

## 부적절노심냉각감시계통 개선 Inadequate Core Cooling Monitoring System Improvement

윤태웅, 백광일, 백승민, 김항배  
한국전력기술(주)  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요약

부적절노심냉각감시계통은 사고 시 원자로용기 내부의 노심냉각상태를 감시하기 위해 부적절한 노심냉각과 관련이 있는 변수들을 계산하여 원자로 운전원에게 정보를 제공하는 안전관련 감시계통이다. 개선된 부적절노심냉각감시계통은 발전소자료수집계통의 하부모듈로써 수행되던 기존원전의 부적절노심냉각감시 알고리즘을 산업용컴퓨터를 사용하여 부적절노심냉각감시계통에서 독립적으로 수행하도록 하였고, 컬러그래픽 환경의 사용자 인터페이스를 개발하여 운전원으로 하여금 보다 직관적이고 용이하게 정보를 취득할 수 있도록 하였다. 또한 기존원전에 비해, 진보된 장비로 교체된 발전소 환경에 맞추어 C/C++ 언어를 사용하여 개발하였다. 본 논문은 부적절노심냉각감시계통의 설계개선내용을 설명하고, 이에 따른 설계개선효과를 기술한다.

### Abstract

The Inadequate Core Cooling Monitoring System (ICCMS) is a safety-related monitoring system which calculates variables associated with Inadequate Core Cooling (ICC) and provides the ICC related information to the reactor operator for monitoring of the status of core cooling during the accident. The improved ICCMS equipped industrial computer therefore independently accomplish the ICCM algorithm which existed as a sub-module of the Plant Data Acquisition System (PDAS) in the existing nuclear power plants and have a improved color Graphic User Interface (GUI) by which the operator can read information more easily and intuitively. Also the improved ICCMS was developed using modern techniques like C/C++ programming language to be consistent with modern system environment. This paper explains the improved features of ICCMS and improvement effects.

### KEY WORDS

ICCMS (부적절노심냉각감시계통), PDAS (발전소자료수집계통), PCS (발전소전산계통), GUI (그래픽사용자인터페이스)

### 1. 서론

기존원전의 부적절노심냉각감시계통 알고리즘이 수행되던 발전소자료수집계통의 Concurrent

3205 컴퓨터 및 모노크롬 문자기반의 부적절노심냉각정보를 표시하던 Plasma Touch Screen 등의 구형장비들이 단종되고, 타 계통의 전산장비들이 보다 진보된 장비로 교체됨에 따라 이에 맞추어 부적절노심냉각감시계통의 전산장비를 교체하고 새로운 환경에 맞도록 계통을 개선하게 되었다. 부적절노심냉각감시계통 전용의 독립적인 산업용컴퓨터를 사용하여 독립적인 알고리즘의 수행, 윈도우환경의 개발도구를 사용하여 보다 효과적으로 운전원에게 정보를 전달할 수 있는 GUI의 제공, 그리고 개선된 타 계통과의 무리없는 호환성 확보를 목적으로 부적절노심냉각감시계통을 개선하고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 부적절노심냉각감시계통의 기능

부적절노심냉각감시계통은 TMI 사고 이후, 미국 원자력규제위원회(NRC)에서 요구한 보완조치의 하나로<sup>1)</sup> 원자로용기 내부에 설치된 가열접점열전대 (HJTC), 노심출구열전대 (CET), 저온관/고온관 저항온도검출기 및 가압기 압력감지기로부터의 신호들을 발전소자료수집계통 (PDAS)를 통해 받아들여 각각의 신호들에 대한 정보를 지시하고, 냉각재수위, 대표노심출구온도값, 과포화여유도 등의 중요한 변수들을 계산 및 지시하여 운전원이 원자로심의 상태를 감시할 수 있도록 한다.<sup>2)</sup> 감지기로부터 표시기까지의 일련의 설비들은 동일한 기능을 수행하는 독립적인 두개의 채널로 이중화되어 있다. 부적절노심냉각감시계통의 주요 기능은 크게 냉각재수위감시, 노심출구온도감시, 과포화여유도감시로 구분되며, 그 외에 발전소경보계통 (PAS), 추이표시기록계 (Trend Recorder), 원격정지반 (RSP), 발전소전산계통 (PCS)등으로 경보 및 정보를 제공하는 기능을 수행한다. 그림 1은 부적절노심냉각감시계통과 다른 계통간의 연계를 보여준다.

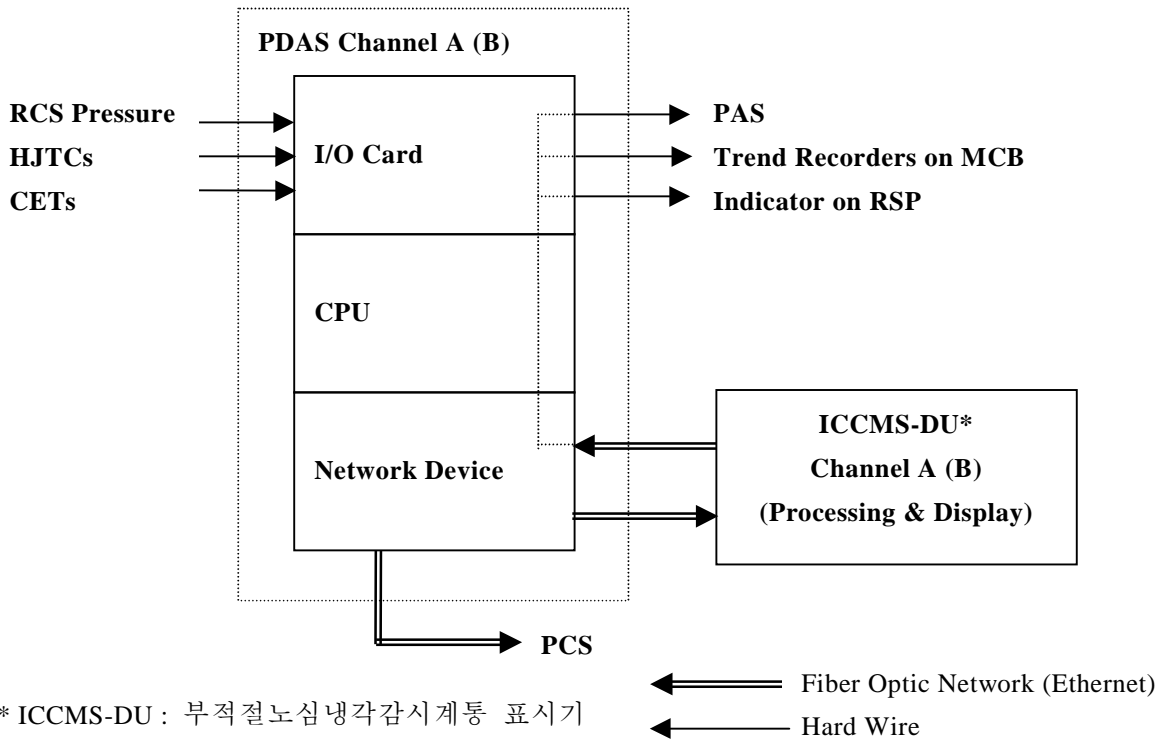


그림 1. 부적절노심냉각감시계통 연계도

### 2.1.1 냉각재수위 감시

원자로용기 헤드로부터 핵연료정열판 위까지 열전대탐침집합체가 설치되어 있으며, 열전대 탐침집합체 내부의 서로 다른 위치에 설치된 8 개의 열전대감지기를 사용하여 원자로냉각재 재고량을 측정한다. 각각의 열전대감지기는 가열접점열전대와 비가열접점열전대의 쌍으로 구성되어 있다. 측정의 기본원리는 서로 인접한 가열접점열전대와 비가열접점열전대 사이의 온도차이를 검출하는 것이다. 인접한 열전대 사이의 온도차는 상대적으로 좋은 열전달특성을 가지는 유체, 즉 액체상태의 냉각재 영역에서는 작으며, 기체상태 혹은 기체/액체 혼합상태에서는 크게 검출된다.

### 2.1.2 노심출구온도 감시

노심출구온도 감시는 노내중성자속감시용 핵계측관 최종단에 설치된 노심출구열전대를 이용한다. 노심출구열전대는 핵연료집합체의 유효출력위치로부터 4~6 인치 상단에 근접하게 설치되어 있어 냉각재가 핵연료집합체를 빠져나갈 때의 원자로냉각재 온도를 감시하여 사고 발생 시 사고가 가장 심하게 진행되는 기간 즉, 핵연료가 냉각재 밖으로 노출되어 용융이 시작되는 기간의 원자로심 상태를 감시한다.

### 2.1.3 과포화여유도 감시

과포화여유도를 통해서 운전원은 냉각재의 상태를 정량적으로 감시할 수 있으며, 저항온도 검출기로 측정된 저온관/고온관의 온도, 원자로용기 상부 4 개의 비가열접점열전대 중 최고온도값, 노심출구온도 대표값, 그리고 가압기 압력감지기의 입력값을 가지고, 온도-압력곡선을 사용하여<sup>3)</sup> 원자로용기상부의 온도/압력 포화여유도 및 노심출구의 온도/압력 포화여유도를 계산 및 지시한다.

## 2.2 설계개선 내용

개선된 부적절노심냉각감시계통은 기존원전의 알고리즘을 그대로 유지하면서, C/C++ 로 개발되었고, 단순히 표시기능만을 수행하던 부적절노심냉각감시계통 표시기에 산업용컴퓨터를 탑재하여 발전소자료수집계통 내부에서 수행되던 알고리즘을 부적절노심냉각감시계통에서 독립적으로 수행되도록 하였다. 또한 모노크롬의 문자기반으로 제공되던 사용자 인터페이스를 윈도우기반의 컬러 GUI 로 개선하여 운전원이 보다 용이하게 정보를 취득 할 수 있도록 하였다. 표 1 은 개선된 부적절노심냉각감시계통이 최초 적용된 울진 5,6 호기 원전과 기존원전과의 차이점을 보여준다. 주요한 설계개선내용에 대한 설명은 다음과 같다.

구 분	울진 5,6 호기	기존 원전
알고리즘 수행장비	Industrial Pentium PC (ICCMS)	Concurrent 3205 (PDAS)
운영 체제	QNX (Unix 기반)	OS 32
표시 장비	TFT-LCD Color Touch Screen	Plasma Monochrome Touch Screen
통신 방식	Ethernet, TCP/IP	광모뎀, Serial 통신
프로그래밍 언어	C/C++	Fortran

표 1. 기존원전과 개선된 부적절노심냉각감시계통의 설계 비교

### 2.2.1 산업용 컴퓨터

인텔사의 133Mhz 펜티엄 프로세서를 탑재한 산업용 컴퓨터를 부적절노심냉각감시계통 표시기 안에 내장하여, 발전소자료수집계통에서 수행되던 알고리즘을 부적절노심냉각감시계통이 독립적으로 수행할 수 있도록 하였다. 입/출력 처리는 기존원전과 마찬가지로 발전소자료수집계통에서 처리하며, 디지털 값으로 변환된 각종 온도, 압력 변수값들은 부적절노심냉각감시계통의 알고리즘으로 입력되어 포화여유도, 노심출구온도대표값 등의 각종 주요 변수들을 계산하는 데 사용된다. 계산된 결과값들은 발전소자료수집계통의 네트워크 모듈을 통해 발전소 전산계통으로 입력되거나 입/출력카드를 통해 발전소경보계통, 추이표시기록계 등으로 입력되어 경보 및 정보를 표시하게 된다.

### 2.2.2 사용자 인터페이스

기존원전의 경우, 문자만을 표시하는 모노크롬의 표시화면을 제공하여 운전원이 다양한 변수정보 및 경보상태를 일순에 취득하기에는 어려움이 있었으나, 개선된 부적절노심냉각감시계통은 펜티엄급의 산업용컴퓨터를 독립적인 장비로 사용하고 표시장치로써 TFT-LCD Color Touch Screen 을 사용함에 따라 보다 진보된 사용자 인터페이스 환경을 구현할 수 있게 되었다. 운영체제로 사용된 QNX 전용 GUI 개발 툴인 Photon Application Builder 를 사용하여 윈도우환경의 사용자 인터페이스를 구현하였고, 각각의 변수 상태에 따른 컬러의 사용, 경보 발생시 깜박임 표시, 중요 변수인 포화여유도, 냉각재 재고량, 대표노심출구온도값에 대한 추이 그래프 제공 및 원자로용기와 냉각재 재고량 및 노심상태의 그래픽화 등 인간공학적 요소들을 고려한 다양한 기능들을 추가하여 개선하였다. 사용된 모든 약어, 컬러, 화면구성 및 기타 인간공학적 요소들은 인간공학적용지침서 (HF-10)을 기준으로 개발되어 보다 쾌적하고 분명한 운전원 인터페이스를 제공하게 되었다. HF-10은 인간공학관련 규제요건을 만족하고 있으며, 원자력발전소 주제어실 설계에 사용되는 문서이다. 그림 2는 노심의 한 개의 사분면 만에 대한 노심출구열전대 정보를 표시하는 기존원전의 화면이고, 그림 3은 모든 사분면을 한 화면에 표시하는 개선된 부적절노심냉각감시계통에서의 표시 화면이다.



### 2.2.3 통신 방식

기존원전의 부적절노심냉각감시계통의 경우 발전소자료수집계통에서 처리된 신호들을 받아들여 표시하는 역할만을 수행하였고 외부와의 통신은 발전소자료수집계통에서 처리하였으나, 개선된 부적절노심냉각감시계통에서는 별도의 독립적인 장비 내에서 독립적으로 알고리즘을 수행하게 됨에 따라, 다양한 변수 값들의 입력과 계산된 변수 값들의 출력을 위해 독자적으로 통신을 수행한다. 개선된 부적절노심냉각감시계통이 최초 적용된 울진 5,6 호기에서는 호스트인 발전소전산계통과 하부 노드들 간의 통신이 이더넷 스위치를 사용한 TCP/IP 프로토콜을 사용하므로, 따라서 개선된 부적절노심냉각감시계통도 TCP/IP 프로토콜을 사용하였다. 부적절노심냉각감시계통과 발전소자료수집계통 및 발전소전산계통 사이의 통신은 전형적인 서버/클라이언트 TCP/IP 통신방식으로, 부적절노심냉각감시계통과 발전소전산계통 간의 통신에는 발전소전산계통이 서버로써, 그리고 부적절노심냉각감시계통은 클라이언트로써 통신을 수행하며, 발전소자료수집계통과 부적절노심냉각감시계통 간의 통신에는 부적절노심냉각감시계통이 서버역할을 수행하고 발전소자료수집계통은 클라이언트 역할을 하게 된다. 서버/클라이언트 TCP/IP 통신은 다음의 순서로 수행되며 그림 4 와 같다.

- 1) 서버가 Well-known Port 를 열어놓고 접속을 기다림.
- 2) 클라이언트는 Well-known Port 에 접속하여 식별코드를 전송.
- 3) 서버가 Private Port Number 를 전송.
- 4) 클라이언트는 Well-known Port 접속을 종료하고 Private Port 로 재접속.

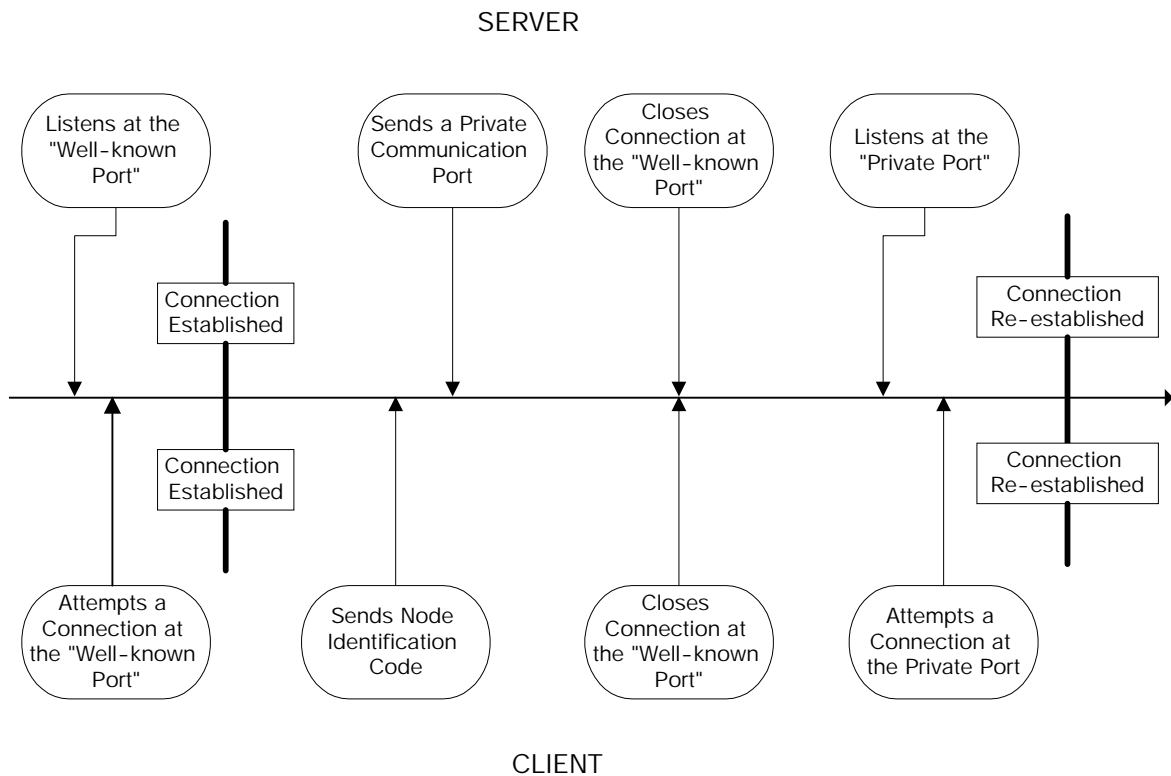


그림 4. 서버/클라이언트 TCP/IP 통신 순서도

## 2.2.4 운영 체제 및 기타

개선된 부적절노심냉각감시계통은 실시간 운영체제인 QNX 를 사용한다. QNX 는 Unix 를 기반으로 한 Microkernel 운영체제로 사용환경이나 명령어 등은 Unix 와 거의 흡사하다.<sup>4)</sup> 울진 5,6 호기의 호스트 컴퓨터인 발전소전산계통의 장비가 HP-Unix 를 사용하는 HP 워크스테이션인 점을 고려하여 QNX 환경에서 뿐만 아니라 HP-Unix 환경에서도 개발 및 컴파일이 가능하도록 개발하였고, 상이한 환경에서의 이식성과 차후 확장되는 Standard 와의 범용성을 위해 가능한 POSIX 함수를 사용하여 개발하였다. 프로세스간의 통신방법으로는 빠르고 간단한 공유 메모리 방식을 사용하였고 개발언어로는 C/C++을 사용함으로써 객체지향 기술을 적용하였다.

## 2.2.5 소프트웨어 검증

기존원전의 Fortran 언어로 작성된 알고리즘을 C/C++ 언어로 재작성하고 TCP/IP, GUI 를 사용하는 등의 많은 부분이 개선됨에 따라, 개선된 부적절노심냉각감시계통의 소프트웨어에 대한 확인 및 검증이 수행되어야만 하기 때문에 계통의 개발 초기단계에서부터 확인 및 검증계획서를 작성하여 절차에 따라 개발을 하였고, 독립된 검증팀에 의하여 확인 및 검증작업이 수행되었다. 완성된 소프트웨어에 대해서는 기존원전과 계산 알고리즘의 동일함, TCP/IP 통신수행 확인, 정확한 화면표시 등의 검증을 목적으로 설계 검증용 I/O Simulator 를 개발하여 검증하였다. Fortran 으로 작성된 기존 알고리즘을 I/O Simulator 의 PDAS Simulator (PdasSim)에 내장하고 검증용 사용자 인터페이스와 PDAS 와 PCS 용 TCP/IP 통신 모듈을 개발하여 PDAS Simulator 와 PCS Simulator (HostSim)를 그림 5 와 같이 구성하였다. I/O Simulator 를 위한 사용자 인터페이스 및 통신모듈은 LabWindow CVI 를 사용하여 개발하였고 알고리즘과 사용자 인터페이스, 그리고 통신모듈들은 MS Visual C 를 사용하여 통합환경을 구축하였다. I/O Simulator 를 사용한 검증 방법은 다음과 같다.

- 1) 기존원전의 부적절노심냉각감시계통 단위시험 시와 동일한 Test Case 를 작성하여 I/O Simulator 에 입력한다.
- 2) I/O Simulator 의 TCP/IP 통신 모듈을 통해 개선된 부적절노심냉각감시계통으로 Test Case 를 전송한다.
- 3) I/O Simulator 의 Fortran 알고리즘에 의해 계산된 결과값과 개선된 부적절노심냉각감시계통 화면상의 결과값을 비교, 확인한다.

검증결과 개선된 부적절노심냉각감시계통 소프트웨어의 알고리즘은 기존원전의 알고리즘과 동일하며 TCP/IP 통신 및 기타 기능들이 적절하게 동작하고 있음이 확인되었다.

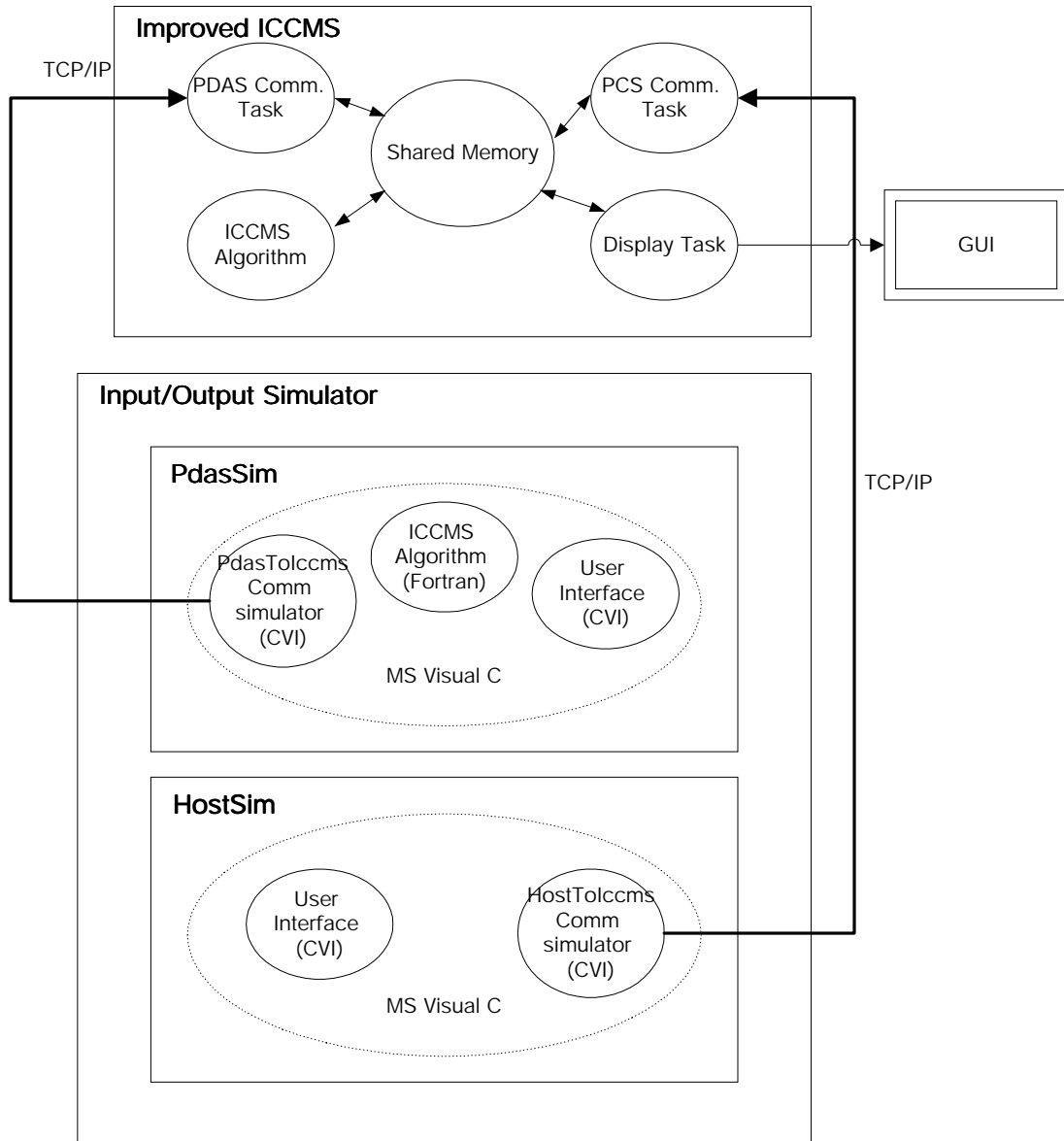


그림 5. I/O Simulator 를 사용한 ICCMS Software 검증

### 2.3 설계개선 효과

부적절노심냉각감시계통의 설계개선으로 얻어지는 기대효과는 다음과 같다.

- 1) 독립적인 산업용컴퓨터 사용과 알고리즘 수행으로 계통 신뢰성 증대
- 2) 진보된 GUI 사용으로 운전편의성 및 감시능력 향상
- 3) 보다 최신의 기술을 사용하여 개발함으로써 타 계통과의 호환성 확보

### 3. 결론

부적절노심냉각감시계통은 원자로용기 내부의 냉각재 및 원자로심 상태에 대한 정보를 운전원에게 제공하여 사고 발생을 예방하고 또한 사고 발생 시 원자로 내부의 상태를 감시 할 수 있는 안전관련 중요한 계통이다. 개선된 부적절노심냉각감시계통은 알고리즘 및 장비의



독립, 진보된 GUI의 사용, 타 계통과의 호환성 및 확장성 등의 설계개선을 통해 운전원에게 보다 신뢰성 있는 정보를 보다 효과적으로 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- 1) NUREG 0718 Rev.2, "Licensing Requirements for Pending Applications for Construction Permits and Manufacturing License", 1982.
- 2) 한국원자력연구소, "한국형표준원전 계통실무", 1996.
- 3) American Society of Mechanical Engineers, "ASME Steam Tables", 1967.
- 4) QNX Software Systems Ltd., "QNX OS System Architecture", 1996.