

## 적외선 열화상 카메라를 이용한 고속가공에서의 열 발생 특성

### Temperature Measurement when High-speed Machining using Infra-red Thermal Imaging Camera

김흥배\*(한국기술교육대학교 대학원), 이우영, 최성주, 유중학(한국기술교육대학교)  
Heung-Bae Kim\*(Graduate School of KUT),  
Woo-Young Lee, Seong-Joo Choi, Jung-Hak Yoo(KUT)

#### ABSTRACT

The term 'High Speed Machining' has been used for many years to describe end milling with small diameter tools at high rotational speeds, typically 10,000 - 100,000 rpm. The process was applied in the aerospace industry for the machining of light alloys, notably aluminium. In recent year, however, the mold and die industry has begun to use the technology for the production of components, including those manufactured from hardened tool steels. With increasing cutting speed used in modern machining operation, the thermal aspects of cutting become more and more important. It not only directly influences in rate of tool wear, but also will affect machining precision recognized as thermal expansion and the roughness of the surface finish. Hence, one needs to accurately evaluate the rate of cutting heat generation and temperature distributions on the machining surface. To overcome the heat generation, we used to cutting fluid. Cutting fluid play a roles in metal cutting process. Mechanically coupled effectiveness of cutting fluids affect to friction coefficient at tool-work-piece interface and cutting temperature and chip control, surface finish, tool wear and form accuracy. Through this study, we examined the behavior of heat generation in high-speed machining and the cooling performance of various cooling methods.

#### Key Words

High-Speed Machining(고속가공), IR (적외선),

Cutting Fluid(절삭유), Cutting Condition(가공조건)

#### 1. 서론

##### 1.1 고속가공

고속가공은 1931년 독일의 Salomon 박사에 의해 “일반적인 가공보다 상당히 높은 절삭속도와 이송속도에서 이루어지는 가공”이라는 정의 아래 시작되었으며 현재는 항공기분야에서 커다란 알루미늄 부재를 신속하게 제거하거나 얇은 박막 가공과 같은 영역을 포함하는 넓은 부분에 적용되고 있다. 최근 생산현장에서는 고경도 재료를 이용한 금형의 제작에 많이 사용되고 있는데, 연한 재료에 EDM 가공과 연마작업을 이용하여 제작하던 종래의 재래식 방법을 탈피하여 고경도의 재질을 고속가공을 이용하여 직접 가공하는 것이다. 또한 절삭에서 절삭유제의 사용은 냉각작용, 윤활작용 등의 목적으로 사용하고 있으나, 특히 냉각작용은 절삭유제를 사용하는 가장 큰 이유이다. 절삭시 절삭유제의 사용은 절삭력을 향상시키며 나아가 생산품의 정도 향상에 기인하지만 사용된 절삭유에 의한 환경과피의 영향이 크게 나타나고 있어서 절삭유제의 사용이 제한되고 있는 실정이다. 환경 친화적인 절삭가공을 위해서는 절삭 시 온도 분포 특성을 미리 파악하는 것이 중요하며, 절삭유제 사용 시 발생하는 다양한 파라미터를 선정하여 그 온도 분포를 파악하는 것이 중요하다.

이번 실험에서는 고속가공에서 다양한 파라미터의 변화에 대한 절삭 온도 분포 특성을 파악하고, 건식절삭 및 절삭유제 사용량에 따른 냉각효과와 절삭성을 파악하고자 적외선 열화상 카메라를 이용한 열발생 측정방법을 확립하고 가공시

를 이용한 열발생 측정방법을 확립하고 가공시의 열발생 특성을 파악하였다.

### 1.2 고속가공의 온도

1924년 Salomon 박사는 고속가공 시 절삭속도의 증가에 따라 최고의 절삭온도에 도달하는 임계절삭속도가 있으며, 절삭속도를 계속 증가하면 온도는 감소하는 경향을 나타낸 이론을 제안하였다. 즉 임계온도에 도달하는 절삭속도가 존재한다는 것이다. 이 이론이 제안된 이후에 대부분의 논문에서 절삭속도의 증가에 따라 온도가 감소하지 않는다는 것으로 결론을 내렸는데, 그중에 하나인 McGee는 절삭온도는 절삭속도의 증가에 따라 최고온도에 도달하게 되는데 이 최고온도는 재료의 녹는점과 거의 일치한다고 제안하였다. 즉, 고속가공에서 온도의 감소는 일어나지 않는다는 것이다. McGee는 알루미늄 합금의 녹는점(약 660°C)은 초경합금이나 세라믹 공구가 그 경도를 상실하기 시작하여 공구의 마모가 급속히 진행되는 온도보다 낮기 때문에 가공 최고온도가 존재하지 않는다고 설명하였다.

역으로, Trent는 알루미늄보다 녹는점이 높은 강은 가공시의 열발생이 중요한 변수가 된다고 하였다. Fig. 1에는 Salomon이 제안한 각 재질별 임계온도를 나타내고 있으며, Fig. 2와 3에는 Salomon과 McGee의 곡선을 각각 나타내고 있다.

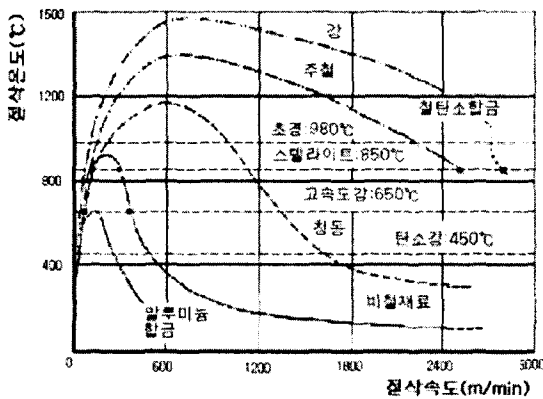


Fig. 1 Salomon's hypothesis

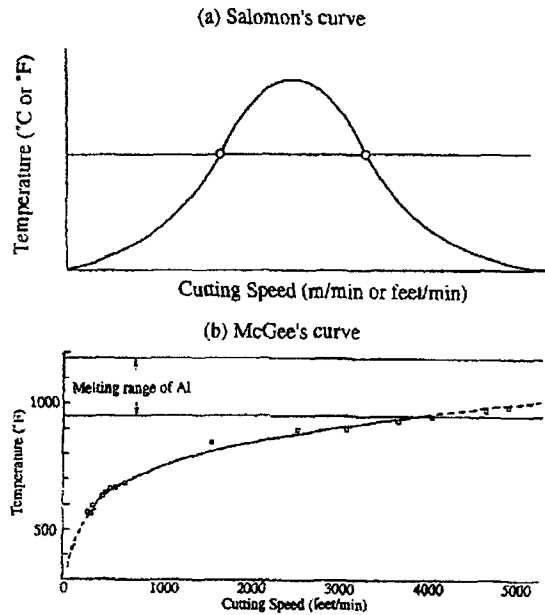


Fig. 2 Graph of temperature vs. cutting speed : (a)Salomon's curve; (b)McGee's Curve

### 1.3 가공온도측정 기술

가공 시에 방출되는 열을 측정하기 위해 많은 방법들이 적용되었는데 크게 아래와 같은 방법들이 사용되었다.

#### (1) Too-workpiece thermocouple technique

: Braiden에 의해 시도되었는데 이것은 공구와 재료가 서로 다른 재질이므로 서로 온도 차이가 발생한다는 것에 착안한 것이며, 단속절삭에서 WC계열의 공구를 사용하여 실험하였다.

#### (2) Thermocouple-insert technique

: Kuster는 많은 공구를 이용하여 재료의 내부에 열전쌍을 삽입하여 온도를 측정하였으며, Usui는 0.01mm의 열전쌍을 인서트 팁에 삽입하여 온도를 측정하였다. 이방법은 열전쌍을 재료나 공구에 삽입하는데 많은 어려움이 따른다.

#### (3) Thermovision technique

: Schwerd는 가공 시 방출되는 열을 적외선을 측정함으로써 측정하였는데, 이 방법은 재료와 공구와의 접촉에 의해 가공에 의해 발생하는 열을 직접 측정할 수 없다는 단점이 있다.

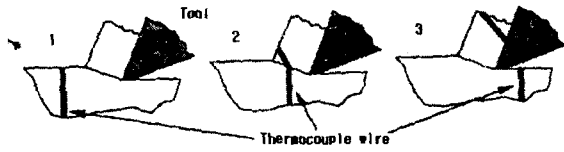


Fig. 3 Machining sequence when using thermocouple-insert technique

(4) Metallographic technique

: 온도에 따른 경도의 값의 변화를 측정하여 온도를 측정하는 방법으로 재료가 가지는 고유의 온도에 따른 경도값과 비교하여 온도값을 측정하는 것이다.

(5) Thermosensitive paints or liquid crystal technique

. 이 방법은 Schallbrock와 Lang에 의해 시도되었으며, 열에 민감한 도료나 액체 등을 공구나 재료에 도포하여 그 열을 측정하는데, 가공 중에 보이는 면에서만 측정이 가능하며 실제 마모되어 도포된 도료가 손실된 공구에서는 정밀도가 떨어진다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Table 1 Specification of experimental equipments, tools and materials

Machine type	Max. spindle speed	Material	Tool	Diameter
	Max. feed rate			Num. of tooth
HSM	42,000 (rev/min)	Al6061	Solid End Mill	Ø10
				Z6
				Type
	30,000 (mm/min)	(STD11)	TiAlN coted Solid End Mill	Ø12
				Z6
				Type
SM45C	TiAlN coted Solid End Mill	Ø10		
		Z2		
		Type		

이번 실험에서는 기계는 고속가공용 머시닝센터 RMS-600(Roeders GmbH, Germany)을 사용하였다. 사용된 피삭재는 Al-6061, 금형강

(STD11), SM45C 재질을 공구는 Ø10으로 TiAlN 코팅된 6날의 고능률 솔리드 엔드밀과 Ø10에 2날인 솔리드 엔드밀을 사용하였다. Table 1에는 실험에 사용된 기계와 그 재료 및 공구에 대한 사양을 나타내고 있다.

가공 중 발생된 열을 측정하기 위해 Thermovision technique 방법을 사용하였으며 적외선 열화상 카메라는 IR Snapshot(Infrared Solutions Inc, USA)을 사용하였다. Fig. 3은 적외선 열화상 카메라를 그리고 Table 2에는 그 사양을 보여주고 있다. Thermovision technique 방법의 문제는 공구와 재료와의 접촉면 열을 직접 측정할 수 없다는 것인데, 이번 실험에서는 가공에 필요한 다양한 파라미터의 변화에 따른 열발생의 경향과 절삭유제의 영향에 따른 열발생 특성의 파악에 그 초점이 맞추어져 있으므로 이러한 문제는 무시할 수 있다.

Table 2 Specification of infrared camera

Item	Value
Detector	120 element linear array of uncooled thermoelectric detectors, 50µm square pixel
measurement range	0 to 350°C
accuracy	2°C or 2% of reading
Spectral Band	8µm to 12µm

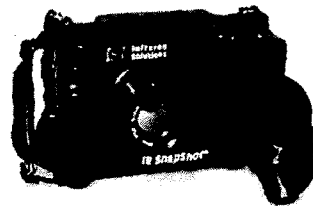


Fig. 3 Infrared thermal image camera

Fig. 4는 적외선 열화상카메라로 촬영된 온도 분포 사진의 예를 나타내고 있다.

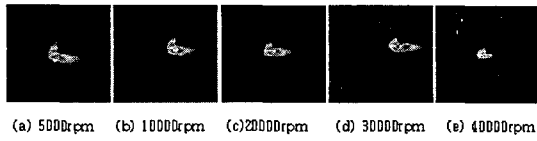


Fig. 4 Examples of infrared picture(Al6061)

## 2.2 실험 조건 및 방법

실험은 절삭속도, 상·하향절삭, 절삭유의 사용유무 및 량 등의 파라미터 변화에 대한 열 발생 특성을 파악하였으며, 절삭유제의 영향을 파악하기 위하여 건식절삭, 압축공기, 압축공기와 오일미스트를 혼합한 것을 그 량을 달리하여 4가지 경우에 대해 실험을 하였다. 축방향 절입량(axial depth of cut, Ap), 반경방향 절입량(radial depth of cut, Ae) 및 절삭속도(Vc) 등의 가공 파라미터에 대한 특성도 파악하였다.

가공시작 전에 재료와 공구의 온도분포를 파악하기 위하여 적외선 사진을 찍었으며, 이를 바탕으로 실제가공 시에 비교하여 온도 분포의 변화를 파악하였으며, 가공중의 사진은 같은 길이의 재료를 사용하여 가공이 끝나는 부위에서의 온도를 측정하였다.

Fig. 5는 가공방법 및 적외선 카메라의 촬영방향을 나타내고 있다.

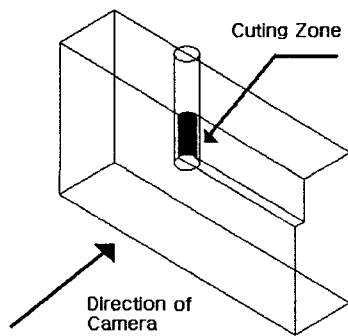
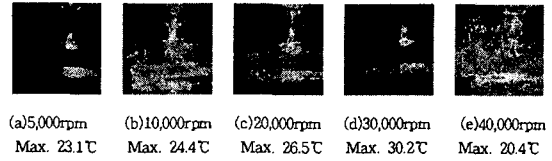


Fig. 5 Schematic explanation of cutting process

## 3. 실험결과 및 고찰

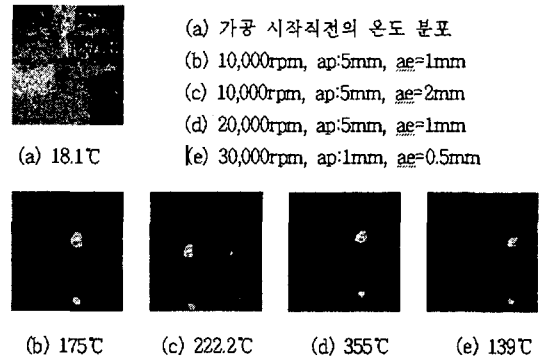
### 3.1 재료에 따른 열발생 일반 특성



Feed: 220m/min, ap:0.5mm, ae:0.2mm

Fig. 6 Examples of infrared picture(SM45C)

SM45C 고탄소강의 경우 절삭속도의 증가에 따라 온도는 계속 상승하다가 30,000rpm에서 최고치를 이루고 40,000rpm에서는 감소하는 경향을 보였다. Fig. 6에는 열화상 카메라로 촬영한 사진과 결과를 나타내고 있다.



Feed: 220m/min

Fig. 7 Examples of infrared picture(STD11)

금형강(STD11)을 이용한 실험(Feed:220m/min)에서는 가공시작 바로직전 주변온도가 18.1°C 이었으나 Fig. 7의 (b)에서 알수 있듯이 175°C에 이르고 다시 반경방향의 절입량을 두배로 증가하면 그 온도는 26%가 증가하여 222.2°C에 이른다. 다시 스피들 회전수를 두배로 증가시키면 그 온도는 355°C 까지 증가하여 102%의 온도 증가율을 보인다. 따라서 재료마다 온도 변화의 차이는 보이나 일반적으로 스피들 회전수가 다른 절삭 변수보다 온도증가에 더 큰 영향을 보인다. 다시 스피들 회전수는 3배, 반경방향 절입량은 반으로 그리고 축방향 절입량을 1/5로 감소시키면 온도는 139°C 까지 감소하는 경향을 보였다.

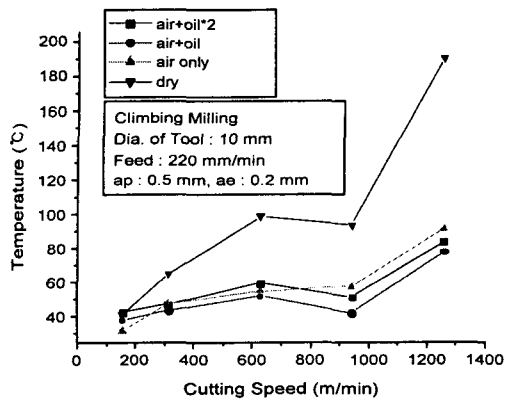


Fig. 8 Cutting temperature characteristics of STD11

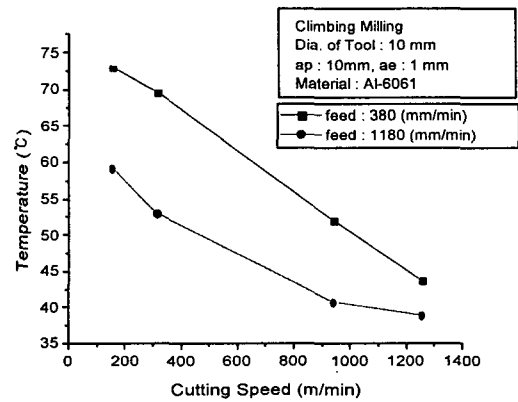
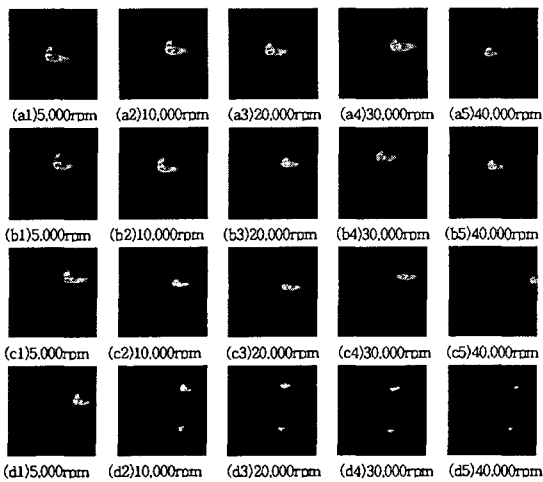


Fig. 10 Temperature variations according to feed in Al-6061



Feed: 220m/min, ap:0.5mm, ae:0.2mm

- (a) 압축공기 + 오일미스트(x2)
- (b) 압축공기 + 오일미스트(x1)
- (c) 압축공기
- (d) 건식절삭

Fig. 9 Examples of infrared picture(STD11)

금형강의 경우 Fig. 8과 9에서 알 수 있듯이 절삭속도가 증가하면 절삭 온도는 증가하는 경향을 나타내다가 600 m/min 의 절삭속도에서 감소하는 경향을 나타내며 다시 1000 m/min의 절삭속도에서 다시 증가하는 경향을 나타냈다.

### 3.1 이송량에 따른 열발생 일반 특성

Fig. 10에는 Al-6061의 이송량(Feed)의 변화에 따른 온도 특성을 나타내고 있는데 이송량이 380mm/min에서 1180mm/min로 3배 증가하면 열발생은 전체 절삭속도에 대해 약 1.75배 증가하는 경향을 보였다. 일반적으로 절삭속도가 작을수록 이송량에 대한 온도 차이는 크게 나타났으며 절삭속도가 증가하면 온도차이는 작아지는 경향을 보였다.

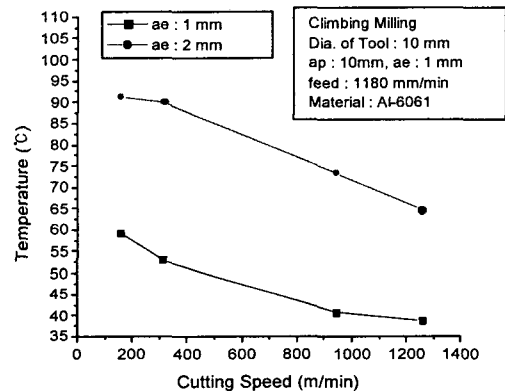


Fig. 11 Temperature variation according to axial depth of cut in Al-6061

### 3.2 절삭깊이에 따른 열발생 특성

Fig. 11에는 Al6061의 축방향 절삭깊이의 변화에 따른 온도 분포를 나타내는데 절삭깊이가 2배

증가하면 온도의 증가차이는 전체 절삭속도에 대하여 약 1.6배 증가하여 이송량의 변화에 따른 온도차이와 같은 경향을 나타내었다.

금형강(STD11)의 경우 Fig. 6의 (a)에서 알 수 있듯이 175℃에 이르고 다시 반경방향의 절입량을 2배로 증가하면 그 온도는 26%가 증가하여 222.2℃에 이른다.

### 3.4 상·하향 절삭에 따른 열발생 특성

이번 실험에서 Al6061의 경우 하향절삭에서는 절삭속도가 증가할수록 절삭 발열은 감소하는 경향을 보였으나, 상향절삭에서는 절삭속도의 증가에 따라 절삭발열이 증가하는 경향을 보였다.

이것은 절삭저항과 상향절삭에서 칩 배출이 원활하지 않기 때문인 것으로 보인다. 일반적으로 절삭열의 70~80%는 칩에 의해 배출되는데 칩 배출이 절삭열에 커다란 영향을 미친다. 그러나 SM45c와 STD11의 경우 절삭속도의 증가에 따라 절삭온도가 증가하는 경향을 보였다. 이것은 Salmon 박사가 제안한 이론과 같이 재료에 따라 온도가 증가하다가 감소 또는 정체되는 절삭속도 영역이 다르다는 것을 보여준다. 이러한 경향을 관찰하기 위해 더 넓은 범위의 절삭속도에서 실험을 해야하며 실제 절삭발열이 발생하는 공구-재료 접촉부에서의 온도를 측정할 수 있는 방법이 강구되어야 한다.

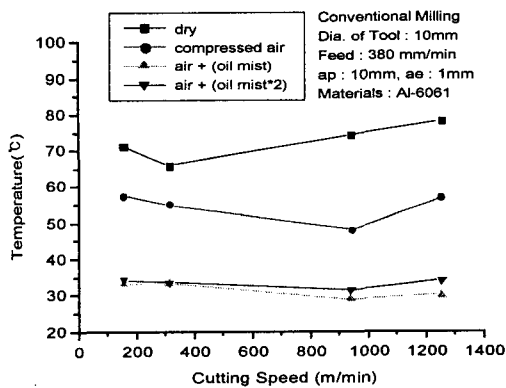


Fig. 12 Cutting temperature characteristics

그러나 SM45c와 STD11의 경우 하향절삭에서도 온도가 증가하는 경향을 나타냈다. Fig. 12, 13,

14에는 Al6061을 이용한 상·하향 절삭의 온도분포 특성을 보여주고 있다.

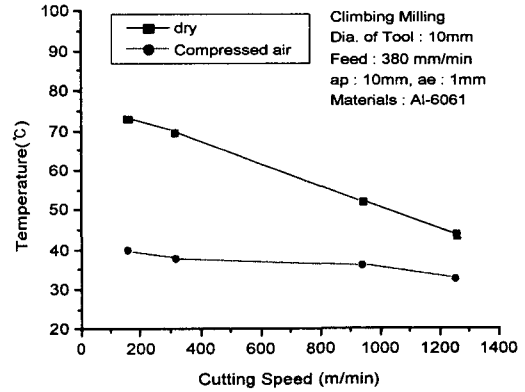


Fig. 13 Cutting temperature characteristics

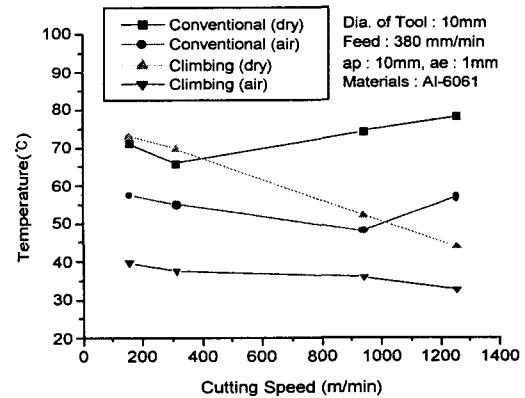


Fig. 14 Cutting temperature characteristics

### 3.5 절삭유제에 따른 열발생 특성

Fig. 12, 13, 14에서 알 수 있듯이 절삭유제의 영향은 압축공기와 오일미스트를 혼합할 경우 제일 좋은 냉각 성능을 보였으며, 압축공기 그리고 건식 절삭일 경우의 순서로 좋은 냉각성능을 보였다.

압축공기와 오일미스트를 사용할 경우 절삭조건에 따라 다르겠지만 어느 정도 사용 양이 되면 사용량에 따른 냉각작용에서의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

또한 저속의 스피들 회전수에서는 온도의 차

이가 거의 없었으나 스펀들 회전수가 증가할수록 온도분포의 차이는 확연하게 구분되었다. 특히 20,000rpm과 30,000rpm 사이에서 최고온도 분포를 나타냈으며, 40,000rpm에서는 다시 온도가 증가하는 경향을 나타냈다.

#### 4. 결과

1. 고속가공에서 발생하는 열을 측정분석하기 위하여 적외선 열화상(IR thermal image) 카메라를 이용하는 방법을 확립하였다.
2. Al6061은 하향절삭에서는 절삭속도가 증가할수록 절삭 발열은 감소하는 경향을 보였으나, 상향절삭에서는 절삭속도의 증가에 따라 절삭발열이 증가하는 경향을 보였다.
3. Al 6061은 상향절삭일 경우 절삭 온도가 계속 증가하는 경향을 보이는데, 이것은 절삭저항과 칩 배출이 원활하지 않기 때문인 것으로 보인다.
4. SM45C와 금형강(STD11)의 경우에는 절삭속도가 증가하면 온도는 증가하다가 일정 절삭속도에서 감소또는 정체를 하다가 다시 증가하는 경향을 보였다.
5. 절삭유제의 영향은 압축공기와 오일미스트와의 혼합할 경우 제일 좋은 냉각 성능을 보였으며, 압축공기 그리고 건식 절삭일 경우의 순으로 좋은 냉각성능을 보였다
6. 오일미스트를 사용할 경우 절삭조건에 따라 다르겠지만 어느 정도 사용 양이 되면 사용량에 따른 냉각작용차이는 거의 없다.

#### 참고 문헌

1. C. salomon, Verfahren zur bearbeitung von metallen oder bei einer bearbeitung durch schneidende werkzeuge sich ahnlich verhaltenden werkstoffen, German Patent no. 523594, 1931
2. G.L. Criger, High speed machining in production, SAMPE Quarterly, 12 April 1981
3. J. Tlusty, High speed milling, Proceedings of the 6th IMEC, Osaka, Japan, 1994, pp35-42
4. J. R. Coleman, No myth high speed machining, Manuf. Eng. 61, Oct 1992
5. J. Gough, High speed machining for toolmaking applications, Prec. Toolmaker 8, 1990
6. H. Schulz, High speed machining - some of the latest developments, Metalworking World 3, 1994
7. F. J. McGee, High speed machining - study : method for aluminium workpiece, Am, Machanist, 1979
8. E. M. Trent, Metal cutting, 3rd edition, Butterworth, London, ISBN 0750610689, 1991
9. T. Moriwaki, "High-Speed Machining", CIRP, Vol.41, 1992
10. H. Schut, "High-Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Condition and Technology", CIRP, Vol.44 1995
11. Nam-Sub Seo, Metal Cutting Theory, Dong myoung sa, Korea, 1985
12. Young-Ha Yum, The Cutting Theory of Machine Tool, Dong myoung sa, Korea, 1992
13. D. G Flom, R. Komanduri and M. Lee, High Speed Machining of Metals, Annual Review of Materials Science, Vol.4, 1984, p.231
14. R. I. King and R.I. Vaughn, A Synoptic Review of High Speed Machining from Salomon to the Present, Proc. of ASME, High Speed Machining Conf, PED 12, 1984, 2
15. Zhijie Tang, "Tool replacement strategies and the precision of tool monitoring system in advanced manufacturing system", Transaction of NAMRI/SME, Vol. 26, pp. 255-260, 1995
16. Di Yan, T. I. El-wardany, M. A. Elbestawi, "A multi-sensor strategy for tool failure detection in milling", MTM, Vol. 35, No. 3, pp. 383-398, 1995
17. H. Schulz, "Hochgeschwindigkeits-bearbeitung", HANSER, 1996.
18. 中川威雄, 金型の高速ミリングを考える, 型技術, Vol.13, No.3, 1998
19. H. Schulz, "High-Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Condition and Technology", CIRP, Vol.44 1995