

정밀 오일냉각기의 오일온도 제어오차에 관한 연구

이상호*(경상대), 이찬홍(한국기계연구원), 김갑순(경상대)

A Study on the Oil Temperature Control Errors of Precision Oil Coolers

Sang Ho Lee*(Gyeong Sang Uni.), Chan Hong Lee(KIMM), Gab Soon Kim(Gyeong Sang Uni.)

ABSTRACT

The Oil Coolers is very important unit for the stable thermal performance in machine tools, semiconductor equipments and high precision measuring systems. To select a proper oil cooler for the temperature control of core unit in a machine, not only cooling ability but also static and dynamic sensitivity of temperature sensors are considered. In this paper, the relationship between cooling ability and inflow oil temperature is identified. The cooling ability is increased with the increase of inflow oil temperature. The oil temperature control errors of a cooler are influenced by mainly sensitivity of temperature sensors and heating velocity in a machine. The validity of error cause analysis for temperature control is proved by real cooling experiments with inflow and outflow temperature sensors.

Key Words : Oil Cooler (오일냉각기), Cooling Ability (냉각능력), Error Cause Analysis (오차원인 분석), Temperature Sensor Sensitivity (온도센서 민감도), Oil Temperature Control Error (오일온도 제어오차)

1. 서론

고도 산업사회에서 고속생산과 고생산성 추구는 지상의 목표로 되어 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 기계의 고속운전이 전제가 되어야 가능하기 때문에 기계내의 발열이 심하게 발생한다. 현대식 장비는 대부분 전자제어 및 전기구동에 의해서 작동이 되므로, 전자회로를 위한 적정 주위온도의 유지가 필수적이고 기계장비에 대해서는 열변위 안정화를 위한 구조물 온도를 항온으로 유지할 필요가 있다. 그래서 첨단장비 일수록 오일냉각기의 사용이 불가피하고 오일온도 제어오차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이하를 많이 사용한다.

그러나 오일냉각기의 정동적 온도제어특성을 고려하지 못하고 냉각능력만으로 오일냉각기를 선정하면 필요이상으로 기계의 국부를 냉각시키거나, 때로는 기계의 온도를 지속적으로 상승시켜 대상기계의 열적 평형을 조용히 파괴해서 오히려 기계의 평균성능을 저하시키게 된다¹. 이것은 드물게 발생되는 현상이 아니라 기계의 급속운전으로 발열이 가파르게 증가하거나, 외기 및 오일온도센서를 냉각기 설계 당시에 과손방지를 위해서 두꺼운 금속 캡슐을 사용해 외부온도에 둔감한 온도센서로 변화시키거나, 센서의 고유 분해능이 떨어지는 센서를 잘못 채택한 경우에 많이 발생해서 냉각기의 설계 및 사용에 변질한 검토가 필요하다. 일반적인 경우

기계의 발열속도 증감현상은 구조적으로 나타나 개선할 수 있는 것이 아니며, 온도센서의 민감성도 실제로는 외부온도를 시간적으로 정확히 측정하는 완벽을 기할 수 없으므로 오일온도의 제어오차는 안정된 냉각 중에도 수시로 나타나는 현상이다.

본 연구에서는 오일냉각기의 입출력 오일온도센서에 의한 오일온도 제어방식이 적용된 경우, 각각 입출력 오일온도가 지정된 온도오차 범위를 크게 초과하는 원인을 분석하였다. 이 분석을 위해서 외부에 파형 발열기를 제작해서 오일냉각기의 입력오일온도에 대한 최대 최소 냉각능력을 평가하고, 사용된 온도센서의 정밀도와 동적 민감도를 측정해서 온도센서만의 원인인 경우에 대해서 냉각 Simulation 으로 오일온도 제어오차를 예측해 보았다. 또한 온도제어기의 명령대로 On/Off 되는 압축기용 Magnetic Switch 의 작동 정확성에 대해 측정하여 입출력 오일온도 제어오차에 대한 원인을 제어부 및 작동부까지 순차적으로 분석하였다. 마지막으로 실제 입출력 오일온도센서에 의한 냉각기 제어를 실시하여 각 입출력 오일온도의 제어오차를 평가하고, 원인을 분석하였다.

2. 오일냉각기와 공작기계간의 열적 입출력

오일냉각기는 Fig.1 과 같이 공작기계의 주요

유니트에서 발생한 발열을 제거하기 위해서 냉각된 오일을 공급하여 발열을 상쇄하거나 적어도 열적 평형을 이루어, 기계내의 과열이나 열변형이 더 이상 진전되지 않도록 하는 역할을 한다. 공작기계의 경우, 대상부위가 냉각을 통해 주변 기계구조물의 온도와 같도록 하는 것이 열변형 억제에 위해서 가장 좋고, 오히려 대상부위의 온도가 더 낮아지면 열응력, 열변형 등 문제가 된다.

냉각기의 오일온도를 제어하는 방법은 절대온도를 설정하여 이 온도를 기준으로 제어하는 방법과 외기온도를 기준으로 제어하는 방법으로 나뉘는데, 현장에서는 외기온도 동조형을 많이 사용한다. 본 연구에서는 사용빈도가 가장 높고 온도제어상 문제가 많이 발생하는 외기온도 동조형 냉각에 대해서 다루었다.

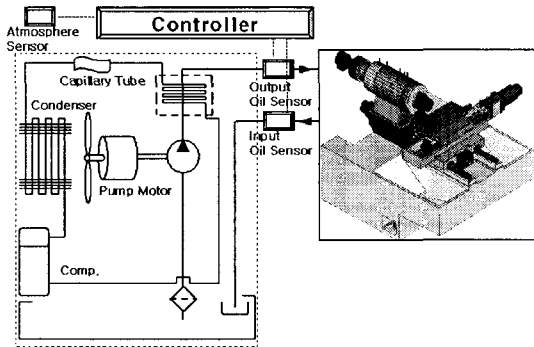


Fig. 1 Heat Exchange between Machine and Oil Cooler

오일온도를 출력부 온도센서를 이용해 제어할 경우, 오일이 짧은 냉각부를 통과하여 온도센서를 지나가므로 출력 오일온도를 짧은 시간 내에 설정 온도 수준으로 제어할 수 있어 빈번한 냉각사이클이 가동 되면서 온도곡선이 주기가 짧은 구형파를 이루게 된다.

입력부 온도센서를 중심으로 제어할 경우, 기계로 출력되는 오일온도는 냉각기가 가지는 최대의 냉각능력을 동원하여 온도를 낮추게 되어 외기온도와는 차이가 크고 낮게 나타난다. 이 때 오일은 냉각기를 통과해 기계의 발열부위를 지나 다시 입력부 온도센서를 지나가기 때문에 냉각기를 제어해도 발열부위에서 불규칙한 발열을 하면 제어상의 노이즈로 작용하여 입력 오일온도를 제어하기가 어렵고, 안정한 제어상태에서도 시간지연 현상이 나타난다. 이 제어방식에서는 냉각된 오일이 긴 오일통로를 지나는 동안 쉬어서 오일온도가 완만한 Sine 유사 곡선을 이룬다. 이렇게 냉각기의 온도센서를 사용하는 방법에 따라서 냉각기와 기계간의 열교환량이 변화하고 오일온도 제어특성도 달라진다.

3. 오일냉각기의 냉각능력 측정 및 평가

오일냉각기에서 가장 중요한 Spec.은 냉각능력이다. 냉각기가 연결된 기계의 발열량이 이 수치를 넘어서면 발열부위가 냉각되지 않고 온도가 지속적으로 상승하기 때문에 한 단계 높은 냉각능력의 냉각기를 사용해야 한다. 그러나 냉각능력은 결국 냉각기내의 Fan 에 의해서 외부공기를 응축기에 불어 넣어 열교환을 시켜야 비로소 간접적으로 오일을 냉각하는 것이므로 외부공기와 입력오일의 온도차이가 클수록 냉각능력이 증가하게 된다. Fig.2 에는 외부 Heater 에서 3,000W 로 오일을 지속적으로 가열했을 때 냉각기의 입출력 오일의 온도를 나타낸 것이다. 시간이 경과하면서 두 곡선의 온도차이는 증가 하고 있어서 냉각능력이 증가하고 있음을 알 수 있고, Heater 의 전원을 차단한 상태에서는 역으로 온도차이가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 온도차이를 냉각능력으로 환산해 보면 Fig.3 과 같다. 그림에 보이듯이 외기온도와 입력오일의 온도차(ΔT)가 커질수록 냉각능력이 851 kcal/hr 부터 시작하여 1,344 kcal/hr 까지 증가하고 있음을 알 수 있다. 그래서 냉각기의 표시 냉각능력은 원칙적으로 가장 작은 값을 선택해야 하며, 이렇게 함으로서 사용자가 어떠한 환경에도 신뢰성 있는 냉각을 실시할 수 있다.

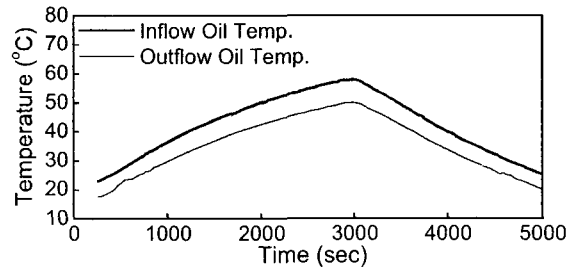


Fig. 2 Temperature Changes of Inflow and Outflow Oil by 3,000W Heater

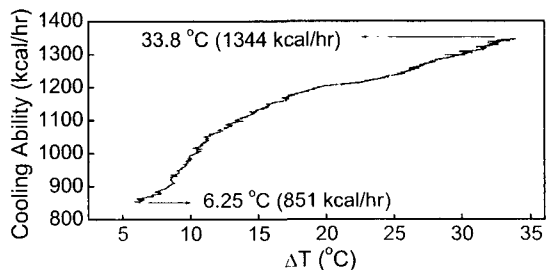


Fig. 3 Cooling Ability of Test Cooler with Temperature Difference between Inflow Oil and Atmosphere

4. 냉각기 온도센서의 정동적 정밀도

냉각기의 오일온도 제어는 온도센서에서 온도정보를 받아서 제어가 수행하므로 제어의 정확성을 위해서 온도센서의 정동적 정밀도를 확인하는 것은 매우 중요하다. Fig.4 에는 냉각기의 입출력 과 외기의 온도센서에 대한 정적 정밀도를 평가하기 위해서 표준 열전대와 비교한 온도곡선을 나타내고 있다. 냉각기의 온도센서는 저항형 센서(PT100Ω)이므로 센서의 연결선이 길어지면 온도가 상승한 것으로 인식된다. 그래서 제어보드에는 오일온도의 정확성을 기하기 위해 offset 을 조정할 수 있게 되어 있다. Fig.4 에는 온도 offset 전의 곡선을 큰 창에 나타내었고, offset 후의 곡선을 작은 창에 나타내었는데 온도센서의 정적 정확성은 표준 온도센서의 정밀도 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 를 확보한 것으로 분석되었다.

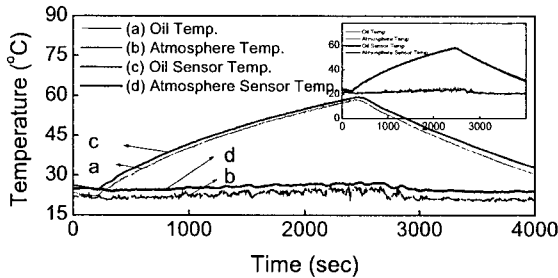


Fig. 4 Static Temperature Accuracy of Oil and Atmosphere Sensors

냉각기의 온도센서에서는 장시간에 걸친 온도측정에서 얻어진 정적온도 정밀도가 중요하긴 하지만 오일이 냉각기와 기계를 순환하는 것을 감안하면 동적온도 정밀도가 더욱 중요하다. Fig.5 에는 오일 온도센서의 표준센서에 대한 추종성을 나타내었다. 실험조건은 외부 Heater 에서 밀폐상태로 60°C 정도로 오일을 가열하고 이 오일을 한번에 공급하여 반응이 아주 빠른 표준센서와 반응이 느린 오일온도센서의 측정온도 변화를 분석하였다. 이때 오일의 순환속도는 냉각기의 상용 순환속도를 사용하였다. 표준온도센서에 대한 대상온도센서의 추종계수는 0.1112757 로 분석되었다.

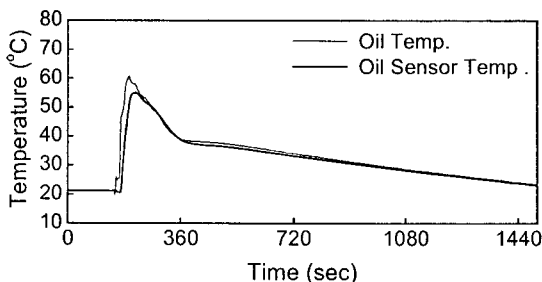


Fig. 5 Dynamic Temperature Tracking of Oil Sensor

Fig.6 에는 외기온도센서의 추종성을 실험한 곡선을 나타내었다. 실험조건은 Fan 에 의한 상용 외기 통과속도를 채택하였고, 근접한 위치에서 10cm 지름의 관에 50°C 의 열풍을 갑자기 불어 넣었다. 분석결과 외기 온도센서의 추종계수는 0.03116 로 나타나서 오일온도센서의 추종성보다는 훨씬 추종성이 떨어지는 것으로 나타났다.

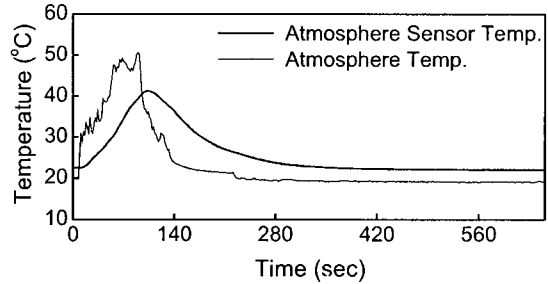


Fig. 6 Dynamic Temperature Tracking of Atmosphere Sensor

5. 오일냉각기의 오일온도 제어오차 특성

오일온도의 제어오차에 관련한 온도센서의 정밀도 분석후에 제어보드와 작동부의 정밀도를 한번에 확인해 보기위해 외기온도에 대한 오일온도가 1°C 이상 상승할 때 Magnetic Switch 의 On 상태가 유지되는지 확인해 보았다. 실험조건은 오일온도센서를 오일속에 넣고 오일을 서서히 가열하는 상태에서, 외기 온도센서를 열풍기로 가열하여 오일온도센서의 측정온도보다 1°C 이상 상회하도록 조건을 만들었다.

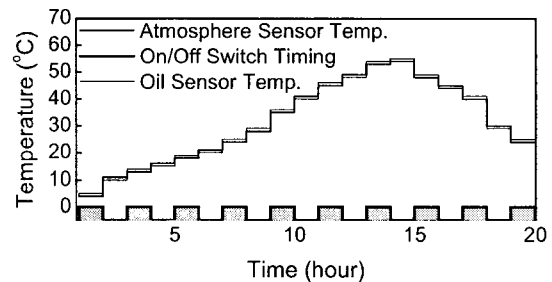


Fig. 7 Operation Accuracy of Magnetic Switch

Fig.7 에는 Magnetic Switch 의 On/Off 정확성을 오일온도와 관련하여 분석하였다. 20 번의 작동조건 변화에 대해서 스위치의 작동은 정확하게 실행되었음을 보여주고 있다. 이 결과로 냉각기의 제어부와 작동부는 온도제어오차에 직접적인 요인이 아님을 확인하였다.

결국 온도센서의 오일온도 추종성과 관련하여 오일온도 제어오차가 발생할 여지가 많으므로, 온도센서에 관련한 냉각공정을 임의의 조건에 대해서 Simulation 해 보았다. Fig.8 에는 온도센서의 추종계

수가 0.0332, 온도상승율(주기 80 초인 상승과)이 하강율보다 크고, 외기온도(일정한 기준값) 20°C, 온도제어 상한값 21°C 하한값 19°C 인 조건에서 Magnetic Switch 의 On/Off 인한 냉각공정을 계산하였다. 그림에 나타난 바와같이 오일온도는 급격하게 변화하는데 오일센서의 측정온도는 완만하게 변화해서, 작은 창에서 보듯이 온도측정오차가 ±2°C 에 이른다. 온도센서의 측정온도가 비로소 21°C 가 되어야 냉각공정에 들어가고 이에 따라 오일온도가 강하한다. 결국 온도센서의 측정온도가 상하 한계치(21, 19°C)에 접근했을 때 실제 오일온도는 이것보다 훨씬 큰 틱니파의 꼭지점 온도 24°C, 17.5°C 에 접근해서 오일온도가 상하 한계값을 2.5°C 정도 더 초과하게 된다.

Fig.9 에서는 Simulation 조건이 동일하고 다만 오일 온도 상승율이 주기 640 초로 완만히 오일온도가 변화하는 경우를 계산해 보았다. 장주기의 오일온도에 대해서 온도센서의 추종이 잘 되는 관계로 온도 제어오차가 0.5°C 만 생겼다. 이 결과로부터 온도센서의 민감성이 온도제어오차의 주요 원인임을 알 수 있다.

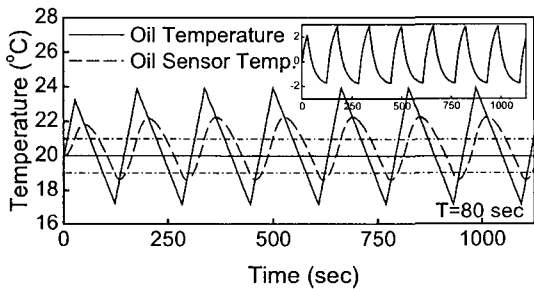


Fig. 8 Oil Temperature Control Error with Rapid Oil Temperature Changes

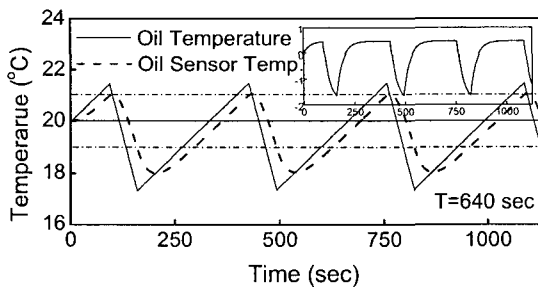


Fig. 9 Oil Temperature Control Error with Slow Oil Temperature Changes

실제 냉각기에서 발생하는 제어오차를 분석하기 위해서 출력부 온도센서와 입력부 온도센서를 이용한 오일온도 제어의 경우를 Fig.10 과 Fig.11 에 나타내었다. 출력부 온도센서를 이용한 제어에서는 Fig.10 에서 보듯이 빈번한 냉각공정이 실행되면서, 급격한 오일온도 변화에 대해 오일온도센서의 온도측정 오차가 증가하게 되었다(작은 창의 곡선). 그래서 제어오차가 ±1.5°C 에 이르게 되었다. 입력부 온도센

서를 이용한 제어에서는 Fig.11 에서 보듯이 입력 오일온도가 장주기의 온도변화 곡선을 그리고 있다. 이런 완만한 온도곡선으로 온도센서의 추종성이 우수해서 온도제어가 비교적 정확히 이루어지고 있음을 알 수 있다(작은 창의 곡선). 냉각기 실험을 통한 결과에서도 온도센서의 오일온도에 대한 민감성이 온도제어오차의 주요 원인임을 밝혔다.

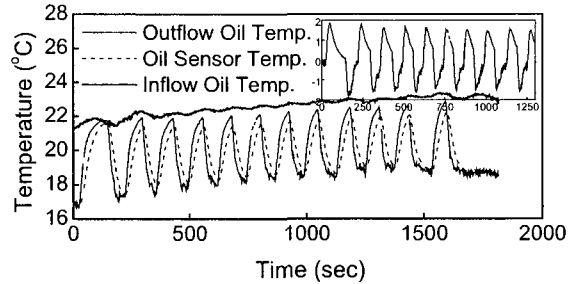


Fig. 10 Temperature Control of Outflow Oil by Outflow Sensor

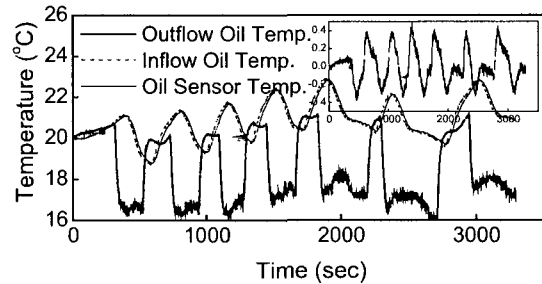


Fig. 11 Temperature Control of Inflow Oil by Inflow Sensor

6. 결론

1. 오일냉각기의 냉각능력은 입력오일과 외기온도차가 클수록 증가한다.
2. 오일냉각기의 온도제어는 입력부 온도센서를 이용하는 것이 온도제어오차를 더 줄일 수 있다.
3. 온도제어오차에 대해서 냉각기 제어부와 작동부는 직접적인 영향을 미치지 않는다.
4. 온도센서의 외부온도에 대한 민감도가 떨어질수록 온도제어오차는 증가한다.

참고문헌

1. Lee, C.H., Lee, S.H., Park, H.C., "Dynamic Temperature Sensitivity of Temperature Sensors for the Oil Coolers," Proceedings of the KSMTE Spring Conference, pp.62-67, 2003.
2. Lee, D.C., Kim Y.H., Kim S.N., Jang, C.H., The sensor engineering, Ent Media, 2002.
3. Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, Fourth Edition, 1999.