Check for updates

Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 47, No. 3, pp. 315-320, June 2021.
ISSN 1225-0988 | EISSN 2234-6457
https://doi.org/10.7232/JKIIE.2021.47.3.315
© 2021 KIIE
<Case Studies>

2019년 원전 인적행위 관련사례 경향분석

박 정 진†

한국수력원자력 중앙연구원

A Study on the Trend of Human Performance Related Events at Nuclear Power Plant in 2019

Jeongjin Park

Central Research Institute, KHNP

Events at nuclear power plants are very rare. It is not easy to find lessons with the existing methods of carrying out improvement activities based on lessons learned from the event. In addition, high reliability systems are quite vulnerable to human error. So human performance require periodic management. For the managing human performance, most nuclear power plants identify the weak points and seek to improve human performance. Also, they evaluate and give feedback on human performance levels through periodic monitoring. In this paper, the major causes and upper control limit were selected for trend analysis in human performance related events at nuclear power plants in 2019. In addition, additional analysis was conducted in subjects exceeding the upper control limit. So several insights were discovered and corrective actions will be conducted to improve human performance in nuclear power plant.

Keywords: Human Error, Trend Analysis, Human Performance, Nuclear Power Plant Event

1. 서 론

1.1 원전에서 인적행위의 모니터링

원자력발전소는 산업의 특수성으로 인해 여러 설비들이 다중화되어 사건이 거의 발생하지 않거나, 극히 드물게 발생한다. 이러한 고신뢰도 시스템에서 가장 취약한 분야는 바로 인적행위이다. 신뢰성을 쉽게 향상시킬 수 없고, 작게는 Near Miss부터 크게는 원자로 정지까지 유발할 수 있는 인적오류의 특성상 원전에서 인적행위는 필수 관리해야 하는 항목이다. 따라서 우리나라 뿐만 아니라 세계 대부분의 원전에서는 이러한 인적행위를 주기적으로 모니터링 하고 있다. 인적행위를 모니터링하는 방법은 매우 다양하나, 미국 원자력사업자협회(INPO)에 따르면 가장 대표적이며 일반화된 방법이 경향분석이다. 우리나라 원전에서도 이러한 경향분석을 통해 인적행위를 모니터링 하고 있으며, 가장 대표적인 모니터링 수단으로 활용 중에 있다.

1.2 인적행위 관련사례 경향분석

원자력발전소에서 작업요청을 포함한 모든 크고 작은 사례들은 CAP(Corrective Action Program)이라는 시스템을 통해 관리되고 있다. 효율적인 프로그램 관리를 위해 CAP에서는 중요도 등급과 원인코드가 부여되고, 이를 주기적으로 관리하고 있다. 이러한 사례들의 원인코드는 인적행위 뿐만 아니라 설비적인 문제까지 포함하여, A.인적신뢰도, B.운영/관리, C.절차서/문서, D.설비신뢰도로 구분되어 있다. 인적행위 관련 절차에 따르면, 인적오류는 개인의 오류 뿐만 아니라 개인이 소속된 조직의 오류까지 포함한다. 이에 따라 인적행위 관련사례의 경향분석 범위는 설비신뢰도를 제외한 인적신뢰도, 운영/관리, 절차서/문서의 3가지 그룹이다. 또한 보고된 사례의 잠재영향을 평가하여 우수사례를 Good Catch로 지정하여 Near Miss 성격의 사례를 지정, 관리를 통해 자발적인 보고문화를 조성하고, 이를 통해 인적행위를 향상시키고 있다.

† 연락저자 : 박정진 선임연구원, 34101, 대전 서구 유성대로 1312번길 70, 한수원 중앙연구원, Tel : 042-870-5272, Fax : 0502-734-0570, E-mail : jj.park82@khnp.co.kr
2020년 9월 23일 접수; 2020년 11월 17일 수정본 접수; 2020년 12월 21일 게재 확정.

2. 분석대상 및 방법

2.1 분석대상

인적행위 경향분석은 매년 직전년도의 1월 1일부터 12월 31일에 발행된 CAP 통지를 대상으로 하고 있으며, 분석대상은 중요도와 원인코드를 바탕으로 선정한다. 운영개선프로그램 특성상 원인코드는 중요도 1~3등급에 대해서만 부여되고, 인적행위의 분석 원인은 설비신뢰도를 제외한 개인/조직 요인으로 한정짓고 있다. 위의 조건을 적용하여, 2019년 분석대상 전체 약 26,000건의 비중을 확인해 본 결과 아래 <Figure 1>과 같이 나타났다.

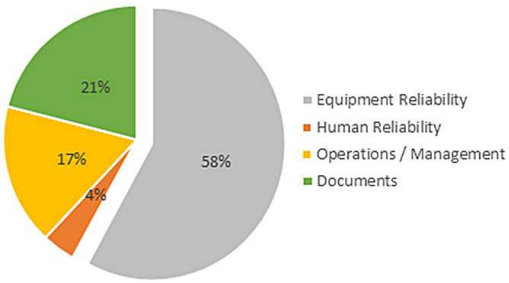


Figure 1. Cause Code Ratio of CAP in 2019

2.2 분석방법

경향분석을 위해 사용하는 방법은 크게 통계적(statistical)인 방법과 인지적(cognitive)인 방법으로 구분된다. 보통 발전소에서는 발생된 사건이나 활동 등에 대해서 잘 알고 있기 때문에, 일반적으로 통계적인 방법과 인지적인 방법을 모두 사용할 수 있다. 하지만 발전소가 아닌 전체 발전소의 경향을 분석하기 위해서는 모든 이벤트나 일정을 알 수 없고, 발전소별 노형이나 문화, 지역 등의 차이와 같은 다양한 변수로 인해, 인지적인 방법을 활용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 14개 발전소(발전소당 2개 호기) 전체의 경향을 분석하기 위해 통계적인 방법만을 활용하였다.

분석방법은 각 발전소별 CAP의 건수 차이 등 표본이 평균값 대비 20%를 초과하는 등 크기편차가 크게 발생하고 있으므로, 각 발전소 및 기간의 계수형데이터를 비율로 환산한 P관리도(P Control Chart)를 활용하였다. 관리도는 원데이터를 기록한 런 차트에 평균값을 산출하여 작성하였고, 표준편차를 계산하여 평균값에 3σ를 가산한 관리상한(UCL, Upper Control Limit)를 추가하여 이를 초과한 대상을 추가분석하는 방식으로 수행하였다. P관리도의 표준편차는 각 데이터 값을 대상으로 아래 수식(1)을 활용하여 계산하였다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{P(1-P)}{N}} \quad (1)$$

P = 표본 비율 / N = 전체 표본 개수

3. 분석 결과

인적행위관련 모든 원인에 대해 경향분석을 수행하는 것은 너무 과도하므로, 많은 비중을 차지하거나 특정 경향을 보이는 원인에 집중하여 분석을 하는 것이 필요하다. 따라서 주요 원인을 먼저 선정한 후 발전소별, 월별 변화 추이를 분석하였다.

3.1 주요원인 선정

전체분석대상의 57개 원인그룹에 대해 아래 <Figure 2>와 같이 파레토 차트를 작성하였고, 0.5% 이하 원인에 대해서는 기타(31개항목, 5.9%)로 처리하였다. 전체 원인코드 중 20%를 차지하는 원인(<Figure 2>의 회색 점선 안쪽)은 아래 <Table 1>과 같은 비중을 차지하고 있다.

Table 1. Top 20% Cause Code

Cause	C-13	B-32	C-14	B-22	C-11	A-12	B-23	C-24	B-01	B-02	A-11	B-03
Ratio(%)	18.0	15.2	14.0	6.5	5.9	3.8	3.6	2.9	2.8	2.5	2.5	2.4

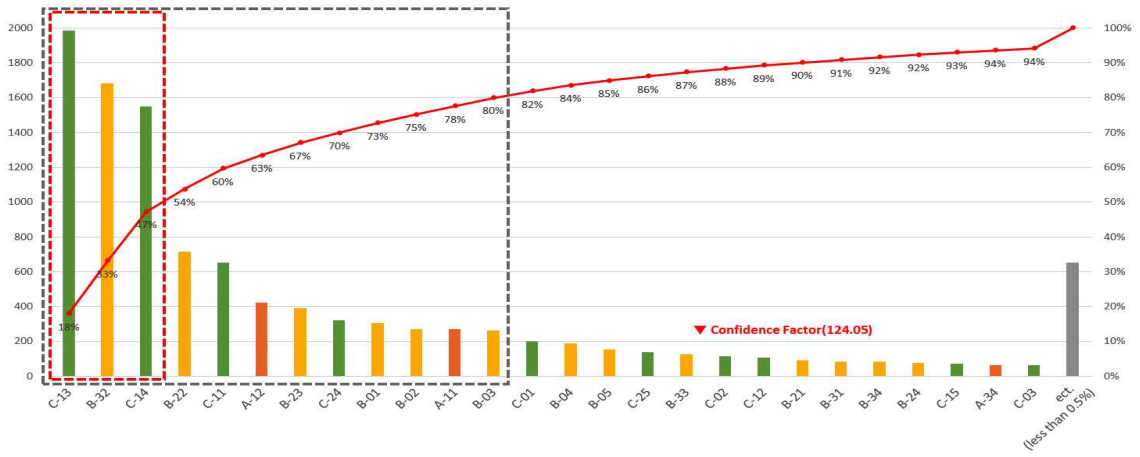


Figure 2. Pareto Chart of Detail Cause Code

파레토 기법(8:2)을 적용하기 전, 상위 20%를 차지하는 원인코드에 대해 유효성여부를 결정하기 위해 아래 수식 (2)에 따라 유효인자를 계산하였다. 전체 데이터 수가 200개를 초과하므로 수식 (2-3)에 따라 계산한 결과 124.05라는 값이 나오므로 상위 20%의 원인코드를 모두 포함하므로 12개의 원인은 주요원인으로 선정하기에 유효하다 할 수 있다.

$$n < 50, \quad CF = 1.282 \times \sqrt{0.21 \times n} \tag{2-1}$$

$$50 \le n < 200, \quad CF = 1.960 \times \sqrt{0.21 \times n} \tag{2-2}$$

$$n \le 200, \quad CF = 2.576 \times \sqrt{0.21 \times n} \tag{2-3}$$

CF = 유효인자, n = 데이터 개수

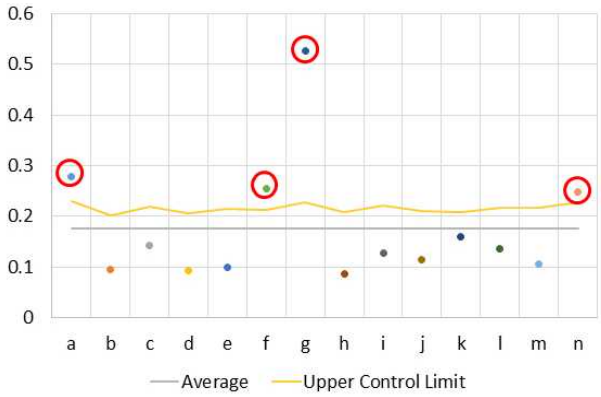
상위 12개 원인의 경우 C-13, B-31, C-14를 제외한 원인은 대부분 타 원인간 차이가 적으며, 12개 이외의 원인과도 차이가 적으므로 3% 이상을 차지하는 7개 원인에 대해 최근 8개 분기간 변화 추이를 확인하였다. 그 결과 7개 원인 모두 주목할만한 추이변동은 없으며, 일부 증가/감소추이를 보이는 항목 역시 모두 1% 미만의 변동을 보여 분석에 유의미하다고 판단하기 어렵다. 따라서 타 항목 대비 확연히 높은 비중을 차지하는 C-13, B-31, C-14를 집중 분석대상항목(<Figure 2>의 빨간점선 영역)으로 선정하였다. 여기에서 C-13, C-14는 절차서 관련 코드이며, B-31은 컴포넌트 기반 기기관리에 대한 원인코드이다.

3.2 주요원인 발전소별 경향분석

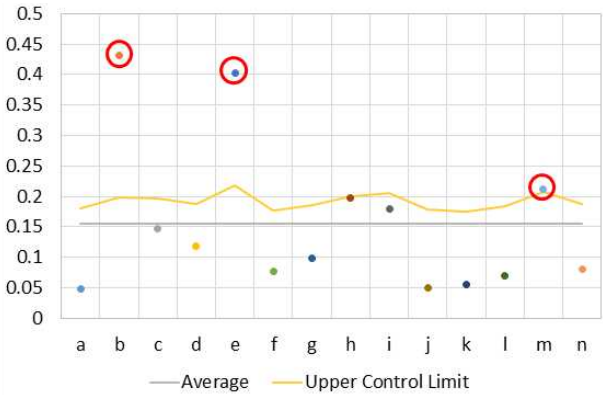
주요원인으로 선정된 3개의 원인코드별 전체 14개 발전소(a~n)의 원인비율 런차트에 관리도를 작성하였다. 회색선은 전체 발전소의 평균값이며, 각 발전소별 관리상한(UCL)을 노란색으로 작성한 결과 C-13원인의 관리상한을 초과한 발전소는 4곳, B-31원인과 C-14원인의 관리상한을 초과한 발전소는 각각 3곳으로 나타났다. 관리상한을 초과한 발전소에 대해서는 분석대상기간에 대해 월별 관리도를 통해 나타난 경향에 대하여 재확인을 수행하였다.

(1) C-13 원인코드

C-13의 관리상한을 초과한 발전소는 a, f, g, n으로 나타났으며, 특히 g의 경우 타 발전소 대비 매우 크게 초과한 것으로 나타났다. 관리상한을 초과한 곳의 월별 분석결과를 확인한 결과는 <Figure 4>와 같다. a, g, n 발전소의 경우 월별 관리상한은 초과하지 않는 것으로 나타났으며, 발전소 내 호기(1개 발전소 내 2개 호기 존재)의 구분이나 기간에 따라 편중되지 않고 해당원인이 차지하는 비중이 고루 분포하여, 원인코드 C-13과 관련된 활동이 고루 수행되고 있음을 알 수 있다. f 발전소의 경우는 3월에 월별 관리상한을 2배 가량 초과하여, 이에 대한 원인을 분석해 본 결과, C-13 관련 활동이 절차서 변경에 따라 3월에 집중되어 시행되었음을 확인하였다. 통계적인 분석으로 원인이 규명되지 않는 사항에 대해서는 인지적인 경향분석을 위해 해당 발전소로 원인분석요청을 수행할 수 있으나, f 발전소의 3월 관리상한 초과건은 원인이 분명하므로 별도의 조치는 불필요하다. 단. C-13 원인코드 관련 사례들을 살펴본 결과 원인코드의 목적과 다른 사례들도 다수 발견되어, 원인코드 신뢰성 차원에서의 일부 개선이 필요하다.

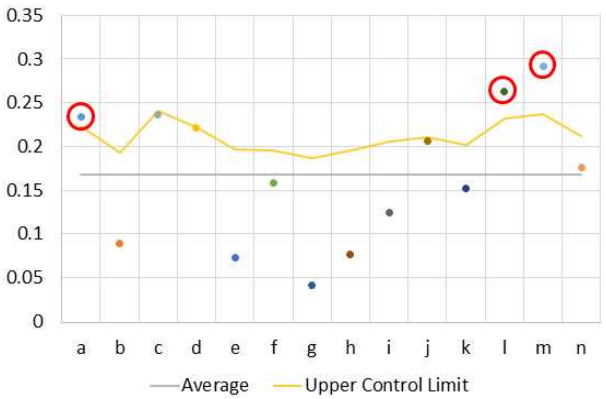


(a) C-13 cause code



* h UCL : 0.199738/Ratio : 0.198288

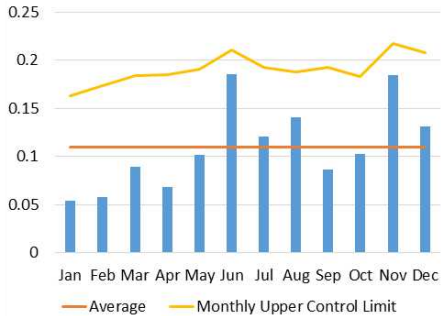
(b) B-31 cause code



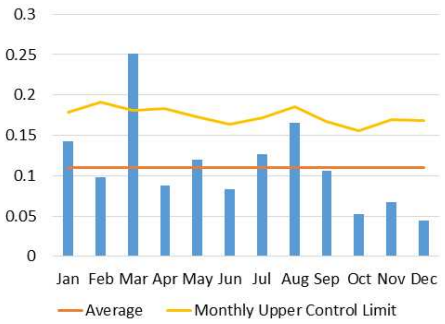
* c UCL : 0.240601/Ratio : 0.236842, d UCL : 0.221223/Ratio : 0.221081, j UCL : 0.210006/Ratio : 0.206388

(c) C-14 cause code

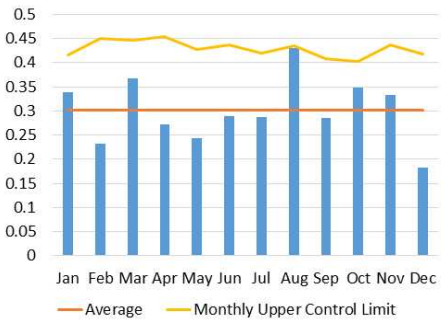
Figure 3. Control Chart of Major Cause Code



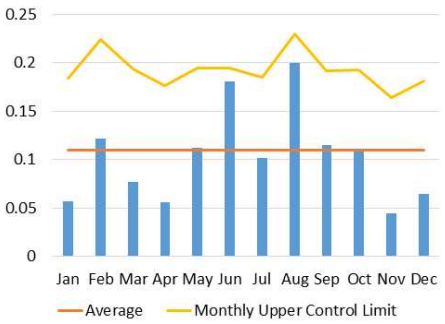
(a) 'a' plant



(b) 'f' plant



(c) 'g' plant

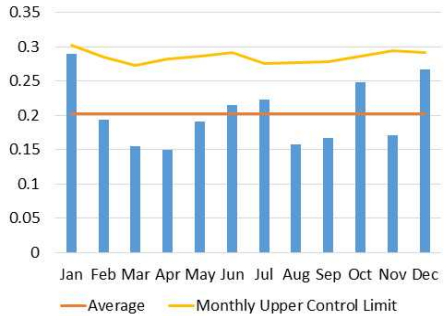


(d) 'n' plant

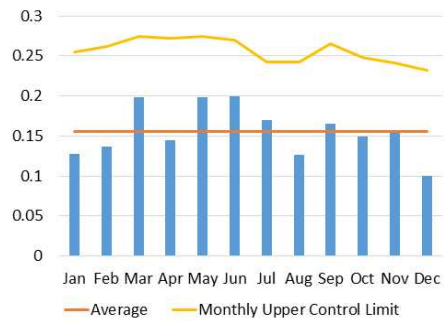
Figure 4. Monthly Control Chart of C-13 Cause Code

(2) B-31 원인코드

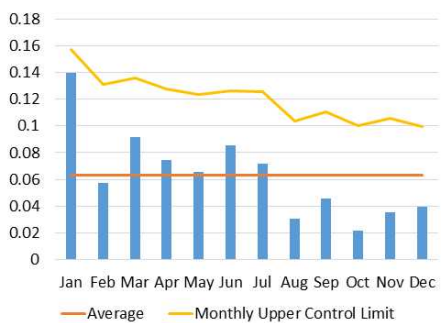
B-31의 관리상한을 초과한 발전소는 b,e,m으로 나타났으며, 각 발전소별 월별 관리도는 <Figure 5>와 같다. b, e, m 모두 각 발전소별 관리상한은 모두 초과하지 않았으며, 상세 확인결과 호



(a) 'b' plant



(b) 'e' plant



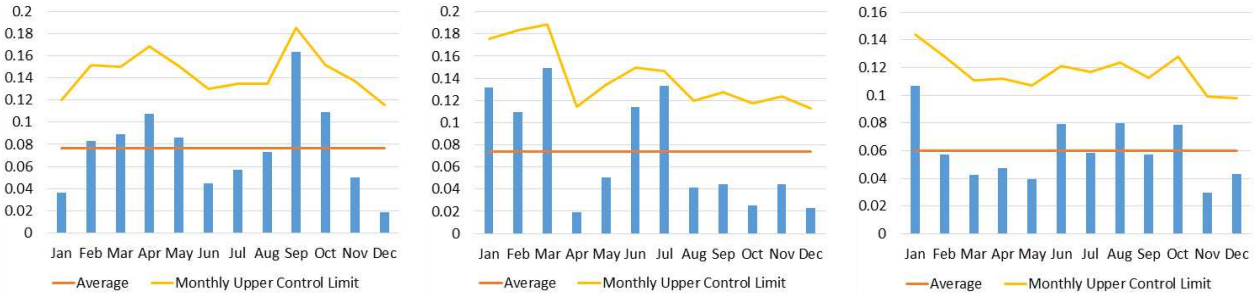
(c) 'm' plant

Figure 5. Monthly Control Chart of B-31 Cause Code

기별 편중되지 않았다. 다만 m발전소의 경우 1월에 타 기간 대비 유독 높게 나타났으나, 그 기간에 수행된 작업이나 발생된 사례가 많아서 비중이 다소 높아진 것으로 나타났다. B-31의 경우, 유의미한 추이는 없었으며, 해당 작업이나 사례에 대한 지속적인 현장점검이 필요한 항목으로, 주요 원인으로 지목된 만큼 경영진의 지속적인 관심과 확인/관리가 필요할 것으로 판단된다.

(3) C-14 원인코드

C-14의 관리상한을 초과한 발전소는 a, l, m으로 나타났으며, 각 발전소별 월별 관리도는 <Figure 6>과 같다. a, l, m 모두 월별 관리상한을 초과하지 않았으며, 일상적인 활동에 의한 결과로 나타났다. 유의미한 경향은 나타나지 않았으므로, 추가적인 분석은 불필요하나, 다만 사례들 중 문제/조치 등의 중요도에 서로 차이가 존재하나 동등한 레벨로 관리되는 사항이 일부 존재하여 이에 대해서는 개선이 필요하다.



(a) 'a' plant (b) 'l' plant (c) 'm' plant

Figure 6. Monthly Control Chart of C-14 Cause Code

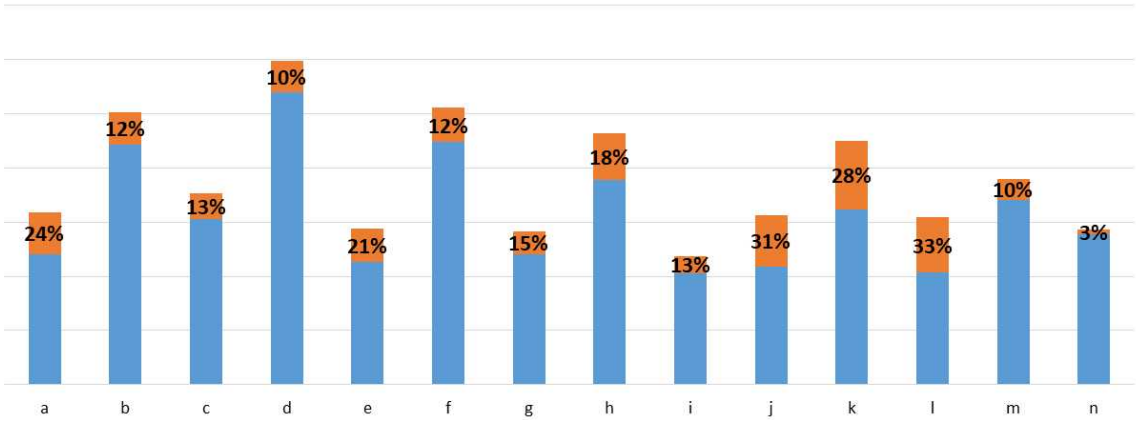


Figure 7. Good Catch Ratio Each Plants

3.3 Good Catch

운영개선프로그램(CAP)에서는 발행된 통지 중에 중요계통의 이상상태 발견 등 과도상태를 예방한 사례를 Good catch로 지정하여 운영하고 있다. 이러한 Good catch는 인적행위 측면에서 Near Miss 사례와 유사한 사례이며, 인적행위 향상을 위해서는 Near Miss를 적극 발굴하여 사전조치가 필요하다. 2019년에는 발전소에서 Near Miss 사례를 발견하거나 경험하는 경우 Good Catch로 선정하도록 운영하는 관리체계 개선에 따라 시범발전소에 대해서 적용하였으며, 그 결과 <Figure 7>과 같이 시범적용한 발전소(e, k)가 전체 평균(약 17%) 대비 Good Catch 선정비중이 20% 이상 높게 나타났다. 이 관리체계는 추후 전사에 적용할 예정이므로 Good Catch 활성화에 대해 관리자 및 전 종사자의 관심이 필요하다.

4. 결 론

인적행위 경향분석은 발전소 측면에서 인적행위를 주기적으로 모니터링하여 취약분야를 확인하여 개선방향을 수립하기 위해 필요하다. 또한 전사적으로는 전체 발전소에 대한 경향을 파악하고 취약분야 또는 취약한 발전소를 사전에 인지하여 개선활동 수립에 도움이 된다. 본 논문을 통해 다수의 원자력 발전소에서 인적행위 관련 절차서 내용 및 일부 컴포넌트 기기의 취약한 분야를 도출하였고 각 항목에 대해서는 피드백을 통해 시사점을 공유하였다. 분석과정에서 통계적인 방법만을 활용함으로 인해 발전소 자체 계획예방정비나 중요사건발생 등에 대한 인지적인 경향분석방법은 충분히 고려하지 못한 점에 대해서는, 발전소별 자체 활동에 대한 사전 인지를 바탕으로 복합적인 경향분석 수행방식으로 전환에 대한 추가 연구가 필요하다.

또한, 본 논문에서에서 수행한 연간단위의 경향분석은 과거 데이터를 바탕으로 수행한 후행지표(lagging indicator)이다. 후행지표는 과거 사례의 재확인 및 설정기간 단위 결산 등의 의미는 있으나, 산업발달의 고도화 및 고신뢰도 측면에서의 실시간적인 모니터링 측면에서는 다소 미흡한 점이 존재한다. 타 산업계에서는 실시간 모니터링을 바탕으로 취약분야를 찾고 이에 대한 선제적인 개선을 통해 신뢰도를 높이고 있다. 원전과 같은 고신뢰도 시스템에서는 이러한 선제적인 대응이 필수적이다. 따라서 본 논문에서 활용된 후행지표와 함께 현재 또는 선행지표(leading indicator)를 같이 운영하여 모니터링을 하는 방향으로의 추가 연구를 지속할 예정이다. 이를 통해 실시간 모니터링을 한다면 인적행위 측면에서 신뢰도를 크게 향상시킬 것이다.

참고문헌

IAEA (2012), Low Level Event & Near Miss Process for NPP, Safety Reports Series No.73.
INPO (2005), Guidelines for Performance Improvement at Nuclear Power Station, INPO 05-005.
INPO (2007), Performance Assessment and Trending, INPO 07-007.
KHNP (2019), Corrective Action Program(CAP), SOP-2036.
KHNP (2019), Human Performance(HU) Management, SOP-2035B.
KHNP (2019), Management of Near Miss, SOG-2035-02.
KHNP (2020), Trend Analysis of Human Error Event in 2019, 2020-50 003339-jeon-0295IR.
WANO (2010), Human Performance Key Performance Indicator, WANO GL ATL 10-001.
WANO (2019), Human Performance Programme Assessment Model, WANO GL 2019-03.
WANO (2019), Performance Monitoring, WANO GL 2019-01.

저자소개

박정진 : 충남대학교 전기공학과에서 2009년 석사학위를 취득하고, 현재 한국수력원자력 중앙연구원 기술지원실 발전운영그룹에 재직하고 있다. 연구분야는 인적행위향상, 인적오류사건 원인분석, 인적오류예방기법 등이다.