

핵연료 가공시설의 핵임계도 평가 지침

신 명원, 김 명현
경희대학교

요 약

국내 핵연료 가공시설에 대한 핵임계 안전성을 가상 사고 조건하의 핵임계 상태를 확인하는 방법으로 평가하였으며, 이미 사용되어왔던 설계 안전 변수의 안전성도 검증하였다. 또한 MOX 핵연료 가공시설에 대한 안전 변수도 같은 방법으로 산출하였다. SCALE system을 사용하여 임계도 계산을 수행한 결과, 국내 UO₂ 핵연료 가공시설과 이 시설에 적용된 안전 변수는 극단적인 사고시에도 핵임계 측면에서 충분한 여유도를 가지고 있었다.

1. 서 론

원자력 발전량이 늘어남에 따라 핵연료 가공 시설이 증설될 계획에 있으며 현재 국내에서는 PWR과 CANDU에 사용되는 세라믹 형태의 UO₂ 핵연료가 성형, 가공되고 있다. 또한 MOX 핵연료와 DUPIC 핵연료 같은 새로운 핵연료에 대한 가공의 필요성도 점차로 증가되고 있다. 하지만 이들 시설에 대한 정확한 핵임계 안전성 평가를 위한 지침이 마련되어 있지 않다. 핵연료 가공 시설에 대한 핵임계 안전성 평가는 정상 운전시의 임계도를 평가하여 충분한 여유도를 가졌음을 확인하는 방법과 가상 사고시에 시설들이 미임계를 유지하도록 하는 두가지의 방법이 있다. 현재 국내의 대부분의 원자력 관련 시설들이 미국의 기준을 따르고 있으나, 기존 핵연료 가공 공장의 경우는 이와 달리 안전 변수에서 독일의 규제치를 적용하였다. 이 안전변수는 1979년 Handbuch der kritikalität의 자료에 근거하고 있으나, 최근 발표된 ANS의 값과 비교해 볼때 표 1과 표 2에서 보면 알 수 있듯이 약간 상이하며 ANS의 안전변수가 좀 더 엄격하게 책정되어 있음을 알 수 있다. 그러므로 원자력 시설들의 안전성이 점차로 중요해지는 상황에서, 기존의 시설에 이미 적용된 안전변수의 안전성에 대해서도 재평가가 필요하여졌다. 본 연구에서는 기존 핵연료 가공 시설에 대한 임계도 해석과 안전 변수의 재평가 및 MOX 핵연료에 대한 안전변수의 산출이 수행되었다. 계산은 SCALE system의 임계도 계산 전용 코드인 KENO V.a와 공명영역에 대한 보정코드인 NITAWL II를 사용하였으며,

27군 핵자료를 사용하였다.

2. UO₂ 핵연료 가공시설과 책임계도

2.1 가공공정의 특성

핵연료 가공공정은 핵분열 물질의 분말상태에서 부터 핵연료 소결체(pellet)를 생산하기 까지의 공정으로 균질혼합, 압분, 소결, 연삭공정을 거치게 된다. 각각의 공정에서 기하학적 구조 설계가 잘못 되거나 공정의 물량제어가 실패하게 되면, 핵분열 물질이 안전 한계치 이상으로 모이게 되어 예기치 못한 사고시에는 임계사고가 발생하게 된다. 책임계 해석은 계산 대상을 직접 모델링하여 계산하는 방법과 구조가 너무 복잡하여 직접 모델링이 불가능한 경우 안전 변수를 적용하여 임계도 해석을 하게 된다. 보수적인 평가를 위해 가장 위험한 가상사고 상태에서 최적으로 중성자 감속이 이루어진다고 가정하여 계산을 수행하였다. 이때의 임계 상태를 파악함으로써 가공시설의 책임계 안전성을 확보하게 된다.

2.2 안전 변수의 검증

표 1과 표 2에서 보면 알 수 있듯이 기존의 핵연료 가공시설에 적용된 안전 변수와 ANS의 안전 변수의 값을 비교해보면 ANS의 값이 좀더 엄격하게 규제되었음을 알 수 있다. 따라서 기존 시설에 적용된 안전변수에 대한 안전성 평가가 이루어져야만 한다. 기존시설에 적용된 독일의 안전변수의 안전성 평가 과정에서 1979년 안전 변수 책정시의 계산조건을 알 수 없으므로, 가상사고 조건하에서 안전변수 값들의 임계상태를 계산함으로써 그 값들의 안전성을 검증할 수 있다. 안전 변수에는 안전질량, 안전직경, 안전 질량, 안전 두께등이 포함되며 각 안전 변수에 대한 안전성 평가를 하였다. 가상사고의 조건으로는 물의 범람사고로 인하여 가공시설이 물에 잠기고, UO₂분말내로 수분이 침투된 상태를 가정하였다. 우선적으로 분말 내에 수분함량에 따른 임계도의 민감도 해석을 하였다. 분말내의 모든 공극이 물로 가득 찬 경우의 수분함량은 30.8%이며, 그림 1에서 볼 수 있듯이 수분함량이 30%일때 가장 높은 임계도 값을 나타내고 있다. 사고 조건을 만족시키기 위해, 분말내의 수분함량은 30%이며 외부에 30cm의 물층으로 싸여있는 모델에 대해 검증 계산을 하였다. 안전직경 23.5 cm에 대한 검증시 원통의 길이는 무한한 것으로 가정하였으며, 안전 두께 11 cm의 검증 계산시 평판은 무한 넓이를 갖게 하였고, 안전 질량 18.7Kg-UO₂의 계산은 구형의 계산 모델로 그 크기를 바꾸어가면서 그때의 질량과 임계도를 측정하여 안전성을 검증하였으며 그 결과는 표 3에 나타내었다. 계산 결과에 비추어 볼때 기존의 핵연료 가공시설에 적용된 독일의 안전 변수는 가상사고시에도 미 임계를 충분히 유지 하는 것으로 판명되었으며, 정상 운전시에도 책임계측면에서 충분한 안전 여유도를 갖고 있음을 알 수 있다.

2.3 핵임계도 평가

가상 사고시에 핵연료 가공시설의 핵임계도를 해석하는 방법을 사용하여, 원전 연료 주식회사의 소결체 제조 공정에 대해 임계도 해석을 하였다. 해석방법은 안전 변수의 적용과 직접 모델링하는 방법으로 수행하였으며, 직접 계산시 핵임계에 영향을 주지 않는 부분은 모델링에서 생략되었다. 균질 혼합공정의 핵임계 안전성 평가 계산은 분말이 최대 적재량으로 적재되고, 분말내에 수분의 침투가 이루어졌으며, 물의 범람에 의해 용기가 물에 잠긴 아주 극단적인 사고 조건을 가진 겨우에 대해 수행되었으며, 이 경우에도 $K_{eff}+2\sigma$ 의 값은 0.90920로서 미임계를 유지 하였다. 또한 균질 혼합기에 분말이 7.5%과적재된 경우에도 미임계를 유지 하였다. 1w/o 수분함량이 최대 허용량 임을 감안할 때, 정상운전시 핵임계측면에서 아주 안전하다고 할 수 있다. 압분공정은 압분시설, 분말 저장시설, 집진 장치, 여과기가 포함되며, 핵임계사고의 위험이 있을 설비는 압분 시설의 상,하부에 있는 분말 저장시설인데, 물이 범람하고 수분이 분말 내부로 침투되는 가상 사고조건에서 상부 저장조는 $K_{eff}+2\sigma$ 의 값이 0.90780, 하부 저장조의 $K_{eff}+2\sigma$ 값은 0.94112로 안전한 값을 보였으며 집진 장치와 여과기는 2.2절에서 검증된 안전 직경이하로 설계되었다. 소결로와conveyer belt도 물이 범람하는 가상사고 조건에서 $K_{eff}+2\sigma$ 의 값이 0.88281로 안전함을 보였다. 연삭공정내의 원심분리기는 2.2절에서 검증된 안전 질량을 고려하였으며, 연삭기의 냉각수에 대한 핵임계 안전성은 2.2절에서 검증된 안전 농도 이하로 규제 하였다. 건조로는 안전 질량을 고려하여 설계되었으며, 산화로의 경우 안전직경을 고려 하여 설계 되었으며, 물이 범람하고 수분이 분말 내부로 침투되는 가상 사고조건에서 분말이 과적재 된 경우에 $K_{eff}+2\sigma$ 의 값이 0.90906으로 미임계를 유지 했다.

3. MOX 핵연료 가공시설의 핵임계도

3.1 가공시설의 특징

MOX 핵연료의 가공시설은 UO_2 핵연료와는 달리 매우 독성이 강한 플루토늄을 사용하므로 모든 공정이 Globe box내에서 이루어 져야한다. MOX 핵연료는 UO_2 와 PuO_2 를 섞어서 원하는 농축도의 분말을 얻게되는데, 이때 핵임계 사고의 가능성이 높은 분말의 균질혼합공정을 두번 거치게된다.

3.2 안전 변수의 산출

현재 국내에는 MOX 핵연료의 가공시설이 없으므로 공정에 대한 상세한 해석은 할 수 없었다. 또한 플루토늄을 사용하는 직접 실험도 할 수 없으므로, 코드 계산을 통해 MOX핵연료에 대한 안전변수를 산출하였다. MOX 핵연료의 경우는 우라늄 핵연료의 경우와는 달리 플루토늄을 포함하므로 취급상 많은 주의가 요구되어 진다. 그러므로 가공 시설이 더욱 복잡하게 될 것으로 예상되며, 이에 따라 안전 변수의 적용 범위는 우라늄 핵연료의 경우보다 커질 것으로 예상된다. 우라늄 핵연료에

대한 계산과 같은 가상사고 조건하에서 각 인자들에 대한 민감도 해석을 통해 미임계를 유지할 수 있는 안전 변수의 값을 구해 냄으로써 그 값의 타당성을 확보 할 수 있었다. MOX 핵연료는 $UO_2(0.9\%^{235}U)$ 와 PuO_2 를 혼합하여 원하는 농축도가 되도록 하는데, 본 연구에서는 MOX분말의 농축도는 $5\%-PuO_2$ 와 장주기 운전이 가능한 $8\%-PuO_2$ 이며, 균질계에 대해 계산을 수행하였다. 먼저 MOX분말의 수분함량의 변화에 따른 임계도의 민감도 해석을 하였으며, 그림 2에서 볼 수 있듯이, 분말내의 모든 공극이 물로 가득 채워졌을때, 가장 높은 임계도를 나타 내었다. 그러므로 계산시에는 분말내의 모든 공극이 물로 가득 채워지고 외부에 30cm의 물층을 고려하게 된다. 시설에 안전 변수를 적용할 때에는 그 안전 변수만으로 핵임계도를 제어 할 수 있어야 한다. 그러므로, 안전 변수의 산출시 조건은 다음과 같은 가정을 가지게 된다. 안전 직경의 산출시 원통의 길이는 무한하다고 가정하고, 안전 두께의 경우 평판의 넓이는 무한하다고 가정하였다. 이와같은 조건으로 직경과 두께를 변화시키면서 미임계 한계치를 구하였다. 안전질량은 기하학적으로 중성자의 누출율이 가장 낮아 임계사고의 위험이 가장 큰 구형의 계산모델에 대해 구형의 직경을 변화시키면서 미임계 한계치를 구하였다. 물의 범람과 분말내로 수분이 침투된 가상의 사고를 고려한 계산 조건에서 찾아낸 미임계 한계치에 안전 여유도(safety factor)를 적용하여 안전 변수를 산출하였으며 그 결과를 표 4에 나타내었다.

4. 결 론

핵연료 가공시설의 임계도 해석은 예기치 못한 사고시에도 미임계를 유지할 수 있는지의 여부를 확인하여야 하므로 2중 또는 3중의 아주 극단적인 사고조건들을 가정하여 계산되어야 하며, 계산결과 본문의 내용에서 보았듯이 원전연료 주식회사의 시설들은 핵임계 안전성 측면에서 안전하게 설계되어 있음을 알 수 있다. MOX 핵연료의 경우도 UO_2 의 경우와 같은 방법으로 핵임계도 해석이 이루어져야 하며, 본 연구에서는 안전 직경, 안전 질량, 안전 두께만을 산출하였으나 각 가공 시설의 특성에 따라 안전 변수의 선정과 각 안전 변수의 산출이 요구될 것이다.

참고 문헌

1. Hugh K. Clark, "Critical and Safe Masses and Dimensions of Lattice of U and UO_2 Rods in Water," 1962
2. "핵연료 가공공장 핵임계도 해석 참고자료," 현대 엔지니어링, 1993
3. "가압 경수로형 원전연료 성형가공 기술," 한국원전연료주식회사, 1993.3
4. "Committee for Technical and Economics Studies on Nuclear Energy Development and the

Fuel Cycle(NDC)," 1994.8

5. "SCALE-PC, Modular Code System for Performing Criticality Safety Analyses for Licencing Evaluation, Version 4.1," ORNL, 1993

표 1. 기존 시설에대한 안전 변수

구분	비균질계	균질계
질량(kg-UO ₂)	15.8	18.7
농도(kg-U/l)	핵입계 농도의 50%	0.145
부피(l)	17.7	22.5
원통형 안전직경(cm)	21.0	23.5
평판형 안전두께(cm)	9.5	11

※핵분열물질의 형태는 UO₂-H₂O 혼합체이며, 농축도는 5w/o임.

표 2. ANSI/ANS 8.1(1983)에 따른 안전 변수

	미임계한계치 (Subcritical Limit)		안전여유도 (Safety Factor)	안전 변수 (Safety Parameter)	
	비균질계	균질계		비균질계	균질계
질량 (kg-U) (kg-UO ₂)	27.2	31.0	1/2.3	11.82 13.40	13.47 15.28
부피(l)	19.5	26.0	1/1.3	15.0	20.0
원통직경(cm)	22.3	24.3	1/1.1	20.2	22.0
평판두께(cm)	9.79	11.2	1/1.2	8.15	9.33
면적농도(g/cm ³)	10.24	11.0	1/1.3	7.87	8.46

표 3. 안전 변수의 핵입계 안전성 계산 결과

안전 변수	Keff + 2σ	
안전 직경	0.93263	
안전 질량	20.27kg-UO ₂	0.80391
	39.58kg-UO ₂	0.88701
안전 농도	0.73357	
안전 두께	0.55093	

표 4. MOX 핵연료에 대한 안전 변수

	미임계 한계치		안전 여유도 (Safety factor)	안전 변수	
	5%-PuO ₂	8%-PuO ₂		5%-PuO ₂	8%-PuO ₂
안전 직경	37cm	35cm	0.85	31.45cm	29.75cm
안전 두께	20cm	19cm	0.75	15cm	14.25cm
안전 질량	66.29kg	56.60kg	0.43	28.50kg	24.34kg

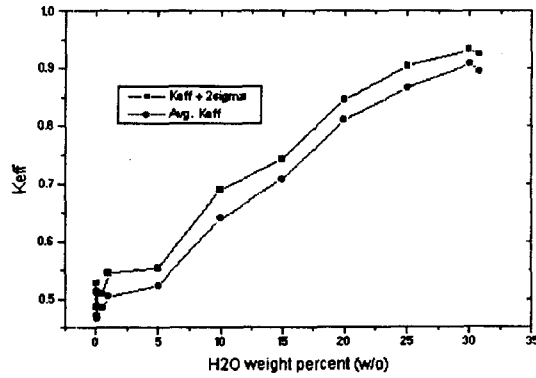


그림 1. UO₂분말내의 수분함량의 변화에 따른 임계도의 변화

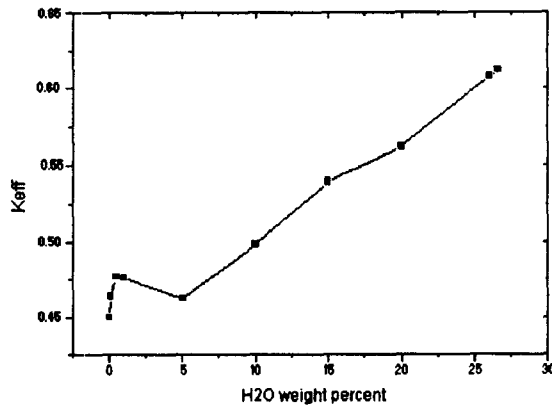


그림 2. MOX 분말내의 수분함량의 변화에 따른 임계도의 변화