

금속파편 충격위치 자동검출을 위한 파형신호 분석 알고리즘 개발

박기용, 장귀숙, 김정수, 박원만, 구인수, 함창식
한국원자력연구소

요 약 문

본 논문의 목적은 현재 사용중인 원자력발전소내 금속파편 감시계통(LMPS: Loose Part Monitoring System)에서 금속파편의 발생위치 평가시 온라인화된 방식을 제안하고 그 효용성을 알아보는 것이다. 현재 사용중인 LPMS 들은 센서들을 통해서 기준 진폭수준 이상의 신호가 입력될 때 경보음이 울리고 신호가 기록되도록 되어있다. 이렇게 기록된 신호를 전문가가 분석함으로써 발생한 금속파편 위치 및 계통손상 가능성등을 평가한다. 그러나 이러한 방법에 의한 신호평가시 경험이 풍부한 전문가에 의해 파편위치 및 손상부위를 평가해야 하므로 많은 시간이 소요되고 금속파편에 의한 손상 잠재성이 큰 경우 즉각적인 조치를 취할 수가 없어 방사능 누출 등의 위험한 상황에 처할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 점에 착안하여 센서로부터의 입력신호 분석 및 평가를 위한 온라인 기법을 제안하고 구조물 모형을 이용한 실험결과를 통하여 그 효용성을 입증한다.

1. 서 론

LPMS 는 원자력발전소 냉각재 계통내의 금속파편에 의한 계통내 구조물들의 취약 또는 파손으로부터 안전성을 확보하기 위한 시스템이다. 이들 금속파편들은 계통내 유체유동, 용력부식, 피로, 구조요소간 비정상적 마찰등의 원인에 의해 구조물로부터 분리되면서 생성되거나, 원전 건설기간 또는 핵연료 재장전, 기타 보수활동시 외부로부터 계통내로 유입될 수 있다. 현재까지 외국에서 개발되어 운용되고 있는 LPMS 는 원자로 냉각재계통 주요 기기의 압력경계 외부표면에 충격에 민감한 센서(Accelerometer, A.E. Sensor 등)들을 부착하여 압력경계 내부구조물에 금속파편이 부딪칠 때, 내부구조물을 따라 전파되는 충격파를 감지함으로써 미리 설정된 경보준위를 초과하는 충격신호의 발생을 주 제어실에 알려주는 비안전성 계측계통이다. 이 충격파 감지용 센서들은 제어봉 구동장치 설치지역인 원자로 압력용기 상부헤드와 금속파편이 비교적 정체하기 쉬운 지역인 증기발생기 Hot Chamber 등 1 차 계통 압력경계 외부표면에 주로 설치되어 있다[1].

LPMS 를 원전의 금속 파편 탐지 도구로써 최적으로 활용하기 위해서는 금속과 금속간의 충격 특성, 냉각재 계통 구조물을 통한 금속 충격파의 전파 특성, 충격에 의한 응답 신호로부터의 금속 파편의 크기, 정체 특성 평가 및 안전성 영향 결정 등 고도의 진단기술이 확립되어 있어야 한다. 하지만 국내의 경우 1985년 9월 상업 운전을 시작한 고리 원전 3 호기에 LPMS 가 최초로 설치되는 등 비교적 짧은 LPMS 도입 역사를 가지고 있으며 또한 운전 경험 및 신호 진단 기술 결핍 등으로 인하여 운전 중 발생하는 LPMS 의 금속 충격 경보에 대한 조치를 포함한 전반적인 운영 상태가 미흡한 실정이다[2]. 이 LPMS 계통이 운

영되고 있는 실태를 간단히 살펴보면 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 평가, 조처한다. 그러나 현재와 같은 수행 방식으로는 빠른 대응을 요하는 큰 결함이 발생하였을 때나 운전원의 경험 부족으로 인한 오판을 하게 되는 경우에 심각한 문제를 야기한다. 따라서 충격에 의한 경보 신호가 발생한 즉시 컴퓨터에 그 신호가 기억되고 그와 동시에 바로 충격 신호가 분석되어 발생한 금속 파편의 위치 및 특성을 파악할 수 있는 온라인 처리 방식이 절실히 요구된다.

본 논문에서는 충격 신호가 센서를 통하여 LPMS 내로 들어올 경우 분석 컴퓨터를 통해서 데이터를 자동 분석하는데 필요한 입력값(파형의 시작점, 종점, 상승시간, 하강시간 등)을 자동계산을 위한 필요한 알고리즘을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1. LPMS 자동화

현재 한국원자력연구소에서 중장기 과제의 일환으로 LPMS 자동화 시스템 구축을 연구하고 있다. 충격신호 파형이 각 센서들을 통해서 검출되면, Lab. Window 라는 데이터 취득 시스템으로 들어오고 이러한 취득된 데이터를 이용하여 본 논문에서 제시한 알고리즘 및 현재 연구중에 있는 적응 필터를 이용하여 파형의 시작점 및 종점을 파악한다. 이를 기반으로 하여 파형의 최대진폭, 상승시간, 하강시간 값들을 구하여 퍼지 논리 시스템에 입력으로 제공하면 퍼지 논리 시스템은 파형의 충격신호 가능성을 파악하여 충격신호로 판명나면 경보를 발생하여 운전원에게 알리고 이에 따라서 충격신호 위치 검출 및 질량과 속도를 구하는 알고리즘이 작동한다.

이러한 자동화 과제중 현재 퍼지 논리 시스템과 충격위치 계산 알고리즘은 이미 개발하였고[3][4], 본 논문에서는 파형의 시작점을 구하는 알고리즘[5]을 원전 충격신호 파형에 적용하여 시작점을 자동으로 검출하고 이를 기반으로 하여 충격신호 발생위치를 파악하는데 그 효용성을 알아보하고자 한다.

2.2. 충격신호 위치 검출 알고리즘

현재 개발된 금속파편 충격위치 검출 알고리즘[4]과는 다른 방법으로 충격위치를 검출하는 방법에 대해서 제시하고자 한다. 이러한 방법은 일반적으로 잡음이 심한 충격신호를 분석하는 데에 보다 현실적인 방책이 될 수 있을 것이다. 기본적인 개념은 Oksa[5]가 제시한 방법을 기반으로 한다. 충격신호가 들어오기 전에 존재하는 기본잡음을 다음과 같은 Auto Regression(AR) 구조로 모델링한다.

$$y(n) = -\sum_{i=1}^p a_{p,i}^f y(n-i) + u(n) \quad (1)$$

이러한 구조를 forward linear prediction 이라고 하며, 식(1)의 $a_{p,i}^f$ 는 forward linear prediction 의 계수이고 $u(n)$ 은 제로평균과 σ^2 의 분산을 갖는 백색잡음이다.

충격신호가 센서를 통하여 들어와서 N 개의 데이터를 취득하였을 경우 충격신호와 기본잡음에 의해 결과적으로 나타나는 신호 $z(n)$ 은 다음과 같다.

$$z(n) = x(n) + y(n), \quad \text{for } n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

여기서 $x(n)$ 은 순수 충격신호 파형이다.

만약 L ($p < L < N$)개의 데이터에는 아직 충격신호 성분이 없다고 가정하면 다음과 같은 actual forward prediction error 식이 구해질 수 있다.

$$e_f(n) = z(n) - z_f(n) \quad (3)$$

$$= z(n) + \sum_{i=1}^p a_{p,i}^f z(n-i), \quad n = p, p+1, \dots, L-1 \quad (4)$$

여기에서 $e_f(n)$ 은 예측오차를 나타내고 있다.

윗식은 기본잡음 만에 대해서 고려를 하는 것이기 때문에 예측오차는 이론상 $[p, L-1]$ 에서는 백색잡음이 될것이다. 그러나 n 이 L 이상으로 계속 진행하면 그 이상에서는 기본잡음과는 다른 충격신호가 포함되기 때문에 예측오차가 갑자기 커지기 시작할 것이다. 즉, 예측오차가 갑자기 커지기 시작하는 점이 충격신호가 들어오는 시작점으로 간주한다.

충격신호 시작점을 판단하는 기준을 정하기 위해 다음과 같이 average forward prediction error(AVFPE); e_A^f 를 정의하자.

$$e_A^f(n) = \frac{(n-p)e_A^f(n-1) + |e_f(n)|}{n-p+1}, \quad n = p, p+1, \dots, N-1 \quad (5)$$

그러면 충격신호의 시작점은 다음식과 같은 조건에 의해 구할수 있다.

$$v(n_0) > \beta e_A^f(n_0-1) \quad (6)$$

여기에서 $v(n)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$v(n) = \frac{|e_f(n-1)| + |e_f(n)|}{2}, \quad n = p+1, p+2, \dots, N-1 \quad (7)$$

식(6)에서 β 는 계수로 임의로 설정되는 값이다.

2.3. 충격신호 시작점 및 위치 파악에 적용

본 절에서는 2-2 절에서 언급한 알고리즘을 금속파편 충격신호에 적용하여 충격신호의 시작점을 구하고 이 시작점을 기반으로 금속파편 위치검출 알고리즘[4]을 작동하여 충격신호의 위치를 파악하고자 한다. 먼저 필요한 충격신호 데이터를 구하기 위해 mock-up 상으로 구현된 실험실에서 충격신호 검출 실험을 수행하였다. 실험 범위는 평판상에서 충격신호를 발생시키는 장치가 있고 원자로 모형에서 발생시키는 장치가 구축되어 있는데 본 알고리즘 적용을 위해서는 우선 평판상에서 충격신호를 구하였다. 평판상에서 수행한 모의 실험은 제작된 가로 2m, 세로 1.6m, 두께 2.5cm의 강철판에 Impact Hammer를 통하여 충격을 가하는 방식으로 이루어졌다. 또한 10cm 간격으로 바둑판 모양으로 평행선을 그어 각 선의 교점에 센서를 부착할 수 있도록 나사구멍을 뚫어 센서를 고정할 수 있도록 하였고 좌측하단으로 부터 (1,1)의 좌표로 정하여 우측상단이 (19,15)가 되도록 하였다.

이러한 방법으로 세개의 센서를 각각 (2,4), (8,14), (17,2)에 부착하여 Impact Hammer로 임의의 지점에서 가한 충격 파형이 그림 1에 있다. 여기에서 나타나는 잡음은 임의로 생성하여 충격신호에 더하였다. 이러한 충격파형에 2-2 절에서 언급한 알고리즘을 적용하여 본 결과 첫번째 실험에서 각 센서들에 대한 충격신호의 시작점이 표 1에 있다.

이와 같이 구한 충격신호 시작점을 기반으로 하여 신호 도달시간차를 이용하여 충격신호 위치를 구한 것이 그림 2에 나타나 있다. 여기에서 충격신호 전달 속도는 So mode와 Ao mode가 섞여 있기 때문에 그룹속도값을 이용하였고 이 값은 2018m/s로 주어진 실험식을 통하여 계산하였다. 그림 2에 보는 바와 같이 실제 충격위치와 계산된 충격위치는 약간의 차이가 남을 알 수 있으나 비교적 잘 위치를 추정하는 것을 볼 수 있다. 그림 3은 같

은 센서들의 위치에서 충격위치를 달리했을 경우의 결과이고 이에 대한 충격신호의 각 센서별 시작점은 표 1에 있다. 두번째 실험에서는 결과가 첫번째 실험보다는 비교적 정확함을 알 수 있다.

따라서 이러한 충격위치 검출을 위한 파형의 시작점 계산 알고리즘에 잡음이 존재하는 실제 충격신호의 경우에 육안으로 시작점을 파악하는 기존의 방식을 대체할 수 있는, 현실적으로 적용 가능한 방법이 될 수 있다.

3. 결론

이상과 같이 센서를 통하여 들어오는 충격신호 파형이 있을 경우 충격신호의 시작점 및 충격신호 위치 검출을 위한 알고리즘과 실험 데이터에 적용한 결과를 살펴 보았다. 그러나 보다 합리적이고 체계적인 작동을 위해서는 몇가지 고려할 사항 들이 있다. 그 중에서 가장 고려할 사항이 식(6)의 β 로 이 값은 시행착오로 주어지나 좀 더 체계적으로 상황에 맞게 주어질 수 있는 방법이 필요하며 현재 연구 중에 있다.

아울러 현재 개발 중에 있는 적응 필터 기법을 이용한 파형의 종범계산이 완료되면 검출된 충격신호의 종점을 구할 수 있을 것이고 이러한 값들이 구해지면 파형에 대한 포락선 형태가 구해져 퍼지 논리 시스템 구동을 위한 기본 입력값인 충격신호의 상승시간, 하강시간, 최대진폭을 구할 수 있을 것이다. 그러면 자동화된 LPMS가 구현 가능할 것이다. 이러한 일들이 앞으로 LPMS 자동화를 위한 추후과제로 남아 있으며 현재 연구진행 중에 있다.

References

- [1] EPRI, "Loose Parts Monitoring System Improvements", EPRI NP-5743, March 1988.
- [2] W. K. Shin, etc., "A Study on the Signal Diagnosis Techniques for Loose Parts Monitoring System (LPMS)", KAERI/NSC-351, 1989.
- [3] Y. G. Oh, et al., "Application of Fuzzy Logic for the Monitoring and Diagnosis of Loose Parts in Nuclear Power Plants", IASTED International Conference Proceedings of Modeling and Simulation, Pittsburgh, USA, April 27~29, 1995.
- [4] 박수영 외 6인, "온라인화된 원전내 금속파편 충격위치 검출 방법 연구", 제 8회 신호처리 합동학술대회, 1996.
- [5] G. Oksa, "Estimation of Beginning of Burst by means of Linear Prediction: An Ideal Case Simulation", J. of Electrical Engineering, vol.44, pp.153~160, 1993.

표 1. 충격신호 시작점 결과

Exp. No. Sensor	Experiment #1 (Impact Location: (12.5, 8.5))	Experiment #2 (Impact Location: (16.5, 5.5))
Channel 1	5454 μ s	5465 μ s
Channel 2	5183 μ s	5345 μ s
Channel 3	5221 μ s	4959 μ s

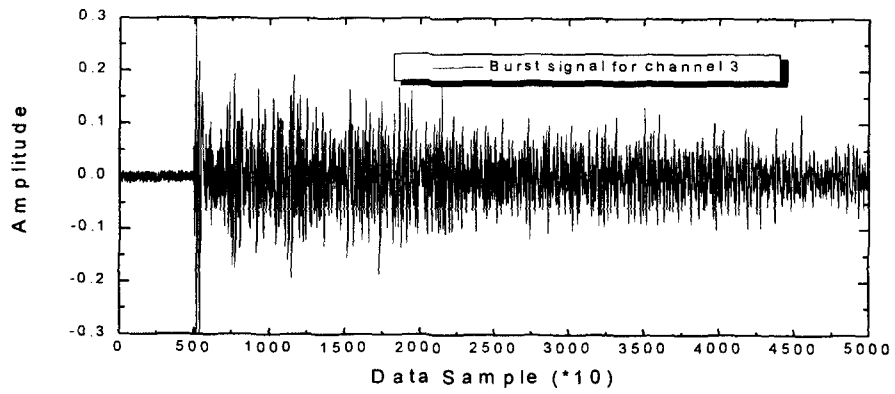
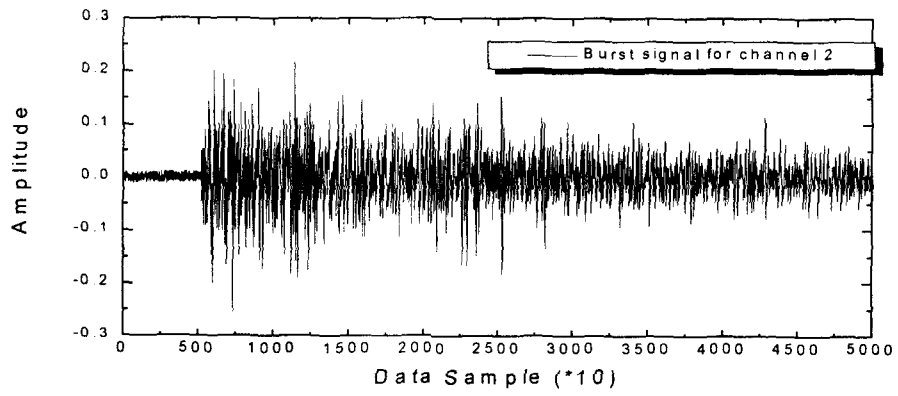
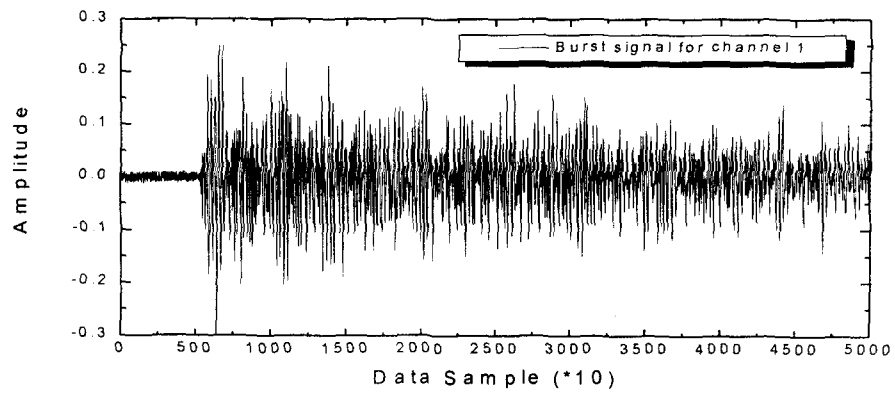


그림 1. 각 센서별 취득된 충격신호 파형

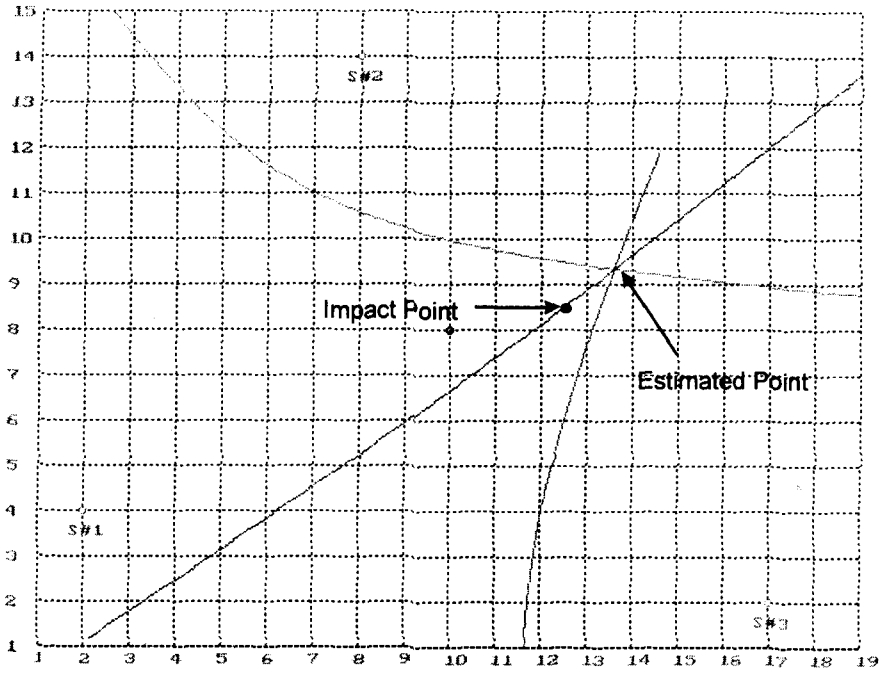


그림 2. 모의실험 1 데이터 분석에 의한 충격위치 평가

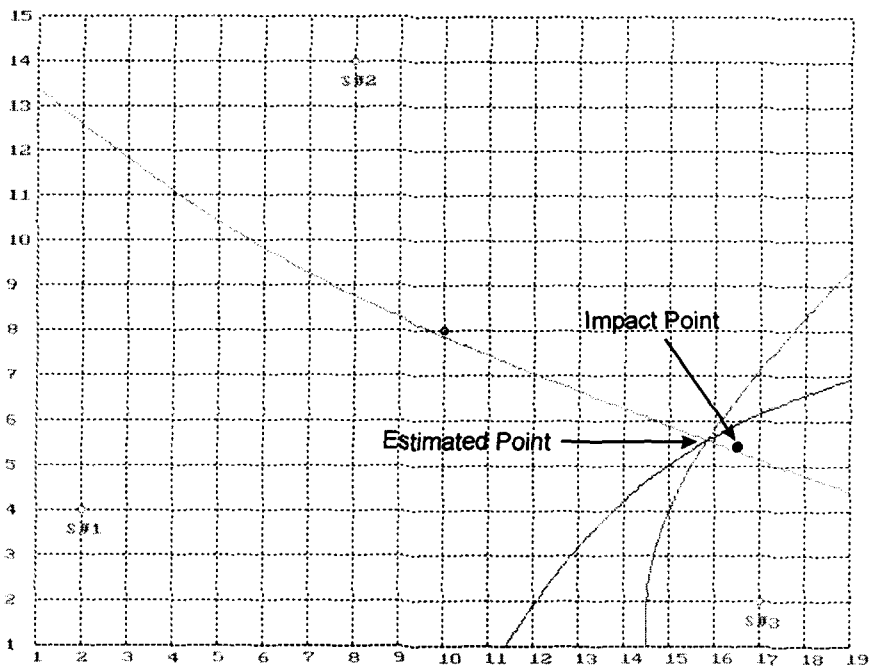


그림 3. 모의실험 2 데이터 분석에 의한 충격위치 평가