

2001 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

FRAPCON-3를 이용한 IFPE 자료 검증 연구 IFPE-data evaluation using FRAPCON-3

김희문, 박광현, 윤연숙, 황선희, 차정훈, 호광일*

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천1리

수원대학교*

경기도 화성군 봉담읍 와우리

송기찬

한국 원자력 연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 FRAPCON-3¹⁾ 코드를 이용하여 실험자료인 IFPE 자료를 검증하고자 하였다. 따라서 CONTACT-1&2 bis 와 IFA-429, Riso-3 의 AN2 핵연료 실험자료를 선정하여 코드와 비교 분석하였다. 그 결과, 저 연소도인 CONTACT-1&2 bis 시험에서는 온도가 대부분 약간 낮은 값을 보이고 있으며 고 연소도인 IFA-429, Riso-3 의 AN2 핵연료 ramp 시험에서는 높은 값을 보이고 있다. 핵분열기체 방출비는 대부분 고 연소도 ramp 시험에서 매우 높은 값을 나타냈고 시험후 반경방향의 핵분열 기체의 잔존량을 비교 볼 때 고온의 영역이 계산값보다 넓은 것을 알수 있었다. 결과적으로 볼 때 온도의 계산이 정확히 이루어야 할 것이며 특히 온도계산에 있어서 연소도가 열전도도 모형에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

Abstract

This study is evaluation of IFPE data using FRAPCON-3. Experimental data of CONTACT-1&2 bis, IFA-429 and AN2 in Riso-3 were compared with FRAPCON-3 code. As a result of temperature, center temperature of pellet in FRAPCON-3 was lower than that of CONTACT-1&2 bis experiment at low burnup. But, it was reversed at ramp test in high burnup (IFA-429), then fission gas release fraction of code was higher than that of IFA-429. Pellet radial distribution of Xe concentration in AN2 fuel in Riso-3 was different with that of code after ramp test. Radial high temperature region of pellet was wider than that of code. So, temperature calculation is very important to analyze any phenomena in pellet. Especially, thermal conductivity model including burnup effect must be studied.

1. 서론

원자력 발전의 경제성을 높이기 위한 방안으로 핵연료를 장주기로 운전을 할 수 있는 연구를 많이 하고 있다. 핵연료의 건전성 및 고연소도 실험은 이미 오래전부터 여러나라에서 행하여져 왔다. 그중에서도 IFPE²⁾ (International Fuel Performance Experiments) 자료는 OECD/NEA, IAEA 그리고 HALDEN Project에 의해 여러 나라들이 참여하여 수십년동안 핵연료 실험을 한 매우 광범위한 자료이다. 따라서 이 실험들이 과연 좋은 결과로서 평가받기 위해서는 코드에 의한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 이 실험자료들을 코드로 검증하고, 한편으로는 코드 개발 및 개선의 문제를 찾고자 한다.

2. 본론

본 연구에서 선택한 실험자료는 피복관의 직경변화를 실험한 CONTACT1&2, 조사후 핵연료를 다시 ramp 시험을 하여 핵분열 기체 방출비를 실험한 IFA-429, pellet 반경방향에 따른 핵분열 기체 분포를 실험한 RISO-3의 실험자료를 선택하였다. 따라서, 각 실험마다 특성이 다르며 또한, 실험중에 핵연료봉을 해체하지 않으므로 FRAPCON-3 코드에 적용이 가능하다.

2.1 CONTACT 1&2 bis 실험 분석

CONTACT1&2 실험은 핵연료내의 핵연료 소결체와 피복관의 접촉현상에 의한 피복관의 반경변화를 분석하기 위한 실험으로서 프랑스의 CEA-FRAMATOME이 수행하였다. CONTACT-1은 1978년부터, CONTACT-2는 1979년에 Siloe 실험로에서 수행되었으며 표-1은 실험당시 핵연료봉의 제원과 시스템의 상태를 나타내었다. 전형적인 PWR 17×17 디자인의 Zr-4 피복관과 5개의 UO₂ pellet으로 이루어진 짧은 봉을 이 실험에서는 사용하였다. 핵연료 중심온도를 측정하기 위해 thermocouple을 장착하였고 따라서 pellet 중심에 구멍을 내었는데 CONTACT-1 경우는 pellet stack 전체에 구멍을 내었고 CONTACT-2 bis의 경우는 pellet stack에 반만 구멍을 내어 온도측정을 하였다. 피복관의 외경을 실시간으로 측정하므로써 연소도에 따른 피복관의 직경변화를 측정할 수있고, He 기체를 핵연료봉에 통과시켜 발생된 핵분열 기체를 핵연료봉 밖에서 감마 측정기로 측정할 수 있게 하였다.(그림-1,2)

CONTACT-2 실험은 실험상의 문제로 중단되어 CONTACT-2 bis로 대체되었으며 제원은 CONTACT-2 일때와 같은 조건이다. 그림-3은 CONTACT-1&2 bis의 출력을 나타낸 그림이다. CONTACT-1은 약 출력이 40kW/m이고 22 MWd/kg-U까지 연소시켰고, CONTACT-2 bis 22kW/m 출력으로 12.4MWd/kg-U 까지 연소시켰다.

표 1 CONTACT-1&2 의 핵연료봉 제원

구조재	제원	단위	값
Pellet	길이	mm	13.46
	직경	mm	8.19
Dish	dish 깊이	mm	0.31
	dish curvature	mm	14.73
	반경		
thermocouple hole	직경	mm	1.5
	외경	mm	9.50
피복관	내경	mm	8.36
	외벽온도	C	330
Plenum	길이	mm	7.7
초기 압력 (Helium)		MPa	1(CONTACT 1) 0.1(CONTACT 2)
	핵연료	농축도	%
운전인자	이론밀도	%	95
	출력	KW/m	40 (CONTACT 1) 25 (CONTACT 2)
시스템 압력	속중성자속	#/m ² .s	6×10^{17}
		MPa	13

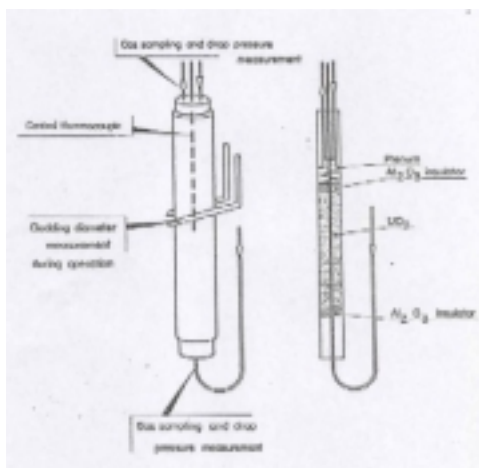


그림 1 핵연료봉 개요

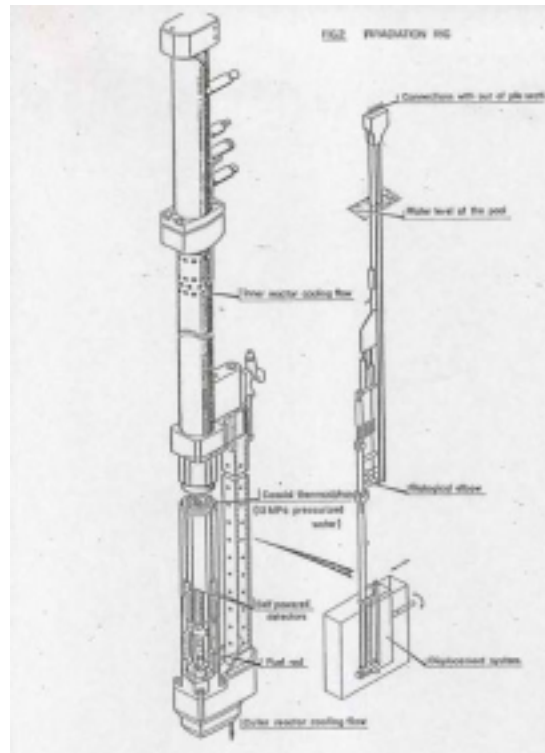


그림 2 핵연료봉이 설치되어 있는 계장

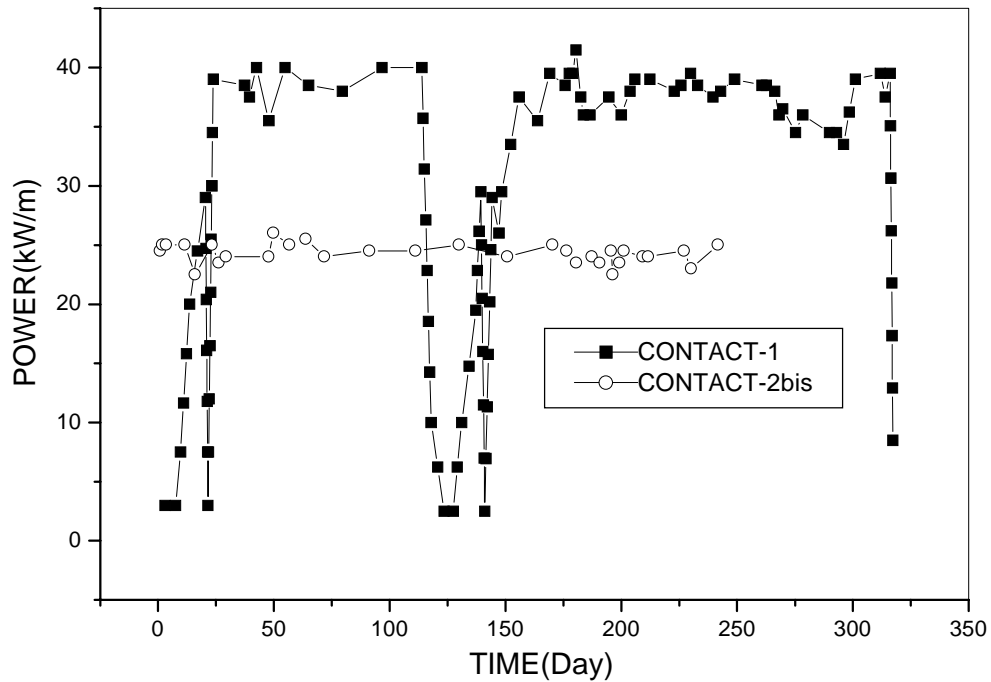


그림 3 CONTACT-1&2 bis 시간에 따른 출력분포

그림-4는 CONTACT-1의 pellet 중심온도를 연소시간에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 code1은 FRAPCON-3코드의 핵연료 중심부 온도를 나타낸 것이고 code2는 핵연료 중심부로부터 실험시 드릴구멍크기인 반경 0.7mm에서의 온도 계산값이다. 실험값이 code1과의 비교시 온도가 거의 일치된 것으로 보이나 code2 값처럼 pellet의 중심에 구멍을 감안하여 보면 실험 중심온도에 비해 계산 온도가 낮으며, 40℃~85℃ 정도 차이를 보이고 있다.

그림-5는 CONTACT-2 bis의 pellet 중심온도를 계산값과 비교한 것이다. 초기에는 잘 맞던 온도가 연소시간이 높아짐에 따라 계산값이 약 80℃~100℃ 정도로 차이로 작음을 알 수 있다.

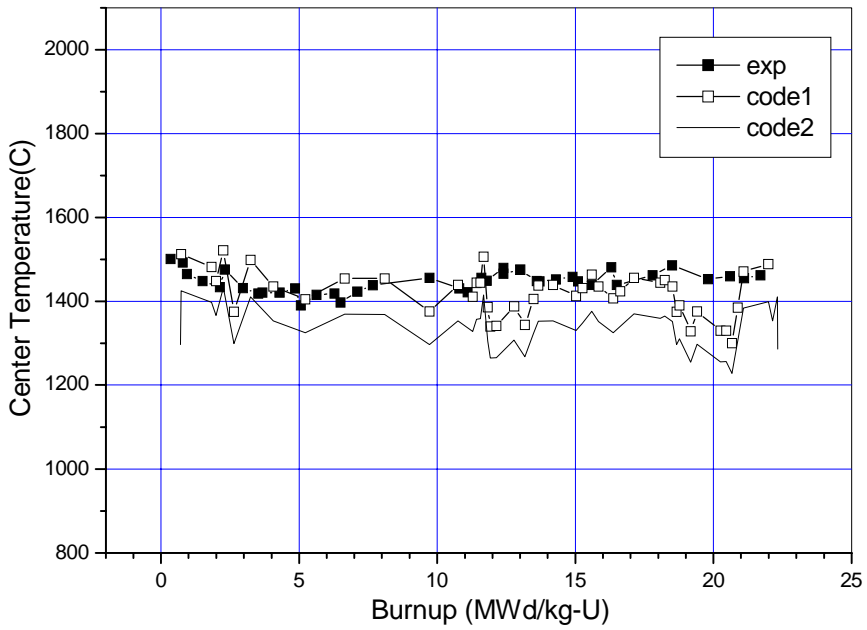


그림 4 연소도에 따른 핵연료 중심온도 비교(CONTACT-1)

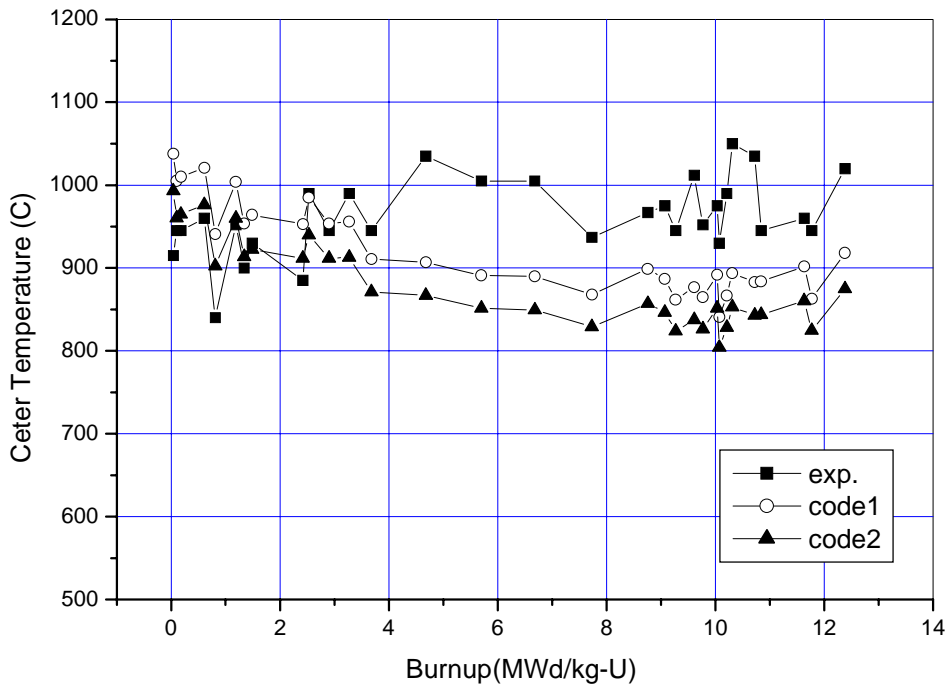


그림 5 CONTACT-2 bis 의 온도 비교

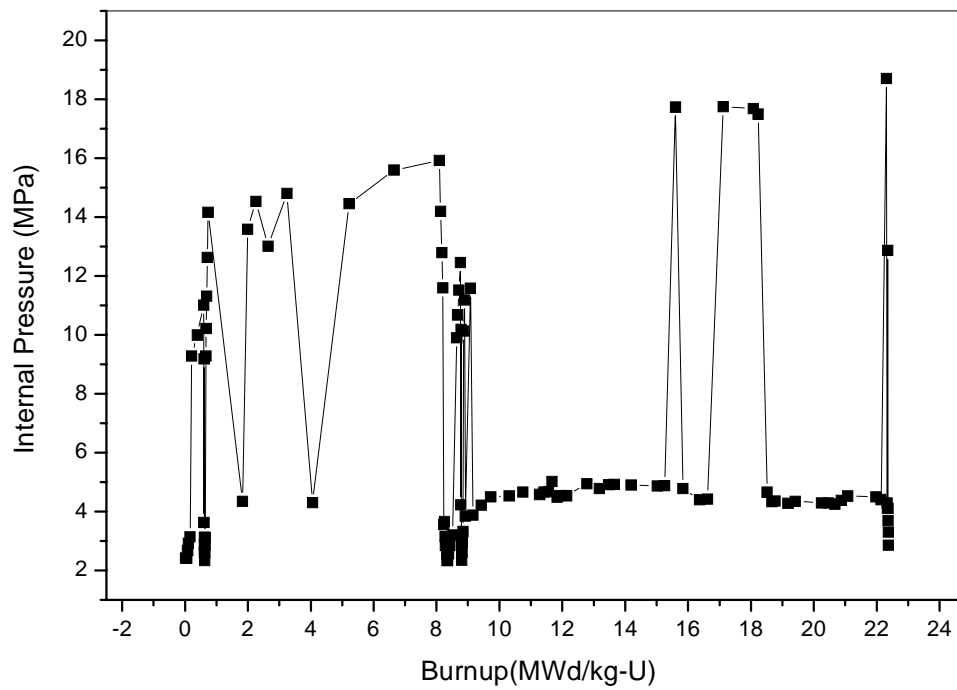
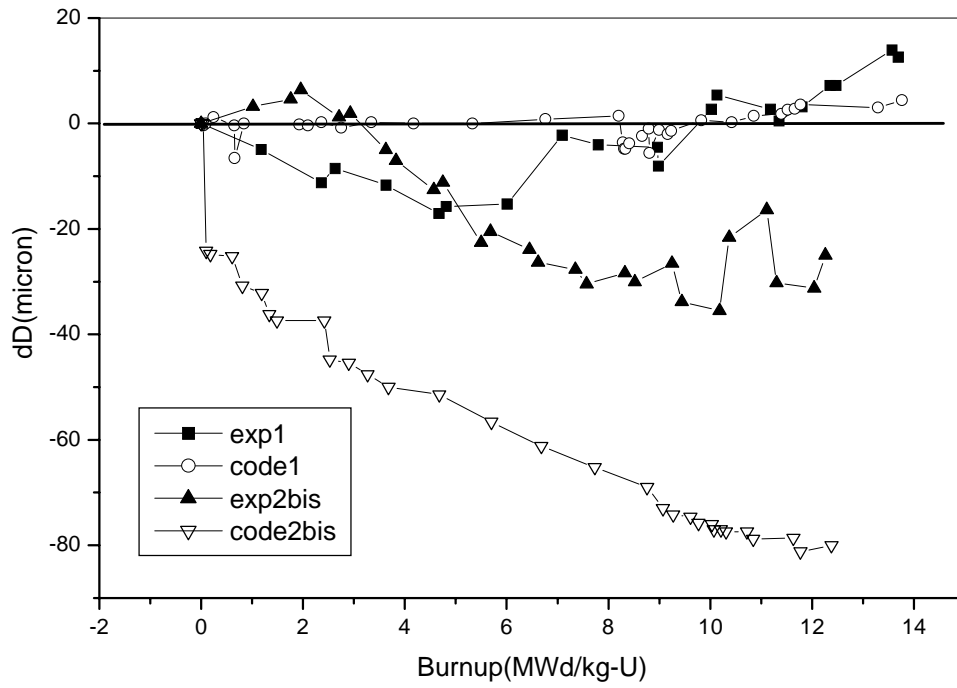


그림 7 연소도에 따른 CONTACT-1의 압력분포

실험결과, CONTACT-1은 약 5 MWd/kg-U 때에 pellet과 피복관의 접촉이 일어났으나 코드 계산에서는 접촉현상이 일어나지 않았다. 이것은 코드상에 내압이 높아서 피복관의 압축변형이 실험에서보다 약하기 때문이라고 판단된다. 따라서 그림-7에서 보듯이 코드에 의한 직경변화 또한 초기에는 나타나지 않는 이유이며 그 이후로는 거동이 실험과 비슷함을 알 수 있다. CONTACT-2 bis는 실험 및 코드계산에서 모두 접촉이 일어나지 않았고 특히 CONTACT-2bis의 실험에서 피복관의 직경변화 또한 초기에 팽창 변형이 있어, 이 자료를 실험자료로서 검증하기에는 어려운 것으로 판단된다.

2.2 IFA-429 실험 분석

이 실험은 Halden 원자로를 이용하여 실험한 자료이다. 실험은 1975년부터 1990년까지 약 56 MWd/kg-U 정도 오랜기간 동안 이루어졌으며 ramp 시험전 미리 연소시킨 핵연료를 짧은 시간동안 출력을 변화시켜 온도 변화 및 핵분열 기체 방출량을 알아 본 것이다. 이 실험에서는 25가지의 핵연료봉이 연소되었으며 재각기 다른 제원을 가지고 있으며 그림-8에서 보듯이 축방향으로 3단-cluster 구조로 각각 6-7개의 핵연료봉이 위치하여 연소되었다.

각각의 핵연료들은 제원의 특성과 실험목적에 맞게 제작되었으며, 본 연구에서는 ramp 시험이전에 핵연료를 해체하지 않은 핵연료중에 모델명이 CH인 핵연료봉을 선택하여 그 결과를 분석하였다. 표-2는 CH 핵연료의 제원을 나타낸 것이며, 그림-9는 총 실험에서 연소시킨 핵연료의 출력분포를 시간에 따라 나타내었으며 FRAPCON-3 코드로 동일 연소이력을 맞추기 위해 ramp 시험전 출력을 단순화시켜 나타낸 그림이다. 단순화시킨 이유는 ramp 시험전 초기 연소시에도 간헐적으로 단일 ramp 시험을 15회 정도 실시하였기 때문에 모든 시간에 출력을 맞추기가 어려워, 출력분포를 실험의 연소도에 맞춰 단순화 시켰다.

표 2 IFA-429 핵연료중 CH 핵연료 제원

내용	단위	값	내용	단위	값
핵연료 무게	kg	0.1645	Land 넓이	mm	1.4
핵연료 밀도	g/cc	10.40	피복관		Zry-4
농축도	%	13	피복관 내경	mm	9.5
Pellet 직경	mm	9.144	피복관 두께	mm	0.61
pellet 길이	mm	15.2	충진기체		He
결정립 크기	micron	17	핵연료봉 내압	MPa	2.5
Dish 반경	mm		pellet 총길이	m	0.2438
Dish 깊이	mm	0.33	plenum 길이	m	0.025

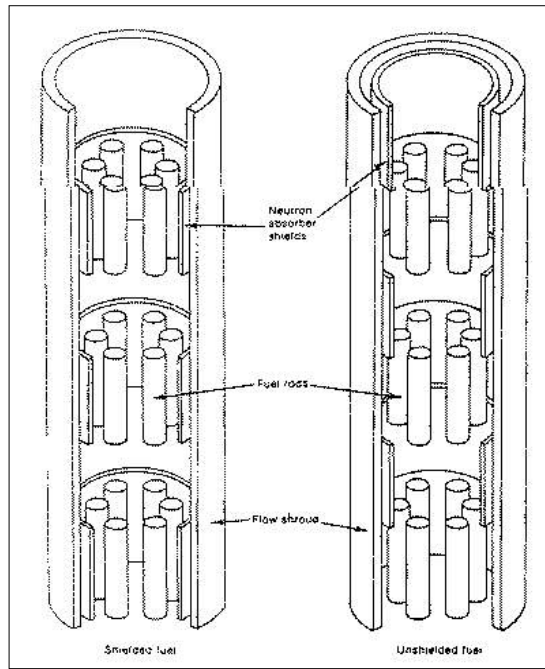


그림 8 IFA-429 핵연료 장전 장치

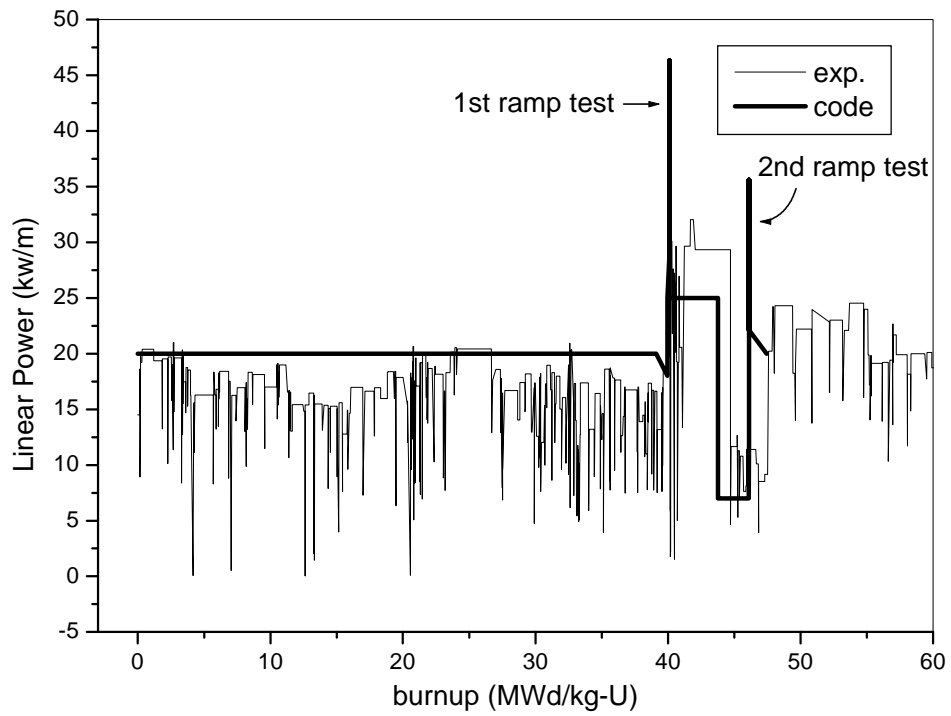


그림 9 연소도에 따른 출력 변화 및 ramp 시험 시점

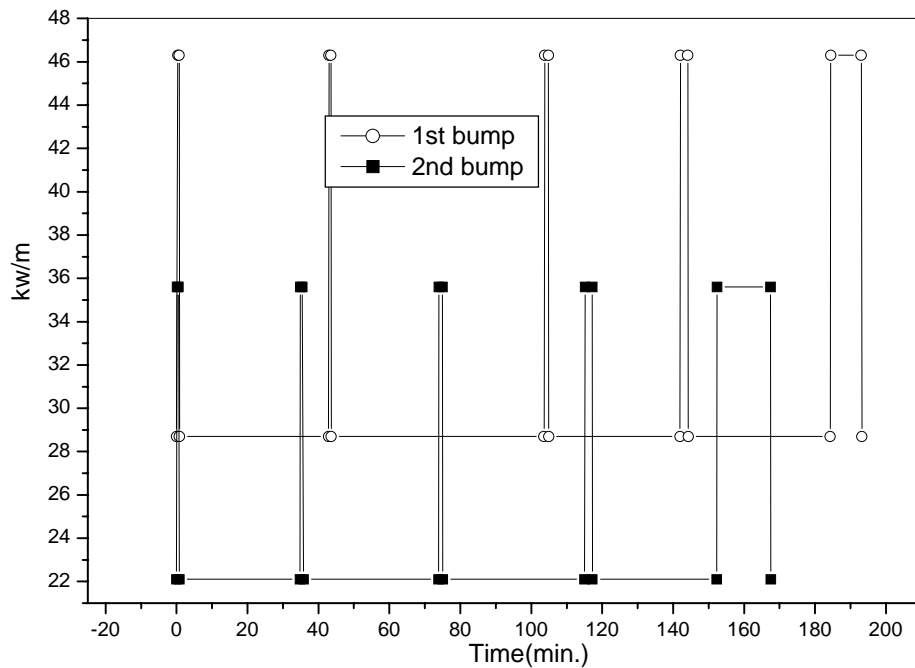


그림 10 Ramp-1, Ramp-2 시험의 출력 분포

그림-10은 ramp 시험시 ramp 출력 및 시간을 나타낸 그림으로서 초기 연소후 ramp 시리즈 시험을 2회를 하였고 각 ramp 시험마다 30초, 60초, 90초, 120초, 150초로 5회의 동일출력으로 시험을 하였다. 첫 번째 ramp 시리즈는 약 46 kw/m로 시험하였고, 두 번째 ramp 시리즈는 약 36 kw/m로 시험하였다.

그림-11은 각각의 ramp 시험 단계마다 핵분열기체 방출비를 나타낸 그림이며 계산값이 실험보다 모두 높게 나타났다. 특히 핵분열 기체 모형에 따라 거동이 달라지는데 초기시간에는 ANS 5.4 모형이 매우 실험값에 근사하나 시간이 흐를수록 Massih의 모형이 적은 차이를 보이고 있다. 더욱이 그림-12,13에서 보듯이 massih의 모형은 ANS 5.4³⁾ 모형과는 달리 연소도에 따라 연속적인 거동이 아닌 계단 형성을 하고 있어서 여러 연소구간에서는 점프현상이 일어난다. 따라서 핵분열 기체 방출비를 실험자료에 근접 모사를 하고자할 때 점프현상에 의해 잘 일치가 되지 않는 경우가 있다. 이것은 결정립계에 핵분열 기체를 기포로서 수용할 수 있는 최대허용농도까지 기체원자가 누적되었다가 허용값 이상이 되면 일시에 모두 방출되는 모형으로 일정시간동안 낮은 핵분열 기체 방출이 일어나다가 짧은 순간에 점프현상에 의해 일시에 방출량을 크게 하는 것이다. 그에 비해 ANS 5.4는 단지 구형 결정립에서의 확산방정식을 계산하기 때문에 시간에 따라 연속적인 값을 나타내지만 본 실험과 비교할 때 연소도가 커지면 큰 차이를 보인다. 그러나 그 이유는 그림-14에서 보듯이 온도에 차이에 의한 문제일 수 있다. 온도가 높기 때문에 핵분열 기체 방출량이 커졌기 때문이다. 따라서 핵연료내의 온도 거동연구가 더욱더 절실히 요구된다.

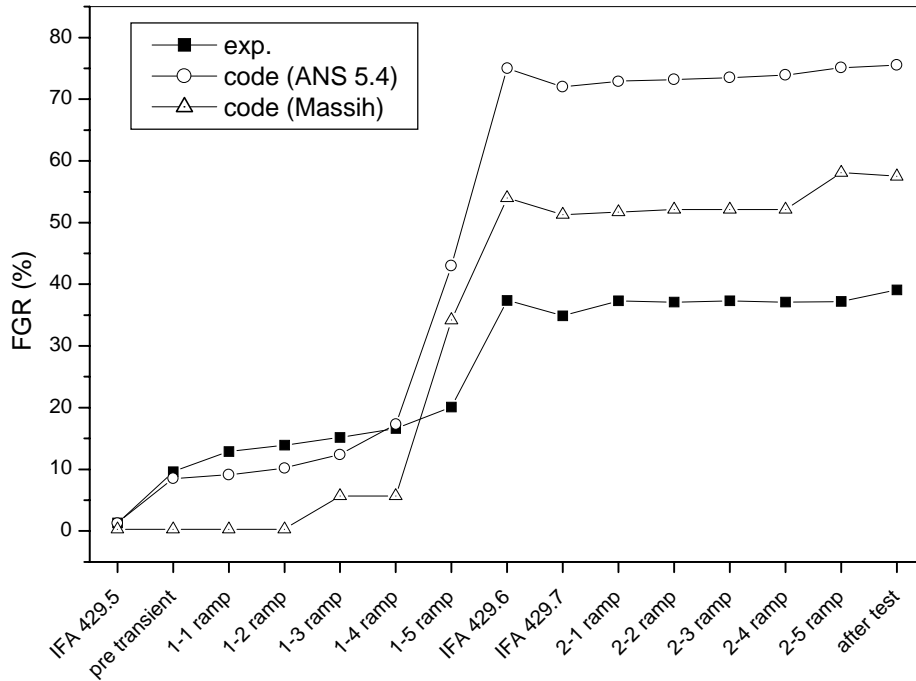


그림 11 CH 핵연료봉의 핵분열 기체 방출비 비교

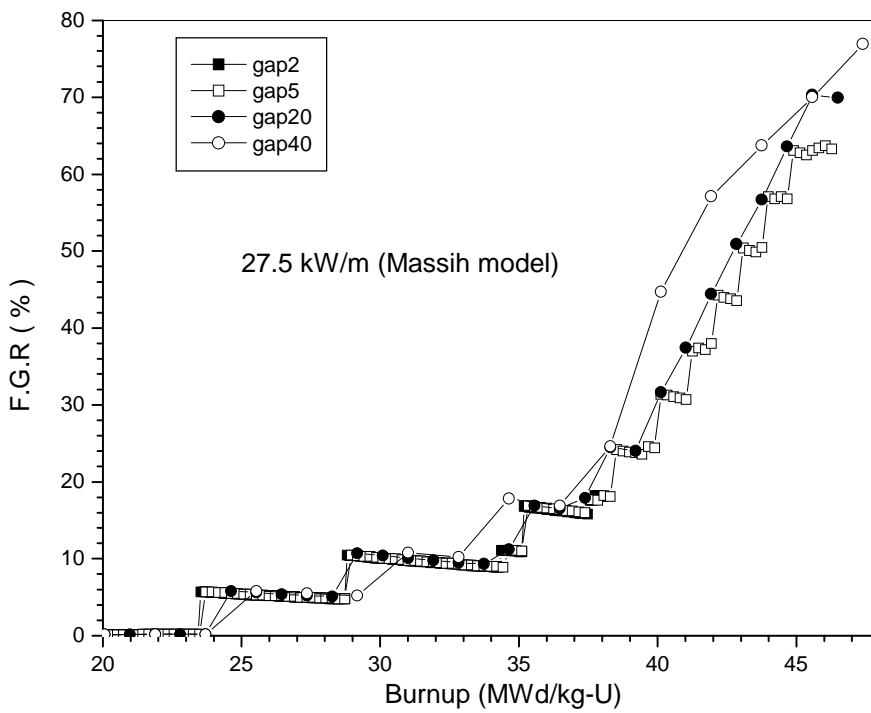


그림 12 FRAPCON-3내의 핵분열 기체 모형 중 Massih 모형의 거동

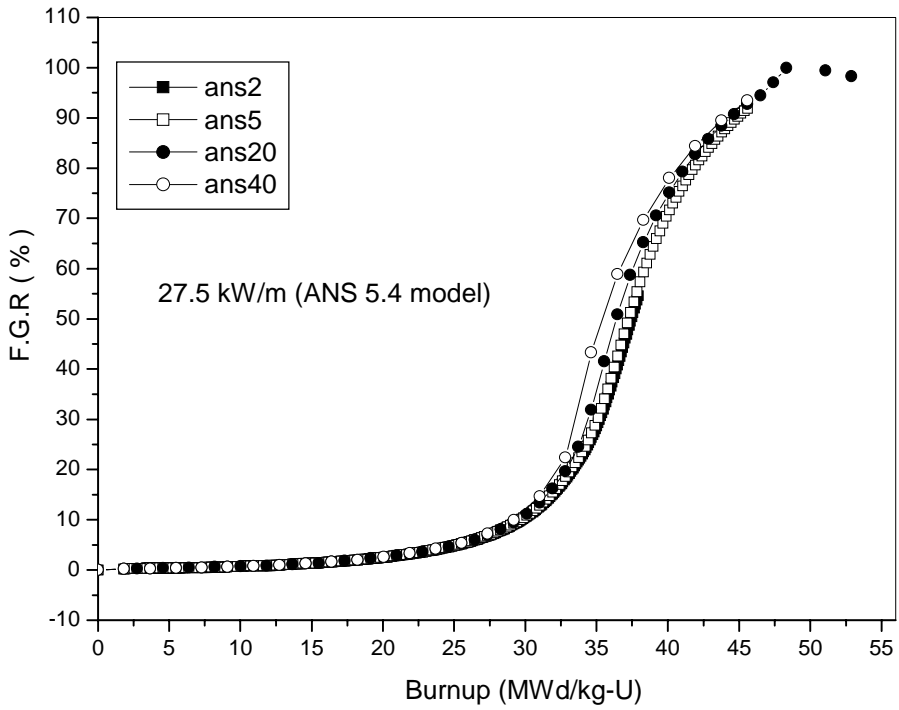


그림 13 FRAPCON-3내의 핵분열 기체 모형 중 ANS 5.4 모형의 거동

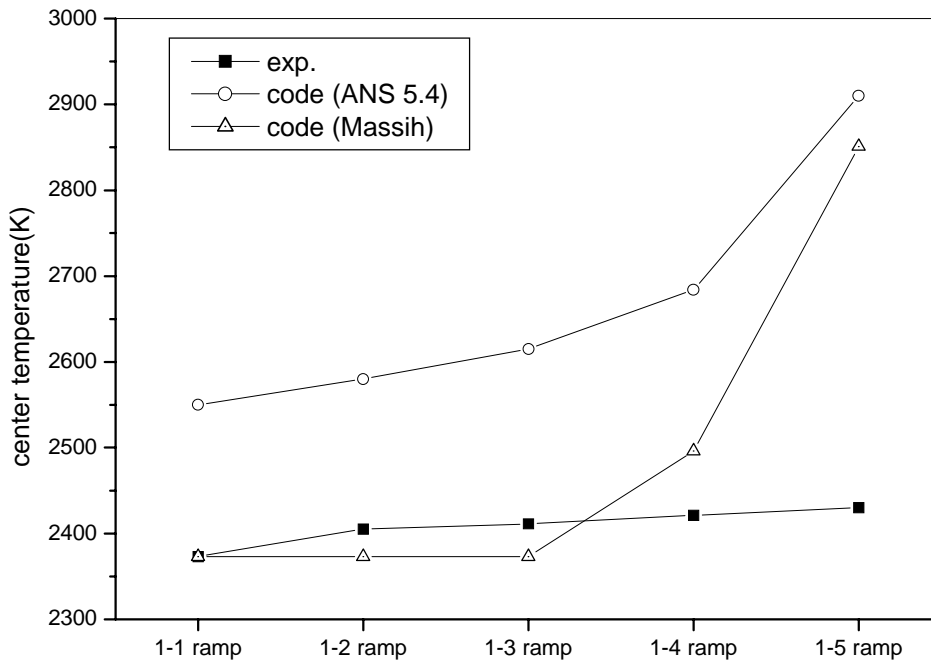


그림 14 Ramp-1 시험에서의 핵연료 중심온도와의 비교

2.3 ANF 핵연료(RISO-3) 실험 분석

이 실험은 덴마크의 Riso National Laboratory에서 bump 시험을 통한 핵연료내의 핵분열 기체 생성 및 반경에 따른 분포를 알아보기 위한 실험으로서 3가지 핵연료 형태(IFA-161, GE BWR, ANF PWR)를 각각 HALDEN, Quad Cities 1 & Millstone 그리고 Biblis-A 에 연소시킨후 BR-3 에 넣어 Bump 시험을 수행하였다. 그 중 본 연구에서는 Biblis A 원자로에 연소시킨 ANF 핵연료들 중 AN2 핵연료를 연구하였다. 이 핵연료봉은 41.54MWd/kg-U 으로 초기 시험전 연소를 시켜 핵연료봉을 개봉하지 않은 상태에서 Bump 시험을 한 것으로 FRAPCON-III 코드에 적용하기에 적합한 형태이다.

Biblis-A 원자로에 사용한 핵연료는 표-3 과 같은 제원을 이용하여 그림-15,16과 같이 제작되었으며 AN2 핵연료는 핵연료 계장에서 중간 위치에 장착하였다. 이 실험은 Biblis-A PWR에서 1982년 7월부터 1986년 10월까지 4주기(7,8,9,10)동안 연소초기연소를 시켰고, 1987년 11월6일~9일까지 ramp 시험을 시행하였다.

그림-17은 AN2 핵연료의 초기 연소시 출력분포와 ramp 시험시 출력을 연소도와 시간에 따라 나타내었다. 초기 연소시에는 매주기마다 출력을 올렸다가 서서히 내리는 운전을 하였고 ramp 시험시 약 37 kw/cm 정도의 출력을 약 60시간동안 진행시켰다. 그림-18은 ramp 시험후 핵연료봉을 축방향 위치별로 절개하여 반경방향에 따라 남아있는 Xe 량을 핵연료와의 무게비로 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 핵연료 중심으로 갈수록 핵분열 기체가 계산값보다 많이 방출된 사실을 알수 있으며 특히 고온의 반경 방향의 분포가 계산값의 온도분포보다 핵연료 반경의 반이상 거리까지 분포하는 것으로 예측된다. 여러 축방향 위치에서 실험값보다 계산값이 크게 나오며 이것은 ramp 시험후 40일 정도이후에 핵연료를 절개하여 분석한 것이므로 Xe 동위원소들의 짧은 반감기를 고려할 때 계산값이 어느 정도 근사한 것으로 판단한다.

표 3 AN2 핵연료봉 제원

내용	단위	값	내용	단위	값
pellet 외경	mm	9.053±0.005	피복관 외경	mm	9.261±0.009
pellet 길이	mm	6.91±0.071	피복관 두께	mm	0.775
Dish 체적	%	0.97	총 pellet 길이	mm	541.8
이론밀도	%	93.74±0.434	총 pellet 무게	g	352.99
결정립 크기	micron	6	충진기체		He
농축도	%	2.95	핵연료봉 내압	Bar	23.1
피복관		Zry-4	plenum 길이	mm	60.96
피복관 외경	mm	10.863±0.004			

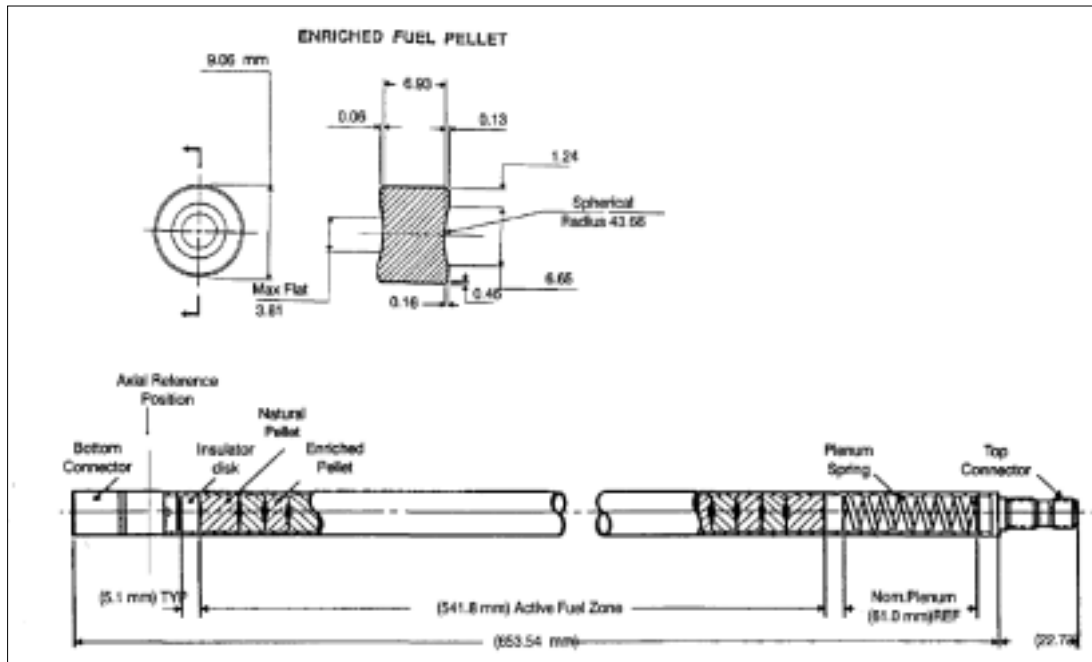


그림 15 AN2 핵연료 및 연료봉 제원

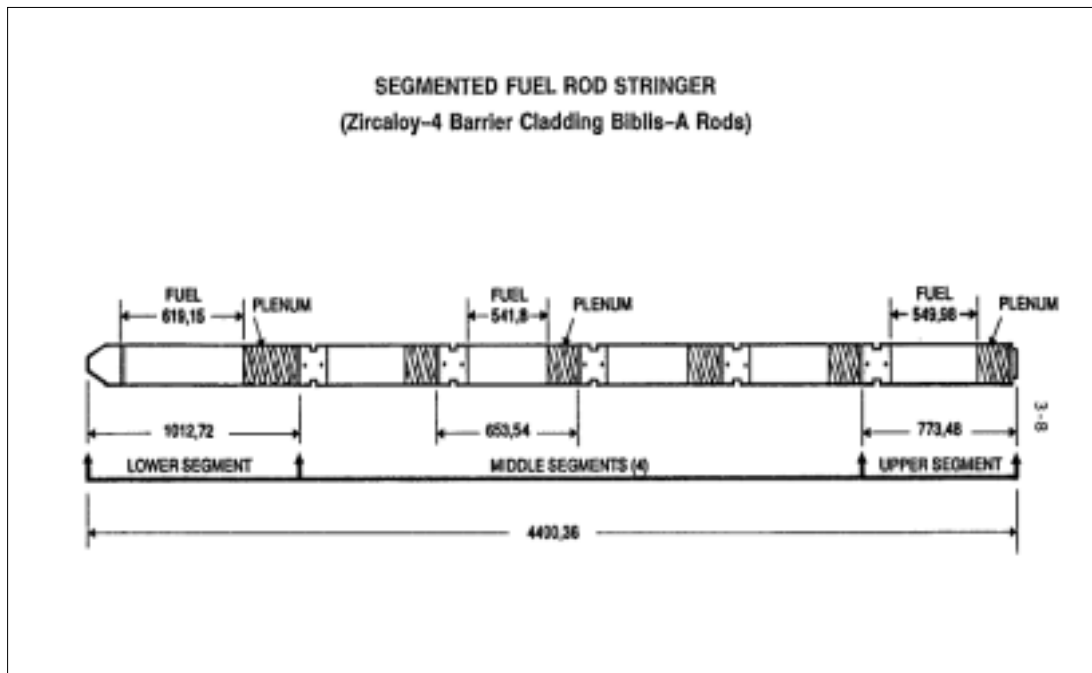


그림 16 핵연료봉의 장착을 위한 계장 제원

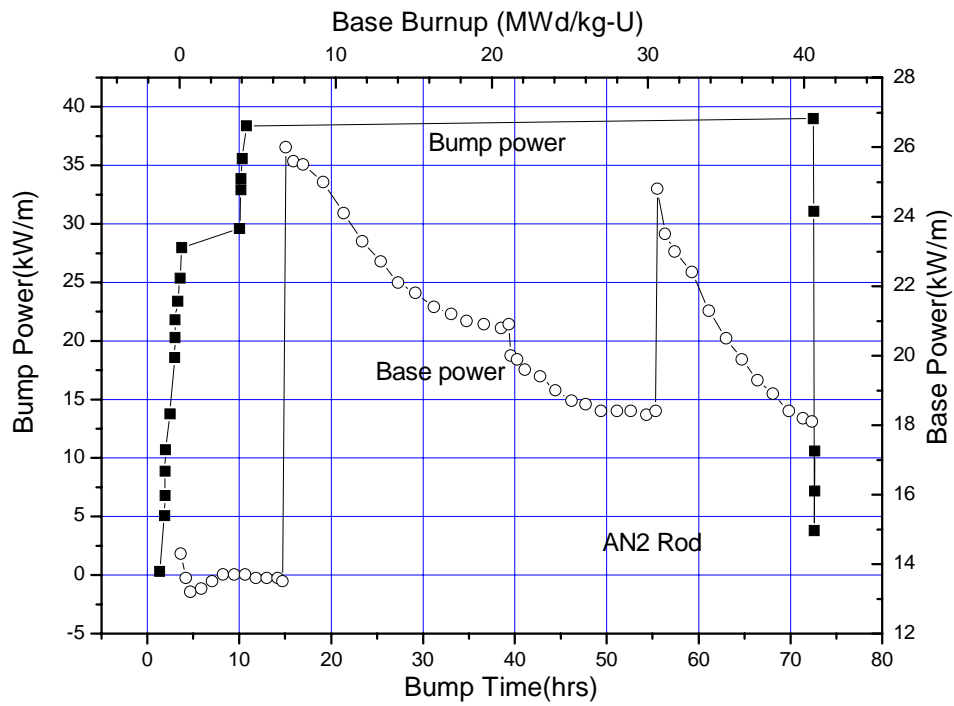


그림 17 AN2 핵연료의 초기 연소 출력과 ramp 출력 분포

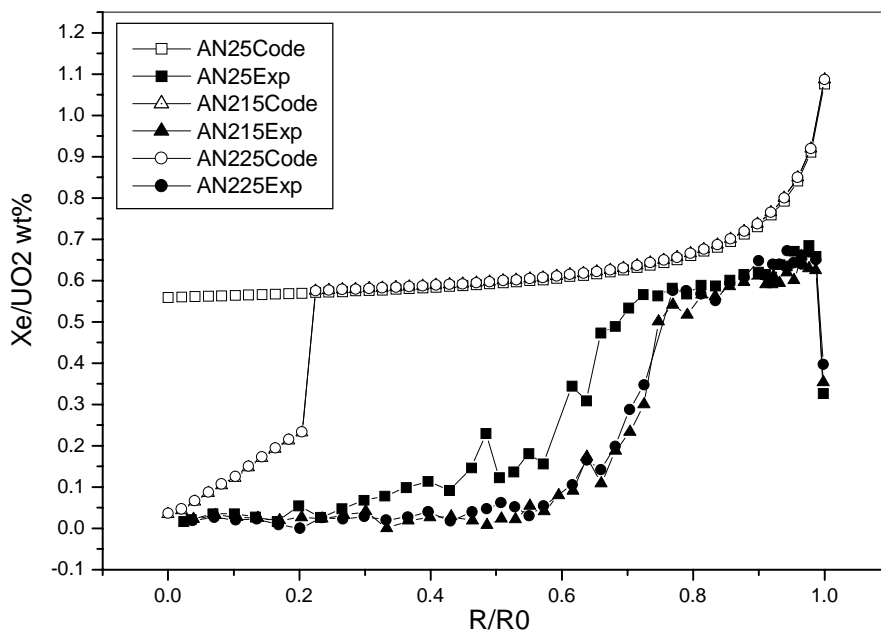


그림 18 pellet 축방향 위치 및 pellet 반경방향에 따른 핵연료내 남아 있는 Xe 량 (AN2)

3. 결 론

본 연구는 FRAPCON-3 코드를 이용하여 핵연료의 온도 및 피복관 직경변화와 ramp 시험을 통한 핵분열 기체 방출비 그리고 pellet 반경에 따른 Xe 분포를 비교하여 보았다. 핵연료 중심온도를 실험값과 비교한결과 CONTACT-1&2 bis 실험에서 알 수 있듯이 연소도가 낮은 부분에서는 계산값이 낮았으나 연소도가 30 MWd/kg-U 이상으로는 IFA-429 및 AN2 실험에서 보듯이 오히려 실험값보다 커짐을 알 수 있었다. 따라서 온도 거동에 대한 모형 연구가 연소도 관점에서 이루어져야 할 것이다.

CONTACT-1&2 bis 실험에서의 피복관 직경 변화는 어느정도 계산값이 비슷함을 알 수 있었고, IFA-429 실험에서의 핵분열 기체 방출비는 온도에 지배적인 영향이 큰 것으로 본다. 또한 AN2 실험에서는 반경방향에 따른 고온의 분포가 계산값보다 넓은 범위에 있는 것으로 판단하며 반경방향의 온도구배에 대한 분석이 요구된다.

이 모든 결과를 요약해볼 때 온도 계산의 중요성이 부각되어야 할 것이며 특히 온도 계산에 가장 중요한 열전도도 모형이 연소도에 따라 미치는 영향을 면밀히 분석할 필요가 있다.

4. 참고문헌

- 1) D.D.Lanning,C.E.Beyer,C.L.Painter, "FRAPCON-3: Modifications to Fuel Rod Material Properties and Performance Models for High-Burnup Application.", NUREG/CR-6534 (1997)
- 2) IFPE Database (Release December 2000) CD-#2, OECD, NEA,(2000.12)
- 3) "Background and Derivation of ANS 5.4 Standard Fission Product Release Model",NUREG/CR-2507