

# Hot Gas 를 이용한 오일쿨러의 성능평가

## Performances of Hot Gas Bypass Type Oil Cooler System

이승우<sup>1,✉</sup>, 염한길<sup>2</sup>, 박길종<sup>3</sup>  
Seung Woo Lee<sup>1,✉</sup>, Han Kil Yeom<sup>2</sup> and Kil Jong Park<sup>3</sup>

1 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (Intelligent Manufacturing Systems Division, KIMM)

2 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부 (Energy Plant Research Division, KIMM)

3 (주)일림나노텍 냉기사업본부 (Nanocooler Department, Ilrim Nanotec Co, Ltd.)

✉ Corresponding author: lsw673@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7417

Manuscript received: 2008.7.18 / Accepted: 2008.11.17

*In accordance with the trend for high-speed multi-axes, and the increasing technical sophistication of machine tools, thermal deformation has become an important factor in the accuracy of machine tools. It was analyzed that thermal deformation error accounts for about 70% of all errors made with machine tools. For precise temperature control, both cooling and heating should be implemented. A hot gas bypass type cooling cycle method has a simplified structure and temperature control accuracy to within  $\pm 0.1$  °C. In this study, the performances of oil cooler system, including temperature controllability according to hot gas flow and preset temperature sustainability according to temperature load, were tested. It is expected that this study will contribute to the development and performances of oil cooler system, which could minimize thermal errors and improve the quality of precision machine tools.*

Key Words: Thermal Error & Deformation (열 변형), Performance Evaluation (성능평가), Hot Gas Bypass Cooling Cycle (Hot gas 우회 냉동사이클), Temperature Controllability & Sustainability (온도제어성 및 유지성), Oil Cooler System (오일쿨러)

### 1. 서론

최근의 공작기계는 추축회전속도 20,000rpm, 이송속도 120m/min 등의 고속화 추구와 여러 개의 공작물을 동시에 가공할 수 있는 다축화 등으로 개발되고 있다. 이와 같은 개발추세는 기존의 공작기계보다 더 많은 열을 발생시켜 열에 의한 공작기계의 변형을 초래하고 공작기계의 가공정밀도에 많은 영향을 미친다. 공작기계에서 발생하는 오차는 오차의 형태에 따라 정적 오차(static error)와 동적 오차(dynamic error)로 구분된다. 동적 오차는 구조물의 진동, 채터(chatter) 및 스피들 유닛의 진동 등에 의해 발생하는 오차이고, 정적 오차는

공작기계의 안내면(guide way), 칼럼(column), 볼스크루(ball screw) 등 구조계의 조립특성에 따른 기하 오차와 열 변형오차(thermal error or thermally induced error)로 구분된다. 실제로 공작기계에서 발생하는 오차 중 약 70%는 열 변형에 의한 오차로 분석되고 있다.<sup>1,2</sup>

공작기계에서 발생하는 열 변형을 최소화하고 보정하기 위한 방법으로는 변형에 따른 위치 보정, 서보 제어 등의 보정방법과 열 변형을 초래하는 발열부를 직접 냉각하여 열 변형을 최소화하는 방법 등이 있으며, 후자의 경우가 시스템구성의 간편성, 최소한의 투자로 최대의 효과 등으로 인해 많이 사용된다. 이러한 방법을 이용한 장치를 오



전자밸브(regulating valve, 450pulse)에 의해서 조절된다. 이 전자밸브는 오일쿨러에서 지정하는 설정 온도를 기준으로 열 교환기의 입구온도, 출구온도 및 대기온도를 기준으로 하여 온도조절기에서 PID 방식으로 제어된다. Fig. 2 는 오일쿨러에서 hot gas 우회부분과 hot gas 양을 조절하기 위한 전자밸브의 모습을 나타낸 것이다.

### 2.2 냉매물성 및 냉각특성

일반적으로 냉매로 많이 사용되는 HCFC 와 CFC 계열의 물질은 열역학적 우수성 및 화학적 안정성 등을 갖추고 있지만 프레온 성분이 대기 중에 누출될 경우 오존층 파괴와 같은 환경문제를 야기시킨다. 이를 대체하기 위한 HFC 계열의 냉매로 R-134a, R-407C, R-410A 등이 있다. 그러나 이 대체 냉매도 오존층에 미치는 영향은 미미하지만 지구의 온난화에는 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이 중에서 R-407C 냉매는 R-22 와 유사한 압력특성을 갖는 R-32/125/134a(23/25/52 wt. %)의 비공비 혼합냉매로 개발된 오일쿨러의 냉매로 선택하였다.

R-407C 는 6℃ 정도의 온도 기울기(temperature glide)가 존재하고 R-22 에 비해 30~40% 정도의 열 전달계수 저하로 인한 성능감소, 시스템의 운전조건에 따른 냉매의 조성비 변화로 인한 성능저하와 냉매의 누설 및 재충전에 따른 시스템의 성능변화 등 고려하여야 할 부분이 있다.

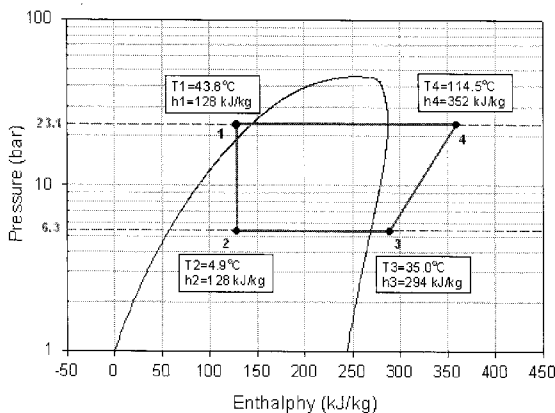


Fig. 3 Pressure-Enthalpy Diagram of R-407C

하지만 압축기 오일의 대체에 따른 부품변경 외에는 큰 설계 변경 없이 기존의 압축기를 그대로

로 사용할 수 있으며 지구 온난화 지수도 상당히 낮은 편이어서 신 냉매로 많이 사용되고 있다.<sup>9</sup> 비등점은 -44℃이고 임계온도 86℃, 임계압력 4.65MPa 이다. 밀도는 4.57 kg/m<sup>3</sup> 이고 25℃일 때 증발 잠열은 193.9 kJ/kg 으로 알려져 있다. Fig. 3 은 R-407C 냉매를 이용한 증기-압축 냉동사이클의 각 상태점을 압력-엔탈피 선도에 나타낸 것이다.

개발된 오일쿨러는 냉동사이클의 고압과 저압이 각각 2.31MPa, 0.63MPa 이고 압축기의 입력이 2220W, 냉동능력은 6250W 로 Fig. 3 의 압력-엔탈피 선도 및 식 (1)을 이용하여 냉동사이클의 순환냉매 유량을 구할 수 있다.

$$Q = \dot{m}\Delta h \tag{1}$$

여기서 Q 는 냉동능력,  $\dot{m}$  은 순환냉매유량,  $\Delta h$  는 엔탈피 변화량(h3-h1)으로 식(1)을 이용하여 순환냉매 유량을 구할 수 있다. 순환냉매유량은 37.66g/s 로 계산된다. 압축기 입력(2220W), 순환냉매유량, h4 등을 이용하여 Fig. 3 의 압력-엔탈피 선도 상의 점 4 에서의 온도를 구할 수 있다. 점 4 에서의 온도는 114.5℃이다.

압축기 출구로부터 우회된 114.5℃의 hot gas 와 팽창변을 지난 건도 약 0.2~0.3℃ 정도의 냉매 액이 열교환기 입구에서 혼합된다. 따라서 우회된 hot gas 의 양에 따라 열교환기의 증발능력이 변화되므로 냉각유의 온도를 제어할 수 있게 된다.

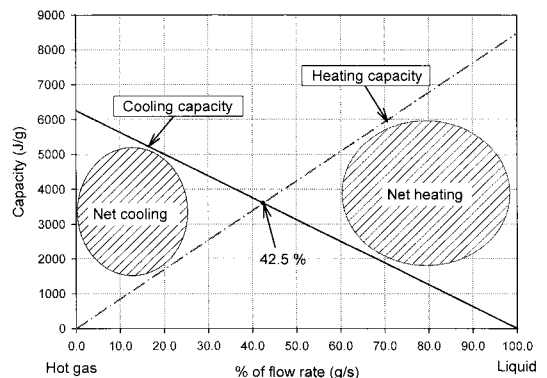


Fig. 4 Changes is cooling and heating capacity according to hot gas flow

Fig. 4 는 우회된 hot gas 의 양에 따라 열 교환기의 냉각(cooling) 및 가열(heating) 능력 변화를

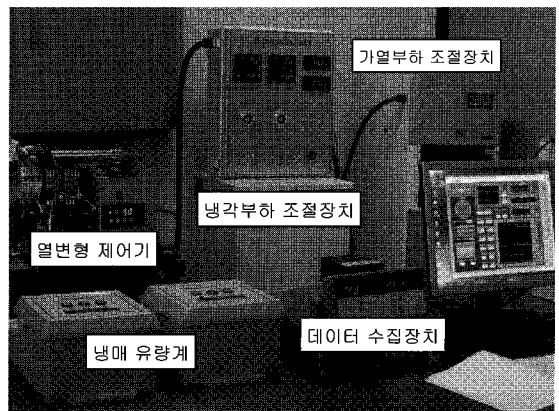
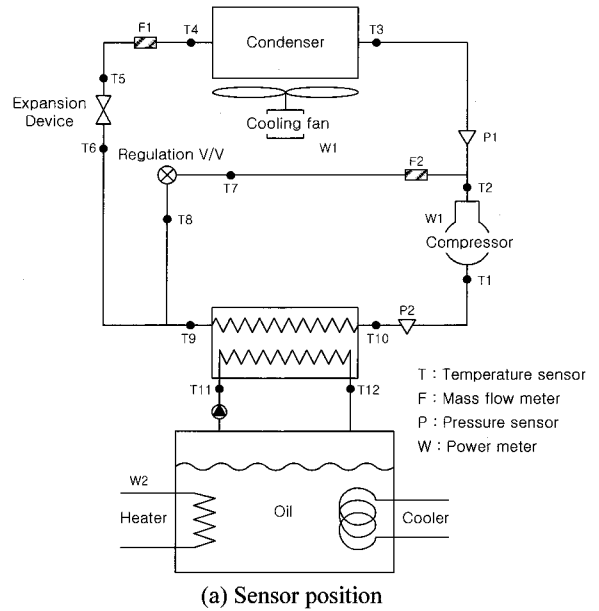
보여주고 있다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 hot gas 의 양이 전체 냉매유량의 약 42.5% 정도가 되면 무부하 운전이 됨을 알 수 있다. 즉 hot gas 의 양이 42.5% 미만이면 냉각유를 냉각시킬 수 있고, 42.5% 이상이 되면 가열을 할 수 있어 설정온도 유지를 위해 전자밸브의 개폐에 따른 hot gas 의 양에 따라 필요한 온도로 냉각유를 제어할 수 있게 된다.

### 3. Hot gas 우회방식 오일쿨러의 성능평가

#### 3.1 성능평가 시험장치

개발된 hot gas 우회방식 오일쿨러의 성능확인을 위해 Fig. 5 와 같은 성능시험장치를 제작하였다. 성능시험 장치의 부하는 전기히터(6 kW)와 쿨러(1.5 kW)에 의해 조절된다. 즉 냉각부하는 전기히터에 의해 조절되고, 가열부하는 별도의 쿨러에 조절된다. 오일쿨러로 공급되는 열량은 냉각유의 온도 차와 유량을 측정하여 모니터링 할 수 있다. 냉각유의 유량은 기어타입 오일 유량계(Oval 사, FLOWPET LS5276)로 측정하였고, 오일쿨러 각 부위(압축기 입/출구, 응축기 입/출구, 팽창밸브 입/출구, 열 교환기 입/출구, regulating 밸브 입/출구)의 온도는 T-type 열전대로 측정하였다. 우회되는 hot gas 의 유량 및 전체 냉매 유량 측정을 위해서는 RHEONIK 사의 RHM 04 질량유량계를 각각 압축기 출구 및 응축기 출구에 설치하여 측정하였다. 또한 오일쿨러 냉동사이클의 고압과 저압 측정은 KELLER 사의 PA-21SR 압력센서를 이용하였으며, 소비전력량은 YOKOGAWA 사 CW240 을 이용하여 측정하였다. 각종 측정 데이터(유량, 온도, 압력, 전력량 등)는 데이터 수집장치(Agilent 사 34970A)로 모아져 PC로 전송, 저장된다.

부하 조절기에서 원하는 부하량을 냉각유에 실어 오일쿨러로 공급하면, 오일쿨러는 이 부하를 처리하기 위해 운전되고, 설정된 온도를 맞추기 위해 regulating 밸브의 개도를 조절하여 hot gas 의 양을 조절한다. Regulating 밸브의 개도는 0 ~ 650 펄스로 조절되는 스텝핑 모터에 의해 정밀하게 조절된다. 응축기의 냉각 팬은 응축기 압력이 21 기압 이상이 되면 가동되게 제어함으로써 압축기 출구 냉매 즉 hot gas 의 열량을 충분히 확보하여 가열 용량 증대시키고, 냉각 팬의 속도변화를 제어하여 냉각 팬의 소비전력을 절감하고 가열용량을 증대할 수 있도록 하였다.<sup>10</sup>



(b) Data acquisition system of various contents

Fig. 5 Test apparatus of oil cooler

#### 3.2 열 부하에 따른 오일쿨러의 동작 특성

개발된 오일쿨러의 동작특성을 시험하기 위해 앞에서 개발한 성능평가 시험장치를 이용해 시험하였다. 시험은 오일쿨러의 설정온도를 조정하여 최대냉각과 최대가열을 하는 것으로 설정하였다.

Fig. 6 은 냉각부하가 3000W 이고, 냉각오일 설정온도를 20℃로 했을 경우 오일쿨러에서 공급되는 냉각오일의 온도를 측정한 것이다. Fig. 6 에서 오일쿨러의 출구 냉각온도는 설정온도 20℃를 약 27 분 경과 후에 정확히 제어하고 있음을 알 수 있다.

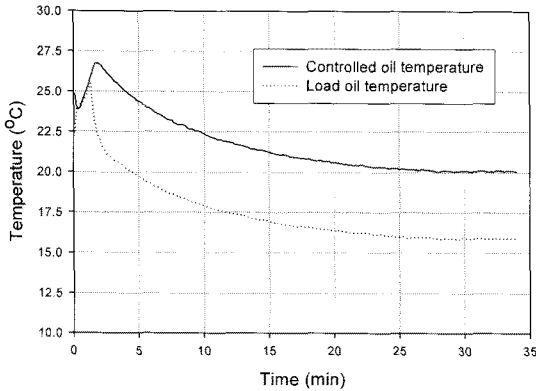


Fig. 6 Temperature of cooling oil's inlet and outlet (full cooling mode)

Fig. 7 은 냉각부하 3000W, 설정온도 20℃일 때의 냉매 유량을 나타낸 것으로 hot gas의 유량은 약 5.5 g/s로 전체 유량의 약 16.9%에 해당된다. 이는 오일쿨러 제어기에서 hot gas 유량제어 밸브의 개도를 10 ~ 100%까지 제어하고 있기 때문으로 hot gas 유량 5.5 g/s는 hot gas 제어밸브를 최대로 닫았을 때의 유량으로 100% 냉각운전이다. 전체 유량은 평균적으로 보면 일정하게 안정되고 있으나 순간값은 평균값을 중심으로 변동이 있음을 알 수 있다. 이는 우회되는 hot gas가 완전히 차단되지 않고 일부가 계속 열교환기 입구 측으로 유입되기 때문에 이에 대한 영향으로 팽창밸브에서 냉매의 팽창량을 지속적으로 제어하기 때문인 것으로 판단된다.

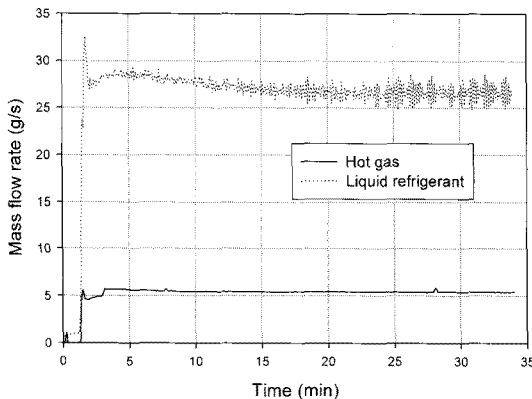


Fig. 7 Mass flow rate of refrigerant (full cooling)

Fig. 8 은 가열부하 운전특성을 시험하기 위해 가열부하 3000W, 설정온도 32℃로 설정하여 온도

와 hot gas의 양을 특정한 결과를 나타낸 것이다. 가열특성을 냉각특성과 달리 운전시작 약 13분 경과 후에 설정온도 32℃를 제어하는 것으로 분석되었다.

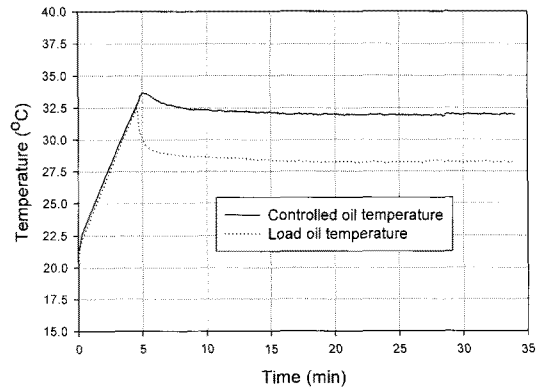


Fig. 8 Temperature of cooling oil's inlet and outlet (full heating mode)

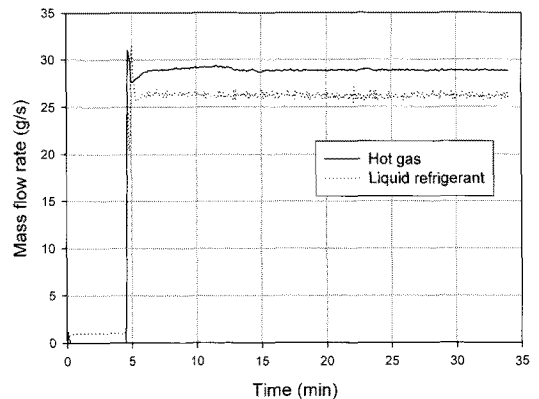


Fig. 9 Mass flow rate of refrigerant (full heating)

Fig. 9는 최대가열 모드에서의 hot gas 유량과 액상 냉매의 유량을 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 hot gas의 유량이 액체 냉매의 유량보다 많은 상태로 분석되었는데, 이는 hot gas 유량 제어 밸브가 100% 열린 상태로 hot gas의 유량은 28.9 g/s(전체 유량의 52.5%)로 나타났다. 이때 열변형 제어기는 100% 가열 운전상태로 오일쿨러의 냉각능력은 0%인 상태이다. 이는 hot gas 우회 방식의 가장 큰 특징 중의 하나인 가열모드로서 공작기계의 초기 운전시에 워밍업 시간의 단축의 효과를 나타내어 작업 준비시간을 최소화 할 수 있는 기능이다.

이 밖에 냉각과 가열을 동시에 할 수 있는 hot gas 우회방식의 오일쿨러에 대해 중간 냉각 및 중간 가열부하에 대해서도 실험을 수행하였다. 최종 실험결과는 Table 1 에 정리하였다. 실험결과에서 보는 바와 같이 각 모드에 대해 오일쿨러는 냉각 오일의 설정온도를 정확히 제어하였고 이를 위해 hot gas 의 유량도 적절히 제어되고 있음을 알 수 있다. 또한 가열 운전시 소비전력이 줄어드는 것은 hot gas 의 유입이 많아짐에 따라 압축기의 부하가 줄어들기 때문이다.

Table 1 Test results of oil cooler with various conditions

Opear.		Cooling		Heating		
		Full	Mid.	Full	Mid.	
Oil	Set	20.0	25.0	32.0	30.0	Heater Load: 3 kW
	Measure	20.0	25.2	32.0	30.1	
Fl.	Full	32.5	41.3	55.1	51.9	
	Hot gas	5.5	15.5	28.9	26.4	
Pr.	High	22.4	21.3	21.1	21.1	
	Low	6.7	7.9	10.3	9.8	
Power (kW)		2.5	2.5	2.3	2.4	

Unit: Oil °C, Flow g/s, Pressure bar

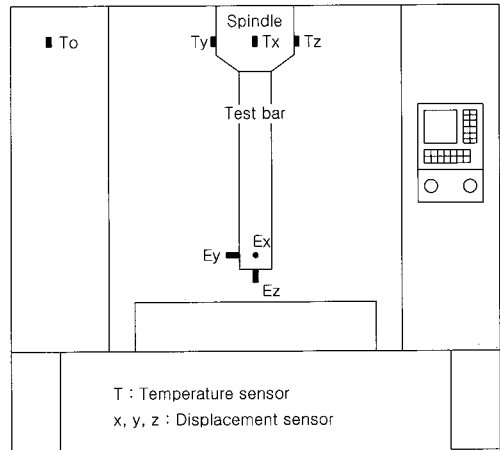
### 3.3 공작기계에서의 열변형 측정

#### 3.3.1 열변형 측정장치

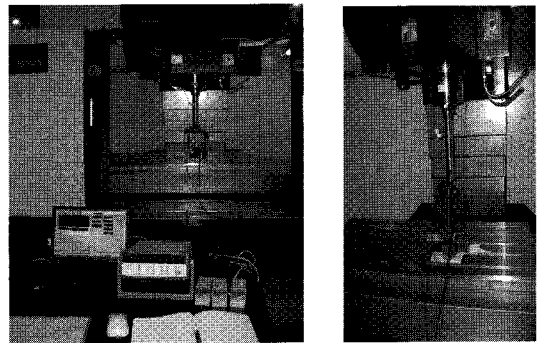
개발된 오일쿨러의 실제 성능평가를 위해 머시닝센터에 개발된 오일쿨러를 부착하고 스피들에 test bar 를 장착한 후 test bar 의 열변형 정도를 측정하였다.

Fig. 10 은 열 변위센서와 온도센서를 장착한 측정장치를 나타낸 것이다. 변위 측정 센서는 서브-마이크로의 변위를 고정도로 측정할 수 있는 KEYENCE 사의 EX-305V 로 측정 범위는 0~1mm 이며 분해능은 0.4 μm 이다. 센서 출력은 ±5V 의 아날로그 출력으로 데이터 수집장치(Agilent 사 34970A)를 통해 수집되어 변위로 변환한다. 변위 측정센서의 위치는 Fig. 10 에 보는 바와 같이 test bar 의 x, y, z 방향의 변위를 측정할 수 있도록 설치하였다. 또한 스피들의 온도 변화 및 스피들 주변 온도 등을 측정하기 위해 온도 센서를 변위센서와 같은 방향으로 설치하였다. 모든 측정 데이터는 데이터 수집장치를 통하여 PC 에 저장된다.

#### 3.3.2 열변형 측정결과 분석



(a) Position of thermocouple and eddy current sensor



(b) Data acquisition system of eddy current sensor

Fig. 10 Test equipment of thermal error using eddy current sensor and thermocouple

실험에 사용된 머시닝센터는 N 사의 SPACE 530 수직형 머시닝센터로 x, y, z 축의 이동량은 각각 1050, 530, 550mm 이고 최고 회전수는 10,000 rpm 이다. 주축 모터의 출력은 연속모드인 경우 15 kW 이고 이송모터 출력은 x, y, z 각각 0.4 kW 이다. 또한 절삭유 및 냉각유 펌프 출력은 각각 0.4, 0.5kW 이다.

열 변형 실험은 ISO/DIS230-3 을 기반으로 수행하였다.<sup>11,12</sup> 실험에서 최대 rpm 은 머시닝센터의 최대 회전속도의 60% 정도를 운전하는 것으로 하였으며 실 가공영역에서 많이 사용되는 4000 ~ 6000 rpm 으로 운전하였다. 오일쿨러의 설정온도는 23°C 이며, 실온추종 제어 방식을 사용하였다. 열 변형 측정은 스피들에 test bar 를 고정시키고 4000 → 6000 → 5000rpm 으로 각각 4 시간씩 주축을 회전 하면서 test bar 의 열변형량을 측정하였다.

Fig. 11 은 각 rpm 영역별 온도변화를 나타낸 것으로 운전시간에 따라 각 부분의 온도가 변화되고 있다. 초기온도 22.7℃에서 4000rpm 영역에서는 y 축 방향의 온도가 24.2℃까지 증가하고, 6000rpm 영역에서는 24.7℃까지 증가하여 최대 온도변화는 약 2.0℃정도로 분석되었다. 5000rpm 영역에서는 온도가 24.4℃까지 하강하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 온도변화 패턴은 y 축뿐만 아니라 x 축과 y 축도 같은 경향을 나타내고 있으며 기존의 열 변형 실험 데이터와 비교해 볼 때 온도의 상승 폭이 매우 작음을 알 수 있다.

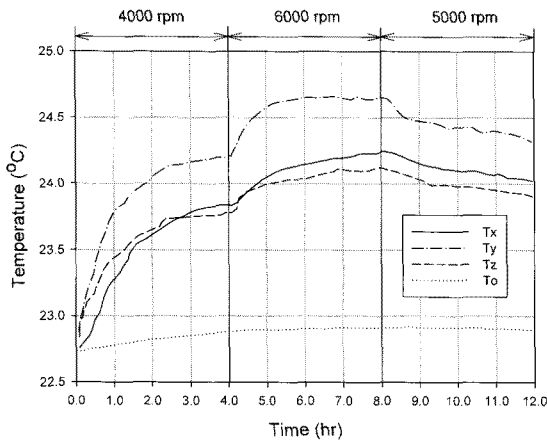


Fig. 11 Temperature of spindle and the air

Fig. 12 는 시간경과에 따른 각 축의 변형량을 나타낸 것이다. 머시닝 센터의 x 축과 z 축은 운전 경과에 따라 주축의 길이 방향(z 축)과 좌우 수직 방향(x 축)으로 변형이 생기고 있다. 즉 센서의 원점에서 가까워지는 방향으로 변형이 발생하고 있다. 측정된 변형량은 0.5~1.3um 정도로 측정되었다. 반면에 y 축은 x, z 축과는 반대로 센서와 멀어지는 방향으로 변형이 생기며 약 1.5um 정도 변형이 발생하였다. 이와 같은 변형 패턴을 볼 때 온도변화에 따른 변형량의 크기는 상당히 밀접한 관계가 있으며, 변형량을 최소화하기 위해서는 온도변화를 최소화하여야 하는 것으로 판단된다.

이와 같은 실험결과를 통해 hot gas 우회 방식의 오일쿨러를 탑재한 머시닝센터는 주축의 고속 및 변속 가공 조건에서도 열변형이 최소화 되는 것으로 판단되며, 부하장치를 이용한 성능평가에서도 분석된 바와 같이 온도유지 능력이 탁월한 것으로 분석되었다.

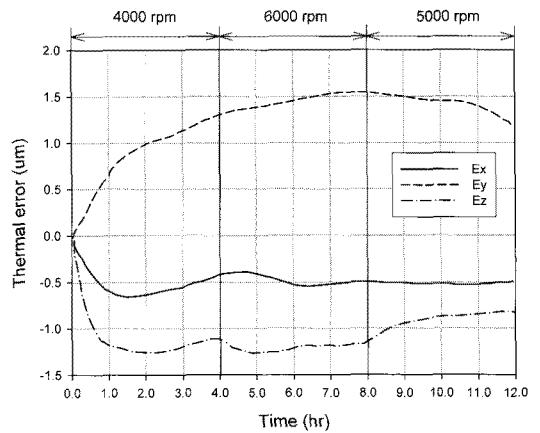


Fig. 12 Thermal deformation of each axis

기존의 열 변형실험에서는 8 시간 동안 무부하 운전을 한 결과 최초온도 21℃에서 시작하여 운전 시간이 경과할수록 주축의 온도가 상승하여 주축 온도가 최고 26℃까지 상승하고 최대 15um 정도의 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 항온 하에서는 최대 2℃이상의 온도변화가 발생하며, 이에 따라 최대 6um의 변형이 발생하는 것으로 측정되었다.<sup>13</sup> 따라서 본 연구에서 개발한 오일쿨러의 적용으로 최대 2℃의 온도변화와 1.5 um 정도의 변형이 생기는 것으로 분석되어 열 변형을 최소화 할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 오차는 기계마다 달라질 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 공작기계에서 발생하는 열 변형을 최소화하기 위해 hot gas 우회방식의 오일쿨러를 개발하고 이에 대한 성능평가를 실시하였다. 성능평가를 위해 열 부하 기능, hot gas 및 액상냉매 유량 측정, 각 부위별 온도 측정이 가능한 시험기를 제작하였으며, 부하별 온도유지성능과 hot gas 와 액상냉매의 유량을 측정하는 동작특성 실험을 수행하였다. 이를 통해 hot gas 의 양에 따른 오일쿨러의 성능이 기대치에 충족하는 것을 분석하였다. 또한 개발된 오일쿨러 시스템을 실제 머시닝센터에 장착하여 실 가공 영역에서의 열변형을 측정하였다. 측정결과 오일쿨러는 냉각오일의 설정온도를 정확히 제어하였고, 스피들의 회전속도 변화에 따른 온도변화가 최대 2℃ 정도로 분석되어 열 변형량도 최대 1.5um 정도밖에 발생하지 않

아 열 변형이 최소화 되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 주축의 고속 및 변속 가공 조건에서도 열 변형이 최소화되어 초정밀 가공기계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 추후에는 on/off, 인버터 방식의 오일쿨러와의 성능비교와 함께 신뢰성 및 경제성을 보증할 수 있는 실험을 수행할 예정이다.

## 참고문헌

1. Bryan, J. B., "International Status of Thermal Error Research," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 2, pp. 645-656, 1990.
2. Weck, M., McKeown, P. A., Bonse, R. and Herbst, U., "Reduction and Compensation of Thermal Error in Machine Tools," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 2, pp. 589-598, 1995.
3. Yaqub, M. and Syed, M. Z., "Capacity Control for Refrigeration and Air-Conditioning Systems: A Comparative Study," *Journal of Energy Resources Technology*, Transactions of the ASME, Vol. 123, No. 1, pp. 92-99, 2001.
4. Tso, C. P., Wong, Y. W., Jolly, P. G. and Ng, S. M., "A comparison of hot-gas by-pass and suction modulation method for partial load control in refrigerated shipping containers," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 24, No. 6, pp. 544-553, 2001.
5. Yaqub, M., Syed, M. Z. and Jameel-ur-Rehman, K., "Performance evaluation of hot-gas by-pass capacity control scheme for refrigeration and air-conditioning systems," *Energy*, Vol. 25, No. 6, pp. 543-561, 2000.
6. Yaqub, M., Syed, M. Z. and Shamsul, H. K., "Scend-Law-Base Thermodynamic Analysis of Hot-gas, By-pass Capacity Control Schemes for refrigeration and air-conditioning systems," *Energy*, Vol. 20, No. 6, pp. 483-493, 1995.
7. Byun, J. S., Lee, J. and Jeon, C. D., "Frost retardation of an air-source heat pump by the hot gas bypass method," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31, No. 2, pp. 328-334, 2008.
8. Cho, H., Kim, Y. and Jang, I., "Performance of showcase refrigeration system with multi-evaporator during on-off cycling and hot-gas bypass defrost," *Energy*, Vol. 30, No. 10, pp. 1915-1940, 2005.
9. Han, X. H., Wang, Q., Zhu, Z. W. and Chen, G. M., "Cycle Performance study on R32/R125/R161 as an alternative refrigerant to R407C," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 10, pp. 2559-2565, 2007.
10. Lee, S. W., Yeom, H. K. and Park, K. J., "Assessment Capability of Oil Cooler with Hot Gas," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 455-456, 2007.
11. Statham, A., Martin, A. and Blackshaw, D. M. S., "Assessing the thermal distortion caused by spindle rotation of a machining center using draft standard ISO/DIS 230-3," *Laser Metrology and Machine Performance III*, pp. 101-111, 1997.
12. Lee, S. W., Han, S. W. and Lee, H. S., "Reliability Evaluation of an Oil Cooler for High-Precision Machining Center," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 8, No. 3, pp. 50-53, 2007.
13. Ko, T. J., Kim, H. S., Kim, H. S. and Kim, S. H., "Research on the Experiment Methods for the Compensation of Thermal Distortion of Machine Tool Spindle," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 300-304, 2001.