論文 한국정밀공학회지 제 12권 제3호 1995. 3
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 12, No 3. March. 1995.

선삭공정시 공구파손의 실시간 검출에 관한 연구

최 덕 기,* 주 종 남,** 이 장 무**

A Study on Real-time Monitoring of Tool Fracture in Turning

D. K. Choi* and C. N. Chu** and J. M. Lee**

ABSTRACT

This paper presents a new methodology for on-line tool breakage detection by sensor fusion of an acoustic emission (AE) sensor and a built-in force sensor. A built-in piezoelectric force sensor, instead of a tool dynamometer, was used to measure the cutting force without altering the machine tool dynamics. The sensor was inserted in the tool turret housing of an NC lathe. FEM analysis was carried out to locate the most sensitive position for the sensor. A burst of AE signal was used as a triggering signal to inspect the cutting force. A significant drop of cutting force was utilized to detect tool breakage. The algorithm was implemented on a DSP board for in-process tool breakage detection. Experimental works showed an excellent monitoring capability of the proposed tool breakage detection system.

Key words : sensor fusion, acoustic emission, built-in force sensor, turret housing, a burst of AE signal, cutting force

1. 서 론

최근 산업계에서는 생산성 향상 및 다양한 수요자들의 요구, 단축된 제품 사이클, 빈번한 노사분규 등에 대처하기 위하여 공장 자동화(factory automation)에 대한 설비투자가 급증하고 있다. 공장 자동화는 NC 공작기계가 도입된 이래 단위기계의 자동화를 비롯하여 나아가서는 FMS(Flexible Manufacturing System), CIM(Computer Integrated Manufacturing System)을 통한 생산공정 전반의 자동화를 위한 연구로 이어지고 있다.

공장 자동화과정에서 간과할 수 없는 부분은 생산시스템의 유지관리이다. 일반적으로 생산시스템의 관리는 세가지 방법으로 이루어진다. Run-to-Breakdown, Time-based Preventive Maintenance, On-Condition Maintenance가 그것인데 현재 산업현장에서는 숙련공의 경험적인 데이타에 의존하는 첫째와 둘째 방법이 대부분 사용되고 있다. 그러나 생산성의 극대화를 위

* 강릉대 정밀기계공학과
** 서울대 기계설계학과

한 효율적인 공정관리와 공정중 발생할 수 있는 돌발적인 사태로부터 안전성을 최대로 확보하기 위해서는 On-Condition Maintenance 방법이 필수적으로 요구된다. 따라서 가공공정에서 중추적인 역할을 담당하고 있는 NC 공작기계의 On-Condition Maintenance를 위한 연구는 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.[1]

공구파손의 신뢰성있는 실시간 검출을 위하여 많은 연구가 수행되어왔는데 기존 연구들은 주로 하나의 센서를 이용하여 얻은 정보에 의존하여왔다. 그러나 하나의 센서로부터의 단순정보는 폭넓은 절삭조건과 절삭과정중 다양한 이상상태로 인하여 신뢰성있는 M&D (Monitoring and Diagnosis)기법의 개발과 적용을 어렵게 하였다. 따라서, 복잡한 절삭공정의 M&D를 위해서는 여러개의 센서를 이용하여 상호보완적인 절삭상태정보를 진단모듈에 제공해줄 필요가 있다. 이로 인하여 다중센서(sensor fusion)의 필요성이 증대되었다. 이러한 다중센서를 이용한 검출시스템에 주로 이용되고 있는 센서는 전반적으로 절삭상태에 대한 정보를 가장 잘 나타내는 절삭력의 측정을 위한 절삭력센서이다.[2]

그런데 기존 절삭력을 이용한 대부분의 연구들은 주로 공구동력계를 사용하였다. 그러나 이러한 방법은 공작기계 자체의 동적 특성을 변화시키고 가공공정에 방해를 줄 뿐 아니라 비경제성, 비유연성으로 인하여 실제 현장에 적용하기가 어렵다. M&D 시스템의 성능향상에 중요한 역할을 하는 센서는 대상으로하는 물리적 성질에 대한 민감도도 중요하지만 그에 못지않게 고려되어야 할 점은 센서의 실용성이다. 실용적인 센서가 일반적으로 갖추어야 할 사항은 신뢰성, 유지 및 보수의 용이성, 경제성, 내구성, 유연성 등을 들 수 있다. 이 경우에 유연성이란 하나의 센서로써 여러 개의 공구를 이용한 가공작업(예를 들면 터렛 가공)의 상태모니터링을 수행할 수 있어야 함을 의미한다. 그러나 기존의 방법으로는 이러한 요구사항을 만족하기 어렵다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 내장형 압전센서를 이용한 절삭력 측정 방법을 제시한다. 이 센서를 공작기계내 공구로부터 이격된 부위에 설치함으로써 절삭 동특성을 유지시켜주며 가공공정에 대한 간섭을 방지할 뿐 아니라 칩이나 절삭유등으로부터 센서를 보호할 수 있다. 이를 위하여 응력분포해석을 수행하여 내장형 압전센서의 공작기계내 최적위치를 선정하고 공구파손에 의하여 내장형센서로 전달되는 전달력과 AE의 특징적인 변화를 살펴봄으로써 공구파손 검출을 위한 신뢰성있는 검출알고리즘을 개발한다. 궁극적으로 위에서의 연구결과를 바탕으로 공구파손 검출시스템을 FMS 가공라인에 구축함으로써 시스템의 성능을 검증한다.

2. 내장형 압전센서의 최적위치선정을 위한 해석

실용적인 M&D시스템의 개발을 위해서 절삭력센서가 갖추어야할 사항은 다음과 같다. 첫째, 절삭력이 민감하게 전달되는 부분에 설치되어야 한다. 절삭상태나 공구상태의 신뢰성있는 검출과 진단을 위해서는 절삭력 신호에 내포된 정보가 가능한한 왜곡되지 않고 정확히 얻어져야 한다. 실제 절삭력신호의 변형(distortion)을 최소화시키기 위해서는 공작기계의 구조상 절삭력의 전달이 상대적으로 민감하게 반영되는 위치를 찾아내야 한다. 둘째, 센서와 센서 장착방법이 견고해야함은 물론 내구성이 보장되어야 한다. 셋째, 실제 작업에 간섭을 주지 말아야 한다. 검출시스템의 실제적인 응용을 위해서는 둘째, 셋째 조건은 상당히 중요하다. 이것은 절삭력을 이용한 여러 검출방법이 연구수준에서는 성공적이나 현장에서의 적용이 만족스럽게 이루어지지 못하는 가장 큰 이유중에 하나이다. 절삭력이 다른 물리적 성질들보다 많은 절삭정보를 갖고 있다하더라도 센서 성능의 노후가 가져 오는 검출의 비신뢰성은 오히려 전체 생산성을 떨어뜨리게 된다. 또한 설치 위치가 실제 현장작업에 불편을 준다면 이 또한 M&D 시스템의 실용화에 커다란 장애가 아닐 수 없다. 넷째는 공구교환에 따른 유연성(flexibility)이 있어야 한다. 공장 자동화라인에서는 여러 공구를 공구매거진이나 터렛에 장착하고 수시로 공구를 교환하면서 작업을 하므로 일반 공구동력계(tool dynamometer)처럼 특정한 공구에 걸리는 절삭력을 측정하는 것은 적절하지 못하다. 따라서 특정 공구가 아닌 절삭을 수행하는 공구를 모니터링할 수 있도록 센싱 시스템을 구성하는 것이 필요하다. 다섯째는 경제적이어야 한다. 일반적으로 둘째, 셋째, 넷째 조건을 동시에 만족시키기 위해서는 절삭이 이루어지는 부분에서 이격된 위치가 적당한데 이러한 제한은 첫째조건과 상충되는 면이 있다. 따라서, 위에서 언급된 조건들을 만족스럽게 수용할 수 있는, 절삭력을 측정할 수 있는 센서로서 내장형 압전센서를 선정하였다.

본 연구에서 M&D 시스템의 구성을 위하여 사용한 압전센서(piezo-electric sensor)는 KISTLER 9117

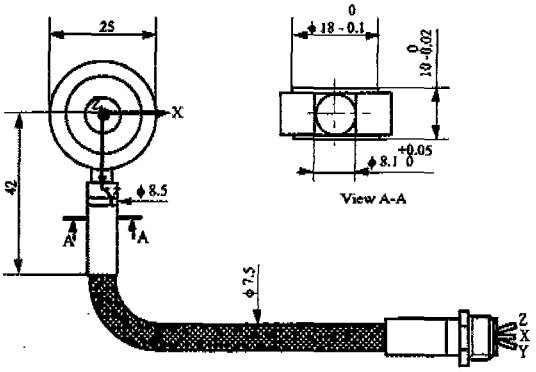


Fig. 1 Shape of built-in piezo-electric sensor

이다. 센서의 형태를 Fig. 1에 나타내었다. 이 압전 센서는 센서 하우징내에 3개의 수정링(quarz ring)으로 구성되며 두개의 수정링은 전단방향으로 걸리는 힘을 측정하고 다른 하나는 센서의 면에 수직방향으로 작용하는 힘을 측정한다. 센서의 장착방법에는 예압볼트(preloading bolt)를 이용한 직렬장착(series mounting)방법과 예압키(preloading key, Fig. 2)를 이용한 삽입 장착(shunt mounting) 방법이 있는데 삽

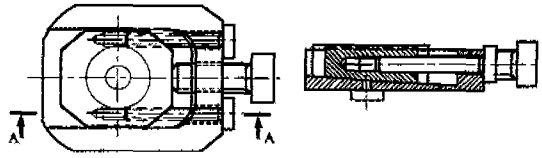
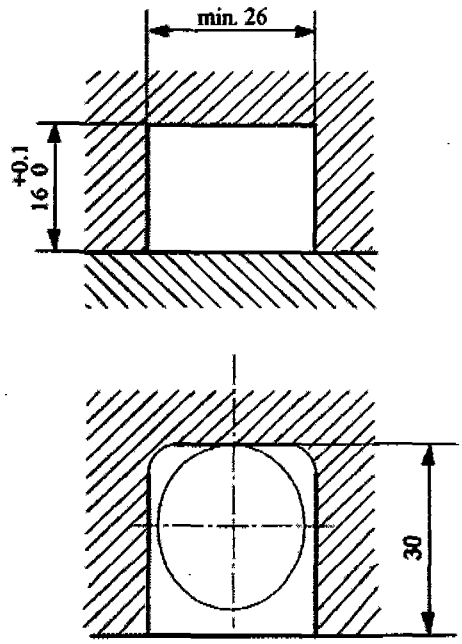


Fig. 2 Shape of preloading key

입장착방법이 직렬장착방법보다 탈, 장착이 용이하므로 본 연구에서는 삽입장착방법을 사용한다. Fig. 3은 센서의 설치방법을 나타낸 것이다.

선정된 센서가 만족스러운 성능을 발휘하기 위해서는 공작기계내에 설치될 수 있는 최적의 위치를 찾는 것이 무엇보다도 중요하다.

공장 자동화의 가공셀에서 많이 쓰이고 있는 터렛 선반을 대상으로하여 내장형 압전센서의 위치를 선정하였다. 가공중 공구의 교체가 빈번하게 일어나고 둘째, 셋째 조건을 고려하여 볼 때 터렛하우징 부위가 적절하다. 따라서 이 부위내에서의 절삭력의 전달정도를 살펴보기 위하여 FEM해석을 수행하였다. 터렛 하우징을 Fig. 4와 같이 단순화시키고 공구에 절삭력이 작용한다고 가정하였다. 2,4,6 위치는 접합볼트부를 나타내고 1,3,5,7은 접합볼트간의 중간부위이다. FEM해석 소프



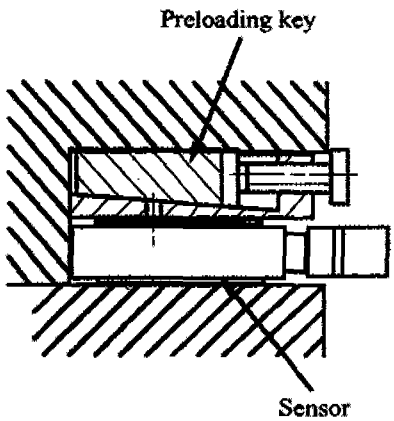


Fig. 3 Mounting method of sensor(shunt mounting)

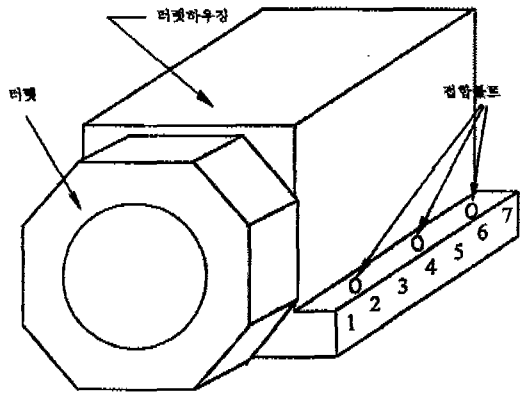


Fig. 4 Idealization of turret & turret housing

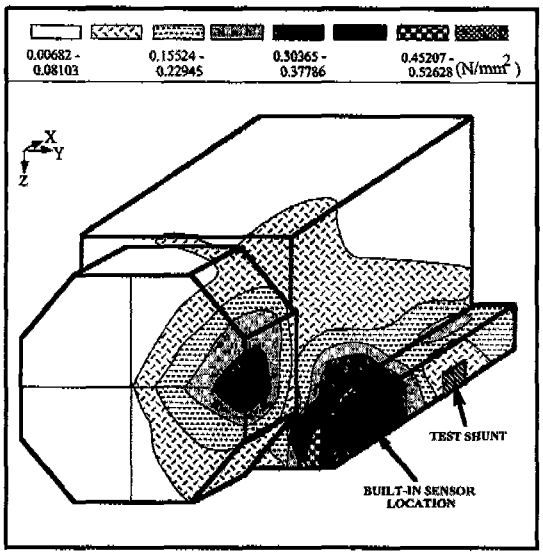


Fig. 5 Stress distribution in turret & turret housing (by FEM analysis)

트웨어는 MSC/NASTRAN (version 67)을 사용하였다. 하우징의 재질은 주철(cast iron, GC 25)이고 70GN/㎟의 탄성계수(young's modulus)와 0.3 포아송비(poisson's ratio)를 갖는다. 해석에 사용된 요소형태(element type)는 3-D space의 8-node hexa solid element이다. 경계조건은 터렛하우징이 선반 베드부에 6개의 볼트로 고정되어 있으므로 볼트가 있는 위치에서 6 자유도 모두를 고정시켰다. 해석결과는 Fig. 5에 나타난 바와 같다. Von-Mises Criterion에 의한 상당 응력값에 따라 부늬별로 구분하여 나타내었다. 그림의 상단에서 보다시피 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 응력값이 높으며 같은 부늬의 영역은 응력치의 정해진 값의 범위에 포함되는 부위를 표시한다. 이 결과에 따르면 터렛하우징과 베드의 접합부에서 하중 작용점에 가까운 접합부위일수록 절삭력이 민감하게 전달되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 터렛하우징과 베드부의 접합부에서 계산된 힘을 나타낸 그림이다. 하중 작용점에 Fig. 5에 나타낸 x(피이드분력), y(배분력), z(주절삭력)방향으로 각각 500N, 700N, 1000N의 힘을 가한 경우이다. 그림에 따르면 접합부의 접합볼트에서 큰힘들이 걸리고 있음을 볼 수 있다. 그중에서도 하중 작용점에 가까운 접합볼트에 가장 큰 힘이 걸리고 있다. 따라서, Fig. 5에 나타낸 위치에 삽입구멍을 가공한 후 예압볼트를 이용하여 내장형 압전센서를 설치하였다.

FEM해석에 의하여 선정된 내장형 압전센서 설치위치의 타당성을 검증하기 위하여 선정된 위치외에 Fig. 5에서 보다시피 빗금친 부위에 또 다른 센서 설치를 위한 삽입구멍을 가공하였다. 이것은 절삭력이 터렛 하우징을 통하여 전달되는 과정에서 센서 설치위치간의 상대적인 민감도를 알아보기 위한 것이다. 따라서 양 위치에 절삭력센서를 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 각각 설치하고 절삭실험을 수행하였다. Fig. 7은 절삭깊이를 변화시키며 절삭하였을 때 두센서에 전달되는 전달력을 나타낸 그림이다. FEM해석에 의하여 선정된 위치에

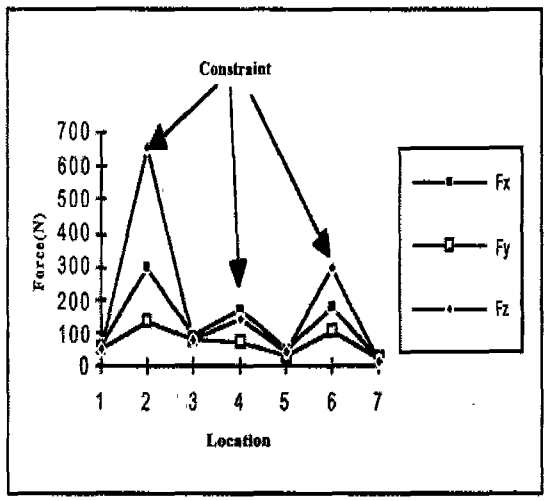


Fig. 6 Predicted force exerted between turret housing and bed due to applied load at tool tip

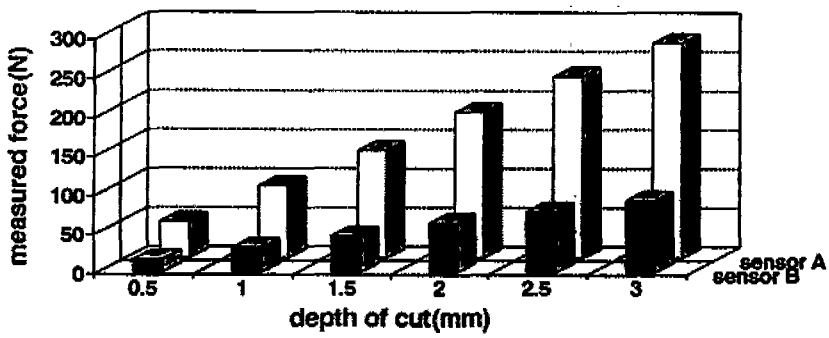


Fig. 7 Comparison of transmission sensitivity between sensor A and sensor B for cutting force (cutting speed:200m/min, feedrate:100mm/min)

설치된 센서를 A라 하고 비교를 위하여 설치된 센서를 B라한다. 이 결과에 따르면 앞서의 해석대로 터렛에 가까운 곳에 위치한 센서 A가 센서 B보다 월등한 절삭력에 대한 민감도(2.98배)를 보이고 있음을 알 수 있다.

절삭력이 터렛하우징과 베드의 접합부로 전달될 때 접합부 전역에 걸쳐 전달이 이루어지므로 앞서 언급한 부위에서 측정되는 전달력은 절삭력의 일부이다. 따라서 센서출력으로부터 실제 절삭력을 구하기위해서는 절삭력이 센서의 설치위치로 전달되는 정도를 알아야 한다. 따라서 이러한 감쇄비를 구하는 실험을 수행하였다. 감쇄비를 구하기위해서는 공구에 걸리는 절삭력에 대하여 내장형센서에 가해지는 전달력을 측정하여야 하는데 이를 동시에 측정하게되면 절삭력의 측정을 위하여 사용하는 터렛용 공구동력계로 인하여 절삭력의 전달경로가 변형하게 된다. 따라서 다음과 같은 방법으로 실험을 수행하였다.

동일한 공작물과 동일한 공구 그리고 동일한 공구 설치 상태, 절삭조건하에서의 공구에 걸리는 절삭력은 일정하다고 할 수 있다. 따라서 먼저 여러 절삭조건하에서 공구동력계를 이용하여 절삭작업을 수행하면서 절삭력을 측정한다. 다음에 공구동력계를 제거한후 전 실험과 동일한 조건을 유지시키고 절삭을 하면서 내장형 센서로의 전달력을 측정하는 것이다. 공구에 걸리는 절삭력의 측정을 위해 터렛용 공구동력계인 KISTLER 9121을 사용하였다. 실험에서 주의해야 할 점은 두 경우 서로 동일한 절삭조건과 설정상태를 유지해야 한다는 것이다. 또 하나는 정확한 예압을 가해주어야 한다. 내장형 센서는 초기 예압을 기준으로 한 작용력의 변화를 측정하기 때문에 예압의 상태에 따라 트랜스듀서의

Table 1 Cutting conditions of experiment for transmission ratio of cutting force between tool and built-in sensor

	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
cutting speed(m/min)	150	170	190	210	230

(a) Experiment A: feed 0.15mm/rev, depth of cut 2mm

	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
feed (mm/rev)	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75

(b) Experiment B: cutting speed 230m/min, depth of cut 2mm

	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
depth of cut (mm)	1	2	3	4

(c) Experiment C: cutting speed 230m/min, feed 0.3mm/rev

민감도가 변하게 되어 결국 정확한 작용력의 양을 측정할 수가 없다. 초기에 설정된 센서의 트랜스듀서 민감도(standard transducer sensitivity)가 예압 25kN을 기준으로 측정된 값이고 그 값을 기준으로한 일정범위에서 선형성(linearity)이 보장되므로 예압키를 이용하여 25kN의 예압을 가해준다.

실험에 사용된 여러 절삭조건은 Table 1에 나타난 바와 같다. 피이드, 절삭깊이를 각각 변화시키면서 센서에 걸리는 힘을 측정하였다. Fig. 8 ~ Fig. 10은 위에서 제시한 실험방법에 의하여 공구동력계에서 측정된 주절삭력과 내장형 센서에서 측정된 전달력과의 비교를 나타낸 그림이다. 실험에 의하면 절삭력의 이송분력과 배분력은 내장형 센서에 거의 전달되지 못한다. 이것은 내장형 센서에서 측정되는 x, y방향의 성분이 예압에 의하

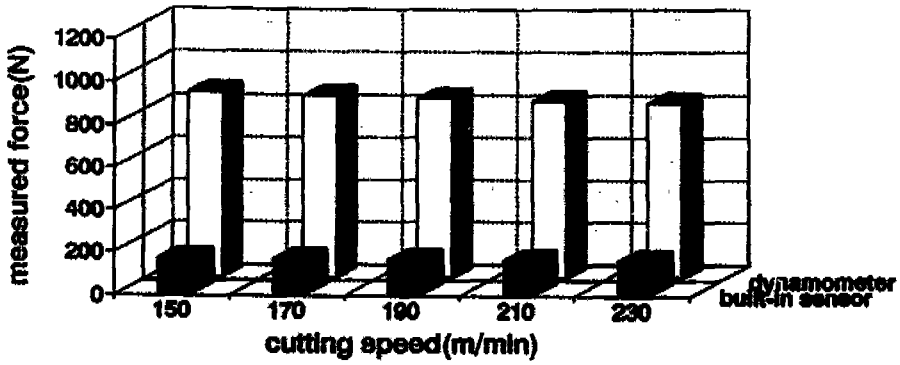


Fig. 8 Variation of cutting force and trasmission force according to cutting speed(Experiment A)

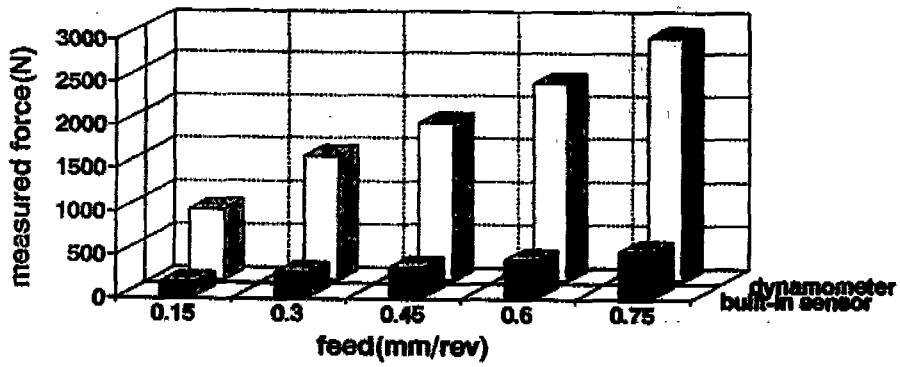


Fig .9 Variation of cutting force and transmission force according to feedrate(Experiment B)

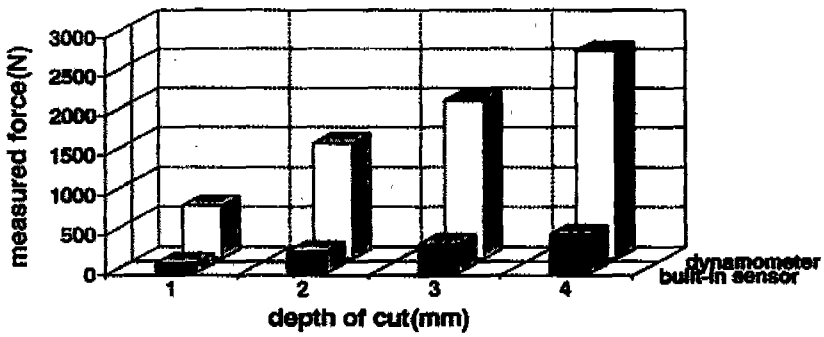


Fig. 10 Variation of cutting force and transmission force according to depth of cut(Experiment C)

여 전단력 형태로 전달되므로 자체 전달특성이 z방향보다 민감하지 않고 이송분력과 배분력이 터렛하우징에 작용하는 회전모멘트가 접합볼트에 의하여 대부분 흡수되기 때문이다. Fig. 8은 절삭속도, Fig. 9는 피이드, Fig. 10은 절삭깊이를 각각 변화시키면서 실험한 결과인데 어느 경우나 내장형 센서에 전달되는 전달력은 절삭력에 대하여 일정한 감쇄비를 유지하고 있다. 실험결과로부터 구한 감쇄비(attenuation ratio)는 5.4이었다.

3. 공구파손으로 인한 전달력과 AE신호의 변화

절삭가공 도중 칩의 두께 변화 및 경사면에서의 공구-칩 접촉면적의 변화 등으로 인하여 공구에는 열 및

기계적 하중이 반복하여 작용하게 된다. 또한, 갑작스런 충격력 또는 공구마멸의 점진적 증가에 따른 과다한 절삭력 등의 원인으로인하여 절삭날이 파손되는 경우가 생기는데 이러한 현상은 주로 크랙, 칩핑, 파괴 등으로 구별된다.[3] 그런데 작은 양의 크랙 또는 칩핑이 발생할 때는 절삭을 계속할 수 있으나 이로 인하여 절삭날이 무디어져 절삭온도가 상승되기 때문에 이후에 마멸속도가 증가된다. 파괴의 경우에는 절삭날의 대부분이 떨어져버리므로 이후 절삭은 불가능하며 단속절삭, 강인한 재료의 중절삭시에 많이 나타나게 된다. 이러한 공구손상의 중요원인으로는 공구재료 자체의 취성, 절삭력이나 열충격, 피로, 과도한 공구마멸의 진행, 채터링 등을 들 수 있다. 일반적으로 힘의 변화에 의하여 재료의 손상이 발생했을 때 AE가 민감하게 발생한다. 절삭력은 AE에 비하여 감도가 낮지만 매개체에 의해 영향을 받지 않고 방향성(orientation)이 있다. 선삭보고서에 따르면 공구파괴시 절삭력이 일시적으로 감소하는데 이 송분력보다는 주분력의 변화가 더 확실히 나타난다.[4] 따라서, 상호보완의 정보를 갖고 있는 절삭력과 AE를 동시에 감시함으로써 보다 신뢰성 있는 공구파괴를 검출할 수가 있다.

선삭 공구파괴 검출실험은 NC 터렛선반(DAE WOO PUMA-10S)에서 행해졌다. 실험장치의 구성은 Fig. 11에서 보는 바와 같다. AE센서(NF Co. AE-905US)는 공구 생크부의 뒷면에 마그네틱 호울더(magnetic holder)를 이용하여 설치하였다. AE의 여러 파라미터 중 에너지 성분을 사용하기 위하여 변별기(DISCRIMINATOR, NF AE-922)에서 AE 포락선 검파(envelope detection)신호를 추출하였다. 기존 연구결과에 의하면 스펙트럼상에서 공구파괴로 인한 AE 신호의 파워변화는 100kHz-1MHz의 대역을 갖는다. 따라서 공구파괴가 아닌 다른 원인으로 인한 AE신호의

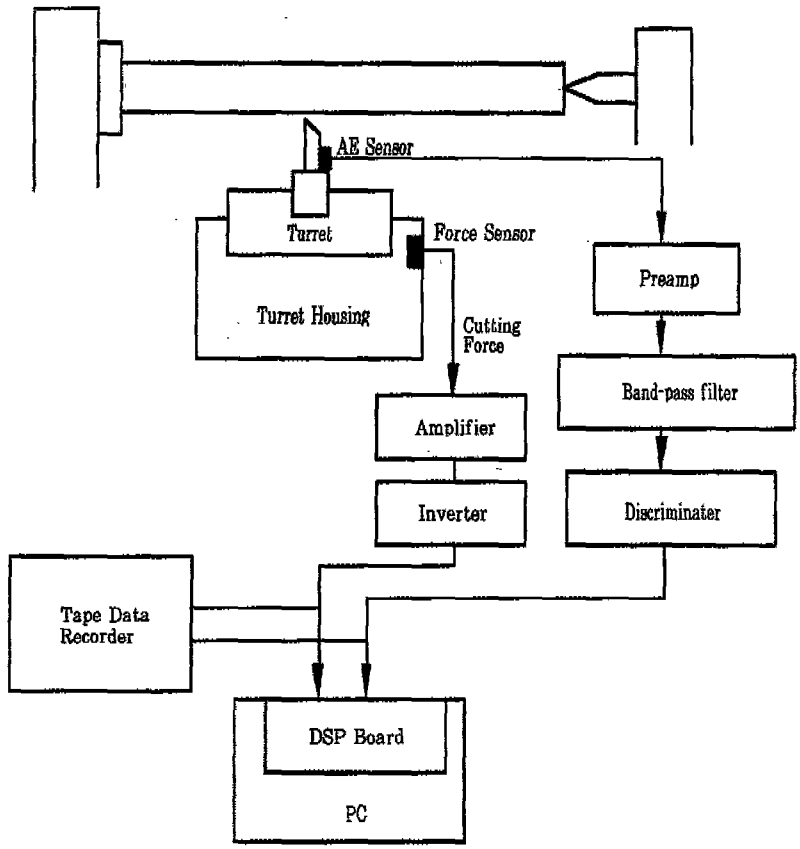


Fig. 11 Experimental setup for tool breakage monitoring in turning

변화를 측정신호에서 제거시키기 위하여 100kHz-1MHz의 패스밴드를 갖는 대역필터를 사용하였다. 메인-앰프(main-amplifier)의 증폭값은 첫번째 실험방법때는 20dB, 두번째 실험방법때는 10dB로 설정하였다. 이 값들은 모두 예비실험을 통하여 DSP 보드의 입력전압 레벨을 고려하여 결정되었다. 내장형 센서는 앞서의 해석결과에 의해 최적 위치로 결정된 터렛 하우징과 베드와의 접합부에 설치되었다. 센서가 설치될 삽입구멍(shunt)은 터렛하우징을 분해한 후 머시닝센터에서 엔드밀을 사용하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 편평도(flatness) 1/100이하, 평행도(parallelism) 2/100 이하로 가공되었다. 이와같이 설치된 센서로부터 출력되는 전하량은 전하증폭기(charge amplifier, Kistler 5022)를 거쳐 DSP보드의 입력신호로 사용되었다. 이때 전하증폭기에서 3kHz의 LPF(Low Pass Filter)를 사용하여 절삭력의 노이즈을 제거하였다. 공구의 파괴를 쉽게 일으키기 위하여 두가지 실험방법이 수행되었다. 하나는 Fig. 12에서 보다시피 인서트의 경사면에 와이어 방전가공(wire EDM)으로 슬롯을 가공하여 그 부위에서 쉽게 파괴가 일어나도록 하였다. 두

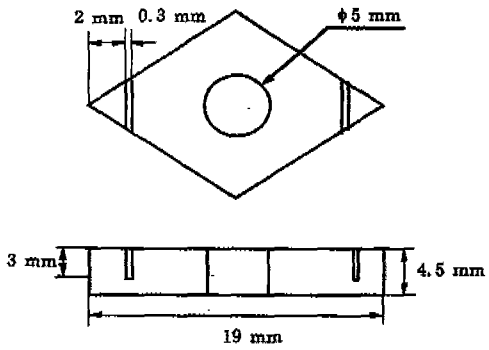


Fig. 12 Tool tip slotted by wire EDM on the rake face

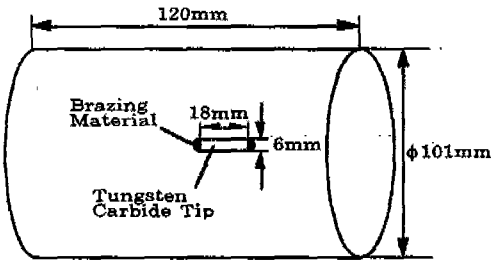


Fig. 13 Workpiece with embedded tungsten carbide tip

번째 방법은 카바이드팁(tungsten carbide tip)이 삽입된 공작물(Fig. 13)을 가공하는 것이다. 공구가 공작물에 삽입된 카바이드팁부분을 절삭할 때 파괴가 일어나도록 하였다. 이러한 공작물을 만들기 위하여 공작물 표면에 엔드밀로 슬롯을 가공한 후 그 슬롯에 사각 카바이드팁을 삽입하고 고정을 위하여 브레이징(brazing)을 수행하였다. 실험에 사용된 공작물의 재질은 S45C이었고 인써트는 대한중석의 황삭용 초경합금인 CNMG 120408, P20과 코팅된 B25를 사용하였다. 공구호울더는 외경절삭용이며 레버고정식인 PCLNR 2525K12를 사용하였다. 모든 실험은 건식절삭으로 이루어졌다. 첫번째 방법을 이용한 실험은 한 패스(pass)에 절삭속도와 절삭깊이를 일정하게 유지시킨채 피이드 오버드라이브로 피이드를 증가시킴으로써 공구파괴가 일어나도록 하였다. 절삭속도는 100m/min-250m/min, 반경방향의 절삭깊이(radial depth of cut)는 0.5mm-3mm까지 다양하게 변화시키며 파괴실험을 수행하였다. 두번째 방법을 이용한 실험은 절삭속도 200m/min, 반경방향의 절삭깊이 2mm, 이송 100mm/min로 실험을 수행하였다.

Fig. 14, Fig. 15는 첫번째 실험방법에 의한 결과를 보여준다. Fig. 14에 나타낸 그림은 점차적으로 피이드를 증가함으로써 생긴 절삭부하로 인하여 슬로팅된 인써

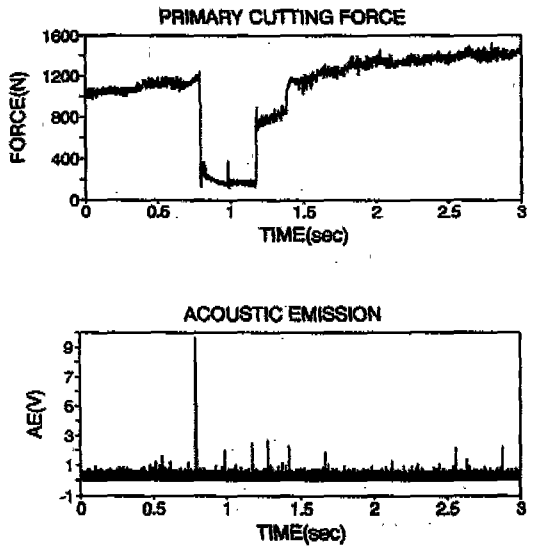


Fig. 14 Cutting force and AE signal in turning. cutting speed:100m/min, depth of cut:1.0mm(using slotted insert)

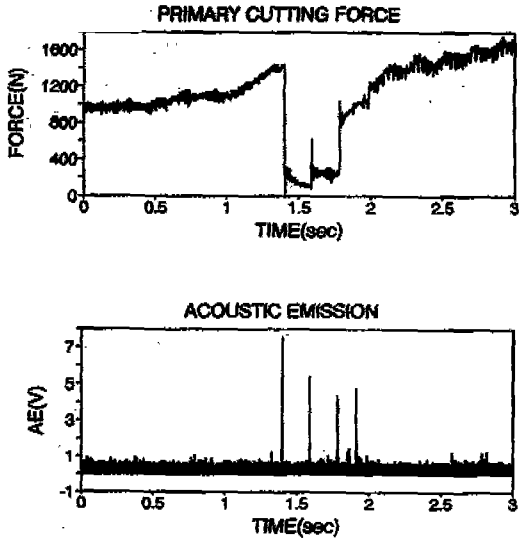


Fig. 15 Cutting force and AE signal in turning, cutting speed:100 m/min, depth of cut:1.0 mm(using slotted insert)

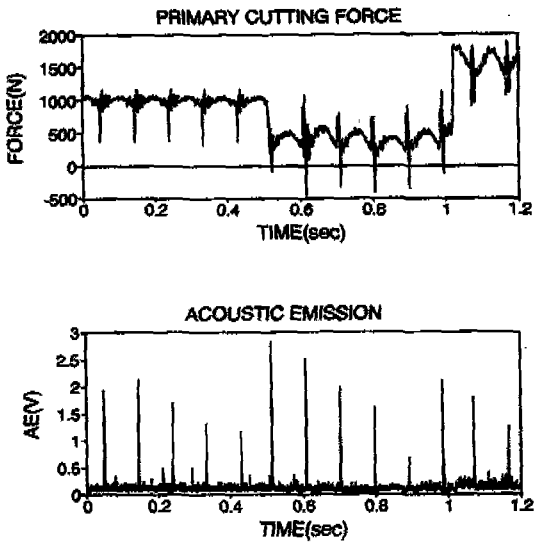


Fig. 16 Cutting force and AE signal in turning cutting speed:200m/min, depth of cut:2.0 mm, feed rate:100mm/min(using workpiece embedded carbide tip)

트가 파괴될 때의 AE신호와 절삭력신호의 변화를 나타내고 있다. Fig. 15는 Fig. 14와 같은 조건에서 피이드가 증가될 때 칩파편이 공구인선과 공작물사이에 끼이면서 절삭부하를 증가시켜 인써트가 파괴되었다고 해석할 수 있다. 이러한 현상은 절삭과정중에 자주 발생한다고 보고된 바가 있다. 50여차례의 실험결과 모든 실험에서 위와 같은 양상의 신호변화를 나타내었다. 즉 공구파괴시 돌발형 AE신호의 발생직후 급격하고 일시적인 절삭력의 감소를 볼 수가 있다. 공구파괴후 공구인선의 이탈로 인하여 절삭깊이가 순간적으로 감소함으로써 절삭력이 급격히 감소하였고 공작물 일회전후에 또 다른 칩핑이 일어났음을 알 수가 있다. 두 회전후 탈락된 인선 대신 공구호울더의 shim부분이 절삭하면서 두차례에 걸쳐서 절삭력이 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 파괴되는 인선의 크기와 피이드에 따라서 파괴로 인하여 절삭력이 감소한 이후의 신호양상이 달라질 수 있음을 의미한다. 그러나 파괴후 주절삭력이 일시적으로 감소하는 현상은 일관성있게 나타나고 있다.

Fig. 16, Fig. 17은 두번째 방법에 의한 실험결과를 보여주고 있다. Fig. 16에 나타낸 그림에서 공구가 브레이징 부위를 절삭할 때 절삭력의 주기적인 감소가 나타나고 있다. 이와 동시에 AE신호가 돌발형 형태를 보이는데 이것은 브레이징 부위로 인하여 단속적인 절삭을 하게 됨으로써 그로 인한 충격때문에 인써트내에 결함이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이후 공작물에 삽입되어있는 카바이드팁을 절삭할 때 내부 결함이 진행

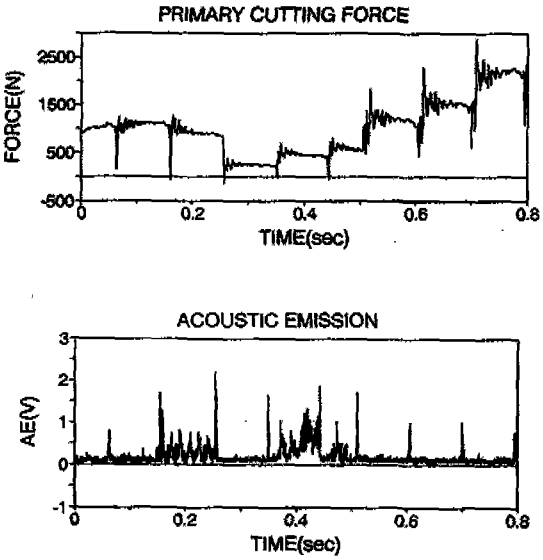


Fig. 17 Cutting force and AE signal in turning cutting speed:200m/min, depth of cut:2.0mm, feed rate:100mm/min(using workpiece embedded carbide tip)

되어오던 인써트의 인선이 파괴되어 탈락되면서 돌발형 AE신호가 나타나고 그 직후 절삭력이 급격히 감소하고 있다. 공구파괴 이후 파괴된 공구가 카바이드팁을 계속 절삭함으로써 절삭력의 주기적인 증가와 감소가 나타나고 공작물의 5.5회전이후 공구호울더의 shim부분이 절삭을 시작하므로 절삭력이 급격히 증가하고 있다. 따라서 삽입된 카바이드팁을 포함하는 부위를 지날 때를 제외하고 공구파괴시 Fig. 14, Fig. 15 경우와 전반적으로 유사한 신호의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 17에 나타난 그림은 Fig. 16과 다른 신호의 변화를 보이고 있다. Fig. 16과 마찬가지의 이유로 절삭력의 순간적인 감소와 AE의 순간적인 증가를 보이고 있으며 0.2sec를 포함하는 회전구간에서의 AE 신호의 형태는 단속절삭으로 인하여 발생한 크랙의 계속적인 성장현상을 나타낸다. 그 이후 공작물에 삽입된 카바이드팁과 충돌함으로써 크랙으로 손상받은 인써트가 파괴되어 인선이 탈락됨으로써 앞의 경우들과 마찬가지로 돌발형 AE가 발생하고 급격한 절삭력의 감소가 일어난다. 파괴된 이후 절삭력의 단계적인 증가와 AE신호의 불규칙적인 변화는 파괴된 인써트의 계속적인 손상을 의미한다. 파괴된 인써트와 카바이드 팁과의 계속적인 충돌로 인하여 반경방향의 절삭깊이를 감소시키는 인선의 탈락은 더 이상 보이지 않고 대신 주절삭날(major cutting edge)과 부절삭날(minor cutting edge)의 손상이 일어나고 있음을 알 수 있다. 이로 인하여 충돌할 때마다 절삭력이 증가하고 있다. 파괴된 인써트로부터 공작물의 반경방향으로의 인선의 탈락은 물론 주절삭날과 부절삭날의 심한 손상을 볼 수 있다.

두가지 형태의 실험으로부터 공구파괴가 일어났을 때 돌발형 AE신호가 발생하고 곧이어 절삭력의 급격한 감소 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 돌발형 AE신호의 지속시간이 약 1msec이므로 적어도 1kHz이상의 샘플링주파수가 요구된다. 따라서 돌발형 AE신호의 안정된 검출을 위하여 4kHz의 샘플링주파수를 선정하였다.

4. 공구파손의 검출 및 진단 전략

AE는 재료의 변형으로부터 발생하는 응력방출파이다. 절삭공정중에 다양한 발생원인에 의하여 여러 형태의 AE신호가 발생하나 칩핑이나 공구파괴, 칩충돌등에 의하여 발생하는 돌발형 신호의 진폭은 상당한 차이를 보인다. 이 사실로부터 돌발형 AE신호의 진폭의 한계값을 설정하므로써 공구파괴를 다른 현상으로부터 변별할 수가 있다. 그러나 AE신호의 진폭과 이들 현상간의 상관관계가 일관적이지 못하고 불규칙하며 재료에 따라서 차이를 보이므로 AE신호만을 사용한 공구파괴 검출 전략을 절삭공정 전반에 걸쳐 일반적으로 적용하기에는 많은 문제점이 있다. 절삭력은 공구가 파괴된 직후 급격한 감소를 보이는데 이는 공구 인선의 탈락으로 인한 절삭깊이의 감소때문이다. 따라서 절삭력의 변화는 공구파괴의 지표로써 충분히 사용될 수가 있다. 그러나 절삭력은 절삭조건에 따라서 변하고 또한 절삭개시나 이탈과정, 공구교환을 위한 터렛의 회전등에 의하여 급격하게 변화한다. 이러한 현상은 가공 공정중에 하나의 센서신호 정보를 통한 공구파괴의 정확한 변별을 어렵게 하므로 이들 변화들을 공구파괴와 변별하기 위해서는 절삭력신호와 AE신호의 정보를 동시에 고려함이 필요하다. 실험에 의하면 공구가 파괴되었을 때 AE신호는 상당한 크기의 돌발형 신호를 발생하고 곧이어서 절삭력의 급격한 감소가 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 신호들의 변화양상을 공구파괴검출에 이용하였다. 기본 알고리즘은 다음과 같다. (Fig. 18)

첫째, 절삭력 변화의 감시는 돌발형 AE신호의 발생

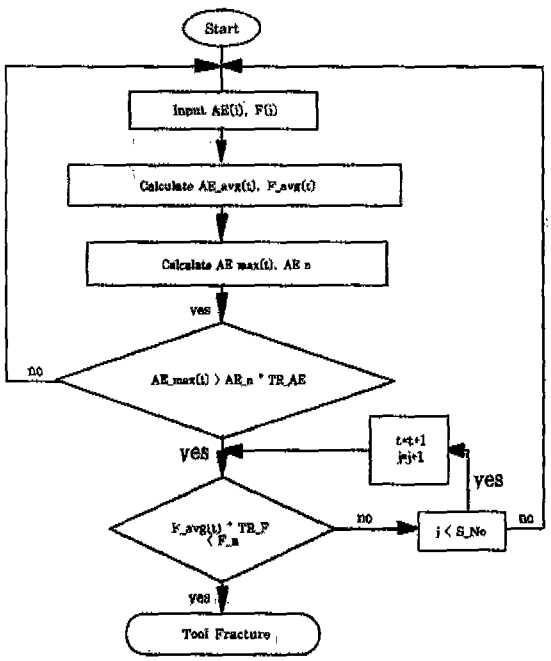


Fig. 18 Tool breakage detection algorithm

검출을 기점으로한다. AE신호의 검출단계에서 고려되어야 할 사항은 공구파괴에 의한 돌발형 신호와 다른 원인에 의한 돌발형 신호와의 정확한 변별이다. 이를 위하여 다음 단계를 수행한다.

(1) 구간별 AE평균(AE_avg(t))과 누적AE평균(AE_n)을 계산한다.

$$AE_avg[t] = \sum_{i=1}^{N} AE[i]$$

$$AE_n = (\sum_{i=1}^{n} AE_avg[t])/n$$

여기서 N은 구간당 A/D 데이타 갯수이고 n은 구간의 갯수이다.

(2) 실험에 의하면 공구파괴로 인한 돌발형 AE신호의 지속시간은 약 1msec이다. 따라서 샘플링주파수가 f kHz일때, 구간비교지표(AE_max(t))는 구간내 가장 큰 f개의 값의 평균으로 정의한다. 이 방법은 다른 원인으로 인한 영향으로부터 좀더 극명한 변별을 가능하게 한다.

(3) 알고리즘은 구간비교지표(AE_max(t))와 누적AE평균(AE_n)과 비교한다. 만일 AE_max(t)가 AE_n*TR_AE보다 크다면 이것을 돌발형 AE신호로 인식한다. AE비의 한계값(TR_AE)은 실험으로부터 정해진다.

둘째, 첫째단계에서 검출된 돌발형 AE신호가 공구파괴로 인한 것인지 다른원인에 의한 것인지를 최종적으로 결정하기 위하여 절삭력의 변화를 감시한다.

(1) 구간별 평균 절삭력(F_avg(t))을 계산한다.

$$F_avg[t] = \sum_{i=1}^{N} F[i]$$

(2) 돌발형 AE신호가 구간 t에서 관측되면 알고리즘은 한 단계 전 구간 평균값(F_avg(t-1))을 비교 기준값(F_n)으로 설정하고 현재 구간 평균값 (F_avg(t))과 F_n을 비교한다. 만일 F_avg(t)가 F_n/TR_F보다 작으면 공구파괴가 발생했다고 결정한다. TR_F는 실험적으로 결정되는 절삭력 비의 한계값이다. F_avg(t) > F_n/TR_F이면 감시시간(S_No)이 경과될 때까지 F_avg(t+j)와 F_n을 비교한다. 감시시간(S_No)은 절삭력의 변화가 감시되는 일정한 시간을 말한다. 공구파괴의 형태에 따라서 절삭력의 급격한 감소가 한 구간내에 일어나지 않을 수도 있기 때문이다. 실험으로부터 돌발형 AE신호의 발생후 0.02sec내에 절삭력의 급격한 감소가 이루어졌다.

구간별 AE 평균은 20개의 AE 입력데이타마다 계산된다. 비교기준값(AE_n)은 전체 구간별 평균의 평균이다. 입력되는 AE신호마다 구간비교지표(AE_max(t))가 계산되고 비교기준값과 비교된다. 절삭력신호 또한 20개를 한 구간 데이타갯수로 하였다. 이것은 표본화주파수 4kHz일때 5msec에 해당된다. 돌발형 AE신호의 발생 직후의 절삭력 신호는 발생 직전의 비교기준값(F_n)과 비교된다. AE신호의 비교기준값(AE_n)에 대한 구간비교지표(AE_max(t))의 값을 AE 비(R_AE)라 정의한다. 또한 절삭력의 구간별 평균(F_avg(t))에 대한 비교기준값(F_n)의 비를 절삭력비(R_CF)라 정의한다. Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22는 선삭실험에서 얻은 신호들의 R_AE와 R_CF를 나타낸 것이다. 그림으로부터 공구의 파괴가 발생하였을때 R_AE가 상당히 크게 증가하고 뒤이어서 R_CF 또한 크게 증가함을 볼 수가 있다. 감시시간은 0.02sec 즉 4구간으로 설정되었다. 그런데 대부분의 실험에 의하면 2구간내에 절삭력의 감소가 이루어졌다. AE비의 한계값(TR_AE)은 5로 설정하였고 절삭력비는 2로 설정하였다. 즉, AE신호의 구간비교지표값이 비교기준값의 5배가 넘으면 절삭력 변화의 감시를 시작하고 감시시간내에 절삭력 또한 비교기준값의 1/2로 감

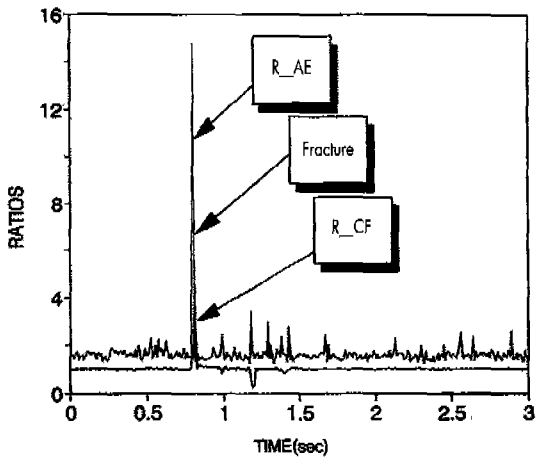


Fig. 19 Behavior of AE ratio and cutting force ratio in turning. (case of Fig. 14)

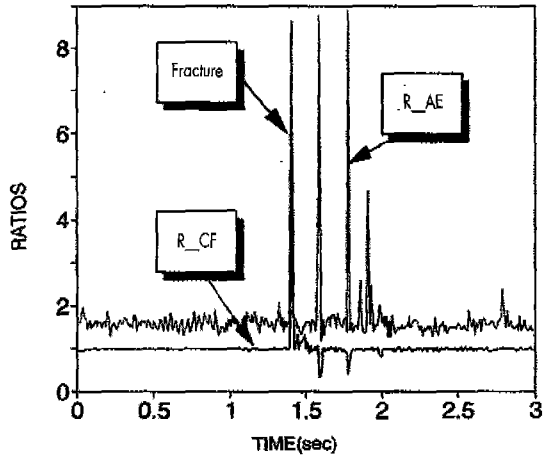


Fig. 20 Behavior of AE ratio and cutting force ratio in turning (case of Fig. 15)

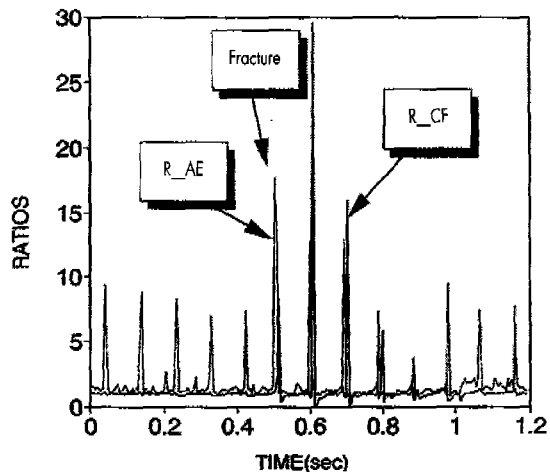


Fig. 21 Behavior of AE ratio and cutting force ratio in turning (case of Fig. 16)

소하게 되면 공구가 파괴가 되었음을 판정한다. 구간당 데이타 갯수와 AE비의 한계값(TR_AE), 절삭력비의 한계값(TR_TH)을 조절함으로써 검출의 민감도와 신뢰도가 조정된다. 본 검출시스템은 N = 20, TR_AE = 5, TR_CF= 2로 설정되었다.

공구파괴 현상은 공작기계, 공작물 및 작업자에게 치명적인 손상을 입힐 수가 있으므로 검출에 소요되는 시간이 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서 수행된 검출방법에 의하면 0.02sec내에 공구파괴를 검출할 수 있으므로 이로 인한 피해를 극소화시킬 수가 있다.

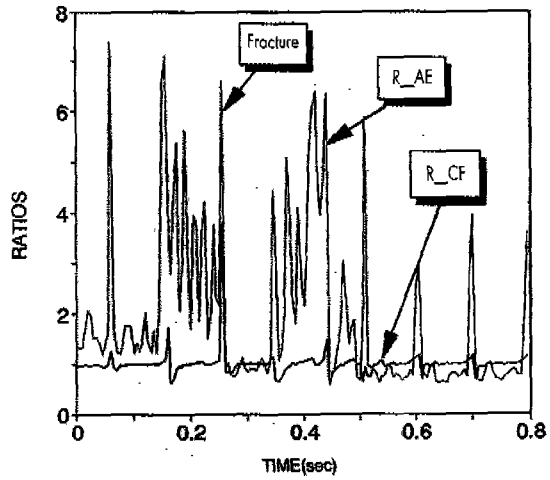


Fig. 22 Behavior of AE ratio and cutting force ratio in turning (case of Fig. 17)

5. CNC 터렛선반용 공구파괴 검출시스템의 구성

앞서 살펴본 내장형 센서와 AE센서 그리고 개발한 공구파손 검출알고리즘을 바탕으로하여 서울대학교 자동화시스템 공동연구소 FMS라인의 가공셀에 공구파손 검출시스템을 구성하였다. Fig. 23은 개발된 시스템의 구성을 나타낸 것이다. Fig. 23에 나타난 바와 같이 시스템은 크게 CNC선반(DAEWOO PUMA-6J), 가공공정 및 이상검출시스템 제어용 메인컴퓨너 PC#1, AE와 절삭력의 A/D변환 및 검출알고리즘을 수행하는 DSP보드가 설치된 컴퓨터 PC#2, 공작물의 탈, 장착과 척 교환작업을 수행하는 로봇과 로봇 콘트롤러, AE측정장치, 절삭력 측정장치로 구성된다. 여기서 PC#1은 RS422, RS232C를 이용하여 CNC선반, 로봇 및 PC#2와 서로 통신이 가능하게 접속이 되어있다. 내장형 절삭력센서는 앞서의 해석을 통하여 최적 위치로 선정된 터렛하우징과 베드의 접합부에 삽입구멍을 가공한 후 설치하였다. PC#2는 공구파괴검출시 DSP보드의 아날로그 I/O를 통하여 CNC 선반에 비상정지 신호를 보내어 가공을 중지시키는 동시에 PC#1에 그 결과를 보고하게 된다. 절삭력과 AE신호는 측정시스템을 거쳐 PC#2에 내장된 DSP보드로 보내지며 여기서 A/D변환, 각종 신호처리 및 이상판정 과정을 거쳐 그 결과가 PC#2의 화면에 표시되도록 하였다. Fgi. 24의 순서도는 구성된 검출시스템의 작동순서를 나타낸 것이다.

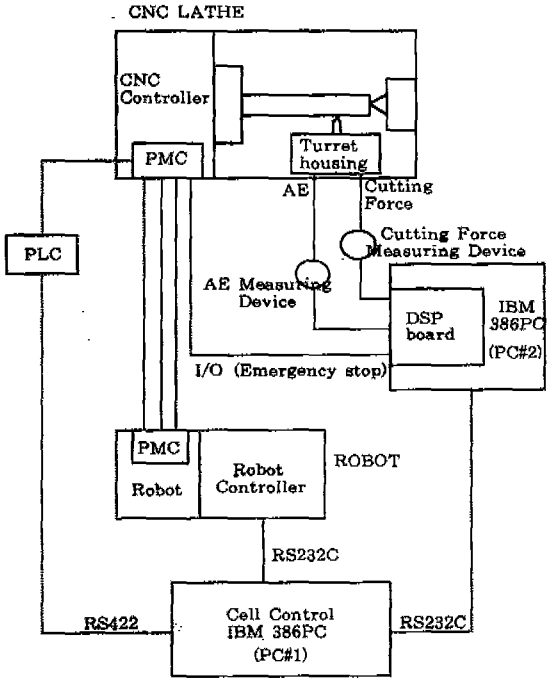


Fig. 23 Tool breakage detection system for CNC lathe

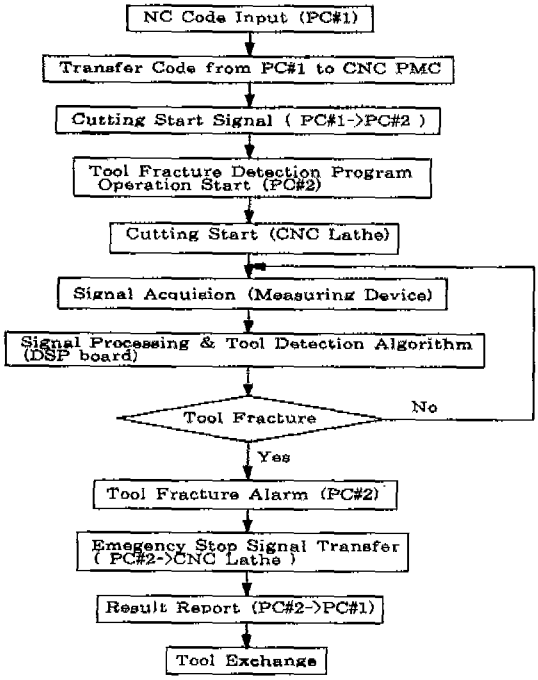


Fig. 24 Flow chart for operation of tool breakage detection system

구성된 검출시스템의 성능을 평가하기위하여 16회의 실험을 수행하였다. 절삭조건을 5가지로 변화시키면서 동일한 조건당 3차례의 공구파손 검출을 시도하였다. 실험에 사용된 절삭조건과 검출결과는 Table 2에 나타낸 바와 같다. 사용된 NC선반(PUMA-6J)이 소형이므로 피이드의 조절여하에 따라서 인써트의 파손을 일으키지 못할 경우도 있었다. 총 15회중 공구 파손이 13회 일어났고 2회는 정상적으로 작업이 이루어졌다. Table 2에서 보다시피 공구파손 현상을 완벽히 검출할 수 있었다.

6. 결 론

절삭공정의 자동화를 위하여 필수적인 공구파손의 검출에 관한 연구를 수행하였다. 기존 연구에서 주로 사용된 하나의 센서로부터 단순정보를 얻는 방법을 탈피하고 절삭력과 AE의 상호보완적인 정보를 이용하기 위하여 공구파손에 따른 이들 신호의 특징적인 변화를 살펴보았다. 또한 기존의 비실용적인 절삭력 계측방법인 공구동력계 대신 내장형 압전센서를 이용한 절삭력 계측방법을 제시하였으며 이의 효용성을 검토하였다. 이

Table 2 Experimental result for system performance evaluation

cutting speed (m/min)	depth of cut (mm)	fracture	detection
100	0.5	●	◉
	1.0	●	◉
	1.5	○	◉
120	0.5	●	◉
	1.0	●	◉
	1.5	●	◉
150	0.5	●	◉
	1.0	○	◉
	1.5	●	◉
170	0.5	●	◉
	1.0	●	◉
	1.5	●	◉
200	0.5	●	◉
	1.0	●	◉
	1.5	●	◉

● fracture ○ no fracture ◉ detect

를 기초로 하여 실시간 공구파손 검출알고리즘을 개발하고 FMS라인에 실제 시스템을 적용하여 본 결과 우수한 검출 성능을 검증할 수 있었다.

7. 참고문헌

1. Dornfeld, D.A., 1990, "Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring", Annals of the CIRP, Vol.39, pp.101-105
2. Martin, K.F., Brandon, J.A., Grosvenor, B.I. and Owen, A., 1986, "A Comparison of In-Process Tool Wear Measurement Methods in Turing", Proc. 26th Int. Machine Tool Design and Research Conf., pp. 289-296
3. Tlusty, J., Masood, Z., 1978 "Chipping and Breakage of Carbide Tools", ASME Journal of Eng. for Ind., Vol.100, pp.403-412
4. Lan, M.S. and Dornfeld, D.A., 1984, "In-Process Tool Fracture Detection", ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.106, pp.111-118
5. Emel, E. and Kannatey-Asibu, Jr.E., 1988, "Tool Fracture Monitoring in Turning by Pattern Recognition Analysis of AE Signals", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.110, pp.137-145