듀얼채널을 적용한 반도체공정용 칠러의 실험적 연구

차 동 안, 권 오 경†
한국생산기술연구원 에너지설비센터

An Experimental Study on Semiconductor Process Chiller for Dual Channel

Dong An Cha, Oh Kyung Kwon†
Energy System Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan 330-825, Korea

(Received June 18, 2010; revision received September 1, 2010)

ABSTRACT: Excessive heat occurs during semiconductor manufacturing process. Thus, precise control of temperature is required to maintain constant chamber-temperature and also wafer-temperature in the chamber. Compared to an industrial chiller, semiconductor chiller's power consumption is very high due to its continuous operation for a year. Considering the high power consumption, it is necessary to develop an energy efficient chiller by optimizing operation control. Therefore, in this study, a semiconductor chiller is experimentally investigated to suggest energy-saving direction by conducting load change, temperature rise and fall and control precision experiments. The experimental study shows the cooling capacity of dual-channel chiller rises over 30% comparing to the conventional chiller. The time and power consumption in the temperature rising experiment are 43 minutes and 8.4 kWh, respectively. The control precision is the same as ±1℃ at 0℃ in any cases. However, it appears that the dual channel's control precision improves to ±0.5℃ when the setting temperature is over 30℃.

Key words: Chamber(챔버), Chiller(칠러), Dual channel(듀얼채널), Energy saving(에너지절감형), Semiconductor(반도체), Wafer cooling(웨이퍼냉각)

기 호 설 명

Aw : 압축기소비동력 [kW]
COP : 성능계수
c_p : 비열 [J/kg・℃]
EER : 에너지 효율비
$\dot{m}$: 질량유량 [kg/h]
Q_{CH} : 채널별 냉각능력 [kW]

† Corresponding author
Tel.: +82-41-589-8528; fax: +82-41-589-8330
E-mail address: kwonok@kitech.re.kr

1. 서 론

국내의 반도체 산업 분야는 세계최고의 기술력과 생산력을 지니고 있으며, 각 반도체 장비 생산업체에서는 세계최고의 기술력을 유지하기 위하여 반도체 장비의 국산화를 위해 연구개발에 투자를 하고 있다. 특히 반도체 칠러는 공정의 고정밀화 대구경화 되어감에 따라 보다 더 사용자 환경에 적합한 장치의 공급을 목적으로 칠러의 지속적인 발전이 요구되고 이에 따라 다양한 기초기술 및 설계기술이 개발되어 지고 있다.

반도체와 LCD, EDS 공정장비용 칠러(Chiller)는 압축, 응축, 팽창, 증발의 과정을 거치는 냉동사이클

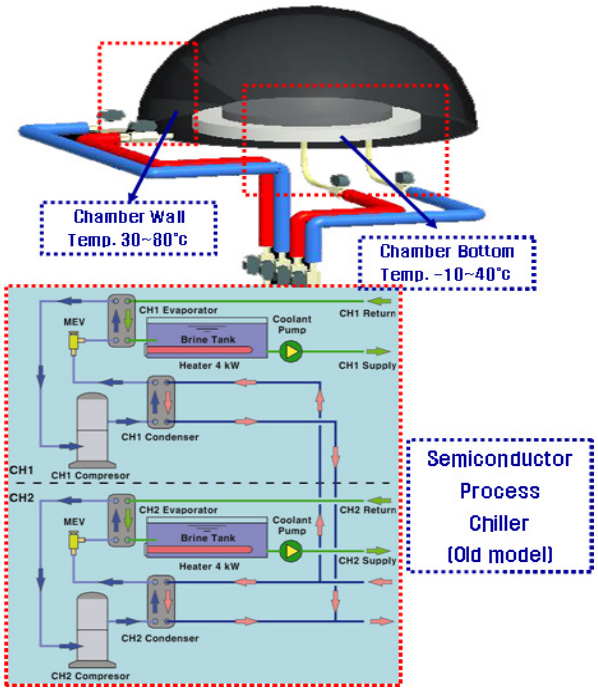

Fig. 1 Schematic diagram of semiconductor cooling process(Old model).

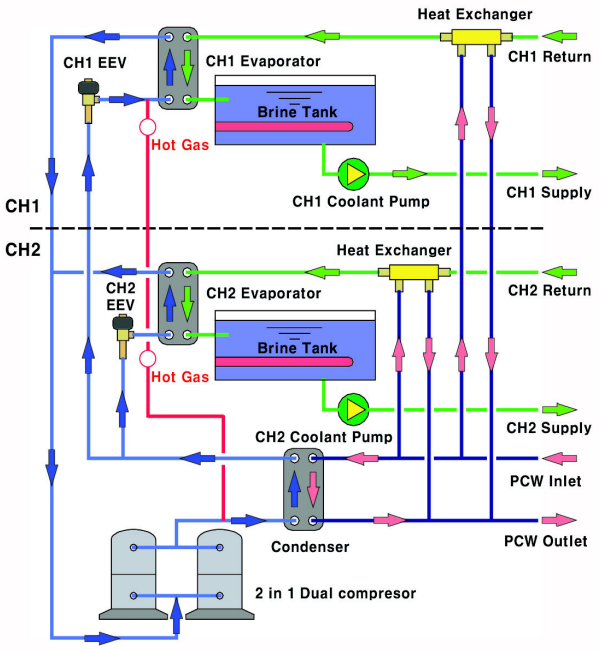

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for semiconductor process chiller.

및 오토캐스케이드 방식[1-3]을 이용한 냉동 사이클, 냉각수를 이용한 냉수 냉각 사이클을 이용하여 이러한 요구조건을 만족시킬 수 있는 장치라 할 수 있다. 특히, 반도체용 칠러는 반도체 챔버에서 발생하는 고온의 열을 제거하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 Wall은 30~80℃, Bottom은 -10~40℃로 저온의 범위로 채널(Channel)을 나누어 정밀하게 제어하는 장치이다.[4-6]

반도체 칠러는 산업용 칠러와는 다르게 운전조건이 24시간 년 중 지속되므로 전력소비량이 대단히 크며, 냉동기의 최적 운전제어를 통한 저소비전력 칠러 개발이 대단히 필요하다.[7] 국내에서 판매되고 있는 반도체 칠러는 1세대 방식 즉, 수동식 팽창밸브(MEV)와 히터 말단 제어방식으로 수입품에 비해 전력소비가 높아 제품 경쟁력이 낮으며, 범용 칠러에 대한 연구는 많이 수행되어졌지만 반도체공정용 칠러에 관한 연구는 전무한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 국내에서 개발된 듀얼채널을 적용하고 전자팽창밸브(EEV)와 핫가스 방식을 적용한 2세대 방식의 반도체 칠러에 관한 실험적 연구를 통하여 칠러의 부하변화 실험, 온도 상승 하강실험, 제어정밀도를 비교실험 함으로써 기존장비(Old model)[8]의 운전 상태를 파악하고 듀얼채널을 적용한 반도체 칠러(New model)와의 성능을 비교하여 반도체 공정용 칠러의 성능개선 방향을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 본 실험대상인 듀얼채널을 적용한 반도체 칠러 냉동사이클의 시스템 개략도이다.

장치는 2개의 채널(Channel)로 구성되며, CH1, CH2는 3HP급 압축기를 듀얼로 연결한 냉동사이클로서 압축기(Compressor), 응축기(Condenser), 팽창밸브(Expansion valve), 증발기(Evaporator), 열교환기(Heat exchanger)로 구성되고, 각 채널 별 공정온도는 -20~80℃ 공정까지 적용이 가능하게 설계, 제작되었다. 공정별 온도 제어는 핫 가스 바이패스 방식과 PCW(Process cooling water)유량제어 방식을 이용하였고, 이를 PID 제어방식으로 각각 제어가 가능하도록 하였다.

Table 1은 본 실험에 사용된 기존방식의 칠러와 듀얼채널 반도체 칠러의 상세 사양을 나타낸 것으로서 기존방식 칠러와 듀얼채널 방식의 차이점은 크게 3가지로 나눌 수가 있다. 첫 번째로 3 HP Digital scroll type 압축기를 CH1과 CH2로 나누어 개별 사이클로 운전되는 방식과 듀얼방식으로 연결되

Table 1 System specification

	Old model	New model
Dimension(mm)	560×980×1500	490×980×1550
Refrigerants	R-507	R-507
Coolant	FC-3283	FC-3283
Compressor	3HP×2 Individual system	3HP×2 Dual system
Expansion V/V	MEV Pressure control	EEV 48-448 step
Brine pump	2HP×2	2 HP×2
PCW cooling	Not use	use
Heater(kW)	4	4
Heat load JIG	7 kW(3/4″) 25 m×2	

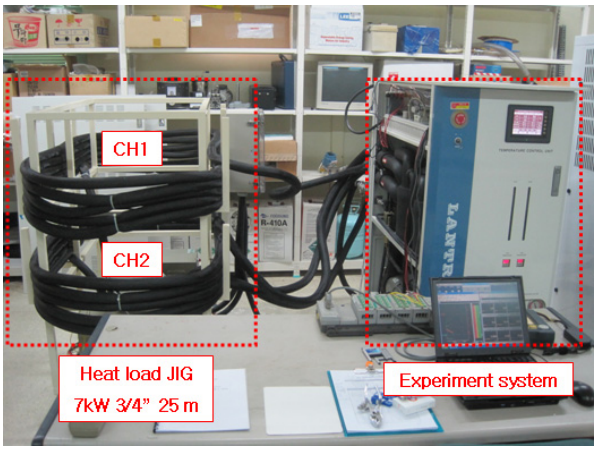

Fig. 3 Heat load JIG and semiconductor chiller.

어 부하변동에 따라 압축기 대수제어로 운전되는 방식이고, 두 번째는 팽창방치를 MEV(Manual Expansion Valve)를 적용하여 사용온도에 따라 수동으로 조절하도록 한 방식과 EEV(Erectronic Expansion Valve)를 적용하여 각 제어영역별 개도를 48~448 step으로 제어하도록 한 방식이며, 세 번째로는 냉각운전 시에 냉동기 full 부하 운전방식과 온도영역을 나누어 20℃ 이상의 조건에서는 PCW를 사용하여 냉각하는 방식의 차이점이 있다.

펌프는 2 HP magnetic pump, 응축기와 증발기는 대향류형식의 판형열교환기를 동일하게 사용하였다. 그리고 Fig. 3과 같이 실제 반도체 공정에서 요구되어지는 조건에 따라 가열히터(Heat load JIG)를 각각 7 kW, 배관 3/4″ 25 m를 상부, 하부로 제작하여 각 채널의 부하를 일정하게 유지하도록 하였으며, 가열히터의 출력을 측정할 수 있도록 전류 및 전압변성기를 설치하였다.

압축기 구동에 필요한 전력을 측정하는 전력계 및 냉각수 입·출구에 열전대와 유량계(유량범위 : 2 m^3/h)를 설치였다. 이를 통하여 냉각수 온도 및 유량을 측정하여 열량을 계산할 수 있도록 하였으며, 냉각수의 온도는 항온조에서 일정온도로 공급할 수 있도록 하였다. 시스템 각 부분의 압력과 온도를 측정하기 위해 고·저압 압력계와 T-type 열전대를 설치했으며, 측정된 온도는 다채널 온도기록장치(40CH)와 RS-232C 케이블을 통해 PC로 전송하여 처리하였다.

2.2 실험방법

Table 2는 반도체 칠러의 실험조건을 나타낸 것으로서 각 채널의 온도영역별 냉각능력 실험, 무부하 운전 시 온도상승 및 하강실험 그리고 사용 빈도가 높은 온도영역에서의 제어정밀도 실험 순서로 진행하였다. 칠러의 운전은 먼저 제어 온도를 설정한 후 PCW를 일정 유량, 압력으로 유입시키고, 칠러를 가동하여 coolant 공급(supply), 환수(return) 온도변화가 ±0.5℃ 이내, 압력은 ±5 kPa이내의 범위에 있을 때 정상상태에 도달하였다고 판단하였다.

냉각능력 실험은 칠러의 운전이 정상상태에 도달하였을 때 가열히터를 가동하여 시스템의 온도, 압력 및 소비전력 등을 측정하였다. 이때 coolant의 압력은 CH1, CH2 모두 600 kPa로 일정하게 유지

Table 2 Experimental conditions

Parameter	Conditions
PCW flow rate(㎥/h)	0.6~1.2(200 kPa)
PCW Temperature(℃)	20
Coolant flow rate(㎥/h)	1.1~1.2(600 kPa)
Cooling capacity experiments	
Coolant Temperature(℃)	0, 20, 40, 60, 80
Heating load(kW)	2~7.5
Temp. up, down experiments	
Coolant Temp(℃)	0~80, 80~0
Heating load(kW)	-
Control precision ratio experiments	
Coolant Temp(℃)	0, 30, 60
Heating load(kW)	2
Operating time	2min ON, 30sec OFF

되도록 설정온도에 따라 return valve를 이용하여 유량 및 압력을 조절하였으며, 가열히터 가동 후 시스템 안정화를 고려해 일정시간(약 10min) 진행 후 coolant 공급온도변화가 ±0.5℃ 이내에서 히터의 부하변화에 따라 냉각능력을 실험하였다.

온도상승 및 하강실험은 초기구동 후 0℃에서 coolant 공급 온도변화가 ±0.5℃ 이내에서 안정화되어 운전되면 목표온도를 80℃로 설정하여 무부하 상태에서 운전하도록 하였다. 이때 목표온도까지 도달하는 시간 및 소비전력을 파악하여 최적의 운전조건을 파악하고자 하였다.

제어정밀도 실험은 사용빈도가 높은 온도대역 즉, 0℃, 30℃, 60℃ 상태에서 히터부하 2 kW를 2분간 공급하고 30초 간 차단하는 방식으로 10회 이상 운전하여 채널 별 공급 온도의 제어 정밀도 및 소비전력을 측정하여 기존 칠러와 듀얼방식 칠러의 제어 정밀도를 측정하여 비교 검토하도록 하였다.

2.3 실험결과 처리

실험에서 CH1과 CH2의 냉각열량은 식(1)을 이용하여 구하였으며, 본 연구에서 냉각열량은 CH1과 CH2의 평균값을 사용하였다.

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

여기서, $\dot{m}_{CH}$와 c_p는 채널의 coolant 질량유량과 정압비열이다. $T_{CH,i}$, $T_{CH,o}$는 각 채널의 coolant 입구, 출구온도를 나타낸다.

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

$$COP = \frac{Q_{CH}}{Aw} \tag{2}$$

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

$$EER = \frac{Q_{CH1} + Q_{CH2}}{Q_{\text{total}}} \tag{3}$$

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 온도별 냉각능력 및 성능변화

Fig. 4와 Fig. 5는 각 채널의 설정 온도에 따른 냉각능력과 성능을 나타낸 것으로서 채널 별로 동일하게 온도를 설정하고 가열히터 출력을 상승시켜 supply 온도가 설정온도 보다 1.5℃ 이상 상승할 때 coolant와의 열평형을 비교하여 부하를 측정하였다. 설정온도가 상승함에 따라 냉각능력이 점차 상승하는 일반적인 경향을 볼 수 있었으며, 듀얼방식 칠러의 경우 기존 방식의 칠러보다 설정온도 20℃ 이상에서 냉각능력이 크게 상승함을 볼 수 있는데 이는 20℃ 이상에서는 PCW 냉각방식으로 운전되어 PCW의 능력만큼 냉각능력이 상승하는 것으로 판단되어진다. 그리고 듀얼방식 칠러의 경우 CH1과 CH2의

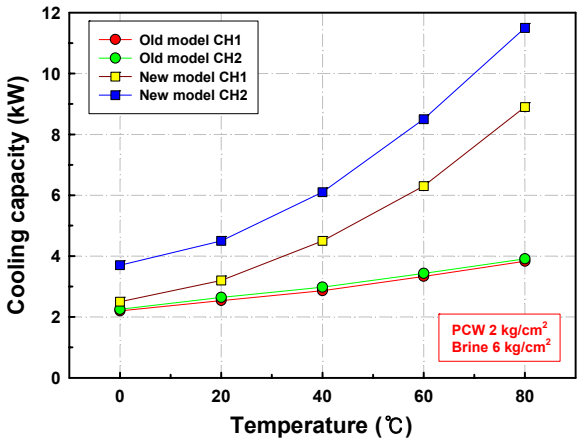

Fig. 4 Variation of cooling capacity with supply temperature.

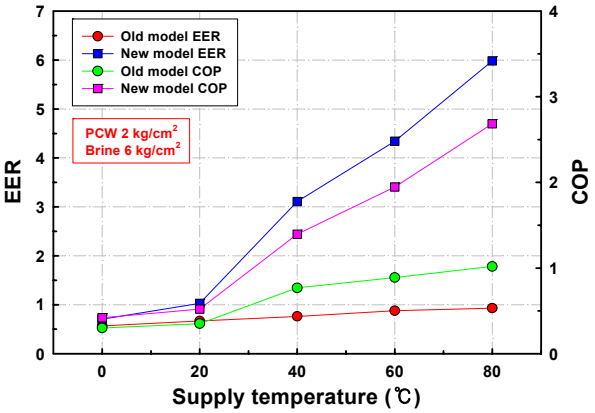

Fig. 5 Variation of EER and COP with supply temperature.

냉각능력이 약 1 kW 정도 차이가 나는 것은 냉매의 불균일한 분배에 기인한 것으로 사료된다.

COP와 EER의 경우도 마찬가지로 20℃ 이상에서 듀얼방식 칠러가 기존 방식의 칠러보다 크게 나타남을 볼 수 있는데 이는 듀얼방식 칠러는 PCW 냉각방식과 핫가스 방식으로 운전되어 히터의 사용이 없으므로 소비전력이 50% 이하로 감소되는 것으로 판단된다.

3.2 온도상승 및 하강실험

Fig. 6과 Fig. 7은 무부하 상태에서 coolant 공급온도가 0℃~80℃, 80℃~0℃까지 도달하는데 소요되는 시간 및 시스템 소비전력을 나타낸 것이다.

온도상승실험은 시스템이 안정화된 0℃에서 최종 목표온도인 80℃까지 기존 칠러는 약 26분, 듀얼방식 칠러의 경우 약 43분이 소요되었으며 평균 소비전력은 12.5 kWh, 8.4 kWh로 각각 측정되었다. 듀얼방식 칠러의 경우 히터를 사용하지 않고 핫가스 방식으로 온도를 상승시키기 때문에 소요시간은 약 17분 정도 증가하지만 전력소비는 크게 감소하는 효과가 있음을 알 수 있었다.

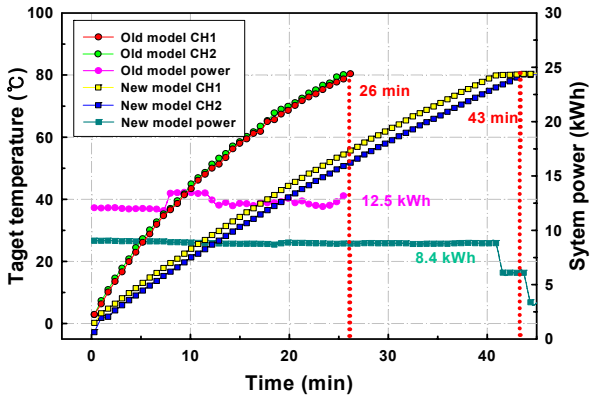

Fig. 6 Variation of target temperature with time(0℃→80℃).

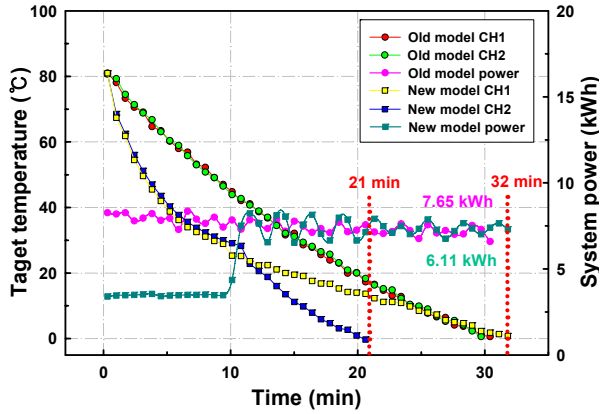

Fig. 7 Variation of target temperature with time(80℃→0℃).

온도하강실험은 시스템이 안정화된 80℃에서 최종 목표온도인 0℃까지 기존 칠러는 약 32분, 듀얼방식 칠러의 CH1은 약 21분이 소요되었으나 CH2의 경우 냉매의 불균일한 분배에 의하여 시간이 지연됨을 알 수 있다. 평균 소비전력은 7.65 kWh, 6.11 kWh로 각각 측정되었으며, 듀얼방식 칠러의 경우 20℃ 이후로 PCW 냉각방식에서 압축기 운전방식으로 전환되면서 소비전력이 약 4 kWh가량 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 온도영역 제어정밀도실험

Fig. 8~Fig. 10은 설정온도 변화에 따른 제어정밀도를 나타낸 것으로 현재 반도체 공정에서 요구되는 제어정밀도 조건을 기준으로 히터부하를 2 kW로 10 cycle(1 cycle : 2min on, 30sec off) 약 30분 실험으로 채널 별 공급온도가 ±1℃에서 일정하게 유지하는지 여부와 이때의 시스템 소비전력의 변화를 실험하였다.

먼저 설정온도 0℃에서 기존방식 칠러의 채널 공급온도는 ±1℃를 유지하지만 시스템 소비전력이 9~16 kWh로 크게 변화하는 것을 볼 수 있고, CH1보다 CH2의 변화 폭이 큰 것을 확인할 수 있었다. 반면에 듀얼방식의 칠러의 경우에는 채널 공급온도가 ±0.5℃를 유지하고 시스템 소비전력이 7~9 kWh로 전력소비가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 온도 제어의 경우 기존방식은 냉동기 운전과 동시에 히터의 on-off 제어로 인하여 온도의 편차가 심하고, 듀얼방식의 경우 냉동기 운전과 핫 가스 바이패스 방식의 적용으로 공급온도의 편차가 작고 히터를 사용하지 않음에 따라 시스템 소비전력도 상대적으로 작은 것으로 판단되어 진다.

설정온도 30℃의 경우에는 공급온도의 편차는 0℃에서와 같은 양상을 볼 수 있으며 듀얼채널의 시스템 소비전력이 약 3.4 kWh로 대폭 감소하는 경향이 나타났다. 이는 냉각수 냉각방식으로 운전되어 압축기 및 히터의 전력소비가 없기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 마지막으로 설정온도가 60℃로 변화했을 때 듀얼방식 칠러 CH1 공급온도의 편차는 0℃에서와 같은 양상을 볼 수 있으나 CH2는 ±1℃로

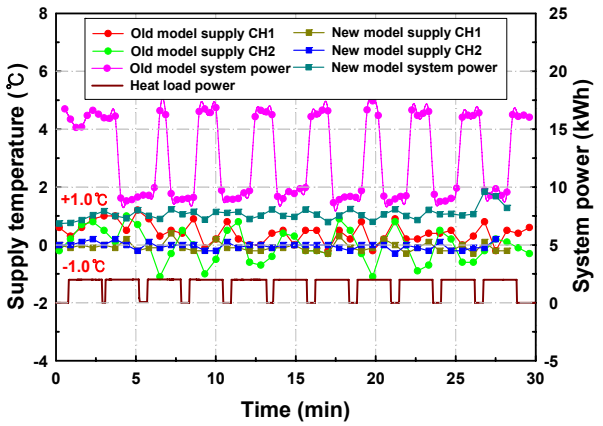

Fig. 8 Variation of supply temperature with time(0℃).

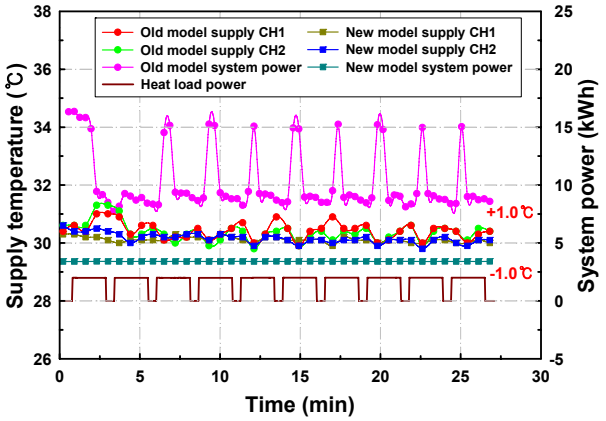

Fig. 9 Variation of supply temperature with time(30℃).

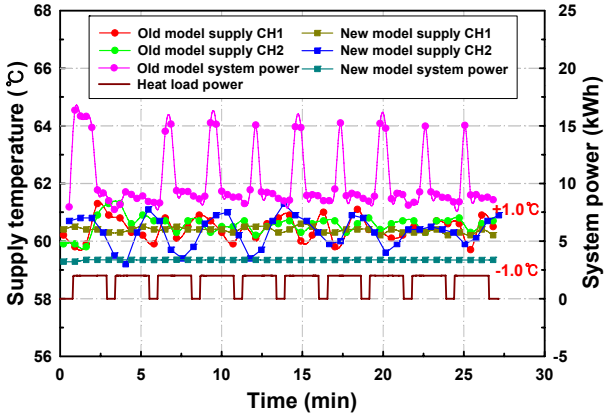

Fig. 10 Variation of supply temperature with time(60℃).

편차가 크게 나타났다. 이는 온도 하강실험에서와 같이 EEV 개도 조절이 CH1과 상이함에 따라 냉매의 불균일한 분배에 기인한 것으로 사료되어진다.

위의 실험결과를 종합하여 보면 반도체 공정용 칠러에서 사용빈도가 높은 온도의 경우 설정온도별 zone의 구분과 20℃의 PCW 냉각방식을 적용한 하이브리드 방식의 접목으로 시스템의 소비전력을 만족하는 절전형 반도체 칠러 시스템의 상용화가 가능할 것으로 판단되어진다. 하지만 설정온도가 30℃ 이상으로 높은 경우에는 듀얼방식에 따른 적절한 EEV 개도조절이 필요한 것으로 예상된다.

4. 결 론

듀얼 채널을 적용한 반도체용 칠러의 성능을 실험적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 냉각능력 및 성능은 기존방식의 칠러보다 30% 이상 증가하는 경향을 보였고, 설정온도 20℃ 이상에서는 2배 이상 증가하는 경향으로 나타났다. 하지만 각 채널의 불균일한 냉매분배문제가 해결되어야 함을 알 수 있었다.

(2) 온도상승 실험에서는 듀얼방식 칠러가 17분 정도 더 소요되었지만 소비전력은 4 kWh 정도 감소하는 것으로 나타났고, 온도하강 실험에서는 설정온도 20℃까지는 시간 및 소비전력이 급격히 감소하는 경향을 보이다가 압축기 운전모드로 전환되면서 소비전력이 7 kWh로 상승하고, 시간이 미세하게 지연되는 경향을 보였다.

(3) 사용빈도가 높은 온도대역에서의 제어정밀도는 0℃ 설정에서 온도편차가 기존 칠러는 ±1℃, 듀얼방식 칠러는 ±0.5℃로 나타났다. 또한 30℃ 이상의 설정에서는 PCW 냉각방식으로 운전되어 압축기 및 히터의 전력소비가 없어 3.4 kWh로 대폭 감소하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 듀얼방식 칠러의 경우 각 채널별로 냉매의 불균일한 분배에 의해 온도 편차가 0.5~1.0℃로 상이하게 나타남을 알 수 있었다.

향후 연구에는 듀얼채널 방식의 불균일한 냉매분배 문제를 해결하기 위하여 EEV를 적용한 실시간 냉매 PID 제어, 온도 대역 Zone 구분 시스템 등의 연구를 추가적으로 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2008년도 중소기업청(과제번호 : S103

6223) 중소기업기술혁신개발사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Cha D. A., Kwon O. K., Yun J. H. and Kim D. Y., 2007, An Experimental Study of Cryochiller System Using Autocascade, Proceeding of the KSME Spring Annual Conference, pp. 1092-1097.
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. Takaishi Y., 1982, A Trend of the Research and Development on the Non-azeotropic Refrigerant Mixtures, Refrigeration, Vol. 57, No. 662, pp. 39-48.
5. Murase, T., Sasaki, C., Matsumoto, K., Kimura, Y., Kotani, M. and Sotani, J., 1993, Power Semiconductor Device Cooling System Using Electrically Insulated Heat Pipe [POWERKICKER-E] for Rolling Stock, Furukawa Review, Vol. 12, pp. 82-93.
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 Presunt and Future of Cryopreservation, Refrigeration, Vol. 63, No. 733, pp. 111-119.
8. 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.