2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

상용로, 계장 후 1차 및 2차 노내 시험자료를 활용한 COSMOS 코드 검증

COSMOS Code Verification by Using the In-Pile Data from the PWR and Two Further Irradiations after Re-instrumentation

이병호, 구양현, 오제용, 천진식, 손동성
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

혼합핵연료의 인허가 증가 프로그램의 일환으로 상용로(PWR)에서 인허가 연소도까지 조사된 핵연료의 일부를 채취하여 계장한 후에 모사된 PWR 분위기에서 연소도를 증가하기 위한 노내 조사를 수행하였다. 그후 33bar/240°C 분위기에서 출력 급증시험을 수행하면서 핵분열기체 방출 및 열적 노내 거동을 시험하였다. 상용로 자료부터 계장후 1 차 연소도 증가시험 및 2 차 출력증감 시험자료 전체를 활용하여 COSMOS 코드를 검증하였다. 상용로, 계장 후 1 차 및 2 차 시험 전체에 대해 COSMOS 코드는 열적 거동, 핵분열 기체 방출 거동, 피복관 크립 및 부식에 대해 실제 노내 거동을 잘 예측하였으나, ~60MWd/kgHM에서의 기체확산에 의한 핵분열기체 방출 예측을 위한 추가적 개선이 필요하였다.

Abstract

The segmented MOX fuel rods base-irradiated in a commercial reactor (PWR) were re-instruemed and irradiated first in the simulated PWR environments and then in the coolant condition of 30bar and 240°C to increase the liscensed burnup. The COSMOS code was verified by using the PIE results after base irradition and the on-line measurement from the instrumentations of thermocouple and pressured transducer for the first and second irradiation. The COSMOS code shows very good applicability for predicting the integral MOX fuel behavior in the high burnup MOX fuel. However, it is necessary that the COSMOS code is upgraded with the additional fission gas release model to precisely estimate the fission gas release by gaseous diffusion which would be expected to occur in the very high burnup MOX fuel rods with multiple cracks

1. 서 론

미래형 핵연료과제에서는 혼합핵연료봉의 노내 성능 해석을 위해 COSMOS 코드를 개발 중에 있다[1]. 현재까지 많은 고연소도 UO_2 핵연료 및 혼합핵연료 노내 연소 자료를 활용하여 개발된 COSMOS 코드를 검증하였다. 그러나 혼합핵연료용 코드를 개발하기 위해 필요한 열적 및 핵분열 기체 방출 등을 포함하는 포괄적 노내 성능 자료는 아직도 많지 않다. 특히 고연소도에서의 노내 성능 결과는 미미한 형편이다.

고연소도 혼합핵연료에 대한 COSMOS 코드 검증을 위해 인허가 연소도 이상에서 열적 및 핵분열 기체 방출 노내 시험자료를 활용하였다. 상용로에서 인허가 연소도까지 조사한 핵연료의 일부를 채취하여 핵연료를 계장(re-instrumentation)한 후, 연구로에서 노내 연소시험을 수행하였다. 먼저 PWR 분위기를 모사한 환경에서 핵분열기체 방출없이 연소도를 ~6MWd/kgOX 에 도달한 후 출력 증감이 용이한 다른 RIG 으로 핵연료를 옮겨 핵분열기체 방출 시험을 수행하였다.

본 논문에서는 기저조사 및 계장후 1 차 및 2 차 노내 시험자료를 활용하여 COSMOS 코드의 고연소도 혼합핵연료에 대한 검증 및 분석 결과를 기술하였다.

2. 기저조사자료를 이용한 검증

BN 에 의해 제조된 혼합핵연료에 함유된 Pu 농도는 ~4% 정도였다. UO_2 기지 내에 존재하는 불균일한 Pu 입자 크자는 ~16 μm 정도였고, 기지 내의 UO_2 결정립 크기는 ~ 8.0 μm 정도였다. 소결체 양면 모두 디쉬 및 모서리 따기를 했으며, 갭에는 상온에서 26 bar 의 헬륨으로 충진하였다. 사용된 피복관은 ZIRCOTUBE 에서 제조된 SR Zicaloy-4 이다. 튜브는 최종적으로 460℃에서 3~6 시간 소둔처리하였다. 피복관의 내경 및 외경은 각각 8.36 mm 및 9.50 mm 였다. 피복관의 화학 조성에서 Sn 함량은 1.39~1.50 w/o 으로 표준 Zircaloy-4 가 사용되었다[2].

제조된 핵연료는 상용로 (PWR) 핵연료 집합체에 포함되어 4 주기동안 조사되었다. 4 주기 동안 평균 선출력은 ~200 W/cm 정도이다.

기저 조사후 선택된 두개의 핵연료 BR1 및 BR2 의 핵연료 길이 전체에 대해 먼저 비파괴 시험이 수행되었다. 와전류 탐사법에 의해 산화층 두께 측정, profilometry, γ-scanning 등을 수행하였다.

COSMOS 코드를 이용하여 기저조사 말에 피복관 바깥 표면에 생성된 산화층 두께 계산 결과와 실제 측정치를 비교하여Fig. 1에 나타내었다. 그림에 나타난 측정된 산화층 값은 각 격자(span)의 가장 두꺼운 산화층 위치에서 측정된 4 개의 값을 평균하여 얻은 값이다. COSMOS 코드 계산시 부식모델에 필요한 BR1 및 BR2 에 대한 피복관의 정확한 이력이 나타나 있지 않아 코드내의 필요한 입력 Annealing factor 는 1.0 으로 가정하였다. 또한 Sn 의 양은 1.39~1.50 % 정도여서 Sn factor 도 1.0 으로 가정하여 계산하였다. 계산된 최고 산화층 두께는 6 번째 격자(span)에서 얻어졌으며, BR1 는 70.65 μm, BR2 는 62.52 μm 이었다. 측정시 관찰된 최고 두꺼운 산화층 값은 BR1 에서 65 μm, BR2 에서 59 μm 정도였다. 또한 두 핵연료 축방향에 따라 산화층 두께를 비교하면 격자 1 에서 7 까지 모

두 실제 결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 COSMOS 코드의 부식 모델은 혼합핵연료 노내 조사시 실제 피복관 산화 거동을 정확하게 잘 예측하고 있다고 할 수 있다.

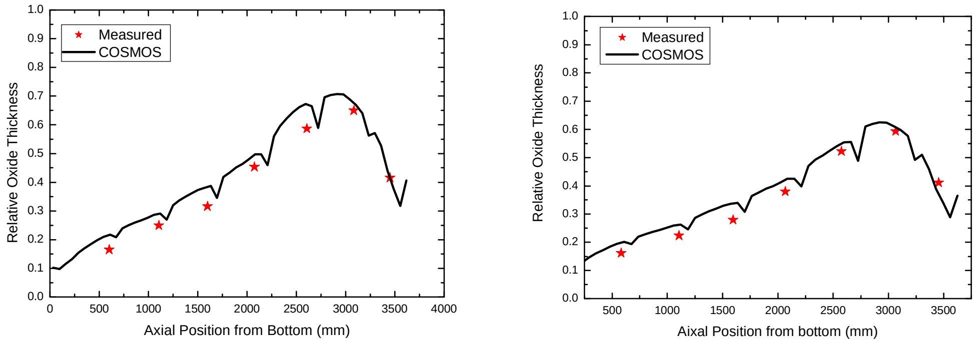

Fig. 1. Comparison between measured and predicted oxide thickness for (a) BR1 and (b) BR2

COSMOS 코드로 핵연료 내에 생성된 핵분열기체 가운데 방출된 양을 평가하여 Fig. 2에 나타내었다. 그림에는 PIE 시 측정된 최종 핵분열기체 방출 평가 결과를 함께 나타내었다. 기저 조사 말기에 측정된 값은 BR1 에서 4.9%, BR2 에서 2.6%였다. BR2 에서 조금 낮은 핵분열기체 방출률은 낮은 조사 출력 때문으로 생각된다. COSMOS 코드의 계산 결과는 BR1 에서 5.58%, BR2 에서 3.81%로 측정치보다 조금 보수적 계산을 보여주고 있다. 이때 핵분열기체 방출 모델에 사용된 변수들은 COSMOS 코드내의 기본값을 사용하였다.

혼합핵연료에 사용되는 일반적 핵분열 기체 방출 모델을 사용했을 때 COSMOS 코드는 약간 보수적으로 실제 노내 핵분열기체 거동을 잘 예측하는 것으로 판단된다.

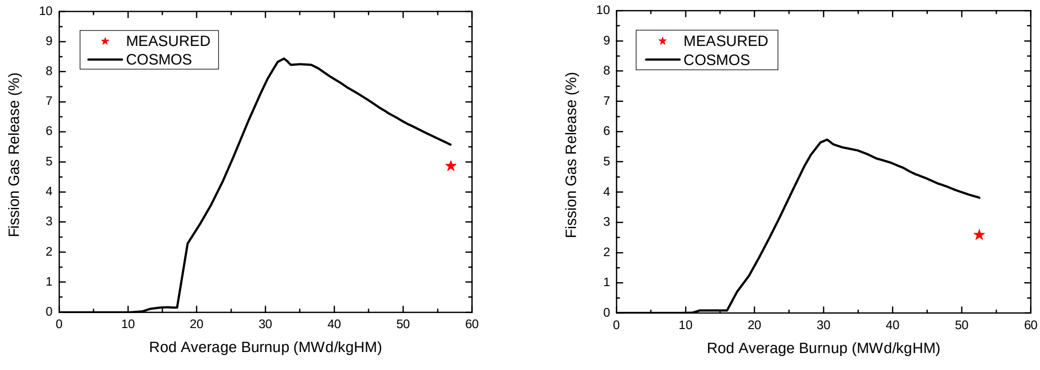

Fig. 2. Comparison between measured and predicted fission gas release for (a) BR1 and (b) BR2

3. 계장후 1차 조사시험 자료를 활용한 검증

PWR 에서 ~50 MWd/kgHM 까지 기저 연소한 혼합핵연료 일부를 채취하여 열전도대, 압력계 등으로 재계장하였다. 재계장 후에 PWR 조사환경을 모사할 수 있는 RIG 에서 핵연료의 열적 및 핵분열 방출기체, 피복관 길이 변화 등에 대한 노내 거동을 시험하였다.

두개의 계장 핵연료 R1 및 R2 는 핵연료 길이가 ~450mm 이고, ~1/12 위치에 열전도대 TIP 이 위치해 있고, 특히 R2 하단에 압력계가 장착되어 있다. R2 핵연료 갭간격에는 26 bar(상온)의 헬륨 기체로 충진하였다.

계장 후 1 차 조사 시험의 목적이 핵분열 기체 방출 없이 혼합핵연료의 연소도를 증가시키는 것이기 때문에 평균 출력 ~100 W/cm 로 낮게 조사되었다. 조사 기간중에 R1 이 R2 보다 출력이 조금 높은 것을 제외하고 두 핵연료는 같은 조건에서 조사되었다. 평균 선출력보다는 열전도대 끝단에서의 출력이 약간 낮다. 두 핵연료 모두 중간에서 출력이 가장 크며, 상단 TF hole 의 영향으로 하단의 출력이 조금 높다. 그러나 전체적으로 축방향에 따른 출력변화가 크지 않다.

측정된 핵연료 중심온도로부터 Halden 의 임계 핵분열 기체 방출 온도 모델을 통해 핵분열 기체 방출 여부를 예측할 수 있다. 물론 혼합핵연료에 대한 상세 자료가 아직 부족하기 때문에 UO_2 에 대한 모델이 혼합핵연료에도 그대로 적용된다고 먼저 가정한다. 보수적으로 연소도 60 MWd/kgMOX 를 가정하면, ~1%의 핵분열기체 방출이 시작하는 온도는 ~1000℃ 정도이다. 따라서 핵연료 열전도대 끝단에서의 중심온도가 700℃ 보다 낮기 때문에 핵연료 전체에서의 최고 온도도 핵분열 기체 방출 임계 온도보다 낮게 조사되었음을 알 수 있다.

두 개의 혼합핵연료(R1, R2) 상단 중심부에 열전도대를 장착하여 얻어진 온라인 온도 측정 자료 활용하여 COSMOS 코드의 온도 예측에 대한 정확성을 검증하였다.

핵연료 내의 온도 해석을 위하여 열전도도 및 연소도에 따른 열전도도 감소, 연소도에 따른 반경방향 출력 분포, 갭 특성등에 대해 COSMOS 코드 내의 기본 모델들을 사용하였다. 첫째로 열전도도는 미래형 과제에서 특별히 혼합핵연료를 위해 개발한 모델을 본 계산에 적용하였다[4]. 둘째로 반경방향 출력 분포는 핵연료 온도 결정에 중요한 영향을 미치게 된다. 반경방향 출력은 비슷한 농축도와 핵연료 치수를 가지고 조사중인 연료의 출력 분포를 사용하였다[3]. 이 출력 분포는 HELIOS 코드를 이용하여 이미 검증된 출력분포이다. 또한 핵연료와 피복관 사이의 갭은 핵연료 온도 분포에 중요한 영향을 미친다. 이를 위해 고려해야 할 사항은 핵연료의 relocation 및 cracking, densification, swelling 등이다. R1 및 R2 핵연료는 이미 상업로에서 상당한 연소도까지 조사된 핵연료로서, 재계장하였을 때 relocation 및 densification 이 다시 발생하리라고는 판단되지 않는다. 따라서 중요하게 고려해야 할 것은 과연 재 계장시의 초기 gap 간격이 얼마냐 하는 것이다. 그동안의 자료에 근거하여 초기 gap 을 20 μm 으로 가정하여, 여러 가지 열적 해석을 수행하였다.

정상 상태 가동 기간 동안 핵연료 중심 온도 거동을 Fig. 3에 나타내었다. 두 핵연료 모두에 대해 재계장 초기에는 온도를 정확하게 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 그러나 조사 중반부에서부터 COSMOS 코드 서서히 실제 보다 약간 높은 온도를 예측하고 있다. 실제 측정된 온도는 연소도가 증

가함에 따라 같은 온도에서 유지되거나 혹은, 조금씩 온도가 감소함을 알 수 있다. 즉 COSMOS 코드는 연소도 증가에 따라 핵연료 내에 생성된 “impurity”의 증가로 인한 열전도도 감소로 온도가 증가하는 반면, 측정 온도는 상이한 현상을 보여주고 있는 것이다. 이는 정상 상태 출력시 gap 이 닫혀 있는 상태라 gap 의 영향을 무시할 수 있다면, 연소되면서 핵연료 내에 어떤 회복 현상이 진행되어 감을 의미하는 것이다. 실제 핵연료 중심 온도가 600~700℃ 정도라면, 핵연료 단면적 전체의 평균 온도는 약 (700+400)/2 를 하면 550℃정도로 가정할 수 있다. 이렇게 낮은 온도에서 열적 확산 현상을 통해 핵연료 내에서 어떤 회복 현상이 기대하기는 힘들다. 대신에 소결체 내에서 생성된 핵분열 기체들이 소결체 내에서 고연소도까지 연소되면서 생성된 어떤 채널이나 경로를 통해 입계(grain boundary)로 이동하여 matrix 의 열전도도가 회복하여 가는 과정일 수도 있다. 이러한 회복 현상은 계장 후 2 차 조사 시험 온도해석(4-1 절 참고)시 반영되었다. 그러나 전체적으로 COSMOS 의 해석 결과는 고 연소도 혼합핵연료의 노내 열적 거동을 허용 범위 내에서 보수적으로 잘 예측할 수 있음을 보여주었다.

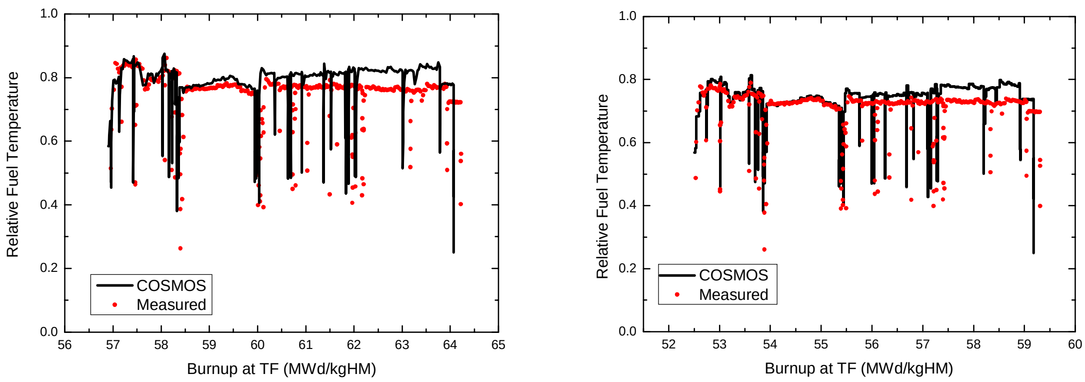

Fig. 3. Comparison between measured and predicted fuel temperature for (a) R1 and (b) R2

4. 계장후 2차 조사시험 자료를 활용한 검증

계장후 1 차 조사시험을 거쳐 확보된 인허가 이상의 고연소도 혼합핵연료에 대한 출력 증감시험 자료를 활용하여 COSMOS 코드의 검증을 수행하였다. 2 차 조사시험은 33bar/240°C 조건에서 빠른 출력 변화 혹은 높은 출력에서의 핵분열기체 방출 및 열적 거동을 살펴보았다.

R1, R2 핵연료봉의 출력은 거의 같고, 평균 선출력이 열전도대 tip 보다는 약간 높고, 각 핵연료의 하단(lower segment not bottom), 중간, 상단(upper segment not top) 위치에서의 축방향 출력변화가 거의 없게 조사되었다.

4-1 열적 해석

혼합핵연료(R1, R2)에 장착된 열전도대를 이용하여 측정된 결과를 근거하여 COSMOS 코드의 온

도 예측에 대한 정확성을 검증하였다.

핵연료 내의 온도 해석에 필요한 물리적, 핵적 특성들은 앞절에서 언급한 자료를 사용하였다. 그러나 2 차 시험시 동반한 고연소 혼합핵연료에서의 핵분열기체 방출이 많이 발생한 경우 핵연료내에서는 어느 정도의 회복(recovery) 현상이 발생할 것으로 예상된다. 이는 핵연료 내에서 열전달의 방해를 연소도 효과라 정의하면 핵분열기체 방출로 인해 열전달 방해 요인이 감소되어 연소도 효과가 상쇄되는 것으로 판단된다. 열전도도 회복에 대해서는 현재까지 많은 논란이 있으나, 아직까지 최종적으로 결론을 내릴 수 있는 자료가 그리 많지 않아 결론을 내리기는 어렵다. 따라서 본 해석에서는 회복현상을 고려하기 위해 열전도도 관계식의 "A" 항목에 대해 핵분열 기체 방출에 따라 아래와 같이 회복된다고 가정하였다.

$$A(T, BU, FGR) = A(T, BU) \cdot \exp(-\alpha \cdot FGR)$$

이상의 관련 자료를 활용하여 작성된 최적화된 입력을 근거로 하여 두개의 고연소도 혼합핵연료에 대한 열적 평가를 수행하였다.

먼저 핵분열 방출로 인해 열전도도 회복현상을 고려하지 않을 경우에 대해 Fig. 4에 나타내었다. 계장후 1 차 조사시험 때의 온도 해석시에는 핵분열기체 방출이 거의 무시되었기 때문에 기존의 열전도도 모델로 노내 거동을 유사하게 예측할 수 있었다. 그러나 그림에서와 같이 핵분열기체 방출을 고려하지 않을 경우 COSMOS 코드는 출력이 높을 때는 약 150°C 까지 높게 예측하는 것을 알 수 있다. 또한 현재의 출력과 온도의 관계를 면밀히 살펴보면 고연소도 핵연료중심온도는 아직 연소도가 낮은 혼합핵연료 온도와 거의 같음을 알 수 있다. 이러한 현상은 고연소도 혼합핵연료에서 높은 출력으로 인한 상당한 양의 핵분열 기체 방출과 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉 핵연료의 연소도 증가로 인한 열전도도 감소효과가 핵분열기체 방출로 인해 어느 정도 회복된 것으로 보인다. 따라서 처음에 언급한 바와 같이 이러한 핵분열기체 방출에 의한 회복 현상을 고려할 경우 Fig. 5과 같은 결과를 얻는다. 이때 예측된 핵분열기체 방출량은 6~7% 정도로 실제 예상되는 ~10% 보다는 낮다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 오차 범위가 50°C 미만으로 상용로→ 계장후 1 차→2 차 노내 조사 시험등의 복잡한 상황을 고려할 시 핵연료 중심온도를 비교적 잘 예측하는 것으로 판단된다.

따라서 제안된 핵분열기체방출로 인한 열전도도 회복 모델이 고연소도 핵연료 온도 해석의 중요한 요소임을 알 수 있고, 전체적으로 COSMOS 의 해석 결과는 고 연소도 혼합핵연료의 노내 열적 거동을 허용 범위 내에서 보수적으로 잘 예측할 수 있음을 보여주었다.

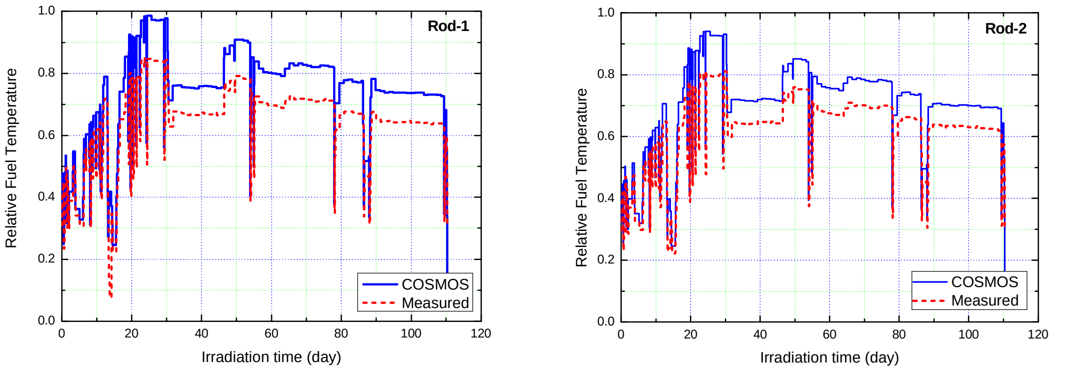

Fig. 4. Comparison of measured and calculated temperature of (a) R1 and (b) R2 without recovery effect due to fission gas release.

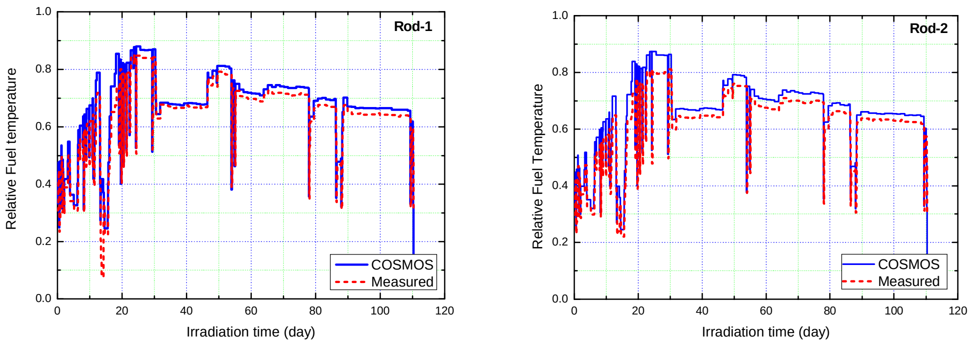

Fig. 5. Comparison of measured and calculated temperature of (a) R1 and (b) R2 with recovery effect due to fission gas release.

4-2 봉 내압

핵연료 R2 의 하단부에는 노내 조사시 봉 내압 변화를 관찰하기 위해 압력계가 설치되어 있다. 따라서 COSMOS 로 R2 에 대해 봉내압을 계산한 후 실제 측정한 결과와 비교하므로 핵분열기체 방출 모델을 평가하였다. 특히 혼합핵연료 R2 의 경우 gap 간격이 없는 상황이여서 봉내압은 주로 핵분열기체 방출로 인한 플레넘에서의 봉내압 변동임을 알 수 있다.

Halden 에서 제안한 핵분열 기체 방출 임계 온도는 현재 고연소도 영역 및 혼합핵연료의 경우 다소 논란이 있지만 아래와 같이 표현된다.

$$Tc = \frac{9800}{\ln(200 \cdot BU)}$$

여기서 연소도 단위는 MWd/kgOX 이다. 조사 초기 R2 의 연소도가 ~52MWd/kgOX 일때 핵분열기체방출을 위한 임계온도는 ~1060°C 정도이고, R2 에 장착된 열전도대로 측정한 핵연료 중심온도가 ~800°C 정도이다. 따라서 핵연료 중심에서의 온도가 열전도대 위치 온도보다 약 200~250°C 정도 높다고 가정하면 핵연료 최대 출력위치에서의 중심온도를 최대 ~1050°C 정도로 예상할 수 있다. R2 의 최대 중심온도는 기존 Halden 핵분열기체 방출을 위한 임계온도 근처에 도달했음을 알 수 있다. 그러나 압력 측정 결과로부터 평가한 핵분열기체 방출률은 조사말기에 ~10%에 도달하였다. 현재 Halden 에서 제안된 핵분열기체 임계온도는 고연소도에서는 낮아져야함을 알 수 있다.

Fig. 6에는 기저조사 및 계장후 1 차 조사시험을 수행한 후에 2 차 계장 시험단계에서의 봉내압에 대해 COSMOS 평가 결과와 측정결과를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 조사 시작과 함께 상당한 양의 핵분열기체가 급격히 방출되는 ~20 일까지 COSMOS 코드는 실제 핵분열기체 방출 거동을 잘 모사함을 알 수 있다. 그러나 급격한 출력변동을 여러 번 겪은 후 조사 후반부에서 실제 봉내압은 계속해서 증가하는 반면에 COSMOS 코드는 일정한 봉내압을 예측하고 있음을 알 수 있다. 조사 후반부의 봉내압 증가는 갭이 없으므로 핵분열기체방출과 직접적으로 비례한다. 후반부의 핵연료 중심온도가 계속해서 감소하더라도 핵분열기체가 고연소도 혼합핵연료에서 게속해서 조금씩 방출하는 것은 고연소도 핵연료 혹은 급격한 출력 변동을 경험한 핵연료의 고유 특성으로 여겨진다. 예를 들면 갭 간격이 없는 가운데 고연소도 핵연료 내부의 많은 균열이 상단 플레넘까지 연결되어 핵분열기체 방출 통로를 제공하여 핵분열기체가 원자확산에 의해서가 아니라 기체 확산에 의해 방출되는 듯하다. 따라서 COSMOS 코드는 ~60MWd/kgHM 에서 예측되는 기체 확산에 의한 아주 느린 핵분열기체 방출 예측을 위한 모델 개선이 필요한 것으로 여겨진다.

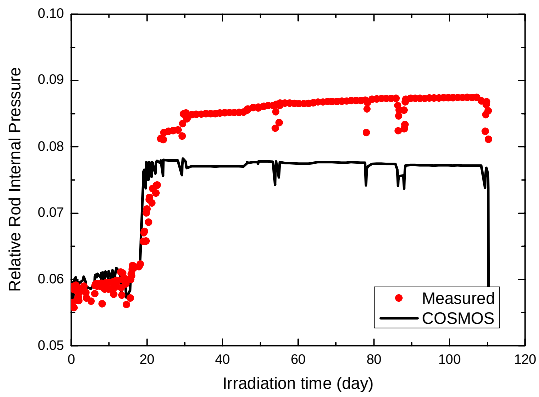

Fig. 6. Comparison of measured and predicted rod internal pressure of R2

Fig. 7에는 COSMOS 코드가 예측하는 핵분열기체 방출률을 도시하였다. 그림에서 계장후 1 차 조사 시험후에 ~0.33% 핵분열기체가 방출되었고, 조사시작 ~20 일 후에 급격한 핵분열기체 방출이 발생되었음을 보여주고 있다. 노내 조사시험을 통해 예측되는 ~10%의 결과와 비교하였을 때 COSMOS 코드는 낮게 예측하였으며, 그후 핵연료 중심온도가 서서히 감소함에 따라 핵분열기체 방출률도 조금씩 감소함을 알 수 있다.

참고로 만약 현재의 COSMOS 코드 내에서 단순히 낮은 Saturation number 값을 사용하게 되면 계장후 1 차 조사시험 기간동안 상당한 양의 핵분열 기체가 방출되어 실제 노내 거동과 상반되는 결과를 얻게된다.

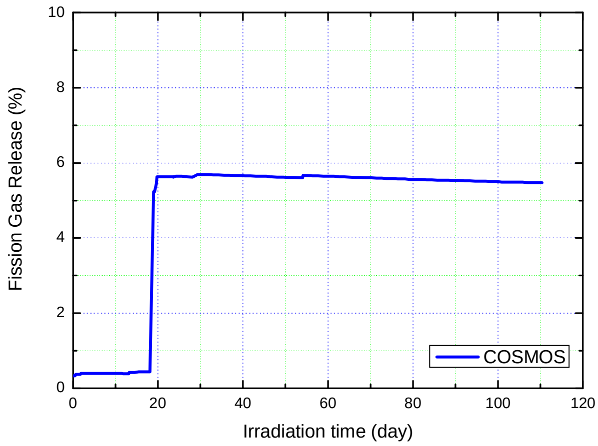

Fig. 7. Predicted fission gas release in R2

5. 결 론

PWR 에서 4 주기 동안 기저 조사된 두개의 혼합핵연료봉 일부를 채취하여 계장한 후에 1 차적으로 모사된 PWR 분위기에서 연소도 증가시험, 2 차적으로 출력 급증시험을 수행한 후에 얻어진 노내 시험 결과를 이용하여 COSMOS 코드를 검증하였다.

개발된 혼합핵연료 열전도도 모델을 적용하여 COSMOS 로 계산된 중심온도는 정상 상태 조사시 핵분열기체 방출이 그리 크지 않을 때에는 실제 노내에서의 핵연료 중심온도를 잘 예측하였다. 그러나 계장후 2 차 조사 시험시와 같이 상당한 핵분열기체가 방출하였을 경우 측정된 핵연료중심온도와 상당한 차이가 있었다. 이는 핵분열기체 방출과 동반된 회복현상을 반영하지 않았기 때문으로 생각된다. 따라서 회복현상을 열전도도 모델에 추가한 후 재평가 하였을 때 COSMOS 코드는 측정된 핵연료 중심온도를 잘 예측하였다.

한편 COSMOS 코드는 기저 조사 시험 및 계장 후 노내 시험시 핵분열 기체 방출량이 급격히 증가하는 기간까지는 핵연료 봉 내압을 정확하게 추적하였다. 그러나 그후에 봉 내압은 실적치보다 다소 낮게 예측되였다. COSMOS 코드의 낮은 핵분열기체 방출 예측은 고연소도 핵연료가 여러 번의 출력 증가 시험을 통해 핵연료내에 생성된 많은 균열을 통한 기체 확산에 의한 핵분열기체 방출현상을 제대로 해석하지 못하기 때문으로 판단된다. 추후 이러한 기체확산현상에 대한 핵분열기체 방출 모델을 추가해야 할 것으로 보인다.

앞으로 기체확산에 의한 핵분열기체 방출 모델을 추가하고, 두개의 시험 핵연료봉에 대해 수행할 PIE 결과를 추적하여 COSMOS 코드의 정확성을 높일 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] 이병호, 구양현, 천진식, 오제용, 손동성, “DEVELOPMENT OF A FUEL PERFORMANCE CODE, COSMOS”, ENS-TopFuel-2003, 2003.

[2] Private communication to CEA, 2001.

[3] 이병호, 구양현, 천진식, 오제용, 주형국, 손동성, KAERI/TR-1901/2001, KAERI, August 2001.

[4] B H LEE, et al., “A Unified Thermal Conductivity Model For LWR MOX Fuel Considering Its Microstructural Characteristics”, Journal of Nuclear Science And Technology, November, 2002.

[5] 구양현, 이병호, 손동성, “ Radial power density distribution of MOX fuel rods in HBWR", KAERI/TR-1365/99, KAERI, July 1999.