

# 엔드밀 변위에 의한 공구파손검출

이 승 일\*, 맹 민 재\*, 정 준 기\*\*

## Tool Fracture Detection by End Mill Deflection

Seung-Il Lee\*, Min-Jae Maeng\*, Joon-Ki Chung\*\*

### Abstract

End milling experiments are conducted to investigate characteristics of laser beam signals due to tool fracture. The laser beam signals are obtained with adapt focusing of tool. Tool states are identified with scanning electron microscopy and optical microscopy. It is demonstrated that the laser beam signals provide reliable informations about the cutting processes and tool states. Moreover, tool fracture can be detected successfully using coefficient of variation.

Keywords : End Milling(엔드밀 가공), Laser Beam(레이저 빔), Focusing(초점), Fracture(파손), Coefficient of Variation(변이계수).

### 1. 서론

엔드밀 가공은 CNC머시닝센터에서 슬롯, 포켓, 표면 가공 등 다양한 형상 가공을 하기 위하여 사용하고 있다. 특히 금형 제작에 있어서는 가공정밀도가 중요하기 때문에 엔드밀을 통한 고정밀도 가공을 이루어야 한다. 고정밀도 가공에는 공구이상상태를 인프로세스(In-process) 상태에서 검출하는 생산시스템의 도입이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 인프로세스 측정을 위해서는 가장 절실하게 요구되는 것이 감시기술의 개발이다. 특히 엔드밀 변위에 의한 파손, 칩핑 등과 같은 공구이상상태는 가공품의 품질 및 정밀도에 치명적인 영향을 미치고 나아가

서는 생산성을 저하시키는 결과를 초래한다. 이러한 공구 이상상태를 측정하는 연구가 매우 활발히 진행되는 것은 필수적이라 하겠다.

Shiraishi<sup>(1-2)</sup>는 인프로세스 측정에서 레이저 빔을 이용하여 공작물의 표면 거칠기 측정 및 공구의 이상상태 검출에 관한 연구내용을 발표하였다. 그 후로 레이저를 이용하여 공구 이상상태 검출에 관한 방법<sup>(3-6)</sup>을 제시하였다. 그러나 신뢰성 있는 진단 방법이 적은 실정이다. 본 연구에서는 밀링가공시 엔드밀의 변위를 레이저 빔을 이용하여 공구변위 측정의 신뢰성 있는 정보 취득의 가능성을 검증하기 위해 이론식과 측정식에 의한 직접측정방법으로 비교하였다. 이에 대한 신뢰성 검증을 통해 얻은 결

\* 홍익대 대학원

\*\* 홍익대 기계공학과

과를 기초로 절삭력 증가에 따른 공구변위의 정도를 정량적으로 측정하고, AE신호도 비교하였다. 변이계수는 칩두께, 절삭방향, 절삭속도에 크게 영향을 받지 않는 장점이 있다. 이러한 특징을 이용하여 공구파손 감지를 위해서 이용하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 엔드밀 변위를 인프로서스 검출하여 엔드밀 공정 중에 공구 파손을 자동으로 감지할 수 있는 방안을 도출하는 것이다.

## 2. 실험장치의 구성 및 방법

### 2.1 실험장치 구성

Fig. 1은 엔드밀 가공 중에 공구변위와 파손을 검출하기 위해 CNC머시닝센터(Tongil H. I.-TNV40A)에 부착한 실험장치의 구성을 보여준다. 레이저(OFV-302 Optical head) 초점은 회전방향에 맞추고, AE센서(PAC-R15)는 공작물 측면, 공작물은 공구동력계(Kistler-9257B) 위에 설치하였다. 기타 실험장치는 레이저 진동계 시스템(OFV-2600 Controller), 레코더(TAC-Wr9000), 디지털인디케이터(Mitutoyo CE 543-250), 충전증폭기(Kistler-5019A), 전치증폭기(PAC-1220A), AE신호처리장치(LOCAN 320-AT) 등이다. 절삭공구는 2날 솔리드형 고속도강 표준 엔드밀( $\phi 10\text{mm}$ ), 공작물은 일반 구조용 탄소강(SM45C)과 공구용 합금강(KP4M)을 사용하였다. 절삭날은 주사전자현미경(Hitachi-S-2700)으로 촬영하였다.

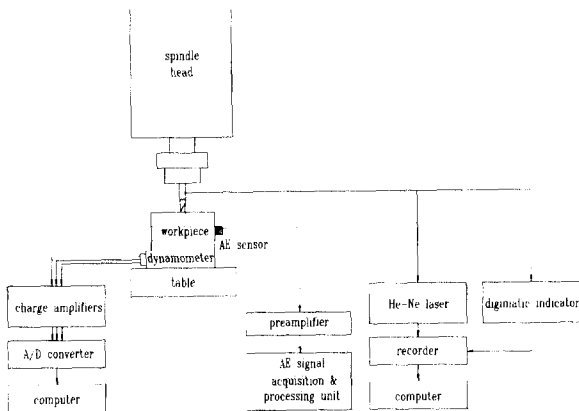


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

### 2.2 실험방법

실험은 3단계로 수행되었다. 첫단계에서는 레이저 진동계를 통해 검출한 변위값의 신뢰성 있는 정보 취득의 가능성을 검증하기 위해, 엔드밀의 집중하중을 받는 외팔보로 가정하여 이론 방정식을 만들어서 산출된 값과 비교하여 이에 대한 신뢰성 검증을 하였다. 두 번째 단계에서는 이를 통해 얻은 결과를 기초로 엔드밀의 절삭력 증가에 따른 공구변위의 정도를 정량적으로 측정하였다. 실험은 32가지의 절삭조건, 즉 절삭속도  $V=20, 25\text{m/min}$ , 이송속도  $f=60, 80, 100, 120\text{mm/min}$ , 축방향 절삭깊이  $da=2, 4\text{mm}$ , 반경방향 절삭깊이  $dr=5\text{mm}$ 에 대하여 SM45C를 상향 및 하향절삭하면서 수행되었다. Fig. 2는 절삭방향(상향 및 하향절삭)과 절삭 3분력의 방향을 보여준다. 마지막 단계에서는 공구파손시 공구변위의 특징적 변화를 검출하였다. 실험의 절삭조건, 즉  $V=20\text{m/min}$ ,  $f=60\text{mm/min}$ ,  $da=2\text{mm}$ ,  $dr=5\text{mm}$ 에 대하여 KP4M을 하향절삭하면서 수행되었다.

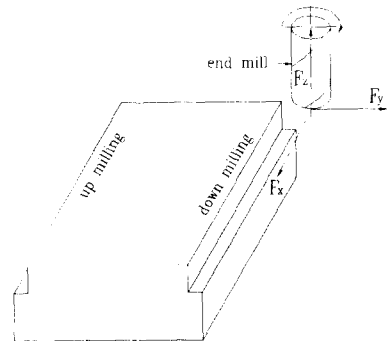


Fig. 2 Cutting force components in end milling ( $F_y$ =principal cutting force,  $F_x$ =feed force,  $F_z$ =vertical force)

### 2.3 신호처리

레이저진동계에서 검출된 신호는 대역필터 200-500Hz에서 여과한 후 1ms 간격으로 레코더에 입력하였다. 입력된 데이터를 보정하여 컴퓨터에서 처리하였다. 변이계수는 0.1sec 단위로 블록화 하여 획득하고 변이계수를 산출하였다.

촉침식 인디케이터에서 검출된 신호는 1ms 간격으로

레코더에 입력하였다. 입력된 데이터를 컴퓨터에서 처리하였다.

공구동력계에서 충전증폭기를 거쳐 출력된 절삭 주분력의 신호는 1.5ms의 간격으로 검출하여 컴퓨터에 입력하였다. 입력된 절삭 주분력 신호에 대하여 연속적인 50개의 피크 값을 취하여 절삭력의 평균값을 계산하였다.

AE센서에서 검출된 신호는 전치증폭기에서 40dB 증폭하고 주파수 영역 100-300kHz에서 여파한 후 AE신호 처리장치에 입력하였다. 입력된 AE신호를 신호처리장치내의 주증폭기에서 20dB 증폭한 후 0.1μs 간격으로 검출하였다. 검출된 AE신호가 50ms 동안에 경계 값(threshold value) 100mV를 통과하는 횟수를 검출하여 AE count를 산출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 공구변위 측정의 신뢰성

Fig. 3은 상향 및 하향절삭시 절삭속도, 칩두께, 축방향 절삭깊이의 변화에 따른 공구 변위의 변화를 보여준다. 밀링작업에서는 칩의 두께가 절삭속도와 이송속도 모두의 영향을 받으므로, 이송속도 대신 평균 칩두께를 절삭변수로 사용하였다. 상향 및 하향절삭시 평균 칩두께  $t_{up}$  과  $t_{down}$  은 다음의 식으로 계산하였다.<sup>(7)</sup>

$$t_{up} = \frac{f_d d_r}{L_u}, \quad t_{down} = \frac{f_d d_r}{L_d} \quad (1)$$

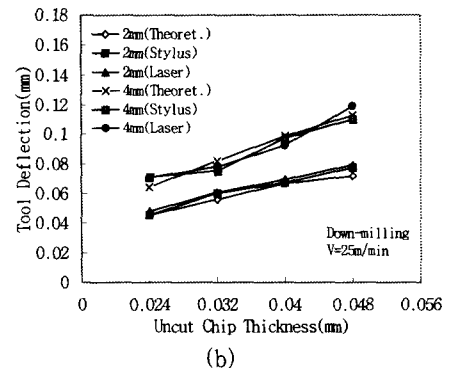
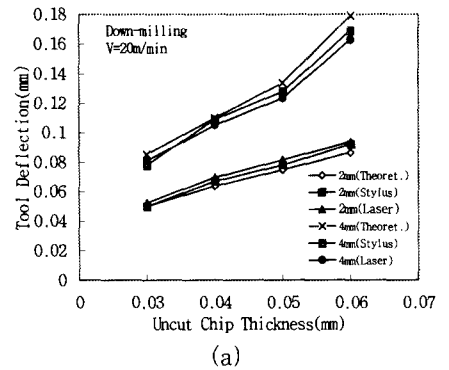
여기서,  $f_i$ 는 절삭날당 이송량을,  $d_r$ 은 반경방향 절삭깊이를 나타내며, 상향 및 하향절삭시의 칩길이  $L_u$ 와  $L_d$ 는

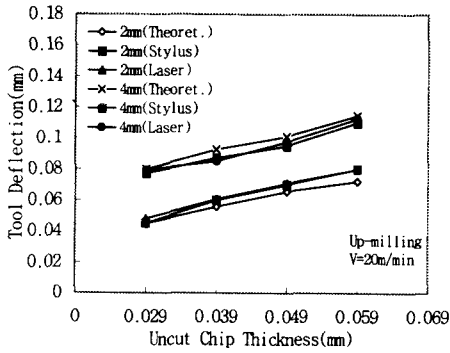
$$L_u, L_d = \frac{\pi}{180} R \cos^{-1} \left( \frac{R - d_r}{R} \right) \pm \frac{f_i}{2\pi R Z} (2Rd_r - d_r^2)^{0.5} \quad (2)$$

로 계산된다. 여기서,  $R$ 은 공구반경을,  $Z$ 는 날의 갯수를 나타내며, 양의 부호(+)는 상향절삭, 음의 부호(-)는 하향절삭의 경우이다. Fig. 3에 나타난 이론  $F_y$  축 엔드밀의 변위  $d_y$ 는 다음의 식으로 계산하였다.<sup>(8)</sup>

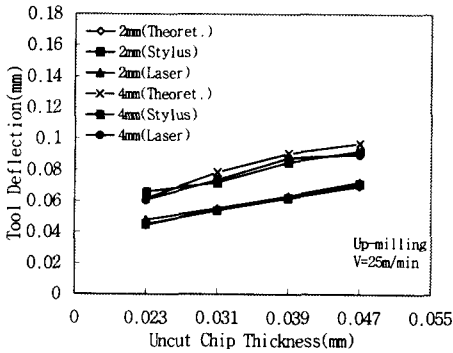
$$d_y = \frac{F_y}{6EI_y} (L_e^3 - 3L^2 L_e + 2L^3) \quad (3)$$

여기서,  $F_y$ 는 회전방향 절삭력,  $I_y$ 는 관성모멘트 ( $I_y = (D^4/48)$ )<sup>(9)</sup>,  $E$ 는 고속도강(HSS) 탄성계수 ( $2.068 \times 10^5$  MPa),  $L$ 은 유효길이(80mm),  $L_e$ 는 자유단으로부터 공구변위 검출점 거리(38mm)이다. Fig. 3은 칩두께와 축방향 절삭깊이가 증가하면 공구변위는 증가하지만 절삭속도가 증가하면 공구변위는 감소하며, 상향절삭에 비해 하향절삭시의 공구변위가 큼을 보여준다. 이론식으로 직접 계산한 결과와 측정식 및 레이저 신호에 의해 검출한 공구변위를 비교하였다. 32가지의 절삭조건에서 대하여 전체적으로 10% 내의 평균오차를 가지는 결과를 얻을 수 있다. 공구변위가 이론으로 계산한 경우 보다 실험에 의해 검출한 값이 약간씩 크게 나타남을 알 수 있다. 측정 오차를 감안하면 실험으로부터 얻은 결과에 대한 신뢰성은 거의 오차가 없는 좋은 결과를 얻었음을 알 수 있다. 따라서 절삭조건에 따른 절삭공구의 변위에 대한 인프로세스 검출의 가능성을 검토한 결과 각 절삭 변수들로 나타난 이론 엔드밀의 변위 값과 실험에 의한 엔드밀의 변위 사이에는 선형 관계의 성립으로 실험이 이론에 상당히 부합하고 있음을 확인할 수 있다.





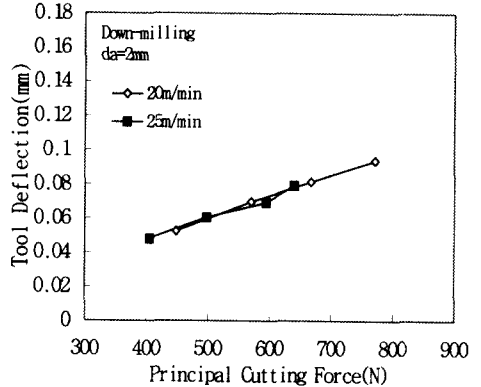
(c)



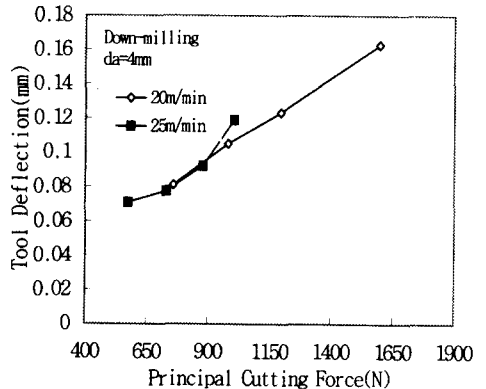
(d)

Fig. 3 Tool deflection versus uncut chip thickness, cutting speed, and axial cutting depth in: (a), (b) down milling, and (c), (d) up milling.

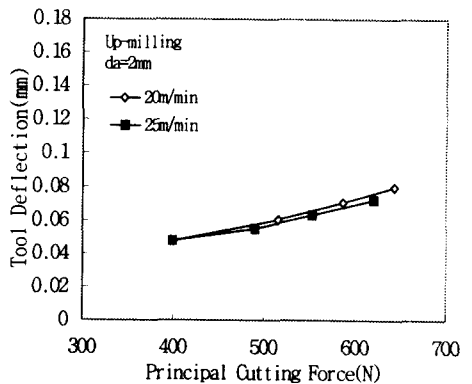
알고 공구변위에 의한 공구손상을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.



(a)



(b)

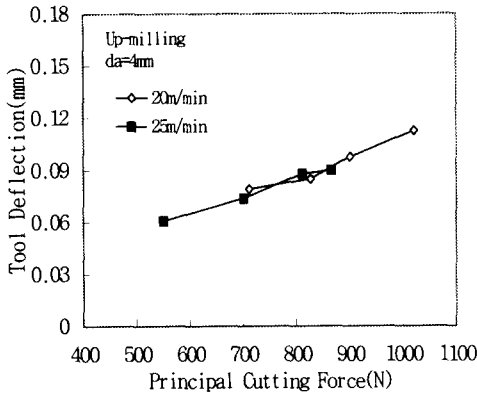


(c)

### 3.2 절삭력의 변화와 공구변위의 관계

밀링절삭에 대한 초기연구에서는 밀링절삭 과정을 운동학적으로 연구를 시작한 이래로 엔드밀 가공시 다양한 절삭조건이 절삭력과 공구변위에 미치는 영향을 예측하기 위해 많은 모델<sup>(10~11)</sup>들이 개발되었다.

Fig. 4는 절삭력의 변화에 따른 공구변위의 변화를 보여준다. 축방향 절삭깊이가 증가하면 절삭력 증가의 영향으로 공구변위가 증가함을 보여준다. 상향절삭에 비해 하향절삭시 칩두께가 증가하기 때문에 절삭력의 증가에 따른 변위가 증가한다. 절삭력이 증가함에 따라 공구변위는 선형적으로 증가한다. 절삭력이 공구변위에 중요한 요소임을 알 수 있다. 이상의 결과를 비교하면, 가공시 공작물에 작용하는 절삭력을 알면, 그 절삭력에 의해 공구의 변위를

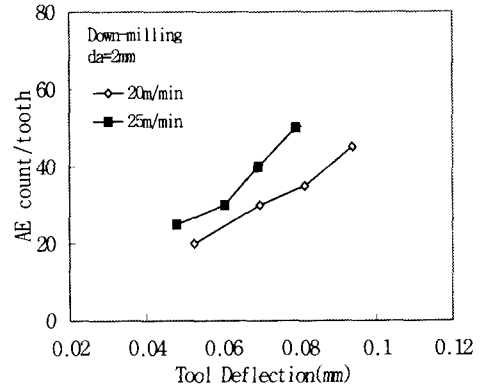


(d)

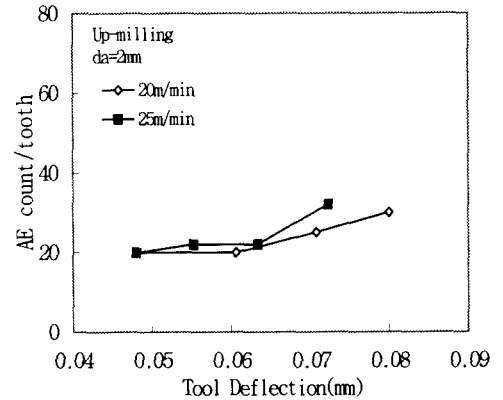
Fig. 4 Tool deflection versus principal cutting force, cutting speed, and axial cutting depth in: (a), (b) down milling, and (c), (d) up milling.

### 3.3 공구변위와 AE신호의 관계

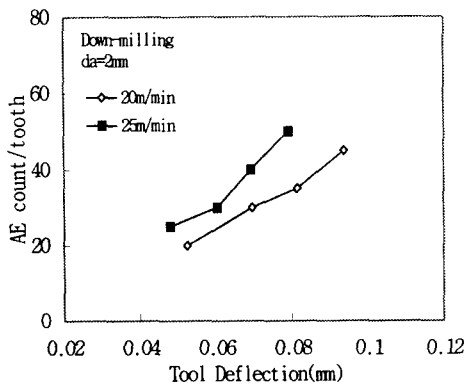
Fig. 5는 Fig. 4와 동일 조건에서 측정된 절삭날당 AE count의 변화를 보여준다. AE count rate 대신 절삭날당 AE count를 사용한 이유는 절삭속도가 변화하면 단위시간당 절삭에 관여하는 절삭 날의 갯수가 변화하기 때문이다. Fig. 5는 공구변위가 증가함에 따라 절삭날당 AE count는 증가한다. 절삭속도가 증가함에 따라 공구변위는 감소하지만 절삭날당 AE count는 증가한다. 상향절삭에 비해 하향절삭시 공구변위가 증가하고 절삭날당 AE count도 증가한다. 이상의 결과를 종합하면, 공구변위와 AE신호와의 관계도에서 공구변위는 AE count에 민감함을 알 수 있다.



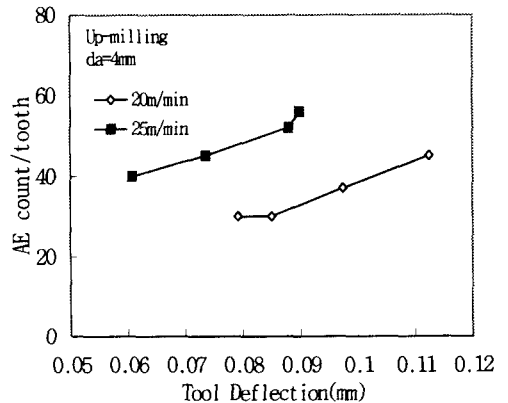
(b)



(c)



(a)



(d)

Fig. 5 AE count per tooth versus tool deflection, cutting speed, and axial cutting depth in: (a), (b) down milling, and (c), (d) up milling.

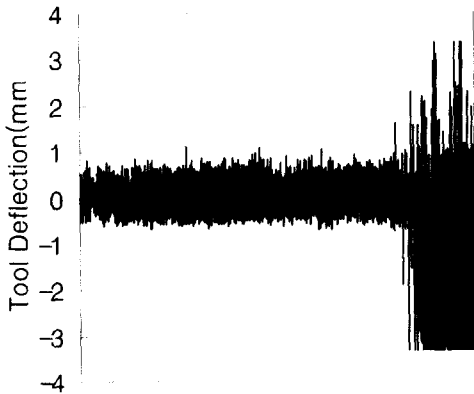
### 3.4 공구 이상상태 검출

밀링시 공구가 파손되면 공구변위도 증가하는데 이것을 공구상태감시에 이용할 수 있다. 절삭가공중 공구변위를 측정하여 파손과의 관계를 알아낼 수 있다. 공구의 마멸 및 파손은 절삭 날 형상의 변화를 통해 공구변위를 발생시키므로 공구변위를 통해 검출되는 레이저 빔의 신호는 공구 이상상태를 검출하는 신호로 신뢰성이 있다고 사료된다.

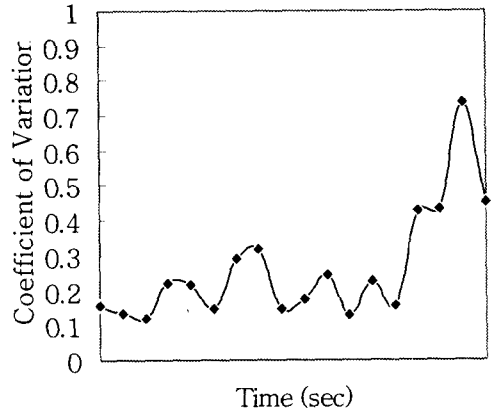
절삭조건은 절삭속도  $V=20\text{m/min}$ , 이송속도  $f=60\text{mm/min}$ , 축방향 절삭깊이  $da=2\text{mm}$ , 반경방향 절삭깊이  $dr=5\text{mm}$ 으로 파손을 쉽게 일으키기 위하여 비교적 경강인 공구용 합금강을 피삭재로 사용하였다. Fig. 6(c)는 파손 발생후 절삭날 상태를 촬영한 주사전자현미경(SEM) 사진이다. 절삭시간 약 10초경에서의 절삭날 상태를 보여준다. 파손은 공구내의 균열성장에서 기인되었음을 추정할 수 있다.<sup>(12-13)</sup> Fig. 6(a)는 공구파손으로 인한 공구변위를 표현하고 있다. 공구변위는 공구파손시점에 일시적으로 큰 변위를 나타내고, 그 이후에는 상대적으로 큰 변위를 계속적으로 나타내고 있다. Fig. 6(b) 변이계수는 공구 이상상태를 반영하는 정보를 제공할 것으로 예상된다. 변이계수  $V_c$ 는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$V_c = \frac{S}{\bar{x}} \quad (4)$$

여기서,  $\bar{x}$ 는 전체 데이터의 평균, 표준편차  $S$ 는



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Variation of tool deflection and coefficient of variation with cutting time in down milling KP4M at  $V=20\text{m/min}$  and  $f=60\text{mm/min}$

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n} \quad (5)$$

로 계산된다. 여기서,  $n$ 은 데이터 전체의 갯수,  $x_i$ 는  $i$  번째 데이터의 값이다.

공구파손의 판정기준을 Fig. 6(c)의 파손된 절삭 날 상태를 기준으로 하고 그 시점의 변이계수 값을 알아내어

공구파손시점을 검출하는 임계값으로 사용할 수 있다. 정상적으로 절삭이 이루어지고 있는 경우에는 변이계수의 값이 0.2~0.3정도로 변화하였는데, 공구변위가 증가하여 파손시 0.7정도로 증가하는 특징을 나타내었다. 이상의 결과를 종합·비교하면 다음과 같다. 공구파손시점을 감시하는 단계에서 변이계수의 임계값  $V_c$ 는 피삭재별이나 절삭조건에 변화에 독립적으로 임계값이 0.7정도를 벗어나지 않았다. 결론적으로, 엔드밀의 파손시점은 변이계수의 임계값을 이용함으로써 검출할 수 있음을 실험을 통하여 알 수 있다. 다른 절삭조건하에서도 정성적으로 유사한 결과를 얻었으므로, 대표적으로 한가지의 절삭조건에서 얻은 실험 결과만을 제시하였다.

#### 4. 결 론

밀링 가공시 레이저 빔을 이용하여 검출한 엔드밀 변위를 절삭력, AE신호, 절삭날 파손형태를 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 레이저를 통해 검출한 공구변위는 이론과 실험을 통해 비교한 결과 평균오차는 약 10% 이내로 신뢰성 있는 정보를 제공한다.
- (2) 절삭력과 공구변위 관계도에서 절삭력이 증가함에 따라 공구변위는 선형적으로 증가한다.
- (3) 공구변위에 대한 AE신호는 공구변위에 따라 큰 민감도를 나타낸다.
- (4) 공구변위에 의한 변이계수의 임계값을 이용하면 공구파손을 효과적으로 검출할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Shiraishi, M., "In-process Measurement of Surface Roughness in Turning by Laser ams", ASME Transactions, Vol. 103, pp. 203-209, 1981.
2. Shiraishi, M., "A Consideration of Surface Roughness Measurement by Optical Method", ASME Transactions, Vol. 109, pp. 100-105, 1987.
3. Hayashi, S. R., and Thomas, C. E., "Tool Breakage Detection by Monitoring Ultrasonic Vibrations", CIRP Annals, Vol. 37, No. 1 pp. 61-64, 1988.
4. Mitsui, K., and Sato, H., "Development of an In-process Sensor for Surface Roughness by Laser Beam", Proc. of 16th Int. MTDR. Conf. pp. 171-176, 1975.
5. Marot, G., and Fan, L. J., "The Workpiece Material-laser Interaction and the Laser-assisted Machining", CIRP Annals, Vol. 40, No. 1 pp. 91-94, 1991.
6. Giusti, F., and Santochi, M., "Development of a Fibre Optic Sensor for In-process Measurement of Tool Flank Wear", Proc. of 20th Int. MTDR. Conf. pp. 351-360, 1979.
7. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process", ASME Transactions, Vol. 67, pp. 233-251, 1945.
8. Timoshenko, S., and Goodier, J. N., "Theory of Elasticity", 2nd ed., McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 1951.
9. Vo, D. T., "Determination of the Equivalent Diameter of an End Mill Based on its Compliancer", CIRP Annals, Vol. 39, No. 1 pp. 93-96, 1990.
10. Kline, W. A., and Devor, R. E., "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling", ASME Transactions, Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, pp. 272-278, 1982.
11. Kline, W. A., and Devor, R. E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling", Int. Journal of Machine Tool Design Research, Vol. 23, pp. 123-140, 1983.
12. Takeyama, H., and Murata, R., "Basic Investigation of Tool Wear", ASME Transactions, Journal of Engineering for Industry, Vol. 85, pp. 33-38, 1963.
13. Okusa, K., Takahashi, H., and Nishizawa, M., "The Mechanism of High Speed Steel Tool Wear (3rd Report): Macroscopic Tool's Failure and their Factors", JSPE, Vol. 43, No. 7, pp. 777-783, 1977.

14. 맹민재, 조성산, 정준기, "엔드밀 밀링공구의 가공특성검출", 한국정밀공학회 '96년도 추계학술대회논문집, pp. 678-682, 1996.

15. 맹민재, 조성산, 정준기, "엔드밀 가공시 절삭력과 절삭유를 통해 전파된 음향방출을 이용한 공구파손검출", 한국정밀공학회지, Vol. 14, No. 11, pp. 163-170, 1997.