

MOX형가압경수로의 로심연소계산

허일문, 서철, 채정숙

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리는 현실발전의 요구에 맞게 나라의 과학기술을 빨리 발전시켜야 하겠습니다.》

(《김정일선집》 증보판 제11권 134페이지)

최근 폐연료속의 플루토늄을 추출하여 $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ 의 혼합산화물(MOX)형태로 경수로연료로 리용하기 위한 연구가 활발히 진행되고있으며 이미 세계 여러 나라들에서 수십개의 경수로들이 MOX연료를 사용하고있다. 현재까지 개별적인 MOX연료집합체들과 그것을 포함한 경수로 로심의 로물리적특성에 대한 연구결과[2-5]들이 발표되었으나 로심 전체가 MOX연료집합체들로 구성된 가압경수로의 3차원연소계산결과에 대하여 구체적으로 소개된것이 없다.

본문에서는 가압경수로물리계산체계 《부흥》[1]을 리용하여 MOX연료를 장입한 가압경수로의 3차원연소계산을 진행하고 UO_2 연료를 리용한 기존가압경수로에 대한 계산결과와 비교하였다.

1. 로심의 주요정수들

계산대상으로 삼은 전기출력이 900MW인 MOX형가압경수로와 대비계산에 리용된 같은 출력의 기존PWR로심의 연료집합체배치구조와 주요정수들을 그림 1과 표 1에 주었다.

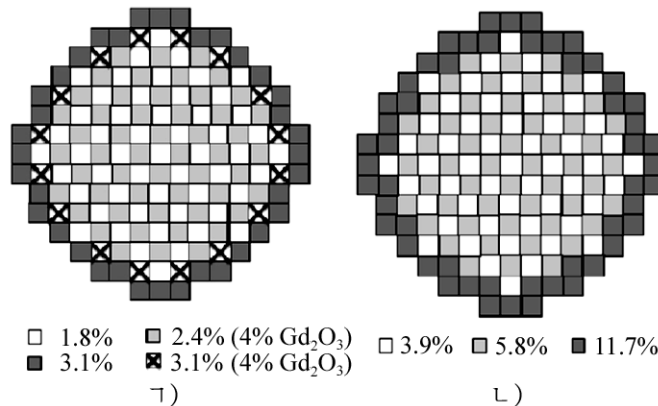


그림 1. 계산대상으로 삼은 연료집합체의 구조[5, 6]

1) UO_2 로심, 2) MOX로심

그림 1에서 보는바와 같이 두 로심은 다같이 157개의 정방형연료집합체로 이루어져있으며 매 집합체의 289개 세포중 264개는 연료봉세포이고 나머지는 안내관 또는 연소흡수체세포이다.

기존 PWR로심은 농축도와 연소흡수체의 유무에 따라 구별되는 4가지 종류의 UO_2 연

료집합체로 되어있으며 그중 연료농축도가 1.8%인 집합체는 53개, 농축도가 2.4%이고 그 안에 16개의 4% Gd_2O_3 연소흡수체세포를 포함한 집합체가 52개, 농축도가 3.1%이고 연소흡수체가 들어있지 않는것이 36개이며 농축도가 3.1%이고 연소흡수체가 들어있는 집합체가 16개이다.

표 1. 900MW_e가압경수로의 주요정수[5, 6]

| 로심 | | 연료봉세포 | | 조종봉안내관(물봉) 세포 | |
|-----------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|--------|
| 열출력 | 2 895MW | 세포걸음 | 1.265cm | 재 료 | 지르칼로이 |
| 비출력 | 40MW/t | 연료알심재료 | UO ₂ , MOX | 내 경 | 2.25cm |
| 압력 | 15.5MPa | 밀 도 | 10.4g/cm ³ | 외 경 | 2.41cm |
| 열매입구/출구온도 | 293°C/327°C | UO ₂ 연료의 농축도 | 1.8%, 2.4%, 3.1% | | |
| 평균선출력밀도 | 186W/cm | MOX연료의 Pu부화도 | 3.9%, 5.8%, 11.7% | | |
| 로심류량 | 13 323kg/s | 알심직경 | 0.819cm | | |
| 높이 | 360cm | 외피재료 | 지르칼로이 | | |
| 연료집합체수 | 157개 | 밀 도 | 6.55g/cm ³ | | |
| 연료집합체종류 | UO ₂ 로심 4, MOX로심 3 | 외 경 | 0.95cm | | |
| 집합체걸음 | 21.51cm | 내 경 | 0.836cm | | |
| 세포배열형식 | 17×17정방형 | 열매(랭각재) | H ₂ O | | |

한편 MOX로심은 Pu부화도가 3.9, 5.8, 11.7%인 세가지 연료집합체로 되어있으며 연소흡수체의 반응도보상효과가 매우 약하므로 Gd_2O_3 을 쓰지 않는것으로 하였다.

MOX로심에서 Pu의 동위원소조성은 표 2와 같다.

표 2. MOX연료에서 Pu의 동위원소조성 [5]

| 동위원소 | ²³⁸ Pu | ²³⁹ Pu | ²⁴⁰ Pu | ²⁴¹ Pu | ²⁴² Pu | ²⁴¹ Am |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 함량/% | 1.9 | 57.5 | 23.3 | 10.0 | 5.4 | 1.9 |

2. MOX형경수로 로심의 3차원연소계산결과

연소전에 감속재속에 붕소가 포함되지 않은 조건에서 MOX로심과 UO₂로심의 연료온도결수(도플러결수)와 감속재온도결수 및 붕소가치에 대한 계산결과는 표 3과 같다.

표 3. MOX로심과 UO₂로심의 연료온도결수와 감속재온도결수 및 붕소가치

| 연료온도결수/K | | 감속재온도결수/K | | 붕소가치/% | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| MOX | UO ₂ | MOX | UO ₂ | MOX | UO ₂ |
| $-2.74 \cdot 10^{-5}$ | $-2.34 \cdot 10^{-5}$ | $-6.18 \cdot 10^{-4}$ | $-4.07 \cdot 10^{-4}$ | $-2.71 \cdot 10^{-5}$ | $-7.13 \cdot 10^{-5}$ |

표 3에서 보는바와 같이 MOX로심과 UO₂로심의 연료온도결수(도플러결수)와 감속재온도결수는 다같이 -값을 가지므로 고유안전성이 담보된다. 절대값에 있어서는 MOX연료가 UO₂연료에 비해 두 온도결수값이 각각 더 크다. 그것은 MOX연료에 포함되어있는 주요공명핵종인 ²⁴⁰Pu의 공명 흡수차름면적이 ²³⁸U보다 훨씬 크기때문이다.

한편 MOX로심의 붕소가치(단위붕소농도변화에 의한 반응도변화)는 UO_2 로심보다 훨씬 작다. 그것은 열에너기대역에서 MOX연료의 중성자흡수자름면적이 UO_2 연료에 비해 훨씬 크기때문에 전체 중성자중에서 열중성자의 상대몫이 UO_2 로심보다 작으므로 붕소에서 열중성자흡수에 의한 반응도감소효과가 상대적으로 작기때문이다.

표 4에 연소전의 각이한 상태에서 로심의 유효증식결수와 림계붕소농도값에 대한 계산결과를 주었다. 표 4에서 보는바와 같이 평상태에서 MOX로심의 유효증식결수가 UO_2 연료를 쓰는 기준가압경수로로심에서보다 크지만 연료온도결수와 감속재온도결수가 각각 UO_2 로심보다 더 크기때문에 평상태로부터 열상태, 령출력을 거쳐 열상태, 만출력에 이르면서 유효증식결수가 오히려 작아진다.

표 4. 각이한 상태에서 로심의 유효증식결수와 림계붕소농도

| 상 태 | 유효증식결수 | | 림계붕소농도 $(\cdot 10^{-4}\%)$ | |
|-----------|-----------|-----------|----------------------------|-------|
| | 표준PWR | MOX로심 | 표준PWR | MOX로심 |
| 평 상태 | 1.205 380 | 1.228 952 | 1 213 | 3 618 |
| 열 상태, 령출력 | 1.136 227 | 1.143 586 | 1 067 | 3 422 |
| 열 상태, 만출력 | 1.109 993 | 1.103 685 | 913 | 2 810 |

한편 림계붕소농도값을 보면 UO_2 로심에서는 평상태에서도 원자로의 고유안전성과 관련하여 설정된 한계인 $1.3 \cdot 10^{-1}\%$ 를 초과하지 않지만 MOX로심에서 림계붕소농도값은 $3.6 \cdot 10^{-1}\%$ 에 달한다. 그러나 표 3에서 보는바와 같이 MOX로심에서 붕소가치가 UO_2 로심보다 거의 1/3정도로 작기때문에 이러한 높은 붕소농도조건에서도 감속재온도결수가 여전히 부의 값을 유지하며 고유안전성이 담보된다.

또한 두 로심에서 로심수명 즉 유효만출력일수를 비교해보면 UO_2 로심에서는 331.5일 ($13\,260\text{ MW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$), MOX로심에서는 287일($11\,482\text{ MW} \cdot \text{d} \cdot \text{t}^{-1}$)로서 MOX로심이 더 작다.

다음으로 연소도(출력운영일수)에 따르는 림계붕소농도(로심의 여유반응도를 보상하여 림계로 되게 하는데 필요한 령각재속의 붕소함량)의 변화를 보면 두 로심에서 현저한 차이를 가져온다.(그림 2와 3) 즉 평형Xe해독이후 UO_2 로심에서는 Gd이 연료보다 훨씬 빨리 연소되면서 일정한 기간 림계붕소농도가 증가하다가 다시 감소하지만 MOX로심에서는 단조감소한다.

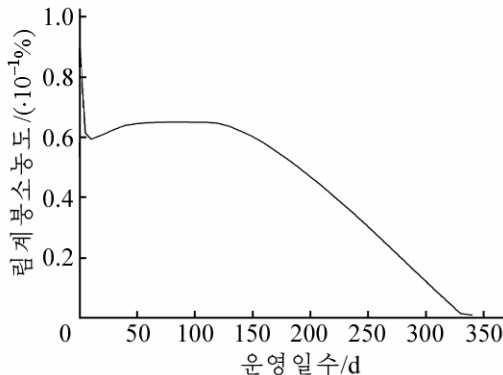


그림 2. 운영일수에 따르는 UO_2 로심의 림계붕소농도변화

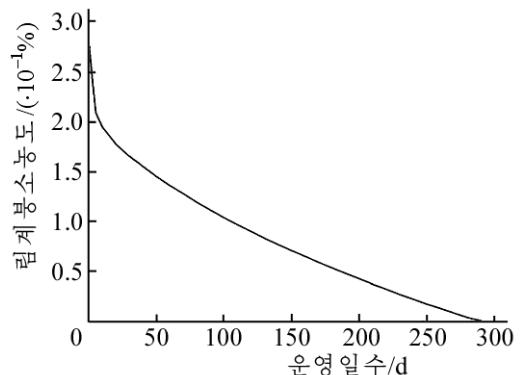


그림 3. 운영일수에 따르는 MOX형 로심의 림계붕소농도변화

UO_2 로심에서와 같은 량의 Gd를 섞는 경우에도 Gd의 연소속도가 UO_2 로심보다 훨씬

느리기때문에 단조감소의 경향성은 달라지지 않으며 유효만출력일수가 244일로 줄어드는 결과만을 가져온다.

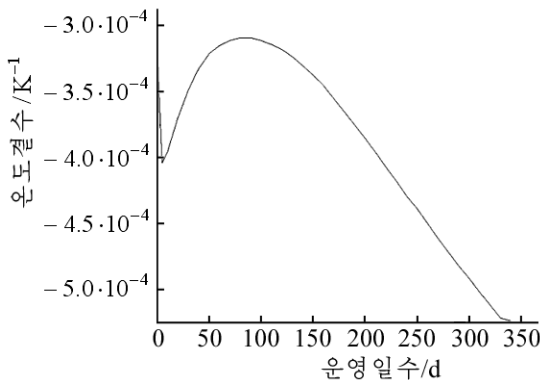


그림 4. 운영일수에 따르는 UO₂로심의
감속재온도결수변화

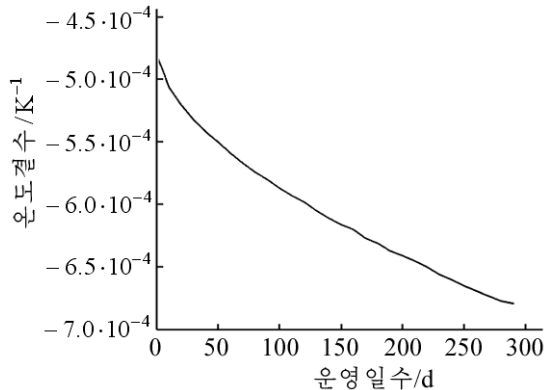


그림 5. 운영일수에 따르는 MOX로심의
감속재온도결수변화

끝으로 운영일수에 따르는 감속재온도결수의 변화에 대한 계산결과를 그림 4와 5에 주었다. 두 로심에서 그 변화곡선의 모양을 보면 그림 2와 3에서 본 림계붕소농도의 변화 곡선과 매우 유사하다는것을 알수 있다.

그것은 감속재온도결수가 감속재(랭각재)에 포함된 붕소의 농도와 밀접한 관계에 있기때문이다. 랭각재속의 붕소함량이 높을수록 감속재온도결수의 절대값이 작아지며 지어 어떤 한계농도이상에서는 부호가 +로 되어 고유안전성이 보장되지 않는다. 연소가 심화됨에 따라 여유반응도보상에 필요한 림계붕소농도값이 감소하며 그에 따라 감속재온도결수의 절대값이 증가한다.

맺 는 말

가압경수로물리계산체계 《부흥》을 리용하여 MOX형가압경수로의 로심연소제산을 진행하고 UO₂연료를 리용한 기존가압경수로와 비교하였다.

참 고 문 헌

- [1] 허일문 등; 원자력, 2, 19, 주체102(2013).
- [2] H. R. Trelluel; Progress in Nuclear Energy, 48, 135, 2006.
- [3] P. Bernard; Progress in Nuclear Energy, 49, 583, 2007.
- [4] A. Yamamoto et al.; Journal of Nuclear Science and Technology, 39, 8, 900, 2002.
- [5] Y. Hanayama et al.; MOX Fuel Assembly for Pressurized Nuclear Reactors, United States Patent Application Publication, US 2008/0181350 A1, July 31, 2008.
- [6] 曹栋兴; 核反应堆设计原理, 原子能出版社, 40~56, 1992.

Core Burn-up Calculation of PWR Loaded MOX Fuel

Ho Il Mun, So Chol and Chae Jong Suk

By using the PWR physics calculation code, “Puhung” developed by us, we carried out core burn-up calculation of PWR loaded MOX fuel and compared it with that of the standard PWR core loaded UO_2 fuel.

Key words: PWR, MOX fuel, burn-up calculation