

용융염원자로의 연료염조성에 따르는 림계특성

김성지, 송용혁

현시기 원자로의 안전성문제와 핵연료자원의 고갈로 하여 세계의 많은 나라들이 전 환성핵연료물질인 토리움을 리용하여 핵에너지 생산하는 용융염원자로에 대한 개발 계획을 세우고 가까운 앞날에 실현하기 위하여 연구를 심화시키고있다.[1-3]

용융염원자로(MSR)는 감속재로서 흑연을 리용하는 열중성자원자로이며 토리움-우라늄연료순환으로 조종한다. 용융염원자로의 본질적인 우점은 대기압조건에서 핵분열 반응을 하는 연료염이 로심과 뿔프, 열교환기를 포함하는 1차순환계통으로 흐르면서 열 발생원천 및 열매로 동작함으로써 로의 안전성을 높이고 연료를 재생하여 리용한다는것이다. 그러므로 연료염의 조성에 따라 용융염원자로의 림계특성이 변하게 된다.

론문에서는 열출력이 2.5MW인 용융염원자로에서 각이한 조성을 가지는 연료염들의 림계특성을 연구하였다.

1. 연료염들의 성질

일반적으로 용융염원자로의 연료염들은 화학적으로 안정하고 녹음점이 낮아야 하며 중성자포획자름면적이 작고 열전도성이 좋아야 한다.

용융염원자로연구에서 리용되고있는 연료염들은 리튬, 베릴리움, 토리움, 우라늄 불화물들의 각이한 혼합비율로 구성되어있다. ${}^7\text{Li}$ 의 동위원소순도는 99.99%이상이어야 한다. 연료염들의 조성을 이 원소들로 하는것은 용융염의 녹음점을 낮추어 원자로반응대안에서의 흐름특성을 개선하며 중성자의 흡수를 줄여 핵적특성을 개선하자는데 있다. 초중 수소발생을 최소로 하기 위하여 ${}^7\text{Li}$ 을 Na로 교체하고 화학적독성을 최소화하기 위하여 Be를 Zr로 교체하려는 연구도 진행되고있다.[1]

용융염원자로의 대표적인 연료염조성비는 표 1과 같다.

표 1. 용융염원자로의 대표적인 연료염조성비(mol%)

조성	연료염 1	연료염 2	연료염 3	연료염 4	연료염 5
LiF	72	63	71.7	68	73
BeF ₂	21	25	16	20	16
ThF ₄	6.7	11.7	12	11.7	10.7
UF ₄	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

표 1에서 보여주는것처럼 매개 연료염들의 혼합비율은 차이난다. 그러므로 이 연료 염들의 녹음점과 밀도에서도 차이가 생긴다.

녹음점과 밀도는 실험에서 결정하며 온도에 따르는 밀도변화는 매 연료염에 따라 경 험적인 실험식들로 주어진다.

연료염들의 밀도계산식은 다음과 같다.

$$\text{연료염 1(녹음점 } 500^{\circ}\text{C)} \quad \rho_1 = 3.153 - 5.8 \cdot 10^{-4} T(^{\circ}\text{C})$$

연료염 2(녹음점 500°C) $\rho_2 = 3.644 - 6.3 \cdot 10^{-4} T(^{\circ}\text{C})$

연료염 3(녹음점 490°C) $\rho_3 = 3.934 - 6.68 \cdot 10^{-4} T(^{\circ}\text{C})$

연료염 4(녹음점 480°C) $\rho_4 = 3.687 - 6.5 \cdot 10^{-4} T(^{\circ}\text{C})$

연료염 5(녹음점 500°C) $\rho_5 = 3.628 - 6.6 \cdot 10^{-4} T(^{\circ}\text{C})$

이 식들에서 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ 는 연료염밀도이고 $T(^{\circ}\text{C})$ 는 연료염의 온도이다. 여기서 원자로의 평균온도를 600°C로 보고 계산을 진행한다. 흑연의 밀도는 $1.84\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. 주어진 연료염들의 조성비와 위의 공식들을 리용하여 구한 연료염들의 밀도에 기초하여 연료염들의 립계특성을 2.5MW용융염원자로에서 전용로심계산도구들인 WIMS와 CITATION프로그람을 리용하여 평가한다.

2. 연료염들의 립계특성평가

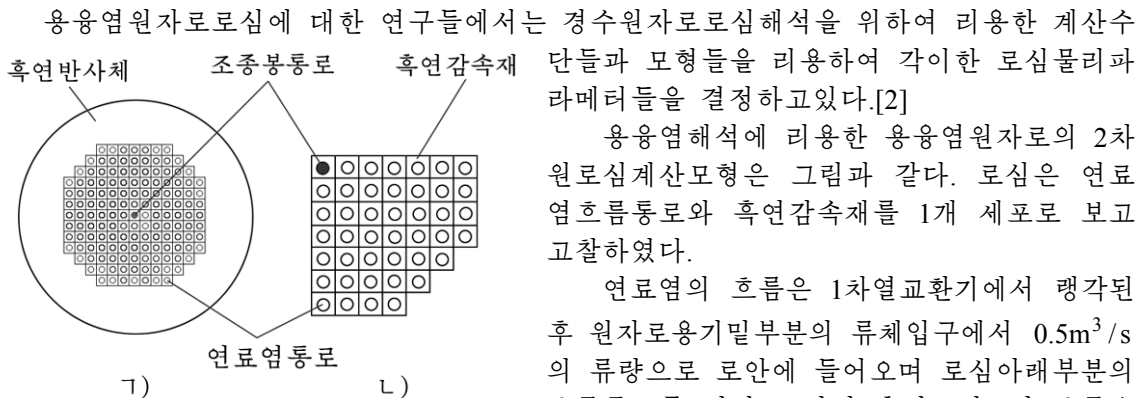


그림. 용융염해석에 리용한 용융염원자로의 2차원로심계산모형

1) 원자로정방향격자의 수평자름면도,
2) CITATION계산을 위한 1/4모형

로를 따라 로심밖으로 나가 순환뿔프와 1차열교환기에로 흘러간다.

계산에서 리용한 열출력이 2.5MW인 용융염원자로로심의 설계파라메터들은 표 2와 같다.

표 2. 열출력이 2.5MW인 용융염원자로로심의 설계파라메터

파라메터	특성값	파라메터	특성값
열출력/MW	2.5	로심흑연몹/체적%	70
로심등가직경/m	2.4	반사체흑연몹/체적%	100
로심높이/m	2.5	연료염입구온도/°C	570
연료통로직경/cm	10	연료염출구온도/°C	706
흑연연료통로관수/개	145	연료염흐름속도/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.5
반경방향반사체두께/m	0.6	연료염조성	LiF, BeF ₂ , ThF ₄ , UF ₄
축방향반사체두께/m	0.6	연료염조성비	0.3
원자로구조재료	하스텔로이-N합금		

립계특성평가는 주어진 5개 종류의 연료염들에 대하여 열출력이 2.5MW인 용융염원자로에서 유효중식결수를 평가하는 방법으로 진행하였다. 계산에서는 원자로의 기하학적

크기 및 재료들을 고정시키고 감속재세포계산은 WIMS, 림계탐색계산은 CITATION으로 매개 연료염들에 대하여 진행하였다. 정방형세포크기는 $17.72\text{cm} \times 17.72\text{cm}$ 이고 연료통로의 직경은 10cm , 통로관의 두께는 0.1cm 이다.

연료염의 종류에 따르는 유효증식결수와 물질량분률은 표 3과 같다.

표 3. 연료염의 종류에 따르는 유효증식결수와 물질량분률

연료염종류	연료염 1	연료염 2	연료염 3	연료염 4	연료염 5
k_{eff}	1.051 563	0.993 148	0.994 760	0.998 138	1.028 558
Th/U(물질량분률)	22.3	39	40	39	35.66

계산결과로부터 림계에 도달하는것은 연료염 1, 연료염 5이며 연료염에 포함되어있는 우라늄의 함량은 다같이 $0.3\text{mol}\%$ 이지만 림계도달특성이 토리움의 함량에 따라 달라진다는것을 알수 있다. 또한 연료염 2와 연료염 4에서 토리움의 함량이 같지만 림계도달특성이 차이나는것은 베릴리움의 함량에서 차이가 있기때문이다. 이로부터 2.5MW용융염원자로에서는 Th/U의 물질량분률이 22.3과 35.66인 연료염 1과 연료염 5를 리용할수 있다. 대규모용융염원자로들에서는 이 값이 40을 넘어서고있다. 그리하여 핵연료증식량과 출력을 높이고있다.

맺 는 말

열출력이 2.5MW인 용융염원자로에서는 연료염 1과 연료염 5가 림계도달특성을 만족시킨다는것을 알수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Dallas et al.; Ann. Nucl. Energy, 110, 1, 2017.
- [2] L. Limin et al.; Prog. Nucl. Energy, 86, 1, 2016.
- [3] C. Fiorina et al.; Prog. Nucl. Energy, 68, 153, 2013.

주체109(2020)년 3월 5일 원고접수

Critical Character Corresponding to Fuel Salt Composition of Molten Salt Reactor

Kim Song Ji, Song Yong Hyok

In this paper, we calculated an effective multiplication factor corresponding to fuel salt composition of 2.5MW molten salt reactor and proved that fuel salts 1 and 5 are satisfied with the critical achievable character.

Keywords: MSR, fuel salt, effective multiplication factor