ON/OFF 제어방식 오일쿨러의 정밀온도 제어에 관한 연구

A Study on a Precision Temperature Control for Oil cooler using ON/OFF Control Method

이 상 윤*
Sang-yun Lee*

요 약

최근 공작기계 분야에서 가공속도와 가공정밀도 같은 시스템 성능이 한층 요구되고 있다. 특히 가공속도가 증가함에 따라 공작기계와 수가공 분야의 공작물 가공 부위에 유해한 열 발생을 초래하게 된다. 이 열은 가공 정밀도를 저하시키는 주된 원인으로 작용한다. 따라서 온도를 제어하는 오일쿨러는 공작기계에서 필수적이다. 일반적으로 두 가지 대표적인 제어기법인 핫가스 바이패스 방식과 압축기 가변속 제어 방식이 오일쿨러에 채택 되었다. 본 논문에서는 오일 출구 온도를 설정값으로 유지하기 위해 압축기의 속도를 제어하였다. 공작기계의 정밀 가공이 요구되는 추세에 맞추어 ±0.1℃의 고정도 온도 제어가 가능한 오일쿨러가 요구된다. 그러나 정밀 온도제어가 가능한 오일쿨러는 가격이 고가이다. 그러므로 본 논문에서는 on/off(릴레이) 제어방식 대신에 PID 제어기와 위상각 전력제어 방식을 사용하여 정밀 온도제어가 가능한 오일쿨러용 제어기를 제안한다. 제안한 제어기를 제작하고, 23℃, 24℃ 그리고 25℃에서 실험하였다.

ABSTRACT

Recently, the needs of system performances such as working speed and processing accuracy in machine tools have been increased. Especially, the working speed increment generates harmful heat at both moving part of the machine tools and handicrafts. The heat is a main drawback to progress accuracy of the processing. Hence, a oil cooler to control temperature is inevitable for the machine tools. In general, two representative control schemes, hot-gas bypass and variable speed control of a compressor, have been adopted in the oil cooler system. In this paper, the compressor's speed are controlled to keep reference value of temperature at oil outlet. The precision processing of a machine tool is required for an oil cooler guaranteeing ±0.1℃ temperature control. But the oil cooler with precision temperature control is expensive. Therefore in this paper, instead of a on/off(relay) control method, a PID and phase angle electric power control method is proposed for the precision control of an oil cooler. The proposed controller is implemented and tested at the temperature of 23℃, 24℃ and 25℃.

Keywords : Machine tool, Oil cooler, Compressor variable speed control, PID control, Compressor

Ⅰ. 서 론

생산 공정이 점차 고속화, 자동화, 인공지능화가 되어가고 있는 현실에서 최근의 공작기계는 고속화, 고정밀화, 고기능화가 요구되고 있다. 이에 따라 공작기계에서의 가공시간 및 가공공정을 단축하기 위한 기술개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 연구 개발의 결과로 현재 국제시장에서 요구되는 공작기계 고속화기술의 범위는 주축속도 20,000rpm이상, 그리고 이송속도 120m/min 이상으로 되어 있다. 그러나 이러한 공작기계의 고속화는 필연적으로 구동장치 계에 열을 발생 시키고, 이 열은 공작기계부품의 열 변형을 초래하여 그 결과로 가동 정밀도 및 기계 신뢰성에 큰 저해요인 되고 있다. 따라서 최근의 공작기계는 고속운동부위인 주축과 볼 스크루(ball screw) 그리고 안내면(guide way)등의 냉각을 위한 오일쿨러(oil cooler)의 부착이 보편적으로 이루어지고 있다.[1]

오일쿨러에 가장 널리 사용되고 있는 제어는 압축기의 on/off(릴레이) 제어 방식이다.[2][3] 이 방식은 정교한 온도 제어가 어렵고, 빈번한 기동 및 정지 동작으로 소비전력이 증가하며, 압축기의 수명이 단축되는 단점이 있다. 보다 정밀한 온도 제어 방식으로는 핫가스 바이패스(hot-gas bypass; HB) 방식과 압축기 가변속 제어 방식이 있다.[2][3] HB 방식은 소비전력 절감 효과는 없지만 구조가 간단하면서도 비교적 정밀한 온도제어가 가능하며, 제어 범위가 넓은 장점을 갖고 있다. 압축기 회전수 제어 방식은 매우 정밀한 온도제어가 가능하며 소비전력을 줄일 수 있는 장점이 있으나, 제어 범위가 좁고 가격이 고가이며 압축기의 회전수에

* 경남대학교 기계공학부
투고 일자 : 2013. 3. 31 수정완료일자 : 2013. 4. 25
게재확정일자 : 2013. 4. 30

따라 팽창밸브의 개도(opening angle) 또한 제어해야 하므로 제어 시스템 구조가 복잡한 단점이 있다.[2][3]

본 논문에서는 이 두 가지 방식 가운데 저가 범용 모델인 압축기 on/off 제어 방식 오일쿨러에 압축기 회전수 제어 방식을 적용하여 압축기 가변속 정밀 온도 제어기를 개발하고자 한다.

현재 정밀가공 공작기계에 사용하는 ±0.1℃ 정도의 고정밀 온도 제어가 가능한 오일쿨러는 가격이 비싸다. 그러므로 저가의 ±1℃ 오일쿨러의 on/off(릴레이) 제어 방식을 전력 위상각 조정기를 적용하여 정밀한 저가의 오일쿨러용 제어기를 설계 및 제작하고 실험을 해서 가능성을 확인해 보고자 한다.

II. 압축기 방식 오일쿨러의 동작원리

오일쿨러의 사이클은 저압의 기상 냉매를 압축하여 고온, 고압 상태의 기체로 만드는 압축기(compressor)가 기체를 냉각시켜 고압의 액체로 만드는 응축기(condenser), 압력을 떨어뜨려 저온 저압의 냉매로 만드는 팽창밸브(expansion valve), 열을 다시 흡수시켜 저압의 기체로 만드는 증발기(evaporator)로 이루어진다. 오일쿨러 시스템은 기본적으로 압축식 냉방장치의 구조와 동일하며 기본 구성요소를 그림 1에 나타내었다.[1][4]

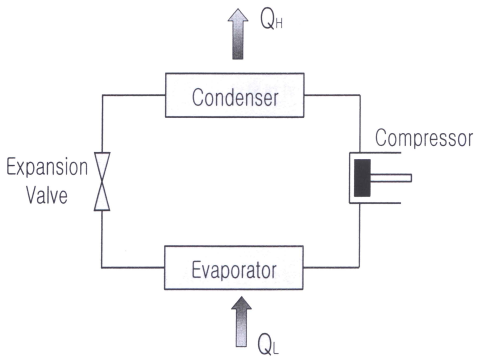

그림 1. 압축식 냉방장치의 구조

Fig. 1. Schematic diagram of compression refrigeration

정속으로 작동하는 압축기가 부착된 오일쿨러는 부하의 변화에 맞추려면, 필요 이상의 큰 용량으로 설계 되어야하나, 전력 위상제어로 압축기를 가변속하여 사용하면 오일쿨러는 높은 부하에서 위상각을 제어하여 압축기의 회전속도를 증가시켜 냉각능력을 보상한다. 또한 부하가 감소 하였을 때에는 저속으로 운전을 하기 때문에 개패운전(on/off control)에 비해 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다. 그림 2는 정속으로 작동하는 압축기의 외부 온도에 대한 부하와 용량 사이의 관계를 나타낸다. 그리고 그림 3은 기존 오일쿨러에 전력 위상제어 방식(가변속으로 압축기를 구동하는 방식) 오일 쿨러는 부하변동에 어느 정도 용량을 맞추어 운전할 수 있는 것을 확인할 수 있다.[1]

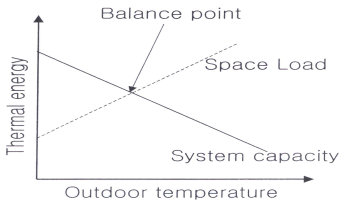

그림 2. 정속으로 작동하는 압축기의 외부 온도에 대한 부하와 용량 사이의 관계

Fig. 2. Space load and system capacity vs. outdoor temperature of compressor that operate with the fixed speed

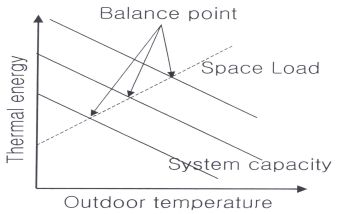

그림 3. 가변속으로 작동하는 압축기의 외부 온도에 대한 부하와 용량사이의 관계

Fig. 3. Space load and system capacity vs. outdoor temperature for a variable speed compressor.

III. 오일쿨러 제어기 설계

기존의 on/off(릴레이) 온도 제어 방식 오일쿨러의 구조를 그림 4에 나타내었다. 기존의 on/off(릴레이) 온도 제어방식은 제어기의 출력으로 릴레이를 이용하여 완전히 on(3200 rpm) 이거나 완전히 off(0 rpm)로 구동 시킨다. 이것은 압축기에 전력을 인가하거나 전력을 차단시킨다. 온도가 설정점 이상에서는 압축기를 동작시키고, 설정점 이하에서는 압축기를 끈다. 과도한 사이클링 또는 진동을 막기 위해서 불감대(dead band 또는 즉 히스테리시스)를 추가해야한다. 이러한 불감대의 영향으로 on/off(릴레이) 온도 제어기의 응답이 일정한 값으로 수렴하지 못하고 항상 진동하는 부분을 포함하고 있다.

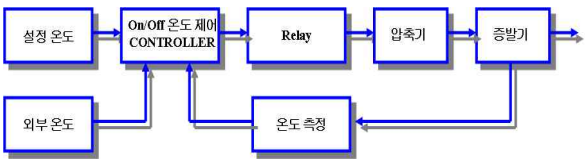

그림 4. on/off(릴레이) 제어방식 오일쿨러

Fig. 4. A oil cooler of on/off(relay) control method

더 미세하고 부드러운 제어를 하기 위해서는 불감대를 비례대로 대치해야한다. 비례대에 있어서 PID 제어기는 오차에 대하여 선형적인 결과를 내어 놓는다. 즉 압축기의 회전속도를 0 에서부터 최대 회전속도(3200 Rpm)까지 선형적으로 조절 할 수 있다.

그림 4에서 on/off(릴레이) 온도 제어기와 릴레이를 PID 온도 제어기와 위상각 전력 조정기로 대체하면 그림 5와 같이 구성한다.

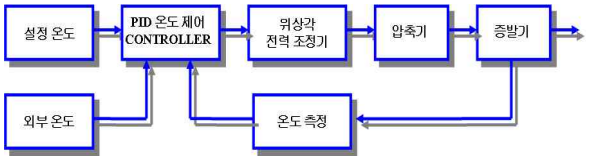

그림 5. PID 제어기와 위상각 전력 조정기를 가진 정밀 오일쿨러
Fig. 5. A precision oil cooler with phase angle power control and PID controller

on/off(릴레이) 온도 제어방식 오일쿨러로 정밀 온도 제어를 하기위해 주로 이용되는 방법은 인버터를 사용하여 압축기의 회전수를 제어하여 냉매의 질량유량을 조절, 분배한다.

본 연구에서는 고가의 인버터 대신에 저가의 위상각 전력 조정기를 사용하여 압축기 회전수를 제어한다. 압축기의 회전수 제어는 증발기의 온도를 조절하는 기능을 가지며, 증발기에 결합된 오일의 온도를 제어하게 된다. 정밀 오일쿨러를 제어하기 위한 제어 알고리즘으로는 간단하면서도 효과가 좋은 특성을 가지고 있어서 산업공정, 산업현장제어에서 가장 널리 사용되고 있는 PID(proportional-integral-derivative) 제어 방식 중 병렬 PID 제어방식을 도입한다.

병렬형이란 비례기능, 적분기능 및 미분기능을 모두 오차량에 바로 연결시킨 형태로서, 대표적인 구현방식에 대해 구성방법과 의미 및 프로그램으로 코딩하기 위한 차분방정식을 설명한다.[5]

병렬형의 PID 제어기를 프로그램으로 구현할 수 있는 차분방정식을 찾기 위해 먼저 연속 영역에서의 관계식을 써 보면 식 (1)과 같다.[5][6]

$$u(t) = k_P e(t) + \frac{k_P}{T_I}\int e(t)dt + k_P T_D \frac{d}{dt}e(t) \qquad (1)$$

여기서 k_p는 비례상수, T_I는 적분시간 그리고 T_D는 미분시간이다.

이 관계식을 차분방정식으로 변환하기 위해서는 각 제어기능을 차분방정식으로 바꿔야 한다. 그런데 이 변환은 적분 및 미분기능을 어떤 방법으로 근사하느냐 따라 달라진다. 즉 여러 가지의 결과가 만들어 질 수 있다는 것이다. 따라서 여기서는 보편적으로 많이 사용되는 근사법을 사용했을 때 유도되는 차분방정식을 설명한다. 대개 적분제어기능은 $s = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}$로 근사되며, 미분제어기능은 $s = \frac{z-1}{Tz}$의 관계로 표현된다. 이 관계를 이용하면 병렬형의 PID 제어기에 대해서는 식 (2)의 차분방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} u(kT) = u((k-1)T) + k_P e(kT) - e((k-1)T) \\ + \frac{T_S k_P}{2T_I} e(kT) + e((k-1)T) \\ + \frac{k_P T_D}{T_S} e(kT) - 2e((k-1)T) \end{aligned} \qquad (2)$$

여기서 k_p는 비례상수, T_I는 적분시간 그리고 T_D는 미분시간이다.

병렬형은 설계 사양에 일치되므로, 이론적인 연구를 하는데는 적합하지만, 현실에서 사용하기에는 적절하지 못한 문제점을 가지고 있다. 이 문제는 미분제어기능 때문에 발생하는 것인데, 만약 목표값이 0이고, 제어량(controlled variable)도 0인 상태에서 목표값이 갑자기 1로 변화되면 미분제어기능은 어떤 동작을 하겠는가? 미분제어기능이란 오차를 시간에 대해 미분하는 것이므로, 짧은 시간에 오차가 0에서 +1로 변동하면 미분제어기는 매우 큰 값을 조절량으로 출력할 것이다. 즉 제어기능이 너무 민감하게 반응할 수 있는 문제가 있다는 것이다. 오차의 이런 변화가 목표값의 변동에 의한 것이 아니라 외부에서 들어오는 잡음에 의해 발생하는 것이라면 문제는 더욱 심각해진다.

병렬형 PID 제어기에서 지적된 미분동작의 문제점을 보완하기 위한 방법으로서 비례 및 적분제어기능은 원래의 설계 개념에 부합되도록 오차에 대한 함수로서 구현하고, 미분기능은 제어량인 출력에 대한 함수로 만들어 세 가지 제어기능을 합하는 설계 사상이다. 그러면 오차량이 급격히 변화했을 때 조절량이 크게 변동하는 문제점을 해결할 수 있다. 병렬형 PID 제어기의 이 방식은 적분제어기능만을 원래의 설계 개념에 일치되도록 남겨두고, 비례 및 미분기능으로 구현한 후 세 가지 제어기능을 합한 구성법이다. 그림 6에 I-PD 제어기의 구성법을 보인다.[5]

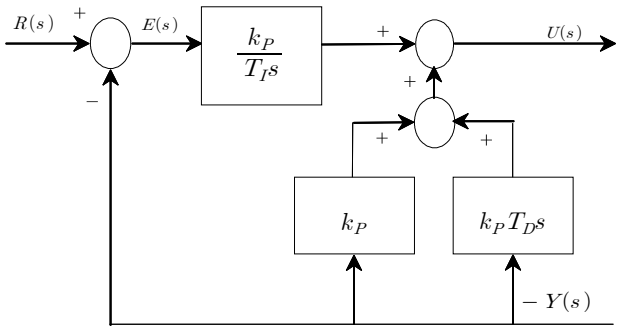

그림 6. I-PD 제어기의 구정도
Fig. 6. Schematic diagram of I-PD Controller

병렬형의 PID 제어기에서와 같은 근사법을 사용한 I-PD 제어기의 차분방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} u(kT) = u((k-1)T) - k_P y(kT) - y((k-1)T) \\ + \frac{T_S k_P}{2T_I} e(kT) + e((k-1)T) \\ + \frac{k_P T_D}{T_S} - y(kT) + 2y((k-1)T) \end{aligned} \qquad (3)$$

식(3)의 제어 알고리즘을 수행하는 제어기 회로를 그림 7에 나타내었다. 제어기의 프로세서는 컴파일 테크놀로지사의 제품을 사용하였다.

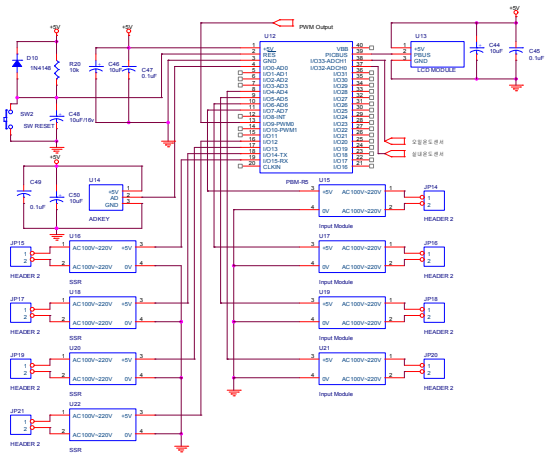

그림 7. 제어부 회로도

Fig. 7. The circuit of control part

제어기는 A/D 입력포트, Adkey 그리고 AC220V INPUT I/O CELL MODULE로부터 조작신호를 받아들이고, 출력신호는 PWM 포트와 SSR OUTPUT I/O CELL MODULE를 통해서 내보낸다.

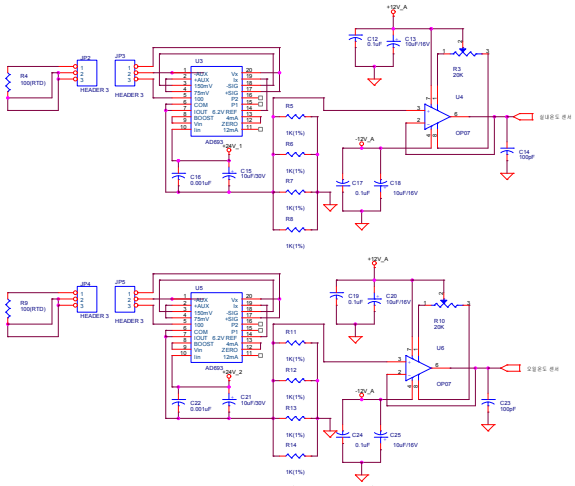

그림 8. 온도 센서부

Fig. 8. The temperature sensor part

그림 8은 RT100을 사용하여 외부온도와 오일온도를 측정하는 회로이다. RT100의 보정에는 AD693전용 소자를 사용하였다.

그리고 위상각 제어용 신호는 PWM 펄스를 적분하여 직류 신호로 변환한 다음 전력 조정기에 연결하는 회로를 그림 9에 표시하였다.[7]

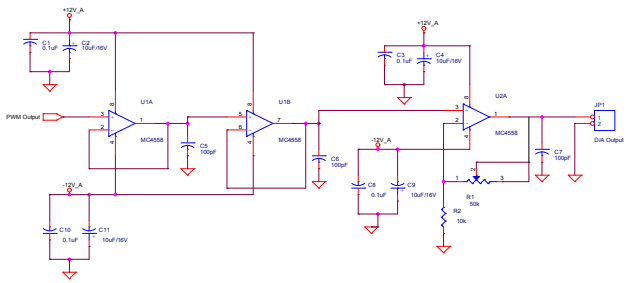

그림 9. PWM 파형을 DC로 변환하는 회로

Fig. 9. A PWM to DC convert circuit

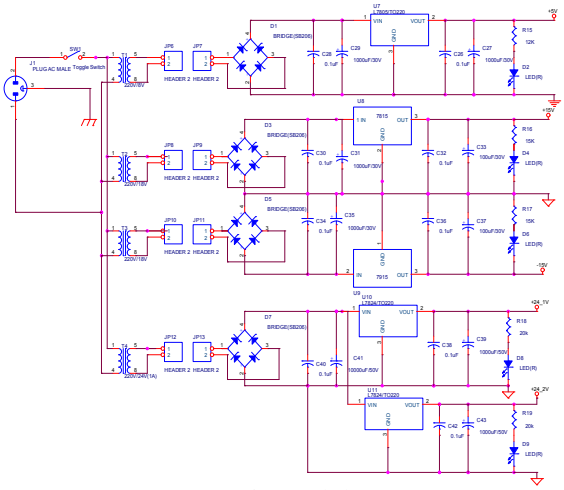

그림 10. 전원부

Fig. 10. Power supply

오일쿨러에서 사용한 위상각 전력 조정기는 (주)파라이엔티사 제품을 사용하였다.

Ⅳ. 실험 및 결과고찰

실험에서 사용한 오일쿨러는 일림나노텍의 제품으로 구조는 그림 11과 같다.[1] 그리고 온도 제어 특성을 그림 12에 도시하였다.[1]

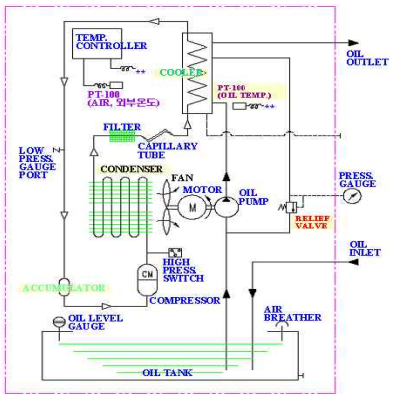

그림 11. 오일쿨러의 구조

Fig. 11. Block diagram of oil cooler system

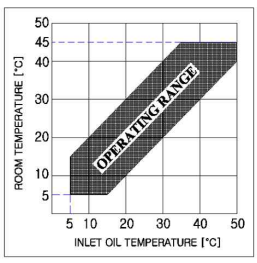

그림 12. 오일쿨러의 온도특성

Fig. 12. A temperature characteristic of oil cooler

오일쿨러의 냉동 사이클은 저압의 기상냉매 → 압축기(compressor) → 콘센서(condenser) → 모세관 → 증발기(evaporator) → 응축기(accmulator) → 기상냉매의 순서로 이루어진다. 그림 13에서 점선으로 표시한 부분이다.

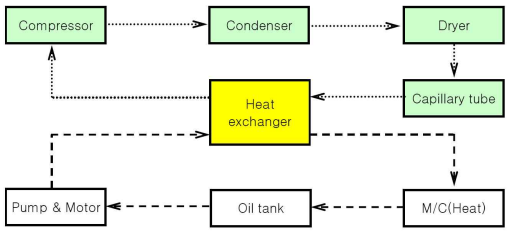

그림 13. 오일쿨러의 냉동 사이클(점선)과 냉각오일 순환시스템

Fig. 13. Refrigeration circulation system(dot line) and cooling oil circulation system(solid line)

압축기는 저압의 기상 냉매를 압축하여 고온, 고압상태의 기체로 만들고, 응축기는 기체를 냉각시켜 고압의 액체로 만든다. 모세관은 압력을 떨어뜨려 저온 저압의 냉매로 만들며, 증발기는 공작기계용 절삭유의 열을 흡수하여 저압의 기체로 만드는 부분이다. 절삭유 온도제어 방식은 기본적으로 압축식 냉방장치의 구조와 동일하다.

실험에 사용한 오일쿨러의 냉매로 R-134a를 사용하였고, 열교환기 즉 증발기의 2차 유체로는 공작기계용 절삭유를 사용하였다. 오일쿨러 실험장치는 압축기와 위상각 전력 조정기, 응축기, 증발기로 구성된 냉매회로와 냉매와 열 교환을 하는 절삭유 순환회로, 절삭유에 온도부하를 조절하기 위한 히터(heater), 그리고 절삭유 온도와 각종 데이터를 읽어 들이기 위한 계측장치 및 제어기기로 구성되어 있다. 절삭유 순환회로는 그림 14에 나타내었다.

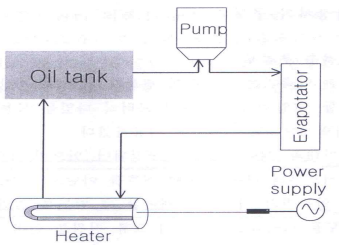

그림 14. 2차 유체 순환 루프

Fig. 14. Schematic diagram of second fluid circulation loop

절삭유의 순환순서는 오일탱크 → 오일펌프 → 오일쿨러(증발기) → 히터(heater) → 오일탱크의 순서로 이루어진다. 히터에서 가열된 고온 절삭유는 오일탱크로 들어가고, 오일탱크의 고온 절삭유는 펌프에 의해서 증발기로 공급되고, 증발기에서 냉각된 절삭유는 다시 히터로 공급된다.

실험장치의 구성은 그림 15과 같이 된다. 그리고 모습을 사진 1에 나타내었다.

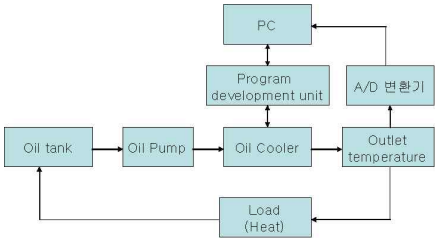

그림 15. 오일쿨러 실험 시스템

Fig. 15. Experimental apparatus of oil cooler system.

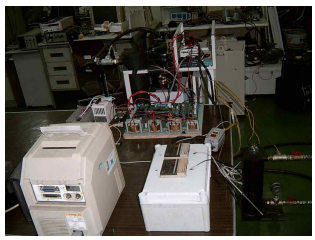

그림16. 오일쿨러 실험 시스템

Fig. 16. Experimental apparatus of oil cooler system

실험은 먼저 오일쿨러의 오일펌프를 구동시켜 절삭유의 온도를 높이기 위해 히터를 통과 시켜 순환시킨다. 그리고 히터 온도제어기에 부하온도(50℃)를 설정하고, 히터를 동작시킨다. 절삭유의 온도가 히터에서 설정한 온도에 도달한 후 온도 제어 실험을 시작한다. 실험은 PC에서 PID 온도제어 알고리즘을 작성하고 컴파일한 후 오일쿨러 제어기에 프로그램을 전송하여 제어기를 구성한다. 그리고 설정온도를 23℃, 24℃ 그리고 25℃ 로 하여 실험을 실시하였다.

첫 번째 실시한 실험은 오일 온도를 23℃로 설정하고 오일쿨러의 오일출구포트(oil outlet port)에서 PT100 온도센서를 연결하여 온도 변화를 관측하였다. 그림 16은 출구 오일온도가 안정된 후 온도의 변화를 관측한 결과이다. 설정온도와 평균 0.07℃ 차이가 났다. 두 번째 실험은 24℃로 설정하고 실험을 하였는데 설정치와 평균 0.04℃ 차이가 나타났다. 그리고 세 번째는 25℃로 설정하였고 편차는 0.03℃를 유지 하였다.

설정온도 23℃, 24℃ 그리고 25℃ 실험결과를 그림 16에 도시하였다. 실험 결과 분석을 표 1에 나타내었다.

표 1 실험결과 분석

Table 1. A analysis of experiment result.

설정온도	23℃	24℃	25℃
최소	22.62℃	23.67℃	24.79℃
최대	23.31℃	24.38℃	25.45℃
평균	23.07℃	23.96℃	25.02℃
평균오차	0.07℃	0.04℃	0.03℃

기존의 시장에서 판매되고 있는 국내외 제품의 성능과 제안한 제어방식을 사용한 오일쿨러의 성능을 표 2에 비교하였다.

표 2 실험결과 비교
Table 2. Experiment result comparison

	Daikin	IROC-40AT	실험결과
온도성능	±0.1℃	±1℃	±0.45℃
냉각능력	9200㎉/h	1000㎉/h	1000㎉/h
제어방식	PID	On/Off	PID
구동방식	인버터	Relay	위상각 전력 조정

그림 16, 표 1 그리고 표 2의 실험결과로부터 제안한 제어방식은 인버터 구동방식보다는 성능이 떨어지고, on/off(릴레이) 방식 오일쿨러 보다는 성능이 우수하다. 표 1의 실험 결과 분석으로 부터 최대-최소값에 대한 오차를 계산하면 약 ±0.45℃ 이지만, 평균값으로 평가하면 ±0.07℃의 오차를 가진다. 평가 방식에 따라 Daikin 제품보다 성능이 매우 우수한 결과를 얻을 수 있다.

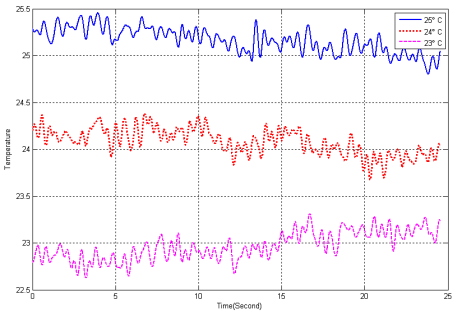

그림 17. 설정온도 23℃, 24℃ 그리고 25℃일 때의 출구 오일온도
Fig. 17. Outlet oil temperature of when the reference temperature is 23℃, 24℃ and 25℃

현재 시중에 시판되는 on/off(릴레이) 방식 오일쿨러의 제어기를 적은 비용으로 제어방식을 개선하면 우수한 제품으로 만들 수 있다.

V. 결 론

정밀 오일쿨러는 압축기에 인버터를 사용함으로 인해 가격이 비싼 문제점이 제기되고 있다. 본 연구는 인버터 대신에 위상각 전력 조정기 방식을 사용하여 실험장치 및 제어방법을 제안하며 실험을 행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) on/off(릴레이) 구동방식으로 발생하는 불연속 구동을 부분적 연속 구동방식으로 개선하였다.
(2) on/off(릴레이) 방식 오일쿨러의 기구부를 수정하지 않고 제어기를 교체함으로 저가의 오일쿨러를 정밀 오일쿨러 성능을 갖도록 할 수 있다는 것을 확인하였다.
(3) 판매되는 정밀 오일쿨러보다 성능은 다소 떨어지지만 기존의 on/off(릴레이) 구동방식 보다는 우수함을 알 수 있었다.
(4)공작기계의 정밀 가공이 요구되는 추세에 맞추어 고정도 온도 제어가 가능한 공작기계용 오일쿨러의 제어기를 저가로 개발 가능함을 확인 하였다.

참 고 문 헌

[1] 대우종합기계(주)부설 공작기계 연구소, “고강성 미세이송 및 고속 주축 기술개발”, 과학 기술부, pp277-292, 2003.
[2] 정석권, 변종영, 김상호, 윤정인, “PI와 피드포워드 제어를 이용한 공작기계용 오일쿨러의 핫가스 바이패스 방식 정밀 온도 제어,” *설비공학논문집*, 제23권 제2호, pp. 111-119, 2011.
[3] 이승우, 염한길, 박종길, “Hot Gas를 이용한 오일쿨러의 성능평가,” *한국정밀공학회지*, 제26권 제3호, pp. 73-80, 2009.
[4] 일림나노텍, “지능형 유압유니트와 오일냉각기 복합장치 개발”, 중소기업청, pp6~25, 2007.
[5] 정동화, “P-I-D 제어기의 이득 동조를 위한 퍼지제어계통 설계”, 경남대학교, 석사학위논문, pp 12-15, 2004.
[6] 신위재, “Fuzzy PID제어기설계 및 구현,” 신호처리.시스템학회논문지, 제6권 2호, pp89-94, 2005.
[7]. J.Michael Jacob, “Industrial Control Electronics Applications and Design”, Ptrentice-Hall, pp279-315. 17-41, 1989.

이 상 윤(Sang-yun Lee)
正會員
1986년 2월 금오공대 전자공학과 (공학사)
1991년 2월 금오공대 전자공학과 (공학석사)
1998년8월 경남대학교 전자공학과(공학박사)
2005년 1월 ~ 2006년 2월 이상윤지도사 사무소 대표
2006년 9월 ~ 2012년 3월 경남대학교 기계공학부 강의전담
2012년 4월 ~ 현재 경남대학교 기계공학부 조교수
※주관심분야 : 자동제어, 유공압, DSP 응용분야