

원자력발전소 일차압력경계내의 금속파편 검출을 위한 계측 및 진단계통의 구성

김성호, 신재활**, 문권기**, 장우현*, 한상준*

(Monitoring System for the Loose Parts Within the Primary
Pressure Boundary of a Nuclear Power Plant)

(Sung Ho Kim, Jae Hwal Shin, Kwon Ki Moon, Woo Hyun Jang, Sang Joon Han)

1. 서론

원자력발전소 일차냉각재계통의 압력경계내부에 금속파편이 존재할 경우, 이들은 냉각재와 함께 이동하면서 다른 내부구조물과 충돌하여 손상을 입히거나 냉각재유로를 차단하여 발전소의 안전성을 저해하는 요인이 된다. 따라서 금속파편이 존재할 때 이를 조기에 감지하여 운전원 또는 관련기술자에게 그 크기와 위치, 그리고 충격에너지 등 관련 정보를 제공하여 줌으로써 해당 금속파편에 의한 영향을 평가하고 조기제거 여부를 결정할 수 있게 해야 한다. 이를 위해 미국 원자력 규제위원회에서는 원자로냉각재계통에 금속파편감시계통을 설치하여 금속파편에 의한 충격신호 발생시 제어실에서 이를 감지하고 신호를 분석하여 진단정보를 제공하는 계통을 구성하도록 규정하고 있다.¹⁾ 이에 따라 구성되는 금속파편감시계통의 감시위치 및 기본적인 계통도는 그림 1, 표 1 그리고 그림 2와 같다.

감지기(압전형 가속도계)에서 수집된 신호는 진치증폭기에서 증폭되어 경보기로 보내어지며, 경보기에서 기본적인 경보계산후 분석처리에 알맞는 형태로 바뀌어 과도사건기록계와 분석컴퓨터로 보내어진다.

이 중, 경보기, 과도사건기록계 및 분석컴퓨터에서 수행되는 경보 및 분석기능은

o 실시간으로 연속해서 이루어 지는 실시간 기능(Conti-

* 정희원, 한국원자력연구소 계측계통설계실

** 한국원자력연구소 계측계통설계실

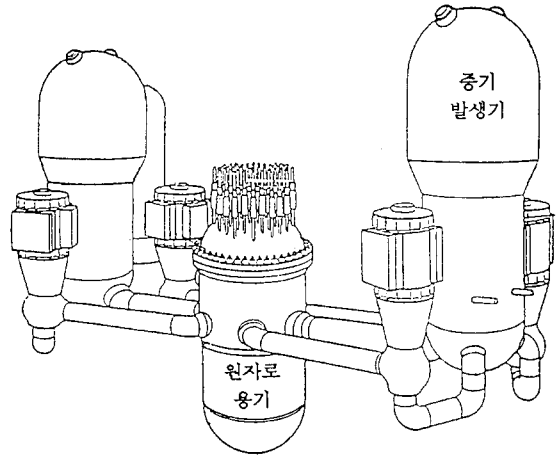


그림 1: 원자로냉각재계통

표 1: 금속파편감시위치와 감지기의 수

| 부품명 | 감시위치 | 감지기수 |
|----------------|-------------------------|------|
| 원자로용기 | 상부덮개 CEDM관 주위 | 2 |
| " | 하부덮개 ICI관 주위 | 2 |
| 중기발생기 1 & 2 | 2차측 Manway 사이 | 2 |
| " | 2차측 Economizer 급수관 위 | 2 |
| " | 1차측 Hot Leg관 주위 | 2 |
| " | 1차측 Cold Leg 사이의 Manway | 2 |

uous Real-Time Function)과

- 사용자(운전원 또는 관련기술자)의 요구에 의해 필요시 이루어 지는 사용자 요구기능(On-Demand Function)으로 나뉜다.

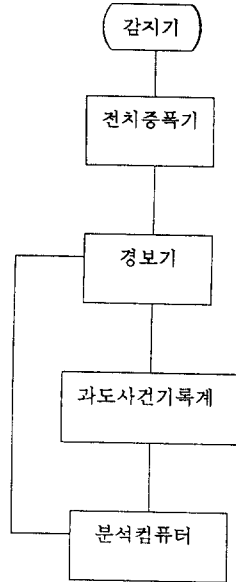


그림 2: 금속파면감시계통

2. 실시간 기능 (Real Time Function)

실시간 기능은 감지기가 설치된 각 채널에서 연속적으로 신호를 수집하여 사용자와의 연계없이 경보기(Alarm Module Unit: AMU), 과도사건기록계(Transient Event Recorder: TER), 분석컴퓨터(Analysis Computer: AC)에서 신호처리, 경보계산, 경보판별 및 표시, 그리고 자료의 저장 등을 수행한다.

실시간 기능의 흐름도는 그림 3과 같다.

2.1 경보기 (Alarm Module Unit: AMU)

경보기에서는 충격신호를 감지하여 실효치로 환산한 후 이를 경보설정치와 비교한다. 충격신호준위가 경보설정치를 넘어서면, 과도사건기록계가 1단계 판별기능(Tier 1 Discrimination)을 수행하도록 신호를 보낸다.

과도사건기록계와 분석컴퓨터에 의해 실제 금속파면에 의한 신호로 평가되면, 사용자에게 경보를 보내고 발전소컴

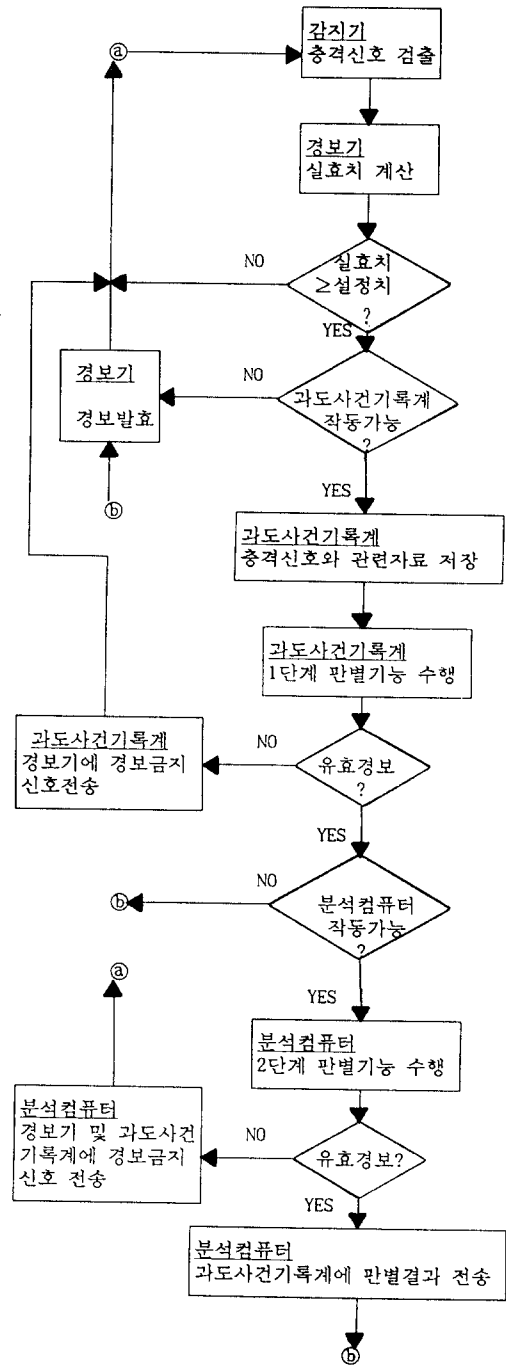


그림 3: 금속파면검출을 위한 실시간기능 흐름도

퓨터에 금속파면 검출사실을 통보한다.

경보기는 다음과 같이 디지털신호처리기(AMU Digital Signal Processor: AMU DSP)와 중앙처리장치(AMU Central Processor Unit: AMU CPU)로 구성과 역할이 나뉜다.

2.1.1 경보기 디지털신호처리기 (AMU DSP)

각 채널별로 하나씩의 신호처리기를 가지며, 다음의 기능을 실시간으로 수행한다.

- 저역 및 고역통과 여파 (High- and Low-Pass Filtering)
- 장기 및 단기실효치 계산 (Long- and Short-Term RMS Calculation)
- 신호의 실효치와 경보설정치 비교 (RMS vs. Setpoint Comparison)
- AMU CPU 및 과도사건기록계로 경보신호 전송 (Event Interrupt)
- AMU CPU의 요구시 현재의 실효치준위 전송

2.1.2 경보기 중앙처리장치 (AMU CPU)

AMU CPU에는 경보기 운영체제(Operating System)와 응용소프트웨어(Compiled Application Software)가 상주하며 다음과 같은 기능을 실시간으로 수행한다.

- 경보제어 (Alarm Control)
과도사건기록계나 분석컴퓨터에 의해 경보가 지시되면 경보계전기(Alarm Relay)를 연결시켜 경보를 발생시키고 변수표시판을 수정한다.
- 신호제어 (Event Management)
DSP가 경보설정치를 넘어서는 신호를 감지하는 시간간격을 제어한다 (보통 50 msec간격). 이 때 최초의 신호접수 시각을 Burst의 시작으로 정의하며, 추가 Burst없이 정해진 시간(Quiet Time-Event Interrupt)가 없는 시간으로 대개 4초)이 지나면 Burst의 끝으로 규정한다.
- TER응답상태의 결정
TER에 충격신호 검출사실을 통보한 후 판별시간을 측정한다. 정해진 판별시간 (대개 1분)이 지나도록 TER이 신호처리를 끝내지 않으면 AMU CPU는 해당신호를 금속파편에 의한 충격신호로 판단하고 경보출력(Alarm Output)을 동작시킨다.
- 자료의 표시 (Local Display)
DSP로부터 입수한 자료를 표시판을 통해 표시하며, 0.5초 간격으로 수정한다. 이 때 표시되는 자료는 피이크준위와 채널의 상태(정상, 경보, 우회, 제어봉이동 경보금지) 및 Event횟수 등이다.

- Event 및 경보기록 (Event and Alarm Log)

Event Interrupt시 특성자료 (순간, 장기 및 단기 피이크, 경보설정치 위반형태)를 기록한다. 이 자료들은 자료표시판(Display Screen)을 통해 표시된다.

경보가 출력되면 경보기록처(Alarm Log)에 관련정보를 기록한다.

- 제어봉이동 경보금지신호의 처리

제어봉이동으로 인한 경보금지신호가 입력되면 이를 과도사건기록계와 분석컴퓨터로 통보한다.

2.2 과도사건기록계 (Transient Event Recorder: TER)

경보기에서 경보설정치를 넘어서는 충격신호를 검출하면 모든 채널의 신호를 대상으로

- 그 때의 신호자료를 수집하여 저장하고,
- 파형판별을 위한 1단계 판별기능(Tier 1 Discrimination)을 수행하며,
- 금속파편에 의한 충격신호로 판별되면 분석컴퓨터에게 2단계 판별기능(Tier 2 Discrimination)을 수행하도록 신호를 보낸다.

2.2.1 1단계 판별기능 (Tier 1 Discrimination)

충격신호가 감지된 채널의 번호와 파형시작시간을 기록하고, 다음의 값들을 계산하여 설정치와 비교한다.

- 실효치비 (RMS Ratio)
- 주파수 (Ringing Frequency)
- 신호지속시간 (Impact Duration)
- 채널간 신호지연시간 (Inter-Channel Delays)
- 신호수집지역 (Collection Zones)
- 진폭비 (Amplitude Ratio)

2.2.2 판별지수계산 및 최종판단

설정치와의 비교후 각 판별변수에 대한 판별지수를 계산하고 이를 합산하여 금속파편평가를 위한 최종판단에 사용한다. 판단결과 금속파편신호로 평가되면 분석컴퓨터에 2단계 판별기능(Tier 2 Discrimination)을 수행하도록 한다.

만일 분석컴퓨터가 작동불능일 경우 경보기에 금속파편 검출사실을 통보한다. 금속파편이 아닌 것으로 판명되면 경보기에 경보금지신호를 보내고 신호수집기능을 재개한다.

1단계 판별과정은 그림 4에 나타나 있다.

3.2 분석컴퓨터

사용자와의 연계를 통해 다음과 같은 기능을 수행한다.

○ 경보기 기능점검

- 경보기를 거친 여파자료와 거치지 않은 비여파자료를 일부 선택하여 비교 분석함으로써 경보기의 기능을 점검한다.

○ 배경신호준위 점검

- 배경잡음이 계속 변화하므로 주기적으로 이를 점검하여 금속파면에 의한 충격신호를 정확하게 판별해 낼 수 있도록 한다.

○ 비충격신호 스펙트럼분석

- 감지기에서 수집되는 신호를 분석하여 감지기의 설치상태나 주변회전기기의 상태 등을 파악함으로써 발전소의 상태를 평가할 수 있다.

○ 충격신호 기록 및 검색

- 감지기로부터의 신호와 계통변수
- 경보기 기능점검내용 및 감지기 비충격신호
- 스펙트럼분석 결과
- 배경신호준위 평가내용
- 충격신호평가와 관련된 운전원의 참고사항 등을 저장한다.

○ 충격신호 판별자료철 검색

- 발전소의 기동전에 인위적인 충격신호를 발생시켜 충격신호의 판별을 위한 자료철을 만든다. 이 자료철은 알려진 충격신호에 관한 실제 파형정보형태를 위치의 함수로 저장함으로써, 발전소 운전중 발생하는 위치 미확인 충격신호의 위치와 신호의 도달순서 및 신호크기비에 관하여 정확하게 알아 내는데 사용될 수 있다. 또한 운전중에 발생한 금속파면신호도 이 자료철에 수록하여 판별자료로 이용할 수 있다.

4. 맺음말

미국 Nuclear Regulatory Commission(NRC)의 Regulatory Guide 1.133에서는, 원자로냉각재계통내의 이물질자연수집지역(Natural Collection Region)에 2개씩의 감지기를 설치하고, 각 감지기로부터 3 피이트 이내에서 질량 0.25 파운드 내지 30 파운드, 운동에너지 0.5 피이트-파운드 이상의 금속파면에 의한 충격신호가 발생하였을 때 이를 감지하여 운전원에게 시청각적 경보를 제공하도록 요구하고 있다.

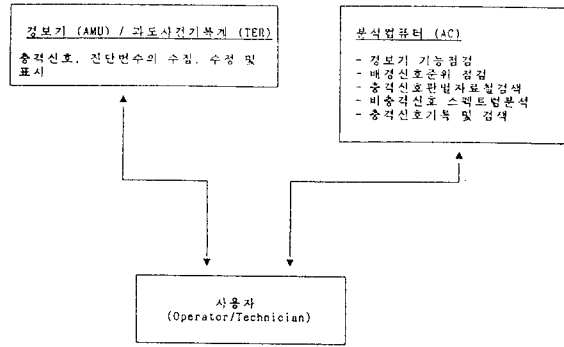


그림 6: 사용자요구기능도

이에 따라 이상에서 살펴 본 것과 같이 구성된 금속파면감시계통은 국내에서 건설중인 가압경수형 원자력 발전소에 적용되었으며, 기존의 국내 원전에 설치된 동일목적의 계통과

○ 디지털형태의 신호처리기법을 적용하고,
○ 컴퓨터를 이용한 1단계 및 2단계의 판별기능이 추가되며,
○ 각 판별단계에서 사용된 판별변수가 다양하고,
○ 실제 금속파면에 의한 충격신호를 수집하여 이를 근거로 작성된 기본자료를 설정치로 사용하므로 오경보의 발생을 최소화하여 계통의 신뢰도가 크게 높아진 점이 다르다. 따라서 기존의 국내 원전에 설치된 아날로그 형태의 금속파면감시계통도 이상에서 기술한 개념을 도입하여 보완한다면 그 효용성이 증대될 것으로 생각한다.

참고문헌

1) U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.133, Revision 1, "Loose Parts Detection Program for the Primary System of Light-Water-Cooled Reactors", May 1981.