

정책 이슈페이퍼 14-05

국내외 원전안전규제시스템 비교

박우영, 이상림

목 차

- I. 배경 및 문제점 / 1
- II. 조사 및 분석 결과 / 3
- III. 연구 결과 및 정책 제언 / 22
- IV. 기대 효과 / 24
- 〈참고자료〉 / 25

I. 배경 및 문제점

1. 연구 배경

- 원자력 발전은 경제성과 동시에 기후변화에도 대응할 수 있는 유일한 전원으로 현재 많은 나라들이 원자력 발전을 주요 전원으로 사용하고 신규 도입도 고려하고 있음.
- 그러나 과거 여러 차례의 심각한 원전사고로 원자력에 대한 국제 사회의 의구심은 깊어졌고, 급기야 2011년 후쿠시마 제1원전 사고가 발생한 이후 독일, 스위스, 벨기에 등은 원자력 발전을 포기하거나 축소하는 방향으로 에너지 정책을 전환하였음.
- 결국 지속가능한 전원으로서 원자력을 사용하기 위해서는 원전의 안전성을 담보할 수 있는 제도적 장치와 시스템을 확보하여 원전에 대한 수용성을 제고할 수 있는 방안이 필요한 상황임.

2. 연구 필요성 및 목적

☐ 연구 필요성

- 원활한 원전 운영을 위해서는 원자력 발전소의 안전성을 확보하는 것이 필수적임. 따라서 원전 안전성을 측정하고 이의 변화를 관찰하여 안전성이 훼손되지 않게 유지하는 것은 매우 중요함.
- 하지만 원전의 안전성을 정확히 측정하는 것은 거의 불가능함.
 - 안전성은 사고가 발생했을 때에만 비로소 관측가능해지는 비관측성이라는

속성을 내포하고 있기 때문임.

- 비록 원전의 안전성을 측정하는 것은 어려운 일이지만, 안전성을 구성하는 요인에 대해서는 몇 가지를 고려해볼 수 있음.
- 첫 번째는 원자력의 안전성을 확보하는 데 있어 가장 중요하고 기본적인 것인 원자력의 기술적 완성도를 높이는 것임.
 - 원전은 방사성 물질이라는 매우 불안정한 물질을 생산하기 때문에 안전한 원전 운영을 위해서는 불안정한 방사성 물질을 인간과 자연으로부터 기술적으로 완벽히 통제하는 것이 필요함.
 - 그러나 아무리 기술적 완성도가 높아도 운영자의 안전의식이 결여될 경우 안전이라는 가치는 확보되기 어려움.
- 둘째, 원자력의 안전한 운영을 위해서는 원자력 안전문화 조성과 같은 비 기술적 요인이 필요함.
 - 하지만 안전문화 그 자체는 강제성이 없기 때문에 원전 사업자는 원전 안전성이 수익성과 배치될 때 안전성을 훼손하면서 수익성을 확보하려는 유인을 가지게 됨.
- 이렇듯 안전한 원자력 이용을 위해서는 원자력 안전문화가 필요하지만, 안전의 비관측성으로 인해 안전관리의 도덕적 해이 현상이 발생할 수 있음. 따라서 안전한 원전 운영을 위해 제도적 차원에서의 관리·감독 즉, 안전규제시스템이 요구되고 있음.

☐ 연구 목적

- 본 연구는 전 세계 원전 보유국이 원전의 안전성을 확보하기 위해 구축하고 운영 중인 원자력 안전규제시스템을 비교 분석함.

- 전 세계 원자로 운전실적 지표를 분석하여 주요 원자력 사고 전후에 유의한 실적변화가 있는지를 분석하여, 사고 이후 정책적 또는 사회문화적 변화가 원자력 발전소 운영에 미친 영향을 살펴봄.
- 더 나아가 원전의 안전한 운영에 필요한 요인 중 비기술적 요인 특히, 안전문화의 중요성을 밝히고 향후 원자력 정책수립에 기여하고자함.

Ⅱ. 조사 및 분석 결과

1. 주요국 원자력 안전규제시스템

- 각국의 안전규제시스템은 중대 원전사고를 통해 크게 개혁되었음. 특히 1979년 TMI사고 이후 미국의 규제 변화는 매우 뚜렷함.
- 하지만 체르노빌 원전사고에 따른 각국의 원자력 안전규제시스템에는 큰 변화가 없는 것으로 나타남.
 - 체르노빌은 미국과 지리적으로 먼 곳에 위치하였고, 사고의 원인도 안전문화가 결여된 상황에서 발생한 인재였다는 점에서 미국의 제도적 변화는 전혀 없었던 것으로 보임.
 - 또한 다른 주요국의 안전규제시스템도 체르노빌 원전사고로 크게 변화되지 않은 것으로 조사됨.
- 그러나 전 세계 원자로의 평균 이용률은 1986년 체르노빌 원전 사고가 발생하기 이전에는 원자로 이용률이 매우 가파르게 상승하고, 사고 이후에는 증가세가 크게 둔화되고 1993년까지 이용률이 정체된 것으로 나타남.

- 이하에서는 이러한 원자로 이용률의 추세적 변화의 유의성을 통계적으로 확인하고, 추세적 변화의 요인을 확인해 보고자함.

2. 전 세계 원자로 운전 현황

- IAEA는 PRIS(Power Reactor Information System)를 통해 전 세계에서 운영한 모든 원자로들의 특성(specification), 운전실적(performance), 전력공급중단(outage) 등을 포함하는 포괄적인 데이터뿐만 아니라 건설, 계획, 해체 중인 원자로에 대한 정보도 제공하고 있음.¹⁾
- 원자력 발전소 운영경험은 미국, 프랑스, 일본, 영국, 러시아, 독일, 캐나다 순으로 높으며, 한국도 9위의 높은 운영경험 순위를 기록하고 있음.
 - 순발전용량 순위는 1위부터 3위 국가까지 운영경험 순위와 같음. 운영경험 4위인 영국의 순발전용량 순위는 11이고, 많은 운영경험을 보유한 독일도 탈원전 정책으로 인해 순발전용량 순위가 9위로 하락함.
 - 중국은 운영경험은 적지만 최근에 많은 원전을 건설하여 순발전용량 순위에서 한국 다음으로 6위를 차지하고 있음.
- 전 세계 원자로의 수는 상업운전 기준으로 1970년의 80개에서 1990년에 429개로 증가하는 가파른 증가세를 보였음.²⁾
 - 하지만 90년대부터 상업운전을 개시하는 원자로가 급격히 줄어드는 가운데 폐로도 증가하면서 전반적으로 원자로 증가세가 크게 꺾였음. 2013년 현재 상업운전 중인 원자로 수는 437개임.

1) IAEA(2013)의 'PRIS-Statistics: Power Reactor Information System Statistical Reports (User's Manual)' 참고

2) 본문의 원자로의 수는 상업운전시점을 기준으로 산출된 것으로 전력망 연결시점을 기준으로 사용하는 IAEA의 발표와는 차이가 있음.

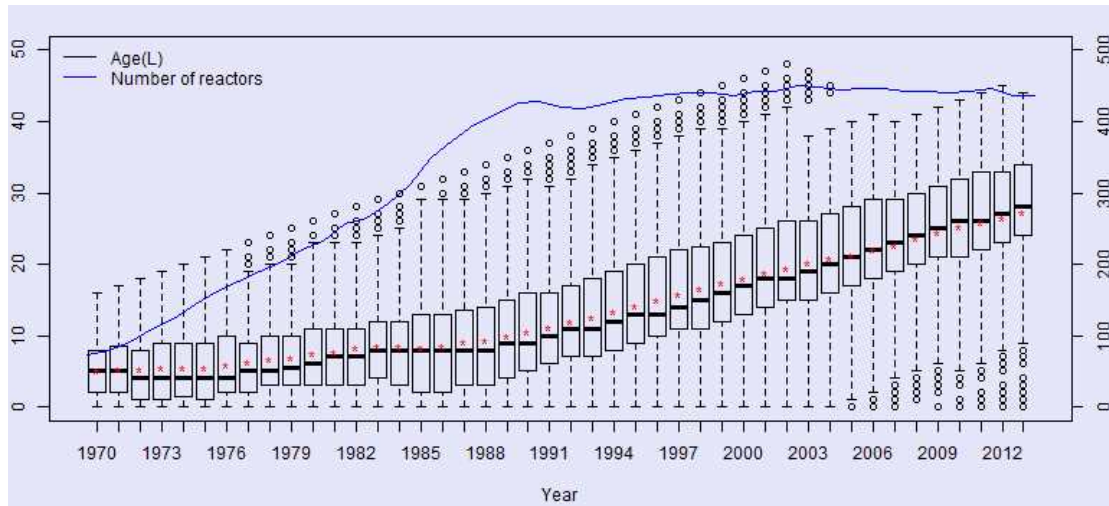
<표 1> 국가별 원자로 운영 현황 (2013년 기준)

국가 코드	국가	운전중		건설중	장기운전정지		영구운전정지		계획중	운영 경험	순위	
		원자로 수	순용량 (MW)	원자로 수	원자로 수	순용량 (MW)	원자로 수	순용량 (MW)	원자로 수	(년)	순용량 (MW)	운영 경험
US	미국	100	99081	5			32	13340	16	3912	1	1
FR	프랑스	58	63130	1			12	3789		1932	2	2
JP	일본	48	42388	2	1	246	11	6164	9	1646	3	3
GB	영국	16	9243				29	4225		1527	11	4
RU	러시아	33	23643	10			5	786	22	1124	4	5
DE	독일	9	12068				27	14301		799	9	6
CA	캐나다	19	13500				6	2143		655	7	7
UA	우크라이나	15	13107	2			4	3515		428	8	8
KR	대한민국	23	20721	5						427	5	9
SE	스웨덴	10	9474				3	1210		412	10	10
IN	인도	21	5308	6					2	397	14	11
ES	스페인	7	7121		1	446	2	621		301	12	12
BE	벨기에	7	5927				1	10		261	13	13
CH	스위스	5	3308				1	6		194	17	14
TW	대만	6	5032							194	15	14
CN	중국	20	16038							160	6	16
BG	불가리아	2	1906				4	1632		155	19	17
SK	슬로바키아	4	1815	2			3	909		148	23	18
FI	핀란드	4	2752							139	18	19
CZ	체코	6	3884							134	16	20
HU	헝가리	4	1889							114	20	21
IT	이탈리아						4	1423		80		22
AR	아르헨티나	2	935							70	26	23
NL	네덜란드	1	482				1	55		69	30	24
PK	파키스탄	3	690	2						58	28	25
ZA	남아공	2	1860							58	22	25
BR	브라질	2	1884							45	21	27
MX	멕시코	2	1330							43	24	28
LT	리투아니아						2	2370		43		28
AM	아르메니아	1	375				1	376		39	31	30
SI	슬로베니아	1	688							32	29	31
KZ	카자흐스탄						1	52		25		32
RO	루마니아	2	1300							23	25	33
IR	이란	1	915						3	2	27	34
AE	아랍에미리트			2					2			
VN	베트남								2			
	계	434	371794		2	692	149	56927		15660		

주) 원자로의 운영시작시점은 전력망연결을 기준으로 함.

자료: IAEA PRIS

[그림 1] 원자로의 가동연령 분포와 운영 중인 원자로 수 추이

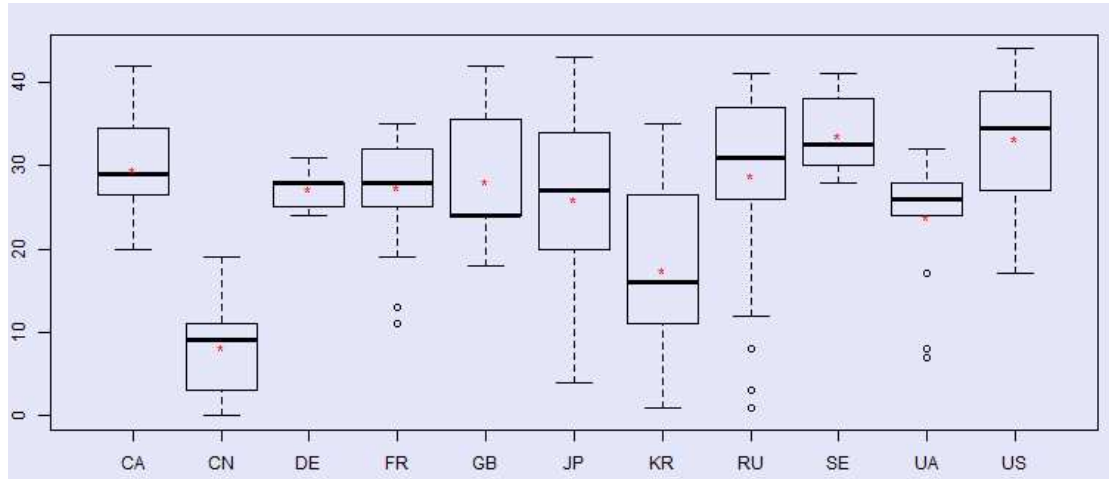


자료: IAEA PRIS

- 이렇듯 원자로 수 증가세가 줄어들면서 전 세계 원자로의 노후화도 빠르게 진행되는 양상임.
- 1990년 이전까지는 신규 원자로의 꾸준한 유입으로 원자로 가동연령 분포의 변화가 매우 완만하였지만, 이후 신규 원자로 유입이 크게 줄면서 전 세계적으로 원전의 노후화가 심화되고 있음.
- 이러한 원자로 노후화는 특히 원전 선진국에서 현저히 나타남.
- 스웨덴(33.7), 미국(33.3), 캐나다(29.53), 러시아(28.9), 영국(28.1), 프랑스(27.5), 독일(27.2), 일본(26.1)과 같은 원전 선진국들이 평균 25년이 넘는 가동연령을 기록하고 있음.³⁾
- 이에 반해 한국과 중국에서 운영 중인 원자로의 평균가동연령은 각각 17.6년과 8.3년으로 전반적인 노후화 정도가 낮음.

3) 각 괄호안의 숫자는 해당국가의 원자로 평균가동연령을 나타냄.

[그림 2] 주요국 원자로 가동연령 분포 (2013년 기준)



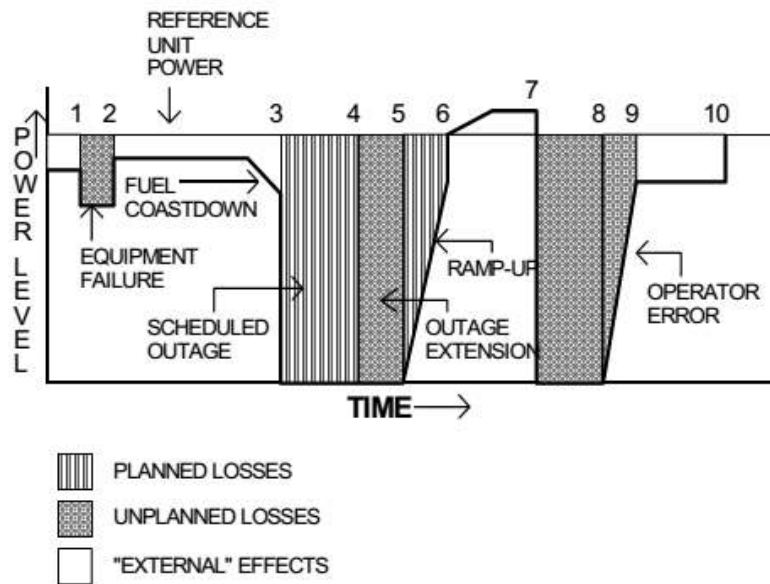
자료: IAEA PRIS

3. PRIS 운전실적지표(performance indicators) 설명

- 원자로는 다른 발전기에 비해 정상출력에 도달하는데 많은 시간이 걸리지만, 일단 정상수준에 도달하면 적은 변동비와 안정적인 출력으로 상당히 오랫동안 전기를 생산할 수 있음.
- 그러나 원자로의 운전실적은 원자로 운영자의 기술수준 및 숙련도, 노형의 특성, 원자로의 입지, 원전에 대한 규제수준 등에 따라 차이가 발생함.
- [그림 3]은 원자로 운영기간 중에 발생하는 손실 유형들을 도식화하여 설명하고 있음.
 - 원자로는 설계 시 결정된 출력용량(reference unit power)을 가지고 있으나, 매 시간에 설비용량으로 발전하는 것은 아님.

- 때로는 설비용량보다 낮게 출력하거나(0-3, 9-10구간), 정비목적으로 계획 또는 비계획 하에 정지하는 경우(3-5, 7-8구간)도 있으며, 냉각수의 효율상승으로 발전량이 설비용량을 넘어서는 경우(6-7구간)도 발생할 수 있음.

[그림 3] 원자로 운영기간에 발생하는 손실 유형들



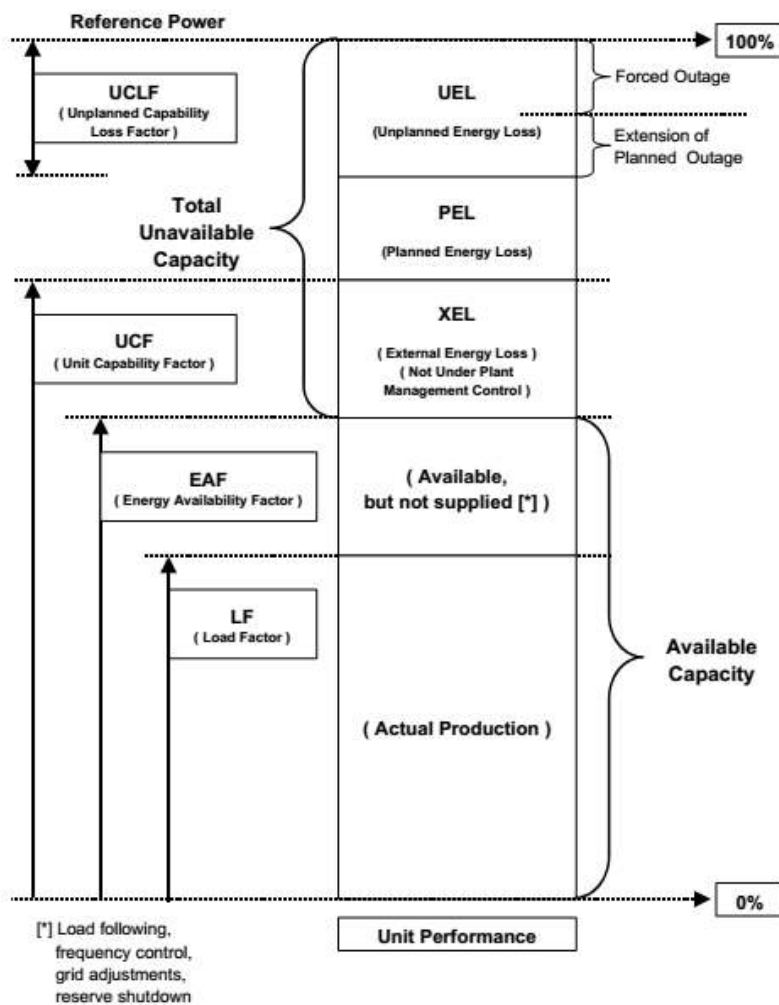
자료: IAEA PRIS

- PRIS는 이러한 유형들의 발전손실을 [그림 4]에 나타나있는 바와 같이 분류하여 지표산정에 반영하고 있음.
- 원자로는 정비와 같은 내부적 필요나 외부적 요인이 발생하지 않을 경우 설비용량으로 발전
- 하지만 연료교체와 같이 지속적인 원자로 가동을 위해서 필요한 기계적인 이유로 불가피하게 원자로를 정지하거나 출력을 낮춰야하는 경우가 발생
- 이러한 결정은 계획(PEL; 4주 이전) 하에 이뤄지거나 운영자의 필요시 비계획적(UEL; 4주 이내)으로 이루어지고 있으며, 비계획정지는 계획정지의

연장과 고장정지(forced outage)로 구분

- 원전의 정지 및 출력감소가 증가할 경우 원자로의 발전량은 자연히 감소
 - 다시 말해서 원자로의 정비로 인한 단전비중이 증가할수록 해당 원자로의 발전량이 낮아지는 음의 함수관계가 존재함.

[그림 4] 원전 운전실적 지표(performance indicators)



자료: IAEA PRIS

- IAEA PRIS는 전 세계 원자력발전소 운영자들로부터 원자로의 운영과 관련된 주요 실적들을 수집하고 이를 웹을 통해 공개하고 있음.⁴⁾
 - 먼저 EAF(energy availability factor)는 발전소에서 생산가능한 에너지 중 실제로 생산한 에너지의 비중을 나타냄.
 - 이와 유사한 지표로 최종 수요자에게 공급된 에너지의 비중을 나타내는 LF(load factor)가 있음.
 - 또한 총 가동가능 시간 중 실제로 가동한 시간의 비중을 나타내는 OF (operating factor)가 있음.
 - 총 출력가능한 발전량 중 발전소 운영자의 관리 하에서 발생한 발전손실을 제외한 발전량은 UCF(unit capacity factor)로 확인할 수 있음.
- EAF와 LF의 차이는 부하추종, 주파수조정, 소내소비 등으로 인해 발생함.
 - 생산된 전력의 일부는 전력생산을 위해 중간재로 재투입되기도 하는 등 발전기에서 생산된 모든 전력에너지가 최종 수용자에게 온전히 전달되는 것은 아님. 따라서 발전기의 생산량과 공급량에는 차이가 발생함.
- 한편, PRIS는 원자로의 계획 또는 비계획적 정지로 발생한 발전손실을 수집하여 지표화하고 있음.
 - 계획 정지에 따른 발전기회비용을 PCL(planned capacity loss factor)로 나타내고 있으며, 유사하게 비계획하에서 발생한 발전손실률은 UCL (unplanned capacity loss factor)로 나타냄.
- PRIS의 원전 운전실적 지표 가운데 원자로의 안전과 상당한 관계를 가지고 있다고 판단되는 지표로 FLR(forced loss rate)이 있음.

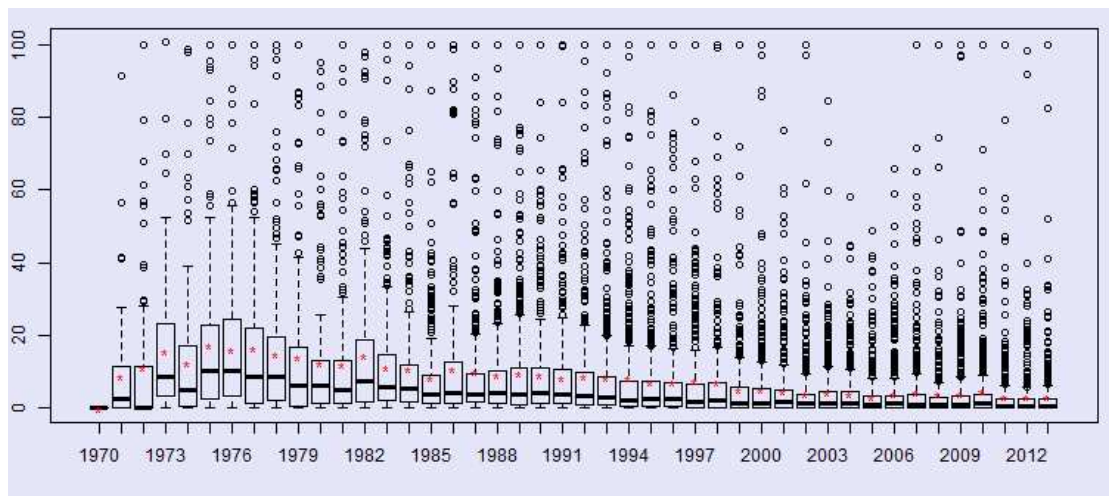
4) <http://www.iaea.org/pris> 참고

- 이는 원전운영자가 원전이 정상적으로 운전될 것이라고 예상하는 시기에 갑작스럽게 발생한 원전 가동중단에 따른 발전손실을 나타냄.
- 발전소 운영자가 예상하지 못한 가동중단은 원전의 안전과도 상당한 상관관계가 있을 것이라고 추측하는 것이 일반적임.
- 하지만 원전의 안전성 이외의 여러 요인들이 원자로의 FLR에 영향을 미침.
 - 고장정지에 따른 발전손실을 즉, FLR은 정지횟수뿐만 아니라 원전 근로자들의 숙련도와 밀접한 관련이 있는 정비시간에도 영향을 받음.
 - 또한 모든 고장정지가 안전문제로 발생한다고 단정 짓기도 어려움.
- 더 나아가 고장정지 횟수가 높다는 것을 원자로의 안전성이 위협받는 증거로 해석할 수도 없음.
 - 원전 운영자는 원자로에 이상 징후가 있을 경우 원자로에서 자동 또는 수동으로 SCRAM이 작동하여 가동을 중단하고 있음. 이는 원전의 비정상적 가동을 차단함으로써 원자로의 안전성을 확보하는 것임.
 - 따라서 안전성이 낮은 원전에서 강제중단이 많이 발생하는 것이 아니라 오히려 안전시스템이 효과적으로 작동하는 원자로에서 강제중단이 잘 발생한다고 해석할 수 있음.
- [그림 5]는 전 세계 원자로에서 강제중단으로 발생한 발전손실 즉, FLR의 1970년부터 2013년까지 연도별 분포를 나타냄.
 - 1970년대 중반이후 FLR의 꾸준한 감소는 원자로 기술의 발달과 원전 근무자의 숙련도 증가 등에 따른 발전효율 향상에 따른 것으로 판단됨.
 - 하지만 이러한 발전효율의 개선을 원자로 안전성의 향상으로 보기는 어려움.
- 즉 FLR은 원자로의 기술적인 안전성 제고 없이도 learning by doing에 따

른 원전 근로자들의 숙련도 향상 등으로 개선될 수 있음.

- Joskow and Rozanski(1979)는 원자력 발전효율 즉, 원자로 이용률 (capacity factor)이 learning by doing으로 개선되고 있음을 실증함.
- FLR이 UCF와 특정 조건에서 음의 함수관계를 가진다는 것을 고려하면, 누적발전량이 증가할수록 learning by doing으로 FLR이 하락하는 것을 유추할 수 있음.

[그림 5] 고장정지에 따른 발전손실률(FLR)의 연도별 분포 추이

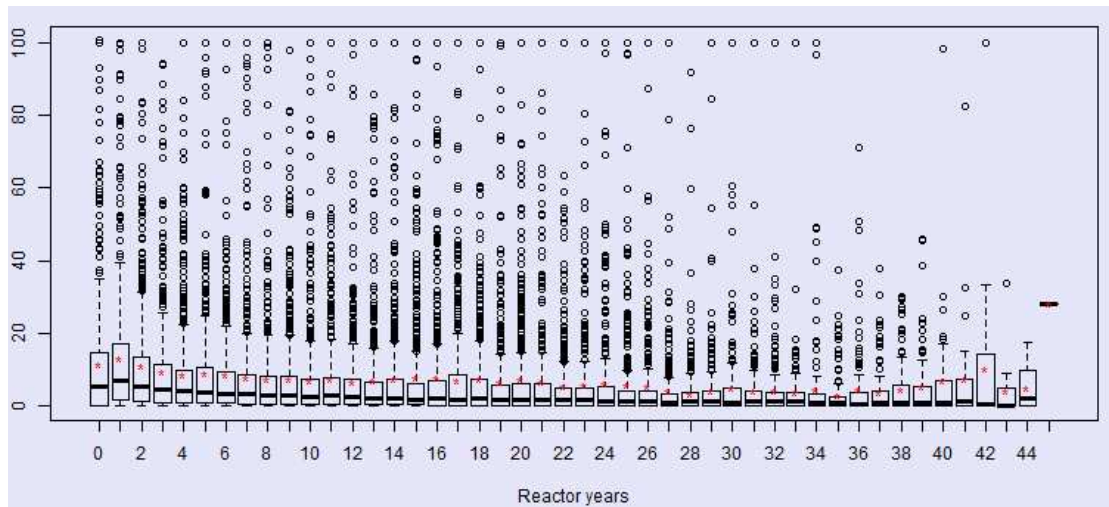


자료: IAEA PRIS

- FLR을 원자로 연령별로 살펴보면 원전운영에서 나타나는 learning by doing효과를 보다 명확히 확인할 수 있음.
- [그림 6]은 전 세계 원자로의 평균 FLR이 원자로의 연령 35년에 달할 때 까지 지속적으로 하락하고 있음을 나타냄.
- 이는 원자로가 최초 건설된 이후에 원전 근무자들이 해당 원자로를 파악하고 효율적으로 활용하는 데는 시간이 필요함을 방증

- 그리고 원자로가 설계수명을 넘어서게 되면 FLR은 다시 상승함. 즉, 노후 원자로의 효율성이 저하되는 것을 확인할 수 있음.⁵⁾
- 결과적으로 FLR은 원자로의 안전성에 영향을 받지만, FLR의 변화를 안전성 변화의 척도로 받아들이는 것은 불가함.
- 다만 FLR에 영향을 주는 요인 중 안전성과 무관한 요인들을 철저히 통제할 수 있다면, 안전성에 보다 근접한 지표를 도출할 수 있을 것으로 기대

[그림 6] 강제중단에 따른 발전손실률(FLR)의 원자로 연령별 분포



자료: IAEA PRIS

4. 실증분석

- 앞서 설명한 바와 같이 IAEA PRIS의 운전실적 지표들(performance indicators) 중 고장정지에 따른 발전손실률(FLR: forced loss rate)은 다른 지표들에 비해 안정성에 많은 영향을 받음.

5) 가동연령 증가에 따른 FLR의 하락을 원전 안전성의 개선으로 볼 수 없듯이, 노후 원자로에서 나타나는 FLR 상승도 원자로 안전성의 악화로 볼 수 없음.

- 하지만 FLR은 안전성뿐만 아니라 원전운영자의 생산성, 원자로의 노형 또는 기술, 가동연령 등에도 영향을 받음.
- FLR의 높고 낮음이 안전성 수준을 나타낸다고 보기 어려움.
 - 왜냐하면 원자로 고장정지(forced outage)는 원자로의 안전성을 확보하기 위한 수단이지 안전성을 훼손하는 것이 아니기 때문임.
- 이하에서는 FLR에 영향을 주는 여러 요인 중 안전과 무관한 변수를 적절히 선택하여 통제한 가운데, 중대원전사고 전후로 FLR에 구조적 변화가 발생했는지를 확인하고 그 결과를 해석함.

□ 기본모형

- 원자로의 규모에 따라 고장정지에 따른 발전손실률(FLR)이 다를 수 있음.
 - 일반적으로 규모가 큰 원자로의 가동중단에 따른 발전기회비용이 작은 규모의 원자로에 비해 높음.
- 정비기술수준을 나타내는 계획정비에 따른 발전손실(PCL)도 FLR과 관련이 있음.
 - 특정기간의 PCL은 FLR과 음의 함수관계가 있음. 즉, 주어진 시간 하에서 계획정비를 많이 할수록 고장정지에 따른 정비시간은 당연히 감소함.
 - 원자로 정비기술 수준이 낮으면 정비시간이 길어져 정비에 따른 발전기회비용이 커지기 때문에 PCL을 (음의) 정비기술 수준을 나타내는 대리변수로 사용할 수 있음.
 - 실증분석에서 PCL과 FLR의 결정적 함수관계를 피하고 특정기간에 일시적으로 발생한 기술수준 변화를 제거하기 위해서 PCL 로그값($\ln PCL_i$)에 3년 이동평균을 취하여 사용함.⁶⁾

- 앞서 설명한 Joskow and Rozanski(1979)의 결과에서도 유추할 수 있듯이 FLR은 learning by doing과 같은 원자로의 생산성에 영향을 주는 요인에 의해 변화할 수 있음.
- 생산투입요소가 균질적인(homogeneous) 산업의 경우 생산성은 산출물로 평가할 수 있음.
 - 원자력 발전의 투입요소로는 자본인 원자로, 중간투입재인 연료(농축우라늄 등), 그리고 노동을 고려할 수 있음.
 - 원자로 기술은 많은 자본을 소요하고, 높은 수준의 교육을 받은 노동을 요구하며, 원자력 발전에 사용되는 연료는 균일함.⁷⁾ 즉, 원자력 발전의 투입요소들은 다른 산업과 다르게 대체로 균질적(homogeneous)임.
 - 일반적으로 생산성은 투입요소 당 산출물의 비중으로 정의되는데, 투입요소에 차이가 없으면 생산성은 산출물의 양에 의해 결정된다고 볼 수 있음.
- 본 연구에서는 $\ln(LFi/OFi)$ 를 생산성의 대리변수(proxy)로 사용하고, 원자로의 생산성이 시간에 따라 크게 변화하지 않는 점을 고려하여 3년 이동평균 값을 활용함.
 - 원자로 운전실적 지표 가운데 최종 수요자에게 공급되는 전력비중을 나타내는 부하율(LF: load factor)은 대표적인 원자로의 산출물 지표임.
 - 하지만 LF 역시 FLR과의 함수관계에서 자유롭지 못하기 때문에 운전률(OF: operating factor)도 함께 고려함⁸⁾. 왜냐하면 원자로의 생산성이 높은 경우에는 가동시간 대비 부하율이 높을 것이고 생산성이 낮으면 가동시간

6) 원자로가 보통 2년 미만의 기간 동안 연료교체 없이 계속가동이 가능하다는 점을 고려하여 3년 이동평균을 사용하였다.

7) 원자력 발전 연료는 노형마다 다르다. 하지만 노형별로 사용되는 연료는 거의 같기 때문에 같은 노형에 대해서는 균질적인 연료를 사용한다고 가정할 수 있다.

8) OF는 총 가동가능시간 중 실제로 가동한 시간을 나타냄.

대비 부하율도 낮을 것으로 예상되기 때문임.

- 시간과 원자로의 연령에 따른 효과를 반영하기 위해서 분석모형에 시간(t)과 원자로의 연령(OP.yr_i)을 포함함.
 - FLR은 시간에 따라 개선되는 모습을 보이는 데, 이는 전 세계의 전반적인 원자력 기술이 시간에 따라 향상되는데 따른 것이라 볼 수 있음.
 - 또한 원자로의 연령에 따라 FLR은 U자형을 나타냄.
- 이에 더해 중대원전사고인 TMI, 체르노빌(Cher), 후쿠시마(Fuku)사고의 전후기간을 더미변수를 통해 고려하고 있음.
- 분석에 사용하는 PRIS database는 1970년부터 2013년 중에 운영되었던 모든 원자로의 운전실적 자료를 기반으로 구축됨.
 - 이들 원자로 중에는 현재 운전되지 않는 폐로된 원자로와 최근에 건설된 신규 원자로를 포함하는 unbalanced panel자료임.
- 따라서 본 연구에서 사용하는 FLR 분석모형은 다음과 같음.

$$\ln FLR_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln RUP_i + \beta_2 \ln PCL.3_{i,t-1} + \beta_3 \ln \left(\frac{LF.3_{i,t-1}}{OF.3_{i,t-1}} \right) + \beta_4 t + \beta_5 OP.yr_{i,t} + \beta_6 TMI_t + \beta_7 Cher_t + \beta_8 Fufu_t + \nu_{i,t}$$

- 패널분석은 오차항에 대한 가정에 따라 fixed effect 모형과 random effect 모형을 적용할 수 있음.
 - 이들 중 가장 적합한 모형을 통계적으로 확인하기 위해서 Hausman test를 시행한 결과 귀무가설은 기각되었고, fixed effect 모형이 적합한 대안으로 선택됨.
 - 그러나 fixed effect모형의 경우 원자로 특성을 나타내면서 시간불변인 변수 즉, 원자로 설비용량(RUP)과 원자로 연령(OP.yr)을 설명변수로 넣을 수

없는 단점이 있기 때문에 pooling regression과 random effect 모형에 원자로 노형과 국가 더미를 사용한 모형도 시도함.

□ 분석결과

- <표 2>는 설비용량 100MW이상인 원자로 데이터를 사용한 단순 pooling, fixed effect, 그룹 더미를 사용한 random effect와 pooling regression의 결과를 보여주고 있음.
- 원자로 특성들을 효과적으로 통제하지 못한 단순 pooling regression을 제외하고, 나머지 세 가지 모형의 분석결과는 모두 유사함.
- 모형을 통한 주요 실증분석 결과는 다음과 같음.
 - 정비기술수준(-PCL3)이 낮을수록 강제중단 발전손실(FLR)도 높음.
 - 반면, 생산성이 높을수록 FLR은 낮아지는 것으로 나타남.
 - 또한 시간에 따른 전반적인 기술수준의 향상은 FLR을 유의하게 낮춤.
 - 원자로 가동연령의 증가는 FLR을 높이고 있음.
 - 마지막으로 원자로의 발전용량이 클수록 FLR이 높음.
- 위의 결과로부터 계획정비와 관련된 기술수준과 숙련도가 고장정지에 따른 정비시간과 양의 상관관계가 있음을 유추할 수 있음.
 - 이는 계획정비 기술수준이 낮은 원자로의 고장정지는 높은 기회비용을 초래하는 것을 시사함.

<표 2> 설비용량 100MW이상인 원자로를 대상으로 한 분석결과

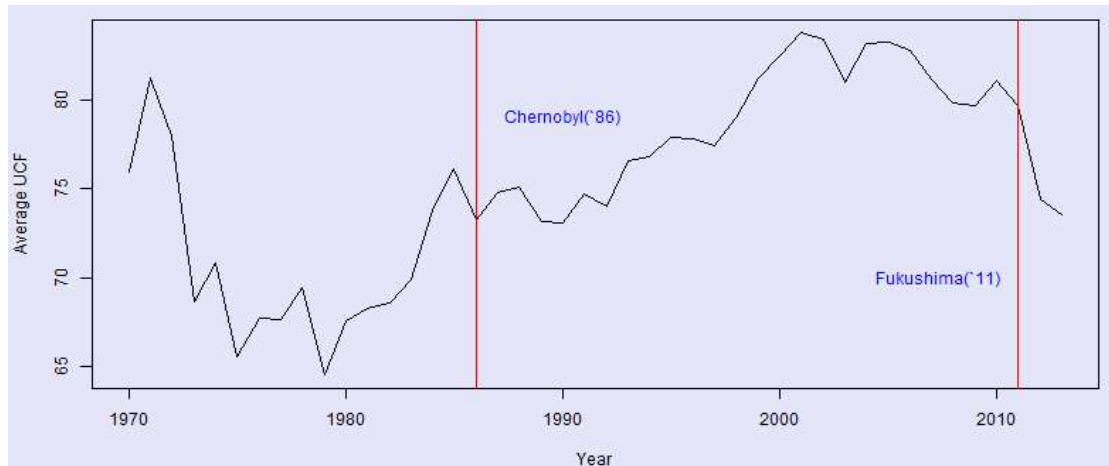
	Pooling	Fixed effects	Random effects with group dummies	Pooling with group dummies
(Intercept)	4.99*** (0.15)		1.73*** (0.49)	1.37** (0.52)
ln(RUP)	-0.01 (0.02)		0.22** (0.07)	0.28*** (0.05)
ln(PCL)	-0.07*** (0.02)	0.10*** (0.03)	0.11*** (0.03)	0.14*** (0.02)
ln(LF/OF)	-5.39*** (0.20)	-1.99*** (0.47)	-2.08*** (0.35)	-2.24*** (0.35)
Time	-0.03*** (0.00)	-0.03*** (0.00)	-0.04*** (0.00)	-0.04*** (0.00)
TMI	0.08 (0.05)	0.02 (0.04)	0.00 (0.08)	-0.02 (0.04)
Cher	0.12** (0.04)	0.14** (0.05)	0.12** (0.05)	0.10* (0.05)
Fuku	0.04 (0.04)	-0.01 (0.03)	-0.01 (0.04)	-0.01 (0.03)
OP.yr			0.01** (0.00)	0.01*** (0.00)
R2	0.15	0.09	0.16	0.28
Adj. R2	0.15	0.08	0.16	0.28
Num. obs.	12318	12318	12318	12318

*** p < 0.001, ** p < 0.01, * p < 0.05

- 설명변수로 통제된 나머지 FLR의 변화를 원전중대사고 전후로 조사한 결과, 체르노빌 원전사고 이후 FLR이 5% 유의수준에서 증가하고 있음.
- TMI나 후쿠시마 사고의 경우 FLR의 유의한 변화를 이끌어 내지 못함.
- 반면, 체르노빌 원전사고 전후로 FLR이 5% 유의수준에서 증가하고 있음을 확인 할 수 있음.
- 체르노빌 사고 이후에 발생한 FLR의 증가는 사고 이후 국제사회에 원자력 안전문화가 확산된 데에 따른 것으로 해석됨.

- 체르노빌 사고에 원전 운영자의 안전 불감증에서 비롯된 것으로써 사고 이후 전 세계 원자력 정책에 눈에 띄는 변화를 초래하진 않았음.
 - 다만, 사고 이후 전 세계 많은 원전 운영자들이 확률적으로만 존재했던 원전사고의 피해를 수치로 확인하고 그 규모가 어마함을 깨닫게 됨.
 - 결국 원전 사업자는 안전성을 확보하고자 부담하는 발전기회비용을 증가시켰고, 대표적인 발전기회비용인 FLR이 구조적으로 상승하는 원인을 제공한 것으로 보임.
- 특히 IAEA는 체르노빌 사고 이후 국제적인 원전 안전성 향상을 위한 원자력 안전문화 조성에 힘쓰는 한편, 3년 주기로 체약국들 간의 원전 운영 상황을 상호 검토하도록 하였음.
- 이러한 국제사회의 노력으로 전 세계에 안전문화가 확산되었음.
 - 또한 국제사회는 원자로의 과거 발전실적 향상을 중심으로 한 원전정책에서 탈피하여 안전을 최우선 가치로 설정하는 원전정책으로 전환함.
- 이러한 국제 사회의 안전문화 확산 노력으로 급격히 증가하던 원전의 이용률은 1986년 체르노빌 원전사고 이후 크게 둔화되었음.
- [그림 7]은 원자력 안전문화의 확대된 체르노빌 사고 이후 원자로 이용률(UCF)의 증가세가 꺾였음을 나타냄.
 - 1970년대 말부터 체르노빌 원전사고가 발생하기 전까지는 전 세계 원자로의 평균이용률이 급격히 상승하는 모습을 보였음.
 - 그러나 체르노빌에 중대원전사고가 발생한 이후 원전 이용률은 크게 꺾이고 1990년대 초반까지 평균 약 74%의 이용률에서 횡보하였음.
 - 원자력 안전규제 강화가 원전 이용률 하락을 초래할 수 있으나, 체르노빌 전후로 전 세계 국가의 두드러지는 원자력 정책 변화는 없었음.

[그림 7] 연평균 원자로 이용률(UCF: unit capacity factor) 추이



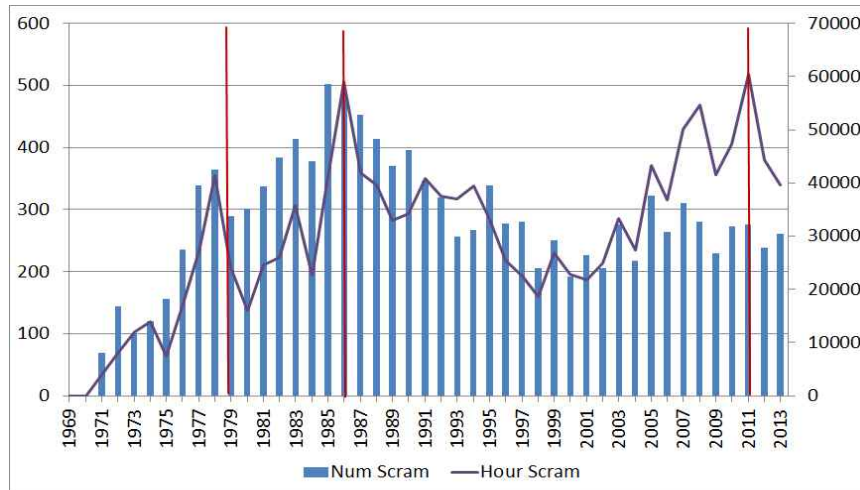
자료: IAEA PRIS

5. 안전지표(SCRAM) 분석

- 한편, 본 연구는 안전과 밀접하게 관련 있는 지표 중의 하나인 SCRAM 자료를 분석하여 발전기회비용인 FLR의 구조적 상승요인을 조사함.
 - FLR은 고장정지 횟수 또는 고장정지 시간이 증가할 경우 상승하기 때문에 FLR의 상승이 고장정지 횟수에 의한 것인지 아니면 고장정지 시간에 의한 것인지를 확인하는 것이 필요함.
- [그림 8]은 1969년부터 2013년까지 발생한 전 세계 SCRAM 발생 건수와 시간을 나타내고 있음.⁹⁾
 - 분석 기간 동안 SCRAM 발생 건수는 체르노빌 사고 시점까지 증가하다가 2000년도까지 감소하고 이후 회복하는 모습
 - 2000년 이후의 두드러진 특징 중 하나는 가동 중인 원자로 수의 큰 변화가 없는데도 불구하고 과거에 비해 정지 시간이 확연히 증가했다는 사실임.

9) 여기서 SCRAM 건수와 시간은 자동 SCRAM과 수동 SCRAM을 합한 수치임.

[그림 8] SCRAM (횟수 및 정지시간)

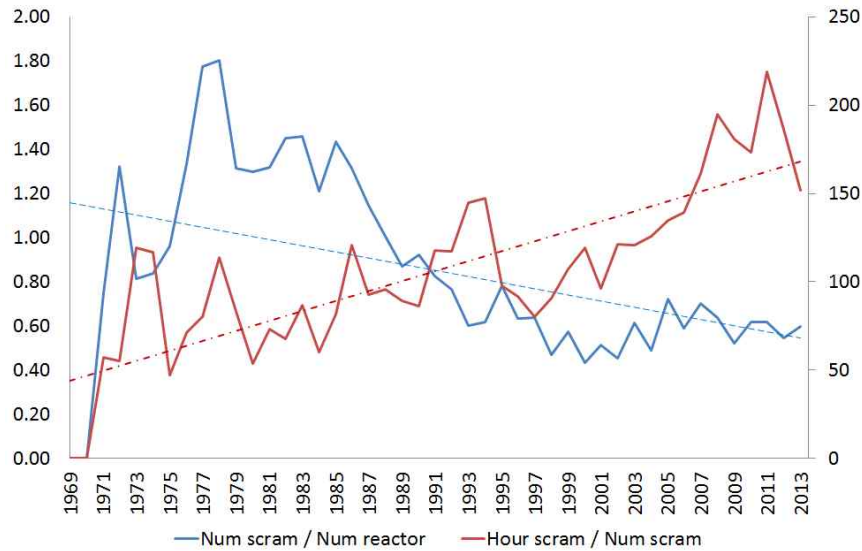


자료: IAEA PRIS

- 이러한 사실은 SCRAM으로 인한 정지 시간을 발생 건수로 나눈 SCRAM 건당 정지 시간 추세를 보면 보다 명확히 확인할 수 있음.
- [그림 9]는 SCRAM 발생 횟수와 정지 시간간의 관계¹⁰⁾를 보여주고 있는데 발생 횟수는 지속적으로 감소하는 반면, 정지 시간은 증가하는 추세
- SCRAM 발생 건수의 감소는 원자로의 안전성이 시간이 지남에 따라 향상되고 있음을 의미함.
- SCRAM 정지 시간의 증가는 원전 사업자가 원전의 사고 위험을 줄이고 안전성을 확보하기 위해 발전기회비용을 증가시켰음을 암시함.
- 따라서 체르노빌 사고 이후 안전성 지표 중 하나인 SCRAM(불시 고장정지)의 발생 건수에 큰 변화가 없는 가운데, 안전문화 확산에 따른 SCRAM 정지 시간의 증가로 FLR이 구조적으로 상승하였음을 알 수 있음.

10) 횟수 = SCRAM 횟수 / 원자로 개수, 정지 시간 = SCRAM 시간 / SCRAM 횟수

[그림 9] 원자로 당 SCRAM 횟수와 SCRAM 당 정지시간



자료: IAEA PRIS

Ⅲ. 연구 결과 및 정책 제언

- 위의 분석결과를 결론적으로 정리하면 다음과 같음.
 - 체르노빌 사고에 따른 대규모 피해는 낮은 수준의 안전문화에 크게 기인함.
 - 반면 체르노빌 원전사고 이후 전 세계의 원자력 정책에는 큰 변화가 없음.
 - 체르노빌 이후 국제사회에 원자력 안전문화가 확산되면서 원전 사업자 및 관계자들의 원자력 안전에 대한 인식이 개선되었음.
 - 이러한 인식전환이 고장정지 발생 시 정비시간을 증가시켰고, 이로써 발전 기회비용인 FLR이 구조적으로 상승함.
- 최근 장시간에 걸친 원전의 가동중지가 원자력의 안전성 저하를 의미한다는 주장이 확산됨.

- 하지만 이는 근본적으로 원자력의 안전과 원전 고장정지에 따른 발전기회 비용 간의 관계를 잘못 이해해서 만들어진 주장임.
 - 원자로에 내재된 안전기술수준이 변화하지 않는다고 가정할 때 원전의 고장정지에 따른 기회비용 즉, 고장정지시간은 안전규제의 강도와 안전문화의 수준이 높아질 때 오히려 상승하게 됨.
 - 특히 체르노빌 사고에 따른 막대한 피해를 경험한 이후 전 세계 원전사업자들의 안전에 대한 인식이 크게 변하였고, 안전성 확보를 위해 보다 많은 기회비용을 부담하고자 노력하였음.
- 안전성은 안전문화 수준, 원자력 정책, 안전규제 등을 모두 고려하여 종합적으로 판단할 때에만 의미가 있음.
 - 안전성을 고장정지시간의 증감 등으로 단순히 판단할 경우 나무는 보되 숲을 보지 못하는 오류를 범할 수 있음.
 - 예를 들어 원전 안전성을 위해 정비시간 확대를 규제할 경우 원전사업자는 발전사업의 경제성을 확보하기 위해 정비인력과 같은 비용발생요인을 축소할 유인을 가지게 됨.
 - 따라서 이러한 직접규제는 본래 목적인 안전성 확보에 기여하지 못하고 오히려 안전성 제고에 역행하는 요인으로 작용할 수도 있음.
- 결론적으로 원자력의 안전성을 제고하고 원전을 효율적으로 활용하기 위해서는 '고장정지시간' 규제와 같은 특정 목표 달성을 위한 정책을 지양하고, 효과적으로 작동하는 안전 규제 시스템과 원전 종사자 및 관계자들 간의 안전문화 등과 같은 근본적 환경을 조성하는 것이 필요함.

IV. 기대 효과

- 후쿠시마 원전사고 이후 원전에 대한 불신이 사회적으로 만연한 지금, 원전을 안전하게 운영하면서 ‘안정적 전력 공급’이라는 가치를 달성하기 위해서는 원전 신뢰를 회복하는 것이 중요함.
- 신뢰회복을 위해서는 원전 운영자 및 원전 규제기관 종사자들이 원전 안전의 중요성을 깨닫고 안전을 최우선 가치로 여기는 환경 즉, 안전문화를 조성하는 것이 필요함.
- 그리고 안전문화의 확산은 원전의 안전성 개선을 위해 원전 운영자가 부담하고자 하는 직·간접적 비용을 증가시켜서 보다 안전한 원자력 발전소를 운영할 수 있는 기틀을 마련할 것으로 기대됨.

< 참고자료 >

1. 참고문헌

- 국가법령정보센터, 2013, “원자력관계법령집-원자력이용시설의 사고·고장 발생 시 보고, 공개 규정”
- 국회예산정책처, 2012, “원자력안전규제시스템 개선방안 연구”
- 김제남·부좌현·오영식·유승희·최재천·홍의락, 2013, “원자력발전의 안전한 운영을 위한 개혁 및 규제 강화 : 정책토론회”, 김제남 의원실
- 김종흡, 2008, “비선회시설 입지 갈등의 효과적 관리에 관한 연구”
- 김진국, 2012, “원자력 안전규제 개선방안 연구”, 국회예산정책처
- 김충곤, 2009, “우리나라 원자력 행정체계와 발전 방향에 관한 연구”
- 김효정, 1999, “원자력안전협약 추진 경과와 이행 현황 - 협약 한 주기를 보내며”
- 김효정·정윤희·강완서·이상훈·김영평·박무익·최병선·최인철, 2005, “안전규제의 국민 이해 및 참여증진 방안 수립”, 한국원자력안전기술원
- 송유나·진상현·이현석·제갈현숙·이승우, 2013, “원자력발전, 안전한 운영을 위한 교훈·비판 그리고 과제”, 사회공공연구소
- 송하중·김영평·정주용·조병훈·김주경·윤인주·고대유·이태구·김정환, 2009, “해외 원자력안전 행정체제 조사연구”, 한국정책학회
- 송하중, 2012, “해외 원자력 안전규제기관의 조직·인력·운영에 관한 조사연구 (A Study on the Overseas Nuclear Safety Administration System)”, 교육과학기술부
- 원자력안전위원회, 2013, “2013 업무보고”

- 이상윤·이진국·이세정·손현·김종천·김형건, 2013, “원자력 법령분석을 통한 최적 안전규제 기법 및 제도 도입방안 연구”, 한국법제연구원
- 이선우·이창길·박경원·박성훈, 2013, “원자력안전체계의 실질적 강화를 위한 원자력안전위원회 조직 발전방안 마련”, 한국조직학회
- 이원근, 2012, “원자력 안전의 현황과 정책 및 입법 과제”, 국회입법조사처
- 조희문·하상섭·손혜현, 2010, “중남미 원전산업의 발전과 한국원전산업 진출을 위한 정책방안 연구”, 대외경제정책연구원
- 주성돈, 2011, “원자력발전정책의 역사적 제도주의 분석 : 김대중 정부와 노무현 정부를 중심으로”, 춘계학술대회 발표논문집
- 진상현, 2013, “해외 원자력발전 및 방사성폐기물 처리 관련 규제의 사례 연구”, 국회예산정책처
- 한국원자력안전기술원, 2013, 새정부의 원자력안전행정체제 개편에 따른 규제 전문기관 역할강화 방안
- 한국정책과학학회, 2007, “국민 안전의식 선진화 추진전략에 관한 연구”
- 함철훈, 2013, “일본의 원자력 안전 규제 법제”
- 황상일, 2011, “(재난성 원전사고에 따른)방사성오염의 토양·지하수 관리 방향 마련”, 한국환경정책·평가연구원
- Bai J, Perron P, 1998, “Estimating and testing linear models with multiple structural changes”, *Econometrica* 66, 47 - 78
- Bai J, Perron P, 2003, “Computation and Analysis of Multiple Structural Change Models”, *Journal of Applied Econometrics* 18, 1-22
- Geoffrey Rothwell, 1996, “Organizational Structure and Expected Output at

- Nuclear Power Plant”, The Review of Economics and Statistics Vol.78 No.3, 482-488, The MIT Press
- IAEA, 1999, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants (INSAG-12)
- IAEA, 2000, Operational safety performance indicators for nuclear power plants
- IAEA, 2004, International outage coding system for nuclear power plants - Results of a co-ordinated research project
- IAEA, 2005, The Power Reactor Information System(PRIS) and its Extension to Non-electrical Applications, Decommissioning and Delayed Projects Information
- IAEA, 2006, “Fundamental Safety Principles”, IAEA Safety Standards - Safety Fundamentals No. SF-1
- IAEA, 2008, The international nuclear and radiological event scale
- IAEA, 2013, Pris-Statistics Power Reactor Information System Statistical Report - User’s manual
- IAEA, 2014, Nuclear Power Reactors in the World
- Lucas W. Davis, 2012, “Prospects for Nuclear Power”, Journal of Economic Perspectives Vol.26 No.1, 49-66
- NEA, 2012, Nuclear Energy Today 2nd edition
- Paul A. David, Geoffrey S. Rothwell, 1996, “Measuring standardization : An application to the American and French nuclear power industries”, European Journal of Political Economy Vol. 12, 291-308
- Paul A. David, Roland Maude-Griffin, Geoffrey Rothwell, 1996, “Learning by

Accident? Reductions in the Risk of Unplanned Outages in U.S. Nuclear Power Plants After Three Mile Island”, *Journal of Risk and Uncertainty* 13, 175-198

Paul L. Joskow, George A. Rozanski, 1979, “The Effects of Learning by doing on nuclear plant operating reliability”, *The Review of Economics and Statistics* Vol.61 No.2, 161-168

Richard K. Lester, Mark J. McCabe, 1993, “The effect of industrial structure on learning by doing in nuclear power plant operation”, *RAND Journal of Economics* Vol. 24 No. 3, 418-438

Roland Sturm, 1993, “Nuclear Power in Eastern Europe : Learning of forgetting curves?”, *Energy Economics*, 183-189

Roland Sturm, 1995, “Why does nuclear power performance differ across Europe?”, *European Economic Review* 39, 1197-1214

WANO, 2013, Performance indicators

정책 이슈페이퍼 14-05

국내외 원전안전규제시스템 비교

2015년 5월 15일 인쇄

2015년 5월 15일 발행

저 자 박 우 영, 이 상 립

발행인 박 주 현

발행처 에너지경제연구원

681-300 울산광역시 중구 중가로 405-11

전화: (052)714-2114(代) 팩시밀리: (052)714-2028

등 록 1992년 12월 7일 제7호

인 쇄 크리커뮤니케이션 (02)2273-1775
