

원자력발전소 가동중정비 도입 효용성 고찰

현진우 · 염동운 · 이상대[†]

한국수력원자력(주) 중앙연구원

(2020년 1월 29일 접수, 2020년 2월 26일 수정, 2020년 2월 28일 채택)

A study of the effectiveness of Online Maintenance for Nuclear Power Plant

Jin Woo Hyun · Dong Un Yeom · Sang Dae Lee[†]

Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co.

(Received 29 January 2020, Revised 26 February 2020, Accepted 28 February 2020)

요 약

가동중정비(OLM : On-Line Maintenance)란 발전소 건전성 유지를 위해 운전 중에 수행하는 예방정비 활동으로 특히 안전설비에 대해 운전 중에 수행하는 예방정비 활동을 말한다. 국내 원자력발전소에서는 2009년부터 가동중정비 도입을 위한 타당성검토를 수행하였고 2010년 규제기관에서도 규제지침에 대한 연구과제를 완료하여 가동중정비 도입을 검토하였으나 후쿠시마 사고 등 원자력발전소의 대외여건 변화 등으로 도입검토가 중단된 상태이다. 하지만 원전의 안전성과 운전성을 향상시키기 위하여 근본적인 대책 수립이 요구되고 있는데 이를 위하여 필요한 가동중정비가 왜 필요한지 어떠한 효과가 있는지 등에 대하여 고찰하여 보았다.

주요어 : 가동중정비, 원전이용율, 예방정비

Abstract - OLM(On-Line Maintenance) is PM(Preventive Maintenance) activity of safety related equipment during running of Nuclear Power Plants. Korea Hydro & Nuclear Power-co.(KHNP) and regulator institute already reviewed the adoption of on-line maintenance in 2010 but now because of changing conditions of nuclear industry it has been halted. Even though that, OLM is one of the most effective programs to enhance safety and operability of Nuclear power plant. Therefore this paper introduce the strengths of OLM and explain why we should apply to Nuclear power plant.

Key words : OLM, PM, NPP

1. 서론

가동중정비(OLM : On-Line Maintenance)란 발전소 건전성 유지를 위해 운전 중에 수행하는 예방정비 활동으로 특히 안전규제 측면에서 중요한 안전설비에 대해 운전 중에 수행하는 예방정비 활동을 말한다. 국내 원자력발전소에서는 2009년부터 가동중정비 도입을 위한 타당성검토를 수행하였고 2010년 규제기관에서도 규제지침에 대한 연구과제를 완료하여 가동중정비 도입을 검토하였으나 후쿠시마 사고 등 원자력발전소의 대외여건 변화 등으로 도입검토가

중단된 상태이다. 참고로 국내 원자력발전소는 대부분의 주요설비들에 대하여 연료재장전시기에 맞춰 원전운전이 정지된 상태에서 한꺼번에 예방정비를 수행하고 있다. 최근에는 국내 원전의 품질서류 문제, 안전성 규제강화 등으로 계획예방정비 기간이 증가하고 있는 추세이며 원전 이용률은 과거에 비해 점점 낮아지는 현상을 보이고 있는 등 효과적인 원전운영이 쉽지 않는 현실이다. 지금과 같이 어려운 시기에 원전의 안전성과 운전성을 향상시키기 위하여 근본적인 대책 수립이 요구되고 있는데 이를 해결하기 위하여 가장 좋은 방법 중 하나가 가동중정비를 도입하는 것이라 생각한다. 현재 가동중정비는 미국, 유럽 등 전 세계 원전의 약 40%에서 수행 중에

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-42-870-5682 E-mail : hjwvip22@khnp.co.kr

있으며 본 논문에서는 이러한 국내 원전운영 환경에서 가동중정비가 왜 필요한지, 가동중정비를 도입하면 어떠한 효과를 예상할 수 있는지에 대해 기술하여 보았다.

2. 가동중정비 수행현황

2-1. 해외원전 현황

가동원전의 안전성 및 경제성 향상을 목적으로 리스크정보를 활용한 가동중정비 활동은 미국, 독일, 프랑스, 스웨덴, 스페인, 스위스, 핀란드 등 전 세계 가동원전 435기 중 대략 40% 원전에서 실시하고 있다.

- 미국 : 90년대 후반 활성화 되었으며, 현재는 발전소 전체 설비의 약 70%에 대해 가동중정비 수행 중
- 유럽 : 90년대 중반부터 프랑스, 스페인, 스웨덴 및 스위스 등 유럽 원전에서도 가동중정비 수행 중

2-2 국내 추진 현황

국내원전의 경우 2010년 규제기관과 가동중정비 도입을 검토하였고 고리원전 필수냉방계통을 대상으로 시범수행('10.11)을 마쳤으며[1] 규제기관에서도 관련 규제지침(안) 개발을 완료한 상태이다. 하지만 이후 후쿠시마사고, 고리원전 SBO(Station Black Out) 사고 등으로 전면 보류상태에 있다

3. 가동중정비와 원전이용률

3-1. 원전 이용률 중요성

기업의 기본적인 목적은 자본을 투입하여 이익을 극대화 하는 것이다 비록 국내 원자력발전회사가 공기기업이라고는 하지만 기업의 기본적인 목적을 달성해야 하는 것은 당연한 것이다. 그러면 이러한 기업의 이익을 극대화하기 위해 어디에 초점을 맞추어야 하는가? 당연히 원자력발전소를 최대한 가동하여 전기를 많이 생산해야 한다. 즉 원전 이용률을 극대화해야 하는 것이다. 원전이용률이 높아지면 기대할 수 있는 효과로 크게 3가지를 기술하여 보았다.

- 1) 세계를 선도하는 최고 수준의 원전달성 가능
 - 최근의 국내원전 이용률은 약 70 - 80% 수준으로 미국원전의 평균(2014년 91.9%)이용률에 비하면 다소 저조한 편이라 할 수 있다.
 - ☞ 미국 상위(25%)원전의 평균 이용률 : 약 95%[2]

- 2) 지속적인 원전수출을 위한 토대 강화
 - UAE원전 수출에서 큰 장점으로 역할을 한 것 중 하나가 원전의 높은 이용률이었다. 앞으로도 원전 수출을 위해서는 높은 이용률을 유지하는 것이 추가원전 수출에 월등히 유리할 것이다.
- 3) 이용률 1%만 올려도 원전 1기정도의 수명연장 효과
 - 한호기당 이용률을 1%만 올려도 설계수명 40년 동안 40%, 이를 23기원전에 적용하면 920% 약9.2년이 된다. 이는 1개호기의 수명연장 기간과 맞먹는 기간이다.

3-2 가동중정비를 통한 원전 이용률 향상

제일먼저 원전이용률이 어떻게 산정되는지 알아보자. 원전이용률의 계산식은 아래와 같다.

$$A = Pr/Pmax = Pr/(C \times T)$$

여기서, Pr : 실제발전량
 Pmax : 최대발전가능량
 C : 설비용량
 T : 가동가능시간

위의 식을 간략화 해보면 결국 이용률이란 가동시마다 100%출력 운전을 한다고 가정하면 실제운전시간/운전가능시간 으로 간략화 할 수 있다. 엄밀히 말해 이것은 가동률이지만 이해하기 쉽게 이용률로 가정하겠다.

자 그러면 어느 정도나 원전을 가동해야 90% 이상의 이용률을 달성 할 수 있을까? 이해하기 쉽게 한호기를 기준으로 계산해보자. 보통 이용률은 1년 단위로 계산하지만 일반적으로 원자력발전소의 계획예방정비(OH)가 18개월 주기이므로 18개월을 기준으로 생각해보겠다. 18개월을 일수로 환산하면 547.5일이다. 90%의 이용률 달성하기 위해선 1년 6개월 동안 54.7일 동안만 발전소를 정지시키면 이용률 90%가 되는 것이다. 다시 말해 OH, 비계획 발전정지, 출력감발을 다 포함하여 54.7일 이내로 유지하면 된다는 것이다. 똑같이 계산해보면 미국의 원전이용률('2014년도 평균 91.9%) 또는 과거(후쿠시마사고 이전) 국내원전의 평균 이용률(약 92%)을 달성하기 위해서는 43.8일내에 모든 문제(OH, 비계획 발전정지, 출력감발)를 해결해야 한다는 것이다. 여기서 더 나아가서 선진 글로벌 상위 원전 수준인 94% 이상의 이용률을 달성하려면 32.9일 미만으로 유지해야 한다는 계산이 나온다.

그러면 이러한 계산 방법이 정말 맞는 가 확인해

Table 3-1. 국내원전 발전운영 실적(2020.2.25.)[3]

연도	불시정지			연간 OH 일수	호기당OH 일수	이용률	가동률
	건수	건/호기	일수/건				
2001	8건	0.50건	8.7	510	40.8	93.3%	90.1%
2002	8건	0.44건	13.3	438	39.8	92.7%	90.0%
2003	11건	0.61건	5.2	514	38.7	94.2%	91.2%
2004	12건	0.63건	3.1	715	44.7	91.4%	88.8%
2005	10건	0.50건	4.9	515	37.6	95.5%	92.1%
2006	11건	0.55건	3.8	467	33.3	92.3%	92.8%
2007	12건	0.60건	5	762	43.1	90.3%	90.9%
2008	7건	0.35건	1.6	460	32	93.4%	93.6%
2009	6건	0.30건	2.4	677	48.7	91.7%	90.4%
2010	2건	0.10건	1.1	765	52.4	91.2%	89.5%
2011	7건	0.33건	5.4	711	52.7	90.7%	90.3%
2012	9건	0.39건	21.8	1130	76.4	82.3%	82.3%
2013	6건	0.26건	8.5	1908	121.9	75.5%	75.7%
2014	5건	0.22건	13.1	1036	75.1	85.0%	85.4%
2015	3건	0.13건	27.5	1184	71.7	85.3%	85.9%
2016	4건	0.16건	25	1373	88.6	79.7%	79.9%
2017	1건	0.04건	48.3	2396	199.7	71.2%	71.3%
2018	3건	0.13건	20.6	2824	164.2	65.9%	66.5%
2019	2건	0.08건	19.3	2435	155.1	70.6%	71.0%
평균	6.7건	0.33건	5.4	1095.8	74.6	85.9%	85.1%

보자. 표3-1은 국내원전 이용률이다. 품질, 케이블 문제 등으로 실적이 저조했던 2012년 이후를 빼고 계산해 보면 과거 실적이 비교적 좋았을 때(2001-2011년) 국내원전의 평균 OH일수는 42.6일, 호기당 평균 불시정지 평균일수 2.2일, 평균이용률은 92.4%이다. 호기당 OH일수와 이용률이 위에서 예로든 한호기에 대한 계산과 거의 맞아 떨어짐을 확인 할 수 있다.

결국 원전이용률을 높이려면 불시정지와 OH일수를 줄여야 하는데, 현재 발전소 불시정지는 실제로 이용률에 영향이 크지 않음을 볼 수 있다. 2014년 호기당 불시정지 건수는 0.22건으로 랜덤 고장을 감안하면 더 이상 발전정지 건수를 줄이기는 거의 한계에 도달했다고 할 수 있다. 실제로 불시정지 건수를 지금의 절반으로 줄인다고 가정해보자. 호기당 0.11건/년으로 이것을 18개월로 환산하면 약 0.16건/호기 이 되며 발전정지시마다 평균정지일수 5.4일을

곱해보면 약 0.9일로 호기당 하루정도 영향을 미칠 수 있다. 하지만 현 수준에서 호기당 0.16건(기존의 절반수준)으로 줄이려면 엄청난 투자와 노력, 거기에다 약간의 운까지 따라주어야 가능할 것이며 이는 투자대비 효과가 크지 않다고 할 수 있다. 따라서 아무리 설비신뢰도를 높여 불시정지를 0로 만들더라도 OH기간을 줄이지 못하면 선진원전과 같은 높은 이용률 달성은 불가능하다. (물론 그럼에도 불구하고 발전정지를 줄이기 위한 노력은 계속 되어야 한다)

4. 가동중정비 도입효과

원전의 운전성과 안전성을 향상시키기 위하여 가동중정비가 최적의 해법이 될 수 있다고 생각하는 이유와 장점을 크게 4가지로 요약하여 보았다.

Table 4-1. 학습 역삼각형[6]

학습 역삼각형		
2주후 우리가 기억하는 경향	개입의 형태	
우리가 말하고 행동한 것의 90%	실제 경험	능동적
	실제 경험 시뮬레이션	
	극적인 구성을 통한 연기	
우리가 말한 것의 70%	이야기하기	수동적
	토론참여	
우리가 보고 들은 것의 50%	실제로 이루어지는 것을 보기	
	시연하는 것을 보기	
	전시된 것을 보기	
	영상보기	
우리가 본것의 30%	사진보기	
우리가 본것의 20%	말하는 것을 듣기	
우리가 본것의 10%	읽기	

4-1 높은(90%이상) 이용률 달성 가능성

앞부분에서 이미 설명하였듯이 원자력발전소 이용률에 가장 많이 영향을 미치는 요소는 OH 기간으로 이를 줄이기 위해서는 가동중정비가 최적의 해법이다. 미국의 경우도 1990년대 OH기간이 평균 104일에서 가동중정비를 통해 2007년 40일대로 감소하였고 이용률은 70%에서 90%대로 향상되었다.[4]

현재 국내원전의 절차서상의 OH기본공기는 노형별로 약간의 차이가 있지만 주공정 약 30일 보조공정 7일로 37일정도이다. 한 치의 오차도 없이 OH를 기본공기 내에 마친다고 해도 불시정지, 출력감발등을 감안하면 최고 92.9%정도 달성할 수 있을 것이다. 하지만 계획대로 되지 않는 경우를 대비할 필요가 있다. 항상 많은 변수와 예측하지 못한 상황이 발생할 수밖에 없으며, 과거 사례를 봐도 계획보다 항상 OH기간은 늘어나면 늘어났지 줄어든 경우는 거의 없었다. (참고로 2012년, 이후 OH 평균 계획일수는 119일 정도이다[5])

또한 인간은 여유가 있을 때 실수하지 않는 법이다. 결국 또다시 꼭 짜여진 일정에 맞추다 보면(더군다나 최근에 강화된 안전기준까지 준수해 가면서) 안전을 위협하는 경계에서 아슬아슬하게 곡예를 탈 수 밖에 없으며, 때론 절차를 뛰어넘어야 하는 상황이 발생할 수도 있고 과거 사례처럼 소외전 원상실(SBO)사건이 재발되지 않는다고 누가 장담할 수 있겠는가?

그러면 어떻게 하면 안전을 위협하지 않으면서, 충분한 작업시간도 가지고 OH기간을 단축할 수 있을까? 답은 의외로 간단할 수 있다. OH기간에 하는 일의 많은 부분을 미리 해버리는 것이다. 즉 운전 중에 할 수 있는 모든 정비를 미리 수행하는 가동중정비를 하면 된다고 생각한다.

기존의 국내원전에서 과거 호기당 평균 40일대 OH를 유지할 수 있었던 것은 공정에 초점을 맞춰 일정을 강행한 측면이 있다고 볼 수 있으며 최근의 변화된 규제환경에서 OH기간 단축은 거의 불가능 실정이다. 따라서 안전을 보장하면서도 OH기간을 40일대로 유지할 수 있는 최적의 방법은 가동중정비가 좋은 해법이라 할 수 있다.

4-2 최고의 원전 운영 전문가 양성 효과

가동중정비 만이 우리가 실제로 경험하기 힘든 과도상태(Transient)와 가장 근접한 체험을 할 수 있게 하며 이를 통한 훈련이 최고의 원전 운영 전문가를 양성 할 수 있다. 인간은 기본적으로 실수를 통해 배워간다. 우리는 행동하지 않고 배울 수 없다. 행동한다는 것은 곧 실수를 저지른다는 것이다. 아기가 넘어지지 않고 어떻게 걸음마를 배울 수 있겠는가? 책을 읽고 강의만 들어서는 비행기 조정법을 배우지 못한다. 그런데 원자력발전소를 운영하는 회사는 실수를 용납하지 않는다. 아니 용납할 수가 없다. 원자력발전소 특성상 자칫하면 돌

이킬 수 없는 큰 사고로 이어질 수 있기 때문이다. 하지만 어디선가는 실수를 허락하고 이를 통해 배울 수 있는 기회를 주어야 한다는 것이 문제다.

위 표는 학습역삼각형이다. 인간이 가장 잘 배울 수 있는 방법을 설명하는데, 읽기의 경우 고작 2주 후 기억효과가 10%이다. 이에 반해 실제경험을 시뮬레이션할 때 90%를 기억할 수 있다고 한다. 실제와 비슷한 경험이 그토록 강력한 학습도구가 될 수 있는 것은 체험을 통해 배울 수 있기 때문이다. 즉 가동중정비야말로 안전하면서도 우리가 경험할 수 없었던 원자력발전소의 과도상태(Transient)와 가장 유사한 체험할 수 있도록 해준다. 가동중정비가 일부 안전계열의 이용불능을 만들기는 하지만 무엇보다 안전하다고 할 수 있다. 왜냐하면 가동중정비시 최고의 인력과 시간을 집중적으로 투입할 수 있으며 만약에 대비한 비상대책(contingency plan)을 철저히 수립하고 진행하기 때문이다. 언제 원전운영자가 안전계통 중 한 계열이 이용불능 상태에서 원자력 발전소를 안전하게 운전하여 보겠는가? 언제 비상디젤 발전기 1대가 정지된 상황에서 적절한 대처를 취하는 훈련을 해볼 수 있는가? 아무리 교육훈련이 잘되어 있어도 인간은 체험해보지 못한 위급한 상황에 적절히 대처하기 어렵다. 가동중정비를 하면서 실제와 비슷한 비정상상황에 대한 다양한 경험을 쌓도록 한다면 어쩌면 있을 수 도 있는 사고 상황에 대비해 최고의 전문가를 양성할 수 있을 것이다.

4-3 국내원전의 엔지니어링 프로세스 효과 극대화

현재 국내원전은 다양한 선진엔지니어링 프로세스를 도입 운영하고 있다. 하지만 이러한 엔지니어링 프로세스가 완전히 정착되어 적절히 활용되기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 특히 현장에서 일하는 직원들의 공감대가 절실히 요구되는데 이를 위해서는 엔지니어링 프로그램의 효과성과 필요성을 평상시에 많이 느낄 수 있도록 하는 것이 필요하다고 생각한다. 국내원전에서는 운전 중에는 주요설비 정비를 하고 있지 않기 때문에 리스크 상태변화가 거의 없고 안전에 대한 수치는 대부분 동일한 상태를 유지하고 있다. 항상 똑같은 리스크 수치를 보면서 엔지니어링 프로세스의 역할이 충분히 발휘 된다고 느끼기는 어렵다고 할 수 있다.

하지만 가동중정비를 도입하게 되면 리스크 관리가 필수적이며 자연스럽게 엔지니어링 프로그램을 활용한 시스템 엔지니어링을 할 수밖에 없는 환경이 될 수밖에 없다. 또한 엔지니어링 프로그램 중 많은 부분이 직간접적으로 가동중 정비와 밀접한 관련이 있어 가동중정비를 통해 본연의 역할을 발휘할 수 있으며 활용도가 대폭 상승할 것이다.

국내원전의 많은 엔지니어링 프로그램들은 실제 가동중정비를 위해 만들어졌으며 리스크관리 차원에서 가동중정비를 수행할 때 그 필요성이 극대화 된다.

- OLM 직접관련 프로그램 : 리스크정보감시시스템(RIMS), 정비규정(MR) (a)(4)항, 발전정지유발기기(SPV) Monitor, 기능적설비그룹(FEG), 예방정비(PM)
- OLM 간접관련 프로그램 : 운영개선프로세스(CAP), 소외전원상실 감시프로그램, 원전신뢰도 DB관리 시스템 등

4-4 발전소 안전성 향상에 기여

실제로 원전의 Outage기간 동안에는 여러 시스템이 동시에 정비가 이루어지고 안전에 중요한 시스템의 계열이 운전정지 되므로 리스크 측면에서 다소 더 위험할 수 있다. 따라서 안전관련기기를 가동중정비로 옮겨 Outage 기간 동안 주요설비의 이용불능시간을 줄이면 안전성을 더욱 확보 할 수 있다. 실제로 계획예방정비(OH)기간 리스크관련 CDF(Core Damage Frequency)를 보면 출력운전 대비 약 2~3배 증가하는 것으로 나타나며 가능한 OH기간 동안 안전관련 기기가 이용불능 되는 시간을 줄여줄 필요가 있다.

이를 위해서 일부 안전계통에 대해 가동중정비를 수행하고 OH 기간 동안은 이용 가능하게 함으로써 안전성을 향상시킬 수 있다. 예를 들어 비상디젤발전기, 잔열제거계통, 기기냉각수 계통 등은 노심냉각을 위해 중요한 기능이므로 출력운전 중 상기 안전계통을 사전에 정비할 경우 OH 기간 중 상시 운전대기 상태를 유지할 수 있어 안전성 향상에 기여할 수 있는 것이다. 또한 가동중정비를 수행하면 정비자원의 효율적 활용을 통한 정비품질 및 설비 신뢰도 향상이 가능하고 이와 더불어 계획예방정비 물량감소 및 숙련정비원 참여 확대가 가능함으로써 정비품질 향상 및 기기고장 가능성이 감소하는 효과를 기대할 수 있다.

규제기관에서도 가동중정비에 대한 공감대 형성 및 규제기술요건(안) 개발이 완료된 상태로 가동중정비에 대한 장점(경제성, 안전성 향상)에 대해 전반적으로 공감하고 있으며 이를 위한 새로운 규제 기술 기반(안)을 구축한 상태이다.

5. 결론

국내원전사업에서 선진 엔지니어링 프로세스를 도입하기 시작한지 10여년, 발전소 이용률은 갈수록 떨어지고 규제강화 등 대외 여건은 점점 어려워

지고 있는 이 시점에 무언가 큰 변화가 필요하다면 가동중정비 도입이야말로 국내 원자력발전소의 정비 문화를 획기적으로 바꾸고 한 단계 도약할 수 있는 방안이라고 생각한다. 이미 미국을 비롯한 세계 많은 원전에서(약40%) 수행하고 있는 가동중정비는 안전성과 경제성에서 효과가 입증되었다. 국내에서도 OLM에 관한 관련 법규 검토가 끝났으며 국내 원전도 OLM 수행을 위한 시스템(MR, RIMS 등)을 기 운영 중에 있다. 물론 아직까지는 국내 규제상 안전계통의 예방정비를 위한 자발적인 운전제한조건에 진입하는 것을 허용하고 있지 않는 등 풀어할 숙제가 많은 것은 사실이다. 하지만 오히려 그렇기 때문에 사업자가 먼저 이 문제를 적극적으로 개선하여 추진할 필요가 있다고 생각한다. 높은 발전소 이용률을 달성할 수 있고, 침체 되어 있는 엔지니어링 업무를 살아 움직일 수 있게 하며, 경제성과 안전성 향상이라는 두 마리 토끼, 아니 세 마리 이상의 토끼를 잡을 수 있는 가동중정비 도입이야말로 현 시점에서 다시한번 진지하게 검토하여야 할 사안이며 추진되어야 한다고 확신 한다. (어제와 똑같이 살면서 다른 미래를 기대하는 것은 정신병 초기 증상이다 - 아인슈타인)

References

1. Jin Woo Hyun, Jin Gyu Han etc., 2012, "Development of Maintenance Management Base Using System Function Analyses", KHNP., pp. 257.
2. 2017, "WANO 2007 4th Quarter PI data(Unit Capability Factor)" WANO., pp. 1, WANO.
3. 2014, "2014.12.9. Power plan/performance management system report" KHNP., pp. 1.
4. Jang Hee Seung, 2009, "Result of Technical Review on Screening Criteria and EPRI Workshop for On-Line Maintenance" KHNP., pp. 24.
5. 2015, "The plan of power production of Nuclear Power Plants in Korea" KHNP., pp. 1.
6. Robert T. Kiyosaki., 2010, "Conspiracy of the rich" hbooks., pp. 101-102.