실시간 플랜트 시뮬레이터를 이용한 우주 열환경 챔버 제어기 개발에 관한 연구

정무진†·신영기*·최석원,문귀원,서희준,이상훈,조혁진**

Study on the application of a realtime simulator to the development of a controller for a space thermal environment chamber

Mu-jin Jung, Younggy Shin, Seok-Weon Choi, Guee-Won Moon, Hee-Jun Seo, Sang-Hoon Lee, Hyokjin Cho

Key Words: Thermal Control(열제어), 열진공 (thermal vacuum), PLC, Simulator(시뮬레이터), Dynamics(동특성), realtime(실시간)

Abstract

A thermal vacuum chamber is mainly used to simulate thermal environments of a test satellite in satellite orbits in which daily temperature variations range from 80K to above 400K depending on solar radiation under the vacuum below 10^{-4} torr. The test facility is quite complex and consists of expensive parts. So any modification of control software is discouraged in fear of unexpected system failure. The purpose of this study is to develop a realtime dynamics model of the thermal vacuum chamber in view of controller design and simulate its electrical inputs and outputs for interface with a PLC (programmable logic controller). A PLC program that was used in the thermal vacuum chamber is applied to the realtime simulator. The realized simulator dynamics is found to be quite similar to that of the thermal vacuum chamber and serve to an appropriate plant to verify the control performance of a programmed PLC.

기호설명

$\dot{W}_{BL}$: Blower 출력 [W]
η_{blower} : Blower 효율 [%]
$\dot{m}$: 질량유량 [kg/s]
h : 엔탈피 [J/kg]
C_p : 질소의 정압비열 [J/kg-k]
T : 온도 [℃]
τ : 시상수
$\dot{Q}_{HT57}$: 히터 출력 [W]

† 세종대학교 대학원 기계공학과
E-mail : immujin@korea.com
TEL : (02)3408-3284 FAX : (02)3408-3333
* 세종대학교 기계공학과
** 한국항공우주연구원 우주시험동

1. 서 론

제작이 용이하고 제어 알고리즘이 간단하며 동특성 모델이 잘 알려진 시스템의 경우에는 동특성 시뮬레이션을 통해 제어기의 최적치를 찾고 현장에서 시행착오의 과정을 거쳐 제어기를 최종적으로 완성하는 것이 가능하다.

하지만 단시간에 제작이 어려운 거대한 플랜트 공정이나 제어기의 잘못된 설계로 제어 대상이 파손되거나 인명사고가 발생할 수 있는 경우에는 제어기 설계에 세심한 주의가 필요하다. 특히, 제어대상의 입출력 변수가 많고 복잡한 제어 시퀀

스를 거쳐야 하는 경우 대개 PLC (programmable logic controller)를 제어기로 사용하는데 이러한 PLC는 지금까지 엔지니어가 현장에서 장기간 체류하면서 실제 플랜트를 대상으로 시행착오 방식으로 제어 프로그램을 개발해 왔다. 이러한 PLC 프로그래밍과정은 실제 플랜트가 만들어진 후에 시작되기 때문에 플랜트 전체의 공사기간이 수개월 지연되게 된다. 또한 PLC 프로그래머가 현장에 장기간 상주하면서 발생하는 비용손실도 개발제품의 원가상승의 원인이 된다.

제어기 설계 및 프로그램개발은 대상 플랜트의 설계 및 시공과정에서 동시에 이루어지는 것이 바람직하다. 이러한 개발환경을 가능하게 하려면 실제의 플랜트를 대체할 플랜트 시뮬레이터가 있어야 한다. 대상 플랜트의 동특성을 실시간으로 모사할 수 있는 대표적인 제품으로는 독일 dSPACE사의 I/O 보드가 있지만 입출력 채널의 추가적인 확장이 불가능하며 고가이므로 입출력 채널 수가 많은 공정제어를 위한 PLC 프로그램 개발용 시뮬레이터로는 비경제적이다. 공정제어용 PLC 프로그램 개발을 위한 하드웨어 시뮬레이터는 적어도 50개 이상의 디지털 입출력 채널이 필요하고 수시로 확장이 가능해야 한다. 본 연구에서는 MATLAB의 실시간 시뮬레이션 모듈인 XPC Target 기능과 전이중(full duplex)방식 RS422 bus 통신을 응용한 범용 I/O 보드의 유연한 확장을 통하여 열유체 공정 모사를 위한 HILS를 개발하였으며 인공위성체 열환경 시험을 위한 대형 열진공 챔버의 제어 시스템 개발과정에의 응용사례를 소개한다.

2. XPC Target 기반 시뮬레이터 구성

외부 입출력이 있는 시스템의 시뮬레이션을 위해서는 latency로 인해 kernel 동작의 실시간성이 보장되지 못하는 윈도우 환경이 아닌 DOS와 같은 실시간 기반 OS (operating system)가 요구된다. Target PC의 DOS 환경을 이용하여 실시간 동작이 보장되는 Simulink 실행 프로그램을 가동시키는 Tool이 MATLAB의 XPC Target이다. Fig. 1은 XPC Target을 이용한 실시간 시뮬레이터의 구성을 보여준다.

XPC Target이 지원하는 Host PC와 Target PC 간의 통신방식은 Serial방식과 Ethernet방식

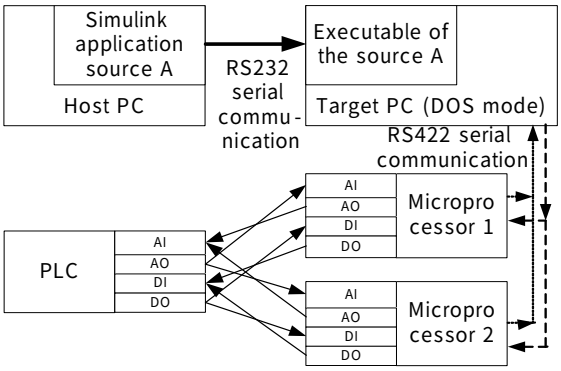

Fig. 1 Schematic of the realtime simulator

(TCP/IP)이 있다. Ethernet방식의 경우 제공되는 Ethernet의 드라이버의 종류가 많지 않기 때문에 제한성이 있어 본 연구에서는 PC에 내장된 시리얼 포트를 활용하는 방식을 택하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 구현하고자 하는 Host PC상의 SIMULINK 응용 프로그램은 XPC complier를 이용하여 실행화일로 변환되고 Target PC에 시리얼 통신을 통하여 업로드된다. 업로드 가능한 실행화일의 최대 크기는 16MB이므로 거의 모든 응용프로그램을 수용할 수 있다. 해당 실행화일의 실행과 정지는 Host PC에서 제어되며 실시간 거동을 모사한다. 입출력 전기 신호를 모사하려면 Target XPC가 인식가능한 입출력 카드를 적용하거나 본 연구에서처럼 범용성과 확장성을 갖춘 전이중 시리얼 통신방식의 RS422 bus를 이용하여 입출력 채널을 구현한다. RS422 방식의 약점은 시리얼 통신방식이므로 시리얼 통신속도보다 빠른 샘플링 주기의 구현은 불가능하다.

본 연구에서는 통신속도를 9,600 bps로 설정하여 50 ms 이상의 샘플링 속도 구현이 가능하며 필요시 115,000 bps까지 증대시킬 수 있다. 이 정도 속도이면 동특성 시상수의 크기가 적어도 수 초 이상인 기계 및 항공 시스템의 동특성 모사가 가능하다.

Fig. 1에서 Target PC와의 시리얼 통신 및 입출력 전기신호 처리를 담당한 마이크로프로세서는 미국 Atmel 사의 AVR 시리즈 중 상위모델인 Mega 128 칩을 사용하였다. 각 프로세서가 담당한 입출력 신호장치의 입출력 채널 제원은 다음과 같다. 8개의 10비트 아날로그 입력(AI), 4개의 16비트 아날로그 출력(AO), 16개의 디지털 입력(DI), 16개의 디지털 출력(DO)이 구현된다.

3. 제어 대상 플랜트

3.1 GN2 모드 열환경 챔버

본 연구에서 다루고 있는 플랜트는 인공위성의 우주 환경시험을 위한 열진공 챔버로서 극저온(-173℃) 에서 고온(127℃)까지의 범위에 걸쳐 임의의 온도 histroy를 시험할 수 있는 GN2 모드 방식이다. GN2는 액체질소 LN2(-196℃)를 mixing vessel에 분사하여 순환되는 GN2와 혼합하여 온도를 낮추고 히터와 blower로 온도를 상승시키는 방식으로 임의의 온도로 조절되며 해당 GN2는 열진공 쉬라우드에서 열막을 형성하여 시험대상체에 필요한 열환경을 조성한다. Fig. 2은 실제 GN2 열환경 챔버의 일부를 나타낸다.

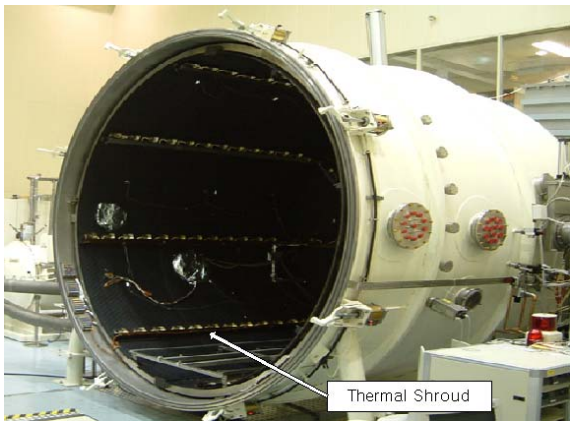

Fig. 2 Inside of the thermal vacuum chamber

3.2 GN2 모드의 작동

Fig. 3는 GN2 모드의 온도 제어과정을 나타낸다. 진공 시스템에 의해 10^{-4} torr 이하의 진공이 확보되고 난 후, GN2 온도는 다음의 제어과정을 거쳐 이루어진다.

- Blower BL53은 GN2를 폐루프 형태로 순환시킨다.
- Heater Heat57는 ON/OFF 동작으로 일정온도 이상을 유지하게 한다.
- 액체질소 비례밸브 CV61은 PT1의 온도를 일정치로 유지하도록 액체질소 공급유량을 PID 제어한다.
- GN2 밸브 CV45는 Shroud 1의 온도 유지를 위해 GN2 통과량을 PID 제어한다.
- GN2 밸브 CV48는 쉬라우드 공급 GN2 압력 일정 유지를 위해 PID 제어로 잉여 GN2를 대기 방출한다.
- Shroud: 실제 쉬라우드는 5개의 섹션으로 구분되어 있으며 특성이 비슷하므로 Shroud 1에 대해서만 제어기 성능을 시험한다.

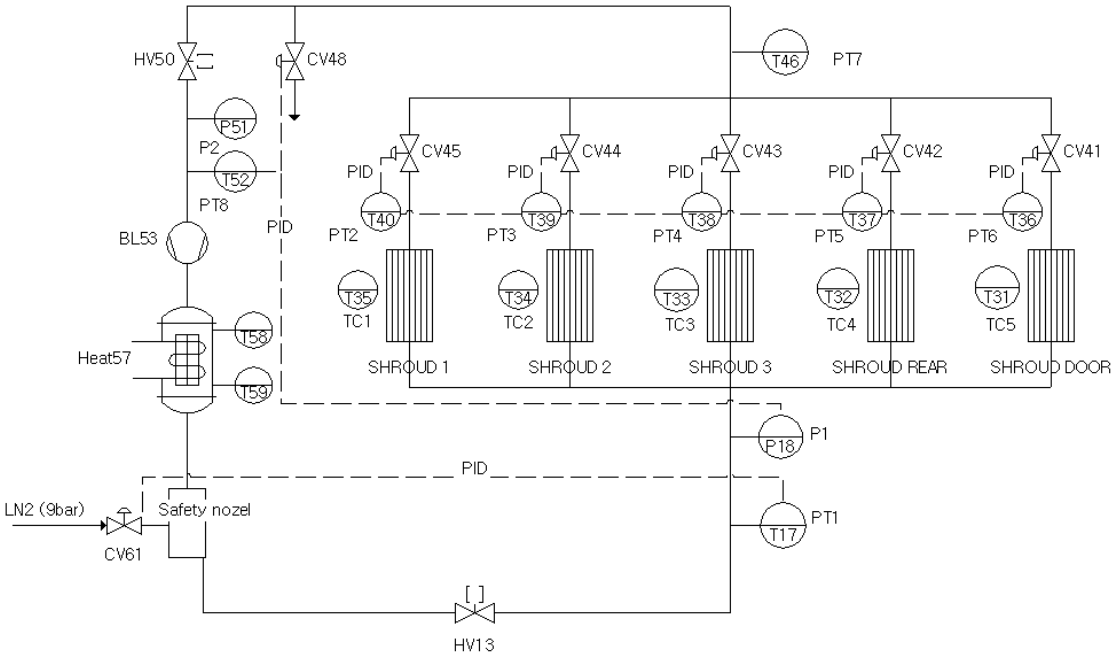

Fig. 3 Schematic of GN2 mode control process

4. 동특성 모델링

제어 알고리즘 구성을 위해서는 대상 플랜트에 대한 동특성 모델이 요구된다. 온도 및 유량의 동특성이 관련되어 있으므로 에너지 보존 법칙, 질량보존 및 베르누이 방정식 등이 적용되어야 한다. 다음의 Fig. 4는 GN2 시스템에 대한 열역학 제1법칙 적용모델을 나타낸다.

4.1 Blower 동특성

정상상태에서의 열역학 제1법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{W_{BL}} \times \eta_{blower} &= \dot{m_2}(h_{T58} - h_{T52}) \\ &= \dot{m_2} C_p (T_{T58} - T_{T52}) \end{aligned} \tag{1}$$

Blower 입력치의 변화가 Blower 입출구 온도차에 미치는 영향에 관한 동특성은 thermal capacity 및 열저항에 의해 지배되므로 일반적으로 1차함수로 근사되어 다음의 형태를 취한다.

$$\begin{aligned} &\frac{d(T_{T58} - T_{T52})(s)}{d\dot{W}_{BL}(s)} \\ &= \frac{\eta_{blower}}{\dot{m_2} C_p} \times \frac{1}{\tau_{blower} s + 1} \end{aligned} \tag{2}$$

4.2 히터 동특성

히터 동특성도 유사한 논리에 의해 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{m_2} h_{T58} + \dot{Q_{HT57}} = \dot{m_2} h_{T59} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{HT57} &= \dot{m_2}(h_{T59} - h_{T58}) \\ &= \dot{m_2} C_p (T_{T59} - T_{T58}) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &\frac{d(T_{T59} - T_{T58})(s)}{d\dot{Q}_{HT57}(s)} \\ &= \frac{1}{\dot{m_2} C_p} \times \frac{1}{\tau_{heater} s + 1} \end{aligned} \tag{5}$$

4.3 LN2 mixing vessel 동특성

GN2 온도저하를 위한 LN2 mixing vessel의 열역학 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{m_2} h_{T59} + \dot{m_{LN2}} h_{LN2} = \dot{m_1} h_{T17} \tag{6}$$

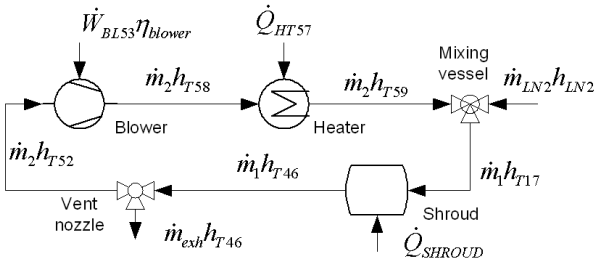

Fig. 4 Thermodynamics model of the system

$$\begin{aligned} &\dot{m_2} C_p T_{T59} + \dot{m}_{LN2}(T_{LN2} C_p - h_{fg}) \\ &= \dot{m_1} C_p T_{T17} \end{aligned} \tag{7}$$

LN2가 혼합되어 형성되는 출구 GN2온도 T_{T17}의 계산과정은 질량 유량과 온도가 곱해지는 비선형성이 포함되어 있으며 혼합과정은 blower나 히터에서 발생하는 시간지연에 비해 빠르게 이루어지므로 1차함수 형태의 동특성을 무시하거나 적절히 빠른 시상수를 T_{T17}에 적용하여 일차 동특성을 표현한다.

4.4 열막 (thermal shroud) 동특성

열막의 열역학 제1법칙 및 동특성 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{m_1} h_{T17} + \dot{Q}_{SHROUD} = \dot{m_1} h_{T46} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} &\frac{d(T_{T46} - T_{T17})(s)}{d\dot{Q}_{SHROUD}(s)} \\ &= \frac{1}{\dot{m_1} C_p} \times \frac{1}{\tau_{shroud} s + 1} \end{aligned} \tag{9}$$

5. PLC 제어 알고리즘

대상 열진공 챔버를 제어하기 위한 PLC 제어기의 제어 플로우차트의 개략적 구조는 다음의 Fig. 5와 같다. Blower 제어를 위해 모니터링할 물리적 변수는 Blower에 의한 풍량이며 전후 온도값에 의하여 상태가 확인 된다. Blower는 GN2 모드 시작시 안전 점검 후 On상태가 되며 온도값에 대한 PID 제어에 의해서 풍량이 조절된다. 히터는 Blower 입출구에 위치한 Blower 보호용 유량밸브가 개방되면 작동하는데 단순 ON/OFF 제어 구조로 되어 있다. 전기히터는 히터온도

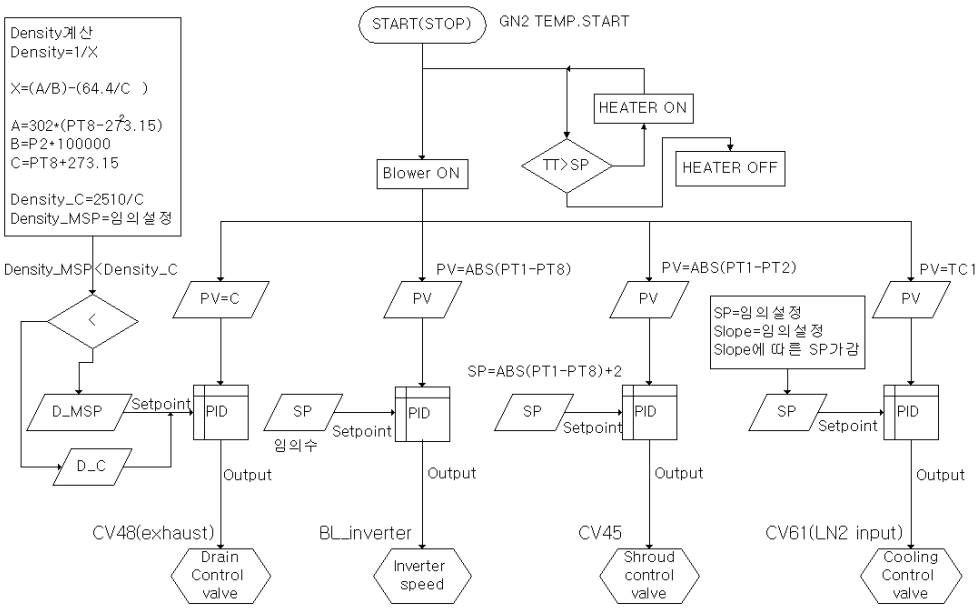

Fig. 5 Flowchart of the PLC control algorithm

(T58)가 설정온도(SP)보다 낮으면 켜지고 높으면 꺼지는 구조로 되어 있다.

본 연구에서 개발된 실시간 시뮬레이터를 이용한 PLC 제어 프로그램 성능 검증을 위하여 알고리즘 검증에 필요한 최소 입출력 채널을 다음의 Table 1과 같이 설정한 후 제어 성능을 파악하였다.

Channel	I/O label	Contents
AO0	T35	shroud temperature
AO1	T17	shroud Inlet temperature
AO2	T40	shroud Outlet temperature
AO3	T46	shroud exhaust temperature
AO4	T52	blower Inlet temperature
AO5	T58	blower Outlet temperature
AO6	T59	heater Outlet temperature
AO7	P2	blower Inlet pressure
AI0	CV45	shroud Outlet GN2control
AI1	CV48	exhaust GN2control
AI2	CV61	Insert GN2 control,
AI3	BL_Inverter	Invert Blower
DI0	Heat57	on/off
DI1	BL53	Blower on/off
DI2	HV13	Blower protection valve outlet
DI3	HV50	Blower protection valve inlet
DI4	BCWV	Blower cooling water valve
DI5	BWDV	Blower water drain valve
DI6	gn2start	GN2start on/off
DO0	ALARM1	M12.0 safty check
DO1	ALARM2	M12.4 START GN2

Table 1 Specifications of I/O channels

6. 검증

6.1 PLC와 시뮬레이터 인터페이스

적용된 PLC는 독일 Siemens사 S7 시리즈이다. 감시 및 제어를 위한 HMI (human-machine interface) 프로그램은 Intouch를 적용하였다. Fig. 6은 모델링 결과를 SIMULINK로 구현한 실시간 시뮬레이터, PLC 및 HMI 응용 프로그램이 통합된 시스템을 보여주고 있다.

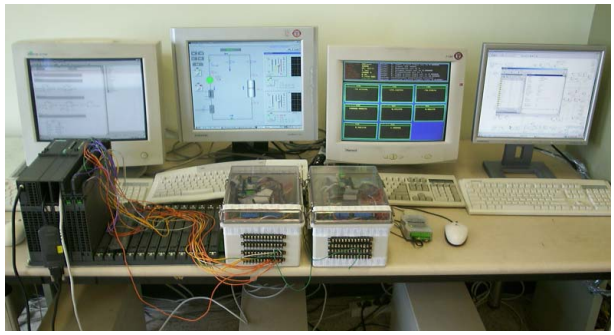

Fig. 6 Picture of the integrated system

6.2 제어 성능 결과

실시간 시뮬레이터의 원활한 제어를 위해 PLC 프로그램이 시행착오의 과정을 거쳐 최적화되었

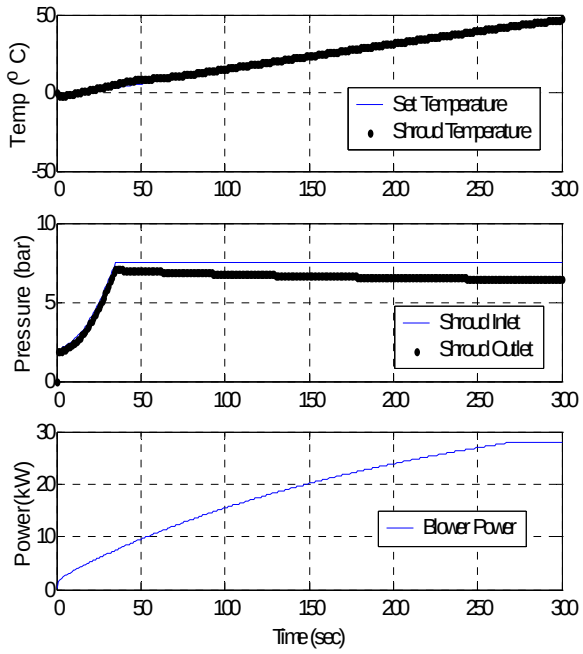

Fig. 7 Control performance of the GN2 system

다. 제어와 관련한 플랜트 거동이 실제 장치에 무리를 주는 상황이 아닌 가상 실시간 시뮬레이터이므로 PLC 시퀀스 제어와 관련된 많은 프로그램 에러가 손쉽게 해결될 수 있었다. 다음의 Fig. 7은 PLC 프로그램 수정 후 얻어진 제어 성능과 관련한 거동 데이터의 예를 보여준다. Fig. 7에서 설정 온도 프로화일을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 이 때 쉬라우드 입구의 GN2 압력은 7.5 기압으로 유지되도록 제어하였는데 약 30초 후 7.5기압의 정상상태에 도달하고 있다. 쉬라우드 출구의 압력은 입구의 7.5 기압을 유지하기 위하여 대기 중으로 잉여 GN2를 방출한 결과 입구압력보다 낮으며 아래 그래프의 Blower 소비동력 추이에서 알 수 있는 것처럼 GN2 순환 유량이 증가함에 따라 압력차도 커지고 있음을 보여준다.

7. 결 론

입출력점수가 많고 플랜트 동특성에 연계된 제어가 포함된 공정의 모사가 가능한 범용 플랜트 시뮬레이터를 개발하였다. 향후 제작될 대형 열진공 챔버의 GN2모드제어 공정에 대한 제어 프로그램을 작성하고 제작된 시뮬레이터를 이용하여 제어 프로그램 성능을 검증할 수 있었다. 이 시뮬레이터는 장시간과 고비용을 요하는 플랜트들을 모사할 수 있으므로 가상 플랜트로 활용되어 제어 시스템 개발 기간 단축 및 성능 검증에 활용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

후 기

본 연구는 정보통신부의 선도기반기술개발사업(과제번호:IMT2000-A1-2)에 의한 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

참고문헌

(1) A. B. Corripio, "Tuning of Industrial Control Systems," An Independent Learning Module, Instrument Society of America, 1990, pp. 9-33

(2) Y.G. Shin, S.H. Lee, H.J. Seo, H.J. Cho, G.W. Moon, S.W. Choi, S.S. Lee, "Modeling of a Bake-out Chamber Dynamics", Proceedings of the Korea Society for Aeronautical & Space Sciences, Fall Meeting, 2002.

(3) M.J Jung, Y.G. Shin, S.H. Lee, H.J. Seo, H.J. Cho, G.W. Moon, S.W. Choi, S.S. Lee, "Development of a Plant Simulator for Control of Thermo-fluid System", Proceedings of the KSAS, Spring Aunual Meeting, 2003.

(4) Gilmore, D.G., "Satellite Thermal Control Handbook", The Aerospace Corporation Press, EI Segundo, California, 1994.

(5) Araujo Filho, J.E., "A New Class of Adaptive Fuzzy Control Systems applied in an Industrial Tehermal Vacuum Process", Proceedings of 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Volume 1, pp.425-430, 2001.

(6) www.circle-seal.com