

# 초정밀 유정압 테이블에서 냉각장치의 변수 설정이 온도특성에 미치는 영향

## Influence of Parameter Setting in an Oil Cooler on the Temperature Characteristics of an Ultra-precision Hydrostatic Table

김경호<sup>1</sup>, 김창주<sup>1</sup>, 오정석<sup>1</sup>, 박천홍<sup>1,✉</sup>  
Gyungho Khim<sup>1</sup>, Chang Ju Kim<sup>1</sup>, Jeong Seok Oh<sup>1</sup>, and Chun Hong Park<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 (Department of Ultra Precision Machines and Systems, Korea Institute of Machinery and Materials)  
✉ Corresponding author: pch657@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7117

Manuscript received: 2014.10.20. / Revised: 2015.5.27. / Accepted: 2015.5.27.

*Temperature characteristics of supply oil in an ultra-precision hydrostatic table are largely influenced by parameter setting in an oil cooler such as the location of reference sensor and cooling temperature. In this paper, influences of the parameter setting on the temperature variation in the hydrostatic table are experimentally analyzed to suggest the guidelines for practical application. In case of using temperature of inlet oil as a reference sensor in the oil cooler, temperature rise of the supply oil is smaller and thermal settling time is faster than that of using temperature of outlet oil as a reference sensor. The experimental results also show that temperatures of table, rail and return oil can be made almost same, and thermal settling time can be decreased by setting cooling temperature in the oil cooler to be lower than atmospheric temperature.*

KEYWORDS: Hydrostatic table (유정압 테이블), Temperature characteristics (온도특성), Oil cooler (오일 냉각장치), Temperature of supply oil (급유온도), Reference sensor (기준센서)

### 1. 서론

유정압 테이블은 비접촉으로 구동되므로 저마찰로 인한 이송분해능 및 반복정밀도가 높고, 평균화효과에 의해 높은 운동정밀도를 달성할 수 있다. 더불어 고압의 윤활유 사용 및 포켓 설치에 의한 고강성화까지 기대할 수 있으므로 초정밀 공작기계, 고정밀 연삭기 등의 이송계에 활발히 응용되고 있다.<sup>1-3</sup> 또한 최근 들어서는 레일의 형상오

차 변화에 따른 테이블 운동오차의 변화를 계산해 낼 수 있을 정도로 이론적인 모델링 기술도 발전을 거듭해가고 있다.<sup>4,5</sup>

그러나 이러한 기술적 특성들은 기본적으로 유압장치를 통해 공급되는 윤활유의 온도, 즉 급유 온도가 일정함을 전제로 한 것이며, 급유 온도가 변할 경우 여러 가지 성능 특성들이 악화되는 경향이 있다. 예를 들어 급유온도의 변화는 베어링 내 압력분포를 미세하게 변화시키게 되며, 이에

따라 테이블의 부상높이가 달라지게 되어 결과적으로 운동오차를 유발한다. 또한 구조적으로도 윤활유와 접촉하는 부분의 온도를 변화하게 하여 구조 변형을 일으키며, 그 결과 강성을 저하시키는 결과를 초래한다. 이러한 영향을 감소시키기 위해 일반적으로 정밀급에는 약  $\pm 0.1$  °C, 초정밀급에는  $\pm 0.1 \sim 0.01$  °C 수준의 온도제어 능력을 갖는 냉각장치(oil cooler)를 사용하게 된다.

냉각장치는 일반적으로 윤활장치의 탱크에 연결하고, 탱크의 윤활유를 냉각장치로 유입시켜 냉각시킨 후 탱크로 되돌려주는 방식으로 배치되어 냉각 기능을 수행한다. 이 때 유정압 테이블이 사용되는 장비의 특성 및 사용 환경에 따라 냉각장치에 요구되는 기능도 달라지게 된다. 유정압 테이블이 항온실이 아닌 시간에 따라 실온이 변화하는 곳에서 사용되는 경우 급유온도와 장비 구조 온도의 차이에 의한 열변형을 최소화하기 위해 실온 동조식 냉각을 하는 것이 일반적이다. 반면 항온실에서 사용되는 경우에는 절대온도 설정 방식을 많이 사용하고 있다. 이 경우에는 사용자의 필요에 따라 제어 대상을 변경할 수 있도록 냉각 기준 센서를 사용자가 설정할 수 있도록 제공하고 있으며, 이 때 제어온도도 보통 실온대비  $\pm 10$  °C 정도의 범위에서 사용자가 설정할 수 있도록 제공하고 있다.<sup>6,7</sup> 그러나 구체적으로 어느 센서를 냉각 기준 센서로 설정하면 유정압 테이블의 온도 특성에 어떤 영향을 미치는지, 또한 냉각온도를 어떻게 설정해야 온도 특성에 유리한지 등 실제 유정압 테이블의 효율적인 활용을 지원할 데이터를 제공한 예는 찾아보기 어려운 상황이다.

본 논문에서는 초정밀 유정압 테이블에 있어서 공급되는 윤활유의 온도특성을 좌우하는 냉각장치의 기준센서 설정이 테이블 내의 온도분포에 어떠한 영향을 미치는지, 또한 냉각장치 설정온도 변경을 통한 급유온도의 설정이 테이블 온도특성에 어떠한 영향을 미치는지를 실험적으로 분석함으로써 유정압 테이블의 초정밀 활용을 위한 실용적 가이드라인을 제시하고자 하였다.

**2. 실험장치의 구성 및 예비실험**

**2.1 실험장치 및 실험방법**

Fig. 1에 실험에 사용한 유정압테이블의 구성과 실험을 위한 온도센서의 배치를 나타내었다. 유정압 테이블의 수직, 수평방향 패드는 모두 양면 지

지형으로 되어 있으며, 길이 방향으로 3개의 패드가 대향되어 배치되어 있다. 유정압 테이블의 강성은 공급압력 100 N/cm<sup>2</sup>에서 수평방향 400 N/μm, 수직방향 450 N/μm이며, 간극은 25 μm로 제작되어 있다. 테이블은 무철심형 리니어모터(LEA-S-4-S, Anorad)와 컴퓨터 기반 운동 제어기(MEI)를 이용하여 구동되며, 레일 측면에 부착되어 있는 레이저 스케일(BS75A, Sony)의 피드백 신호를 이용하여 0.01 μm까지의 분해능으로 구동된다.

Fig. 2는 테이블에 사용된 모세관형 유정압베어링의 패드 구조를 보여준다. 유압펌프에서 공급된 윤활유는 모세관으로 구성된 유동 제한기를 통해 패드 내 포켓으로 들어와 압력을 형성하며, 랜드부의 좁은 간극을 통해 레일쪽으로 배출되는 구조로 되어있다.

이때 유정압 베어링에 공급되는 윤활유는 윤활 탱크와 연결되어 있는 냉각장치(AKZ206, Daikin)를 이용하여 일정한 온도로 조절된다. 유정압 테이블

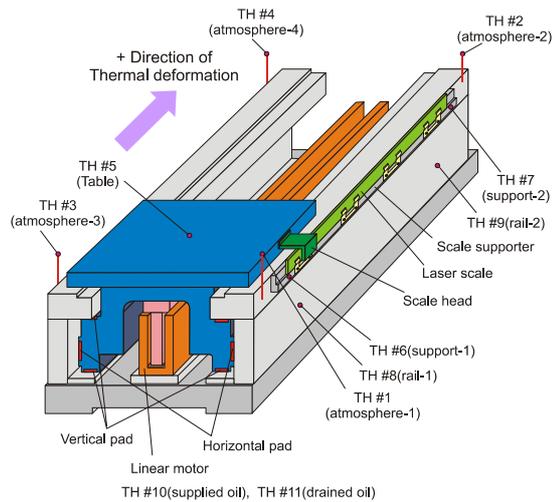


Fig. 1 Experimental setup of a hydrostatic table

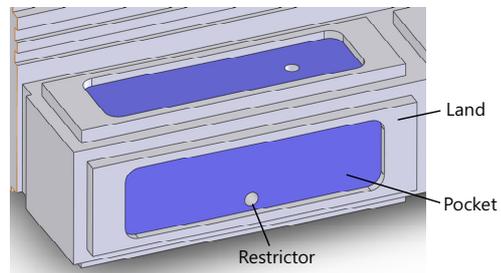


Fig. 2 Structure of a hydrostatic bearing pad

에서의 온도분포를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 실험장치 주위의 대기온도 4곳(TH #1, #2, #3, #4), 테이블(TH #5), 스케일지지대 전, 후부(TH #6, #7), 레일 전, 후부(TH #8, #9), 급유온도(TH #10), 배유온도(TH #11) 등 총 11곳에 열전대(T type)를 설치하였다. 여기서 급유온도는 유정압베어링 모세관에 들어가는 부분의 온도이고, 배유온도는 베어링에서 나와 레일 바닥을 따라 윤활장치로 리턴하는 부분의 온도이다. 본 논문에서의 모든 실험은 20±0.6 °C로 유지되는 항온실에서 수행하였다.

**2.2 온도측정용 열전대의 보정**

실험에 사용한 열전대의 상대적인 측정편차를 보정하기 위해 열전대를 냉동실에서 15 시간 동안 보관한 상태에서의 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. 열전대의 측정값은 모두 0.3 °C 범위 이내에 있었으며, 평균값을 기준으로 각 열전대의 편차를 0.1 °C 단위로 보정하여 사용하였다.

**3. 냉각장치 기준센서 설정에 따른 급유온도의 특성변화**

Fig. 4에 실험에 사용된 유정압 테이블용 윤활장치와 냉각장치의 유압회로를 나타내었다. 냉각장치는 실내온도(TH #15), 냉각기 구조물 온도(TH #14), 윤활탱크로부터 냉각장치에 유입되는 윤활유 온도(TH #12) 및 윤활탱크로 배출되는 윤활유 온도(TH #13) 등 4곳의 온도를 측정할 수 있는 센서가 부착되어 있다. 이 가운데 하나의 센서를 냉각 기준센서로 설정하면, 그 센서에서 측정된 온도값이 설정온도가 되도록 윤활유의 온도를 제어하게 된다.

일반적으로 윤활장치 및 냉각장치는 자체 발열이나 진동의 우려가 있으므로 유정압 테이블이 장착된 장비의 정밀도가 높을수록 장비와 다소 떨어

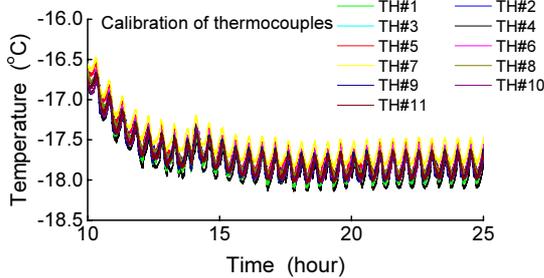


Fig. 3 Temperature deviation of thermocouples

진 상태로 설치된다. 따라서 위의 4개 센서 가운데 실내온도(TH #15)나 냉각기 구조물의 온도(TH #14)를 측정하는 센서를 기준센서로 설정하는 경우 실제 작동하는 장비의 주위온도를 반영하지 못할 우려가 있으며 이러한 관점에서 보면 실제 장비 내부를 순환하는 윤활유 온도를 기준으로 제어하는 것이 유리하다.

이 경우, 윤활탱크로부터 냉각장치에 유입되는 윤활유 온도(TH #12)와 윤활탱크로 배출되는 윤활유 온도(TH #13) 가운데 어느 쪽의 온도를 측정하

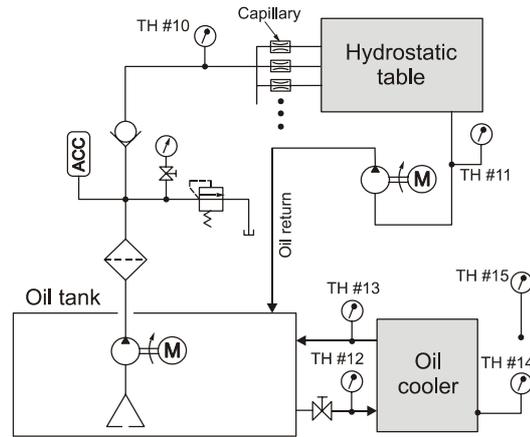


Fig. 4 Hydraulic circuit of a hydrostatic table

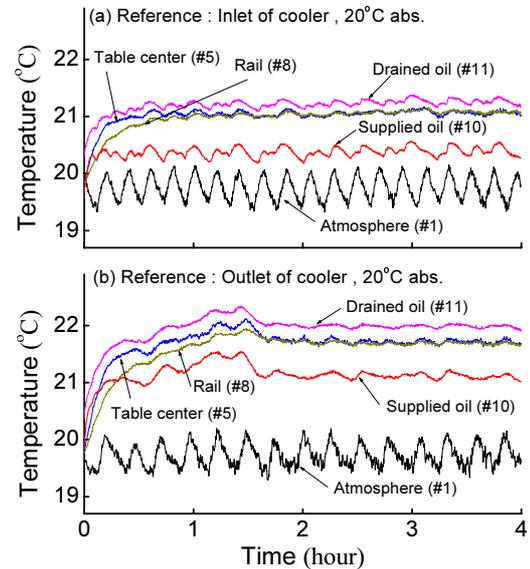


Fig. 5 Temperature variations of a hydrostatic table with position of reference sensor in a cooler

는 센서를 기준센서로 사용하는 것이 유리한지를 판단하기 위해, 각각의 경우를 냉각 기준센서로 설정했을 때의 유정압 테이블에서의 급유온도, 배유온도 및 테이블 주요부의 온도변화를 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 실험은 유정압 테이블을 레일 중앙부에 정지시킨 상태에서 각각 4시간 동안 수행되었으며 이 때 냉각 설정온도는 두 경우 모두 항온실과 같은 20 °C로 하였다.

두 경우 모두 유정압 테이블로 공급되는 급유온도(#10)는 초기상태를 제외하면  $\pm 0.2$  °C 내에서 제어됨을 보이고 있다. Fig. 5(a)는 냉각장치 유입유온(#12)을 기준으로 생각하는 경우(이하 유입유온 기준제어)에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 급유온도(#10) 측정값을 보면 설정온도에 비해 약 0.5 °C 정도가 상승된 상태에서 공급되고 있으며, 이 때의 급유온도의 파형은 대기온도와 냉각장치의 온도제어주기가 혼합된 형태를 나타내고 있다. 또한 레일, 테이블 중앙부 및 배유온도는 급유온도와 같은 파형을 보이면서 약 0.7 ~ 1 °C 상승된 값을 나타내고 있다. 여기서 이들 온도가 급유온도보다 높은 것은 윤활유가 모세관 보상요소를 지나면서 그 저항에 의해 열이 발생하기 때문이다. 이 윤활유는 테이블 중앙부를 거쳐 레일을 타고 탱크로 순환되며, 레일의 온도 측정위치(#8)는 테이블 중앙부(#5)로부터 떨어져 있으므로 테이블 중앙부에 비해 온도상승 구배가 완만하게 나타나고 있다. 또한 레일과 테이블 중앙부는 대기온도에 의해 자연 냉각이 되므로 상대적으로 배유온도(#11)에 비해 낮은 온도를 나타내게 됨을 알 수 있다.

이 때 냉각장치와 윤활탱크 사이에서의 윤활유의 흐름을 고려하면, 냉각장치로 유입된 윤활유는 20 °C로 냉각된 후 냉각장치 내부를 거쳐 탱크의 상부로 되돌아가게 되며, 이 때 탱크내의 분리벽 설치 여부에 따라 유정압 테이블에서 탱크 상부로 회수되는 배유와 혼합 또는 전열되면서 탱크 하부로 유입된 후 급유펌프로 들어가거나 냉각장치로 재순환하게 된다. 따라서 유입유온 기준 제어방식은 펌프로 유입되기 직전의 윤활유 온도를 제어하는 효과를 갖게 되며, 급유온도가 설정온도에 비해 0.5 ~ 0.6 °C 정도 상승하는 것은 윤활장치에서의 펌핑동력 및 배관상의 저항 등(이하 펌핑동력 손실로 표현)에 의한 온도상승으로 추정된다.

Fig. 5(b)는 냉각장치에서 탱크로 유출되는 유온(#13)을 기준으로 생각하는 경우(이하 유출유온 기준 제어)의 실험결과를 나타낸 것이다. 급유온도

(#10) 측정값을 보면 설정온도에 비해 약 1.5 °C 정도가 상승된 상태로 공급되고 있으며, 이 때의 급유온도의 파형은 유입유온 기준 제어시와는 달리 대기온도와는 무관하게 냉각장치의 온도제어 주기만의 영향을 받음을 볼 수 있다. 또한 이러한 급유온도 파형은 테이블 중앙부 온도(#5), 레일 온도(#8) 및 배유온도(#11)에도 그대로 영향을 미쳐 동기화된 파형을 보이고 있다. 그러나 이들 세 부분의 온도값의 차이는 Fig. 5(a)의 유입유온 기준 제어시와 거의 유사하게 나타나고 있어 윤활장치의 영향이 아닌 유정압테이블의 구조나 원리에 따른 특성임을 알 수 있다. 한편 이 제어방식에서 냉각장치와 윤활탱크 사이에서의 윤활유의 흐름을 고려하면, 냉각장치 유출부에서 냉각된 윤활유는 탱크로 되돌아가면서 배유온도의 영향을 받으며 탱크 하부로 유입된 후 급유펌프로 들어가거나 냉각장치로 재순환하게 된다. 따라서 급유온도는 윤활장치내에서의 펌핑동력 손실 이외에도 냉각장치 냉각 이후에 배유와의 혼합 또는 전열에 의한 영향을 받게 되므로 유입유온 기준 제어시에 비해 설정온도 대비 온도상승량이 훨씬 커져 약 1.5 °C 정도 상승된 상태를 보이고 있으며, 약 1.5시간까지의 파형이 과도응답 특성 형태를 보이는 것도 같은 이유로 추정된다.

이상의 실험 결과로부터 초정밀 유정압 테이블을 항온실에서 구동하는 경우, 윤활탱크로부터 냉각장치로 유입되는 유온을 기준으로 생각하는 경우가 냉각장치에서의 유출유온을 기준으로 생각하는 경우에 비해 급유온도의 설정온도 대비 온도상승량이 작고 급유온도의 안정화 시간도 단축됨을 알 수 있었다.

#### 4. 급유온도에 따른 유정압 테이블 온도특성

유정압 테이블에 공급되는 윤활유의 온도에 따른 유정압 테이블 각 부에서의 온도변화 특성을 분석하기 위해 급유온도를 대기온도보다 높게 설정한 경우(조건 A), 같게 설정한 경우(조건 B) 및 낮게 설정한 경우(조건 C)의 세 조건에 대해 실험을 수행하였다.

조건 A의 경우에는 펌핑동력 손실을 고려한 급유온도가 대기온도보다 약 1 °C 정도 높아지도록 냉각장치의 설정온도를 20.5 °C로 설정하였다. 조건 B의 경우에는 급유온도가 대기온도와 같아지도록 냉각장치 설정온도를 예비실험을 통해

19.4 °C로 설정하였다. 조건 C의 경우에는 배유온도가 가능한 한 대기온도와 같아지도록 예비실험을 통해 냉각장치 설정온도를 18.3 °C로 설정하였다.

유정압 테이블을 레일 중앙부에 정지시킨 상태에서 위의 세 조건에 대해 온도특성 실험을 수행하였으며 이 때의 테이블 각 부의 온도변화를 Fig. 6에, 대기온도의 변화를 Fig. 7에 각각 나타내었다.

Fig. 7의 대기온도 변화를 참조하면서 Fig. 6에서 급유온도의 프로파일을 비교하면, 조건 A, B, C 모두 Fig. 5(a)에서의 특성과 같이 대기온도와 냉각장치 제어주기가 혼합된 과정을 보이고 있다. 또한 테이블 및 배유온도의 변화주기는 급유온도의 변화주기와 일치하는 특성을 갖는데 반해, 레일의 경우 대기온도의 영향을 크게 받아 그 변화주기와 일치하는 특성을 보이고 있다.

한편, Fig. 6(a)의 조건 A에 있어서 유정압 테이블의 온도특성을 보면 배유온도는 모세관의 저항에 의한 온도상승으로 급유온도에 비해 약 1 °C 정도 상승하고 있다. 테이블의 경우에는 대기온도와의 접촉에 의한 냉각효과에 의해 배유온도보다는 다소 낮은 온도를 유지함을 보이고 있다. 레일의 경우에

는 대기와의 접촉면적이 상대적으로 넓고 측정점이 배유와의 직접 접촉도 없으므로 온도상승량이 가장 작게 나타나고 있다. 또한 충분히 열적 평형이 이루어진 6.5시간 이후에도 배유, 테이블 및 레일의 온도는 일정한 온도차를 유지하고 있다.

Fig. 6(b)의 조건 B의 경우에는 레일에 의해 온도 안정화 시간이 늦어지기는 하지만, 시간이 지남에 따라 배유, 테이블 및 레일의 온도가 어느 정도 근사한 온도로 수렴되는 특성을 보이고 있다. 그러나 윤활유가 모세관 보상요소 통과할 때의 저항에 의한 발열로 배유온도가 급유온도에 의해 약 1 °C 정도 상승하게 되며, 이에 따라 테이블, 레일에서 Fig. 6(a)와 마찬가지로 대기온도에 의한 냉각작용이 발생하므로 세 곳의 온도가 일치하는 수준까지 도달하기는 어려움을 확인하였다.

Fig. 6(c)의 조건 C의 경우에는 모세관 보상요소 통과후의 배유온도가 대기온도와 같아지므로 테이블 중앙부나 레일에서의 대기온도에 의한 냉각효과가 크게 나타나지 않게 되며, 따라서 아주 빠른 시간 내에 배유, 테이블 및 레일의 온도가 거의 같아지면서 열적 평형상태에 도달하는 특성을 보이고 있다. 또한 레일부 온도가 미소하지만 제일 높게 나타난 것은 배유온도가 예비실험과는 달리 실제 대기온도보다 오히려 0.1 °C 정도 낮게 되어 배유와 접촉하지 않는 레일 부분이 대기온도에 의해 가열되었기 때문인 것으로 추정된다. 이러한 결과를 감안하면 적절한 냉각온도 설정에 의해 테이블, 레일 및 배유온도가 같아지는 윤활조건의

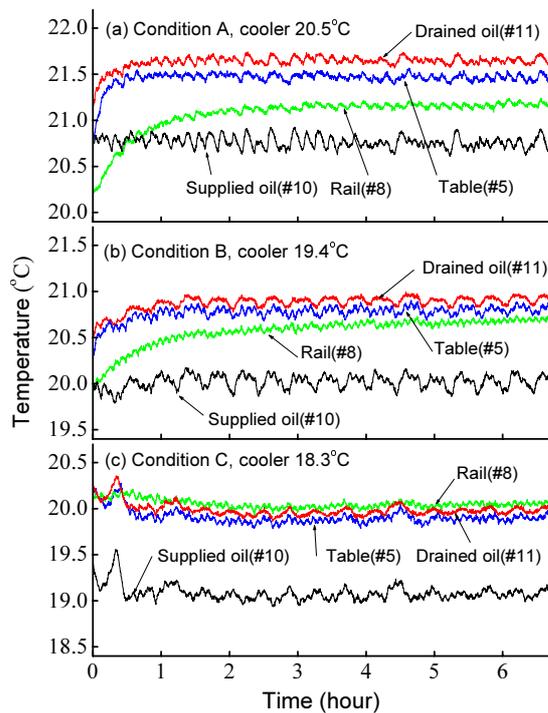


Fig. 6 Temperature variations of a hydrostatic table with different setting temperature in a cooler

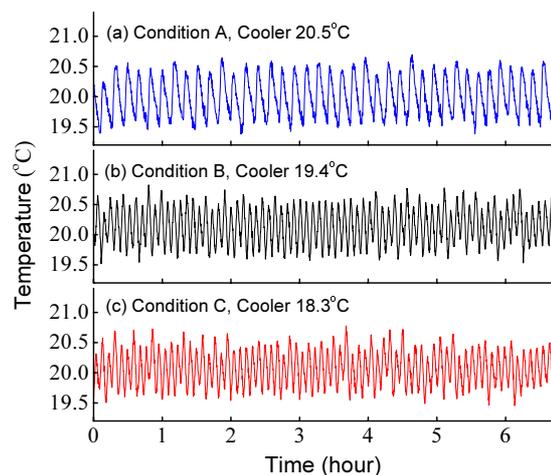


Fig. 7 Variation of atmospheric temperature with different setting temperature in a cooler

설정이 가능함을 확인할 수 있다. 한편, 조건 B에서의 예비실험을 통한 설정온도 19.4 °C와 대기온도 20 °C와의 차이는 Fig. 5에서의 펌핑동력 손실 0.5 ~ 0.6 °C와 거의 일치하며, 조건 C에서의 예비실험을 통한 설정온도 18.3 °C와 대기온도 20 °C와의 차이는 펌핑동력 손실과 모세관 보상요소의 저항에 의한 온도상승의 합인 1.5 ~ 1.6 °C와 거의 일치한다.

이상의 실험결과로부터 냉각장치 설정온도를 대기온도보다 낮게 설정하는 것에 의해 테이블, 레일 및 배유의 온도가 거의 근사하도록 설정하는 것이 가능하며, 특히 펌핑동력 손실과 모세관 보상요소의 저항에 의한 온도상승의 합을 미리 고려하여 그에 상응하는 냉각온도를 설정하는 것에 의해 온도 안정시간도 빠르게 단축하면서 테이블, 레일 및 배유의 온도를 거의 일치시키는 것이 가능함을 확인하였다. 단, 본 논문에서의 실험결과는 유정압 테이블이 항온실에서 마찰에 의한 발열이 무시되는 속도로 구동됨을 가정한 실험결과이므로 고속 구동의 경우에는 마찰에 의한 온도상승의 영향을 고려한 냉각온도 설정이 필요하다. 또한 본 실험은 테이블 단독으로 실험한 결과이므로 유정압 테이블이 장비내에 설치되어 있는 경우에는 냉각온도가 대기온도보다 낮아짐에 따라 급유나 배유가 장비 구조에 미치는 열적 영향도 고려해야 할 필요가 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 초정밀 유정압 테이블에 있어서 공급되는 윤활유의 온도특성을 좌우하는 냉각장치의 기준센서 설정 및 급유온도의 설정이 테이블 온도특성에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 실험결과, 냉각장치 기준센서 설정 시 윤활탱크로부터 냉각장치로 유입되는 유온을 기준으로 생각하는 경우가 냉각장치에서의 유출유온을 기준으로 생각하는 경우에 비해 설정온도 대비 급유온도의 온도 상승량이 작고 급유온도의 안정화 시간도 단축됨을 알 수 있었다. 또한 냉각장치 설정온도를 대기온도보다 낮게 설정하는 것에 의해 테이블, 레일 및 배유의 온도가 거의 근사하도록 설정하는 것이 가능하였다. 특히 펌핑동력 손실과 모세관 보상요소의 저항에 의한 온도상승의 합만큼 냉각온도를 낮추어 설정하는 것에 의해 온도 안정시간도 빠르게 단축하면서 테이블, 레일

및 배유의 온도를 거의 일치시키는 것이 가능함을 확인하였다.

## REFERENCES

1. Oh, J. S., Song, C. K., Hwang, J., Shim, J. Y., and Park, C. H., "An Ultra-precision Lathe for Large-area Micro-structured Roll Molds," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 12, pp. 1303-1312, 2013.
2. Precitech, "Global Manufacturer of Innovative Ultra Precision Machining Solutions," <http://www.precitech.com/> (Accessed 22 May 2015)
3. Park, C. H., Song, C. K., Hwang, J., and Kim, B.-S., "Development of an Ultra Precision Machine Tool for Micromachining on Large Surfaces," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 10, No. 4, pp. 85-91, 2009.
4. Shamoto, E., Park, C.-H., and Moriwaki, T., "Analysis and Improvement of Motion Accuracy of Hydrostatic Feed Table," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 1, pp. 285-290, 2001.
5. Khim, G., Oh, J. S., and Park, C. H., "Analysis of 5-dof Motion Errors Influenced by the Guide Rails of an Aerostatic Linear Motion Stage," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 15, No. 2, pp. 283-290, 2014.
6. DAIKIN, "Oil Cooling Unit," [http://www.daikinpmc.com/en/special/oilcon/index.html?ID=en\\_pmc\\_top](http://www.daikinpmc.com/en/special/oilcon/index.html?ID=en_pmc_top) (Accessed 22 May 2015)
7. ILRIM NANO TEC, "Oil Matic," [http://www.ilrim.co.kr/ebook/nano/ebook\\_n/VIEW.HTM](http://www.ilrim.co.kr/ebook/nano/ebook_n/VIEW.HTM) (Accessed 22 May 2015)