

원자력 발전소 운전의 학습효과 분석

이만기·문기환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 우리나라 원자력 발전소들 사이의 운전 경험에 대한 정보가 원자력 발전소의 운전 성과에 미치는 효과를 실증적으로 분석하는 것을 목적으로 하였다. 본 연구의 실증 분석 결과, 동질적 기술을 가지고 있는 발전소들 사이의 운전 정보의 공유가 대체적으로 더 활발한 것으로 분석되었으며 동일 부지에 있는 발전소들의 운전 경험이 운전 성과 향상에 미치는 효과가 큼을 알 수 있다. 이러한 실증분석 결과는 예상과 일치하는 것으로 기존의 다양한 원자력 발전 기술의 도입이 발전소의 운전 성과 측면에서는 비효율적이었음을 지적하는 것이다.

1. 서 론

우리나라에서 운전되고 있는 원자력발전소는 모두 경수로형이며 이 중 가압경수로가 8기로 주종을 이루고 있고 나머지 1기는 중수로 이다. 원자력발전소의 공급측면은 핵증기공급계통, 보조기, 그 외의 건설부문으로 구성된다. 이 중 주요 부문인 핵증기공급계통의 설계는 Westinghouse, Framatome, AECL의 3개사가 다양하게 공급하였다. 각사가 공급한 기수를 살펴보면 Westinghouse가 6기, Framatome이 2기, 나머지 1기는 AECL이 공급하였다.¹⁾

원자력 발전소 운전의 학습효과에 대한 분석은 주로 단일 발전소를 대상으로 이루어져 왔다. 그러나 어떤 발전소의 운전경험이 미치는 효과는 그 발전소의 운전성과에만 국한되는 것이 아니고 다른 발전소의 운전성과에도 영향을 줄 수 있는 것이 현실이다. 우리나라의 원자력발전소는 원자로 형태와 핵증기공급계통의 공급자별로 다양하며 동일부지에 다수 기를 건설하는 입지방법을 적용하고 있다. 한 발전소에서 실현된 학습효과가 다른 발전소의 운전성과에 영향을 미치는 정도는 발전소가 서로 동일부지에 위치하고 있는지의 여부에 따라서 크게 좌우될 것으로 기대된

1) 핵증기공급계통은 원자력발전소의 가장 핵심적인 기술이므로 원자력발전의 기술종류를 대표한다고 보아도 무방하다.

다. 또한 기술적 특성이 비슷한 발전소들 사이에서의 정보 교환의 가치가 큰 반면 기술적으로 상이한 발전소들 사이에서의 정보교환은 비용이 많이 발생할 것으로 예상된다.

본 연구의 목적은 이렇게 다양한 우리나라 원자력발전소들 사이의 운전경험에 대한 정보가 원자력 발전소의 운전성과에 미치는 효과를 실증적으로 분석하는 것이다.

II. 분석 모형

본 연구에서 설정한 모형은 Lester and McCabe(1993)의 모형을 근거로 하였으며 구체적인 추정모형은 다음 (1)식과 같다. 이 식은 multiplicative 형태를 취하고 있으며 운전성과는 각종 변수들의 분리 가능한 함수라고 가정하고 있다.

$$\begin{aligned} \ln AV_{it} = & A + \beta_1 AGE_{it} + \beta_2 AGE_{it}^2 + \beta_3 PRESITE_i \\ & + \beta_4 TRASITE1_{it} + \beta_5 TRASITE2_{it} + \beta_6 PREFIRM_i \\ & + \beta_7 TRAFIRM1_{it} + \beta_8 TRAFIRM2_{it} + \beta_9 DUMPHWR + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (i= 1, \dots, 9) (t= 1978, \dots, 1994). \quad (1)$$

여기서 AV_{it} 는 i 원자력발전소의 t 년도에서의 이용률을 나타낸다. 여기서의 이용률은 실적 이용률에서 계획예방정비에 소요되는 기간으로 인해 발생하는 이용률 손실분을 빼준 것이다. 이는 실적 이용률 자료를 그대로 사용할 경우 계획예방정비가 시행되지 않은 해의 이용률은 상대적으로 더 높게 나타남으로써 학습효과가 과대하게 평가될 가능성을 가지고 있기 때문이다.

AGE_{it} 는 i 원자로가 상업가동을 시작한 이후의 경과시간을 나타내는 것으로써 년 단위로 측정된다. 이 변수는 발전설비의 운전경험을 나타내기 위하여 도입되었다. 그러나 이 변수는 발전설비의 노후화 효과도 동시에 반영하고 있으므로 궁극적인 이용률의 증감은 학습효과와 노후화효과의 크기에 좌우될 것이다. 학습효과가 노후화효과보다 더 크면 이용률은 증가할 것이지만 노후화효과가 학습효과보다 크면 이용률은 감소할 것이다. 시간의 경과와 함께 이 두 효과가 서로 작용하는 것을 고려하기 위해 본 모형에서는 AGE 변수에 대한 2차 항을 포함시켰다.

(1)식에 있는 다음 6개의 변수는 발전소들 사이의 정보교환에 의한 학습효과를 반영하기 위해서 도입된 것이다. 이들 각 변수는 해당 기간의 원자로 운전년수를 합하여 생성되도록 하였다. 따라서 동일한 변수에 있어서 1년간의 운전년수가 학습효과 측면에서 지니는 가치는 원자로와 시간에 관계없이 일정하다는 것을 암묵적으로 가정하고 있는 것이다.

$PRESITE_i$ 는 i 발전소의 최초 상업운전 이전에 동일부지에서 가동된 발전소들의 총운전 년수를 나타낸다.²⁾ $TRASITE1_{it}$ 과 $TRASITE2_{it}$ 는 i 발전소의 최초 상업운전 이후에 동일부지에서 실현된

다른 발전소들의 운전경험이 i 발전소의 운전성과에 미치는 효과를 분석하기 위하여 도입된 것이다. $TRASITE1_{it}$ 는 오래된 발전소들³⁾의 i 발전소 최초 상업운전 시점 이후부터 t 시점까지의 총 운전년수를 나타낸다. $TRASITE2_{it}$ 는 새로운 발전소로서⁴⁾, i 발전소의 최초 상업운전 이후에 새로 도입된 동일부지 원자로들의 t 년도 시점에서의 총 운전년수를 나타낸다.

다음의 3개의 변수들은 i 발전소와 다른 부지에 있는 발전소들의 운전경험이 i 발전소의 운전성과에 미치는 효과를 분석하기 위해 도입된 것이다. $PREFIRM_i$ 는 i 발전소의 최초 상업운전 이전에 다른 부지에서 가동하고 있던 발전소들의 총 운전년수를 나타낸다.⁵⁾ $TRAFIRM1_{it}$ 는 다른 부지에 위치한 오래된 발전소들의 i 발전소 최초 상업운전 시점 이후부터 t 시점까지의 총 운전년수를 나타내며, $TRAFIRM2_{it}$ 는 i 발전소의 최초 상업운전 이후에 다른 부지에 새로 도입된 원자로들의 t 년도 시점에서의 총 운전년수를 나타낸다.

$DUMPHWR$ 은 더미변수로서 가압경수로형과 가압중수로형의 이용률 차이를 설명하기 위하여 도입하였다. 가압중수로형의 이용률이 가압중수로형 발전소보다 이용률이 높은 것이 일반적이며 우리나라의 경우도 과거 실적자료에서 이러한 추세를 확인할 수 있다. 가압경수로형의 발전소에는 0을, 가압중수로형의 발전소에는 1의 수치를 부여하여 $DUMPHWR$ 변수의 자료를 생성하였다.

설정 모형 (1)식을 추정하기 위하여, 본 연구에서는 1978년부터 1994년까지의 기간 동안, 9기의 원자로에 대한 자료를 이용하였다. 따라서 자료는 Panel data로서 unbalanced 형태를 취하고 있다. 분석에 이용된 자료는 한국 전력공사의 경영통계(1995), 원자력발전년보(1995)를 활용하였다. 일반적으로 Panel data를 사용한 모형의 추정은 GLS(Generalized Least Squares)방법에 의한 것이다. 그러나 본 연구에서 대상으로 하고 있는 발전소의 수가 9개에 불과하고($N=9$), 모든 발전소의 운전은 하나의 회사인 한국전력에서 담당하고 있으므로 각 발전소별 특성이 두드러지지 않을 것이라고 판단하여 OLS(Ordinary Least Squares)방법에 의해 (1)식을 추정하였다.

III. 추정 결과

설정 모형인 (1)식의 구체적인 적용에 있어서 ①원자력 발전설비 간의 동질적 기술을 가정한 경우, ②이질적 기술을 가정한 경우, ③Westinghouse사가 설계한 원자로의 경우, 등의 3가지 경우를 상정하여 (1)식에 대한 추정을 각각 수행하였다. 동질적 기술의 가정이 의미하는 것은, 발전소

-
- 2) $PRESITE_i$ 는 i 발전소보다 먼저 도입되어 i 발전소와 동일부지에서 이미 가동하고 있던 발전소들의 총 운전년수(i 발전소의 상업가동 시점까지의)
- 3) 오래된 발전소란 i 발전소가 최초의 상업가동에 들어가기 이전에 i 발전소와 동일부지에서 이미 가동되고 있던 발전소들을 의미한다.
- 4) 새로운 발전소란 i 발전소가 최초로 상업가동을 시작한 이후에 동일부지에 도입된 발전소들을 의미한다.
- 5) $PREFIRM_i$ 는 i 발전소보다 먼저 도입되어 i 발전소와 다른 부지에서 가동하고 있던 발전소들의 t 년도 시점에서의 총 운전년수(i 발전소의 상업가동 시점까지의)

의 운전경험으로 획득한 정보의 교환이 초래하는 가치가 모든 발전소에 있어서 동일하다는 것이며, 이질적 기술의 가정은 핵증기공급계통의 공급자가 다르면 서로 다른 기술의 발전소로 간주한다는 것이다. 이러한 가정은, 상이한 기술을 갖고 있는 발전소와 동질적 기술을 갖고 있는 발전소 사이의 운전경험은 서로 차이가 있을 수 있다는 점을 설명하기 위한 것으로, 동질적 기술의 가정을 완화시킨 것이다. 그리고 Westinghouse사의 원자로만 별도로 분석한 것은, 1978년부터 1994년까지의 총원자로 운전년수 90년 중 同社의 원자로 운전년수가 65년으로서 전체의 72%를 차지하고 있기 때문이다. 따라서 Westinghouse사가 설계 공급한 원전 사이의 운전경험의 공유에 대한 분석을 수행함으로써 동질적인 발전기술의 운전경험이 운전성과에 미치는 효과 분석이 필요하다고 판단된다. 추정 결과는 <표 1>과 같다.

<표 1> 추정 결과

변 수	동질적 기술	이질적 기술	Westinghouse
A	4.2699*** (0.0600)	4.1035*** (0.0678)	4.3431*** (0.0319)
AGE	0.0557*** (0.0169)	0.0460*** (0.0181)	0.0333*** (0.0084)
AGE2	-0.0042*** (0.0013)	-0.0041*** (0.0015)	-0.0021*** (0.0005)
PRESITE	0.0160*** (0.0059)	0.0235*** (0.0066)	0.0027* (0.0017)
TRASITE1	-0.0067* (0.0051)	-0.0075 (0.0073)	0.0039** (0.0017)
TRASITE2	0.0126** (0.0065)	0.0168* (0.0119)	0.0035** (0.0017)
PREFIRM	-0.0001 (0.0023)		0.0042** (0.0018)
PREFIRMS		0.0171*** (0.0048)	
PREFIRMD		-0.0016 (0.0026)	
TRAFIRM1	0.0060*** (0.0024)		0.0012 (0.0015)
TRAFIRM1S		-0.0032 (0.0042)	
TRAFIRM1D		0.0109*** (0.0030)	
TRAFIRM2	0.0003 (0.0029)		0.0074* (0.0040)
TRAFIRM2S		0.0041 (0.0117)	
TRAFIRM2D		0.0019 (0.0038)	
DUMPHWR	0.0822* (0.0542)	0.1200** (0.0615)	
결정 계수	0.43	0.52	0.52

주) ***는 1%, **는 5%, *는 10% 유의수준임./()안은 표준편차임.

동질적 발전기술 가정 하에서의 추정결과를 살펴보면, 운전시간의 경과에 따른 학습효과와 노후화효과와 관련된 변수인 AGE와 AGE²는 매우 유의적으로 추정되었다. 이들 변수의 추정치를 해석하면 발전소의 운전성고가 극대화되는 해는 최초 상업운전 후 6.63년이 되는 때이며 그 이후로는 점차 감소한다는 의미이다. 그리고 동일 부지에 위치한 발전소의 운전경험이 운전성고에 미치는 효과와 관련된 변수는 PRESITE, TRASITE1, TRASITE2인데 이들 변수의 추정치는 모두 유의적으로 추정되었으나, TRASITE1의 계수는 예상과 다르게 음수로 추정되었다. 그러나 그 추정치의 크기는 작은 것으로 나타났다. PRESITE와 TRASITE2의 계수는 각각 1%와 5%의 유의수준 하에서 추정되었으며 그 부호도 예상과 일치한다. 이들 추정치 중에서 PRESITE의 계수가 가장 크게 추정되었다. 이러한 추정결과를 통해, 동일부지에 위치한 발전소의 운전경험은 발전소의 운전성고의 향상에 미치는 효과가 큼을 알 수 있다. i발전소의 최초 상업가동 운전 이전에 실현된 동일 부지 발전소들의 운전경험이 i발전소의 운전성고에 미치는 효과를 나타내 주는 변수인 PRESITE변수의 추정치를 해석하면, 5년 동안의 이와 같은 운전경험은 발전소의 이용률을 8.3% 상승시킨다는 것을 의미한다. 한편, 다른 부지에 위치한 발전소의 운전경험이 운전성고에 미치는 효과와 관련된 변수는 PREFIRM, TRAFIRM1, TRAFIRM2인데 이들 변수 중에서는 TRAFIRM1만이 유의적으로 추정되었다.⁶⁾ 이들 추정계수는 동일부지와 관련된 변수의 추정치에 비해 상대적으로 작은 값을 갖고 있다. 이러한 추정결과를 통해 다른 부지에 위치한 발전소의 운전경험이 발전소의 운전성고에 미치는 효과는 미미한 것으로 판단된다.

기술의 동질성 여부에 따라 영향을 받는 변수는 TRAFIRM1과 TRAFIRM2 인데 동일한 기술인 경우에는 이들 변수의 마지막에 S자를 첨가시켜 TRAFIRM1S와 TRAFIRM2S라는 변수를, 이질적 기술인 경우에는 이들 변수의 마지막에 D자를 첨가시켜 TRAFIRM1D와 TRAFIRM2D라는 변수를 명명하였다⁷⁾. 이질적 기술 가정 하에서의 추정결과를 살펴보면, 운전시간의 경과에 따른 학습효과와 노후화 효과의 정도를 나타내는 AGE와 AGE²변수의 추정치는 동질적 기술을 가정한 경우와 거의 비슷한 수준으로 추정되었다. 그리고 동일부지의 운전경험은 운전성고 향상에 이바지하는 정도가 역시 큰 것으로 나타났다. 특히 PRESITE변수는 매우 유의적으로 추정되었으며 추정치의 크기도 커서 운전성고에 미치는 효과가 큼을 알 수 있다. 한편, 다른 부지의 운전경험과 관련된 추정치는 TRAFIRM1D 변수를 제외하고는 대체적으로 예상과 일치하는 것으로 나타났으로써 다른 부지의 운전경험은 동일부지의 운전경험에 비해 운전성고향상에 미치는 효과가 미미한 것을 알 수 있다. 그러나 다른 부지라 하더라도 동일 기술의 오래된 발전소의 운전경험을 반영하

6) 그러나 추정치의 크기는 작은 것으로 나타났다.

7) 동일 부지에 있는 발전소들은 이미 서로 동일한 기술을 보유하고 있으므로 이에 대해서는 변수의 추가가 없다.

는 PREFIRMS 변수는 매우 유의적으로 추정되었으나, 상이한 기술의 오래된 발전소의 운전경험을 반영하는 TRAFIRM1D변수도 또한 매우 유의적으로 추정됨으로써 발전기술의 동질성 여부가 운전성과에 미치는 효과에 대하여는 이상의 분석만 가지고는 일관적인 결과를 도출하기가 어렵다고 판단된다.

Westinghouse社가 설계한 원자로에 대한 추정 결과를 살펴보면, 모든 추정계수의 부호는 예상과 일치하였으며 상당히 유의적으로 추정되었다. 이를 동질적 기술의 가정과 이질적 기술의 가정 하에서의 추정 결과와 비교할 때 특이한 점은, 운전 경험 공유와 관련된 모든 변수들의 추정치가 상대적으로 작은 값을 갖지만 거의 모든 변수들이 유의적으로 추정되었다는 것이다. 이러한 추정결과는 기술적 동질성이 운전성과 향상에 미치는 효과가 지배적임을 의미하며, Westinghouse 社가 설계 공급한 원전사이의 운전경험의 공유가 활발하였던 것을 의미한다. PREFIRM과 TRAFIRM2변수의 유의적 추정을 통하여 다른 부지에 위치하고 있는 발전소 사이에서도 운전경험의 공유가 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 동질적인 발전 기술을 갖고 있는 발전소의 운전경험은 발전소의 운전성과 향상에 매우 중요한 요인이 된다는 것을 의미한다.

IV. 결 론

우리나라의 원자력발전 산업은 다양한 구조를 지니고 있다. 원자로형태는 대부분이 가압경수로형이지만 1기의 가압중수로형을 보유하고 있다. 또한 원자력발전소의 가장 핵심적인 기술이라고 할 수 있는 핵증기공급계통도 발전소별로 3개사로 나뉘어 공급되었다. 이러한 다양성으로 인해 기술적으로 상이한 이들 발전소 사이의 운전경험이 발전소 운전성과의 향상을 위해 효율적으로 활용되지 않을 가능성을 내포하고 있다. 이러한 상황을 배경으로 한 본 연구의 실증분석 결과, 동질적 기술을 가지고 있는 발전소들 사이의 운전 정보의 공유가 대체적으로 더 활발한 것으로 분석되었으며 동일 부지에 있는 발전소들의 운전 경험이 운전 성과 향상에 미치는 효과가 큼을 알 수 있다. 이러한 실증분석 결과는 예상과 일치하는 것으로 기존의 다양한 원자력 발전 기술의 도입이 발전소의 운전 성과 측면에서는 비효율적이었음을 확인하는 것이다.

참고문헌

1. 한국전력공사, 『경영통계』, 1995.
2. 한국전력공사, 『원자력발전년보』, 1995.
3. Lester, R. K. and McCabe, M.J. "The effect of industrial structure on learning by doing in nuclear power plant operation", *Rand Journal of Economics*, Vol. 24, No.3, Autumn 1993.