한국공작기계학회논문집 Vol.13 No.2 2004. 4.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

저온 냉풍시스템을 이용한 환경친화적 가공시스템의 성능평가

배정철*, 김경중+, 황인옥++, 강명창+++, 김정석+++

(논문접수일 2004. 1. 30, 심사완료일 2004. 3. 16)

Performance Evaluation of Environmentally Conscious Machining System Using Low Temperature Air System

Jung-Cheol Bae*, Gyeng-Joong Kim+, In-Ok Hwang++, Myung-Chang Kang+++, Jung-Suk Kim+++

Abstract

In industrially advanced countries, environmentally conscious machining was eagerly studied because of ecological and economical reasons. As the environmental regulations become stricter, the new machining technologies which take environmental aspects into consideration are being developed. Recently the research institutions have established application method for dry, semi-dry, oil-mist and compressed cold air machining. In this paper the performance of new compressed cold air system for environmentally conscious machining is investigated and machinability of dry and new compressed cold air machining is evaluated. A series of tests are carried out by using measuring equipments in condition of dry and compressed cold air machining.

Key Words : Environmentally Conscious(환경친화적), Environmental Regulations(환경규제), Dry Machining(건식절삭), Oil-Mist(오일미스트), Compressed Cold Air(압축냉각공기)

1. 서 론

최근 들어 환경문제의 대두와 함께 절삭공정에서도 환경친화적인 많은 장치와 기술들이 활발히 연구되어지고 또는 실용화되고 있다. 그것을 총칭하여 환경친화절삭이라 할 수 있는데, 이런 경향은 선진국의 환경보호정책인 그린라운드(Green Round)나 ISO 14000과 같은 규제가 더욱 강화되어지는 것과 발맞추어 생각해 볼 수 있다[1].

절삭공정에서의 환경친화적인 접근은 이미 10여 년 전부터 제조업 선진국이라 할 수 있는 일본과 독일에서 먼저

* 주저자, 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 (mc1269@dreamwiz.com)
주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산 30번지
+ 부산대 대학원 정밀기계공학과
++ 부산대 대학원 나노시스템공학협동과정
+++ 부산대 기계공학부/정밀정형 및 금형가공 연구소

시도되었다. 1990년 독일에서는 절삭유 처리기술에 관한 연구가 시작되었고, 일본에서는 1996년 냉풍을 이용한 가공기술을 처음으로 개발하였으며, 최근에는 극압 첨가제를 절삭유에 첨가하지 못하도록 JIS 규격의 개정작업도 아울러 실시하였다[2].

현재 연구되고 있는 환경 친화적인 절삭기술을 살펴보면 먼저 절삭유의 개선인데, 기존의 절삭유는 작업장의 환경오염 문제, 작업자 건강문제, 폐유의 처리 문제 등을 발생시키므로 현재 인체에 무해한 식물성 절삭유의 개발기술과, 절삭유를 필터시스템을 통해 리사이클링하는 기술 등이 연구되고 있다.

절삭기술은 기존의 절삭유제를 사용하는 가공기술에서 아주 작은 입자크기를 가지는 극미량의 오일미스트(Oil-mist)를 사용하는 MQL(Minimal Quantity Lubrication)가공이라든지, 절삭유를 사용하지 않는 건식가공 그리고 고압의 차가운 공기를 분사하며 가공하는 압축냉각공기시스템 등이 연구되어지고 있다[3]. 이런 환경 친화적인 절삭가공기술이 실제 작업장의 환경개선을 가져올 뿐만 아니라 상당부분 기존의 절삭유제 시스템과 비교해서 경제적 이점이 있는 것도 환경 친화적인 절삭기술 연구의 또 하나의 이유이기도 하다[4].

현재 국내에서는 윤활효과보다 냉각효과가 필요한 연삭가공에서 그 적용성에 대해 활발한 연구가 진행되고 있고, 산업현장에서도 적용하고 있다[5]. 또한 선삭과 같은 연속절삭에 대해서도 많은 연구기관에서 연구하고 있고, 기존연구에서도 밀링가공과 같은 단속절삭에 대한 냉풍절삭연구가 행해졌지만 그 온도가 -2 ~ -10℃에서 행해져 절삭과정에서 충분한 냉각효과를 반영하였다고 볼 수는 없다[6]. 따라서 본 논문에서는 실험실에서 최대 -50℃의 초저온까지 냉각능력을 가지고 있는 냉풍시스템을 개발하였고, 시스템의 성능을 온도, 압력, 유량 등의 측면에서 평가하였다. 또한 기존의 절삭가공과 압축냉각공기를 이용한 환경 친화적 절삭가공을 실제 현장에서 가공하는 헤드폰 금형을 통해 가공성 평가를 실시해 그 실용성을 평가해 보았다.

2. 압축냉각공기시스템

2.1 압축냉각공기시스템의 설계

압축냉각공기에 의한 냉풍절삭은 일본의 요꼬가와(Yokogawa)가 1996년 최초로 선삭에서 시도하였고, 이후 해외뿐만 아니라 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있는 분야중의 하나이다[7].

본 연구에서는 기존의 절삭이 절삭유제로 인한 많은 환경오염과 작업자의 인체에 미치는 유해한 영향, 그리고 절삭유제의 사용으로 인한 추가 처리비용 등 여러 가지 문제점을 안고 있다고 파악하고, 실제 가공에서도 절삭유를 사용하지 않는 환경 친화적인 절삭을 위해 자체 압축냉각공기시스템을 제작하였다. 본 압축냉각공기 시스템은 냉매의 냉각사이클을 통한 1차 냉각과 보텍스 튜브(Vortex tube)에 의한 2차 냉각으로 최대 -50℃까지 냉각이 가능하다. 본 장치의 규격과 외관은 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

압축냉각공기시스템은 공기 중의 수분의 영향으로 -15℃ 이하로 냉각하면 쿨러 내부에서 수분의 결빙으로 쿨러의 막힘현상을 초래한다. 따라서 본 시스템은 유입된 압축공기는 먼저 수분을 제거하는 제습단계를 거치고, 제습된 압축공기는 냉매를 사용한 압축식 냉동사이클에 의한 간접냉각방식을 통해 냉각되어 보텍스 튜브를 거쳐 더 낮은 초저온의 온도로 냉각된 압축공기가 되는 것이다. 압축기에서 공급된 8 kg_f/cm^2 고압의 압축공기는 관로를 따라 에어 드라이어(Air dryer)(⑫)에서 수분이 제거되고, 에어 쿨러(Air cooler)(⑪)로 유입되어 냉매(R22)가 흐르는 관로와 교축되면서

Table 1 Specification of compressed cold air system

System	Compressed cold air system
1st cooling	Indirect cooling method using compressed cooling cycle
2nd cooling	Vortex tube
Refrigerant	R22
Lowest Temperature	-50℃

Fig. 1 Overview of compressed cold air system

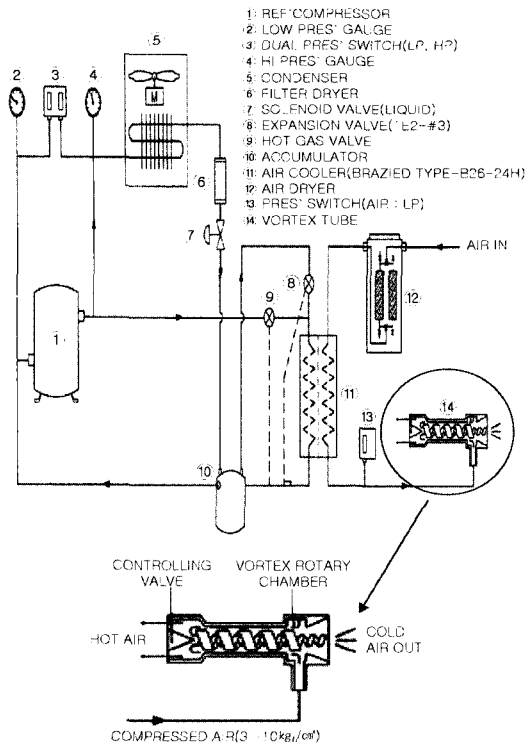
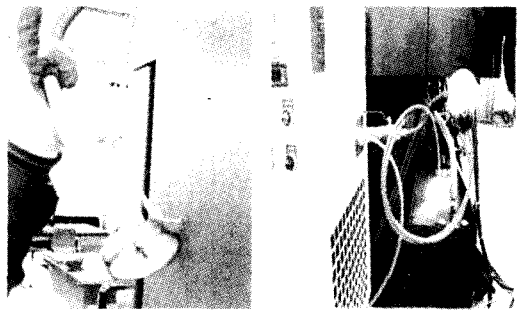


Fig. 2 Schematic diagram of compressed cold air system

열교환이 일어나고 여기에서 열을 빼앗긴 압축공기는 보텍스 튜브(⑭)를 거치면서 -20～-50℃의 초저온의 압축공기가 노즐을 통해 분사된다. 한편 냉매는 축압기(⑩)와 콘덴서(⑤) 그리고 냉동 압축기(①)에서 재생되어 계속 에어 쿨러로 공급된다. 보텍스 튜브를 사용하지 않으면 최대 -30℃까지는 냉각이 가능하나, 최대 -50℃까지의 압축냉각공기를 공급하기 위해 채용하였다. 보텍스 튜브에서 압축공기는 보텍스 회전실에서 1,000,000rpm으로 초고속 회전하게 되고 이 회전공기는 온기 출구쪽으로 향하다가 일부는 조절밸브의 온기출구로 배출(30～90℃)되고, 나머지 공기는 조절밸브에서 회송되어 1차 보텍스 흐름의 안쪽에 있는, 보다 낮은 압력의 지역을 통과하면서 열량을 잃고 온도가 낮아지면서 냉기 출구쪽으로 향하게 되는 원리를 이용하였다. Fig. 2는 제작한 압축냉각공기 시스템과 보텍스 튜브의 구조를 상세하게 보여주고 있다.

2.2 실험장치 및 실험방법

실험은 먼저 제작한 압축냉각공기시스템의 성능평가를



(a) Temperature test **(b) Pressure test**

Fig. 3 Testing equipments setup for performance evaluation

실시하고, 헤드폰 금형을 가공하면서 가공성평가를 아울러 행하였다.

압축냉각공기시스템의 성능평가는 온도, 압력, 유속의 세 가지 항목에 대해서 실시하였다. 온도는 바이메탈 온도계를 사용하여 셋팅온도의 도달시간과 냉각온도 그리고 지속성에 대해서 조사하였고, 압력은 유입압력, 출구압력, 시간에 대한 압력의 변화에 대해 알아보았고, 마지막으로 유량은 유량계(피토튜브관, Micro-manometer)를 통해 시간당 유량변화에 대해 평가해 보았다. 성능평가의 장치는 Fig. 3에 나타내었다.

본 시스템의 가공성평가는 TiAlN 코팅한 직경 8mm, 2날의 볼엔드밀을 사용하여 수행하였다. 실험에 사용된 시편은 80×150 mm^2의 STD11 (H_RC 25)을 사용하였으며, 공작기계는 최대 주축회전수 20,000rpm, 최대 이송속도 50 m/min인 고속 머시닝센터 Makino V55를 이용하였다. 대상은 헤드폰 금형을 건식과 압축냉각공기 방식에 따라 가공하는데 이는 실제로 현장에서 헤드폰 금형을 건식으로 가공하고 있으므로 이와 연관시켜 자체 제작한 압축냉각공기시스템의 성능을 평가할 수 있다고 판단되어 실시하였다. 현장에서는 금형을 가공하는데 절삭유를 사용하면 열적변화에 따른 치핑으로 고정도의 금형을 생산할 수 없어서 거의 사용하지 않으므로 절삭유제 공급방식은 건식과 제작한 압축냉각공기시스템에서 나오는 -30℃의 압축냉각공기를 공급하며 가공을 하였다. 가공성 평가에 관한 조건은 Table 2와 같고, 실험장치는 Fig. 4와 같이 구성하였다.

Table 2 Experimental setup and cutting conditions

Machining center	Makino V55
Tool	ϕ8 Ball Endmill (2-flute, TiAlN coated)
Workpiece (mm^2)	STD 11 (H_RC 25) 80×150
Cutting Speed(rpm)	8000
Feed Rate(mm/min)	1500
Axial depth of cut(mm)	1.3 (Rough cutting) 0.28 (Finish cutting)
Coolant	Dry, Compressed cold air (-30℃, 3 kg_f/cm^2, 10 ℓ/sec)

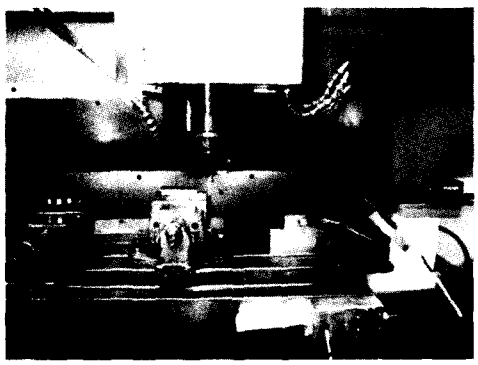


Fig. 4 Experimental setup

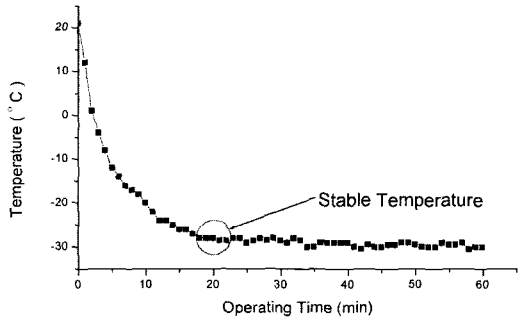


Fig. 5 Temperature variation of compressed cold air

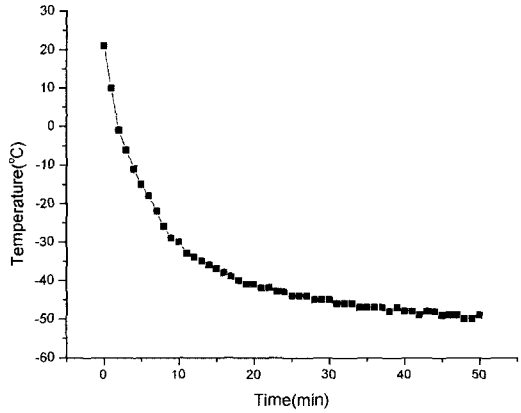


Fig. 6 Minimum cooling temperature of compressed cold air system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 성능평가

압축냉각공기시스템의 온도는 바이메탈 온도계를 통해 측정하여 시간에 대한 온도변화를 관찰하였다. Fig. 5에서는 시간에 대한 압축냉각공기시스템의 온도변화에 대해 나타내었다. 시스템을 -30℃에 셋팅을 하고 가동하면 온도는 급하강하여 20분이 지나면 -30℃의 온도를 나타내고, 시간이 지나도 거의 변하지 않는다. 이것은 압축냉각공기시스템이 실험에 적합한 온도인 -30℃의 온도에 이르는 데는 20분의 시간이 소요됨을 알 수 있었다. 20분 이후에는 1~2℃의 오차를 가지지만 항상 같은 온도를 유지함을 알 수 있었다. 이 결과에 따라 가공성 평가를 실시할 때는 시스템을 가동한 뒤 20분이 지나고 적정온도에 이르렀는지 확인하고 실험을 하였다.

Fig. 6과 같이 최저냉각온도에 대한 실험도 아울러 실시하였는데 최저냉각온도를 -50℃로 셋팅하고 실험한 결과 20분 경과 후 약 -40℃까지 냉각되는 능력을 보였으나 -50℃까지는 총 50분이 소요됨을 알 수 있다. 따라서 본 시스템은 -50℃까지의 냉각능력을 가지고 있으나 상당한 시간이 소요됨을 알 수 있다.

압력 변화를 알아보기 위해 압축기에서 공급되는 압축공기와 압축냉각공기시스템을 통해 나오는 출구와 노즐 부분의 압력을 측정하였다. 노즐의 직경은 5mm의 노즐을 사용하였다. Table 3은 압력 측정결과를 나타내고 있다.

압축기에서 공급되는 압축공기와 압축냉각공기시스템을 통해 나오는 압축냉각공기의 압력은 8 kg_f/cm^2으로 동일하였으나, 노즐부분에서의 압력은 3 kg_f/cm^2으로 상당히 떨어지고 있다. 이는 보텍스 튜브를 거치면서 상당량의 압력손

Table 3 Result of pressure measurement

Input Pressure	Output Pressure	Nozzle Pressure
8 kg_f/cm^2	8 kg_f/cm^2	3 kg_f/cm^2

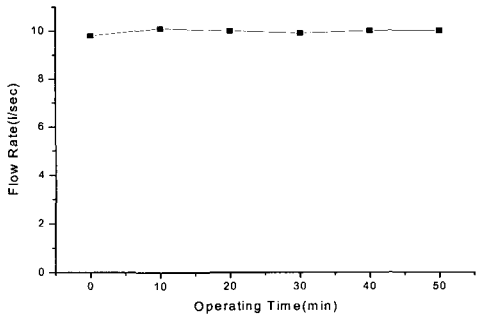


Fig. 7 Flow rate of compressed cold air system

실이 있기 때문이다.

유량의 측정은 피토튜브관과 마이크로 마노메타(Micro-manometer)를 통해서 측정하였다. Fig. 7에 보이는 바와 같이 시간에 대한 유량의 변화를 나타내었는데 유량을 측정한 결과 초당 10 ℓ 의 균일한 유량을 공급하는 것으로 측정되었다.

따라서 압축냉각공기시스템은 20분이 지나면 가공성 평가실험에 적합한 성능을 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 가공성 평가

STD 11과 같은 금형강을 고속가공하는 데 실제 작업 현장에서는 절삭유를 사용하는 작업보다는 건식으로 작업을 많이 하고 있다. 그 이유는 절삭유를 사용하여 고속으로 금형을 가공할 시 마찰로 인한 고온의 열발생과 절삭유에 의한 급냉이 반복적으로 일어나고 고속회전으로 인한 원심력으로 인하여 절삭유가 가공점에 투입되는 것이 어렵기 때문이다. 따라서 STD 11 소재의 헤드폰 금형을 가공하는 건식절삭과 제작된 압축냉각공기시스템에서 공급하는 냉풍을 이용한 냉풍절삭을 비교 평가하였다.

헤드폰 금형은 U/G로 모델링하여 NC 데이터를 획득하여 가공하였는데 황삭, 정삭 시간은 각각 30분이 소요되었다. Fig. 8은 모델링한 헤드폰 금형의 형상을 보여주고 있다.

건식과 냉풍절삭으로 가공한 금형의 가공상태를 비교해 보면 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 관찰할 수 있는 것은 건식이 냉풍절삭보다 볼 엔드밀 가공하면서 문질러진 흠집이 상

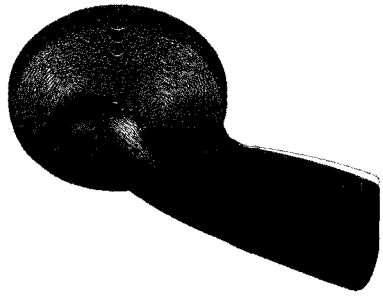
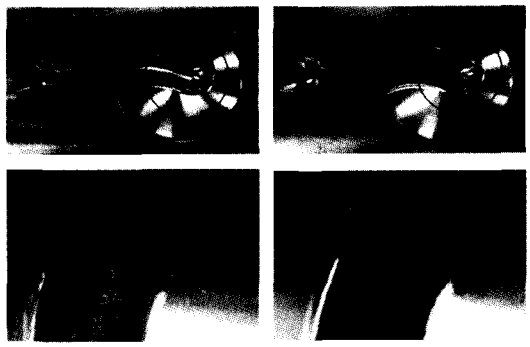
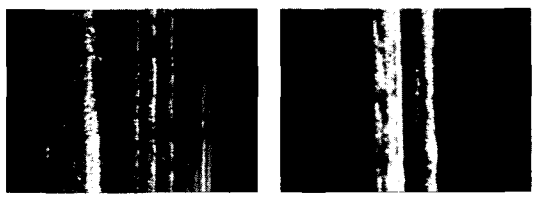


Fig. 8 Shape of headphone modeling



(a) Dry **(b) Compressed cold air**

Fig. 9 Headphone die machined by dry and cold air cutting



(a) Dry **(b) Compressed cold air**

Fig. 10 Surface shape by dry and cold air cutting

대적으로 많다는 것이다. 이는 건식으로 절삭을 할 때 높은 온도가 공구의 표면에 발생하게 되고, 이 온도를 냉각시켜 주지 못하기 때문에 높은 온도와 높은 압력 하에서 칩이 공구에 미세하게 달라붙게 되고 이러한 상태의 공구가 절삭에 관여하면서 가공표면에 문질러지면서 흠집을 남기게 되기 때문이다. Fig. 10은 헤드폰 금형의 원호부분을 공구현미경을 사용하여 관찰한 그림이다.

Fig. 10에서 압축냉각공기를 이용한 냉풍절삭은 절입방향에 대해서 아주 규칙적인 절삭을 한 것으로 관찰이 되나, 건식절삭은 절입방향에 대해서 냉풍절삭과 같은 규칙성을

보여주지 못하며 또한 가로방향의 미세한 흠집을 관찰할 수 있다. 이로 인해 냉풍절삭이 건식절삭에 비해서 더 좋은 표면과 광택을 가지게 된다. 실제로 이 금형은 자유곡면으로 된 형상이므로 표면조도를 측정하기가 곤란하여 동일한 소재의 시편에 대해서 같은 공구로 건식과 냉풍에 대한 평면절삭을 실시하고 그 표면조도를 촉침식 표면조도기로 측정하였다. 건식의 중심선 거칠기 값 R_a이 0.27㎛이고 냉풍절삭의 중심선 거칠기 값이 0.19㎛을 나타내고 있어 표면조도 또한 냉풍의 경우가 양호한 특성을 보였다.

4. 결 론

환경친화적 가공과 고정도 가공을 실현하기 위해서 압축냉각공기시스템을 자체 제작하였고, 시스템에 대한 성능평가를 실시한 결과 일정한 시간의 경과 후 온도와 압력 그리고 유량에 대해서 안정된 성능을 보여주므로 안정된 실험을 하기 적합함을 알 수 있었다. 구성된 가공 시스템에서 절삭유제 공급방식에 따른 가공성 평가를 실시하였다. 기존의 건식절삭보다 표면광택, 표면조도 등에서 더 좋은 품질을 보여주었다. 따라서 냉풍절삭가공이 고품질, 고정도의 금형을 가공하는 데 있어서 건식가공보다 양호한 표면조도 및 품질을 보여주어, 환경친화적인 대체가공기술임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2001년 한국생산기술연구원 국가청정생산 지원센터의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Sokovic, M., and Mijanovic, K., 2001 "Ecological Aspects of the Cutting Fluids and its Influence on Quantifiable Parameters of the Cutting Processes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, pp. 181～189.

(2) Kang, J. H., 2000, "Environmentally Conscious Machining Technology and Machine Tool", *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 9～19.

(3) Rahman, M., Senthil Kumar, A., 2001, "Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling", *Journal of Machine Tool and Manufacturing*, Vol 42, pp. 539 ～547.

(4) Klocke, F., and Eisenblatter, G., 1997, "Dry Cutting", *Annals of CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 519～526.

(5) Choi, H. Z., Lee, S. W., and Jeong, H. D., 2002, "The Cooling effects of Compressed Cold Air in Cylindrical Grinding with alumina and CBN Wheels", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, pp. 265～269.

(6) Kim, S. W., and Lee, D. W., 2000, "Evaluation of Machinability by Cutting Environments in High-Speed Machining of Difficult-to-Cut Materials", *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 6, pp. 158～163.

(7) Honma, H., Yokogawa, k., and Yokogawa, M., 1996, "Study of Environment Conscious CBN Cooling Air Grinding Technology", *The Japan Society Precision Engineering*, Vol. 62, No. 11.