

초정밀 가공기를 위한 환경 제어용 셀에 관한 실험 및 해석적 연구

오상준^a, 김철숙^a, 조지현^a, 김동연^a, 서태범^{b*}, 노승국^c, 박종권^c

Numerical Analysis and Experiment of Environmental Control Cell for Ultra-nano Precision Machine

S.J. Oh^a, C.S. Kim^a, J.H. Cho^a, D.Y. Kim^a, T.B. Seo^{b*}, S.K. Ro^c, J.K. Park^c^a Graduate School of Mechanical Engineering, Inha University, 253, Yong hyeon-dong, Nam-gu, Incheon, Republic of Korea^b Department of Mechanical Engineering, Inha University, 253, Yong hyeon-dong, Nam-gu, Incheon, Republic of Korea^c Intelligent Machine System Research Center, KIMM., 171, Jang-dong, Yoosung-gu, Daejeon, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	13	August	2013
Revised	30	September	2013
Accepted	2	October	2013

Keywords:

Ultra-nano precision Machine
 Temperature control method
 Thermal deformation
 Environmental control cell
 Numerical analysis
 C.F.D

ABSTRACT

In ultra-precision machining, the inside temperature should be controlled precisely. The important factors are environmental conditions (outside temperature, humidity) and temperature conditions (cutting heat, spindle heat). Thus, in this study, an environmental control cell for the ultra-precision machine that could control the inside temperature and minimize effects of the surrounding environment to achieve a thermal deformation of less than 400nm of a specimen was designed and verified through C.F.D. Further, a method that could control the temperature precisely by using a blower, heat exchanger and heater was evaluated. As a result, this study established a C.F.D technic for the environmental control cell, and the specimen temperature was controlled to be within $17.465 \pm 0.055^\circ\text{C}$.

1. 서론

최근 IT (Information Technology), NT (Nano Technology), BT (Bio Technology) 등의 신기술 산업의 발전에 따라 반도체, LED, 의학용기기, 각종 센서 등 다양한 전자기기가 소형, 첨단화 되고 있기 때문에 초정밀 나노 가공부품의 필요성과 중요성이 증가 되고 있다^[1]. 초정밀 가공에 대한 정의는 그 시대의 기술 수준에 따라 변화하지만, 현재 시점에서는 가공물의 치수 및 형상 정밀도 0.1 μm , 표면조도 0.01 μm Rmax 또는 그 이하를 말하며, 가공 정밀도는 최종적으로 1 nm를 가질 것으로 전망하고 있다^[2,3]. 이와 같

이 초미세 정밀 가공에서 안정적인 절삭 능력을 확보하기 위해서 핵심 부품인 주축은 여러 축을 가지면서 움직이고, 스핀들과 모터의 회전수를 증가시켜 이송과 절삭을 고속으로 수행하게 된다. 정밀도 확보를 위한 기계적인 움직임은 가공셀(Cell) 내부에서 발열 원으로 존재하게 되며 이러한 발열에 의한 열변형 오차는 공작기계에서 발생하는 오차의 50~70%를 차지하고 있다고 보고되어졌다^[4]. 따라서 이러한 초정밀 나노급 가공에서는 일반 가공과는 다르게 가공셀 내부의 온도를 매우 정밀하게 제어해야 하며, 이 때 고려해야 할 것은 크게 가공셀 외부의 온도, 습도 등의 환경 조건과 내부의 절삭열, 주축열 등에 의해서 변화되는 온도 조건으로 나눌 수

* Corresponding author. Tel.: +82-32-860-7327

Fax: +82-32-873-7327

E-mail address: seotb@inha.ac.kr (Tae-Beom, Seo).

있다. 공작기계가 사용되는 공간은 다양한 환경 변수들이 존재하고 매우 불규칙적인 환경에서 사용되기 때문에 가공셀 내, 외부에서 발생하는 복합 열전달 현상에 대해 명확한 이해와 분석이 필요하다. Fig. 1은 공작기계에서 발생하는 열 오차에 대한 개략도를 보여주며 복합 열전달 현상이 주위 환경, 냉각제, 가공공정에 미치는 영향과 균일/불균일한 온도변화, 이전 가공물의 영향에 대해서 상세하게 분석이 되어있다.

따라서 초정밀 공작기계에서 열 오차에 대한 영향을 최소화하기 위해 전도, 대류, 복사 현상을 정확하게 제어하고 이를 보상해 줄 수 있는 환경이 필요하다.

Mayr et al은 연구를 통해 열변형 측정, 온도 측정 등 진화된 측정 기술에 대한 소개와 공작기계의 열변형에서 수치해석적인 접근에 대한 이해, 공작기계의 다양한 냉각방법을 다루었으며, 온도 조건 변화에 따라 공작기계의 성능 변화에 대한 영향을 분석하고 최근 공작기계에서 열 오차에 대한 전반적인 연구사항을 정리하였다^[5]. Zhao et al.은 정밀 계측, 가공 시스템에서 나노미터 이하의 허용 오차를 만족시키기 위해서 개방 루프 함수를 가진 제어기를 설계하여 7 m³의 체적을 가진 공간에서 2시간 동안 연속적으로 한 지점의 온도를 ±0.001℃로 제어하는 실험을 수행하였다^[6]. Kwac et al.은 초정밀 절삭 가공에서 발생할 수 있는 오차를 레이저 엔코더를 사용하여 실시간으로 측정하고 미소절삭 공구대를 통하여 보상함으로써 가공 정밀도를 확보할 수 있는 연구를 수행하여 약 50 nm의 추종오차성능을 달성하였다^[7]. Hwang et al.은 온도 제어 챔버의 온도를 ±0.5℃로 제어하여 오차를 ±0.1 μm 이내인 미크론 범위로 조절하는 연구를 수행하였다^[8]. 이전 연구를 통해서 열 오차에 대한 전반적인 사항을 확인하였으며, 다소 복잡한 알고리즘을 가지고 있는 미세 온도 제어 기법과 가공오차를 실시간으로 진단하여 보상해 줄 수 있는 제어 알고리즘에 대해 살펴보았다. 하

지만 이러한 연구의 결과물을 실제 산업계에서 사용하고, 유지·보수하는 것은 비용이 많이 들어가고 가공 시스템에 적용하기 어려운 단점이 있다. 일반적인 범용 가공에서는 10℃정도의 실내온도 차이에 의한 열변형량은 가공오차에 큰 영향을 미치지 않는다. 하지만 초정밀 가공시스템의 경우 가공 범위와 형상이 작아지고, 재료의 열팽창 계수에 따라 가공 오차가 발생한다.

또한, 공작기계를 이루는 복잡한 구성 요소들은 각각의 방열 성능의 차이와 결합부 등에서 발생하는 열 접촉저항 차이에 따른 불균일한 온도 구배가 존재한다.

따라서, 이로 인하여 발생하는 열적 처짐과 평균 온도 상승에 의한 단순 열팽창의 영향을 제어할 수 있는 효율적인 측면이 고려된 환경제어셀이 필요하다. 본 연구에서는 초정밀 가공에서 효율적으로 가공재가 400 nm 이하의 변형을 대응하면서 주위 환경의 영향을 최소화하고 내부의 발열원에서 발생하는 온도제어를 수행할 수 있는 초정밀 가공기 환경제어셀을 설계하였으며 이를 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 통해 검증하였다. 또한 송풍기, 열교환기, 히터를 사용하여 온도를 정밀하게 제어할 수 있는 기법에 관한 연구를 수행하였다.

2. 환경제어셀의 설계와 C.F.D 해석

2.1 환경제어셀 설계

가공물과 외부 환경을 차단시킬 수 있는 챔버는 이미 CNC 등의 공작기계에서 도입 되어 사용되고 있다. 하지만 외부의 환경 영향에 대해서 정밀한 온도제어가 불가능하고 내부 발열원에 대해서 온도 제어를 할 수 없는 것이 대부분이다. 또한 외부의 환경 영향을 최소화하기 위해 대류열전달을 무시할 수 있도록 진공도를 10⁻⁴ torr이하로 유지시켜주는 진공단열, 복사열전달 차폐를 위한 다층 단열, 일정한 간격 사이에 분말입자를 채워 전도열전달을 차단해주는 진공분말단열 등 다양한 단열재를 적용하였을 경우 매우 정밀한 온도제어(±0.001℃)가 가능하지만 비용이 상승하고 비효율적일 수 있다는 단점이 발생하기 때문에 개발된 환경제어셀은 추가적인

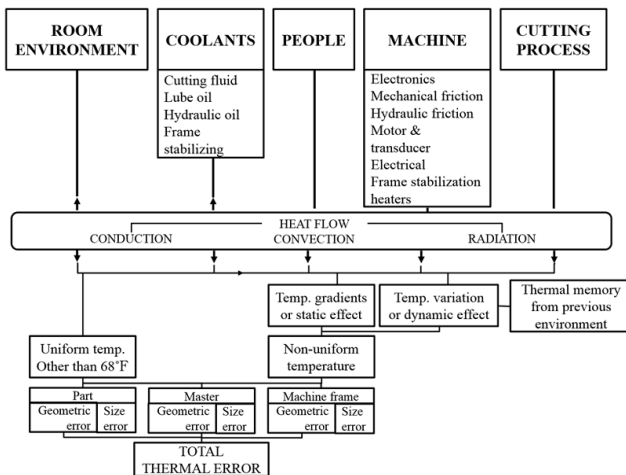


Fig. 1 Thermal effect diagram

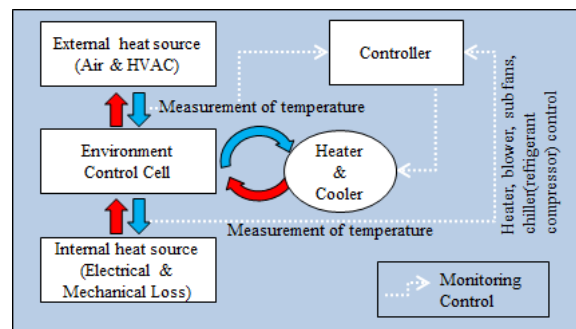


Fig. 2 Experimental equipment and control logic

단열을 하지 않고 내부 공기 온도 제어가 가능하도록 설계하였다. 본 연구에서 사용되는 환경제어셀의 체적은 1 m^3 ($1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$)로 일반적으로 많이 사용되는 초정밀가공기를 설치할 수 있도록 설계하였다. 환경제어셀은 초정밀가공기가 위치하는 가공부와 제어를 담당하는 각종 부품이 위치한 제어부로 나뉘며, 가공부 상부의 2개의 흡입 덕트를 통해 동일한 풍량을 보유한 송풍기를 사용하여 공기혼합상자로 공기를 흡입하게 되고, 각 덕트는 공기혼합상자 내부의 별도로 설치된 냉각장치와 발열장치를 통과한 후에 균일한 온도로 공기가 혼합될 수 있도록 설계하였으며 혼합된 공기는 6개의 팬을 통하여 가공부로 토출되도록 설계하였다. Fig. 2는 개발된 환경제어셀의 구성품과 작동 순서를 나타낸다.

2.2 모델링 및 격자구성

설계된 환경제어셀의 성능을 검토하기 위해서 C.F.D를 수행하였으며 해석에 사용된 모델은 실제 설계 모델과 동일한 모델이지만 실제 해석에서 큰 영향을 미치지 않는 제어부의 부품을 제외하고 가공부, 공기덕트, 공기혼합상자, 냉각장치, 발열장치를 고려하여 모델링을 하였다.

추가적으로 추후 수행되어야 할 해석 기법 확립 및 상부의 대류 열전달계수 확인을 위해 공기영역을 함께 격자로 구현하였다. 공기 영역의 거리는 속도장이 충분히 발생될 수 있도록 완전 발달 길이를 계산하여 Stage Domain의 3배가 될 수 있도록 하였다. 해석에 사용되는 격자의 수는 약 550만개로 해석의 수렴성과 결과의 신뢰성 확보를 위해 격자 전체를 Hexahedral mesh를 구현하였으며,

격자의 Skewness는 0.5이하로 구성하여 열전달 해석에 적합하도록 하였다. 모델링 및 격자구성은 Gambit 2.4.6을 사용하였다.

2.3 경계조건

항온·항습 시스템 내부는 스핀들의 구동에 의해 발생하는 전기적인 손실(Electrical loss)과 마찰 손실(Mechanical loss)에 의한 공기의 밀도 변화와 부력항의 발생으로 자연대류 현상이 발생하게 되고, 내부 공기 순환용 팬에 의한 강제대류가 함께 발생하는 열전달 구조를 가지고 있다. 스핀들에서 발생하게 되는 열손실 조건은 일반적으로 정격출력의 30% 수준이며 스핀들 내부에서 개별 냉각이 적용되기 때문에 발열은 약 5%가 발생한다고 가정하였다. 발열장치와 냉각장치는 내·외부 공기온도 차이와 송풍기의 유량, 가공부 벽면의 대류열전달계수를 가정하여 식 (1)과 식 (2)의 결과를 근거로 최소 필요한 열량을 계산하여 각 1,000 W급으로 가정하였다.

$$Q = hA(T - T_{\infty}) = 5 \times 4.56 \times 10 = 228 \text{ W} \quad (1)$$

$$Q = \dot{m}C_p(T_i - T_o) = 0.08 \times 1005 \times 8 = 643 \text{ W} \quad (2)$$

가공부에서 발생하는 전도, 대류 등의 복합열전달 문제를 보다 명확하게 분석하기 위해 경계조건으로 자연대류가 발생할 수 있도록 공기의 물성치에 Boussinesq model을 적용하였으며, 압력보정식은 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 해법을 사용하였다. SIMPLE 해법은 흔히 정상상태 유동에서 사용되는 해법이지만 동일한 알고리즘에 운동량방정식의 비정상항이 격자 중심점의 영향계수에 넣어진 형태로 처리되고 문제를 매우 효율적으로 풀 수 있다는 장점이 있다. 수렴조건은 잔류원천항(Residual Resource)의 크기로 결정되며 본 해석에서는 반복계산중 이전 단계에서의 계산 결과와의 차이를 각 종속변수의 입구 유량으로 나눈 상대 잔류오차값을 0.001%이하로 설정하여 해석 정확도를 높였다. 또한 해석의 수렴을 확인하기 위해 팬의 유속, 스핀들의 온도, 외기온도 변화 조건에 따른 내부 온도 변화량의 크기를 확인하면서 해석의 정확한 수렴성을 파악하였다. 비정상상태 유동을 계산시에 사용되는 난류모델은 해석 정확도를 높이기

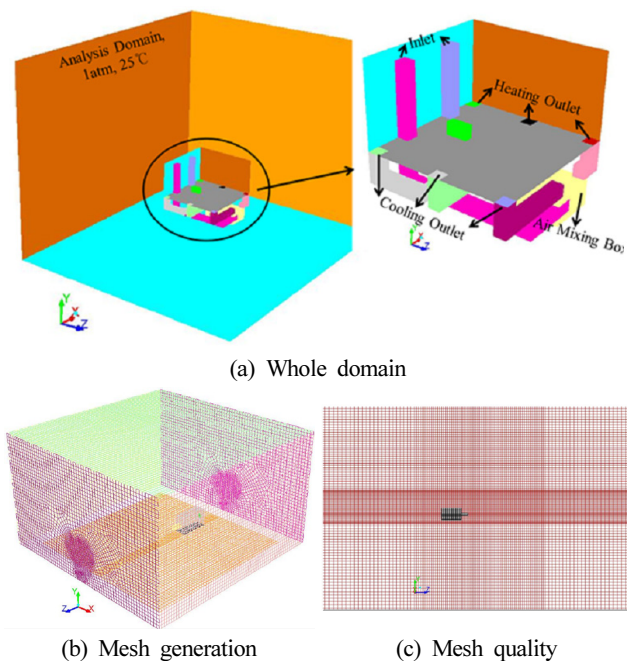


Fig. 3 Computational model

Table 1 Boundary condition

Numerical model	3D, Transient	Natural convection	Buoyancy
Ambient condition	1atm, 25±3 °C	Forced convection	Linear fan
Loss (W/m ³)	Spindle	5429	Turbulent
	Axis	1417	Spatial Disc.
			k-ω SST
			2nd order

위해 L.E.S (Large Eddy Simulation) model을 사용하여야 하지만 해석 수렴시간이 오래 걸리고 계산 자원의 한계로 인하여 간단한 2-Eq.모델인 k- ω SST Model을 사용하여 해석을 수행하였다. 기본적인 사각 공간에 열유체 유동의 정확한 해석을 위해 공학적인 여러 측면에서 많은 연구들이 수행되고 있으며, 공간내의 온도차의 증대와 많은 장애물의 설치 등으로 난류 자연대류로 해석한 결과가 많이 있는 상태이며 다양한 해석 모델들이 제시되고 있다⁹⁾.

본 연구에서 적용한 k- ω SST Model은 모델 자체가 단순하고 예측 성능이 매우 우수하다고 알려져 있으며, 해석 대상 모델이 강한 압력구배와 유선의 곡률을 크게 고려하지 않아도 되기 때문에 사용을 하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 구체적인 해석 경계조건을 나타낸다.

3. 환경제어셀 구성 및 제어 기법 개발

3.1 환경제어셀 구성

본 연구는 기존의 연구^{6,8)}를 기반으로 가공 챔버 내부의 온도를 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내에서 8시간 이상을 운전하여 시편에서 발생할 수 있는 열변형을 400 μm 로 제어하는 것을 목표로 하고 있으며, 가공 챔버 내부 공기의 미세 온도 제어를 위해 가공부에 21지점(RTD : 3EA, K-Type : 18EA)을 선정하여 기준이 될 수 있는 온도값을 측정하였으며, 공기혼합상자에는 4지점(RTD : 2EA, K-Type : 2EA)의 온도를 측정하였다. K-Type 온도센서를 많은 지점에 설치하였지만 센서 자체의 오차가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 연구 목표에 적합하지 않기 때문에 측정하여 상대적인 온도를 비교하기 위한 용도로 사용하였다. 연구에 사용된 RTD 센서의 오차는 $\pm 0.03^\circ\text{C}$ 로 연구 목표에 적합하기 때문에 주로 제어를 하기 위한 목표온도의 설정과 온도 계측을 위해 정밀하게 교정을 받은 후 사용하였다. K-Type 온도센서는 RTD 센서를 사용하여 자체 보정을 실시한 후 계측 위치에 취부 하였다. 센서 모니터링은 Agilent 34970을 사용하였으며 제어로직 구성을 하기 위해 LabView를 사용하였다.

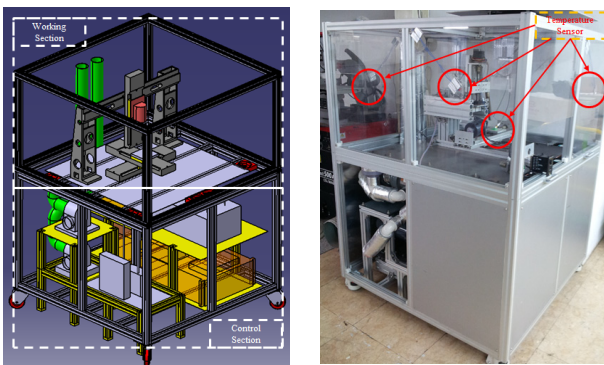


Fig. 4 Design and Experimental setup

흡입 덕트는 마찰손실이 적은 직경 114 mm의 PVC 배관을 사용하여 가공부 내부의 공기를 흡입하도록 하였다. 상대적으로 유로가 복잡한 토출 덕트는 직경 76 mm의 PVC 배관을 사용하여 압력손실을 최소화하였고, 배관 외부에 단열을 실시하여 가공부 내부로 토출되는 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 공기혼합상자의 체적은 0.12 m³ (0.8 m×0.5 m×0.3 m)로 발열장치로 흡입되는 덕트와 냉각장치로 흡입되는 덕트가 분리되어 설치되어 있으며, 온도 제어가 된 상태의 공기는 6개의 덕트를 통해 가공부로 송출되게 된다.

3.2 환경제어셀 제어 기법 개발

본 연구에서는 가공부의 능동적인 온도 제어 기법을 선정하기 위하여 두 가지 제어 방법으로 실험을 수행하였다.

첫 번째 온도 제어 방법은 공기혼합상자 내부의 온도를 직접 제어하여 균일한 온도를 가지는 공기를 가공부 내부로 지속적으로 공급하는 방식으로, 온도변화가 크지 않을 경우에서는 미세한 온도 제어가 가능하였으나 공기혼합박스의 체적이 가공부에 비해 상대적으로 작아서 가공부 내·외부에 국부적으로 급격한 온도변화가 발생할 때 온도 제어가 쉽지 않고 시편온도에 영향을 미치는 것이 확인되어 본 연구의 시스템의 제어 방법으로 적합하지 않는 것으로 판단하였다.

두 번째 온도제어 방법은 가공부 내부의 대표 온도를 직접 제어하여 내부 온도가 변동하게 되면 동일한 양의 열을 보상할 수 있는 방식으로, 실험 결과 가공부 내부 온도를 일정하게 유지하여 시편 온도를 제어할 수 있음을 확인하였다. 제어 수행시에 발열장치와 냉각장치를 동시에 제어하는 것이 가장 좋은 방법이지만 각 장치의 동작시간에 편차가 있기 때문에 냉각장치는 상시 구동하면서 내부의 대표 온도가 설정온도를 벗어 날 경우 발열 장치를 단독으로 제어하면서 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 제어 시스템을 나타내며, 여기에서 A와 B는 요구되는 온도 함수의 상수, H는 히터온도, I는 대표되는

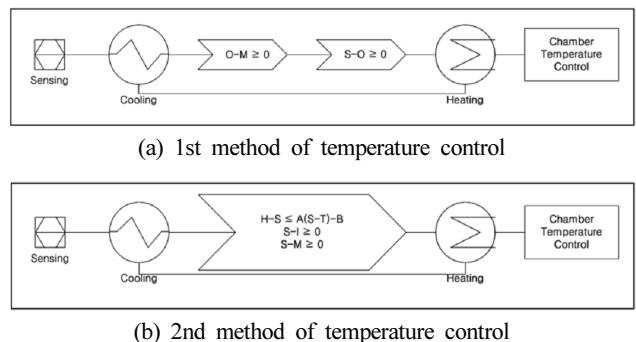


Fig. 5 Temperature control method configuration

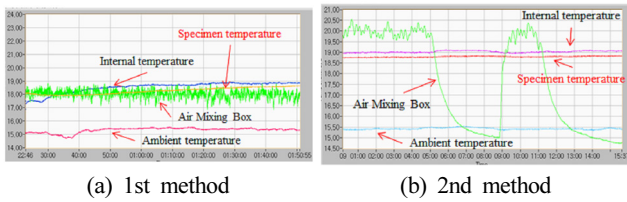


Fig. 6 Temperature control method comparison data

가공부의 내부 평균 온도, M은 시편온도, O는 공기혼합상자의 대표 온도, S는 설정온도, T는 챔버 주변의 환경온도를 의미한다.

Fig. 5(a)의 제어방식은 공기혼합상자의 온도를 설정 온도에 도달 하도록 하기 위하여 공기혼합상자의 온도가 설정 온도보다 낮아질 경우 히터가 가동되게 하였고, 시편의 온도가 공기혼합상자의 온도보다 높을 경우에는 히터의 작동을 멈추도록 하였다. Fig. 6(a)는 첫 번째 온도제어 방식에 따라 내부 온도와 시편 온도의 변화를 측정된 결과로 공기혼합상자의 온도는 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 편차를 가지고 설정 온도가 유지되는 것을 확인하였으며, 목표를 만족시키기 어려운 결과임을 확인하였다.

따라서 Fig. 5(b)와 같이 제어 방식을 3가지의 제어 알고리즘을 동시에 만족시키도록 수정하였다. 첫 번째로 급격하게 온도를 상승시키는 히터의 적절한 제어를 위하여 설정 온도와 대기 온도의 편차를 1차 함수로 표현하여 1차 함수의 결과보다 히터 온도와 설정 온도의 편차가 크게 되면 히터의 작동을 멈추도록 하였다. 두 번째로 급격한 외부의 온도 변화에 의한 오차를 줄이기 위하여 환경제어 어셀 내부에 장착된 온도 센서의 평균값이 설정 온도 보다 높을 경우 히터의 작동을 멈추도록 하였다. 세 번째로 공기보다 온도 변화의 반응이 늦게 발생하는 시편 온도가 설정 온도보다 높을 경우 히터의 작동을 멈추도록 하였다. 이와 같은 3가지의 제어 알고리즘을 동시에 적용한 결과 Fig. 6과 같이 가공부 내부의 시편 온도는 $\pm 0.055^{\circ}\text{C}$ 의 편차를 가지면서 제어가 되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 연구 결과

4.1 해석 수행 결과

Fig. 7은 가공부의 온도분포 결과를 나타내며, 발열원을 모사한 스피ndl의 외부 표면 온도는 36.21°C 로 확인되었다. 스피ndl 주변 평균 공기온도는 26.1°C 이며, 공기혼합상자 내부의 평균 공기온도는 24.96°C , 가공부 내부의 평균 공기온도는 25.01°C 로 나타났다.

내부의 온도분포는 자연대류 효과 및 팬의 유동영향으로 인하여 온도장의 형성이 한쪽으로 치우쳐 있으며, 이를 고려하여설계 수정시에 내부 팬의 배치 및 송풍량을 선정하도록 하였다. 또한 내부의 공기 유동 현상이 자연스럽게 유지되면서 환경제어셀의 내·외부 온도의 차이가 0.38°C 로 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있었다.

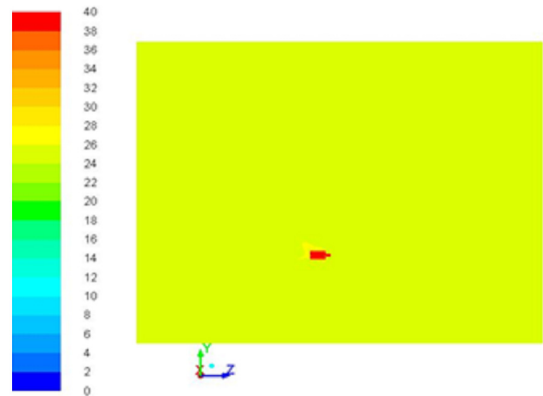


Fig. 7 Temperature distribution

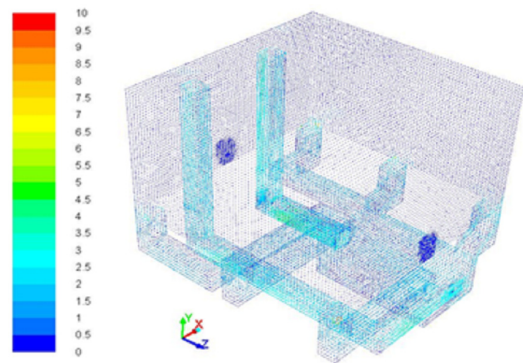


Fig. 8 Velocity distribution

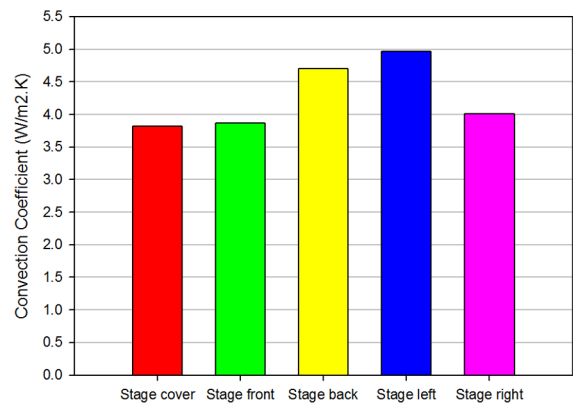


Fig. 9 Cross-sectional average convection coefficient of stage

시스템 내부 속도분포는 Domain을 중심으로 와류가 발생하는 형상이며, 발열원인 스피ndl 상부의 공기속도가 스피ndl이 없는 부분에 비하여 상대적으로 속도가 빠르게 존재하고 있음을 알 수 있었다.

가공부 내부 공기의 평균속도는 1.54 m/s 로 존재하며, 흡입 덕트 내부의 유동에서 동일한 팬으로 경계조건으로 부여하여 계산을 수행한 결과 상대적으로 짧은 덕트의 경우 평균 유속은 2.77 m/s 이며, 긴 덕트의 경우 평균 유속은 2.32 m/s 으로 확인되었으며 이와 같은 결과는 공기혼합상자와의 거리와 덕트에서 발생하는 마찰 손



Fig. 10 Average velocity in inlet and outlet ducts

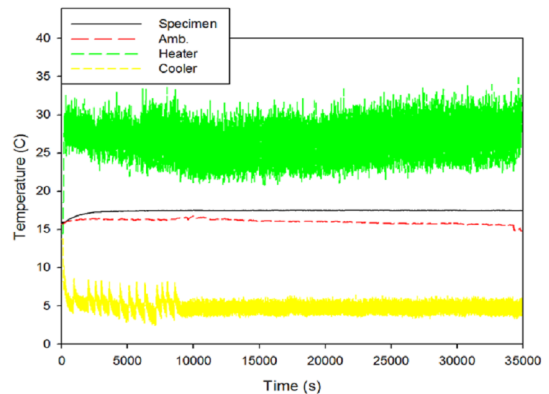


Fig. 11 Result of inside temperature change

실로 인한 손실로 예측할 수 있다. 공기혼합상자를 통해 토출되는 덕트의 경우 거리에 따라 차이가 있지만 평균 속도는 1.4~2.1 m/s 사이로 유로가 상대적으로 복잡하여 충분한 발달 거리를 갖지 못하여 에너지 소실이 크게 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 본 해석 결과를 바탕으로 환경제어셀에서 흡입덕트측에 설치되는 송풍기 배치와 유량에 변화를 주어 속도가 낮은 덕트에는 5,700 LPM의 송풍기를 설치하고, 속도가 높은 덕트에는 3,200 LPM의 송풍기를 설치하도록 하였다. 또한 가공부로 들어가는 6개의 토출구 끝단에 1,150 LPM의 팬을 추가로 장착하여 일정한 온도를 가진 공기의 유량을 확보하도록 설계를 수정하였다.

Fig. 9는 가공부 벽면의 대류열전달계수를 나타내며, 각 면에서의 대류열전달계수는 3.5~5 W/m²K으로 유동의 영향을 가장 많이 받는 흡입 덕트 주변인 후면과 좌측면이 상대적으로 높은 값을 가지고 있었다. 위와 같은 결과는 일반적인 수직형 평판에서 자연 대류 상태에서 가질 수 있는 대류열전달계수로 해석 결과의 타당성을 확인 할 수 있는 결과로 볼 수 있다.

본 해석 결과를 통해 환경제어셀 내부의 유동 및 열전달 효과를 예측 및 검증할 수 있는 해석 기법을 확립하였으며, 최적 Duct 위치 선정 및 환경제어셀 설계의 기초 자료로 활용하였다.

4.2 실험 수행 결과

Fig. 11은 가공 시간 동안 외부 공기의 온도 변화가 ±1°C의 편차를 가지고 변화할 때 가공부 내부의 온도가 17.5°C를 유지하도록 설정한 실험 결과를 보여준다. 시편온도를 제어하기 위해서 냉각모듈의 온도는 5.67±2.79°C로 제어되고 발열모듈의 온도는 27.27±6.39°C로 제어되고 있음을 알 수 있다.

내부의 발열원은 스템모터를 사용하여 모사하였으며, 제어 없이 연속 동작하여 표면 온도는 34°C까지 상승하면서 포화하였다. Fig. 12는 시편온도가 17.465±0.055°C의 범위로 제어되고 있음을 나타낸다.

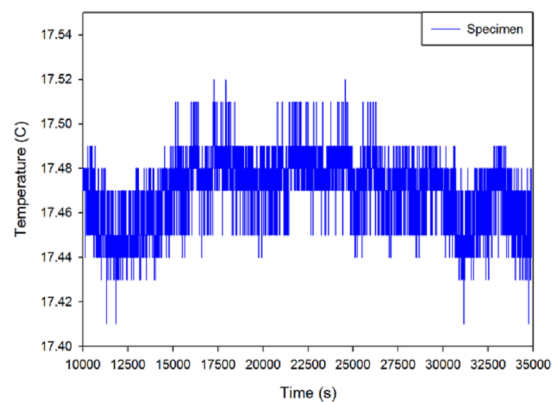


Fig. 12 Specimen temperature change graph

5. 결론 및 고찰

본 논문에서는 초정밀가공시 시편 또는 가공체의 열변형량이 400 nm/8시간 이내에서 유지되도록 환경제어셀의 온도를 ±0.1°C 이내로 유지할 수 있도록 하는 제어기 및 주변장치를 구성하고 실험과 CFD해석을 수행하여 설계 및 해석모델의 검증을 수행하였다. 환경제어셀의 가공부 온도유지를 위한 2가지의 제어기법을 고안 및 적용하였으며, 가공부 내부의 대표 온도를 직접 제어하여 시편의 온도가 17.465±0.055°C 이내로 제어가 되고 있음을 확인하였다. 향후 제어 기법의 다양한 적용을 위해 공기혼합상자의 체적을 증가시켜 주어야 하며, 더욱 정밀한 온도 제어를 위해 냉각장치와 발열장치의 개선이 반드시 필요하다. 또한 초정밀 가공에서 습도의 영향을 파악하고 이를 제어할 수 있는 방안에 대한 추가 연구가 필요하며 현재 개발하고 있는 나노기반 Hybrid 가공기에 적용이 가능하도록 소형화 및 조립화를 하기 위한 연구가 추가적으로 필요하다.

후 기

이 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업(과제번호 No.10 033375)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Kim, W. J., Kim, J. Y., Moon, J. K. 2005, The Simulation of Cutting Force Estimate Model at Micro-Stage for Ultra Precision Cutting Machine of Nano Part, Proceeding of Spring Annual Conference of KSTLE, 169-174.
- [2] Etsuo, M., 1992, Ultra-precision machining Corona Publishing, Japan.
- [3] Taniguchi, N., 1996, Nanotechnology, Oxford University Press, Oxford, 1-2.
- [4] Bryan, J. B., 1990, International Status of Thermal Error Research, Annals of the CIRP, 39/2, 645-656.
- [5] Mayr, J., Jedrzejewski, J., Uhlmann, E., Alkan Donmez, M., Knapp, W., Hartig, F., Wendt, K., Moriwaki, T., Shore, P., Schmitt, R., Brecher, C., Wurz, T., Wegener, K. 2012, Thermal issues in machine tools, CIRP annals - Manufacturing Technology, 61 771-791.
- [6] Zhao, Y., Trumper, D. L., Heilmann, R. K., Schattenberg, M. L., 2010, Optimization and temperature mapping of an ultra-high thermal stability environmental enclosure, Precision engineering, 34:1 164-170.
- [7] Kwac, L. K., Kim, J. Y., Kim, H. G., 2006, Real-time Motion Error Time and the Thermal Error Compensation of Ultra Precision Lathe, Transactions of the KSMTE, 15:4 44-48.
- [8] Hwang, J. H., Park, C. H., Lee, C. H., Kim, S. W., 2002, Analysis on the Positioning Error of an Aerostatic Stage, 1st Korean-Japan Conference on Positioning Technology, 27-31.
- [9] Jung, H. M., Lee, C. J., Chung, H. S., 2000, Study on the numerical modeling of turbulent natural convection in rectangular enclosure, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, 12:1 33-39.