

압축냉각공기를 이용한 선삭가공시 냉각효과 해석

곽승용*·김동길*·이종항**·이상조†
(2002년 12월 2일 접수, 2003년 4월 2일 심사완료)

Analysis of Cooling Effect Using Compressed Cold Air in Turning Process

Seung-Yong Kwak, Dong-Kil Kim, Jong-Hang Lee and Sang-Jo Lee

Key Words: Cooling Effect(냉각 효과), Finite Element Method(유한 요소법), Computational Fluid Dynamics(전산 유체 역학), Turning(선삭), Orthogonal Metal Cutting(2차원 직교 절삭), Temperature Measurement(온도 측정), Thermocouple(열전대), Desiccant Air Dryer(흡착식 공기 건조기), Environmental Pollution(환경 오염), Cold Air Machining(냉풍 가공)

Abstract

As environmental restriction has continuously become more strict, machining technology has emphasized on development of environment-friendly technology. In cutting technology, it has been well recognized that cutting fluids might have undesirable effects on workers health and working environment. In this study, compressed cold air was used as a replacement for conventional cutting fluids. The cooling effect on cutting tool was analyzed using the finite element method and the computational fluid dynamics. This study focused on the temperature simulation of cutting tool by real flow analysis of cold air. The maximum flow rate and the minimum temperature of compressed cold air are 300l/min and -30°C respectively. To compare the simulation and experimental results, inner temperature of the cutting tool was measured with the thermocouple embedded in the insert. The results show that the analysis of cutting temperature using FEM and CFD is reasonable, and the replacement of cutting fluid with cold air is available.

1. 서론

최근 국제규격인 ISO14000에서 작업환경에 대한 규제가 강화됨에 따라 기계가공의 절삭유 처리비용 및 설비 유지관리 비용이 증가하고 있다. 특히, 절삭유는 윤활성능을 높이기 위해 광유 등에 염소, 인, 유황 등을 극압 첨가제로 섞는데, 이러한 첨가제는 인체에 매우 해로우며, 특히 염소화합물의 경우에는 절삭열이나 칩 등의 폐기물

소각시 다이옥신 등의 발암 물질을 발생시키며 분진화에 의해 작업 환경을 오염시킨다. 또한 사용된 폐절삭유의 처리 규정이 강화되면서 그에 소비되는 처리 비용이 공구 비용보다 오히려 커지게 되었다.⁽¹⁾

냉풍을 이용한 기계가공 분야의 연구는 일본의 요코가와⁽²⁾가 최초로 시도하였다. 국내에서도 절삭유 대신 압축냉각 공기나 오일 미스트를 이용한 기계가공에 대한 연구들이 수행되고 있다.⁽³⁾

유한요소법을 이용한 절삭공정의 온도에 관한 연구가 이루어졌는데, Stevens^(4,6)은 건식 조건에서 측정된 절삭력으로부터 칩, 공구등의 응력, 변형율, 온도 등을 구하였다. Childs⁽⁷⁾는 온도분포를 해석한 유한요소모델에 경계조건으로 공구 주

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : sjlee@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2818 FAX : (02)364-6769

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한국산업기술대학교 기계공학과

위에 일정한 상수의 대류계수를 적용함으로써 절삭가공시 절삭유 등의 냉각제를 이용한 냉각효과를 해석하였다. 환경오염 등의 문제로 절삭유를 대체하기 위한 압축 냉각 공기를 이용한 절삭열 냉각에 대한 실험 위주의 연구들^(8,9)이 진행되어 왔다.

냉각해석에 있어서 지금까지의 연구방법^(7,10)은 실제의 냉각모델이 아닌 임의의 대류계수를 가정하여 공구의 온도분포의 영향을 보는 것이었다. 그러나 냉풍가공 등 실제의 냉각조건에 대해서는 그 대류계수를 알 수 없으므로 실제 가공의 경우와 비교할 수 없다. 따라서 해석과 실제 실험을 비교하기 위해서는 실제의 냉각 조건에 맞는 대류계수를 구하거나 공구와 공작물의 주위 환경까지 고려한 해석이 필요하다.

본 연구에서는 절삭 가공시 발생하는 열과 그 분포를 유한요소법을 이용한 실제 가공 과정을 해석하고, 또한 공구와 공작물 주위의 냉각공기의 유동을 전산유체역학을 이용하여 냉풍 분사시 그 냉각효과를 해석한다. 이러한 해석결과를 실제 제작된 냉풍장치를 이용한 가공시의 절삭온도를 측정된 결과와 비교함으로써 해석의 타당성을 검증하고, 냉풍가공의 유용성을 확인하고자 한다.

2. 유한요소법과 전산유체역학을 이용한 절삭온도 해석

냉풍 가공시의 냉각 효과를 확인하기 위해 여러 가지 냉풍 조건에 따른 공구의 온도 변화를 시뮬레이션을 통하여 비교한다. 여기서 시뮬레이션은 2가지 단계로 나누어 진행한다. 우선 가공 과정, 즉 칩 발생 과정을 시뮬레이션 함으로써 칩과 공구의 접촉면 등에서 발생하는 발열량을 구한다. 다음으로는 이 열량을 이용하여 냉각 공기 분사시 공구의 온도를 전산 열유체 해석을 통하여 구한다.

2.1 유한요소법을 이용한 발열량 해석

선삭가공시 발생하는 발열량을 해석하기 위해 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS®를 사용하였으며, 변위와 응력뿐만 아니라 온도분포 역시 해석의 목표이므로 공작물과 공구를 온도와 변위를 동시에 변수로 하는 4절점의 2차원 4각형 요소로 구성한다. Fig. 1은 유한요소모델의 초기

격자형상을 나타낸다. 이때 공구가 절입함에 따라 칩으로 분리될 층에 포함된 격자들은 공구의 경사각에 의해 심하게 변형되기 때문에 계산오차를 수반한다. 따라서 과도한 뒤틀림을 대비해 칩에 해당하는 격자들은 초기에 45°의 경사를 주었다. 즉 초기에 기울어진 격자들은 공구표면을 지나가면서 직사각형에 가까워진다.

절삭깊이가 0.5mm인 경우 요소의 크기를 칩은 100 μ m×50 μ m의 요소들이 50×10의 형태로 배열되어 있다. 공작물에서 칩을 제외한 부분은 높이가 1.5mm로 요소의 가로 길이는 칩과 같은 100 μ m이고 깊이 방향으로 5줄의 요소로 구성하였다.

이와 같이 공작물은 칩과 절삭되지 않는 부분으로 초기에 나누어 정의하며, 절삭날 끝이 지나가는 경로 위의 절점들을 초기 조건으로 서로 구속시켜 놓는다. 즉 하나의 좌표에 접하고 있는 두 부분의 요소들의 절점이 존재하고, 이들은 일정한 조건에 되면 서로 떨어지면서 칩이 생성된다. 또한 공구의 경사면과 칩의 하단면 사이는 마찰이 발생할 수 있도록 미끄럼 접촉면으로 정의하였다. 또한 공구는 15mm×30mm의 크기로 5×10개의 요소들을 경사각 5°와 여유각 5°에 맞게 구성하였으며, 이송 속도는 180m/min으로 일정하다.

재료의 물성치는 공작물의 경우 SM45C에 대한 값으로 하고, 공구의 경우는 초경에 대한 값을 이용하였다. 이 때의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties

SM45 C	WC
E: 210MPa,	E: 520MPa,
ρ : 7800kg/m ³ ,	ρ : 14010kg/m ³
K: 43kW/m·K,	K: 49.5kW/m·K
C: 440J/kg·K	C: 402J/kg·K

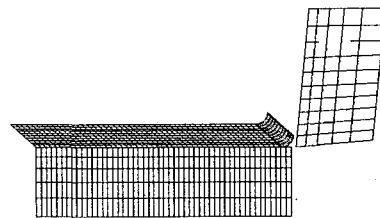
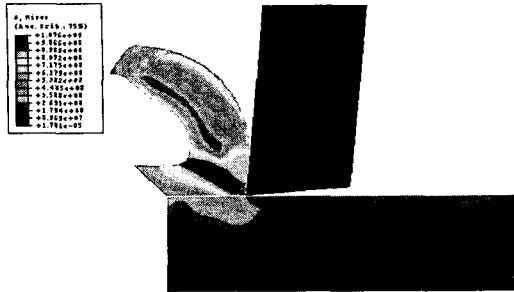
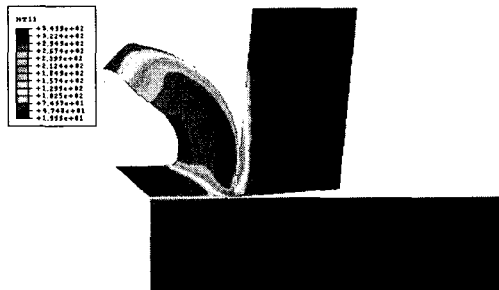


Fig. 1 FEM mesh for orthogonal metal cutting simulation



(a) Stress distribution



(b) Temperature distribution

Fig. 2 FEM results, cutting depth=0.5mm

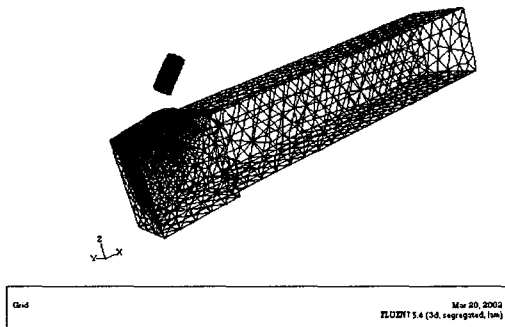


Fig. 3 Tool modeling and mesh

2.2 해석 결과 및 절삭 깊이에 대한 발열량

Fig. 2는 절입깊이가 0.5mm일 때의 공구 및 공작물에서 응력 분포와 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 알 수 있듯이 전단면(Shear plane)에서의 응력이 탄성 한계를 넘어 약 1GPa 정도이므로 이 영역이 발열부임을 알 수 있다. 또한 칩과 공구 경사면 사이의 마찰 때문에 칩의 마찰부 응력도 다른 부분보다 높음을 알 수 있

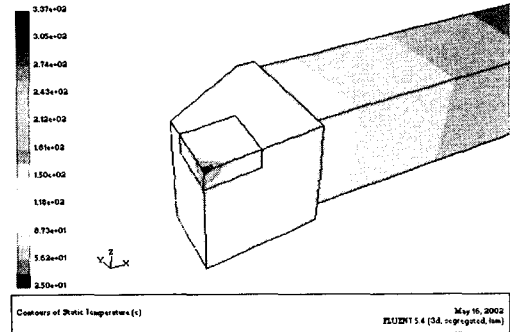


Fig. 4 Temperature distribution of cutting tool, without cold air, cutting depth=0.5mm

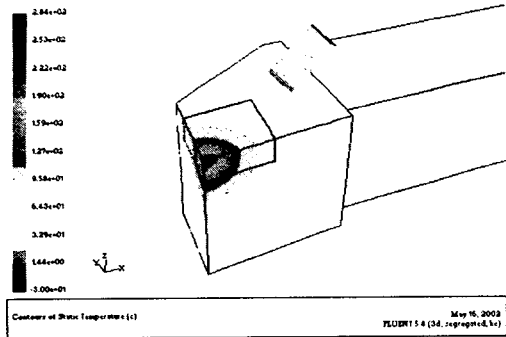
다. Fig. 2(b)는 온도 분포를 나타낸 것으로 공구와 칩 사이 마찰면에서 발생한 열이 이 면에 적체되면서 최고 온도 344.9℃를 유지하는 것을 알 수 있다. 각 절입 깊이에 대한 발열량은 해석 결과로부터 얻을 수 있으며 절입 깊이가 0.5mm, 2.0mm일 때 각각 6994W, 30641W가 된다.

2.3 전산 유체 역학을 이용한 냉각 해석

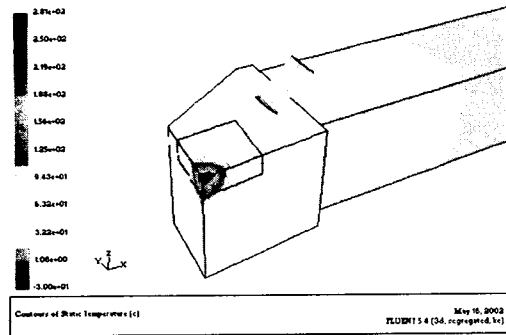
절삭가공시 냉풍공기에 의한 냉각은 노즐의 공기 유동과 온도에 의하여 대류열전달 계수가 정해지므로, 노즐에서 분사되는 냉풍공기를 전산유체역학 프로그램인 FLUENT를 이용하여 공구 주변의 온도 분포를 계산하였다. 공구와 칩 등을 모델링하고 냉풍이 분사되는 노즐 역시 실제의 형상과 위치 등을 고려하여 모델링에 포함시킨다. 공구의 형상은 선반 가공시에 일반적으로 사용하는 PCLNR2525-M12의 형상을 사용하였다.

모델링 형상은 공구를 포함하여 그 주위까지를 해석 범위에 포함시킨 것이다. 이때 주위의 범위는 노즐 분사에 의한 공기유동의 영향이 거의 없을 정도의 크기로 설정하며, 이를 먼 경계(far boundary)라고 부른다. 본 연구에서는 이 경계를 직경이 1m인 구형상으로 가정하였으며, 밀폐되지 않고 개방되어 있어 내부에서 발생한 압력에 대한 반작용은 없는 것으로 경계조건을 지정하였다. 모델링한 공구의 형상과 요소들의 구성은 Fig. 3과 같다.

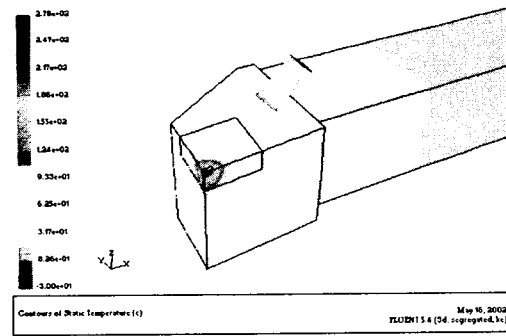
노즐 출구단에서 절삭점까지의 거리는 15mm이며 공구 상면과 이루는 각은 45°이다. 또한 각각의 절입 깊이에 해당하는 발열량을 공구와 칩 사



(a) Q=100l/min



(b) Q=200l/min



(c) Q=300l/min

Fig. 5 Temperature distribution of cutting tool, cold air temperature=-30℃, cutting depth=0.5mm

이의 접촉면에 대입함으로써 경계 조건을 주었다. 그리고 홀더의 길이 방향을 반무한체로 가정하여 발열 부위와 가장 멀리 떨어진 면의 온도를 상온인 25℃로 가정하였다. Fig. 4는 절입 깊이가 0.5mm일 때 건식 가공에 대한 공구의 온도 분포를 나타낸다. 그리고 Fig. 5는 동일한 절삭 조건에 대해 냉각 공기의 온도가 -30℃일 때 그 유량

Table 2 Specification of cold air generator

Cooling method	Indirect Air-cooling
Refrigerant	1st refrigerant: R-12 2nd refrigerant: R-23
Tank capacity	52.5l
Power supply	5.5kW
Dimension of Apparatus	1155×700×1575mm (W×L×H)

이 각각 (a) 100l/min, (b) 200l/min, (c) 300 l/min 일 때의 공구의 온도를 나타낸다.

냉각공기를 사용하지 않는 건식 가공시 공구의 최대 온도는 337℃이었으나, 냉각공기를 분사하여 유량을 증가함에 따라 최대온도는 284℃, 281℃, 278℃로 감소하였다. 냉각공기의 분사유무에 따라 최대온도는 약 50℃정도 차이가 나지만, 냉각 공기의 분사유량에 따른 최대온도의 변화는 별로 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그 이유는 공구의 끝단 부분은 칩과 접촉하고 있기 때문에 냉풍공기가 접촉점까지 도달하지 못하기 때문이며, 냉각공기의 유량에 따라 대류계수의 변화가 적기 때문이다. 즉, 분사된 냉각 공기는 칩과 공구주변을 대류에 의해 냉각하면서 접촉점의 온도를 강하시키는 것이다.

3. 냉풍가공시의 절삭온도 측정

3.1 실험 장치

3.1.1 냉풍 발생 장치

본 연구에서는 압축식 냉동 사이클 시스템을 이용한 냉풍 발생 장치를 사용하였으며, 이 장치는 컴프레셔, 에어 드라이어, 공기 냉각 장치 등으로 구성되어 있다. 컴프레셔로 압축되어 공급되는 공기에는 다량의 수분과 이물질 등이 포함되어 있으므로 이를 제거하기 위해 여러 단계의 필터와 흡착식(desiccant) 에어 드라이어를 통해 수분을 제거하여 열교환기 내부의 결빙을 방지함으로써 냉각 장치의 연속적인 운전을 가능하게 하였다.

제작된 냉풍 발생 장치의 사양은 Table 2과 같다. 유량과 온도 등은 기기 외부에 부착되어있는

Table 3 Experimental equipment

NC Lathe	DAEWOO PUMA 200M
Workpiece	SM45C Diameter : 120mm
Tool	Insert : CNMG120408 Holder : PCLNR2525 M12
Thermocouple	K-type
D/A Board	YOKOGAWA DA100

Table 4 Experimental conditions

Cutting condition	feedrate: 0.2 mm/rev
	speed: 180 m/min
	depth: 0.5, 2 mm
Cooling condition	temperature: 15, 0, -15, -30℃
	flowrate: 100, 200, 300 l/min

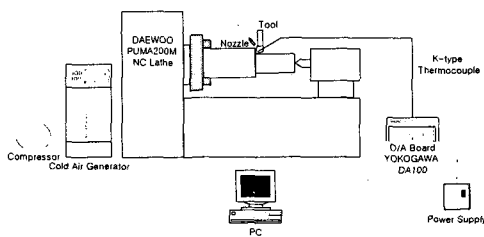


Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup to measure the cutting temperature

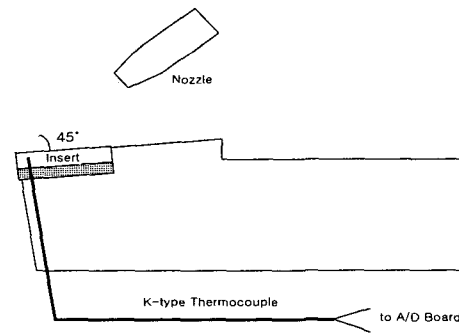


Fig. 7 Embedded thermocouple arrangement

각종 조절기를 통해 일정한 조건으로 유지시킬 수 있도록 하였다.

3.1.2 가공 및 측정 장치

선삭 가공에 냉풍을 적용하였을 때의 절삭 온도를 비교하기 위해 Table 3와 같은 가공 장치와 온도 측정 장비를 사용하였다. 여기서 K-type의 열전대는 약 1250℃까지 측정할 수 있어 절삭시 발생하는 최고 온도까지 측정이 가능하다. 또한 절삭 가공이 진행됨에 따른 공구의 온도 변화 데이터를 기록하기 위한 A/D 보드의 샘플링 시간은 0.5초이다. 한편 전체적인 실험 장치의 개략도는 Fig. 6과 같다.

3.2 실험 조건

3.2.1 가공 조건

절삭조건과 냉풍 공기에 의한 냉각특성을 연구하기 위한 실험 조건은 Table 4와 같다.

냉각 공기는 Fig. 4의 모델링 조건과 절삭점과 15mm 떨어진 곳에서 45도로 노즐을 통해 분사된다. 여기서 노즐로부터 분사되는 냉풍의 실제 온도를 반드시 측정해야 한다. 그 이유는 분사 이후 냉풍이 급격히 확산되기 때문에 토출 이후 온도 역시 상승되고 일정 거리 이상에서는 더 이상 공

급된 냉각공기의 냉각 온도가 유효하지 않기 때문이다. 따라서 노즐의 분사 방향은 정확히 절삭점을 향해야 하며 노즐과 절삭점과의 거리를 칩배출에 방해가 되지 않는 범위 내에서 최소한으로 유지시켜야 한다.

한편 팁의 온도 측정을 위한 열전대를 공구에 구멍을 내어 Fig. 7과 같이 설치하였다. 이때 온도가 측정되는 위치는 각각 팁의 끝단에서 2.75mm, 윗면에서 1mm이다. 이렇게 측정된 온도들은 해석 과정을 통해 얻은 결과와 비교하였다.

4. 실험결과 및 시뮬레이션과의 비교

열전대로부터 측정된 온도는 절삭 시작 후 급격한 상승하여 서서히 일정한 값으로 수렴하게 된다. Fig. 8은 절입깊이가 0.5mm이고 냉각공기의 온도가 -15℃일 때의 시간에 따른 공구의 온도 분포를 나타낸 것이다. 약30초가 경과하면 냉각공기를 사용하였을 때 공구의 온도는 정상상태를 유지하는 것을 알 수 있다. 따라서 수렴 후 최종 온도만을 취하여 시뮬레이션과 비교하였다.

결과 비교에는 2가지 절삭 조건에 대한 모든 냉풍 조건 변화에 따른 온도 변화를 모두 표시하

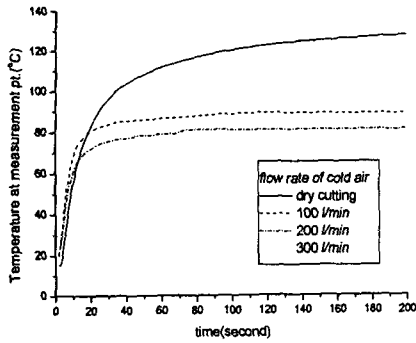


Fig. 8 Cutting temperature (T=-15°C)

Table 5 The Comparison of simulation and experiment (Cutting depth=0.5mm)

Flow rate	Cold air temperature(°C)				
	-30	-15	0	15	
0(l/min)	Exp. [#]	140			
	Sim. ^{##}	130			
100(l/min)	Exp.	76	80	85	89
	Sim.	73	77	82	87
200(l/min)	Exp.	66	70	77	81
	Sim.	61	67	72	78
300(l/min)	Exp.	57	63	69	74
	Sim.	54	60	66	72

Exp.[#] = Experiment
 Sim.^{##} = Simulation

Table 6 The Comparison of simulation and experiment (Cutting depth=2.0mm)

Flow rate	Cold air temperature(°C)				
	-30	-15	0	15	
0(l/min)	Exp.	266			
	Sim.	254			
100(l/min)	Exp. [#]	76	202	208	213
	Sim.	73	195	199	208
200(l/min)	Exp.	66	164	170	177
	Sim.	61	158	164	169
300(l/min)	Exp.	57	141	147	163
	Sim.	55	135	142	155

였다. Table 5는 절입깊이가 0.5mm일 때 냉풍 조건에 따른 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교

한 것이다. 건식 절삭에서는 시뮬레이션과 실험의 차이가 약 10°C정도 이지만, 냉각 공기를 사용할 경우 오차는 약 5°C정도로서 실험과 시뮬레이션이 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 측정점의 공구 온도는 분사되는 냉각공기의 온도 비례하고 유량에 반비례하는 것을 알 수 있다.

Table 6은 절입 깊이가 2.0mm일 때의 시뮬레이션과 측정 결과를 비교한 것이다. 건식절삭때의 측정점에서 실험과 시뮬레이션의 공구의 온도 오차는 약 15°C이지만, 냉각공기를 사용할 경우의 오차는 약 10°C정도로서 나타났다. 그리고 Table 6에서 마찬가지로 절삭 공구의 온도는 냉풍공기의 온도에 비례하고, 냉풍공기의 유량에 반비례하는 것을 관찰할 수 있다.

절입깊이 0.5mm일때 건식 절삭시 공구의 온도는 약 140°C였으나, 냉각 공기에 의하여 60~80°C까지 냉각 되었으며, 절입깊이 2mm일 때 건식 절삭시 공구의 온도는 266°C정도이고, 냉각 공기에 의하여 공구의 온도는 약 140~160°C로 냉각되는 것을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션과 실험결과에서, 실험의 온도가 높게 측정되는, 시뮬레이션을 위하여 모델링시 기하학적 형상을 단순화시키기 위하여 실제 형상의 일부분만을 모델링하였기 때문이다

위의 실험 결과에서 압축 냉각 공기는 절삭공구를 냉각시키는 효과가 있기 때문에, 냉각공기만 사용하던지 혹은, 냉각공기와 코팅(내열)공구를 사용하면 작업 환경을 청결히 유지하면서, 절삭공구의 수명을 연장시킬 수 있다.

5. 결론

절삭 가공중에 발생하는 공해를 최소화하기 위해 절삭유 대신 압축 냉각 공기의 냉각 성능을 유한요소법과 전산유체역학을 이용한 시뮬레이션을 통해 비교·분석하였다. 또한 온도 측정 실험을 통해 시뮬레이션 결과의 타당성을 입증하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 냉각 해석시 노즐에서 분사된 유체의 실제 유동을 해석함으로써 공구의 냉각 정도를 해석하였으며, 실험을 통한 온도 측정 결과와 비슷한 경향성을 보여 해석 결과가 타당함을 보였다.

(2) 제작된 냉풍 발생 장치를 실제 절삭가공에

이용하여 냉풍 가공의 효율성을 검증하였으며, 이 장치는 실제 가공에 이용할 만한 냉각 성능을 보여 주었다.

참고문헌

- (1) Kloche, F. and Eisenblatter, G., 1997, "Dry cutting-Keynote papers," *Annals of CIRP*, Vol 46, No. 2, pp. 519~526.
- (2) Honma, H., Yokogawa, K., and Yokogawa, M. 1996, "Study of Environment Conscious CBN Cooling Air Grinding Technology," *JSPE*, Vol. 62, No.11 pp. 1638~1642.
- (3) Kwak, S. Y. Lee, J. H. Kim D. G. and Lee, S. J., 2002, "Cooling Effect of Cold Air in Machining Process," *KSME 2002 spring conference*, pp. 1137~1142.
- (4) Stevensen, M. G., Wright, P. K. and Chow, J. W. 1983, "Further Developments in Applying the Finite Element Method to the Calculation Temperature Distributions in Machining and Comparisons with Experiment," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 105, pp. 149~154.
- (5) Lin Z. C. and Lin, S. Y., 1992, "A Coupled Finite Element Model of Thermo-Elastic-Plastic Large Deformation for Orthogonal Cutting," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 114, pp. 218~226.
- (6) Shih, A. J., 1996, "Finite Element Analysis of Orthogonal Metal Cutting Mechanics," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 2, pp. 255~273.
- (7) Childs, T. H. C., Maekawa, K., and Maulik, P., 1988, "Effects of Coolant on Temperature Distribution in Metal Machining," *Materials Science and Technology*, Vol. 4, pp. 1006~1019.
- (8) Hong, S. Y. and Ding, Y., 2001, "Cooling Approaches and Cutting Temperature in Cryogenic Machining of Ti-6Al-4V," *Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp. 1417~1437.
- (9) Daniel, C. M., Rao, K. V. C., Oison, W. W. and Sutherland, J. W., 1996, "Effect of Cutting Fluid Properties and Application Variables on Heat Transfer in Turning and Boring Operations," *Japan/USA Symposium on Flexible Automation*, Vol. 2, pp. 1119~1126.
- (10) Li, X., 1996, "Study of the Jet-Flow of Cooling in Machining - Part 1. Theoretical Analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 62, pp. 149~156.