

비균질 토륨장전 노심의 핵설계 최적화 방안 연구

A Study on the Nuclear Design Optimization for Heterogeneous Thorium Core

김관희, 김명현

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리

요 약

증식성에 최적화된 현재의 KTF 설계안을 기초로 증식성, 핵확산저항성, 방사성 독성의 여러 측면을 동시에 고려한 최적화 설계안을 찾기 위하여 변수해석을 수행하였다. 이번 변수해석에서 고려한 핵연료의 설계변수들은 핵연료의 종류, 핵연료봉의 크기, 핵연료의 농축도 및 함유량이다. 변수해석 결과는 크게 핵연료 종류별로 구별하였고 각 평가항목 별로 다시 나누어 평가하였다. 각 독립된 평가항목은 증식성에 FIR과 FEI, 핵확산저항성에 SNS와 TG, 방사성독성에 I_1 를 사용하였다. 독립된 평가 항목의 우열이 상이하게 다르기 때문에 쉽게 최상의 성능을 갖는 핵연료를 판별할 수 없었다. 그래서 종합적인 평가 지수 G-Value와 GPI를 도입하여 평가하였다. G-value에 적용된 가중치는 증식성에 0.6, 핵확산저항성에 0.3, 방사성독성에 0.1이다.

Abstract

Design optimization for KTF is sought for multiple objectives; high conversion for fuel cycle economics, high proliferation resistance, low production of high-level radioactive waste. A parameter study was repeated to cover all possible choices in PWR. Design parameters are fuel type, pin radius, enrichment and volume content of fuel in seed and blanket. As a first stage, characteristics of fuel material choices were evaluated. Among four options, choice of U/Zr alloy fuel for seed and UO_2+ThO_2 ceramic fuel for blanket is the best consistently. The second parametric study for V_m/V_f and enrichment showed many findings, most of them are consistent with physics. It is found that tendencies to each fuel cycle performance indices are contradict among themselves. In order to have an overall index to sort design options. Global index(G-Value,GPI) are calculated for cases in parametric studies.

1. 서 론

현재의 KTF는 핵연료 증식성(FIR)에 대해 최적화된 설계이다. 그러나 신형 핵연료에 대한 요구 사항은 시대에 따라 변하며 지금은 핵연료의 증식성보다는 환경친화적이면서 비핵확산에 유리한 핵연료에 관심을 보이고 있다. 이에 기존의 KTF 설계안을 환경친화적이고 비핵확산에 유리한 핵연료 설계로 보완, 수정 하고자 한다. 기존 변수해석 결과를 바탕으로 새롭게 고려될 사항과 평

가항목을 추가하여 최적화 설계를 위한 변수해석을 재수행하였다. 표 1은 토륨핵연료를 사용한 대표적인 핵연료 설계안의 설계변수들이다.

표 1 Fuel Assembly Parameters

| Parameter | SBU-Galperin Design | | WASB-MIT Design | | KTF-KHU Design | |
|-----------------------------|---|--|---|--|---------------------------------------|--|
| | Seed | Blanket | Seed | Blanket | Seed | Blanket |
| Fuel Assembly Size, cm | 21.4 | | 21.4 | | 21.522 | |
| Dimension, cm | 13.83 | 21.4 | 21.4 | 21.4 | 21.522 | 21.522 |
| Fuel Material Composition | U/Zr metal alloy U enrichment < 20% | (U+Th)O ₂ U volume fraction ~0.1 U enrichment < 20% | UO ₂ U enrichment ~ 20% | (U+Th)O ₂ U volume fraction ~0.1 U enrichment < 12% | U/Zr metal alloy U enrichment < 6% | (U+Th)O ₂ U volume fraction ~0.2 U enrichment < 10% |
| Number of Fuel Rods | 108 | 156 | 264 | 289 | 264 | 264 |
| Fuel Pellet Radius, cm | 0.0 - 0.20 (Zr filler) 0.20 - 0.385 (Fuel) | 0.4095 | 0.0 - 0.28 (Er ₂ O ₃) 0.28 - 0.377 (Fuel) | 0.4095 | 0.33 | 0.4025 |
| Gas Gap, cm | No | 0.0085 | 0.0082 | 0.0085 | No | 0.0085 |
| Cladding Thickness, cm | 0.03 | 0.057 | 0.03 | 0.057 | 0.006 | 0.0649 |
| Fuel Rod Radius, cm | 0.415 | 0.475 | 0.415 | 0.475 | 0.336 | 0.4759 |
| Fuel Cell Pitch, cm | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1.266 | 1.266 |
| Moderator/Fuel Volume Ratio | 3.32 | 1.67 | 5.46 | 1.24 | 3.81 | 1.86 |
| Core Volume Fraction | 41 | 59 | 50 | 50 | 25 | 75 |

기존의 토륨핵연료 설계인자들을 요약하여 살펴보면 표 2와 같다. 표 2에 있는 설계인자를 바탕으로 신 변수해석에 필요한 변수의 조합을 만들 수 있다. 조합을 만드는데 있어 대표적인 토륨 핵연료의 설계변수들을 포함하였고 수정이 요구되는 부분도 첨가하였다. 표 2에서 KTF 씨드 핵연료의 Cladding Thickness가 0.006 cm인데 이것은 핵연료 가공 가능성에 있어 의문을 제시하게 한다. 그래서 기존 KTF 설계안을 변경하고자 한다. 또한 KTF의 블랭킷 Fuel에서 Cladding Thickness가 0.0649 cm인데 다른 핵연료의 0.057 cm에 비해 두꺼운 편이다. 블랭킷의 Cladding Thickness로서 0.057 cm가 전체 연소도 동안 건전성을 유지할 수 있다면 0.0649 cm로 고집할 이유가 없다. 그래서 신 변수해석에서는 KTF의 블랭킷 Cladding Thickness를 0.057 cm로 하였다.

표 2 Thorium Fuel Design Parameters

| Seed vs Blanket | Seed | | | | Blanket | | | | | Fuel Cell Pitch [cm] |
|---------------------------------------|--|------------------------------------|--|---|---|---|-------------------------------------|---|---|---|
| | Seed Fuel Type | Seed Enri. [w/o] | Seed Fuel Radius [cm] | Vm/Vf | Blanket Fuel Type | Blanket Enri. [w/o] | Blanket U Content [v/o] | Blanket Fuel Radius [cm] | Vm/Vf | |
| 1:1 ^{bc} 1:3 ^a | UO ₂ ^c U/Zr ^{ab} | 6 ^a 20 ^{bc} | 0.336 ^a 0.377 ^c 0.385 ^b | 3.32 ^b 3.65 ^a 5.46 ^c | (U+Th) O ₂ ^{abc} | 10 ^a 12 ^c 20 ^b | 10 ^{bc} 20 ^a | 0.4759 ^a 0.4075 ^{bc} | 1.24 ^b 1.67 ^c 1.75 ^a | 1.2600 ^{bc} 1.2660 ^a |

^a KTF-Kyunghee Design

^b SBU-Galperin Design

^c WASB-MIT Design

2. KTF 변수해석 경향분석

그림 1에서 그림 5는 기존 KTF의 변수해석 계산결과를 정리한 것이다. 새롭게 변수해석을 하기 전에 이미 수행된 결과를 살펴봄으로서 신 변수해석의 방향을 잡고 결과 분석 작업에서 누락된 부분이 있는지를 살펴본다.

그림 1은 씨드의 농축도가 10 w/o이고 블랭킷의 우라늄 함유량이 10 v/o일 때의 씨드와 블랭킷 반경 변화에 따른 단위 집합체 모듈의 FIR를 나타낸 것으로 씨드 반경 변화(0.3300cm에서 0.3717cm로)에 따른 FIR의 변화량(0.8623에서 0.8819로)과 블랭킷의 반경 변화(0.4130cm에서 0.4543cm로)에 따른 FIR의 변화량(0.8819에서 0.9030로)이 0.0196과 0.0211로 거의 같다. 그림 2는 블랭킷의 우라늄 함유량이 20 v/o일 때의 씨드와 블랭킷 반경 변화에 따른 단위 집합체 모듈의 FIR를 나타낸 것으로 모든 Case에 대하여 그림 1보다 낮아졌다. 그러므로 FIR를 높이려면 블랭킷에 장전되는 초기 우라늄 양을 최소화하는 것이 필요하다. 씨드의 농축도를 10 w/o에서 13 w/o로 증가시킨 Case를 살펴보면 FIR이 거의 변화하지 않았다. FIR 관점에서 씨드의 농축도는 블랭킷에게 충분한 중성자를 공급해 주고 주기길이 동안 임계만을 유지시켜 주는 최소한의 농축도를 가지는 것이 좋다.

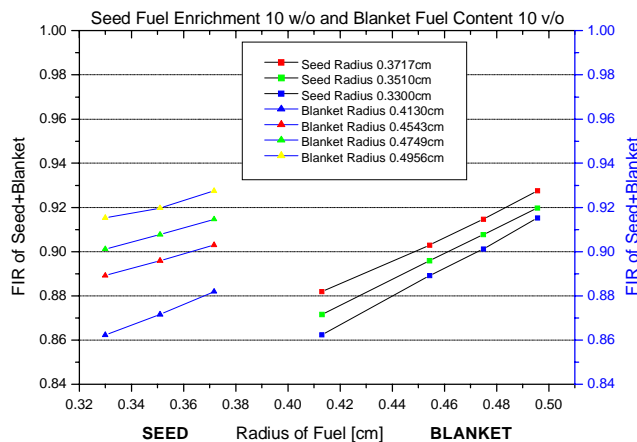


그림 1 FIR of Unit Module with Seed 10 w/o and Blanket 10 v/o

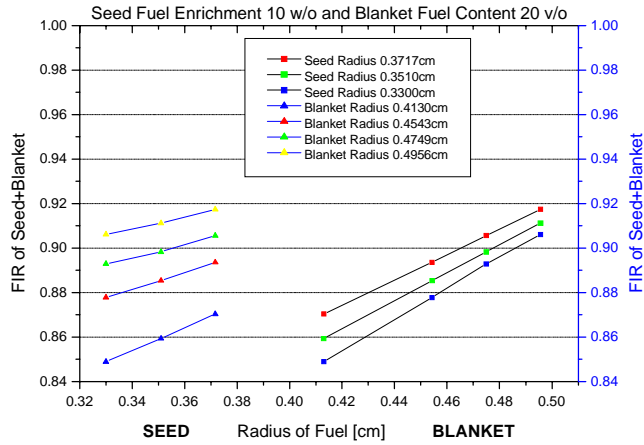


그림 2 FIR of Unit Module with Seed 10 w/o and Blanket 20 v/o

그림 3은 모든 경우의 수를 Moderator/Fuel Volume Ratio로 종합하여 나타낸 것이다.

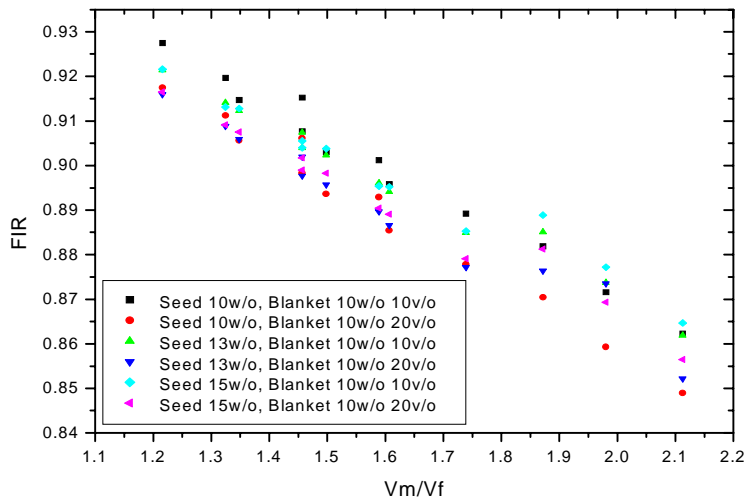


그림 3 Moderator/Fuel Volume Ratio에 따른 FIR

그림 4와 그림 5에서 알 수 있듯이 블랭킷 핵연료의 우라늄 함유량과 농축도 변화는 FIR 측면에서 영향이 적다. 반면 씨드 핵연료의 농축도 증가는 FIR 측면에서 유리하다.

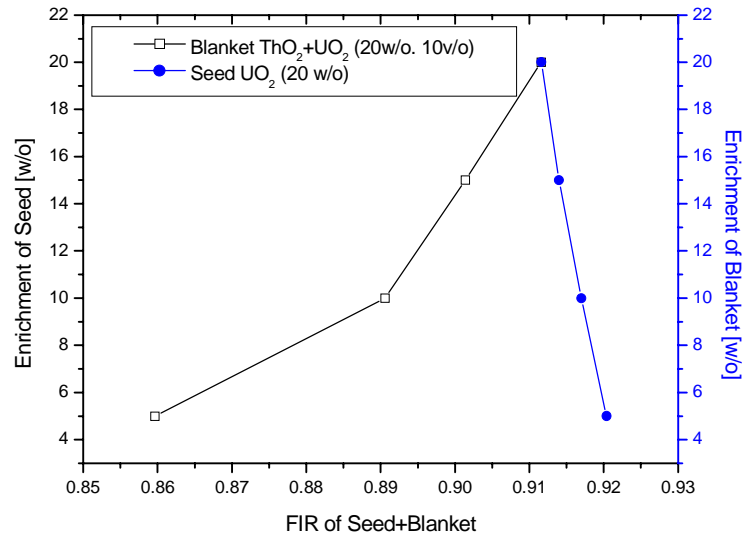


그림 4 FIR of Unit Module vs Uranium Enrichment

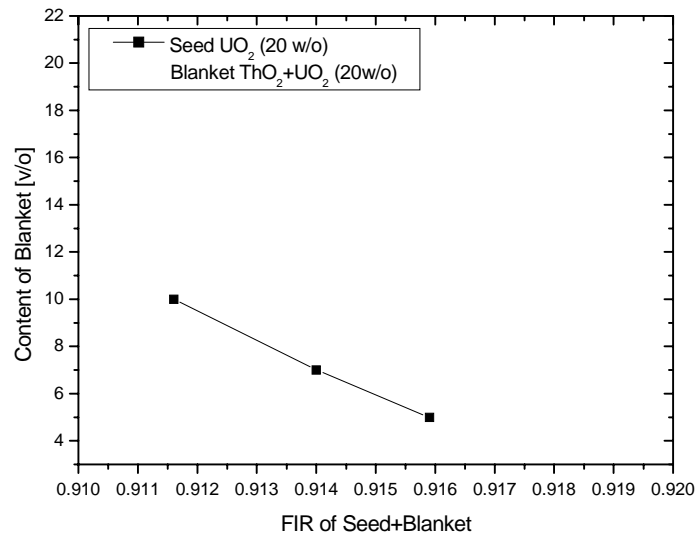


그림 5 FIR of Unit Module vs Uranium Content

3. KTF 최적화를 위한 신변수해석

씨드 핵연료 종류 변화에 따라 크게 나누고 V_m/V_f 변화(핵연료의 반경 변화), Fissile 함유량 변화(핵연료의 농축도 및 함유량)에 따라 각각 경우의 수를 정하였다. 경우의 수를 정하는 방법은 우일탁 학생이 기존 변수해석에서 사용한 방법을 선택하였으며 각 변수의 수치는 대표적인 토륨 핵연료의 수치를 택하였다. 이번 변수해석에서 고려되지 않는 설계변수는 표 3으로 정리하였다. Gas Gap과 Cladding Thickness는 SBU 및 WASB의 수치를 사용하였다.

표 3 신 변수해석에서 변경하지 않는 KTF의 설계변수

| Seed | | | Blanket | | |
|---------------|-------------------------|------------|---------------|-------------------------|------------|
| Gas Gap, [cm] | Cladding Thickness [cm] | Pitch [cm] | Gas Gap, [cm] | Cladding Thickness [cm] | Pitch [cm] |
| 0.0082 | 0.03 | 1.285 | 0.0085 | 0.057 | 1.285 |

변수해석을 위한 기하학적 모델은 단위 집합체 모듈 모형과 Cell 모형을 고려할 수 있다. 그림 6과 그림 7은 각각의 모형을 보인 것이다. 두 가지 모형은 장단점을 가지고 있다. Cell 모형으로 변수해석을 수행하면 단위 집합체 모듈 모형으로 계산하는 것보다 계산 시간이 상당히 절약되고 결과 분석을 위한 자료 정리에도 수월하다. 그러나 단위 집합체 모듈 단위로 계산한 결과에 비해 신뢰도가 떨어지고 씨드와 블랭킷간의 Flux 불균형을 고려하지 않은 계산이 된다. 반면, 집합체 모듈 단위 계산은 Cell 모형에 비해 계산 시간은 상당히 오래 걸리지만 모델 그대로를 묘사한 것이므로 근사 묘사로 인한 계산 값의 오류를 보이지 않을 것이다.

Cell 단위 계산을 위한 모델 설정은 다음과 같다. Pitch(V_m/V_f)는 Guide tube를 포함했을 때의 Equivalent pitch를 사용하였고 냉각재 조성은 Grid 및 불순물의 조성까지 고려하여 기하학적 효과를 최소화하였다. 또한 HELIOS 코드를 실행하는데 있어서는 정밀한 계산을 위하여 Sun Mesh와 Resonance Option은 “8”을 사용하였다. 집합체 모듈 단위는 계산 시간의 절약을 위해 최소한의 그림 8과 같은 단위 집합체 모듈을 설정하였고 Mesh는 단순화하였다. Guide tube는 차세대 원전(APR1400)의 Guide tube와 동일하게 사용하였다.

이번 변수해석에서는 집합체 모듈 모형을 계산 모델로 선정하여 계산을 실행하였다. 변수해석을 위한 핵연료 Type은 씨드 핵연료는 U/Zr과 UO_2 를 블랭킷 핵연료는 $(U+Th)O_2$ 와 $UCO+ThCO$ 를 각각 선정하였다. 가연성독봉 선정 및 설계는 핵연료의 조성 및 크기가 결정된 다음 출력분포를 고르게 할 때 수행할 것이다.

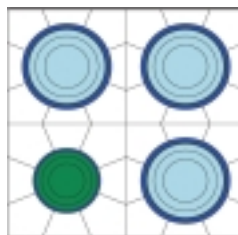


그림 6 Cell 모형

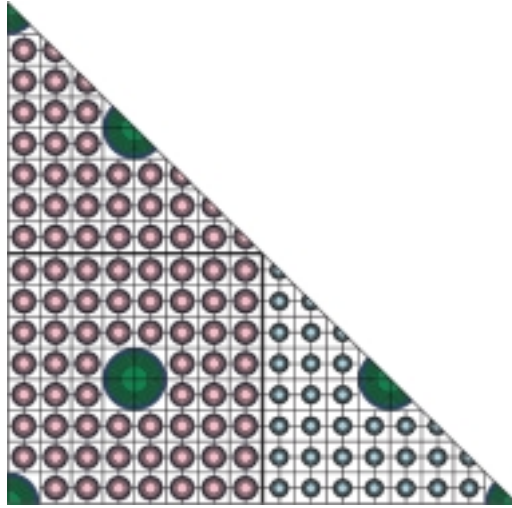


그림 7 Assembly Module 모형

단위 집합체 모듈 모형에 사용된 각 설계 변수는 차세대원자로 APR1400의 수치를 사용하였다. 표 4와 표 5는 APR1400의 설계 변수를 나타낸 것이다.

표 4 APR1400 Mechanical Design Parameters

| Core Arrangement | |
|---|-------------------------------|
| Number of fuel assemblies in core, total ^a | 241 |
| Spacing between fuel assemblies, fuel rod surface to surface inches (cm) ^a | 0.208 (0.528) |
| Fuel Assemblies | |
| Fuel Rod Pitch, inches (cm) ^a | 0.506 (1.285) |
| Fuel Rod Array ^a | square, 16 x 16 |
| Outside dimensions ^a | |
| Fuel rod to fuel rod, inches(cm) ^a | 7.972 x 7.972 (20.25 x 20.25) |
| Guide I.D (cm) ^a | 1.143 |
| Guide O.D (cm) ^a | 1.2446 |

^a KNGR SSAR

표 5 APR1400 Thermal and Hydraulic Parameters

| Core Average Characteristics at Full Power | |
|---|----------|
| Total core heat output, MWt ^a | 3,983 |
| Reactor inlet coolant temperature, F(°C) ^a | 555(291) |
| Reactor outlet coolant temperature, F(°C) ^a | 615(324) |
| Core exit average coolant temperature, F(°C) ^a | 617(325) |
| Power density, kW/liter ^a | 100.5 |

^a KNGR SSAR

이미 앞에서 구 변수해석에 대한 경향 분석을 하였고 그 결과 신 변수해석에 대한 예상 결과를 유추할 수 있다. 이를 이용하여 변수해석 Case에서 우선 수행 Case를 선정하였다. 우선 수행 Case는 3장의 그래프에 적용할 때 시작점과 끝점에 해당하는 Case로 모든 변화가 선행적으로 변한다고 가정하면 중간 Case를 구하지 않고도 경향을 분석할 수 있다.

4. 변수해석 결과 분석

그림 8에서 그림 11은 신 변수해석 결과를 요약한 그림이다. 그림 8에서 보면, 씨드가 UZr일 때 FIR이 높게 평가되었다. 두가지 블랭킷 타입 중에는 (U+Th)O₂일 때 Vm/Vf가 작을 때 핵연료의 증식성이 더 높았다. SNS 측면에서 평가를 하면 FIR과 반대의 경향을 보인다. 증식성은 플루토늄의 조성 중 Pu-239,241이 높은 비중을 차지하면 높게 나타난다. 그러나 SNS는 플루토늄의 조성 중 Pu-238,240의 비율이 높으면 핵확산 저항성에 유리한 입장을 보이기 때문이다.

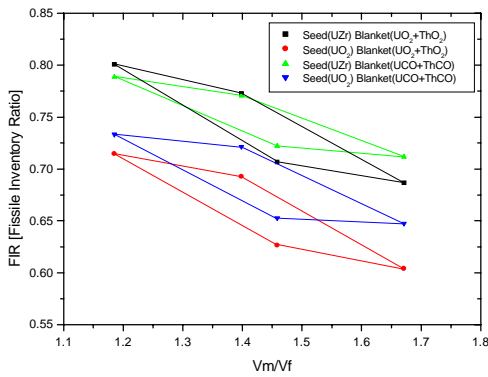


그림 8 FIR value

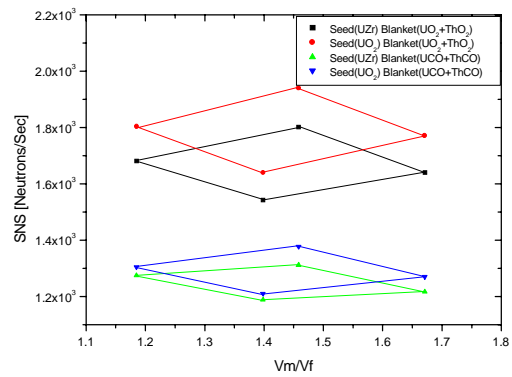


그림 9 SNS value

그림 10의 TG 경우는 SNS와 같은 경향을 보인다. 플루토늄의 조성 중 주로 열을 발생시키는 핵종이 Pu-238,240이기 때문에 그래프의 경향이나 핵연료 타입에 따른 우열도 같게 보인다. 그림 11의 방사성독성에 있어서는 씨드가 UZr일 때 가장 우수한 성질을 보인다.

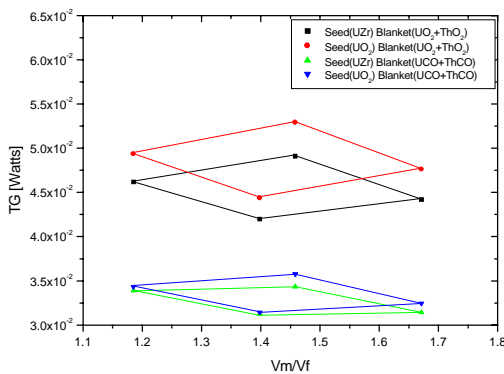


그림 10 TG value

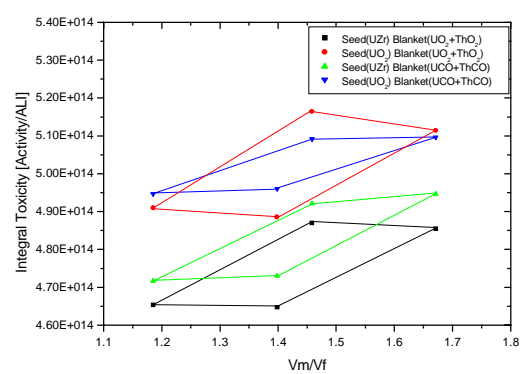


그림 11 Integral Toxicity

그림 8의 FIR 지수는 사용후 핵연료의 핵분열성 물질 총 양만을 고려한 지수이다. 그러나 일회성 핵연료 주기를 사용하는 경우에는 핵연료의 경제적 사용이라는 측면을 살펴 볼 수 없다. 그래서 FEI(Fissile Economic Index)를 도입하여 씨드가 UZr이고 블랭킷이 (U+Th)O₂인 핵연료 타입에 대해 재평가하였다. FEI 지수의 결과는 FIR의 경향과 정반대의 결과를 산출하였다. FIR은 초

기 장전되는 핵연료 양이 많으면 주기말 방출되는 즉, 남아있는 잔존양이 많기 때문에 FIR 지수치가 높게 나온다. 그러나 FEI는 핵연료의 경제적 사용이라는 측면을 평가하는 지수이기 때문에 초기 장전되는 핵연료의 양도 작아야 되고 주기말 잔존하는 핵연료의 양도 작아야 높게 평가된다. 그림 12는 FEI 지수를 보인 것으로 그림 8의 FIR 지수와 대조를 이룬다.

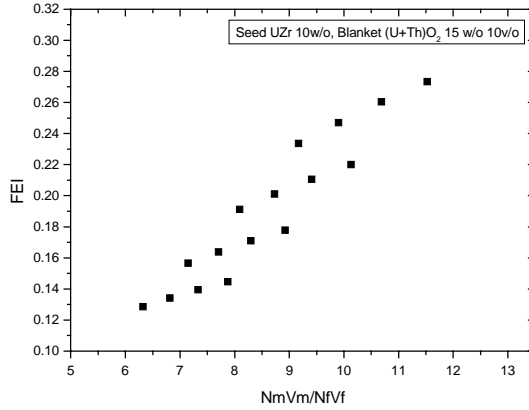


그림 12 Fissile Economic Index Value

위에서 평가한 지수들은 각 독립된 평가항목에 대해서 개별적으로 평가한 것이다. 그러나 핵연료의 특성은 다양한 성능 평가 지수로 평가할 수 있다. 성능 평가 항목은 그림 13과 같이 여러 항목으로 분류할 수 있고 각 항목에 대해서도 각각 독립된 평가를 수행할 수 있다. 핵연료를 선택하고 채택하는 과정에서 특정 항목에서만 우수한 것을 선택할 수는 있다. 그러나 복합적으로 우수한 성능을 가지는 핵연료를 선택할 때는 문제가 발생한다. 각각 독립된 평가 항목의 우열이 상이하게 다르기 때문에 쉽게 최상의 성능을 갖는 핵연료를 판별할 수 없다. 그러면 각 독립된 평가 항목을 어떻게 합성하여 종합적인 평가를 할 것인가? 이를 해결하기 위해 종합평가지수(Global Performance Index)를 도입하였다. 종합평가지수는 다음과 같은 두 가지 방법에 의하여 계산할 수 있다. 첫 번째, 각 독립된 평가 항목에 특정 가중치를 가중하여 합산하는 방법이 있다. 두 번째, 각 독립된 평가 항목을 주어진 범위 내에서 표준화(Normalized)하는 방법이 있다.

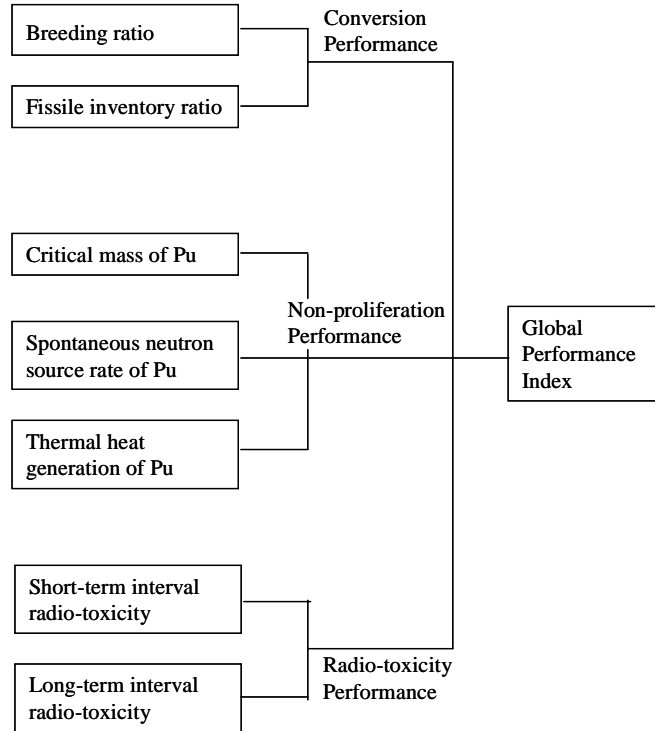


그림 13 핵연료 성능 평가 항목

단일 평가 항목이 아닌 복합적인 요소로 구성된 핵연료 성능 평가 항목을 동시에 고려하기 위해서는 종합 평가 지수의 개발이 필연적이다. 어떤 평가 대상이 되는 핵연료가 모든 성능 평가 항목에서 일관성 있게 다른 대상보다 우성의 성질을 보인다면 종합 평가 지수는 필요 없을 것이다. 그러나 대부분의 경우 성능 평가 항목에서 일관성 있게 성능의 우열을 보이지 않고 항목마다 차이를 보인다. 예를 들어, 그림 14처럼 6가지 평가 항목에 대하여 Case 1과 Case 2의 우수성이 각기 다르다면 종합적으로 우수한 Case를 Case 1과 Case 2 중 선택하기가 쉽지 않다. 그러므로 여러 평가 대상 중에서 한가지를 선정하거나 채택할 경우에는 종합 평가 지수가 필요하다.

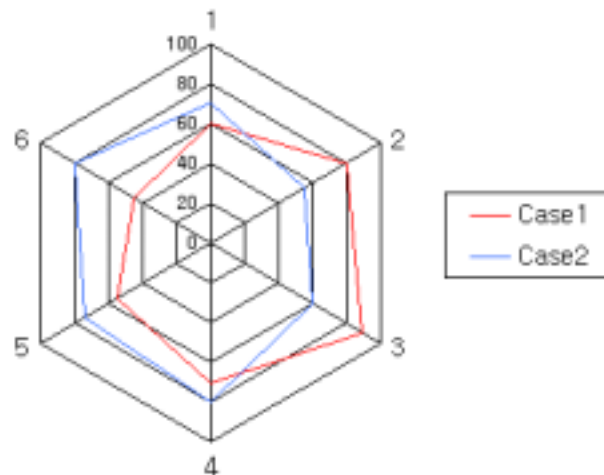


그림 14 복합 평가 항목에 따른 우열의 차이

5. 종합 평가 지수 적용

가중치를 적용한 종합평가지수 G-value의 정의 및 식은 아래와 같다. G-value는 각 평가 항목의 지수 값을 기준이 되는 특정 핵연료의 지수 값과 비교한 상대값에 가중치를 곱함으로써 얻는다. 가중치는 각 평가 항목에 따라 다르다. 또한 가중치는 평가자의 평가 방향에 따라 조절할 수 있다. 예를 들어, 핵연료의 증식성, 핵확산저항성, 방사성 위해도에 각각 0.6, 0.2, 0.1, 0.1을 적용할 수 있다. 이는 평가자의 평가 의도 및 사회적 여건에 따라서 변경 조절할 수 있다.

$$G\text{-value} = \sum_i W_i \left[\frac{f_i - f_{i0}}{f_{i0}} \right]$$

여기서 W_i = weighting factor of index type i ,
 f_i = value of index type i ,
 f_{i0} = base value of index type i

가중치를 적용한 종합평가지수 G-value는 각 평가 항목에 적용되는 가중치의 객관성 및 타당성을 유지하기 위해서는 합리적인 가중치 평가가 필수적으로 필요하다. 또한 사회적, 경제적 환경에 따라 가중치가 여러 가지 형태로 평가될 수 있고 적용될 수 있다.

표준화를 적용한 종합평가지수 (Global Performance Index, GPI)는 표 6의 각 평가 항목에 대하여 각 지수 값의 범위를 한정하여 정하고 지정된 범위의 시작과 끝을 0에서 100까지의 구간으로 나누어서 평가하고 이들 평가 항목을 합산하여 전체 점수를 구한 것이다. 예를 들어, 표 2의 평가 항목이 7개이므로 모든 평가 항목에서 100점을 받으면 총점이 700점이고 GPI는 총점을 7로 나눈 100이 되는 것이다.

각 평가 항목의 변수의 범위 결정은 그 지수가 가질 수 있는 최하의 값과 최상의 값을 고려하면 된다. 지수가 가질 수 있는 값의 범위가 없거나 정할 수 없는 경우에는 통상적으로 지수가 가질 수 있는 값의 범위를 고려한다.

표 6 GPI을 위한 선별 평가 항목

| Property | Index | Unit | Range of variability |
|--|----------------|--------------------|----------------------|
| Overall fissile inventory ratio | FIR | - | 0.5~1.5 |
| Critical mass of Pu from spent fuel | BCM | kg | 10.0~20.0 |
| Spontaneous neutron source rate of Pu from spent fuel | SNS | Mbq/kg | 1.0~2.0 |
| Thermal heat generation of Pu from spent fuel | TG | W/kg | 2.0~100.0 |
| Short-term integral radio-toxicity of Actinide from spent fuel | I _S | tera(Activity/ALI) | 12.0~14.0 |
| Long-term integral radio-toxicity of Actinide from spent fuel | I _L | tera(Activity/ALI) | 13.0~15.0 |

그림 15에서 G-value에 적용된 가중치는 증식성에 0.6, 핵확산저항성에 0.3, 방사성독성에 0.1이다. 가중치가 증식성에 큰 비중을 되었기 때문에 G-value는 FIR 특성 그림과 같은 경향을 보인다. G-value에 의해 선택된 최상의 case는 씨드와 블랭킷 반경이 제일 큰 경우가 선택되었다. 반면 GPI에 의해 선택된 최상의 case는 씨드의 반경이 가장 작고 블랭킷 반경이 제일 큰 경우가 선택되었다. GPI의 지수치는 그림 16과 같다. 그림 15의 G-Value와는 다른 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

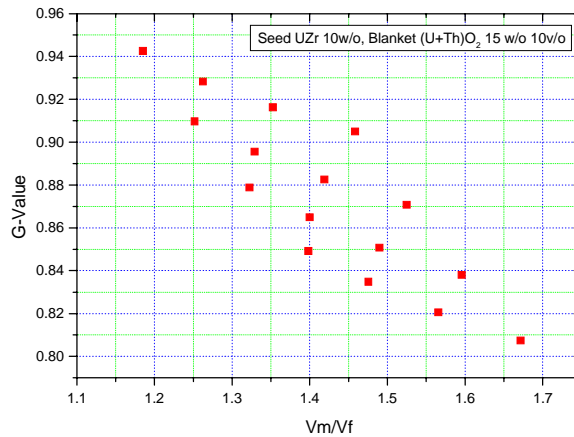


그림 15 G-Value

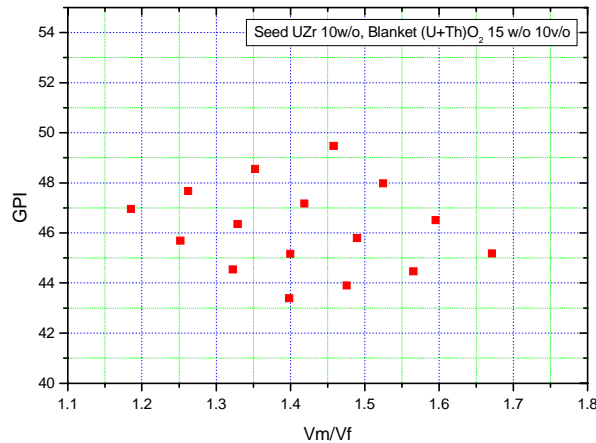


그림 16 Global Performance Index Value(GPI)

6. 결론

기존 KTF 변수해석 결과를 바탕으로 새롭게 고려될 사항과 평가항목을 추가하여 최적화 설계를 위한 변수해석을 재수행하였다. 수행한 결과를 평가하기 위하여 각 평가 항목에 따른 특정 지수를 사용하여 평가하였고 이를 종합적으로 평가하는 방법을 도입하였다. 각 독립된 평가 항목별로 보면 씨드가 UZr일때 FIR은 높게 평가되었고 두가지 블랭킷 타입 중에는 (U+Th)O₂일 때 Vm/Vf가 작을 때 핵연료의 증식성이 더 높았다. SNS 측면에서 평가를 하면 FIR과 반대의 경향

을 보인다. TG 경우는 SNS와 같은 경향을 보인다. 플루토늄의 조성 중 주로 열을 발생시키는 핵종이 Pu-238,240이기 때문에 그래프의 경향이나 핵연료 타입에 따른 우열도 같게 보인다. 방사성 독성에 있어서는 씨드가 UZr일 때 가장 우수한 성질을 보인다. FEI(Fissile Economic Index)를 도입하여 핵연료의 경제적 사용이라는 측면을 살펴 보았다. FEI 지수의 결과는 FIR의 경향과 정반대의 결과를 보였다.

독립된 평가 항목에 대한 지수 평가로는 최적의 핵연료를 선정하는데 어려움을 준다. 각각 독립된 평가 항목의 우열이 상이하게 다르기 때문에 쉽게 최상의 성능을 갖는 핵연료를 판별할 수 없다. 그래서 종합적인 평가 지수 G-Value와 GPI를 도입하여 평가하였다. G-value에 적용된 가중치는 증식성에 0.6, 핵확산저항성에 0.3, 방사성독성에 0.1이다. 가중치가 증식성에 큰 비중을 되었기 때문에 G-value는 FIR 특성 그림과 같은 경향을 보인다. G-value에 의해 선택된 최상의 case는 씨드와 블랭킷 반경이 제일 큰 경우가 선택되었다. 반면 GPI에 의해 선택된 최상의 case는 씨드의 반경이 가장 작고 블랭킷 반경이 제일 큰 경우가 선택되었다.

참고 문헌

1. 김관희, 김명현 “토륨 핵주기를 이용하는 고전환 압력관형 경수로에 대한 핵주기 특성” 2000 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000
2. Kim, K.H., Kim, M.H. "Performance Evaluation of High-Conversion Thorium Fuels for PWR Application" Proc. ANS/ENS Int. Mtg. Washington DC, U.S.A, 2000
3. Kim, M.H., Woo, I.T. "Once-Through Thorium Fuel Cycle Options for the Advanced PWR Core", Proc. ANS Int. Top. Mtg. on Advances in Reactor Physics, Pittsburgh, PA, USA, XV.C.3, 1-11, 2000
4. Maurizio Fiorini, Giancarlo Barbiroli "A Global Performance index to Assess the Quality of Elastomres", Polymer Testing, 19, 967-973, 2000