creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

**저작자표시**. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

**비영리**. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

**변경금지**. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000334479

2020년 08월
석사학위 논문

# LPMS 센서 및 프리앰프 진단기술에 대한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 병 수

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# LPMS 센서 및 프리앰프 진단기술에 대한 연구

A Study on Sensor & Pre-Amp Diagnostic Technology in LPMS

2020년 8월 28일

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 병 수

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# LPMS 센서 및 프리앰프 진단기술에 대한 연구

지도교수 나 만 균

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 5월

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 병 수

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 박병수의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 김 종 현 (인)

위 원 조선대학교 교 수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교 수 이 경 진 (인)

2020년 6월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 목 차

ABSTRACT ····· vi
제 1 장 서 론 ····· 1
제 2 장 한빛 1,2호기 금속파편감시계통 ····· 2
제 1 절 개요 ····· 2
1. 기능 ····· 2
2. 구성 및 주요기기 ····· 7
3. 금속충격 신호 분석 ····· 13
제 3 장 LPMS 경보 발생 현황 ····· 21
1. 개요 ····· 21
2. 발생 현황 ····· 21
3. 분석 결과 ····· 21
제 4 장 프리앰프 및 센서 진단기술 ····· 22
제 1 절 프리앰프 및 센서진단 ····· 22
1. 모의충격신호의 형태에 따른 진단 ····· 22
2. 배경잡음의 형태에 따른 진단(Ⅰ) ····· 23
3. 배경잡음의 형태에 따른 진단(Ⅱ) ····· 23
4. 배경잡음의 크기에 따른 진단 ····· 24
5. Frequency Domain을 이용한 진단 ····· 25
6. 배경잡음의 주파수 응답특성을 이용한 진단 ····· 25
7. 질량지표 FC(Frequency Center)를 이용한 진단 ····· 27
제 5 장 결 론 ····· 28
【참고문헌】 ····· 30

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 표 목 차

표 1. LPMS 센서 채널 구성 ····· 7
표 2. 경보 발생 목록 ····· 21

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 그림 목차

그림 1. Plate 파형 ····· 4
그림 2. Bending Wave Phase Velocity ····· 5
그림 3. Bending Wave Group Velocity ····· 5
그림 4. Total Wave Attenuation for 2 KHz ····· 6
그림 5. Total Wave Attenuation for 10 KHz ····· 6
그림 6. Structural Branch Point ····· 6
그림 7. Transmission Through Right-Angle Connection ····· 6
그림 8. Right-Angle Transmission Through "T" Branch Point ····· 6
그림 9. Transmission Past "T" Branch Point ····· 6
그림 10. 가속도계 설치위치 개략도 ····· 7
그림 11. LPMS 계략도 ····· 8
그림 12. LPMS 신호처리 ····· 8
그림 13. DPU 기능 블록 선도 ····· 9
그림 14. Floating Setpoint 방식에 의한 Event 검출 ····· 10
그림 15. Event 검출 신호 ····· 11
그림 16. 쌍곡선 교차점을 이용하는 삼각법 ····· 14
그림 17. Flow Pattern and Loose Part Trajectories in S/G Inlet Chamber ····· 15
그림 18. 고리#3 750채널에서의 배경 잡음과 충격 신호 ····· 17
그림 19. 질량 지표 fc의 계산 ····· 18
그림 20. 다양한 충격 질량에 대한 질량지표 $f_c$ ····· 18
그림 21. 특정 주파수 성분을 이용한 질량평가 ····· 19
그림 22. A lookup chart for mass estimation ····· 20
그림 23. 중심주파수/가속도특성 ····· 20
그림 24. 정상센서 모의충격신호 파형 ····· 22
그림 25. 성능저하 센서 모의충격신호 파형 ····· 22
그림 26. 센서 절연저하 파형 ····· 23
그림 27. 프리앰프 성능저하 파형 ····· 23
그림 28. 정상센서 배경잡음 파형 ····· 24
그림 29. 성능저하센서 배경잡음 파형 ····· 24
그림 30. 정상센서 주파수 응답 특성 ····· 25
그림 31. 정상센서 주파수 응답 특성(배경잡음) ····· 25
그림 32. 성능저하센서 주파수 응답 특성(배경잡음) ····· 26
그림 33. 충격질량에 대한 질량지표 ····· 27

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# ABSTRACT

Byong Soo Park
Advisor : Prof. Man Gyun Na, Ph.D.
Department of Nuclear Engineering
Graduate School of Chosun University

Digital Metal Impact Monitoring System (DMIMS) of Hanbit Units 1 and 2 is an online instrument system that monitors shock waves generated when metal fragments hit internal structures within the pressure boundary by attaching shock waves-sensitive sensors (accelerometers) to the outer wall of the area where metal fragments in the reactor coolant can be collected, indicating anomalies in the alarm room.

However, this system is important as an instrument for securing the integrity of the plant as it enables early detection of damage to the equipments/structure of the reactor coolant system by rapid debris, failure of the control rod operation, leakage of the steam generator tube and so forth related to maintaining the integrity of the reactor coolant system.

The official abbreviation of the Loose Parts Monitoring System (LPMS) is used as LPMS, whereas the Hanbit Units 1 and 2 are used as DMIMS installed by Westinghouse Corporation. In 1998, KLPMS, which adopted domestic technology, was improved on behalf of DMIMS inside NSSS Integrity Monitoring System (NIMS) for the latest standard nuclear power plant; LPMS (Loose Parts Monitoring System) + Acoustic Leak Monitoring System (ALMS) + Internal Vibration Monitoring System (IVMS)+RCPVMS (Reactor Coolant Pump Monitoring System) + RCPVMS (Reactor Coolant Pump Vibration Monitoring System) Vibration Control System (VMS).

In this thesis, the operation and maintenance experience according to the signal analysis flow and impact signal judgement algorithm in LPMS are described, and

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

the sensor and preamplifier diagnostic methods that are commonly applicable to domestic nuclear power plants for improving facility reliability are described.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 제 1 장 서론

한빛 1,2호기의 디지털 금속충격 감시 계통(DMIMS : Digital Metal Impact Monitoring)은 원자로 냉각재내의 금속 파편이 모일 수 있는 부분의 외벽에 충격파에 민감한 센서(가속도계)를 부착하여, 금속 파편이 압력경계 내부 구조물에 부딪칠 때 발생되는 충격파를 감시하는 온라인 계측 계통으로서, 설정된 경보 준위를 초과하는 충격 신호 발생시 주 제어실에 이상 신호 발생을 알려주는 비 안전성 관련 계통이다.
그러나, 이 계통은 원자로 냉각재 계통의 건전성 유지와 관련하여 금속 파편에 의한 원자로 냉각재 계통 기기/구조물 손상, 제어봉 구동 장애, 증기발생기 튜브 누설 등의 조기 발견이 가능함으로서 발전소 안전성 확보를 위한 계측 수단으로서 그 중요성을 가지고 있다.

금속 파편 감시계통(LPMS)의 공식적인 약칭은 LPMS로 통용되고 있으나, 한빛 1,2호기는 웨스팅하우스사의 DMIMS가 설치되어 LPMS 대신 DMIMS로 통용되고 있다. 1998년 국내기술을 도입한 KLPMS가 DMIMS의 일부 기능을 대신하며 설비개선을 수행하였다. 최근 표준형원전에 있어 NIMS(NSSS Integrity Monitoring System)는 LPMS (Loose Parts Monitoring System, 금속파편감시시스템) + ALMS(Acoustic Leak Monitoring System, 음향누설감시시스템) + IVMS(Internals Vibration Monitoring System, 원자로내부구조물 감시시스템) + RCPVMS(Reactor Coolant Pump Vibration Monitoring System, 원자로냉각재펌프 진동감시시스템) 통합이 진행되고 있다.

본 논문에서는 LPMS에 있어서 신호분석 흐름 및 충격신호 판단 알고리즘에 따른 운전 및 정비 경험사항에 대해 기술하였고, 설비 신뢰도 향상을 위해 국내 원전에 공통적으로 적용 가능한 센서 및 프리앰프 진단방법에 대해 기술하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 제 2 장 한빛 1,2호기 금속파편감시계통

## 제 1절 개요

### 1. 기능

Hertz의 금속충격이론을 바탕으로, 충격물체가 원자로 및 증기발생기 압력경계 내부 면에 부딪칠 때 발생되는 충격파를 가속도계(Accelerometer)를 이용하여 탐지하는 것으로서, 취득된 가속도 신호로부터 충격응답 가속도 진폭, 가속도계간의 신호도달 지연시간 및 충격파 시간이력 및 주파수 특성 등을 평가하여 충격 위치, 충격물질의 질량 및 충격에너지를 추정함으로써 금속파편의 조기제거 여부를 결정하는 기술이다.

#### 가. Hertz의 금속충격이론

금속평판(Steel plate)에 강구(Solid sphere)가 충돌할 때, 평판의 주된 응답함수가 충격 접촉시간을 반주기(Half period)로 하는 굽힘파(Bending wave)라고 가정하면 접촉시간 동안의 최대변위 Dmax 및 접촉시간 Td는 다음과 같이 표현된다.

Dmax=Kh(mV02)0.4R-0.2

Td=2.94Dmax/Vo

여기서, $K_h = \left[ \frac{15}{16} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{0.4}$

m = 강구의 질량 (lbf/32.2ft/sec2)

$V_0$ = 강구의 충돌속도 (ft/sec)

$V_1, V_2$ = 평판과 강구의 Poisson 비

$E_1, E_2$ = 평판과 강구의 Young율 ( lbf/in2)

R = 강구의 반경 (ft)

접촉시간 동안의 충격물질 변위, 속도, 가속도는 접촉시간 Td와 관련하여

$D(t) = D_{max} \sin\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \qquad 0 < t < T_d$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$V(t)= \frac{\pi}{T_d} D_{max} \cos\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \qquad 0 < t < T_d$$

$$A(t)= -\left(\frac{\pi}{T_d} D_{max}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \qquad 0 < t < T_d$$

로 표현되고, 이때의 충격물질에 의한 충격력은 다음의 식으로 된다.

$F(t) = mA(t)$ $\qquad 0<t<Td$

속도, 가속도, 충격력의 최대치를 표현하면 아래와 같다.

$$Vmax= V_0 \frac{K_h \pi}{T_d} (m V_0)^{0.4} R^{0.2}$$

$$Amax= K_h^{-1} m^{0.4} V^{1.2} R^{0.2}$$

$$Fmax= K_h^{-1} (m V_0^2)^{0.6} R^{0.2}$$

또 충격접촉시간에 대해서도 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$Td= \pi K_h m^{0.4} V_0^{-0.2} R^{-0.2}$$

또는, $Td= \pi K_h m^{0.5} (m V_0^2)^{-0.1} R^{-0.2}$

이론적, 실험적 결과로 충격력은 충격에너지의 0.6승에 비례하는 것으로 확인되었으며, 충격접촉시간은 충격질량에 지배적이다.

1) Plate의 충격응답과 충격파 전파 특성

가) Plate 충격응답 특성

금속 평판(Plate)과 금속물체와의 충격 접촉시간은 금속체의 충격질량에 지배적이다. 또한 Plate파의 초기 반파(Half wave)는 충격 접촉시간 Td보다 1.6배 정도 짧은 주기를 갖는 것으로 입증되었으며, 충격응답 가속도의 주파수 특성은 Td/1.6의 초기 반파와 관련된 주파수(fa) 부근에서 최고치(Peak)를 보이고, 아래 식과 같이 표현되는 이 주파수의 ±50%(0.5fa~1.5fa)에 대해 분산되는 주파수 특성을 보인다.

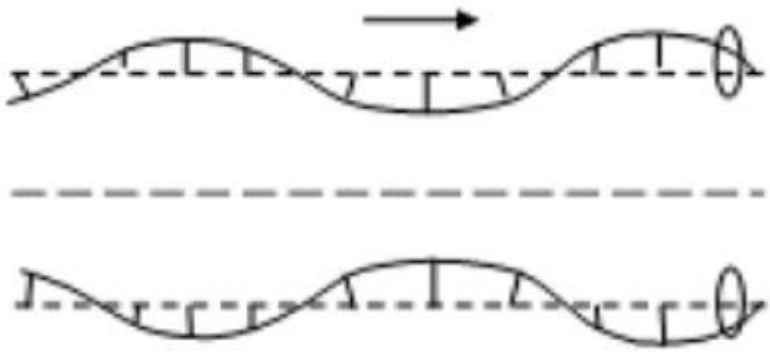
$$fa= \frac{1.6}{2T_d}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나) 충격파 전파 특성

Lamb wave 이론에 의한 Plate파[1]는 그림 1과 같이 크게 대칭파(Longitudinal wave; S-wave)와 비대칭파(Transverse wave; A-wave)로 분류되며, 파의 전파속도는 구조물 두께 및 전파 주파수에 관련한다. Lamb wave 이론에 의한 Plate 파의 전파속도에 따른 종류를 그림 1에서 볼 수 있다.

굽힘파의 위상과 군속도는 Plate의 두께와 주파수와의 관계를 그림 2와 3으로 나타난다.



(a) $S_0$ wave mode

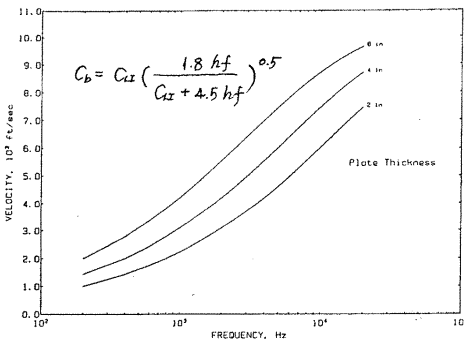
(b) $A_0$ wave mode

[그림 1. Plate 파형]

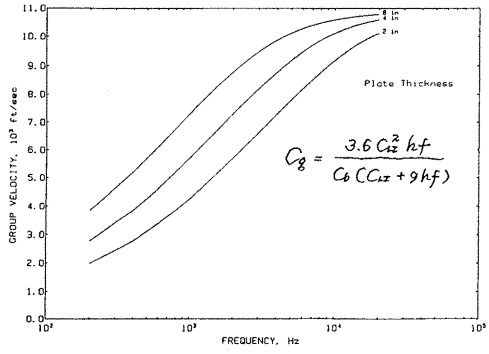
1) Lamb wave 이론에 의한 Plate파는 파의 전파속도에 따라 $S_0$~$S_5$, $A_0$~$A_5$로 분류되며 한빛 1,2호기를 기준으로 할 때 주파수대역 20Khz와 원자로 압력용기 최대 8.6″와 관련하여 탐지할 수 있는 파의 종류는 $S_0$,$S_1$,$S_2$파 및 $A_0$,$A_1$파이다. 이중 $S_1$,$S_2$ 및 $A_1$파는 관측하기 힘든 파로 알려져 있어 실제 위치평가에 이용되는 파의 $S_0$, $A_0$파이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2) Bending Wave Phase & Group Velocity




[그림 2. Bending Wave Phase Velocity]




[그림 3. Bending Wave Group Velocity]

3) 충격파의 진폭 감소 인자

충격파의 진폭 감소인자는 거리, Damping 및 구조물에 의해 진폭이 감소된다.

가) 거리에 따른 진폭감소 특성

$$D(r) = D_0[H_0(kr) - H_0(-jkr)]$$

$$H_0(kr) = \frac{2}{\pi} j \ln(kr), \quad |kr| \ll 1$$

$$H_0(kr) = \left(\frac{2}{\pi} kr\right)^{0.5} e^{-(x-\frac{\pi}{4})j}, \quad |kr| \gg 1$$

$D_0$ : 충격위치에서의 진폭
$D(r)$ : 충격위치로부터 거리 $r$ 위치에서의 진폭
$k$ : $2\pi f / C_b$
$H_0$ : Hankel Function of the 2nd kind

나) Damping에 의한 진폭감소 특성

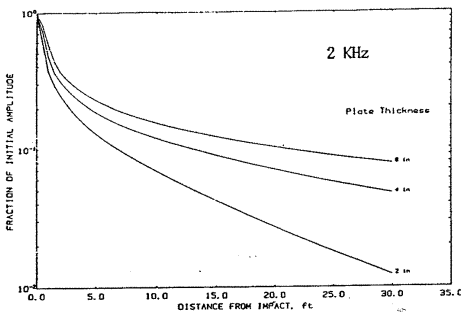
$$D(r) = D_0\, e^{-(\frac{\pi \eta f}{C_g})r}, \qquad \eta = \frac{\rho_0 c_0}{2\pi f \rho_s h} \cdot \frac{M_f}{\sqrt{M_f^2 - 1}}$$

$\rho_0$ : 주변유체 밀도
$f$ : 전파 주파수
$h$ : Steel Plate 두께
$\eta$ : 감소계수
$c_0$ : 주변 유체에서의 음속
$\rho_s$ : Steel Plate 밀도
$M_f$ : $C_b / c_0$

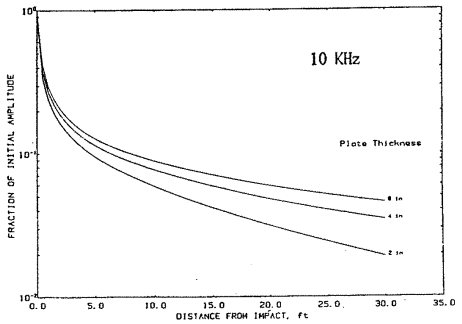
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다) 진폭감소 특성 Chart

주파수의 세기에 따른 진폭감쇠 현상을 그림 4와 5와 같이 나타남을 알 수 있다.



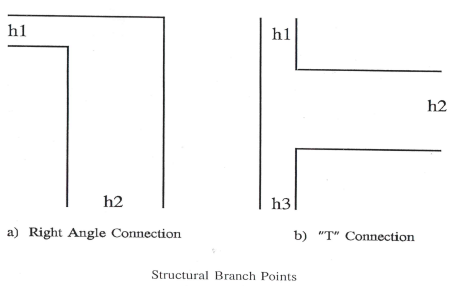

[그림 4. Total Wave Attenuation for 2 KHz]



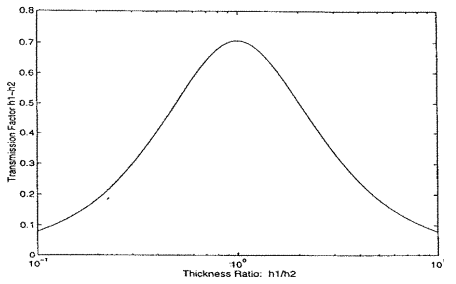

[그림 5. Total Wave Attenuation for 10 KHz]

라) 구조물 불연속에 의한 진폭감소 특성

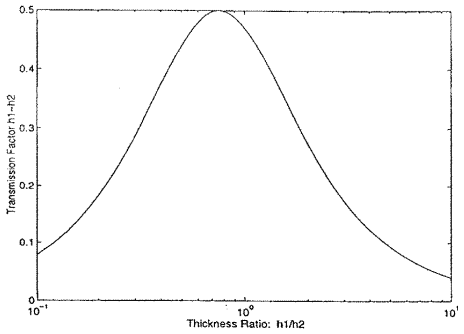
구조물의 "ㄱ" 자 "T" 의 형태에 따라(그림 6) 구조물의 두께 비 h1/h2를 기준으로 진폭감쇄 특성을 그림 7 ~ 9를 통해 알 수 있다.



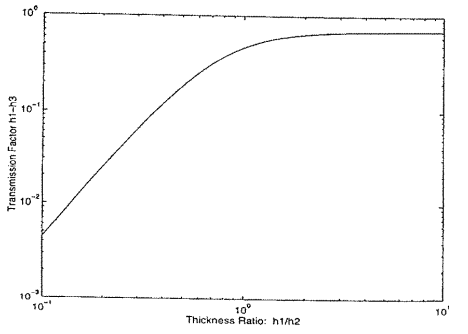

[그림 6. Structural Branch Point]




[그림 7. Transmission ThroughRight-Angle Connection]




[그림 8. Right-Angle Transmission Through "T" Branch Point]



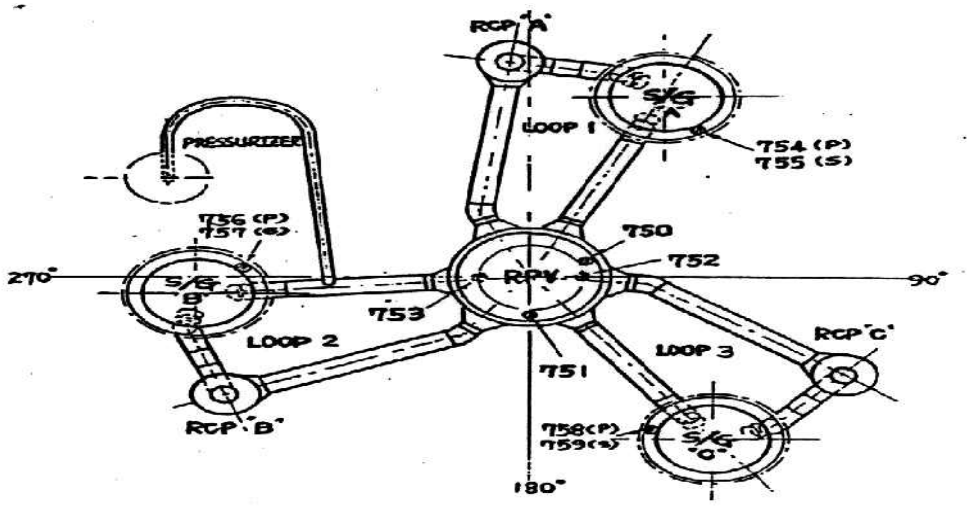

[그림 9. Transmission Past "T" Branch Point]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 2. 구성 및 주요기기

가. 가속도계 설치 위치

가속도계 센서는 원자로 상부에 2개, 하부에 2개 및 증기발생기 Loop 1 ~ 3에 각각 2개씩 총 10개가 설치되어 있다. 아래 그림 10은 가속도계의 설치위치 개략도 이다.




[그림 10. 가속도계 설치위치 개략도]

나. 채널 구성

각 채널은 표1 과 같이 CH750 ~ 759 로 구성되어 있다.

[ 표 1. LPMS 센서 채널 구성 ]

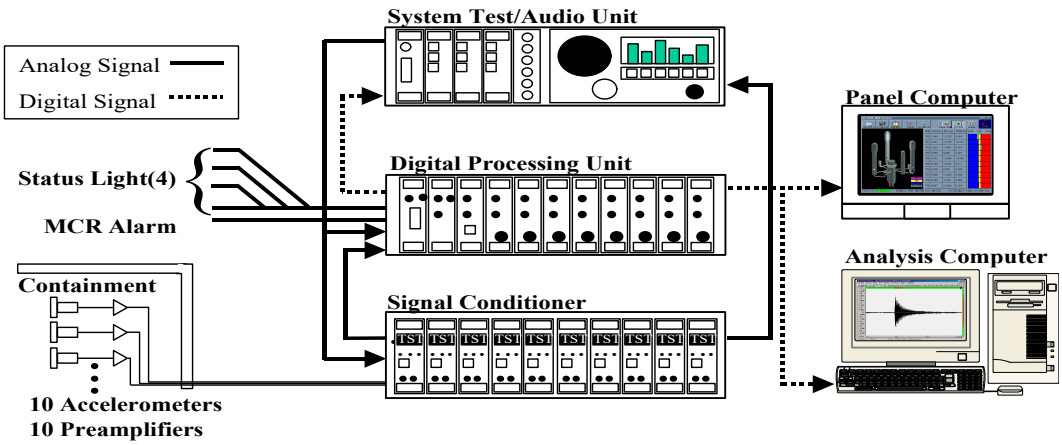
| 번호 | 채널 | Destination | 설 치 위 치 |
|---|---|---|---|
| 1 | 750 | RVU | Reactor Vessel Upper |
| 2 | 751 | RVU | Reactor Vessel Upper |
| 3 | 752 | RVL | Reactor Vessel Lower |
| 4 | 753 | RVL | Reactor Vessel Lower |
| 5 | 754 | SG 1-S | Steam Gen. 1 Secondary |
| 6 | 755 | SG 1-P | Steam Gen. 1 Primary |
| 7 | 756 | SG 2-S | Steam Gen. 2 Secondary |
| 8 | 757 | SG 2-P | Steam Gen. 2 Primary |
| 9 | 758 | SG 3-S | Steam Gen. 3 Secondary |
| 10 | 759 | SG 3-P | Steam Gen. 3 Primary |

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

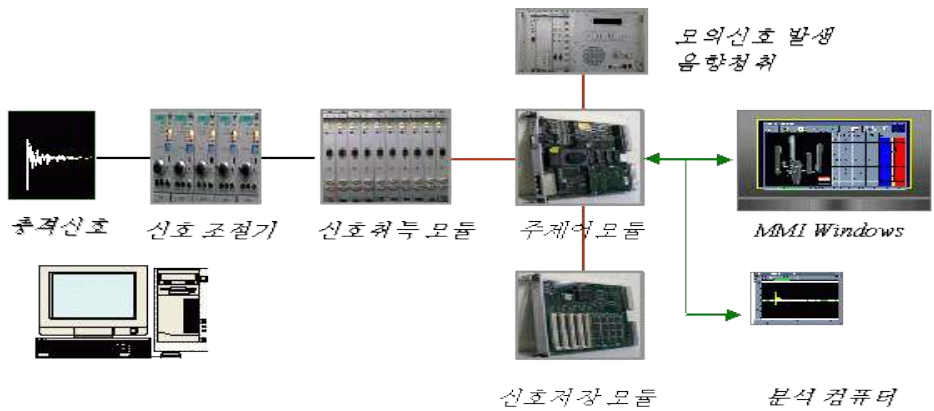
다. 패널 구성

패널 구성은 그림 11에서 보는 바와 같이 물리적으로 독립된 Signal Conditioning Unit(SCU), Digital Processing Unit(DPU), Panel Computer(PPC), Audio & Simulation Unit(ASU), Analysis Computer(AC) 및 Data Storage Devices(DSD) 등 모두 6 개의 유닛으로 구성되어 있다.

LPMS의 신호처리는 그림 12와 같이 충격신호가 감지가 되면 신호 조절기를 통해 주제어실 모듈로 전달되며, MMI Windows를 통해 운전원들이 볼 수 있게 구성이 되어 있다.




[그림 11. LPMS 계략도]




[그림 12. LPMS 신호처리]

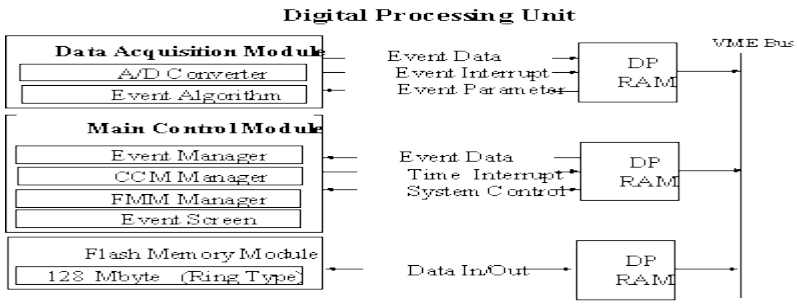
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1) Signal Conditioning Unit(SCU)

SCU는 10 개의 Signal Conditioning Module(SCM)로 구성되어 있으며 최대 16 모듈까지 확장이 가능하다. SCM의 주 기능은 센서에서 발생되는 미소 신호를 시스템에서 사용하기 용이한 신호 범위인 ± 5 Vpp로 정규화 시키며, 신호의 필터링 및 16 VDC 바이어스 전원을 전단증폭기에 공급한다. 각 SCM은 운전, 시험 및 교정의 3 가지 운전 모드를 제공하며, 모듈전면에 LCD Display를 갖고 있어 모듈에 대한 상세정보를 쉽게 확인할 수 있도록 되어 있다.

2) Digital Processing Unit(DPU)

DPU는 VME 기반의 데이터 취득 모듈(DAM), 주 제어 모듈(MCM), 데이터 저장 모듈(FMM), Digital Input/Output 모듈(DIOM)로 구성되었다. 그림 13은 DPU의 기능 블록도를 나타내고 있다.




[그림 13. DPU 기능 블록 선도]

3) Data Acquisition Module(DAM)

가) DAM(DSP : TMS320C32)의 주요 기능은 금속충격 신호 검출 알고리즘을 이용하여 Event 신호를 정확히 검출하는 것이다.

나) DAM은 SCM의 아날로그 신호를 디지털 신호(Sampling Time : 100 kHz, Resolution : 16 bit)로 변환하여 Ring Type(FIFO)의 임시저장 메모리에 연속적으로 저장한다. 저장된 신호 중 이상신호는 검출 알고리즘(Fixed, Floating Set-Point)에 의해 검출된다.

다) 충격 Event 검출은 짧은 주기의 신호 평균값이 Event Level을 초과하는 순간에 Event Trigger 신호가 발생되고, 이어서 충격신호 데이터 정보가 임

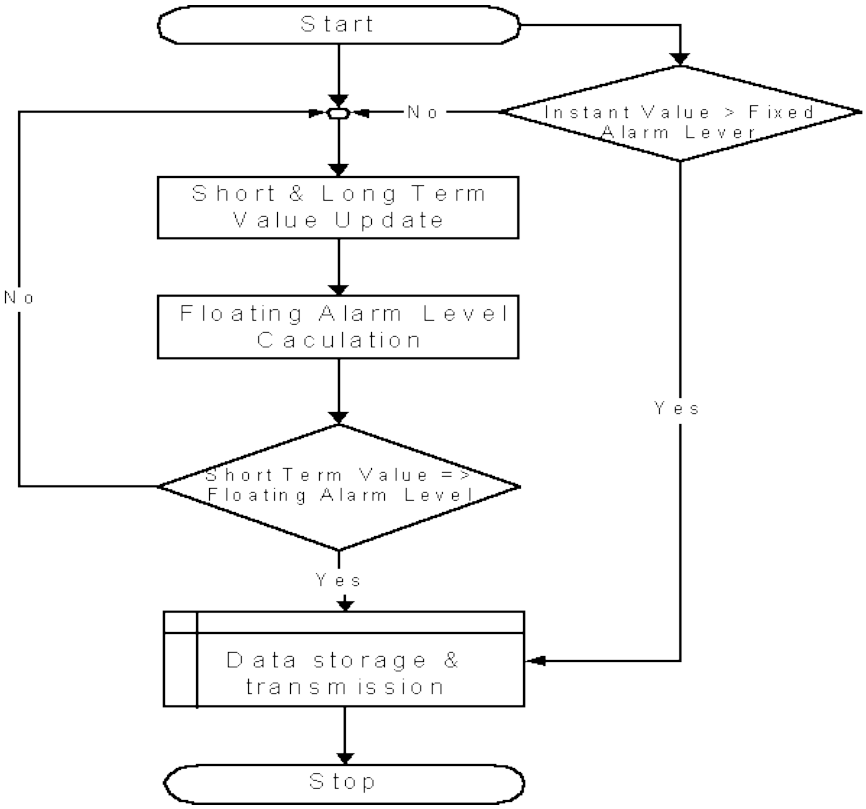
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시 저장영역에 저장된다.

4) Main Control Module (MCM)

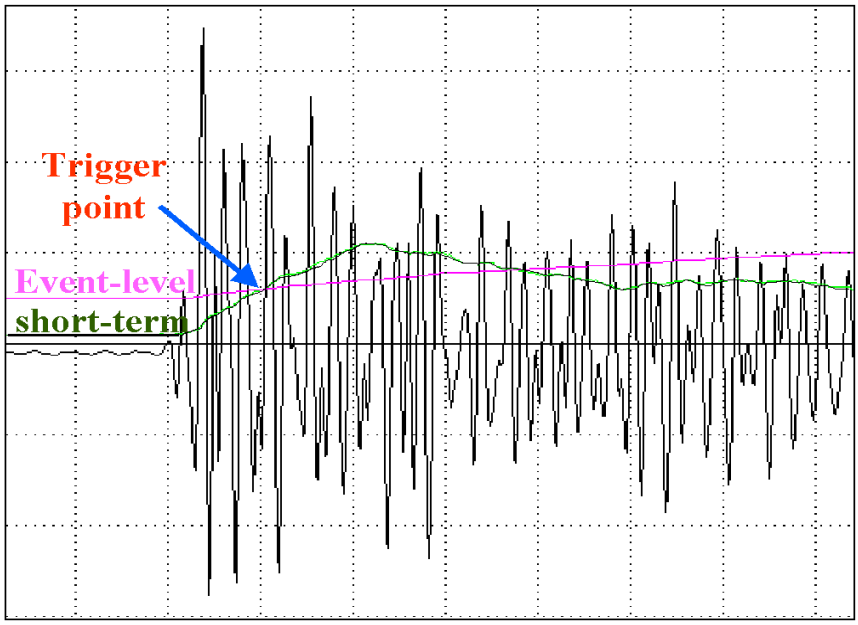
가) MCM(CPU : MC68040)은 시스템 제어를 담당하는 핵심 모듈로 실시간 운영체제에 의해 Event 신호의 발생여부, 검출된 신호의 진위여부 진단이 실시간으로 이루어진다.

나) DAM으로부터 그림 15와 같은 이벤트 신호 검출 인터럽트를 받게 되면, 시각동기 된 16 개 전 채널의 각 180 msec 분량 Event 데이터를 주 제어모듈 메모리에 저장한 후, 그림 14와 같이 검출된 신호가 금속충격에 의한 신호인지를 분별하기 위한 6 단계의 충격신호 진위판단 알고리즘을 수행한다. 적용된 알고리즘은 6 단계로 구성되며 필요에 따라 선택적으로 설정할 수 있다.




[그림 14. Floating Setpoint 방식에 의한 Event 검출]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY




[그림 15. Event 검출 신호]

5) 충격신호 진위 진단 알고리즘

검출 알고리즘에 의해 취득된 충격신호는 주 제어모듈에서 Valid Alarm인지 판단하게 된다. 이러한 목적을 수행하기 위해 총 6 가지의 판단 알고리즘이 수행되며, 사용자에 의해 이중 일부는 제외될 수 있다. 모든 판별 조건이 만족되기 전에 취득된 신호는 False 신호로 간주된다.

가) RMS 비율 비교 테스트(RMS Ratio Comparison Test)

판별 : (RMS Ratio) ≥ (Alarm RMS, 또는 Significant RMS)

나) Ringing Frequency Test

판별 : Max. Freq. > Ringing Freq. > Min. Freq.

다) Impact Duration Test

판별 1 : Peak 후 minimum Impact Duration 이후를 중심으로 1 msec 내의 RMS 값이 Impact pulse RMS 값의 90 %보다 커야 함.

판별 2 : Peak 후 Max. Impact Duration만큼 지난 부분에 중심을 둔 1 msec 시간 범위의 RMS 값이 Impact pulse RMS 값의 50 %보다 작아야 함.

라) Inter-Channel Delay Test

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

판별 : Max. Delay Time > Chnl. Delay Time > Min. Delay Time

마) Amplitude Ratio Test

판별 : (Ampli. Ratio) > (Alarm Ratio 또는 Significant Ratio)

사) Event Period Test

판별 : RMS 비율 비교 테스트 ~ Amplitude Ratio Test 결과가 Valid Alarm 이라고 판단되는 Event가 Event Period 동안 정해진 회수 이상으로 발생되어야 함.

5) Flash Memory Module (FMM)

가) MCM의 판별 알고리즘에 의해 검증된 충격신호는 충격신호 발생시간, 발생채널, 최대 가속도 값 등과 같은 정보와 함께 전 채널의 데이터를 블록화 하여 FMM에 기록된다.

나) FMM은 전원상실시 에도 데이터를 보존할 수 있는 128 Mbyte의 Flash Memory로 구성되어 있으며, 약 500 개의 데이터를 저장할 수 있다.

6) Panel Computer (PPC)

가) 현장 신호의 변화, 경보 발생 데이터 등의 신호정보 제공, 그리고 시스템 운영 변수 관리와 같은 시스템 제어 기능을 담당한다.

나) 금속충격 경보가 발생하는 경우 PPC는 사용자가 경보 발생 상황을 용이하게 파악할 수 있도록 Mimic상에 경보 발생 가속도계 위치 및 순서를 자동으로 표시하고, 경보발생 시간, 크기, 위치 등 경보신호와 관련된 모든 정보를 화면에 동시에 출력하여 신속한 조치가 가능토록 해준다.

다) PPC 운영 프로그램은 4GL인 Delphi로 개발되어 기능 변경 및 개선이 용이하고, 재 활용성이 높다는 장점을 갖고 있다.

7) Analysis Computer

가) 분석 컴퓨터는 금속충격 신호, 배경잡음 또는 모의 충격신호를 분석하기 위한 다양한 기능들을 제공하며, 원 신호 및 분석 결과 데이터를 체계적으로 관리하기 위한 Tool들을 제공한다. 또한 패널 컴퓨터의 백업기능을 제공하여 패널 컴퓨터 고장의 경우에도 시스템 제어 등의 패널 컴퓨터 고유 기능을 수행할 수 있도록 설계되었다.

나) 신호의 분석은 보통 Semi-automatic Analysis로 진행된다. 일반적으로 신

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

호분석의 완전 자동화는 구현하기 어렵지 않으나, 분석 결과의 정확성은 분석 프로그램을 이용하여 사용자에 의해 단계별로 진행되는 반 자동화 분석보다는 현격하게 떨어진다.

다) 분석 컴퓨터는 충격신호의 충격위치 및 질량을 분석하기 위해 요구되는 많은 디지털 필터를 제공하며, 사용자는 쉽게 자신이 원하는 필터를 설계하여 목적에 맞도록 사용할 수 있도록 되어 있어 다양한 신호 분석이 가능하다.

라) 금속 충격신호로부터 충격위치 및 질량을 추정하기 위해서는 위에서 소개한 여러 분석 기법들을 적용할 수 있으나, KLPMS는 다양한 금속 강구를 이용한 모의 충격시험을 통해 개발된 각 가속도계별 Lookup chart를 이용하여, 신호 분석을 수행하며, 이와는 별도로 분석이론에 의한 신호분석도 병행함으로써 상호 확인과정을 거치고 있다.

# 3. 금속충격 신호 분석

## 가. 금속파편의 충격위치 분석

충격위치 평가에 이용되는 신호정보는 충격응답파의 상승시간(Rise time), 지속시간(Duration time), 도달시간(Arrival time)등 대부분 충격신호의 시간이력 정보에 의한다.

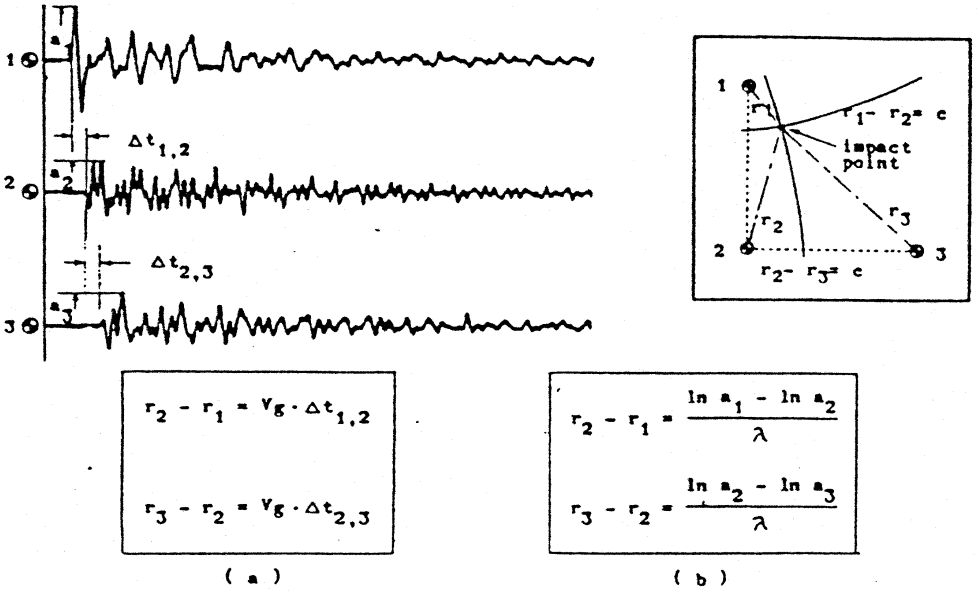
위치 평가에는 다음의 평가방법들이 이용된다.

- 삼각법 (Triangular method)
- 포락 곡선법 (Envelope curve method)
- 원 교차법(Circle intersection method)

1) 삼각법(Triangular method)에 의한 위치평가

금속파편에 의한 충격파가 쌍을 이루는 센서들 간에 각기 도달되는 지연시간과 충격파의 전파속도를 이용하는 가장 보편적인 방법이다. 그러나 이 방법을 사용하기 위해서는 그림 16에 있는 쌍곡선 교차법을 이용하는 삼각법의 예와 같이 적어도 3개 이상의 센서로 부터의 신호정보가 필요하다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY




(a) 도착시간법 (b) 최대진폭법

[그림 16. 쌍곡선 교차점을 이용하는 삼각법]

2) 포락 곡선법(Envelope curve method)에 의한 위치평가

충격에 의한 응답가속도신호는 충격위치와 가속도계 설치위치간의 거리에 따라 신호의 상승시간(Rise time)이 달라진다는 특징을 이용한 평가방법으로, 1개 가속도 신호로부터 개략적인 충격위치 추정이 가능하나 정확한 충격위치 평가는 곤란하다.

3) 원 교차법(Circle intersection method)에 의한 위치평가

원 교차법은 구조물 내에서의 Lamb wave 전파특성을 이용하는 것으로서, 1개 가속도 신호상에서 서로 다른 2개의 특정 Mode파($S_0$,$A_0$)를 이용하는 방법과 센서의 2개 공진주파수(공진주파수 $f_1$과 센서 Mounting 공진주파수 $f_2$)를 이용하는 방법이 있다.

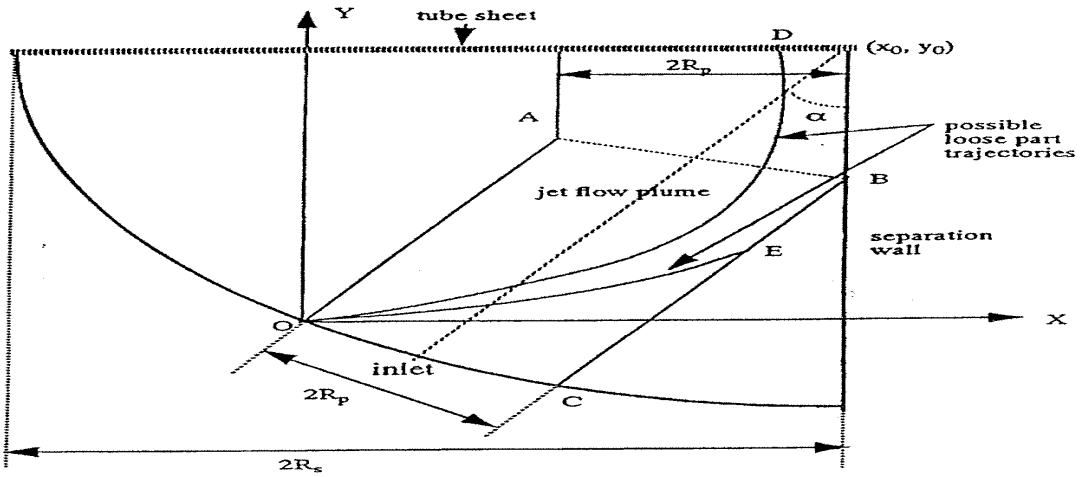
Mode파에 의한 방법은 기본 Mode파, 즉 $S_0$와 $A_0$ Mode파의 전파속도차에 의한 신호도달 지연시간 $\Delta ta_0,s_0$를 이용한다. 2개 공진주파수에 의한 방법은 $A_0$파와 $S_0$파중 비교적 큰 진폭을 야기시키는 $A_0$파의 2개 공진주파수간 전파속도 차이에 의한 신호도달 지연시간을 이용한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이상의 방법들에서 얻어지는 충격위치 r은 가속도계 설치위치를 중심으로 하는 반지름 이므로, 적어도 2개의 가속도계 신호로부터 r1, r2가 구해져 그를 반지름으로 하는 2개 Circle의 교차점을 구해야 정확한 평가가 가능하다.

충격신호로부터 $A_0$, $S_0$파 및 $f_1$,$f_2$파의 구분이 쉽지 않으나 정확도가 높고 2개의 가속도계 신호를 이용한다는 점에서 2Array 충격위치 평가에 가장 적합한 방식이다. 아래 그림 17은 증기발생기 내부의 이물질의 거동을 나타낸 그래프이다.

4) 증기발생기내 Loose part 거동




[그림 17. Flow Pattern and Loose Part Trajectories in S/G Inlet Chamber]

## 나. 금속파편의 질량분석

금속 파편의 질량과 에너지를 분석하기 위해 Hertz의 충격 이론이 이용된다. Hertz의 충격 이론에 의하면 금속충격 응답은 질량, 속도, 접촉 부위 곡률 등 최소한 세 가지 요소에 좌우된다. 따라서 신호의 진폭과 주파수라는 두 가지 특성만 가지고는 이 요소들을 단일하게 결정할 수 없다. 그러나 국내외의 LPMS 운전 경험을 통해 금속 파편의 질량과 에너지를 어느 정도 추정할 수는 있다는 사실이 알려졌다.

금속 충격의 특성상 이러한 절차의 정확성과 정밀도는 전파 경로의 복잡성, 부착 센서의 주파수 응답, 취득 데이터의 정밀도 등에 크게 좌우된다. Loose part의 질량분석은 시간 및 주파수 이력정보가 이용되며 다음의 방법들이 질량분석에 이용된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1) 접촉시간에 의한 질량추정

접촉 시간을 이용하는 방법(Hertz's Theory)

가) 충격 위치와 센서로부터의 거리 결정

나) 충격 신호의 주파수 성분을 검토하여 1차 충격 주파수, 파형의 모드, 센서 공진 주파수 분석

다) 센서에 감지된 샘플의 최대 진폭을 구해내고, 거리에 따른 진폭 감쇠 효과를 고려하여 충격 위치에서의 최대 진폭을 구함

라) 충격 자료와 이론 등을 사용하여 앞에서 구한 진폭과 주파수 성분에 적합한 질량과 속도를 분석

이 방법은 충격응답 시간이력에서 접촉시간 정보를 얻을 수 있고 충격속도가 정해질 때 평가가 가능한 방법으로, 정확한 충격속도의 결정에 의해 평가의 불확실성(Uncertainty)을 줄일 수 있다.

2) 질량지표 $f_c$를 이용한 질량 추정

충격물질의 질량이 커질수록 구조물 주파수특성의 저주파성분이 잘 여기 된다는 이론에 근거하여 취득된 충격신호 주파수 분석으로 충격질량을 알아내는 방법이다.

배경잡음(Background noise)과 충격가속도 신호의 주파수 대역별 파우어 스펙트라 비(Normalized power spectra ratio)를 이용해 충격질량에 따라 구성주파수의 상대적 증가를 확인할 수가 있는데, 산출된 Power spectra 함수의 면적중심 $f_c$는 다음의 식으로 표현되며 이것이 질량지표로 활용된다. 그림 19는 배경잡음과 충격가속도의 신호를 이용하여 질량지표로 어떻게 표현되는지 보여준다.

$$R_{f_i} = \frac{I_{f_i}}{B_{f_i}},\quad f_c = \frac{\sum R_{f_i} \cdot f_{c_i}}{\sum R_{f_i}}\ (kHZ)$$

여기서, $I_{fi}$ ; 충격신호 주파수대역 (i-1)-(i)Khz의 Power spectra 값

$B_{fi}$ ; Background noise 주파수대역 (i-1)-(i)Khz의 Power spectra 값

$R_{fi}$ ; (i-1)-(i)Khz 주파수대역에서의 충격신호와 Background noise의 Power spectra 비

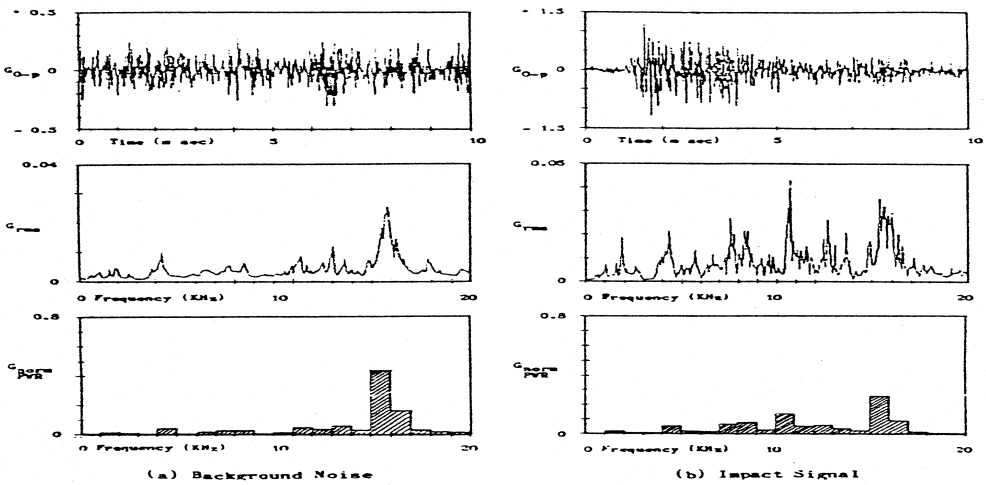
$f_{ci}$ ; ( i-1)-(i)Khz 주파수대역의 중심주파수 ($(f_{i-1}+f_i)/2$)

$f_c$ ; 전체 $R_{fi}$에 대한 중심주파수

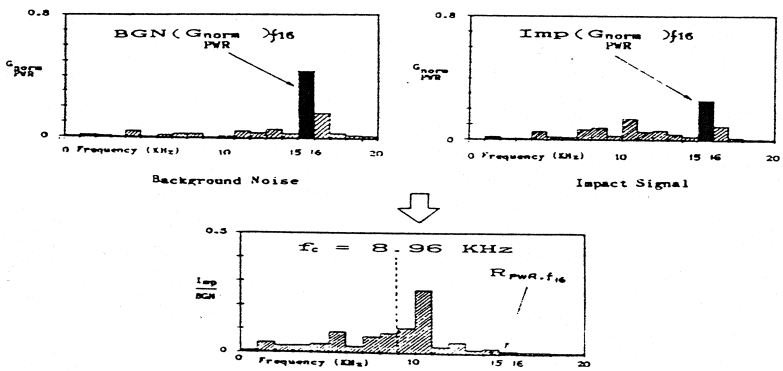
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

질량지표 fc는 충격질량의 크기에 반비례한다. 그림 20은 다양한 충격질량에 대한 질량지표와의 관계를 알 수 있다.

평가되는 주파수대역을 세분화하는 경우 질량평가의 불확실성 을 줄일 수 있어 보다 정확한 평가가 가능하나, 충격질량 평가에 질량지표 fc를 이용하기 위해서는 정량적인 기계적 충격시험에 의한 기준데이터(Reference data)의 취득이 우선되어야 한다. 그림 18은 고리3호기 CH 750에서의 배경 잡음과 충격신호를 나타내고 있다.

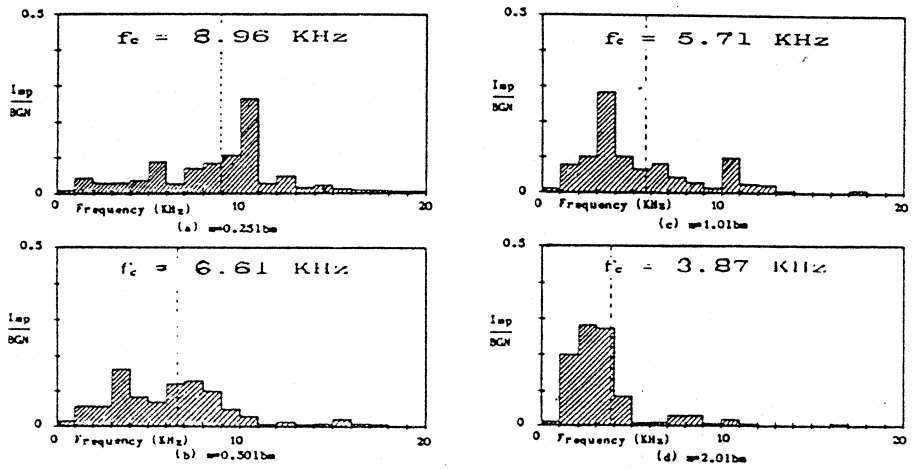



[그림 18. 고리#3 750채널에서의 배경 잡음과 충격 신호]
( m = 0.25 lb, K.E. = 0.5 ft-lb)




[그림 19. 질량 지표 fc의 계산]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY




[그림 20. 다양한 충격 질량에 대한 질량지표 $f_c$]

3) 질량지표 fr를 이용한 질량

충격물질의 질량이 클수록 전파되는 충격파의 주파수 성분 중 저주파 성분이 잘 여기 되는 특성을 지닌다는 사실이 알려져 있다. 이러한 이론에 의거하여 T.Tsunoda는 다음과 같은 FR(Frequency Ratio)을 질량을 추정하는 한가지 지표로서 제시하였다.

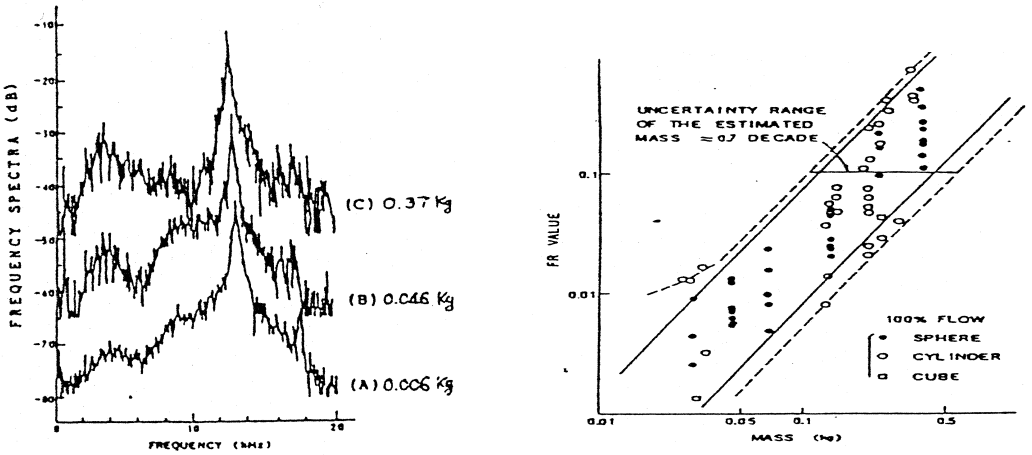
$$FR = \frac{\int_{1kHZ}^{6kHZ}(APSD)df}{\int_{10kHZ}^{15kHZ}(APSD)df}$$ APSD : Auto Power Spectral Density

즉 FR은 고주파 성분의 크기에 대한 저주파 성분의 크기의 비로써 주어진 주파수 대역은 실험적으로 얻어진 것이다. 그림 21(a)를 보면 충격질량 증가에 따라 10kHZ 이하 저주파 성분의들의 상대적 증가가, 10 ~ 15 kHZ 사이의 상대적 증가고바 크므로 FR 값은 충격 질량과 함께 증가한다는 것이다. 다시 말해 FR 값이 클수록 저주파 성분이 상대적으로 크다는 의미가 되므로 충격 물질의 질량이 더 크다고 할 수 있겠다. 그림 21(b)에서 나타나 있는 바와 같이 FR값은 충격물질의 형상과도 무관하며, 또한 충격 위치와 무관함이 실험적으로 입증되어 있다.

이 방법은 충격응답함수의 주파수 특성에 주안점을 둔 방법이므로 Sensor 응

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

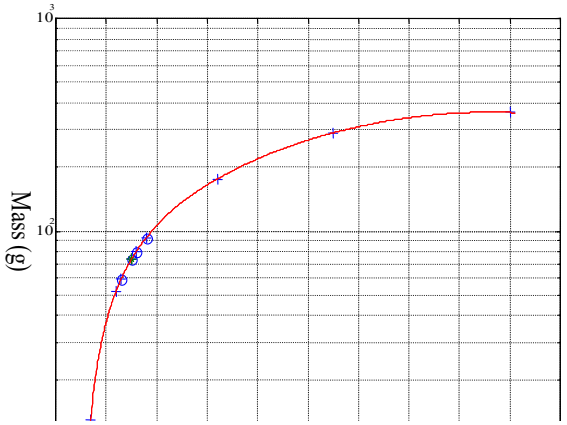
답 특성이 달라짐에 따라 주파수 특성의 Peak 부분을 선정해야 하는 어려움이 있고, 그림 21(b)에 나타나 있듯 0.7 decade 정도의 불확실성을 가지고 있다. 또한 주파수 비를 이용한 질량평가를 그림 22에서 보여준다.




(a) 충격질량에 대한 PSD

(b) 충격 질량과 FR값의 관계

[그림 21. 특정 주파수 성분을 이용한 질량평가]




[그림 22. A lookup chart for mass estimation]

4) 질량평가 Map을 이용한 질량평가

Metal Sphere Signal Map(MSSM)을 이용한 질량 평가는 충격신호의 가속도 크기와 중심 충격주파수 정보를 통해 충격체의 질량과 충격속도를 추정하는 방법으로 다음의 절차로 분석이 진행된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가) 충격 거리, 중심 충격주파수 및 구조물 두께 정보 확인

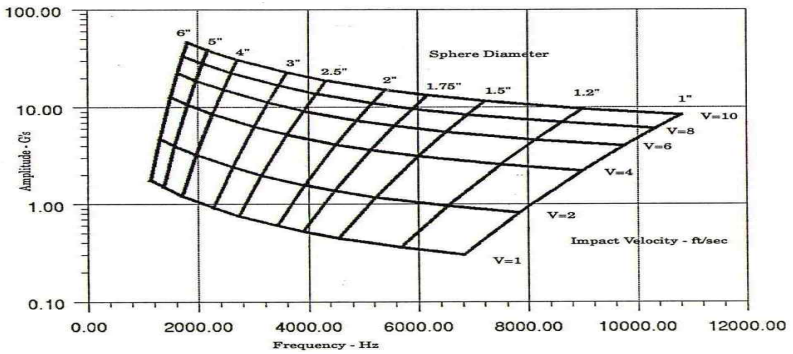
나) 거리에 따른 중심 충격주파수 감쇄율 계산

다) 3 feet 위치에서의 충격가속도 크기 계산

라) MSSM에서 주파수, 가속도크기와 Match되는 강구 및 속도 확인

마) 강구 크기를 고려한 질량 계산

그림 23은 3ft 위치에서의 강구에 의한 중심주파수 및 가속도특성 그래프 이다.




[그림 23. 중심주파수/가속도특성]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 제 3 장 LPMS 경보발생 현황

## 1. 개요

2019년 1월 14일 20시 47분 한빛 2호기에서 RCS를 123℃에서 292℃로 가열, 발전소 기동 절차 진행 중 LPMS CH-750, 751, 754, 755, 757, 758(총 6개 채널)에 “MIM SYS LOOSE PARTS DETECTED” 경보가 발생한 사례이다.

## 2. 발생 현황

표 2와 같이 총 20회의 경보가 발생됐으며 발생된 파형을 중앙연구원에 분석 의뢰하여 파형을 분석하였다.

[표 2. 경보 발생 목록]

| 발생채널 | 발생횟수 | 발생시간 | 센서위치 |
|---|---|---|---|
| CH750 | 8회 | ‘19.01.14, 20시47분46초<br>~ ‘19.01.15, 20시27분52초 | 원자로 상부 60° |
| CH751 | 4회 | ‘19.01.15, 15시24분08초<br>‘19.01.15, 20시04분13초 | 원자로 상부 180° |
| CH754 | 1회 | ‘19.01.15, 14시42분35초 | 증기발생기 “A” 2차측 40° |
| CH755 | 1회 | ‘19.01.15, 13시12분27초 | 증기발생기 “A” 1차측 40° |
| CH757 | 5회 | ‘19.01.15, 12시22분05초<br>~ ‘19.01.15, 16시27분15초 | 증기발생기 “B” 1차측 150° |
| CH758 | 1회 | 19.01.15, 21시05분44초 | 증기발생기 “C” 2차측 280° |

## 3. 분석 결과

당시 시간에 따른 파형(내부자료로 공개 불가)은 각 채널별 시간영역 및 주파수영역 신호 분석결과 동시간대 파형이 삼각파형태로 발생(이물질 파형일 경우 센서 간 파형은 약간의 시 지연으로 나타남)한 것으로 보아 센서의 기능저하와는 무관하며, 발생한 경보신호는 RCS 온도 상승에 따른 열팽창에 의한 충격파로 추정

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

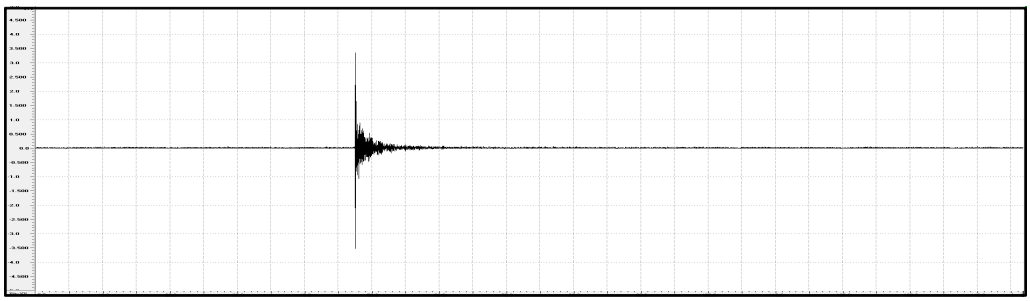
# 제 4 장 프리앰프 및 센서 진단기술

## 제 1 절 프리앰프 및 센서진단

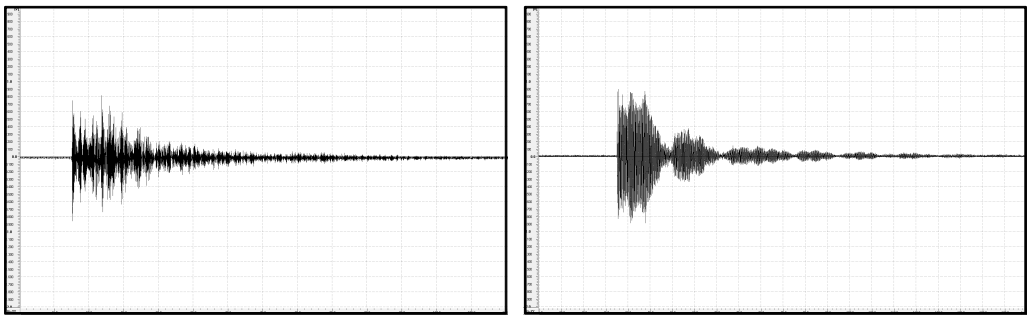
### 1. 모의충격신호의 형태에 따른 진단

#### 가. 정상 및 성능저하 센서의 모의충격신호 파형

정상센서의 충격파형은 그림 24와 같이 삼각파 형태의 모양을 형성하는 것이 일반적이다. 경년열화 등의 이유로 센서의 성능이 저하되면 그림 25와 같이 파형의 형태를 나타내게 된다.



[그림 24. 정상센서 모의충격신호 파형]



[그림 25. 성능저하 센서 모의충격신호 파형]

#### 나. 성능진단 방법

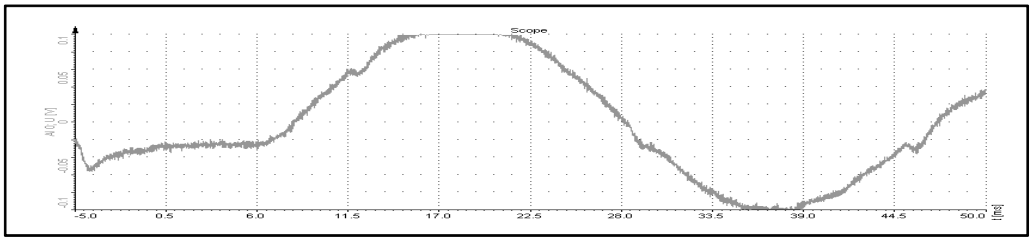
정상 센서의 모의충격신호 파형은 삼각형(▷)으로 급격한 상승시간과 완만한 하강시간을 가진다. 그러나 성능저하 센서는 신호의 하강시간이 길며 감쇄가 적절하게 이루어지지 않는다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 2. 배경잡음의 형태에 따른 진단(Ⅰ)

### 가. 센서의 절연이 저하된 배경잡음

센서 설치시 절연 상태가 양호하면 정현파 형태를 띄게 되는데 절연상태가 나빠지게 되면 그림 26에서처럼 파형이 흔들리게 된다.




[그림 26. 센서 절연저하 파형]

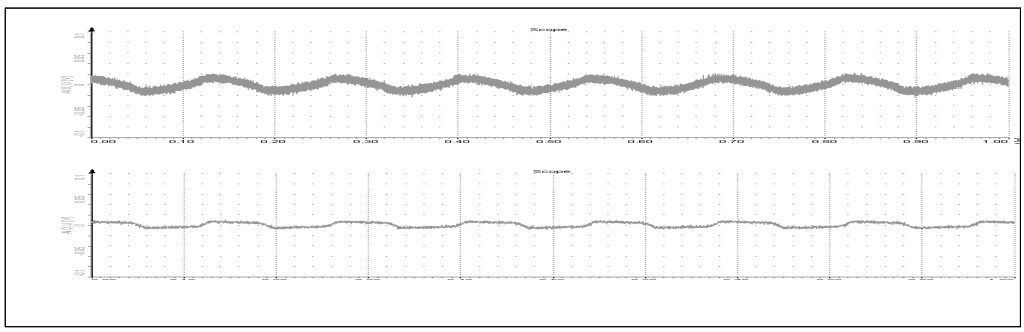
### 나. 성능진단 방법

센서 절연은 최소 10MΩ 이상이어야 한다. 그러나 절연이 저하되면 수십 kΩ의 이하의 절연저항이 측정되며, (+)와 (-) 단자 사이에 부유용량이 형성되어 센서의 출력파형이 흔들리게 된다. 센서 절연 저하가 성능에 미치는 영향은 적으나, 쉽게 기능이 저하되는 특성이 있다.

## 3. 배경잡음의 형태에 따른 진단(Ⅱ)

### 가. 프리앰프의 성능이 저하된 배경잡음

배경잡음으로 프리앰프의 성능을 측정하여 일직선 형태의 파형이 정상적인데 반해 성능이 저하되면 그림 27과 같이 정현파의 상태를 띠게 된다.



[그림 27. 프리앰프 성능저하 파형]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

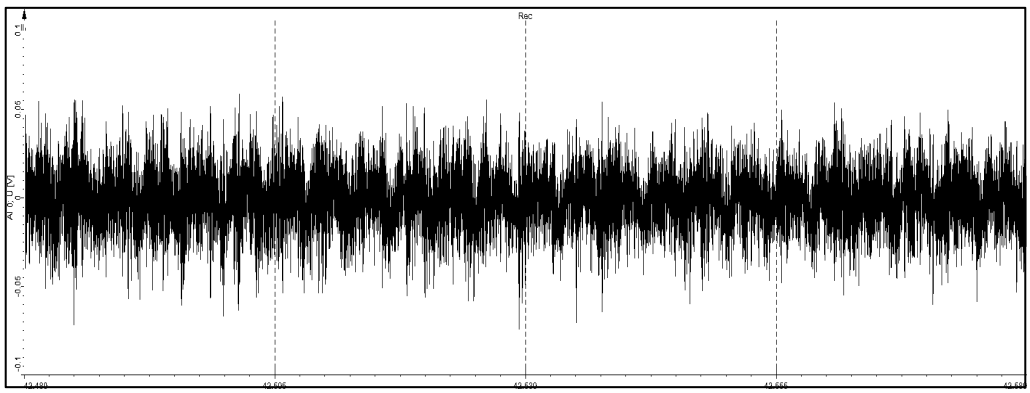
### 나. 성능진단 방법

배경잡음 신호가 정현파 형태로 나타나면, 프리앰프의 성능이 저하된 것이다.

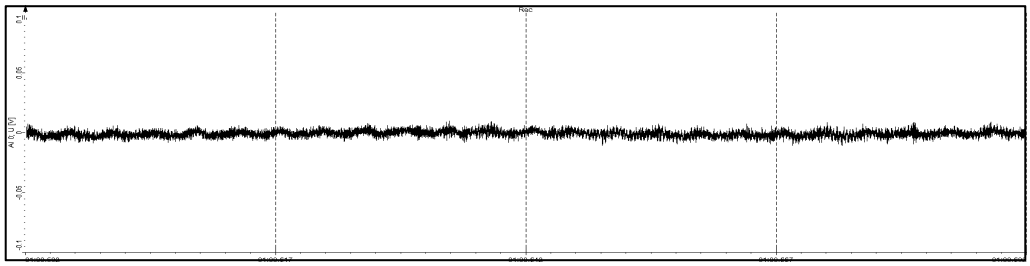
## 4. 배경잡음의 크기에 따른 진단

### 가. 정상 센서 및 성능저하 시 배경잡음

동일 위치에서 배경잡음의 크기를 비교해보면 정상센서와 성능저하 센서의 파형이 그림 28과 29와 같이 나타난다.



[그림 28. 정상센서 배경잡음 파형]



[그림 29. 성능저하센서 배경잡음 파형]

※ 정상 센서와 성능저하 센서의 배경잡음 크기(y축)는 동일 척도임.

### 나. 성능진단 방법

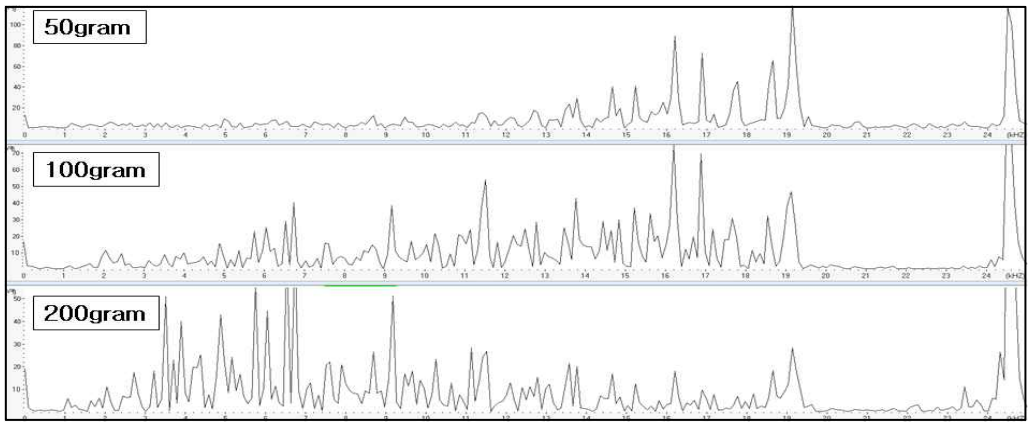
센서의 기능이 저하되면 배경잡음의 크기가 정상 센서의 1/2 이상 감소된다. 단 배경잡음의 크기 비교는 동일 위치의 과거 배경잡음 신호와 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 5. Frequency Domain을 이용한 진단

## 가. 정상 센서의 주파수 응답특성

강구시험을 통한 정상센서의 주파수 특성은 강구의 무게에 따라 그림 30의 분포를 보이며, 성능 저하시 전 주파수 영역대에서 에너지 분포를 나타나게 된다.




[그림 30. 정상센서 주파수 응답 특성]

## 나. 성능진단 방법

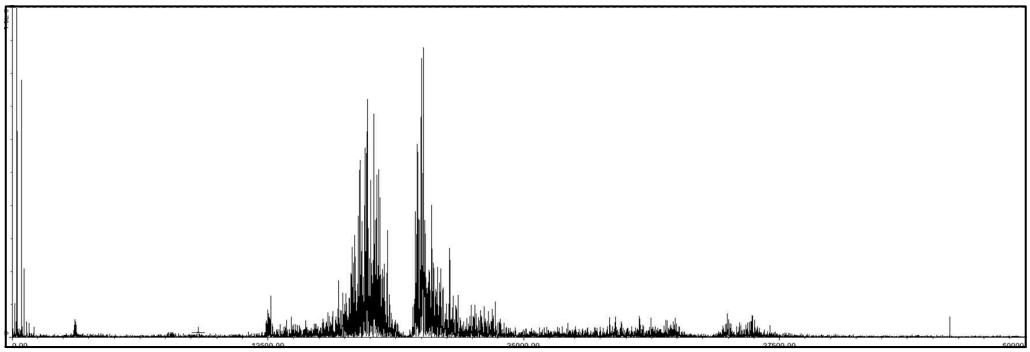
정상 센서의 모의충격신호는 강구의 질량이 무거울수록 저주파수 대역에 에너지가 많이 분포되는 특성이 있으나, 센서의 성능이 저하될수록 질량과 에너지 분포의 관계가 적어진다.

# 6. 배경잡음의 주파수 응답특성을 이용한 진단

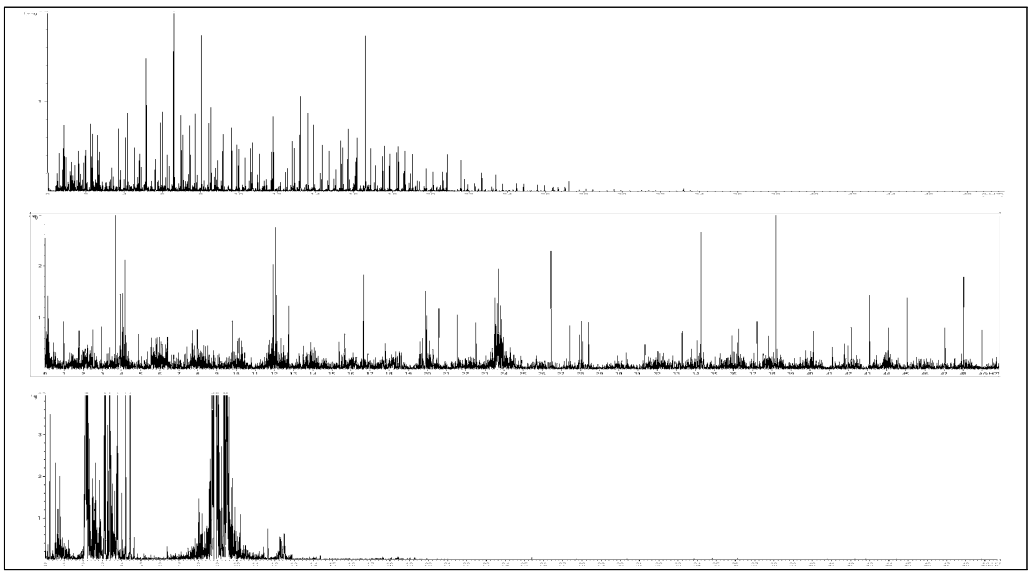
## 가. 정상 및 성능저하 센서의 주파수 응답특성

배경잡음의 주파수 응답특성은 그림 31과 같이 공진주파수 영역대에서 Peak 형태로 나타나게 된다. 그러나 센서의 기능이 저하되면 그림 32와 같이 전체적인 특성이 공진주파수 아래 영역쪽 영역에서 발생하게 된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 31. 정상센서 주파수 응답 특성(배경잡음)]



[그림 32. 성능저하센서 주파수 응답 특성(배경잡음)]

## 나. 성능진단 방법

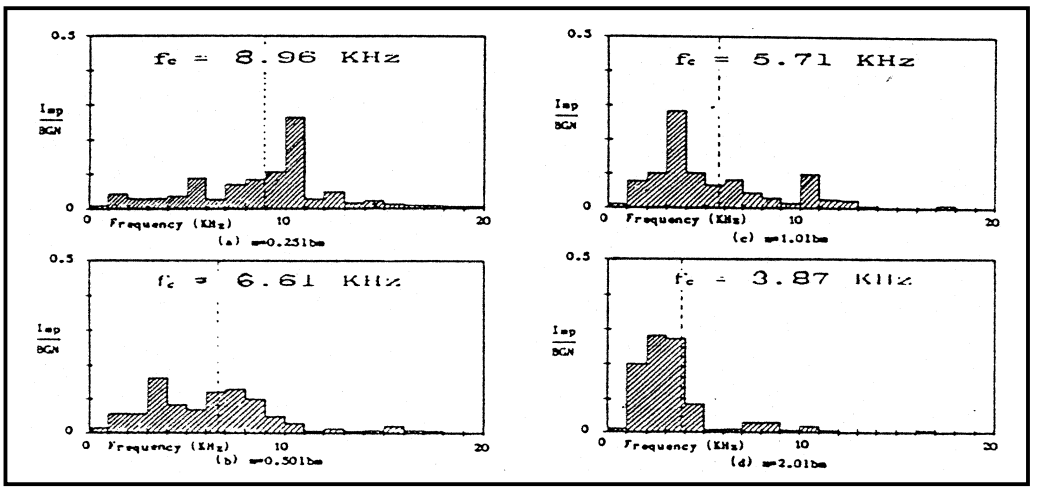
정상 센서 배경잡음의 주파수 응답특성은 공진대역의 주파수 응답이 명확하게 나타난다. 그러나 센서의 기능이 저하되면 전 주파수 대역에서 비슷한 크기로 에너지가 분포되거나, 공진대역보다 저주파수 대역에서 큰 에너지가 분포하는 특성이 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 7. 질량지표 $f_c$(Frequency Center)를 이용한 진단

### 가. 다양한 충격 질량에 대한 질량지표 fc

강구시험을 통한 충격 질량은 충격신호와 배경잡음의 면적 중심을 구하는 방법으로 그림 33과 같이 고유한 질량지표를 나타내게 되는데 센서의 성능이 저하하게 되면 강구의 무게와는 무관한 특성을 보인다.




[그림 33. 충격질량에 대한 질량지표]

### 나. 성능진단 방법

fc(Frequency Center)는 충격신호와 배경 잡음의 Power Spectra 비의 면적 중심을 구하는 방법으로 충격체의 무게가 커질수록 fc 값이 감소된다. 모의시험용 강구의 무게 변화와 무관하게 fc 값이 불규칙적이면 센서 기능이 저하된 것으로 판단한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 제 5 장 결 론

원자로냉각재계통(RCS) 내 금속물질의 유무를 감시하는 LPMS 계통은 Hertz의 금속충격이론에 근간을 둔다. 원자로 상부, 하부 및 증기발생기의 센서로 부터 충격신호를 입력받아 주제어실의 LPMS 패널 신호조절기와 신호취득 모듈을 거쳐 MMI 형태로 파형을 구현하고 있다.

충격파형의 검출은 DAM 모듈에서 디지털 신호로 변환하여 이상신호는 검출 알고리즘을 통해 Event Trigger 신호를 발생하여 MCM 모듈로부터 검출된 신호의 진위여부 진단이 실시간으로 이루어짐을 알 수 있다.

하지만 센서 및 프리앰프의 성능저하는 해당 계통의 오경보 발생률을 높이고, 이물질의 형태를 분석하는데 장애 요소이다.

이에 2010년부터 전 원전의 파형분석을 담당한 중앙연구원 직원과 LPMS 담당자들과 함께 현안사항을 도출하고 이에 진단기술의 표준화를 진행하였다.

상기 진단기술의 도입으로 한빛 1발전소의 매주기 계획 예방정비시마다 금속파편감시계통 내 센서 및 프리앰프의 파형분석을 통해 주기적인 설비교체를 수행한 결과 오경보 발생률이 현저하게 줄어들었으며, 이는 원자로냉각재계통 내 이물질을 검출하는데 신뢰성을 증진시켰음을 알 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 감 사

한국수력원자력에 입사이후 한빛 원자력본부 제1발전소 계측제어팀에서 근무를 시작으로 원자력과 인연을 맺은 후 계속해서 근무를 하고 있습니다.

약 5년간 발전소에 근무하면서도 원자력에 대한 저에 지식은 항상 부족하기만 했습니다. 이런 저에게 회사의 지원 아래 석사학위 과정의 길은 어쩌면 천운이었는지 모르겠습니다. 학위 과정을 진행하면서 원자력발전의 기본 개념부터 발전소에서 얻은 경험을 정립하는데 도움이 되었고 깊이 있는 공부를 할 수 있는 기회가 되었습니다. 위 논문의 연구 또한 근무 중 경험한 사례를 토대로 나름대로 재정립을 통해 보다 깊이 있는 공부를 할 수 있는 기회가 되었습니다.

이 모든 것은 훌륭한 교수님들의 애정 어린 지도와 같이 공부했던 선배님들의 아낌없는 조언과 헌신적인 도움이 없었더라면 불가능했을 거라는 생각이 듭니다. 퇴근 후 교육훈련센터 강의실부터 대학원에 통학하면서 서로 격려하며 같이 공부하던 시간들은 이제 저에게는 잊지 못할 추억으로 남을 것입니다. 먼저 본 논문을 지도해 주시고 뜨거운 열정과 자상함으로 저를 이끌어주신 나만균 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀 올립니다. 그리고 학과 수업시간에 변함없는 애정과 관심으로 격려해주신 정운관 교수님, 김진원 교수님, 이경진 교수님, 김종현 교수님, 송종순 교수님 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다.

그리고 바쁜 업무 와중에도 학위과정에 도움을 준 계측제어팀원들에게 특별히 감사를 드립니다.

마지막으로 원활한 학업과 직장생활이 가능하도록 물심양면 아낌없이 지원과 논문작성에 많은 용기를 북돋아준 아내 그리고 아들, 딸에게도 본 지면을 통해 아빠의 고마운 마음을 전합니다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 참고문헌

[1] Reg. Guide 1.133 Loose-Part Detection Program for the Primary System of light-Water-Cooled Reactors.

[2] KHNP, YGN 1&2 LPMS system manual (1998)