

분산제어시스템(DCS)의 원자력발전소 적용을 위한 검증용 시뮬레이터 개발

Development A Dynamic Simulator For Distributed Control System Application On Nuclear Power Plant

서강완*, 조병수*, 최박렬*

Kang-Wan Seo, Byung-Soo Cho, Bak-Ryul Choi

Abstract

일반 산업체와 화력발전소 계측제어시스템에 널리 사용되고 있는 분산제어시스템(Distributed Control System)을 원자력발전소에 사용하기 위해서는 분산제어시스템의 안전성과 신뢰성의 입증은 선결과제이다. 따라서 새로운 시스템을 시뮬레이션에 의해 구현하고 검증하기 위한 시뮬레이터가 필요하게 되었다. 발전소 전범위 시뮬레이터(Full Scope Simulator)를 제작 하기에 앞서 발전소 계통 중에서 소규모 계통을 대상으로 부분범위 시뮬레이터(Compact Simulator)를 제작하였다.

개발된 DCS 검증용 시뮬레이터의 시스템은 발전소 제어반을 모의한 소프트 판넬, 발전소 프로세스를 모의한 계통 모델링 소프트웨어, 그리고 현재 발전소의 아날로그 제어계통을 대신한 DCS 제어계통 등의 세개의 계통으로 구성하였다.

개발 제작된 시뮬레이터를 이용하여 원자력 발전소 계측제어시스템에 분산제어시스템 적용을 시뮬레이션을 통하여 구현하였으며 분산제어시스템의 적용 검증작업은 물론 적용을 위한 설계업무에도 DCS 검증용 시뮬레이터가 효과적으로 사용될 수 있음을 알았다.

1. 서론

전자산업 분야기술의 발전 특히 컴퓨터 관련기술의 급속한 발전은 계측제어시스템에 커다란 변화를 가져오게 되어 80년대 이후부터 아날로그 계측제어시스템은 점차 사

라지고 분산제어시스템이 그 자리를 대신하게 되었다. 이러한 분산제어시스템이 우리나라 다수의 일반산업체와 화력발전소 계측제어시스템에 사용되었고 새로 건설되는 일반산업체와 화력발전소의 계측제어시스템에 채택되고 있다. 그러나 원자력발전소에는 비안전계통의 제어시스템의

* 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

일부에 부분적으로 사용이 되고 있을 뿐 안전계통을 포함한 대부분의 계통에 아직도 예전의 아날로그 방식이 사용되고 있다. 이렇게 일반 산업체와 화력발전소의 계측제어시스템에 활발하게 사용되고 있는 분산제어시스템이 원자력 발전소의 계측제어시스템에 사용되지 못하고 있는 가장 커다란 이유는 분산제어시스템의 안전성과 신뢰성의 입증이다. 이러한 안전성과 신뢰성이 검증절차를 거쳐 입증되어야만 새로운 계측제어시스템을 적용할 수 있게 된다. 새로운 계측제어시스템의 안전성과 신뢰성 검증을 효과적으로 수행하기 위해서는 검증용 시뮬레이터의 사용이 필수적이며, 이러한 검증용 시뮬레이터는 대상 발전소의 제어반을 그대로 모의하여 그 운전 및 감시기능 등이 실제 발전소의 제어반과 같이 동적(dynamic)으로 표시, 운전되는 설비로서 엔지니어링 시뮬레이터의 일종이라 할 수 있다. 미국 EPRI에서도 원자력발전소 계측제어시스템에 분산제어시스템 적용을 위한 설계와 검증업무를 검증용 시뮬레이터를 이용하여 수행할 것을 요구하고 있다 [1].

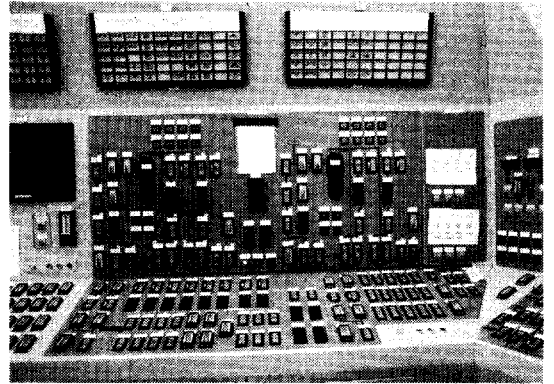
이러한 원자력 발전소의 계측제어시스템에 분산제어시스템 적용을 검증하기 위한 시뮬레이터의 필요성이 대두됨에 따라 우리회사에서는 검증용 시뮬레이터 연구개발을 통하여 시제품을 제작하였다.

2. 시뮬레이터 구성

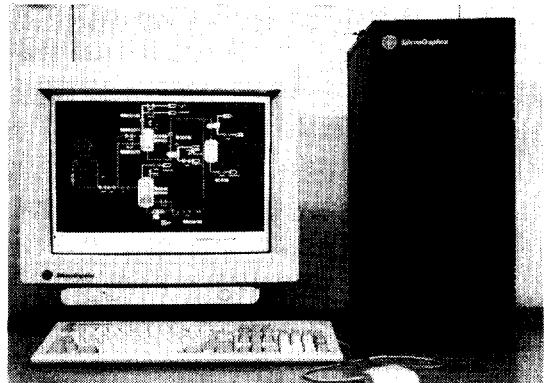
개발된 시스템 구성을 크게 나누어 보면, 소프트 판넬, 시물레이션 소프트웨어, DCS 적용 제어계통 등의 3개의 계통으로 되며, 시뮬레이터 구성을 시물레이션 대상 발전소의 실제 구성과 비교하면 다음 <표 1>과 같다. 또한 <그림 1>은 발전소 실제의 제어반을, <그림 2>와 <그림 3>은

개발에 사용된 시물레이션 컴퓨터설비와 분산제어시스템을 각각 보여준다.

이들 각 계통을 통합한 검증용 시뮬레이터 하드웨어 구성과 소프트웨어 구성은 각각 다음 <그림 4>, <그림 5>와



<그림 1> 발전소 제어반

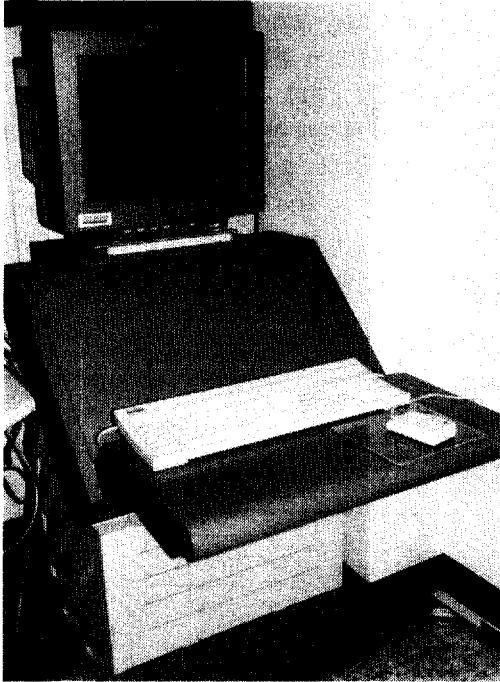


<그림 2> 시물레이션 컴퓨터 설비

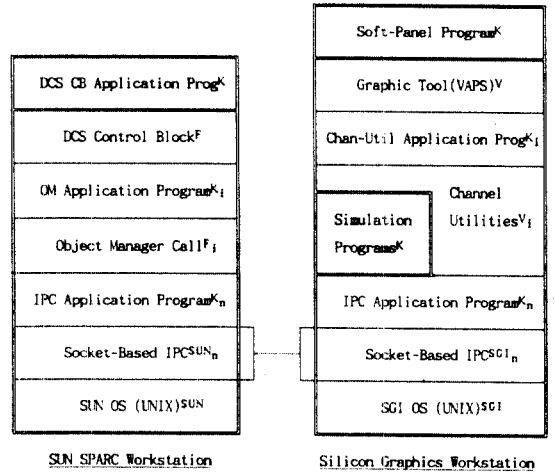
<표 1> 실제 발전소 구성요소와 시뮬레이터 구성요소의 비교표

실제 발전소 구성 요소	시뮬레이터 구성 요소	
- 발전소 프로세스 (예: 배관, 열교환기, 밸브, 펌프 등)	- 시물레이션 컴퓨터 시스템	- 프로세스 모델링 프로그램
- 제어반 (예: 상태표시등, 조작스위치 등)		- 컴퓨터 그래픽을 이용한 소프트판넬
- 아날로그 제어기기 (예: 릴레이, 아날로그 콘트롤러 등)	- 분산제어시스템	

같다. 또한 <그림 6>은 구성계통 사이의 정보흐름을 보여 준다.

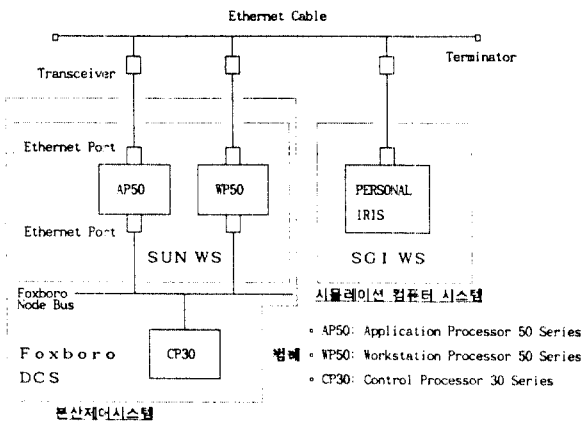


<그림 3> 분산제어시스템

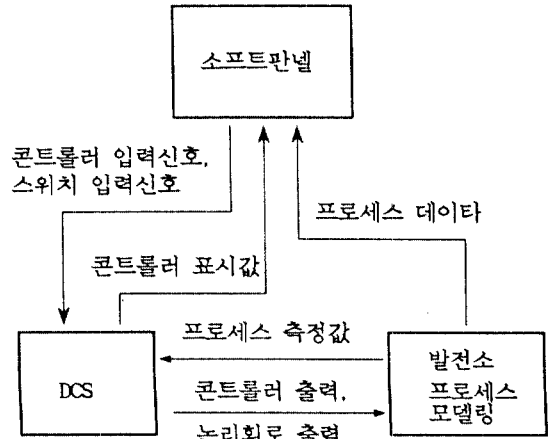


- 주) K: 자체개발 소프트웨어
 F: Foxboro 제공 소프트웨어 V: VPI 제공 소프트웨어
 SUN: SUN 제공 소프트웨어 SGI: SGI 제공 소프트웨어
 i: 내부 통신 프로그램 n: 외부 통신 프로그램

<그림 5> 검증용 시뮬레이터 소프트웨어 구성도



<그림 4> 검증용 시뮬레이터 하드웨어 구성도



<그림 6> 구성계통 연계도

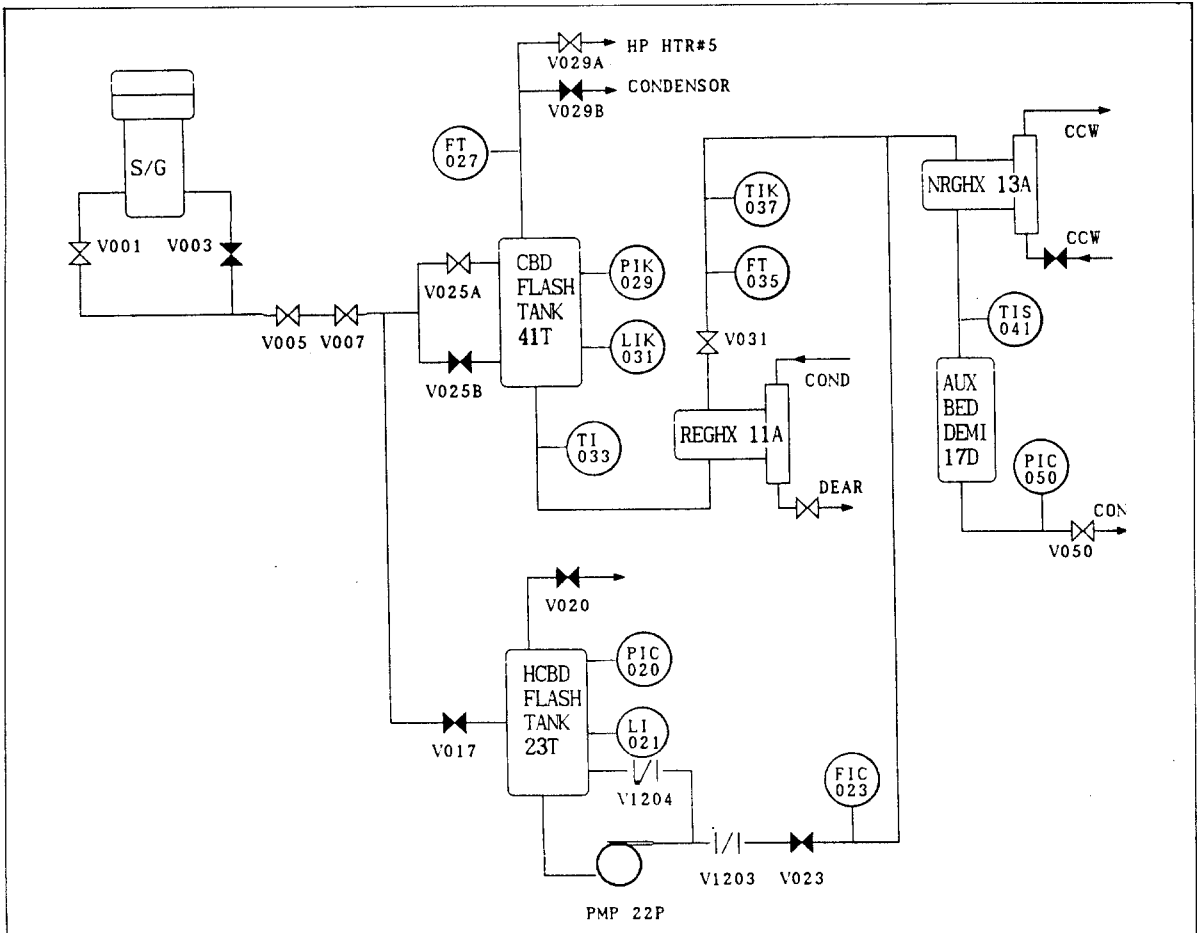
3. 연구개발 내용

3.1 개발범위와 대상계통

검증용 시물레이터의 시제품제작에 있어 개발범위를 원자력 발전소 소규모 계통에 분산제어시스템 적용을 검증할 수 있는 범위로 하였으며, 대상 계통은 다른 계통에 비해 제어요소가 다양하고 분산제어시스템의 원자력발전소 적용 평가의 가치가 큰 영광 원자력발전소 3호기의 증기발생기 취출계통 (SGBDS: Steam Generator Blow Down System)을 적용 대상 계통으로 삼았다.

증기발생기 취출계통은 수처리계통과 연계하여 주급수

의 질을 일정수준 이상으로 유지시키기 위한 계통으로 계통도는 <그림 7>과 같다 [2]. 계통운전을 살펴보면 정상 운전시 급수처리를 위해 증기발생기로부터 급수를 연속 취출(CBD: Continuous Blow Down)하여 재생열교환기를 통과시켜 급수의 열을 제거시키며 동시에 그 열로 복수를 가열시킨다. 급수처리된 취출수는 그 질에 따라 복수기나 수처리계통으로 보내진다. 그리고 주기적 또는 필요시에 많은 양의 급수를 빠르게 취출(HCBD: High Capacity Blow Down)하여 증기발생기 튜브에 누적될 수 있는 고형물질을 제거시킨다. 운전 정지시 WLS(Wet Layup System)을 운전하여 증기발생기 내의 급수를 순환시키고, 화학성분을 조절한다. 증기발생기 취출물은 CBD경우는 최대증기



<그림 7> 증기발생기 취출계통(SGBDS) 계통도

발생률의 1% 까지, HCBDB는 16.7% 까지 운전할 수 있도록 되어있다 [3][4].

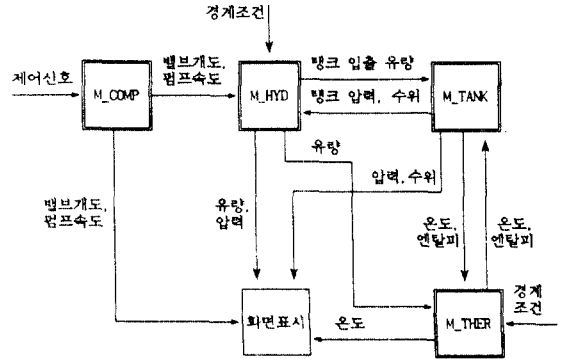
3.2 발전소 프로세스 모델링

증기발생기 추출계통의 모의는 증기발생기 추출단부터 시작하여 CBD Flash 탱크와 HCBDB Flash 탱크, 재생열교환기, Mixed Bed Demineralizer, CBD 배압 조절밸브까지의 일련의 배관망 및 관련 I&C 기기를 그 범위로 하였다. 실제계통에는 2대의 증기발생기로 부터 급수를 추출하도록 구성되어있으나 여기에서는 1대의 증기발생기 경우만 모의하였다. 발전소 운전정지시 사용되는 WLS 계통은 모의하지 않으며, Mixed Bed Demineralizer의 급수처리과정은 항상 정상적으로 동작한다고 가정하여 단순히 압력강하 요소로서만 모의하였다 [6].

프로세스 모델링 프로그램은 증기발생기 추출계통의 HCBDB/CBD 탱크의 2상(Two-Phase) 열·수력 프로세스를 모의하고, HCBDB/CBD 탱크를 제외한 배관 및 관련 기기(밸브, 펌프, 열교환기, 오리피스 등)로 구성된 배관망을 흐르는 단상 유체의 압력, 유량, 온도, 엔탈피 등을 계산하며, 프로그램 기능에 따라 다음 <표 2>와 같이 모듈화 하였다. <그림 8>은 발전소 프로세스 모델링 프로그램 모듈 사이에서 교환되는 입출력 데이터 흐름과 각 모듈의 기능을 보여준다.

3.2.1 M-HYD 모듈

M-HYD 모듈은 M-TANK에서 계산한 탱크압력과 수위, M-COMP에서 계산한 밸브개도, 펌프속도 등을 입력으로하여 수력 배관망(그림 9 참조)의 다음과 같은 상태



<그림 8> 모듈 연계도

변수(압력,유량)를 계산한다.

- 배관망 유량 어드미턴스
 - 배관망 내부노드 압력
 - 증기발생기에서 HCBDB/CBD 탱크로 유입되는 추출수 유량
 - HCBDB/CBD 탱크 배기증기와 배출수 유량
 - 기타 유량
- 계산시 적용한 가정과 간략화 방법은 다음과 같다.
- 배관, 밸브, 열교환기 등의 유량 어드미턴스는 압력이나 차압 변화에 무관한 일정상수로 취급
 - 유량과 압력손실은 선형관계로 해석
 - 열교환기의 냉각수 유량은 밸브개도에 비해

<표 2> 프로세스 모델링 프로그램 모듈

모듈명	기능	사용 언어	주기 (초)	초기화 필요여부
M-HYD	유체 배관망 수력학(hydraulic)변수 계산	C	0.5	O
M-THER	유체 배관망 열적(thermal)변수 계산	C	0.5	O
M-TANK	CBD/HCBDB 탱크 열수력학 변수 계산	C	0.5	O
M-COMP	밸브, 펌프 동작 특성치 계산	C	1.0	O

가. 입·출력 변수

1) 입력 변수

기호	내 용	단 위
P _{SG}	S/G 압력	KG/CM ²
P _{CN}	CONDENSER 압력	KG/CM ²
P _{PK}	STEAM PACKING 압력	KG/CM ²
P _{DE}	DEAERATOR 압력	KG/CM ²
P _A	대기압	KG/CM ²
D _t	실행 주기	SEC
P _H	H CBD 탱크 압력	KG/CM ²
B _H	H CBD 탱크 수위	M
P _C	CBD 탱크 압력	KG/CM ²
B _C	CBD 탱크 수위	M
R ₁	밸브 V001 개도	P.U.
R ₃	밸브 V003 개도	P.U.
R ₅	밸브 V005 개도	P.U.
R ₇	밸브 V007 개도	P.U.
R ₁₇	밸브 V017 개도	P.U.
R ₂₀	밸브 V020 개도	P.U.
R ₂₃	밸브 V023 개도	P.U.
R _{25A}	밸브 V025A 개도	P.U.
R _{25B}	밸브 V025B 개도	P.U.
R _{29A}	밸브 V029A 개도	P.U.
R _{29B}	밸브 V029B 개도	P.U.
R ₃₁	밸브 V031 개도	P.U.
R ₉₀₁	밸브 V901 개도	P.U.
R ₅₀	밸브 V050 개도	P.U.
R _{CCW}	밸브 V _{CCW} 개도	P.U.
S _{PP}	H CBD TRANSFER PP SPEED	P.U.

2) 출력변수

기호	내 용	단 위
W _{BD}	S/G 취출수 유량	KG/S
W _{IH}	H CBD 탱크 유입 유량	KG/S
W _{HS}	H CBD 탱크 증기 배기량	KG/S
W ₃₂	H CBD TRANSFER 유량	KG/S
W _{1C}	CBD 탱크 유입 유량	KG/S
W _{CS}	CBD 탱크 증기 배기량	KG/S
W _{CW}	CBD 탱크 배출수 유량	KG/S
W _{CON}	재생열교환기 복수 유량	KG/S
W _{CCW}	일반열교환기 냉각수 유량	KG/S
W _{PP}	H CBD PP FLOW	KG/S
W _{PPR}	H CBD PP RETURN FLOW	KG/S
W ₂₄	일반열교환기 복수 유량	KG/S
P ₁	내부노드(CBD 탱크전단) 압력	KG/CM ²
P ₂	내부노드(일반열교환기전단)	KG/CM ²
P ₃	내부노드(펌프배출단) 압력	KG/CM ²
P ₄	내부노드(CBD BACK PRESSURE)	KG/CM ²

나. 수치모델

1) 배관망 유량 어드미턴스(Y) 계산

- Y_{BD} : S/G 와 내부노드(P₁) 사이
- Y_{1C} : 내부노드(P₁) 과 CBD 탱크 사이
- Y_{IH} : 내부노드(P₁) 과 H CBD 탱크 사이
- Y_{CW} : CBD 탱크 와 내부노드(P₂) 사이
- Y_{29B} : CBD 탱크 증기 배출 배관(TO CONDENSER)
- Y_{HS} : H CBD 탱크 증기 배출 배관
- Y₃₂ : H CBD 펌프 출구측 배관(P₃ - P₂)
- Y₅₀, Y₂₄ : H CBD/CBD 탱크 배출수 수처리 배관(P₂ - P_{CON})

2) 배관망 내부노드 압력 계산

- 노드압력 P₁

$$P_1 = Y_{BD} * P_{SG} + Y_{IH} * P_H + Y_{1C} * P_C / (Y_{BD} + Y_{IH} + Y_{1C})$$
- 노드압력 P₂, P₃

$$K_P = F - PPC(TSIZE, TABW, TABP)$$

$$Y_D = (1/K_P - C_{1204} - Y_{32}) * (Y_{24} + Y_{CW} + Y_{32}) + Y_{32}^2$$

$$P_2 = (Y_{24} * P_{CN} + Y_{CW} * P_C) * (1/K_P - C_{1204} - Y_{32}) + (S_{PP} * C_{HPS} / K_P - C_{1204} * P_H) * Y_{32} / Y_D$$

$$P_3 = (Y_{24} * P_{CN} + Y_{CW} * P_C) * Y_{32} + (S_{PP} * C_{HPS} / K_P - C_{1204} * P_H) * (Y_{24} + Y_{CW} + Y_{32}) / Y_D$$

C₁₂₀₄: 펌프 순환 배관의 어드미턴스
 K_P: 펌프특성곡선상 해당구간의 기울기
 TSIZE: 펌프 특성곡선테이블 크기
 TABW: 펌프 특성곡선테이블(유량)
 TABP: 펌프 특성곡선테이블(압력)
 C_{HPS}: 펌프 정지수두 (kg/cm²)
 S_{PP}: 펌프 스피드 (0.0 - 1.0)
 F-PPC: 펌프특성곡선 테이블로부터 현재 유량 구간의 K_P(DP/DW)를 계산

- 노드압력 P₄

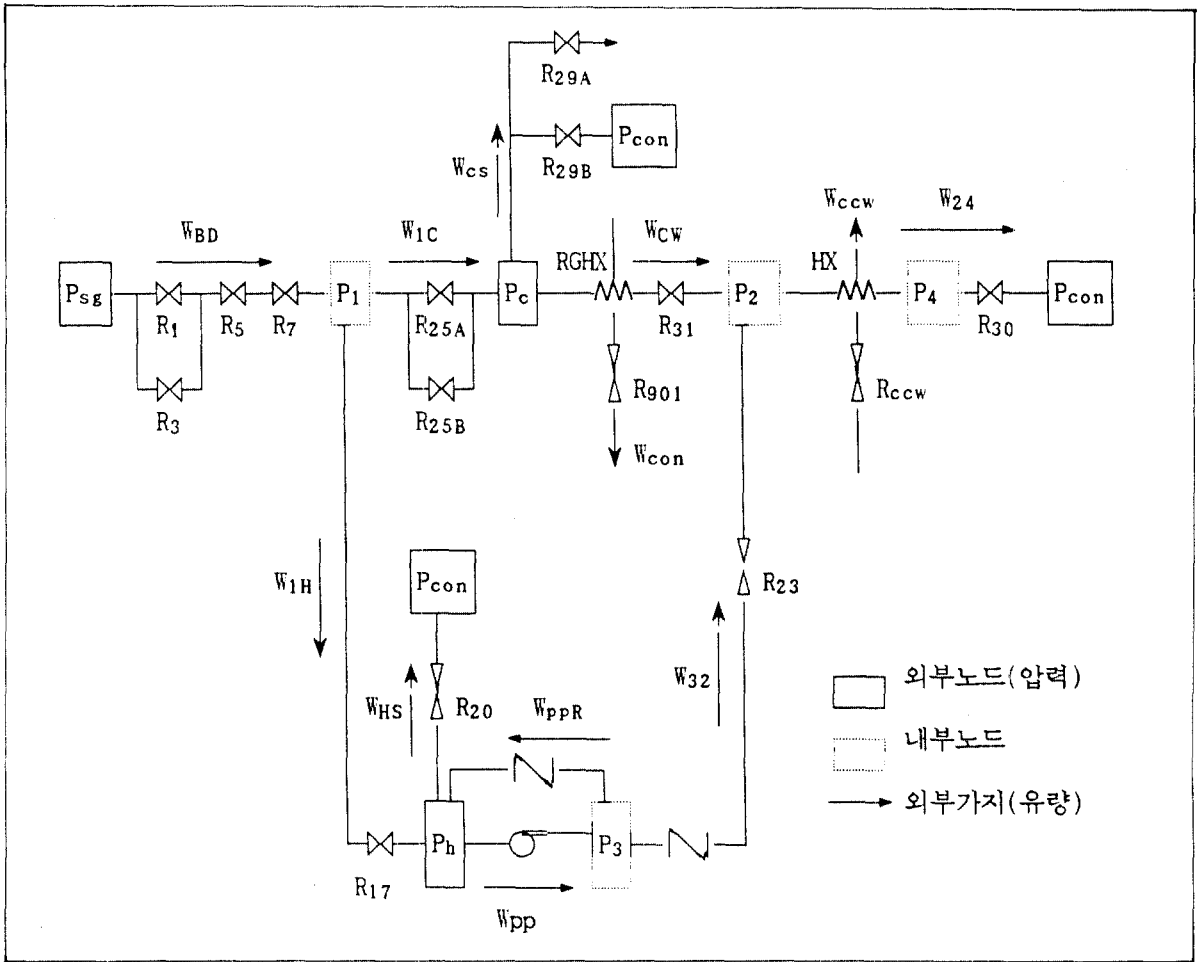
$$P_4 = (C_{HX} * P_2 + Y_{50} * P_{CN}) / (C_{HX} + Y_{50})$$

3) 배관망 유량 계산

- 증기발생기 취출유량 W_{BD}, W_{1C}, W_{IH}

$$W_{BD} = Y_{BD} * (P_{SG} - P_1)$$

$$W_{1C} = Y_{1C} * (P_1 - P_C)$$



〈그림 9〉 증기발생기 취출계통 Hydraulic Network

- $W_{1H} = W_{BD} - W_{1C}$
- HCBD 탱크 배기증기 및 배출수 유량 W_{HS}, W_{HW}, W_{32} ,
 - $W_{HS} = Y_{HS} * (P_H - P_{CN})$
 - $W_{PPR} = C_{1204} * (P_3 - P_H)$
 - $W_{32} = Y_{32} * (P_3 - P_2)$
 - $W_{PP} = W_{PPR} + W_{32}$
- CBD 탱크 배기증기 및 배출수 유량 W_{CS}, W_{CW}
 - $W_{CSA} = C_{HTR} * R_{29A}$
 C_{HTR} : 밸브 V29A가 완전개방시 CBD 탱크에서 HTR #5 로 배출되는 증기유량
 - $W_{CSB} = Y_{29B} * (P_C - P_{CN})$
 - $W_{CS} = W_{CSA} + W_{CSB}$
- $W_{CW} = Y_{CW} * (P_C - P_2)$
- HCBD/CBD 배출수 유량 W_{24}
 - $W_{24} = W_{CW} + W_{32}$
- 기타 유량
 - $W_{CON} = C_{CON} * R_{901}$
 - $W_{CCW} = C_{CCW} * R_{CCW}$
 - C_{CON} : 밸브 V901 이 완전히 열렸을 때 복수 유량
 - C_{CCW} : 냉각수 계통의 밸브가 완전히 열렸을 때 냉각수 유량

3.2.2 M-THER 모듈

M-THER 모듈은 M-HYD 모듈에서 계산한 유체 배관망의 유체 상태변수(압력, 유량, 수위), M-TANK 모듈에서 계산한 탱크의 열역학 상태변수(온도, 엔탈피) 등을 입력으로하여 열 배관망(그림 10 참조)의 다음과 같은 열역학 상태변수를 계산한다.

- 재생 열교환기 입·출구측 취출수 온도
- 일반 열교환기 출구측 취출수 온도
- 내부노드 온도

계산시 적용한 가정과 간략화 방법은 다음과 같다.

- 열교환기에서 유량의 방향 변화는 고려하지 아니함
- 내부노드는 완전혼합노드로 가정

가. 입·출력 변수

1) 입력 변수

기호	내 용	단위
W_{32}	HCBD TRANSFER 유량	KG/S
W_{CW}	CBD 탱크 배출수 유량	KG/S
W_{CCW}	일반열교환기 냉각수 유량	KG/S
W_{CON}	재생열교환기 복수 유량	KG/S
W_{24}	일반열교환기 취출수 유량	KG/S
T_C	CBD 탱크 취출수 온도	DEGC
T_H	HCBD 탱크 취출수 온도	DEGC
T_{CCW}	일반열교환기 냉각수 온도	DEGC
T_{CON}	재생열교환기 복수 온도	DEGC
T_A	주변 대기온도	DEGC
DT	실행 주기	SEC

2) 출력변수

기호	내 용	단위
T_{RHXI}	재생열교환기 입구측 취출수 온도	DEGC
$T_{RH XO}$	재생열교환기 출구측 취출수 온도	DEGC
T_{HXO}	일반열교환기 출구측 취출수 온도	DEGC
T_2	CBD/HCBD 취출수 혼합 노드 온도	DEGC

나. 수치모델

1) 재생열교환기 출구측 취출수 온도

F-HXS ($T_{RH XO}$, 출구측 취출수 온도

T_C , 입구측 취출수 온도

T_{CON} , 복수 온도

T_A , 주변 온도

W_{CW} , 취출수 유량

W_{CON} , 복수 유량

DT , 실행주기

A_{N1} , $EFF_N * CR_N$

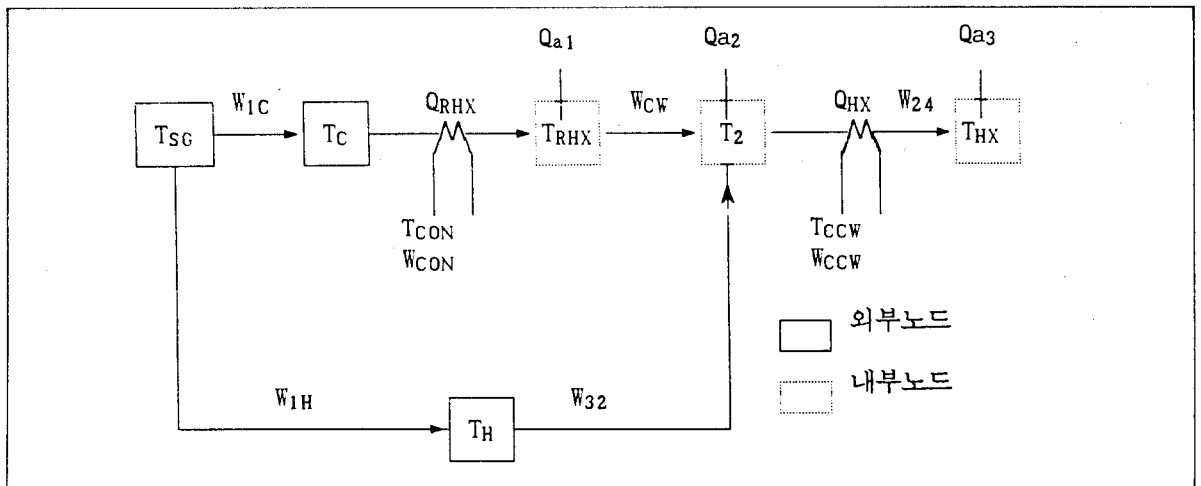
Ka_1 , 열전달계수 (KW/DEGC)

Me_1 , Hot Side Equivalent Mass

C_p , 취출수 정압비열 (KJ/KG · DEGC))

EFF_N : 열교환기 정격효율(Nominal Effectiveness)

CR_N : Heat Capacity Ratio Nominal



(그림 10) 중기발전기 취출계통 Thermal Network

2) 일반열교환기

- F—HXS (T_{HXO} , 출구측 취출수 온도)
- T_2 , 입구측 취출수 온도
- T_{CCW} , 냉각수 온도
- T_A , 주변 온도
- W_{24} , 취출수 유량
- W_{CCW} , 냉각수 유량
- DT, 실행주기
- Λ_{N2} , $EFF_N * CR_N$
- Ka_2 , 열전달계수 (KW/DEGC)
- Me_2 , Hot Side Equivalent Mass
- C_p , 취출수 정압비열 (KJ/KG · DEGC))
- EFF_N : 열교환기 정격효율(Nominal Effectiveness)
- CR_N : Heat Capacity Ratio Nominal

3) CBD/HCBD 취출수 혼합 노드 온도 (T_2)

$$Q_{in} = C_p * (W_{CW} * T_{RHXO} + W_{HW} * T_H) [KW]$$

$$Q_{out} = W_{24} * C_p * T_2 + Ka * (T_2 - T_A) [KW]$$

$$T_2 = T_2 + (Q_{in} - Q_{out}) * DT / (Me * C_p)$$

Ka : 대기와의 열전달계수
 Me : Node Mass Equivalent

3.2.3 M-TANK 모듈

M-TANK 모듈은 Two-Phase 탱크인 HCB Flash 탱크와 CBD Flash 탱크의 열·수력학적 현상을 모의한다. M-HYD 모듈에서 계산된 탱크 유입·유출 유량과 M-THER 모듈에서 계산된 유입·유출 유량의 엔탈피 또는 온도를 입력으로하여 다음의 탱크 변수를 계산한다.

- 수위, 증기 압력, 물 온도
- 증기 및 물의 엔탈피
- 증기 밀도

계산시 적용한 가정과 간략화 방법은 다음과 같다.

- 탱크 내에서 증기와 물은 평형상태에 있다고 가정
- 증기 또는 물로 완전히 채워지는 현상은 모의하지 않음

가. 입·출력 변수

1) 입력 변수

기호	내 용	단 위
W_{JC}	CBD 탱크 유입수 유량	KG/S
W_{CW}	CBD 탱크 배출수 유량	KG/S
W_{CS}	CBD 탱크 배출 증기량	KG/S
W_{JH}	HCB 탱크 유입수 유량	KG/S
W_{PPR}	HCB 탱크 펌프 회수 유량	KG/S
W_{PP}	HCB 탱크 펌프 배출 유량	KG/S
W_{HS}	HCB 탱크 배출 증기량	KG/S
H_{SG}	S/G 취출수 엔탈피	KJ/KG
P_{SG}	S/G 압력	KG/CM2
T_A	대기온도	DEGC
dt	실행 주기	SEC

2) 출력변수

기호	내 용	단 위
P_H	HCB 탱크 압력	KG/CM2
B_H	HCB 탱크 수위	M
T_H	HCB 탱크 온도	DEGC
H_{HL}	HCB 탱크 취출수 엔탈피	KJ/KG
H_{HS}	HCB 탱크 취출증기 엔탈피	KJ/KG
V_{HL}	HCB 탱크 취출수 부피	M3
V_{HS}	HCB 탱크 증기 부피	M3
D_{HS}	HCB 탱크 취출증기 밀도	KG/M3
P_C	CBD 탱크 압력	KG/CM2
B_C	CBD 탱크 수위	M
T_C	CBD 탱크 온도	DEGC
H_{CL}	CBD 탱크 취출수 엔탈피	KJ/KG
H_{CS}	CBD 탱크 취출증기 엔탈피	KJ/KG
V_{CL}	CBD 탱크 취출수 부피	M3
V_{CS}	CBD 탱크 증기 부피	M3
D_{CS}	CBD 탱크 취출증기 밀도	KG/M3

나. 수치모델

1) HCB 탱크

○ 총 탱크 유입 유량 계산(W_{sum})

$$W_{sum} = W_{in} - W_{out} = (W_{JH} + W_{PPR}) - (W_{PP} + W_{HS})$$

○ 총 탱크 유입 에너지 계산(Q_{sum})

$$Q_{sum} = Q_{in} - Q_{out} - Q_a = (W_{JH} * H_{SG} + W_{PPR} * H_{HL}) - (W_{PP} * H_{HL} + W_{HS} * H_{HS}) - (Ka * (T_H - T_A))$$

○ 탱크의 열수력 변수 계산

$D_{HL} = f-DLDS(D_{HS})$: 포화 물 밀도계산 루틴

$H_{HL} = f-HLDS(D_{HS})$: 포화 물 엔탈피계산 루틴

$H_{HS} = f-HSDS(D_{HS})$: 포화 증기 엔탈피계산 루틴

$V_{HS} = K_{vh} - V_{HL}$

K_{vh} : 탱크의 총 체적

○ 탱크 상태변수 계산

$f-PTANK(\&PABCD, D_{HS}, D_{HL}, H_{HS}, H_{HL}, V_{HS}, V_{HL})$

$DNOM = PABCD[0] * PABCD[3] + PABCD[1] * PABCD[2]$

$V_{HL}(n) = V_{HL}(n-1) + dt * (PABCD[3] * Wsum - PABCD[1] * Qsum) / DNOM$

$D_{HS}(n) = D_{HS}(n-1) + dt * (PABCD[0] * Qsum - PABCD[2] * Wsum) / DNOM$

$f-PTANK()$: 탱크 파라미터 A,B,C,D 계산 루틴

PABCD[0] : 파라미터 A

PABCD[1] : 파라미터 B

PABCD[2] : 파라미터 C

PABCD[3] : 파라미터 D

(n) : 프로그램 스텝 수

○ 기타 출력변수 계산

$P_H = f-PSDS(D_{HS})$: 포화 증기압력 계산 루틴

$T_H = f-TLDS(D_{HS})$: 포화 물 온도 계산 루틴

$B_H = V_{HL} / Karea$

Karea : 탱크 단면적

2) CBD 탱크

○ 총 탱크 유입 유량 계산(Wsum)

$Wsum = Win - Wout = W_{ic} + (W_{cw} + W_{cs})$

○ 총 탱크 유입 에너지 계산(Qsum)

$Qsum = Q_{in} - Q_{out} - Q_a = (W_{ic} * H_{SG}) - (W_{cw} * H_{CL} + W_{cs} * H_{CS}) - (K_a * (T_c - T_A))$

○ 탱크의 열수력 변수 계산

$D_{CL} = f-DLDS(D_{CS})$: 포화 물 밀도계산 루틴

$H_{CL} = f-HLDS(D_{CS})$: 포화 물 엔탈피계산 루틴

$H_{CS} = f-HSDS(D_{CS})$: 포화 증기 엔탈피계산 루틴

$V_{CS} = K_{vc} - V_{CL}$

K_{vc} : 탱크의 총 체적

○ 탱크 상태변수 계산

$f-PTANK(\&PABCD, D_{CS}, D_{CL}, H_{CS}, H_{CL}, V_{CS}, V_{CL})$
 $DNOM = PABCD[0] * PABCD[3] + PABCD[1] * PABCD[2]$

$V_{CL}(n) = V_{CL}(n-1) + dt * (PABCD[3] * Wsum - PABCD[1] * Qsum) / DNOM$

$D_{CS}(n) = D_{CS}(n-1) + dt * (PABCD[0] * Qsum - PABCD[2] * Wsum) / DNOM$

$f-PTANK()$: 탱크 파라미터 A,B,C,D 계산 루틴

PABCD[0] : 파라미터 A

PABCD[1] : 파라미터 B

PABCD[2] : 파라미터 C

PABCD[3] : 파라미터 D

(n) : 프로그램 스텝 수

○ 기타 출력변수 계산

$P_c = f-PSDS(D_{CS})$: 포화 증기압력 계산 루틴

$T_c = f-TLDS(D_{CS})$: 포화 물 온도 계산 루틴

$B_c = V_{CL} / Karea$

Karea : 탱크 단면적

3.2.4 M-COMP 모듈

M-COMP 모듈은 수력 배관망을 구성하는 펌프, 밸브 등의 동작특성을 일괄 처리하는 프로그램 모듈이며, 밸브 모듈은 밸브의 구동 방식에 따라 다음과 같이 구분하여 독립적인 서브 모듈을 두어 각각 처리하도록 하였다.

-솔레노이드 밸브(Solenoid Valve) 처리 모듈

-전동기 구동 밸브(Motor Operated Valve) 처리 모듈

-콘트롤 밸브(Control Valve) 처리 모듈

펌프는 별도의 모듈에 의해 처리된다.

분산제어시스템으로부터 밸브, 펌프의 작동신호를 받아서 밸브와 펌프의 다음 변수값을 계산한다.

-밸브 개도와 동작상태표시램프

-펌프 속도와 동작상태표시램프

계산시 적용한 가정과 간략화 방법은 다음과 같다.

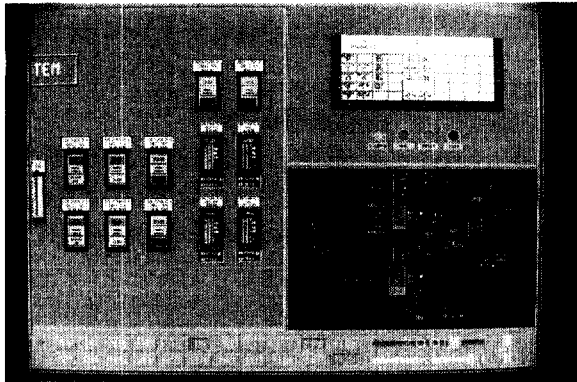
-밸브 개도 변화와 펌프 속도 변화는 linear하다.

3.3 소프트판넬

소프트판넬(Soft Panel)은 하드웨어적인 판넬에 대응되

는 개념으로서 컴퓨터 화면상에 그래픽 툴을 이용하여 패널배열 및 제어기 지시기 등의 동작을 소프트웨어적으로 구현한 화상판넬을 말한다. 본 연구에서는 캐나다 VPI사에서 개발한 VAPS를 소프트판넬 설계개발 툴로 사용하였다.

소프트판넬의 설계 대상은 영광 3호기 증기발생기 취출계통(SGBDS)의 제어반으로 앞의 <그림 6>에서와 같이 소프트판넬에서 수동조작 스위치와 콘트롤러를 조작하면 DCS와 시뮬레이션 프로그램에 데이터가 전송되어 처리되고 처리된 데이터를 다시 소프트판넬에서 전송받아 표시하도록 한다. 다음 <그림 11>은 본 연구에서 개발된 소프트판넬을 보여준다.



<그림 11> 소프트판넬

3.3.1 화면구성

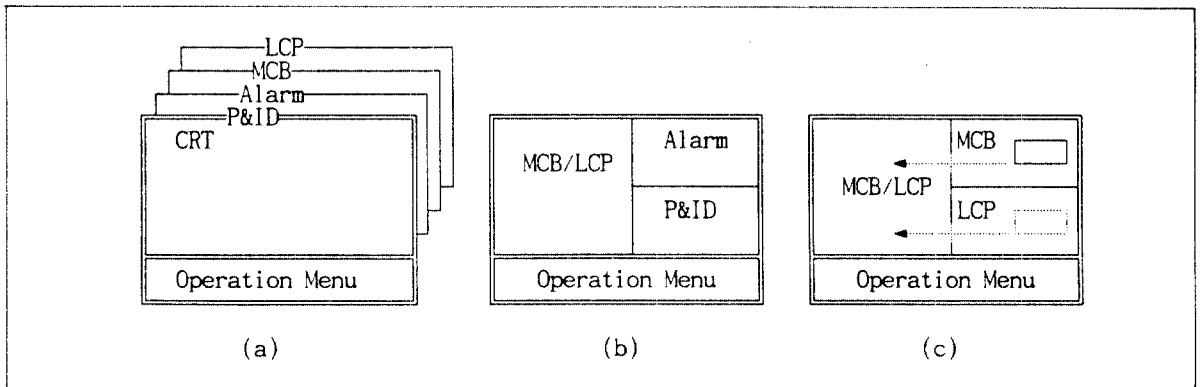
소프트판넬에서 화면구성은 SGBD계통의 운전을 위한 주제어반(MCB: Main Control Board), 현장제어반(LCP: Local Control Panel), P&ID(Piping and Instrument Diagram), 경보창(Alarm Window) 화면과 운전메뉴 화면으로 구성된다. 이렇게 구성된 화면을 계통 감시 및 운전에 편리하도록 다음과 같이 표시화면을 선택할 수 있도록 한다.

- MCB, LCP, P&ID, Alarm Window 화면 중 1개를 선택하여 전체화면에 표시 (<그림 12(a)> 참조)
- MCB/LCP, Alarm, P&ID를 한 화면에 모두 표시 (<그림 12(b)> 참조)
- MCB와 LCP의 원하는 부분을 확대(Zoom)하여 표시 (<그림 12(c)> 참조)

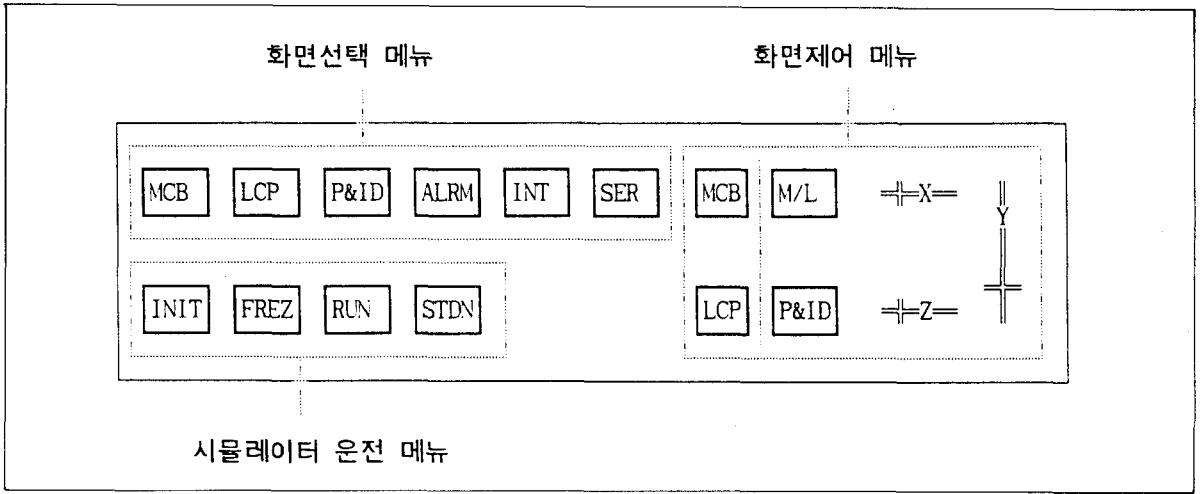
3.3.2 소프트판넬 메뉴

소프트판넬의 메뉴<그림 13>는 표시할 화면을 선택하는 화면선택 메뉴, 선택된 화면을 제어하는 화면제어 메뉴, 그리고 전반적으로 시뮬레이터를 운전하는 시뮬레이터 운전 메뉴로 구분하며, 이들 각각의 세부기능은 다음과 같다.

- 가. 화면선택 메뉴
 - MCB, LCP, ALRM, P&ID 메뉴는 <그림 12(a)>와 같은 화면선택
 - INT 메뉴는 <그림 12(b)>와 같은 화면선택
 - SER 메뉴는 <그림 12(c)>와 같은 화면선택



<그림 12> 소프트판넬 화면구성



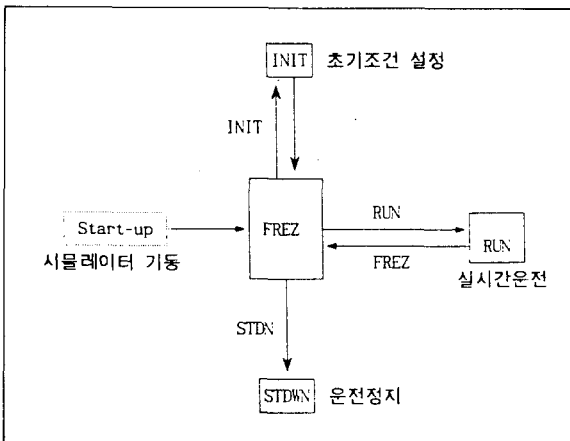
〈그림 13〉 소프트웨어 패널 메뉴

나. 화면제어 메뉴

Zoom, X축이동, Y축이동 등의 기능을 이용하여 화면 제어를 하도록 하며, 메뉴 중에서 MCB, LCP 메뉴는 〈그림 12(b)〉와 〈그림 12(c)〉에서 MCB와 LCP 화면을 각각 선택하도록 하며, M/L, P&ID 메뉴는 〈그림 12(b)〉에서 MCB/LCP, P&ID의 화면제어를 선택하도록 한다.

다. 시물레이터 운전 메뉴

시물레이터 운전 메뉴의 기능과 메뉴간의 연계는 〈그림 14〉와 같다.



〈그림 14〉 시물레이터 운전메뉴 연계도

3.3.3 Display

가. MCB, LCP, Alarm Window 화면

영광 3호기의 실제 제어반을 소프트웨어로 시물레이션 하여 SGBD 계통에 해당하는 수동조작스위치, 콘트롤러, 지시계 등의 계기와 경보창(Alarm Window)에 대해서 동작 기능을 시물레이션한다.

나. P&ID 화면

P&ID상에서 운전상황의 표시는 물론 운전도 가능하도록 설계하며, SGBD 계통의 감시(Monitoring) 데이터로는 압력, 유량, Level 등의 프로세스 데이터와 밸브 개도, 펌프 동작상태 등 공정기기의 상태변수가 있으며, 운전/제어 기능으로는 ON/OFF 밸브, 펌프 등의 논리제어(Logic Control)와 Modulating 밸브와 같은 연속제어(Continuous Control)로 구분된다.

○ 감시(Monitoring) 기능

- 각 프로세스 데이터 표시는 운전조작설명서(Operation Manual)을 근거로 MCR과 LCP에 표시되는 데이터를 P&ID 화면에 표시한다.

- 밸브에 대한 동작상태 및 개도는 운전원의 시각적 효과를 위해 다음과 같이 색상변화로 나타낸다.

- Fully Open ; GREEN (▷◁)
- Fully Close ; RED (▶◀)
- Intermediate ; RED로 개도표시(예: ▶◀=50% OPEN)

-펌프에 대한 동작상태는 회전상태를 나타내도록 한다.

-탱크 Level은 BAR Graph와 함께 디지털값을 표시하도록 한다.

○ 운전제어(Operation and Control) 기능

-ON/OFF 밸브, 펌프와 같이 ON/OFF Control되는 공정기기는 P&ID 상에서 마우스로 공정기기를 Click 함으로써 해당 Switch를 디스플레이하여 조작할 수 있도록 한다.

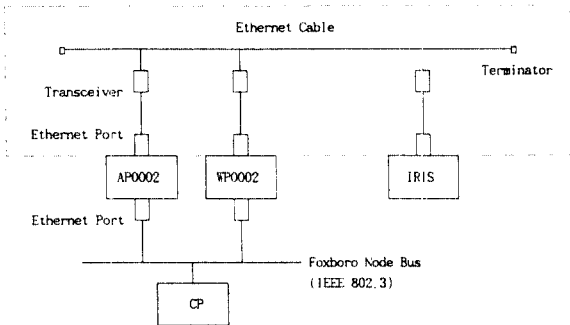
-Modulating Control은 P&ID상의 Control Variable을 Click 함으로써 해당 Controller를 디스플레이하여 제어조작을 할 수 있도록 한다.

3.4 데이터 통신 프로그램

계통 통합을 위한 데이터 통신을 내부 통신과 외부 통신으로 구분할 수 있으며, 내부 통신은 컴퓨터 내부의 프로그램 사이의 데이터 통신을 가능하게 하며 외부 통신, 즉 Network 통신은 두 대 이상의 컴퓨터 사이의 데이터 통신을 할 수 있도록 한다.

3.4.1 Network 데이터 통신

본 연구의 목표는 서로 독립적인 두 하드웨어 시스템을 연계 통합하여 하나의 통합 시스템을 구축하는 것으로써 이러한 시스템 연계를 위하여 Network 통신이 필요하게 된다. 본 연구에서는 TCP/IP 통신 프로토콜을 사용하였다.



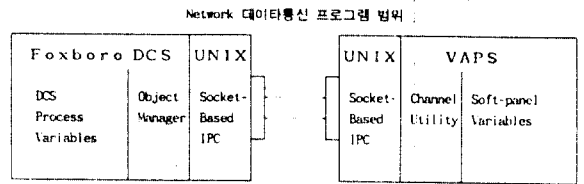
〈그림 15〉 네트워크 하드웨어 설치도

가. 하드웨어 설치

네트워크 접속장치를 이용하여 컴퓨터 사이를 연결하는 것으로, 다음 〈그림 15〉의 점선 부분이 네트워크를 위해 추가 설치된 부분이 된다.

나. Network 데이터통신 프로그램 개발

Foxboro DCS와 VAPS 사이에 서로 필요한 데이터를 주고받기 위하여 Network 통신 프로그램을 개발하였으며, Network 통신 프로그램의 개발 범위는 다음 〈그림 16〉 전체 구성도에서 점선으로 표시된 부분이 된다.



〈그림 16〉 통신 프로그램 전체 구성도

3.4.2 내부 통신

내부 통신은 각 하드웨어 시스템 내부에서 프로그램 사이의 데이터 통신에 필요한 것으로,

- 분산제어시스템 (SUN 워크스테이션): DCS 응용 프로그램과 외부 통신 프로그램 사이의 내부통신 기능 담당
- 시뮬레이션 컴퓨터 (SGI 워크스테이션): 소프트판넬 프로그램, 프로세스 모델링 프로그램 과 외부통신 프로그램 사이의 내부 통신 기능 담당

으로 나누어 설명한다.

가. DCS 데이터통신 프로그램

DCS 응용 프로그램과 Network 통신 프로그램 사이의 데이터 교환을 위한 프로그램으로, Foxboro DCS에서 제공하는 Object Manager Call을 이용하여 DCS 데이터 값을 사용자가 만든 임의의 버퍼로 읽어내거나 또는 그 반대로 버퍼에 있는 값을 DCS 데이터에 쓸 수 있도록 하는 프로그램으로 다음과 같이 기능을 세분하여 세분된 기능별로 프로그램 모듈을 만들었다.

-simom-init 모듈

- Object Manager Description Set-up

- DCS로 부터 읽어낼 데이터 목록 작성
- DCS에 써넣을 데이터 목록 작성
- Object Manager file open
- simom—sim 모듈
- 시물레이터 상황 즉 INIT, FREEZE, RUN, SHUT-DOWN 등의 상황을 DCS 데이터에 써넣음.
- simom—read 모듈
- simom—init 모듈에서 작성된 DCS 데이터 리스트의 각 데이터 값을 버퍼로 읽어 냄.
- 읽어낸 값 중에서 Boolean 값을 갖는 데이터의 값을 Integer로 변환함. (C 프로그램에는 Boolean 변수가 없음.)
- simom—write 모듈
- simom—init 모듈에서 작성된 DCS 데이터 리스트의 각 데이터에 대응되는 버퍼의 값을 데이터에 써넣음.
- Boolean 값을 갖는 데이터를 위해 버퍼의 Integer 형태를 Boolean 형으로 변환함.(C 프로그램에는 Boolean 변수가 없음.)
- simom—close 모듈
- simom—init 모듈에서 열어놓은 화일을 닫음.

나. 소프트판넬 데이터통신

소프트판넬은 크게 데이터를 발생시키는 수동조작 스위치, 콘트롤러 입력 등의 Input Object와 데이터를 디스플레이 시키는 수동조작 스위치의 상태표시램프, 지시계, 경보창의 정보램프 등의 Output Object로 구성된다. 소프트판넬 통신은 Input Object에서 발생한 데이터를 DCS로 전송시키고, 프로세스 모델링 프로그램과 DCS로부터 발생된 데이터를 전송받아서 Output Object로 데이터를 디스플레이 시키기 위한 것이다.

소프트판넬 설계에 이용된 VAPS는 외부 프로그램과의 통신을 위해 TCP/IP 프로토콜의 프로세스간 통신(Inter-Process Communication) 기능이 지원되고 있으며 VAPS Communication 소프트웨어 계층구조는 <그림 17>과 같다.

VAPS는 각 Object와 외부프로그램 간의 데이터 통신을 위해 채널(Channel: 일종의 Shared Memory)을 이용한다. 따라서 Input/Output Object와 사용자 버퍼간에 데이터 전송을 위해서 채널을 생성하여 각각의 Object와 채널 간은 VAPS에서 제공하는 Integration Editor와 ATN Message Utilities를 이용하여 데이터를 전송하며, 채널과 사용자 버퍼간의 데이터 전송은 Channel Utilities를 이용하여 데이터

Channel Utilities & ATN Message Utilities
User Defineable Message Handlers
VAPS Stream Interface
UNIX Sockets, 1553 Bus Drivers, etc

<그림 17> VAPS Communication 소프트웨어 계층구조

를 Read/Write 할 수 있도록 하였다. 따라서 소프트 판넬의 데이터 통신을 위해 다음과 같은 기능별 프로그램 모듈을 만들었다.

- vaps—com 모듈
 - VAPS Network Initialize
 - 생성된 각 채널의 등록
- recv—vaps 모듈
 - 소프트판넬 데이터를 DCS 및 시물레이션 모델 프로그램으로 전송하기 위해 사용자 버퍼로 Read
- disp—data 모듈
 - DCS 및 시물레이션 모델 프로그램에서 사용자 버퍼로 보내온 데이터를 채널에 Write하여 각각의 Object에 디스플레이
- 기타
 - 시물레이터 강사조작기능(Initialize, Run, Freeze, Shutdown) 명령을 DCS 및 시물레이션 모델 프로그램으로 전송하기 위한 Routine

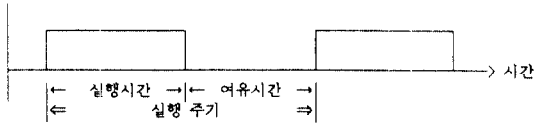
3.5 시물레이터 실시간 관리 프로그램

시물레이터 실시간 관리 프로그램은 모든 프로그램이 실시간을 만족하며 수행 되도록 실행 순서, 실시간 주기, 신호의 동기화 등을 결정하여 각 프로그램이 하나의 시스템으로 통합되어 각각의 프로그램 기능이 조화롭게 연계 되도록 하는 프로그램이다.

3.5.1 실시간 발생 프로그램

전체 프로그램의 실행주기를 일정한 Time-Frame에 맞추어서 실시간 수행을 하기 위한 프로그램으로, 전체 프로그램의 1주기 실행시간을 측정하여 여유시간 동안 CPU

를 쉬게하므로써 정해진 Time-Frame에 정확하게 한번 씩 실행되도록 하였다. 이를 도표로 나타내면 <그림 18>과 같다.



(그림 18) 실행주기 구성도

3.5.2 시뮬레이터 관리 프로그램

전체의 모든 프로그램이 실시간을 만족하며 수행 되도록 실행 순서, 실시간 주기, 신호의 동기화 등을 결정하여 각 프로그램이 하나의 시스템으로 통합되어 각각의 프로그램 기능이 연계되도록 하는 시스템 통합 프로그램 즉, Foxboro DCS로 구성된 SUN Sparc WS과 Soft-Panel 및 시뮬레이션 프로그램으로 구성된 Silicon Graphics WS의 두 개의 시스템을 연계 통합하기 위한 관리 프로그램으로 각 시스템 내부의 관리는 각 시스템에서 분산 처리하며, 전체 통합 관리기능은 Silicon Graphics WS에서 종합 처리하도록 하였다. 따라서 이들 프로그램은 단독 프로그램으로서 존재하는 것이 아니라 각 시스템의 통신 프로그램 모듈에 포함되어 기능을 수행하게 되며 그 내용은 다음과 같다.

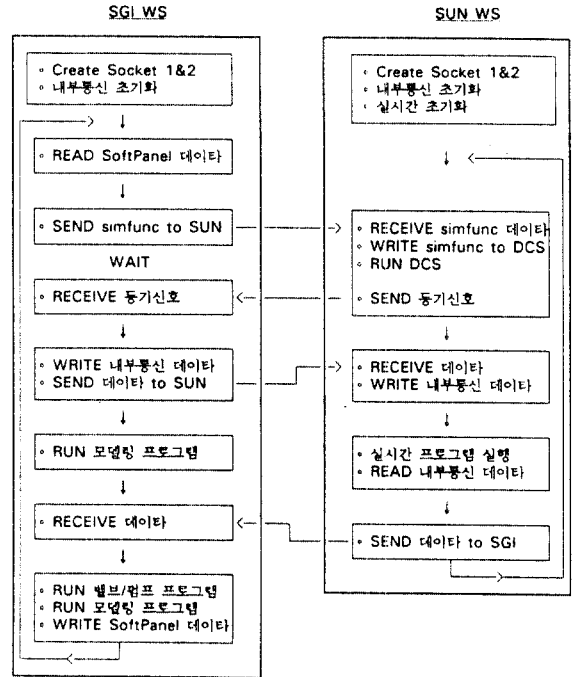
가. SGI WS 측 통신모듈 수행기능

- 통신 SERVER 기능 수행
- Soft Panel 프로그램과 시뮬레이터 프로그램 순차적 실행
- 전체 프로그램의 순차적 실행

나. SUN WS 측 통신모듈 수행기능

- 통신 CLIENT 기능 수행
- 실시간 수행
- 두 시스템 사이의 데이터 통신 동기화
- DCS 프로그램의 순차적 실행

다음 <그림 19>는 전체 프로그램 실행 흐름 및 시스템 연계도를 보인 것이다.



(그림 19) 전체 프로그램 실행 흐름 및 시스템 연계도

4. 결론 및 앞으로의 연구개발 방향

본 연구를 통하여 분산제어시스템(Distributed Control System)의 원자력발전소 계측제어시스템 적용을 검증할 수 있는 부분범위 시뮬레이터(Compact Simulator)를 구축하였다.

대상계통은 영광원자력 3호기 발전소의 증기발생기 취출계통(Steam Generator Blow Down System)을 선정하여 발전소 프로세스와 제어반 등을 simulation 하였으며, 분산제어시스템은 미국 폭스보로사의 최근 기종인 I/A 50 Series를 채택하여 stimulation 하였다.

구축된 시뮬레이터를 통하여 제공되는 검증환경은 다음과 같다.

- 분산제어시스템의 발전소 계측제어시스템 적용 시뮬레이션 및 검증
 - 기존의 아날로그 계측제어시스템 구현 및 시험
 - 현대 제어이론의 적용 시뮬레이션 및 성능시험
 - 제어반 MMI(Man-Machine Interface) 설계 및 시험
- 그러나, 본 연구에서는 시뮬레이션 대상계통이 발전소

전범위가 아닌 소규모 계통으로 제한되는 등 몇가지 제한 사항을 갖고 있으므로 전 범위인 경우에 예상되는 대규모 분산제어시스템의 네트워크 문제점 등은 시물레이션할 수 없게 된다. 따라서 앞으로의 연구개발에서는 다음사항에 대한 연구를 계속할 계획이다.

- 시물레이션 계통범위 확대
- 시물레이터 운전기능 보완

참고문헌

[1] *Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document*, EPRI, 1992.

[2] 한국전력기술(주), 「영광 3,4호기 설계도면 (P&ID, Loop Diagram, Logic Diagram)」, 1992.

[3] 한국전력기술(주), 「영광 3,4호기 System Functional Description」, 1992.

[4] 한국전력기술(주), 「영광 3,4호기 운전 절차서」, 1992.

[5] 한국전력기술(주), 「분산형 컴퓨터 제어기술의 원전 계통 적용연구」, 1993.

[6] 한국전력공사, 「영광 1,2호기 Simulator Documentation Package」, 1986.

[7] *I/A Series Systems User's Guide & Information*, Foxboro, 1992

[8] *VAPS Conceptual Overview*, VPI, 1991.

[9] *VAPS Reference Guide*, VPI, 1991.

[10] *VAPS Programmer's Guide*, VPI, 1991.

[11] 미지시다 노부히로 외 1인, 「이기종 접속과 TCP/IP」, 동서교역출판부, 1992.

[12] Judith Radin, *IRIX Network Programming Guide*, Silicon Graphics Inc., 1991.

[13] *Mastering Irix Student's Workbook*, SGI, 1991.

[14] *I/A Series Programming - Object Manager Calls*, Foxboro, 1992.

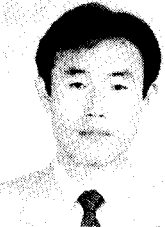
[15] *Network Administration*, SUN, 1992.

● 저자소개 ●



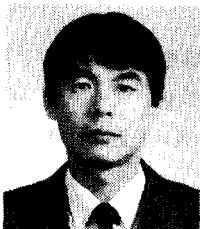
趙炳秀

1989년 광운대학교 전자공학과 졸업
1992~현재 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소 근무
관심분야: 컴퓨터 그래픽, 현대 제어이론, 발전소 계통 시물레이션



徐康完

1987년 단국대학교 전자공학과 졸업
1989년 단국대학교 전자공학과 석사과정 졸업
1990~현재 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소 근무
관심분야: 훈련용 시물레이터, 컴퓨터 데이터통신



崔博烈

1976년 서울대학교 공업교육학과(전기전공) 졸업
1978년 서울대학교 공업교육학과 석사과정 졸업
1977~1982 풍산금속 동력과 근무
1982~현재 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소 근무
관심분야: 훈련용 시물레이터, 자동제어