' 99 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

Hertz 이론을 이용한 금속파편의 질량추정 알고리즘
(A mass estimation algorithm for loose part using Hertz theory)

김정수*, 황인구*, 정철환*, 박진호*, 함창식*,
* 한국원자력연구소,
양재현°, 이용호°
°한국 전력공사 영광 1 발전소

요 약

금속파편 감시계통(LMPS: Loose Part Monitoring System)에서 금속파편신호가 발생할 때 냉각재계통의 안전성을 판단하기 위해 녹취된 신호로부터 금속파편의 충격위치 및 충격 질량의 추정이 필요하다. 본 논문에서는 Hertz 이론을 이용하여 질량을 추정하는 알고리즘을 개발하였다. Hertz 이론은 무한 평면상에서 질량을 추정하는 이론이므로, 이를 실제 발전소에 적용하기 위해서는 기본 알고리즘에 대한 수정이 필요하다. Hertz 이론을 이용하여 기본 알고리즘을 세우고, Mockup 을 사용하여 실험을 수행하면서 수정 알고리즘을 개발하였다. 또한 이 알고리즘을 검증하기위해 실험실의 원자로 mock-up 및 실제 발전소에서 금속파편 신호를 이용하였다. 금속파편의 추정질량과 실제질량을 비교해본 결과, 개발된 알고리즘에 의한 분석결과가 외국의 분석사례보다 더 나은 결과를 보여주었다.

Abstract

An algorithm estimating the mass of loose part has been developed based on the Hertz theory which is generally used for estimating the mass and energy of a spherical metal impacted on the infinite plate. The theory was modified considering the amplitude and energy attenuation effects in order to apply for nuclear power plant. To verify the new algorithm, a variety of impact tests has been performed with various steel balls at laboratory mock-up and real power plant, respectively. As a result, the mass estimation for the tested balls showed better result than the former Hertz algorithm's

1. 서 론

LPMS 는 원자력발전소 냉각재 계통내의 금속파편에 의한 구조물들의 취약 또는 파손으로부터 안전성을 확보하기 위한 시스템이다. 금속파편 들은 계통내에서 유체유동, 응력,부식, 피로 및 구조요소 간의 비 정상적 마찰 등의 원인에 의해 구조물로부터 분리되면서 생성될 수 있다. 또한 이들은 원전 건설기간 또는 핵연료 재장전, 기타 보수활동시 외부로부터 계통내로 유입될 수 있다. 현재까지 외국에서 개발되어 운용되고 있는 LPMS 는 원자로 냉각재 계통 주요 기기의 압력경계 외부표면에 충격센서(Accelerometer)를 부착하여 압력경계 내부구조물에 금속파편이 부딪칠 때, 내부구조물을 따라 전파되는 충격파를 감지하여 그 크기가 미리 설정된 경보준위를

초과하면 충격신호가 발생하고 주제어실에 알려주는 비안전성 계측 계통이다.[1-3]

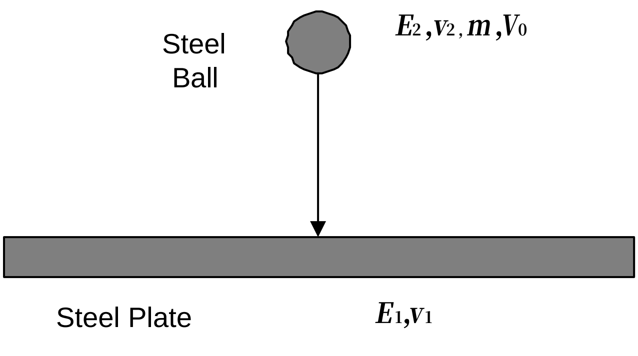
현재 운영되고 있는 LPMS는 금속 파편에 의한 이상 신호가 발생하게 되면 경보가 울리고 자기 기록 테이프가 동작하여 이상 신호의 이력을 기록한 뒤, 이 기록된 신호를 바탕으로 운전원이 경험적으로 그 위치와 특성을 평가하고 이에 따라 적절하게 조치한다. 그러나 현재와 같은 수행 방식으로는 빠른 대응을 요하는 큰 결함이 발생하였을 때나 운전원의 경험 부족으로 인한 오판을 하게 되는 경우에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 충격에 의한 경보 신호가 발생한 즉시 컴퓨터에 그 신호가 기억시키고 그와 동시에 충격 신호를 분석하여 발생한 금속 파편의 위치 및 질량을 추정할 수 있는 자동 분석 알고리즘이 절실히 요구된다.

한편, 충격신호를 사용하여 충격 질량 및 에너지를 평가하기 위한 이론들은 Hertz 이론 등을 포함하여 여러 이론 등이 제시되어 있다[4-6]. 이러한 이론들은 무한히 큰 평판하에서 충격공급원이 강구로 가정하에 연구되었다. 하지만 이와 같은 가정과 달리 발전소의 경우 금속파편들은 강구가 아닌 대부분이 제어봉 제어핀이나 나사와 같은 막대기형 금속물체 들이 대부분이다. 그래서 본 논문에서는 Hertz 이론을 이용하여 기본 알고리즘을 수립하고, 이를 발전소에 사용하기 위해 실험실의 원자로 mock-up에서 시험하여 기본 알고리즘을 수정하였고, 또한 실제 발전소의 금속파편 발생신호를 이용하여 개발한 알고리즘을 검증하였다. 본 논문의 2장은 Hertz 이론과 관련된 기본 알고리즘을 제시하고, 3장은 실험실 mockup에서 충격신호를 취득하여 질량 추정에 관한 결과를 비교 및 분석하였고, 4장에는 발전소 데이터를 이용하여 질량 추정결과를 비교 및 분석하였으며, 5장은 결론을 맺는다.

2. 본 론

2.1 Hertz 이론

금속파편의 특성 중 질량 평가를 위한 가장 기본적인 이론으로 Hertz의 충격이론이 제시되어있다[6]. 즉, 무한히 넓은 금속평판에 강구(Solid Sphere)를 그림 1과 같이 충돌시킬 때, 평판의 주된 응답 함수가 충격접촉시 반주기(Half Period)로 하는 굽힘파(Bending Wave) 형태로 나타난다고 가정하면 Hertz의 이론으로 다음과 같이 금속구에 대한 접촉시간동안의 최대변위 D_{max} 및 접촉시간 T_d을 (1)식으로 나타낼 수 있다.



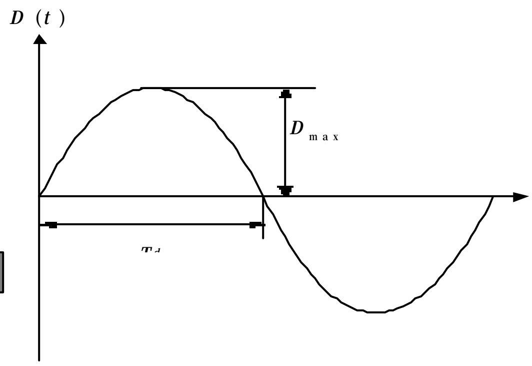


그림 1. 강구와 금속평판의 충돌실험　　　그림 2. 강구와 금속평판의 충돌실험

$$D_{\max} = K_h (mV_0^2)^{0.4} R^{-0.2} \quad (1)$$

$$T_d = 2.94 \frac{D_{\max}}{V_0} \quad (2)$$

여기서, m : 강구의 질량, V_0 : 강구의 충돌속도 (m/sec) , v_1 & v_2 : plate 와 강구의 possion 비 E_1 & E_2 : plate 와 강구의 possion 비(N/m^2), R : 강구의 반경, K_h : Hertz 의 충돌 계수 ($m^{0.8} N^{-0.4}$) 그리고 K_h

$$K_h = \left[\frac{15}{16} \left(\frac{1 - v_1^2}{E_1} - \frac{1 - v_2^2}{E_2} \right) \right]^{0.4} \quad (3)$$

이 이론을 이용하면 강구가 금속파편에 충돌했을 때 최대변위와 충격 접촉시간을 알 수 있다. 하지만 접촉시간과 최대변위는 우리가 원하는 충격속도나 가속도 정보와 같은 식으로 더 이상 도출할 수 없으므로, 강구가 금속판에 충돌하는 변형모양을 정현파의 모양으로 가정해야 한다.

2.2 충격 거동에 대한 정현파 가정

강구가 금속판에 충돌하는 모양을 Hertz 이론에 근거하여 정현파의 모양으로 가정하면 그림 2 와 같으며, 다음과 같은 중요 변수들을 도출 할 수 있다. 그림 2 에서 강구가 금속판에 충돌 시 변형되는 변위는 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(t) = D_{\max} \sin\left(\frac{p}{T_d} t \right) \quad (4)$$

$$D'(t) = V(t) = \frac{p}{T_d} D_{\max} \cos\left(\frac{p}{T_d} t \right) \quad (5)$$

$$D''(t) = A(t) = -\left(\frac{p}{T_d} \right)^2 D_{\max} \sin\left(\frac{p}{T_d} t \right) \quad (6)$$

또 금속판에 가해지는 힘은 (7)식과 같다.

$$F(t) = m\ A(t) \quad (7)$$

여기서 t 의 범위는 $0 < t < T_d$ 이다. 즉, 강구가 평판에 충돌한 후 충격접촉시간 T_d 동안에만 의미를 갖는다. 또한 최대 충격력은 cosine 함수부분이 1 이 될 때이며, (8)식과 같이 표현된다.

$$V_{max} = V(0) = V_0 = \pi/T_d\ D_{max} \quad (8)$$

이 식을 이용하여 강구가 강판에 접촉하는 접촉시간은 (9)식과 같이 표현될 수 있다.

$$T_d = \pi\, D_{max} / V_0 \tag{9}$$

이 식을 앞의 Hertz 이론과 비교하면 약 0.7 %정도의 오차를 보이고 있다. 따라서 충격신호를 해석할 때 충격신호를 충격거동에 대한 정현파로 가정하여도 큰 오차를 내지않고 금속파편의 충격속도, 가속도 및 에너지를 구할 수 있다. 그리고 접촉시간과 반주기와의 관계는 접촉시간 측정 실험을 통하여 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$T = T_d / 1.6 \tag{10}$$

여기서, T : 주기, T_d : 접촉시간을 나타낸다. 이 식을 이용하여 실제 충격응답 가속도 파형의 최초 반주기(half wave)는 접촉시간보다 1.6 배 짧음을 알 수 있다.

2.3 금속평판의 가속도 응답

Hertz 의 충격이론 및 정현파 가정에 의해 얻어진 가속도 정보는 충격을 가하는 물질인 금속파편에 의한 정보이다. 그러나 우리가 얻을 수 있는 정보는 충격이 가해지는 원자로 혹은 증기발생기의 외벽에 부착된 가속도계로부터 전해지는 충격파이다. 그러므로 앞 식에서 구해진 정보를 다시 금속판에 관한 정보로 바꾸어야 실제 충격파 분석이 가능하다. 식(11)은 강구를 중심으로 가속도 및 충격력을 나타내는 식이다.

$$A_{plate} = F_{max} / m = k_h^{-1} m^{-0.4} V_0^{1.3} R^{0.2} \tag{11}$$

식(11)에서 언급한 강구에 대한 정보를 Plate 에 대한 정보로 다시 정의해야 한다. 충격을 가하는 순간의 힘은 강구와 금속평판에 같은 크기로 나타나므로 금속평판에 대한 최대 충격력은 (11)식의 F_{max}를 사용하여도 무방하다. 그리고 금속평판에 가해지는 가속도 정보는 최대 충격력과 접촉시간동안에 응답하는 금속파편의 유효질량으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$A_{plate} = F_{max} / M_{eff} \tag{12}$$

여기서 M_{eff}는 충격접촉시간동안 응답하는 금속평판의 유효질량이며, 충격지점에서 접촉시간과 충격파의 전달속도의 곱으로 표현되는 반지름의 제곱에 π를 곱하고 강판의 두께 및 강판의 밀도를 곱하여 구할 수 있다.

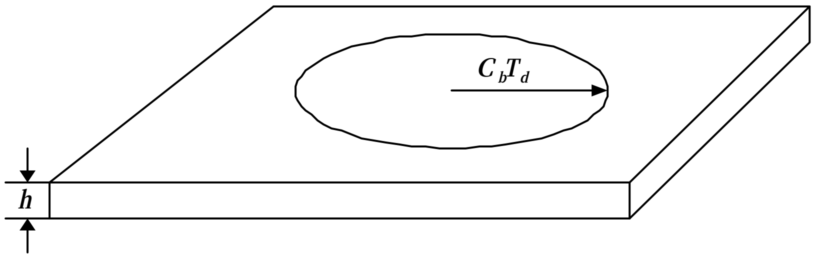


그림 3. 금속평판의 유효질량

따라서 강구가 강판에 충돌 시 강구의 질량에 비례하는 강판의 질량은 (13)식과 같이 표현할 수 있다.

$$M_{eff} = \pi\,(C_b\,T_d)^2\,h\,\rho_{steel} \qquad (13)$$

[C_b = 금속평판 굽힘파(Bending Wave) 전파속도 = C_{LI} ($1.8hf_a$ / C_{LI} + $4.5hf_a)^{0.5}$]
여기서, C_{LI} = 5,270 ㎧/sec , T_d = 충격 시 접촉시간, h = 금속평판의 두께(ft), ρ_{steel} = 금속평판 밀도를 나타낸다.

2.4 진폭감소 특성에 대한 보상

(12),(13)식으로 얻을 수 있는 데이터는 충격지점과 센서위치가 일치하기 때문에 충격지점에서 얻은 데이터를 분석할 수도 있지만 일반적으로 충격지점에서 어느 정도 떨어져 있는 센서로부터 취득한 정보를 분석하게 된다. 그러므로 충격지점에서 센서까지 충격파가 전파되는 동안 매질의 종류와 매질의 내부 물질 등 여러 가지 감쇄영향에 의해 충격파의 진폭이 감소하여 여러 중요한 정보들이 손실된다. 따라서 충격지점에서 센서까지의 거리 때문에 생기는 진폭감쇄와 Damping 에 의한 진폭감쇄를 보상하고, 전달되는 충격파의 전파 특성을 알면 센서로부터 얻어진 신호를 분석하여 충격지점에서 금속파편의 특성을 평가할 수 있다. 그러므로 거리와 Damping 에 따른 충격파의 진폭감쇄특성에 대한 보상은 충격점과 센서와의 거리차에 의한 중요 데이터의 손실을 줄인다는 의미에서 매우 중요하다[8].

2.4.1 거리에 따른 진폭감소

거리에 따른 진폭감소는 충격점과 센서사이의 거리에 의한 충격파가 전파되는 동안 진폭이 감소되는 현상이다. 이러한 특성은 Hankel Function 에 의해 보상할 수 있으며, 충격위치로부터 거리 r 만큼 떨어진 위치에서의 진폭은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D(r) = D_0\left[H_0(kr) - H_0(-jkr)\right] \qquad (14)$$

여기서, $H_o(kr) = 2/\pi j \ln(kr)$ {|kr| <<1}, $H_o(kr) = (2/\pi kr)^{0.5}\exp(-(x-\pi/4)j)$ {|kr| >>1} , D_0 : 충격 위치에서의 진폭, D(r) : 충격위치에서 거리 r 위치에서의 진폭, k : $2\pi f / D_o$, H_o : Hankel Function of 2^{nd} kind.

2.4.2 Damping 에 따른 진폭감소

Damping 에 의한 진폭감소의 원인은 매질 및 매질 주변 물체인 냉각재에 의한 효과이며 주변유체밀도, 주파수, 금속판의 두께, 밀도 등 몇 가지 변수에 의해 보상할 수 있다.

$$D(r) = D_0\, e^{-\left(\frac{ph\ f}{C\ g}\right)r} \qquad (15)$$

여기서 ρ_0 : 주변 유체 밀도, C_0 : 주변 유체에서의 음속, f : 전파 주파수, ρ_s : Steel Plate 밀도, h : steel 두께, M_f : C_b/C_o , Cg : 충격파의 군속도, η : 감소 계수,

$$C_g = \frac{3.6\, C_{LI}^2\, h_f}{C_b \left(C_{LI} + 9 h_f \right)} \qquad h = \frac{r_0 c_0}{2 p f r_s h} \times \frac{M_f}{\sqrt{M_f^2 - 1}}$$

충격위치와 센서사이의 거리가 도출되면 D(r)값이 정해지고, (15)식에 의해 충격위치에서의 진폭 D_0를 구할 수 있게 된다. 따라서 이러한 정보로부터 충격위치에서의 신호를 계산한 후 접촉시간을 알아내고, 이를 이용하여 충격위치에서의 충격접촉시간, 질량 및 에너지 등에서 강구로 가정한 금속 파편의 반경을 구해낼 수 있으며, (16)식과 같은 간단한 식으로 질량을 계산할 수 있다.

$$m = 3/4\, \pi\, R^3 \rho_{steel} \qquad (16)$$

여기서, m : 강구의 질량, R : 강구의 반경, ρ_{steel} : 강구의 밀도.

3. 실 험 I (원자로 Mockup)

원자로 mockup 은 실물크기의 1/7 로 축소한 형태로 그림 4 에 있다. 그림 4 에서 나타난것과 같이, 주요 구성품은 구조물 지지대, 급수 및 배수 장치, 가속도계 설치패드등이 설치되어 있다. 원자로 모형 구조물은 한국 표준형 원자로 크기의 약 1/7 축소된 것이며, 10mm 두께의 스테인레스 강으로 제작되었다. 가속도계 설치패드는 60° 간격으로 측면에 18 개, 하부헤드에 14 개, 상부헤드에 14 개가 설치되어 있다[7].

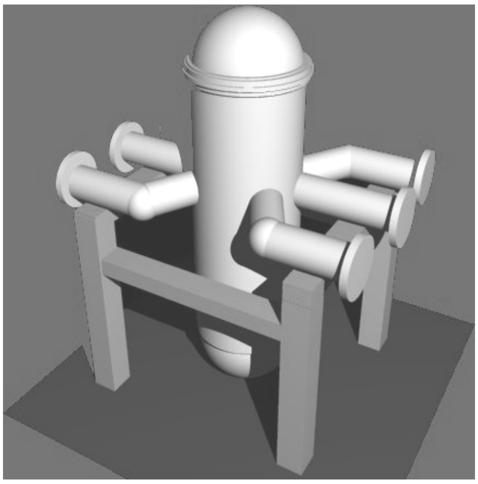


그림 4. 원자로 모형

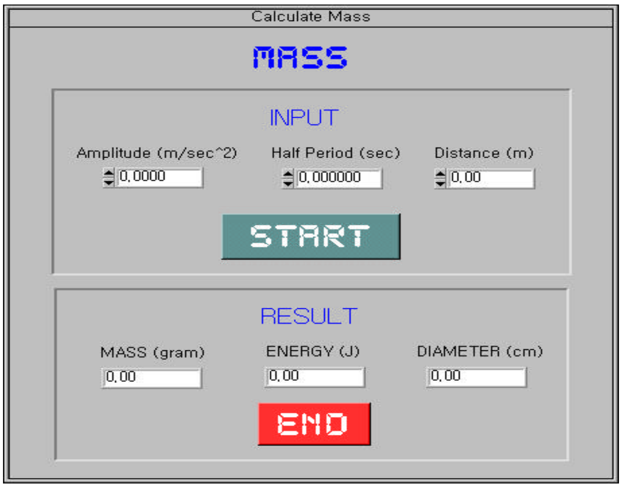


그림 5. 질량 추정 프로그램

금속파편의 질량을 판별하기위해서는 충격지점과 센서와의 거리, 충격파의 초기 반주기, 최대 진폭값이 필요하다. 충격지점과 센서와의 거리는 충격위치추정 프로그램으로부터 취득하고, 최대 진폭값은 초기 반주기까지 나타난 최대 진폭값을 의미하기 때문에 신호로부터 알 수 있다. 이와 같은 입력정보와 매질의 특성 및 신호의 특성을 고려하여 보상과정을 거쳐서 질량을 판별한다. 그림 5 는 질량을 판별하기위한 프로그램을 보여주고 있다. 표 1 은 그림 5 의 프로그램을

이용하여 질량을 추정한 결과이다. 표 1 로부터 직경 1.9cm, 질량 30.5g 의 강구를 센서에서 30cm, 70cm, 110cm 의 거리에서 충격을 가했을 경우 질량을 판별한 결과이다. 이 때 각각의 거리에 대해 3 번씩 실험을 시도하였다. 그 결과 직경의 경우 평균 22 %정도의 오차를 보이고 있다.

표 1. 직경 1.9cm 강구의 평가 결과

거리-시도	질량(g)	오차(%)	직경(cm)	오차(%)
30-1	49.96	63.80	2.2634	19.13
30-2	50.14	64.39	2.3142	21.8
30-3	53.14	75.21	2.3216	22.19
70-1	52.42	71.87	2.3437	23.35
70-2	49.64	62.75	2.3015	21.13
70-3	51.35	68.36	2.3276	22.5
110-1	54.34	78.16	2.3720	24.84
110-2	50.71	66.26	2.3179	21.99
110-3	52.54	72.26	2.3455	23.44

4. 실 험 II

실제 발전소의 충격신호를 취득하여 질량을 추정해 보았다. 그림 6 와 7 은 증기발생기 1 차측 센서로부터 충격신호를 tape recorder 을 이용하여 받은 데이터를 보여주고 있다. 본 논문에서 적용한 발전소의 경우, 증기발생기에는 가속도 센서가 1 차측 및 2 차측에 각각 한 개씩 붙어 있으며, 증기발생기가 3 개 설치되어 있으며 이중 2 곳에서 발생하였다. 증기발생기의 반지름은 2.115 m이고, 정상상태의 유속은 7.8 m/sec 이며, hot chamber 내의 유속은 약 1.23 m/sec 이다. 그리고 두 센서와의 거리는 1.5 m 이고 이들 센서의 sampling time 은 $3*10^{-5}$ sec 이다. 그림 8 과 9 는 동일 시간대의 데이터를 추출한 그림이다. 그림 8 과 9 의 데이터를 그림 5 의 질량 추정 프로그램을 이용하여 질량을 추정해보았다. 질량을 추정하기 위해서는 먼저 충격위치가 필요하기 때문에, 이를 추정하기 위해 원 교차법(Circular Intersection Method)을 이용하였다. 추정결과 충격위치는 센서로부터 약 1.9 m 정도 였으며, 금속파편 신호의 최고치는 139. 763 m/sec 이고, 초기 반파는 75.37 usec 로 분석되었다. 이 정보를 질량 추정프로그램에 넣어 질량을 추정한 결과 약 500 – 600 gram 정도로 추정하였다. 이 결과를 실제 증기발생기내의 금속파편의 실제질량과 비교한 결과가 표 2 에 있다. 또한 표 2 에는 국외 신호 분석기관에서 추정한 결과가 함께 비교하였다. 추정값과 실제값 사이에는 비교적 큰 오차를 보이고 있다. 이는 Hertz 이론의 경우 무한 평면상에서 이론을 수립한 것으로, 이 이론을 이용하여 추정알고리즘을 수립했으므로 어느 정도의 오차가 발생된 것으로 판단된다. 실제로 원자로 mockup 상에서도 상당한 차이가 남을 알 수 있다. 하지만 외국의 신호분석 전문회사가 제시한 값 보다 실제값에 더 근접하는 추정값을 보여주었다.

표 2. 추정값 과 실제값의 비교표

추정값 (I)(본 논문)	추정값(II)(외국회사)	실제값
약 500 – 600 gram	약 1.5 pound(600gram)	약 200 gram
약 300 – 400 gram	약 1 pound(450gram)	약 100 gram

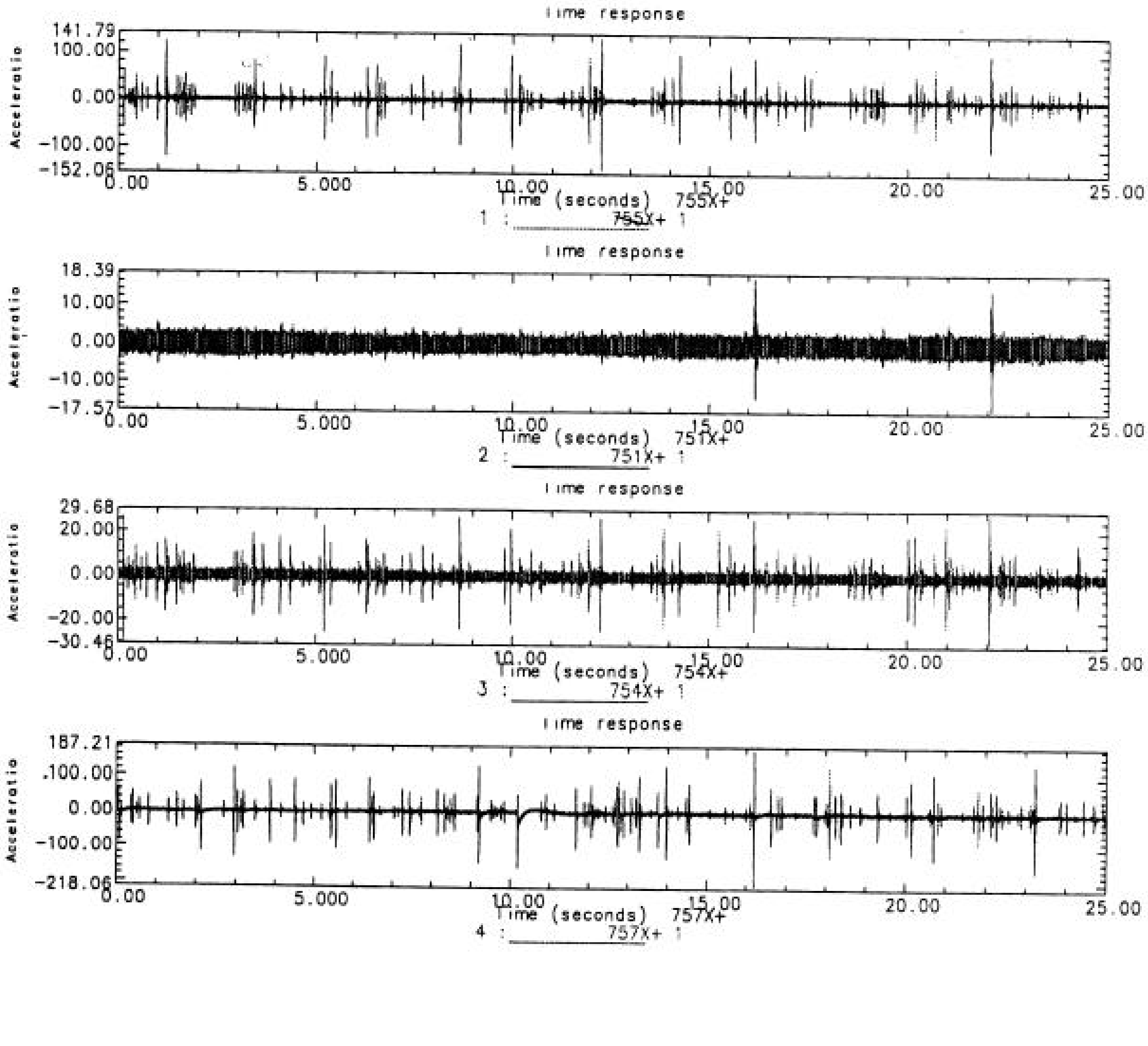


그림 6. 실제 충격신호

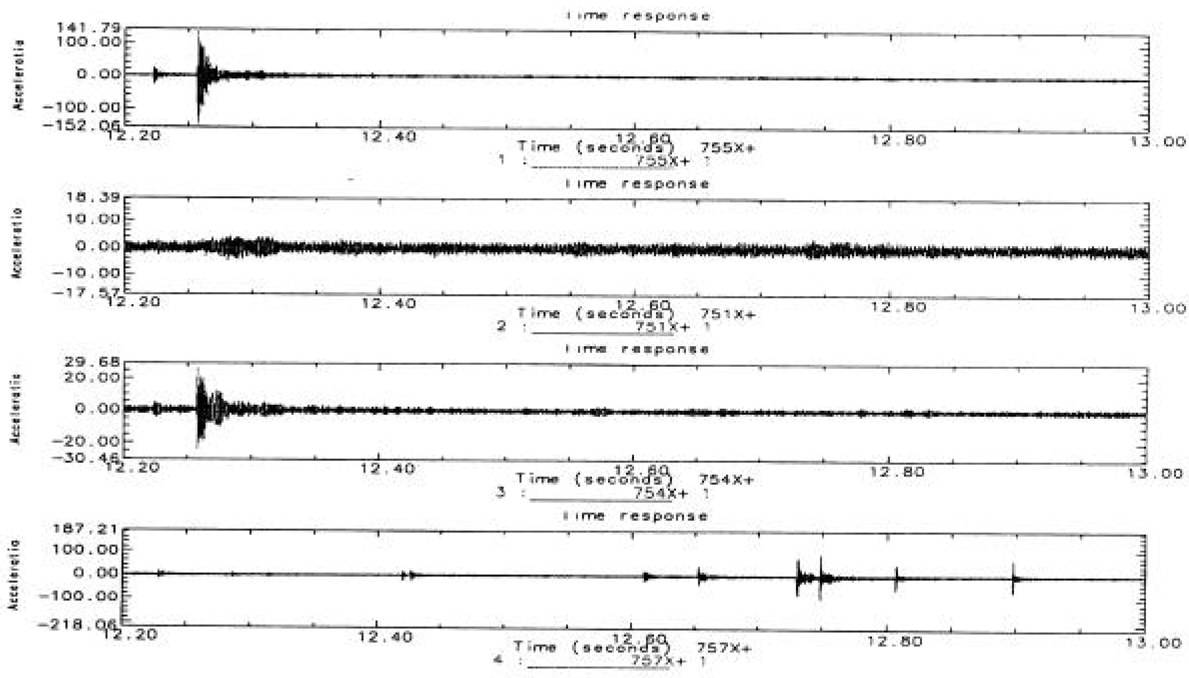
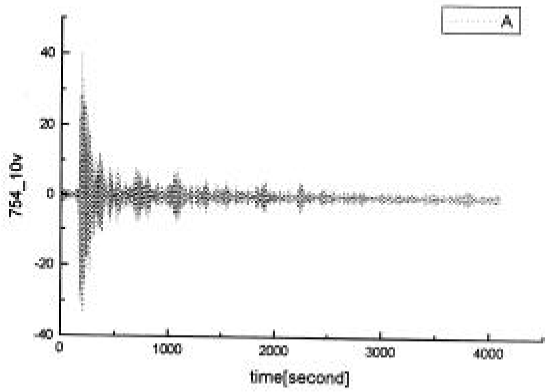


그림 7. 실제 충격신호 확대파형



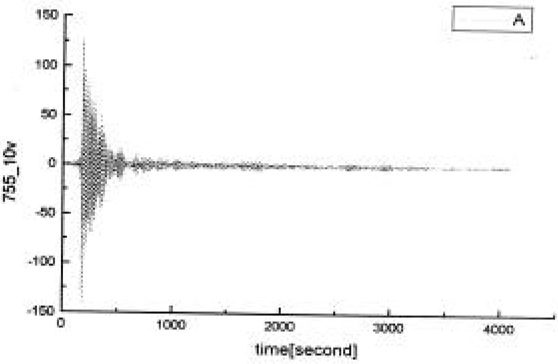


그림 8. 충격신호 확대파형(I)

그림 9. 충격신호 확대파형(II)

5. 결 론

본 논문은 원자로내의 금속파편 신호를 이용하여 질량을 추정하는 알고리즘을 개발하였고, 이를 실험을 통하여 입증하였다. 원자로 mock up 상에서 실험한 결과 추정오차가 직경의 경우, 약 20 - 30% 정도의 오차율을 보이고 있다. 그리고 이 알고리즘을 실제 발전소의 충격신호에 적용하여 추정한 결과 추정값과 실제값 사이에 상당한 오차를 보이고 있다. 이는 Hertz 이론을 근간으로 하여 알고리즘을 개발하였으므로, 다소 오차율이 큼을 알 수 있었다. 그리고 실제 구조물의 경우, 구조물의 복잡한 현상등으로 인하여 이러한 오차율이 훨씬 더 크게

나타날 수 있다. 하지만 국외의 신호분석 업체의 분석결과 보다 본 논문에서 개발한 결과가 더 개선됨을 보여주었다. 즉, 국내 금속파편 신호에 대한 질량 추정 알고리즘을 국내기술로 개발했다는 점에서 상당한 의의가 있다고 할 수 있다. 이러한 알고리즘을 이용하여 차세대 발전소나 기존발전소에 적용하면, 원전의 안전성 향상에 상당한 도움을 줄 것으로 예상된다. 향후 연구방향으로는 이러한 오차를 줄이기 위해 인공 지능 기법인 Neural Network 을 이용하여 질량 추정 알고리즘을 개발할 계획이다.

참 고 문 헌

1. EPRI NP-5734, Loose –Parts Monitoring System Improvements, March, 1988.
2. ReG. Guide 1.133, Loose-Parts Detection Program for the Primary System of Light Water Reactors, U.S.NRC, May, 1981.
3. Technical Manual, Digital Metal Impact Monitoring Systems(DMIMS) for Korea Nuclear Unit 5 & 6.
4. I.K Rhee, et,al, "Development of Loose Part Signal Location Estimating Technique in High Pressured Structure" , KAERI/CM/94.
5. Joseph A.Thie, Power Reactor Noise, American Nuclear Society, 1981.
6. W.K.Shin, etc.,"A study on the plant Diagnostic Techniques Using Reactor Noise", KAERI/NSC-454/89.
7. 이일근외, "고압구조물의 이상신호발생 위치 검출 기술개발", KAERI/CM-146/96.
8. L. Cremer, et.al, Structure-Borne Sound, New-York: Springer-Verlag, 1973.