

# 이송모터 전류신호의 패턴특성을 이용한 밀링공구의 파손검출

김 선 호\*, 안 중 환\*\*, 박 화 영\*

## Tool Breakage Detection using Pattern Characteristics of Feed Motor Current in Milling Operations

Sun-ho KIM\*, Jung-hwan Ahn\*\*, Hwa-young Park\*

### ABSTRACT

This paper is concerned with effective and reliable tool breakage detection method using pattern characteristics of feed motor current in milling operations. Correlation coefficient is derived from the feature vector of signal for two consecutive which are extracted feed motor current over three spindle revolutions. The changing pattern of correlation coefficient is continuously compared to detect tool breakage and monitor cutting conditions. This proposed monitoring scheme is not affected by different tools, friction of motion, and varying cutting conditions and material shapes. Experimental results are presented to support the proposed monitoring scheme.

**Key Words** : Tool Breakage, Feed Motor Current, Pattern Characteristics, Correlation Coefficient

### 1. 서 론

오래전부터 가공중 공구상태를 감시하기 위해 많은 연구가 수행되어 왔으며, 최근에는 공구재질의 내마모성이 향상됨에 따라 공구마모보다 돌발적으로 발생하는 공구파손을 검지하는 쪽으로 더 많은 관심이 쏠리고 있다.<sup>(1,2)</sup>

절삭정보를 얻기 위한 센서로는 공구동력계, 가속도계 그리고 AE(Acoustic Emission)등이 주류를 이루

고 있으나, 이들은 감시시스템을 실용화하기 위해 필요한 저가적, 내구성 그리고 유연성 측면에서 불리한 점이 많았다.<sup>(3)</sup> 이러한 점에서 전류센서를 이용한 모터전류 측정에 의한 공구 감시가 가장 실용 가능한 방법으로서 주목을 받고 있다.

지금까지 전류신호를 이용한 공구상태 감시에 관한 연구를 살펴보면, 전류측정 방법은 주로 초기에는 저항을 이용한 방법, CT(Current Transformer)를 이용한 방법이 주류를 이루었으나, 최근에는 홀(Hall)소자

\* 한국기계연구원 자동화연구부

\*\* 부산대학교 정밀기계공학과

를 이용해 전류를 측정함으로써 초기의 전류센서에서 문제가 되어 왔던 신뢰성, 민감성이 크게 향상 되었다.<sup>(4)</sup> 또한, 모터전류 측정에서 응답시간 지연이 문제가 되어왔으나,<sup>(5)</sup> 최근에는 모터 구동기 및 센서기술의 발달로 응답시간 지연은 7-8ms 이내로 측정이 가능해졌다.<sup>(6,7)</sup> 이러한 전류신호를 이용한 감시는 선삭의 경우 레벨감시에 의해 부분적으로 실용화도 이루어졌다.<sup>(8,9)</sup>

밀링가공중 절삭신호를 얻기 위한 전류신호로서 주축 모터전류와 이송축 모터전류가 있다. 주축의 경우 동력 전달부의 기어박스 때문에 관성력이 대단히 크고, 또한 공구의 직경에 비해 용량이 커서 민감성 및 밴드폭(Bandwidth)이 이송축의 경우에 비해서 대단히 낮다. 따라서 모터전류를 이용한 밀링 가공감시에서는 이송축 모터전류쪽이 더욱 유리하다고 알려져 있다.<sup>(10,11,12)</sup>

단, 밀링감시의 경우 반드시 고려되어야 할 사항으로 선삭과는 다른 몇가지 특성을 가지고 있다. 즉, 회전중첩(Chip)의 두께변화 및 각 팁(Tip)의 마모상태 및 체결오차가 절삭력에 영향을 준다. 또 대부분의 밀링가공에서는 공작물의 형상과 가공조건이 자주 변화하며, 공구가 회전하는 가공 메카니즘 때문에 센서의 설치위치 선정이 어렵다. 특히 셀(Cell) 단위로 운용되는 머시닝 센터에서는 공작물이 팔렛(Pallet) 단위로 이동되기 때

문에 센서의 선택 및 설치위치 선정이 더욱 불리하다.

본 연구에서는 실용적이고 신뢰성이 높은 밀링공구의 파손검출방법에 대해서 연구하였다. 이송축 모터전류 신호를 주축 3회전 주기로 특징벡터로 추출하여 연속되는 두개의 특징벡터 사이의 상관계수를 구한 뒤, 상관계수의 변화 패턴을 비교함으로써 파손을 비롯한 공구의 상태를 검출하였다. 이 방법은 레벨감시의 단점인 한계값 설정이 필요없고 이송계의 마찰특성, 가공조건의 변화 그리고 소재형상의 영향을 받지 않아서 작업조건 변화가 다양한 밀링공정에서의 공구 파손검출에 유용하다는것이 입증되었다.

## 2. 밀링공정의 특성과 전류신호

### 2.1 실험장치

절삭실험에는 수직형머시닝센터(대우중공업, FZ25)가 사용되었다. 머시닝센터의 주축은 7.5KW의 AC 서보모터, X, Y 이송축은 1.1KW의 DC 서보모터 그리고 Z 이송축은 1.8KW의 DC 서보모터로 구동된다. 가공물은 S45C(ANSI 1045+)가, 공구는 직경 25mm의 T.A.형 엔드밀 홀더(Sumitomo CME 2025)와 초경합금 P30(Sumitomo MDMM52R) 팁이 사용되었

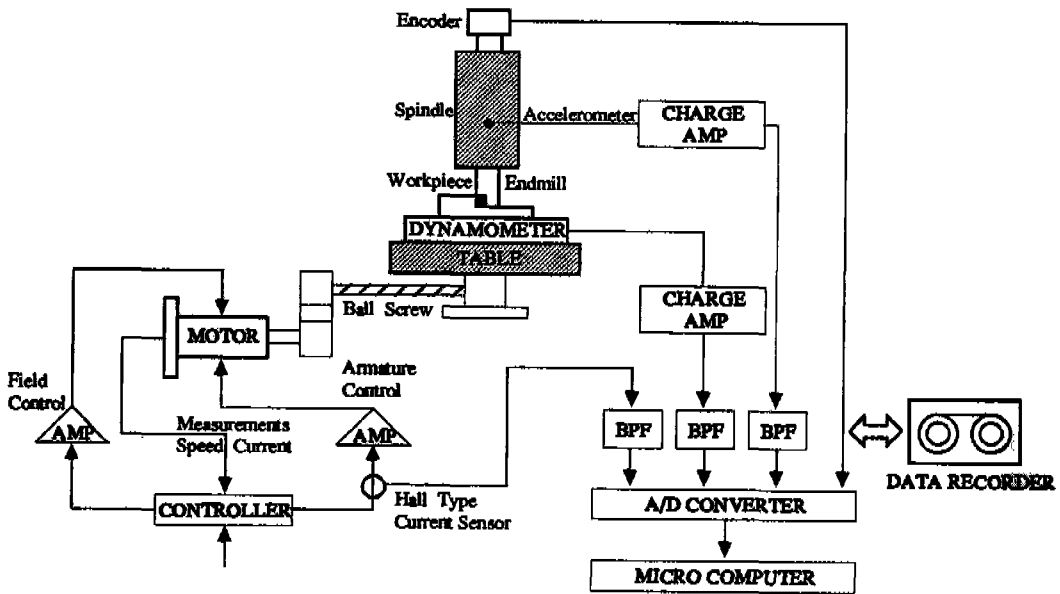


Fig. 1 Experimental Setup

Table 1 Specification of Experimental Apparatus

Vertical Machining Center	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Daewoo FZ25</li> <li>· Controller:FANUC 11MA</li> <li>· Capa. of Spindle Motor:7.5Kw</li> <li>· Capa. of X and Y axis Motor:1.1Kw</li> <li>· Capa. of Z axes Motor:1.8Kw</li> </ul>
Workpiece	<ul style="list-style-type: none"> <li>· ANSI 1045+</li> </ul>
Tool	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 2 Flute Endmill</li> <li>· Holder: Sumitomo CME 2015</li> <li>· Tip: P30(Sumitomo MDMM52R)</li> </ul>
Sensors	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Tool Dynamometer: Kistler 9265</li> <li>· Accelerometer: B&amp;K4383</li> <li>· Current Motor: Hall Type</li> <li>· Encoder: 500PPR(Autonics)</li> </ul>

다. 주축 회전수는 780rpm으로 고정시키고 이송속도와 절삭깊이 (Rd) 절삭폭 (Ad)을 변화시켜 가면서 실험을 하였다. 센서로는 Fig. 1과 같이 테이블에 설치된 3축 공구동력계 (Kistler 9265), 주축의 베어링 표면에 부착된 가속도계 (B&K 4383), 이송축 모터와 드라이버 사이에 설치된 홀 (Hall)형 전류센서 그리고 주축과 직결시킨 엔코더 (500PPR)의 4개 센서를 사용했다. 공

구동력계 및 가속도계는 전류센서의 성능을 확인하기 위한 기준신호 센서로 그리고 주축에 부착된 엔코더는 주축의 매 회전을 확인하고 A/D 변환의 간격을 결정하는 동기신호 센서 (500PPR)로서 사용했다. 각 신호들은 적류 및 전하증폭기를 통해 적절한 신호로 변환하고 데이터 기록계 (Data Recorder (Racal V Store 8)에 저장했으며, 재생시 저주파 통과 필터를 사용한후 A/D 변환기를 통해 신호를 처리했다. 필터의 차단 주파수는 500Hz이고, A/D 샘플링 주파수는 1,300Hz(주축 1회전당 100점)이다. 이에 대한 내용을 Table 1에 정리하였다.

### 2.2 밀링공정의 특성과 전류신호

본 연구의 실험에 사용된 공구는 Fig. 2와 같이 두 날 (Two Tips) 엔드밀로서 이 공구가 절삭 회전하면 절삭시작점 (ENP), 소성변형구간 (ENP-EXP) 그리고 절삭종료점 (EXP)이 회전당 2번씩 반복된다.

Fig. 3은 공구동력계로부터 측정된 이송방향 절삭력과 홀형 전류센서로부터 측정된 이송모터 전류의 특성을 비교한 것이다. 이론적으로 공구에 걸리는 절삭력과 모터의 부하 토크 (Torque)는 비례하며, 또한 모터의 부하 토크와 모터의 부하전류는 비례한다. 그림에서

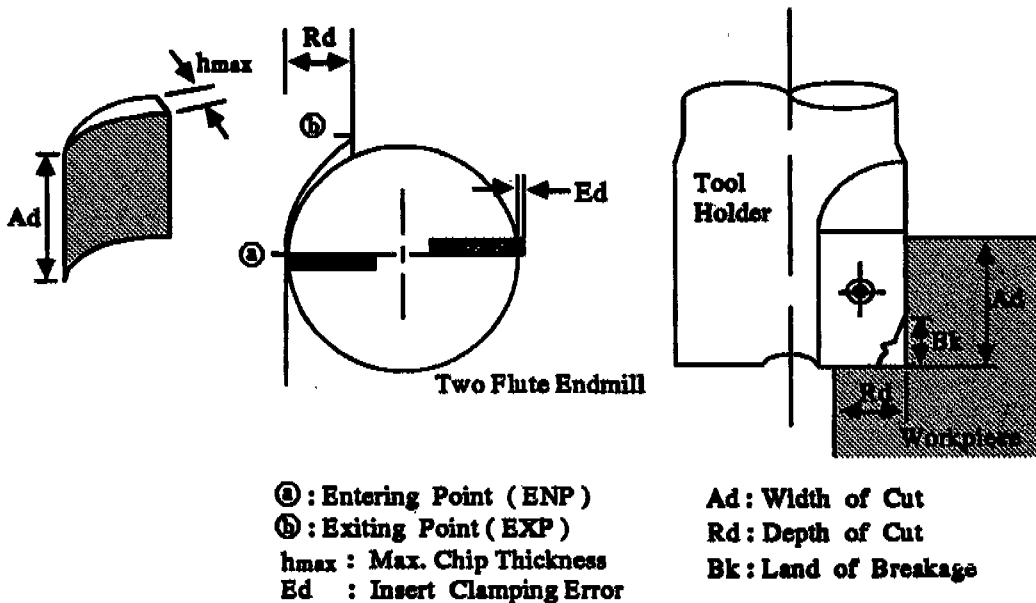


Fig. 2 Geometry of the Tool and Ideal Chip Generation Mechanism

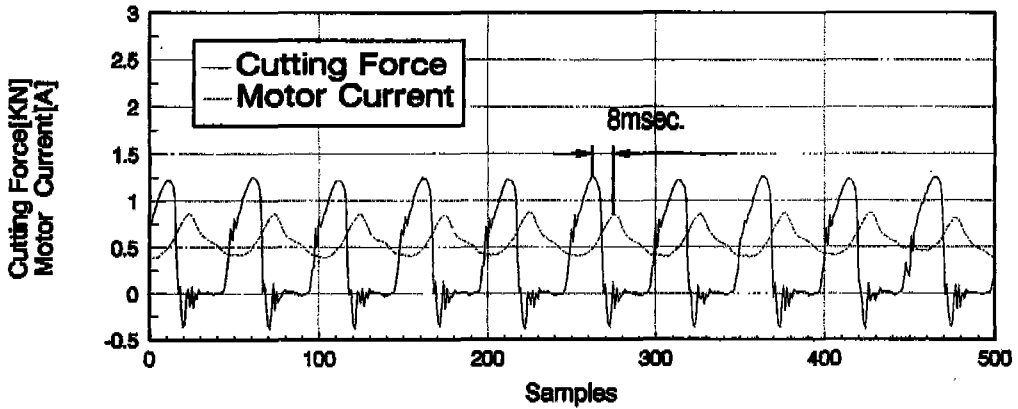


Fig. 3 Comparison Between Feed Directional Cutting Force and Feed Motor Current (780rpm, Rd:6mm, Ad:6mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

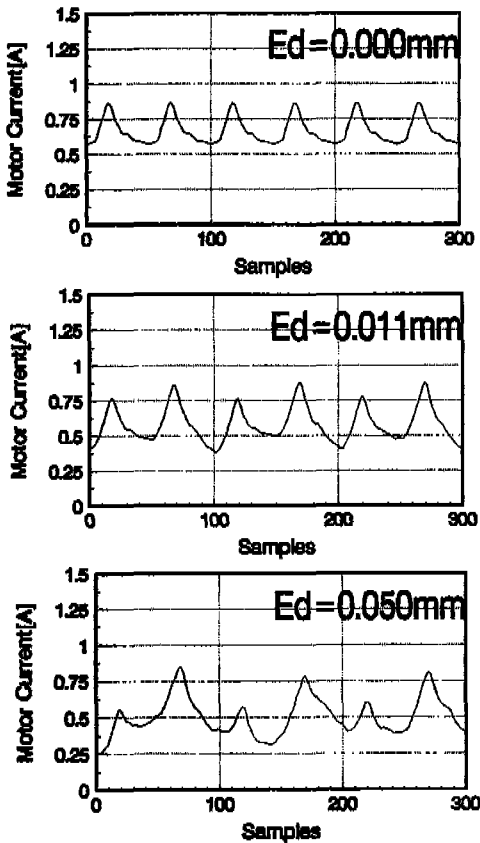


Fig. 4 Patterns of Feed Motor Current with Variations of Tip Clamping Error (780rpm, Rd:6mm, Ad:6mm, Feedrate:100 mm/min, Sampling Rate: 1300Hz)

보이듯이 공구동력계로 측정된 절삭력과 부하전류는 약 8ms 정도의 시간지연을 가지지만 패턴은 유사하다. 그러나 공구가 공작물을 빠져 나오는 순간 절삭력은 민감하게 회복되지만 부하전류는 관성력에 의해 완만하게 회복되는 특성을 갖는다.

밀링에서 절삭력 또는 이에 비례하는 전류신호의 크기는 각 텃이 제거하는 칩(Chip)의 크기에 비례하며, 칩의 크기에 영향을 주는 인자로서는 주축 편심량, 텃의 체결 정밀도, 절삭조건, 마모상태, 공구홀더의 정밀도, 그리고 텃 자체의 가공 정밀도등이 있다. 예를들어, 본 실험에 사용된 텃의 경우, 반경 방향 크기가  $9.525 \pm 0.075\text{mm}$ 이지만 실험시 칩의 최대두께  $t_{max}$ 는  $0.065\text{mm}$ 이다. 이것은 텃의 허용공차량에 따라서 칩의 두께가 변할수 있음을 보여준다. Fig. 4는 동일한 절삭 조건일지라도 체결오차에 따라 각 텃의 전류신호가 달라지는 것을 나타낸다. 기하학적으로 두께의 텃이 갖는 원의 중심이 일치한다면 ( $E_d = 0.0\text{mm}$ ) 1회전에 나타나는 전류신호가 동일한 레벨과 패턴을 갖는다. 그러나 Fig. 4에 보이듯이 체결오차를 가질때는 정상 텃이라 하더라도 두 텃간에는 레벨뿐 아니라 패턴도 달라진다. Fig. 5는 밀링가공중 가공물의 형상변화와 절삭조건 변화에 따른 전류신호의 변화를 나타낸다. Fig. 6은 이송속도 변화에 따른 전류신호의 변화를 나타낸다. 이러한 특성으로 인해 밀링의 경우 단순히 절삭신호의 레벨로써 공구상태를 감시하는 방법은 높은 신뢰도를 기대하기 어렵다.

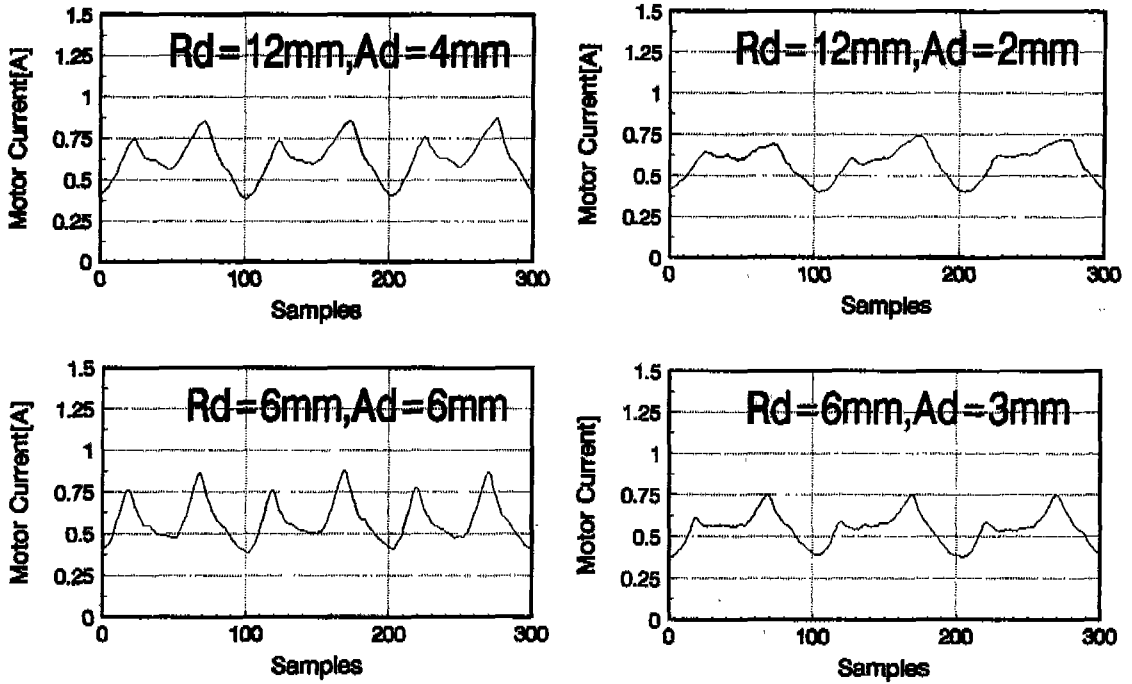


Fig. 5 Patterns of Feed Motor Current with Variations of Cutting Conditions (780rpm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

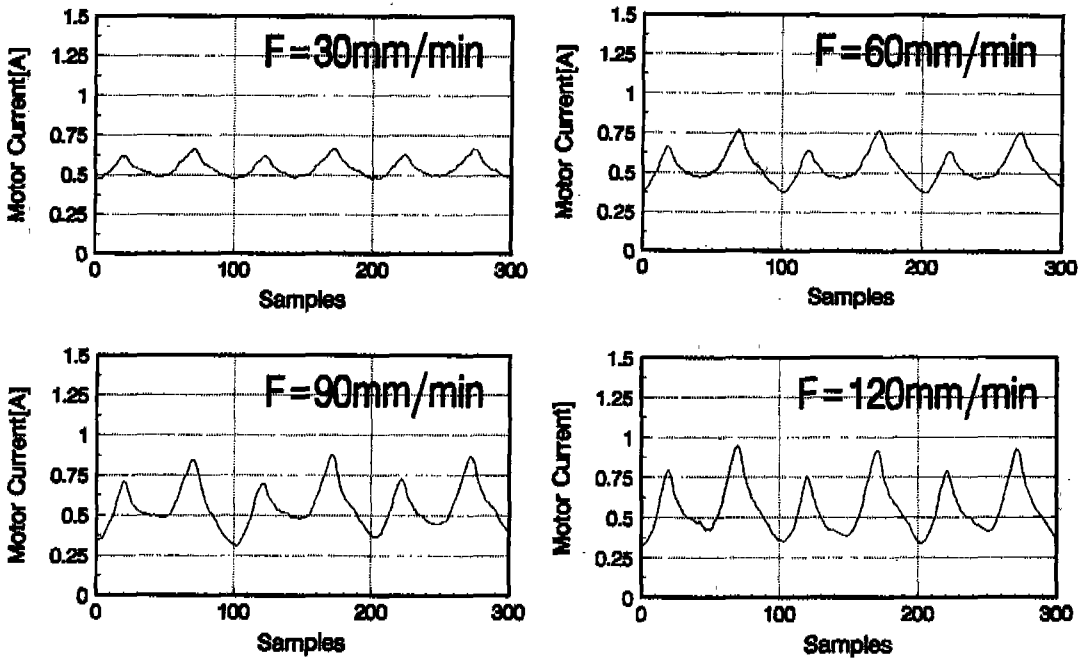


Fig. 6 Patterns of Feed Motor Current with Variations of Feedrate (780rpm, Rd:6mm, Ad:7mm, Sampling Rate:1300Hz)

### 3. 상관계수법에 의한 밀링공구의 파손감시

밀링공구의 파손을 검출하기 위해서는 단순한 레벨값 시로서는 효과적인 감시가 어렵고, 다음과 같은 밀링공정의 특징이 반영되는 감시방법이 필요하다.

- ① 밀링공구의 절삭력 패턴은 각 텃의 상태(체결상태, 마모상태)의 영향을 받는다.
- ② 가공물 형상 및 가공조건의 변화에 따라 절삭력 패턴도 변한다.
- ③ 전류신호에 구동계의 마찰특성이 포함된다.
- ④ 공구가 회전하기 때문에 절삭력 패턴은 주기적인 특성을 갖는다.

Fig. 7은 전류신호의 패턴속에 공구의 파손정보가 들어 있는지 없는지를 확인하기 위한 실험결과를 나타낸 것이다. 공구가 파손이 되면 파손공구에는 파손크기 만큼 제거칩량이 줄어들고 반면에 다음에 오는 정상공구에는 그 만큼 제거칩량이 증가하여 파손크기에 따라 전류신호 패턴의 변화도 분명히 나타난다. 그림에서 보듯이 파손크기가 증가하면 할수록 부러진 텃의 특성은 없어지고 패턴의 특성은 더욱 명확해진다.

이러한 밀링공구의 특성을 고려하여 본연구에서는 이송축모터 전류신호를 주축 3회전당 단위신호로 끊어서 k-1번째 단위신호와 k번째 단위신호 사이의 상관도를 비교하는 즉, 상관계수(Correlation Coefficient)를 이용한 공구파손 감시방법을 제안한다.

상관계수는 두개의 단위신호에 대한 상관도를 나타내는 것으로서, 이 값이 클수록 유사성이 높으며 동일한 함수인 경우 1이 된다. 각 단위신호를 n개의 데이터로 A/D 변환해서 n차 특징벡터(Feature Vector)로 나타내면 k-1번째의 단위신호의 특징벡터  $\overline{C}_{k-1}$ 는  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 이고, k번째의 특징벡터  $\overline{C}_k$ 는  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ 이다. 이들 신호 사이의 상관계수 r은 다음 식과 같다.

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \right) \left( \frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \right)$$

$\bar{x}, \bar{y}$  : k-1, k번째의 특징벡터 성분의 평균

$S_x, S_y$  : k-1, k번째 특징벡터 성분의 표준편차

본연구에서 대상으로 한 전류신호의 경우 공구날이 두개이므로 주축 1회전당 두개의 피크(Peak) 값을 갖는

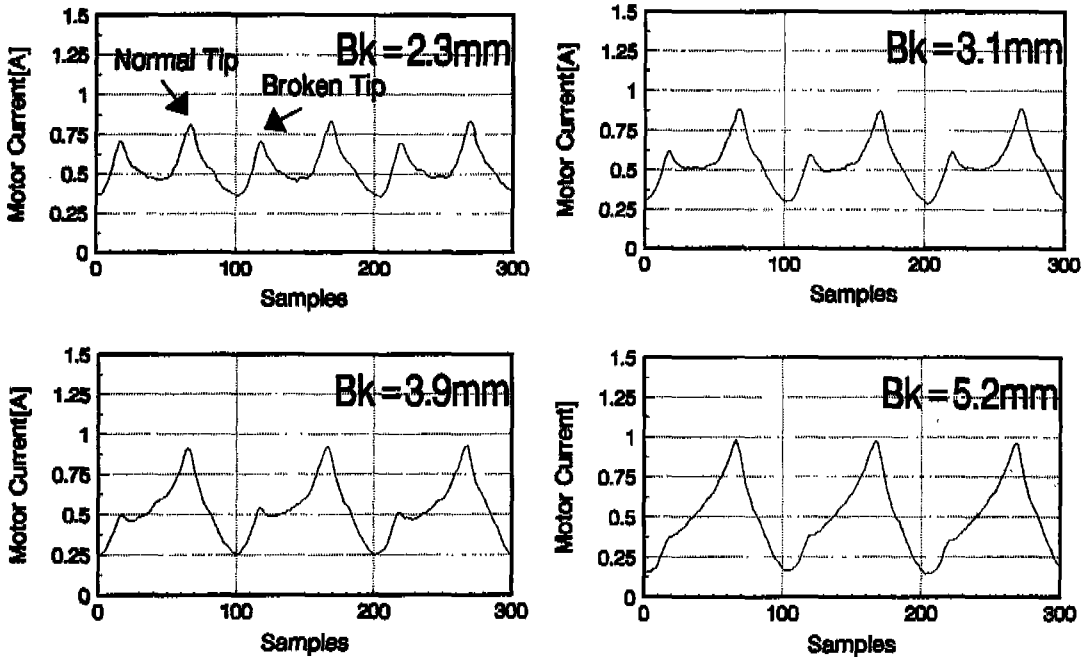


Fig. 7 Patterns of Feed Motor Current with Variations of Tool Breakage Land (780rpm, Rd:6mm, Ad:6mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

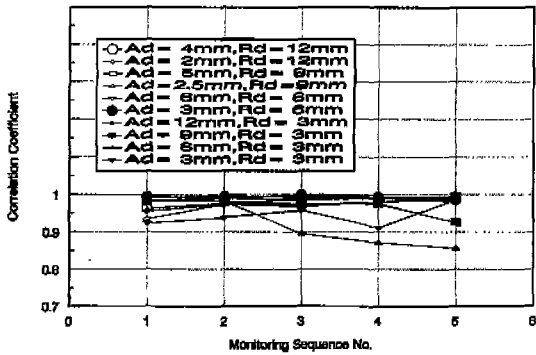


Fig. 8 Correlation Coefficients for Normal Current Signal with Different Cutting Conditions

다. 공구가 파손 또는 이상이 발생한 경우 전류신호의 특성상 두개의 피크값에 대한 평균값은 비슷하나 피크값의 차이는 상대적으로 커진다. 이와같은 전류신호에 상관계수를 적용시키면 그 값은 0.6-1.0 정도의 값이

된다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 몇가지의 서로 다른 절삭조건에서 정상공구의 전류신호에 대해 상관계수비교법의 유효성을 보이기 위해 10가지의 서로 다른 절삭조건에 대해 상관계수법을 적용시킨 것이다. 그림에서 보이듯이 상관계수는 1에 거의 근접되어 있으나, 절삭폭 Ad, 절삭깊이 Rd가 작아서 절삭칩의 크기가 작은 경우에는 상관계수의 변동이 비교적 크게 나타난다. 이것은 이송계의 구동 마찰력이 절삭력보다 더 중요한 인자로 작용하기 때문으로 생각된다.

밀링에 대한 공구감시를 하는 경우, 얻어진 절삭신호가 공구파손에 의한 것인지 아니면 다른 원인에 의한 것인지를 구분할 필요가 있다. 밀링가공중 모터부하가 증가하지만 공구파손과 식별해야 할 경우를 다음의 5가지 정도로 상정할 수 있다.

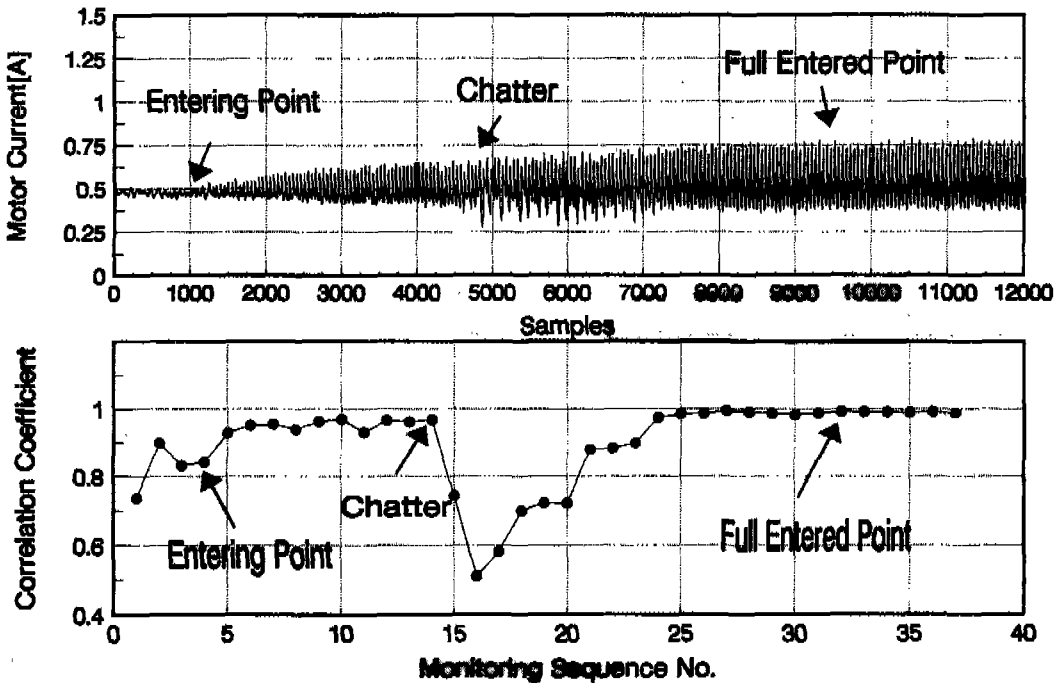


Fig. 9 Change of Feed Motor Current and Correlation Coefficient at the Entrance into the Workpiece (780rpm, Ad:6mm, Rd:6mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

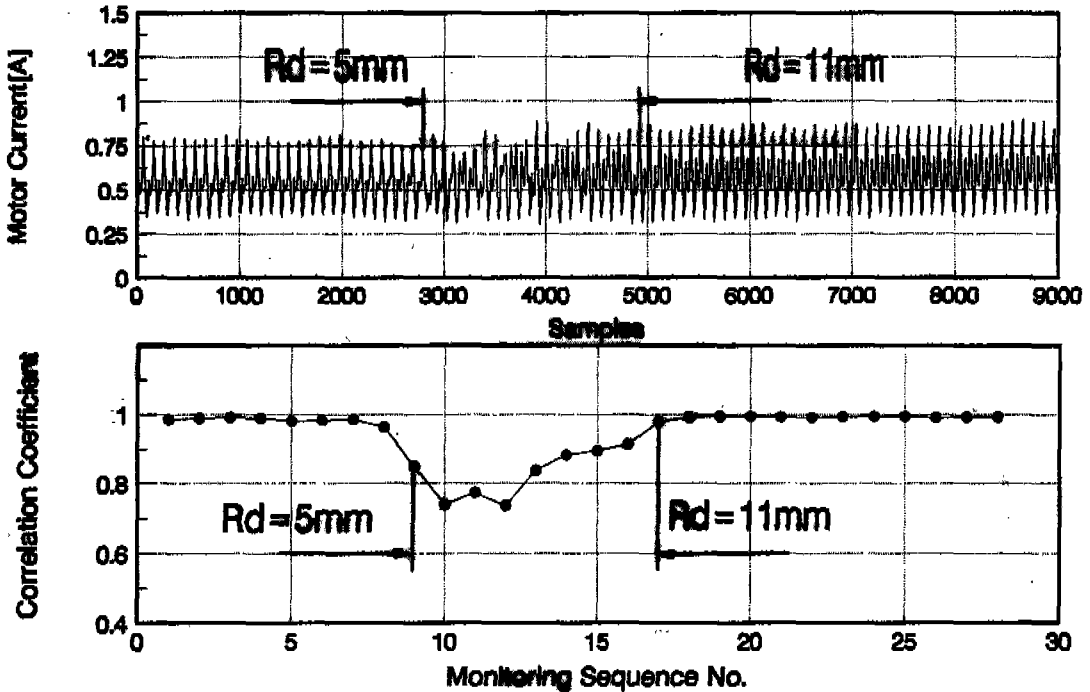


Fig. 10 Change of Feed Motor Current and Correlation Coefficient with Changing Depth of Cut (Rd).  
(780rpm, Ad:4mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

- ① 가공을 위해 공구가 공작물에 들어갈때,
  - ② 공작물의 형상변화에 따라 절삭폭(Ad)이 증가할때,
  - ③ 공작물의 형상변화에 따라 절삭깊이(Rd)가 증가할때,
  - ④ 이송속도(F)가 증가할때,
  - ⑤ 채터등의 이상절삭 현상이 발생할 때,
- 등이다.

Fig. 9는 공구가 무부하 상태에서 가공을 위해 공작물에 들어가는 순간의 전류신호와 이것에 상관계수법을 적용시킨 것이다. 공구가 공회전시에는 무부하 전류신호의 파형으로 인해 상관계수법 적용시 변동이 크지만 절삭이 시작되면 절삭신호의 주기성에 의해 1에 근접한다. 또한 공구가 공작물에 완전히 들어가는 시점에서는 상관계수의 변동이 없다. 이상에서 보듯이 절삭깊이 0mm인 무부하 상태에서 공구가 공작물에 완전히 들어갈때(절삭깊이 6mm)까지 전류신호의 레벨은 증가하지만, 채터가 발생하는 영역을 제외하면 상관계수는 1에 근접한다. 따라서 가공을 위해 공구가 공작물에 들어갈때는 절삭신호 레벨은 증가하지만 상관계수는 1에 접근

하는 패턴을 가진다.

Fig. 10은 가공물의 형상변화에 따라 가공중 절삭깊이가 5mm에서 11mm로 증가하는 경우의 전류신호와 이것에 상관계수를 적용시킨 것이다. 이때는 절삭깊이의 변동구간이 짧기 때문에 과도절삭의 특성을 갖는다. 따라서 공작물의 형상변화에 따라 절삭깊이가 증가할때 상관계수는 급격히 작아졌다가 완만히 증가하며 변화가 끝나면 상관계수는 1에 근접하는 패턴을 가진다.

Fig. 11은 가공중 절삭폭이 2mm에서 5mm로 증가하는 경우에 대한 전류신호와 이것에 상관계수법을 적용시킨 것이다. 절삭폭의 변화가 시작되는 점과 종료되는 점에서 상관계수의 변화가 있는데 이에 대한 상관계수의 패턴은 Fig. 9와 유사하다. 절삭폭의 변화와 동일하게 두점에서의 상관계수는 급격히 작아졌다가 완만히 증가하는 특징을 갖는다.

Fig. 12는 절삭중 이송속도가 변경되는 순간에 대한 전류신호와 이것에 상관계수를 적용시킨 것이다. 단속 절삭의 경우 1개의 텀이 짧은 시간 동안 공작물과 접촉하기 때문에 이송속도의 변경시 전류신호의 레벨이 완



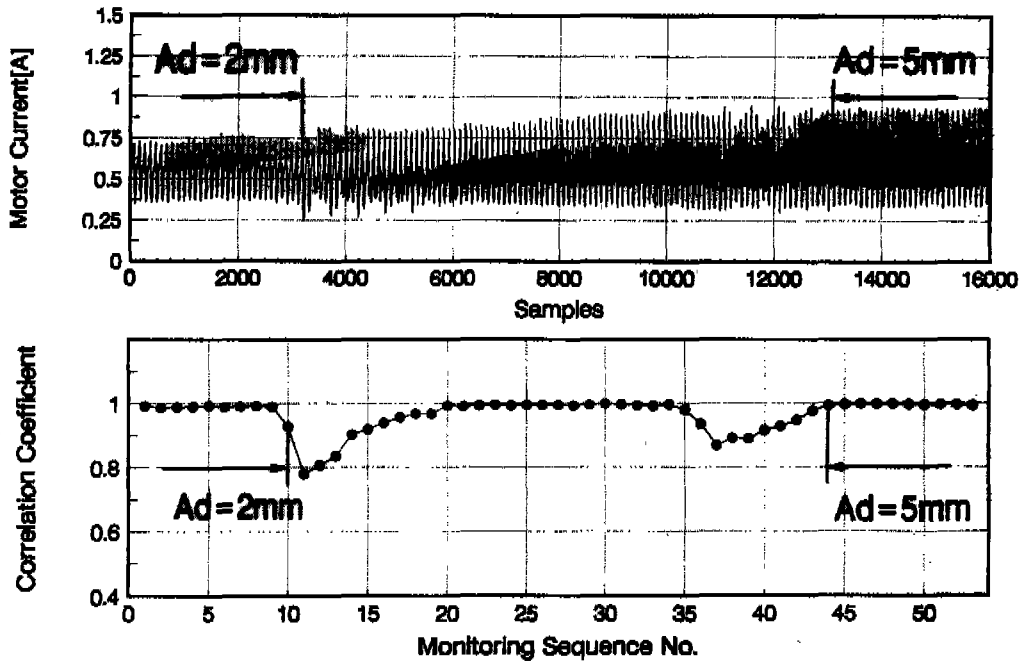


Fig. 11 Change of Feed Motor Current and Correlation Coefficient with Changing Width of Cut(Ad)  
(780rpm, Rd:10mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

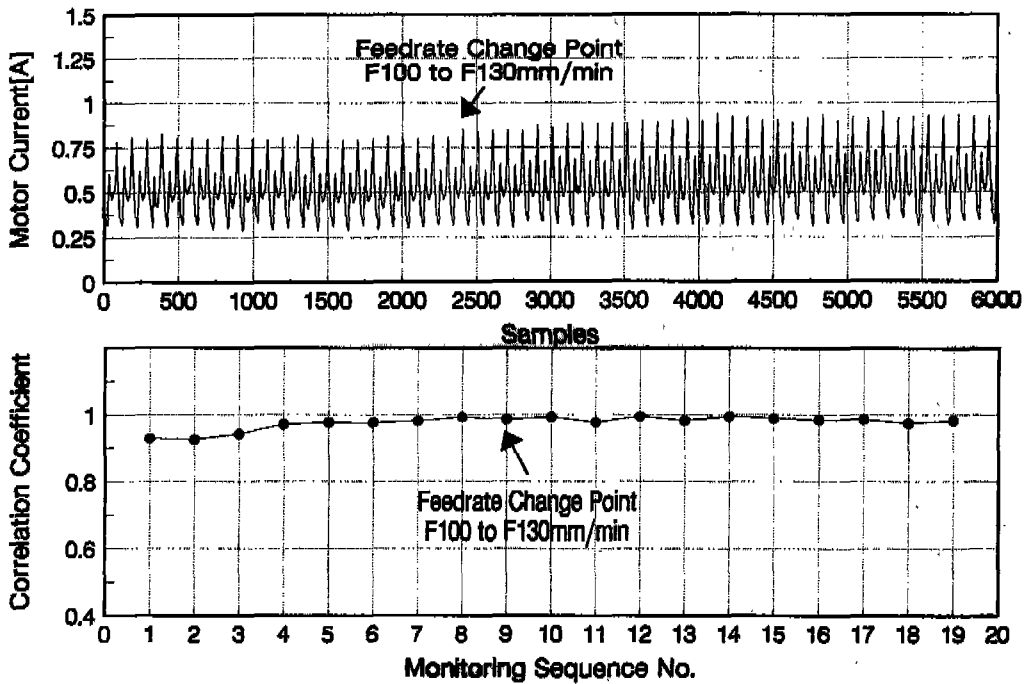


Fig. 12 Change of Feed Motor Current and Correlation Coefficient with Changing Feedrate  
(780rpm, Ad:6mm, Rd:5mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

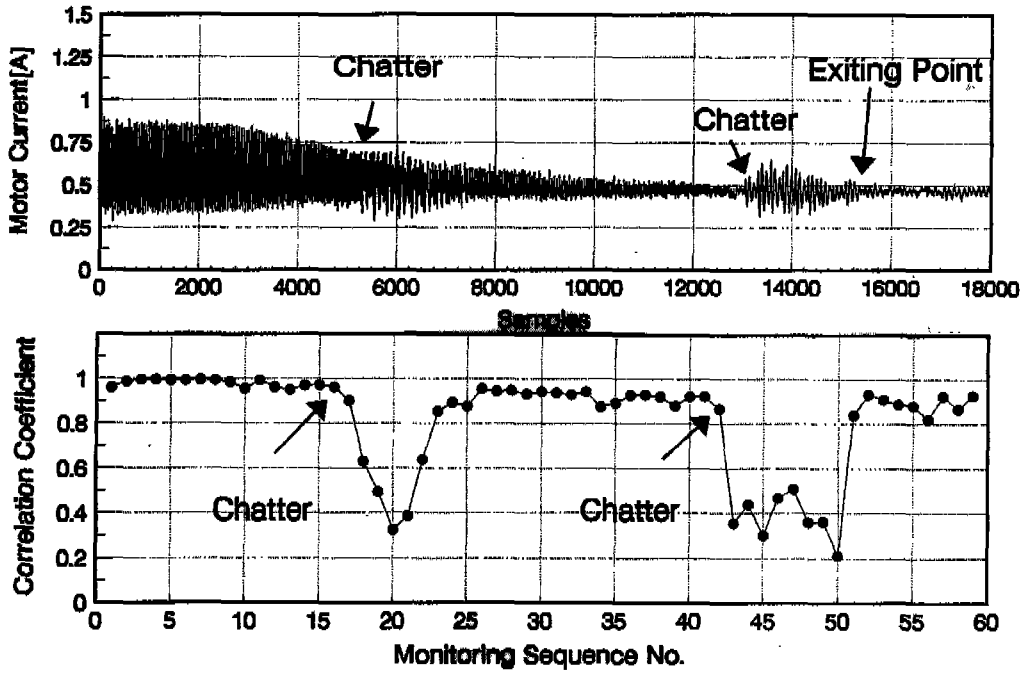


Fig. 13 Change of Feed Motor Current and Correlation Coefficient at the Exit the Workpiece (780rpm, Ad:6mm, Rd:9mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

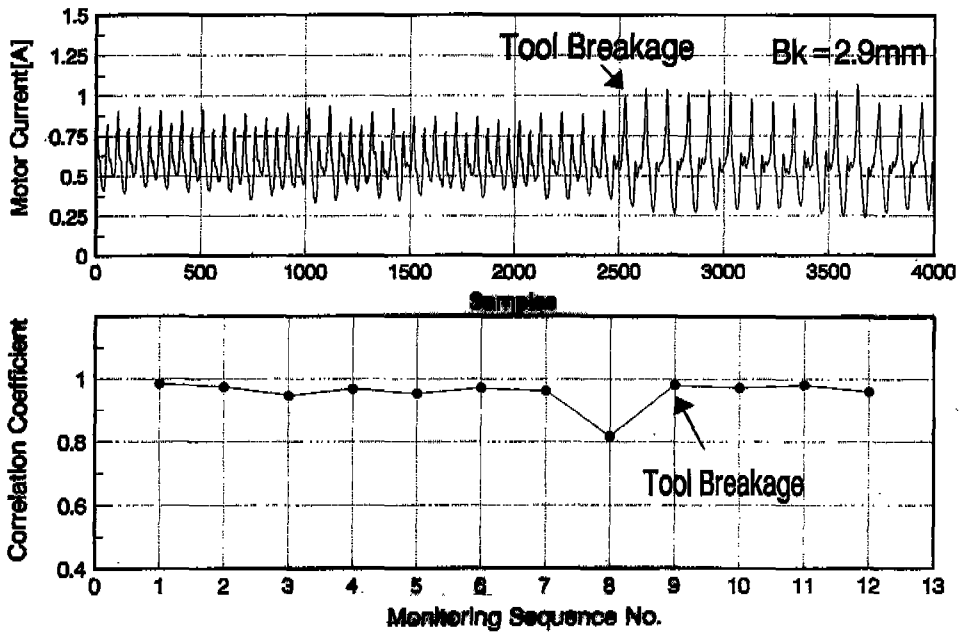


Fig. 14 Change of Feed Motor Current and Correlation Coefficient with Tool Breakage (780rpm, Ad:5mm, Rd:8mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

만하게 증가하며 이는 상관계수에 영향을 주지 않는다.

Fig. 13은 가공이 종료되는 시점 즉, 공구가 공작물을 빠져 나오는 과정에서 채터가 발생한 경우에 대한 전류신호와 이것에 상관계수법을 적용시킨 것이다.

채터구간에서는 상관계수가 감소하지만 채터의 제거

와 함께 상관계수도 다시 1로 회복되는 패턴을 갖는다.

Fig. 14는 공구가 부러지는 순간에 대한 전류신호와 이것에 상관계수법을 적용시킨 것이다. 공구가 부러지기 전과 부러진 후에는 전혀 다른 신호패턴을 갖는다. 그러나 공구가 부러지는 경우는 앞의 5가지 경우와는

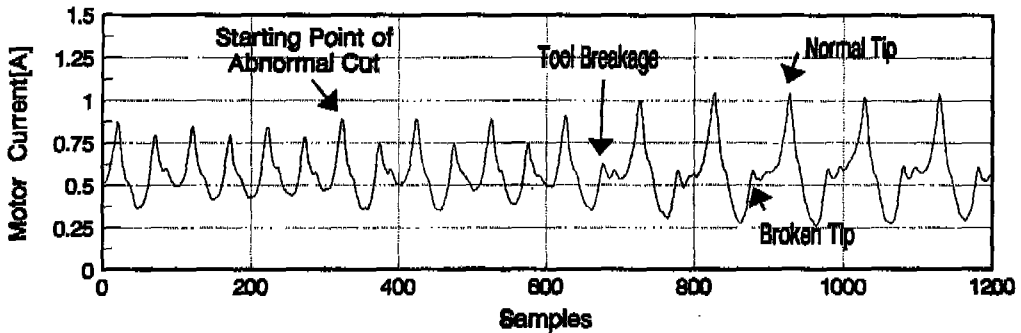


Fig 15. Detailed Pattern of Feed Motor Current before and after Tool Breakage  
(780rpm, Rd:5mm, Ad:8mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

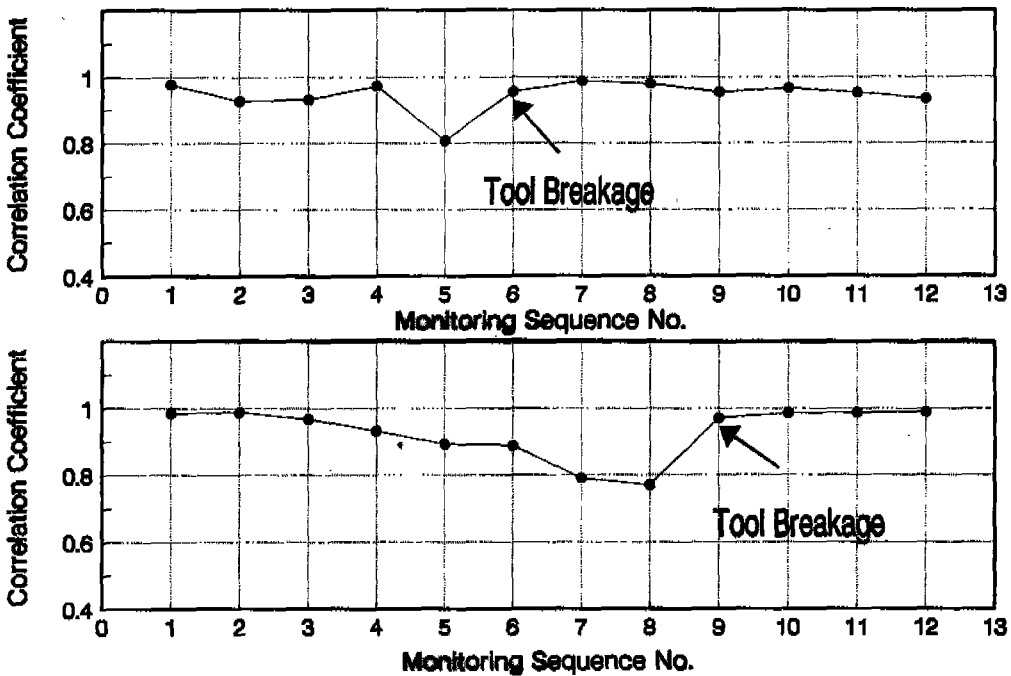


Fig. 16 Correlation Coefficient Patterns for Tool Breakage with Different Cutting Conditions.  
(Top: Bk:2.6mm, 780rpm, Rd:8mm, Ad:5mm, Feedrate:100mm/min, Bottom: Bk:2.6mm, 780rpm, Rd:8mm, Ad:4mm, Feedrate:100mm/min)

달리 짧은 시간(약 3회전 정도)내에 패턴이 바뀌기 때문에 공구가 부러진 후 즉시 상관계수가 1로 회복되는 특성을 갖는다. Fig. 15는 Fig. 14에서 공구가 부러지는 순간에 대한 상세한 그림이다. 일반적으로 단인공구를 이용한 선삭의 경우 공구가 파손될때 순간적인 파손에 의해 부하가 급속히 증가했다 감소하는 특성을 갖지만, 밀링공구의 경우 한번에 부러지기 보다는 몇회전 정도의 과도절삭구간을 거치면서 부러지는것이 일반적이다. 따라서 상관계수법의 적용시에도 주축의 1회전 성분보다는 3회전 정도의 성분을 단위신호로 함으로써 좋은 결과를 얻었다. Fig. 16은 다른 절삭조건에서 공구파손이 발생했을때 상관계수법을 적용시킨 것이다. 그러나 Fig. 17과 같이 미소파손시에는 특징이 잘 나타나지 않는 단점이 있다.

공구파손을 포함하여 이상의 6가지 경우에 대한 상관계수를 정리하면 Fig. 18과 같다. 공구파손의 경우 상관계수 패턴은 급속히 상관도가 떨어졌다가 주축의 2-3회전내에 급속히 회복되지만, 가공물의 형상, 절삭조건 및 기타 이상현상이 원인인 경우는 그 원인이 제거될 때까지 상관도의 회복이 늦어지는 특징을 갖는다. 따라

서 공구파손의 경우는 이상현상과는 전혀 다른 상관계수 패턴임을 알 수 있다.

### 5. 결 론

머시닝센터에서 이송축 모터전류를 이용한 밀링공구의 파손을 검출하기 위해, 이송축 모터전류 신호를 주축 3회전 주기로 특징벡터로 추출하여 연속되는 두개의 특징벡터 사이의 상관계수를 구한 뒤, 상관계수의 변화 패턴을 비교하는 방법을 적용했다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 상관계수법은 밀링공구의 파손검출에 유효했으며, 공구파손시 상관계수 패턴은 다른 이상현상의 패턴과는 구별이 가능했다.
- (2) 파손감시의 경우, 제안된 방법은 주축 3회전 이내로 빠른 판정이 가능했다.
- (3) 제안된 상관계수법은 레벨감시의 어려움인 한계값 설정이 필요 없으며, 이송계의 마찰특성 그리고 소재의 형상에 영향을 받지 않는 장점이 있다.

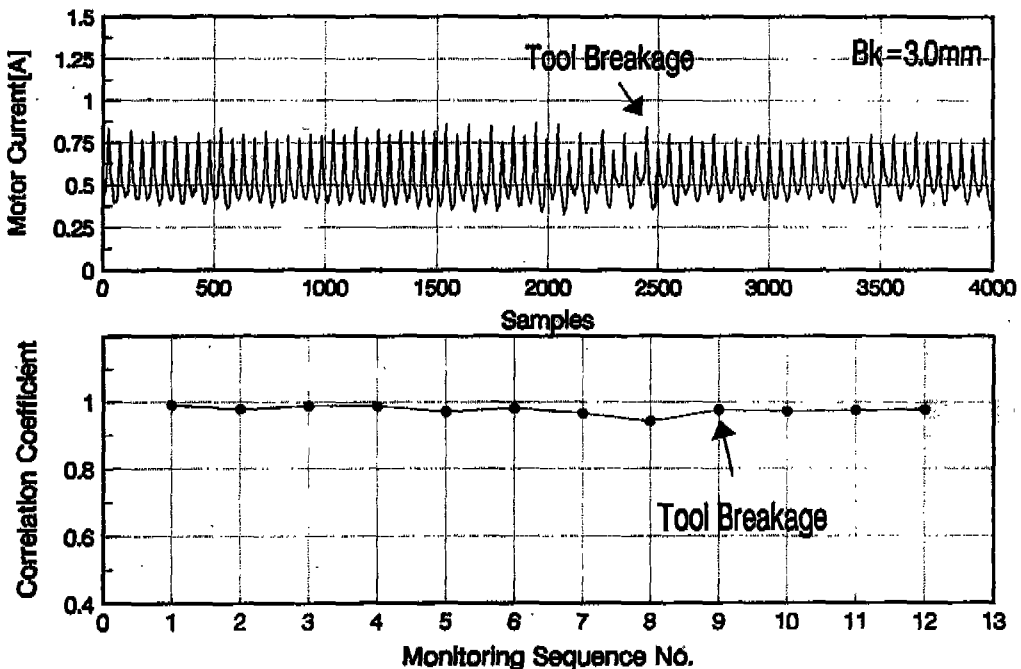


Fig. 17 Change of Feed Motor Current and Correlation Coefficient with Micro Tool Breakage (780rpm, Ad:9mm, Rd:4mm, Feedrate:100mm/min, Sampling Rate:1300Hz)

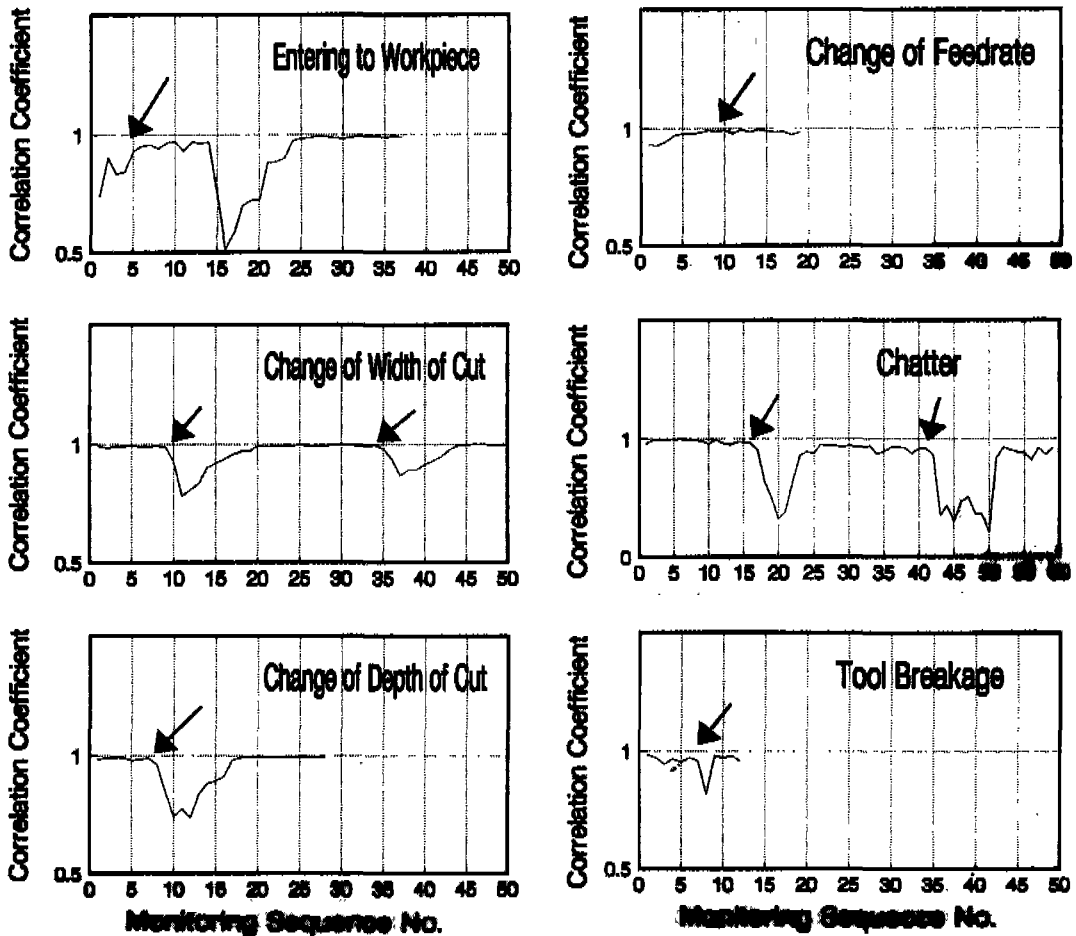


Fig. 18 Correlation Coefficient for Pattern Identification

## 6. 참고문헌

1. Powell, J. W., "In-Process Tool Sensing", Carbide and Tool J., Nov./Dec., pp.17-23, 1988
2. Weis, W. and Dornfeld, D., "WorkShop on Tool Condition Monitoring", 2nd Meeting of the CIRP Working Group on TCM, pp.28-30, Sept., 1993
3. Jetry, S., "Measuring Cutting Tool Wear On-Line : Some Practical Consideration", Manufacturing Engineering, July, pp.55-60, 1984
4. 김선호, 박화영, "형상과 가공조건 변화에 대응한 공구파손 감시방법" 한국정밀공학회춘계학술대회 논문집, pp.32-37, 광주 조선대, 1994. 5
5. Berr, L. D., "Power Consumption- A Measure of Tool Performance", Tech. Paper, SME, MR79-398, 1979
6. 金善浩, 朴和永, 宮澤伸一, 碓井雄一, "工具状態監視診断システムの知能化に関する研究(第1報) -工具破損時のセンサ信号の特徴-, 1993年度精密工學會秋季大會學術講演會論文集, pp.707-708, 日本 京都 京都大, 1993. 10
7. 金善浩, 安重桓, 朴和永, 宮澤伸一, 碓井雄一, "送りモータ電流信号のパターン識別による工具の破損検知 -

- 工具状態監視診断システムの知能化に関する研究 (第2報)-, 1994年度精密工學會春季大會學術講演會 論文集, pp.139-140, 日本 東京 東京大, 1994. 3
8. Kashimoto, M., Sakamoto, C., Wakai, H., Kado, S., and Mizutani, E., "Development of a Tool Breakage Detection System (Success in Making a Fully-Automatic Flexible Manufacturing Cell)", Proc. of the CIRP Seminars, Manuf. Systems, pp.227-237, 1983
  9. Mannan, M. A., and Broms, S., "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements", Annuals of the CIRP, Vol.38, No.1, pp.347-350, 1989
  10. Stein, J. L., and Shin, K. C., "Current Monitoring of Field Controlled DC Spindle Drives", Proceeding of the Winter Annual Meeting of the ASME, PED Vol.33, pp.57-66, 1988
  11. Matsushima, K., Bertok, P., and Sata, T., "In-Process Detection of Tool Breakage by Monitoring the Spindle Motor Current of a Machine Tool", Measurement and Control for Batch Manufacturing ASME, pp.14-19, 1982
  12. Altintas, Y., "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements", Trans. of the ASME, J. of Eng. for Ind., Vol.114, pp.386-392, 1992