

## 볼 엔드밀링에서 열전대를 이용한 절삭온도 측정법

이득우\* · E.G.NG\*\* · D.K.Aspinwall\*\* · R.C.Dewes\*\*  
(1999년 9월 9일 접수)

### Measurement Technique of Cutting Temperatures Using Implanted Thermocouples in Ball End-Milling

Deug Woo Lee, E.G.NG, D.K.Aspinwall and R.C.Dewes

**Key Words:** Cutting Temperature(절삭온도), Implanted Thermocouple(삽입 열전대), Ball End-Milling(볼엔드밀링)

#### Abstract

In this paper, the measurement technique of cutting temperatures of shear zone using implanted thermocouples is proposed in ball end milling. K-type thermocouple implanted in the hole of workpieces is directly cut in order to measure temperatures of the shear zone in cutting process. Experiments are performed for a nickel based superalloy(Inconel 718) using a ball nose end mill. The results show that the cutting temperature in shear zone is about 320°C at the cutting speed of 90m/min with dry.

#### 1. 서 론

최근 산업의 발달과 더불어 금형 등 제품가공에 있어 절삭조건은 점점 고속화되어 가는 경향으로 이에 따라 고속가공에서는 열에 의한 여러가지의 문제가 발생하고 있다. 가공 중에 발생하는 절삭열은 공구수명을 감소시키며 가공면에 열영향층을 증가시키는 등 제품의 품위에 나쁜 영향을 미친다. 특히, 난삭재의 가공에서는 절삭열이 공구수명에 큰 영향을 미치는 문제점으로 인식되고 있다.<sup>(1)</sup> 절삭온도는 사용된 공구 및 공작물의 특성과 가공조건에 따라 변하기 때문에 절삭특성을 파악하는데 주요한 인자이다. 20세기초

부터 이러한 현상을 이해하기 위한 이론적 해석과 실험이 진행되고 있으며 여러가지의 절삭온도를 측정하기 위한 방법들이 제시되고 있다.<sup>(2)</sup>

P. Lezanski<sup>(3)</sup>는 고속밀링에서의 공구와 공작물 간의 열전대원리를 이용하여 절삭온도 측정방법을 제시하였다. 공구-피삭재 열전대법은 많이 사용되는 방법이지만 이 방법으로 측정된 온도는 절삭점의 절삭온도가 아니라 공구와 칩의 접촉면의 평균온도만을 나타내는 것이다. 또한 절삭유제나 산화물 등 외부 요인으로 인해 잘못된 온도가 측정될 수도 있다.

절삭열을 직접 측정하는 방법은 절삭점이나 절삭점 근방의 온도를 측정하는 것으로 여기에는 적외선 온도 측정법, 열전대 삽입 측정법이 사용된다.<sup>(4)</sup> 적외선 온도 측정법은 절삭점 부근의 복잡한 온도분포를 알 수는 있으나 열 유동으로 인한 칩과 공구면의 온도에 영향을 미치는 접촉영역의 간섭, 장비 조작 등의 난점이 있다. 특히 엔드밀링 작업에서는 엔드밀의 기하학적인 복잡

\* 회원, 부산대학교 ERC/NSDM

E-mail : dwlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2465 FAX : (051)514-2982

\*\* Birmingham University

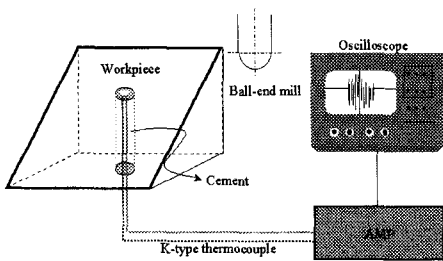
성과 단속절삭의 특성으로 인해 절삭온도의 급격한 상승과 냉각이 반복됨으로 절삭점의 온도를 정확히 측정하는 것은 아직 이루어지지 않고 있다. 자유곡면의 금형가공에서는 주로 볼 엔드밀을 이용하는 경우가 많으며, 이러한 가공에서는 칩의 두께가 공구의 각 위치에서 균일하지 않고 절삭기구가 복잡하여 열특성을 파악하기가 어렵다.

따라서 본 논문에서는 볼엔드밀을 이용하여 난삭재인 Inconel718의 고속가공에서 열특성을 파악하기 위해 보다 정확하게 절삭점의 온도를 측정하는 방법을 제시한다. 피삭재에 미소한 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하고 피삭재와 함께 열전대를 절삭함으로써 절삭 순간의 전단면에서 절삭점 온도를 직접 측정하는 방법과 원리를 살펴보았다.

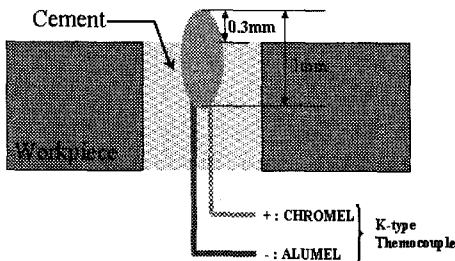
2. 실험장치 및 실험방법

2.1 열전대 설치 방법

Fig. 1(a)는 전단면의 절삭점 온도측정을 위한 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.



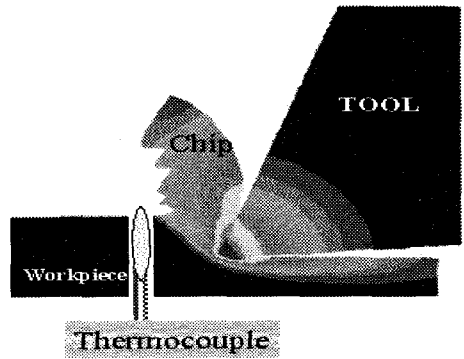
(a) Schematic diagram of experiment



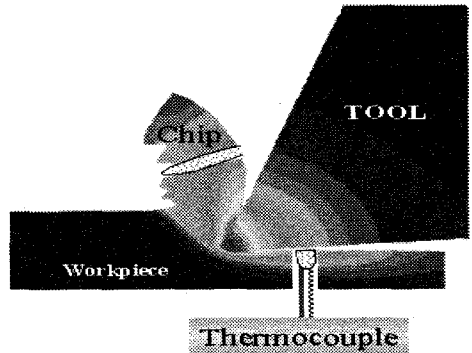
(b) Thermocouple set-up

Fig. 1 Experimental set-up

사용된 열전대는 측정 온도범위가  $-200^{\circ}\text{C} \sim 1250^{\circ}\text{C}$ 인 K- type으로 전선 직경은 0.076mm이고 응답속도가 공기중에서 70msec이다. Fig. 1(b)는 열전대의 설치모습을 보여주고 있다. 열전대의 접점길이는 1mm로 경납땜하였으며 피삭재에 지름 0.5mm의 구멍을 뚫고 열전대의 끝이 시편위로 약 0.3mm 정도 나오도록 열전대를 설치하고 열전대 전용 시멘트를 이용하여 열전대와 공작물을 완전 절연되도록 고정하였다. 따라서 가공실험에서 절입깊이를 0.5mm로 설정하여 가공을 수행하여 가공 후 열전대의 남은 접점의 크기가 0.2mm정도가 되도록 하였다. 측정점이 볼엔드밀의 절삭부위 중앙에 위치하도록 열전대 설치위치를 조절하였으며 피삭재를  $45^{\circ}$  기울여 경사면에서의 볼엔드밀에 의한 절삭온도를 측정하였다. 측정된 신호는 열전대 증폭기를 거쳐 오실로스코프에 기록하였다.



(a) Before cutting the thermocouple ( $t < 0$ )



(b) After cutting the temperature ( $t > 0$ )

Fig. 2 Cutting process of the thermocouple

2.2 측정원리

Fig. 2는 본 실험방법의 기본 개념을 설명한 그림이다. 시간  $t < 0$ 일 때 그림에서 보는 바와 같이 피삭재의 온도가 측정되며  $t=0$ 일 때 절삭날에 의해 열전대가 절삭이 되면서 공구가 피삭재를 절삭하는 순간의 전단면의 절삭온도가 측정되고  $t > 0$ 일 때 피삭재의 온도가 측정된다. 열전대를 절삭하는 순간 공구와 열전대가 서로 금속 접촉하므로 공구에 생긴 2차 기전력이 노이즈 형태로 열전대에 전달되어 기준온도 이하로 측정온도가 감소하는 현상이 발생한다. 그러나 절삭날이 열전대를 지난 바로 그 순간에는 공구와 열전대가 접촉하지 않으며 시멘트에 의해 절연되어 있는 상태로 열전대에 2차기전력의 영향이 없으므로 오직 절삭순간의 전단면 온도만이 열전대에 의해 측정된다.

Fig. 3은 본 논문의 측정원리를 살펴보기 위해 납의 온도를 측정한 테스트 결과다. 그림에서 보듯이 열전대가 열원인 납땀기에 가까이 다가가면 열에 의한 온도가 상승되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 열전대가 접촉하는 순간 열원에서의 2차 기전력으로 온도가 급격히 감소하여  $-200^{\circ}\text{C}$  이하로 측정되는 현상을 볼 수 있다. 그 이후에는 납의 용점온도와 2차 기전력 성분이 같이 존재하여 다시 온도가 상승하여 정적 평형상태에 도달하게 된다. 다시 열전대를 열원에서 분리하는 순간 2차 기전력 성분은 제거되며 납의 용점온도만이 측정되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3의 점선부분을 나타낸 것으로, 열전대를 열원에서 분리하는 순간의 온도 변화를 확대하여 본 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 열전대가 열원에서 분리되는 순간의 온도상승은  $0.05\text{msec}$ 이하에서 급속히 이루어지고 있으며 온도상승이 완전히 이루어진 후, 수 msec 동안 정적 평형 상태를 유지하고 있다. 사용한 열전대의 공기 중 응답속도는  $70\text{msec}$ 이지만 절삭 중에는 공구와 열전대가 금속접촉을 하므로 열전대의 응답속도가 매우 향상됨을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서 제시하는 전단면에서의 절삭온도 측정원리는 공구가 열전대를 절삭하고 열전대와 접촉이 끊어지는 그 순간의 온도를 측정하는 방법으로 고속절삭시의 전단면에서의 공구 온도를 측정할 수 있는 효율적인 방법으로 생각된다.

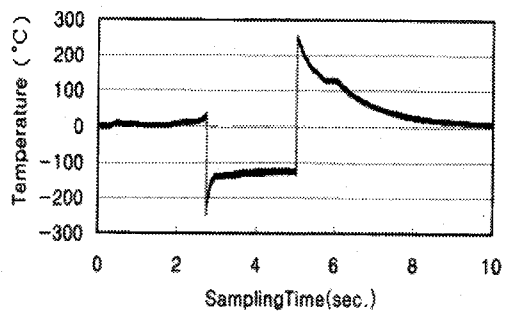


Fig. 3 Temperature distribution in test of 2nd-emf

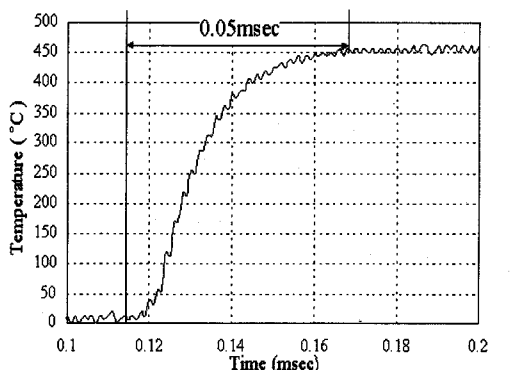


Fig. 4 Response time of thermocouple when separated from heated metal

2.3 실험방법

삽입 열전대법에 의한 볼랜드 밀링작업에서의 절삭온도 측정 실험을 내열합금강인 Inconel718의 고속가공에 적용하였다. 각 가공환경에 따른 절삭 열 특성을 파악하기 위한 건식, 습식, 미스트, 고압쿨링 등 다양한 가공 환경에서 수행하였다. 절삭 방향은 하향절삭(down milling)이 되게 하였으며 공구경로는 수평 하방향으로 절삭하였다. Table 1은 본 실험의 실험조건을 나타낸 것이다.

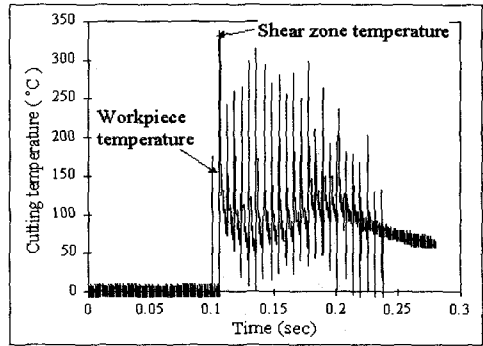
3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5, 6은 Table 1의 조건에서 볼랜드밀에 의한 Inconel718 절삭시의 절삭온도와 절삭력을 보여주고 있다. Fig. 5는 공구의 이송에 따른 절삭

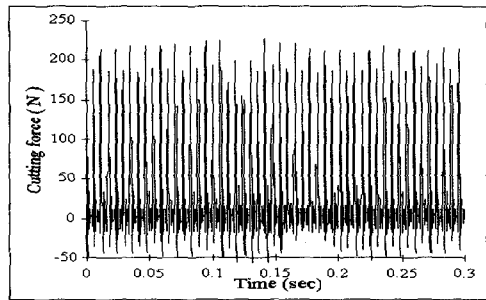
**Table 1** Experimental conditions

Machining Parameters	
Workpiece	45° inclined plane
	Inconel 718
Cutting Tool	φ 8, TiAlN, technicut
Operation	Down milling
Cutter Orientation	Horizontal downward
Cutting Speed ( RPM )	90 m/min ( 5064rpm )
Feed Rate	0.1 mm/tooth
Depth of Cut	Axial : 0.5mm
	Pick feed : 2mm
Cutting Environment	Dry, Wet(20bar), spray mist, 70bar high pressure coolant

온도의 연속적인 변화로 피삭재 및 전단영역의 온도를 보여주고 있다. 가공이 이루어지기 전에는 상온의 온도가 유지되고 있으며 피삭재와 같이 열전대의 절삭이 이루어지는 순간 절삭온도가 급격히 상승하여 전단면의 온도가 측정된다. 그 후 볼앤드밀의 다음 날이 다시 열전대를 절삭할 때까지 피삭재의 온도가 측정되는 이러한 현상이 공구가 지나가는 동안 반복하여 이루어지고 있다. 이는 Fig. 2, 3에서 설명된 바와 같이 열전대 절삭시에는 금속접촉으로 인해 공구의 2차 기전력과 공구의 절삭온도가 신속히 전달되어 지는 것과 열전대를 절삭한 후의 순간적인 공구온도와 피삭재의 온도가 측정됨을 볼 수 있다. 또한 본 실험에서 열전대의 삽입을 위해 피삭재에 0.5mm의 관통 구멍이 있어 이 영역을 가공하는 중에는 절삭이 0.2mm<sup>2</sup>의 면적만큼 이루어지지 않기 때문에 가공 중 피삭재의 온도가 전체적으로 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러므로 첫 번째의 절삭이 이루어지는 순간이 보다 실제 상황에 가장 접근된 절삭온도임을 생각할 수 있고, 보다 정밀한 측정을 위해서는 가능한 한 구멍의 크기를 작게 하는 것이 필요하다.



**Fig. 5** Distribution of cutting temperature



**Fig. 6** Distribution of cutting force

Fig. 6은 절삭온도 측정과 그때의 절삭력 변화를 보여주고 있다. 절삭력이 열전대가 삽입된 부분을 지나가는 동안 최대 50N 정도 작아지는 것을 볼 수 있으며 절삭시간이 0.24sec로 동일함을 알 수 있다.

Fig. 7은 가공환경으로 건식, 미스트, 습식(26기압), 고압쿨링(70기압)인 경우의 온도측정 결과이다.

온도측정결과에서 보듯이 고압쿨링(70기압)의 경우가 온도상승이 가장 적으며 효과적인 냉각이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 반면에 건식 절삭의 경우, 고압쿨링에 비해 거의 2배이상의 온도상승이 이루어지고 있다. 그러므로 Inconel718의 고속절삭에서 가공환경으로 냉각효율은 고압쿨링(70기압), 습식냉각(26기압), 미스트냉각, 건식냉각의 순으로 나타나고 있다.

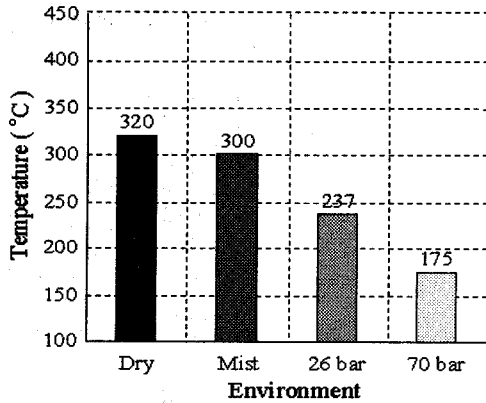


Fig. 7 Cutting temperature according to the cutting environment

#### 4. 결론

볼랜드밀 가공에서 열전대를 이용하여 전단영역의 절삭온도를 측정하기 위한 방법에 대해 실험한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 볼랜드밀가공에서 열전대 삽입법에 의한 전단영역의 절삭온도를 측정하는 방법과 측정원리를 제시하였다.
- (2) 볼랜드밀가공에서 전단영역의 온도와 공작물의 온도변화를 확인할 수 있었다.
- (3) 내열합금강인 Inconel718의 고속절삭에 적용하여 가공환경에 따른 온도변화를 측정하고 냉각특성을 제시하였다.

#### 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 및 Birmingham 대학 연구비지원에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

- (1) Wang Z. Y., Rajurkar K. P. and Fan, J., 1996, "Turning TI-6Al-4V Alloy with Cryogenic Cooling," *Transactions of NAMRI/SME*, Volume XXIV, p. 3.
- (2) Lezanski P., Shaw M. C., 1990, "Tool Face Temperatures in High Speed Milling," *Transactions of the ASME*, Vol. 112, p. 132.
- (3) Kovacevic R., Cherukuthota C. and Mazurkiewicz M., 1995, "High Pressure Water jet Cooling/Lubrication to Improve Machining Efficiency in Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35, No. 10, p. 1459.
- (4) 양민양, 1997, 절삭가공-이론과 실제, 청문각.
- (5) Schulz H., Hock St., 1995 "High-Speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology," *Annals of the CIRP* Vol. 44, p. 35.
- (6) Ding. Y and Hong S. Y., 1995, "A Study of the Cutting Temperatures in Machining Processes cooled by Liquid Nitrogen," *Technical Papers, The North American Manufacturing Research Institution of SME*, p. 114.