한국정밀공학회지 제18권 제6호 (2001년 6월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 6, June 2001.

냉각공기에 의한 환경 친화적 절삭가공기술

이종항*, 조웅식*, 정준기**, 박철우*, 김영중*

Environment-Friendly Metal Cutting Technology using Cooled Air

Jong Hang Lee*, Woong Shick Cho*, Joon Ki Chung**, Ceol Woo Park*, Young Jung Kim*

ABSTRACT

It is necessary to develop a new metal cutting technology which does not use cutting fluid, since cutting fluid can have undesirable effect on workers's health and working environment. For this to be possible, it is necessary to replace the conventional method of using cutting fluid, whose basic functions are removing chip and heat, and providing lubrication between tool and chip. In this work, cooled air is utilized in order to replace cutting fluid. Experiments were carried out while cutting workpiece with HSS flat endmill under a variety of supply conditions for cooled air. Also the performance characteristics of the air cooling system, which was built for the experiments, were carefully analyzed. For the reliable operation of air cooling system, moisture contained in the cooled air had to be removed before being supplied to the workpiece and tools. It was found that depending on the amount of its flow rate the temperature of cooled air changes at the time of injection from the nozzle. The flow rate of cooled air also plays an important role in removing the accumulated chip on the workpiece.

After comparing the flank wear for the three cases of using cooled air, cutting fluid, and pure dry technique, it was demonstrated that the level of flank wear was similar for the cases of cooled air and cutting fluid. The pure dry technique, however, showed higher level of flank wear than cooled air.

Key Words : environment technology(환경기술), metal cutting(절삭가공), endmill(엔드밀), cooled air(냉각공기), cutting fluid(절삭유), 플랭크마모(flank wear)

1. 서론

최근 작업현장의 환경문제에 대한 관심이 높아짐에 따라 절삭유 사용으로 인한 작업환경의 악화나 절삭유의 폐기처리비용의 증가로 인하여 절삭유를 이용하지 않는 건식가공(dry machining)이나 미량의 절삭유를 분무상태로 공급하는 세미건식가공(semi-dry machining)이 주목받고 있다.

일반적으로 절삭가공은 칩의 원활한 배출, 공작물 또는 공구의 냉각, 공구와 칩 사이의 윤활, 가공된 공작물의 표면거칠기의 확보를 위하여 절삭유가 이용된다. 이러한 절삭유는 성능을 향상시키기 위해 작업자의 인체에 나쁜 영향을 미치는 염소, 유황, 인등의 유독한 물질이 극압 첨가제로 포

☞ 2000년 12월 19일 접수
* 한국산업기술대학교
** 홍익대학교

함 되어있다[1]. 특히 염소화합물을 소각하면 발암성 유해물질인 다이옥신이 발생된다. 이것은 절삭유에 부착된 칩이나 폐기물 등이 소각되거나 가공중의 절삭열에 의해서도 발생될 수 있다. 이 때문에 최근 일본에서는 극압 첨가제를 절삭유에 첨가하지 못하도록 JIS규격의 개정작업에 들어가 있다.

절삭유가 기계외부로 비산되거나 세균의 번식에 의한 악취문제 등으로 절삭유 자체와 설비의 유지관리에 필요한 운전비용이 총가공비용 중 공구비용이 2~4% 정도인데 비해 절삭유 관련비용은 7~17% 정도에 달한다는 보고도 있다[2].

냉각공기를 이용한 절삭 및 연삭가공 분야의 연구는 일본의 요꼬가와가 최초로 시도하였으며 이와 관련된 최근의 연구는 다음과 같다. 요꼬가와는 선삭가공시 냉각공기의 온도 20℃~-40℃, 냉각공기의 공급유량 100~800l/min를 가공점에 공급하여 가공할 경우 냉각공기의 온도가 낮을수록 공급유량은 많을수록 공구수명이 증가함을 보여주었다[3]. 오쿠무라와 요꼬가와는 드릴가공에서 -20℃의 냉각공기를 드릴의 에어홀(air hole)을 통과시켜 인선부에 공급할 경우 냉각공기를 전혀 사용하지 않을 경우에 비해 공구수명이 약 10배 증가함을 보여 주었고, 특히 식물성 절삭유를 사용하면 수명이 더욱 증가함을 보여 주었다[4].

선삭가공이나 드릴가공에 비해 밀링가공에 대한 연구는 냉각공기를 사용한 방식에 비해 분무상태의 극미량절삭유(minimum quantity lubrication) 가공에 대한 연구결과들이 많다. 예를 들면, 高橋一郎은 100,000rpm급의 초고속 밀링기를 이용하여 SKD61를 TiAlN코팅 초경 볼엔드밀로 가공할 경우 수용성 절삭유는 열충격으로 인하여 공구마모가 더욱 증가하였으나 분무상의 오일미스트를 이용한 MQL가공에서는 공구수명이 증가함을 보여주었다[5]. 仲川博夫는 TiAlN코팅 초경 플랫엔드밀(flat endmill)로 FCD450 판재를 냉각공기의 공급온도 -30℃, 공급유량 1700l/min의 조건에서 가공할 경우 저속절삭 영역에서는 냉각공기 쪽이 일반 절삭유를 사용한 것보다 공구마모가 3배 이상 감소됨을 보여 주었다[6].

TiAlN 코팅 초경엔드밀을 이용한 仲川博夫의 연구와 같이 엔드밀가공은 단속가공이므로 가열과 냉각이라는 열충격 현상으로 인하여 인성이 취약한 재질인 초경의 경우는 과도하게 냉각될 경우 이러한 열충격으로 공구수명이 단축될 수 있다. 이에 비해 고속도공구강(HSS)재는 초경에 비해 인성이 우수하므로 열충격이 적을 것으로 생각되어 냉각공기를 이용하여 엔드밀가공시 공구마모특성에 대한 조사를 시도하여 보았다.

본 연구에서는 아직도 가공현장에서 상당량 이용되는 고속도공구강재의 플랫엔드밀을 이용하여 초경공구보다 저속의 절삭조건에서 각종 냉각방식에 따른 엔드밀가공의 특성을 조사한다. 그리고 이러한 실험의 수행을 위해서 사용된 공기냉각시스템의 성능과 문제점에 대해서도 파악한다.

2. 본론

2.1 공기냉각시스템

절삭유를 대신하여 사용되는 냉각공기는 가공시 발생되는 절삭열을 제거할 수 있어야 하며 이를 위해 다음과 같은 냉각방식들이 이용된다.

- 냉매를 사용한 압축식 냉동싸이클에 의한 간접 냉각방식
- 액체질소 등의 저 비등점 매체를 사용한 간접 냉각방식
- 압축공기의 단열팽창을 이용한 공기싸이클에 의한 직접 냉각방식
- 공기의 와류를 이용한 볼텍스튜브(vortex tube)에 의한 방식

이러한 방식들 중에서 냉매를 사용한 냉동싸이클에 의한 방식을 제외한 다른 방식들은 경제성 및 제어성 등의 관점에서 여러 문제점들을 가지고 있어 Fig.1과 같은 압축식 냉동싸이클 시스템이 주로 이용된다.

압축식 냉동싸이클 시스템은 공기 냉각기 유닛, 에어드라이어 유닛, 컴프레서 유닛, 온도계, 압력계, 유량계, 가공부까지의 단열배관, 분사노즐로 구성되어 있다. 컴프레서 유닛에서 공급된 7kgf/cm^2, 약 28℃의 공기에는 수분과 이물질들이 다량 포함되어 있으므로 이를 제거하기 위한 40 ㎛급의 메인필터(main filter)와 5 ㎛급의 프리 필터(pre-filter)를 통과하여 냉동식 에어 드라이어(refrigerated air dryer)에 들어가 약 85%의 수분이 제거된다. 그후 압축공기는 1 ㎛이하의 고정밀급 필터를 거쳐 흡착식 에어 드라이어(desiccant air dryer)에 들어가 나머지 수분들이 제거되어 출구노

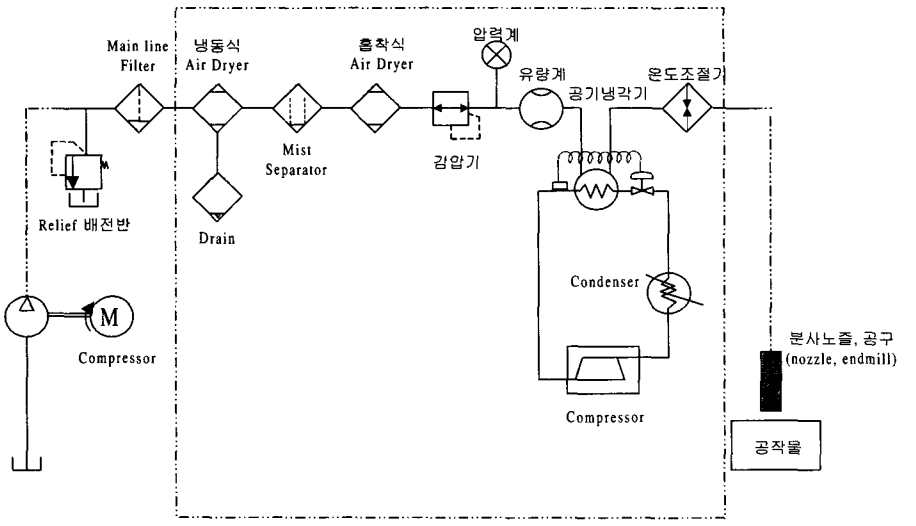

Fig. 1 Schematic diagram of air cooling system

점온도가 -40℃인 냉각공기를 압력계, 온도계, 유량계와 단열배관을 거쳐 노즐(nozzle)을 통해 가공점에 공급된다.

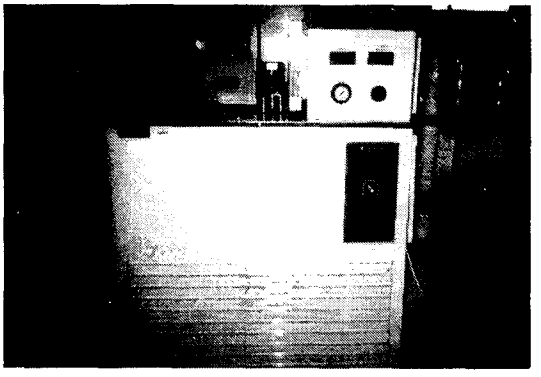

Photo. 1 Overview of air cooling system

한편 이러한 필터들이 사용되지 않을 경우에는 미세하게 빙결된 수분과 이물질로 인하여 고가의 에어드라이어들의 수명이 줄어들고 냉각장치의 열교환기용 튜브 안에서 빙결되어 궁극적으로는 냉각공기를 공급할 수 없게 된다.

제작된 공기냉각시스템의 외관은 Photo.1과 같으며 사진의 우측에 있는 2 타워 형상의 것이 흡착식 에어 드라이어이다.

2.2 실험장치 및 실험방법

실험장치는 Photo.2와 같이 CNC 머시닝센터(DAEWOO, ACE V-850, 8호)를 이용하였다. 사용된 공구는 직경 12mm의 HSS 2날 표준 플랫엔드밀(두 날의 회전흔들림 0.02mm)이고, 공작물은 300mm*150mm*120mm의 SM45C를 이용하였으며, 분석장비로는 온도계(Line Seiki, TC-550, K type thermo couple, 정밀도 ± 0.1% of reading), 동력계(Hioki, Model 3161, 정밀도 ± 1% of reading), 공구현미경(Mitutoyo, TM510, 분해능 0.001mm)을 이용하였다.

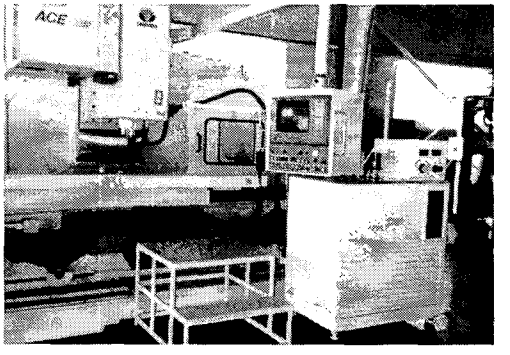

Photo. 2 Overview of experimental set-up

공구수명의 판단기준으로서 평균 플랭크 마모(averaged flank wear)를 이용하였으며, 각종 냉각

방식에 따른 공구 냉각효과를 알아보기 위하여 공구온도를 가공 후 일정 시점마다 측정하였고, 절삭동력도 일정 가공시점마다 가공중의 스핀들동력을 측정하였다.

냉각공기의 공급방향에 따라 절삭특성이 다를 수 있으므로 Photo.3과 같이 냉각공기의 공급방향을 공작물의 가공면으로부터 45도 경사지게하고 절삭점과 노즐과의 거리를 15mm로 일정하게 유지되도록 하여 실험하였다.

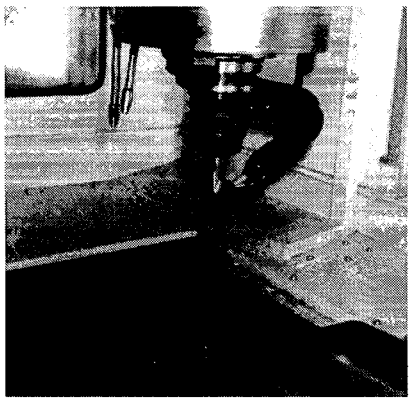

Photo. 3 Nozzle set-up for the cooled air supply

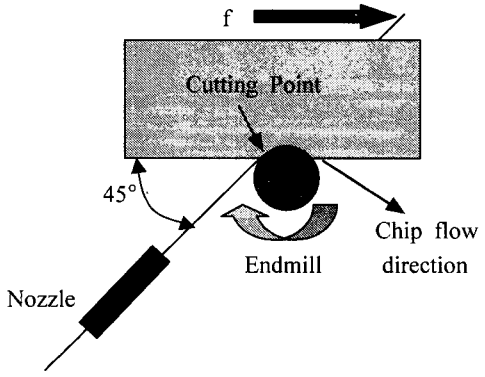

Fig. 2 Nozzle set-up for removing chip

또한 Fig.2와 같이 원활한 칩 배출을 위하여 노즐방향은 하향절삭(down-cut)의 절삭날 인입점에 45도로 냉각공기가 공급되도록 하였다.

2.3 공기냉각시스템의 성능

Fig.3은 에어드라이어를 설치할 경우와 설치하지 않을 경우에 대한 공기냉각시스템의 성능을 나타낸다. 에어드라이어를 설치하지 않을 경우 직경 9.5mm의 열교환용 동파이프(길이 26m) 내에서 결빙으로 인한 막힘현상으로 90분만에 냉각공기를 전혀 공급할 수 없었지만 흡착식 에어드라이어를 설치할 경우 24시간 가동에도 전혀 문제가 없었다. 이것은 공기를 냉각하기 전에 흡착식 에어드라이어에서 제습하였기 때문으로 에어드라이어 설치의 중요성을 보여준다.

절삭가공에서는 정삭 및 중절삭 등 가공조건이 다르기 때문에 절삭점에서 발생되는 절삭열량이 다르다. 그러므로 이러한 절삭열의 충분한 제거를 위하여서는 냉각공기의 온도와 공급유량이라는 냉각공기의 에너지량이 중요하다.

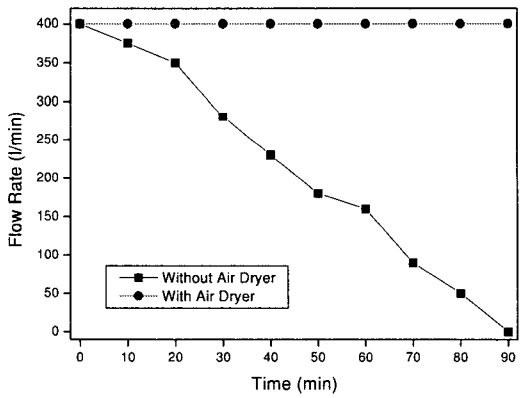

Fig. 3 The performance of air cooling system with and without air dryer

Fig.4는 공기냉각시스템에서 공기와 메틸알콜 사이의 열교환이 이루어지는 수조온도로서 -5℃에서 -30℃로 변화시킬 경우에 대한 특성이다. 공기냉각시스템은 히터로 수조내의 메틸알콜을 가열하기 때문에 초기 -40℃에서 -5℃로 변하는 데는 23분이 소요되었으나 냉각시킬 경우에는 -30℃가 되기에는 108분 정도로 많은 냉각시간이 필요한 것으로 나타났다. 이 실험에서 가열과 냉각 사이의 20분은 냉각시스템의 안정을 위해 -5℃에서 일정시간 동안 강제 유지시킨 것이다.

본 실험에서 이용된 공기냉각시스템에서 최대로 공급될 수 있는 냉각공기의 에너지량을 파악하기 위하여 냉각공기의 공급유량에 따른 노즐의 출구온도를 조사한 것이 Fig.5이다. Fig.5는 초기 공급

유량을 100l/min에서 수조온도를 -44℃로 설정한 후 노즐 출구에서 공급되는 냉각공기의 온도변화를 측정한 것이다. 사용된 노즐은 입구단 직경이 8mm이고 출구단 직경이 6mm이었으며, 장치 주위 온도는 28.7℃이었다.

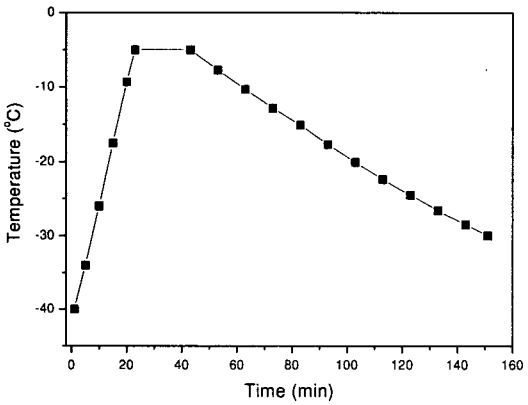

Fig. 4 Heating and cooling performances of the heat exchanger

Fig.5와 같이 냉각공기의 공급유량이 400l/min부터는 수조온도가 증가하고 노즐 출구온도도 -33.8℃로서 더 이상 떨어지지 않았다. 이것은 시스템이 -33.8℃와 400l/min의 냉각공기 에너지량 이상을 발생시킬 수 없다는 용량의 한계를 보여준다.

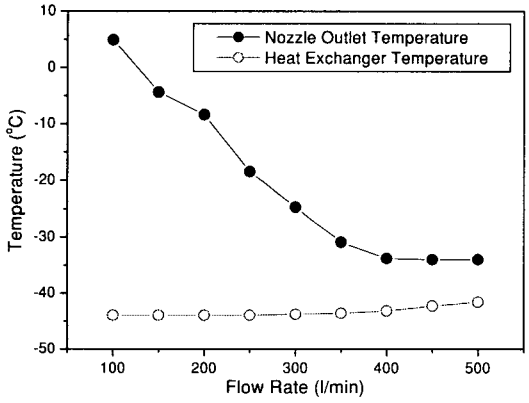

Fig. 5 Performance of the air cooling system with respect to cooled air flow rate

따라서 이 공기냉각시스템을 이용하여 가공실험을 할 경우 냉각공기의 온도가 -30℃, 공급유량이 400l/min 이상에서는 실험이 불가능할 것으로 생각된다.

2.4 냉각방식에 따른 스핀들동력과 공구온도

엔드밀 가공특성을 알아보기 위하여 분석인자로서 공구마모, 절삭동력, 공구온도가 이용된다.

이러한 인자들을 이용하여 옆날절삭시 다음과 같은 가공조건하에서 절삭동력과 공구온도를 측정한 것이 Fig.6과 Fig.7이다.

공　　구 : HSS(without Co) 2F ϕ 12 endmill
공 작 물 : SM45C, 300mm*150mm*120mm
절삭속도 : V=30m/min(795rpm)
이송속도 : f=0.1mm/tooth
절삭깊이 : d(Axial)=15mm, d(Radial)=1.0mm
절삭방식 : Down-cut의 옆날절삭
건조공기에 의한 절삭 : T=+20℃, Q=350l/min
냉각공기에 의한 절삭 : T=-30℃, Q=350l/min
건조 및 냉각공기 분사각과 거리 : 45도, 15mm
절삭유공급에 의한 절삭 : 수용성 2종,
혼합비율 20:1
순수건식절삭 : 칩제거용 매체를 사용치 않음

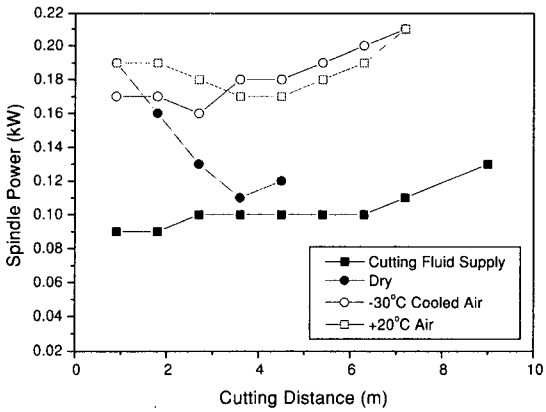

Fig. 6 Spindle power characteristics with respect to different cooling methods

Fig.6과 같이 절삭유를 사용한 경우가 냉각공기를 이용하는 방식에 비해 약 2배정도 스핀들 동력이 적다. 이것은 절삭유를 사용할 경우 절삭유의 주요 기능인 윤활효과에 의해서 공구 경사면과 칩 사이의 마찰력을 감소시켜 주기 때문으로 추측되며, -30℃의 냉각공기나 +20℃의 건조공기를 이용하면 이러한 윤활효과가 없기 때문에 스핀들 동력

이 커진 것으로 추측된다.

절삭유를 전혀 이용하지 않는 순수한 건식가공의 경우는 초기에는 냉각공기와 유사한 동력을 가지고 있었으나 시간이 지남에 따라 동력이 감소하다 다시 증가한다. 이것은 초기의 공작물상태가 가공을 하지 않았기 때문에 원래의 절삭동력을 보여 주었으나 시간이 지나면서 공작물이 가열되어 가공표면의 연화 때문에 스핀들동력이 감소된 것으로 추측되며, 그 후에는 공구의 마모(절삭거리 4.5m에서 플랭크마모량 최대0.22mm, 평균0.1mm)로 인하여 절삭동력이 다시 증가된 것으로 생각된다.

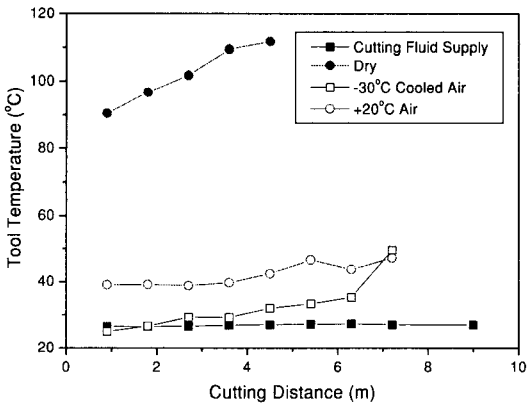

Fig. 7 Tool temperature characteristics with respect to different cooling methods

공구온도는 공구마모에 큰 영향을 주기 때문에 이에 대한 조사가 필요하다. Fig.7과 같이 순수한 건식가공에서는 공구온도가 약 90℃~112℃로서 다른 냉각방식에 비해 현저히 높았으나, 절삭유를 사용할 경우에는 26.5℃~27.1℃로 거의 일정하고, -30℃인 냉각공기를 이용할 경우에는 25℃~49.5℃이었다.

+20℃의 건조공기를 이용한 경우에는 37℃~47℃로 -30℃의 냉각공기에 비해 초기의 공구온도는 높았지만 공구가 마모됨에 따라 거의 동일한 수준까지 증가된다. 여기서 두 방식의 최종 공구온도 2.5℃의 차이는 공구마모에 의한 차이인 것으로 보인다. 특히 -30℃의 냉각공기의 경우 후반부의 공구온도 상승경향은 -30℃의 냉각공기온도와 350l/min의 공급유량의 냉각에너지가 공구마모에 따라 점점 증가하는 절삭열을 제거할 수 없기 때문에 발생되는 것으로 고려할 수 있다.

2.5 냉각방식의 차이에 따른 플랭크마모특성

냉각공기 공급에 의한 절삭, 순수한 건식절삭, 그리고 절삭유를 사용한 절삭에 대하여 가공거리에 따른 플랭크마모량의 추이가 Fig.8이다.

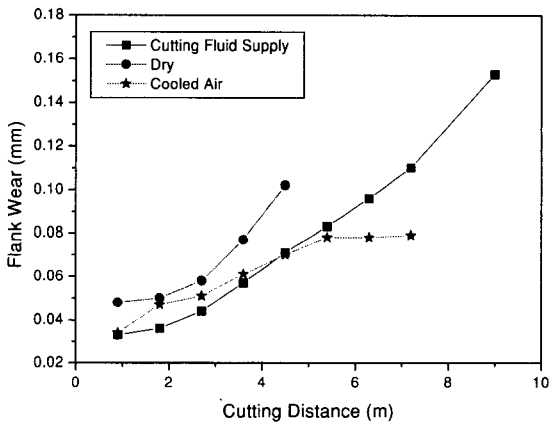

Fig. 8 Comparison of flank wear behavior with respect to different cooling methods

Fig.8에서 볼 수 있드시 순수한 건식절삭이 다른 방식에 비해 플랭크마모량이 1.5배정도 많았고, 특히 절삭유를 이용한 절삭은 5.5m 이후부터는 플랭크마모량이 증가하고 있으며, -30℃의 냉각공기를 이용한 것은 마모량이 안정적이며 상대적으로 적은 것을 볼 수 있다. 이것은 절삭유를 이용한 공급방식이 현재 사용된 가공조건에서 발생되는 절삭열에 비해 그 양이 과도하여 절인의 가열과 냉각온도의 차이가 커서 발생되는 열충격에 의한 마모인 것으로 고려된다.

3. 결론

환경에 친화적인 절삭을 위해서는 가공시 이용되는 절삭유를 사용하지 않아야 하며, 이를 위해서는 절삭열의 냉각, 윤활, 그리고 칩 배출이라는 절삭유 기능을 대체할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 냉각공기에 의한 가공을 위해 공기냉각시스템을 제작하고 그 성능과 문제점에 대하여 조사하였으며, 엔드밀가공시 냉각공기, 절삭유, 순수한 건식가공에 따른 플랭크마모량에 대하여 파악하여 본 결과 다음과 같았다.

(1) 공기냉각시스템의 운용을 위해서는 공기 중

의 습기를 제거할 수 있는 에어드라이어가 반드시 필요하다.

(2) 절삭열을 충분히 제거할 수 있는 공기냉각 시스템의 용량이 중요하고, 노즐에서 토출되는 냉각공기의 온도는 공급유량에 따라 다르며, 이것은 가공면상에 누적된 칩의 제거에 매우 중요하다.

(3) 스핀들동력은 절삭유를 사용한 경우가 냉각공기를 이용하는 방식에 비해 약 2배정도 적었으며, 순수한 건식가공의 경우에는 큰 폭으로 변동하였다.

(4) 공구온도는 순수한 건식가공이 다른 방식에 비해 현저히 높았으며, 절삭유 사용방식과 냉각공기 사용방식은 거의 비슷하였다.

(5) 냉각방식에 따른 플랭크마모량을 비교한 결과, 순수한 건식절삭은 다른 방식에 비해 플랭크마모량이 가장 큰 값을 보였으며, 절삭유를 사용한 절삭과 냉각공기를 사용한 것은 플랭크마모량이 거의 비슷하였다.

후기

본 논문은 선도기술 개발사업 중 첨단생산시스템개발의 연구비에 의하여 지원되어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 横川和彦, 横川宗彦, “ISO14000取得のための冷風切削 研削技術,” 機械技術, pp. 52-73, 1997.
2. F. Klocke, G. Eisenblatter, “Dry cutting,” *Keynote papers, Annals of CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 519-526. 1997.
3. 横川宗彦, 島ノ江洋司, “環境やさしい冷風旋削加工に關する研究(第2報),” 1998年度砥粒加工學會學術講演會講演論文集, pp. 98-99,1998.
4. 奥村成史, 横川和彦, 清水茂夫, 横川宗彦, “環境負荷低減のための切削油剤を用いない冷風ドリル加工に關する研究,” 精密工學會誌, Vol. 66, No. 5, pp. 719-724, 2000.
5. 高橋一郎, 安齊正博, 中川威雄, "鋼材の超高速ミーリングにおける 切削油剤供給の効果," 精密工學會誌, Vol. 65, No. 7, pp. 1013-1015, 1999.
6. 仲川博夫, 大失忠彦, 伊藤仁, "エンドミル加工における冷風切削性能," 1998年度 砥粒加工學會學術講演會講演論文集, pp. 86-87, 1998.