성되어진 불규칙한 인선이 가공재료를 절삭하기 때문이다.

앞의 Fig. 5, 6, 7의 경우, 공구파손을 평가하기 위해 도입되었던 평균절삭력들은 정면밀링에 있어서 절삭과정의 초기와 절삭가공중에 발생하는 공구파손을 효율적으로 평가할 수 있다. 그러나 Fig. 8과 같이 절삭종료시에 공구가 파손되어 절삭력이 감소하는 경우, 파손시의 절삭력의 감소는 전체 절삭력성분에 거의 영향을 미치지 않으므로 공구파손을 거시적으로 평가할 수 있는 검출인자의 도입이 필요한데 AE는 절삭종료시의 공구파손 뿐만 아니라 전체 절삭과정에 있어서 공구의 상태를 평가할 수 있는 검출인자를 제공한다. Fig. 8은 절삭력으로 공구파손을 검출할 수 없는 경우이며, Fig. 9, 10, 11, 12는 Fig. 8에서 절삭력으로 공구파손을 검출하지 못할 때 AE 인자로 공구파손을 검출할 수 있다는 것을 보여주는 그림이다.

Fig. 8은 절삭조건이 RPM 715, feed speed 87 mm/min, 물림깊이 0.5mm인 경우에 절삭시간에 대한 평균절삭력 성분들과 여유면 마모의 거동을 나타낸다. 공구파손은 228초에서 285초 사이에서 발생하였고, 이때의 공구파손은 여유면 마모 및 절삭력 성분들이 규칙적인 증가를 하는 도중에 공구가 파손되는 경우이며 평균절삭력성분으로 파손을 검출할 수 없는 경우를 나타낸 것이다. 공구의 마모가 증가할수록 AE와 AE

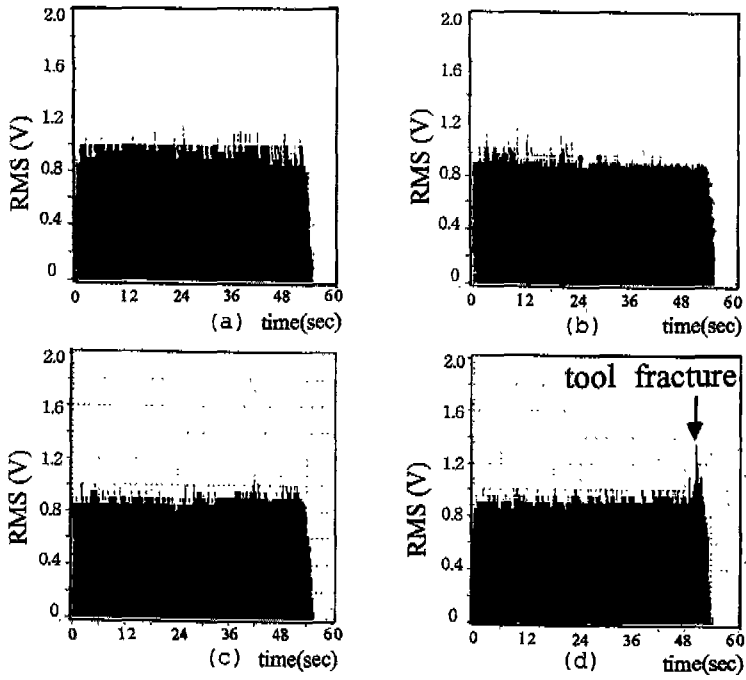


Fig. 9 The tendency of AE RMS variation (RPM = 715, feed speed = 87 mm/min, $a_p = 0.5$ mm)

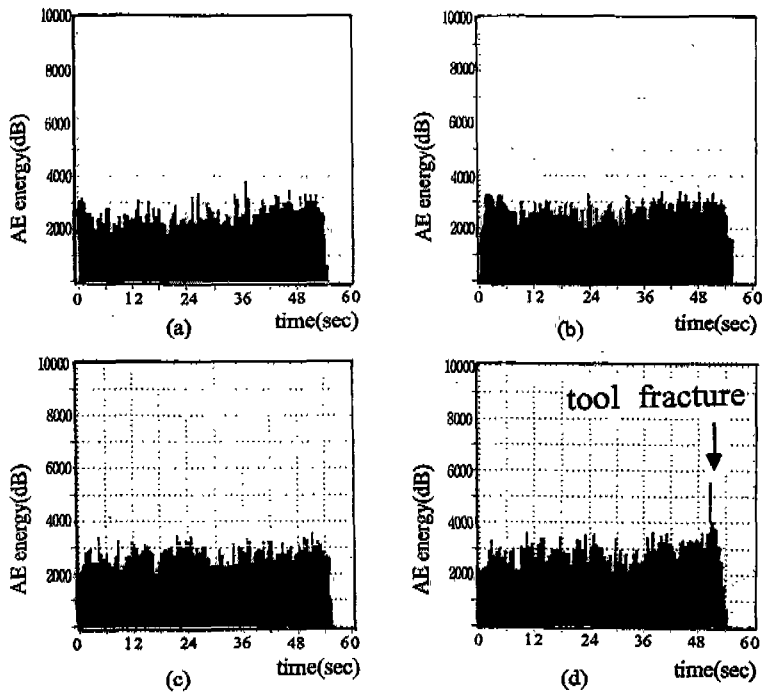


Fig. 10 The tendency of AE energy variation (RPM = 715, feed speed = 87 mm/min, $a_p = 0.5$ mm)

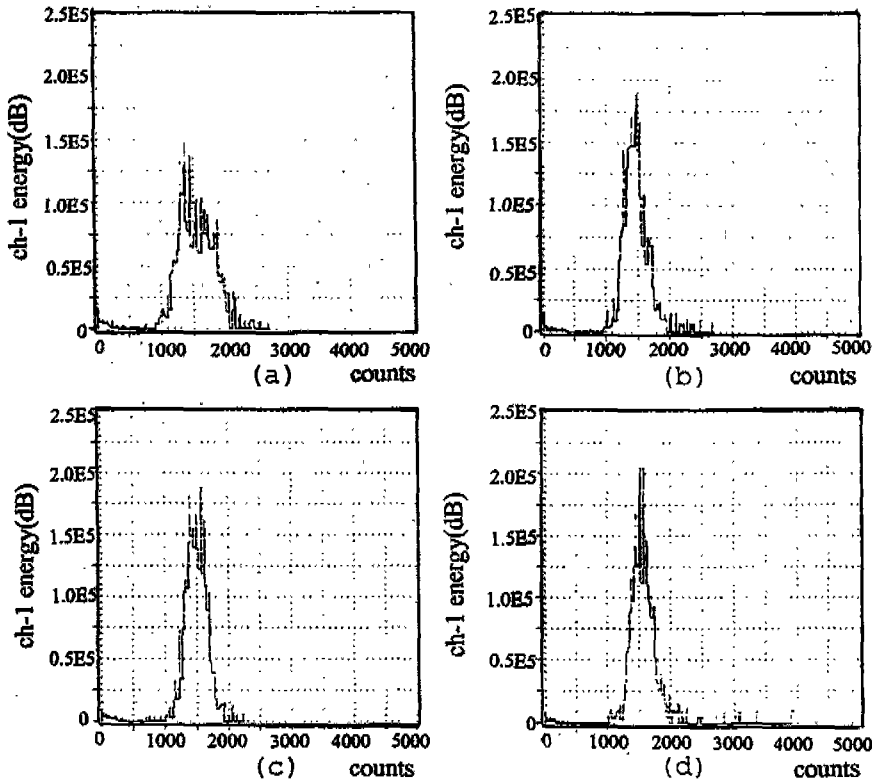


Fig. 11 The tendency of AE count variation (RPM = 715, feed speed = 87 mm/min, $a_p = 0.5$ mm)

파라미터들의 거동을 일정한 증가양상을 나타내는 반면, 공구파손시는 급격한 에너지의 해방과 절삭과정에 가해지는 충격으로 인해 AE의 발생률에 있어서 공구파손이전의 일정 수준을 초과하는 돌발형 AE신호가 발생하게 된다.

Fig. 8의 실험에서 평균절삭력성분으로 공구파손을 검출할 수 없는 경우, AE RMS, AE 에너지, energy vs. count, duration 등으로는 검출할 수 있다. Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12(여기서 (a), (b), (c), (d)는 시편의 길이가 80mm이고 57초/1회 동안 5회 절삭한 실험의 결과중 (a)번 그림은 1회 절삭한 그림이며 (b)는 2회 절삭 (c)는 3회 절삭 (d)는 5회 절삭한 결과의 그림)는 절삭조건이 RPM 715, feed speed 87 mm/min, 물림깊이 0.5 mm, feedrate 0.122 mm/rev인 조건에서 공구파손시 AE RMS, AE 에너지, energy vs. count, duration의 변화를 나타낸다.

Fig. 9에서 1회 절삭한 (a), 2회 절삭한 (b), 3회 절삭한 (c)의 RMS 값이 약 0.9 V 정도를 유지하다가 공

구파손시(5회 절삭한 (d))에 약 1.4 V까지 급격히 증가함을 보여준다. Fig. 10의 AE 에너지의 경우도 공구파손 이전(Fig. 10의 (a), (b), (c))까지 4000 dB이하였던 AE 에너지의 값이 공구파손시(d) 약 5500 dB까지 증가한 것을 보여준다. Fig. 11의 count에 대한 채널-1의 에너지는 공구파손 이전 ((a), (b), (c))보다 공구파손시(d) 에너지의 값이 증가하고, count는 약 4000까지 확장되며 Fig. 12의 AE duration의 경우 공구파손 이전 ((a), (b), (c))에 12000 μ s이하를 유지하였던 AE duration은 공구파손시(d) 약 17000 μ s까지 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 절삭력 성분과 AE인자들이 조합을 통해 보다 신뢰성 있는 공구파손의 검출이 가능하다.

3개의 물림깊이에 대한 9개의 feed 조건들을 조합하여 27개의 최대절삭면적을 구성하고 최대절삭면적에 대하여 표면거칠기와 평균절삭력 성분의 거동을 고찰하여 공구파손의 거동을 특징지을 수 있다.

Fig. 13은 최대절삭면적에 대한 표면거칠기들의 평

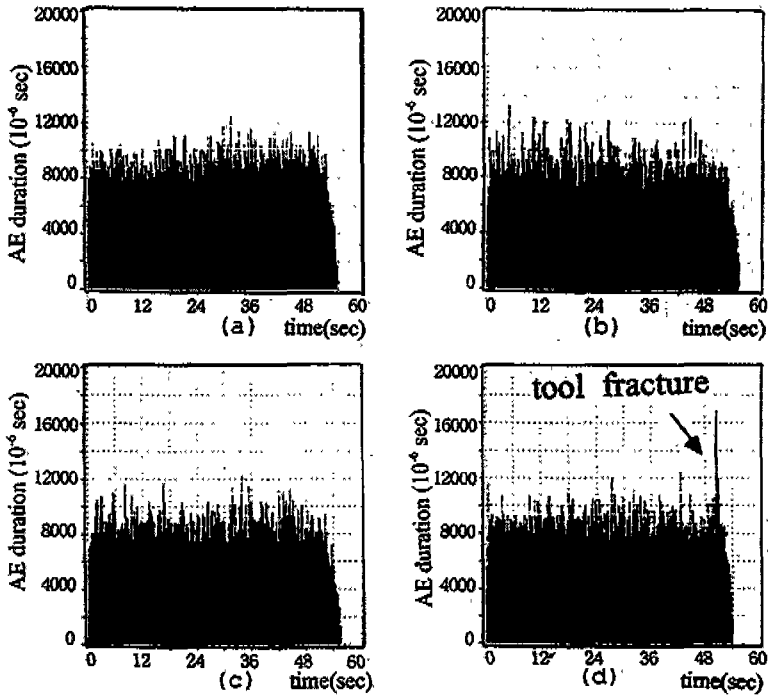


Fig. 12 The tendency of AE duration variation (RPM = 715, feed speed = 87 mm/min, $a_p = 0.5$ mm)

균값과의 관계를 나타내며 Fig. 14는 z 방향 평균절삭력의 평균값에 대한 최대절삭면적과의 관계를 나타낸다. Fig. 13의 경우 최대절삭면적이 0.05 mm^2 이하에서는 표면거칠기가 매우 불규칙한 양상으로 분포하는 것을 관찰할 수 있는데 이것은 0.05 mm^2 이하에서 인서트의 파손 및 치핑, 초기 공구인선 마모현상의 발생이 밀집되어 있기 때문이다. 인서트의 손상이 0.05 mm^2 이하

에 밀집되어 있는 것은 z 방향의 평균절삭력을 통해 설명할 수 있다. 그림에서 10, 45, 60은 표면거칠기의 측정위치를 나타낸다. Fig. 14의 경우 0.05 mm^2 이하에서 평균절삭력이 급증하는 경향을 나타내며 이러한 절삭력의 급격한 증가로 인해 공구의 손상이 촉진된 것으로 판단된다.

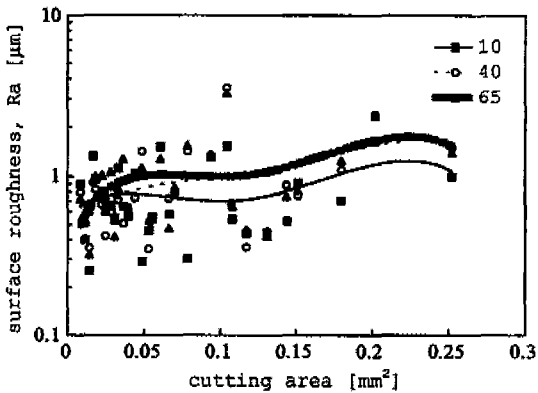


Fig. 13 The relation between maximum cutting area and surface roughness

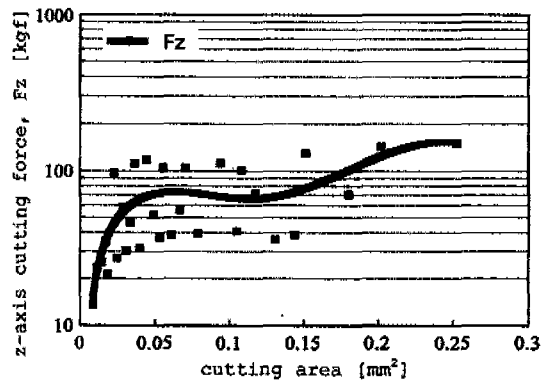


Fig. 14 The relation between maximum cutting area and z-axis mean cutting force

5. 결 론

정면밀링머신을 이용하여 SUS 304 절삭가공시 발생하는 공구파손 검출 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 공구의 파손은 평균절삭력과 AE RMS, AE 에너지, AE count, AE duration을 통해 검출할 수 있으며, 흠을 포함하는 인서트로 절삭가공시 공구파손 및 손상은 최대절삭면적 0.05 mm^2 이하에 밀집되어 있었고, 이것은 z 방향의 평균절삭력성분의 고찰시 최대절삭면적 0.05 mm^2 이하에서 절삭력이 급격히 증가하기 때문이다. 공구 마모 및 파손을 검출하는데 있어서 단일검출기법의 사용보다는 독립적인 검출기법이면서 상호보완적인 평균절삭력성분과 AE 인자의 사용이 유용하다.

참고문헌

1. N.H.Cook, "Tool Wear and Tool Life", Journal of Engineering for Industry, pp.931~938, November, 1973
2. J. Tlustý, Z. Masood, "Chipping and Breakage of Carbide Tools", Journal of Engineering for Industry, pp.403~412, Vol.100, November, 1978
3. M.S.Lan, D.A.Dornfeld, "In-Process Tool Fracture Detection", Journal of Engineering Materials and Technology, pp.111~118, Vol.106, April, 1984
4. I.Inasaki, S.Yonetsu, "In-Process Detection of Cutting Tool Damage by Acoustic Emission Measurement", Proc. 22nd MTDR conference, pp.261~268, 1981
5. T.Blum, I.Inasaki, "A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process", Journal of Engineering for Industry, pp.203~211, Vol.112, AUGUST, 1990
6. A.G.Beattie, "ACOUSTIC EMISSION, PRINCIPLES AND INSTRUMENTATION", Journal of Acoustic Emission, Vol.2, pp.95~128, Number 1/2, 1983
7. Edward Nkechi Diei, "Investigation of the Milling Process Using Acoustic Emission Signal Analysis", Ph.D.Thesis, University of California Berkeley, 1985