

# 전용 시나리오에 따른 준실시간 계량관리 시스템의 전용 탐지 알고리즘 성능 비교 연구

원병희\*, 신희성, 안성규, 한보영, 박세환, 박근일

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*wonbh@kaeri.re.kr

## 1. 서론

준실시간 계량관리(Near Real Time Accountancy, NRTA) 시스템은 재처리시설에서 핵물질 전용이 발생 시 전용 시점 및 그 양을 탐지하기 위해 개발되었다. 1 년에 한번 MUF 평가를 수행하는 기존 계량 시스템과 달리 NRTA 시스템은 주기적으로 MUF 평가를 수행한 후, 통계기법을 기반 한 핵물질 전용 탐지 알고리즘을 이용하여 전용 여부를 판단한다. 현재 핵물질 전용 탐지를 위한 여러 가지 알고리즘들이 개발되었으며, 성능이 동일한 계량 시스템이 구축되었더라도 어떤 알고리즘을 적용 할 것인가에 따라 핵물질 전용 탐지 성능은 달라진다. 또한, 전용 시나리오에 따라서도 성능 차이를 보인다. 핵물질 전용 탐지 알고리즘에 따른 NRTA 시스템 성능은 시설 안전조치성 확보에 중요한 요소로 작용되기 때문에 알고리즘의 성능 평가는 필수적으로 수행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 가상 파이로 시설에 동일한 측정 장비를 기반 하여 준실시간 계량관리 시스템 모델을 설정한 후, 기존 계량 시스템 및 다양한 전용 탐지 알고리즘 성능 차이를 파악하기 위하여 비교 분석을 수행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 가상 파이로 안전조치 모델 구축

핵물질 전용 탐지 성능 평가를 위하여 NRTA 시스템에 기반 한 가상 파이로 안전조치 모델을 구축하였다. 본 연구에서 구축된 모델은 파이로 안전조치성 평가를 위해 수립된 기준 파이로 시설(Reference Engineering-scale Pyroprocess Facility, REPF) 모델의 주요 정보를 토대로 구축되었다. Table 1은 주요 측정 지점의 핵물질 양과 측정 불확도 정보를 나타낸다. 표에서 보듯이, 해당 모델은 1 년간 348 kg의 핵물질(Pu)을 처리하며 전체 물질수지기간(Material Balance Period, MBP)동안 주기적으로 60번의 MUF 평가를 수행한다. 주요 측정 지점에서의 측정 불확도는 REPF에서 가 정된 측정 불확도 정보를 토대로 수립되었다. 한번 의 NRTA 기간 동안 평가된 MUF 불확도는 0.5

kg/MBP 이며, 기존 계량 시스템에 해당되는 1년 간 CUMUF 불확도는 2.4 kg 이다.

Table 1. Pu Mass, Measurement Uncertainties in the Hypothetical Pyroprocessing Model.

| Measurement Point | Pu Mass (kg) | Standard Deviation of Random Error (1 $\sigma$ , %) | Standard Deviation of Systematic Error (1 $\sigma$ , %) |
|-------------------|--------------|---|---|
| Input             | 5.8/MBP      | 1.17  | 0.59  |
| Output            | 5.8/MBP      | 0.54  | 0.29  |
| Inventory         | 3.48         | 10  | 10  |

### 2.2 핵물질 전용 탐지 알고리즘 구축

핵물질 전용 여부를 판단하기 위해서는 탐지 알고리즘이 요구된다. 기존의 NRTA 시스템에 적용된 탐지 알고리즘 성능 분석을 위하여 총 7 가지의 탐지 알고리즘[1, 2, 3]들을 본 가상 모델에 적용하였다. 먼저, 기존 계량 시스템의 핵물질 탐지 성능을 나타내는 연간 CUMUF Test를 기준으로 NRTA 기반 탐지 알고리즘 기법인 MUF Shewhart, SITMUF Shewhart, MUF joint cusum, SITMUF joint cusum, Page's test, Sequential Probability Ratio Test(SPRT)를 구축하였다.

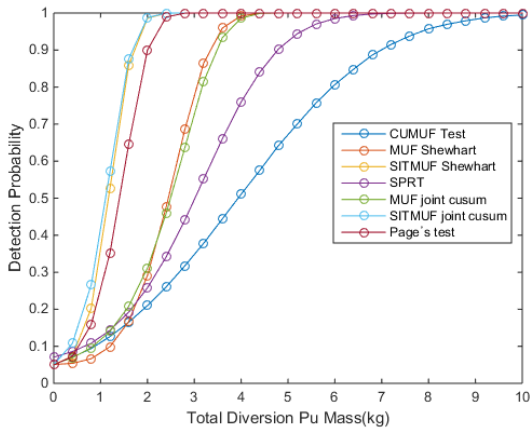
### 2.3 핵물질 전용 시나리오 수립

핵물질 전용 시점 및 기간에 따라서 3 가지의 대표 전용 시나리오를 수립하여 연구를 수행하였다. 시나리오 1은 전체 기간 중 30 번째 MBP 시점에서 핵물질을 한번 전용하는 경우이다. 시나리오 2는 21 ~ 40 번째 MBP 기간 동안 일정량의 핵물질을 계속적으로 전용하는 경우이다. 즉, 전체 시설 운영 기간 중 1/3에 해당하는 기간 동안 일정량의 핵물질이 전용된다. 전용 시나리오 3은 전체 운영 기간 동안 60번의 일정한 핵물질 전용이 발생하는 경우이다.

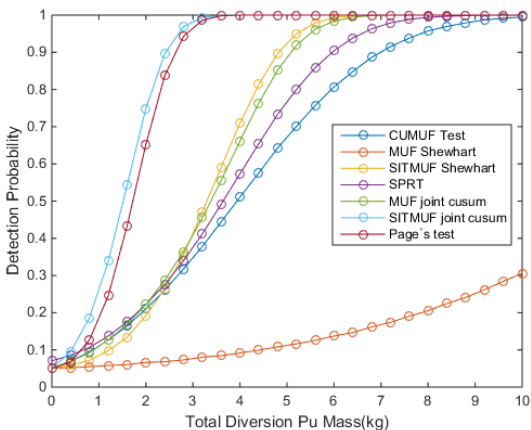
### 2.4 핵물질 전용 탐지 성능 평가 결과

본 연구에서는 하나의 전용 시나리오에 대하여

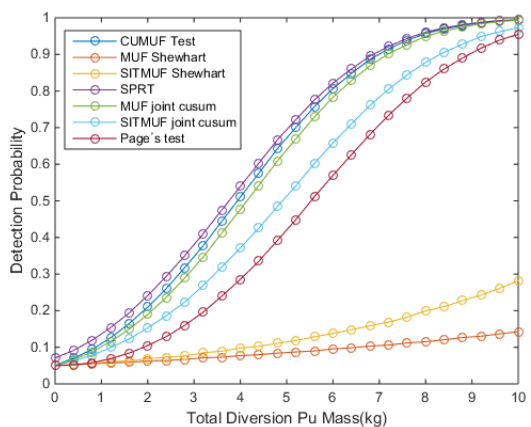
100,000번의 동일한 시뮬레이션을 반복 수행하여 최종 결과인 탐지 확률 평가를 수행하였다. Fig. 1의 (a)~(c)는 각각의 전용 시나리오마다 전체 전용된 핵물질 양에 따른 알고리즘들의 핵물질 전용 탐지 확률을 나타낸다. 총 전용양이 0 kg일 때 결과는 오경보 확률(False Alarm Probability, FAP)을 의미하며, 각각의 탐지 알고리즘의 오경보 확률은 약 5%로 비슷한 성능을 나타내도록 설정하였다.



(a) Diversion Scenario-1



(b) Diversion Scenario-2



(c) Diversion Scenario-3

Fig. 1. Detection Probability according to Diversion Mass.

Fig. 1 (a)에서 보듯이, 짧은 기간의 전용 경우에는 모든 NRTA 기반 알고리즘이 기존 핵물질 계량 시스템 기반인 CUMUF Test보다 더 좋은 탐지 성능을 보여준다. 1/3 기간 동안 전용(Fig. 1 (b))에 대해서는 SITMUF joint cusum과 Page's test가 뛰어난 탐지 성능을 보여주며 유일하게 MUF Shewhart만이 매우 저조한 탐지 성능을 나타내었다. 전체 기간 동안 전용(Fig. 1 (c))에 대해서는 SPRT만이 CUMUF Test 대비 소폭 향상된 탐지 성능을 보여주며 그 외 모든 알고리즘들이 기존 계량 시스템의 탐지 성능보다 낮게 나타났다. 특히, MUF 및 SITMUF Shewhart는 매우 낮은 탐지 성능을 보여주었다.

### 3. 결론

본 연구에서는 가상 파이로 시설을 대상으로 기존 계량 시스템의 전용 탐지 성능과 NRTA 기반 핵물질 전용 탐지 알고리즘들의 성능 비교를 수행하였다. 각각의 기법들은 핵물질 전용 시나리오마다 다른 탐지 성능을 보여주었으며, 일부 알고리즘들은 특정 시나리오에 취약하고 어떤 기법들은 높은 성능을 보여주는 것을 확인하였다. 추가적으로 탐지 성능에 미치는 다양한 요인 파악을 위하여 여러 가지 안전조치 요소들에 따라서 해당 알고리즘의 탐지 성능 평가를 수행 할 예정이다.

### 4. 감사의 글

이 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었다 (원자력기술개발사업, NRF-2012M2A8A5025950).

### 5. 참고문헌

- [1] J.-P. SHIPLEY et al., MATHEMATICAL AND STATISTICAL METHODS IN NUCLEAR SAFEGUARDS, Ispra Courses on Nuclear Engineering and Technology, 1981.
- [2] T. Burr and M. S. Hamada, Revisiting Statistical Aspects of Nuclear Material Accounting, Science and Technology of Nuclear Installations, Vol. 2013, 1-15, 2013.
- [3] Rainer Beedgen, Statistical Near-Real-Time Accountancy Procedures Applied to AGNS Minirun Data Using PROSA, Los Alamos National Laboratory, 1988.