

소형원자로의 합리적인 랭매선택과 구조물질들의 상태방정식에 대한 연구

홍권룡, 김련희

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《세포공학, 유전자공학, 초고압물리학, 극저온물리학을 발전시키며 원자에너지, 태양 에너지를 비롯한 새로운 에너지를 개발하며 레이자와 플라즈마를 깊이 연구하여 인민 경제에 널리 리용하도록 하는데 힘을 넣어야 하겠습니까.》(《김일성전집》 제72권 292페이지)

원자로의 랭매는 원자로의 목적과 사명, 형태에 따라 여러가지로 선택된다. 소형원자로의 랭매로 어떤 물질이 리용[2, 3]되는가에 대하여서는 밝혀졌으나 그것이 왜 합리적인가 하는 자료는 밝혀진것이 없다.

또한 세계적으로 많은 상태방정식자료기지들이 개발리용되고있으나 그 생성코드는 비공개로 되고있으므로 우리 식의 코드개발에서 상태방정식자료기지서고작성은 필수적인 문제로 나선다.

우리는 소형원자로에 합리적인 랭매를 선택하고 그것의 물리화학적 및 열력학적특성들을 고찰하였으며 임의의 물질들에 대한 상태방정식을 생성하는 코드를 작성하고 소형원자로구조물질들의 상태방정식을 얻어내었다.

1. 합리적인 랭매선택

원자로의 소형화를 실현하기 위해서는 액체금속을 랭매로 리용하여야 한다. 액체금속은 콤팩트화된 로심을 설계할수 있게 하고 높은 랭매온도($\sim 500^{\circ}\text{C}$)를 보장하여 열을 잘 리용할수 있게 할뿐아니라 좋은 체계안정성을 보장할수 있다. 액체금속으로는 세가지 물질이 주목된다. 그것은 Na, Pb, 연-비스무트용융물(LBE 혹은 PbBi)이다. Pb와 PbBi는 둘 다 중성자적으로 안정하고 높은 끓음점을 가지며 공기나 물과 반응하지 않고 서로 비슷한 밀도와 열수력학적인 특성(열전도도, 열용량, 뿔프출력)을 가진다.

Pb와 PbBi의 특성은 표 1과 같다.[1]

표 1. Pb와 PbBi랭매의 비교

지표	비교내용
녹음점	PbBi : 123°C , Pb : 327°C
녹음팽창	녹음때 Pb의 체적팽창은 3.6%, PbBi는 거의 팽창하지 않음
부식	PbBi는 Pb보다 더 잘 부식된다. 동등한 부식속도에서 Pb에 비하여 최대랭매온도가 50°C 나 더 낮은 온도에서 부식된다.
중성자포획	Pb에서의 중성자포획은 PbBi의 2배이상
폴로늄생성	^{209}Bi 에서의 중성자포획때 ^{210}Po 이 생성된다. 이것은 138일의 반감기를 가지고 α 방출하는 공기줄이다.

표 1에서 보는바와 같이 PbBi가 폴로늄생성 그리고 부식효과를 가지고있으나 훨씬 낮은 녹음점과 녹음때 팽창이 없는 특성으로 하여 Pb보다 PbBi를 리용하는것이 더 편리하다. 그것은 이러한 특성들이 체제안정성을 높이고 쉽게 소형원자로를 운반할수 있게 하기때문이다.

Na와 PbBi용융물사이의 열적 및 중성자적특성과 열수력학적파라미터들은 표 2, 3과 같다.

표 2. Na와 PbBi의 열적 및 중성자적특성

특성	단위	PbBi	Na
밀도	g/cm ³	10.14	0.83
비열	J/(kg·K)	143	1 269
점성	kg/(m·s)	0.001 37	0.000 141
열전도도	W/(m·K)	13.7	69.1
열용량	J/(m ³ ·K)	1 450	1 069
열영역포획자름면적	b	0.10	0.53
공명영역포획자름면적	b	0.16	0.32
용융물충돌당 최대중성자 에네르기손실	%	2.0	16.0
원자밀도	10 ²⁴ /cm ³	0.030	0.022

표 3. Na와 PbBi의 T/H실현파라미터들

특성	단위	PbBi	Na
로심에서의 질량흐름	kg/s	4 649	524
속도			
랭매속도	m/s	1.90	2.60
레이놀즈수		157 000	174 000
열수송계수	kW/(m ² ·K)	21.2	64.9
연료켄의 온도상승	K	15.8	5.1
상대뿔프 출력		4.88	1.00

표 2와 3에서 보는바와 같이 Na는 열수력학적견지에서 랭매로서의 특성이 더 좋다는 것을 알수 있다.

또한 연료심의 중성자특성, 열수송실현, 녹음점, 가격, 로의 크기와 질량, 자연순환, 열용량, 뿔프출력, 심으로부터의 감마선방출과 방어물질에서의 가열 등에서 Na가 더 우월하다는것을 알수 있다.

본질적인 특성은 끓음점, 녹음때 체적팽창, 화학반응성, 부식/침전, PbBi에서의 Po생성과 Na에서의 ²⁴Na 생성, Na랭매를 위한 중간연결관의 필요 등에서 찾아보아야 한다.(표 4)

표 4로부터 운반가능한 소형원자로에서는 랭매로서 LBE를 선택하는것이 편리하다는것을 알수 있다. 가동과정에 생길수 있는 Na의 류출과 그것으로 인한 물과의 반응특성은 체제의 불안정성을 높인다. 녹음때 팽창특성 역시 체제의 안정성을 파괴할수 있는 요소로 된다.

Pb와 PbBi와의 비교, Na와 PbBi와의 비교결과 소형원자로의 합리적인 랭매로서는 PbBi를 쓰는것이 좋다는것을 알수 있다.

표 4. PbBi와 Na랭매의 비교

지표	비교
끓음점	Na는 883℃에서, PbBi는 1 670℃에서 끓는다. 끓음점이 낮으면 로심가열이 일어난다. Na 랭매원자로는 정의 공백계수를 가지며 또한 끓음때 연료켄온도를 낮고 필요한 연료켄을 허실할수 있게 한다. 소형원자로는 모든 사고의 원인인 끓음을 제거하도록 설계되어야 한다.
부식	Na와 PbBi는 둘 다 부식을 일으키며 따라서 랭매에서의 산소조절을 요구하고 랭매/피복 물질온도를 적당히 보장할것을 요구한다. PbBi에서 랭매의 온도는 500℃(혹은 보호피복을 입히는 경우 550℃이상)이다. 산소는 10 ⁻⁶ ~3·10 ⁻⁶ % 로 조절할것을 요구한다. Na에서는 산소가 약 10 ⁻³ % 보다 작게 제한할것이 요구된다. 부식방지는 PbBi체제에서 더 힘들다.
침전	PbBi에서 랭매속도가 제한될 때 일어나는 부식을 조절하기 위한 보호피복을 입히는 경우 침전현상이 나타난다. 속도제한은 2m/s이다.

표제 속	
지 표	비 교
녹음때 팽창	녹음때 Na는 약 3% 정도 팽창하며 PbBi는 거의 팽창하지 않는다.
화학반응성	Na는 공기와 조금 반응하며 물과는 잘 반응한다. 이것은 잘 알려진 Na냉매로설계의 안정성문제이다. 운반가능한 소형원자로에서 이 문제는 중요한 문제로 나선다.
$^{24}\text{Na} / ^{210}\text{Po}$	Na에서 포획은 치명적인 방사성원천인 ^{24}Na 를 생성한다. PbBi냉매에서 생성되는 ^{210}Po 은 원자로에서의 류출 혹은 원자로운반때 생물학적인 위험을 준다. 운반과 관련해서는 원자로를 한자리에 얼마동안 가만히 놔두면 해결할수 있다. ^{210}Po 의 반감기는 138일이다.
중간연결관	Na의 화학반응성으로 하여 Na냉매원자로에서는 중간연결관이 반드시 필요하다. PbBi냉매를 쓰는 체계에서는 중간연결관을 설치해도 되고 안해도 된다.

2. 구조물질들의 상대방정식

소형원자로의 열수력학적방정식을 수값풀이하려면 구조물질들의 상대방정식이 넓은 대역의 밀도와 온도에서 주어져야 한다. 이를 위하여 여러 상대방정식모형들을 리용하여 상대방정식생성코드를 작성하고 선행연구자료[2]와 비교하였으며 그것에 기초하여 일련의 구조물질들의 상대방정식을 얻어내었다. 작성된 생성코드는 임의의 단순물에 대하여 넓은 대역에서 전에너지와 압력, 이온화도를 표화하여 얻어낼수 있다.

대표적인 구조물질들인 ^9Be , ^{56}Fe 의 내부에너지는 그림 1, 전체 압력은 그림 2, 이온화도는 그림 3과 같다.

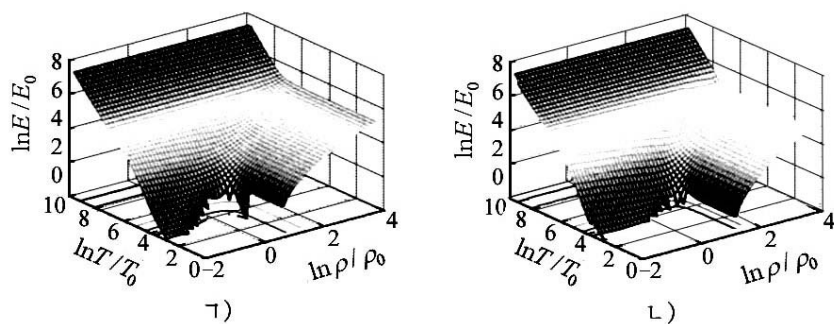


그림 1. 온도와 밀도에 따르는 내부에너지

ㄱ) ^9Be , ㄴ) ^{56}Fe

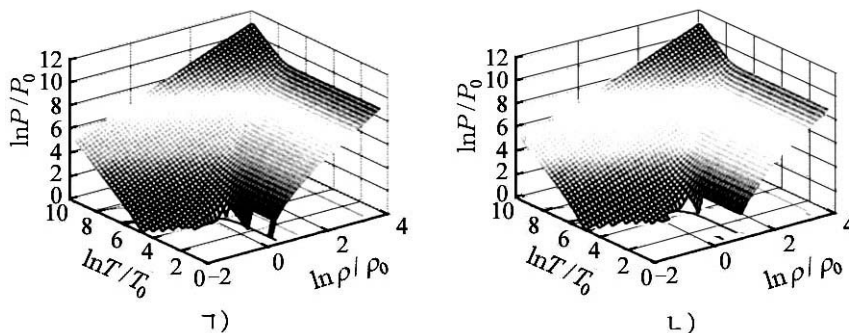


그림 2. 온도와 밀도에 따르는 전체 압력

ㄱ) ^9Be , ㄴ) ^{56}Fe

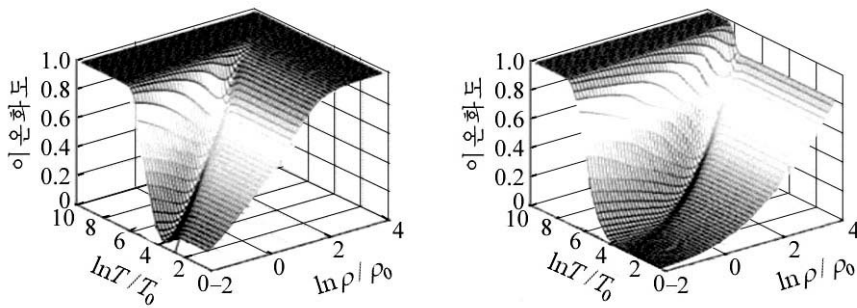


그림 3. 온도와 밀도에 따르는 이온화도
 ㄱ) ${}^9\text{Be}$, ㄴ) ${}^{56}\text{Fe}$

맺 는 말

1) 소형원자로의 랭매로서 소형화와 운반의 간단화에 편리한 PbBi를 선택하는것이 편리하다는것을 다른 액체금속랭매의 물리화학적 및 열수력학적성질들과의 비교속에서 그리고 소형원자로의 목적과 사명의 견지에서 론증하였다.

2) 소형원자로의 열수력학적과정에 대한 모의에서 제기되는 구조물질들의 상태방정식을 얻기 위한 상태방정식생성코드를 작성하고 그 결과를 밝혔다.

참 고 문 헌

- [1] Dimitris Drikakis et al.; High-Resolution Methods for Incompressible and Low-Speed Flows, Springer, 526~613, 2007.
- [2] S. X. Hu et al.; Phys. Rev., B 84, 224109, 2011.
- [3] L. Caillabet et al.; Phys. Rev., B 83, 094101, 2011.

주체103(2014)년 5월 5일 원고접수

Reasonable Selection of Coolant and the EOS of Structural Material for the Mini Nuclear Reactor

Hong Kwon Ryong, Kim Ryon Hui

We firstly selected the reasonable coolant of the mini nuclear reactor and then considered its physicochemical and thermohydraulic properties. And we constructed a code for the EOS of optional materials and by using this code, we made out the EOS of some structural materials for the mini nuclear reactor.

Key words: mini nuclear reactor, EOS(equation of state)