

에너지 절감형 공작기계 주변기기의 개발 현황



이승우

한국기계연구원
지능형생산시스템연구본부



강재훈

한국기계연구원
지능형생산시스템연구본부



이현웅

한국기계연구원
지능형생산시스템연구본부



임선종

한국기계연구원
지능형생산시스템연구본부

1. 서 론

산업의 발전에 따라 에너지의 사용이 증가하게 되어, 예 따라 발생되는 에너지부족, 환경문제 등은 요즘 이슈화 되고 있는 온실가스 감소와 맞물려 전 세계적으로 신재생에너지, 에너지 효율향상 및 절감 등에 대한 에너지 관련연구가 각 분야별로 진행되고 있다. 이러한 추세는 제조업에도 영향을 미쳐, 생산시스템을 구성하는 공작기계에서도 에너지 절감형 공작기계가 등장하였다. 단위 제품생산을 위해 소요되는 에너지를 최소로 소모하는 공작기계가 상품화되었다. 에너지 절감형 공작기계는 공작기계를 구성하는 다양한 주변장치의 에너지 소모량 감소 및 효율성을 높임으로서 달성할 수 있다. 공작기계에는 스판들의 회전, 이송계의 이동, 공작물과 공구 등의 고정 및 다양한 부가장치 등이 전기에너지를 사용하여 다양한 에너지가 사용되므로 이를 주변장치의 에너지 소비효율을 극대화하는 것이 에너지 절감형 공작기계를 개발하는 기반기술이 될 것이다.

본 연구에서는 에너지 절감형 공작기계 개발을 위해서 적용되고 있는 공작기계 주변기기 중 오일쿨러와 유압시스템에 대한 개발내용을 소개하고자 한다.

2. 에너지 절감형 오일쿨러

공작기계에서 발생하는 오차는 오차의 형태에 따라 정적오차(quasi-static error)와 동적오차(dynamic error)로 구분된다. 동적오차는 기계의 진동, 채터(chatter) 및 스판들 유닛의 진동에 의해 발생하는 오차이고, 정적오차는 공작기계의 구성요소인 안내면(guide way), 칼럼(column), 볼 스크루(ball screw) 등 구조계의 조립특성에 따른 기하오차와 열 변형오차(thermal errors)로 구분된다. 이중 열변형오차는 공작기계의 주축속도가 20,000rpm 이상, 이 속도 120 m/min 등의 고속화 추구와 함께 다축화, 복잡화 등에 따라 공작기계의 가공정밀도에 심각한 영향을 주

고 있다. 실제 열 변형오차는 공작기계에서 발생하는 오차의 약 70% 정도를 차지하는 것으로 분석되고 있다[1,2].

이러한 열 변형을 최소하고 보정하기 위해 위치보정, 서보제어 등 많은 방법 등이 사용되고 있으나 발열부에 냉각유를 공급하여 피대상물을 목표온도로 유지하게 하는 방법이 가장 많이 사용된다. 이러한 방법을 이용한 장치를 오일쿨러라고 한다. 공작기계가 고급화됨에 따라 기존에 선택 사양이던 오일쿨러도 기본 장착으로 전환되고 있어 에너지 절감 혹은 효율이 뛰어난 오일쿨러용 냉동사이클의 개발이 진행되거나 상품화 되고 있다.

정밀한 온도제어를 위해서는 발열부에 냉각과 가열이 동시에 필요하고, 이를 위해서는 많은 에너지가 소요된다. 특히 기존에 많이 사용되는 on/off type의 오일쿨러는 압축기의 on/off 동작에 의한 온도제어와 함께 과냉각 방지를 위한 히터까지도 포함되고 있는 방식이 있어 에너지의 소비가 큰 편이다.

열 변형제어기의 냉각원리는 냉매의 단열 팽창 및 압축 등을 통한 냉매의 상변화(역 카르노 사이클)를 유도하여 냉매의 온도를 변화시켜 물, 기름 등과 같은 냉각매체와의 열교환을 통해 발열체의 온도를 조절한다[3].

오일쿨러의 온도제어 방식으로는 압축기(compressor)의 on/off 동작에 의해 온도를 조절하는 on/off 방식, 압축기에서 압축된 냉매가스의 일부를 우회시켜 온도를 제어하는 gas bypass 방식과 압력에 따라 압축기의 속도 등을 제

어하는 인버터(Invertor)방식 등이 있다. On/off 방식은 온도제어 정밀도가 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 이상으로 냉각정도가 떨어지고 압축기 단속에 의한 수명단축이라는 단점이 있지만 가격이 저렴하여 많이 사용되고 있는 실정이다. 인버터 방식은 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 의 온도 정밀도로 냉각정도는 매우 우수하나 가격이 고가인 단점이 있어 고정밀 공작기계에 옵션형태로만 적용되고 있다. Gas bypass방식은 regulating valve에 의해 hot gas의 양으로 온도를 제어하는 방식으로 우수한 온도 제어 정밀도와 에너지 절감율이 높은 냉동 사이클 제어 방식이다[4].

Gas by-pass 방식은 압축기에서 압축된 고온, 고압의 가스 일부 혹은 전부를 정밀 regulating valve에 의해 양을 조절하여 온도제어를 하는 방식이다. 우회된 hot gas는 열 교환기 입구에서 혼합됨으로써 정밀한 온도제어가 가능하게 된다[5]. Hot gas의 양은 450 pulse로 분할되는 스테핑모터의 구동에 의해 regulating valve의 개폐각도가 조절된다. Fig. 2는 gas bypass 열 변형 제어기의 냉동 사이클을 나타낸 것이다.

Gas bypass type 오일쿨러는 기존의 동일 용량의 오일쿨러 보다 에너지 효율이 뛰어나다. 기존의 on/off 방식 오일쿨러는 냉매가 과냉각되면 가열을 위해 heater를 사용하여 보다 많은 에너지가 소비되었다. 정밀한 온도 제어를 위해서는 냉각과 가열이 빠르게 동시에 이루어져야 하기 때문이다. Gas bypass type 오일쿨러는 압축기에서 발생



Fig.1 공작기계에 사용된 오일쿨러

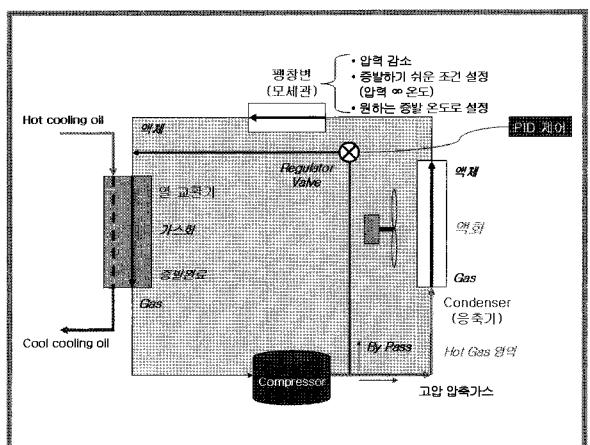


Fig.2 Gas bypass type의 오일쿨러의 냉동사이클

되는 hot gas를 이용하여 on/off 방식에서 사용되는 heater를 제거하고 압축기의 특성상 연속운전이 유리하기 때문에 에너지 효율이 높다. Table 1은 1500W급(압축기 마력) on/off 방식과 gas bypass 방식 오일쿨러의 에너지 소비량을 계산한 것이다.

기본적으로 on/off 방식과 gas by-pass 방식의 냉동 사이클은 같으나, on/off 방식에서 가열을 위한 히터의 소비전력은 압축기 냉각능력의 65%로 가정하였다. 냉동사이클의 경우 보통 COP(성능계수)는 3.48 정도 이므로 압축기의 소비전력이 1900W일 경우 냉각능력은 약 6628W이며 히터의 소비전력은 이를 기준으로 하였다. 또한 gas bypass의 경우 에너지 효율을 높이기 위해 팬 모터의 속도를 가변적으로 운전한다. Table 1은 두 방식의 에너지 절

Table 1. On/off 방식과 gas bypass 방식 오일쿨러의 에너지 소비량 계산

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 by-pass 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

감율을 비교하기 위한 기본조건과 비교 결과를 나타낸 것이다. 비교결과 gas bypass 방식이 가열용 히터를 가지는 on/off 방식 보다 약 49.6% 에너지가 절감되는 것으로 분석되었다.

Gas bypass 방식의 오일쿨러에서 온도제어를 위한 가장 중요한 요소는 hot gas 양과 이에 따른 냉각유의 온도 변화라고 할 수 있다. Fig.3은 hot gas의 양을 조절하는 regulating valve의 위치와 압축기 출구에서 열 교환기 입구로 연결되는 hot gas bypass 부분을 나타낸 것이다. Regulating valve의 개폐 정도는 설정온도를 기준 값으로 오일쿨러의 열 교환기 입구온도, 출구온도 및 외기온도를 기준으로 결정된다. 특히 열 변형제어기는 외부 온도와 습도에 대해 매우 민감하기 때문에 이와 관련된 성능평가가 매우 중요하다.

오일쿨러는 냉매의 상변화를 통한 온도제어를 하기 때문에 환경친화적 냉매도 사용하고 있다. 기존의 냉동 시스템에서 많이 사용되던 냉매인 HCFC와 CHC 계열의 물질은 열역학적 우수성 및 화학적 안정성을 갖추고 있지만 프레

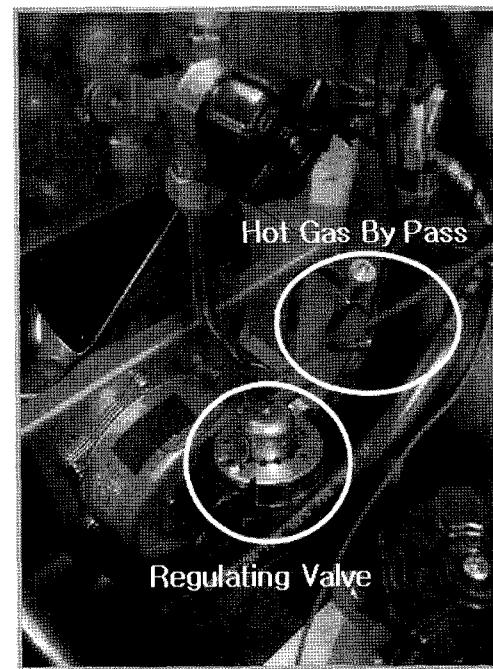


Fig.3 Hot gas 양 조절을 위한 regulating valve 및 bypass 부분

온 성분이 대기 중에 누출될 경우 오존층 파괴 등의 환경문제를 야기한다. 따라서 이들 CFC 계열 냉매를 대체하기 위한 대표적인 HFC 계열의 냉매로 R-134a, R-407C, R-410A 등이 있으며, gas bypass type 오일쿨러에 사용된 냉매는 R-407C로 친환경 냉매로 분류된다.

R-407C의 물성은 비등점이 -44°C , 임계온도 86°C , 임계압력 4.65 MPa 이며 포화증기밀도 4.57 kg/m^3 이고 25°C 일 때 증발잠열은 193.9 kJ/kg 으로 알려져 있다. 오일쿨러에 사용되는 압축기는 $1,500\text{W}$ 급으로 최대 입력 $2,220\text{W}$, 냉동능력 $6,250\text{W}$ 로 계산할 수 있으며, 열 변형제어기의 사용 범위는 $5\sim45^{\circ}\text{C}$, 온도제어 정밀도 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이다[6].

Gas bypass type의 오일쿨러는 on/off 보다 에너지 효율성도 좋지만 인버터 type에 비해서도 온도제어유지 성능이 뛰어나다. Fig.4는 오일쿨러 성능평가 시험장치를 나타낸 것으로, 부하장치로서 전기히터와 쿨러를 이용하고, 냉각유의 유량 측정을 위한 오일 유량계, 냉매 및 hot gas양 측정을 위한 유량계, 오일쿨러 각 부분의 온도제어 값 수집을 위한 T-type 열전대 및 데이터 수집 장치로 구성되어 있다.

Fig.5는 오일쿨러의 온도제어 특성을 나타낸 것으로, 주변온도를 35°C 로 하고 실온동조 온도제어 방법으로 성능평가 시험을 하였다. 실험은 분위기 조성용 환경 chamber에서 실시하였다. 오일쿨러에 가해지는 부하가 $3,800\text{W}$ 로서 외기 및 부하의 급격한 온도상승에 따라 온도유지 안정화 단계에서 약간의 오버슈트 현상이 발생하나 약 22분 후에는 오일쿨러의 설정온도와 냉각용 오일 출구온도가 설정온도에 맞게 유지됨을 알 수 있다.

전 산업분야에 요구되는 에너지 절감기술은 공작기계 분야에도 영향을 받아 공작기계의 열 변형최소화와 에너지 효율을 향상시키는 에너지 절감형 오일쿨러에 대한 연구가 진행되고 있으며, 일부 제품들은 이미 상용화되고 있으며, 에너지 효율성과 온도제어 정도를 높인 오일쿨러에 대한 상용화 연구도 완성단계에 있다.

3. 가변 토출형 유압시스템

공작기계에서의 유압시스템은 유체에너지를 기계에너지로 변환시키는 에너지 변환장치로서 공작기계, 수송기계, 공장 자동화 공정 등에서 중요한 역할을 한다. 특히 공작기계에 있어서는 가공물이나 공구의 clamping 혹은 unclaiming, 이송은 물론 공작기계 구동부의 구동에도 사용되어 에너지 소비량이 많은 주변기기이다. 공작기계의 개발 추세가 고정밀화, 고속화됨에 따라 유압시스템의 활용범위가 증가하고 있고 이에 따라 에너지 절감형 유압시스템의 개발연구도 활발히 진행되고 있다.

일반 공작기계에 사용되는 유압시스템은 항상 일정한 압력을 유지하여 유압구동부에 유압을 공급하는 형태를 사용하고 있으며, 정밀공작기계, 에너지 절감형 공작기계 등에 사용되는 빠른 반응속도와 정밀도를 요하는 유압시스템은 대부분 수입에 의존하고 있다. 일본의 DAIKIN을 비롯한



Fig.4 오일쿨러 성능평가 시험장치

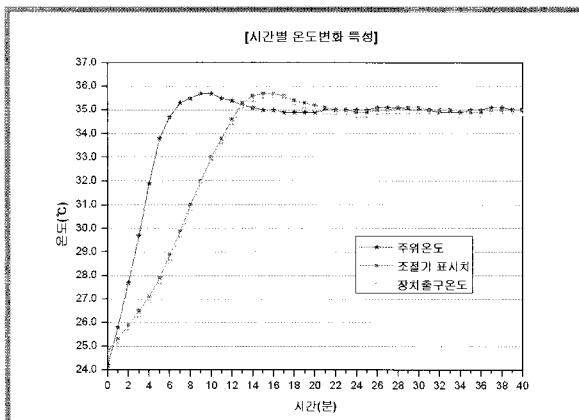


Fig.5 Gas bypass type 오일쿨러의 온도제어 특성

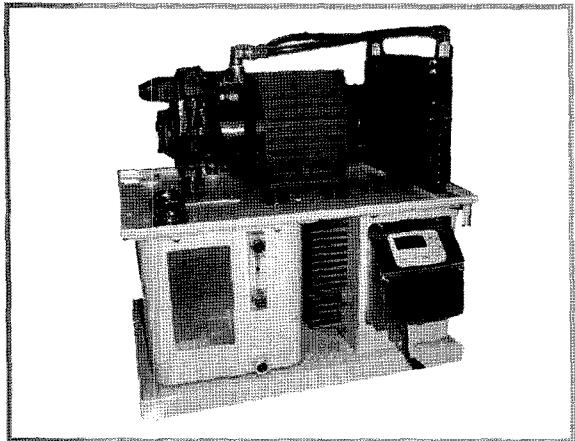


Fig.6 가변 토출형 유압시스템

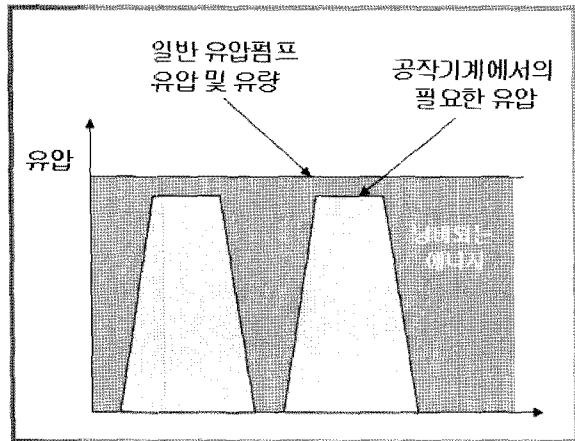


Fig.7 고정용량 토출형 유압시스템 에너지 소비

선진회사들만이 인버터제어방식을 이용한 고정밀 가변용량형 유압시스템을 생산하고 있으며, 국내의 경우에는 공작기계 제조사의 요청에 따라 개조하고 있는 실정이다.

가변토출형 유압펌프는 공작기계의 용량에 따라 모터 용량 2.2~3kW에서 45~70kg/cm²의 유압을 가지는 다양한 모델이 있다[8]. Fig.6은 상용화된 가변 토출형 유압시스템으로 속도가변 모터, 인버터제어기, 유압펌프 등의 핵심기로 구성되어 있다.

Fig.7은 고정용량 토출형 유압시스템의 유압 공급방식을 나타낸 것으로, 공작기계에서 구동부나 고정부에서 필요로 하는 최대 유압보다 항상 여유 있는 유압을 발생하고

있으므로 실제 공작기계에서 필요한 유압을 제외한 나머지 유압을 발생시키는 에너지는 낭비되고 있다.

이에 비해 가변 토출형 유압시스템은 공작기계 구동부 혹은 고정부에서 유압발생 요구가 있기 전에는 최소용량 만큼만 유압을 발생시키다가 유압발생 요구가 있으면 최대한 빠른 시간 내에 공작기계가 필요로 하는 만큼보다 조금 더 여유를 가지는 유압을 발생시키는 방법으로 고정용량 토출형 유압시스템보다 소요되는 에너지를 절감할 수 있다.

Fig.8은 가변 토출형 유압시스템의 유압공급 방식을 나타낸 것이다. Fig.8에 나타난 것 같이 가변토출유압시스템의 개발을 위해서는 다양한 요소기술들이 필요하다. 공작기계에서 필요로 하는 유압요구 감지 기술이 필요하다. 일반적으로 0.1~0.2초 이내에 감지하여 유압모터의 회전속도를 200rpm 정도에서 4500rpm으로 급상승시켜 필요한 유압을 얻어야 한다. 이를 위해서는 모터의 회전속도 감지 및 소요시간 측정기술 등이 필요하다.

또한 가변적으로 유압 조정에서 나타나는 유압 및 유량의 안정성을 위해 이를 측정하는 기술이 필요하다. 이를 위해서는 압력맥동의 저감, 캐비테이션 방지, 펌프효율 향상 등의 기술개발이 이루어져야 한다. 이를 통해 유압시스템의 소음과 소비전력의 감소로 에너지 절감형 유압시스템을 구성할 수 있다.

가변 토출형 유압시스템의 핵심은 유압 actuator의 사용압력을 feedback하여 원하는 유량을 낼 수 있도록 모터의 속도를 제어 할 수 있는 제어기와 속도 가변형 모터이다. Fig.8은 가변 토출형 유압시스템의 성능평가를 위한

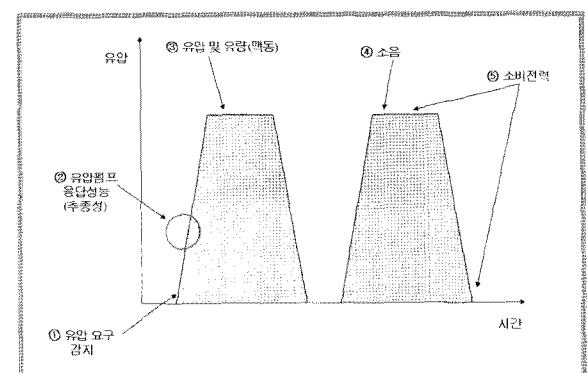


Fig.8 가변 토출형 유압시스템 에너지 소비

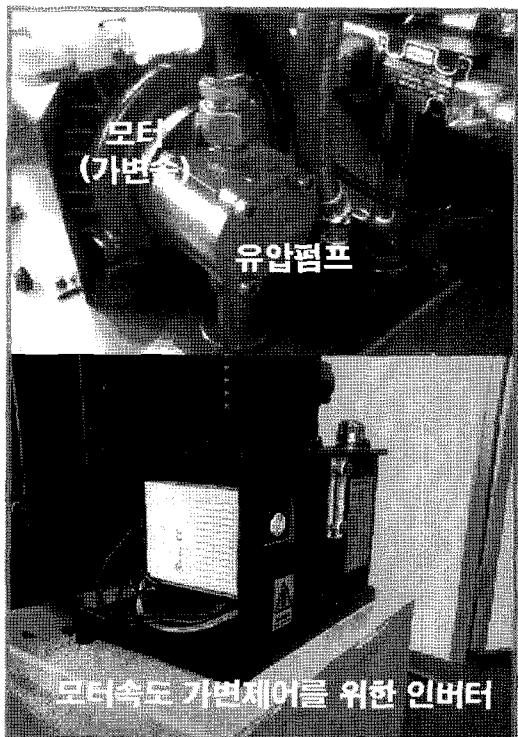


Fig.9 가변토출형 유압시스템

Table 2. 가변 토출형 유압시스템 성능목표

성능평가	항목기준
응답시간	0.1 sec
유압액동	±0.12 MPa
유량액동	±0.1 L/min
소음	69 dB
펌프효율	70 %

시스템구성을 나타낸 것이다.

시장에서 요구되는 가변 토출형 유압시스템의 성능은 기본적인 항목이고 에너지 소비효율에 초점이 맞춰질 것으로 예상된다. Table 2는 가변 토출형 유압시스템의 목표 성능을 나타낸 것이다.

일반적으로 공작기계의 운전 상태를 볼 때 가변 토출형 유압시스템은 고정용량 토출형 유압시스템보다 소비 에너지를 약 60%까지 절감 가능하다.

4. 결론

지구온난화 방지를 위해 에너지 및 환경문제를 해결하기 위한 방안이 세계적으로 진행되고 있다. 기후변화협약에서도 각 분야별로 온실가스를 줄이는 사업이 진행되어 제조업 분야에서도 이를 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 공작기계는 전기에너지를 이용하여 다양한 에너지로 변환하여 여러 기구부를 움직이는 장치로서, 현재에는 공작기계의 에너지효율을 높인 에너지 절감형 공작기계가 상품화되고 있다. 이를 위해서는 공작기계를 구성하는 다양한 주변기기의 에너지 효율을 개선하여야 하는데, 본 논문에서는 공작기계의 열 변형을 최소화할 수 있는 에너지 절감형 gas bypass type 오일쿨러와 공작기계의 유압요구 시에만 유압을 발생하는 가변 토출형 유압시스템의 개발사례를 소개하였다. Gas bypass type 오일쿨러의 경우 동일 용량의 on/off type 보다 약 50%의 에너지 절감효과를 나타낼 수 있으며, 가변 토출형 유압시스템은 고정 용량형 유압시스템보다 최대 60%까지 에너지 소비를 줄일 수 있다. 에너지 효율성을 높이고 단위제품 생산 당 소비에너지를 낮추는 연구개발 기술들은 공작기계뿐만 아니라 제조업 전반에 걸쳐 시장에서 많은 수요가 있을 것이다.

참고 문헌

- Bryan, J. B., 1990, "International Status of Thermal Error Research", *Annals of the CIRP*, Vol.39, pp. 645~656.
- Weck, M., McKeown, P. A., Bonse, R., and Herbst, U., 1995, "Reduction and Compensation of Thermal Error in Machine Tools", *Annals of the CIRP*, Vol.42, pp. 589~598.
- Yaacob, M., and Syed M. Z., 2001, "Capacity Control for Refrigeration and Air-Conditioning Systems: A Comparative Study", *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 123, pp. 92~99.
- Lee, S.W., Yeom, H.K. and Park, K.J., 2007, "Performance of Oil Cooler System with Hot Gas

- Bypass," *Proceeding of Korean Society of Precision Engineering (Spring)*, Vol. 1, pp. 459~460.
5. Yaqub, M., and Syed M. Z., and Shamsul, H. K., 1995, "Second-Law-Base Thermodynamic Analysis of Hot-gas, By-pass Capacity Control Schemes for refrigeration and air-conditioning systems", *Energy*, Vol. 20, pp. 483~493.
6. Han, X. H., Wang, Q., Zhu, Z. W., and Chen, G. M., 2007, "Cycle performance study on R32/R125/R161 as an alternative refrigerant to R407C", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 559~565.
7. Doddannavar, R., Barnard, A. and Mackay, S., 2005, *Control components in a hydraulic system*, Practical Hydraulic Systems, pp. 93-131.
8. Yousefi, H., Handroos, H. and Soleymani, A., 2008, "Application of Differential Evolution in a system identification of a servo-hydraulic system with a flexible load", *Mechatronics, on-line service*.