



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

기계 구동식 가스압력제어기 적용
압력제어식 루프 히트 파이프의
밀폐형 압력제어식 정밀온도제어



2023년 02월

부경대학교대학원

지능로봇공학과

박청용

공학석사학위논문

기계 구동식 가스압력제어기 적용
압력제어식 루프 히트 파이프의
밀폐형 압력제어식 정밀온도제어

The logo of Pukyong National University is a circular emblem. It features a central stylized 'P' and 'N' intertwined, with a blue and grey color scheme. The text 'PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY' is written in a circular path around the center, and '부경대학교' is written in Korean at the bottom.

지도교수 정 옥 철

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2023년 02월

부경대학교대학원

지능로봇공학과

박 청 용

박청용의 공학석사 학위논문을 인준함.

2023년 02월 17일



위원장	공학박사	김정수	(인)
위원	공학박사	김창원	(인)
위원	공학박사	정욱철	(인)

목 차

I.	표 목차	iii
II.	그림 목차	iv
III.	논문요약	vi
1.	서론	1
1.1.	연구 배경	1
1.2.	국내의 연구 동향	2
1.2.1.	정밀 가스압력제어기술	2
1.2.2.	정밀 온도제어기술	4
1.3.	연구 목표	9
2.	이론적 배경	11
3.	실험장치 구성 및 실험방법	15
3.1.	기계 구동식 가스압력제어기(MDGPC)	15
3.1.1.	MDGPC 구성	15
3.1.2.	MDGPC 제어방법	17
3.2.	PCLHP 및 실험장치 구성	20
3.3.	실험 방법	24
3.3.1.	MDGPC 최적 제어이득 결정 및 압력제어특성 평가	24
3.3.2.	PCLHP 기반 압력제어식 온도제어특성 평가	27
4.	실험결과 및 토의	31
4.1.	MDGPC 의 압력제어특성	31
4.2.	밀폐형 압력제어식 온도제어특성	35

4.3.	대용량 MDGPC 의 제어이득 결정 및 압력제어특성	38
4.4.	대용량 MDGPC 적용 밀폐형 압력제어식 온도제어특성	49
5.	결론	54
6.	참고문헌	57
	영문 초록	63
	감사의 글	65



표 목차

- Table 1 Design parameters of the PCLHP
- Table 2 Control characteristics of the MDGPC to ± 1 kPa step changes in set-point values at various proportional gains (K_p)



그림 목차

- Fig. 1 Schematic of the heat pipe
- Fig. 2 Schematic of the gas-controlled heat pipe
- Fig. 3 Schematic of the LHP
- Fig. 4 Thermodynamic operation curve of the LHP
- Fig. 5 Schematic of the PCLHP
- Fig. 6 Thermodynamic operation curve of the PCLHP
- Fig. 7 Volume change of the variable-volume bellows chamber during expansion and compression processes
- Fig. 8 Photograph of the MDGPC
- Fig. 9 Block diagram of the gas pressure control process of the MDGPC with the stepped proportional control
- Fig. 10 Block diagram of the gas pressure control process with the proportional control
- Fig. 11 Block diagram of the gas pressure control process with the proportional integral control
- Fig. 12 Structure and dimensions of the wick
- Fig. 13 Structure and dimensions of the isothermal region
- Fig. 14 Schematic of the PCLHP
- Fig. 15 Schematic of the test setup
- Fig. 16 Stability of the MDGPC with the proportional control

- Fig. 17 Resolution of the MDGPC with the proportional control
- Fig. 18 Response of the MDGPC to external pressure disturbances
- Fig. 19 Response of the MDGPC to stepwise set-point value changes
- Fig. 20 Change in the stability of the pneumatically-controlled temperature of the isothermal region
- Fig. 21 Comparison of the stability characteristics between the commercial GPC and MDGPC
- Fig. 22 Stepwise temperature control with the MDGPC
- Fig. 23 Responses of the MDGPC with different gains to stepwise set-value changes
- Fig. 24 Pressure stability changes inside the variable-volume chamber before and after the MDGPC operation.
- Fig. 25 Response of the MDGPC to increasing pressure steps
- Fig. 26 Response of the MDGPC to external pressure disturbances with the P and PI controls
- Fig. 27 Response of the MDGPC to stepwise set-value changes
- Fig. 28 Comparison between the P and PI controls
- Fig. 29 Dimensions of the dry-block comparator
- Fig. 30 Large-scale stepwise pressure changes generated by the MDGPC
- Fig. 31 Horizontal temperature uniformity of the working space of the isothermal region
- Fig. 32 Vertical temperature uniformity of the working space of the isothermal region

기계 구동식 가스압력제어기 적용 압력제어식 루프 히트 파이프 기반 밀폐형 압력제어식 정밀 온도제어기술 구현

박 청 용

부경대학교 대학원
지능로봇공학과

요 약

온도는 다양한 현대 산업 및 연구분야에서 필수 물리량으로 사용되며, 정밀 온도제어는 이들 분야에서 요구되는 핵심제어기술이다. 정밀온도제어는 빠른 제어속도, 향상된 안정도 및 정밀도 등의 요건을 만족해야 한다. 기존 온도제어기술은 제어기기의 유한한 물성으로 인해 균일한 온도장 형성에 제약을 받거나 고속 온도변화 시 오버 슈트 및 언더 슈트를 수반하는 불안정한 거동을 보이는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 제안된 압력제어식 온도제어기술은 피동형 2상 열전달장치인 압력제어식 루프 히트 파이프(pressure-controlled loop heat pipe, PCLHP)의 고유한 열수력학적 연결관계를 이용하여 2상 유체 저장소인 보상실 내 압력제어를 통해 증발기에서 발생하는 포화증기의 온도를 제어하는 기술이다.

기존의 압력제어식 온도제어기술은 PCLHP의 보상실 압력제어를 위해 압력 소스와 싱크가 존재하는 개방구조의 상용 가스압력제어기(gas pressure controller, GPC)를 사용하였으며, 이에 따라 보상실 압력제어 중 대기로의 작동유체 유출 가능성이 존재하였다. 특히, PCLHP의 고온 운전을 위해 사용할 수 있는 알칼리 금속과 같은 작동유체는 유출 시 GPC의 오염, 손상 및 안전상의 문제를 유발할 수 있다는 점에서 압력제어식 온도제어의 실용성을 크게 제한한다. 이에 따라 본 연구에서는 작동유체 유출을 방지할 수 있는 밀폐형 가스압력제어기를 개발하고, 이를 이용한 밀폐형 압력제어식 온도제어 기술을 확립하고자 하였다.

본 연구에서는 밀폐형 압력제어식 온도제어기술 구현을 위해 밀폐형 공압회로 기반 가변 체적형 기계 구동식 가스압력제어기(mechanically-driven gas pressure controller, MDGPC)를 제작하였다. 기계 구동식 가스압력제어기는 벨로우즈 형태의 가변체적형 챔버와 챔버의 축방향 선형 변위를 제어하기 위한 선형 구동기로 구성하였으며, 가변체적형 챔버의 축방향 변위변화에 따른 내부 체적 변화를 통해 내부 압력변화가 유도되도록 제작하였다. 가변체적형 챔버는 기준 변위 80 mm에서 가동 변위 ± 50 mm를 갖는 챔버를 제작하였다. 선형 구동기의 경우 250 mm의 총 구동범위와 0.01 mm의 변위제어 분해능을 갖는 선형 구동기를 사용하였다. 이후 기계 구동식 가스압력제어기의 압력제어특성 시험을 진행하였으며 제작된 MDGPC의 고안정·고속·강건 압력제어특성을 확인하였다.

본 연구에서는 스테인리스 스틸 재질의 원통형 외을 사용하는 PCLHP를 제작하였다. 제작된 PCLHP의 보상실은 전체 PCLHP 부피의 약 50 %의 체적을 갖도록 설계하였으며, 내부 압력제어를 위해 보상실 상단에 압력제어공 및 압력 측정공을 갖도록 제작하였다. 또한, 작동유체는 상온 온도제어를 위해 증류수를 사용하였으며, 보상실 내 압력제어를 위한 제어 가스는 고순도 헬륨(99.999 % He)을 사용하였다. 본 연구에서는 MDGPC를 적용한 밀폐형 압력제어식 온도제어기술의 구현 및 온도제어특성 평가를 통해 약 0.01 °C의 온도 안정도 달성을 확인하였으며, 이는 기존의 상용 GPC기반 압력제어식 온도제어특성과 동등한 수준임을 확인하였다. 또한, 계단형 압력제어 구현에 따른 고속 온도제어능력 및 오버 슈트 및 언더 슈트 없는 안정적 온도제어 역시 달성됨을 확인하였다. 본 연구에서는 온도제어 범위 확장 및 제어 안정도 향상을 위해 대용량 가변체적형 챔버를 제작하고 개선된 P 제어를 기반으로 약 1 Pa의 제어압력 안정도를 달성하였다. 이를 이용한 밀폐형 압력제어식 온도제어 수행 시 약 85 °C에서 110 °C의 온도제어범위에서 0.01 °C의 온도 안정도를 갖는 안정적인 고속·정밀 압력제어식 온도제어를 달성하였다.

1. 서론

1.1. 연구 배경

현대의 다양한 고부가가치 산업과 기초과학 연구에서 높은 온도 안정도를 갖는 정밀 온도제어기술은 필수적이다. 이러한 정밀 온도제어기술은 식품 압출공정 중 최적의 품질을 위한 가공온도유지[1] 및 식품 포장을 위한 고압 멸균 공정 중 정상상태 온도제어[2], 반응기 기반 제약 공정을 위한 장시간 정밀 온도제어[3], 고수율 수소 생산을 위한 높은 안정도의 온도제어[4] 및 수소의 안정적인 저장을 위한 온도제어[5]와 물질 고유 상변화 온도인 액상선 온도(liquidus temperature) 결정을 위한 고안정·고속 온도제어[6]에 이르기까지 매우 다양한 산업분야 및 기초 연구에서 요구되는 핵심 기술이다. 이러한 정밀 온도제어기술의 요건으로는 크게 정밀도, 안정도, 빠른 제어속도 등이 존재한다. 하지만 기존의 온도제어기술인 열량제어식 온도제어기술과 같은 온도제어 대상의 물성에 의해 제약을 받거나[7] 온도의 실시간 측정 및 측정온도 피드백을 통한 제어 중 최적 설정 이상의 빠른 온도제어 수행 시 온도의 오버 슈트 및 언더 슈트와 같은 불안정한 거동이 발생하는 특징을 가져 정밀 온도제어기술의 요건에 부합하지 않는 경우가 있다[8].

이러한 한계를 보완하기 위해 최근 제안된 압력제어식 온도제어기술은 피동형 2상 열전달 장치인 루프 히트 파이프(loop heat pipe, LHP)를 이용한 압력제어식 온도제어기술로, 본 기술은 상기 정밀 온도제어 요건들을 모두 만족하는 고안정·고속 정밀 온도제어기술이다[9]. 압력제어식 온도제어기술은 압력제어식 루프 히트 파이프(pressure-controlled loop heat pipe, PCLHP)의 고유한 열수력학적 특성인 증기상 작동유체를 생성하는 증발기의 온도와 여분의 2상 유체를 보유하는 보상실 압력 간 고유한 연결관계를

이용하여 보상실 내 제어가스의 압력제어를 통해 증발기에서 발생하는 증기 온도를 제어하는 기술이다. 제안된 온도제어기술은 증기상 작동유체의 고속 유동 영역을 환형으로 구성하여 원통형 작업공간을 형성하였다는 특징을 가지며, 약 240 °C의 운전온도에서 온도 안정도 약 0.02 °C의 안정적인 온도제어 달성을 보였다[10]. 다만, 기존의 PCLHP 기반 압력제어식 온도제어기술은 보상실 압력제어를 위해 사용한 상용 가스압력제어기(gas pressure controller, GPC)의 개방특성에 따라 작동유체 유출가능성과 이를 방지하기 위한 복잡한 압력제어절차가 존재한다. 작동유체의 유출은 가스압력제어기의 파손 및 오염을 유발할 수 있으며, 고온의 온도제어를 위해 알칼리 금속과 같은 반응성 작동유체를 사용할 경우 유출에 따른 안정성 문제가 초래될 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 작동유체의 유출 우려가 없는 밀폐형 압력제어식 정밀 온도제어기술을 실현하고자 하였다. 이를 위해, 본 연구에서는 가변체적형 챔버 및 선형 구동기로 구성된 기계 구동식 가스압력제어기(mechanically-driven gas pressure controller, MDGPC)를 제작하여 고속·정밀 압력제어기로서의 성능을 검증하고자 하였다. 이후 MDGPC를 적용한 압력제어식 온도제어를 실현하여, 밀폐형 정밀 압력제어식 온도제어기술을 확립하고자 하였다.

1.2. 국내외 연구 동향

1.2.1. 정밀 가스압력제어기술

정밀 가스압력제어기술은 공정 자동화와 같은 다양한 산업분야에서 필수적으로 요구되는 기술이며[11], 이에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다[12]. 본 기술의 실현을 위한 GPC는 산업분야 응용에 더해 압력 및 관련

물리량 측정기의 정밀 교정 및 시험 수행을 위한 필수 장비로 사용되고 있으며[13, 14], 이에 따라 GPC의 구성 및 성능 향상을 위한 제어기법 관련 산업의 관심이 고조되고 있다. 가스압력제어기술은 제어를 요하는 회로의 개폐여부에 따라 외부 압력 소스 및 싱크(예. 가스 실린더 및 진공 펌프)를 사용하는 개방형 공압회로 압력제어(open pneumatic circuit control, 이후 개방형 압력제어)와 별도의 장치를 요하지 않는 밀폐형 공압회로 압력제어(closed pneumatic circuit control, 이후 밀폐형 압력제어)로 분류된다[15].

개방형 압력제어 관련 연구는 공압회로 내 접속부의 전달특성 변화에도 강건한 제어가 가능한 2 자유도 제어기 개발에 관한 연구[16], 안정화 필터와 모델링 오차 보상 필터의 적용을 통한 시스템 피드백 특성 향상 관련 연구[17] 및 제어 중 모델링 오차의 영향이 존재하는 주파수 영역에서 제어이득 조절이 가능 제어기 개발 관련 연구[18]가 수행된 바 있다. 또한, 보다 정밀한 제어를 위해 제어기의 성능향상 뿐만 아니라 다단제어를 통해 기화된 액화천연가스의 압력제어 안정도를 향상시킬 수 있는 압력변화 보상 제어기 설계와 관련된 실험적 연구[19] 및 압력제어밸브 내부구조에 따른 압력강하의 수치해석을 통한 향상된 압력제어능력을 갖는 압력제어기 설계 관련 연구가 수행되었다[20].

일반적으로 가스압력제어는 상기 연구들과 같이 솔레노이드 밸브를 기반으로 수행되는 압력제어가 주를 이루어 왔다. 다만, 솔레노이드 밸브를 통한 압력제어는 내부 코일 사용에 따른 에너지 과소비가 필연적이며 이에 따라 압력제어 중 발생하는 에너지 손실 및 온도에 대한 민감도를 개선하기 위해 압전 밸브로 대체가능여부 관련 연구가 진행되었다[21]. 이와 관련하여 PID (proportional integral derivative) 제어 기반 압전 밸브 제어를 통한 개방형 공압회로 내 압력제어성능 연구[22] 및 압전 밸브 기반 압력제어기 개발 및

개발된 압력제어기의 응답특성 향상을 위한 PID-PWM (proportional integral derivative-pulse width modulation) 제어기 개발 관련 연구[23] 역시 진행된 바 있다. 다만, 개방형 압력제어는 제어의 편리성으로 인해 활발한 연구가 진행되었음에도 불구하고 추가적인 압력 소스 및 싱크의 설치가 용이하지 못한 특수환경 적용이 어렵다는 한계를 가져, 밀폐형 압력제어 관련 연구들도 지속적으로 수행되었다.

밀폐형 압력제어 관련 연구로는 체내 일정유량의 혈액 순환을 위한 유량제어용 공압식 펌프 관련 연구[24] 및 밀폐형 공압회로 내 유량제어 기반 감염방지용 산소공급기 관련 연구[25]가 진행된 바 있으나, 이들 연구는 공압회로 내 작동유체의 유량제어를 위한 연구이며 밀폐형 공압회로 내 압력제어관련 연구는 부족하다. 특히, 압력제어식 온도제어의 높은 온도안정도 실현을 위해 요구되는 수십 Pa 수준의 제어압력 안정도를 갖는 밀폐형 가스압력제어는 보고된 바가 없는 실정이다.

1.2.2. 정밀 온도제어기술

상기에 기술한 바와 같이 다양한 산업 및 연구분야에서 정밀 온도제어기술은 필수적으로 요구되는 기술이며, 이와 관련된 다양한 온도제어기술이 연구된 바 있다. 대표적인 온도제어기술로는 열량제어식 온도제어기술로 발열체 또는 냉동기를 사용하는 방식이며 해당 기술은 온도제어 중 특정 지점의 측정온도를 통해 PID 제어 기반 히터를 사용하여 작업공간 내 온도를 제어한다[8]. 다만, 열량제어를 통한 온도제어는 최적설정 이상의 속도를 갖는 온도제어를 요하는 경우 측정온도의 오버 슈트 및 언더 슈트 등의 불안정한 거동을 보이는 한계를 가지며, 외기온도와 목표온도의 온도차가 커짐에 따라 필연적으로 작업공간의 온도 균일도가 나빠진다는 단점이 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위해 보다 높은 온도 균일도를 갖는 다중 히터를 적용한 작업공간 내 온도제어기술

관련 연구[7]와 다중요소 가열로를 통한 온도제어 중 작업공간 내 온도제어특성의 향상을 위한 히터 제어관련 연구가 수행된 바 있다[26]. 하지만 다중요소가열을 통한 온도제어 기술은 고온의 작업온도를 요하는 경우 균일한 온도장 실현에 있어 여전히 제약이 존재하며[9], 온도제어속도 측면에서도 한계가 존재한다.

이러한 한계는 주로 온도제어 대상 물체의 유한한 물성에 기인하며 이를 보완하기 위해 전기로의 등온블록을 대신하여 히트 파이프를 사용한 온도제어 기술이 1976 년 제안되었다[27]. 해당 기술에 사용된 히트 파이프는 대표적인 피동형 2 상 열전달 장치로 밀폐된 용기 내 작동유체의 포화상태를 유지하도록 고안된 장치로 작동유체 상변화에 따른 대량의 열전달 용량과 증기상 작동유체의 유동에 따른 외부로의 에너지 소모없이 고속으로 열을 전달하는 특성을 갖는다[28]. Figure 1 은 이러한 히트 파이프의 개략도와 간략한 운전을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯 열원이 접하는 영역인 증발부에서 작동유체의 증발 및 열흡수가 발생하며 응축부에서 작동유체의 응축에 의한 열제거가 수행되며, 증발부에서 응축부로 열이 전달된다. 이러한 히트 파이프를 전기로 등온블록을 대신할 수 있도록 구성하여 고온 전기로 내 향상된 작업공간 온도 균일도를 갖는 온도제어가 가능하며, Bassini 등은 소듐을 작동유체로 사용한 가스 압력제어식 히트 파이프(gas-controlled heat pipes,

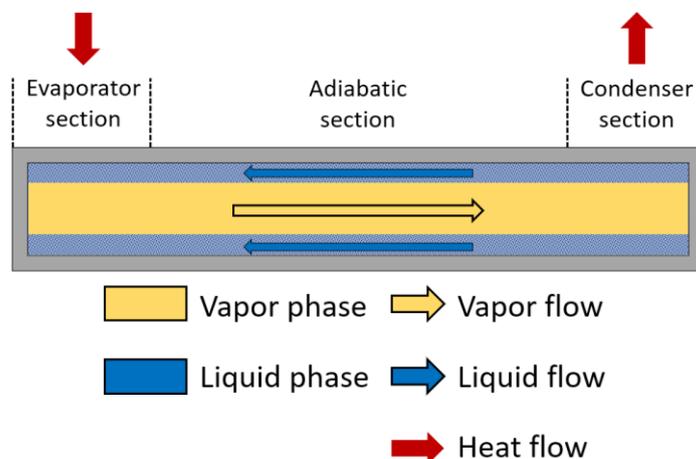


Fig. 1 Schematic of the heat pipe [28]

GCHPs)를 통해 약 1000 °C에서 작업공간 내 25 cm의 수직 온도 균일도 약 10 mK 을 달성하였다[29]. 또한, Gotoh 등은 소듐을 작동유체로 사용한 GCHP 를 통해 709 °C에서 945 °C까지의 구간에서 온도제어를 구현하였으며, 약 798 °C 에서 작업공간 내 30 cm 의 수직 온도 균일도 약 0.4 mK 를 달성하였으며[30], Figure 2 는 사용된 가스 압력제어식 히트 파이프의 개략도를 보여준다.

최근에는 위 소개한 연구보다 더욱 저온에서 GCHPs 를 적용한 온도제어도 연구된 바 있다. Merlone 등은 235 °C에서 445 °C까지의 구간에서 수은을 작동유체로 하며, 3 개의 온도 측정구를 갖는 구조의 GCHP 를 제작하여 히터와 압력의 PID 제어 기반 동시제어를 통해 약 445 °C에서 작업공간 내 20 cm의 수직 온도 균일도 약 5 mK를 달성하였다[32]. 이러한 GCHPs 기반 정밀 온도제어기술은 히트 파이프 증발부에서 발생된 증기상 작동유체의 고속 유동에 의해 형성되는 등온영역의 온도를 내부 압력제어를 통해 구현하는 기술이며, 기존 온도제어방식으로는 도달할 수 없는 수준의 균일도를 갖는다는 장점이 존재한다. 하지만 히트 파이프의 열역학적 운전특성에 의해 동일 열입력 제어 중 압력제어만을 통한 온도제어범위가 제한적이라는 한계를 갖는다. 이에 따라 히트 파이프의 본질적인 열전달 한계를 극복하는 루프 히트

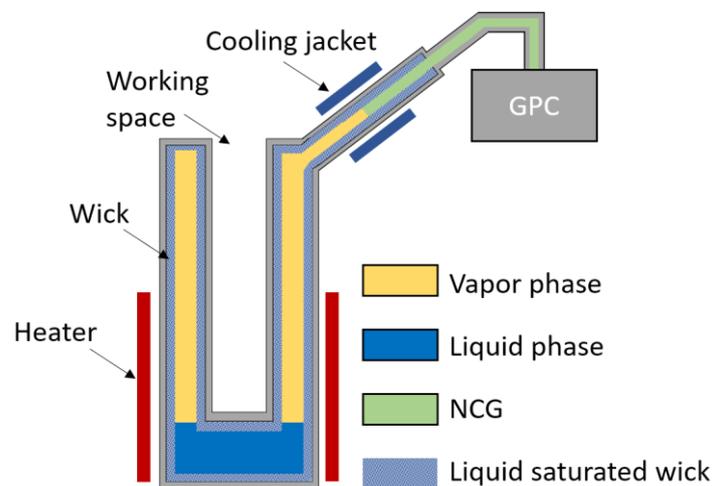


Fig. 2 Schematic of the gas-controlled heat pipe [31]

파이프(loop heat pipe, LHP)를 통한 온도제어기술 역시 지속적으로 연구되어왔다.

Maidanik 등은 우주선에서의 전자장비(열원) 온도유지를 위해 LHP 를 도입하였으며, 작동유체 저장조에 부착된 히터의 열작용을 통해 전자장비의 온도를 성공적으로 유지하였다[33]. 이처럼 초기의 LHP 작동온도 제어 관련 연구에서는 보상실 또는 보상실로 회귀하는 액체상 작동유체 수송관의 열작용을 통해 보상실 포화압력을 제어하여 작동온도를 제어하는 방법을 사용하였다[34]. 다만, 보상실 내부 온도는 액체상 작동유체의 회귀와 워를 통한 증발기로부터의 열유출 등 다양한 요소들에 의해 복잡한 열균형을 가지므로, 보상실 및 액체 수송관의 직접 가열 및 냉각을 통한 온도제어는 다소 느리고 부정확하며, 제어온도의 예측이 어렵다는 단점과 온도제어 범위가 좁다는 한계를 가졌다[35].

이에 따라 압력제어밸브의 도입으로 증기 흐름의 유동 저항을 변경하여 보상실과 증발기 간 포화압력차를 제어함으로써 PCLHP 의 온도제어를 수행하는 방법 역시 제안된 바 있다[36]. 또한, 낮은 열원온도에 의해 증발기를 통해 응축기로 향하는 증기상 작동유체의 온도가 일정온도에 도달하지 못할 경우 증기관에 위치한 밸브와 보상실로 연결된 바이패스 수송관을 통해 응축기를 거치지 않고 보상실로 회귀시키거나 온도에 따라 바이패스의 비율을 조절하여 열원의 일정온도 유지를 달성하는 연구 역시 수행된 바 있다[37]. Mishkinis 등은 이러한 압력제어 기반 LHP 온도제어기술을 확장하기 위해 2 방향 제어밸브의 도입으로 일정온도 도달 전 증기상 수송관의 흐름을 통제하여 바이패스 수송관으로의 증기상 작동유체 유동에 따른 손실을 감소시키고자 하였으며, 기존 대비 원활한 LHP 시동에 성공하였다[38]. 이와 유사한 방식을 통해 Hartenstine 등은 2 방향 제어밸브 적용 루프 히트 파이프를 통한 우주환경에서의 전자장비 온도유지성능을 확인하였으며, 영하

60 °C 의 응축부 온도 조건에서 정상작동 및 증발기 온도 유지성능을 확인하였다[39]. 또한, Konstantin 등은 히터가 적용된 벨로우즈 형태의 3 방향 제어밸브를 구성하여 압력제어와 밸브의 온도제어를 동시 수행하며, 다양한 조건에서 약 ± 0.5 °C 이내로 열원의 온도유지를 달성하여 보다 향상된 성능을 보였다[40].

위 방식의 제어는 이전 방식 대비 넓은 온도제어 범위를 가지며 빠른 제어가 가능하다는 장점을 가졌으나, 압력조절밸브에 의한 추가적인 유동 저항에 따라 최대 모세관압력차와 유동손실의 균형이 요구되는 조건에 의해 온도제어 범위가 제한된다는 한계를 가졌다. 최근 연구에서는 가변 전도성 히트 파이프 기반 온도제어기술[41-44] 구현을 위해 사용된 벨로우즈형 챔버를 적용하고 스텝모터를 이용하여 벨로우즈 챔버 변위제어를 수행함으로써 약 1000 °C에서 가스압력제어 히트 파이프의 운전온도를 약 1.4 mK의 온도 안정도(측정온도의 표준편차)를 갖도록 제어한 결과가 보고된 바 있다[45]. 이러한 기술은 히트 파이프를 기반으로 하기에 매우 안정적인 온도제어가 가능하다는 장점을 가짐에도 불구하고 느린 온도제어 속도와 좁은 온도제어 범위라는 본질적인 한계를 가진다[46].

이에 따라 최근 Joung 등에 의해 제안된 PCLHP 기반 압력제어식 온도제어기술은 PCLHP 보상실 내 불응축 가스압력제어를 통해 증기상 작동유체 유동영역에 위치한 등온영역 내 약 0.02 °C의 온도 안정도를 갖는 빠르고 안정적인 정밀 온도제어기술을 보고한 바 있다[47]. 또한, Joung 등은 해당 기술을 이용하여 오버 슈트 및 언더 슈트 없는 정밀 온도제어를 통해 ITS-90 의 고정점 온도인 주석의 응고점을 실현하였다[48]. 이후 압력제어식 온도제어기술의 고속온도제어특성을 기반으로 구현된 약 0.7 °C 폭의 열펄스 적용을 통해 기존의 ITS-90 고정점 중 주석의 응고점이 해당 시험을 통해 측정된 값과 약 3.23 mK 만큼 차이가 존재한다는 사실을 확인하였다[49].

압력제어식 온도제어기술은 약 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 달하는 높은 온도안정도의 달성을 보였으나, 보상실과 증발기 간 압력의 역전가능성에 따라 급격한 제어가스 압력증가에 의한 온도제어 시 일시적 불안정성이 발현되는 특성을 가진다[10]. 이러한 불안정성을 회피하기 위해 제어가스압력증가 시 일정한 시간변화율을 갖도록 하여 압력제어식 온도제어를 수행한 연구가 보고된 바 있으며, 해당 연구에서 사용된 Dowtherm A 를 작동유체로 사용한 PCLHP 의 경우 50 Pa/s 의 압력증가율에서 불안정성 발현 없이 빠른 승온이 가능함을 확인하였다[50]. 또한, 압력제어식 온도제어에 대한 히트 싱크(heat sink) 온도의 영향을 평가하기 위해 다양한 응축기 공급 냉각수 온도에서의 압력제어식 온도제어기술의 작동특성에 대한 연구가 수행되었고[51], 히트 싱크 온도 상승에 따라 계단형 제어가스 압력변화에 대한 안정적 압력제어식 온도제어의 범위가 확장됨을 확인하였다. 이에 더해, 열입력에 따른 안정적인 온도제어범위의 영향에 관한 연구가 진행된 바 있으며, 열입력의 상승에 따라 안정적 계단형 압력제어식 온도제어범위가 확장됨을 확인하였다[53].

1.3. 연구 목표

본 연구에서는 기존 압력제어식 온도제어기술과 동일한 성능을 가지며 작동유체의 유출가능성이 없는 밀폐형 공압회로 기반 MDGPC 를 개발하고, 이를 적용한 밀폐형 압력제어식 정밀 온도제어를 실현하고자 하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 가변체적형 챔버 및 선형 구동기 기반 MDGPC 제작과 밀폐형 공압회로 내 제어압력 안정도 유지능력, 외부 압력 외란에 대한 설정압력 회복능력, 빠르고 안정적인 설정압력 변화 구현능력의 측면에서 MDGPC 의 압력제어특성을 평가하고자 하였다. 특히, MDGPC 압력제어성능 개선을 위한 제어기법의 최적화를 수행하고자 하였으며, 이를 적용한 MDGPC 의 압력제어특성을 평가하고자 하였다. 이와 같이 MDGPC 의 개발을

완료한 후, MDGPC 적용 PCLHP 기반 밀폐형 압력제어식 온도제어의 온도제어특성 평가를 수행하여 밀폐형 압력제어식 정밀 온도제어기술을 구현하고자 하였다. 또한, 본 연구에서는 기존 상용 GPC 기반 압력제어식 온도제어특성 평가를 수행하여 밀폐형 압력제어식 온도제어특성 평가의 결과 간 비교를 제시하고자 하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 제작된 MDGPC를 통한 밀폐형 공압회로 내 고속·고안정 압력제어의 실현과 이를 적용한 밀폐형 압력제어식 온도제어기술을 통해 고속·고안정 정밀 온도제어의 달성을 목표로 연구를 진행하였다.



2. 이론적 배경

2.1. 압력제어식 루프 히트 파이프(PCLHP) 작동온도제어

압력제어식 온도제어는 피동형 2 상 열전달 장치인 LHP 의 고유한 열수력학적 연결관계를 이용하여 LHP 의 2 상 작동유체 저장소인 보상실의 압력을 제어함으로써, 증발기에서 배출되는 포화증기의 온도를 제어하는 기술이다[9]. Figure 3 은 환형의 증기상 작동유체 유동 영역 내 위치하는 원통형의 등온영역을 갖는 LHP 의 구조를 보여주며, LHP 의 작동을 열역학적 선도에 표현하면 Figure 4 와 같다.

상기에 기술한 바와 같이 LHP 의 구동은 LHP 의 보상실의 포화압력과 증발기에서 발생하는 증기의 포화온도의 연결관계인 고유한 열수력학적 특징에 의존한다. PCLHP 의 작동유체 순환 구동력인 보상실과 증발기 간 포화압력차는 작동유체의 유동손실과 균형을 이루기 때문에 일정한 열입력 조건에서 일정 압력차를 유지하게 된다. 따라서 보상실 압력변화를 유도하는

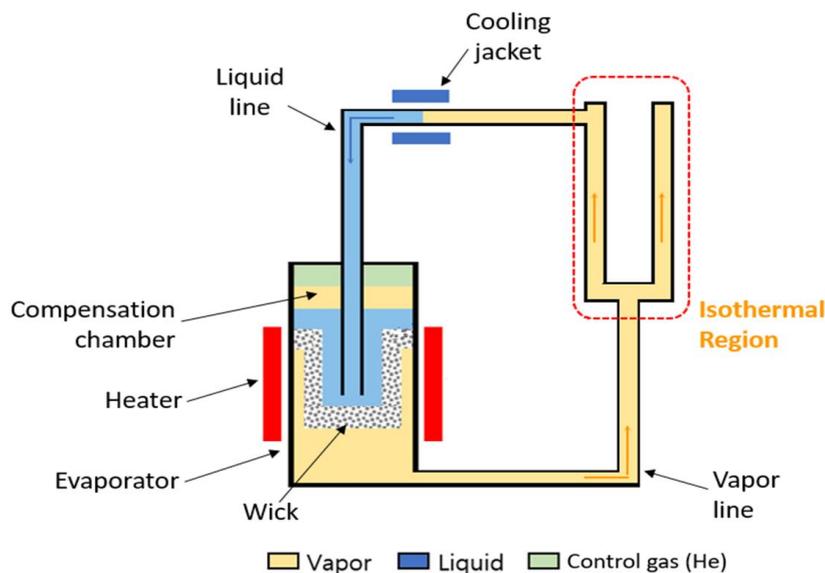


Fig. 3 Schematic of the LHP [9]

경우 이에 따라 증발기 내 증기상 작동유체의 포화압력이 일정 포화압력차 유지를 위해 변하며 포화증기의 온도가 이에 따라 변하게 된다. 이러한 원리를 이용해 LHP 작동유체와 혼합되지 않는 불응축 제어가스와 가스압력제어기를 이용하여 보상실 내부 압력제어를 통해 증발기 배출 증기상 작동유체의 온도를 제어하도록 고안된 장치가 압력제어식 루프 히트 파이프이다.

Figure 5는 이러한 PCLHP의 개요도를 보여준다. PCLHP는 외부의 GPC를 이용하여 보상실 내부 압력제어가 가능한 구조를 가지며, PCLHP의 고유한 열수력학적 온도-압력 연결관계에 의해 보상실 내부 압력제어를 통해 증발기 배출 증기의 온도가 제어된다. 특히, 해당 PCLHP는 고속의 증기 유동 영역에 환형의 구조로 제작된 증기 이송관을 가져 내부에 형성된 원통형의 등온영역 온도제어가 가능하다. 이러한 압력제어식 온도제어기술은 기존 온도제어기술 대비 매우 빠른 제어속도를 가지며, 넓은 온도범위에서 안정적이고 정밀한 압력제어가 가능함을 보였다[10]. 해당 기술에서 보상실 내부 압력제어에 따른 증발기 내부 압력변화($\Delta p_{\text{Sat, evap}}$)는 식 (1)와 같이 표현된다. 해당 기술은 보상실 압력제어에 따른 증발기에서 발생한 증기의 포화압력 및 포화온도가

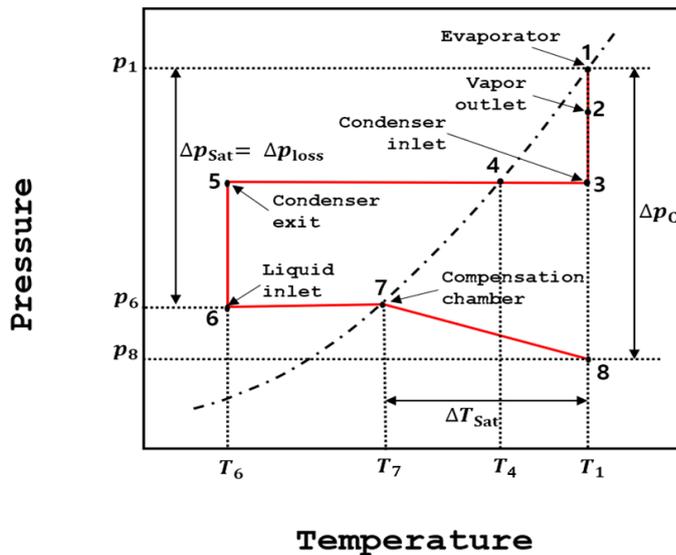


Fig. 4 Thermodynamic operation curve of the LHP [52]

제어되는 원리를 이용하기 때문에 압력변화에 따른 온도변화를 열역학적 관계식인 Clapeyron-Clausius 근사식에 의해 식 (2)과 같이 예측이 가능하다는 특성 또한 가진다[10].

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{Sat, evap}} &= \Delta p_{\text{Sat, evap } 2}(\Delta T_{\text{Sat, evap } 2}) - \Delta p_{\text{Sat, evap } 1}(\Delta T_{\text{Sat, evap } 1}) \\ &= \Delta p_{\text{C.C.}} = \Delta p_{\text{control}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$T_{\text{Sat, evap } 2} = \frac{T_{\text{Sat, evap } 1}}{1 - T_{\text{Sat, evap } 1} \frac{R_s}{h_{fg}} \left(1 + \frac{\Delta p_{\text{control}}}{p_{\text{Sat, evap } 1}}\right)} \quad (2)$$

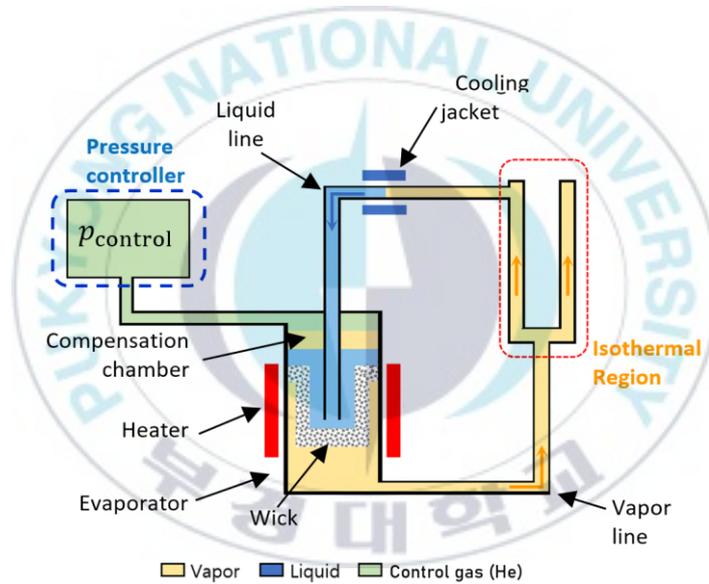


Fig. 5 Schematic of the PCLHP [10]

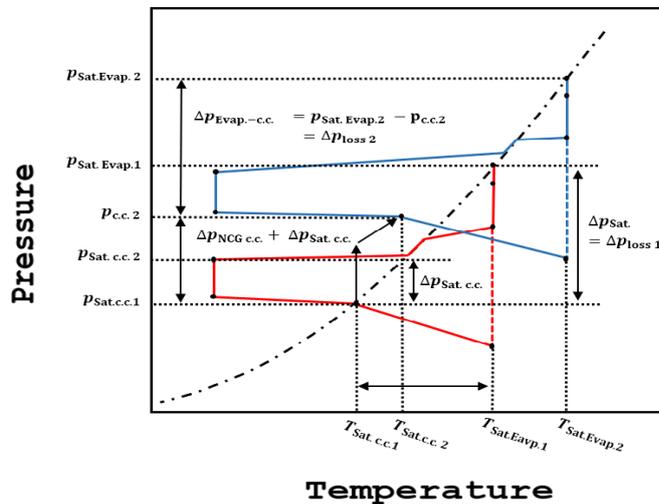


Fig. 6 Thermodynamic operation curve of the PCLHP [10]

이와 같은 PCLHP 기반 압력제어식 온도제어기술의 온도제어과정을 열역학적 선도에 나타내면 Figure 6 과 같다[10]. 그림에서 기존의 작동선도는 적색선으로 표현되었으며, 압력제어 후 작동선도는 청색선으로 표현되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 보상실 내부압력이 $p_{\text{Sat,C.C. 1}}$ 이 $p_{\text{Sat,C.C. 2}}$ 로 변화될 경우, 증발기에서 발생하는 증기상 작동유체의 온도는 $T_{\text{Sat,evap. 1}}$ 에서 $T_{\text{Sat,evap. 2}}$ 로 제어됨을 확인할 수 있다. 이와 같이 보상실 내부의 가스압력제어를 통해 PCLHP의 작동온도를 제어하는 경우 PCLHP 내부 각 압력변화율을 수식으로 표현하면 식 (3)과 같다[53].

$$\frac{d(\Delta p_{\text{evap-C.C.}})}{dt} = \frac{dp_{\text{Sat,evap}}}{dt} - \frac{dp_{\text{control}}}{dt} \quad (3)$$

PCLHP 기반 압력제어식 온도제어기술의 실현을 위해선 LHP의 운용 조건과 별개의 안정적인 작동을 위한 추가적인 운용조건이 존재한다. LHP 작동유체 순환 구동력은 증발기와 보상실 간의 포화압력차이며, 제어가스 압력 변화 시 보상실에서 증발기로의 압력전달이 워과 작동유체 이송관을 통해 이루어지기 때문에 증발기 압력변화율은 제어가스 압력변화율 대비 느려질 수 있다[50]. 특히 제어가스 압력증가가 증발기 압력증가 대비 더 높은 증가율을 가질 경우 LHP의 구동력이 크게 감소하여 일시적인 작동 정지가 발생할 수 있다. 이에 따라 작동정지의 발생없이 안정적인 온도제어를 위해서는 증발기 압력변화율과 제어가스 압력변화율이 비슷하거나 제어가스 압력변화율이 더 작은 값을 가지는 경우에만 넓은 범위에서의 온도제어가 가능하다[50].

3. 실험장치 구성 및 실험방법

3.1. 기계 구동식 가스압력제어기(MDGPC)

3.1.1. MDGPC 구성

본 연구에서는 밀폐형 압력제어식 온도제어기술의 실현을 위해 밀폐형 공압회로 내 압력제어를 구현하고자 하였다. 이에 따라 가변체적형 챔버 및 선형 구동기로 이루어진 기계 구동식 가스압력제어기를 제작하였다. 가변체적형 챔버는 0.02 mm 두께의 스테인리스 스틸 주름관으로 제작하였으며, 축방향 길이 변화에 의한 체적변화를 통해 내부 압력변화가 유도되도록 설계하였다. 선형 구동기 구동축(rod end) 변위제어를 통해 제어되는 가변체적형 챔버의 축방향 길이는 외력이 가해지지 않을 때의 축 길이 130 mm를 기준으로 ± 50 mm의 변위범위를 갖도록 제작하였다. Figure 7 은 제작된 MDGPC 가변체적형 챔버의 압축 및 팽창과정의 외형변화를 보여준다.

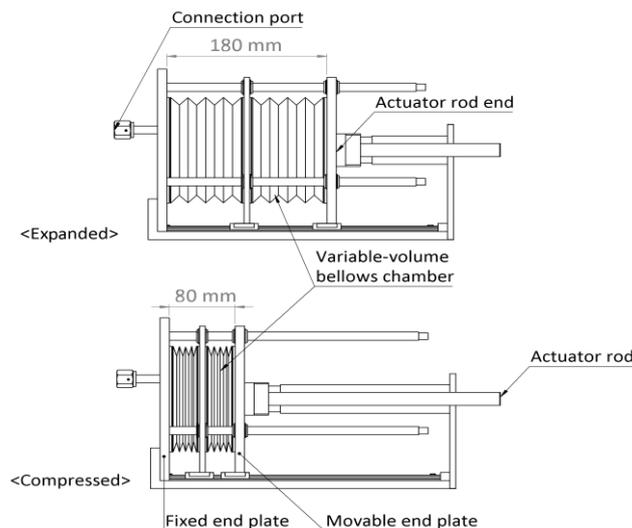


Fig. 7 Volume change of the variable-volume bellows chamber during expansion and compression processes

본 연구에서는 가변체적형 챔버의 축방향 변위를 제어하고자 하였으며 0.01 mm/s부터 2 mm/s의 속도범위에서 250 mm의 이동범위와 0.01 mm의 변위제어 분해능을 갖는 상용 선형 구동기를 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 MDGPC 가변체적형 챔버의 체적은 챔버와 연결된 선형 구동기 구동축의 위치제어를 이용하여 제어하였다. 가변체적형 챔버 축방향 길이변화는 선형 구동기의 구동축 위치변화와 역비례관계를 가지기 때문에 본 연구에서는 가변체적형 챔버의 축방향 길이를 제어변수로 사용하였다. MDGPC의 압력제어 매질인 제어가스는 불활성 기체인 헬륨(He)을 사용하였으며, 가변체적형 챔버 내부 제어가스의 압력측정은 상대 교정불확도($U(p)/p_{FS}$) 0.005 (약 95 % 신뢰의 수준)의 정밀 압력측정기를 이용하여 실시간 측정하였다. 이와 같이 측정된 가변체적형 챔버 내부 제어가스 압력은 선형 구동기 변위제어를 위한 제어변수로 사용하였다. 본 연구에서는 상기 제작된 챔버 대비 압력제어범위 향상을 위해 외력이 가해지지 않을 때의 축 길이 205 mm를 기준으로 ± 90 mm의 변위범위를 갖는 대용량 가변체적형 챔버를 추가로 제작하였다. 추가로 제작된 대용량 챔버 기반 MDGPC는 Figure 8과 같다.

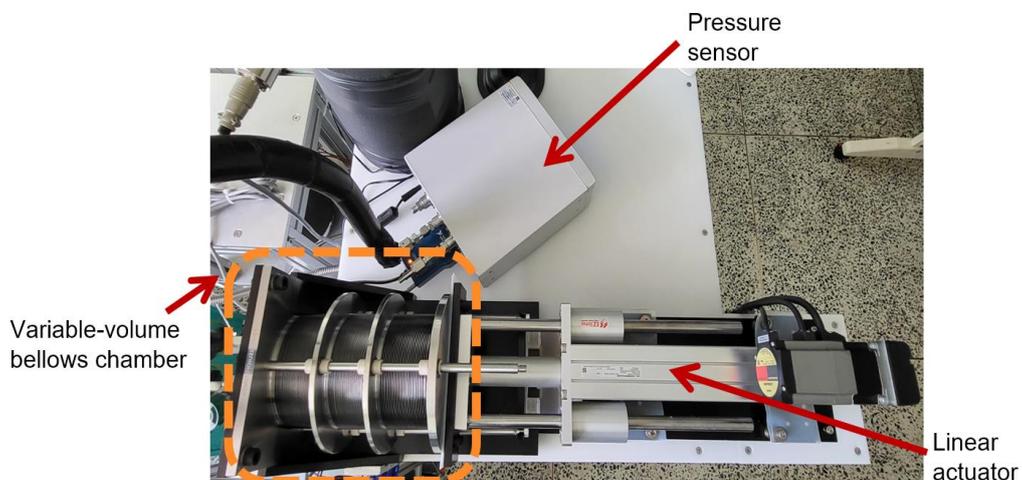


Fig. 8 Photograph of the MDGPC

3.1.2. MDGPC 제어방법

본 연구에서 밀폐형 공압회로 내 압력제어를 위해 제작된 MDGPC는 압력 피드백을 갖는 선형 구동기의 구동축 변위제어를 통한 가변체적형 챔버 선형 변위제어(체적제어)를 유도하고 이를 통해 가변체적형 챔버 내부 압력을 제어하고자 하였다. 이를 위해, 본 연구에서는 MDGPC의 압력제어 구현능력 평가를 위한 선형 제어방법으로서 계단형의 수정된 비례제어(modified proportional control)를 사용하였으며, 이를 통해 밀폐형 공압회로 내 정밀·고속 압력제어를 달성하고자 하였다. 계단형의 수정된 비례제어는 가변체적형 챔버 축방향 변위변화는 설정압력과 측정압력의 차와 구동축의 현재 위치에 따라 세 가지 범주(즉, 0.01 mm, 0.1 mm, 1 mm)로 설정하여 제어를 수행하였다. 본 제어를 통한 압력제어과정의 블록 다이어그램은 Figure 9와 같다. 또한, 본 제어 방식은 변위제어 시 조작변수의 상한을 설정하여 선형 구동기의 과도한 움직임과 불안정한 거동을 방지하면서 빠른 압력 제어를 수행하였으며 피드백 제어 루프의 시간 간격은 0.5 초로 설정되었다. 또한, 이를 통해 결정되는 조작변수를 수식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$l_i = l_{i-1} + \Delta l \times \frac{\Delta p}{|\Delta p|}, \quad \Delta l = \begin{cases} 1 \text{ mm} & (1 \text{ kPa} < |\Delta p|) \\ 0.1 \text{ mm} & (1 \text{ kPa} < |\Delta p| \leq 1 \text{ kPa}) \\ 0.01 \text{ mm} & (|\Delta p| \leq 1 \text{ kPa}) \end{cases} \quad (4)$$

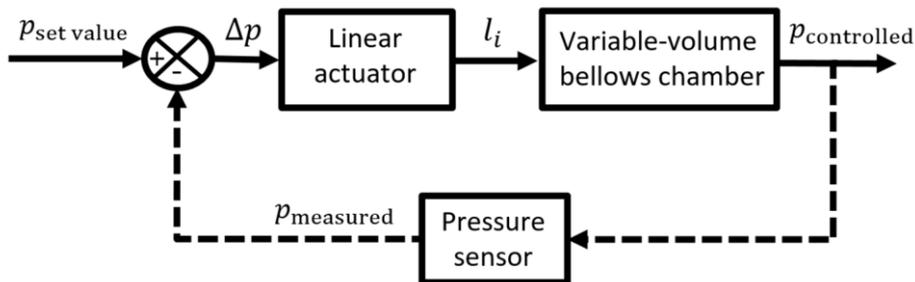


Fig. 9 Block diagram of the gas pressure control process of the MDGPC with the stepped proportional control

본 연구에서는 수정된 비례제어 기반 압력제어식 온도제어 실현을 통해 밀폐형 압력제어식 온도제어기술 실현가능성을 검증하고자 하였다. 본 연구에서는 상기의 수정된 비례 제어방식을 통한 밀폐형 압력제어식 온도제어 실현가능성 검증 후, 이후 향상된 압력제어방법 적용을 통해 보다 안정적인 압력제어식 온도제어를 구현하고자 하였다.

본 연구에서는 MDGPC 기반 압력제어식 온도제어 구현 가능성 검증 이후, 확장된 온도제어 범위 및 향상된 제어 정밀도 달성을 위해 PID 제어 방식을 MDGPC 구동에 적용하고자 하였다. PID 제어는 비례(proportional) 성분, 적분(integral) 성분, 미분(derivative) 성분의 제어성분을 조합하여 목표값(set-point value)과 측정값(process value)의 차인 제어오차(error, $e(t)$)에 대해 조작변수(manipulated variable, $m(t)$) 값을 결정하는 제어이다[54]. PID 제어는 각 성분의 조합을 통해 제어방식이 결정되며, 대표적으로 P 제어, PI 제어, PID 제어가 사용된다[55]. P 제어는 제어대상의 제어오차에 비례하는 값을 제어기에 조작변수로 입력하는 제어이며, P 제어를 통해 결정된 조작변수는 아래의 식(5)과 같이 표현된다. 또한, P 제어 기반 압력제어 과정의 블록 다이어그램은 Figure 10 과 같다

$$m(t) = K_p e(t) \quad (5)$$

이러한 P 제어는 단순 온-오프 제어 대비 부드럽고 빠른 제어가 가능하나, 제어오차에 비례하는 값을 사용한 제어 특성에 의해 측정값이 목표값에 근접할 시 미세한 정상상태 오차(steady-state error)가 유지되는 특성을 가진다[29].

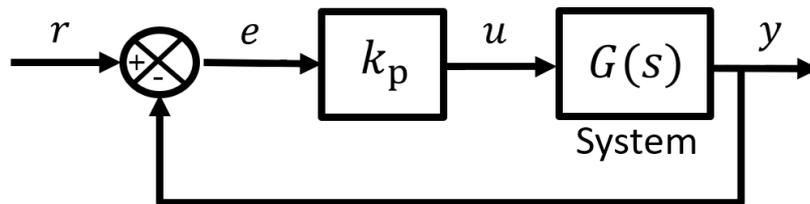


Fig. 10 Block diagram of the pressure control process with the proportional control

이러한 한계를 극복하기 위해 제안된 PI 제어는 제어오차의 비례 성분과 시계열 적분 성분을 조작변수 결정에 사용하며, PI 제어를 통해 결정된 조작변수는 아래의 식(6)과 같이 비례 성분에 대한 제어이득(K_p) 및 적분 성분에 대한 제어이득(K_i)을 이용하여 표현된다. 또한, PI 제어 기반 압력제어 과정의 블록 다이어그램은 Figure 11 과 같다.

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (6)$$

PI 제어는 제어오차 적분값을 조작변수에 지속적으로 적용하므로 정상상태 오차를 줄이는 특성을 가지나 외란에 대한 회복에 일정 시간이 요구되어 일반적으로 P 제어 대비 느린 제어속도를 갖는다[29]. 앞서 언급된 제어 이외에 PID 제어 역시 많은 산업에서 적용되고 있으나, 미분 성분은 제어오차의 현재 기울기를 외삽하여 조작변수를 결정하여 제어속도를 증가시키고 보다 향상된 안정도 달성에 기여할 수 있으나, 고주파 외란이 시스템 제어에 직접적 영향을 미칠 경우 외란을 증폭시켜 불안정을 야기할 수 있다[29]. 본 연구에서 제작한 MDGPC 는 압력변화가 큰 PCLHP 의 보상실에 장착하여 사용하여야 하므로 D 제어를 배제한 P 제어 및 PI 제어만을 적용하여 압력제어를 수행하였다.

본 연구에서 제안된 P 제어 및 PI 제어는 각 성분의 제어이득 선정에 따라 압력제어특성이 크게 변할 수 있으므로, 전체 공압회로의 동특성을 기반으로

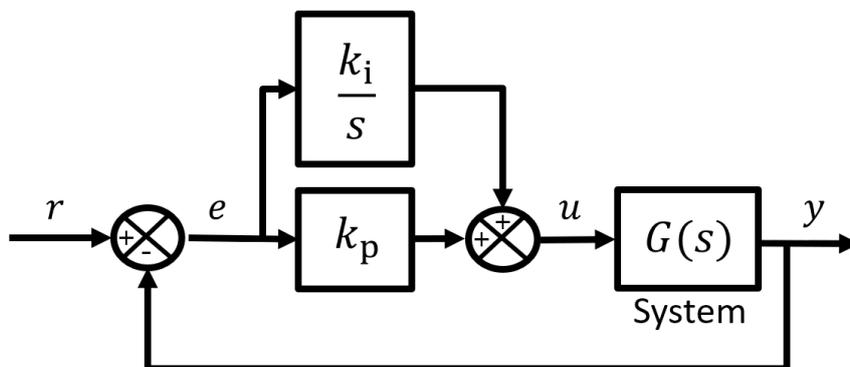


Fig. 11 Block diagram of the pressure control process with the proportional integral control

그에 맞는 최적 제어이득 선정이 요구된다. 이에 따라 개발된 MDGPC 의 고속·정밀 가스압력제어를 위한 P 제어 및 PI 제어에 대한 최적 제어이득 선정 후, 이를 적용한 MDGPC 의 압력제어특성 및 개선된 제어 기반 압력제어식 온도제어특성을 평가하고자 하였다.

3.2. PCLHP 및 실험장치 구성

본 연구에서는 밀폐형 압력제어식 정밀 온도제어기술의 실현을 위해 PCLHP 를 제작하였으며, 상온 온도제어를 위해 증류수를 작동유체로 사용하였다[10]. 작동유체의 유동 시 발생하는 총 압력손실과 균형을 이루는 모세관압력차를 생성하는 다공성 물질인 워ick은 $50\text{ mm} \times 114\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ (외경 \times 길이 \times 두께)의 스테인리스 스틸 재질 원통형 소결체이며, 제작사에서 측정된 제원인 공칭 기공 직경과 투과도는 각각 약 $10\text{ }\mu\text{m}$ 및 $6.7 \times 10^{-13}\text{ m}^2$ 로 확인되었다[13]. 이와 같이 제작된 워ick 구조물을 $60\text{ mm} \times 54\text{ mm} \times 155\text{ mm}$ (외경 \times 내경 \times 길이) 크기를 갖는 원통형 증발기 몸체에 삽입하였으며, 이러한 워ick 구조물의 형상 및 제원은 Figure 12 을 통해 확인할

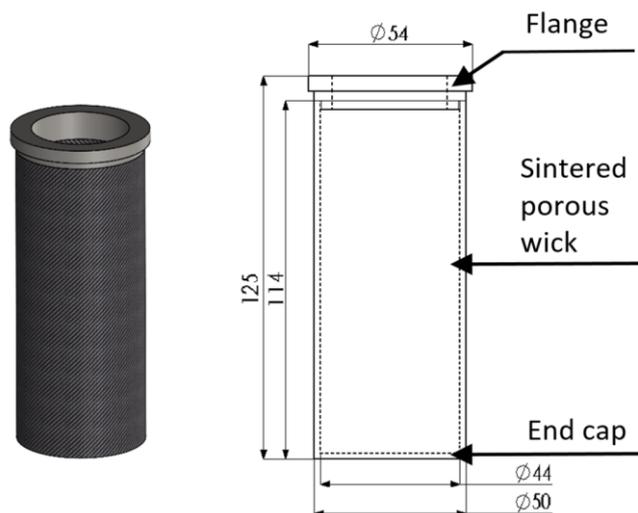


Fig. 12 Structure and dimensions of the wick

수 있다. 증발기의 내부에는 30 개의 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ (높이 \times 너비) 크기를 갖는 증기 배출 유로가 증발기 하우징의 내부 표면을 따라 등각 배열되어 원의 증발표면에서 증발된 작동유체가 증기 이송관으로 유동하도록 하였다. 원 구조물의 플랜지와 증발기 몸체 내벽 사이 모든 접촉면 역시 기밀을 유지할 수 있도록 용접으로 결합하였다. 증발기에서 발생한 증기상 작동유체는 길이 1 m, 직경 18.1 mm의 증기 이송관을 통해 증발기로부터 배출되도록 하였다. 본 연구에서 제작한 PCLHP 는 증기 수송관의 고속 증기 유동영역 내 환형의 증기상 작동유체 유로를 구성하여, 내부에 높은 온도 균일도를 갖는 $54\text{ mm} \times 432\text{ mm}$ (내경 \times 높이)의 원통형 작업공간(등온영역)을 형성하였다[53]. Figure 13 은 이러한 PCLHP 의 등온영역의 형상 및 제원을 보여준다. 또한, 압력제어식 온도제어 중 증기상 작동유체의 온도를 측정하기 위해 등온영역 외부 증기 유동영역에 2 개의 온도계 삽입구를 형성하였다.

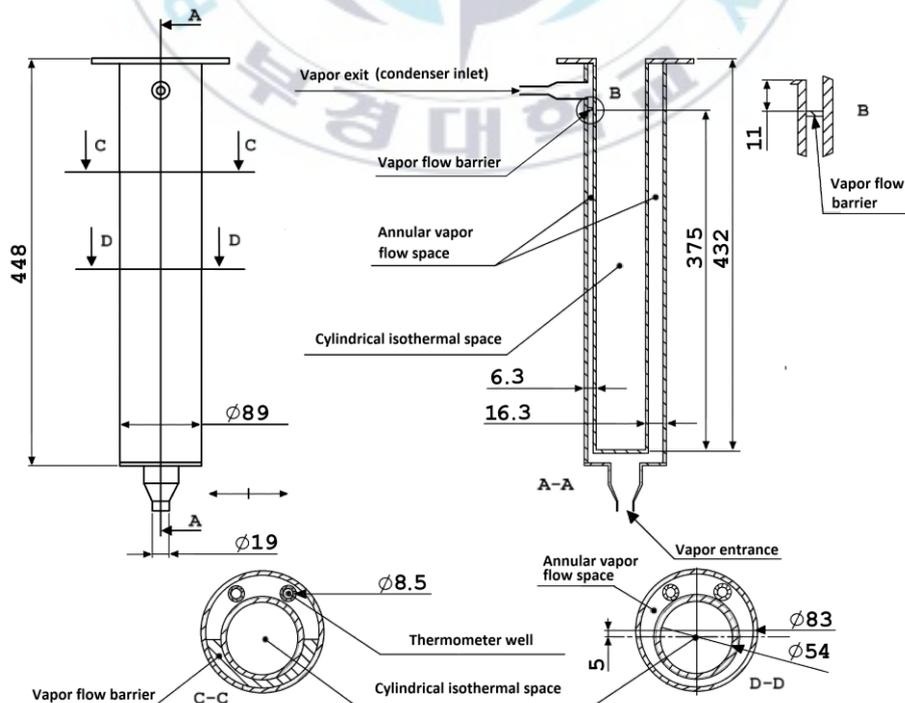


Fig. 13 Structure and dimensions of the isothermal region
(The section views show the internal shape.)

응축기는 직사각형의 수정된 다관형 열교환기 형태로 제작하였으며, 길이 2m, 직경 9.5 mm의 스테인리스강 작동유체 유동관과 냉각수 유동영역으로 구성되어 있다. 향온 냉각수(약 55°C의 증류수)는 증기상 작동유체의 응축을 위해 냉각수 유동관으로 지속적으로 공급되었다. 응축기를 통해 배출되는 액체상 작동유체는 길이 0.4 m, 직경 9.5 mm의 액체 수송관과 액체 수송관 끝단의 연장관을 통해 보상실로 이동한 뒤 워 내부 공간의 중앙(증발기 코어)으로 액체상 작동유체가 지속적으로 공급되도록 하였다. 보상실 본체는 PCLHP 전체 체적의 약 52%를 차지하도록 설계하여 2 상 작동유체 및 제어가스를 위한 충분한 공간을 제공하였다. 보상실의 상단 덮개는 압력제어용 및 압력측정용 포트를 설치하여 각각 보상실 내부 제어가스 압력의 변경과 보상실 내부 압력 관측에 사용되었다. Figure 14 는 본 연구에서 제작한 PCLHP 의 조립도를 보여준다. 이와 같이 제작한 PCLHP 의 설계변수 세부 내용은 Table 1 과 같다[53]. 본 연구에서는 전체 PCLHP 체적의 약 49%에 해당하는 약 1.6 kg의 증류수를 PCLHP 에 주입하였으며, 작동유체 주입 전 PCLHP 내부는 에탄올을 주입하여 세척한 후 완전 건조하였다.

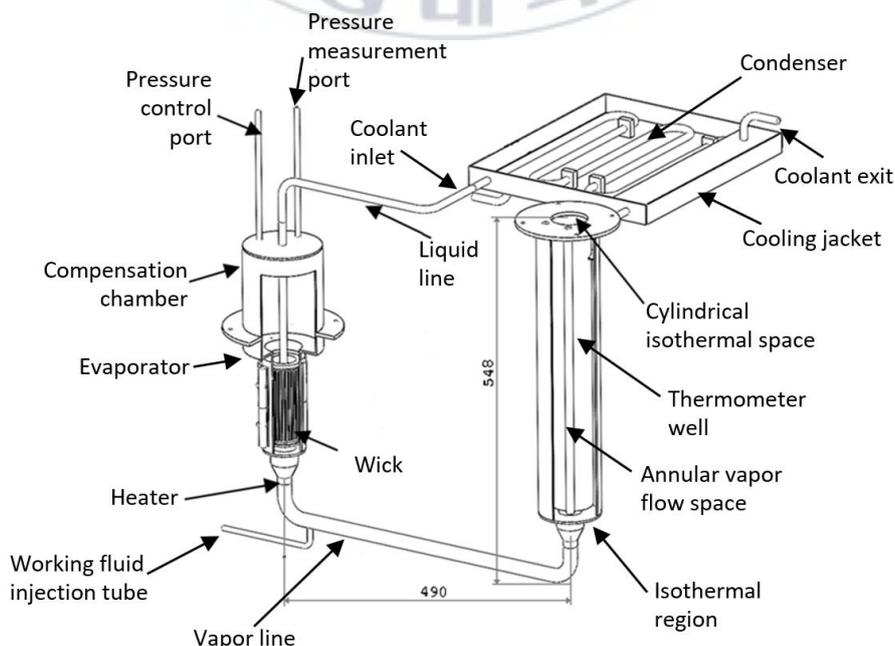


Fig. 14 Schematic of the PCLHP

Table. 1 Design parameters of the PCLHP [13].

Parameter	Description
Wick	
Dimension	50 mm × 114 mm × 3 mm (diameter × length × thickness)
Material	Sintered stainless steel powder (316 L)
Nominal pore diameter	10 μm
Permeability/porosity	6.7×10^{-13} m ² / 0.5 (nominal)
Evaporator	
Dimension	60 mm × 54 mm × 155 mm (outer diameter × inner diameter × length)
Number of vapor channels	30
Vapor removal channel dimension	2 mm × 2 mm × 120 mm (width × depth × length)
Material	Stainless steel (316 L)
Compensation chamber	
Bottom connection dimension	60 mm × 54 mm × 20 mm (outer diameter × inner diameter × length)
Main body dimension	114 mm × 110 mm × 158 mm (outer diameter × inner diameter × length)
Material	Stainless steel (316 L)
Volume fraction	Approximately 52%
Isothermal region	
External dimension	89 mm × 83 mm × 448 mm (outer diameter × inner diameter × height)
Cylindrical isothermal space dimension	54 mm × 432 mm (inner diameter × height)
Thermometer well dimension	8.5 mm × 432 mm (inner diameter × height)
Eccentricity of the annulus	5 mm
Material	Stainless steel (316 L)
Vapor line (excluding the annular vapor passage)	
Outer diameter/inner diameter	19.1 mm/16.6 mm
Effective length	Approximately 1 m
Material	Stainless steel (316 L)
Liquid line	

Outer diameter/inner diameter	9.5 mm/7.9 mm
Length	Approximately 0.4 m
Material	Stainless steel (316 L)
Condenser tube	
Outer diameter/inner diameter	9.5 mm/7.9 mm
Length	Approximately 2 m
Material	Stainless steel (316 L)
Working fluid	
Substance	
Distilled water	
Fluid mass	Approximately 1600 g

3.3. 실험방법

3.3.1. MDGPC 최적 제어이득 결정 및 압력제어특성 평가

본 연구에서 개발한 MDGPC는 가변체적형 챔버 내 제어가스 압력과 챔버의 축방향 길이를 각각 제어변수와 조작변수로 사용하며, 설정압력과 측정압력의 차를 제어오차로 설정하여 가변체적형 챔버 내 가스 압력을 제어하였다. 먼저 P 제어 기반 MDGPC 제어의 조작변수는 식 (7)와 같이 선형 변위로 변환된 제어오차($\Delta p(dl/dp)$)에 비례제어이득(K_p)을 곱하고 초기 선형 변위에 더하여 결정하였다. 본 연구에서는 압력변화에 대한 길이변화율(dl/dp)을 불안정성을 야기하지 않는 가장 큰 압력에 대한 변위 변화율인 1 mm/kPa로 설정하였다. 아울러 설정압력과 측정압력 간 차이가 1 kPa 이상에 해당하는 큰 제어오차의 발생 시 MDGPC의 안정도 유지를 위해 1 mm 이상의 변위가 가해지지 않도록 조작변수의 상하한을 각각 1 mm와 -1 mm로 설정하였다.

$$m = l_0 + K_p \times \Delta p(dl/dp) \quad (7)$$

상기한 바와 같이 P 제어는 최적의 제어이득을 요하며 이를 도출하기 위해 본 연구에서는 비례제어이득을 1.0에서 2.0의 범위에서 0.1 단위로 상승시키며 ± 1 kPa의 계단형 설정압력 변화에 대한 응답을 확인하였다. 최적 제어이득 선정은 제어압력 안정도에 주안점을 두고 평가하였으나 오버 슈트 및 언더 슈트 특성 역시 고려하여 불안정한 거동 발현이 제한되는 가장 안정적인 응답을 보이는 제어이득을 최적 제어이득으로 선정하고자 하였다. 본 연구에서는 MDGPC 를 이용한 가스압력제어 시 발생할 수 있는 정상상태 오차를 없애기 위해 PI 제어 역시 적용하고자 하였으며, 이를 위해 PI 제어 구동을 위한 최적 제어이득을 결정하고자 하였다. 본 연구에서 사용한 PI 제어 기반 조작변수는 식 (8)과 같이 표현되며, 앞 절의 P 제어와 동일하게 압력변화에 대한 길이변화율 (dl/dp) 을 1 mm/kPa 로 설정하고 조작변수의 상·하한 역시 동일하게 각각 1 mm, -1 mm로 설정하였다.

$$m = l_0 + K_p \times \Delta p \left(\frac{dl}{dp} \right) + K_i \int_0^t \Delta p \left(\frac{dl}{dp} \right) dt \quad (8)$$

본 연구에서는 PI 제어를 위한 최적 비례제어이득(K_p)과 적분제어이득(K_i) 조합 결정을 위해 P 제어와 동일한 비례제어이득 범위에 대해 적분제어이득을 0.005 부터 0.05 까지 0.005 단위로 증가시키며 ± 1 kPa 의 계단형 설정압력 변화에 대한 MDGPC 의 응답을 확인하였다. PI 제어를 위한 최적 제어이득 조합의 선정 시, P 제어를 위한 최적 비례제어이득의 선정과 동일한 기준을 적용하여 최적 제어이득을 선정하였다. 본 연구에서는 이와 같이 결정된 최적 비례 및 적분제어이득을 적용하여 제어오차(Δp) 및 dp/dl 에 의해 조작변수가 결정되어 가변체적형 챔버의 선형 변위제어를 수행하였다. 이를 통해 지속적으로 측정되는 가변체적형 챔버 내 압력 측정값을 기반으로 연속 피드백 제어함으로써 MDGPC 의 가변체적형 챔버 내부 가스압력을 설정압력으로 정밀 제어하고자 하였다. 이와 같이 개발된 MDGPC 는 제어방식 별

압력제어특성 평가를 진행하였다. 압력제어특성은 압력제어의 안정성과 분해능, 외부 압력 외란에 대한 설정압력 회복능력 및 빠르고 안정적인 압력 변화(오버 슈트 또는 언더 슈트) 없는 압력변화) 생성능력을 확인하여 진행하였다.

본 연구에서 제작한 MDGPC 는 가변 체적형 챔버가 단열처리 없이 외부에 노출되어 있으므로 외기 온도변화에 따라 내부 압력변화가 유발될 수 있다. MDGPC 를 이용한 정밀 가스압력제어 달성을 위해서는 이와 같은 실온변화에 대한 압력변화를 보상할 수 있는 안정적 압력제어능력 검증이 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서 수행한 압력제어 안정도 시험은 가변체적형 챔버 주변 외기 온도변화에 대한 챔버 내부 가스압력 변화 보상 및 설정압력 유지능력 검증을 중점으로 진행하였다. 해당 시험은 불규칙적으로 변화하는 외기 온도에 대해 압력제어 전후 가변체적형 챔버 내부 압력 안정도 변화를 비교함으로써 수행하였으며, 정량적 비교를 위한 압력제어 안정도는 12 h 기준 압력변화의 표준편차로 정의하였다. 이와 더불어 MDGPC 기반 가스압력제어의 정밀도를 결정할 수 있는 압력제어 분해능 역시 평가하였다. 압력제어 분해능은 안정도를 벗어나는 명시적 제어압력 변화가 관측되는 설정압력 변화로 정의하여 평가하였으며, 압력제어 안정도 내의 설정압력 변화로부터 시작하여 일정한 비율로 설정압력 변화를 증가시켜 가며 분해능 평가를 수행하였다.

본 연구에서 제작된 MDGPC 는 안정적이고 정밀한 압력제어특성 외에도 수 kPa 수준의 설정압력 변화에 대해 오버 슈트나 언더 슈트와 같은 불안정성 없이 빠르게 설정압력에 도달하는 것이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 MDGPC 의 순간 압력제어특성을 평가하기 위해 70 kPa 에서 90 kPa 의 범위에서 ± 5 kPa 의 계단형 설정압력 변화에 대한 압력제어 응답특성을 시험하였다. 이와 같은 시험에 있어, 각 설정압력 유지 구간에서의 압력제어 안정도 및 설정압력 변화 시 오버 슈트 및 언더 슈트 발생 여부를 중요한 지표로

설정하여 평가하였다. MDGPC 는 밀폐형 공압회로 내 가스압력제어를 목적으로 하므로 공압회로 내·외부의 직·간접적 압력 외란에 대한 설정압력 회복능력은 평가되어야 할 중요 특성 중 하나이다. 이에 본 연구에서는 80 kPa의 설정압력으로 제어 중인 MDGPC 에 외부에서 ± 5 kPa의 압력 외란을 일정시간 동안 인가 후 설정압력 회복 시간 및 회복 후 제어압력 안정도를 주요지표로 하여 MDGPC 의 외란에 대한 회복능력을 평가하고자 하였다. 해당 시험에서 외부 압력 외란은 별도의 상용 GPC 를 이용하여 75 kPa 및 85 kPa의 압력을 발생시킨 후 약 5 s의 시간 동안 MDGPC 의 가변체적형 챔버를 해당 압력에 노출시키는 방식으로 인가하였으며, 설정압력 회복 시간은 압력 외란 인가 후 설정압력의 99.99 % 에 해당하는 압력으로의 회복까지 소요된 시간으로 정의하였다.

3.3.3. PCLHP 기반 압력제어식 온도제어특성 평가

본 연구에서는 압력제어식 온도제어기술의 실현을 위해 PCLHP 보상실 압력제어가 요구되며 이를 위해 보상실 압력제어공과 상용 GPC 및 MDGPC 가 병렬구조로 연결된다. 또한, 상기 세 요소의 연결을 위해 사용된 3 방향 밸브는 하나의 가스압력제어기가 작동 중일 때 다른 하나의 연결을 차단하기 위해 사용되었다. 또한, 제어가스 수송관은 작동유체 증기가 가스압력제어기로 유입되는 것을 방지하기 위해 약 -5°C 로 유지되는 콜드 트랩을 통과하도록 설치하였다. PCLHP 의 열입력은 Ni - Cr 히터를 증발기 외벽에 장착 후 피드백 제어 DC 전원공급기를 사용하여 일정한 열입력을 증발기에 인가하였다. 본 연구에서 냉각기의 냉각수(증류수) 온도는 이전 연구에서 높은 응축부 온도에서 보다 안정적인 거동을 보였으므로[51], 본 연구에서 사용한 냉각수 공급기가 제공할 수 있는 냉각수 온도 상한인 약 55°C 의 냉각수를 약 5 l/min의

유량으로 응축기에 지속적으로 공급하였다. 본 연구에서의 PCLHP 응답특성 확인은 등온영역 온도변화 측정을 통해 평가되었으며, 등온영역 온도는 30 °C에서 150 °C의 온도 범위에서 0.06 °C (약 95% 신뢰 수준)의 교정불확도로 교정된 산업용 백금 저항 온도계(industrial platinum resistance thermometer, IPRT)를 사용하여 측정하였으며, 공칭불확도 약 7 mK 인 전위차계를 통해 IPRT 의 저항을 측정하였다. 또한, PCLHP 의 각 요소별 작동온도 측정을 위해 공칭불확도 약 0.5 °C인 T 형 열전대 16 개를 사용하였다. 그리고 보상실 내부 압력측정은 0 kPa에서 200 kPa의 압력범위에서 80 Pa(약 95% 신뢰 수준)의 교정불확도로 교정된 압력 센서를 이용하여 수행하였다. PCLHP 의 시동은 먼저, 가스압력제어기의 잔류기체 제거 작업 후 일정량의 제어가스(99.999 % He)를 보상실에 주입 후 보상실 가스압력제어공이 닫힌 상태로 600 W을 열입력을 인가하여 시동을 실시하였다. PCLHP 의 정상상태 도달 후 열입력을 800 W 로 상승하여 정상상태 작동에 도달한 이후 가스압력제어공을 열고 보상실 내부 압력제어를 시작하였다. Figure 15 은 전체 실험장치의 개략도를 보여준다.

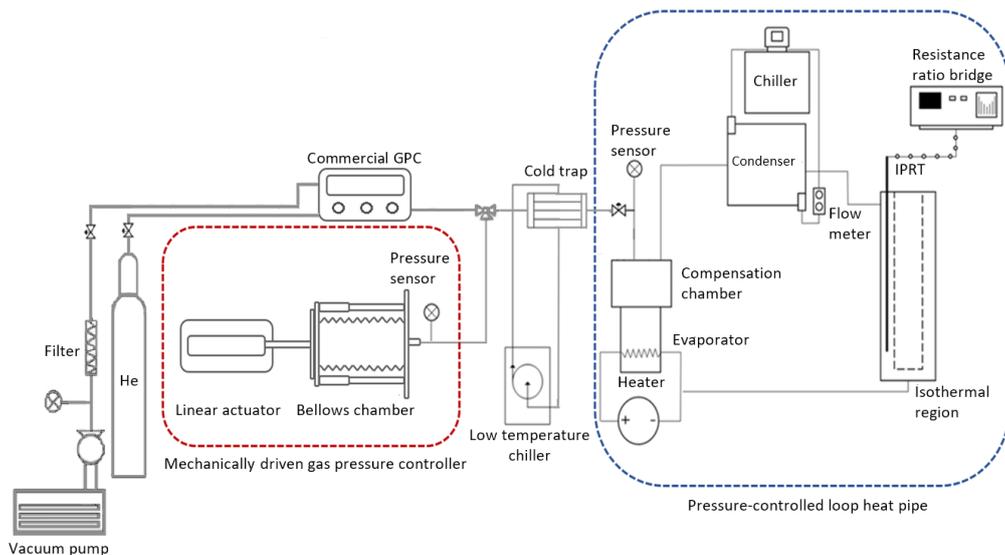


Fig. 15 Schematic of the test setup

본 연구에서는 800 W의 열입력에서 PCLHP가 정상상태에 도달한 후 MDGPC를 PCLHP 사이의 밸브를 개방하였으며, 이후의 보상실 내부압력은 MDGPC에 의해 능동적으로 제어되었다. 가변체적형 챔버 내부 제어가스 압력은 20 Pa (약 95% 신뢰 수준)의 고정불확도를 갖는 고정된 정밀 압력센서로 측정하였다. MDGPC의 제어는 가변체적형 챔버 내 측정압력을 기반으로 챔버 축방향 변위의 확장 또는 축소를 통해 수행되었으며, 밀폐형 압력제어식 온도제어기술의 실현가능여부 확인을 위해 단순한 계단형 비례제어를 적용하여 MDGPC 적용 압력제어식 온도제어의 실현 가능성을 평가하였다. 이후 확장된 온도제어범위 및 향상된 제어 안정도 달성을 위해 비례 및 비례적분 제어방식을 적용한 MDGPC를 이용한 압력제어식 온도제어를 수행하였다.

본 연구에서는 MDGPC 기반 밀폐형 압력제어식 온도제어특성과의 비교를 위해 압력 소스와 싱크(He 실린더, 진공 펌프)가 있는 개방형 상용 GPC 기반 압력제어식 온도제어특성 평가 역시 동일한 방식으로 수행하였다. MDGPC 또는 상용 GPC를 사용한 압력제어식 온도제어가 수행되는 동안 PCLHP 등온영역 온도는 등온영역 내의 온도계 삽입구에 위치한 고정된 산업용 백금 저항 온도계(IPRT)를 이용하여 측정하였다.

본 연구에서 압력제어식 온도제어특성은 MDGPC를 이용한 보상실 압력제어 전후 등온영역 제어온도 안정도 변화, 단계적 및 점진적 제어가스 압력변화에 대한 등온영역 온도변화를 통해 평가하였다. MDGPC의 제어가스 압력은 먼저 상용 GPC를 사용하여 PCLHP의 보상실 내 압력과 일치하도록 설정되었으며, 이후 보상실 내부압력을 압력제어식 온도제어의 시작압력으로 설정한 80 kPa로 점진 제어하였다. 압력제어 시작압력에 도달한 후, 제어가스 압력을 MDGPC 및 상용 GPC를 통해 단계적으로 또는 점진적으로 상승시켜 이러한 압력변화에 대한 등온영역의 온도 안정도를 측정하였으며, MDGPC

기반 압력제어식 온도제어 안정도와 개방형 상용 GPC 기반 압력제어식 온도제어 안정도를 비교하였다. 제어가스 압력의 단계적 변화에 대한 등온영역 제어온도 응답은 70 kPa에서 90 kPa 범위에서 수행되었으며, MDGPC 에 의해 ± 2.5 kPa 압력 단계를 형성하여 압력변화에 대한 등온영역 온도의 응답을 확인하였다. 또한, 제어가스 압력의 점진적 변화의 경우, 대용량 챔버 기반 MDGPC 를 통해 60 kPa에서 140 kPa 범위에서 ± 100 Pa/s의 압력제어속도로 ± 20 kPa의 압력 단계를 형성하여 이에 따른 등온영역 온도 변화를 확인하였다.

본 연구에서는 등온영역 온도제어특성 평가 이후 등온영역 내 형성된 작업공간의 온도 균일도 역시 평가하였다. 이에 내부 온도측정을 위한 알루미늄 드라이블록을 제작하였으며, 이를 등온영역 내 삽입하여 드라이블록에 위치한 온도계 삽입구 별 바닥부 수평 온도 균일도 및 중앙에 위치한 온도계 삽입구에 대한 수직 온도 균일도를 측정하였다. 또한, 60 kPa에서 140 kPa까지의 압력제어범위에서 보상실 내부 압력 별 온도 안정도 및 균일도를 반복 측정하였다. 측정 시 드라이블록의 상부는 세라믹 울 단열재를 이용하여 상단으로의 열손실을 최소화하였다. 본 연구에서 모든 측정은 약 95 % 신뢰 수준에서의 확장불확도 산출을 위해 3 회 반복 측정하였다.

4. 실험결과 및 토의

4.1. MDGPC의 압력제어특성

Figure 16은 MDGPC의 압력제어 전후 가변 체적형 챔버 내 제어가스 압력변화를 보여준다. MDGPC를 이용한 압력제어 전 가변 체적형 챔버의 축 길이는 기준위치로 고정(고정 체적 모드)하였으며, MDGPC의 압력제어 후 가변 체적형 챔버의 체적은 축 길이제어를 통해 12시간 동안 실시간 제어(가변 체적 모드)되었다. 이와 같은 MDGPC의 압력제어 안정도 실험 시, 외기 온도는 그림 우상단의 삽도와 같이 $\pm 5^\circ\text{C}$ 범위에서 변화하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 처음 12시간 동안의 고정 체적 모드 중 가변 체적형 챔버 내부 압력은 외기 온도변화에 따라 크게 변하는 반면, 가변 체적 모드인 압력제어가 수행된 이후 가변 체적형 챔버 내부 압력은 MDGPC 제어에 의해 안정적으로 유지되었다. 본 연구에서는 제어압력 안정도를 각 12시간에 대한 압력 측정값의 표준 편차로 정의하였으며, 이와 같이 정의된 압력 안정도는 압력제어 전 약 130 Pa에서 압력제어 후 약 1 Pa로 크게 향상되었다.

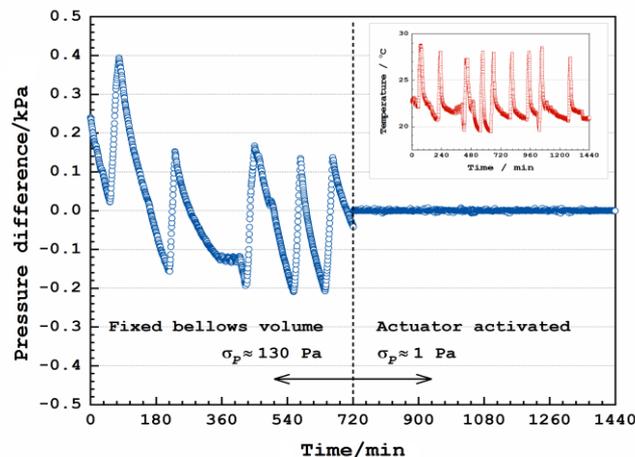


Fig. 16 Stability of the MDGPC with the proportional control

또한, MDGPC 로 얻은 압력제어 안정도를 바탕으로 MDGPC 의 압력제어 분해능을 평가하였다. Figure 17 은 시험 결과를 보여주며, 가변 체적형 챔버 내부 측정압력(p_{reading} , 청색 표식)의 설정압력($p_{\text{set value}}$, 녹색 점선) 증가에 대한 응답과 더불어 측정압력의 평균값(p_{mean} , 적색 실선) 변화가 도시되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 설정압력이 10 Pa 증가했을 때 압력제어 안정도를 벗어나는 측정압력의 명확한 변화가 관찰되었으며, 이에 따라 본 MDGPC 의 압력제어 분해능이 약 10 Pa임을 확인하였다. 따라서 Figure 17 과 18 에 나타난 결과를 바탕으로 MDGPC 를 통한 압력제어 안정도와 분해능은 각각 약 1 Pa 및 10 Pa로 확인되었다.

이어서 외부 압력 외란에 대한 가변체적형 챔버 내부 압력변화에 따른 MDGPC 의 설정압력 회복능력을 평가하였고, 그 결과가 Figure 18 에 도시되어 있다. MDGPC 에 의해 80 kPa로 제어 중인 가변체적형 챔버 내 제어가스는 상용 GPC 에 의해 생성된 +5 kPa 및 -5 kPa (85 kPa 및 75 kPa)의 압력 외란에 약 10 초 간 노출되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 가변체적형 챔버 내부 가스 압력은 가해진 압력 외란에 의해 잠시 영향을 받으나 약 30 초 이내에 설정압력 (80 kPa) 으로 회복하여 오버 슈트 및 언더 슈트 없이 제어압력 안정도(측정압력의 표준 편차) 약 1 Pa 을 갖는 안정적인 압력제어를

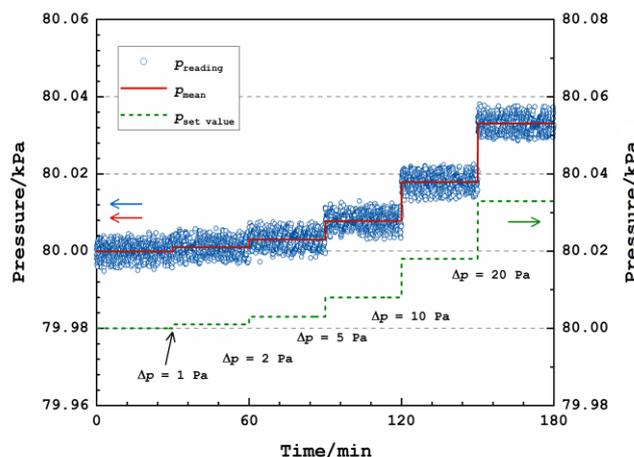


Fig. 17 Resolution of the MDGPC with the proportional control

달성하였다. 이후, MDGPC 의 순간 압력제어특성 평가를 위해 ± 5 kPa의 계단형 설정압력 변화에 대한 압력제어 응답특성을 시험하였다. Figure 19 (a)는 MGDPC 를 이용한 계단형 압력 제어시험의 결과로서 가변 체적형 챔버 내부 측정압력(p_{reading} , 청색 표식)의 설정압력($p_{\text{set value}}$, 적색 실선) 증가에 대한 응답을 보여준다. 설정압력은 70 kPa에서 90 kPa의 범위에서 ± 5 kPa만큼 증감하며 변경되었으며, 그림에서 보이는 바와 같이 MDGPC 는 오버 슈트 및 언더 슈트 발생없이 설정압력 변화를 따라 제어되었다. 또한, 0 mm의 중립 위치에서 시작한 선형 구동기 구동부 끝단위치(x_{actuator} , 녹색 점선)가 90 kPa의 설정압력에서 최대변위(중립 위치에서 ± 50 mm)에 도달함에 따라 압력 제어 범위는 약 ± 20 kPa로 평가되었다.

MDGPC 기반 계단형 설정압력 구현 시험에서 가변 체적형 챔버 축 길이변화에 대한 압력 변화율은 MDGPC 의 가압 및 감압과정에 따라 다른 값을 갖는 경향을 보였다. 이러한 결과는 Figure 19 (b)를 통해 확인할 수 있다. 이는 압축과 팽창 과정 사이의 상대 체적변화 차이에 기인한다. 이와 같은 시험 결과를 통해 MDGPC 는 PCLHP 의 압력제어기로 사용할 수 있는 압력제어특성을 갖추고 있음을 확인하였다.

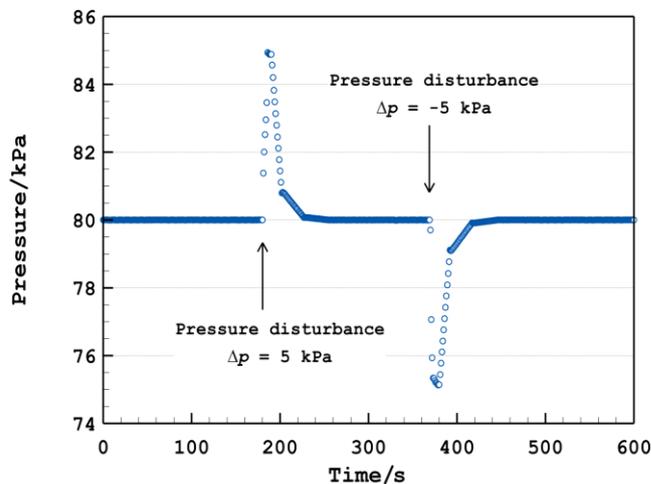
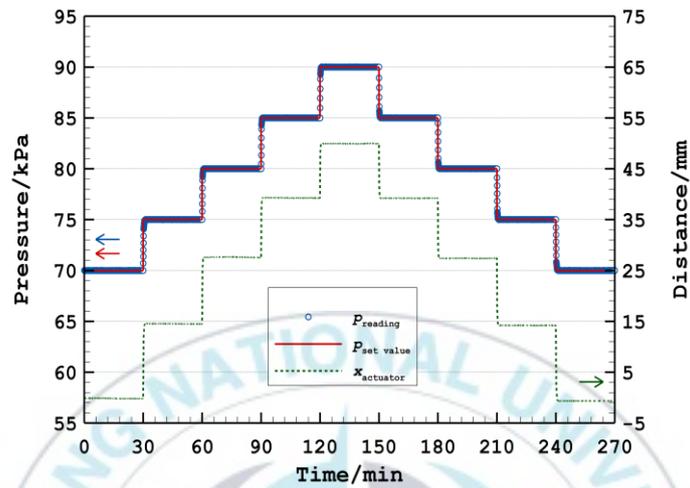
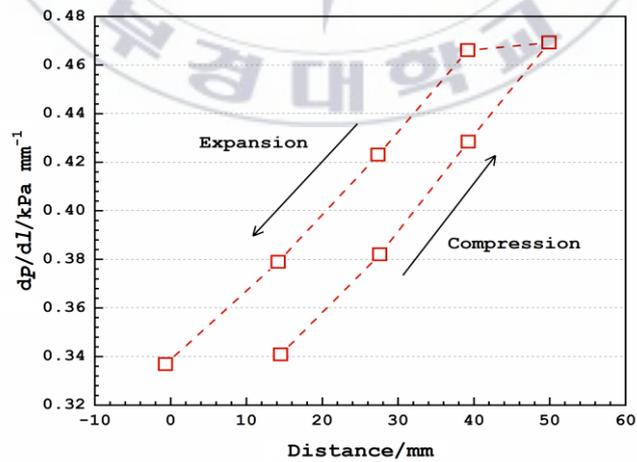


Fig. 18 Response of the MDGPC to external pressure disturbances



(a) Stepwise pressure changes of the MDGPC with modified proportional control



(b) Hysteresis of the MDGPC during stepwise pressure change

Fig. 19 Responses of the MDGPC to stepwise set-point value change

4.2. 밀폐형 압력제어식 온도제어특성

본 연구에서는 이와 같이 압력제어특성을 평가한 MDGPC 를 이용하여 PCLHP 의 보상실 압력제어를 수행함으로써 밀폐형 압력제어식 온도제어를 구현하고자 하였다. Figure 20 은 MDGPC 를 통한 보상실 압력제어 전후 등온영역의 온도변화를 평균으로부터의 편차를 통해 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 MDGPC 를 이용하여 보상실 압력제어 수행 후 등온영역 온도 안정도가 크게 향상되었음을 확인할 수 있다. 12 시간 측정온도의 표준편차로 정의된 온도 안정도는 MDGPC 를 사용한 압력제어 전 약 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 압력제어 후 약 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 크게 향상되었다. Figure 21 (a)와 (b)는 MDGPC 와 상용 GPC 기반 압력제어식 온도제어 수행 중의 등온영역 온도변화 및 보상실 내 측정압력을 비교한 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 MDGPC 를 이용하여 제어된 압력 및 온도(청색 표식)는 상용 GPC 를 통해 얻은 결과(적색 표식)와 유사한 안정도를 보였으며, 압력 측정값의 12 시간 표준 편차는 MDGPC 및 상용 GPC 제어 시 각각 약 25 Pa 및 22 Pa 로 확인되었다. 또한, 이를 통해 얻어진 등온영역 온도의 제어 안정도는 MDGPC 를 적용한 경우와 상용 GPC 를 적용한

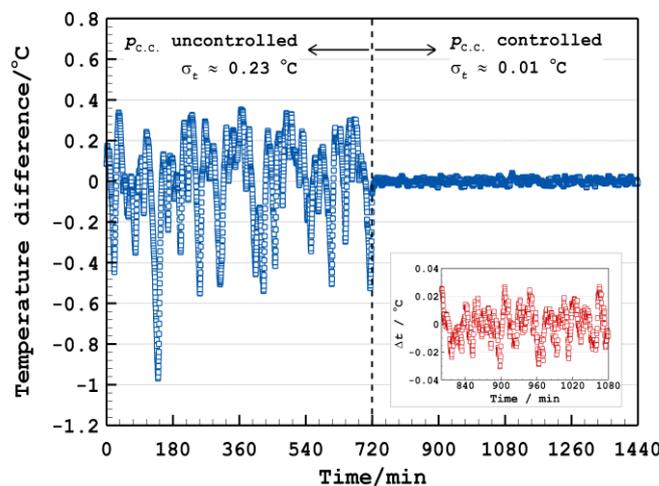
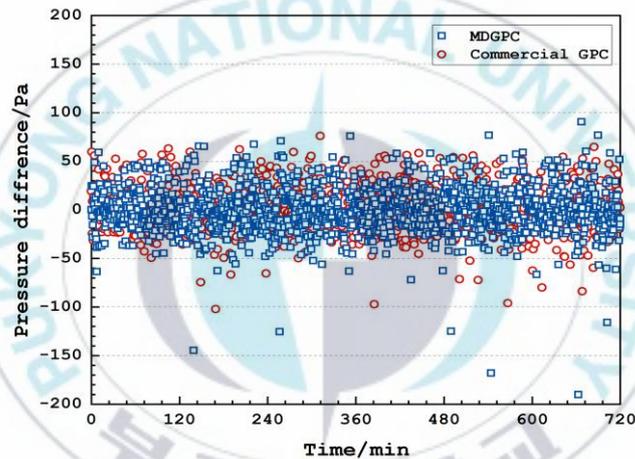


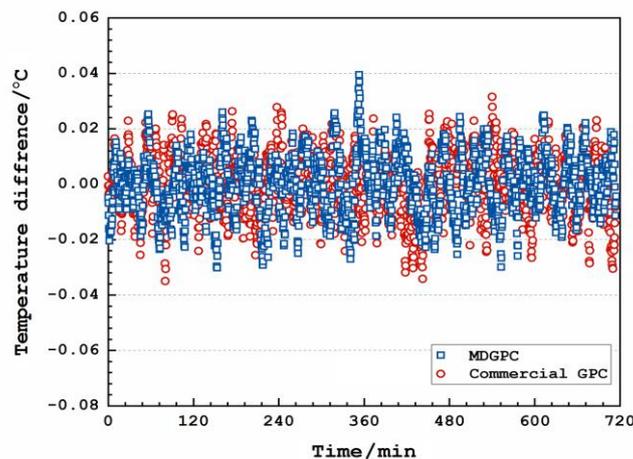
Fig. 20 Change in the stability of the pneumatically-controlled temperature of the isothermal region

경우에 대해 모두 약 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다. 이를 토대로 밀폐형 MDGPC 를 이용한 PCLHP 보상실 압력제어 및 이로부터 얻어진 온도제어특성은 모두 상용 GPC 를 이용한 결과와 동등한 수준임을 확인하였다.

본 연구에서는 등온영역 온도 안정도 평가 후, MDGPC 를 이용하여 제어가스 압력을 일정 크기($\pm 2.5\text{ kPa}$)로 순간 증감하여, 밀폐형 압력제어식 온도제어기술의 신속하고 안정적인 온도제어 가능여부를 확인하였다. Figure 22 는 MDGPC 에 의해 제어가스 압력(p_{control} , 청색 점선)이 증감할 때



(a) Comparison of the pressure stability characteristics



(b) Comparison of the temperature stability characteristics

Fig. 21 Comparison of the stability characteristics between the commercial GPC and MDGPC

등온영역 온도($t_{I.R.}$, 흑색 표식)의 응답을 보여준다. 본 시험에서 제어가스 압력은 80 kPa 에서 2.5 kPa 의 증가량으로 90 kPa 까지 증가시킨 후 다시 2.5 kPa의 감소량으로 80 kPa까지 감소시키는 방식으로 진행되었으며, 시험한 압력 증분은 800 W의 열입력에서 증발기와 보상실 간 압력 역전을 유발하는 임계 압력크기인 4.38 kPa보다[53] 작은 값으로 선택하여 진행하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 등온영역 온도는 오버 슈트 및 언더 슈트 없이 설정된 제어가스의 계단형 압력변화를 따라 빠르고 안정적으로 제어되었다. 또한, 각 압력 단계에서 약 0.8 °C 크기의 계단형 온도변화가 발생하였으며, 모든 온도 단계에서 약 0.01 °C 의 안정도를 가짐을 확인하였다. 또한, 본 시험에서 압력제어를 통해 제어된 온도는 Clapeyron-Clausius 근사식을 통해 이론적으로 예측된 온도와 정확하게 일치하는 특성을 보였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 단순한 계단형 비례제어를 적용한 MDGPC 를 이용할 경우, 상용 GPC 수준의 안정도와 속도로 고속·정밀 압력제어식 온도제어가 구현됨을 확인하였다.

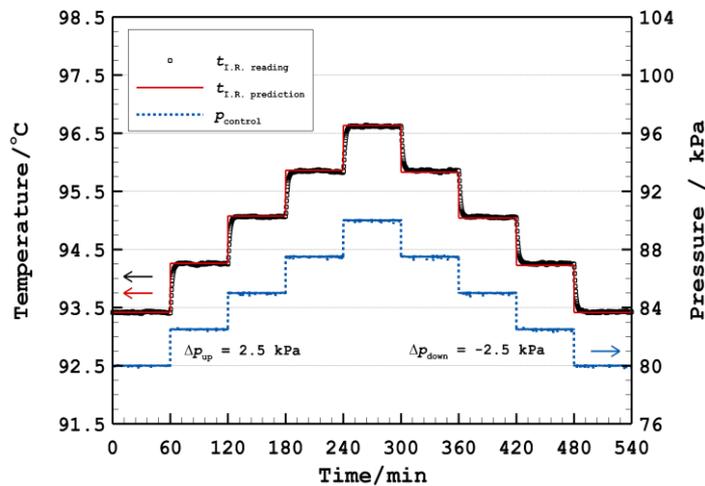


Fig. 22 Stepwise temperature control with the MDGPC

4.3. 대용량 MDGPC 압력제어특성

먼저 P 제어 적용 MDGPC 의 가스압력제어의 조작변수는 식 (9)와 같이 선형 변위로 변환된 제어오차($\Delta p(dl/dp)$)에 비례제어이득(K_p)을 곱하고 초기 선형 변위에 더하여 결정한다. 본 연구에서는 압력변화에 대한 길이변화율(dl/dp)을 불안정성을 야기하지 않는 가장 큰 압력에 대한 변위 변화율인 1 mm/kPa로 설정하였다. 아울러 설정압력과 측정압력 간 차가 1 kPa 이상에 해당하는 큰 제어오차의 발생 시 MDGPC 의 안정도 유지를 위해 1 mm 이상의 변위가 가해지지 않도록 조작변수의 상하한을 각각 1 mm와 -1 mm로 설정하였다.

$$m = l_0 + K_p \times \Delta p(dl/dp) \quad (9)$$

본 연구에서는 P 제어의 최적 비례제어이득을 도출하기 위해 1.0에서 2.0의 범위에서 비례제어이득을 0.1의 단위로 상승시키며 ± 1 kPa의 계단형 설정압력 변화에 대한 응답을 확인하였다. 본 연구에서는 제어압력 안정도에 주안점을 두고 평가하였으나 오버 슈트 및 언더 슈트 특성 역시 비교하여 불안정한 거동 발현이 제한되는 제어이득을 최적 제어이득으로 선정하고자 하였다. Table. 2 는 이와 같은 비례제어이득 변화에 따른 응답특성 시험 결과를 보여주며, 각 비례제어이득에서 설정압력 유지 구간 내 30 분간 측정된 측정압력 변화의 표준편차로 정의된 제어 안정도(control stability), 설정압력 유지 구간 내 최대값과 최소값의 차로 정의된 첨두치 간 진폭(peak-to-peak amplitude), 설정압력 변화 시 발생한 첨두치와 정상상태 측정압력의 차로 정의한 오버 슈트(overshoot) 및 설정압력 변화 시 발생한 최저치와 정상상태 측정압력의 차로 정의한 언더 슈트(undershoot)의 값을 확인할 수 있다. 표를 통해 확인할 수 있듯이 비례제어이득 1.5에서 가장 안정적인 압력제어가 이루어짐을 확인할 수 있으며, 첨두치 간 진폭 역시 최소수준을 보임을 알 수 있다. 또한, 오버 슈트

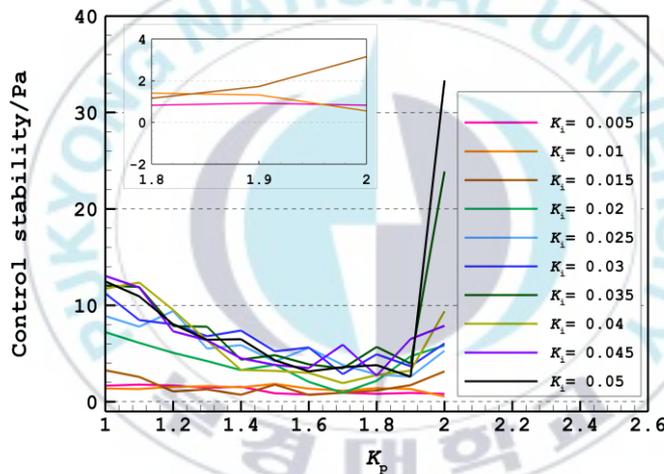
Table. 2 Control characteristics of the MDGPC to ± 1 kPa step changes in set-point values at various proportional gains (K_p)

K_p	Control stability (Pa)	Peak-to-peak amplitude (Pa)	Overshoot (Pa)	Undershoot (Pa)
1.0	2.00	9.25	1.81	0
1.1	1.48	7.14	3.98	0.32
1.2	1.94	7.68	1.00	0
1.3	1.47	6.42	1.36	1.06
1.4	1.15	5.68	1.37	2.69
1.5	0.54	3.57	1.07	1.58
1.6	0.72	3.20	1.65	1.93
1.7	0.81	4.87	1.46	2.54
1.8	1.26	4.76	1.13	2.48
1.9	0.89	4.91	3.15	1.43
2.0	0.71	4.10	260.92	4.92

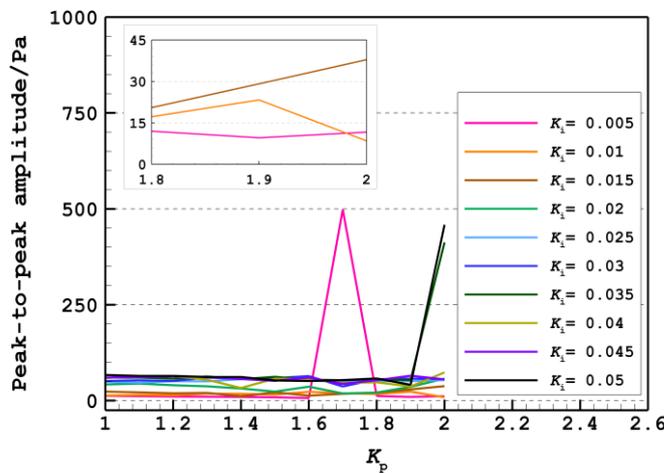
및 언더 슈트의 경우 상대적으로 낮은 수준인 약 1 Pa의 값을 가짐을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서는 P 제어를 위한 최적 비례제어이득으로 가장 안정적인 압력제어특성과 더불어 상대적으로 작은 오버 슈트 및 언더 슈트 특성을 보인 1.5를 최적 비례제어이득으로 선정하였다.

Figure 23는 이어 수행된 비례적분제어의 최적 제어이득 선정 시험 결과를 보여준다. Figures 23 (a)와 (b)는 각각 비례 및 적분제어이득 별 ± 1 kPa의 계단형 설정압력 변화에 대해 각 설정압력 유지 구간 내 제어압력 안정도와 침두치 진폭 변화를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 비례제어이득이 증가함에 따라 제어압력 안정도가 향상되었으며, 제어이득이 $K_p = 2.0$ 과 $K_I = 0.01$ 의 조합을 가질 때 가장 안정적인 압력제어달성이 가능하였다. 또한, Figure 23 (b)에서 볼 수 있듯이 침두치 진폭의 경우 적분제어이득 변화에 따른 큰 차이를 보이지 않았으나, $K_p = 2.0$ 과 $K_I = 0.01$ 의 조합을 가질 때 약 8 Pa로 상대적으로 낮은 값을 가져 위 제어이득 조합을 사용할 경우 상대적으로 안정적인 제어가 가능함을 확인하였다.

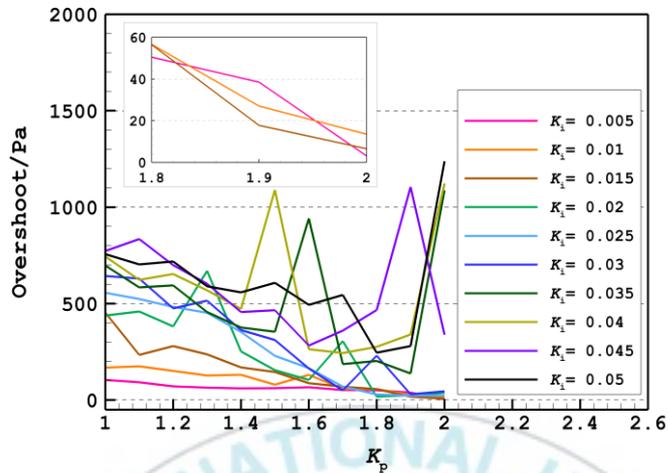
Figures 23 (c)와 (d)는 각각 비례 및 적분제어이득 별 계단형 설정압력 변화에서 측정된 오버 슈트 및 언더 슈트 변화 경향을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 $K_p = 2.0$ 과 $K_i = 0.01$ 의 조합을 가질 때 상대적으로 낮은 수준의 오버 슈트 및 최저 언더 슈트가 발생하였다. 이와 같은 거동에 따라 본 연구에서는 $K_p = 2.0$ 과 $K_i = 0.01$ 를 PI 제어의 최적 제어이득 조합으로 선정하였다.



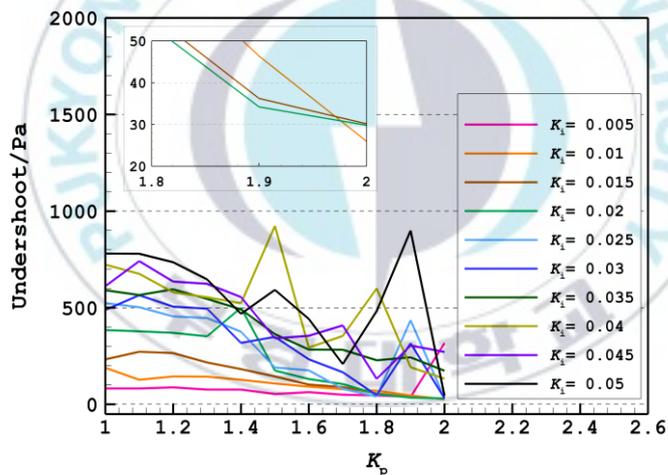
(a) Control stabilities with various gains (K_p and K_i)



(b) Peak to peak amplitude with various gains (K_p and K_i)



(c) Overshoot with various gains (K_p and K_i)

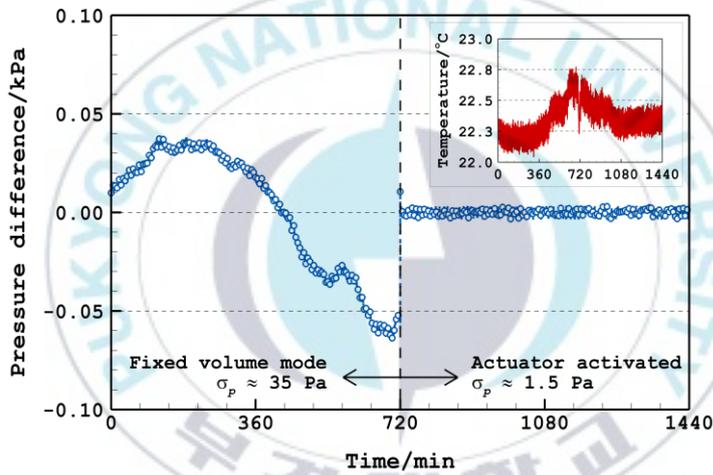


(d) Undershoot with various gains (K_p and K_i)

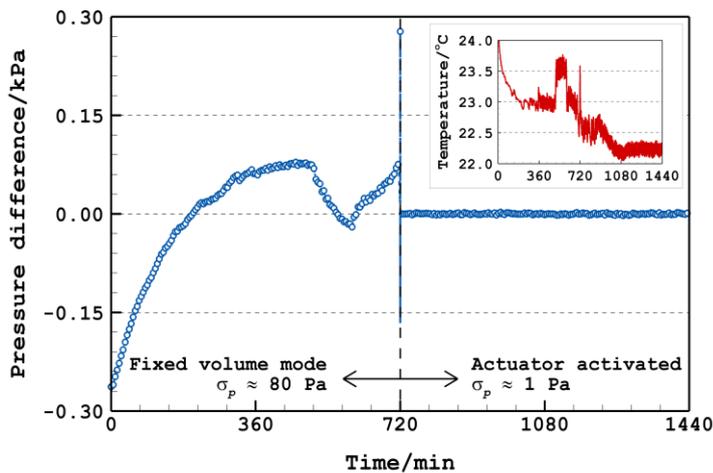
Fig. 23 Responses of the MDGPC with different gains to stepwise set-value changes

Figures 24 (a)와 (b)는 약 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 외기 온도변화 환경에서 각각 P 및 PI 제어를 적용한 MDGPC의 압력제어 전후 가변체적형 챔버 내부 압력변화를 보여준다. 해당 시험에 있어 압력제어 전의 가변체적형 챔버는 축방향 길이를 고정하여 고정체적 모드(fixed-volume mode)로 운용하였다. 그림에서 보이듯이 가변체적형 챔버 내부 압력은 고정체적 운용 시 외기 온도변화에 따라 크게 변하는 특성을 보였다. 반면, 선형 구동기 제어를 통한 압력제어를 실시할 경우 외기 온도변화와 무관하게 가변체적형 챔버 내부 가스압력이

설정압력으로 제어되었으며, 이에 따라 압력제어 안정도가 크게 향상되었다. 가변체적형 챔버 내부 가스압력은 압력제어 전 약 80 Pa의 안정도로 변화하였으나, P 제어 및 PI 제어를 적용한 MDGPC 구동하였을 시 각각의 제어 방식에 따라 약 1.5 Pa 및 약 1 Pa의 안정도로 매우 안정적인 가스압력제어가 이루어졌음을 확인할 수 있다. MDGPC의 제어압력 안정도는 위와 같이 PI 제어가 P 제어 대비 다소 우수한 특성을 보였으나, 첨두치 진폭은 P 제어와 PI



(a) Under the P control

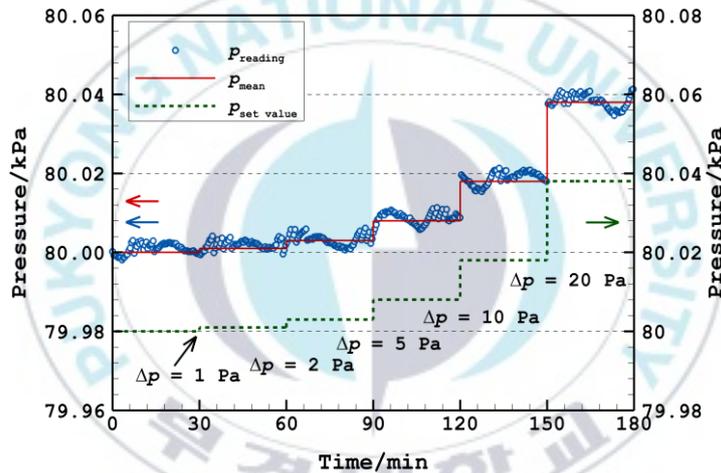


(b) Under the PI control

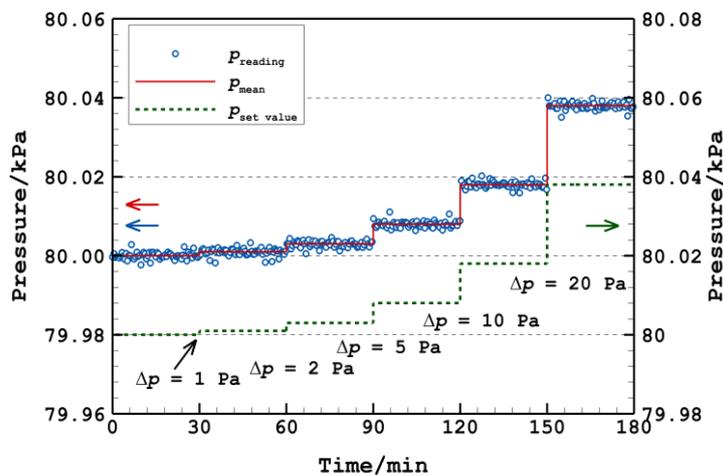
Fig. 24 Pressure stability changes inside the variable-volume chamber before and after the MDGPC operation. (The insets show the variation in the room temperature.)

제어에 따라 각각 약 7 Pa 및 약 20 Pa로 확인되어 P 제어보다 좁은 폭의 압력제어가 가능함을 확인하였다.

본 연구에서는 압력제어 안정도 시험에 이어 MDGPC의 압력제어 정밀도를 정량화하기 위한 분해능 평가를 수행하였다. 본 연구에서 압력제어 분해능은 1 Pa부터 20 Pa까지 설정압력을 약 두 배씩 증가시키며 측정압력 변화가 안정도를 벗어나 명확히 구분되는 설정압력 변화로 결정하였다. Figures 25 (a)와 (b)는 각각 P 제어 및 PI 제어를 적용하였을 때 얻어진 가변체적형 챔버



(a) Under the P control



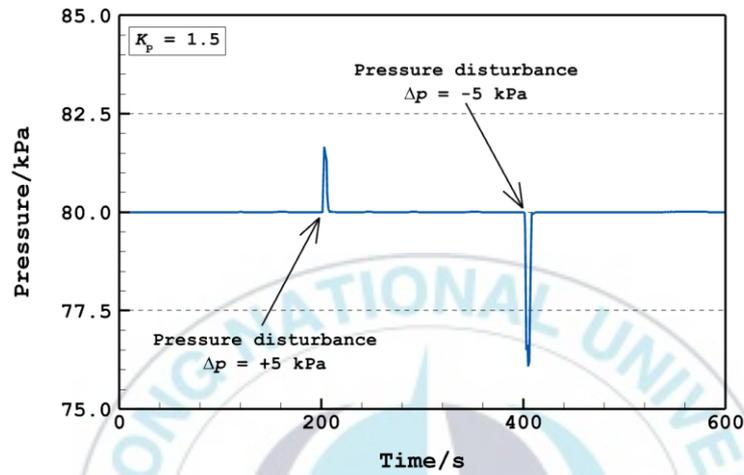
(b) Under the PI control

Fig. 25 Response of the MDGPC to increasing pressure steps

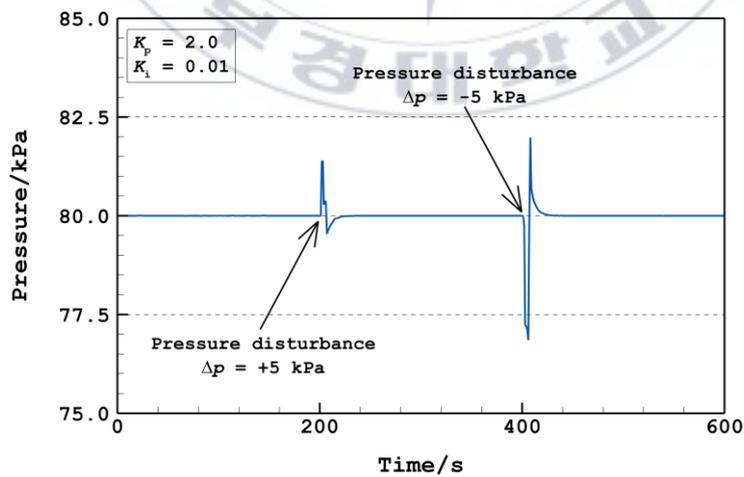
내부 측정압력(청색 표식)의 설정압력(녹색 점선) 변화에 대한 응답특성을 보여주며, 각 설정압력 유지 구간에서의 측정압력 평균(적색 실선) 역시 도시되어 있다. 그림과 같이 P 제어 및 PI 제어 시, 각각 설정압력 10 Pa 및 5 Pa 증가 시 측정압력의 명확한 변화가 관측되어 MDGPC의 압력제어 분해능이 각각 약 10 Pa 및 약 5 Pa임을 확인하였다. 위 시험결과를 바탕으로 본 연구에서 제작된 MDGPC의 압력제어 안정도는 P 제어와 PI 제어에 대해 각각 약 1.5 Pa과 약 1 Pa로 확인되었으며, 제어 정밀도를 지시하는 압력제어 분해능은 P 제어와 PI 제어에서 각각 약 10 Pa과 약 5 Pa로 평가되었다. 이를 통해 압력제어 안정도 및 정밀도는 PI 제어가 P 제어 대비 다소 우수한 특성을 가짐을 확인하였다.

Figures 26 (a)와 (b)는 각각 P 제어 및 PI 제어를 통한 설정압력 제어 중 ± 5 kPa의 압력 외란에 노출된 후 얻어진 압력 회복과정을 보여준다. MDGPC의 압력 외란에 대한 설정압력 회복능력은 80 kPa의 설정압력으로 제어 중인 MDGPC에 ± 5 kPa 압력 외란을 약 5 초간 인가한 후 설정압력으로의 회복 거동을 통해 평가하였다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이, 가변체적형 챔버 내부 압력은 압력 외란에 의해 잠시 영향을 받았으나 P 제어 및 PI 제어 시 각각 약 5 초 및 약 20 초 이내에 설정압력으로 회복하였으며, 회복 후 압력 안정도는 P 제어와 PI 제어 시 각각 1.5 Pa과 1 Pa로 평가되었다. 다만, 그림에서 확인할 수 있듯이, P 제어의 경우 설정압력 회복 시 오버 슈트 또는 언더 슈트 없이 즉각적인 회복을 보인 반면, PI 제어 시 제어압력에서 오버 슈트 및 언더 슈트가 발생하여, 압력 외란에 노출가능성이 존재하는 MDGPC의 운용에 있어 PI 제어보다 P 제어의 적용이 더욱 적합한 것으로 평가되었다. 또한, 그림에서 보이는 바와 같이 MDGPC는 설정압력보다 높은 값의 압력 외란에 노출될 경우 낮은 값의 압력 외란에 노출되는 경우 대비 더욱 강건한 특징을 보였는데, 이는

MDGPC의 가변체적형 챔버의 팽창과정 시 부피증가에 의한 압력 변화율이 감소하는 특징에 기인한다.



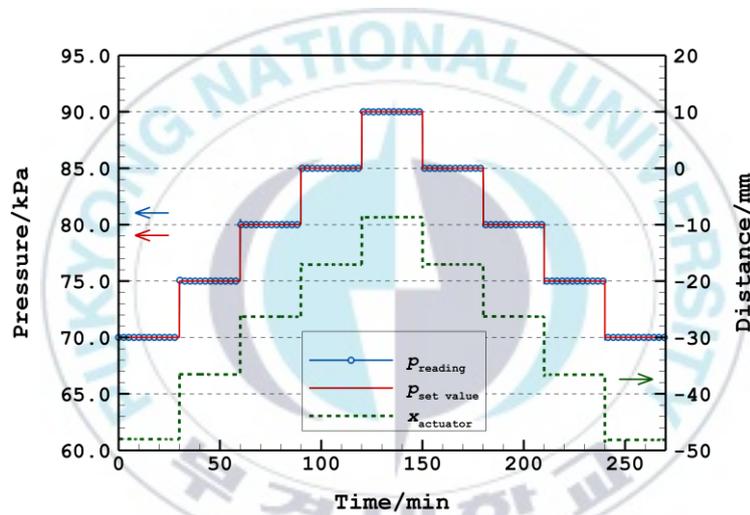
(a) Under the P control



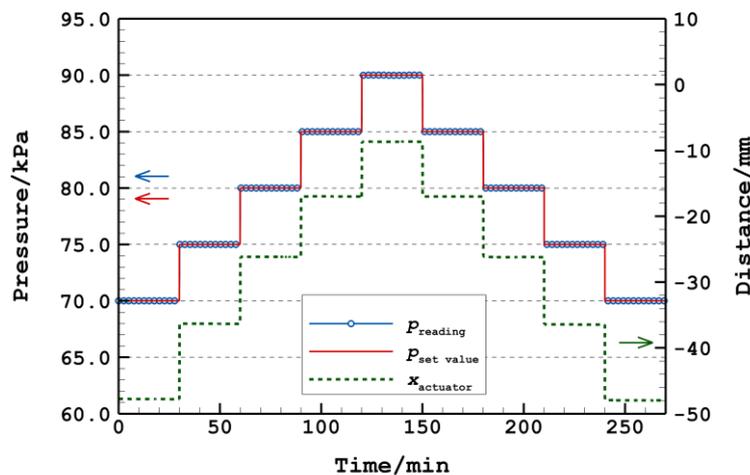
(b) Under the PI control

Fig. 26 Responses of the MDGPC to external pressure disturbances with the P and PI controls

본 연구에서는 MDGPC의 순간 압력제어특성 평가를 위해 ± 5 kPa의 계단형 설정압력 변화에 대한 압력제어 응답특성을 시험하였다. Figures 27 (a)와 (b)는 각각 P 및 PI 제어를 적용하였을 경우 얻어진 계단형 설정압력 변화에 대한 MDGPC의 압력제어 응답특성을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 설정압력 변화(적색 점선) 시 선형 구동기 구동축 위치(녹색 점선)변화에 따라 측정압력(청색 표식)이 매우 빠르고 정밀하게 제어됨을 확인할 수 있다.



(a) Under the P control

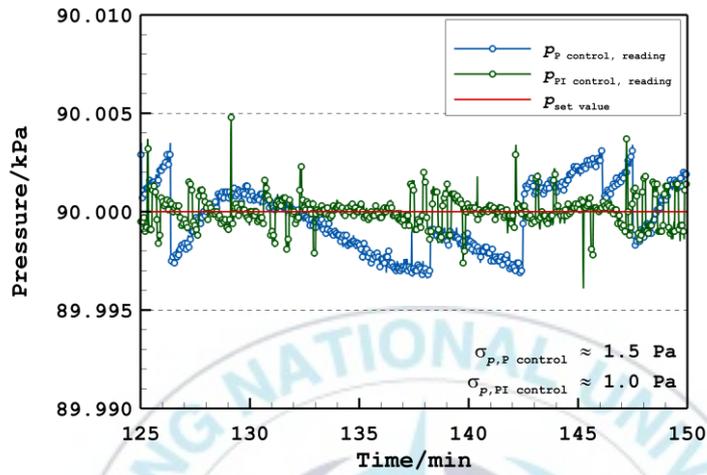


(b) Under the PI control

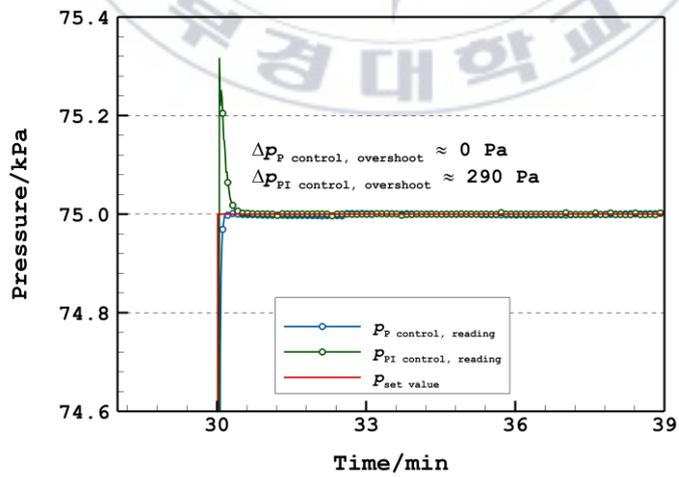
Fig. 27 Response of the MDGPC to stepwise set-value changes

Figure 28 (a)는 90 kPa에서 P 제어 및 PI 제어를 통한 압력제어 중 제어압력의 변화를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이, P 제어를 적용한 MDGPC의 경우 측정압력(청색 표식)이 설정압력(적색 실선) 기준 약 3 Pa의 폭 내에서 제어되며 약 1.5 Pa의 제어압력 안정도를 가진 반면, PI 제어 적용 시 측정압력(녹색 표식)이 설정압력(적색 실선) 기준 약 2 Pa의 폭 내에서 약 1 Pa의 제어압력 안정도로 제어됨을 확인할 수 있다. 또한, Figure 28 (b)는 계단형 압력제어 시험 중 P 제어 및 PI 제어 중 설정압력(적색 실선)이 70 kPa에서 75 kPa로 변경될 때의 오버 슈트 특성을 보여준다. 그림에서 보이는 것과 같이 P 제어를 적용할 경우 측정압력(청색 표식)에서 오버 슈트의 발생은 확인되지 않았으나, PI 제어를 적용할 경우 측정압력(녹색 표식)에서 약 290 Pa의 오버 슈트가 발생하였음을 확인하였다.

위 시험결과들을 종합하여 볼 때, 설정압력 유지 구간의 제어압력 안정도는 PI 제어가 P 제어 대비 근소하게 우수한 것을 알 수 있다. 다만, 설정압력의 변화 또는 외부 압력 외란의 발생 시, PI 제어에서 오버 슈트 및 언더 슈트가 발생하여 제어 안정성을 악화시킬 수 있다는 점에서 설정압력 유지 및 제어를 위해서는 PI 제어 대비 P 제어의 사용이 더욱 적합한 것으로 평가되었다. 이에 따라 본 연구에서는 압력제어식 온도제어 구현을 위한 MDGPC의 제어방식으로 P 제어가 PI 제어방식 대비 더욱 적절함을 확인하였다.



(a) Stability comparison at 90 kPa



(b) Overshoot characteristic at 75 kPa

Fig. 28 Comparison between the P and PI controls

4.4. 대용량 MDGPC 적용 밀폐형 압력제어식 온도제어특성

본 연구에서는 P 제어 적용 대용량 MDGPC 기반 압력제어식 온도제어특성을 평가하였다. 본 실험에서는 등온영역 근방 증기상 작동유체의 온도변화에 더해 등온영역(작업공간) 내부의 온도변화 역시 측정하고자 하였으며, Figure 29는 PCLHP의 작업공간 내 온도 균일도 및 온도 안정도 시험을 위해 제작된 알루미늄 드라이블록의 제원 및 개요도 및 온도계 삽입구 별 번호를 보여준다. 드라이블록은 5 개의 온도계 삽입구를 가지며 약 22 cm의 깊이를 갖도록 제작되었으며, 드라이블록을 등온영역 내 작업공간에 삽입하여 내부 온도변화를 측정하고자 하였다. Figure 30 (a)는 계단형 제어가스 압력변화에 대한 등온영역 근방 증기상 작동유체의 온도변화를 보여주며, Figure 30 (b)는 등온영역 내 작업공간에 삽입된 알루미늄의 드라이 블록 내부 온도변화를 보여준다. 시험된 압력제어범위는 60 kPa에서 140 kPa까지였으며, 이는 선형 구동기의 하중한계에 해당하는 압력범위 내에서 압력제어식 온도제어를 진행하기 위해 설정되었다.

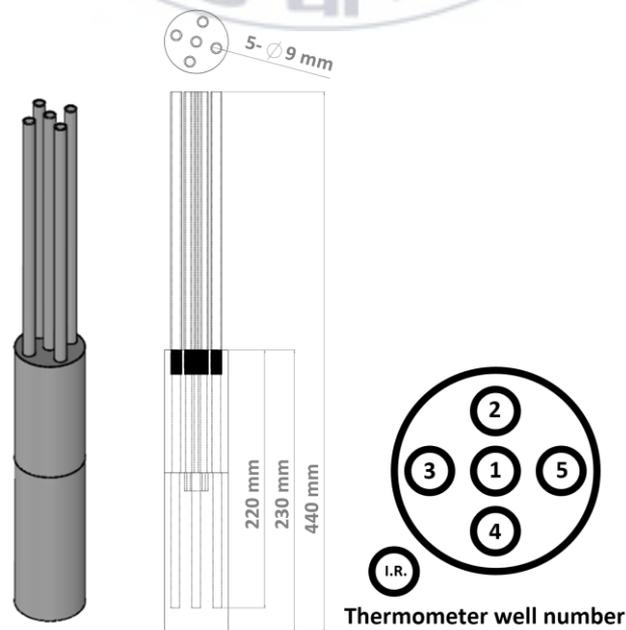
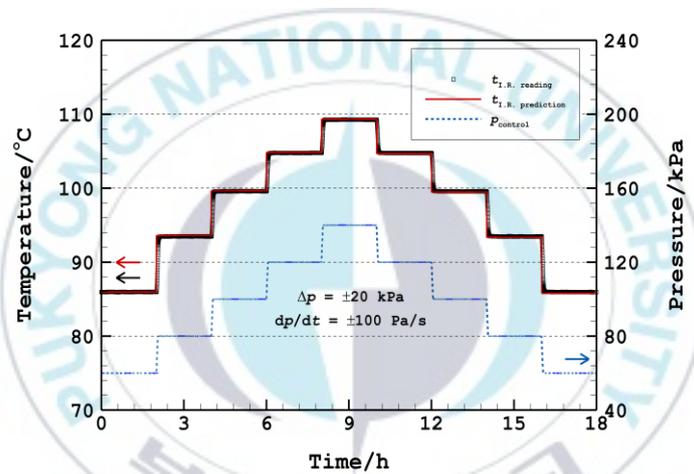
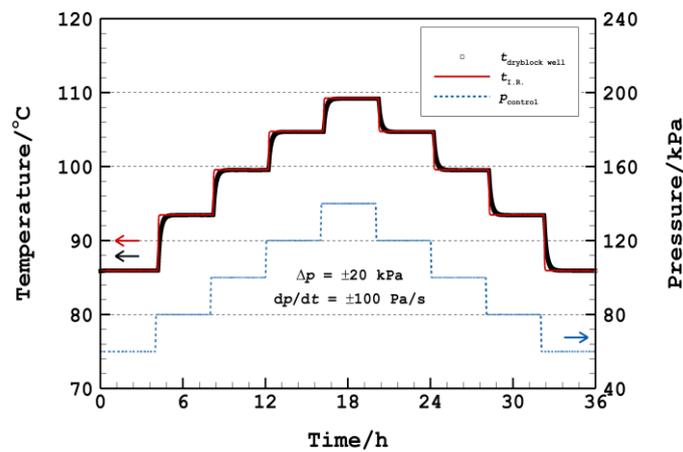


Fig. 29 Dimensions of the dry-block comparator

Figure 30 (a)에서 볼 수 있듯이 대용량 MDGPC의 적용을 통해 기존 대비 확장된 온도제어범위를 보였으며, 전체 압력제어범위에서 약 86 °C에서 110 °C의 범위에서 등온영역의 온도가 제어되었다. 등온영역 온도는 설정된 제어가스 압력의 단계적 변화를 따라 안정적이고 빠르게 제어되었으며, 모든 온도 단계에서 약 0.01 °C의 온도 안정도를 갖는 것으로 측정되었다. 그림을 통해 볼 수 있듯 본 시험에서도 Clapeyron-Clausius 근사식을 통해 예측된



(a) Response of isothermal region temperature



(b) Response of working space temperature

Fig. 30 Large-scale stepwise pressure changes generated by the MDGPC

온도와 실제 측정 온도가 정확히 일치하여, 압력제어식 온도제어의 예측가능 특성을 보였다. 제어 특성 Figure 30 (b)는 등온영역에 삽입된 드라이 블록 내 측정온도(흑색 표식)과 등온영역 온도계 삽입구 측정온도(적색 실선)의 변화를 보여주며, 제어가스 압력변화(청색 점선)를 따라 드라이 블록 내부 온도 역시 정밀제어됨을 확인할 수 있다. 다만, 드라이 블록 내부 온도의 경우 알루미늄이 갖는 유한한 열용량에 의해 압력제어를 통해 직접 제어된 온도인 등온영역 온도 대비 느린 반응을 보였다.

본 연구에서는 등온영역 온도제어특성 평가 이후 작업공간 내 설치된 드라이 블록 내부 수평 및 수직 온도 균일도 평가를 진행하였다. Figure 31 은 드라이 블록에 형성된 각 온도계 삽입구 별 바닥부의 수평 온도 균일도를 측정 한 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 1 번 삽입구에서 5 번 삽입구까지 모든 온도계 삽입구 간 온도차는 확장불확도 내에서 일치하는 약 0.03°C 의 균일도를 갖는 것으로 확인되었다. 또한, 시험된 모든 압력범위에서 보상실 제어 압력에 따른 드라이 블록 내부 수평 온도 균일도의 변화는 관측되지 않았다.

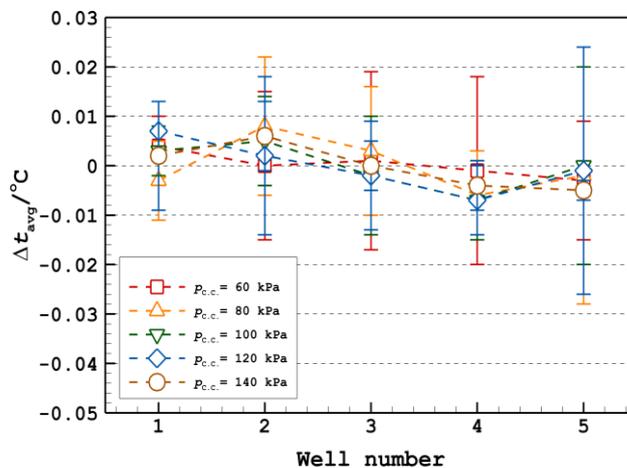
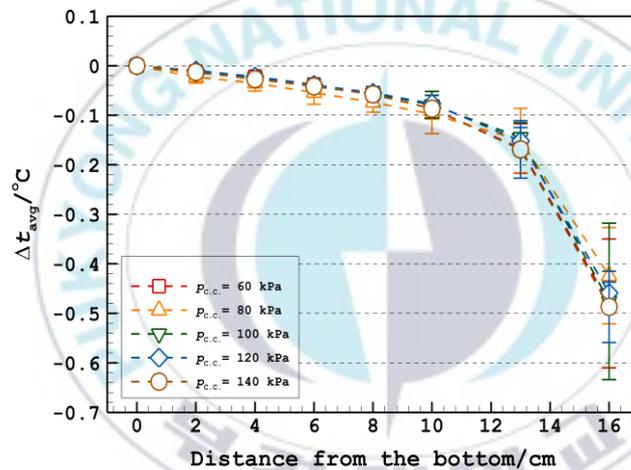
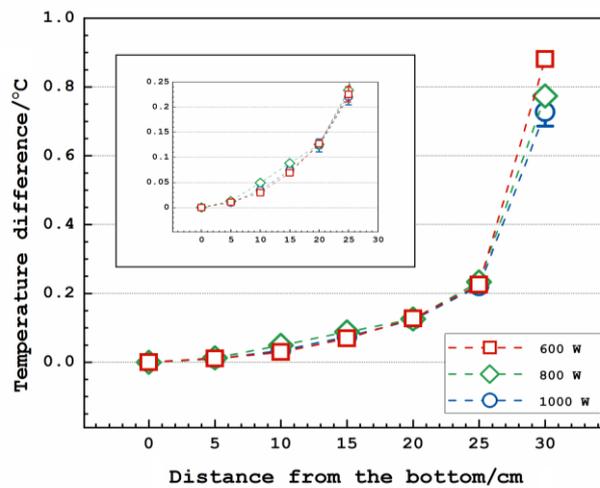


Fig. 31 Horizontal temperature uniformity of the working space of the isothermal region

Figure 32 (a)는 드라이 블록 중앙 온도계 삽입구에 대한 수직 온도 균일도 평가 결과를 보여준다. 앞선 수평 온도 균일도 평가 결과와 동일하게 보상실 내 제어압력 변화에 따른 유의미한 변화는 관측되지 않았으며, 바닥부 기준 16 cm 높이까지 측정된 결과에서 0 cm 에서 10 cm 의 범위에서 약 0.1 °C 의 온도변화를 보였으며, 전체 측정 범위에서는 약 0.5 °C 의 온도변화를 보이며 예상보다 큰 온도차가 존재함을 확인하였다. Figure 32 (b)는 등온영역의 증기상 작동유체 유동공간에 형성된 온도계 삽입구에서 측정된 수직



(a) Vertical temperature uniformity of the dry-block



(b) Vertical temperature uniformity of the isothermal region

Fig. 32 Vertical temperature uniformity of the working space of the isothermal region

온도변화[53]를 보여주며, 0 cm에서 20 cm의 범위에서 약 0.1 °C의 변화를 보였으며, 이를 통해 등온영역의 증기 유통공간 온도분포는 드라이 블록 내부 수직 온도분포보다 더욱 균일함을 확인하였다. 이러한 결과는 드라이 블록 상부로의 열손실에 기인하는 것 보이며 향후 추가 연구를 통해 개선이 요구된다.



5. 결론

본 연구에서는 상용 GPC 사용에 따라 개방형 특성을 가졌던 기존 압력제어식 온도제어의 한계를 극복하기 위해, 작동유체 밀폐형 압력제어가 가능한 MDGPC의 개발 및 이를 이용한 밀폐형 압력제어식 온도제어의 실현을 목표로 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 밀폐형 압력제어식 온도제어를 위해 가변체적형 챔버와 선형 구동기로 구성된 MDGPC와 상온영역에서의 온도제어를 위한 증류수 작동유체 PCLHP를 제작하였다. MDGPC는 선형 구동기 기반 가변체적형 챔버 축 길이의 선형 변위제어를 통해 내부 압력제어를 구현하였으며, 계단형 비례제어 및 개선된 비례제어를 적용하여 상용 GPC 수준의 압력제어특성 달성에 성공하였다. 본 연구에서는 이와 같이 제작된 MDGPC를 적용한 PCLHP를 이용하여 밀폐형 압력제어식 온도제어를 실현하였다. MDGPC 적용 압력제어식 온도제어 시험 결과, 상용 GPC 기반 압력제어식 온도제어와 동등한 수준의 온도제어 안정도 및 고속 온도제어특성을 가짐을 확인하였다. 본 연구에서 수행된 압력제어특성 및 온도제어특성의 세부적인 결과는 아래와 같다.

1. 수정된 비례제어를 적용한 MDGPC 기반 압력제어특성 평가를 통해 압력제어 후 제어압력 안정도 약 1 Pa의 달성을 확인하였다. 또한, 고속 압력제어특성 평가를 통해 오버 슈트 및 언더 슈트의 발현없이 설정압력의 빠른 도달 및 제어압력 안정도 약 1 Pa의 달성을 확인하였다. 이후, 압력 외란에 대한 회복능력 시험을 통해 직접적인 압력 외란에 대해 설정압력으로 30 초 이내 회복이 가능함을 확인하였다. 다만, 사용한 계단형 비례제어 특성에 따라 측정압력이 설정압력에 근접함에 따라 압력제어속도가 감소하는 특징을 가지며 가변체적형 챔버의 제한된 체적에 따른 제한적인 압력제어범위를 확인하였다.

2. 수정된 비례제어를 적용한 MDGPC 기반 PCLHP 를 통한 압력제어식 온도제어특성 평가를 통해 상용 GPC 기반 압력제어식 온도제어와 동일한 수준의 제어온도 안정도 약 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 달성을 확인하였으며, 계단형 제어가스 압력변화에 대해 계단형 온도제어 구현능력 시험을 통해 오버 슈트 및 언더 슈트 없이 빠르고 안정적인 온도제어가 가능함을 확인하였다. 또한, 열역학적 관계식(Clapeyron-Clausius approximation)을 통한 정확한 제어온도 예측이 가능함을 확인하였다. 이에 따라 밀폐형 MDGPC 를 적용하여 개방형 상용 GPC 적용 압력제어식 온도제어와 동등한 수준의 밀폐형 압력제어식 온도제어가 실현됨을 확인하였다.

3. MDGPC 의 압력제어 범위 확장 및 제어성능개선을 위해 대용량 가변체적형 챔버를 채용하고 비례제어 및 비례적분제어를 적용하였다. 최적제어이득이 적용된 MDGPC 의 압력제어특성 평가를 통해 비례제어 적용 시 동일한 수준의 제어압력 안정도에서 타 제어기법 대비 빠르고 안정적인 제어 달성이 가능하며, 비례제어 기반 MDGPC 의 운용이 고안된 제어기법 중 가장 적절함을 확인하였다. 또한, 대용량 가변체적형 챔버의 적용에 따라 기존의 70 kPa 에서 90 kPa 까지의 압력제어범위에서 60 kPa 에서 140 kPa 까지의 압력제어범위로의 압력제어범위 확장을 확인하였으며, 각 설정압력 단계별 약 1.5 Pa 의 제어압력 안정도를 확인하였다. 또한, $\pm 5\text{ kPa}$ 의 압력 외란에 대한 설정압력 회복능력 시험을 통해 외란 발생 후 설정압력으로 5 초 이내에 빠른 회복을 보여 기존 계단형 비례제어 대비 개선된 압력제어능력을 가짐을 확인하였다.

4. 개선된 MDGPC 적용 PCLHP 를 이용한 압력제어식 온도제어특성 평가를 통해 약 60 kPa 에서 140 kPa 까지의 압력제어범위에서 약 $86\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 범위 내 제어온도 안정도 약 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 안정적 온도제어가 가능함을 확인하였다. 달성된 제어온도 안정도는 기존 개방형 상용 GPC 적용 압력제어식 온도제어의

안정도와 동등한 수준이었으며, 이를 통해 본 연구에서 목표로 하였던 밀폐형 압력제어식 정밀 온도제어가 구현되었음을 확인하였다. 이와 더불어, 작업공간 내 수평 및 수직 온도 균일도 시험을 통해 5 개의 온도계 삽입구 간 바닥부 수평 온도 균일도는 약 0.01 °C로 측정되었으며, 수직 온도 균일도는 0 cm에서 20 cm의 범위에서 약 0.1 °C의 변화를 보였다. 다만, 드라이 블록 상단으로의 열손실에 의한 예상보다 큰 온도구배는 향후 연구를 통해 개선될 여지가 있음이 확인되었다.



6. 참고문헌

- [1] J. Tan, J.M. Hofer, Self-tuning predictive control of processing temperature for food extrusion, *J. Process Control*, 5, (1995), 183-189.
- [2] C. Chung, H. Chen, C. Ting, Fuzzy logic for accurate control of heating temperature and duration in canned food sterilization, *Eng. Agric. Environ. Food*, 9, (2016), 187-194.
- [3] G. Karer, G. Music, I. Skrjanc, B. Zupancic, Hybrid fuzzy model-based predictive control of temperature in a batch reactor, *Comput. Chem. Eng.*, 31, (2007), 1552- 1564.
- [4] D. Kim, J. Wu, K. Jeong, M. Kim, H. Shin, Natural inducement of hydrogen from food waste by temperature control, *Int. J. Hydrog. Energy*, 25, (2011), 10666- 10673.
- [5] H.Q. Nguyen, B. Shabani, Review of metal hydride hydrogen storage thermal management for use in the fuel cell systems, *Int. J. Hydrog. Energy*, 46, (2021), 31699-31726.
- [6] W. Joung, K.S. Gam, Y. Kim, Realization of tin freezing point using a loop heat pipe-based hydraulic temperature control technique, *Metrologia*, 52(5), (2015), 694-707.
- [7] D. I. Head et al., Current work on furnaces and data analysis to improve the uniformity and noise levels for metal fixed points, *Int. J. Thermophys.*, 30, (2009), 296-305.
- [8] H. Liang, Z. Sang, Y. Wu, Y. Zhang, R. Zhao, High precision temperature control performance of a PID neural network-controlled heater under complex outdoor conditions, *Appl. Therm. Eng.*, 195, (2021), 117234.
- [9] W. Joung, Y. Kim, I. Yang, K.S. Gam, Operating characteristics of a loop heat pipe-based isothermal region generator, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 65, (2013), 460-470.
- [10] W. Joung, K.S. Gam, Y. Kim, I. Yang, Hydraulic operating temperature control of a loop heat pipe, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 86, (2015), 796-808.

- [11] Desborough, L., Miller, R., Increasing customer value of industrial control performance monitoring—Honeywell' s experience, AIChE Symposium, Series No.326(98), (2002), 153-186.
- [12] S. Yun, S. Han, M. Kim, The world-wide market and technique trends of process & hydraulic-pneumatic valve, Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society, 6(3), (2009), 2-9.
- [13] KASTO 17-20401-427, (2017), Altermeters.
- [14] KASTO 19-20406-391, (2019), Absolute Pressure Gauges.
- [15] B. Kim, J. Lee, K. Nam, C. Ahn, K. SUN, Pressure regulation system for optimal operation of the pneumatic VAD with bellows-type closed pneumatic circuit, Journal of Biomedical Engineering Research: The Korean Society of Medical & Biological Engineering, 28(4), (2007), 569-576.
- [16] J. Jang, A study on the pressure control of a pneumatic pressure vessel considering dynamic characteristics of pneumatic transmission line, Journal of Korean Society for Power System Engineering, 5(4), (2001), 90-96.
- [17] J. Jang, K. Lee, Pressure control of a pneumatic control system with a long transmission line, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 27(4), (2003), 567-576.
- [18] J. Jang, D. Koh, Y. Kim, Pressure control in a pneumatic pressure chamber, Proceedings of the KSPSE 2006 spring conference, 2006, 333-338.
- [19] B. Kim, A study on the characteristics of high pressure regulator for vehicle CNG, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 12(12), (2011), 5997-6003.
- [20] J. Jung, C. Nam, M. Kim, A study on the pressure control process of gas regulators through numerical analysis, Journal of the Korean Institute of Gas, 25(5), (2021), 37-51.

- [21] S. Yun, C. Kim, W. Seo, J. Park, Y. Ham, Pressure regulator for piezoelectric valve, Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society, 3(2), (2006), 1-6.
- [22] S. Yun, C. Kim, Y. Ham, J. Park, D. Youn, Digital control for PZT type electro-pneumatic regulator, Proceedings of the KSPE 2007 Spring Conference, 2007, 93-94.
- [23] S. Yun, K. Lee, Digital control of electro-pneumatic regulator with two piezoelectric microvalves, Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society, 5(2), (2008), 17-23.
- [24] C. Yoo, S. Kang, S. Choi, Method for determination of pump ejection quantity through in vitro experiment of ECMO using pneumatic pulsatile pump, Proceedings of the KSME 2020 conference, (2020), 1996-1998.
- [25] Cavaglià, M. et al., Noninvasive mechanical ventilation in the COVID-19 era: Proposal for a continuous positive airway pressure closed-loop circuit minimizing air contamination, oxygen consumption, and noise, Artificial Organs, 45(7), (2021), 754-761.
- [26] L. Shen, J. He, C. Yang, W. Gui, Multi-zone multi-phase temperature field modelling of aluminum alloy workpieces in large-scale vertical quench furnaces, Applied Thermal Engineering, 113, (2017), 1569-1584.
- [27] Bassani, C. and Busse, C., A Pressure controlled precision thermostat, Heat pipes, (1976), 537-544.
- [28] D. A. Reay, P. A. Kew, R. J. McGlen, Heat pipes Theory, Design and Applications, ELSEVIER, 6th Ed, (2013).
- [29] Bassani, C., Geiger, F., and Sciamanna, G., Progress on gas controlled heat pipe precision furnaces for temperatures up to 1100 °C, Proc. of the 4th International Heat Pipe Conference, (1982), 37-46.

- [30] M. Gotoh, K.D. Hill, Temperature stability and reproducibility of pressure-controlled sodium-filled heat pipe furnaces, AIP Conference Proceedings, 6, (1992), 955-959.
- [31] W. Joung, Progresses in ultra-precise temperature control and thermometry techniques, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 38(12), (2021), 905-915.
- [32] A. Merlone, S. Giunta, A. Tiziani, A new mercury gas-controlled heat pipe for temperature amplifier and as calibration facility, Int. J. Thermophys., 29, (2008), 1876-1886.
- [33] Yu. Maidanik, et al., Thermoregulation of loops with capillary pumping for space use, SAE Paper 921169, (1992), 523-528.
- [34] Yu.F. Maidanik, Yu.G. Fershtater, N.N. Solodovnik, Loop heat pipes: design, investigation, prospects of use in aerospace technics, SAE Paper 941185, (1994).
- [35] Y.F. Maidanik, Yu.G. Fershtater, N.N. Solodovnik, Design and investigation of methods of regulation of loop heat pipes for terrestrial and space application, SAE Paper 941407, (1994).
- [36] A. Torres, D. Mishkinis, F. Romera, J. Corrochano, T. Kaya, Set-point active control of vapor-modulated loop heat pipe, Heat Pipe Sci. technol. Int. J. 3 (2-4) (2012) 263-280.
- [37] F. Romera, D. Mishkinis, A. Kulakov, A. Torres, Control of LHP operation temperature by a pressure regulating valve, Proceedings of the 15th International Heat Pipe Conference, Clemson, USA, (2010), 1-8.
- [38] D. Mishkinis, A. Kulakov, F. Romera, C. Gregori, A. Torres, Thermal control of loop heat pipe with pressure regulating valve, VIII Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources", Minsk, Belarus, (2011).

- [39] John R. Hartenstine, William G. Anderson, Kara L. Walker, Jeffery T. Farmer, Michael R. Brown, Loop heat pipe with thermal control valve for variable thermal conductance link of lunar landers and rovers, American Institute of Aeronautics and Astronautics, (2011), 4-7.
- [40] K. Goncharov, V. Buz, U. Hildebrand, O. Ronberg, F. Bodendieck, R. Schlitt, Loop heat pipe for high-precision satellite thermal control, 55th International Astronautical Congress, Vancouver, Canada, (2004).
- [41] T. Wyatt, A Controllable Heat Pipe Experiment for the SE-4 Satellite, (1965), AD 695433.
- [42] P.J. Brennan, Study to Evaluate the Feasibility of a Feedback Controlled Variable Conductance Heat Pipe, NASA, Cockeysville, (1970), NASA-CR-73475.
- [43] W.B. Bienert, P.J. Brennan, J.P. Kirkpatrick, Feedback controlled variable conductance heat pipes, in: Proceedings of the 6th AIAA Thermophysics Conference, Tullahoma, USA, (1971), 1-11.
- [44] C. Depew, W. Sauerbrey, B. Benson, Construction and testing of a gas-loaded, passive-control, variable-conductance heat pipe, in: Proceedings of the 8th AIAA Thermophysics Conference, Palm Springs, USA, 1973, pp. 1-7.
- [45] A. Merlone, et al., Gas-controlled heat pipes in metrology: more than 30 years of technical and scientific progresses, Measurement 164 (2020) 108103.
- [46] S. Krenek, S. Rudtsch, Temperature comparator based on a pressure-controlled heat pipe, Tech. Mess. 85 (2018) 49-55.
- [47] W. Jung, Loop heat pipe-based hydraulic temperature control technique and its application to the precision thermometry, Proceedings of the KSME 2015 conference (2015) 1517-1519.

- [48] W. Joung, J. Park, J.V. Pearce, Determination of the liquidus temperature of tin using the heat pulse-based melting and comparison with traditional methods, *Metrologia* 55 (3) (2018) 334-349.
- [49] W. Joung, J.V. Pearce, J. Park, Comparison between the liquidus temperature and triple-point temperature of tin realized by heat pulse-based melting, *Metrologia* 55 (3) (2018) L17-L24.
- [50] W. Joung, Y. Kim, J. Lee, Transient characteristics of a loop heat pipe-based hydraulic temperature control technique, *Int. J. Heat Mass Transf.* 103 (2016) 125-132.
- [51] W. Joung, J. Lee, Effect of sink temperature on the stability of the pressure-controlled loop heat pipe, *J. Heat Transf.* 141 (9) (2019) 091805.
- [52] Yu. F. Maydanik, Loop heat pipes, *Appl. Therm. Eng.* 25 (2005) 635-657.
- [53] C. Park, W. Joung, Effect of heat load on pneumatic temperature control characteristics of a pressure-controlled loop heat pipe, *Int. J. Heat Mass Transf.* 186 (2022) 122472.
- [54] Lei, G., Feedback and uncertainty: some basic problems and results, *Annual Reviews in Control* 49 (2020) 27-36.
- [55] Smith, Carlos A., *Automated continuous process control*, John Wiley & Sons.

**Closed-type pneumatic temperature control of a pressure-controlled loop
heat pipe with a mechanically driven pressure controller**

Cheongyong Park

Department of Intelligent robot engineering,
Pukyong National University

In this study, a pressure-controlled loop heat pipe (PCLHP) utilizing water as a working fluid was constructed, and a mechanically driven gas pressure controller (MDGPC) was devised to control pressure of compensation chamber of the PCLHP in a closed manner. The MDGPC consisted of a variable-volume bellows chamber and linear actuator; the former comprised multiple welded bellows for internal volume change by axial dimension change, and the latter was employed to change the axial dimension of the bellows chamber. As to the control method of the linear actuator, a stepped proportional, proportional (P), and proportional-integral (PI) controls were used. Initially, the stepped proportional control was used as the control method of the MDGPC to investigate the applicability of the MDGPC to the pressure control of the PCLHP. Based on the test results obtained from the MDGPC with the stepped proportional control, the P and PI controls were used to improve pressure control characteristics of MDGPC and correspondingly the temperature control characteristics of the PCLHP with the MDGPC.

Characterization of the pressure control of the MDGPC was carried out in terms of stability, precision, and ability to recover from external pressure disturbances. The pressure control stability and resolution of the MDGPC were found to be approximately 1.5 Pa and 10 Pa for the P control and 1 Pa and 5 Pa for the PI control, respectively. Despite the more stable and precise control characteristics of the PI control method, considerable overshoots and undershoots were observed under the PI control during the set-point pressure changes and recoveries from pressure disturbances. In contrast, the MDGPC operated under the P control did not show any significant overshoots or undershoots when the set-point pressure changed in a stepwise manner or

when the MDGPC was exposed to pressure disturbances. Thus, it was found that concluded that the P control was a suitable control method for the MDGPC in the context of the fast, precise, and stable gas pressure control in a closed manner.

With the optimized control method of the MDGPC, the compensation chamber pressure of the PCLHP was controlled in a closed manner, and the operating temperature of the PCLHP was pneumatically controlled in a closed manner. The temperature control characteristics of the PCLHP with the MDGPC were tested in terms of stability, precision, and speed of the control. In addition, temperature uniformity of the working space within the isothermal region was evaluated. Stability of the pneumatically-controlled temperature of the PCLHP with the MDGPC was approximately 0.01 °C. Temperature steps of approximately 8 °C were generated from pressure steps of ± 20 kPa, and the changed temperatures were accurately predicted by the thermodynamic relation (i.e., Clapeyron-Clausius approximation). Horizontal and vertical temperature uniformities of the working space in the isothermal region were evaluated to be 0.01 °C and 0.1 °C, respectively; the worse vertical temperature uniformity was attributed to the axial heat loss toward the opening of the isothermal region to the atmosphere, necessitating used of an enhanced insulation or heat spreading device. Overall, a closed-type pneumatic temperature control of the PCLHP was successfully attained with the use of the MDGPC.

감사의 글

지도교수님을 찾아 뵙고 인사를 드린 것이 마치 엇그제 같은데 석사 과정과 학위논문을 마무리하며 이렇게 감사의 글을 쓰는 날이 오니 감회가 새롭습니다. 무엇보다 우선하여, 2년 반의 실험실 생활 중 제가 학문적으로 그리고 인간적으로 성장할 수 있도록 큰 가르침과 아낌없는 지도를 주신 정옥철 교수님께 감사인사를 올리고자 합니다. 본 논문의 체계적인 구성을 만들어가며, 작은 부분 하나하나 세심하게 지도해주신 부분도 진심으로 감사드립니다. 앞으로도 끊임없이 배우며 지속적으로 발전할 수 있도록 항상 정진하겠습니다. 또한, 교수님께서 보여주신 학문에 대한 태도와 열정을 보며 학문을 대하는 자세를 배울 수 있었으며, 앞으로 인생을 살아감에 있어 매사 최선을 다하겠다는 마음을 가질 수 있었습니다. 조금이라도 더 많이 가르쳐 주시고 지도해주시고자 노력하신 교수님 덕분에 지금까지 올 수 있었다고 생각합니다. 마지막까지 아낌없이 격려해 주시고 지도해 주신 덕에 학위논문을 잘 마무리할 수 있었습니다. 교수님, 감사합니다.

학부 졸업 후 대학원 생활을 할 것에 대한 기대감과 전혀 없는 감염병 발생에 대한 안타까움이 동시에 있었지만, 보다 깊고 넓은 배움이 즐거웠던 4 학기를 보냈습니다. 배움에 대한 열의가 가득하여 함께 많은 밤을 지새운 실험실 동기들에게 그 감사함을 이 지면을 통해 조금이나마 표현하고자 합니다. 그리고 사랑하는 제 가족들에게 감사를 전합니다. 항상 아들이 한 자라도 더 배울 수 있도록 많은 희생을 몸소 보여주신 부모님의 은혜 평생 잊지 않고 많이 배울수록 매사에 낮은 태도로 삶에 임하며 항상 겸손하게 살아가겠습니다. 또한, 항상 동생을 믿고 동생이 잘 배울 수 있도록 많은 도움을 주었던 매형과 세 누님에게도 감사를 표합니다.

지면에 다 표현하지는 못하였지만, 석사 과정을 하는 2년 반 동안 힘이 되어준 나의 친구들에게 감사를 전하며, 격려를 아끼지 않았던 선배들과

동생의 끼니를 항상 걱정해주신 형님들에게도 감사를 표하고 싶습니다. 그 고마움을 꼭 잊지 않고 앞으로 갚아가겠습니다. 마지막으로, 제 석사 과정 동안 옆에서 정신적으로 가장 큰 버팀목이 되어주며, 석사 과정 중 힘든 일, 기쁜 일, 즐거운 일, 속상한 일, 모두를 옆에서 함께 보내고 모든 일들에 대한 감사함을 느낄 수 있게 해준 여자친구에게 감사함을 표하고 싶습니다.

석사 과정을 통해 배운 것들을 잊지 않고 모든 일들에 감사하는 마음을 갖고 앞으로 살아감에 있어서도 항상 겸손한 자세를 갖도록 하겠습니다. 감사합니다.

