

論文95-32B-8-1

## 화력발전소 경보처리 시스템에 관한 연구

### (A Study on the Alarm Processing System for Fossil Power Plant)

申承哲\*, 朴世華\*\*\*, 李在燦\*\*\*\*, 卞增男\*\*

(S. C. Sheen, S. H. Park, J. H. Lee, and Zeungnam Bien)

#### 요 약

본 논문에서는 화력발전소에서 동시다발적으로 발생하는 경보들의 처리 및 발전소의 일시정지(Trip)시 그 원인을 판단해주는 경보처리 시스템(Alarm Processing System)에 관한 연구를 하였다. 숙련된 운전원들의 지식 및 기타 자료들로부터 경보들과 고장원인들 사이의 원인-결과 트리(Cause-Consequence Tree)를 구성하고 경보들의 발생시간(Fired Time)을 이용하여 발생한 다중경보(Multiple Alarm)에서 원인경보(Cause Alarm)를 찾아내고 이 원인경보에 대한 원인정도(Cause Degree)를 계산하여 운전원에게 알려주어 신속한 조치를 할 수 있게 한다. 서울화력 4호기의 디지털 시뮬레이터를 이용한 실험을 통해 구성된 경보처리 시스템에서의 경보처리의 과정을 보인다.

#### Abstract

The purpose of multiple alarm processing is to give the operator the correct information and perception of the malfunction present in the plant. In this thesis, an APS(Alarm Processing System) is studied for fossil power plants. This APS is based on a cause-consequence trees in the knowledge representation aspect for alarm and plant and adapts alarm filtering methods using fired time information in the decision aspect. Through the cause-consequence trees and filtering methods, the Alarm Processing System finds the cause alarm among the fired multiple alarms and calculates the cause degree which represents the possibility of a fault occurring in the instruments of the plant with the information of fired alarm. The knowledge base is built via interviews and questionaries with the expert operators on the Seoul power plant unit 4. Finally, the validity of the studied APS is shown via simulations.

#### I. 서 론

발전소에는 보일러, 터빈, 발전기 및 기타 여러 기

기들이 설치된 복잡하고 거대한 시스템으로 안정된 운전을 위하여 각 부분에 센서를 설치하여 주제어실(배전반) 내에서 운전시의 대부분의 상태를 파악할 수

\* 準會員, \*\* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., KAIST)

\*\*\* 正會員, 生産技術硏究員 生産設備 技術센터

(Korea Academy of Industrial Technology)

\*\*\*\* 正會員, 韓國外國語大學校 制御計測工學科

(Dept. of Control and Inst., Hankuk University of Foreign Studies)

接受日字: 1995年3月18日, 수정완료일: 1995年8月17日

있게 해 두고 있다. 특히 계기의 고장, 운전원의 실수, 센서의 고장, 제어시스템의 고장등으로 나타나는 발전소의 이상상태(Abnormal State)를 운전원에게 알려주는 경보(Alarm)는 발전소 운전상태 파악에 있어서 아주 중요한 신호이다. 경보는 발전소의 이상상태를 나타내어 운전에도 도움을 주고자 하는 데 목적이 있으나 여러 개가 동시에 발생할 경우에는 오히려 운전원들이 발전소의 상태를 파악하는데 인지부담(Cognitive Load)을 주게 된다. 이러한 경보들은 대부분 하나의 고장으로 인해 그 원인이 파급되어 거의 동시에 발생하므로 다중경보(Multiple Alarm)의 발생시 원인경보(Cause Alarm)를 찾아 주고 이에 대한 조치사항 및 조치순서를 운전원에게 알려주어 신속한 조치가 이루어 질 수 있도록 도와주는 경보처리 시스템의 개발이 요구된다<sup>[1][12]</sup>.

다중경보의 발생시 이의 원인경보를 찾고 고장원인(Cause)을 추론하는 데 있어서 여러 방법들이 연구되어 오고 있다<sup>[3]</sup>. 하지만 이러한 기존의 방법들에서는 어떤 경보가 발생했는가만을 중요시하고 경보들이 언제 어떤 순서로 발생했는가에 대한 고려는 하지 않고 있다. 따라서 경보의 설치나 운전원들의 지식이 서로 상반되어 나타날 수 있는 경보망(Alarm Network) 구조나 경보들이 순서를 달리하여 발생했을 경우에 대해서는 원인경보를 찾지 못하거나 그 경보들을 발생시킨 고장원인을 찾아내지 못하는 경우가 나타난다<sup>[5][16]</sup>. 본 논문에서는 운전원들의 경험적 지식과 플랜트의 계통분석을 통해 경보들과 고장원인들 사이의 원인-결과 트리의 형태로 지식베이스를 구성<sup>[15]</sup>하고 경보의 발생시간, 즉 발생순서를 고려한 원인경보의 추론방법과 고장원인들에 대한 원인정도를 동적으로 변화시켜

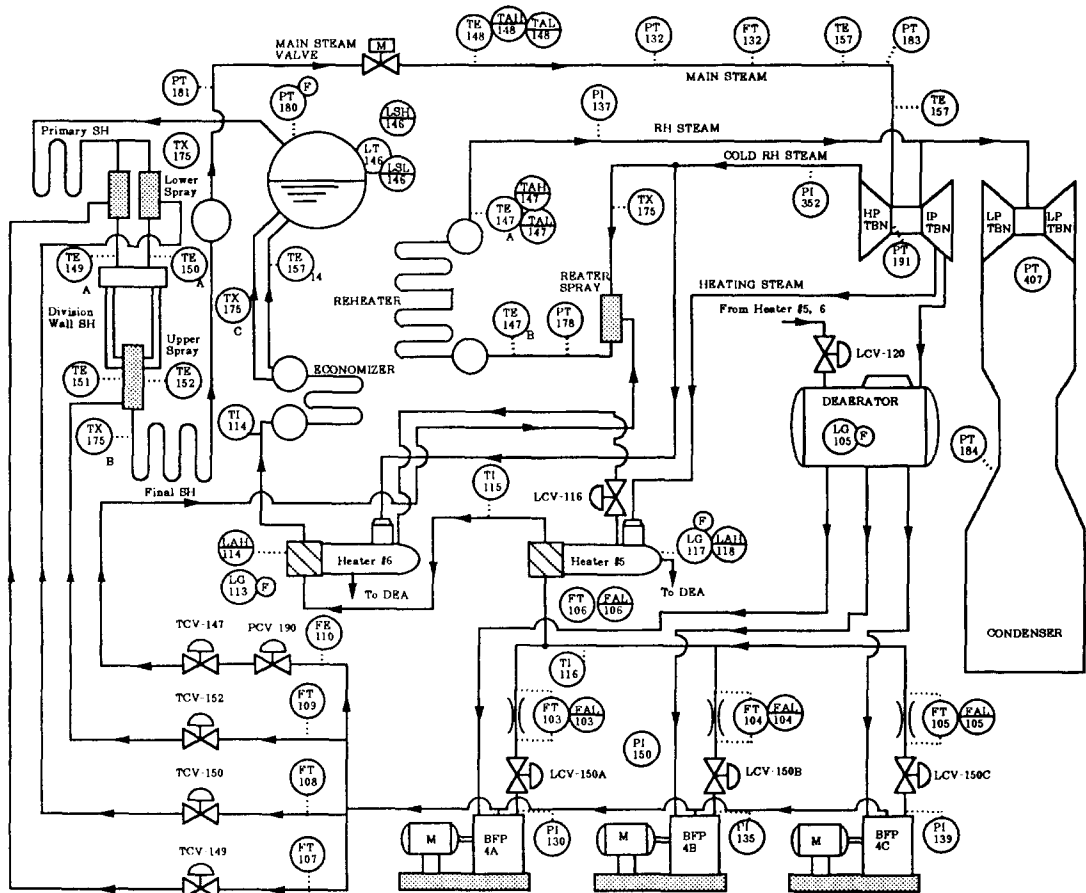


그림 1. 서울화력 4호기 보일러 계통의 경보  
Fig. 1. Alarms of boiler system in Seoul power plant unit 4.

서 운전원이 상황에 따라 조치순서를 다르게 할 수 있도록 한다. 이러한 추론방법으로 대상 발전소인 서울화력 4호기에 발생하는 경보들에 대해 적용한다.

본 논문에서는 I 장의 서론에서 경보처리의 일반적인 상황을 기술하였으며, II 장에서는 발전소의 개요와 대상 발전소인 서울화력 4호기의 계통분석을 통한 경보체계를 기술한다. III 장에서는 일반적인 경보처리 및 본 논문에서 구성한 화력발전소 경보처리 시스템에 관하여 자세한 내용을 기술한다. IV 장에서는 모의실험을 통해서 기존의 방법과의 비교를 보인다. V 장에는 결론 및 추후 연구과제를 기술한다.

### II. 시스템 개요

일반적으로 발전소는 자연에너지(Raw Energy)를 전기에너지로 변환하는 시스템이다. 화력발전소(Steam Power Plant)는 증기의 힘을 이용하여 터빈(Turbine)의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 시스템이다. 본 논문에서의 대상 발전소는 서울화력 4호기로서 자연순환식 드럼형 보일러를 갖는 중유전소식 발전소이다. 서울화력 4호기의 사양은 다음과 같다<sup>18)</sup>.

- 최대 전력(Maximum Power) : 137.5 [MW]
- 최대 증발량(Maximum Steam Evaporation) : 450 [Ton/hr]
- 증기 압력(Steam Pressure) : 126.6 [Kg/cm<sup>2</sup>]
- 증기 온도(Steam Temperature) : 540 [°C]

발전소의 각 부분에는 센서들이 설치되어 있고 센서 값들을 논리적으로 구성하여 로직이 성립하면 경보가 발생하도록 되어 있다. 주제어실의 경보판넬(Panel)에는 경보들을 계통별로 분류해두고 있으며, 색깔을 달리하여 중요성의 정도를 나타내고 있다. 경보가 발생했을 때, 당장 처리하지 않아도 운전에 큰 영향을 미치지 않는 경보들도 있지만 빠른 시간 내에 처리하지 않으면 발전소의 일시정지를 유발하는 경보에 이르러 발전소가 정지하게 되는 경보들도 있다. 대상 발전소인 서울화력 4호기의 주제어실에는 약 240여개의 경보가 설치되어 있고 보일러, 터빈, 발전기의 세 계통에 대해 경보들이 구분이 되어 있다. 그림 1에서는 서울화력 4호기의 보일러계통에 관한 계통도에서 경보의 설치상태를 나타낸 한 예를 보인다.

### III. 화력발전소 경보처리 시스템의 설계

#### 1. 경보처리

동시다발적으로 발생하는 경보들에서 불필요한 경보나 연동에 따른 경보들을 제거해서 원인이 된 경보를 찾아내고 이에 대한 발생원인을 찾아내는 과정이다. 대부분 경보들은 서로 연관을 가지고 있다. 즉 하나의 경보가 원인이 되어 다른 경보를 일으키고 그 경보는 다시 또 다른 경보를 발생시키는 형태를 띤다. 발전소와 같은 대규모 시스템에서는 경보의 수가 많으며 경보의 발생 또한 다중경보의 형태로 발생한다. 하나의 원인에 의해 발생한 한 계통에서의 경보는 다른 계통의 경보를 유발시키며 연동동작(Interlock Action)에 의한 경보들을 발생시킨다. 또한 하나의 경보를 유발하게 되는 원인들은 여러 개가 있을 수 있다.

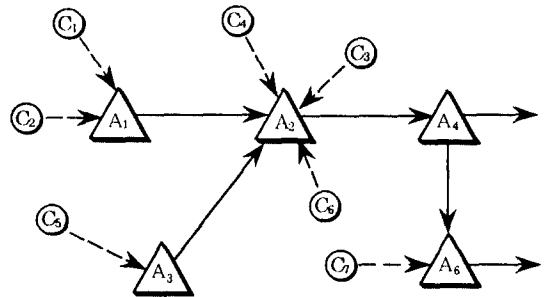


그림 2. 원인-결과 트리 예  
Fig. 2. Typical cause-consequence alarm relationship trees.

그림 2는 경보들 사이의 관계 및 경보와 고장원인들과의 관계를 원인-결과 트리 형태 구성한 예를 나타낸다. 그림에서 보면 A<sub>2</sub>경보는 A<sub>1</sub>이나 A<sub>3</sub>경보에 의해 발생할 수도 있고 c<sub>3</sub>, c<sub>4</sub>, c<sub>6</sub>의 고장원인들에 의해서도 발생할 수 있음을 나타낸다. 이러한 경보들의 처리에 있어서 플랜트에 관한 지식 및 자료를 표현하는 지식베이스의 구축방법으로는 경보트리(Alarm Trees), 고장트리(Fault Trees), 원인-결과 트리(Cause-Consequence Tree), 결정테이블(Decision Table), FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)등이 있으며 발생한 경보들로부터 원인경보를 추론하는 방법으로는 패턴매칭(Pattern Matching) 방법, 우선순위 규칙들(Prioritization Rules)의 적용, 확인/억제 규칙들(Validation/ Inhibition Rules)의 적용, 플

플랜트의 상태에 따른 경보들의 그룹핑(Grouping) 방법, 탐색 알고리즘(Search Algorithm)의 적용등의 방법들이 이용되어지고 있다<sup>[3]</sup>. 최근에는 인공지능용 탐색기법을 이용하여 경보처리를 할 수 있는 지식베이스 구축방법이 대두되고 있으며<sup>[4]</sup><sup>[16]</sup>, 신경회로망을 이용하여 패턴매칭(Pattern Matching)을 통한 원인 경보의 추론<sup>[5]</sup>이나, 탐색기법을 이용한 원인경보 및 고장의 추론<sup>[2]</sup><sup>[16]</sup>, 플랜트의 상태에 따른 경보들의 우선순위(Priority)의 조절과 필터링(Filtering)<sup>[6]</sup> 등의 방법들이 연구되고 있다.

2. 경보처리 시스템의 구성

경보처리 시스템은 고장진단 시스템이나 발전소 감시시스템 등을 포함하는 운전자 지원시스템의 일부로서 다중경보의 발생시 원인을 찾아내고 이에 대한 적절한 조치사항을 운전자에게 알려주는 시스템이다. 일반적으로 경보처리 시스템에는 다중경보의 발생시 원인경보(들)를 검색하는 기능, 원인경보에 대한 고장원인을 검색하는 기능, 고장원인에 대한 해당 조치사항을 안내해 주는 기능, 조치사항들에 대한 순서를 결정해주는 기능, 발전소의 일시정지시 빠른 원인분석을 해주는 기능, 사용자 접속기능(User Interface)등이 요구된다<sup>[9]</sup>. 본 논문에서의 경보처리 시스템은 전문가시스템(Expert System)의 형태로 그림 3와 같이 구성하였다<sup>[12]</sup><sup>[13]</sup>.

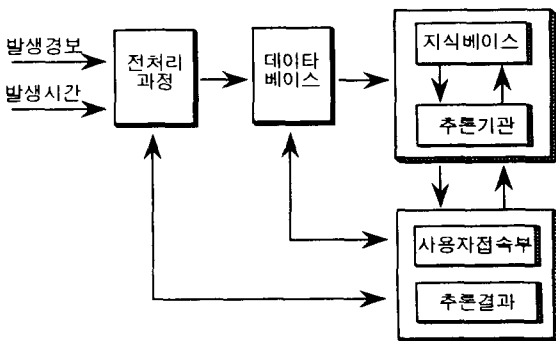


그림 3. 경보처리 시스템의 구성  
Fig. 3. Configuration of alarm processing system.

전처리과정에서는 연속적으로 입력되는 신호들 중에서 발생한 경보 및 발생시간을 데이터베이스(Data-base)에 입력한다. 데이터베이스에서는 전처리과정을 거친 발생경보와 발생시간을 저장하며 지식베이스

(Knowledge Base)와 추론기관(Inference Engine)에 연결된다. 지식베이스에서는 운전원의 경험적 지식 등을 바탕으로 경보들의 상호관계 등의 지식을 원인-결과와 트리 형태로 저장한다. 추론기관은 지식베이스의 규칙과 사실들과 데이터베이스에서 입력된 발생된 경보와 이들의 발생시간 및 추론규칙으로 탐색 알고리즘에 적용하여 원인경보 및 고장원인을 검색하는 부분이다. 사용자 접속부는 사용자가 쉽게 경보 처리 시스템에 접근할 수 있도록 하기 위한 부분이다.

3. 지식베이스의 구성

지식베이스는 기본운전 지침서(4호기), P&ID (Piping and Instrument Diagram) 계통도 분석, 일시정지시 발생경보들의 분류<sup>[7]</sup><sup>[14]</sup>, 배전반 내의 계기판의 각종 지시계 내역 및 조작스위치의 기능분석, 각 계통에 관련된 운전전문가들의 경험적 지식으로 프레임형태로 구축한다. 경보의 프레임에는 경보의 고유번호(identifier), 이름(text\_id), 우선순위(alarm\_priority), 선행경보 리스트(precedents), 후행경보 리스트(descendents), 고장원인들의 리스트(causes), 경보들에 대한 원인정도(alarm\_cause\_degree), 고장원인들의 원인정도(cause\_degree), 발생시간 정보(fired\_time), 종류(class)등의 데이터를 저장한다.

1) 경보의 분류

각 경보들이 현재 발전소의 어떤 상태를 나타내느냐에 따라 3가지로 분류를 한다. 즉 발전소의 상태를 나타내는 경보(Plant State Alarm)와 기기의 고장, 부품의 고장을 나타내는 트립경보(Trip Alarm)와 발전소의 트립시 발전소의 안전을 위하여 자동적으로 일어나는 연동에 의한 경보(Interlock Alarm)의 세가지로 구분한다.

표 1. 경보의 분류  
Table 1. Classification of alarms.

경보 종류	분류 코드
발전소의 상태를 나타내는 경보	plant_state_alarm
기기의 트립을 알리는 경보	trip_alarm
연동동작에 따른 경보	interlock_alarm

연동동작에 의한 경보들은 기기의 고장이나 발전소의 일시정지시 자동으로 발생하는 경보들로서 운전원에게 혼란을 가중시킬 우려가 있으므로 처리시 이들을 제거하게 된다. 표 1에서 경보의 분류를 나타낸다.

2) 경보의 우선순위

경보의 우선순위(Alarm Priority)는 경보들 사이의 상대적인 중요도를 나타내어 처리의 순서를 결정하는 데 도움을 주기 위한 값이다. 본 논문에서의 경보의 우선순위는 표 2에서와 같은 방법 및 운전원의 경험적 지식, P&I 계통분석 및 기타 관련자료의 분석으로 결정하며 발전소의 일시정지에 관계된 경보일수록, 일시정지에 이르는 시간이 짧은 경보일수록 높은 순위를 갖는다. 경보의 우선순위는 0과 100사이의 값으로 한다.

표 2. 경보의 우선순위 결정 방법 예  
Table 2. Examples of decision method in alarm priority.

1) 유체 흐름 방향 (A <sub>1</sub> ) A <sub>2</sub> )	
2) 저수량 → 저수위 (A <sub>1</sub> ) A <sub>2</sub> )	
3) 냉각수 저유량 → 고온 (A <sub>1</sub> ) A <sub>2</sub> )	
4) 저압력 → 파열 → 저유량 (A <sub>1</sub> ) A <sub>2</sub> )	
5) 펌프 트립 → 저유량 (A <sub>1</sub> ) A <sub>2</sub> )	
6) 연동동작 (A <sub>1</sub> ) A <sub>2</sub> )	

3) 발생원인에 대한 원인정도

하나의 경보는 여러개의 발생원인들에 의해 유발될 수 있다 이러한 발생원인들 중에서는 경보로 연결되어 있기도 하고, 경보로 설치되어 있지 않은 고장원인들도 존재한다. 경보에 연결된 발생원인들이 그 경보를 발생시킬 가능성, 또는 그 발생원인의 중요성 등을 원인정도(Cause Degree, cd)에 나타낸다. 원인정도는 0과 1사이의 값으로 나타낸다. 경보의 원인정도의 초기값은 운전원들의 인터뷰한 값을 Saaty의 방법(Saaty's Pairwise Comparison Method)<sup>[8] [9]</sup>에 적용하여 각 원인정도의 상대적인 값으로 결정한다.

4) 경보의 발생시간

동시다발적으로 발생한 경보들의 발생시간을 경보처리에 이용한다. 거의 같은 시간에 발생한 경보들에 대해서 그 순서를 사람이 구분하기는 매우 어렵지만 기계를 이용하면 쉽게 측정할 수 있다. 따라서 경보의 처리에 있어 경보의 발생시간, 즉 발생순서를 이용한다. 서울화력 4호기의 실제 경보트리에 대한 지식베이스 프레임의 구성을 그림 4에 나타낸다.

```
* alarm( identifier : B2-17,
text_id : FO_Discharge_Press_Low,
priority : 50,
precedent_alarms : FO_Service_Tank_Level Low,
FOP_Trip,
descendent_alarms : FO_to_BNR_Press_Low Trip,
alarm_cause_degree : 0.9, 0.7,
causes : Strainer_Plugging, Recir_Cnt_Valve Abnormal,
cause_degree : 0.3, 0.4
fired_time : 255.00(sec)
class : plant_state_alarm )
```

그림 4. 지식베이스 프레임의 예  
Fig. 4. A frame of knowledge base.

4. 추론 과정

1) 원인경보의 추론

A<sub>0</sub>경보가 t<sub>0</sub>시간에 발생하였고, A<sub>n</sub>경보가 t<sub>n</sub>시간에 발생하였다. 경보처리의 시간은 t<sub>0</sub>와 t<sub>n</sub>시간 사이의 t<sub>r</sub>에서 수행한다. 경보의 발생시간을 이용한 추론규칙은 아래의 표 3과 같다.

표 3. 추론규칙  
Table 3. Inference rules.

규칙번호	규칙 내용
규칙 1	IF 선택경보에 대해 다중경보중 t <sub>0</sub> ≤ t < t <sub>n</sub> 내에 선행경보가 존재하면 THEN 선택경보 제거
규칙 2	IF 선택경보가 기기의 트립에 관계된 경보이면 THEN 선택경보 선택
규칙 3	IF 선택경보가 다중경보중에서 발전소의 연동에 관련된 경보이면 THEN 선택경보 제거

규칙 1에서는 다중경보의 발생시 선행경보와 후행경보의 관계에서 원인경보를 추론하는 규칙으로 선택된 경보가 발생한 이전 시간에 발생한 경보들 중에서 선택경보의 선행경보가 있으면 선택경보를 원인경보에서

제거한다. 규칙 2는 발전소의 각 계통들의 기기들의 트립을 알리는 경보들에 대해서는 이의 조치를 위하여 운전원에게 기기의 트립상태를 보여주기 위한 규칙이다. 규칙 3에서는 발전소의 유니트(UNIT) 정시시 연동동작에 의해 발생하는 경보들을 제거하기 위한 규칙이다. 그림 5는 표 3에서의 추론규칙을 순차탐색(Sequential Search) 알고리즘에 적용하여 원인경보를 추론하는 과정을 나타낸 흐름도이다.

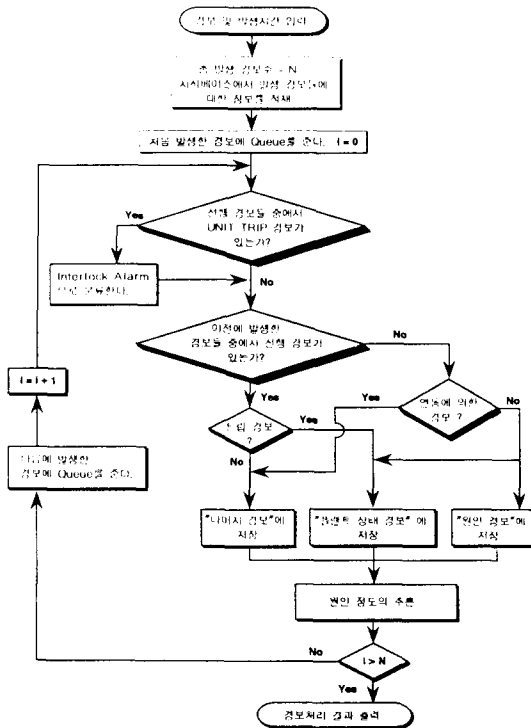


그림 5. 원인경보의 추론과정 흐름도  
Fig. 5. Flow chart of inference procedure for cause alarm.

2) 원인정도의 추론

발생원인들이 그 경보를 일으켰을 가능성의 정도(Cause Degree)를 추론하는 과정이다. 발생한 경보 및 발생시간을 고려하여 원인정도의 값을 상황에 따라 동적으로 변화시키고 이 값에 따라 경보에 대한 조치 순서를 결정하고자 한다. 일반적으로 여러개의 고장이 동시에 일어날 가능성은 고장의 개수가 많을수록 작아지며 선행경보는 후행경보를 발생시킬 수 있는 가능성이 높은 발생원인으로 볼 수 있다. 본 논문에서는 이런 관점에서 발생한 다중경보들 중에서 선택한 경보에 대

해서 선행경보가 발생했으면 이 선행경보에 대한 원인정도(Alarm Cause Degree,  $ad_i$ )를 높이고, 상대적으로 나머지 원인들에 대한 원인정도를 낮춘다. 또한 발생하지 않은 선행경보에 대해서는 원인정도를 낮추고 상대적으로 나머지 원인들에 대한 가능성의 정도를 높여준다. 여기서 가중치  $w_1$ 과  $w_2$ 를 두어서 선행경보가 선택경보 이전에 발생했다면  $w_1(\geq 1)$ 을, 이후에 발생했다면  $w_2(\geq 1)$ 의 가중치로 원인정도의 계산을 한다. 일반적인 경우에 대한 원인정도의 계산과정을 아래에서 보인다. 선행경보들에 대한 원인정도를  $ad_i$ 로 나타내고, 고장원인들에 대한 원인정도를  $cd_i$ 로 나타낸다. 발생한 모든 경보들을 시간순으로 선택하여 원인정도의 계산을 함으로 선택경보에 있어서 후행경보들의 영향은 고려하지 않는다. 그림 6에서는 원인정도의 계산에 대한 고장원인들과 경보들의 연결된 상황을 나타낸다.

원인정도의 계산 : 선택경보( $A_s$ )에 대한  $n$ 개의 선행경보중  $k$ 개가  $A_s$ 의 발생시간( $t_s$ ) 이전에 발생하였고( $t_0 \leq t < t_s$ ), 1개의 선행경보가  $t_s$ 이후에 발생하였고( $t_s < t \leq t_f$ ),  $m$ 개의 선행경보가 발생하지 않았다( $t_0 \leq t \leq t_f$ ).  $n$ 개의 선행경보 외에  $r$ 개의 고장원인들이 존재한다

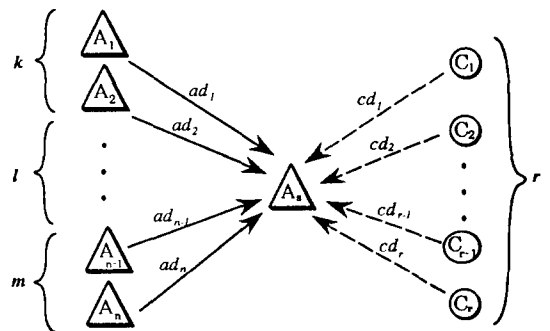


그림 6. 원인정도 계산에 대한 일반적인 경보트리  
Fig. 6. General cause-consequence trees for the calculation of cause degree.

(i) 선택경보 이전에 발생한  $k$ 개의 선행경보에 대한 원인정도( $ad_i$ )의 가중치 계산

$$\begin{aligned}
 W_{ON, before} &= w_1 \left( \frac{1}{w_1^{k-1}} \right) \left( \frac{1}{w_2} \right) w_1^m \\
 &= \frac{w_1^{m-k+2}}{w_2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

선택경보가 발생하기 이전에 발생한 하나의 선행경보에 있어서의 원인정도( $ad_i$ )에 대한 전체 가중치는 자기자신이 발생되었으므로 초기값에  $w_1$ 을 곱하고, 나머지( $k-1$ )개의 발생된 선행경보에 대한 영향을 고려하여  $w_1^{k-1}$ 만큼을 나누어 준다. 선택경보 이후에 발생한 선행경보 1개에 대한 영향을 고려하여  $w_2$ 로 나누어 주고 발생하지 않은 선행경보들의 영향을 고려하여  $w_1^m$ 을 곱한다. 아래의 (2)에서 (4)까지의 과정도 이와 같은 방법으로 계산한다.

(ii) 선택경보 이후에 발생한 1개의 선행경보에 대한 원인정도( $ad_i$ )의 가중치 계산

$$W_{ON, after} = w_2 \left( \frac{1}{w_2} \right)^{l-1} \left( \frac{1}{w_1} \right)^m w_1^m \quad (2)$$

$$= \frac{w_1^{m-k}}{w_2^{l-2}}$$

(iii) m개의 발생하지 않은 선행경보에 대한 원인정도( $ad_i$ )의 가중치 계산

$$W_{OFF} = \frac{1}{w_1} (w_1^{m-1}) \left( \frac{1}{w_1} \right)^k w_2^l \quad (3)$$

$$= \frac{w_1^{m-k-2}}{w_2^{l-1}}$$

(iv) r개의 고장원인들에 대한 원인정도( $cd_i$ )의 가중치 계산

$$W_C = \left( \frac{1}{w_1} \right)^k \left( \frac{1}{w_2} \right)^l w_1^m \quad (4)$$

$$= \frac{w_1^{m-k}}{w_2^l}$$

(v) 정규화(Normalization)

(i)에서 (iv)까지의 과정에서 구한 가중치를 초기에 Saaty의 방법으로 정해진 원인 정도의 값에 곱해서 모두 더한 원인정도의 총합은

$$P_{total} = \sum^k ad_{on, before} W_{ON, before} + \sum^l ad_{on, after} W_{ON, after} \quad (5)$$

$$+ \sum^m ad_{off} W_{OFF} + \sum^r cd_c W_C$$

와 같이 된다. 따라서 각 경보에 있어서 원인정도( $ad_i$ )와 고장 원인들에 대한 원인정도( $cd_i$ )는 아래와 같이 계산된다.

$$ad_{i, normal} = \frac{ad_i}{P_{total}} \quad , 1 \leq i \leq n \quad (6)$$

$$cd_{i, normal} = \frac{cd_i}{P_{total}} \quad , 1 \leq i \leq r \quad (7)$$

여기서  $l=0$ 은 선택경보가 발생한 이후시간에 발생한 선행경보는 없음을 의미한다.  $w_1 = w_2$ 의 상태는 선택경보의 선행경보들에 대한 발생시간을 고려하지 않고 처리하는 것과 같다. 실제로 운전원들의 경보처리 상황을 볼 때  $w_1$ 의 값을  $w_2$ 보다 크게 주어 조작순서를 결정하는 것이 타당하다. 경보처리의 전체적인 과정은 그림 7과 같다. 사용자 접속부를 그림 8에서와 같이 구성을 하였다.

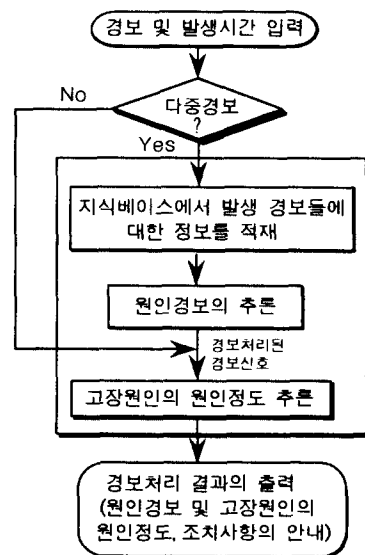


그림 7. 전체적인 경보처리 과정  
Fig. 7. Block Diagram of alarm processing.

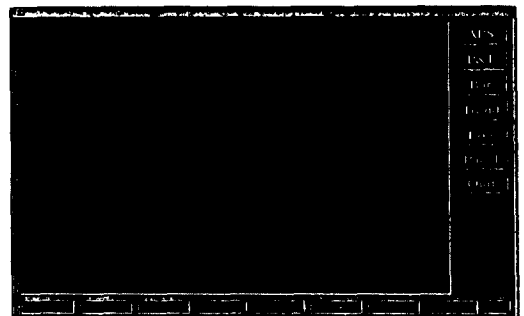


그림 8. 사용자 접속화면  
Fig. 8. User interface screen.

IV. 모의실험

1. 모의실험 환경

모의실험을 위한 환경은 그림 9와 같이 APS (Alarm Processing System) 개발 호스트로서 워크스테이션을 이용하였고 공정제어를 위해 핵심이 되는 프로세서 모듈로는 모듈 자체에 네트워크를 위한 이더넷 (Ethernet) 포트를 내장하고 있으며 CPU30을 사용한다. 대상 플랜트인 서울화력 4호기 발전소의 시스템을 디지털로 구현한 시뮬레이터는 CPU33에서 수행한다. CPU30과 CPU33은 VME BUS에 접속되어서 전체적으로 SUN 시스템이 네트워크를 통해 정보를 주고 받게 된다. 실시간 운영체제인 VxWorks를 구축하여 CPU30과 CPU33이 부팅시에 VxWorks 관련 화일을 LAN(Local Area Network)을 통해 RAM에 상주시켜서 프로세서 모듈에서 실시간 목적을 위해 이용한다 [10] [11]

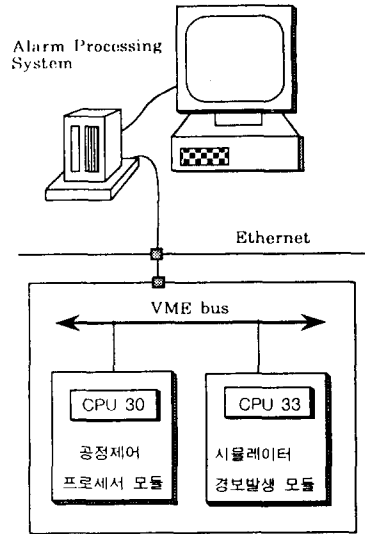
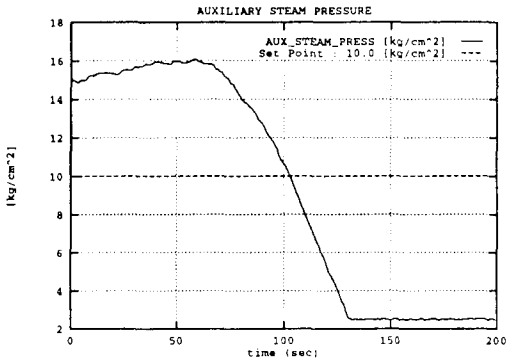
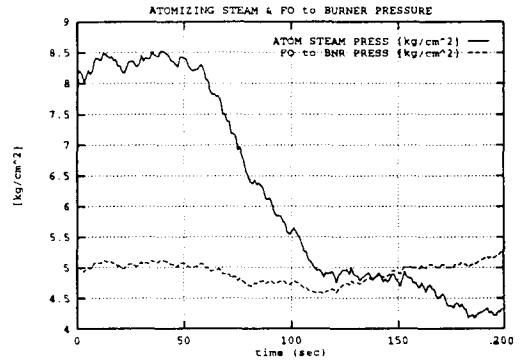


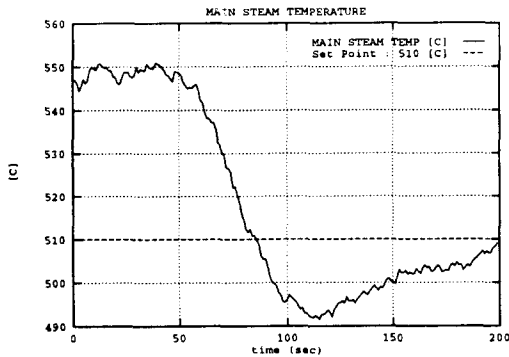
그림 9. 모의실험 환경  
Fig. 9. Configuration of experiment system.



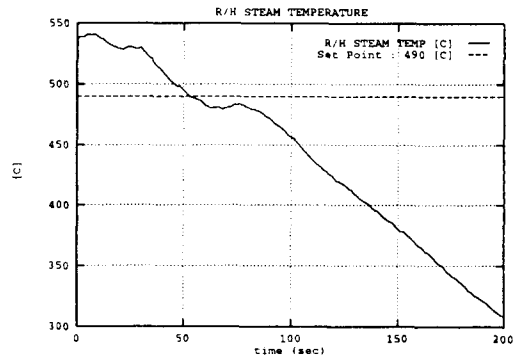
(a) Auxiliary steam pressure



(b) Atomizing steam/fuel oil pressure



(c) Main steam temperature



(d) Reheater steam temperature

그림 10. 보조증기 및 연료계통의 발전소 상태값  
Fig. 10. Plant states in the auxiliary steam and oil system.



2. 기존의 경보처리 결과와의 비교 분석

여기서는 기존의 경보의 발생순서를 고려하지 않고 선행경보와 후행경보의 관계에서 필터링(Filtering)의 방법으로 원인경보를 추론한 경보처리 방법<sup>12) 16)</sup>과 경보의 시간적 순서를 고려하여 처리한 제안한 방법에서의 결과를 보이고 비교한다. Case I에서는 경보트리의 발생순서와 다른 순서로 발생한 경우에 대한 결과를 보이고, Case II에서는 운전원들의 경험적 지식이 상충하여 나타나거나 실제 경보들의 설치상태에 의해 나타나는 경보망(Alarm Network) 구조에 대한 처리 결과를 보인다. Case III에서는 서울화력 4호기의 일시정지시(Unit Trip) 발생한 경보들에 대한 처리를 보인다.

Case I. 경보트리의 순서를 달리한 다중경보의 발생시

여기서는 경보트리에서의 순서와 다르게 발생한 경보들에 대하여 처리결과를 비교한다. 그리고 제안하는 방법에서의  $w_1, w_2$  값의 변화에 따른 조치순서에 미치는 영향에 대해 고려한다. 대상은 서울화력 4호기 발전소의 보조증기 및 연료계통의 경보들이다. 그림 10에서는 보조증기 계통의 발전소의 상태값들을 나타내었다. 여기에서 보면 어떤 원인에 의해 보조증기의 압력이 감소하고 주증기와 재열증기의 온도가 변하고 있음을 보여준다. 이때 발생한 경보들을 그림 11에서 나타내었다.

Fired Time	Alarm Name
62.000	RH_Stm_Temp_High_Low
83.500	Atom_Steam_Press_Low
103.250	Aux_Steam_Press_Low
104.750	FO_Atom_Stm_Diff_Press_Low
105.000	Main_Stm_Temp_High_Low
114.000	FO_to_Bnr_Temp_Low
155.000	MFT_Trip

그림 11. 발생한 다중경보  
Fig. 11. Fired multiple alarms.

(1) 원인경보의 추론

기존의 방법으로 처리한 결과를 보면 보조증기의 압력이 낮아져서(Aux\_Steam\_Press\_Low) 다른 여러 경보들이 발생했음을 보여준다(그림 12.a). 제안하는 방법에 의한 처리 결과(그림 12.b)는 재열기의 온도에 관련된 부분(RH\_Steam\_Temp\_High\_Low)과 연료를

분사하는 증기계통(Atom\_Steam\_Press\_Low)에서 어떤 고장이 있음을 나타내고, 기존의 방법에서 나타났듯이 보조증기의 압력이 낮아진 것에 대한 고장원인(Aux\_Steam\_Press\_Low)도 있음을 보여준다.

Time	Cause Alarm
103.25	Aux_Stm_Press_Low

(a) 기존의 방법

Time	Cause Alarm
62.00	RH_Stm_Temp_High_Low
83.50	Atom_Steam_Press_Low
103.25	Aux_Steam_Press_Low

(b) 제안한 방법

그림 12. 원인경보의 추론 ( $w_1=10, w_2=3$ )

Fig. 12. Inference result of cause alarm.

(2) 원인정도의 추론

추론된 원인경보들에 대한 고장원인들의 원인정도를 그림 13에 나타내고  $w_1$ 과  $w_2$ 의 값의 변화에 따른 고장원인들의 원인정도값의 변화로 조치순서가 달라질 수 있음을 나타낸다.

Cause Alarm	RH_Stm_Temp_High_Low (409)
priority	30
precedent	Air_Flow_Low (0.000) Flue_Gas_O2_High_Low (0.000) Atom_Steam_Press_Low (0.286)
causes	TCV_147 Abnormal (0.476) SH_RH Damper Abnormal (0.238)
fired time	62.000

Cause Alarm	Atom_Steam_Press_Low (801)
priority	50
precedent	Aux_Steam_Press_Low (0.500)
causes	PCV_245 Abnormal (0.500)
fired time	83.500

Alarm Name	Aux_Steam_Press_Low (800)
priority	30
causes	PCV_256 Abnormal (1.000)
fired time	103.250

그림 13. 원인정도의 추론 ( $w_1=10, w_2=3$ )

Fig. 13. Inference result of cause degree.

Case II. 경보망(Alarm Network) 구조의 다중경보 발생시 아래의 그림 14는 서울화력 4호기의 공기계통의 경보들에 대한 원인-결과 트리의 일부이다. 압입통풍기 2대가 트립되면 이에 따른 경보(FDF\_Trip)가 발생하고 유인통풍기를 트립시킨다(IDF\_Trip). 마찬가지로 유인통풍기 2대가 트립되면 압입통풍기가 트립이 되는 경보망구조를 형성한다. 이러한 경보들이 발생했을 경우의 처리 결과를 그림 15에서 보인다.

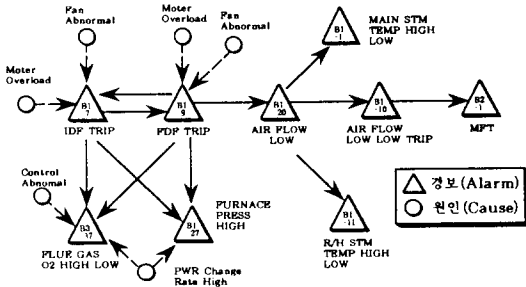


그림 14. 서울화력 4호기 공기계통의 경보들에 대한 원인-결과 트리 예  
Fig. 14. Cause-consequence alarm trees of air system in Seoul power plant unit 4.

(1) 원인경보의 추론

기존의 방법으로는 원인경보를 찾지 못하지만(그림 15.a) 발생시간을 고려한 제안하는 방법에서는 그림 15.(b)에서 처럼 원인경보가 압입통풍기의 트립(FDF\_Trip)임을 알려준다.

Fired Time	Alarm Name

(a) 기존의 방법

Fired Time	Cause Alarm
66.75	FDF_Trip

(b) 제안한 방법

그림 15. 원인경보의 추론  
Fig. 15. Inference result of cause alarm.

(2) 원인정도의 추론

그림 16은 제안한 방법으로 추론한 원인경보에 대한 고장원인의 추론결과를 나타낸다.

Cause Alarm	FDF_Trip (402)
priority	70
precedent causes	IDF_Trip (0.048) Motor_Overload (0.529) Fan_Trouble (0.265) Bearing_Trouble (0.159)
fired time	66.75

그림 16. 원인정도의 추론  
Fig. 16. Inference result of cause degree.

CASE III. 발전소의 일시정지(트립)시 발생한 다중경보의 경우

그림 17은 서울 화력발전소 4호기의 일시정지시 발생한 경보들의 한 예이다. 이러한 경보들에 대한 원인경보의 추론결과를 그림 18에서 나타낸다.

Fired Time	Alarm Name
100.380	IDF_Trip
107.141	FDF_Trip
111.381	Flue_Gas_O2_High_Low
123.510	Air_Flow_Low
133.230	Main_Stm_Temp_High_Low
134.590	RH_Stm_Temp_High_Low
136.397	FO_to_Bnr_Press_Low_Trip
145.348	Atom_Steam_Press_Low
147.500	Air_Flow_Low_Low_Trip
151.500	MFT_Trip
151.506	UNIT_Trip
151.516	GIF_Trip
151.520	Drum_Level_High
151.533	TBN_Trip
151.545	GEN_Trip
151.556	FO_Pump_Disch_Press_Low
151.576	IAC_Trip
160.015	Furnace_Press_High

그림 17. 서울 화력발전소 4호기의 일시정지시 발생한 경보들  
Fig. 17. Multiple alarms in Seoul power plant unit 4 trip.

(1) 원인경보의 추론

기존의 방법으로 처리한 결과는 "Atom\_Steam\_Press\_Low"가 원인이 되어 일시 정지가 되었음을 나타낸다(그림 18.a). 제안한 방법으로 추론한 원인경보는 "IDF\_Trip"과 "FO\_to\_Bnr\_Press\_Low\_Trip" 및 "Atom\_Steam\_Press\_Low"임을 보인다(그림 18.b).

Time	Cause Alarm
145.348	Atom_Steam_Press_Low

(a) 기존의 방법

Time	Cause Alarm
100.380	IDF_Trip
136.397	FO_to_Bnr_Press_Low_Trip
145.348	Atom_Steam_Press_Low

(b) 제안한 방법

그림 18. 원인경보의 추론

Fig. 18. Inference result of cause alarm.

### V. 결론 및 추후 연구 과제

본 논문에서는 다중경보의 발생시 경보들 사이의 원인-결과 트리 및 발생시간을 이용하여 원인경보를 추론하는 방법을 제안하였고, 발생한 경보들에 관한 정보로 조치순서를 결정하는 원인정도의 추론방법에 관하여 연구하였다. 그리고 서울화력 4호기 발전소의 경보들에 대하여 운전전문가들의 경험적 지식과 플랜트의 계통분석을 통한 지식베이스를 구축하고 모의실험을 통해 기존의 방법과 제안하는 방법으로 처리한 경보처리의 결과를 비교 검증하였다. 경보트리를 구성하기 어려운 경우의 처리나 센서의 고장(Sensor Failure), 판넬의 고장에 대한 처리 방법과 Temporal reasoning 및 고장진단에 대한 연구가 계속되어야 하겠다.

### 참 고 문 헌

[1] S.W. Cheon, S.H. Chang and H.Y. Chung, "Development Strategies of Expert System for Multiple Alarm Processing and Diagnosis in Nuclear Power Plants", *IEEE Transactions of Nuclear Science*, vol. 40, no.1, February, 1993.

[2] "원자력 발전소 1차 계통 고장진단 시스템 구축을 위한 연구(1)", 최종보고서, 한국 전력 공사, 1990. 8

[3] L.R. Lupton, P.A. Lapointe and K.Q. Gue, "Survey of International Developments in Alarm Processing and Presentation Techniques", 1990

[4] Harold E. Dijk, N.V. KEMA, "AI-Based

Techniques for Alarm Handling", *Third Symposium on Expert Systems Application to Power Systems*, April, 1991.

[5] S. W. Cheon, S. H. Chang, "Application of Neural Networks to Multiple Alarm Processing and Diagnosis in Nuclear Power Plants", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 40, no. 1, Feb. 1993.

[6] P. Domenico, "Alarm Processing System", Conference on Expert Systems Application for the Electric Power Industry, EPRI Report, June, 1989, Orlando, FL

[7] "서울화력 기본 운전 지침서(4호기)", 한국 전력 공사, 1989

[8] W. Pedrycz, "Fuzzy Control and Fuzzy Systems", RSP, 1989.

[9] 박 민용, 최 항식, "퍼지 시스템의 응용 입문", 대영사, 1990

[10] "발전소 제어용 디지털 계장 제어시스템 개발", 한전기술연구원, 최종보고서, 1990. 8.

[11] 변 승현, "화력발전소 드럼형 보일러 시스템의 고장진단을 위한 퍼지 전문가시스템의 개발", 한국과학기술원, 석사학위 논문, 1994

[12] Tharam S. Dillon, Michael A. Laughton, "Expert System Applications in Power Systems", Prentice Hall, 1990

[13] D.A Waterman, "A Guide to Expert Systems", Addison Wesley, 1986

[14] "서울화력 4호기 시퀀스 해설서", 서울화력, 1984

[15] S. Padalkar, G. Karsai, C. Biegl and J. Sztipanovits, "Real-Time Fault Diagnostics", *IEEE Expert*, vol. 6, no. 3, pp. 75-85, 1991

[16] J. O. Yang and S. H. Chang, "An Alarm Processing System for a Nuclear Power Plant Using Artificial Intelligence Techniques", *Nuclear Technology*, vol. 95, pp.266-270, Sep. 1991.

## — 저 자 소 개 —



## 申承哲(準會員)

1971年 11月 7日生. 1992年 2月 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사). 1995年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1995年 3月 ~ 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심 분야는 고장진단 및 카오스 이론 및 제어 등임.

## 李在燦(正會員)

1963年 2月 12日生. 1986年 2月 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업(공학사). 1988年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1994年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1994年 3月 ~ 1995年 2月 한국과학기술원 연수연구원. 1995年 3月 ~ 현재 한국외국어대학교 전임강사

## 朴世華(正會員)

1965年 7月 23日生. 1988年 2月 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1990年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사). 1995年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1995年 3月 ~ 현재 생산기술연구원 선임연구원. 주관심 분야는 내고장성 및 신뢰성 제어시스템 설계 및 고장진단 등임.

## 卞增男(正會員) 第27卷 第1號 參照

현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수