

열충격에 의해 발생한 금속파편감시시스템의 거짓경보신호 저감 연구 A Study on the False Alarm Reduction of LPMS Caused by Thermal Shock

허용호* · 이상국**†
Yong-Ho Heo* and Sang-Guk Lee**†

(Received 9 February 2021, Revised 24 March 2021, Accepted 29 March 2021)

Abstract : A number of unnecessary false alarms generated from a loose part monitoring system during heating and cooling operation of a power plant increase the workload of the power plant operators and the analysts. Accordingly, there is a need to develop an algorithm capable of reducing the occurrence of unnecessary false alarms by effectively decreasing the alarms generated by thermal shocks. In this study, the algorithm is suggested to effectively decrease the alarms generated by thermal shocks, and the performance of algorithm is tested by both simulation scenarios and actual alarm signals collected from power plants. The suggested algorithm only uses the values already calculated in LPMS and does not require additional computational effort. From the result, the algorithm is capable of reducing 62.5% of false alarms occurred by thermal shocks. Through this, it is expected that the effort spent on unnecessary task can be reduced, and the workload of the power plant operators and analysts can be reduced.

Key Words : False alarm, Loose part monitoring system, Thermal shock

1. 서 론

원자력발전소 금속파편 감시계통(LPMS, Loose Part Monitoring System)은 원자로계통의 구조물에 금속 이물질이 부딪힐 때 발생하는 충격신호를 감시하는 설비이다. 충격신호의 계측에는 구조물에 설치된 가속도 센서를 이용하며 계통 내부의 판별 알고리즘의 통과 여부를 판단하여 경보신호

를 발생시키게 된다. 경보신호의 발생 시 운전원들은 경보신호의 진위여부 확인과 이물질의 질량 및 위치 추정 등의 추후 분석 업무를 수행하게 된다.^{1,2)}

금속파편 감시계통 내에 기존의 내부 로직들은 다양한 환경에서 발생하는 경보신호들을 효과적으로 걸러내지 못하고 다량의 거짓경보신호들을 발생시켜 운전원들에게 업무 부담을 주고 있다.

**† 이상국(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5324-2471) : 책임연구원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원
E-mail : Sangguklee@khnp.co.kr, Tel : 042-870-5514
*허용호(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2011-5449) : 선임연구원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원

**† Sang-Guk Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5324-2471) : Principal Research Engineer, Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd.
E-mail : Sangguklee@khnp.co.kr, Tel : 042-870-5514
*Yong-Ho Heo(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2011-5449) : Senior Research Engineer, Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd.

거짓경보신호를 효과적으로 판별하기 위해 충격파의 전파특성을 분석하여 파편의 크기를 추정하거나,³⁾ 주파수 지표를 추가하여 경보신호의 진위여부를 판단하거나,⁴⁾ 시간-주파수 영역 분석기법을 도입하거나,⁵⁾ 특정 채널들의 이벤트 신호의 특성을 개별적으로 분석한⁶⁾ 선행 연구들이 있었다. 하지만 이를 현장에 적용하기 위해서는 복잡한 수식 계산을 위한 감시시스템의 계산 부담이 증가하고 전문엔지니어의 판단과 분석이 필요하다는 점으로 인해 현장 설비에 즉시 적용이 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 발전소 기동과 정지 시에 발생하는 다양한 거짓경보신호들 중 구조물의 열팽창과 수축에 의해 발생하는 경보신호들을 효과적으로 저감하기 위한 알고리즘을 제안하고 이의 성능을 시뮬레이션을 이용하여 평가하였다. 제안된 알고리즘은 현재 발전소 금속파편 감시시스템내에서 계산되어 활용되는 값들만을 이용하여 구성함으로써 추가적인 계산의 부담이나 내부 계산 구조의 변경을 필요로 하지 않도록 설계하였다.

2. 금속파편 감시시스템 구조

금속파편 감시시스템의 센서들이 설치된 위치를 Fig. 1과 Table 1에 나타냈다. 12개의 가속도 센서가 설치되어 감시하는 원자력 발전소의 경우 원자로 상부에 2개, 원자로 하부에 2개, 각 증기발생기에 4개의 센서들이 설치되어 있다.

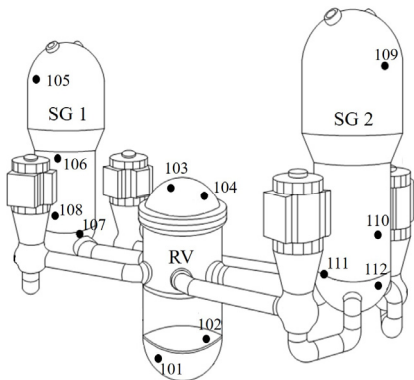


Fig. 1 Sensor configuration

Table 1 Position of sensor channels

Number	Structure	Position
101	RV bottom	Incore detector 0°
102	RV bottom	Incore detector 180°
103	RV top	Control element drive mechanism nozzle 15°
104	RV top	Control element drive mechanism nozzle 195°
105	SG 1	Secondary maintenance inlet 0°
106	SG 1	Economizer inlet 0°
107	SG 1	Primary head inlet 180°
108	SG 1	Primary head outlet 180°
109	SG 2	Secondary maintenance inlet 0°
110	SG 2	Economizer inlet 0°
111	SG 2	Primary head outlet 180°
112	SG 2	Secondary maintenance inlet 0°

금속파편 감시시스템의 신호처리 과정을 Fig. 2에 나타냈다. 가속도계를 통해 측정된 신호는 LPAU(LPMS Alarm Unit)으로 전달되어 측정된 신호의 단기와 장기 이동평균을 계산하고 기 설정된 고정 설정치와 유동 설정치의 초과 여부를 판단하게 된다. Fig. 3과 같이 측정된 신호가 기 설정된 설정치들을 초과하는 값이라고 판명되는 경우 LPAP(LPMS Alarm Processor)로 값을 전달하여 미리 설정된 로직과 변수 값들을 만족하는지 여부를 판단하게 된다. LPAU와 LPAP의 통신연결이 끊어진 경우, 임의로 LPAU에서 AMU(Alarm Module Unit) 경보를 발생시키게 된다.

LPAP 내부에서는 충격신호와 배경신호의 RMS(Root Mean Square)의 비율 평가, 주파수 성분 평가, 충격신호의 감쇠 속도 평가, 센서 채널들 간의 지연시간 평가, 충격신호 피크 성분의 상대 크기 평가, 충격신호의 발생 횟수를 체크하게 되며 6개의 로직을 모두 통과하는 경우는 분석컴퓨터(Analysis Computer)로 결과를 전달한다.⁷⁾ 이후 분석컴퓨터에서는 금번 발생한 충격신호와 기존의 강구실험에 의해 축적된 데이터를 비교하여 질량을 추정하고 경보신호를 발생시킨다. 6개의 로직을 하나라도 만족하지 못하는 경우 거짓경보

신호로 분류된다.

발전소 기동과 정지 시에 발생하는 구조물의 열팽창 혹은 수축에 의해 발생하는 경보신호들이 LPAP에 의해 적절히 걸러지지 않는 경우 다량의 경보신호가 발생하는 원인이 되며, 급변 연구에서는 열팽창과 수축에 의해 발생하는 충격신호들의 특징을 반영한 로직을 LPAP에 추가하여 이를 거짓경보신호로 분류하는 새로운 로직을 제안하고 시뮬레이션을 통해 이의 성능을 평가하였다.

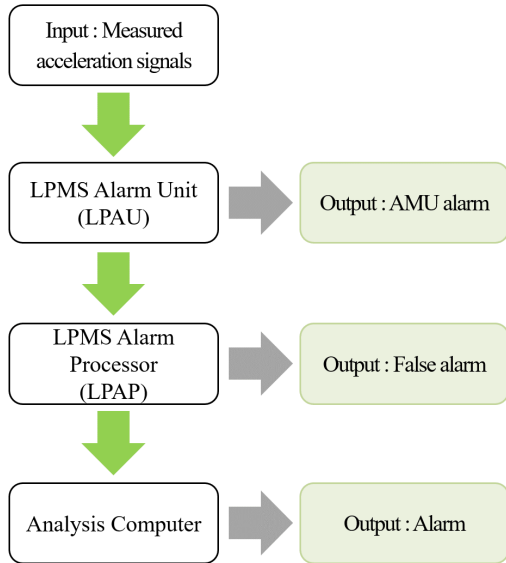


Fig. 2 LPMS Procedure

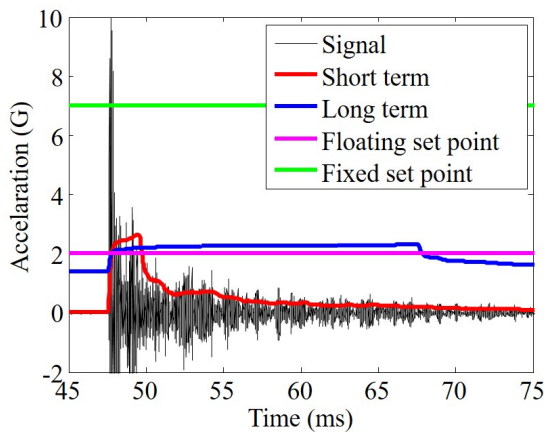


Fig. 3 Signal analysis in LPAU

3. 신규 로직 제안

3.1 열 충격신호 경향 관찰

발전소 원자로냉각재계통(RCS, Reactor Coolant System)의 운전 온도와 압력에 따른 경보신호의 발생 빈도를 Fig. 4에 나타냈다. RCS의 온도와 압력이 유지되는 경우 경보신호의 발생이 없으며, 온도와 압력이 상승하는 구간에서 다량의 경보신호가 발생했음을 관찰할 수 있다.

경보신호가 발생했을 때의 센서채널들에 측정된 가속도 신호를 관찰해 보면 Fig. 5와 유사한 경향을 나타내며, 다른 구조물에 설치된 센서채널들에서도 충격신호가 나타나는 경향이 관찰된다. 일반적으로 금속파편에 의해 발생하는 충격신호의 경우 원거리 채널까지 충격이 전파되기는 어려우며 최초 충격발생 위치로부터 10 ft 내에서 90% 이상의 에너지가 손실되는 것으로 알려져 있다.⁸⁾ 온도와 압력이 유지되는 구간에서 경보신호의 발생이 없다는 점과 발생한 충격신호의 형태가 동시에 여러 구조물에서 관찰된다는 점을 종합해 볼 때 구조물의 열팽창에 의해 발생한 충격신호로 인해 경보신호가 발생한 것으로 추정할 수 있다.

3.2 신규 로직

신규 알고리즘은 각 구역들의 상관성을 판단하는 구역상관성시험(Zone correlation test)으로 각 센서들에 구역을 할당하고 동시에 여러 구역들에서 충격신호가 감지되는 경우 금속 파편에 의해 발생한 충격이 아닌 것으로 판단하였다. 알고리즘의 순서도는 그림에 나타냈으며, 순서도의 각 절차들은 개별센서, 구역, 전체의 값들을 확인하여 진행한다.

각 개별 센서채널들에서는 신호의 RMS 값이 설정된 고정 및 유동 설정치를 초과하는 AMU 이벤트가 발생하는 경우 그에 따라 Ch. flag의 값을 설정하며 Fig. 6과 같이 진행한다.

각 구역에서는 해당 구역의 센서채널들의 Ch. flag 값을 합산한 후 결과에 따라 Zone flag 값을 정하며 Fig. 7과 같이 진행한다.

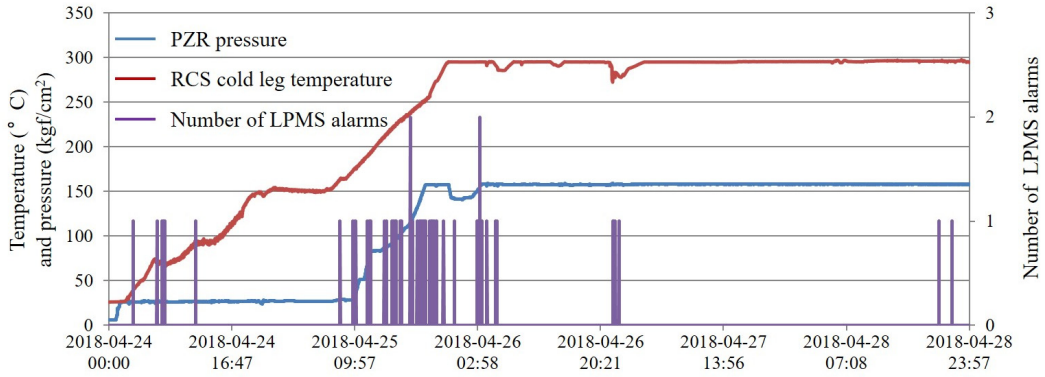


Fig. 4 Number of alarms with temperature and pressure in reactor coolant system

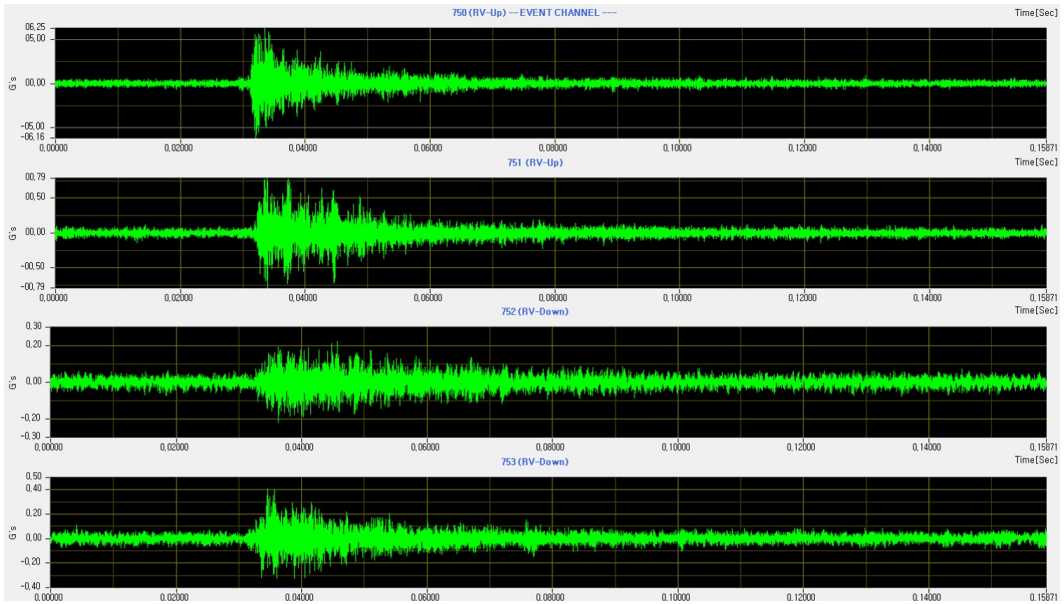


Fig. 5 Impact signal by thermal shock

전체 구역들의 Zone flag 값을 합산하여 동시에 두 구역 이상에서 충격신호가 발생한 경우가 감지되면, 금속파편에 의한 충격신호가 아닌 열충격에 의해 발생한 경보신호로 판단하여 거짓경보신호로 분류하며 Fig. 8과 같이 수행한다.

4. 시뮬레이션 수행

4.1 시뮬레이션 시나리오

LPMS 센서가 12개인 경우에 시뮬레이션 시나

리오를 설정하였으며, 시뮬레이션의 입력으로 사용되는 충격신호와 설정치들은 발전소 현장에서 부터 측정된 값을 이용하였다. 시뮬레이션의 결과는 구역을 설정하는 방법, 센서 채널들을 구역에 할당하는 방법, 전 구역에 동시 경보신호 발생 허용 개수 설정, Fig. 6에서 8가지 나타낸 몇 개의 채널 혹은 구역을 기준으로 경보를 억제할 것인지에 따라 달라질 수 있다.

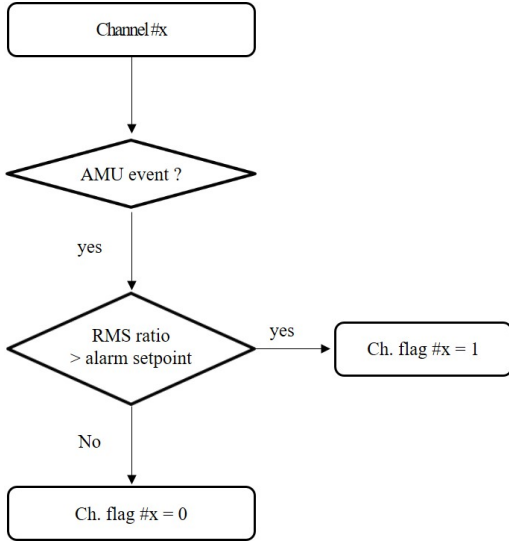


Fig. 6 Channel flag algorithm

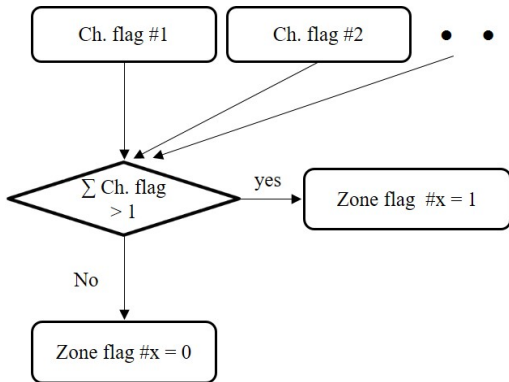


Fig. 7 Zone flag algorithm

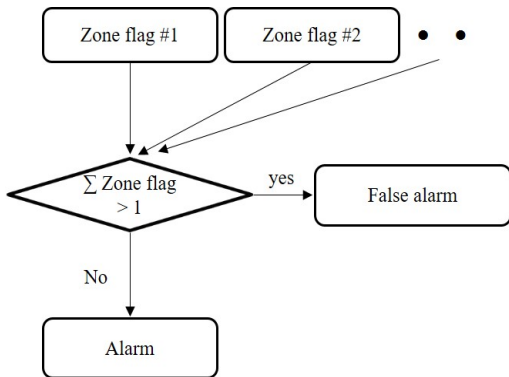


Fig. 8 Alarming algorithm

Table 2 Simulation scenarios

Scenario	RV bottom	RV top	SG 1	SG 2
1	101	-	-	-
2	101	103	-	-
3	-	103 104	107 108	-
4	101 102	-	105 107	-
5	101	103	107	-
6	101	103	107	111

12개의 센서가 설치된 경우 구역은 총 4곳으로 원자로 상부, 원자로 하부, 증기발생기 1, 증기발생기 2로 설정하였다. 12개 센서가 설치된 경우의 시뮬레이션 시나리오는 Table 2와 같으며, 각 열에 나타난 센서채널은 충격신호가 발생한 채널을 나타낸다. 시나리오의 설정은 동시에 여러 구역에서 충격신호가 발생하는 경우와 한 구역에 위치한 여러 센서들에서 충격신호가 발생하는 경우를 포함한다. 현재의 변수 설정에서는 단일 구역에서 2개 이상의 센서에서 충격이 감지되는 경우는 그 이상의 경우와 결과 값이 동일하므로 시뮬레이션 시나리오에서 생략하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

각 시나리오별로 입력된 충격신호는 개별적으로 Fig. 3에 나타난 신호처리 과정을 거치고, 이후에 Fig. 6에서 8까지의 순서도를 거친 후 경보신호의 발생 여부를 결정한다. 한 예로 Table 2의 시나리오 6번에 대한 전체 채널의 AMU 신호처리 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 시나리오 6번의 경우 101, 103, 107, 111번의 센서채널들에서 충격신호가 발생하여 각 채널들에서 AMU 이벤트 발생여부의 판단이 필요하며, Table 2에서 나누어진 4개의 구역 모두에서 경보신호가 발생하였다.

제안된 구역상관성시험을 활용하면 현재 시스템에서 운용중인 신호처리 방법만을 활용하여 추가적인 복잡한 계산절차 없이 시나리오 1번을 제외한 모든 시나리오들에서 효과적으로 경보신호가 억제되었다.

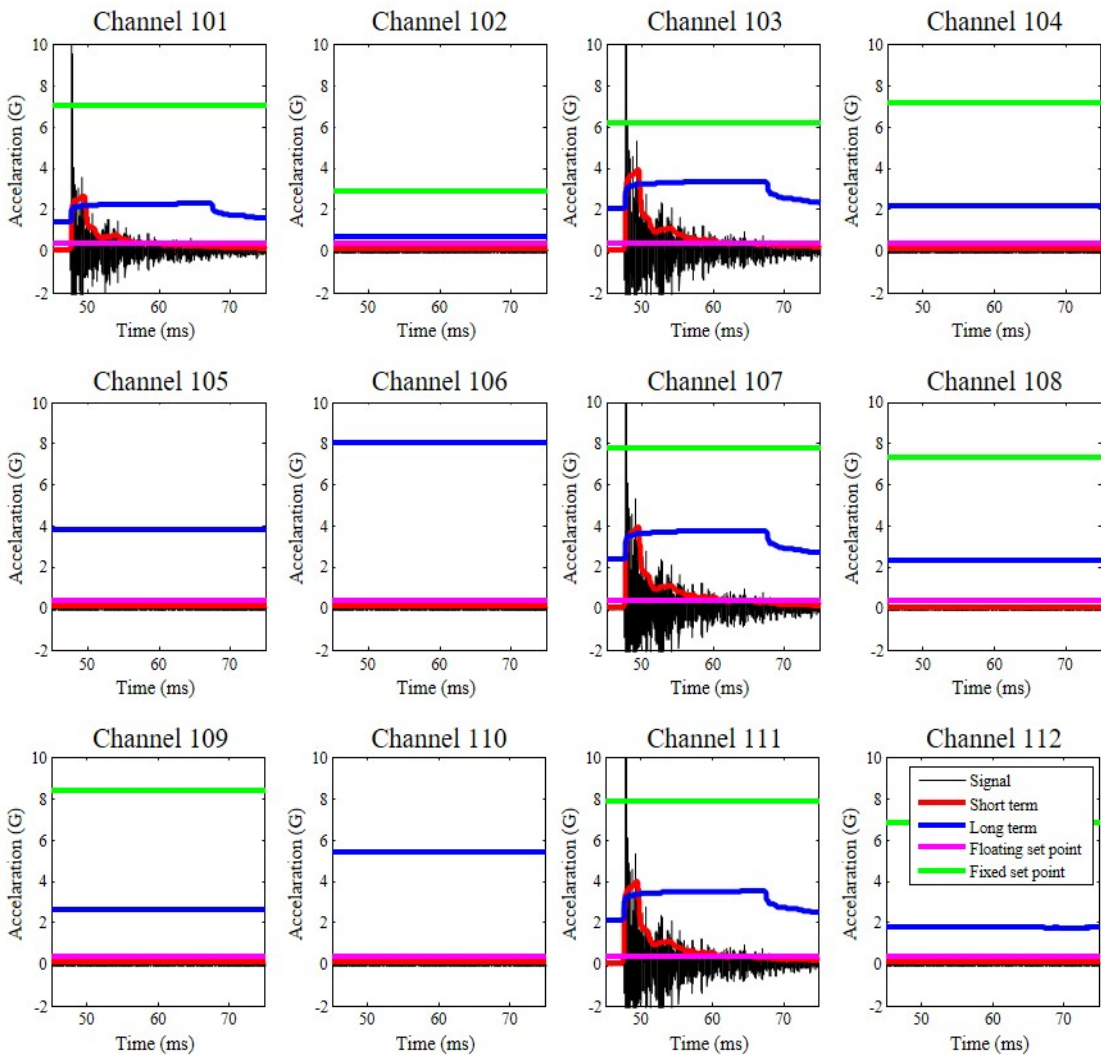


Fig. 9 Signal processing for scenario 6

4.3 현장 신호 측정시험 결과

제안된 시나리오 외에 실제 발전소 현장에서 발생한 24건의 열충격에 의해 발생한 경보신호들을 입력하여 제안된 구역상관성시험을 진행하였다.

입력된 경보신호들의 각 채널별 신호들은 Fig. 3에서 나타낸 LPAP 내부의 신호 분석 절차와 Fig. 6에서부터 8까지 나타낸 알고리즘을 적용하여 각 구역별 경보신호 발생 유무로 변환하였으며, 변환된 결과와 구역상관성 시험 결과를 Table 3에 나

타냈다.

구역상관성시험 적용 결과, 총 24건의 경보신호 중 15건의 경보신호들을 효과적으로 억제할 수 있었으며, 불필요한 경보신호의 발생을 62.5% 저감할 수 있었다.

발전소 현장 적용에 제안된 알고리즘을 적용할 시 발전소 운전원 및 신호 분석원들의 업무 부담을 경감할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3 Zone correlation test result

No.	RV bottom	RV top	SG 1	SG 2	Test
1	O	-	-	O	O
2	-	-	O	-	X
3	-	-	O	-	X
4	-	O	-	-	X
5	O	O	O	-	O
6	O	O	O	-	O
7	-	O	-	-	X
8	-	O	-	-	X
9	O	O	-	O	O
10	O	O	-	O	O
11	O	O	O	O	O
12	O	O	O	O	O
13	O	O	O	O	O
14	O	O	-	O	O
15	O	O	-	O	O
16	-	O	-	-	X
17	-	-	O	-	X
18	O	O		O	O
19	O	O	O	O	O
20	O	O	-	O	O
21	O	O	-	O	O
22	-	O	-	-	X
23	O	O	-	O	O
24	-	-	O	-	X

5. 결 론

금속파편 이물질 감시계통에 신규 알고리즘을 추가하여 구조물의 열에 의한 팽창이나 수축에 의해 발생하는 열충격에 의한 경보신호들을 저감할 수 있는 알고리즘을 제안하고 이의 성능을 평가하였다.

시뮬레이션 시나리오들에서 효과적으로 경보가 저감됨을 확인하였으며, 실제 발전소 현장에서 발생한 경보신호를 적용하여 시험할 시 62.5%의 불필요한 경보신호의 발생을 저감할 수 있었다.

기존의 경보처리 프로세서 내부에서 계산되는 값들만을 사용하여 감시계통의 추가적인 계산 부

담을 최소화하였고 현재 발전소 현장에 소프트웨어 수정을 통해 즉각적으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20206510100010)

Author contributions

Y. H. Heo; Investigation & Resources, Methodology, S. G. Lee; Conceptualization, Writing review and editing.

References

1. Reg. Guide 1.133, 1981, "Loose-part Detection Program for the Primary System of Light-Water-Cooled Reactor", Rev. 1.
2. S. G. Lee and Y. H. Heo, 2018, "A Study on the Propagation Characteristics Analysis of LPMS Impact Signal", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, pp. 103-107.
3. T. Tsunoda and T. Kato, 1985, "Studies on the Loose Part Evaluation Technique", Progress in Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 569-576.
4. M. G. Min, C. G. Jeong, J. K. Lee, S. H. Jo and H. J. Kim, 2014, "Development of an Algorithm to Discriminate between Valid and False alarms in a Loose-parts Monitoring System", Nuclear Engineering and Design, Vol. 278, pp. 1-6.
5. C. W. Mayo, D. P. Bozarth, G. N. Lagerberg, and C. L. Mason, 1998, "Loose-part Monitoring System Improvements", Research Project 2642-1, EPRI NP-5743.
6. S. G. Lee and K. N. Jang, 2014, "A Study on the Event Signal Analysis of Loose Parts Monitoring System", Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering Annual

- Spring Conference, pp. 129-131.
7. S. G. Lee, 2018, "LPMS Alarm Discrimination and Impact Signal Analysis Method in NPP", The 14th International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 501-502.
 8. S. G. Lee, 2015, "A Study on the Wigner Ville Time Jointed Frequency Signal Analysis for Impact Signal of LPMS", Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering Annual Spring Conference, pp. 10-103.