

금속파편충격에 의한 강판의 가속도신호 특성

성 계 용* · 윤 용 구**

Acceleration Signal Characteristics of Steel Plate Impacted by Metallic Loose Parts

K. Y. Sung* and Y. K. Yoon**

Abstract Acceleration signal characteristics of a steel plate, impacted by steel balls, were studied in an attempt to apply the experimental results to the impact location and mass estimation of metallic loose parts in the cooling system of nuclear power plants.

Experimental results show that the variation of maximum acceleration amplitude and impact contact time due to the change of ball mass and impact velocity can be well explained by the Hertz impact theory. The frequency spectral pattern shifted slightly in spite of the increase of impact velocity and impact location. Ball mass, however, strongly affected the frequency spectral pattern. Hence the frequency spectrum can be used for estimation of the mass of unknown loose parts in the cooling system.

1. 서 론

원자력발전소의 냉각재계통에 금속 이물질이 존재할 경우 핵연료, 노심 내부구조물 및 증기발생기 전열관을 손상시켜 방사성 물질 누출등 안전성에 지대한 영향을 가져올 수 있고 가동을 저하로 인하여 원전의 경제성에도 큰 손실을 가져올 수 있다. 이에 따라 금속파편 탐지계통(Loose Part Monitoring System ; LPMS)의 필요성을 인식하여 외국에

서는 규제지침서^{1), 2)}를 발간하여 발전소 설계 및 운전의 기본적인 지침을 제시하고 있다. 그러나 이러한 규제지침서들에 의해 설계된 LPMS는 금속파편의 존재유무를 탐지하는 데는 사용할 수 있지만 금속파편 존재시 후속조치를 결정하는 중요한 사항인 금속파편의 질량크기 및 충격위치에 관한 정량적이고 직접적인 정보를 제공하지 않기 때문에 충격파의 특성을 통하여 금속파편의 질량크기 및 충격위치를 추정하고자 많은 연구가 수행되

* 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety)

** 한국과학기술원(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

접수 : 1992년 5월 20일(Received May 20, 1992)

었다.

충격위치 추정에 관한 연구로는 가속도계 (Accelerometer)간의 충격과 도달시간차 및 신호 감쇠율을 이용하는 방법³⁾과 가속도계에 감지된 2개의 서로 다른 특성과인 굽힘파 (Bending Wave)와 의사종파(Quasi-Longitudinal Wave)의 도달시간차와 각각의 전파 속도를 이용하는 방법이 제시되었다.^{4), 5)} 질량 추정에 대해서는 가속도신호의 진폭크기 및 진폭감쇠율을 이용하는 방법과 충격가속도 주응답주파수 분포를 이용하는 방법이 연구 되었다.^{6), 7), 8)}

현재 국내 원전에서도 LPMS가 설치, 운영 되고 있지만 충격신호 특성에 대한 기술적 지식 및 진단기술 부족으로 실제 이물질 존재시 적절한 탐지 및 진단이 의문시 되고 있다. 본 연구는 강판과 강구를 이용하여 충격 응답가속도 및 주파수스펙트럼 특성, 충격과 전파특성등을 실험하고 이론치와 비교 분석하여 금속파편 충격위치 및 질량추정에 적용 되는 적절한 방법을 제시하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 이론적 고찰

2-1. 강구와 강판간의 충격 이론

강판에 강구가 수직으로 낙하할 때 접촉부 분에서의 거동은 두 물체가 탄성충돌한다는 가정과 강구에 비해 강판이 매우 크다는 가정하에 Hertz이론으로 나타낼 수 있다.^{9), 10)} 충격지점에서의 충격력은

$$F = -m\ddot{a} = n\alpha^{3/2} \dots\dots\dots (1)$$

으로 나타낼 수 있고 여기서

m : 강구의 질량, α : 충돌시 탄성변형 깊이

n : $4\sqrt{R/3\pi(K_1+K_2)}$, R : 강구의 반경

$K_{1,2} = (1-\mu_{1,2}^2)/\pi E_{1,2}$

$E_{1,2}$ $\mu_{1,2}$: 강구와 강판의 Young을 및 Poisson비

식 (1)의 양변에 $\dot{\alpha}$ 를 곱한후 적분하면

$$\int m\ddot{a} \dot{\alpha} = -\int n\alpha^{3/2} \dot{\alpha}$$

$$\dot{\alpha}^2 - V_0^2 = -\frac{4n}{5m} \alpha^{5/2} \dots\dots\dots (2)$$

이고, $\dot{\alpha}=0$ 일때

$$\alpha_{max} = \left(\frac{5m}{4n} V_0^2\right)^{2/5} = K_h E^{0.4} R^{-0.2} \dots\dots\dots (3)$$

이다. 여기서 E : 강구의 운동에너지,
 V_0 : 충돌직후 강구의 속도

$$K_h = \left(\frac{15}{16} \left\{ \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right\}\right)^{0.4}$$

또 강구와 강판의 충돌접촉시간동안 변형된 강판의 변위 및 가속도는 근사적으로 다음 식으로 가정할 수 있다.

$$\alpha(t) = \alpha_{max} \sin\left(\frac{k_f t}{T_d}\right) \quad (0 \leq t \leq T_d) \quad (k_f : \text{상수})$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = A(t) = -\alpha_{max} \left(\frac{k_f}{T_d}\right)^2 \sin\left(\frac{k_f t}{T_d}\right) \quad (0 \leq t \leq T_d) \quad (4)$$

식 (3)을 식 (4)에 대입하면

$$A(t) = -k_h E^{0.4} R^{-0.2} \left(\frac{k_f}{T_d}\right)^2 \sin\left(\frac{k_f t}{T_d}\right)$$

$$A_{max} \propto E^{0.4} R^{-0.2} T_d^{-2} \dots\dots\dots (5)$$

이다. 또 식 (2)로 부터

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left(V_0^2 - \frac{4n}{5m} \alpha^{5/2}\right)^{1/2}$$

이므로, 적분하면

$$T_d = C_0 \alpha_{max}/V_0 \quad (C_0 : \text{상수}) \dots\dots\dots (6)$$

가 된다. 식 (3)을 식 (6)에 대입하면 접촉

시간은 다음과 같다.

$$T_d = C_0 k_b \frac{E^{0.4} R^{-0.2}}{V_0} \propto E^{-0.1} m^{0.43} \dots\dots (7)$$

$$\propto H^{-0.1} m^{0.33} \dots\dots (8)$$

식 (7) 및 (8)을 식 (5)에 대입하면

$$A_{max} \propto E^{0.6} m^{-0.93}$$

$$F_{max} = m A_{max} \propto E^{0.6} m^{0.067} \propto H^{0.6} m^{0.67} (9)$$

가 된다. 결과적으로 강구의 낙하높이 (H)가 일정하면 접촉시간 및 최대 충격력은 강구의 질량(m)의 0.33승 및 0.67승에 비례하고 강구의 질량이 일정하면 접촉시간은 낙하높이의 0.1승에 반비례하고 최대충격력은 낙하높이의 0.6승에 비례한다.

강구가 강판에 충돌시 강판에 부착된 가속도계에서 탐지되는 가속도 신호의 주파수 스펙트럼은 초기충격력 시간이력에 따라 크게 좌우된다. 즉 충격파는 충격후 짧은 시간 동안(~수십 msec)만 큰 진폭을 가진 Sine파 모양을 유지하면서 진행한다. 응답가속도의 주파수스펙트럼은 식(4)와 같이 k_f 값에 따라 주응답주파수가 결정되는데 주파수스펙트럼은 결정된 주응답 주파수를 중심으로 분포하게 된다. Raman은 초기반주기가 접촉시간보다 1.6배 빠르다고 제시하였다.¹¹⁾ 따라서

$$T/2 = T_d/1.6, T_d = 0.8T \quad (T : \text{주기})$$

가 되고, 주응답 주파수는

$$f = 1/T = 0.8/T_d \quad (k_f = 0.8) \dots\dots (10)$$

가 되어 식 (8)로부터

$$f \propto H^{0.1} m^{-0.33}$$

가 된다.

상기 식으로부터 강구의 낙하높이가 일정할 때 충격응답주파수는 질량의 0.33승에 반비례하고 강구의 질량이 일정할 때에는 낙하높이의 0.1승에 비례함을 알 수 있다.

2-2. 충격파의 전파속도

강구가 강판에 충돌시 여러가지 형태 (Mode)의 충격파가 발생될 수 있지만 가속도계에 민감하게 작용하는 파는 의사충파와 굽힘파이다.⁸⁾ 의사충파는 굽힘파보다 진행속도가 훨씬 빠르기 때문에 굽힘파보다 가속도계에 먼저 도달하지만 진폭이 작아 쉽게 감지되지 않는다. 판형에서의 의사충파 속도는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.^{12), 13)}

$$C_1 = \left(\frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \right)^{1/2} \dots\dots (11)$$

여기서 E, μ : 강판의 Young을 및 Poisson비
 굽힘파는 강판의 횡진동(Transverse Vibration)에 의해 생성되는데 다른 파에 비해 진폭이 매우 크기 때문에 가속도계에 쉽게 탐지되고 금속충격물질의 물리적 성질을 분석하는데 가장 중요한 파로 이용되고 있다. 굽힘파의 상속도(Phase Velocity)는 다음 식과 같이 유도될 수 있다.^{12), 13)}

$$C_b = C_1 \left(\frac{1.8hf}{C_1 + 4.5hf} \right)^{1/2} \dots\dots (12)$$

굽힘파의 속도는 구조물의 두께(h)와 진동 주파수(f)의 함수로서 실제 강구와 강판이 충돌하였을 때에 주응답주파수를 중심으로 각각 다른 주파수의 파가 수없이 생성되어 그 파들의 진행속도는 모두 다르게 전파된다. 따라서 굽힘파는 진행할수록 분산하게 되고 파형도 변형되어진다. 이러한 분산파(Dispersive Wave)의 속도는 상속도로 측정하는 것은 무의미하며 통상적으로 군속도(Group Velocity) 개념에 의해 굽힘파의 속도를 정의하게 된다. 따라서

$$\text{군속도 } C_g = d\omega/dK$$

$$\text{상속도 } C_s = \omega/K$$

$$(\omega : 2\pi f, K : \text{Wave Number})$$

이므로 군속도를 구하면 다음식과 같이 유도된다.

$$C_g = \frac{3.6C_1^2 hf}{C_1(C_1 + 9hf)} \dots\dots (13)$$

3. 실험 결과 및 고찰

강판(Steel Plate)에 강구(Steel Ball)를 일정 높이에서 낙하시킴으로서 금속파편이 일차냉각수의 유동에 의해 증기발생기 외부구조물이나 원자로벽에 충격을 가하는 조건을 모의하고자 하였다. 실험에 사용된 강판의 제원은 700×700×20(mm)이고 강구질량은 0.033-28.1g이며 강판의 네 모서리에 칼날받침대(Knife Edge)로 고정시켜 놓았다. 충격신호를 측정할때는 오실로스코프 및 16 bits PC를 사용하였다.

3-1. 충격응답가속도 및 접촉시간측정

질량 0.25g에서 16.4g까지 각각 다른 질량의 강구를 낙하높이 2.0cm에서 50cm까지 변화시키면서 가속도계 중심(Epicenter)에 낙하시켜 충격응답 가속도를 측정하였다. Fig. 1은 충격속도가 일정할 때(낙하높이가 일정할 때) 질량변화에 따른 최대가속도 값을 최소자승법으로 도식한 것으로 이때 실험값은

$$F_{max} \propto m^{0.49-0.67} \quad (H: \text{일정})$$

이고 평균값은 0.55로서 식 (9)의 이론값인 0.67에 비하여 상당히 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 이론치가 탄성충돌을 가정하여 설정된 Hertz이론에서 도출된 것이기 때문에 6.9g이상의 강구충돌시에는 강판에 약간의 소성변형을 일으켜 에너지손실이 일어나 충격응답가속도가 감소되었기 때문으로 사료된다. 실험값중 6.9g이상의 값을 제외하고 계산한 결과는

$$F_{max} \propto m^{0.61-0.75} \quad (H: \text{일정})$$

이다. 평균값은 0.69로서 이론치 0.67과 매우 잘 일치한다. 또 강구질량이 일정할 때 낙하높이 변화에 대한 최대가속도 값을 측정할 결과 Fig. 2와 같이

$$F_{max} \propto H^{0.56-0.68} \quad (m: \text{일정})$$

으로서 평균 기울기값은 0.60으로 이론치와 매우 잘 일치하고 있다. 이상의 측정 결과로 보아 강구가 강판 두께에 비하여 비교적 작다면 충격질량이나 충격에너지는 Hertz 이론에 의해 강판의 응답가속도 크기로 표현될 수 있다.

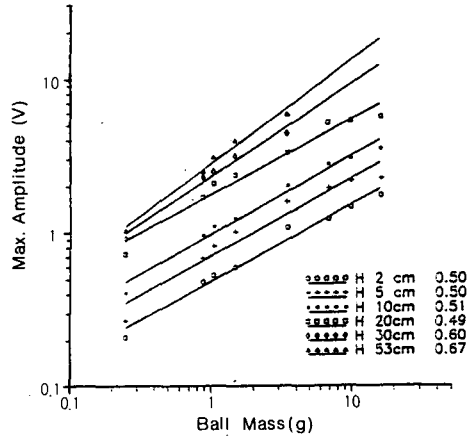


Fig. 1 Relation between ball mass and maximum acceleration amplitude for different drop height.

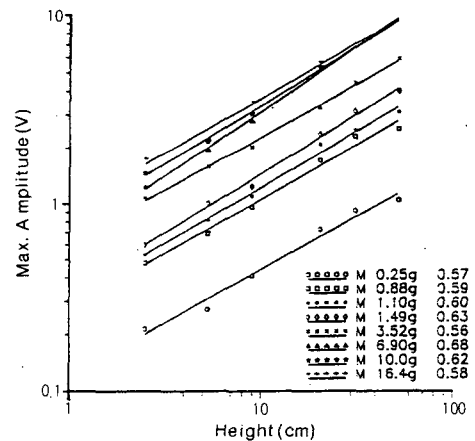


Fig. 2 Relation between drop height and maximum acceleration amplitude for different ball mass.

충격접촉시간 측정시 사용된 강구질량은 1.10g-16.3g까지로 낙하높이 2.0cm에서 20.0cm까지 변화시키면서 가속도계 중심에 낙하시켜 충격접촉시간을 측정하였다. 측정결과 Fig. 3 및 4와 같이

$$T_d \propto m^{0.31-0.33} \quad (H: \text{일정})$$

$$T_d \propto H^{-0.08-0.13} \quad (m: \text{일정})$$

이고 평균값은 각각 0.32 및 -0.11로서 식

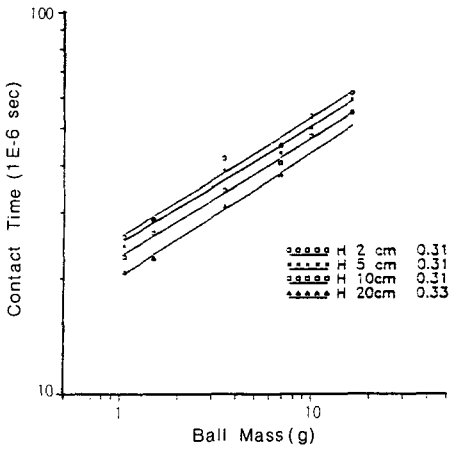


Fig. 3 Relation between ball mass and contact time for different drop height.

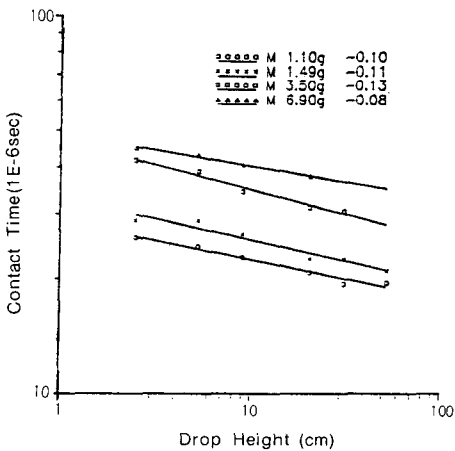


Fig. 4 Relation between drop height and contact time for different ball mass.

(8)의 이론치 0.33 및 -0.1 과 매우 잘 일치한다. 이상의 결과로 보아 강구의 강판충돌시 접촉시간은 Hertz 이론에 의해 적절히 묘사될 수 있다. 특히 접촉시간은 낙하높이의 변화(충격 에너지 변화)에 대해서는 둔감하고 질량변화에 대해서는 비교적 민감하기 때문에 충격 질량을 추정하는데 주요변수로 이용될 수 있다.

3-2. 충격응답 주파수 측정

강구의 질량 및 충격에너지의 변화에 따른

충격 응답가속도 주파수스펙트럼 변화를 알기 위해 0.03g~28.1g의 강구를 2.0cm~30.0cm의 높이에서 가속도계 중심 혹은 일정한 거리에 낙하시켜 충격신호를 200~500KHz의 충분한 샘플링율로 취득한 후 Fast Fourier Transform에 의해 주파수를 분석하였다.

충격가속도 주파수는 식 (4)와 같이 접촉시간 및 k_r 값에 의해 계산될 수 있다. Ramna은 $2k_r$ 인 $T_d/(T/2)$ 값을 1.6으로 제시하였는데 실제 측정된 결과는 질량에 따라 1~2사이

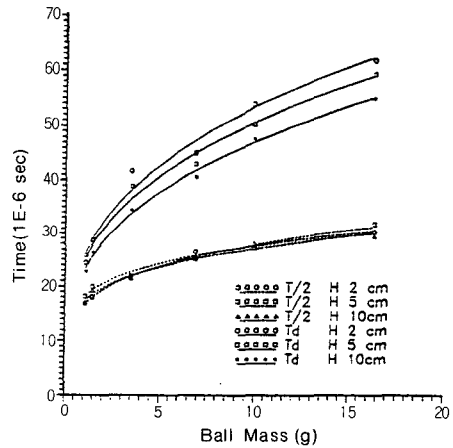


Fig. 5 Ball mass versus contact time(T_d) and half-period($T/2$) for different drop height.

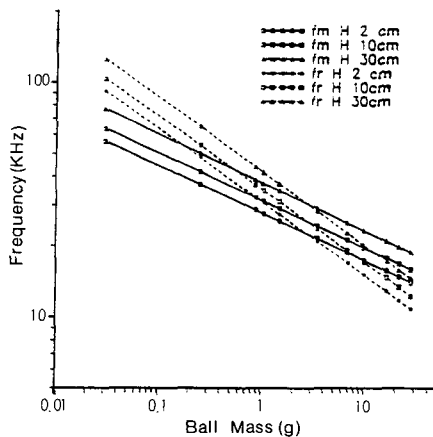


Fig. 6 Relation between ball mass and response frequency for different drop height.

값을 나타내고 있다.(Fig. 5). 실제 측정된 $T_d / (T/2)$ 값 및 Raman 상수 1.6에 의해 추정된 질량별 응답가속도 중심 주파수 값을 f_m 및 f_c 이라하면 그 결과가 Fig. 6에 나타나 있다.

실제 10cm 높이에서 가속도계 중심에 낙하시켰을 때 측정 분석한 질량별 주파수 스펙트럼(Fig. 7)과 Fig. 6에 나타난 f_m 및 f_c 값을 비교해보면 f_m 과 f_c 중 어느것이 실제 측정치에 더 접근하고 있는가를 구분하기는 매우 힘들다. 그 이유는 측정된 주파수 스펙트럼에는 강구의 특성주파수뿐 아니라 가속도계 고유공진 주파수 및 강판의 고유 진동수등이 존재하기 때문에 실제 주파수스펙트럼은 응답 주파수를 중심으로 형성되지 않을 수도 있기 때문이다. 따라서 정량적으로 분석된 f_c 값이나 f_m 값에 의해 강구의 질량을 추정하는 것은 큰 오차를 가져올 수 있다. 그러나 f_m 값이나 f_c 값에 의해 알 수 있는 중요한 사실은 강구의 질량이 클수록 충격응답 주파수스펙트럼 밀도가 낮은 주파수 대역으로 이동한다는 점이다. 이러한 점에 착안하여 각 질량에 대한 누적밀도(Cumulative Density)를 도시

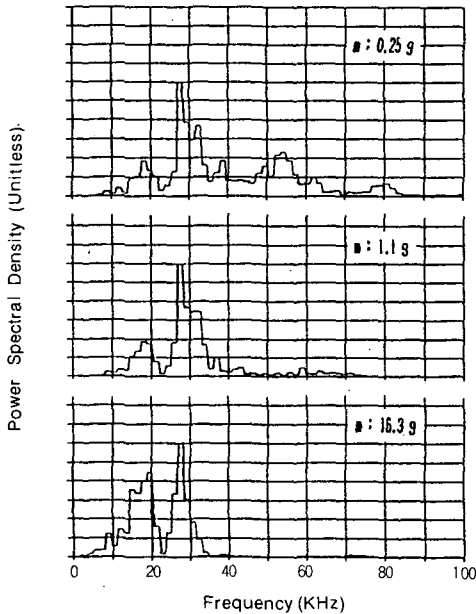


Fig. 7 Power spectral density for different ball mass.

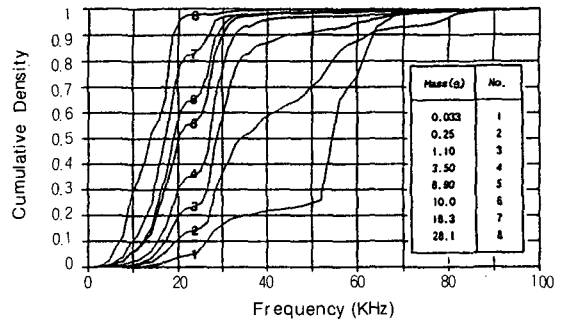


Fig. 8 Relation between frequency and cumulative density for different ball mass.(H : 10cm, Epicenter)

해 보면 Fig. 8과 같이 각 질량의 크기에 대한 차이가 명확하게 나타나 누적밀도는 금속 파편의 질량 추정에 매우 유용하게 이용될 수 있다.

낙하높이를 변화시켜 강구를 가속도계 중심에 낙하시켰을 때 충격응답주파수는 이론적으로 질량이 일정할 때 낙하높이의 0.1승에 비례하여 변화한다. 따라서 강구를 2~30cm 높이(낙하속도 60~240cm/sec)에서 낙하시켰을 때 누적밀도는 Fig. 9와 같이 응답주파수 스펙트럼은 낙하높이가 낮을수록 저주파영역으로 약간 이동하는 것으로 나타나고 있지만 전체적으로 볼때 낙하높이에 대한 주파수스펙트럼 변화는 질량에 의한 변화에 비하여 거의 유사한 형상을 가지고 있다고 할 수 있다. 따라서 충격응답주파수스펙트럼은 충격속도변화에 대해 거의 일정한 주파수스펙트럼을 갖는다고 가정할 수 있다.

가속도계 중심에서 2-55cm 떨어진 곳에 강구를 낙하시켜 거리에 대한 주파수스펙트럼 변화를 측정하였다. 각각의 질량에 대하여 측정된 주파수스펙트럼의 누적밀도는 Fig. 9와 같다. 질량이 클때, 즉 주응답주파수가 낮을 때는 충격거리에 관계없이 비슷한 분포를 보이고 있지만 질량이 작을 때에는 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 강구의 질량이 작을수록 접촉시간이 짧아지고 FFT시 응답주파수의 분포가 넓게 퍼지는 특성과 충격거리가 멀어질수록 파형태 변환(Wave Mode Conversion)에 의한 여러가지

파의 주파수가 혼합되어 가속도계에 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 거리변화에 대한 전체적인 누적밀도의 모양은 질량에 의한 변화에 비해 크게 변하지 않는다고 볼 수 있으며 충격거리에 관계없이 질량이 같으면 주응답주파수는 가속도계 중심에서의 주파수스펙트럼과 거의 유사하다고 가정할 수 있을 것이다.

결론적으로 낙하높이 및 거리가 적절한 구간내에서 임의의 곳에 강구를 낙하시켰을 때 충격속도 및 거리는 주파수스펙트럼에 크게 영향을 미치지 못하지만 질량은 주파수스펙트럼 변화에 크게 작용하므로 주파수스펙트럼 특성분석은 강구질량 추정에 주요 수단으로 이용될 수 있다.

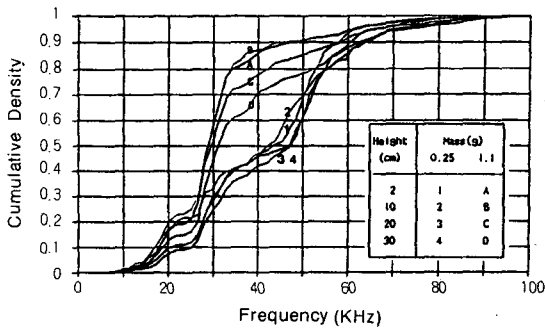


Fig. 9 Relation between frequency and cumulative density for different drop height. (m : 0.25g & 1.1g, Epicenter)

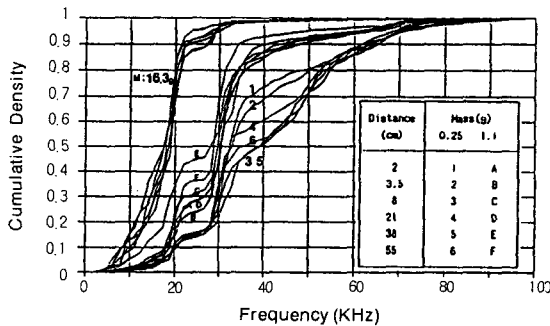


Fig. 10 Relation between frequency and cumulative density for different drop distance. (m : 0.25g, 1.1g & 16.3g, H : 10cm)

3-3. 충격파의 전파속도 측정

강구의 충격에 의해 가속도계에 지배적으로 반응하는 파는 굽힘파로서 전파속도는 식 (13)과 같이 구조물의 두께와 응답주파수에 따라 변한다. 전파속도의 측정방법은 일정한 거리간격(Δl)으로 가속계를 부착한 후 금속충격을 유발하여 신호도달시간 차이(Δt)를 측정하여 $\Delta l / \Delta t$ 으로 군속도를 계산한다. Fig. 11에서는 의사종파속도(C_g)인 5460m/sec를 구하여 강판두께(h) 20mm의 조건하에 주파수에 따른 상속도와 군속도의 이론값을 도시하였고 강구의 질량에 대한 주응답 중심주파수가 Fig. 6에 있는 f_m 값이라는 가정하에 주파수에 대한 측정된 군속도를 도시하였다. 그 결과 주파수 20~60KHz에서 이론적인 군속도는 2760~3240m/sec이고 측정값은 3140~3340m/sec를 나타내어 이론값이 측정값보다 약간 낮은 값을 나타내고 있으나 비교적 두께가 잘 일치한다고 볼 수 있다. 또 측정된 군속도는 강판두께(h)와 충격주파수(f)에 의존하는 굽힘파의 특성을 그대로 보여주고 있다. 따라서 금속파편의 응답주파수와 구조물의 두께만 알면 이론적으로 굽힘파의 전파속도를 유도하여 충격위치 추정에 적절히 활용될 수 있을 것이다.

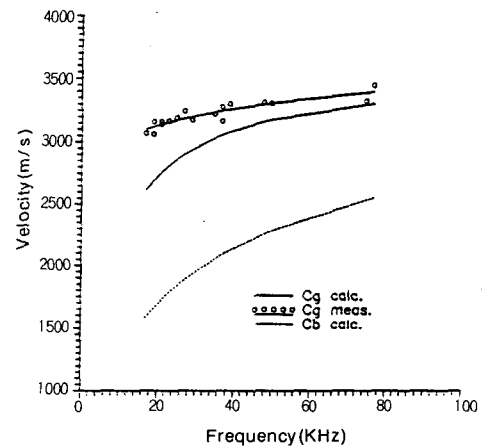


Fig. 11 Relation between frequency and phase and group velocity.

3-4. 금속파편 질량 추정실험

지금까지 수행된 강구와 강판의 충격실험 결과를 이용하여 실제 원자로 냉각재내에 존재할 수 있는 여러가지 금속파편 형태를 모의하여 충격질량을 추정하는 실험을 수행하였다. 실험방법은 700×700×20(mm)의 강판에 임의의 높이(5~40cm사이) 및 위치에 4가지 형태의 모의 금속파편(구형, 입방체, 판형, 봉형)을 낙하시켜 발생하는 급협파의 진동 가속도의 주파수를 분석하여 질량추정을 시도하였다. 즉 주파수 스펙트럼은 질량에 크게 좌우되고 충격속도 및 위치에 거의 무관하다는 실험결과를 이용하여 정량적으로 충격질량을 판별할 수 있는 주파수 스펙트럼비를 사용하여 질량을 추정하고자 한다.

$$\text{주파수 스펙트럼 비} = \frac{\int_0^{22} P(f) df}{\int_{22\text{KHz}}^{100} P(f) df}$$

$P(f)$: Power Spectral Density

22KHz를 중심으로 저주파수 대역 및 고주파 대역을 비교하여 각각의 질량에 관한 주파수 스펙트럼비를 계산하였다. 22KHz를 분기점으로 설정한 근거는 질량 변화에 대한 누적밀도의 변화가 가장 뚜렷하고 27~30 KHz근방에서 나타나는 공진주파수 영향을 제거하기 위한 것이다.

실험결과 강구의 경우 Fig. 12와 같이 질량이 작은 경우 약 0.7Decade에서 질량이 큰 경우 0.5Decade의 불확실성(Uncertainty)을 보여주었고 다른 시편들에 대해서는 Fig. 13과 같이 약 1.0~0.8Decade의 불확실성을 나타내었다. 강구의 경우 오차의 원인은 충격시마다 낙하높이 및 충격위치가 다르기 때문에 발생하는 주응답주파수의 차이에서 기인하는 것으로 판단되고 판형, 입방체 및 봉형의 경우에는 낙하높이 및 충격위치 차이 뿐만 아니고 충격접촉시의 접촉면적 및 질량중심이 강구와 다르기 때문에 Hertz이론을 다른 형태의 시편에 적용할 시 발생하는 오차

로서 판단된다.

그러나 임의의 금속파편에 대한 주파수분석에 의한 질량추정 방법은 최대 충격 가속도 진폭에 의한 질량추정 방법에 비해 훨씬 오차가 적은 것으로 나타나고 있으며⁷⁾ 원거리 충돌에 의한 충격파의 최대 충격가속도의 구분이 어려울 경우에도 질량을 구할 수 있기 때문에 주파수 스펙트럼 분석에 의한 질량추정은 실제원전에서 유용한 수단으로 적용할 수 있을 것이다. 아울러 냉각재 유속이 일정하여 충격속도가 거의 일정하다고 가정하면 불확실성의 범위를 좀더 줄일 수 있을 것이다.

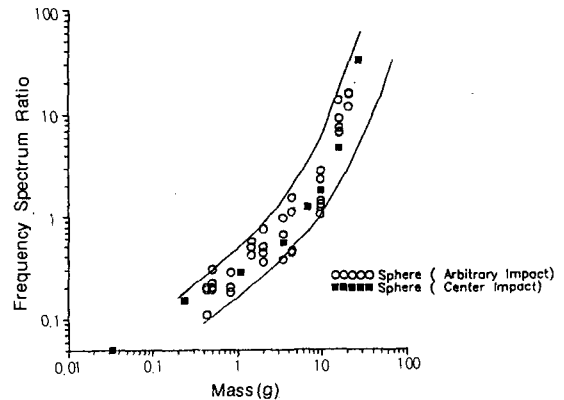


Fig. 12 Relation between mass and frequency spectrum ratio for steel ball.

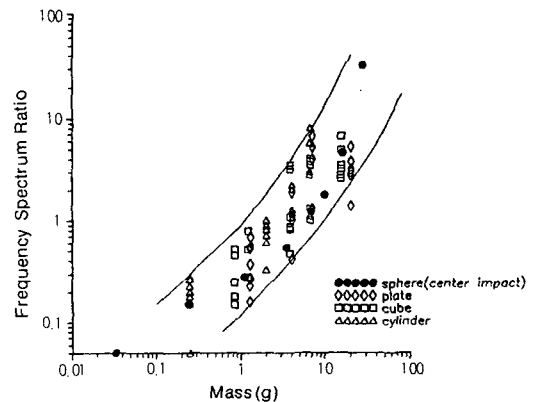


Fig. 13 Relation between mass and frequency spectrum ratio for steel plate, cube and cylinder.

4. 결론

1. 강구의 질량 및 충격속도 변화에 대한 강판의 최대응답가속도 진폭 및 접촉시간 측정결과 측정값은 Hertz이론을 적용한 이론값과 거의 일치하였다.

2. 강판의 주응답 주파수스펙트럼은 강구의 충격속도와 충격위치에 관계없이 거의 일정한 스펙트럼을 갖는 반면 강구의 질량 변화에 크게 의존한다. 이 성질을 이용한 주파수스펙트럼비를 사용하여 여러가지 형태의 시편(구형, 입방체, 봉형, 판형)에 대한 질량 크기를 추정할 결과, 그 불확실성의 범위가 강구는 0.5~0.7Decade이고 다른 시편은 0.8~1.0Decade로서 가속도 최대 진폭을 이용한 방법에 비해서 불확실성이 적으며 미지의 금속파편 질량을 추정하는데 유용한 방법으로 사용될 수 있다.

References

1. U. S. NRC, Reg. Guide 1. 133, "Loose Part Detection Program for the Primary System of Light Water Reactors"(1981)
2. DIN 25475, "Acoustic Monitoring Systems for Loose Particle Detection ; Characteristics, Design and Operational Procedures"(1983)
3. R. C. Kryster and F. Shahrokhi, NUREG /CR-2344(1981)
4. B. J. Olma, Progress in Nuclear Energy, Vol. 15(1985), pp. 583-594
5. G. Castanie, et. al. Progress in Nuclear Energy, Vol. 21(1987), pp. 515-525
6. T. Tsunoda, et. al. Progress in Nuclear Energy, Vol. 15(1985), pp. 569-576
7. T. Tsunoda, et. al. Nuclear Science and Technology, Vol. 23(1986), pp. 968-978
8. C. W. Mayo, et. al. EPRI NP-5743(1988)
9. S. Timosenko and J. Gooder, Theory of Elasticity, 3rd ed., McGraw-Hill Book Company(1970)
10. C. M. Harris and C. E. Crede, Shock and Vibration Handbook Vol. I, McGraw-Hill Book Company(1961)
11. C. Raman, Physical Review, Vol. 15(1920), pp. 277-284
12. L. Cremer, et. al. Structure-Borne Sound, Springer-Verlag(1973)
13. D. Ross, Mechanics of Underwater Noise, Pergamon Press(1976)