

# 원전내 금속파편 충격위치 및 질량 예측을 위한 연구

송영중\*, 이일근, 김택환, 김현수  
한남대학교 대학원 전자공학과  
dspsong@ee.hannam.ac.kr

## A Study on Estimation for both Impact Location and Mass of Metallic Loose Parts in Nuclear Power Plant

Young-Joong Song\*, Il-Keun Rhee, Taek-Hwan Kim, Hyun-Su Kim  
Dept. of Electronic Engineering, Hannam Univ.  
dspsong@ee.hannam.ac.kr

### 요 약

본 논문에서는 원자로의 몸통부위와 상, 하부 헤드에 존재하는 금속파편에 의한 충격위치 예측을 위한 알고리즘에 금속파편의 질량을 동시에 판별하는 프로그램을 접목시켜 금속파편의 충격위치와 질량을 동시에 판별할 수 있는 통합 환경 LPMS(Loose Parts Monitoring System)에 관한 연구를 수행하였다. 또한 모의실험을 통하여 본 연구에서 제안된 통합 환경 LPMS 알고리즘이 금속파편의 위치와 질량 예측을 함에 있어서 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

### I. 서 론

원자로 내부 피입쇠의 이탈이나 원자로 유지보수 또는 연료 재장전 기간중 외부로부터의 유입에 의해 원전내에 존재하는 금속파편은 고온, 고압의 유체 유동으로 인해 계통내 구조물의 파손등을 야기시켜 대형사고의 원인이 될 수 있다. 그러나 안전성을 크게 저해시키지 않는 금속파편이 존재할 경우, 원전의 가동을 멈춘다면 오히려 막대한 경제적 손실을 불러온다. 따라서 금속파편 발생여부 탐지, 위치평가, 그리고 질량의 판별은 대형사고의 예방차원에서 뿐만 아니라 원전의 계속가동여부를 판별하는 중요한 정보를 제공한다.

현재 운용중인 LPMS는 원자로 냉각재계통 주요기기의 외부표면에 가속도계(Accerometer) 센서를 부착

하고 이를 통해 충격파를 탐지 하며, 레코더에 충격파를 저장하여 숙련된 전문가가 이미 취득한 충격파와 비교분석하는 방법을 취하고 있다. 그러나 이러한 방법은 숙련된 전문가에 의하여 복잡하고 장시간을 요하는 판독과정이 필요한 단점을 지닌다.

본 논문에서는 원전내 금속파편으로 인한 충격파를 가속도계로부터 취득하여 정확한 위치평가와 질량판별을 동시에 수행할 수 있는 방법을 실현하였다.

본 논문의 제 2장에서는 본 연구에서 사용된 금속파편의 충격위치평가와 질량판별기법에 관하여 기술하고 실제 원전을 축소된 모형에서 취득한 충격파를 이용하여 수행된 모의 실험 결과를 검토, 분석한 후, 제 3장에서 결론을 맺는다.

### II. 금속파편의 충격위치평가 및 질량판별 기법 구현

본 연구에서 제안된 통합 LPMS는 금속파편의 위치평가 및 질량판별을 동시에 실행할 수 있다. 이 통합 LPMS의 흐름도는 그림 1과 같으며 크게 신호입력, 충격위치 평가, 충격파편의 질량판별, 결과출력으로 구분된다. 질량판별이 위치 평가보다 뒤에 이루어 지는 이유는 질량판별 과정에서 충격위치 정보를 이용하여 여러가지 손실들에 대한 보상을 하기 위함이다. 각각의 세부사항은 다음과 같다.

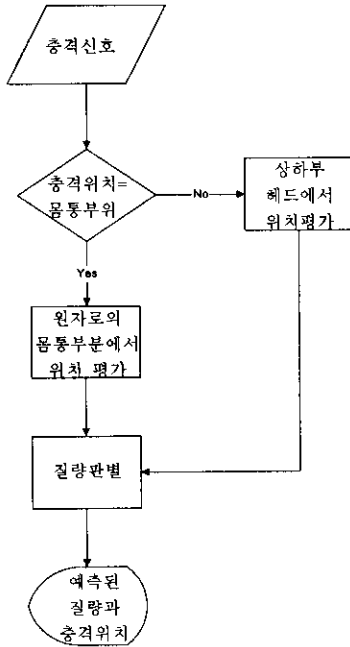


그림 1. 통합 LPMS의 흐름도

### 2.1. 충격위치 평가

충격위치의 평가는 통계적으로 원자로 내부에 금속 파편이 가장 잘 모이는 부분을 고려하여 크게 두 부분에서 수행한다. 즉, 원통모양의 원자로 몸통부분과 반구모양의 상,하부 헤드부분에 가속도계센서 (Accelerometer)를 부착하여 금속파편이 원자로 내벽에 충격을 가할때의 충격신호를 수집한다. 센서는 몸통부분과 헤드부분에 각각 3개를 설치하였다. 충격위치평가 방법에는 원교차법(Circle Intersection Method)과 삼각법(Triangulation Method)[1]이 있다. 이들에 대한 자세한 사항은 참고문헌에 언급되어 있으며 본 절에서는 간단한 사례를 들어 설명하고자 한다.

먼저, 원자로 몸통부분에서의 충격위치 평가는 원교차법을 이용하여 구현하였다. 원교차법은 모델링 과정에서 삼각법보다 용이하다는 장점이 있다. 즉, 삼각법을 이용한 방법은 구현과정에서 대칭성에 의해 2개의 충격점을 찾기때문에 실제 충격위치를 계산하는 과정이 포함되어야 한다. 그러나 원교차법을 이용하면 각 센서로부터 충격지점까지의 거리가 직접 계산되는 장점이 있다.

그림 2는 원교차법을 이용하여 원자로 몸통에서 위치평가를 한 결과를 보여 준다.

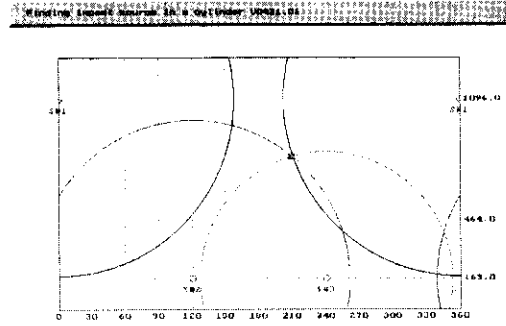


그림 2. 원교차법을 이용한 충격위치 평가 결과

원교차법에서는 원통면을 양의 각도로 펼친 후 각각의 센서에서 충격지점까지의 거리를 반지름으로 하는 원을 그린다. 이때 대칭성에 의해 생기는 문제점을 해결하기 위하여 0° 와 360° 지점은 동시에 나타내도록 한다. 센서를 120° 와 240° 하단에 각각 설치하고 360° 상단에 설치 한 후 270°, 높이 80cm에서 충격파편이 발생 한 경우의 평가 결과는 그림 2와 같다. 모의실험에 의하면 비교적 정확한 위치를 평가할 수 있다.

다음으로 반구형의 원자로 상,하부헤드 부분에서 위치평가에 대하여 기술한다. 반구형의 구조물에서 위치평가는 개선된 원교차법[2]을 이용한다. 반구형에서 충격위치평가를 위하여 3개의 가속도계센서를 (R, 60°, 0°), (R, 60°, 120°), (R, 60°, 240°)와 같이 60°의 같은 원주상에 120° 간격으로 설치하였으며 이때, 모의 실험을 위한 원자로모형 상부헤드의 반지름(R)은 33cm이다. 평가결과는 반구형을 정사영한 원에 표시하도록 하였다. 그림 3은 반구형 구조물의 (R, 30°, 100°)부분에서 충격을 가했을 경우를 평가한 것으로서 우수한 결과를 보인다.

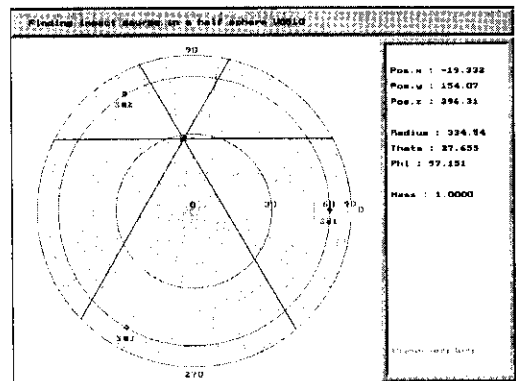


그림 3. 상부헤드에서 충격위치 평가

## 2.2. 금속파편의 질량 판별

금속파편의 질량을 판별하기 위해서는 충격지점과 센서사이의 거리와, 충격파의 초기 반주기, 최대 진폭값이 필요하다. 센서와 충격위치사이의 거리는 앞절에서 취득한 정보이며, 최대 진폭값이란 초기 반주기까지 나타난 최대 진폭값을 의미한다. 이와 같은 입력정보와 매질의 특성과 신호의 특성을 고려한 보상과정을 프로그래밍하여 질량을 판별하였다. 그림 4는 질량을 판별하기위한 프로그램 입력력 창을 나타낸다.

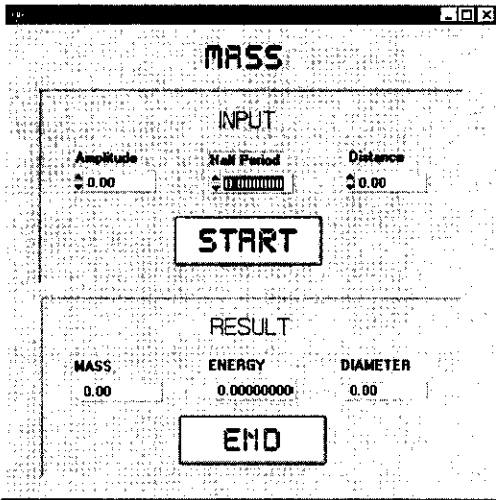


그림 4. 질량판별 프로그램 입력창

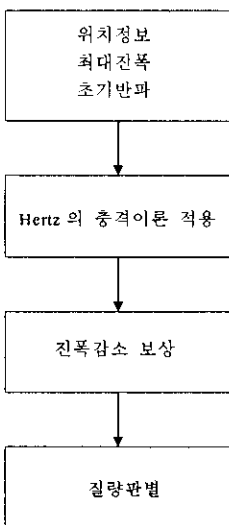


그림 5. 질량판별 과정

표 1. 직경 1.9cm 강구의 평가결과

거리-시도	질량(g)	질량 오차(%)	직경(cm)	직경 오차(%)
30-1	49.96	63.80	2.2634	19.13
30-2	50.14	64.39	2.3142	21.8
30-3	53.44	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

질량판별 프로그램은 그림 4와 5에서 보는 바와 같이 윗부분에 최대 진폭값과 반주기, 센서와 충격점 사이의 거리를 입력한뒤 Start버튼을 클릭하면 아래 부분에 금속파편의 질량과 에너지, 그리고 금속파편의 지름이 계산된다. 다음은 금속파편의 질량과 크기를 달리하여 실험한 결과를 나타내었다. 표 1로부터 직경 1.9cm, 질량 30.5g의 강구를 센서에서 30cm, 70cm, 110cm의 거리에서 충격을 가했을 경우 질량판별의 결과를 나타내었다. 이때 각각의 거리에 대해 3번씩의 실험을 시도하였다. 그 결과 직경의 경우 평균 22% 정도의 오차를 보이고 있다. 또한 직경 2.94cm, 질량 106.2g과 직경 3.8cm, 질량 229.4g 그리고 직경 5.05cm, 질량 542.6g의 경우에 대하여 모의실험을 통해 얻어진 결과를 표 2, 표 3, 표 4에 나타내었다.

표 2. 직경 2.94cm 강구의 평가결과

거리-시도	질량(g)	질량 오차(%)	직경(cm)	직경 오차(%)
30-1	103.75	2.30	2.9426	0.09
30-2	100.97	4.92	2.9161	0.81
30-3	121.32	14.23	3.1001	5.45
70-1	84.79	20.16	2.7512	6.42
70-2	99.54	6.27	2.9022	1.29
70-3	89.35	15.87	2.7996	4.78
110-1	87.21	17.88	2.7771	5.54
110-2	79.84	24.82	2.6965	8.28
110-3	81.22	23.52	2.7120	7.76

표 3. 직경 3.8cm 강구의 평가결과

거리-시도	질량(g)	질량 오차(%)	직경(cm)	직경 오차(%)
90-1	361.91	57.76	4.4627	17.44
90-2	364.41	58.85	4.4730	17.74
90-3	345.37	50.55	4.3937	15.62
120-1	358.67	56.35	4.4494	17.09
120-2	368.44	60.61	4.4894	18.14
120-3	332.18	44.80	4.3370	14.13
170-1	270.94	18.10	4.0522	6.64
170-2	301.37	31.37	4.1986	10.49
170-3	299.26	30.45	4.1887	10.23

표 4. 직경 5.05cm 강구의 평가결과

거리-시도	질량(g)	질량 오차(%)	직경(cm)	직경 오차(%)
90-1	412.61	23.96	4.6621	7.68
90-2	424.37	21.79	4.7060	6.81
90-3	385.17	29.01	4.5564	9.77
120-1	411.09	24.23	4.6564	7.16
120-2	396.74	26.88	4.6015	8.88
120-3	379.54	30.05	4.5340	10.21
170-1	434.92	19.85	4.7446	6.05
170-2	419.86	22.62	4.6892	7.14
170-3	408.53	24.70	4.6467	7.99

### III. 결론

본 연구에서는 원전내 스팀 발생기와 원자로의 몸통부분과 상,하부 헤드부분에서 금속파편에 의한 충격위치 평가 및 질량판별에 대한 통합 환경을 구현하였다. 또한 실제 원전의 상황을 고려한 모의 실험을 통해 제안된 통합환경을 검증하였다. 그 결과 평가된 충격위치는 약 3.33%의 오차와 0.045의 표준편차[3]를 나타내고 있으며 질량의 판별에서 직경은 약 10%, 질량은 약 20~30%의 오차만을 보이고 있다. 이는 실제 원전에서 사용 할 수 있을 만큼의 허용 오차를 가진다[4]. 따라서 센서에서 취득한 신호로 위치평가에서 질량판별에 이르는 일련의 과정을 한번에 처리할 수 있도록 하였다.

본 연구의 결과는 국내 LPMS에 충격위치 판

별에서 질량판별에 이르기까지의 과정을 온라인화 하는데 적용 할 수 있을 것으로 전망된다.

### 참고 문헌

- [1] 이일근 외, "삼각법과 원교차법의 실험적 관점에서의 비교", 대한전자공학회 추계종합 학술대회 논문집 제18권 제2호, 1995.
- [2] 최재원 외, "RPV 상하부에서 발생하는 금속파편의 충격위치 평가", 한국원자력학회 춘계 학술발표회 논문집(I), 1997.
- [3] 이일근 외, "고해상도 센서어레이 신호처리법을 이용한 원자력발전소 핵증기 공급계통의 새로운 금속파편 진단기법", 한국음향학회 논문집 제16권 제6호, 1997.
- [4] 이일근 외, "고압구조물의 이상신호 발생 위치 검출기술 개발" 한국원자력연구소 연구보고서, 1996.
- [5] W.K. Shin, etc, " A Study on the Signal Diagnosis Techniques for Loose Parts Monitoring System," KAERI/NSC-351/89.
- [6] B.J. Olma, "Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of PWRs," Progress in Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 583 to 594, Pergamon Press, 1985.