

## 금속파편 충격신호에 대한 Benchmark Data 평가

성계용, 오규명, 김봉현

한국원자력안전기술원

대전광역시 유성구 구성동 19

### 요약

원전 일차계통 내부구조물에 심각한 손상을 유발할 수 있는 금속파편의 탐지 및 진단기술을 비교하고 공유하기 위하여 LPM(loose part monitoring) Benchmark Exercise를 수행하였다. 금속파편 충격에 대한 Benchmark Data는 미국 Catawba Unit 2에서 취득하였으며, 6가지 질량의 강구를 다른 높이에서 낙하시킨 36 종류의 data set으로 구성되어 있다. 충격위치 및 강구의 질량을 추정한 결과 실제값과 잘 일치하였고 국내 분석기술의 유용성을 보였으며 외국기술과 비교할 때 동등한 수준임을 확인하였다.

### 1. 서론

금속파편이 압력경계 내부에 존재할 경우 핵연료 및 원자로 내부구조물에 손상을 미칠 수 있고 특히 증기 발생기 전열관을 손상시켜 방사성 물질의 누출을 초래할 수 있다. 만약 충격신호에 의해 금속파편의 크기/질량을 정확히 추정할 수 있다면 금속파편의 충격에 의하여 생길 수 있는 손상범위 및 위험도를 적절히 평가할 수 있을 것이다. 지난 20년간 금속파편의 충격위치, 충격에너지 및 금속파편의 질량을 결정하기 위하여 여러 가지 방법이 제시되었다[1]. 그러나 충격신호는 구조물 Geometry, Sensor 특성 및 설치방법, 금속파편의 모양 및 충격형태등에 의존하기 때문에 고도의 분석기술이 필요하다. 특히 실제 원전 일차계통의 충격신호에 관한 측정 및 분석경험의 부족으로 이미 개발된 여러 진단기법에 대한 적용성 및 신뢰성이 부족하였다. 이에 따라 원자력 발전소 신호평

가에 관한 전문가 그룹인 SMORN (Specialist Meeting on Reactor Noise)에서 OECD/NEA 후원을 받아 미국 Duke사의 Catawba Unit2에서 취득한 금속파편 신호를 기준으로 각국의 금속파편 전문가가 참여하는 Benchmark Exercise를 수행하게 되었다. 본 연구에서는 국내 분석기술 및 경험[2.3]등을 바탕으로 Benchmark Data 를 분석하고 각국의 분석결과에 대한 비교, 평가를 통하여 국내 분석기술의 신뢰성을 확보 하는데 주목적이 있다.

## 2. 금속파편 분석 관련이론

강구가 원자로나 증기발생기벽에 충격을 가했을 때 여러 형태(mode)의 충격파가 발생할수있지만 센서인 가속도계에 가장 민감하게 작용하는 파는 의사종파(Quasi-longitudinal wave)와 굽힘파(bending wave)이다. 의사종파는 굽힘파보다 진행속도가 훨씬 빠르기 때문에 굽힘파보다 가속도계에 먼저 도달하지만 진폭이 작아 쉽게 감지되지 않는다. 상대적으로 굽힘파는 진폭이 크기 때문에 충격신호 분석에 주로 활용되고 있고 본 연구에서도 이를 이용하였다.

### 2-1. 충격파의 전달속도

원자로나 증기발생기벽을 강판으로 가정하였을 때 굽힘파의 전달되는 군속도(group velocity,  $C_g$ )는 식(1)과 같이 표현될 수 있다 [4.5]

$$C_g = \frac{3.6 C_1^2 h f}{C_b (C_1 + 9 h f)} \quad (1)$$

여기서

$$C_b = C_1 \left[ \frac{1.8 h f}{C_1 + 4.5 h f} \right]^{1/2}$$

$C_b$  : 상속도 (phase velocity),  $C_1$  : quasi-longitudinal wave의 속도

$h$  : 구조물의 두께,  $f$  : 충격가속도의 중심주파수

### 2-2. 금속파편 질량추정

강판에 강구가 수직으로 낙하할 때 접촉부분에서 거동은 Hertz 이론을 이용하여 식(2) 및 (3)과 같이 표현될 수 있다[6].

$$\text{최대가속도 } A(V,D) = \frac{V^{1.4} \{2.678 \times 10^4 \times K_h \times (D/2) \times \rho^{0.4} + h V^{0.2}\}}{3.472 \times 10^8 \times h^2 \times K_h^3 \times 9^{1.2}} \quad (2)$$

$$\text{여기서 충격속도 } V = \left[ \frac{f(V,D) \times 2.94}{6.965 \times K_h \times (D/2) \times \rho^{0.64} \times \pi} \right]^5 \quad (3)$$

$$K_h = 1.82 \times 10^{-4} (\text{ft}^{0.8} \text{ lbf}^{-0.4}) \text{ at steel}$$

$f(V,D)$  : 충격가속도의 중심주파수,  $D$  = 강구직경,  $\rho$  : 강구밀도

식(2) 및 (3)에서 알수있듯이 강구의 질량을 얻기 위해서는 금속파편 충격가속도 신호의 최대값, 중심주파수 및 충격속도의 3가지 요소중 2가지만 알면 충격 강구의 질량을 추정 할 수 있다.

### 3. Benchmark Data 분석 및 평가

#### 3-1. Benchmark Data 구성

Benchmark Exercise 용으로 주어진 Data는 6개의 다른 질량의 강구를 6가지의 다른 높이에서 낙하시킨 36 종류의 Data Set 으로 구성되어있다. 각 data set 은 5 번의 동일 에너지의 충격신호가 기록되어 있으며 각 Data Set 에 대한 충격속도는 Table 1 과 같이 주어졌다..

#### 3-2. 금속파편 충격위치 추정

제공된 충격 data set은 한곳에 충격을 가해서 생산된 것이며 그 충격위치는 충격질량을 추정하는데 결정적인 요소이기 때문에 이곳을 찾기위해 각 가속도계에 탐지된 가속도 진폭, 신호형태, 신호 도달시간과 충격파의 속도를 이용하여 충격위치를 추정하였다. 총 4개의 증기발생기에 설치된 8개의 가속도계에 도달된 가속도신호 진폭 및 파형을 분석한 결과, 증기발생기 'A' 에 설치된 채널 6 및 10에서 가장 크고 전형적인 충격신호가 나타났다 (Fig.1). 채널 6 에 충격신호가 더 빨리 도달된 것으로 보아 충격위치는 증기발생기 'A' 의 가속도계 채널 6 및 10 사이(채널 6 에 보다 가까운 쪽으로)인 것으로 대략 추정할 수 있다. 또한 제공된 원전 자료를 분석한 결과 Catawba Unit2 (W-type 4-loops) 증기발생기에서 가속도계설치 위치는 Tube Sheet 최하단으로부터 약 1 ft 떨어진 곳에 180도 간격으로 2 개가 같은 Elevation에 설치된 것으로 나타났다. 또한 그 부분의 증기발생기 벽 두께는 약 8 인치로 가정하였다(Fig.2).

정확한 충격위치 추정을 위해 증기발생기 원주길이, 각 채널의 충격 신호 도달시간과 충격파의 속도를 이용하여 충격위치를 계산하였다. 신호전달속도는 식(1)을 이용하였고 이 식에서 요구하는 변수는 전달매질의 두께 및 충격파의 주파수값으로서 두께는 8인치로 주어지고, 주파수값은 채널 6의 충격파중 초기 싸인파주기를 역으로 환산하였다.( Fig.1 채널 6 에서 초기 Sine파 형태 ). 채널 6 와 10 사이의 신호도달 시간차는 Fig.1 과 같이 나타나고있으며 이것은 충격질량 및 에너지에 따라 약간씩 차이가 있으나 본 연구에서는 각 Data Set 에서 진폭이 가장 큰 신호를 선택하여 신호도달 시간차를 측정하였고 분석시에는 그것들의 평균값을 사용하였다. 상기 방법에 의하여 구한 신호도달 시간차 및 충격속도를 이용하여 두채널 (채널6 및 10) 간의 거리차는 18.1ft (542cm)으로 나타났고 이것에 의하여 구한 충격위치는 Fig.2와 같이 채널 6로부터 3 ft (90cm) 떨어진 곳으로 A 혹은 A' 인 것으로 추정된다.

### 3-3. 금속파편 충격질량 추정

금속파편 질량은 식(2) 및 (3) 과 같이 충격파의 최대가속도, 중심주파수 및 충격속도의 3 가지 변수중 2개만 알면 충격질량을 추정할수 있다. 이중 충격파의 최대 가속도값 및 중심주파수값은 제공된 Data Set의 충격신호로부터 Spectrum Analyzer 를 이용하여 측정할수 있었고, 충격속도는 Table 1과 같이 주어졌다. 신뢰성있는 분석을 위해 충격신호를 100Hz에서 10kHz 사이로 Bandpass Filtering 을 수행하였다. 그 이유는 60Hz의 전기적 신호를 제거하고, 10kHz 이상의 가속도계의 고유주파수 및 설치에 의해 발생하는 불필요한 주파수대역을 제거하기위함이다. 아울러 측정가능한 강구충격파의 주파수대역이 1 kHz 에서 10 kHz 사이이기 때문이다. 계산에 주로 이용된 신호는 채널 6 에 탐지된 충격파이고 채널 10의 신호는 보완계산시 이용하였다.

충격파의 최대가속도, 중심주파수 및 충격속도의 3 가지 변수중 2개의 변수에 의해 조합된 3 가지의 경우에 대하여 각각 충격질량을 계산하였다. 그 3 가지의 경우는 ① 최대 가속도 및 중심주파수, ② 최대가속도 및 충격속도, ③ 중심주파수 및 충격속도 등의 조합이다. 측정된 값들을 식 (2) 및 (3) 에 대입하여 구한 결과는 다음과 같다.

#### 3-3-1. 최대 가속도진폭 및 중심주파수를 이용한 질량추정 (case 1)

최대진폭은 각각의 Data Set의 5개 동일 충격신호에 대하여 Peak 값을 평균하여 산출하였다. 중심주파수는 초기 Sine Wave 의 주기(T)를 나누어 중심주파수(1/T)로 설정하였다. 이 값 역시 5 개의 동일 충격신호를 평균하였다. 측정된 각 Data Set 에 대한 최대진폭가속도 및 중심주파수값을 식(2) 및 (3)에 대입하여 계산한 결과 Table 2 및 Fig.4 와같이 6 개의 질량값이 추정되었다.

이때 최대진폭값은 채널 6 과 충격위치가 3 ft 떨어진점을 감안하여 3 ft에 해당하는 진폭감쇄율을 적용하여 채널 6 센서에서의 최대 가속도진폭값을 환산하였고 이값을 계산시 사용하였다. 추정된 질량값은 비교적 양호한 일관성을 보이고 있음을 알수있다.

### 3-3-2. 충격파 가속도주파수 및 충격속도를 이용한 질량추정 (case 2)

각각의 Data Set 에 대하여 측정된 가속도주파수 및 Benchmark Data 생산시 주어진 충격속도를 이용하여 식(3)에 의해 질량을 추정하였다. 가속도주파수는 Case 1 에서 적용한 값을 사용하였다. 계산 결과 Table 2 와같이 질량값이 추정되었다. 계산된 질량값은 Case 1 에서 추정된 값보다 약간 낮은 값으로 추정되었으며 그값들은 비교적 Case 1 보다 양호한 일관성을 보이고 있음을 알 수 있다. 그 이유로는 가속도진폭이 주파수보다 충격질량에 더 민감하기 때문에 가속도진폭에 의한 추정값이 오차가 더 크다고 할 수 있다.

### 3-3-3. 최대 가속도진폭 및 충격속도를 이용한 질량추정 (case 3)

각각의 Data Set 에 대하여 측정된 최대 가속도진폭 및 Benchmark Data 생산시 주어진 충격속도를 이용하여 식(2)에 의해 질량을 추정하였다. 그 결과 Table 2 와같이 질량값이 추정되었다. 계산된 직경값은 Case 1 및 2 에서 추정된 값보다 1.5 내지 2 배정도 매우 큰 값으로 추정되었으며 또한 크기순서도 Case 1 및 2 와 는 달리 일관성이 떨어지고 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단된다. 전술한바같이 가속도진폭이 충격질량의 크기를 추정하는데 있어서 주파수값보다는 더 민감하게 작용하기 때문이다. 이 결과로 보면 최대진폭값으로만 질량값을 추정하는 것은 큰 오차를 내포할수있기 때문에 신뢰성이 떨어진다고 할수있다.

## 4. Benchmark Data 분석결과 비교

이상의 결과를 종합하면 Table 2 와 같이 질량 크기의 순서는  $F > C > A > D > B > E$  로 나타났으며 실제 충격파에서 구할 수 있는 최대 가속도값과 가속도주파수를 이용한 Case 1 의 결과를 Benchmark Exercise 결과로 제시하였다. Benchmark Exercise 에는 표 3 과 같이 각국에서 6 개팀이 참여하였다(7). Table 3 의 결과와 같이 KINS의 결과는 충격위치에 대하여 약 14 cm 차이를 보이고 있으며 충격질량에 있어서도 Ball 'B'를 제외하고 약간 낮은 값으로 추정되었다. 만약 충격위치를 900 mm 가 아닌 762 mm 로 계산을 했다면 신호진폭 감쇄효과 때문에 질량값이 더 적게 추정되었을 것이다. 그러나 KINS의 분석결과는 정확성이 비교적 높은 것으로 인정되었고 이 정도의 분석기술은 실제 금속파편탐지 및 진단시 적절하고 유용하게 사용될수 있는 기술을 확보하고

있는 것으로 평가되었다.

## 5. 결 론

LPM Benchmark Exercise를 통하여 금속파편 충격 분석기술의 유용성을 보였고, 실제 금속 파편 존재시 적절하게 적용할 수 있는 분석기술을 확보하고 있음이 확인되었다. 그러나 현재 국내의 분석기술을 더욱 보완, 개선하기 위해서는 Noise 제거를 위한 신호처리기술 개발, 충분한 모의시험을 통한 관련 이론과 신호특성의 재정립 및 분석 Software 의 개선 및 실용화 등을 심도있게 연구하여야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 김용식 외, "원자로냉각재 금속파편 감시계통 신호평가기술에 관한 연구", KAERI/NSC-351/89, 원자력안전센터, 1989
2. 성계용 외, "금속파편충격에 의한 강판의 가속도신호 특성", 한국비파괴검사학회지, Vol.12, No.2, 1992
3. K. Y. Sung et al., "Inspection Experience on Loose Part Monitoring System of YG-3 during Pre-Operational Test ", Proceedings of the KNS Spring Meeting, Pohang, 1994
4. C. Cremer, et. al. Structure-Borne Sound, Springer-Verlag, 1973
5. D. Ross, Mechanics of Underwater Noise, Pergamon Press, 1976
6. C.W. Mayo, et. al "Loose Parts Monitoring System Improvements ", EPRI-NP-5743, 1988
7. G.L.Ziegler and C. W. Mayor, "SMORN VII Loose Parts Benchmark", NEA/NSC/DOC(96)17, OECD NEA, May 1996.

Table 1. Benchmark Data Sets and Their Impact Velocity (unit:ft/sec)

Set	Ball	A	B	C	D	E	F
	1		5.04	9.34	5.01	6.42	13.9
2		3.75	7.52	3.72	5.07	9.30	3.66
3		3.11	5.87	2.88	3.77	7.01	2.84
4		2.48	4.34	2.47	2.50	5.09	2.02
5		1.86	2.86	1.85	1.87	3.32	1.21
6		1.24	1.42	1.23	1.24	1.64	0.81

Table 2. The Summary of Estimated Mass

Data Set		A	B	C	D	E	F
1	Diameter(in.)	3.29	2.12	3.96	2.70	0.97	4.52
	Mass (kg)	2.39	0.65	4.20	1.32	0.059	6.35
2	Diameter(in.)	2.92	1.99	3.63	2.49	0.93	4.29
	Mass (kg)	1.68	0.54	3.25	1.04	0.05	5.42
3	Diameter(in.)	7.74	3.32	7.50	4.87	1.66	6.65
	Mass (kg)	32.1	2.57	28.8	7.90	0.33	21.6

Table 3. The Estimated Impact Location and Mass on LPM benchmark data

Participants	Estimated Impact Location	Estimated Mass (kg)					
		Ball A	B	C	D	E	F
Actual	762 mm	4.31	0.54	8.4	1.81	0.068	14.6
EdF	560	0.7	0.77	2.4	1.0	0.36	4
Laborelec	900	0.5	0.1	0.7	0.25	0.13	1
Siemens	756	4.2	0.89	7.0	1.9	<0.3	> 8
<b>KINS</b>	<b>900</b>	<b>2.4</b>	<b>0.65</b>	<b>4.2</b>	<b>1.3</b>	<b>0.059</b>	<b>6.4</b>
Mitsubishi	N/A	#3	#5	#2	#4	#6	#1
GRS	637	4.3	0.5	8.4	1.8	0.05	14.5

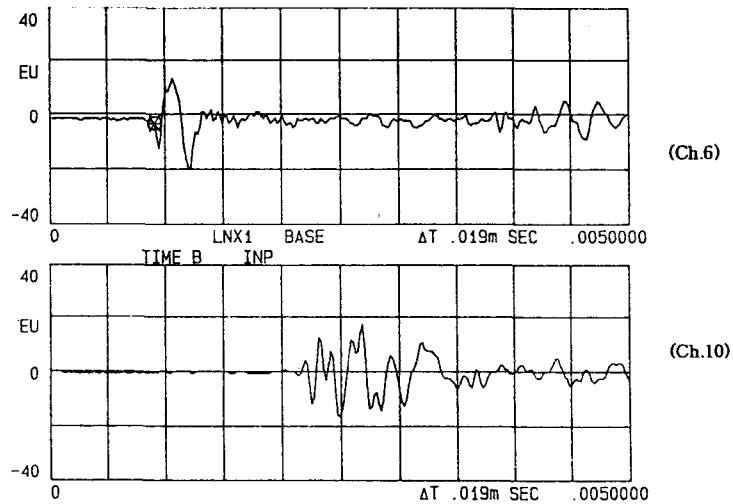


Fig.1 Impact signals of Ch.6 and 10 showing the difference of signal arrival

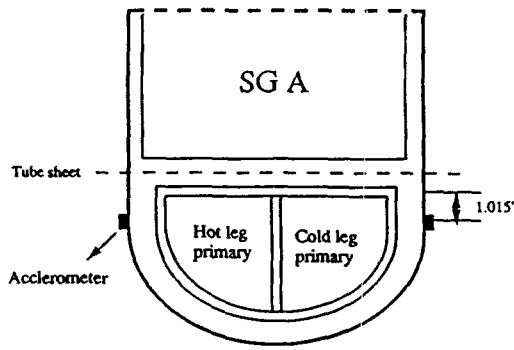


Fig.2 The location of LPM sensors at SG 'A'

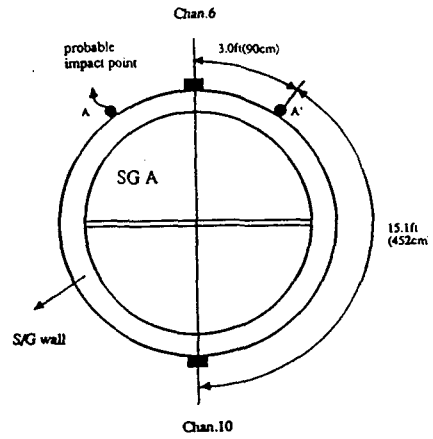


Fig.2 The estimated impact location of SG 'A'

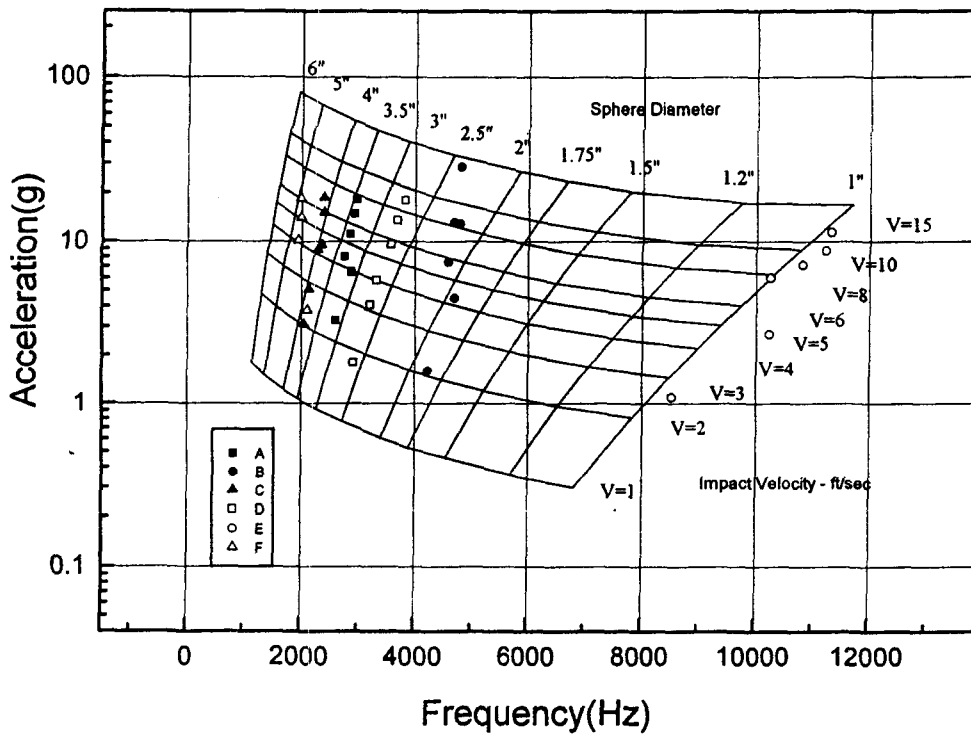


Fig.3 Sphere mass plotted on the metal sphere signal map at three feet from sensor  
The masses were estimated by maximum acceleration and frequency