

# 분말 고속도공구강 평엔드밀의 공구마멸 평가

정하승\*, 고태조\*\*, 김희술\*\*, 배종수\*\*\*, 김용진\*\*\*

## Evaluation of Tool Wear of P/M High Speed Steel Flat Endmill

Ha Seung Jung\*, Tae Jo Ko\*\*, Hee Sool Kim\*\*, Jong Soo Bae\*\*\*, Yong Jin Kim\*\*\*

### ABSTRACT

Powder metallurgy(P/M) process has been used for the production of high performance high-speed steels. P/M high speed steel has more uniform and fine microstructure than those of conventional wrought products. Therefore, it offers distinct advantages over conventional tool steels. The superior uniformity of composition and fine microstructure lead to excellent toughness and less distortion during heat treatment, which in turn can reduce total grinding costs and provides other benefits, such as uniform hardness and increased tool life. From these reasons, milling, hole machining, broaching, and gear manufacturing tools are major applications of P/M high-speed steels. In this research, we evaluated tool wear of flat endmill which is made of P/M high-speed steel from the view point of cutting tool performance.

**Key words** : Powder metallurgy(분말야금), High speed steel(고속도강), Endmill(엔드밀), Tool wear(공구마멸)

### 1. 서론

엔드밀은 금형 가공에 가장 널리 사용되는 절삭 공구로서 공구산업의 발달과 함께 그 수요가 날로 증가하고 있다. 엔드밀은 일반적으로 고속도강이나 초경재료를 원재료로 사용하여 연삭가공하거나 연삭가공 후 코팅처리를 하여 제조한다. 현재 사용하는 대부분의 엔드밀은 용해주조 고속도강을 원재료로 사용한다. 용해주조 고속도강은 Fig. 1과 같이 진공 또는 대기 중에서 용해 및 주조를 하여 잉곳(ingot)을 만든 다음 단조나 압연 등 일련의 공정을 거쳐 엔드밀 제조에 필요한 봉재를 만들게 된다.

그러나 용해주조 공정은 주조시의 편석으로 인해 내부조직이 불균일하고 조대한 입도 및 탄화물 분포를 가지고 있으며 조직의 방향성 등으로 인하여 기계적 성질이 저하될 뿐만 아니라 열처리시 제품의 변형이나 결함이 발생하기도 한다.<sup>1)-2)</sup> 이와 같은 단점으로 인해 용해주조 고속도강 소재로 만들어진 엔드밀은 연질재에서는 성능이 양호한 편이지만 난삭재나 고속가공에서는 내구성이 현저히 떨어지는 문제점이 있다. 이러한 용해주조 공정이 가지는 한계를 극복하기 위해 1980년대 이후 미국, 일본, 스웨덴 등을 중심으로 다양한 공정의 분말 고속도공구강을 제조하는 연구가 수행되어왔다.

2001년 4월 4일 접수

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 영남대학교 기계공학부

\*\*\* 한국기계연구원 재료기술연구부

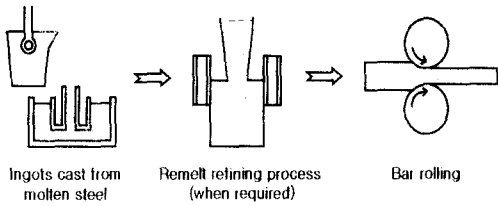


Fig. 1 Conventional process for fabrication of high speed steels

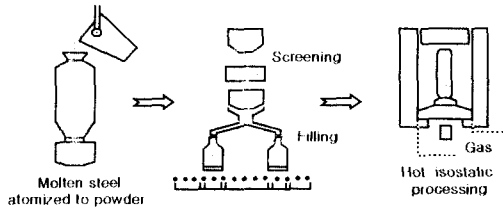


Fig. 2 P/M process for fabrication of high speed steels

분말 고속도강을 제조하는 일반적인 방법은 가스분사 또는 물분사법으로 만들어진 고속도공구강 합금분말을 성형, 소결이나 고온등압성형(HIP: Hot Isostatic Press) 등의 고밀도화 공정을 거쳐 제품을 제조하고 필요에 따라서 단조, 압연 등의 소성가공을 통하여 미세조직을 제어하여 우수한 기계적 특성을 가진 제품을 제조하는 공정이다.<sup>[3-6]</sup> 일반적으로 공구소재에 잔류하는 내부기공은 공구의 수명에 직접적인 영향을 미치는 피로강도, 충격강도 등을 급격히 감소시키는 역할을 한다. 내부 기공을 제거하여 제품의 신뢰도를 향상시키는 고밀도화 공정은 Fig. 3과 같이 HIP, CIP(Cold Isostatic Press) 및 단조, 압연 등의 여러 방법이 사용되고 있다. 그 중에서 일반적으로 사용되고 있는 공정은 Fig. 2처럼 공구강분말을 캔에 충전 및 진공 밀봉된 분말을 HIP를 사용하여 고밀도화 한 후에 열간 단조, 압연 등의 이후 공정을 거쳐 판재 또는 봉재를 제조하는 공정이다. 이 공정으로 만든 분말 고속도강은 재료의 조직이 아주 미세하며 불균일 조직이 거의 없고 편석이 나타나지 않는다. 또한, 바나듐 함량을 5wt% 이상으로 증가시킴으로서 적열경도가 높고, 미세한 탄화물을 생성시켜 내마모성을 증가시킨다.

또한 열처리시간이 단축되고 균열 및 변형 등을 최소화 할 수가 있다. 이러한 공구재료를 사용하여 제작된 엔드밀은 인성, 내마모성이 우수하며 단속 절삭용 공구재료로서 좋은 것으로 알려져 있다.

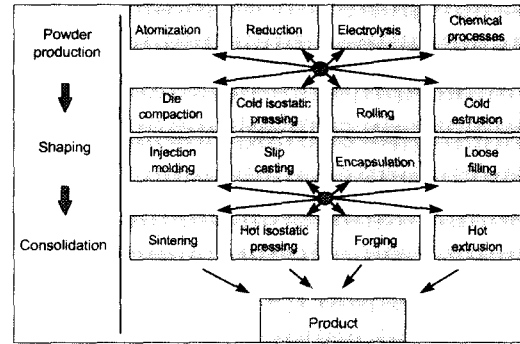


Fig. 3 Different production methods for powder metallurgy

본 연구에서는 HIP 공정으로 분말 고속도공구강을 개발한 후, 개발하고 있는 분말 고속도공구강 재료와 용해주조 고속도공구강 재료를 사용하여 제작된 평엔드밀을 각각 이용하여 공구마멸의 관점에서 절삭성을 평가함으로써 공구재료로서의 비교우위를 평가하고자 한다. 공구재료로서의 적합성을 평가하는 방법은 내마모시험, 충격시험, 항절력시험, 공구마모시험, 굽힘시험 등 많은 방법이 있으나 본 연구에서는 절삭공구로서 가장 중요한 공구마모시험만을 평가를 하였다.

## 2. 실험방법

개발된 재료 및 용해주조 고속도공구강으로 만든 공구의 마멸을 평가하는데 있어서 실험의 효율성을 위해 Taguchi의 실험계획법에 의거하여 실험을 하였다. Table 1의 직교배열표(L9)에 따라 용해주조 및 분말 고속도공구강으로 제작된 엔드밀을 이용하여 실험 1번부터 9번까지 차례로 각각 실시하였으며, 절삭조건은 Table 2처럼 절삭속도, 날당이송, 절삭깊이의 변화를 주면서 건식절삭, 습식절삭 그리고 공기냉각을 할 때의 공구마멸 특성을 상호 비교하였다. 사용한 절삭유는 수용성(Emulsion type)이며, 공기냉각의 경우는 단순히 압축공기를 절삭점 근처에 분사하는 방식을 사용하였다.

절삭은 측면절삭이며, 절삭방식은 상향절삭보다 절삭부하가 작고 안정적이면서 특히 공구의 여유면 마멸이 적고, 공구수명이 양호한 하향절삭방식을 선택하였다. 피삭재는 SKD 11종으로 경도는  $H_{RC}20$ 이다.

Table 1 Orthogonal array for experiment(L9)

No.	A. Cutting speed (rpm)	B. Feed rate (mm/tooth)	C. Depth of cut (mm)	D. Cutting fluid
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C2	D2
3	A1	B3	C3	D3
4	A2	B1	C2	D3
5	A2	B2	C3	D1
6	A2	B3	C1	D2
7	A3	B1	C3	D2
8	A3	B2	C1	D3
9	A3	B3	C2	D1

Table 2 Cutting conditions used in the experiment

Factor Level	A. Cutting speed (rpm)	B. Feed rate (mm/tooth)	C. Depth of cut (mm)	D. Cutting fluid
1	600	0.02	axile 0.5d radial 0.05d	Dry
2	850	0.06	axile 1.0d radial 0.1d	Wet
3	1100	0.1	axile 1.5d radial 0.15d	Air

절삭 실험은 머시닝센터(ACE-V45, 대우)에서 실험을 하였으며, 실험에 사용되는 공구는 용해구조 고속도강(M2)과 한국기계연구원에서 개발한 분말 고속도강 소재를 사용한 엔드밀로 직경이 10 mm, 2날이고 헬릭스 각이 30° 로 동일하게 제작하였다. 이 기하학적 형상은 일반 상용의 형상과 동일한 규격이다. 사용된 분말 고속도강의 화학적 성분은 Table 3과 같으며, 이 조성은 개발중인 재료이기 때문에 경우에 따라서 달라질 수도 있다. 이때 각각의 경도는 측정결과 용해구조인 경우  $H_{RC}64-65$ , 분말 고속도공구강의 경우는  $H_{RC}66-67$ 이었다.

공구마멸은 공구 현미경(TM301, Mitutoyo)을 이용하여 플랭크면의 마멸이 VB 0.2 mm가 될 때까지 측정하였다. 동시에 표면조도 측정기(Surf-301,

Mitutoyo)를 사용하여 Cutoff 길이 2.4 mm를 기준으로 피삭재의 절삭면을 세 구간으로 나눠서 측정하며 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )값을 관찰하여 참고적인 데이터로 사용하였다.

Table 3 Chemical composition(%) of powder metallurgy

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co	Nb
1.7	0.3	0.3	4.0	4.5	5.0	5.0	5.0	1.0

### 3. 실험 결과 및 토론

용해 및 분말 고속도강 엔드밀의 마멸특성을 관찰함에 있어, 신뢰성 높은 데이터를 확보하기 위해 직교배열표에 따른 절삭 실험을 2회 반복하였다. 각각의 실험은 각각 다른 batch에서 만들어진 분말 재료를 이용하여 만든 공구로서 절삭하게 되며, 동일한 시간대가 아닌 다른 날 실험한 것으로 실험에서의 오차범위를 평가해보기 위함이 목적이다.

Table 1에서 No. 1은 절삭속도 18.8 m/min, 이송속도 0.02 mm/tooth, 축 방향 절삭깊이 5 mm, 반경방향 절삭깊이 0.5 mm로 건식절삭 실험을 했을 경우이다. Fig. 4는 이에 해당하는 마멸 그래프로서, 짐선은 1차 실험이고 실선으로 나타나는 것은 2차 실험 결과이다. 그림에서 보는 바와같이 1, 2차 실험사이에는 약간의 정량적인 오차가 존재하고는 있으나, 경향은 동일하게 나카나고 있다. 그래프에서 용해구조 고속도강 엔드밀(Conv. HSS)의 경우 1 m 절삭 후 플랭크면에서 미소 칩핑이 관찰되었으며, 2 m지점에서는 칩의 융착현상을 볼 수 있었다. 이는 피삭재로부터 생성된 칩의 배출이 원활하지 못하여 엔드밀과 피삭재 사이에서 발생한 열로 인해 플랭크면에서 융착이 일어나고 이로 인해 칩핑이 발생하여 공구수명이 다함을 알 수 있었다. 분말 고속도강 엔드밀(P/M HSS)은 3 m에서 융착현상과 함께 플랭크 마멸이 VB 0.2 mm에 도달하였다. 따라서 분말고속도공구강에 의해 제조된 엔드밀의 수명이 용해구조의 경우보다 2배정도 우수한 것으로 평가되었다.

No. 2의 절삭조건으로 실험을 했을 경우 No. 1과 비교해 볼 때 절삭속도는 동일하고, 이송속도나

절삭깊이가 큰 경우이지만 절삭성능면에서 No. 1의 결과와 큰 차이를 보인다(Fig. 5). 그 이유는 건식절삭에 비해 절삭유 사용으로 절삭부위에서 냉각과 윤활작용의 영향이 크게 작용했기 때문이다. 이로 인하여 표면조도도 No.1의 절삭결과보다 상당히 개선됨을 관찰할 수 있었다. 이는 환경친화적 절삭 등을 위하여 단순히 건식절삭만을 하고자 할 때 상당한 어려움이 있음을 나타낸다. 또한 용해주조 고속도강은 분말 고속도강보다 공구수명이 반 이하로 낮음을 볼 수 있다.

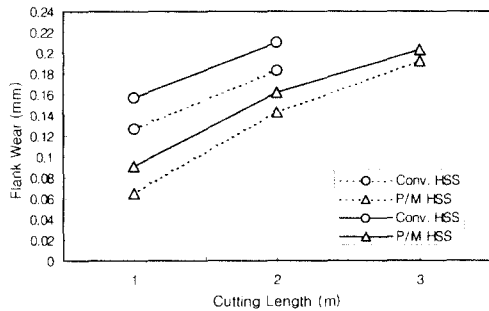


Fig. 4 Flank wear according to cutting length(No. 1)

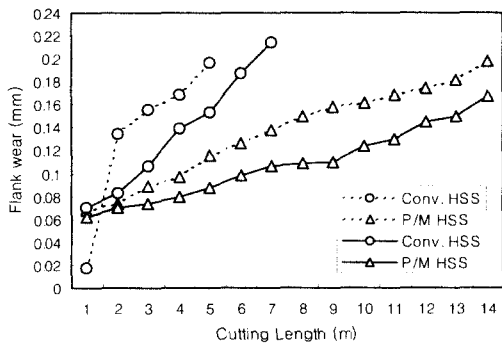


Fig. 5 Flank wear according to cutting length(No. 2)

No. 3의 절삭속도 또한 No. 1, No. 2와 동일하지만 이송속도와 절삭깊이가 가장 큰 경우로서, 절삭 시험시 압축기에서 나오는 고압의 공기를 엔드밀과 피삭재의 접촉부위에 불어주는 방식이다(Fig.6). 이 경우는 절삭시 발생하는 높은 열을 줄이고, 칩의 배출이 원활함으로써 건식절삭보다 절삭성능이 뛰

어남을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 그러나 윤활작용의 미비와 절삭부하의 증가로 인해 절삭유를 사용하는 경우인 Fig. 5 보다는 공구수명이 나빴다. 따라서 미량의 절삭유라도 절삭유를 사용할 경우에는 절삭성능에 상당한 영향을 미침을 알 수가 있다. 또한 분말 고속도강의 경우는 용해주조보다 공구수명이 매우 긴 것으로 미루어 이 재료는 윤활성이 보다 좋음과 함께 가혹한 절삭조건에 유리함을 확인할 수 있다.

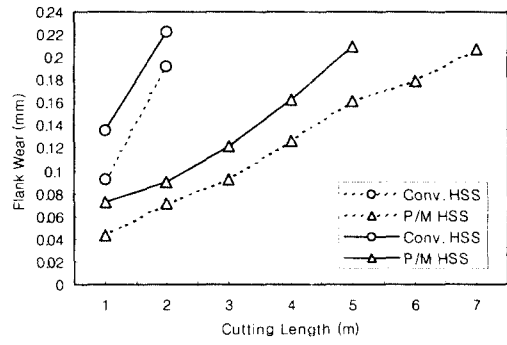


Fig. 6 Flank wear according to cutting length(No. 3)

No. 4는 절삭속도 26.7 m/min, 이송속도 0.02 mm/tooth, 축 방향 깊이 10 mm, 반경방향 깊이 1 mm에서 공기냉각으로 실험을 했을 경우이다(Fig. 7). Fig. 7의 마멸 그래프에서 용해주조 고속도강 엔드밀의 경우 1.5 m 지점에서 플랭크면을 관찰했을 때 마멸이 VB 0.2 mm까지 도달했지만, 분말 고속도강 공구는 2.5 m까지 절삭하고 미소 칩핑이 발생했다. 이는 엔드밀의 날당 이송거리나 절삭깊이가 감소하였지만, 절삭속도의 증가로 절삭거리가 많이 줄었으며 용해 고속도강이나 분말 고속도강 엔드밀 모두 공구수명이 절삭속도에 상당한 영향을 받고 있음을 볼 수 있다. 그러나 여전히 분말 고속도강 엔드밀의 성능이 우수함을 알 수 있다.

No. 5는 No. 4와 동일한 절삭속도에서 이송속도와 절삭깊이를 증가하고 건식절삭으로 실험을 했을 경우를 나타낸다(Fig. 8). Fig. 8의 마멸 그래프를 보면 용해주조 엔드밀은 1 m 지점에서, 그리고 분말 엔드밀은 1.5 m에서 마멸이 급증하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 절삭시 엔드밀과 피삭재

사이에서 발생한 높은 열의 방출이 잘 되지 않아서 플랭크 마멸을 증가시켰으며, 이것은 엔드밀의 날 부위가 갈색으로 변하는 버어닝 현상으로 확인 할 수 있었다.

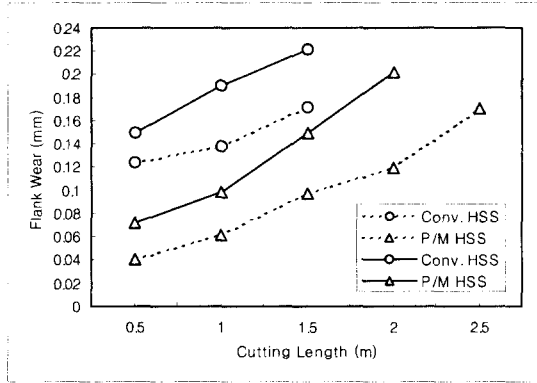


Fig. 7 Flank wear according to cutting length(No. 4)

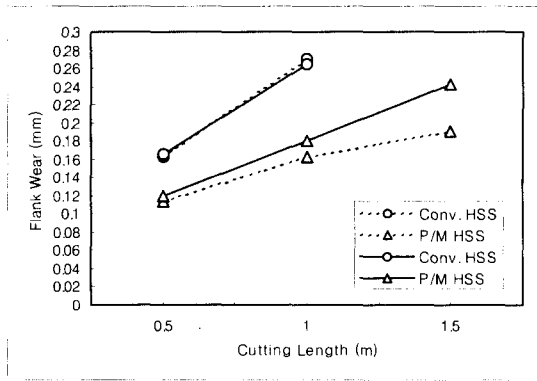


Fig. 8 Flank wear according to cutting length(No. 5)

No. 6은 절삭유를 사용하여 실험을 했을 경우 No. 5와 절삭조건이 비슷하지만 이송이 크고, 절삭 깊이는 작은 경우이다(Fig. 9). Fig. 8의 그래프와 비교해 볼 때 절삭거리가 크게 차이가 생기는 것은 절삭유를 사용함으로써 No. 5에서 엔드밀 마멸에 많은 영향을 주었던 절삭열을 줄일 수 있었기 때문이다.

Fig. 10은 No. 7의 조건에서 실험한 마멸결과를 나타낸 것으로 이때 절삭조건은 절삭속도 34.5 m/min, 이송속도 0.02 mm/tooth, 축 방향 깊이 15 mm, 반경방향 깊이 1.5 mm에서 절삭유를 사용하

였다. Fig 10에서 용해주조 엔드밀은 1 m에서 VB 0.2 mm를 훨씬 넘었으며, 분말 엔드밀은 각각 1.5 와 2 m에서 마멸점에 도달했다. 이 경우 절삭유를 사용했음에도 절삭성능이 좋지 못한 것은 절삭속도에 비해 날당 이송이 느리므로 마찰에 의한 마멸이 증가했고, 축 방향과 반경방향의 절삭깊이가 크므로 엔드밀의 날에 작용하는 절삭부하가 많은 영향을 미쳤기 때문이다.

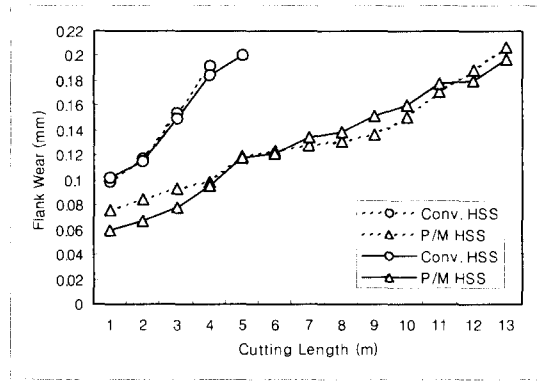


Fig. 9 Flank wear according to cutting length(No. 6)

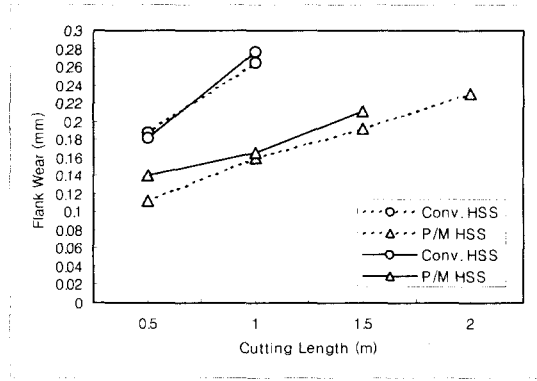


Fig. 10 Flank wear according to cutting length(No. 7)

Fig. 11은 No. 7과 동일한 절삭속도에서 날당 이송을 높이고, 절삭깊이를 작게 하여 공기 냉각으로 실험한 조건인 No. 8의 마멸특성을 나타낸다. Fig. 11에서 용해주조 엔드밀의 경우 2 m 부터 미소 칩핑 현상이 발생하고, 분말 엔드밀은 4 m, 5 m 지점에서 칩핑이 발생했다. 플랭크면을 관찰해보면 마멸이 전반적으로 고르게 발생했음을 볼 수 있는데,

이는 고압의 공기를 불어 줌으로써 절삭시 발생하는 열과 칩의 간섭을 줄일 수 있었기 때문이다. 이러한 공기는 약간의 냉각작용도 있겠지만 절삭영역 부근에서의 칩 제거라는 효과로 마멸특성을 변하게 하고 있음을 나타낸다.

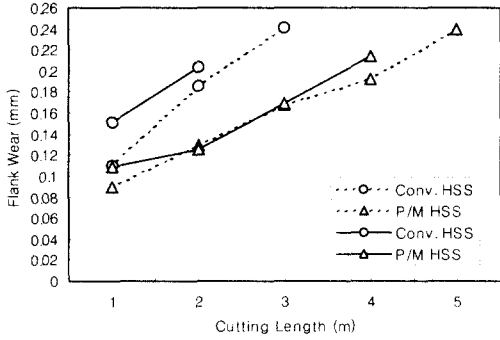


Fig. 11 Flank wear according to cutting length(No. 8)

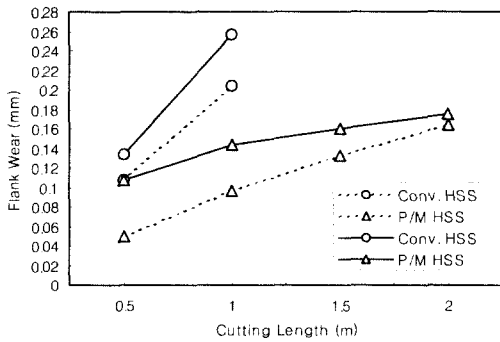


Fig. 12 Flank wear according to cutting length(No. 9)

No. 9의 절삭조건을 보면 절삭속도 34.5 m/min, 축 방향 깊이 10 mm, 반경방향 깊이 1 mm로 날당 이송을 최고인 0.1 mm/tooth에서 건식절삭으로 실험을 하였다(Fig. 12). Fig. 12에서 용해구조 엔드밀은 플랭크 마멸이 급격히 증가하다가 1 m에서 VB 0.2 mm를 넘었으며, 분말 엔드밀의 경우 마멸 그래프가 완만하게 증가를 하다가 2 m 지점에서 플랭크 마멸이 0.15 mm로 측정이 되었고, 그때 칩핑 현상이 나타났다. 이처럼 빠른 절삭속도와 이송속도에서는 엔드밀과 피삭재 사이에서

발생하는 열을 신속히 낮추어줘야 하는데 그렇지 못했기 때문에 No. 5처럼 버어닝 현상이 날 부위에서 관찰되었다. 즉, 용해구조공구강에서 이미 잘 알려져 있듯이 분말 고속도공구강 역시 고온에서 경도저하로 공구의 성능이 매우 떨어지고, 따라서 가능하면 절삭유를 사용하는 습식절삭을 하여야 함을 알 수가 있다.

#### 4. 결론

분말고속도강 엔드밀의 절삭성을 평가하기 위하여 공구마멸을 기준으로 용해 고속도강 엔드밀과 비교하는 절삭실험을 하였다. 직교배열표(L9)에 따라 절삭속도, 날당 이송속도, 절삭깊이의 변화를 주면서 절삭실험 한 결과, 플랭크면의 마멸 특성을 볼 때 용해 고속도강 엔드밀보다 분말 고속도강 엔드밀의 마멸특성이 좋았으며, 절삭성능면에서 20% - 40% 우수함을 실험을 통해 확인했다. 특히, 열악한 절삭환경에 대해 분말 엔드밀이 용해구조 엔드밀보다는 공구수명이 더욱 양호하다. 그러나, 두 경우 모두 고온열화현상을 보이고 있기 때문에 건식 절삭 또는 공기 냉각으로 절삭을 했을 때보다 절삭유를 사용했을 경우 절삭 시 발생하는 많은 열을 줄일수 있었고, 칩의 원활한 배출로 플랭크면에서 칩핑과 칩의 용착현상을 줄일 수 있어서 절삭유의 사용은 필수적이다. 이러한 분말 고속도강 엔드밀은 공구재료가 상대적으로 고가인 면이 있으나, 공구제작 시의 용이성 및 절삭공구의 성능 등의 문제로 그 사용이 확산될 것으로 사료된다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 선도 기술 개발사업(G7)의 지원으로 수행된 분말 고속도 공구강 개발 과제 의 위탁연구사업으로 추진된 내용의 일부임을 밝히며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. H. D. Ambs, Production of stainless steel low-alloy steel, and tool steel powder, ASM Metal Handbook 7th ed., pp. 100-104.
2. F. Thummer and R. Oberacker, An introduction to

- powder metallurgy, London:Institute of Materials, 1993.
3. R. W. Stevenson, P/M tool steels, ASM Metal Handbook, Vol. 1, pp. 784-793.
  4. W. Schatt, K. Wieters, Powder metallurgy processing and materials, Shrewsbury:European Powder Metallurgy Association, 1993.
  5. G. S. Upadhyaya, Powder metallurgy technology, Cambridge:International Science Publishing, 1997.
  6. W. D. Jones, Fundamental principles of powder metallurgy, London:Edward Arnold Lth., 1960.
  7. 정보구, 고태조, 김희술, "에어-오일 냉각방식에 의한 고경도 재료의 선삭," 한국정밀공학회지, Vol. 14, No. 8, pp. 73-81, 1997.