

영광 3,4 호기 장주기 노심에 대한 경제성 평가

임채준, 송재용, 이창규, 이정찬, 지성균

한국원자력연구소

요 약

국내 1000 MWe 급 발전소인 영광 3,4 호기는 현재 표준주기 (12 개월 주기)로 운전되고 있으나 향후 18 개월 장주기 운전을 계획하고 있다. 본 연구에서는 영광 3,4 호기의 교체노심을 대상으로 표준주기와 장주기에 대한 장기 핵연료관리계획을 수립하고 이들 평형노심에 대하여 핵연료주기비와 발전원가를 중심으로 경제성 분석을 수행하여 상호 비교하였다. 18 개월 장주기로 운전할 경우 표준주기에 비하여 핵연료주기비는 약 7% 증가하나 약 4%의 발전소 이용률 향상에 따라 고정비가 약 5% 절감되어 총 발전원가를 약 4% (연간 약 99 억원) 절감할 수 있는 것으로 평가되었다. 또한 선형반응도 모델을 이용하여 핵연료 이용도(Fuel Utilization Curve)를 만들어 발전원가에 영향을 미치는 교체 신연료의 다발수, 농축도, 주기길이, 발전소 평균 부하율 및 재장전 보수기간의 변화에 따른 발전원가의 민감도 분석을 수행하였다.

1. 개 요

근래 들어서 표준주기 운전 방식에서 장주기 운전방식으로 전환하는 발전소들이 늘어가는 추세이다. 이와같이 장주기를 채택하는 주된 이유는 주기길이 증가에 의한 발전소 이용률을 향상시킴으로써 발전비를 절감하는데 있다. 장주기 채택에 따라 핵연료 주기비는 다소 증가하지만 발전소 이용률 향상에 따른 고정비의 절감으로 이러한 부의 효과를 충분히 상쇄시킬 수 있다. 원자력발전소의 경제성 분석에 사용되는 주요 인자로는 교체 신연료의 다발수, 농축도, 주기길이 및 발전소 이용률등이 있다.

본 연구에서는 영광 3,4 호기의 표준 및 장주기의 발전소의 평균 부하율을 95%, 재장전 보수기간을 65 일로 서로 동일하다고 가정하고 장주기 운전주기를 18 개월로 정하여 정격출력일수를 446 일 (발전소 이용률 83% 에 해당). 표준주기는 정격출력일수를 306 일 (발전소 이용률 79% 에 해당)로 정하였다. 본 연구에서는 이들 인자에 기초한 표준주기와 18 개월 장주기의 발전원가를

비교 분석함으로서 장주기의 경제성 평가를 하였다. 또한 18 개월 장주기에 대하여 교체 신연료의 다발수, 농축도, 재장전 보수기간 및 발전소 평균부하율등의 변수들에 의한 발전원가의 민감도 분석을 수행하였다.

2. 발전원가 계산방법

원자력발전소의 발전비는 교체 신연료의 다발수, 농축도 및 주기길이와 관련된 핵연료 주기비, 발전소 건설부터 상업운전시점까지 소요된 총 자본 및 발전소 운전에 소요되는 제경비를 포함한 고정비로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 고정비 계산시 발전소의 총 건설 비용을 제외한 제비용(발전소 건설기간 동안에 발생한 이자, 물가 상승율, 고정비율 및 운전 유지비 등)을 고정비율에 포함 시켰다. 또한 이러한 고정비율은 운전유형이나 발전소에 따라 민감하지 않다고 보고 본 연구의 장주기 운전에 대한 경제성 평가에서는 주기길이와 발전소에 관계없이 11.83%의 고정비율을 사용하였다. 대상 발전소의 고정비율이 주어졌을때 고정비는 다음 식에 의하여 계산된다.

$$\text{고정비 (원 / kWhe)} = \frac{\text{총건설비} \times \text{고정비율}}{\text{시설용량} \times 8766(\text{hr / year}) \times \text{이용율}}$$

발전원가의 또다른 구성 요소인 핵연료비는 정광, 변환, 농축, 성형가공 및 사용후핵연료 처리비등의 각 핵연료 주기 단계별로 실제로 지불된 비용인 직접비와 직접비의 이자에 해당하는 간접비로 구분된다. 한편 핵연료주기비를 핵연료의 노심장전 기준에 따라 선행 핵주기비, 노심내 주기비 그리고 후행 핵주기비로 구분하기도 한다. 후행 핵주기비에 대해서는 우라늄과 플루토늄의 Credit 에 대한 자료와 저장/수송 및 처분에 따른 비용을 정확히 산출하기 곤란하여 본 연구에서는 후행 핵주기의 직접 및 간접비에 대해서는 고려하지 않았다.

3. 표준주기와 18 개월 장주기의 주기비 비교

2 절에서 기술한 발전원가 산출법으로 영광 3,4 호기 표준주기와 18 개월 장주기의 평형노심에 대한 고정비 계산과 핵연료주기비 계산을 위해 표 1 에 주어진 비용입력자료를 사용하였다. 주기 길이는 교체 신연료의 다발수 및 U235 농축도에 의하여 결정되며 이를 바탕으로한 연소계산 결과에 따라 핵연료주기비가 변하므로 이들의 신뢰성 확보는 경제성 평가에 매우 중요하다. 따라서 표준주기와 18 개월주기의 정확한 평형노심 자료를 얻기 위해 설계코드인 ROCSE를 사용하였다.

영광 3.4 호기 표준주기와 18 개월주기의 평형노심에 대한 주기비 계산 결과가 표 2 에 있다. 표준주기에 비해 18 개월주기의 핵연료주기비가 약 7% 이상 증가한 것은 교체 신연료의 다발수와

농축도 증가로 인한 정광, 농축 및 성형/가공등의 직접비 및 간접비가 증가했기 때문이다. 그러나 장주기를 채택함으로써 주기길이 증가로 발전소 이용율이 4%이상 증가하고 이에 따라 고정비도 5%이상 감소하여 결국 발전원가는 표준주기에 비하여 3.7% 정도 낮아졌다.

4. 민감도 분석

민감도 분석을 위해 교체 신연료의 다발수, 농축도와 주기길이 및 배치 방출연소도의 상관관계를 나타내는 핵연료 이용도를 18 개월 장주기에 대해서 그림 1에 나타내었다. 이 그림은 선형반응도 모델을 이용하여 각 집합체별 반응도를 농축도와 연소도의 함수로 나타내어 노심의 증성자 누출도를 ROCS Scoping 계산 결과를 기준으로하여 주기말에서 노심의 반응도가 영이 되는 연소도를 주기길이로 정하는 방법을 사용하여 구하였다.

이 그림에서 교체 신연료의 다발수 증가에 따른 배치 방출연소도의 변화가 단순 감소가 아니고 특정 교체 신연료의 다발수(44, 60, 88)에서 peak 를 보이고 있다. 이 특정 교체 신연료의 다발수들은 177 개 연료를 갖는 노심에서 배치 수 (4, 3, 2)로 나눈 값에 가장 근사한 값으로서 가능한 한 교체 신연료의 다발수를 이 값에 맞추면 핵연료 이용도를 극대화 할 수 있다. 물론 농축도 및 교체 신연료의 다발수를 결정할 때는 첨두출력제어 및 고농축연료 제조에 대한 인허가 문제 그리고 집합체의 붕 최대연소도 제한치등을 고려해야 한다. 따라서 주기길이에 따라 교체 신연료의 다발수와 농축도를 적절히 조정하여 핵연료 사양을 결정해야 한다.

한편 이 핵연료 이용도를 이용하여 18 개월주기의 교체 신연료의 다발수 및 농축도에 따른 핵연료주기비 및 발전원가를 분석한 결과를 그림 2에 나타내었다. 핵연료주기비 관점에서 보면 교체 신연료의 다발수가 일정할 경우 농축도 증가에 따라 정격출력일수가 증가하나 핵연료주기비에는 큰 변화가 없다. 이것은 농축도 증가로 인한 우라늄 농축의 직접비 및 간접비 비용이 증가하였으나 주기길이 증가로 충분히 연료비 증가분을 상쇄시켰기 때문이다. 그러나 농축도가 일정할 경우 교체 신연료의 다발수가 증가함에 따라 핵연료주기비는 상당히 증가함을 볼 수 있다. 이 경우 교체 신연료의 다발수 증가로 인한 우라늄관련 비용 증가를 주기길이 증가로 충분히 상쇄시키지 못했기 때문이다. 한편 발전원가 관점에서 보면 교체 신연료의 다발수가 일정할 경우 농축도 증가에 따라 정격출력일수가 증가하여 발전소 이용율이 향상되고 이에 따라 발전원가는 감소하는 추세이다. 그리고 농축도가 일정할 경우 교체 신연료의 다발수가 증가함에 따라서 발전원가도 감소함을 볼 수 있다. 이것은 교체 신연료의 다발수 증가에 따른 핵연료비 증가분보다 발전소 이용율 향상으로 인한 고정비 감소분이 훨씬 크기 때문이다. 교체 신연료의 다발수 및 농축도에 따른 민감도 분석을 통하여 교체 신연료의 다발수를 증가시켜 주기길이를 늘리는 것보다 농축도를 증가

시켜 주기길이를 증가시키는 것이 발전원가 관점에서는 유리하다는 결론을 얻었다.

그림 3은 정격출력일수가 459 일이 되도록 교체 신연료의 다발수와 농축도를 변화시켰을 때의 핵연료주기비와 발전원가 변화 추이를 나타낸 것이다. 이 경우 95%의 발전소 부하율과 65일의 재장전 보수기간을 동일하게 적용하고 정격출력일수가 고정되어 있으므로 고정비 변화는 전혀 없다. 동일한 주기길이를 내면서 핵연료주기비와 발전원가를 줄이기 위해서는 교체 신연료의 다발수를 줄이고 농축도를 증가시키는 방법이 있다. 교체 신연료의 다발수가 60개이하에서는 핵연료주기비 감소폭이 현저히 둔화됨을 볼 수 있는데 이것은 핵연료 이용도와 밀접한 관계가 있음을 그림 1에서 알 수 있다.

그림 4와 5는 평균 부하율변화 및 재장전 보수기간변화가 발전원가에 미치는 영향을 운전유형별로 각각 나타낸 것이다. 발전소 부하율이 증가할수록 발전원가는 운전유형에 상관없이 선형적으로 감소하고 있다. 발전소 부하율 1% 변화에 따른 발전원가 변화폭은 95% 부하율 기준으로 표준·장주기 모두 발전원가의 0.8% (~0.24 원/KWhe) 정도로 나타났다. 그리고 재장전 보수기간이 증가할수록 발전원가는 운전유형에 상관없이 선형적으로 증가하며 주기길이가 길어질수록 발전원가의 변화폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 재장전 보수기간이 10일 변할때 발전원가의 변화폭은 보수기간 65일 기준으로 표준주기의 경우 발전원가에서 2.3% (~0.7 원/KWhe) 정도이고 18개월장주기의 경우 1.6% (~0.5 원/KWhe) 정도로 평가되었다.

5. 결론

표준·장주기 운전유형에 따른 경제성 분석결과 핵연료주기비와 고정비가 발전원가에서 차지하는 비중이 각각 15%와 85% 정도로 고정비의 변화요인이 중요하였다. 장주기 운전을 통해 주기길이가 증대됨으로써 발전소의 이용율이 향상되고 이에 따른 고정비 절감은 핵연료 주기비의 증가분을 여유있게 상쇄하는 것으로 나타났다. 이용율에 영향을 미치는 주기길이, 평균 부하율 및 보수기간의 변화에 따른 발전원가의 민감도분석을 통해 주기길이를 증가시키기 위해 교체 신연료의 다발수를 증가시키는 것보다 농축도를 증가시키는 것이 발전원가 관점에서는 유리하며 발전원가는 부하율과 재장전 보수기간에 따라 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

- 1) 한국원자력연구소, "900 Mwe 급 경수로 장주기 운전 타당성 연구," KAERI/TR-178/90, 1990.
- 2) ABB-CE, "User's Manual for ROCS," CE-CES-4 Rev. 8-P, March, 1994.

표 1 발전원가 계산을 위한 비용입력자료

고정비관련 비용 입력자료		핵연료주기비관련 비용 입력자료	
항 목	입력자료	항 목	입력자료
시설용량	2815 MWt (994.5 MWe)	우라늄 원광구입비	\$ 21 /lb U ₃ O ₈
부하율	95%	변환비	\$ 5 /KgU
재장전 보수기간	65 Days	농축비	\$ 125 /KgU
총건설비	1조5650억원/호기	성형가공비	\$ 260 /KgU
이자율	10%	사용후핵연료 처리비	-
현가율	10%	Conversion Loss Factor	0.5%
고정비용	11.83%	Fabrication Loss Factor	0.7%
환율	780원/\$	Tail Enrichment	0.25 w/o
현가화 기준 시점	1996년 초	우라늄 원광	핵연료장전 18개월 전
		변환	핵연료장전 12개월 전
		농축	핵연료장전 8개월 전
		성형가공	핵연료장전 4개월 전
		사용후핵연료 처리	핵연료장전 60개월 후

표 2. 표준주기 및 18개월 장주기의 경제성 비교

항목 \ 주기형태	표준주기	18개월 장주기
정격출력일수 (일)	306	446
교체 신연료 농축도 (w/o)	3.900	4.014
교체 신연료의 다발수	44	68
이용율(%)	79.04	83.44
주기길이 (MWD/T)	11288	16452
방출연소도 (MWD/T)	45408	42823
전력생산량 (KWhe)	7.301E+09	1.064E+10
핵연료주기비 (원/kWhe)	3.77	4.05
표준주기대비 핵연료주기비 비율	100.0	107.5
고정비 (원/KWhe)	26.87	25.45
표준주기대비 고정비 비율	100.0	94.7
발전원가 (원/KWhe)	30.63	29.50
표준주기대비 발전비 비율	100.0	96.3
연간 핵연료비 (억원)	328	353
연간 핵연료비용 절약분 (억원)	0	-25
연간 발전비 (억원)	2669	2570
연간 발전비용 절약분 (억원)	0	99

그림 1. 핵연료 이용도 (Fuel Utilization Curve)
 (68개 교체신연료 사용 18개월 장주기노심 증성자 누출도 기준)

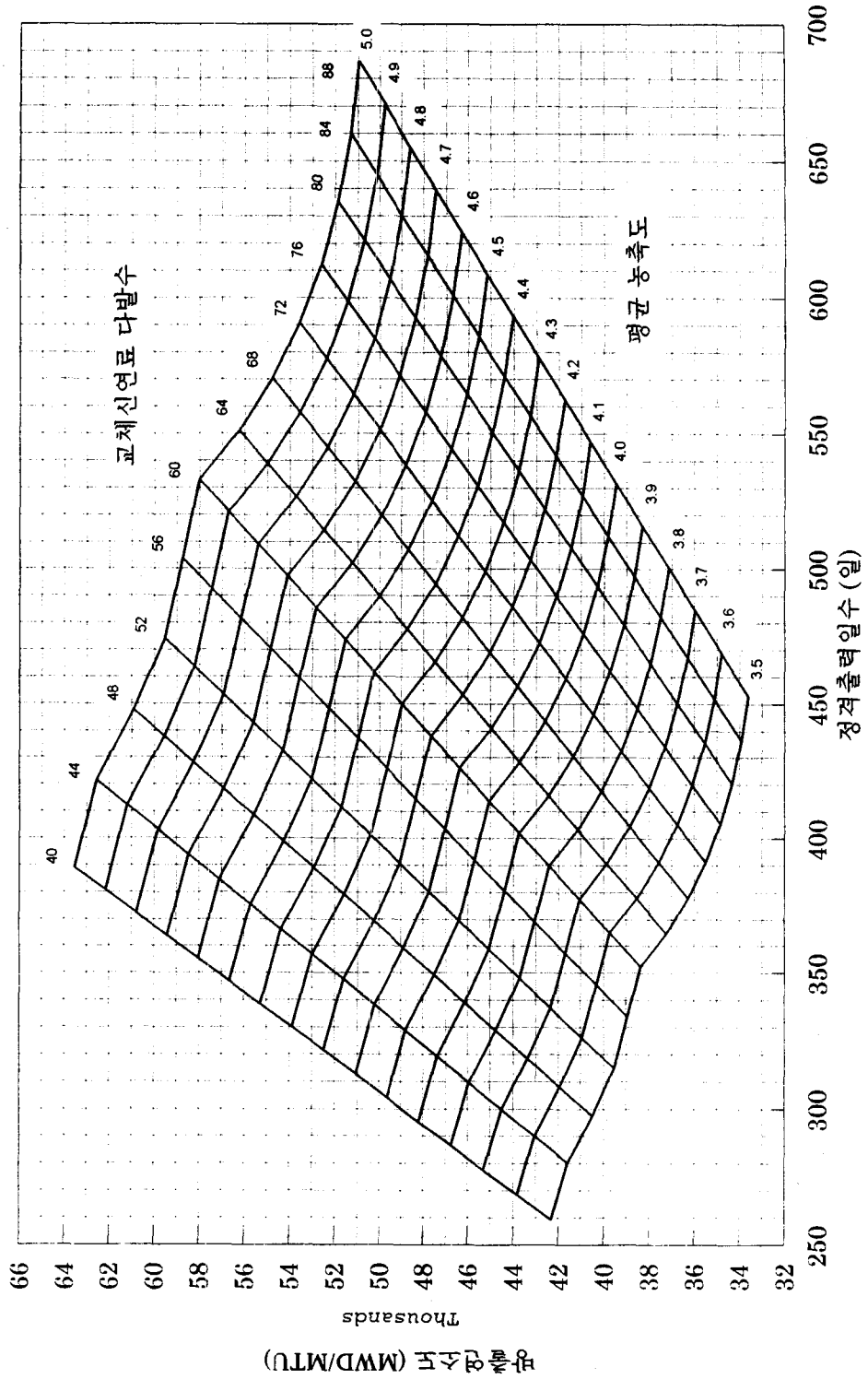


그림 2. 교체신연료 다발수와 농축도에 따른 주기비의 변화
(정격출력일수 변동)

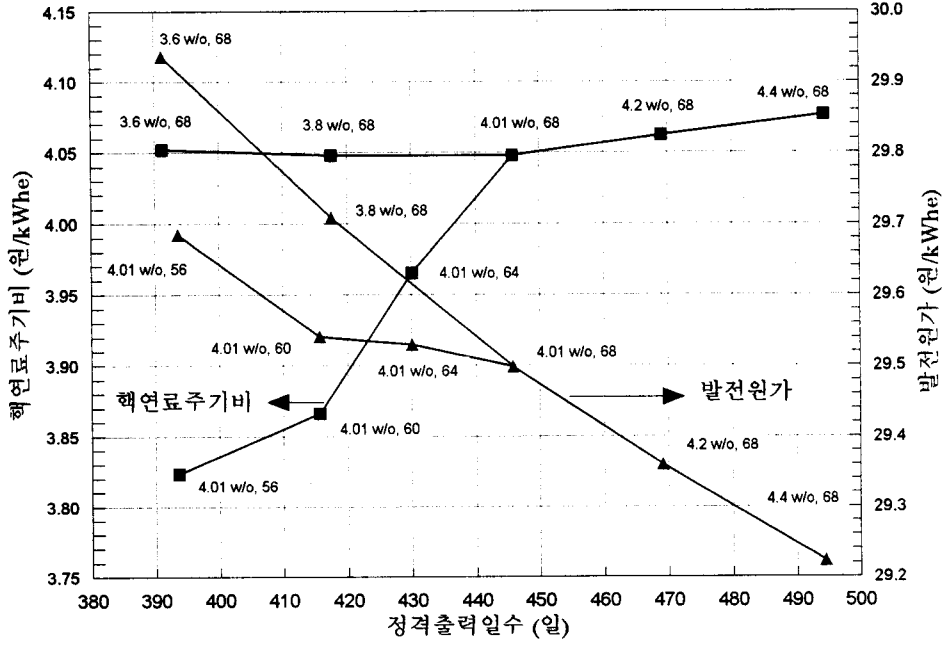


그림 3. 교체신연료 다발수와 농축도에 따른 주기비의 변화
(정격출력일수 고정)

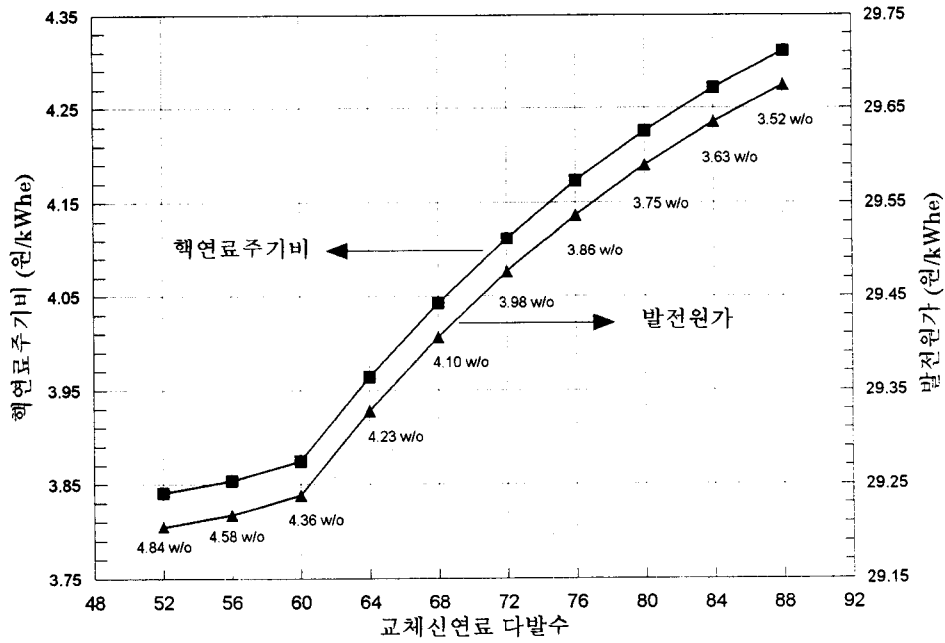


그림 4. 발전소 부하율에 따른 발전원가 추이
 (표준주기=306 EFPD & 44 Feed, 18개월주기=446 EFPD & 68 Feed 기준)

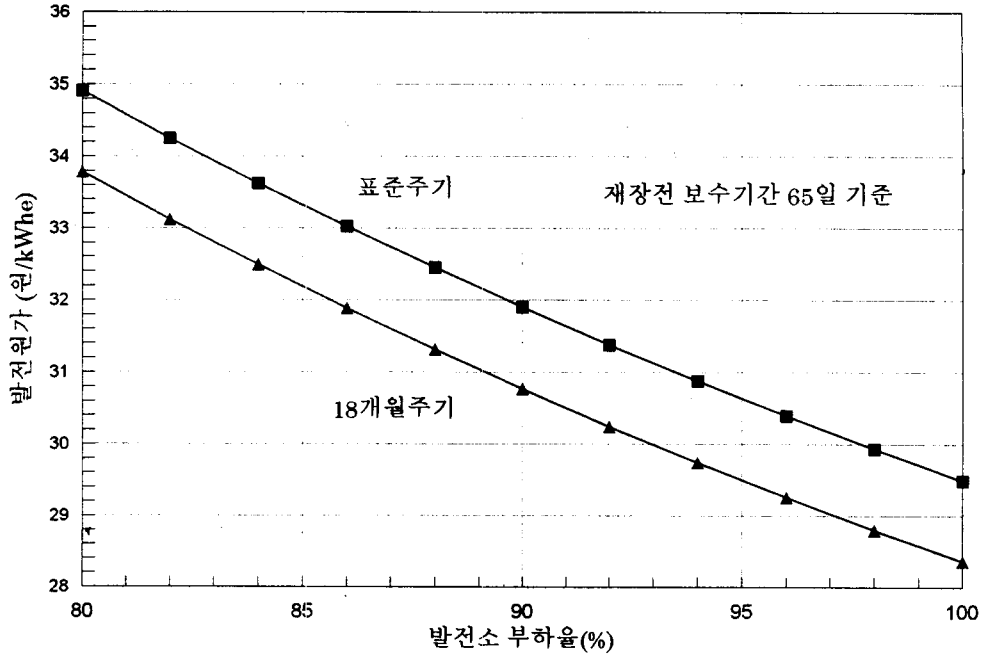


그림 5. 재장전기간에 따른 발전원가 추이
 (표준주기=306 EFPD & 44 Feed, 18개월주기=446 EFPD & 68 Feed 기준)

