

고속가공기술

이종찬

경북 구미시 신평동 188 번지

금오공과대학교 기계설계공학과 교수

ABSTRACT

Although the high speed machining technology (HSM) has been significantly studied in worldwide for past two decades, and has been widely applied in machining processes at many countries, it is not well known in domestic machining industries. The objective of this article, therefore, is to introduce the HSM to domestic industries so that they can apply the HSM on their products and results in improvements on productivity and precision.

The concept of HSM, tool materials and tool wear of HSM, surface roughness of HSM, and the chip shape of HSM are discussed.

1. 고속가공의 개념

고속가공(High-Speed Machining)이라는 개념은 피삭재의 관점에서 볼 때는 매우 상대적이라고 할 수 있다. 그것은 피삭재의 종류에 따라 공구마모를 최소화하면서 가공할 수 있는 절삭속도에 큰 차이가 나기 때문이다.

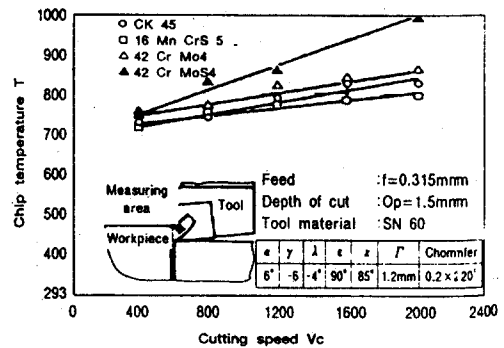
따라서 고속가공을 주변형역(Primary deformation zone)에서 전단의 국부화(Shear localization)가 완전히 일어나는 속도이상에서의 가공으로 정의하기도 한다. 그러나 이러한 정의는 정량적이지 못하므로 현재 생산현장에서 사용되는 절삭속도보다 현저히 높은 속도에서의 가공을 고속가공이라 부르는 것이 보다 일반적이다.

고속가공에 대한 개념은 가공품의 정밀도 향상과 가공시간의 단축으로서 생산원가를 절감하고자 하는 목적 아래 1924년 독일의 Carl J. Salomon 박사에 의하여 착안되었으며 1931년 독일특허를 받으면서 시작되어갔다. 이 고속가공의 개념은 절삭가공시 발생하는 절삭온도와 절삭속도의 관계에 근거를 두고 있다. 즉, 절삭온도는 어떠한 임계속도에서 최대치가 되며 그 임계속도를 초과하게 되면 온도는 감소한다는 것이다.

그러나 최근의 여러 실험데이터들은 절삭속도의 증가에 따라 절삭온도가 감소하는 것이 아니라 절삭온도는 절삭속도와 함께 증가한다

는 것을 보여 주고 있다.

Fig. 1은 절삭속도의 증가에 따른 절삭온도의 변화를 보여주는 실험데이터로서 절삭속도를 400 m/min에서부터 2,000 m/min까지 증가시켜가며 선삭실험한 결과이다. 실험에 사용된 4가지 소재의 경우에 있어서 모두 절삭속도의 증가에 따라 절삭온도가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.



<Fig. 1> 절삭속도의 증가에 따른 여러 소재의 온도변화

이러한 실험결과에서 보듯이 고속가공에서 Salomon의 주장대로 절삭속도가 고속화됨에 따라 절삭온도가 감소하는 효과를 보는 것은 아니며, 절삭속도의 증가에 따른 생산성의 향상, 가공정밀도의 향상, 표면거칠기의 향상 등의 효과를 얻어내는 것이다.

이처럼 절삭온도는 절삭속도가 증가함에 따라 증가하고, 계속적으로 절삭속도가 증가하면 절삭온도는 피삭재의 용융온도(Melting Point)에 접근하며 그 이상 증가하지 않는다. 그 이상의 절삭속도에서는 절삭온도가 증가하지 않으므로 상대적으로 단위 공구에 대한 가공량이 증가하게 된다.

절삭온도가 용융온도에 근접하게 되면 피삭재가 국부적으로 유동성을 갖게 되는 이른바 연화(Softening)가 발생하게 되어 절삭력이 감소한다. 고속가공에서는 절삭력의 감소로 공구의 휨(Deflection)이 작아져 정밀가공이 가능하게 되며, 박형부품의 가공이 가능하게 된다. 또한 가공 변질층의 두께가 얇아지게 되어 표면품질이 향상된다.

또한 절삭력의 감소로 인한 전단각(Shear Angle)의 증가로 칩의 배출속도가 절삭속도보다 크게 되어 칩의 배출이 원활하게 되고, 버(Burr)의 발생이 억제된다.

이러한 장점들이 있는 고속 가공을 생산에 적용함으로써 공작기계 사용효율증가, 생산시간단축, 공작품 표면 품질개선, 공구 사용량 감소, 생산비용 감소 등의 효과를 기대할 수 있다.

고속가공은 가공의 효율성을 추구하는 고능률가공과 가공표면의 정밀성을 추구하는 고품위가공으로 구분된다. 고능률가공은 구간 이송(Feed)을 증가시킴으로써 재료제거율(MRR; Material Removal Rate)을 극대화시킴으로써 가공시간을 단축시키는 방법이며, 고품위가공은 공구경로의 간격(Pick feed)을 감소시킴으로써 최종표면에 남는 커슥(Cusp)을 최소화시키는 가공방법이다^[1].

현재 고속가공에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있지만 가장 문제점으로 나타나는 것은 고속으로 고정밀도가공을 가능하게 하는 공작기계의 개발과 공구재료의 개발이라 할 수 있다. 주축을 고속으로 회전시켜 이송속도를 증가시킨다는 일반적인 방식으로는 고속가공을 할 수 없다. 이송속도를 증가시키면 형상오차는 커지게 되고, 주축의 회전을 증가시키면 진동이 커지게 되어 공구수명이 짧아지게 되며 절삭온도에 의해 정밀도가 저하된다.

고속가공을 하는 데에는 고속에 적합한 가공법, 고속의 주축, 고속이송, 고속이송에서의 정밀도가 저하되지 않는 제어방법, 고속을 제

어할 수 있는 기계강성, 열변형이 작은 기계구조가 요구되어진다. 이와 더불어 고속가공에서 충분한 성능을 발휘하기 위해서는 고속가공에서 장시간 견딜 수 있는 신소재 공구재료의 개발도 필연적이라 할 수 있다.

2. 고속가공용 공구재료

절삭공구재료의 발달은 절삭시 요구되는 고온에서의 높은 경도와 필요한 인성을 갖는 소재의 개발이라고 할 수 있다. 19세기의 탄소공구강으로부터 시작하여 고속도강(HSS; High Speed Steel), 1940년대에 텅스텐 카바이드(WC)를 이용한 초경합금, 1960년대의 세라믹, 1970년대에는 티타늄 카바이드(TiC)를 이용한 서멧(Cermat)의 개발이 이루어졌다. 최근에는 인조다이아몬드, CBN 등으로 발전되어 보다 높은 가공속도로 가공할 수 있게 되었다^[1].

이들 공구재료 가운데 고속가공에 가장 적합하고 효율적인 공구재료는 다이아몬드와 CBN이다. 다이아몬드와 CBN은 타공구재료에 비하여 경도와 열전도율이 월등히 뛰어나다.

아래의 Table 1은 이들을 포함한 몇가지 주요 공구재료의 물리적 성질을 나타낸다. 이러한 다이아몬드와 CBN의 개발은 지금까지는 연삭가공에 의존할 수밖에 없었던 고경도재료들의 절삭가공을 가능하게 하였고 또한 고속가공을 실용화할 수 있는 길을 열어 놓았다. 다이아몬드는 철계재료의 가공에는 탄소의 확산(diffusion)과 흑연화현상(graphitization) 때문에 적합하지 않고 고경도의 비철계재료들(nonferrous materials)의 가공에 적합하다.

<Table 1> 주요 공구재료의 물리적 특성 비교

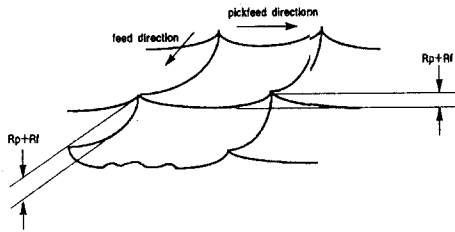
	비중	영향 ($\times 10^3$ MPa)	경도(mHv) ($\times 10$ MPa)	열전도율 ($\times 10^3$ W/mK)	열팽창계수 ($\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)
다이아몬드	3.52	99	9,000	20.9	3.1 (실온~800℃)
CBN	3.48	71	4,500	13.0	4.7 (실온~900℃)
TiC	4.92	46	3,200	0.33	7.6 (실온~850℃)
Al ₂ O ₃	3.98	42	3,000	0.42	8.5 (실온~980℃)
WC	15.8	70	1,800	1.21	5.1 (실온~1,400℃)

철계재료에 대한 다이아몬드의 대응으로서 CBN은 철계재료와 화학반응이 없을 뿐 아니라 열적 안정성도 매우 뛰어나서 고경도로 열

처리된 고탄소강, 금형강, 합금강 등의 가공에 뛰어난 성능을 발휘한다.

3. 고속가공과 표면조도와의 관계

고품질 가공을 하고자 하는 경우 피피드(pick feed)양을 기존의 마무리 가공보다 작게 주며, 가공시간의 증가를 보상하기 위해 이송속도를 증가시키게 된다. 이런 경우 표면거칠기는 피피드방향의 기하학적 표면 거칠기와 피드마크에 의한 거칠기의 중첩식으로 표현되어 기존 커스프 방향으로만 표면거칠기를 계산하였던 표면거칠기 이론을 수정식으로 표현할 수 있다. 이것은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.



<Fig. 2> 표면거칠기와 절삭방향

$$R_{\max} = R_p + R_f = \frac{P^2}{8R} + \frac{f^2}{8R} \quad \text{-----(1)}$$

(R_p : 피피드 방향의 거칠기, R_f : 피드 방향의 거칠기, P : 피피드양, f : 피드양, R :노즈반경)

위의 식에서 피피드양(P)과 피드양(f)을 줄임으로서 공작물의 표면거칠기를 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 정량적인 실제의 가공면의 거칠기는 불확정 인자인 공작기계의 정밀도, 공구의 동적현상(진동, 처짐 등), 공구형상에 따른 러빙특성 등에 의하여 영향을 받으므로 실제의 표면거칠기는 예측치보다 크게 된다. 따라서 다음과 같은 식으로 다시 나타내어질 수 있다.

$$R_{\max} |_{\text{real}} = \frac{P^2}{8R} + \frac{f^2}{8R} + R_{\text{physical}} \quad \text{---(2)}$$

여기서 R_{physical} 은 불확정 인자의 값이다.

표면거칠기는 공구재료의 종류와 피삭재의 종류에 따라 다른 특성을 나타내는데 Fig. 3은 탄소강(S45C), 회주철(FC250), 알루미늄합금(A5056)을 선삭가공할 때의 표면거칠기를

나타낸 것이다.

앞서 설명한 바와 같이 실제적인 표면거칠기는 불확정 인자의 영향으로 이론적인 표면거칠기보다 크게 되어진다. 표면거칠기를 이론적인 값에 근접하게 하기 위해서는 피피드(pick feed)와 피드양을 감소시킴으로서 가능하다는 것을 위의 식에서 설명하였다.

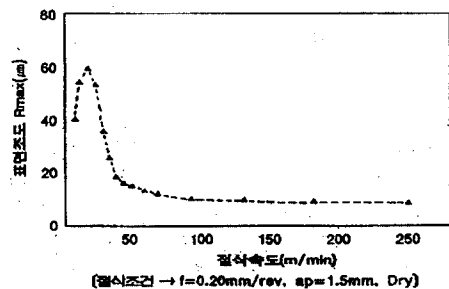
탄소강 S45C	고속도공구강 초경합금 Al ₂ O ₃ 계 세라믹
회주철 FC250	고속도공구강 초경합금 CBN 소결체
알루미늄합금 A5056	초경합금 다이아몬드 소결체 합연 CVD다이아몬드

1,000 100 10 1 0.1 0.01 0.001

<Fig. 3> 피삭재의 종류에 따른 표면조도의 특성

피드양을 줄인다는 것은 칩두께를 줄여 공구 1회전시 제거되어지는 체적을 감소시킨다는 것인데, 일정한 절삭속도에서 피피드와 피드양을 감소시킨다면 그 감소된 양에 비례하여 가공시간이 증가될 것이다. 따라서 표면거칠기의 향상과 더불어 가공시간을 단축시키기 위해서는 절삭속도를 증가시켜 이송을 높임으로서 가공시간을 보상할 수 있다.

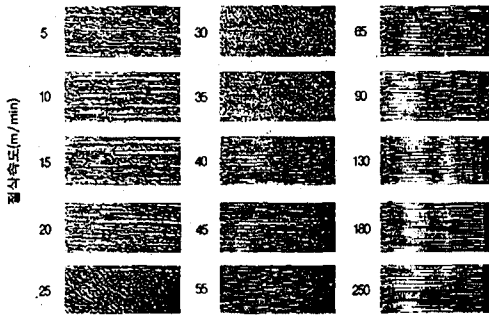
Fig. 4는 초경합금공구를 사용하여 탄소강(S45C, H_B180)을 선삭실험한 것으로서 이송을 일정하게 하고 절삭속도를 증가시키면서 절삭속도 증가에 따른 표면거칠기의 변화를 실험한 결과이며, Fig. 5는 이 때의 가공면을 절삭속도별로 나타낸 것이다.



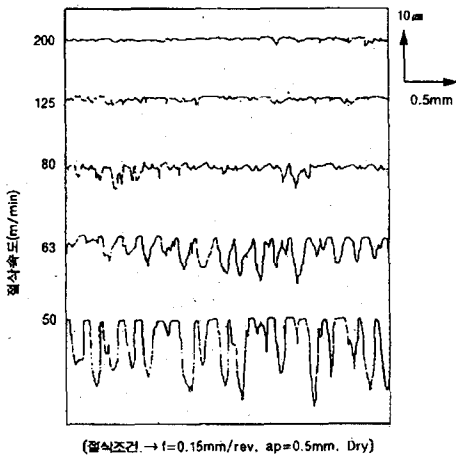
<Fig. 4> 절삭속도증가에 따른 표면거칠기의 변화

Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 절삭속도가 낮은 영역에서는 표면거칠기가 매우 불량하지만 절삭속도가 점점 높아짐에 따라 표면거칠기가 향상되어짐을 볼 수 있다.

Fig. 6은 구조용합금강(SNCM439, H_B276)을 서멧공구로 선삭실험한 것으로서 절삭속도의 증가에 따른 표면거칠기의 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서도 마찬가지로 절삭속도가 증가함에 따라 표면거칠기가 향상되어짐을 볼 수 있다.



<Fig. 5> 절삭속도에 따른 가공면의 형상

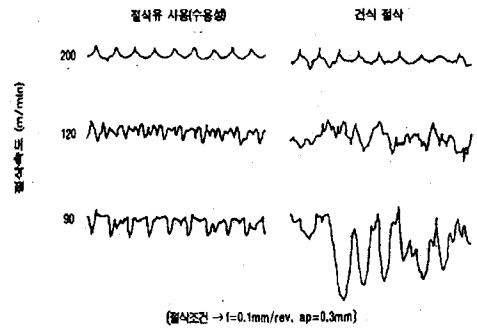


<Fig. 6> 절삭속도의 증가에 따른 표면거칠기의 형상

고속가공에서 절삭유제의 적절한 선택과 적용은 표면거칠기를 향상시키기 위한 한가지 방법이라 할 수 있다. Fig. 7은 합금강(SCM440, HRC30)을 초경공구를 사용하여 선삭실험한 것으로서 절삭속도를 변화시키면서 수용성 절삭유를 사용하여 절삭한 경우와 절

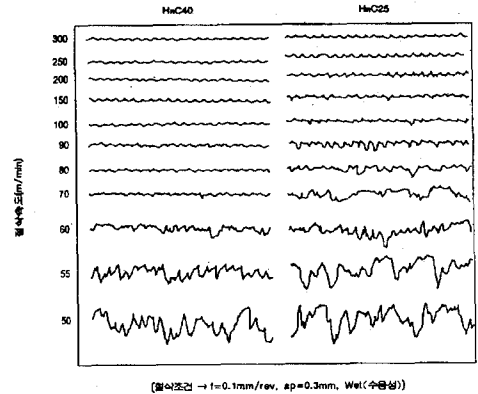
삭유를 사용하지 않은 경우의 표면거칠기 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 절삭유를 사용하여 절삭한 가공면의 표면거칠기가 절삭유를 사용하지 않은 경우보다 월등히 우수한 표면거칠기를 나타내며 절삭속도가 증가할수록 우수한 표면거칠기를 나타냄을 볼 수 있다. 일반적으로 고속절삭이나 열전도성이 나쁜 스테인레스강, 티타늄합금의 절삭에는 냉각성이 우수한 수용성 절삭유가 적합하고, 저속절삭이나 초내열합금, 고경도강의 난삭재의 절삭에는 윤활성이 우수한 유성 절삭유를 사용한다. 그러나 공구재료의 종류에 따라서 절삭유제가 표면거칠기와 공구마모에 미치는 영향에는 차이가 있다.



<Fig. 7> 절삭유제와 표면거칠기와의 관계

Fig. 8은 합금강(SCM440)의 경도를 다르게 하고(HRC25, HRC40) 절삭속도를 변화시키면서 피삭재의 경도가 표면거칠기에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

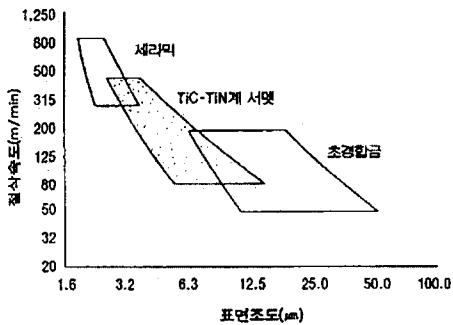


<Fig. 8> 피삭재의 경도가 표면조도에 미치는 영향

Fig. 8에서 보는 바와 같이 경도가 높은 쪽의 표면거칠기가 경도가 낮은 쪽의 표면거칠기보다 우수하다는 것을 볼 수 있으며, 절삭속도가 증가할수록 표면거칠기가 향상된다는 것을 알 수 있다. 이것은 동일조성, 동일규격의 금속재료에서도 열처리방법이 다르거나 열처리된 경도가 다르면 재료특성이 달라지기 때문이다.

Fig. 9는 탄소강(S45C)을 선삭실험한 것으로서, 공구재료가 표면조도에 미치는 영향을 절삭속도를 변화시키면서 실험한 결과이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 동일가공조건이라도 공구재료의 구성성분, 조직, 강성에 따라 표면조도에 커다란 차이가 있다.

이와 같이 피드양을 줄이고 절삭속도를 증가시키면서 절삭유체의 적절한 선택과 적용 및 공구재료의 적절한 선정으로 표면거칠기를 향상시켜 정밀표면을 가공할 수 있다. 또한, 공구형상을 개선함으로써 고속가공에서 표면거칠기를 향상시킬 수 있는데, 노즈반경(Nose Radius, R)을 크게 하면 이론적으로 표면거칠기를 향상시킬 수 있다.



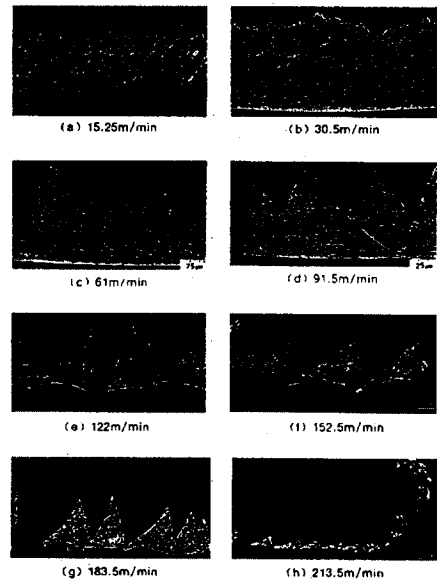
<Fig. 9> 각종 공구재료와 표면거칠기와의 관계

4. 고속가공에서의 칩의 형상

보다 짧은 절삭시간이 요구되어지는 자동화 생산에서 높은 체적제거율을 위해서는 칩의 형상이 매우 중요하다. 예를 들어 주철과는 달리 연강을 선삭할 경우에는 유동형 칩이 발생하며 이러한 유동형 칩은 범용선반으로 작업할 경우 작업자들에게도 위험하고 가공표면을 손상하기도 한다. 공작물과 공구가 긴 리본모양의 칩으로 덮여 있을 때는 공작물의 표

면이 보이지 않을 뿐만 아니라 칩이 공구와 공작물 사이에 간섭을 일으키는 경우에는 공구 파손 및 공작물 직경의 편심을 일으킬 수 있다. 따라서 절삭가공을 효율적으로 수행하기 위해서는 칩이 절단되어 나오도록 하여야 할 필요가 있고 이에 따라 칩 브레이크에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이와 같은 문제를 극복하는 다른 한가지 방법은 절삭속도를 증가시키는 것이다. 절삭속도를 증가시키게 되면 칩이 짧게 끊어져 나온다. 절삭속도가 증가함에 따라 칩이 짧아지는 것은 고속절삭에서는 칩의 전단부에서 국부전단(Shear localization)이 발생되어 연속적인 칩형상에서 국부전단형 칩(Shear localized type chip)의 형태로 되어지기 때문이다^[2].

Fig. 10은 CBN공구를 사용하여 Inconel 718을 절삭실험한 것으로서 절삭속도의 증가에 따른 칩의 형상과정의 변화를 뚜렷히 보여주고 있다.



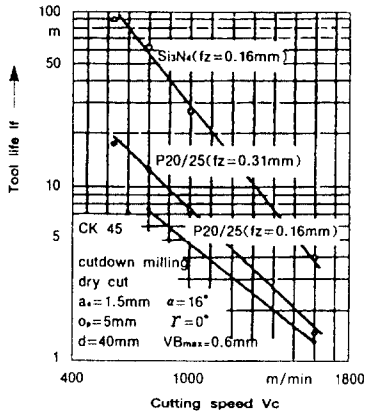
<Fig. 10> 절삭속도의 증가에 따른 칩의 형상

5. 고속가공과 공구마모

일반적으로 공구손상에 영향을 미치는 절삭조건은 절삭속도, 이송량, 절삭깊이 순으로 크고 3가지 요인 모두 각각 커지면 커질수록 공

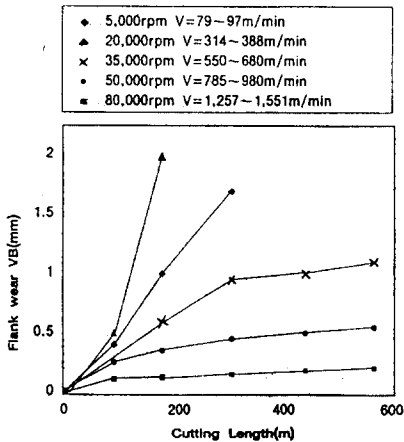
구손상은 커지고 공구수명은 짧아지는데, 절삭속도가 증가할수록 공구마모가 증가하는 것은 절삭시 발생하는 절삭온도가 높아져 열화학적 마모를 발생시키기 때문이다.

Fig. 11은 절삭속도의 증가에 따른 공구수명을 나타낸 것으로 절삭속도가 증가함에 따라 공구수명이 감소함을 볼 수 있다.



<Fig. 11> 절삭속도와 공구수명

그러나 다른 연구결과에 의하면 절삭속도가 증가함에 따라 공구마모가 감소한다는 실험결과가 발표되기도 하였다. Fig. 12는 이러한 실험결과를 나타내는 것으로서 CBN볼 엔드밀을 사용하여 담금질강을 절삭실험한 것으로 절삭속도가 증가함에 따라 공구마모가 감소하는 것을 볼 수 있다.



<Fig. 12> 절삭속도의 증가에 따른 공구마모

이와 같이 절삭속도에 따른 공구마모현상이 상반되는 것은 공구와 피삭재의 관계가 상대적으로 작용하고 공작기계의 강성의 차이 및 절삭조건의 차이에서 나타나는 현상이라고 생각되어진다. 따라서 피삭재의 재질에 따라 공구를 적절히 선정하고 고속가공에 적합한 높은 강성의 공작기계를 사용해야 할 것이다.

이와 같이 고속가공의 마모메카니즘에 대한 연구는 아직도 미흡하므로 앞으로 지속적인 연구가 요구되어진다.

6. 맺음말

현재 기계가공업체서는 고속가공의 실현으로서 제품의 정밀도 향상과 가공시간의 단축 및 제조원가 저하로 생산성의 향상을 요구하고 있다. 앞서 살펴 본 바와 같이 고속가공으로서 픽피드와 이송피드의 양을 줄이고 적절한 절삭유제의 선정과 적절한 공구재료의 선정으로 표면의 정밀도를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 가공시간의 단축으로 생산성을 향상시킬 수 있다. 그러나 고속가공의 실현을 위해서는 고속가공에 대한 충분한 이해가 있어야 하며 고속가공을 할 수 있는 공작기계의 높은 강성과 고속 스펀들에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다. 또한 고속가공시 가장 문제점이 되고 있는 급속한 마모현상을 극복할 수 있는 공구재료와 공구의 개발도 필연적이라 할 수 있다.

[REFERENCES]

- [1] 양민양 "절삭가공 이론과 실제" 청문각, pp 174, 183, 1997.
- [2] R. Komanduri, K. Subramanian, and B. F. von Turkovich, "High Speed Machining", ASME, 1984.