

고정밀 오일쿨러의 에너지 절감에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Energy Saving on High Precision Oil Cooler System

*#이승우¹, 염한길², 박길종³, 하승한³

*S. W. Lee¹(lsw673@kimm.re.kr), H. K. Yeom², K. J. Park³, S. H. Ha³

¹ 한국기계연구 지능형생산시스템연구본부, ²한국기계연구원 에너지플랜트연구본부, ³(주)일립나노텍 냉기사업부

Key words : On/Off cooling cycle, Hot Gas Bypass cooling cycle, Energy Saving, Oil Cooler System

1. 서론

산업의 발전에 따라 에너지 사용의 증가와 이에 따른 오염물질의 배출이 증가하고 있다. 이러한 문제들로 인하여 에너지 부족, 환경문제 등은 요즘 이슈화 되고 있는 온실가스 감소와 맞물려 에너지 효율향상, 에너지 절감 등의 에너지 관련연구가 각 분야별로 진행되고 있다. 이러한 추세는 제조업에도 영향을 미쳐 생산시스템을 구성하는 공작기계에서도 에너지 절감형 공작기계가 등장하고 있다. 즉 단위제품을 생산하기 위해 소요되는 에너지를 최소로 소모하는 산업기계를 의미한다. 공작기계를 예로 들면 공작기계를 구성하는 스핀들 구동 및 이송계 구동을 위한 모터, 유압시스템, 오일쿨러 등의 다양한 주변장치들이 소모하는 에너지를 최소화하여 전체 시스템의 에너지 소비량을 줄이는 것이다.

본 연구에서는 공작기계에서 발생하는 열 변형을 최소화하기 위해 사용되는 고정밀 오일쿨러 시스템을 냉각 사이클에 따른 에너지 절감량을 이론식에 의한 에너지 절감량과 실제 오일쿨러 시스템의 실험을 통해 비교하였다. 오일쿨러의 냉각 사이클은 압축기의 단속(on/off)에 의해 온도제어를 하는 on/off 방식과 압축기에서 발생하는 hot gas를 전부 혹은 일부를 우회시켜 온도제어를 하는 gas bypass 방식을 대상으로 실험하였다.

2. 오일쿨러 시스템의 구성 및 에너지 소비량 비교

공작기계에서 발생하는 오차는 오차의 형태에 따라 동적오차(dynamic error)와 정적오차(static error)로 구분된다. 동적오차는 기계의 진동, 채터 및 스핀들 유닛의 진동 등에 의해 발생하는 오차이고 정적오차는 공작기계의 구성요소인 안내면, 컬럼, 볼스크루 등 구조계의 조립 특성에 따른 기하오차와 열 변형오차로 구분된다. 이 중 열 변형오차는 최근의 공작기계의 개발 추세가 주축속도 20,000 rpm 이상, 이송속도 120m/min 이상 등의 고속화 추구하고 함께 다축화 복잡화 등을 추구함에 따라 열에 의한 변형이 심화되고 이는 공작기계의 가공정밀도에 심각한 영향을 주고 있다. 실제로 열 변형오차는 공작기계에서 발생하는 오차의 약 70% 정도를 차지하는 것으로 분석되고 있다.

공작기계에서 열에 의한 변형을 최소화하고 보정하기 위한 방법으로는 변형된 만큼 위치를 보정하거나 서보제어에 의한 변형을 보상하는 방법 등이 사용되고 있으나 발열부에 직접 냉각유를 공급하여 피대상물을 목표온도로 유지하여 열에 의한 변형을 최소화하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다. 이렇게 냉각유를 공급하는 장치를 오일쿨러라고 한다. 공작기계가 고급화됨에 따라 기존에 선택사양이던 오일쿨러가 거의 기본 장착화 되어 가고 있다. 즉 공작기계의 주변장치의 장착이 증가함에 따라 공작기계 전체 시스템의 에너지도 소비량도 증가하고 있다. 따라서 주변장치에 대한 에너지 절감 기법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 오일쿨러도 기존에 많이 사용되던 on/off type 보다 에너지 효율이 뛰어난 gas bypass 방식이나 inverter 방식이 사용되고 있다. 그러나 Inverter 방식은 온도제어 정밀도 측면이나 에너지 소비량이 월등히 뛰어나거나 가격이 고가인 단점이 있으며, on/off type의 경우 냉동사이클이 간단한 구조를 가지고 있으나 온도제어 정밀도 떨어진다. Gas bypass type은 온도제어 정밀도가 inverter type과 대등한 성능을 가지고 에너지 소비량이 on/off 보다 뛰어나다는 장점이 있다. 본 연구에서는 같은 압축기 용량을 가지는 on/off type의 오일쿨러와 gas bypass type의 오일쿨러를

대상으로 에너지소비량을 측정하였다. 두 시스템 모두 압축기의 용량은 1500W이며 냉매는 친환경 냉매인 R-407C를 사용하고 있다.

Fig 1은 on/off type 오일쿨러 시스템의 냉동사이클 구조를 나타낸 것이다. 기본적인 냉동사이클은 압축기의 on/off 동작에 의해 냉매가 압축되어 생기는 hot gas의 온도를 제어하여 cooling oil의 온도를 제어한다. On/off에 의한 온도제어이므로 온도제어 추종성이 떨어지며, 과냉각이 될 경우 기계로 향하는 cooling oil을 가열하는 히터가 장착되어 별도의 에너지가 소비된다.

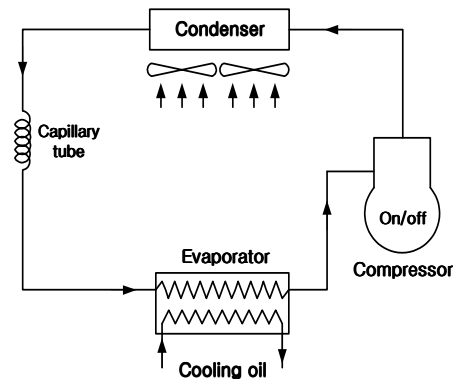


Fig. 1 Cooling cycle of on/off type

Fig. 2는 gas bypass type의 냉각 사이클을 나타낸 것으로 압축기는 항상 운전되고 있으며 압축기 출구에 우회로를 만들어 압축기에서 나온 hot gas의 일부 혹은 전부를 우회시킨다. 우회된 hot gas는 열 교환기 입구에서 차가운 냉매와 혼합하여 온도를 제어한다. Hot gas의 양은 450 pulse 단위로 제어되는 regulating valve에 의해 조절된다. On/off type과 달리 압축기의 on/off 동작이 없어 효율이 높으며, 별도의 히터를 부착하지 않아 에너지 절감을 할 수 있는 장점이 있다. 또한 정밀한 온도제어를 위한 응축기 냉각용 fan 모터의 속도를 제어한다.

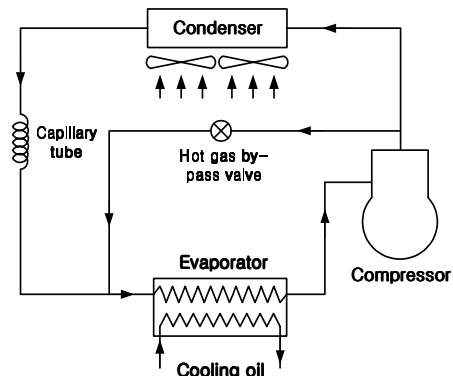


Fig. 2 Cooling cycle of hot gas bypass

Table 1은 이론적으로 산출한 두 냉각시스템의 에너지 소비량을 계산한 것이다. 동일한 운전조건으로 on/off type의 경우 제어용 히터(4308W)가 약 40%정도 운전되며, gas bypass type의 경우 응축기 냉각용 fan 모터가 약 60% 정도 가변 운전을 하는 것으로 가정한 조건이다. 계산 결과는 1년간의 에너지 소비량을 계산한 것으로 gas bypass type이 on/off type 보다 약 49.3% 정도 에너지를 절감하는 것으로 계산되었다.

Table 1 Calculation of energy consumption

오일쿨러의 운전조건	
- 운전조건 : 60%(기계장비의 평균 부하율)	
- 일일운전시간(작업 & warm up 시간포함) : 8hr	
- 월간근무시간 : 25일	
- 냉동 압축기 소비전력 : 1900W (냉각능력 : 5700 kcal/h = 6628W)	
- 제어용 히터양(냉각능력 65%) : 4308W	
- 응축용 팬 모터 소비전력 : 85W × 2 ea	
on/off 방식	gas bypass 방식
냉동기 및 히터 소비 전력	
·시간당 소비전력 (냉동기 + 0.4×히터전력) 1900 + (0.4×4308) = 3623.2W	·시간당 소비전력 (냉동기×평균부하율) + ((1-평균부하율)×hot gas 소비전력) (1900×0.6) + (1680×0.4) = 1812W
·년간 소비전력 3623.2 × 8 × 25 × 12 = 8696 kWh/년	·년간 소비전력 1812 × 8 × 25 × 12 = 4349 kWh/년
Fan 모터 소비전력	
Fan 모터 100% 운전 170 × 8 × 25 × 12 = 360 kWh/년	Fan 모터 60% 가변운전 170 × 8 × 25 × 12 × 0.6 = 245 kWh/년
총에너지 사용량	
8696 + 360 = 9056 kWh/년	4349 + 245 = 4594 kWh/년

3. 실험을 통한 에너지 절감량 비교

에너지 소비량 측정은 특정 부하에 따른 오일쿨러의 전력 소비량을 측정하였다. On/off type은 오일쿨러 시스템과 히터의 전력량을 따로 측정하였으며, gas bypass는 오일쿨러 시스템만을 측정하였다. Fig. 3은 파워미터를 이용하여 오일쿨러의 전력 소비량을 측정하는 것을 나타낸 것이다.

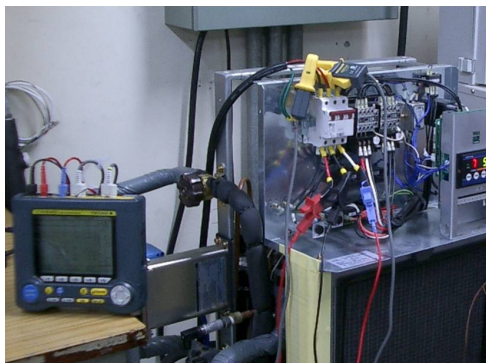


Fig. 3. Measurement of power consumption

On/off type과 gas bypass type 오일쿨러 시스템의 실제 에너지 소비량을 계산하기 위해 앞에서 언급한 동일한 냉각 사이클을 가지는 오일쿨러를 온도제어가 가능한 실험용 챔버 안에서 실행하였다. 공작기계에서 발생하는 동일한 부하 패턴을 시료에 조성하기 위해 실제 열 변형 실험에서 수행한 온도제어 패턴을 부하패턴(최대 6.0 kW)으로 전환하여 실험하였다. 부하패턴에 적용된 열 변형 시험은 ISO/DIS230-3을 기반으로 수행한 것으로 공작기계의 실 가공영역에서 많이 사용되는 4,000-6,000rpm 영역으로 4,000rpm에서 4시간, 6,000rpm에서 4시간, 5,000rpm에서 4시간 순으로 총 12시간 측정된 것이다. 이 실험에서 나타난 온도변화량을 부하패턴으로 사용하였다.

Fig. 4는 부하 패턴에 따른 각 냉동 사이클별 에너지 소비량을 나타낸 것이다. 부하패턴은 공작기계 스핀들 회전량에 따른 부하

량을 계산하여 공급한 것이며, 실선은 on/off type의 에너지 소비 누적량을 나타낸 것으로 12시간 운전 시 55.3kWh의 에너지를 소비하였다. 점선은 gas bypass의 에너지 소비량을 나타낸 것으로 12시간 운전 시 30.0kWh의 에너지를 소비하는 것으로 측정되었다. 12시간 동안 소모된 에너지 절감량은 on/off type을 100%로 가정하였을 때 gas bypass type은 on/off에 비해 약 54.2% 정도만 에너지를 소비하는 것으로 나타나 에너지 절감율이 약 45.8% 정도인 것으로 분석되었다.

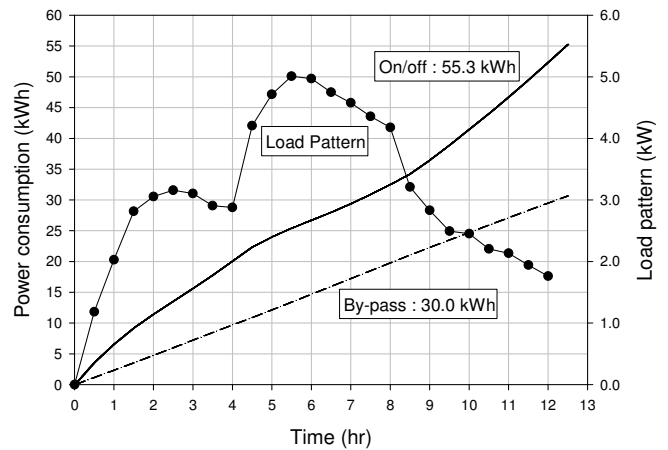


Fig. 4 Energy Consumption according to cooling cycle

이론에 의해 계산된 에너지 절감량과 실제 실험을 통해 측정된 에너지 절감량은 약 3.5% 정도가 차이가 있는데, 이것은 오일쿨러의 운전조건이 조금 상이하기 때문이다. 즉 이론에서는 하루 8시간 운전에 가동율을 60%로 가정한 반면에 실제 실험에서는 12시간 운전에 100% 가동을 했기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 최근의 에너지 절감 연구 추세에 따라 공작기계의 열 변형 최소화를 위해 사용되는 고정밀 오일쿨러 시스템의 에너지 절감량에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 이론적 에너지 절감량 계산에서는 gas bypass type의 에너지 소비량이 4594 kWh/년이고 on/off type은 9056 kWh/년으로 계산되어 gas bypass type이 약 49.3% 정도 에너지를 절감하는 것으로 계산되었다. 실제 오일쿨러 시스템을 사용하여 분위기 조성용 챔버에서 실시한 실험에서는 on/off type의 에너지 소비량이 55.3 kWh/일, gas bypass type의 에너지 소비량이 30.0kWh/일로 측정되어 gas bypass type이 on/off type 보다 약 45.8% 정도 에너지가 절감되는 것으로 분석되었다. 이와 같은 측정결과는 제조업 분야에서도 새로운 분야로 인식되는 에너지 효율 및 절감 기술로서 에너지 절감형 공작기계의 출현에 기반기술이 될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Weck, M., McKeown, P.A. et al "Reduction and Compensation of thermal error in Machine tools," Annals of the CIRP, Vol.42, No. 2, 589-598, 1995.
2. 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. 20, No. 6, 543-561, 2000.
3. 고태조, 김희술, 김선호, "공작기계 스핀들의 열 변형 보상에 대한 실험적 방법에 대한 연구." 2001 한국정밀공학회 춘계 학술대회, 300-304, 2001.
4. 이승우, 염한길, 박길중, 하승환 "Hot gas를 이용한 오일쿨러의 성능평가," 한국 정밀공학회지, 제26권, 제3호, 73-80, 2009.