

열처리 금형강의 블엔드밀 고속가공

양진석*(한국생산기술연구원), 허영무(한국생산기술연구원)

High Speed Ball End Milling of Hardened Mold Steel

J. S. Yang(Korea Institute of Industrial Technology), Y. M. Heo(Korea Institute of Industrial Technology)

ABSTRACT

High speed machining experiment on the heat-treated mold steel(STAVAX and CALMAX of hardness HRC 53) is carried using TiAlN coated ball endmill. Tool life and wear characteristics under the various machining parameters and cooling methods are investigated. Effect of cooling method on life and wear of the tool was compared. For most cases, tool life was not determined by the amount of wear but by the chipping on the cutting edge. It is found that tool manufacturer's cutting parameters generally agrees with the results of this experiment.

Key Words : Ball Endmill (블엔드밀), HSM (고속가공), Mold Steel (금형강), Tool Wear (공구마모)

1. 서론

근래들어 금형의 수명 증대와 강도 향상을 목적으로 금형 제작시 열처리한 금형강이 많이 적용되고 있다. 아울러 금형업계에서 고속가공기의 적용사례가 증가하면서 하드밀링(Hardmilling)에 대한 관심이 높아지고 있다. 하드밀링은 가끔 고속밀링가공과 혼용되기도 하지만 피삭재가 부드러운 상태에서 가공하는 것이 아니라 열처리된 강을 황삭 또는 정삭을 수행하는 것을 의미한다. 하드밀링을 적용하기 전에는 통상 피삭재를 금형의 최종치수보다 약 0.2 ~ 0.3mm 가공여유로 가공한 후 열처리한다. 이후 방전가공을 하여 최종 형상을 얻은 후, 많은 시간이 소요되는 수작업인 사상공정을 거쳐 금형이 만들어진다. 결과적으로 제조원가가 상승하고 납기가 길어지게 된다. 하드밀링은 가공시간이 많이 소요되는 방전가공의 일부 또는 전부를 대체할 수 있다. 즉, 최근에는 방전가공의 역할이 깊은 홈 및 내부 코너부 등 밀링가공이 어렵거나 불가능한 곳에 제한적으로 사용하려는 추세이다.

금형업체에서의 주 관심사항은 품질을 향상시키고 원가와 납기를 단축하는 것이다. 하드밀링을 올바르게 적용하면 금형제조에서의 이 문제에 대한 해결책을 얻을 수 있고 그 예로서 수작업 공정의 대체가 있다. 하드밀링은 증가된 feed 속도와 pick feed량 감소로 인하여

가공시간의 증가 없이 금형의 최종형상을 얻을 수 있는 가능성을 제공하고 이로 인하여 수작업 또는 기계에 의한 마무리작업을 최소화하거나 없앨 수 있다. 또한 가공시 열방출이 잘 되므로 금형표면의 결함을 최소화하여 금형수명을 연장시킬 수 있다.

그러나, 국내 금형업체에서 고속가공이 아직 금형제작에 많이 적용되지 못하고 있고 가공설비 중 고속가공기의 비중이 크지 않기 때문에 고속가공기의 가공특성과 고속가공용 공구의 특성 등 가공관련 데이터 축적량이 상대적으로 적다. 특히 HRC 50 ~ 60 정도의 고경도 금형강의 가공에 대한 연구가 많이 진행되고 있지만^{1,2,3,4} 실제 금형제조시 하드밀링의 적용사례는 아직 많지 않다. 공구제조사 또는 가공기 공급사에서 추천하는 가공조건은 일반적으로 그 범위가 넓고 안전한 쪽을 추천하기 때문에 실제 금형회사에서 보유하고 있는 고속가공기를 고능력로 사용하기 위한 가공조건은 자체적으로 시험하여 확립할 수 밖에 없다. 본 실험은 플라스틱 사출금형의 제작에 많이 적용되는 금형강인 STAVAX 와 CALMAX를 대상으로 하드밀링에 적합한 가공조건을 얻기 위한 연구의 일환으로 수행되었다.

2. 본론

2.1 실험장치 및 방법

사용된 실험장치의 개략도는 그림 1과 같이 절삭력 측정을 위한 공구동력계(Kistler 9256B1) 및 전용 앰프, 공구변위 측정용 gap 센서, 공구촬영용 카메라, 절삭력측정용 시편과 마모시험용 시편으로 구성되어 있다. 사용한 고속가공기는 Rödgers사의 RFM760으로서 최대회전수는 42,000RPM이다. 사용한 공구는 TiAlN 코팅된 $\phi 6$ 볼엔드밀(Jabro)이고 공구마모의 판단은 CCD카메라를 이용하여 공구마모부의 화상을 촬영하여 마모폭을 측정하였다.

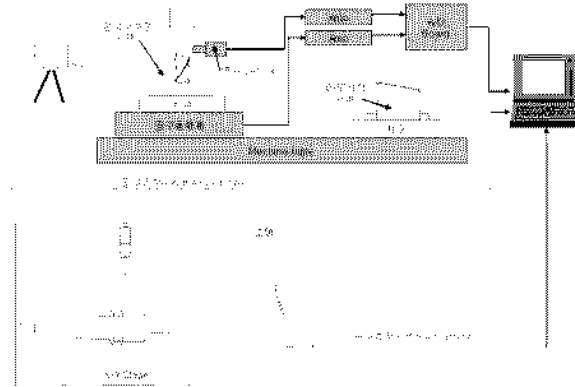


Fig. 1 Experiment setup of tool wear and cutting force measurement system

공구 마모시험은 별도로 장착된 마모시험용 시편을 일정한 거리만큼 가공한 후 공구동력계 상부에 장착된 절삭력측정 시편을 가공하면서 절삭력을 측정 후 카메라로 공구마모 부위의 화상을 취득하여 마모양을 측정하는 과정을 공구가 마모될 때 까지 반복한다. 공수 수명 한계는 통상 공구 플랭크면의 마모폭의 크기를 기준으로 하지만 가공면의 조도증가, 치핑의 크기를 동시에 고려해야 한다. 마모폭이 적더라도 일정크기 이상의 치핑이 발생하거나 표면조도가 일정한계를 넘어서면 마모한계에 도달한 것으로 판단한다.

공구마모 측정시 공구가 기계의 주축에 장착된 상태에서 화상을 취득하는 것이 실험시간을 줄일 수 있고 공구척의 장탈착에 의한 runout 오차를 줄일 수 있어 가장 이상적인 방법이지만 볼엔드밀의 경우 마모부위가 구면상에 위치하므로 화상취득을 위한 광학계와 조명의 세팅이 쉽지 않고, 고배율 광학계를 쓸 경우 초점 심도가 낮아 마모부위 화상을 직접 촬영하기가 어려운 점이 있어 본 실험에서는 주축에 장착된 상태로 측정하지 않고 공구와 holder를 탈착하여 측정하였다.

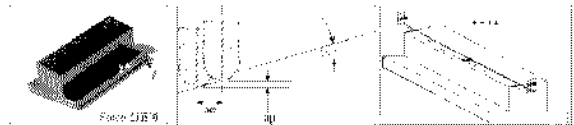
2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 절삭속도 및 이송의 영향

아래 표1은 실험에 사용한 공구의 제조사에서 제시한 추천 절삭조건이다. 이를 기준으로 피삭재의 고속가공에 적합한 절삭속도와 날당이송량의 영향을 판단하기 위하여 가공조건을 그림 2와 같이 선정하였다. 이 그림에서 Test 1-1 ~ 1-6 과 Test 2-1 ~ 2-6 은 정삭조건과 황삭조건에서의 절삭속도의 변화에 따른 절삭력변화를 시험하기 위한 조건이고 날당이송 = pick feed로 설정하였다. 사용한 공구동력계가 250N까지 측정 가능한 소형이기 때문에 과도한 절삭력이 걸리는 것을 피하기 위해 절입량을 작게하여 실험하였다. Test 3-1 ~ 3-5는 날당이송량의 영향을 알아보기 위한 가공조건이다.

Table 1 Tool maker's suggested cutting condition

| Hardened steel > 48-56 HRC | 가공 조건 | |
|----------------------------|-----------|-----------|
| | 황삭 | 정삭 |
| 절삭속도 Vc (m/min) | 200 | 280 |
| 축방향절입량 ap (mm) | 0.10d max | 0.02d max |
| 반경방향절입량 ae (mm) | 0.30d max | 0.01d max |
| 날당이송 (mm) | 0.100 | 0.051 |



| 속이속도 (m/min) | 절입량 ap | 피삭재 | 절삭력 | | 날당이송 (mm/min) | 날당이송 (mm/min) | |
|--------------|--------|------|--------|-------|---------------|---------------|-------|
| | | | 피삭재 | 공구 | | 피삭재 | 공구 |
| 120 | 0.10 | 0.05 | 12.200 | 3.571 | 0.051 | 1.261 | 0.280 |
| 150 | 0.10 | 0.05 | 16.272 | 3.820 | 0.051 | 1.466 | 0.435 |
| 200 | 0.10 | 0.05 | 21.282 | 3.820 | 0.111 | 0.953 | 0.576 |
| 300 | 0.10 | 0.05 | 24.526 | 3.820 | 0.111 | 0.681 | 0.500 |
| 400 | 0.10 | 0.05 | 28.928 | 3.820 | 0.111 | 0.500 | 0.500 |
| 500 | 0.10 | 0.05 | 33.245 | 3.820 | 0.111 | 0.051 | 0.546 |
| 120 | 0.10 | 0.05 | 10.521 | 2.890 | 0.051 | 0.381 | 0.280 |
| 150 | 0.10 | 0.05 | 14.521 | 2.890 | 0.051 | 0.163 | 0.381 |
| 200 | 0.10 | 0.05 | 18.054 | 2.890 | 0.103 | 0.837 | 0.576 |
| 300 | 0.10 | 0.05 | 21.521 | 2.890 | 0.103 | 0.728 | 0.576 |
| 400 | 0.10 | 0.05 | 25.054 | 2.890 | 0.103 | 0.051 | 0.576 |
| 500 | 0.10 | 0.05 | 28.521 | 2.890 | 0.103 | 0.163 | 0.576 |
| 120 | 0.10 | 0.05 | 12.200 | 3.571 | 0.051 | 1.711 | 0.280 |
| 150 | 0.10 | 0.05 | 16.272 | 3.571 | 0.051 | 0.280 | 0.280 |
| 200 | 0.10 | 0.05 | 21.282 | 3.571 | 0.051 | 0.833 | 0.280 |
| 300 | 0.10 | 0.05 | 24.526 | 3.571 | 0.051 | 1.326 | 0.280 |
| 400 | 0.10 | 0.05 | 28.928 | 3.571 | 0.051 | 4.033 | 0.280 |

Fig. 2 Selected machining parameters

그림 3은 공구동력계로부터의 전형적인 절삭력 신호이고 그림 4에 열처리된 CALMAX 소재의 절삭력 측정 결과를 보여주고 있다. 여기서 좌표계 X, Y, Z는 상기 그림 2에서와 같이 각각 Feed방향, Feed와 직각인 방향, 축방향을 나타낸다. 그래프상의 절삭력은 peak값 평균(절삭력파형 peak치 30개의 평균값)을 나타낸 것으로서 절삭력측정 시편상의 일정한 지점을 통과하는 시점을 기준으로 연속된 30개 파형에 대한 평균값이다. 축방향 절삭력(Z)이 다른 방향의 힘보다 일반적으로 크게 나타나고 있고 Feed방향 절삭력(X)은 절삭속도 변화에 상대적으로 둔감하다. 절삭속도가 증가함에 따라 절삭력이 증가하다가 Vc=200m/min 이상의 속도가 되면 절삭력이 감소하는 경향을 보이고 있다. 앞에서 언급한 것처럼 고속

가공에서는 접촉부에서 발생한 열에 의해 flow stress가 감소하므로 결과적으로 절삭력이 감소한다. 따라서 $V_c=200$ m/min 정도가 되면 고속가공 영역에 도달한다고 판단되고 공구마모를 고려하지 않는다면 이보다 높은 속도로 가공하는 것이 유리함을 알 수 있다. 날당이송의 영향을 보면 그림 17에서와 같이 각 절삭분력이 날당이송에 직선적으로 비례함을 보이고 있다. 그림 5는 동일한 경도의 stavax 소재와 calmax 소재에 대한 절삭력 측정 결과로서 동일한 경도이지만 stavax가 절삭성이 더 우수함을 알 수 있다.

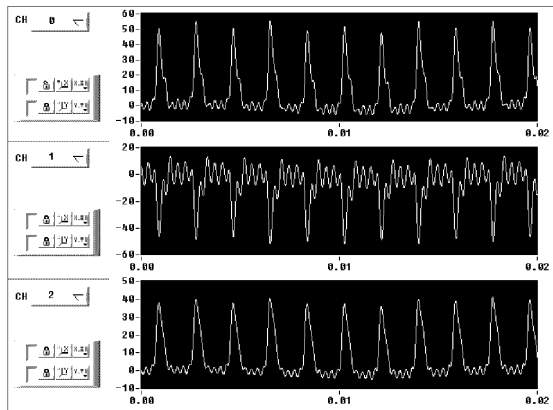


Fig. 3 Typical cutting force signal from tool dynamometer

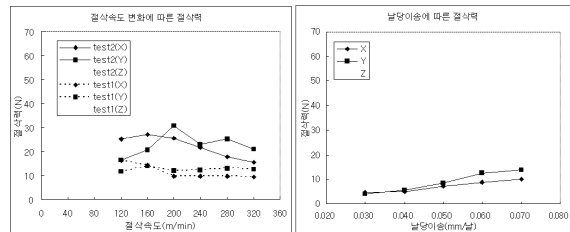


Fig. 4 Cutting force for CALMAX (HRC ~53)

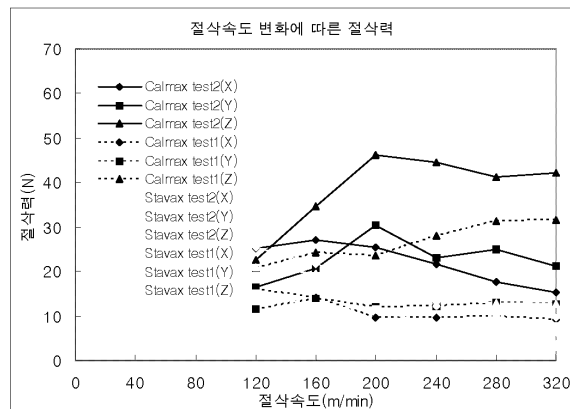


Fig. 5 Comparison of cutting force for different mold steel(HRC ~53)

2.2.2 피삭재 경도의 영향

피삭재의 경도에 따른 절삭력의 변화를 알아보기 위해 STAVAX 소재를 열처리한 경우와 열처리하지 않은 경우를 비교실험 하였다. 열처리를 하지 않은 소재의 경우 절삭속도가 증가함에 따라 3방향 절삭력이 모두 감소하였다. 열처리한 경우 그림 6에서와 같이 Test2 조건에서는 절삭속도 증가에 따라 절삭력이 모두 감소하고 있으나 test1의 경우 축방향 힘은 증가하는 반면 x, y방향 힘은 큰 변화가 없었다.

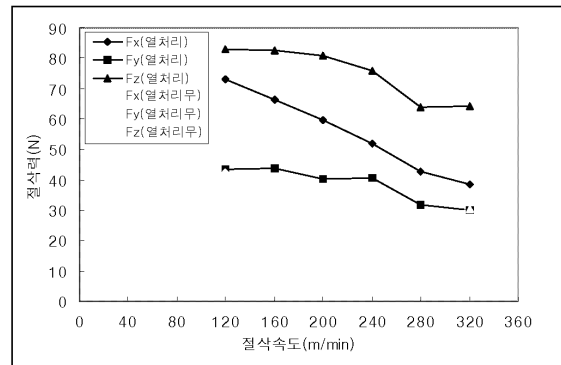


Fig. 6 Cutting force for different workpiece hardness (stavax at HRC 53 and 35, $\phi 8$ ball endmill, test2)

2.2.3 공구마모시험

사용한 공구의 수명을 평가하기 위하여 마모시험을 실시하였다. 마모시험 방법은 그림 7에서와 같이 15도 경사진 마모시험편을 일정거리 만큼 절삭가공한 후 절삭력과 마모량을 측정하였고 공구사용 한계에 도달할 때 까지 이 과정을 반복하게 된다. 피삭재는 열처리된 Stavax(HRC 53.5)이고 직경 6mm 볼엔드밀을 사용하였다. 가공조건은 아래 그림에서와 같이 고정도제의 중삭가공 정도의 조건을 기준으로 하였고 절입량($a_p=0.3$ mm), 피치($a_e=0.3$ mm), 날당이송(0.1mm)을 일정하게 유지하고 절삭속도를 200 ~ 320 m/min 으로 변화시키면서 실험하였다.

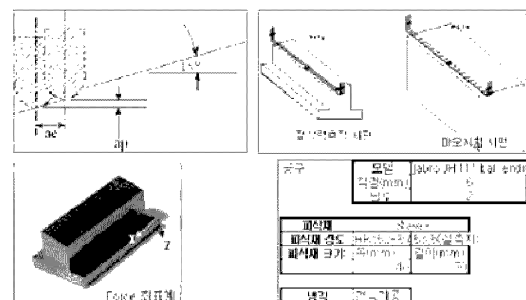


Fig. 7 Workpiece and definition of the coordinate system for tool wear test

그림 8(a) ~ 8(d)는 각각 절삭속도 $V_c = 200, 240,$

280, 320 m/min일 경우 공구의 마모를 시험한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 공구마모량의 증가와 절삭력 증가는 뚜렷한 연관 관계가 있음을 나타내고 있다. 공구의 마모가 급격히 커지기 시작하면 절삭력의 y, z 분력은 급격히 증가하지만 x 분력은 변화가 거의 없거나 아주 서서히 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 그림 왼편의 peak 평균은 절삭력신호 peak치의 평균값이고 그림 오른편의 평균절삭력은 파형의 평균값으로서 평균절삭력의 증가추세도 peak 평균과 유사한 양상을 보이고 있다.

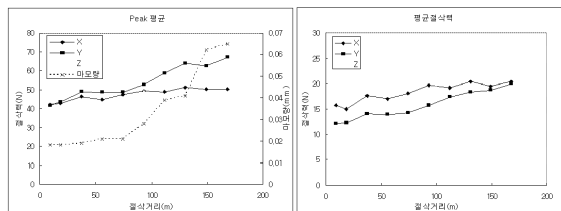


Fig. 8(a) Measured cutting force and flank wear (Vc=200m/min)

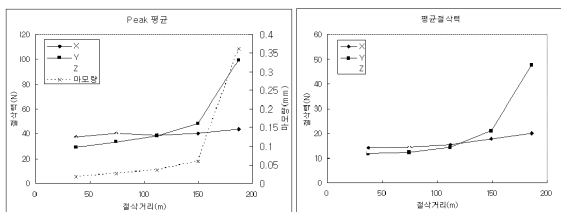


Fig. 8(b) Measured cutting force and flank wear (Vc=240m/min)

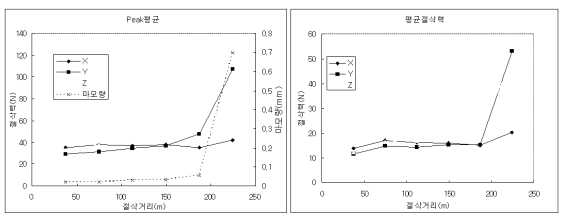


Fig. 8(c) Measured cutting force and flank wear (Vc=280m/min)

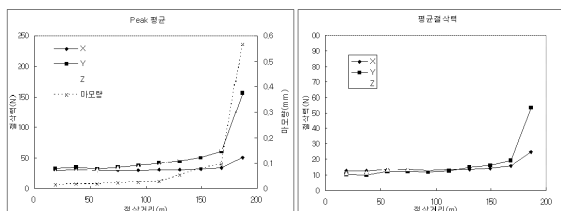


Fig. 8(d) Measured cutting force and flank wear (Vc=320m/min)

그림 9는 절삭속도 변화에 따른 플랭크면 마모량 그래프로서 절삭거리가 약 120m까지는 마모량의 크기나 마모증가량이 크게 차이가 나지 않고 절삭거리가 따라 선형적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 공구의 초기마모가 시작된 후 일정거리까지는 이상마모 없이 균일한 마모가 진행되는 것으로

예측된다. 절삭속도가 가장 큰 Vc = 320 m/min의 경우 절삭거리가 약 120m를 지나면서 급격히 마모가 진행되는 것을 알 수 있다. 시험한 모든 속도에서 공구수명의 한계는 플랭크 마모에 의한 것이 아니라 인선부 치핑이 원인이었다. Vc=280m/min일 경우가 가공거리가 가장 길고 마모량도 적은 결과를 얻었고 그 다음으로는 Vc=200m/min일 경우이다. 공구제조사 추천 절삭속도는 황삭 200m/min, 정삭 280m/min로서 시험결과 이 속도에서 안정적인 마모를 기대할 수 있음을 알 수 있다.

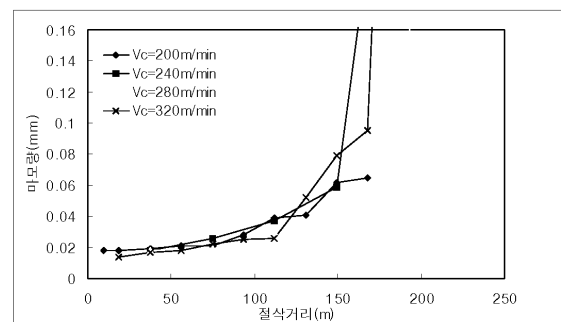


Fig. 9 Measured flank wear (Dry cut)

치핑(chipping)이 발생하기 전까지는 마모는 전반적으로 가공거리에 비례하고 마모량도 0.06mm 정도이다. 통상적으로 플랭크면 마모한계가 0.15~0.2mm인 것을 감안하면 실험에 사용한 공구가 상당히 내마모성이 우수한 것을 알 수 있다. 본 실험에서 공구 치핑이 생긴 원인은 가공실험에 사용한 공구경로에서 보듯이 공구의 진입/진출시 이송속도를 줄이지 않고 일정한 feed로 가공함으로써 급격한 충격부하를 반복적으로 받는 것이 원인중의 하나일 것으로 유추된다. 실제 금형의 고속가공시에는 이런 형태의 공구경로를 거의 사용하지 않으므로 공구수명은 본 실험결과에서 얻은 것 보다 훨씬 길 것으로 판단된다. 그림 10은 가장 안정적인 마모형태를 보인 Vc=280m/min으로 가공했을 때 가공거리에 따른 공구 플랭크면 마모부 사진의 예이다.

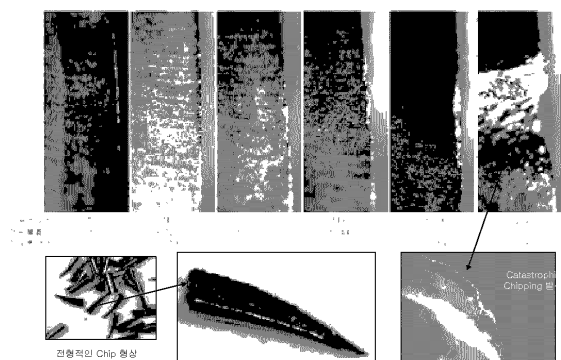


Fig. 10 Photograph of the primary flank surface showing progress of wear (Dry cut)

2.2.4 오일미스트 분사의 영향

TiAlN 코팅공구의 경우 건식이나 오일미스트를 사용할 수 있고 TiCN 계열의 코팅공구는 건식, 유성, 수용성 절삭유를 사용하는 것이 통상적인 가공방법으로 알려져 왔다. 냉각방식의 차이에 의한 영향을 알아보기 위하여 건식가공과 동일한 가공조건으로 오일미스트를 사용하여 마모실험을 하였다. 그림 11은 초기 절삭력(가공거리 0m 일때) 대비 절삭력 증가량 그래프로써 상기의 건식가공에서와 유사한 추세를 보이고 있다. Feed방향의 절삭분력 X는 절삭거리에 따른 변화량이 적은 일정한 값을 나타내고, Y 및 Z 분력은 가공거리에 비례하여 증가하는 추세를 보이고 있다.

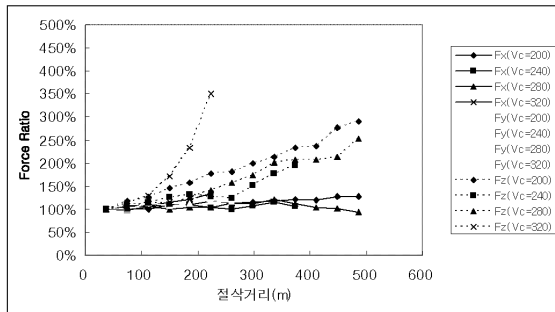


Fig. 11 Cutting force ratio vs cutting velocity (Oil mist)

그림 12은 건식가공과 오일미스트 분사가공에 따른 공구수명을 비교한 그래프로써 건식가공에서와 마찬가지로 Vc=200, 280 m/min일 경우가 우수한 마모 특성을 보이고 있다. 모든 속도에서 마모한계의 판단은 역시 인선부 치핑이 원인이었다. Vc=320 m/min 일 경우가 건식가공과 마찬가지로 가장 수명이 짧았고 가공거리가 150m를 지나면서 마모속도가 급격히 증가하였으며 파손되기 전까지의 가공거리도 건식가공보다 조금 길다. Vc=320m/min 이외의 속도에서는 마모한계가 Vc=320m/min의 경우보다 2배 이상 길어졌다.

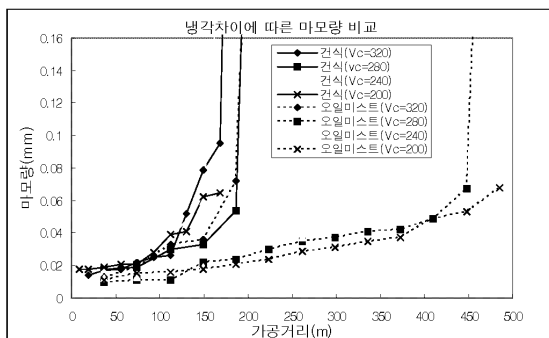


Fig. 12 Comparison of flank wear (dry cut vs oil mist spray)

그림에서 보는바와 같이 오일미스트를 간접 분사하며 가공한 경우가 공구수명 측면에서 건식가공보다 월등히 유리한 결과를 얻었다. Vc=320m/min의 경우 건식가공과 오일미스트 분사가공시의 공구수명 차이가 크지는 않지만 이 외의 다른 속도에서는 공구수명이 2배 이상 향상됨을 알 수 있다. 그림 41은 가공거리가 가장 긴 Vc=280m/min일때 가공거리에 따른 플랭크면 마모부의 사진이다. 이 조건의 경우 건식가공보다 2.5배 정도 수명을 보였다.

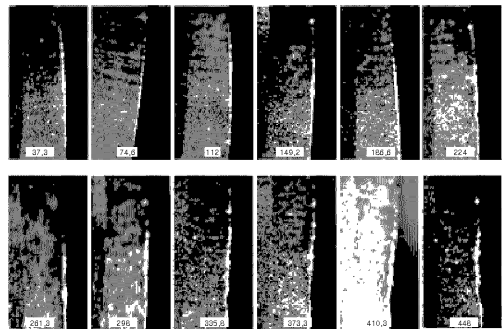


Fig. 13 Photograph of the primary flank surface showing progress of wear (with oil mist)

2.2.5 유사 공구와의 마모량 비교

황삭가공 추천 절삭속도인 Vc=200m/min 조건에서 여러 제조사의 TiAlN 코팅된 $\phi 6$ 블엔드밀에 대하여 마모시험을 하였다. Pick feed량은 상기의 마모 실험에서는 ae=0.3mm에서 실험하였으나 마모시험 시간 단축을 위하여 이 보다 크게 하여 ae=0.9mm 및 0.7mm에서 비교시험 하였다. 선정된 5 종류의 공구는 전부 고경도 소재의 고속가공용으로 판매하는 공구로서 공구 인선의 형상은 각 제조사마다 조금씩 차이가 나고 이에 따라 마모가 없는 상태에서 측정된 절삭력도 그림 14에서와 같이 큰 차이가 났다. 공구 T1 및 T2가 상대적으로 초기절삭력이 크고 마모에 따른 절삭력 증가도 크게 나타났다. 그림 15는 공구 마모한계까지 가공했을 때의 절삭거리와 총 가공부피를 비교한 그래프로 공구수명 측면에서 공구 J와 D가 우수한 성능을 나타낸 반면 공구 T1 및 T2는 공구 D와 비교하여 50% 이하의 성능을 보여주고 있다. 이는 공구 T1 및 T2가 높은 절삭력을 받음에 따라 마모가 조기 진행되고 공구변형의 크기도 이에 따라 증가하는데 기인한 것으로 판단된다.

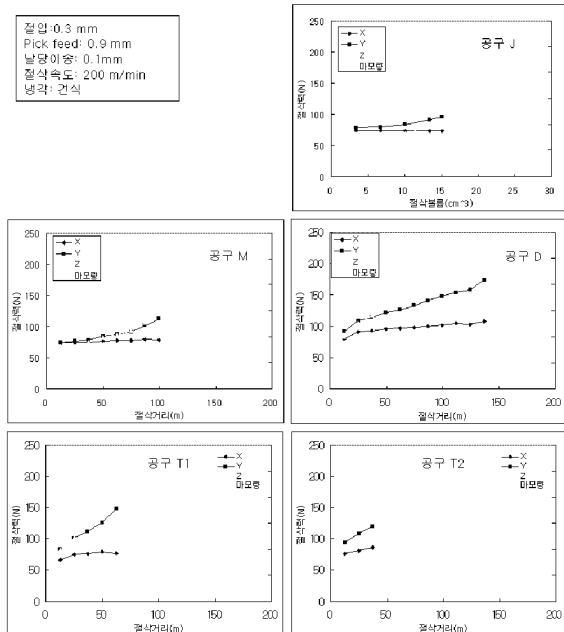


Fig. 14 Cutting force of various brand tools

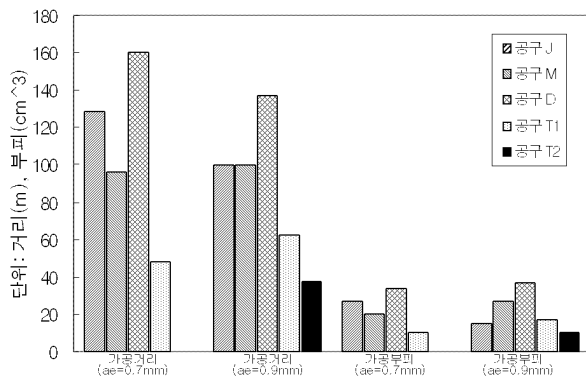


Fig. 15 Comparison of tool life

3. 결론

하드밀링 구현을 위한 절삭조건 데이터 확보를 목적으로 고경도 금형소재인 Calmax 및 Stavax 에 대하여 기초 절삭실험을 하였고 공구사가 제시한 가공조건의 타당성을 확인하였다. 또한, 피삭재의 경도가 절삭력에 미치는 영향을 시험하였고, 선정된 공구를 대상으로 공구 수명단계 판단을 위한 마모시험을 실시하였고 절삭력 신호와 마모량간의 상관관계를 확인하였다. Feed 방향 절삭력(X)은 절삭속도 변화에 상대적으로 둔감하고 공구마모가 진행됨에 따라 축방향 절삭력이 가장 민감하게 변화하였다. 건식 및 오일미스트 냉각방식에 따른 공구의 마모특성을 실험적으로 검증하였고, 오일미스트 냉각을 사용할 경우 건식가공에 비해 2 ~ 2.5배 수명향상 결과를

얻었으며 절삭속도가 280m/min인 경우가 가장 우수한 마모특성을 보였다. 공구제조사별 마모정도 비교에서는 가격이 비교적 저렴한 공구 T1 및 공구 T2가 타사 제품과 비교하여 마모가 심하게 진행되었다.

후기

본 연구는 2010 생산기반혁신기술개발사업으로 (주)재영솔루텍에서 추진중인 “납기단축을 위한 사출금형 고속가공 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Y Kita, H. Furuike, Y. Kakino, H. Nakagawa, T. Hirogaki, "Basic study of ball end milling on hardened steel," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 111, pp. 240-243, 2001.
2. Yamada, Y., Aoki, T., Kitaura, S., Tanaka, Y., Okazaki, Y. and Hayasaki, H., "High speed cutting performance of (Al, Ti)N coated carbide end mills for hardened steels," Proceedings of the first French and German Conference on High Speed Machining, University of Metz, France, pp 486-489, 1997
3. Koshy, P., Dewes R.C. and Aspinwall D. K., "High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel(~58 HRC)," Journal of Materials Processing Technology, pp. 1-8, 2002.
4. 강창명, 김정석, 이득우, 임유엽, "고속가공에 의한 고경도재 QRO90 코어부의 가공성 향상," 한국정밀공학회지, 제19권, 제3호, pp. 101-106, 2002.