파이로시설의 안전성 분석을 위한 고장모드영향분석(FMEA) 방법의 도입

서석준*, 문성인, 서중석, 정원명, 유길성, 이호희, 이효직, 김현민
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*sjseo@kaeri.re.kr

1. 서론

국내에서는 제 255차 국가 원자력위원회에서 의결된 "미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획"에 따라 2025년까지 종합 파이로 건식처리 공정(KAPF, Korea Advanced Pyroprocess Facility)을 건설하기 위한 준비가 진행 중이다[1].

미국 원자력규제위원회(NRC)에서는 유관시설의 안전성평가를 위해 NUREG-1513(Integrated Safety Analysis Guidance Document)을 토대로 한 통합안전성분석을 수행하도록 하고 있다[2]. 통합안전성분석을 위한 12가지 방법에 대해서는 이전 논문에 간략히 설명이 되었고, 이 중 하나인 사건수목(Even Tree) 방법을 파이로시설의 안전성 분석에 적용하는 연구를 진행하였다[3]. 사건수목을 이용한 방법은 특정 사고들에 대해서 미시적인 관점에서 면밀히 분석하는데 사용될 수 있다. 이에 반해, 이번 연구에서 실시하는 고장모드영향분석(FMEA, Failure Mode and Effects Analysis) 방법은 장비 및 구성품의 고장에 대해 거시적인 관점에서 파악하려는 데에 특징이 있고, 그 영향이 전파되는 방향을 분석하여, 최종적으로는 사고의 예방, 확대방지 및 영향완화 방안을 찾는 데 있다.

현재 미국의 University of New Mexico에서는 안전조치에 특화된 FMEA 방법을 파이로시설에 적용하여 예비평가하는 과정을 진행 중에 있다[4]. 특히 전해정련, 양극 염증류, 잉곳제조의 세 가지 공정에 대한 연구를 발표하였고, Table 1에 나와 있는 것처럼 각 공정에 대해 여러 가지 고장모드에 대해 분석하였다.

이 연구에서는 안전성에 특화한 FMEA를 전해환원 공정에 대해 분석하였으며, 10개의 범위로 분류하여 각각에 대한 주요한 고장모드와 영향을 정리하였다.

2. 본론

2.1 고장모드영향분석 방법

FMEA를 진행하는 방법으로는 (1) 전체 시스템 영역 구분, (2) 영역 내의 구성요소 간의 구분 및 설명, (3) 잠재적 고장요소 확인, (4) 발현가능성, 심각성 및 위험성 결정의 단계가 있다[5]. 이 연구에서는 전해환원 공정(Fig. 1)으로 범위를 제한하고, 공정에 대한 설명은 생략하도록 한다. 세 번째 항목인 잠재적인 고장요소에 대해서는 대표성을 띌 수 있는 10가지 항목들 즉, ①임계, ②화재/폭발, ③낙하/충돌/전도, ④지진, ⑤불활성분위기 손상, ⑥전원상실, ⑦공정장치 운전불능, ⑧누출, ⑨과열, ⑩냉각기능 상실 등의 고장모드와 그 영향에 대해 논의하고자 한다.

Table 1. Various failure modes studied by the UNM group: electrorefining, cathode salt distillation, and ingot consolidation[4]

Electrorefining	
1	Temperature variations within the ER
2	Poorly characterized anodic feedstock
3	Change in rotational speed of electrodes and/or salt stirrer
4	Decreased electrode submersion depth
5	Electrical shorting of the electrode
6	Catching of integrated cathode scraper
Cathode salt distillation	
1	Poorly characterized feedstock
2	Temperature variations
3	Pressure variations
Ingot consolidation	
1	Poorly characterized feedstock
2	Feedstock delivery holdup
3	Temperature variations

2.2 전해환원 공정에서의 FMEA

Table 2에 정리된 것과 같이, ①운전원 오조작 및 잔류 축적에

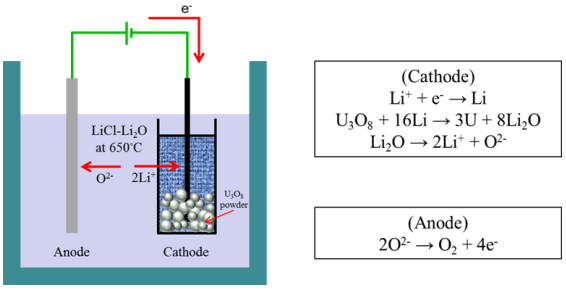

Fig. 1. A schematic diagram of the electrolytic reduction process.

Table 2. A preliminary study of various types of failure modes and their effects for the electrolytic reduction process in a pyroprocessing facility

분류	고장모드	영향
①임계	운전원 오조작으로 인한 핵물질 과잉도입	치명적 운전사고
②화재/폭발	전처리 오운전으로 인한 수분 유입	수소발생 조건
③낙하/충돌/전도	운전원 오조작 또는 취급장치 고장	핵물질적재 양극 바스켓 낙하/충돌
④지진	운전 중 운반용기 전도	핵물질적재 양극 바스켓 전도
⑤불활성분위기 손상	아르곤 셀 격납기능 상실	금속과 공기의 접촉, 화재/폭발
⑥전원상실	자연재해로 인한 전원 상실	운전사고 가능성
⑦공정장치 운전불능	과인가 전류로 인한 전극 손상	치명적 운전사고
⑧누출	증기배출관 막힘으로 인한 과압 발생	용융염 및 핵물질 누출
⑨과열	온도조절기 고장으로 온도 제어 상실	과량의 용융염 휘발 및 방출
⑩냉각기능 상실	냉각장치 고장으로 냉각능력 상실	과량의 용융염 휘발 및 방출

의한 핵물질 과잉도입은 임계 측면에서 치명적 운전사고로 이어질 수 있다. ②,⑤불활성 분위기의 상실로 인한 공기 및 수분의 유입은 수소발생 조건에서 화재/폭발의 가능성이 있다. ③,④운전원의 오조작, 취급장치 고장 및 지진 등의 상황으로 전해환원 양극 바스켓의 수송 시에 낙하/충돌/전도 등의 발생이 예상되고, ⑥,⑦자연재해로 인한 전원상실이나 공정장치 운전불능의 상태에서는 운전사고의 가능성을 내포하고 있다. 또한, ⑧,⑨,⑩ 증기배출관 과압, 온도 제어 상실, 냉각장치 고장의 경우에는 용융염 및 핵물질의 누출로 이어질 개연성을 지니고 있다. 이 외에도 전해환원 공정과 관련하여 다양한 종류의 고장모드가 있을 수 있으며, 그로 인한 영향은 위에서 언급된 10가지 종류의 범위로 분류하여 고려할 수 있을 것이다. 또한, 전해환원 공정 이외에도 한국원자력연구원에서 개발되고 있는 전처리, 전해정련, 전해제련, 염증류, 잉곳제조, 폐기물처리 등의 공정들에도 FMEA법을 적용한 연구가 진행될 수 있다. 더 나아가 분석된 결과를 토대로 하여 사고의 예방, 확대방지 및 영향완화를 위한 구조, 시스템, 구성품(SSC, structure, system, and component)과 행정적 조치(AC, administrative controls)들이 함께 연구되면 안전성 향상을 위한 방안을 마련하는데 활용될 수 있을 것이다.

3. 토의

파이로시설의 안전성 향상을 위해서 FMEA 방법을 사용하여 전해환원 공정에 대해서 기초적인 분석을 진행하였다. 이 방법을 이용하여 10가지 분류들인 임계, 화재/폭발, 낙하/충돌/전도, 지진, 불활성분위기 손상, 전원상실, 공정장치 운전불능, 누출, 과열, 냉각기능 상실 등에 대한 연구를 진행하였고, 해당 공정에 대한 전반적인 위험 요소들을 거시적인 관점에서 한 눈에 인지할 수 있었으며, 그 영향에 대해서도 검토를 진행하였다. 향후 파이로시설의 각각의 공정에 대해서도 FMEA 방법을 이용하여 고장 요소와 그 영향에 대한 평가를 진행하며, 사고의 예방, 확대방지, 영향완화 등과 같은 요소들을 추가적으로 고려하면 각각의 공정의 안전성 개선을 기반으로 한 시설 전반의 안전성 향상을 기대할 수 있을 것이다.

4. 참고문헌

[1] 파이로 일관공정 시험시설(PRIDE) 설계보고서, KAERI/TR-4132/2010.

[2] Integrated Safety Analysis Guidance Document, NUREG-1513, U.S. NRC.

[3] 서석준, 문성인, 정원명, 유길성, 구정회, 김호동, "사건수목을 이용한 파이로시설의 안전성 분석 방안", 한국방사성폐기물학회 2015 춘계학술발표회 논문요약집, 13(1), 75-76, 5.27~29, 2015, 인천.

[4] R.O. Hoover, P.L. Lafreniere, E.D. Blandford, "Commercial-Scale Pyroprocessing Failure Modes and Implications for Operations and Safeguards", Transactions of the American Nuclear Society, 110, 58-61, 2014.

[5] D.H. Stamatis, "Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution", ASQ Quality Press, Milwaukee, WI (2003).