2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

웨스팅하우스형 16X16 개량연료의 사양에 따른 주기비 평가 (Evaluation of the Fuel Cycle Cost According to WH 16X16 Advanced Fuel Types)

유상근, 최규환, 장도익, 김선두
한전원자력연료㈜, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

현재 고리2호기는 이미 70년대에 개발된 WH형 SFA(Standard Fuel Assembly)연료를 사용하고있다. 이 연료는 첨두출력인자등의 안전성인자가 제한적이어서 경제성과 직결되는 저누출장전모형 또는 장주기 전략 등이 어려운 형편이다. 따라서 16X16 연료개량의 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 최근 정부주도과제로 채택된 '웨스팅하우스형 원전용 개량 핵연료 개발'과제와 관련하여 16X16 개량연료의 형태를 결정하기에 앞서 각 연료의 형태별 주기비를 평가하였다. 웨스팅하우스형 연료는 연료봉의 규격에 따라 SFA형과 OFA (Optimized Fuel Assembly)형으로 크게 분류된다. 이들 연료의 주기비는 연료의 성능에 따른 안전성인자와 밀접한 관계를 갖고 있다. 따라서 이들 개량연료의 기계적, 열적 성능을 고려한 안전성인자의 제한치를 가정한 최적 장전모형을 선정하여 주기비를 평가 하였다. 주기비 평가는 고리2호기를 대상으로 다양한 신연료 장전 수에 따라 수행 되었으며, 현재 재장전 노심의 핵설계에 사용되는 3D 노달 연소 코드인 ANC코드를 사용하여 최적의 평형노심 장전모형을 선정하였다. 평가결과 선.후행 주기비 모두 OFA형 개량연료가 SFA형 개량연료보다 경제성이 높은 것으로 나타났으며, 선행 핵주기만 고려한 경우 주기당 최대 134만 달러의 이득이 있는 것으로 나타났다.

Abstract

Kori unit 2 has been applied SFA(Standard Fuel Assembly) of Westinghouse fuel type developed in 1970s. But there is a difficulty in using this fuel for the low leakage loading pattern and long term fuel cycle strategy related to the fuel cycle cost because of low safety limit such as hot channel factor. Therefore, the development of 16X16 advanced fuel is gathering strength. In this study, the fuel cycle cost evaluation was performed according to the fuel types of 16X16 advanced fuel to be developed. Westinghouse fuel types are classified as SFA and OFA (Optimized Fuel Assembly) by

fuel rod size largely. The fuel cycle costs of these fuel types are closely related with the safety parameters dependent on the fuel performance. Therefore, the optimized fuel loading pattern search were performed by assuming the revised safety limits considering the mechanical and thermal performance of these advanced fuel and the fuel cycle costs are evaluated based on these loading patterns. The equilibrium cycle loading patterns are determined for the various number of feed fuel using ANC code, 3D nodal depletion code for nuclear design, for Kori unit 2. As the results, both of the front and back-end fuel cycle cost analysis show that OFA gives more economic gain compared to SFA and the maximum economic gain is of 1.34 million dollars, considering the front-end fuel cycle only.

1. 서론

현재 고리 2호기는 웨스팅하우스형 16X16연료를 사용하는 원자력 발전소로서 SFA연료가 장전되어 현재까지 운전 되고 있다. 현재 사용중인 SFA연료는 이미 70년대에 개발된 연료로서 기계적, 열적 성능개선이 이루어지지않은 연료이다. 이에 따라 현재 적용되고 있는 핵주기 전략은 첨두출력인자의 제한으로 인해 저누출 장전모형의 개발과 축방향 반사체의 적용 및 장주기 전략 등이 어려운 형편이다. 따라서 16X16연료 개량의 필요성이 대두 되었다. 최근 정부주도과제로 '웨스팅하우스형 원전용 개량 핵연료 개발'과제가 채택되어 한전원자력연료㈜와 웨스팅하우스사가 공동으로 기계적, 열적 성능이 우수한 16X16형 및 17X17형 개량연료의 개발이 추진 되고있다.

웨스팅하우스형 연료는 연료봉의 규격에 따라 SFA형과 OFA형으로 크게 분류된다. OFA연료는 감속재와 우라늄의 비율을 고려하여 중성자 이용율을 최적화한 연료라 할 수 있다. 이들 연료들은 각각 서로 다른 핵적특성을 가지는데, SFA연료는 노심의 안전성인자인 감속재온도계수 및 첨두출력인자등의 제어가 쉬운 반면에 OFA연료는 중성자 이용율을 높여서 경제성을 강조한 연료라 할 수 있다. 그러나 이들 연료의 주기비는 연료의 성능에 따른 안전성 인자와 밀접한 관계를 갖고 있다. 최적의 장전모형은 이러한 안전성 제한치를 만족 시키면서 노심의 중성자 누출율을 최소화하여 연료의 방출연소도를 높인 장전 모형이라 할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 개량연료의 형태의 결정과 더불어 개량 OFA연료에 대해서 저누출 장전모형이 가능한 안전성 제한치를 제시하는 것이다. 16X16 개량연료의 형태를 결정하기 앞서 기계적, 열적 성능을 고려한 안전성인자를 이들 2가지 연료 형태에 적용하여 각 연료의 주기비를 평가 하였다. 감속재온도계수와 반경방향 첨두출력 인자($F_{\Delta H}$)는 각각 5pcm/°F (영출력) 및 1.500이 적용 되었다. 각각의 연료형태에 따라 이들 안전성인자 제한치를 만족하는 평형노심의 장전모형이 선정 되었으며, 웨스팅하우스형 노심 핵설계 코드 체계인 APA(ALPHA/PHOENIX-P/ANC)코드 체계가 사용되었다. 다양한 신연료 수에 따라 선정된 장전모형의 농축도, 주기길이 및 영역 평균 방출연소도 등을 입력자료로 FUCO코드를 사용하여 주기비 평가가 수행 되었다.

2. 본론

2.1 개량연료의 특징

2.1.1 개량 원전연료의 기계적 특성

- 피복관, 그리드 및 안내관등의 재질을 ZIRLO를 사용하여 장주기 고연소 및 높은 방사선 조사량과 고온에서 우수한 내구성.
- Intermediate Flow Mixing (IFM)을 사용하여 열적 여유도를 증가.
- 축방향 반사체를 적용하여 연료의 효율적연소를 통한 경제성 향상.
- Debris Filter Bottom Nozzle(DFBN)을 사용하여 노심내로 유입되는 이물질 차단.
- Removable Top Nozzle (RTM)을 사용하여 원전연료의 효율적인 검사 및 수리.

2.1.2 개량 원전연료의 핵적 특성

- 피복관, 그리드 및 안내관등의 재질을 중성자 흡수율이 낮은 ZIRLO를 사용하여 중성자 이용율 증가.
- IFM 그리드의 채택으로 열적 여유도가 평균 20%이상 증가하여, 첨두출력인자등을 증가시켜 원자력발전소의 안전여유도 제고.
- 연료봉 규격을 최적화하여 중성자 이용율 증가.

2.2 연료의 주요사양 비교

웨스팅하우스형 16X16 연료는 현재 고리2호기에 사용중인 SFA연료만 개발되어 있는 상태이다. 따라서 16X16 개량 OFA연료의 피복관 지름, 소결체 지름 및 소결체 길이 등의 치수는 이미 개발되어 있는 17X17 OFA 연료의 치수[1]를 참조하였다. 본 계산에서 고려된 연료 형태는 현재 고리 2호기에 사용되고 있는 SFA형 그리고 앞서 2.1절에서 언급된 개량연료인 개량 SFA형 및 개량 OFA형 연료이다. 이 연료들의 주요사양은 표1.에서 보여주고 있다.

2.3 최적 평형노심 장전모형 선정

2.3.1 코드체계

- ALPHA[2]

  ALPHA 코드는 핵반응 단면적을 생산하는 PHOENIX-P 코드의 입력모델을 생산하고, PHOENIX-P에 의해 생산된 핵반응 단면적을 ANC 코드에서 사용할 수 있도록 편집해주는 기능을 가지는 연계 코드이다.

- PHOENIX-P[3]

  PHOENIX-P 코드는 2차원 다군 중성자 수송 코드로써 연료형태, 온도 및 연소도의 함수로 ANC에 제공할 핵반응 단면적을 생산한다.

- ANC[4]

ANC코드는 다차원 노심분석 코드로써 2차원 또는 3차원 계산이 가능하며, 노심의 반응도, 집합체의 평균출력 및 연료봉 출력분포, 집합체의 평균연소도 및 연료봉 연소도를 계산하는데 사용된다. 또한, 노심 연소계산, 제어봉가 계산, 반응도계수 계산등 노심핵설계 과정에 필요한 각종계산 및 사고관련 인자계산을 빠르고 편리하게 할 수 있도록 많은 자동화된 기능을 가지고 있다.

2.3.2 평형노심 장전모형 선정조건

평형노심이란 동일한 노심의 상태(농축도, 신연료 장전수, 주기 연소도, 장전모형등)가 여러주기 반복되어 이전주기와 출력분포, 연소도분포등이 동일한 평형상태에 이른 노심을 말한다. 16X16 개량연료의 형태 선정이라는 본 연구의 목적상 평가대상의 노심에 대한 경우의 수를 줄이고자 가연성 독봉은 120 inch 길이의 WABA(Wet Anular Burnable Absorber)로, 축방향 반사체는 노심의 상/하 6 inch 길이의 농축도 1.8w/o로 고정 시켰다. 그러나 가연성 독봉의 길이나 종류 그리고 축방향 반사체의 길이와 농축도등은 연료형태가 결정되면 경제성 및 안전성을 고려하여 최적 사양의 가연성 독봉과 축방향 반사체를 선정하는 연구가 필요하다. 평가대상의 장전모형은 개량 SFA연료와 개량 OFA연료 각각에 대해서 신연료 수가 48, 44 그리고 40개인 경우로 변경시켜 모두 6개의 장전모형을 선정하였으며 현재의 연료 사양과의 주기비 비교를 위하여 고리2호기 설계에 적용하고 있는 SFA 연료사양의 48개 신연료 수를 사용하는 참고장전모형을 선정 하였다. 공정한 주기비의 평가를 위하여 주기초 붕산수농도 및 농축도 한계를 고려하여 주기길이를 430.7 EFPD로 고정하고 이에 해당하는 농축도를 찾는 방법을 택하였다. 현재 고리 2호기의 주기길이는 약 380일 정도이다. 표2.는 장전모형 선정시 적용된 주요 설계 제한치 및 특성이다.

2.3.3 최적 평형노심 선정결과

앞 절의 조건에 따라 독립적인 최적의 장전모형이 탐색 되었으며, 각 장전모형의 핵 특성은 표3.에서 보여준다. 현재 연료 사양인 SFA연료의 참고 장전 모형은 노심의 중성자 누출율이 반경방향 첨두출력인자의 제한(1.435)으로 현재 수준을 유지한 경우이며 그장전 모형은 그림1.과 같다. 그리고 개량연료에 대한 장전 모형은 그 성능을 고려한 상승된 반경방향 첨두출력인자의 제한치(1.500)로 인해 모든 개량핵연료의 경우에 대해 노심외각에 신연료를 배치하지 않는 L^4P(Low Low Leakage Loading Pattern) 장전 모형의 선정이 가능 하였다. 참고로 그림2.는 48개의 신연료가 사용된 개량 OFA연료의 장전모형으로서 L^4P 장전모형의 예를 보여준다. 다음은 선정된 장전모형의 특성을 요약 하였다.

- 주기초 영출력 붕산수 농도 제한

  주기초 영출력 붕산수 농도는 개량 OFA연료 보다는 SFA연료의 제어가 노심내 우라늄 양의 차이로 인해 제어가 어려웠으며, 신연료 수가 많은 경우보다는 적은 경우가 가연성독봉의 사용량이 상대적으로 작아서 제어하기가 어려웠으며, 실제로 개량 SFA 연료의 경우 48개 신연료 장전의 경우만 만족 되었다. 이것은 붕산수 농도

제한치를 올리면 해결이 가능할 것이나 붕소의 용해능 또는 고농도의 붕산수의 경우 핵연료봉에 붕소가 석출되기 쉬운 문제점등을 고려하여 신중히 결정해야 할 것이다. 다른 해결 방법은, 현재 장전모형에 사용된 분리형 독봉은 그 사용량의 한계가 있기 때문에 주기초 붕산수농도의 제어능이 일체형 가연성 독봉보다 적다고 할 수 있다. 따라서 일체형 가연성 독봉을 사용한다면 어느 정도 해결될 것으로 본다. 그림 3.은 연료형태별 신연료 장전 수에 따른 주기초 영출력 붕산수농도의 추세를 보여준다.

- MTC 제한

  MTC제한치는 모든 경우의 장전모형이 만족 되었다. SFA연료가 OFA연료보다 제어가 용이 하였다.

- 반경방향 첨두출력인자 제한

  반경방향 첨두출력인자 제한치는 모든 경우의 장전모형이 만족 되었으며, 특히 개량형 연료의 경우 제한치의 상승으로 가장 경제적인 장전모형 유형인 L^4P 장전모형이 가능하였다. SFA연료가 OFA연료보다 반경방향 첨두출력인자의 제어가 용이 하였다. 그림4.는 연료형태별 신연료 장전 수에 따른 반경방향 첨두출력인자의 추세를 보여준다.

- 농축도 제한

  농축도 제한은 현재 신연료 및 사용후연료 저장고의 제한 농축도가 3.8w/o로 되어 있으며, 기존의 임계도해석[5] 결과를 보면 5.0w/o까지 문제없는 것으로 보고된 바 있다. 따라서 개량연료에 대해서 5.0w/o를 제한치로 가정하였다. 현재 연료 사양인 SFA연료의 경우 참고 장전모형의 농축도는 개량연료와의 주기비 비교를 위하여 제한하지 않았다. 결과를 보면 개량 OFA연료, 40개 신연료를 사용한 경우가 연료중심 영역의 농축도가 5.0w/o로 나타나 그보다 작은 수의 신연료 장전으로 430.7EFPD 이상의 주기길이는 불가능할 것으로 보인다.

- 장주기 가능성

  430.7EFPD 이상으로의 장주기 가능성은 주기초 붕산수농도의 제한으로 인해 분리형 가연성 독봉의 사용으로는 개량 SFA연료는 48개의 신연료 사용으로 약 437EFPD 가 한계인것으로 나타났으며, 신연료 수를 늘리거나 일체형 가연성 독봉의 사용 등으로 어느정도 주기길이를 늘리는 것이 가능할 것으로 보인다. 개량 OFA연료는 48개 신연료 사용으로 약 450EFPD 까지 주기길이가 가능한 것으로 평가되었다. 더 이상의 장주기 가능성은 앞서 언급한 SFA연료의 경우와 동일하며, 추가로 고려 되어야 할 것은 주기길이가 길어지면 노심의 집합체들의 연소도 격차가 심해져서 첨두출력인자의 제어가 어렵다는 점이다. 개량연료의 첨두출력인자 제한치는 이러한 사항을 고려하여 적합하게 결정되어야 할 것이다.

2.4 연료 주기비 평가

주기비 계산에 사용된 코드는 FUCO 코드로서 각 연료의 농축도, 주기길이 그리고 영역 평균 방출 연소도등을 입력으로 선행 및 후행 주기비를 평가한다. FUCO코드는 이미 연료의 주기비 계산을 위하여 여러 보고서[6]에서 사용되었으며 현재가(Present Worth) 개념을 이용하여 균등화 비용(Levelized Fuel Cycle Cost) 및 현재가 에너지를 계산하여 균등화 연료비(Levelized Fuel Cycle Cost)를 계산한다.

2.4.1 주기비 계산시 사용된 경제성관련 주요 입력변수

주기비 계산에 사용된 경제성관련 주요 입력변수는 표4.와 같으며 이 값들은 모든 계산 경우에 대해 공통으로 사용 되었다. 이 값들은 최근 단가를 적용했기 때문에 미래의 값들과는 약간의 차이가 있을 수 있으나 개량 SFA연료 및 OFA연료의 상대적인 주기비를 평가하는 현연구의 목적에는 부합된다고 판단된다.

2.4.2 주기비 계산 결과

주기비 계산은 2.3.2절에서 제시한 7가지 최적 평형노심 장전모형 선정 결과에 대해서 각각 평가 되었으며, 선행 및 선.후행 주기비를 별도로 평가하여 표5. 및 표6.에서 보여준다. 여기서 상대 주기비 및 주기비 이득은 현재의 SFA연료를 사용한 경우인 참고장전모형을 기준으로 하여 상대적인 비용으로 평가 되었다. 선행 주기비의 경우 개량 SFA연료 보다는 개량 OFA연료의 주기비 이득이 큰 것으로 나타났으며, 최대 40개 신연료를 사용하는 경우 개량 OFA연료가 개량 SFA연료보다 약 134만 달러의 이득이 있는 것으로 나타났다. 선.후행 핵주기를 모두 고려한 경우는 선행과 마찬가지로 개량 OFA연료의 주기비 이득이 개량 SFA연료보다 큰 것으로 나타났으며, 또한 선행 주기비의 경우보다 장전 신연료의 수가 적은 쪽이 상대적인 이득이 커지는 것으로 나타났다. 주기비에서 추가로 고려해야 하는 것은 개량연료의 가공비 증가이다. 그러나 현 계산에서는 반영하지않고 현 SFA연료의 가공비에 그비용을 증가시켜 그 손익분기점이 되는 개량연료 가공비를 평가하였으며, 선행주기비는 개량 SFA연료의 경우 현 SFA연료 가공비의 약 35%, OFA연료는 약 55%정도 증가한 값이 손익분기점으로 평가 되었다. 선.후행 주기비를 모두 고려한 경우는 그 손익분기점에 해당하는 가공비는 상당히 증가할 것으로 판단된다.

3. 결론

현재 웨스팅하우스형 원자력발전소의 주요 연료 형태인 SFA연료형과 OFA연료형을 대상으로 기계적 열적 성능이 우수한 연료로 개량한 개량 SFA연료와 OFA연료에 대해서 노심의 안전성 및 경제성의 주요 변수로 작용하는 첨두출력인자, 최대 봉연소도 그리고 농축도 등의 제한을 상향 조정하여 각 연료형태의 주기비를 평가하였다. SFA연료의 특성은 OFA연료에 비해 감속재온도계수 및 첨두출력인자의 제어가 용이하여 상대적으로 저누출 장전모형이 가능하며 이것은 경제성에 직결된다. OFA연료는 노심내의 감속재와 우라늄의 비를 최적화하여 중성자 이용율을 높인 연료이다. 이 두 연료형태의 주기비는 노심의 안전성 제한치

에 크게 영향을 받는다.

주기비 평가는 개량 SFA연료와 개량 OFA연료 각각에 대해서 신연료 수가 48, 44 그리고 40개인 경우 6개의 최적 평형노심 장전모형과 현재의 연료 사양과의 주기비 비교를 위하여 설계에 적용하고 있는 SFA 연료사양의 48개 신연료 수를 사용하는 참고장전모형에 대해서 수행되었다. 먼저 안전성 제한과 관련하여 평가하면, 일부 개량 SFA 연료의 주기초 붕산수 농도제한이 만족 되지 못한 것을 제외하면 모든 경우가 표2.의 안전성 제한치를 만족하는 것으로 나타났다. 개량 SFA연료의 경우, 약 430EFPD의 주기길이에서 48개 신연료를 장전하는 경우만이 주기초 붕산수 농도 제한을 만족시켰으며 이것은 붕산수 농도 제한치를 올리는 방법, 주기길이를 줄이는 방법 및 일체형 가연성독봉을 사용하는 방법 등으로 해결이 가능하다. 반면에 개량 OFA연료는 모든 경우가 안전성 제한 인자들을 만족시켰으나 40개 신연료 장전의 경우 농축도 제한치인 5.0w/o에 근접하였으며 첨두출력인자의 제어도 상당히 어려운 것으로 나타났다. 본 연구에서는 주기길이를 약 430EFPD로 고정시켰으나 그 이상의 장주기는 주기초 붕산수 농도의 제어 관점에서 일체형 가연성독봉의 사용이 불가피하며 개량 SFA연료보다는 개량 OFA연료가 유리한 것으로 평가되었다. 주기비 관점에서도 마찬가지로 개량 SFA연료보다는 개량 OFA연료가 경제적인 것으로 나타났으며, 신연료 장전수를 줄이고 농축도를 높인 경우가 경제적인 것으로 나타났다. 선행 주기비의 경우 개량 OFA연료가 SFA연료보다 최대 134만 달러의 이득이 있는 것으로 나타났다. 따라서 표2.에 보여준 안전성 제한치를 기준으로 개량 OFA연료가 개량 SFA연료보다 주기비 측면에서 우수하며, 약 430EFPD의 주기길이를 가정할 때 44개의 신연료 장전 수가 이상적인 것으로 나타났다.

추후로 개량연료에 대한 최적 BA형태, 축방향 반사체의 최적 농축도 등에 관한 연구가 필요하다.

References

1. Westinghouse, “Nuclear Design Design Manual, METCOM, Volume 2,” 1998.
2. Westinghouse, “Nuclear Design Computer Code Manual, ALPHA Code, Version 8.5.3,” 2000.
3. Westinghouse, “Nuclear Design Computer Code Manual, PHOENIX-P Code, Version 8.4.4,” 2000.
4. Westinghouse, “Nuclear Design Computer Code Manual, ANC Code, Version 8.6.1,” 2001.
5. 조희봉, “원자력2호기 핵연료저장시설의 최대수용가능 농축도 결정연구,” 84 N-S16, 한국전력공사, 1984.
6. 권태제, “WH형 핵연료의 축방향 반사체 평가,” KNF-TR-ND2-00001, 한전원자력연료㈜, 2000.

표1. 연료의 주요사양 비교

항 목	SFA	개량연료(SFA형)	개량연료(OFA형)
Clad OD(in)	0.374	0.374	0.360
Pellet OD(in)	0.3225	0.3225	0.3088
Pellet Length(in)	0.3870	0.3870	0.3700
Effective Dish(%)	1.2074	1.2074	1.2110
Clad Material	Zirc-4	ZIRLO	ZIRLO
Spacer Grids Material	Inc-718	ZIRLO	ZIRLO
IFM	N/A	ZIRLO	ZIRLO
Axial Blanket	N/A	T/B 6inch	T/B 6inch

표2. 각 연료의 주요 특성 및 설계 제한치

항 목	SFA	개량연료
BA	PYREX	WABA
Axial Blanket	N/A	T/B 6 in
주기길이(EFPD)	430.7	430.7
감속재온도계수(pcm/°F)	5	5
$F_{\Delta h}$ 제한치	1.435	1.500
농축도 제한(w/o)	3.8*	5.0
주기초 영출력 붕산수농도(ppm)	2300	2300
최대봉 연소도(MWD/MTU)	60,000	70,000

주) * 현재 농축도 제한은 3.8w/o이나 주기길이의 비교평가를 위해 제한하지 않음

표3. 평형노심 장전모형 핵특성 비교

항 목	**Case 1** SFA	**Case 2** 개량 SFA	**Case 3** 개량 OFA	**Case 4** 개량 SFA	**Case 5** 개량 OFA	**Case 6** 개량 SFA	**Case 7** 개량 OFA
신연료수	48	48	48	44	44	40	40
농축도(w/o)	4.25	4.192	4.325	4.439	4.615	4.761	5.001
Axial Blanket	N/A	1.8w/o, 6 in	1.8w/o, 6 in	1.8w/o, 6 in	1.8w/o, 6 in	1.8w/o, 6 in	1.8w/o, 6 in
BA 사양	PYREX 142 in	WABA 120 in	WABA 120 in	WABA 120 in	WABA 120 in	WABA 120 in	WABA 120 in
사용 BA 수	528	592	560	592	528	544	544
Core Uranium Loading(KgU)	50,055	50,055	45,880	50,055	45,880	50,055	45,880
주기 길이 (EFPD)	430.7	430.7	430.7	430.7	430.7	430.7	430.7
주기연소도 (MWD/MTU)	16,145	16,145	17,610	16,145	17,610	16,145	17,610
방출연소도 (MWD/MTU)	40,699	40,699	44,392	44,399	48,428	48,839	53,270
HZP BOC Cb (ppm)	2419	2313	2154	2426	2260	2496	2295
Peak Ass Bu (MWD/MTU)	51,913	50,951	55,213	55397	59344	61,058	62,627
Peak Rod Bu (MWD/MTU)	54,413	53,185	57,278	57806	61607	64,113	65,467
Max. $F_{\Delta H}$	1.414	1.465	1.477	1.495	1.499	1.491	1.499
HZP BOC MTC (pcm/°F)	-1.786	-2.561	0.761	-2.622	0.813	-3,448	-0.169
노심의 중성자 누출율	현재 수준 유지	L4P	L4P	L4P	L4P	L4P	L4P

표4. 경제성관련 주요입력변수

항목	입력자료
원광(U3O8 비)	31.40 $/kgU
변환비	5.80 $/kgU
농축비	99.20 $/SWU
가공비	233 $/kgU
이자율	9.4 %/yr
사용후연료 저장비	260 $/kgU
사용후연료 처리비	400 $/kgU
사용후연료 처리기간	10 year
PYREX 봉 단가	996 $/rod
WABA 봉 단가	1431 $/rod

표5. 선행 주기비 계산결과

항 목	**Case 1** SFA	**Case 2** 개량SFA	**Case 3** 개량OFA	**Case 4** 개량SFA	**Case 5** 개량OFA	**Case 6** 개량SFA	**Case 7** 개량 OFA
신연료수	48	48	48	44	44	40	40
농축도(w/o)	4.25	4.192	4.325	4.439	4.615	4.761	5.001
BA 사양	PYREX	WABA	WABA	WABA	WABA	WABA	WABA
사용 BA 수	528	592	560	592	528	544	544
U-Loading (kgU)	50,055	50,055	45,880	50,055	45,880	50,055	45,880
주기길이 (EFPD)	430.7	430.7	430.7	430.7	430.7	430.7	430.7
주기비 ($/MWh)	5.279	5.021	4.801	4.997	4.754	5.007	4.745
상대주기비 (%)	100	95.1	90.9	94.7	90.1	94.8	89.9
주기비 이득 ($10^3$$/주기)	-	1,419	2,571	1,533	2,790	1,470	2,813
OFA-SFA ($10^3$$/주기)	-	1,152		1,257		1,343	

표6. 선.후행 주기비 계산결과

항 목	**Case 1** SFA	**Case 2** 개량SFA	**Case 3** 개량OFA	**Case 4** 개량SFA	**Case 5** 개량OFA	**Case 6** 개량SFA	**Case 7** 개량 OFA
신연료수	48	48	48	44	44	40	40
농축도(w/o)	4.25	4.192	4.325	4.439	4.615	4.761	5.001
BA 사양	PYREX	WABA	WABA	WABA	WABA	WABA	WABA
사용 BA 수	528	592	560	592	528	544	544
U-Loading (kgU)	50,055	50,055	45,880	50,055	45,880	50,055	45,880
주기길이 (EFPD)	430.7	430.7	430.7	430.7	430.7	430.7	430.7
주기비 ($/MWh)	6.336	6.078	5.770	5.951	5.628	5.857	5.525
상대주기비 (%)	100	95.9	91.1	93.9	88.8	92.5	87.2
주기비 이득 ($10^3$$/주기)	-	1,425	3,046	2,088	3,736	2,554	4,213
OFA-SFA ($10^3$$/주기)	-	1,621		1,648		1,659	

	1	2	3	4	5	6	7
1	2X	1X	1X	F_{20}	1X	F_{16}	2X
2	1X	1X	1X	1X	F_{20}	F	2X
3	1X	1X	1X	F_{20}	1X	F	
4	F_{20}	1X	F_{20}	1X	F_{08}	2X	
5	1X	F_{20}	1X	F_{08}	2X		
6	F_{16}	F	F	2X			
7	2X	2X					

Note. F_{xx} – F : Feed Fuel, xx : # of PYREX rods

1X – Once Burnt Fuel

2X – Twice Burnt Fuel

그림1. 현재 SFA연료 48개 신연료 사용 1/4노심 참고장전모형

	1	2	3	4	5	6	7
1	2X	1X	1X	F_{20}	1X	F_{8}	2X
2	1X	1X	F_{20}	1X	F_{20}	F	2X
3	1X	F_{20}	1X	F_{16}	1X	1X	
4	F_{20}	1X	F_{16}	1X	F	2X	
5	1X	F_{20}	1X	F	2X		
6	F_{8}	F	1X	2X			
7	2X	2X					

Note. F_{xx} – F : Feed Fuel, xx : # of WABA rods

1X – Once Burnt Fuel

2X – Twice Burnt Fuel

그림2. 개량 OFA연료 48개 신연료 사용 1/4노심 장전모형

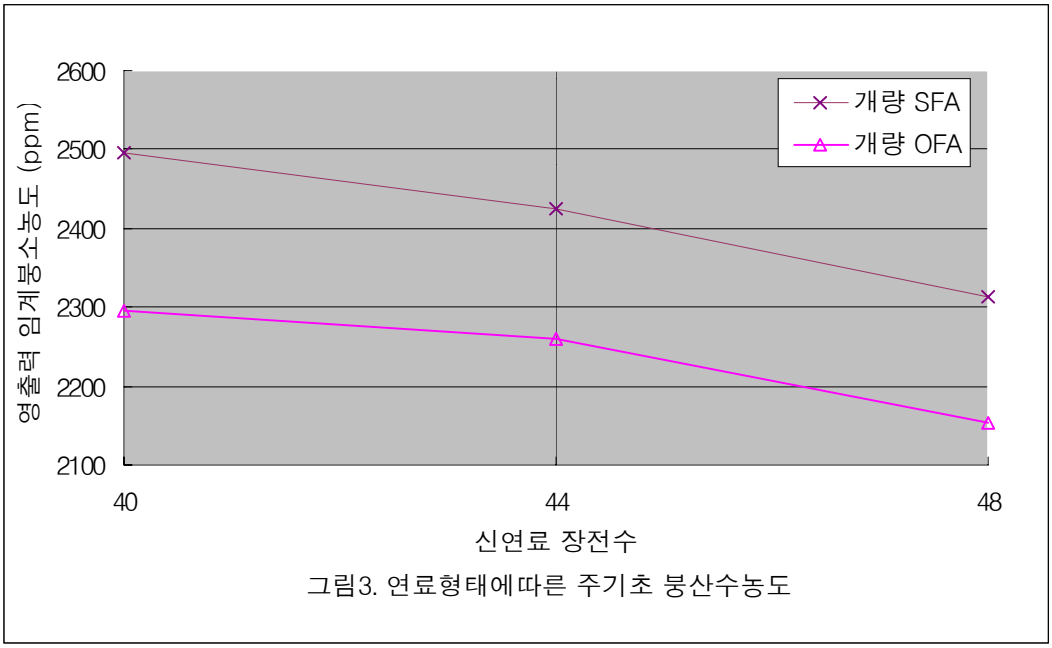

그림3. 연료형태에따른 주기초 붕산수농도

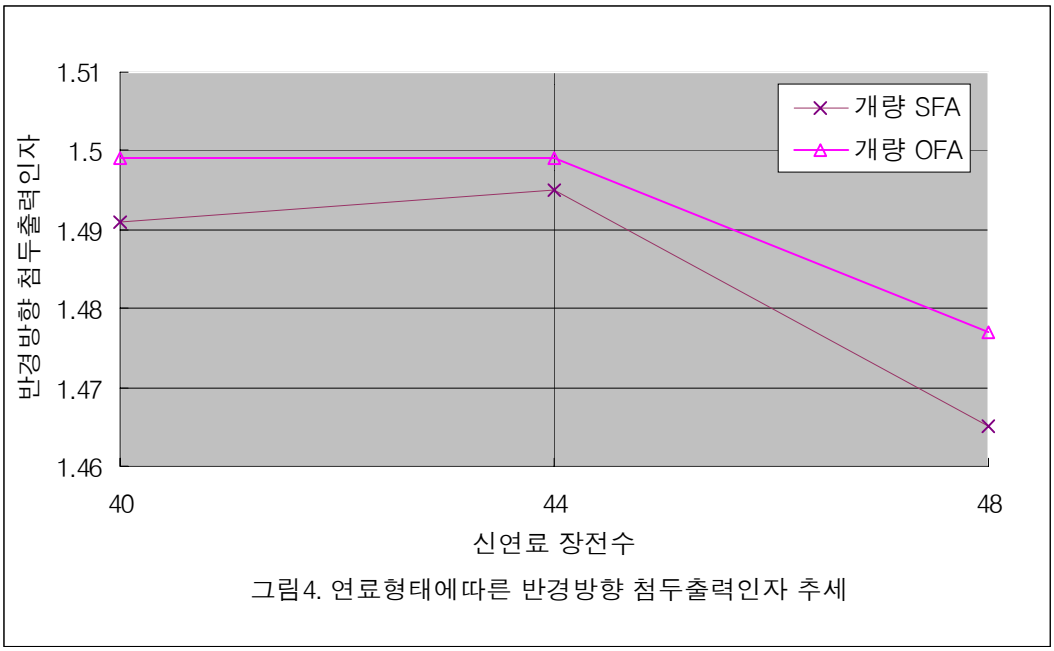

그림4. 연료형태에따른 반경방향 첨두출력인자 추세