

고연소도 초장주기 고속로심 설계를 위한 노심 타당성 연구

A Feasibility Study for Ultra-Long Life Fast Reactor  
Core Designs with High Burnup

송훈, 김상지, 김영일  
한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150

요약

출력에 따른 장주기 노심 가능성을 살펴보기 위하여 1000 MWe, 500 MWe, 300 MWe 3가지 출력에 대하여 설계목표를 만족하는 고출력 장주기 노심을 구성하였다. 초기노심연료로 U-Pu-Zr의 3원합금과 U-Zr 이원합금으로 구성된 금속연료를 사용하였다. 노심의 출력이 증가할수록 필요한 최적 농축도와 최적 연료체적비는 감소하였다. U 노심의 경우 Pu 노심에 비해 높은 농축도 및 연료체적비를 필요로 하였다. 30년 장주기에 필요한 최소연료체적비는 300 MWe 노심의 경우 0.53으로 나타났으며 다른 출력에서는 0.5 이하에서 만족하였다. 최대 중성자 플루언스를 제외한 다른 노심 핵특성 인자들은 모두 설계목표를 만족하였다.

Abstract

An extensive parametric study was performed on the design parameters of ultra long life cores(ULLC) using metallic fuel for 1000 MWe, 500 MWe and 300 MWe liquid-metal cooled fast reactor. The fuels composed of U-Pu-Zr ternary and U-Zr binary metal were used as initial core fuel. The optimal fissile enrichment and fuel volume fraction have been reduced with the increased power capacity. The values of fissile enrichment and fuel volume fraction for U-core are larger than that of Pu core. The minimum fuel volume fraction necessary for 30 years of operation for the 300 MWe core was found to be 0.53 but that of others was identified to be below 0.5. Nuclear performance parameters other than the fast neutron fluence of cladding satisfy the design goals.

1. 서론

고속로의 경우 플루토늄 함유량이 높은 핵연료집합체가 장전되고 배출되기 때문에 핵비확산성(Proliferation Resistant)에 대한 국제적 관심이 높다. 특히, 현재 국내에서 핵연료 재처리가 상당히 많이 제약되고 있다는 점을 고려할 때 고속로 노심설계에서 핵비확산성은 중요한 설계요건중 하나라고 할 수 있다. 이러한 점에서 대략 30년 이상의 주기길이를 갖는 초장주기 노심(ULLC : Ultra

Long Life Core)은 많은 경제적 이점과 핵비확산성을 갖고 있다. 초장주기 노심은 한번의 장전후 운전수명기간동안 운전되기 때문에 사용후핵연료 저장과 재장전을 위한 설비가 필요없으며 재장전을 위한 재처리 과정이 필요없기 때문에 초기 건설 비용과 재처리 비용을 절감할 수 있다. 또한 30년 이상의 핵연료 잔존기간과 높은 연소도를 실현함으로써 핵연료 이용율을 크게 향상시킬 수 있다.

핵연료 재처리 시설을 운용할 수 없는 국내 현실을 고려할 때 보통 1년내지는 3년주기로 이루어지는 기존 고속로의 재처리 과정에 비하여 Once-Through 방식의 초장주기 노심은 초기 장전되는 플루토늄의 재처리만이 필요할 뿐 운전중 더 이상의 재처리가 필요없다. 따라서 운전기간중 플루토늄을 함유하고 있는 핵연료집합체를 원자로 밖으로 빼내지 않기 때문에 핵비확산성이 높다.

이러한 초장주기 노심은 1979년 Doncals[1]에 의해 제안되었고 산화물 연료와 탄화물 연료[2]에 대해 그 실현가능성이 입증되었다. 또한 Fertile 연료만을 재장전하는 Partial Refuelling 초장주기 노심 설계와 APC(Asymmetric Parfait Core) 개념을 도입한 초장주기 노심[3]이 개발되었다. 금속 연료에 대해서도 300 MWe급 노심[4]에 대해 구형 및 실린더형 근사 모델을 통한 예비설계가 이루어졌다. 이들 노심들은 초장주기 노심의 높은 증식비로 인한 높은 연소 결손 반응도(Burnup Reactivity Swing)를 억제하고 운전기간중 최대 출력밀도를 낮추기 위해 기존 출력밀도의 1/2 정도의 저출력밀도 노심으로 구성되어있다. 따라서 일반적인 노심보다 노심 부피가 3~4배 크고 30년의 핵연료 잔존기간에 비해 노심 평균 및 최대 연소도가 작으므로 경제적인 노심과는 거리가 멀다.

따라서 경제적인 면에서 일반적인 고속로의 평균 출력 밀도를 유지하는 장주기 노심을 구성하여 출력에 비례한 고출력 장주기 노심 가능성에 대한 타당성을 살펴보았다. 1000 MWe, 500 MWe, 300 MWe 3가지 출력에 대하여 초기노심연료로 U-Pu-Zr의 3원 합금으로 구성된 Pu 금속연료 노심과 U-Zr의 2원 합금을 사용하는 U 금속연료 노심에 대하여 장주기 노심 가능성을 연구하였다. 금속연료는 상대적으로 밀도가 높고 구성물질로 감속물질을 함유하고 있지 않기 때문에 산화물 연료나 탄화물 연료보다 경화된 중성자 스펙트럼을 얻을 수 있다. 따라서 다른 종류의 연료보다 증식특성이 뛰어나고 75% 정도의 희석밀도(Smeared Density)를 채용하였을 때 높은 연소도에서도 연료의 건정성을 유지하는 것으로 알려져 있다. 따라서 오랫동안의 핵연료 잔존기간을 위해 높은 증식비를 필요로 하는 고연소도 초장주기 노심의 연료로 금속연료가 적합하다고 할 수 있다.

## 2. 계산 방법

노심 핵계산은 한국원자력연구소에서 고속로심 해석을 위해 사용하고 있는 종합 전산체제인 K-CORE 시스템을 사용하였으며 OECD NEA의 평가핵자료 JEF2.2로부터 NJOY코드의 처리과정을 거쳐 생산된 KAFAX-F22[5] 단면적 라이브러리를 사용하였다.

TRANSX코드[6]를 이용하여 자기차폐보정을 수행하고 KAFAX-F22 단면적 라이브러리로부터 영역별 온도에 해당하는 80군 균정수를 생산하였고, 이를 바탕으로 R-Z모델로 근사된 노심 모델에 대하여 TWODANT코드[7]를 통해 영역별 균중성자속을 계산하였다. 이렇게 계산된 80군 균중성자속을 가중함수로 하여 다시 TRANSX코드로 균축약 과정을 통해 최종적으로 DIF3D/REBUS코드[8,9]에 사용될 영역별 9군 유효 미시 단면적을 생산하였다.

노심 연소계산은 DIF3D/REBUS 코드를 통해 이루어졌다. 육각주 3차원 모델을 바탕으로 X-Y방향으로는 핵연료집합체를 하나의 노드로 축방향으로는 대략 24개 노드로 계산을 수행하였다.

### 3. 설계 목표

본 연구에서 설정한 고연소도 초장주기 노심의 설계목표는 원자로 운전수명은 30년 이상이어야 하며 핵확산저항성을 향상시키기 위해 운전기간중 플루토늄을 함유하고 있는 핵연료집합체를 원자로 밖으로 배출하지 않는다는 것이다. 또한 장주기노심이 가지는 저출력에서 벗어나 고연소인 노심 평균 연소도 200 MWD/kg 이상을 만족하면서도 연소도에 따른 연소결손 반응도는 4%  $\Delta k/k$  이하이며 최대 출력밀도는 400 W/cm<sup>3</sup> 이하이어야 한다. 노심 평균 출력밀도는 90 W/cm<sup>3</sup> 이상이어야 하며 핵연료 체적비는 0.55 이하이어야 한다. 위에서 200 MWD/kg 이상의 연소도는 기존의 고속연료의 경우 최대 국부 연소도가 200 MWD/kg인 연소도까지 핵연료 건전성이 유지된다고 알려져 있다. 핵연료 피복관은 최대 중성자 플루언스 한도를 벗어나는 시점에서 피복관 교체가 가능한 것으로 하였다. 이전에 연구되었던 초장주기 노심들이 대체적으로 저출력 노심으로서 50 W/cm<sup>3</sup> 정도의 노심 평균 출력밀도를 갖는 것에 비해 본 연구에서는 국내 개발 증식특성노심정도의 노심 평균 출력밀도를 유지하도록 하였다. 핵연료집합체에서의 유로 확보와 피복관 및 집합체 덕트가 차지하는 체적비를 고려하여 핵연료 체적비에 대한 제한을 두었다. 출력별 장주기 노심설계의 참조노심은 노심 길이는 120 cm 축방향 블랭킷 길이는 각각 35 cm로 설정하였다. 출력별 계산인자를 서로 비교하기 위하여 출력밀도는 1000 MWe 노심의 출력밀도를 기준으로 하였고 내부 블랭킷과 외부 블랭킷, 핵연료집합체의 체적비를 출력에 비례하여 일정하게 유지시켰다.

### 4. 참조노심 설정 및 노심설계인자 탐색

노심 평균 농축도, 핵연료 체적비, 영역별 농축도에 대해서 설계 인자를 탐색하였다. 1000 MWe 노심[10]의 경우에는 Fissile 농축도 6%에서 15%까지 노심의 평균 농축도를 변화시켰을 때의 유효 증배계수의 변화를 보면 적어도 8%이상의 농축도에서 30년의 장주기가 가능한 것으로 나타났다. 노심평균농축도의 변화에 대한 최소연소결손반응도의 변화는 8.3% 농축도에서 최소의 반응도를 보였다. 최적 핵연료 체적비를 조사한 결과 핵연료 체적비에 따라 일정한 반응도의 상승을 나타내었으며 핵연료 체적비에 따른 최소연소결손반응도의 최소점은 체적비 0.45에서 나타났지만 14년 이상에서는 임계로 도달하지 못하여 30년 주기길이 가능한 0.5를 기준 핵연료 체적비로 결정하였다. 핵연료 체적비는 주기길이에 밀접히 관여하는 인자로서 30년 이상의 주기길이를 갖는 초장주기 노심의 경우 일반적인 고속로에서 보다 높은 핵연료 체적비가 필요하다. 3년 이내의 주기길이를 갖는 노심이 대체적으로 0.4 이내의 핵연료 체적비를 갖는 것에 비해 초장주기 노심의 경우는 0.4~0.55 정도의 핵연료 체적비를 갖게 된다.

일반적으로 반경방향으로 균질한 노심의 경우 농축도가 다른 2개의 영역으로 구성되어 있으며 이때 영역의 농축비에 따라 최소 반응도 변화를 보이는 최적점을 갖는 반면, 농축도가 다른 영역이 본 노심의 경우와 같이 3개 이상일 경우 뚜렷한 최적점을 보이지 않는다. 따라서 본 연구에서는 각 영역이 보이는 출력 분율을 기초로 반복 계산에 의해 최소 반응도 변화와 주기길이, 그리고 최대 출력밀도에 대하여 설계목표를 만족하는 노심을 구성하였다. 1000 MWe 노심의 최적노심은 각 연료영역의 농축도를 달리하여 반복계산을 통하여 구하였다. 초기 연료를 우라늄으로 사용하는 1000 MWe U 노심의 경우 앞서의 Pu 노심과 같이 Fissile 농축도 6%에서 15%까지 노심평균농축도를 변화시켜 조사한 결과 연료체적비 0.5인 경우 주기길이 16년 이상에서는 임계를 만족하지 못하였고 노심평균 농축도의 변화에 대한 최소연소결손반응도에서는 앞서의 Pu 노심보다 높은 농축도인 12%에서 최소

값을 나타내었다. 최소값을 나타낸 농축도에서 임계에 필요한 연료체적비는 0.55로 나타났다. 따라서 이 결과로부터 초기연료를 Pu 대신에 우라늄으로 사용할 경우 Pu 노심에 비해 상대적으로 높은 농축도와 핵연료 체적비가 필요함을 알 수 있다.

500 MWe 노심의 경우 앞서의 1000 MWe 결과와 비교하기 위해 1000 MWe 노심과 내부 블랭킷 및 연료 집합체와의 비를 일정하게 유지시킨 상태에서 평균 출력밀도를 1000 MWe 노심의 평균 출력밀도  $94.70 \text{ W/cm}^3$ 의 10% 오차범위에서 유지시켰다. 이러한 조건에서 여러 인자를 변화시켜 조사한 결과 1000 MWe 노심과 0.52의 비율을 갖는 노심, 즉 내부 블랭킷 집합체 개수가 48개, 3개의 연료영역의 집합체 개수가 각각 48개인 노심이 평균 출력밀도가 1000 MWe의 평균 출력밀도와 가장 근접한  $96.15 \text{ W/cm}^3$  계산결과를 보였다. 최적 노심을 찾기위해 노심평균농축도를 TRU 농축도 10%에서 20%까지 변화시킨 결과에서 TRU 농축도 14%에서 가장 최소 반응도 변화를 보였다. 그림 1에서 참조노심을 보인다.

300 MWe 노심의 경우 앞서와 같이 1000 MWe 노심과 비교하여 비 0.32에서 0.4까지 조사한 결과 1000 MWe와의 비 0.32에서 가장 근접한 노심평균출력밀도  $92.1 \text{ W/cm}^3$ 를 보였다. 최적노심을 찾기 위해 TRU 농축도 14%에서 24%까지 변화시켜 16%에서 최소반응도 변화를 확인하였다. 그러나 이 농축도에서는 주기길이 24년 이상에서는 임계에 도달하지 못하여 연료체적비를 변화시켜 조사한 결과 적어도 체적비가 0.53 이상에서 주기길이 30년을 보장하는 것을 확인하였다. 그림 2는 300 MWe 노심에서 연료체적비를 변화할 때 유효증배계수의 변화를 보여주고 있다.

## 5. 출력별 초장주기 노심의 핵특성

최종으로 구성된 초장주기 노심의 핵특성 인자들을 표 1과 그림 3, 4, 5에 나타내었다. 표 1에서 보는 바와 같이 1000 MWe Pu 노심에서 33년, 1000 MWe U 노심에서 30년, 500 MWe Pu 노심에서 31년, 300 MWe Pu 노심에서 31년의 주기길이가 가능한 것으로 나타났다. 연소 결손 반응도는 1000 MWe Pu 노심에서  $2.6\% \Delta k/k$ , 1000 MWe U 노심에서  $3.2\% \Delta k/k$ , 500 MWe Pu 노심에서  $2.5\% \Delta k/k$ , 300 MWe Pu 노심에서  $4.64\%$ 로 가장 적은 출력인 300 MWe 노심에서 가장 높게 나타났다. 출력별 필요한 TRU 농축도를 표시한 그림 3에서 보는 바와 같이 노심의 출력이 증가할수록 최적농축도가 감소하는 것을 보이고 있으며 필요한 최적 연료체적비도 감소함을 보여주고 있다. U 노심인 경우 Pu 노심에 비해 높은 농축도 및 연료체적비를 필요로 하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 연소반응도 변화를 최소화하면서, 초장주기 운전을 만족하는 최소 연료체적비는 300 MWe 노심을 제외하면 모두 0.5이하에서 만족하였지만 300 MWe인 경우 최소 연료체적비는 0.5보다도 높은 0.53으로 나타났다. 그림 5에서 보는 바와 같이 운전기간이 증가함에 따라 출력이 낮은 노심의 경우 유효증배계수는 초기에는 단조 감소한 후 증가하는 경향을 보였다. 3가지 노심출력에서 수명 기간 중 최대 출력밀도는  $380 \text{ W/cm}^3$ 으로 설계 목표를 만족하고 있으며 최대 중성자 플루언스는  $1.8 \times 10^{24} \text{ n/cm}^2$ 의 값을 보였다.

## 6. 결론

3가지 출력에서 핵연료 농축도와 체적비에 따른 노심 특성 변화를 탐색하여 30년의 주기길이를 갖는 초장주기 노심들을 구성하였다. 노심의 평균 출력밀도를 높힘으로써 노심의 부피를 줄이고 평균 연소도를  $200 \text{ MWD/kg}$  이상으로 증가 시키면서도 연소 결손 반응도 및 최대 출력밀도를 설계 목표 이내로 만족시킬 수 있었다. 주기기간 동안의 Shuffling Scheme에 대한 최적화 노력을 통해 연소 결손 반응도, 최

대 출력밀도는 좀더 감소시킬 수 있을 것으로 생각되며 중성자 중요도에 따른 최적 배치를 통해 피복관 최대 중성자 플루언스도 감소될 수 있을 것이다. 또한 중성자  $1.8 \times 10^{24}$  n/cm<sup>2</sup> 중성자 플루언스 값은 현재의 설계기준  $4 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup> 을 만족하기 위하여서는 약 10년 정도 가동 후 피복관 교체의 재가공 공정을 거쳐야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기과제인 “액체금속로 설계기술 개발” 과제의 일환으로 수행하였다.

### 참고문헌

1. R. A. Doncals, et al., "Nonrefueling Liquid-Metal Fast Breeder Reactor," Trans. Am. Nucl. Soc. 33, 445 (1979).
2. S. Hattori, et al., "Feasibility Study of Ultra Long Life Core with Oxide and Carbide Fuel," Proc. Int. Conf. Fast Breeder Systems: Experience Gained and Path to Economical Generation, Pasco, Washington, 13-17, 8.8-1 (1987).
3. M. Kawashima, et al., "Neutronic Feasibility of An LMFBR Super Long-Life Core(SLLC)," Nuclear Engineering and Design, 106, 357-373 (1988).
4. Zaki Su'ud and Hiroshi Sekimoto, "Conceptual Design Study of Ultra Long Life Fast Reactor," ANP'92 International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Tokyo Japan, Vol 2, p. P9.7/1-P9.7/6. (1992).
5. 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다균 단면적 라이브러리 생산 및 검증," KAERI/TR-842/97, KAERI (1997).
6. R. E. MacFarlane, "TRANSX 2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, LANL (1993).
7. R. E. Alcouffe, et al., "User's Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional Diffusion-Accelerated Neutron Transport," LA-10049-M, LANL (1990).
8. K. L. Derstine, "DIF3D: A Code to Solve One-, Two-, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion theory Problems," ANL-82-64, ANL (1984).
9. B. J. Toppel, "A User's Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability," ANL-83-2, ANL (1983).
10. 유재운 외 2인, "1000MWe급 고연소도 초장주기 고속로심 설계를 위한 노심설계인자 탐색," '99 한국원자력학회추계발표회논문집(1999).

표 1 출력별 주요 설계 변수 및 노심 핵특성 인자

Core electric power (MWe)	1000(Pu)	1000(U)	500	300
Cycle length (years)	33	30	31	31
Fuel/coolant/structure volume fraction				
Driver	0.5/0.22/0.28	0.55/0.22/0.23	0.5/0.22/0.28	0.53/0.19/0.28
Blanket	0.5/0.22/0.28	0.55/0.22/0.23	0.5/0.22/0.28	0.53/0.19/0.28
TRU weight percent				
(Inner/middle/outer core)	9.22/12.23/14.44	12/12/12	14/14/14	16/16/16
Burnup reactivity swing (%Dk)	2.58	3.19	2.51	4.64
Peak power density (W/cc)				
(BOL/EOL)	379/358	336/253	315/252	306/210
Average power density (W/cc)	94.74	94.81	96.15	92.11
Peak fast fluence (n/cm <sup>2</sup> )	1.80E+24	1.65E+24	1.62E+24	1.49E+24
Peak discharge burnup (MWD/kg)	425.4	409.2	410.3	395.9

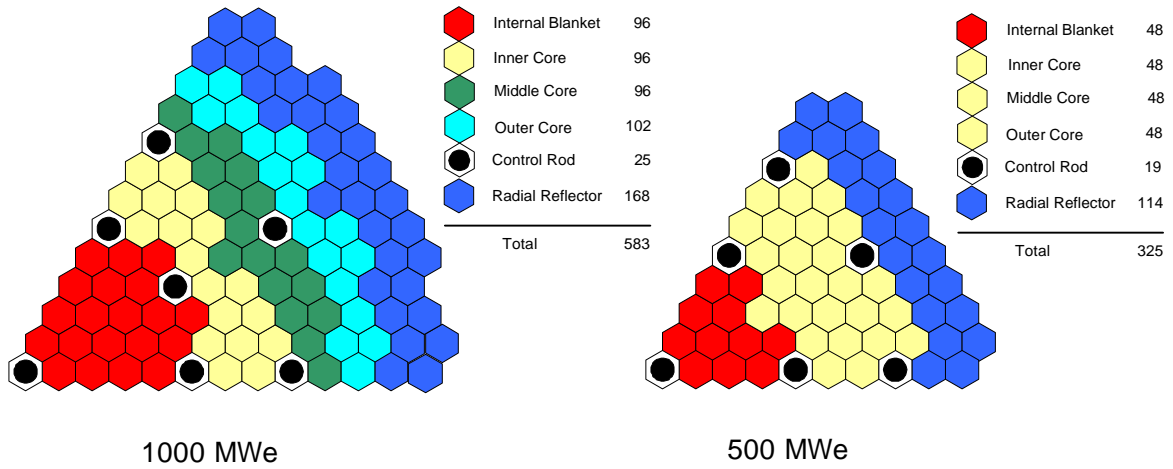


그림 1. 참조노심의 반경방향 Layout

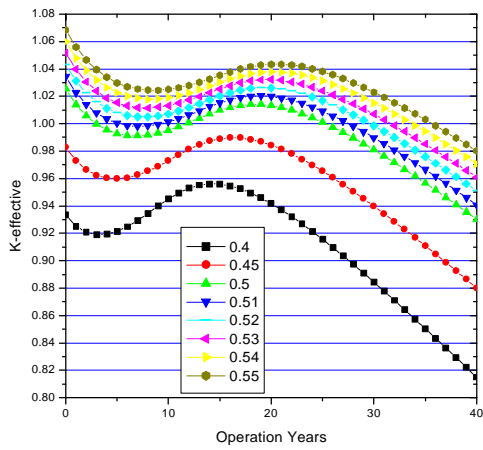


그림 2. 연료 체적비 변화에 따른 반응도 변화  
(300 MWe 노심)

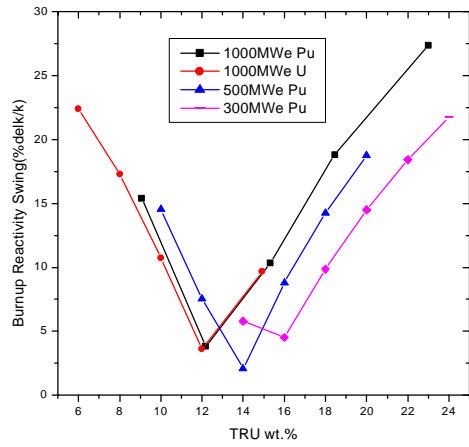


그림 3. 출력별 TRU 농축도

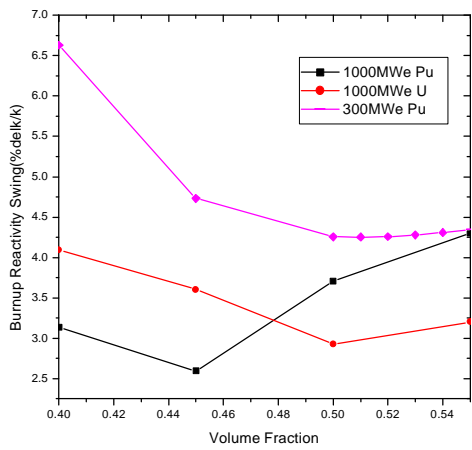


그림 4. 출력별 연료 체적비

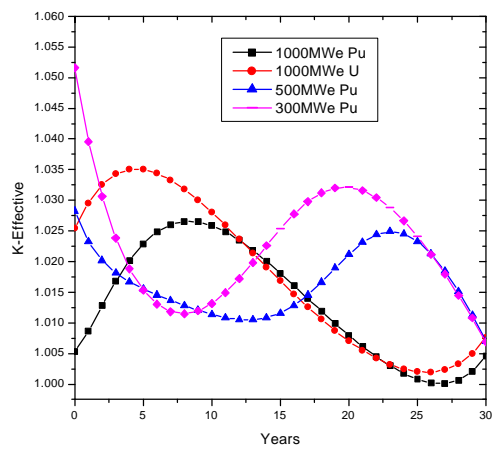


그림 5. 출력별 유효증배계수