

## 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER 원자로의 정특성 최적설계

조재국, 원성희, 임현진, 김태규, 윤정선, 오세기  
아주대학교

### Some Static Design Characteristics of the Optimized 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER Core

Jae-Kook Cho, Sung-Hee Won, Hyun-Jin Lim,  
Tae-Kyu Kim, Jang-Sun Yoon, Se-Kee Oh  
Ajou University

#### 1. 서론

AMBIDEXTER(Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-mission EXperimental and TEst Reactor)는 고온저압의 Th/<sup>233</sup>U 불화용융염을 핵연료로 사용하므로 피복관이나 독립된 냉각재 없이 핵연료 자체가 열수송 매체로서 순환하는 원자로시스템개념으로서 저농축 <sup>235</sup>U 고체 핵연료를 사용하는 기존의 원자력 발전시스템이 안고있는 핵확산과 안전성 등의 고유문제를 해결할 수 있는 혁신형 차세대 원자력 발전시스템이다.

그림 1의 개념도에서 알 수 있듯이 AMBIDEXTER 원자로는 1차 열교환기를 비롯한 주요 원자로계통 기기들을 연결하는 배관망이 없이 원자로 용기 안에 배열시킨 단순 일체형 원자로개념으로서 기존 발전로의 설계기준사고로 가정하는 핵증기계통에서의 배관파단으로 인한 LOCA(Loss of Coolant Accident) 및 방사능물질의 누출 우려가 없고, 냉각재가 계통을 순환하면서 발생하는 에너지손실을 최소화할 수 있기 때문에 보다 높은 열효율을 얻을 수 있는 발전로개념이다.<sup>1)</sup>

특히 액체핵연료의 고유한 장점으로서 핵연료의 조성을 운전 중에도 온라인으로 조절할 수 있기 때문에 핵연료에 장전된 핵분열성물질, <sup>233</sup>U의 총량을 임계에 필요한 최소량으로 유지하게 되어 반응도사고의 중대성을 획기적으로 경감시키고, 잔류하는 핵분열성물질 농도를 적정선 이하로 낮추어 운전하므로 중성자 경제성 관점에서나 사고해석 선원항 평가에서 큰 개선이 이루어질 것으로 예상된다.

본 연구는 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER 원자로의 노심을 설계함에 있어 임계도와 전환율이 핵적자확성 요건<sup>3)</sup>에 만족하는 1.0+0.005의 범위 안에 유지되는 최적의 평형노심을 찾으므로, 정상 출력운전을 유지하면서 핵분열물질의 연소와 생성 간의 수지균형(break-even)을 보장하는 노심관리 개념설계를 목적으로 수행하였다. 또 출력제어와 안전정지를 설계, 평가하는데 필요한 주요 노물리특성으로서 평형노심에 대한 반응도 요구조건과 핵연료 및 감속재의 반응도계수를 분석하였다.

시뮬레이션에 사용된 계산체계는 2차원 중성자/감마선 수송이론 코드, HELIOS와 R-Z 2차원 다군 중성자 확산이론 코드인 SQUID를 주요 코드체계로 하고, 또한 온라인 정화공정계통의 특성과 용량을 고려한 평형노심의 용융염 핵연료 성분비를 계산하기 위해 ORIGEN2 코드를 이용하였다.<sup>4),5)</sup>

#### 2. AMBIDEXTER 원자로 노심 격자 및 노심 모델링

원자로심은 흑연 감속재 육각주 증앙에 원통형 용융염 채널이 있는 기하학적 모형의 노심 격자를 기본단위로 구성되는데, 정상운전상태에서 용융염 핵연료의 평균온도를 1225°F로 고정하고, 불화염  ${}^7\text{LiF}$ ,  $\text{BeF}_2$ ,  $\text{ThF}_4$  및  ${}^{233}\text{UF}_4$ 의 성분비를 각각 71.7-X, 16.0, 12.0 및 0.3+X mole %, 또 격자단면의 면간 거리를 12.0+Y cm, 격자내 용융염 핵연료 용적분율을 Z%라 할 때, 노심격자가 핵적자활성을 만족하는 최적조건은 변수 X, Y, Z의 함수로 표현할 수 있다.

그림 2는 HELIOS 코드를 이용하여 각 격자변수들에 대해 시뮬레이션한 결과를 종합하여, 격자내 용융염 핵연료의 용적분율을 기준 축으로 각 변수 변화에 따른 임계도 및 전환율의 유효 영역을 도시한 것이다. 그림에서 얻을 수 있는 결론은 주어진 용융염 핵연료의 성분 및 규격 범위를 만족하는 노심 격자에서 핵적 자활성 지배인자인 전환율과 임계도가 서로 역비례 관계에 있으므로 단일격자만으로 최적 노심을 구성하는 설계방법은 충분한 설계여유도를 확보하는데 효율적이지 못하다는 점이다. 따라서 노심형상설계의 기준은 임계도 및 전환율 요건을 상호 독립적으로 최적화한 노심 격자와 블랑킷 격자의 이원적 요소를 갖는 다영역 노심 구조를 선정하는데 있다.

여러 가지 상황에 대한 시뮬레이션을 거쳐 결정된 격자 특성은 용융염 핵연료의  ${}^{233}\text{U}$  mole %가 0.375(X=0.075)인 단일성분의 용융염과, 격자단면의 면간 거리가 10(Y=-2.0) cm인 단일 규격으로서 격자내 용융염 핵연료의 용적분율(Z)이 노심 격자는 0.125, 블랑킷 격자는 0.8의 값을 갖는 것으로 평가하였다. SQUID 코드 시뮬레이션을 위한 노심의 모델링은 노심 격자와 블랑킷 격자 이외에 흑연 반사체 격자 및 Hastelloy 구조재 격자를 추가하였다.

SQUID 코드는 이와 같은 노심에 대해 경계조건, 열출력, Z-축·반경방향의 기하학적 구조 및 격자별 2군 균정수 등을 입력 자료로 하여 시뮬레이션을 수행하며 주요 입력자료는 표 2에 정리하였다.

R-Z 원통형 구조로 단순화한 노심에 대해 2군 중성자 확산방정식의 해를 외삽 경계조건,  $\alpha\psi + \beta(d\psi/dr)=0$ 에 대해  $\alpha=\beta=1$ 을 가정하고 구하였다. 상용발전로급 용량에서와 동등한 핵적자활성 특성을 보장할 수 있는 규모가 되도록 정격 열출력 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER 실증로를 가정하여 반경 방향으로 노심 격자, 블랑킷 격자, 흑연반사체 격자 및 Hastelloy 구조재 격자영역을 동심원으로 대칭적으로 분포하도록 배치하는 노심관리 방안을 시뮬레이션하였다. 격자배치논리의 기준은 국부유효증배계수가 상대적으로 높은 영역에 노심 격자를, 그리고 중성자유실율이 높은 영역에 블랑킷 격자를 배치하므로 각 격자의 설계기능을 효과적으로 나타내도록 하는 배치이다. 따라서 노심 격자는 노심의 증앙부분에 배치하여 임계도에 집중하도록 하고, 그 주위에 전환율에 대응하는 블랑킷 격자를 배치하여 Th 전환에 대한 열증성자 이용이 극대화 되도록 하였다. 반사체로는 격자와 동일 규모를 갖는 흑연격자를 배치하였으며, 노심 구조재인 Hastelloy 합금을 상·하부 및 최외각면에 배치하였다.

그림 3은 예상되는 범위의 시나리오에 대해 trial & error 기법을 이용하여 SQUID 시험을 수행하여서 최종 선정된 반경 141cm(흑연반사체, Hastelloy 구조재 제외), 높이 250cm의 표준 노심 단면도이고, 표 3에는 최적 노심을 구성하기 위해 수행한 HELIOS-SQUID 계산모델 중에 최종평가 대상으로 선택된 모델들의 유효증배계수( $k_{\text{eff}}$ ) 및 전환율(C.R.)를 포함하는 주요 노물리설계특성을 수록하였다. 이 표에 의하면, case 3 및 4는 case 1 및 2에 비해 원자로심의 크기와 함께 장전해야할 핵연료의 용적량이 상대적으로 매우 크므로 경제성이 크게 떨어질 것으로 평가되어 고려 대상에서 제외하였다. 또한 case 2가  $k_{\text{eff}}=1.0056$  및 C.R.=1.005로서 핵적자활성 요건에 가장 합당하고 핵연료용융염 노내 장전요구량이 8700 l로서 가장 작은 값을 가지므로 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER의 표준 노심으로서 가장 적합한 것으로 평가되며, 특히 이 원자로는 평형 노심에 도달하면 외부로부터 핵연료물질  ${}^{233}\text{U}$ 을 공급받지않고 약 300g/day의 잠재핵분열성물질 Th만을 첨가함으로 지속적 출력운전이 가능한 무한핵연료주기에 근사하여 핵확산 저항성이 우수할 뿐만 아니라 장기적으로 볼 때, 핵연료

자원의 안정공급에 크게 기여할 수 있을 것이 확실하다.

### 3. 출력 분포 및 반응도 해석

#### 3.1 평형 노심 출력분포해석

SQUID R-Z 노심 모델을 이용하여 계산한, 최적화 노심인 250 MW<sub>th</sub> 표준 평형 노심의 100% 출력상태에서 노심 중앙선을 따라 반경 및 Z-축 방향의 중성자속 분포와 단위 용융염 체적 당 출력밀도 분포를 도시하였다.(그림 4, 5) 두 그림에 의하면 Z-축 방향 출력은 최대  $7.64 \times 10^2$  W/cc, 평균  $4.81 \times 10^2$  W/cc의 정규 cosine분포로서 출력침투인자는 1.59이고, 반경방향으로는 각각  $7.64 \times 10^2$  W/cc,  $2.73 \times 10^2$  W/cc로서 출력침투인자가 2.79로 되어 노심 최대 출력침투인자는 4.44로 평가되는데 이는 기존 상용발전로들의 출력침투인자가 2.5~3.5 범위 안에서 설계되고 있음과 비교하면 매우 높은 값을 보이고 있다. 그러나 상용원자로에서는 고체핵연료봉을 사용하므로 핵연료의 용융이나 피복관의 파손을 방지하기 위해서 최대 국부출력제한치를 두고 있으나 용융염의 액체핵연료를 사용하는 AMBIDEXTER 원자로에서는 핵연료의 파손이 안전성 설계인자가 될 수 없으므로 출력침투인자와 원자로 안전성은 상대적으로 그 상관관계가 미약하다. 단지 용융염이나 흑연감속재의 온도가 과도하게 높은 값을 유지할 경우 흑연감속재의 구조적 안정성에 영향을 미칠 수 있다는 점을 고려하여야 한다.

그림 4 및 5에 함께 도시된 열중성자속 분포는 그 최대치와 평균치가 각각 Z-축 방향  $7.43 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> sec,  $4.67 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> sec과 반경방향  $7.43 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> sec,  $2.46 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup> sec로 나타났다. 또한, 열중성자 에너지 상한선 1.0eV에 대한 노심 최대 속중성자속은  $1.442 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> sec로서, 원자로 수명을 30년으로 가정하고, 가동률은 국내 상용원자로의 경우인 약 82%로 예상하였을 때, 흑연감속재의 속중성자 조사량은  $4.661 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup>으로 계산되었다.

#### 3.2 핵연료 및 감속재반응도계수

AMBIDEXTER 원자로의 노물리 특성으로서 안전성과 출력제어에 가장 중요한 반응도계수로서 용융염 핵연료의 온도 및 밀도계수와 흑연감속재의 온도계수를 계산하였다. 예상 운전영역을 고려하여 용융염 핵연료는 1160°F~1325°F(설계기준온도 1225°F) 범위에서, 흑연감속재는 1215°F~1375°F(설계기준온도 1275°F) 범위에서 HELIOS-SQUID 노심 모델을 이용하여 노심 유효반응도계수를 구하였으며 감속재-용융염 핵연료 등은 변화와 용융염 핵연료 밀도변화의 반응도효과도 함께 평가하였다.

그림 6은 감속재-용융염 등은 및 용융염 핵연료 온도 및 흑연감속재 온도 변화에 대한 노심 반응도 변화율을 도시한 것이다. 경수형 발전로와 달리 운전영역 전반에서 노심반응도는 노심 구성물질의 온도 변화에 대해 완만한 선형함수관계를 유지하므로 선형적으로 등은 반응도계수, 핵연료온도 반응도계수, 감속재온도 반응도계수는 운전상태와 독립적으로 각각  $-4.62 \times 10^{-5} \Delta k/k$  °C,  $-4.53 \times 10^{-5} \Delta k/k$  °C,  $-1.24 \times 10^{-6} \Delta k/k$  °C로서 모두 음의 값을 갖는 것으로 평가하였다. 특히 핵연료온도계수는 기존의 LWR이나 HWR과 비교하여 상대적으로 큰 음의 값을 보이며 흑연감속재온도계수 또한 가연성독극물(Burnable poison)의 영향을 우려할 필요없이 항상 음의 값을 갖기 때문에 노물리 관점에서 AMBIDEXTER 원자로는 상대적으로 높은 고유안전성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 온도 상승에 대한 액체 핵연료의 부피팽창이 UO<sub>2</sub> 고체 핵연료에 비하여 크고 높은 핵연료 온도에서 Th 공명흡수 단면적의 Doppler Broadening 효과가 큰 영향을 미치기 때문이다. 이밖에 그림 7은 용융염 핵연료의 밀도 변화에 대한 반응도 효과를 도시한 것으로 유사하게 선형관계를 보이며 대응하는 핵연

료밀도 반응도계수는  $1.26 \times 10^{-4} \Delta k/k \% \rho$ 로 계산하였다.

#### 4. 결론

HELIOS-SQUID 노심 핵설계 코드 체계를 이용하여, Th/<sup>233</sup>U 핵주기 용융염 핵연료를 사용하는 250 MW<sub>th</sub>급 AMBIDEXTER 원자로 노심을 2종의 노심격자를 배치하여 핵적 자활성에 대해 최적화 된 기하학적 노심 구조와 개략적 사양을 도출하였으며, 노심의 중요한 안전인자로서 핵연료 온도 및 흑연감속재 온도 변화에 따른 온도계수와 노심 등온계수, 용융염 밀도 변화에 따른 밀도계수를 계산·분석하였고, 원통형 노심의 출력 및 중성자속 분포를 분석하였다.

AMBIDEXTER 원자로 노심은 노심반경 141cm(흑연반사체, Hastelloy 구조재 제외), 높이 250cm인 원통형으로, 노심 격자간격이 10cm, 용융염 성분비는 Mole %로 <sup>7</sup>LiF-71.625; BeF<sub>2</sub>-16.0; ThF<sub>4</sub>-12.0; <sup>233</sup>UF<sub>4</sub>-0.375 일 때, 격자내 용융염 핵연료의 용적분율이 0.125인 노심 격자, 0.8인 블랑킷격자 등, 2종의 격자로 구성된다. 최적화된 평형노심은 기존 상용발전로와 비교하여 큰 침투출력인자 4.44를 갖는 고출력 운전이 가능하고, 평가된 등온 반응도계수, 핵연료온도 반응도계수, 감속재온도 반응도계수는 각각  $-4.62 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $-4.53 \times 10^{-5} \Delta k/k \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $-1.24 \times 10^{-6} \Delta k/k \text{ } ^\circ\text{C}$ 로 상대적으로 큰 음의 온도 반응도 계수값을 갖는 반응도 특성에 의해 더 높은 고유 안전성을 보유하고 있음을 알 수 있다.

결과적으로, 핵적자활성요건을 만족하는 AMBIDEXTER 원자로 노심은 기존 원자력 발전에 비하여, 고체 핵연료 사용에 따르는 핵연료 용융방지를 위한 최대 국부출력제한 등의 출력제한 요인이 없어 고출력 운전이 가능하고, 상대적으로 절대값이 큰 음의 반응도 계수의 보유로 높은 고유안전성을 갖는 원자력 발전시스템임 확인하였다.

#### 5. 감사문

본 연구는 98년도 과학기술부 주관 원자력 기초 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

#### 6. Reference

- 1] 오세기, 정근모, AMBIDEXTER 원자력 복합체-신뢰성 있는 미래 원자력에너지 이용 방안, 한국 에너지공학회 춘계학술발표 논문집, 1998
- 2] 원성희, 임현진, 조재국, 오세기, 등가연소도 최적화를 위한 AMBIDEXTER 핵연료 재생공정의 시간 상수특성화 연구, 한국 원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 1998
- 3] 조재국, 원성희, 임현진, 오세기, 등가연소도 근사법을 이용한 AMBIDEXTER 로심격자의 핵적 자활성에 관한 연구, 한국 에너지공학회 춘계학술발표회 논문집, 1998
- 4] USER MANUAL HELIOS, SCANDPOWER, 1995
- 5] A. Daneri, B. Gabutti, E. Salina, SQUID-360, Research Contract Euratom-Fiat-Ars, 1967
- 6] J. R. McWherter, Molten Salt Breeder Experiment Design Bases, ORNL-TM-3177 Oak Ridge National Laboratory, 1970
- 7] L. G. Alexander, Molten Salt Converter Reactor Design Study and Power Cost Estimates from a 1000MW<sub>e</sub> Station, ORNL-TM-1060 Oak Ridge National Laboratory, 1965
- 8] J. R. Engel, W. R. Grimes, H. F. Bauman, Conceptual Design Characteristics of Denatured Molten-Salt Reactor with Once-Through Fueling, ORNL-TM-7207 Oak Ridge National Laboratory. 1980

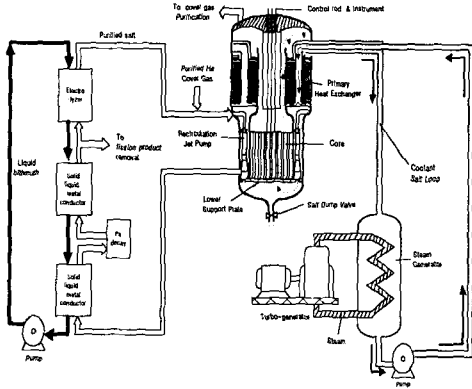


그림 1. AMBIDEXTER 원자력 보일러 시스템 개념도  
(Concept of AMBIDEXTER Nuclear Boiler System)

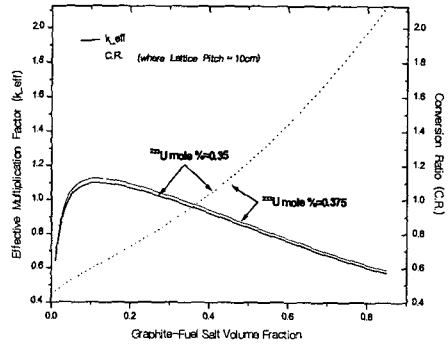
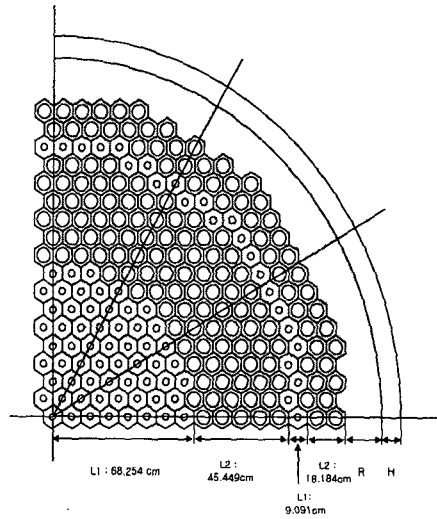


그림 2. 노심격자 흑연-용융염 체적비에 따른 유효증배계수와 전환율의 변화

표 1. 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER 노심 HELIOS 입력자료

LiF - BeF <sub>2</sub> - <sup>232</sup> ThF <sub>4</sub> - <sup>233</sup> UF <sub>4</sub> 용융염 mole %	LiF	71.625
	BeF <sub>2</sub>	16
	<sup>233</sup> UF <sub>4</sub>	0.375
Average Temperature [°C]	Moderator	690.56
	Fuel Salt	662.78
Fuel Salt Density [g/cc] ( <sup>233</sup> UF <sub>4</sub> mole % = 0.375 일 때)		3.3174
격자 내 용융염 핵연료 농도비 (Lattice Pitch=10cm)	노심격자	0.125
	불량킷격자	0.8
Cylindrical core structure	Radius [cm]	141
	Height [cm]	250



Core Radius = 140.98cm (exclude R & H)  
L1=Lattice Volume Fraction:0.125  
L2=Lattice Volume Fraction:0.8  
H=Hastelloy:(10cm)  
R=Reflector:(25cm)

그림 3 AMBIDEXTER 250MW<sub>th</sub> 표준 노심  
구성 단면도

표 2. AMBIDEXTER 노심 SQUID 입력자료(중성자 에너지 2군 균정수)

균정수 격자	중성자	노심격자	블랑킷격자	흑연반사체	Hastelloy 구조재
Diffusion Coefficient	fast	1.00477	1.12829	9.92831E-1	3.65570E-1
	Thermal	0.774544	1.02097	7.45188E-1	2.48540E-1
$\Sigma_a$	fast	1.33733E-3	5.94345E-3	7.07088E-6	1.31231E-2
	Thermal	5.05073E-3	2.39798E-2	1.55009E-4	1.15391E-1
$\nu \Sigma$	fast	1.27076E-3	4.08255E-3	0.0	0.0
	Thermal	7.61182E-3	3.78251E-2	0.0	0.0
$e \Sigma$	fast	1.6295E-14	5.2350E-14	0.0	0.0
	Thermal	9.7638E-14	4.8519E-13	0.0	0.0
$\Sigma_{cp}^{Th}$	fast	6.97492E-4	3.88444E-3	0.0	0.0
	Thermal	1.29268E-3	5.73695E-3	0.0	0.0
$\Sigma_a^{U^{235}}$	fast	5.99944E-4	1.88468E-3	0.0	0.0
	Thermal	3.35240E-3	1.65409E-2	0.0	0.0
$\Sigma_{Rem}$		2.95684E-3	2.80853E-4	3.79023E-3	6.51253E-6

표 3. 후보 및 표준 노심의 반응도 특성

case	핵적자활성 요건		원자로 규격(높이:245cm)		$^{235}\text{Th}$ 공급율 [g/day]
	유효중배 계수	전환율	노심 반경[cm]	용융염 용적량[l]	
case 1	1.0037	1.013	178.479	9817.74	297.95
case 2	1.0056	1.005	178.479	8700.84	299.47
case 3	1.0117	1.008	223.940	12810.62	306.38
case 4	1.0113	1.002	287.584	17374.40	302.32

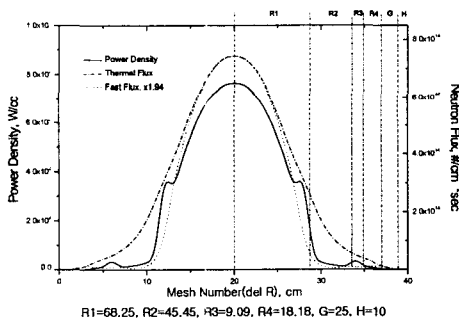


그림 4. 반경방향 출력 및 중성자속 분포

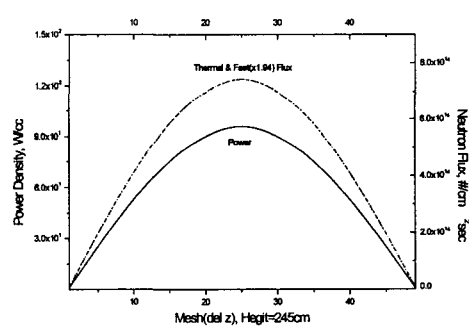


그림 5. 축방향 출력 및 중성자속 분포

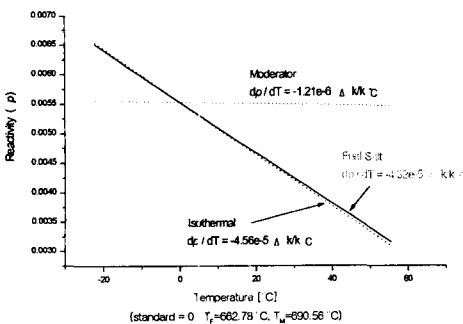


그림 6. 온도에 따른 반응도 효과

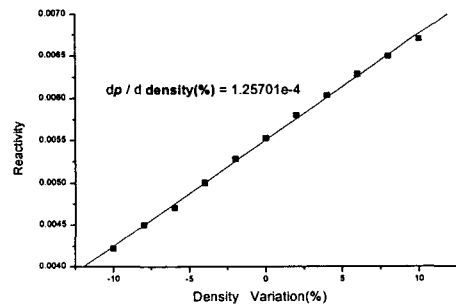


그림 7. 용융염 핵연료 밀도에 따른 반응도 효과