

DUPIC 핵연료 공정에서의 핵임계 안전성

신 명원, 김 명현
경희대학교

요 약

본 연구에서는 DUPIC 핵연료 주기개발이 상업화 됨을 전제로 하였을때 핵연료 제조 공정에 대하여 핵임계 해석을 수행하였다. 계산 과정은 PWR 핵연료봉을 해체하는 공정과 분말을 취급하는 공정으로 나누었으며, 이중 우발성의 원리를 기초하여 가상 사고 조건을 고려하였다. 핵임계 해석의 결과, DUPIC 핵연료 제조 공정에서는 특별한 가상조건을 제외하고는 핵임계의 위험은 없는 것으로 나타났다.

1. 서 론

DUPIC 핵연료 주기는 공학적, 경제성, 안전성 측면에서의 건전성에 대해 KAERI, AECL, 그리고 USDOS가 함께 연구하고 있다. DUPIC의 개념은 PWR의 사용후 핵연료를 건식 공정을 통해 Actinide와 Fission Product를 분리하지않고 CANDU의 핵연료를 제조, 공급하는 것이다. 핵연료 제조공정은 종래의 PWR의 것과 큰 차이는 없으나 다음의 몇가지 공정에서 차이를 보인다. 첫째, 모든 공정은 많은 방사선 때문에 Hot cell에서 원격조정으로 운전되어야 하는데, 이 방사선의 문제는 공장의 크기와 취급 물량을 제한하게 되므로, 상업화에 있어서 약점이 되고 있다. 두번째로, PWR의 사용후 소결체를 산화와 환원을 반복하는 OREOX 공정을 들수 있는데, 이 공정에 앞서 사용후 핵연료는 냉각, 해체, 절단(cutting), 연마(decladding)공정을 거치게 된다.

본 연구에서는 균질 혼합공정, OREOX공정, 그리고 압분공정에서 취급하게되는 분말형태의 핵연료와 Cutting공정과 Decladding공정에서 취급되는 핵연료봉으로 나누어 계산을 수행하였으며, 연구의 목적은 상업화 계획에 있는 DUPIC 핵연료 공정에서의 핵임계 사고의 위험성을 검토하는데 있다. 계산은 새로운 핵연료 공정을 취급하게 되므로 가장 정확한 계산을 하는 것으로 인정받고 있는 MCNP 4.a code를 사용하였다.

2. 계산 과정

계산은 크게 DUPIC 핵연료 분말과, 사용후 핵연료봉에 대해 두가지로 나누어 수행되었다. 계산에 사용된 가정은 다음과 같다.

1. 사용후 핵연료는 냉각기간을 거치지 않고, 분말 제조공정으로 공급된다.
2. 원자로 내에서의 위치에 따른 연소도의 불균질성은 10%(33,000 MWD/MTU에 대해)로 고려하였으며, 동위원소 조성의 계산은 CASMO-3 code를 사용하였다.
3. Fission Product는 배제하였다. 하지만 실제로는 DUPIC 핵연료는 모든 Fission Product를 포함하고있다.
4. 침수 사고를 고려하였으며, H/U의 비율을 변화시키면서 최적의 감속 조건을 고려하였다.

2.1 분말 계산

CASMO-3 code의 결과를 바탕으로 하여 각 핵종의 질량비를 계산하였으며, 분말이 균질하게 분포되어 있다고 가정을 하였다.

침수 사고시에 분말의 농도를 변화시키면서 임계도값을 구하였고, 다음으로 감속재의 밀도 변화에 대한 임계도의 변화를 구하였다. 그림 1과 2에서 알 수 있듯이 물속의 분말의 농도가 3.0g/cc에서 가장 높은 임계도를 보였으며, 감속재의 밀도가 높을수록 임계도도 높게 나타났다. 이러한 최적의 감속조건에서 기하학적으로 핵임계의 위험이 가장 큰 구형의 모델에 물 반사체를 고려하여 미임계 질량 한계치를 구하였다. 그림 3에서 알 수 있듯이 196.3ton의 질량에서 K-eff+2 σ 값이 미임계 안전기준인 0.95가 되었다.

2.2 Cutting & Decladding 공정에서의 계산

핵연료봉을 취급하는 공정에서는 분말을 취급하는 것과는 다른 비균질 효과를 받게 되므로 임계의 위험이 보다 크다고 할 수 있다. 따라서 먼저 핵연료봉의 적재 형태에따라서, Rectangular 형태와 Triangular 형태에 대한 민감도 계산을 하였으며, 각각의 형태에대해 2x2, 3x3의 계산을 하였다. 계산 결과, Rectangular array형태로 적재된 경우가 물에의한 감속효과를 많이 받게 되므로 더 높은 임계도를 보였다. 또한 연소 상태와 첨가물(Oxygen, F.P.)들에 대한 민감도 해석도 수행하였으며, 결과는 표 1에 나타내었고, 연소도에 의한 임계도의 민감도가 가장 큰 것을 알 수 있다.

다음으로 핵연료봉의 수를 늘려가면서 미임계 한계치를 구하였는데, 기준이 되는 계산조건으로는 Hexagonal array로 적재되고, F.P.를 함유하지 않았으며, 물에 완전히 침수된 사고시를 가정하였으며, 추가적으로 여러가지 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 표 2에서 알 수 있듯이 hexagonal array로 사용후 핵연료봉 271개(9-ring)개가 적재되었을때, 임계도가 안전기준인 0.95를 초과하고있다.

3. 결 론

현재 구상중인 DUPIC 핵연료 공장에서 요구하는 양이 연간 100ton정도인것을 고려하면, 분말의 경우 196.3ton의 값은 핵임계 사고에 영향을 미치지 않는 수치이다. 분말을 취급하는 공정중에서 임계사고의 위험이 가장 큰것은 균질 혼합공정인데, PWR 핵연료 제조공정에서는 균질혼합기 외부에 Cadmium막을 사용하여 임계사고를 예방하고 있다. 하지만 DUPIC의 경우는 그러한 추가적인 예방조치는 필요로 하지않는다.

사용후 핵연료봉은 DUPIC 핵연료 제조공정에서 처음단계인 Cutting공정과 Decladding공정에서 취급된다. 공정에서 요구하는 생산량이 500 kg/day이며, 생산율이 40%임을 고려하면 1250kg, 즉 2개의 핵연료 집합체(17x17)를 필요로한다. 이때 공정에서 사용하는 핵연료봉수는 약 564개인데, 계산 결과에서 알 수있듯이 271개의 핵연료봉이 적재된 경우에 이미 임계도값은 안전 기준치를 넘어 서고 있다. 271개의 연료봉이 적재된 경우는 반경이 약 13cm가량이 되는데 실제적으로 271개의 연료봉을 한꺼번에 절단할 수 없으며, 또한 271개의 연료봉이 Hexagonal array로 적재되는 경우는 있을 수 없으므로, 이 공정에서도 핵임계사고의 위험은 없다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. B.W. Rhee et al., "A Comparative Analysis on Low Void Reactivity DUPIC Fuel Bundle," Proc. of Intl Conf on Math and Comp, Reactor Physics, and Environmental Analyses, p.1314, Portland, Oregon(1995).
2. M.S. Yang et al., "Conceptual Study on the DUPIC Fuel Manufacturing Technology," Proc. of Intl Conf and Tech Exhibition on Future Nuclear System; Global '93, Seattle, USA(1993).
3. Hugh K. Clark, "Criticality and Safe masses and Dimensions of Lattice of U and UO₂ Rods in Water."(1962).

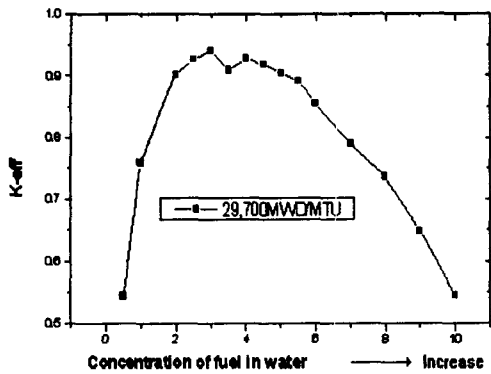


그림 1. 분말농도변화에 따른 임계도의 변화

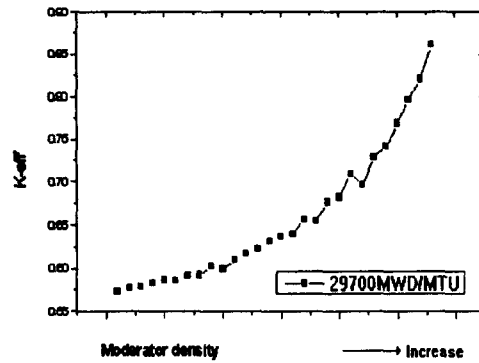


그림 2. 감속재 밀도에 따른 임계도의 변화

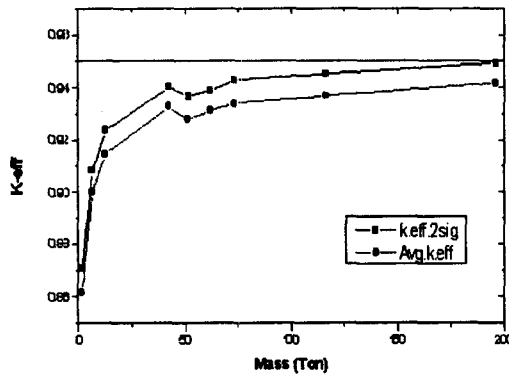


그림 3. 질량변화에 따른 임계도의 변화

표 1. 217개의 핵연료봉에 대한 임계도의 민감도 해석

	K-eff $\pm \sigma$
29,700MWD/MTU w/o Oxygen & F.P	0.96858 \pm 0.00396
29,700MWD/MTU with Oxygen, w/o F.P	0.90470 \pm 0.00468
29,700MWD/MTU with Oxygen & F.P	0.89749 \pm 0.00420
33,000MWD/MTU w/o Oxygen & F.P	0.95600 \pm 0.00390

표 2. 핵연료봉 수에 따른 임계도의 변화

Hexagonal Array			Rectangular Array	
Rods number	K-eff $\pm \sigma$ (w/o F.P)	K-eff $\pm \sigma$ (with F.P)	Rods number	K-eff $\pm \sigma$ (with F.P)
169	0.85555 \pm 0.00438		196	0.86587 \pm 0.00403
217	0.90470 \pm 0.00468	0.89749 \pm 0.00420	225	0.89031 \pm 0.00427
271	0.95812 \pm 0.00371	0.93983 \pm 0.00428	256	0.91382 \pm 0.00427
331	0.99076 \pm 0.00382	0.98192 \pm 0.00425	289	0.94353 \pm 0.00415
397		1.00919 \pm 0.00435		