

반도체 공정 온도제어용 칠러의 실험적 연구

차동안** · 권오경* · 오명도**

* 한국생산기술연구원 에너지설비센터, ** 서울시립대학교 기계정보공학과

Experimental Study of Process Chiller for Semiconductor Temperature Control

Dong An Cha **, Oh Kyung Kwon * and Myung Do Oh **

* Energy System Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology

** Dept. of Mechanical and Information Engineering, Univ. of Seoul

(Received September 28, 2010 ; Revised February 28, 2011 ; Accepted February 28, 2011)

Key Words: Chamber(챔버), Chiller(칠러), Energy Saving(에너지절감형), Semiconductor(반도체), Wafer Cooling(웨이퍼냉각)

초록: 반도체 제조를 위한 공정에서는 과도한 열이 발생한다. 따라서 Chamber 내의 웨이퍼나 주변온도를 일정하게 유지할 수 있도록 온도의 정밀제어가 요구된다. 반도체 칠러는 산업용 칠러와는 다르게 운전조건이 24시간 년중 지속되므로 반도체 칠러는 전력소비량이 대단히 크며, 냉동기의 최적 운전제어를 통한 저소비전력 칠러 개발이 대단히 필요하다. 국내에서 판매되고 있는 반도체 칠러는 수입품에 비해 전력소비가 높아 제품 경쟁력이 낮은 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 국내에서 개발된 반도체 칠러에 관한 실험적 연구를 통하여 칠러의 부하변화 실험, 온도 상승 하강실험, 제어정밀도 실험 등을 통하여 칠러의 에너지절감 방향을 제시하고자 한다. 실험을 통하여 칠러의 냉각능력은 2.1~3.9 kW, EER은 0.56~0.93으로 측정되었다. 제어정밀도는 0°C에서 ±1°C, 30°C 이상 설정에서는 ±0.6°C로 향상되는 것으로 나타났다.

Abstract: Excessive heat may be generated during the semiconductor manufacturing process. Therefore, precise control of temperature is required to maintain a constant ambient temperature and wafer temperature in the chamber. Compared to an industrial chiller, a semiconductor chiller's power consumption is high because it is in continuous operation for a year. Because of this high power consumption, it is necessary to develop an energy-efficient chiller by optimizing the operation. The competitiveness of domestic products is low because of the high energy consumption. We experimentally investigated a domestic semiconductor by conducting load change, temperature rise and fall, and control precision experiments. The experimental study showed that the chiller had 2.1~3.9 kW of cooling capacity and 0.56~0.93 of EER. The control precisions were ±1°C and ±0.6°C when the setting temperatures were 0°C and 30°C respectively.

- 기호설명 -

A_w	: 압축기 소비동력	[kW]
COP	: 성능계수	
c_p	: 비열	[J/kg·°C]
EER	: 에너지 소비효율	
\dot{m}	: 질량유량	[kg/h]
Q_{CH}	: 채널별 냉각능력	[kW]
Q_{total}	: 시스템 소비전력	[kW]
$T_{CH,o}$: 냉수 출구온도	[°C]
$T_{CH,i}$: 냉수 입구온도	[°C]

1. 서론

최근 유가상승 및 에너지고갈의 위기감으로 인해 고효율, 저소비전력형 장비의 필요성이 산업체 전반에 부각되고 있으며, 반도체 산업에서도 생산 장비의 효율성 향상을 위해 최적의 설계 및 제어 등에 관한 개발연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

반도체 제조를 위한 공정 중 웨이퍼 상에 식각(etcher) 및 증착(deposition)공정을 수행하는 건식 식각장치(dry etcher)와 그 외의 공정장비인 진공 증착(sputter), CVD, EDS 등의 공정에서 과도한 열이 발생한다. 따라서 챔버 내의 웨이퍼나 척 및

† Corresponding Author, kwonok@kitech.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

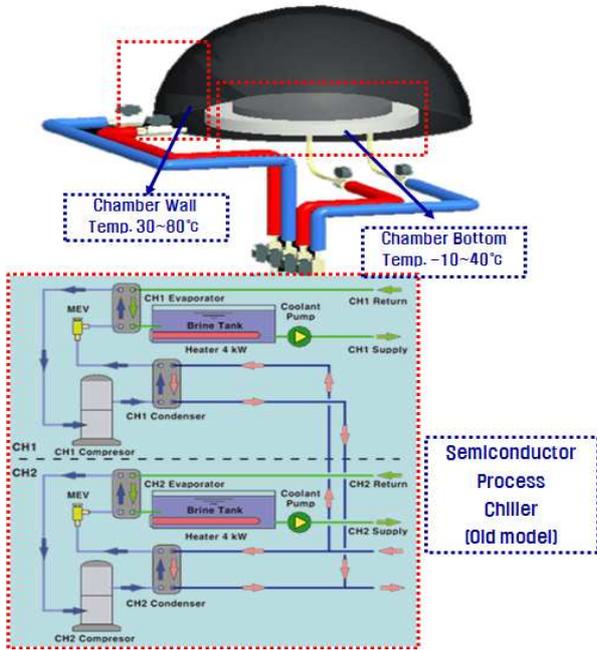


Fig. 1 Schematic diagram of semiconductor cooling process

주변온도를 일정하게 유지할 수 있도록 온도의 정밀제어가 요구되며, 온도를 일정하게 유지함으로써 공정효율을 개선할 수 있다.

반도체와 LCD, EDS 공정장비용 칠러(chiller)는 압축, 응축, 팽창, 증발의 과정을 거치는 냉동사이클 및 오토캐스케이드 방식^(1,2)을 이용한 냉동사이클, 냉각수를 이용한 냉수 냉각사이클을 이용하여 반도체 공정 요구조건을 만족시킬 수 있는 장치라 할 수 있다. 최근 공정이 고정밀화, 대구경화에 따라 다양한 기초기술 및 설계기술을 기반으로 맞춤형 칠러에 대한 지속적인 개발이 요구되고 있다.

Fig. 1은 반도체 공정중의 하나인 EDS(Electrical Die Sorting)공정용 칠러의 계통도를 예로 나타낸 것이다. 반도체 챔버에서 발생하는 고온의 열을 제거하기 위하여 벽측(wall)은 30~80°C, 바닥부(bottom)는 -10~40°C 범위로 채널(channel)을 나누어 사이클이 구성되어 있다.

EDS 공정의 경우 완성된 웨이퍼 내 소자의 전기적인 동작상태를 테스트하는 공정으로서 웨이퍼를 고온 및 저온의 극한 상황에서 전기를 인가하여 돌아오는 신호가 정상이면 양품, 비정상이면 불량으로 반도체 칩을 선별하게 된다. 이 때 요구되는 온도의 제어정밀도는 ±1°C 이상일 때 불량률이 5~7% 증가하므로 ±0.5°C 이하의 조건에

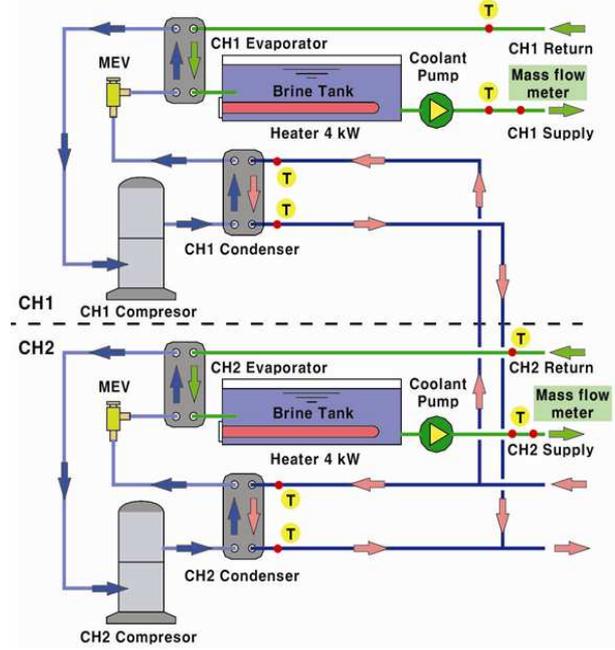


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for semiconductor process chiller

만족하도록 요구하고 있다.

반도체 칠러는 산업용 칠러와는 다르게 운전조건이 24시간 년중 지속되므로 전력소비량이 대단히 크며, 냉동기의 최적 운전제어를 통한 저소비 전력 칠러 개발이 절실히 필요하다.⁽³⁻⁶⁾ 국내에서 판매되고 있는 반도체 칠러는 수입품에 비해 전력소비가 높아 제품 경쟁력이 낮은 실정이다. 관련 연구는 많이 수행되어졌지만 반도체 공정용 칠러에 관한 연구는 전무한 실정이다.⁽⁷⁾

이에 따라 본 연구에서는 국내에서 개발된 반도체 칠러에 관한 실험적 연구를 통하여 칠러의 부하변화 실험, 온도상승 하강실험, 제어정밀도 실험 등을 통하여 현 장비의 운전 상태를 파악하고 연구결과를 통하여 반도체 공정용 칠러의 에너지절감 방향을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 본 실험대상인 반도체 공정 온도제어용 칠러 냉동사이클의 시스템 개략도이다.

장치는 2개의 채널(channel)로 구성되며, CH1, CH2는 개별 냉동사이클로서 압축기(compressor), 응축기(condenser), 팽창밸브(expansion valve), 증발기(evaporator)로 구성되고, 각 채널 별 공정온도는

Table 1 System specification

Dimension	560×975×1500 mm
Refrigerant	R-507A CH1, CH2 : 3.5 kg
Coolant	FC-3283 (3M) 30°C Density : 1800 kg/m ³ Specific heat : 0.25 kcal/kg°C
Compressor	3 HP × 2 Individual system MANEUROP : MTZ36
Evaporator	ALFALAVAL : AC30-30EQ
Condenser	ALFALAVAL : CB26-24H
Brine pump	2 HP × 2
Expansion V/V	MEV (Pressure control) × 2 PARKER : A7-B (150-170 kPa)
Heater	4 kW × 2
Heat load JIG	7 kW (3/4") 25 m × 2

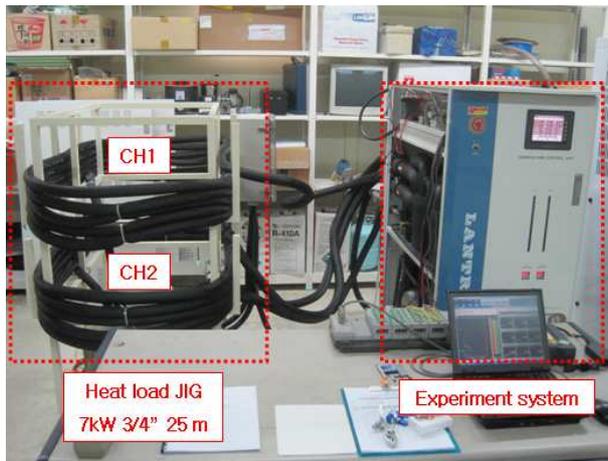


Fig. 3 Heat load JIG & semiconductor chiller

-10~80°C 공정까지 적용이 가능하도록 설계, 제작되었다. 공정별 온도 제어는 냉수(coolant) 루프에 삽입되어 있는 히터를 이용하였고, 이를 PID 제어방식으로 각각 제어가 가능하도록 하였다.

Table 1은 본 싀험에 사용된 반도체 칀러의 상세 사양을 나타낸 것이다. 채널 별로 압축기는 3 HP급 밀폐식(hermetic type), 펌프는 2 HP급 마그네틱 타입, 히터는 4 kW급 카트리지 히터가 탱크 내에 삽입되어 탱크 내부의 온도를 제어하도록 하였으며, 응축기와 증발기는 관형형식의 대향류 열교환기를 사용하였다. 그리고 Fig. 3과 같이 실제 반도체 공정 설치에 요구되는 조건으로 CH1, CH2를 상부 하부로 나누어 가열히터(heat

Table 2 Experimental conditions

Parameter	Conditions
PCW flow rate (m ³ /h)	0.6 ~ 1.2, (200 kPa)
PCW Temperature. (°C)	20
Coolant flow rate (m ³ /h)	1.1 ~ 1.2, (600 kPa)
Cooling capacity experiments	
Coolant Temperature. (°C)	0, 20, 40, 60, 80
Heating load (kW)	2 ~ 5
Temp. up, down experiments	
Coolant Temp. (°C)	0 ~ 80, 80 ~ 0
Heating load (kW)	-
Control precision ratio experiments	
Coolant Temp. (°C)	0, 30, 60
Heating load (kW)	2
Operating time	2 min ON, 30 sec OFF

load JIG) 7 kW, 배관 3/4" 25 m로 제작하여 각 채널의 부하를 일정하게 부여할 수 있도록 하였다. 또한 가열히터의 출력을 변화하고 측정할 수 있도록 전류 및 전압 변성기를 설치하였다. 압축기 구동에 필요한 전력을 측정하는 전력계 및 냉각수 입·출구에 열전대와 유량계(유량범위:2 m³/h)를 설치하였다. 이를 통해 냉각수 온도 및 유량을 측정하여 열량을 계산할 수 있도록 하였으며, 냉각수(PCW : Process Cooling Water)의 온도는 항온조에서 일정온도로 공급할 수 있도록 하였다. 시스템 각 부분의 압력과 온도를 측정하기 위해 고·저압 압력계와 T-type 열전대를 설치했으며, 각 계측장치는 보정(calibration)을 수행한 후 유량, 온도 및 압력 등을 다채널 온도기록장치(40CH)와 RS-232C 케이블을 통해 PC로 전송하여 처리하였다. 계측장비의 오차로써 유량은 ±0.1%, 온도는 ±0.15%, 압력은 ±0.1%이다. 싀험 데이터에 대한 불확실성 해석⁽⁸⁾을 통해서 시스템의 냉각열량(Q_{CH})은 ±3.72%, 성능계수(COP)는 ±3.73%의 값을 가진다.

2.2 싀험방법

Table 2는 반도체 칀러의 싀험조건을 나타낸

것으로서 각 채널의 최적 냉매 충전량을 파악하기 위해 일정부하(2 kW) 조건에서 충전량을 변화시켜 각 채널의 최적 냉매 충전량을 파악한 후 각 채널의 온도영역별 냉각능력 실험, 무부하 운전 시 온도상승 및 하강실험 그리고 반도체 공정에서 사용 빈도가 높은 온도영역에서의 제어정밀도 실험 순서로 진행하였다.

현재 반도체 칩러에 대한 별도의 시험규격이 정해져 있지 않기 때문에 국내 반도체 업계에서 일반적으로 사용하는 일본기업(SMC)의 시험규격을 기준으로 하였다.

칩러의 운전은 먼저 제어 온도를 설정한 후 PCW를 일정 유량, 압력으로 유입시키고, 칩러를 가동하여 coolant 공급(supply), 환수(return) 온도변화가 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내, 압력은 ± 5 kPa이내의 범위에 있을 때 정상상태에 도달하였다고 판단하였다.

냉각능력 실험은 설정온도에서 칩러의 운전이 정상상태에 도달하였을 때 가열히터로 일정부하를 입력하고 이때의 시스템 온도 및 압력, 소비전력 등을 측정하였다. 이때 냉수의 유량을 일정하게 유지하기 위해 CH1, CH2 공급압력을 600 kPa로 일정하게 유지되도록 환수밸브(return valve)를 이용하여 압력을 조절하였다. 각 채널에 가열히터로 부하를 입력 후 시스템 안정화를 고려해 일정시간(약 10min) 동안 냉수 공급온도변화가 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내에서 히터의 부하를 0.2 kW씩 증가시켜 설정온도와 공급온도가 1.0°C 이상의 차이로 측정될 때를 설정온도의 최대냉각능력으로 판단하였다.

온도상승 및 하강실험은 공정의 변화에 따라 설정온도가 변할 때 각 공정에 신속하게 대응함으로써 공정 대기시간을 최소화 하기위한 실험이다. 실험은 초기구동 후 0°C 에서 냉수 공급 온도가 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내에서 안정화되어 운전되면 목표온도를 80°C 로 설정하여 무부하 상태에서 온도상승 운전이 되도록 하고, 온도하강 실험의 경우는 반대의 조건으로 실험하였다. 이때 목표온도까지 도달하는 시간 및 소비전력을 측정하여 시스템 반응속도를 파악하고자 하였다.

제어정밀도 실험은 일본 SMC사에서 제안한 칩러의 온도제어 정밀도 실험에 따라 사용빈도가 높은 온도대역 즉, 0°C , 30°C , 60°C 상태에서 히터부하 2 kW를 2분간 인가하고 30초간 차단하는 방식으로 10회 이상 운전하여 채널 별 공급 온도의

제어 정밀도 및 소비전력을 측정하여 실제 공정에의 적합성을 파악하였다.

2.3 실험결과처리

실험에서 CH1과 CH2의 냉각열량은 식 (1)을 이용하였으며 설정온도 부하 값과 열평형을 비교하여 시스템 열손실을 최소화하고자 하였으며, 본 연구에서의 냉각열량은 CH1과 CH2의 평균값을 사용하였다.

$$Q_{CH} = \dot{m}_{CH} c_p (T_{CH,o} - T_{CH,i}) \quad (1)$$

여기서, \dot{m}_{CH} 와 c_p 는 채널의 냉수 질량유량과 정압비열이며 $T_{CH,i}$, $T_{CH,o}$ 는 각 채널의 냉수 입구, 출구온도를 나타낸다.

시스템 성능계수(COP)는 각 채널의 냉각열량(Q_{CH})과 압축기 소비동력(A_w)를 이용하여 식 (2)와 같이 구하였다.

$$COP = \frac{Q_{CH}}{A_w} \quad (2)$$

에너지 소비효율(EER)은 시스템의 정격 냉각능력과 시스템 총 소비전력의 비로서 식 (3)을 이용하여 구하였다.

$$EER = \frac{Q_{CH1} + Q_{CH2}}{Q_{total}} \quad (3)$$

여기서, Q_{total} 은 각 채널의 압축기와 펌프, 히터에서 소비되는 전력을 합산한 값이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시스템 사이클 변화

냉매는 각 채널별로 3.8 kg이 충전되었으며, 설정온도의 변화에 따라 냉매 순환량은 최소 3.15, 최대 5.02 kg/min으로 측정되었다.

Fig. 4는 시스템의 냉동사이클을 설정온도에 따른 압력-엔탈피 선도로 나타내었다. 각 채널의 설정 공급온도(0°C , 20°C)에 따라 시스템 압력이 저압은 309 kPa에서 404 kPa로 증가하였고, 고압은 1,338 kPa에서 1,294 kPa로 미세하게 감소하는 경

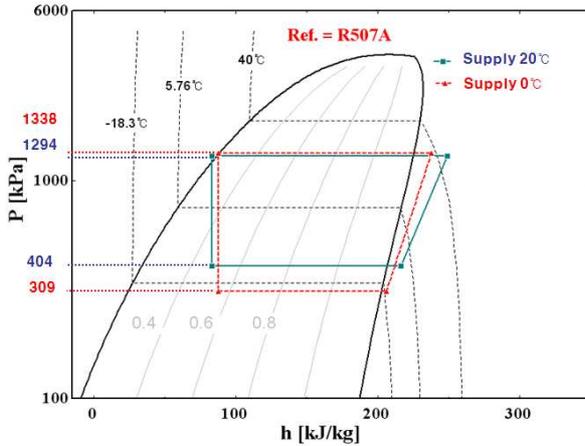


Fig. 4 P-h diagram of the semiconductor process chiller system

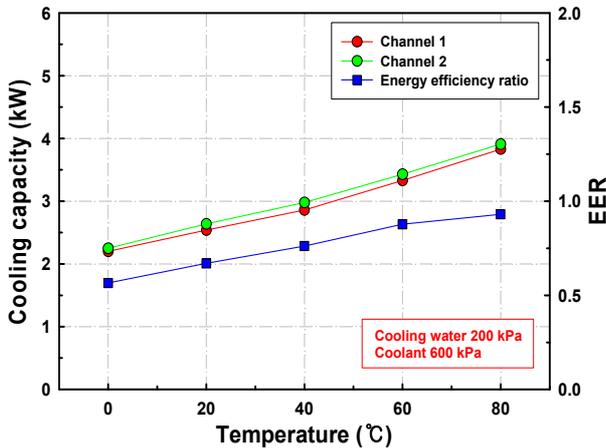


Fig. 5 Variation of cooling capacity with supply temperature

향으로 나타났다. 이는 설정온도 변화에 따른 팽창밸브 내부의 오리피스 조절에 의한 것으로 판단되어 진다.

3.2 온도별 냉각능력 변화

Fig. 5는 각 채널의 설정 온도에 따른 냉각능력과 EER을 나타낸 것으로서 채널 별로 0°C에서 80°C까지 동일하게 온도를 설정하고 가열히터 출력을 시스템이 안정화되는 시간을 고려하여 10분 간격으로 1 kW씩 증가시켜 공급온도가 설정온도보다 1°C 이상 상승할 때 냉수와 열평형을 비교하여 냉각능력을 측정하였다.

설정온도가 상승함에 따라 냉각능력이 점차 상승하는 일반적인 경향으로 나타났다. 냉각능력은 0°C에서 최소 2.1 kW, 80°C에서 최대 3.9 kW로 측정되었고 EER은 최소 0.56에서 최대 0.93의 경향으로 나타남을 알 수 있었다.

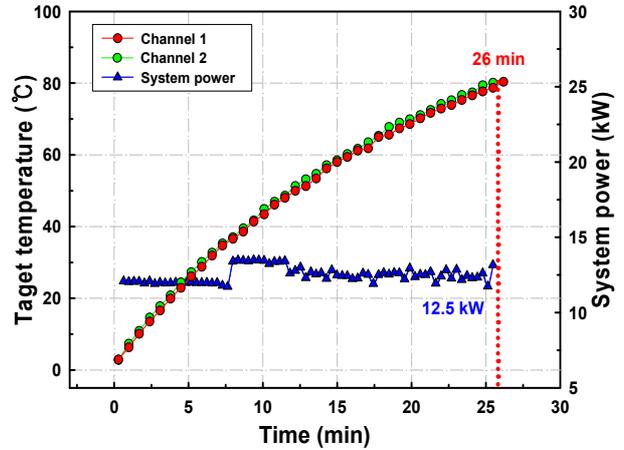


Fig. 6 Variation of target temperature with time (0°C→80°C)

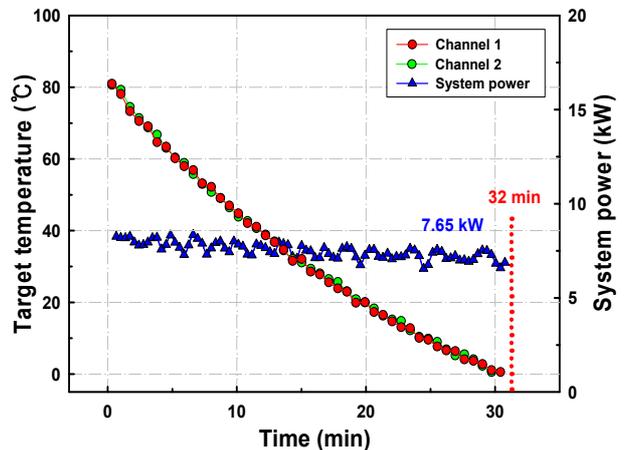


Fig. 7 Variation of target temperature with time (80°C→0°C)

3.3 온도상승 및 하강실험

Fig. 6은 공정전환에 따른 시스템 대응성을 모사한 무부하 상태에서 냉수 공급온도가 0°C~80°C까지 상승하는데 소요되는 시간 및 시스템 소비전력을 나타낸 것이다.

시스템이 안정화된 0°C에서 최종 목표온도인 80°C까지 약 26분이 소요되었으며 평균 소비전력은 12.5 kW로 측정되었다. 이 때 냉수는 각 채널별로 25m 배관에서 약 600 kPa의 압력으로 일정하게 유지되어 순환되도록 하였다. 그리고 약 8분 정도의 운전지점에서 시스템 소비전력이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 냉수의 온도가 증가함에 따라 순환압력을 600 kPa로 제어하면서 각 채널 펌프의 소비전력이 미세하게 증가하기 때문이며, 설정온도에 도달하면서 히터의 제어량 변화로 인하여 시스템 소비전력의 변화가 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 무부하 상태에서 냉수의 공급온도가

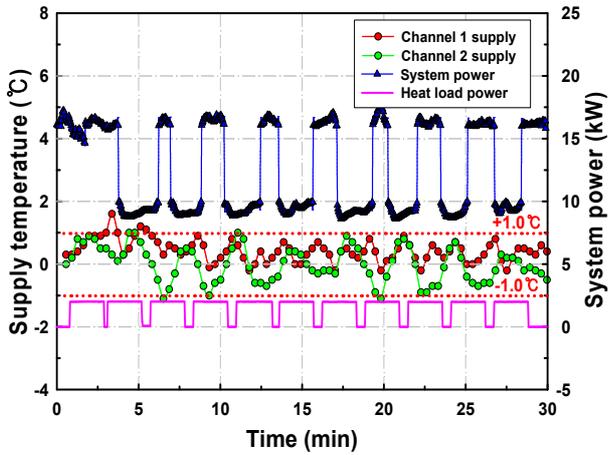


Fig. 8 Variation of supply temperature with time (0°C)

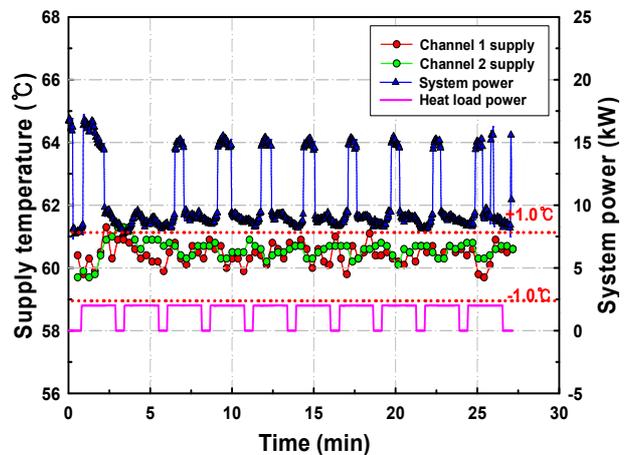


Fig. 10 Variation of supply temperature with time (60°C)

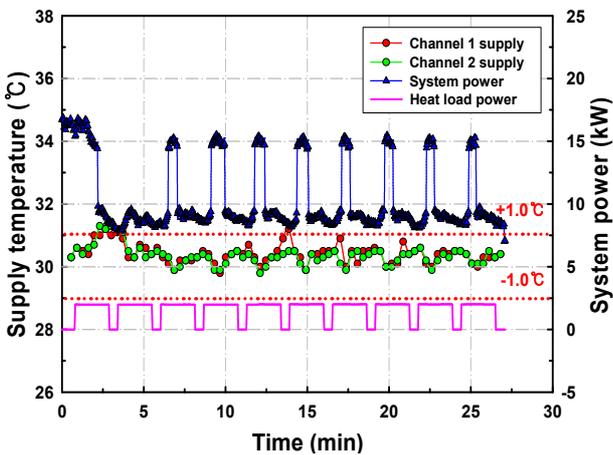


Fig. 9 Variation of supply temperature with time (30°C)

80°C~0°C까지 하강하는데 소요되는 시간 및 시스템 소비전력을 나타낸 것이다.

시스템이 안정화된 80°C에서 최종 목표온도인 0°C 까지 약 32분이 소요되었으며 평균 소비전력은 7.65 kW로 측정되었다. 냉수의 온도가 점차 하강함에 따라 시스템 소비전력이 미세하게 저하되면서 변화폭이 큰 것을 볼 수 있는데 이는 설정온도에 도달하면서 각 채널 압축기의 간헐적인 운전과 히터의 제어에 의한 것으로 판단된다.

3.4 온도영역 제어정밀도 실험

Fig. 8~10은 설정온도 변화에 따른 제어정밀도를 나타낸 것이다. 실험에서는 가열부하를 2 kW로 10 cycle (1 Cycle : 2 min ON, 30 sec OFF) 약 30분간의 실험으로 채널 별 공급온도가 ±1°C에서 일정하게 유지하는지 여부와 이때의 시스템

소비전력의 변화를 살펴본 것이다.

먼저 Fig. 8은 설정온도 0°C에서 제어정밀도와 시스템 소비전력을 살펴본 것이다. 채널 공급온도는 ±1°C를 유지하지만 시스템 소비전력이 9~16 kW로 크게 변화하는 것을 볼 수 있고, CH1보다 CH2의 온도변화 폭이 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 시스템 PID설정에서 CH1의 활용온도 범위가 -20°C~80°C, CH2의 온도범위가 0°C~80°C로 설정되어있으므로 CH1이 저온영역인 0°C에서 정밀한 제어성을 나타내는 것으로 확인되었다.

Fig. 9와 10은 설정온도 30°C와 60°C에서의 제어정밀도와 시스템 소비전력을 살펴본 것이다. 설정온도 30°C와 60°C에서 각 채널의 공급온도가 ±0.6°C로 CH1과 CH2가 동일한 경향으로 나타났지만 설정온도보다 0.3°C 높은 영역에서 제어됨을 볼 수 있다. 이는 시스템 내부 온도센서와 실험용 온도센서의 설치위치에 따라 약 0.3°C의 온도편차에 의한 것으로 판단된다. 또한 시스템 소비전력은 8~15 kW로 설정온도 0°C보다 약 1 kW 정도 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 설정온도가 높아짐에 따라 히터의 투입시간이 줄어들면서 전체적인 시스템 소비전력이 감소하는 것으로 판단된다.

4. 결론

반도체 공정 온도제어용 칠러의 부하변화, 온도상승 하강, 제어정밀도 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 현재 사용되고 있는 반도체 공정용 칠러의 설정온도 변화에 따른 칠러의 냉각능력은 2.1~3.9

kW, EER은 0.56~0.93으로 측정되었다.

(2) 온도상승실험은 목표온도까지 약 26분이 소요되었고, 소비전력은 12.5 kW로 측정되었다. 하강실험은 약 32분, 7.65 kW로 측정되었다.

(3) 사용빈도가 높은 온도대역에서의 제어정밀도는 0℃ 설정에서 ±1℃로 나타났고, 30℃ 이상의 설정에서는 ±0.6℃로 향상되었으며 소비전력은 1 kW 정도 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구결과를 통하여 현재 반도체 공정 온도 제어용으로 사용되는 CH1, CH2 각각의 개별 냉동사이클로는 제어정밀도를 높이고 소비전력을 줄이는데 한계가 있는 것으로 보여진다. 따라서 제어정밀도를 높이고 소비전력을 줄이기 위해서는 각 온도영역별 zone을 구분하고, 20℃의 PCW를 활용할 필요가 있을 것으로 판단되어진다.

따라서 향후 연구로는 반도체 공정용 칠러의 성능 및 제어정밀도 향상을 위하여 압축기 2 in 1 멀티 시스템, 냉각수 냉각시스템 적용 하이브리드 시스템, EEV(Electronic Expansion Valve)를 적용한 실시간 냉매 PID 제어, 온도 대역 zone 구분 시스템 등의 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(과제번호 : 2009T100100639)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고문헌

- (1) Park, S. N. and Kim, M. S., 1999, "Performance of Autocascade Refrigeration System Using Carbon Dioxide and R134a," *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 11, No. 6, pp. 880~890.
- (2) Prenger, F.C., Hill, D.D., Daney, D. E., Daugherty, M. A., Green, G.F. and Roth, E.W., 1996, "Nitrogen Heat Pipe for Cryocooler Thermal Shunt," *Advances in cryogenic engineering*, Vol. 41, pp. 147~154.
- (3) Khatri, A. and Boiarski, M., 1997, "A Throttle Cycle Cryocooler Operating with Mixed Gas Refrigerant in 70 K to 120 K Temperature Range," *Cryocoolers*, Vol. 9, pp. 515~520.
- (4) Cha, D. A., Kwon, O. K., Yun, J. H. and Kim, D. Y., 2010, "An Experimental Study on Semiconductor Process Chiller for Energy Saving," *Proceeding of the KSME Spring Annual Conference*, pp. 371~376.
- (5) Cha, D. A. and Kwon, O. K., 2010, "An Experimental Study on Semiconductor Process Chiller for Dual Channel," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 22, No. 11, pp. 760~766.
- (6) Mori, S., 1986, "Refrigeration Apparatus Using Nonazeotropic Refrigerant Mixture," *Refrigeration*, Vol. 61, No. 702, pp. 1~8.
- (7) Kuraoka, Y. and Urao, T., 1989, "The Present and Future of Cryopreservation," *Refrigeration*, Vol. 63, No. 733, pp. 11~119.
- (8) Holman, J.P., 2000, "Experimental Method for Engineer," 7th ed., *McGraw-Hill*, pp. 51~60.

(1) Park, S. N. and Kim, M. S., 1999, "Performance of