

## 용융염 핵연료 원자로 AMBIDEXTER의 동특성 해석

김태규, 윤정선, 원성희, 임현진, 조제국, 오세기  
아주대학교

### Some Reactor Kinetics Properties of the 250 MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER Circulating Fuel Core

TaeKyu Kim, JungSun Yoon, SungHee Won, HyunJin Lim, JaeKook Cho, SeKee Oh  
Department of Energy Studies, Ajou University  
Suwon, Kyunggi-Do, Korea

#### I. 서론

농축우라늄 고체핵연료를 사용하는 기존의 발전용 원자로 개념에서는 냉각기능의 상실 또는 반응도 상실사고와 같은 극심한 열적 불균형에 의해 핵연료의 온도가 급격히 증가하고, 결과적으로 핵연료의 파손 및 용융으로 발전할 수 있다. 본 연구는 이러한 기존 발전로의 고유 안정성 문제를 획기적으로 해결할 수 있는 혁신형으로서 Th/<sup>233</sup>U 용융염핵연료주기를 사용하며 원자로계통 전체를 원자로용기에 내장하는 일체형 원자로개념의 AMBIDEXTER (Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-mission EXperimental and TEst Reactor) 원자력 에너지시스템의 동특성을 해석하기 위해 수행되고 있다.

1996년부터 아주대학교에서 설계개념 개발이 진행 중인 AMBIDEXTER시스템은 그림 1의 계통개념도에 도시된 대로 1차 열수송회로인 원자로계통에서 배관과 밸브를 획기적으로 배제한 집적구조로서 용융염핵연료가 원자로용기의 중앙 하단에 위치한 흑연감속재 노심을 통과하면서 자체내 핵연료물질 <sup>233</sup>U의 핵분열에너지로 가열되고 원자로용기 상부 환형 공간에 대칭적으로 배열된 내장형 열교환기를 거쳐 냉각된 후 노심으로 재 순환된다. 이때 핵연료 용융염 유량의 일부는 우회경로로 핵연료정화계통에 수송되어 핵분열생성물질을 분리하는 건식처리공정을 거친 후, 노심에서 연소된 <sup>233</sup>U를 보충하고 재순환, 분류와 합류한다. 특히 AMBIDEXTER는 핵연료의 전환율이 수지균형점을 유지하도록 설계되어, 잠재핵분열물질 Th이 노내에서 중성자를 흡수하여 <sup>233</sup>Pa으로 변환되고, 다시 반감기 27.4일의 β 붕괴로 변환·생산되는 <sup>233</sup>U의 양은 연소로 손실되는 양과 같기 때문에, 반응도 상실사고로 삼입 가능한 최대 잉여반응도나 핵연료 파손으로 유출 가능한 방사성물질의 양이 획기적으로 줄어 고유 안전성이 크게 향상된 원자로이다.

본 연구는 AMBIDEXTER 원자력 시스템의 시뮬레이터용으로 개발 중인 AMBISM (AMBIDEXTER SiMulation) 코드의 노심 동특성 모델로서 용융염핵연료의 계통순환주기 와 정화공정주기 특성을 포함하도록 개량한 점원자로 동력학 방정식을 기술하고, 정상 또는 비정상 운전상태에서 예상되는 각 종의 반응도 삼입효과와 각 계통의 설계주기특성 변화에 대한 출력천이 응답특성을 해석하므로 AMBIDEXTER 원자로의 동적 안정성과 제어 능력을 평가하여 앞으로 원자로 제어계통 개념설계의 기반자료를 제공하는데 그 목적이 있

다. 이 모델에서는 핵분열성물질  $^{233}\text{U}$ 의 6군 지발중성자 분율 및 시간상수를 사용하였으며 감속제 및 핵연료 온도의 반응도 계환효과를 고려할 수 있도록 원자로계통의 간략한 열유동모델을 포함하고 있다. 원자로 구성에 필요한 다른 인자들의 값은 2 차원 노심 격자 설계용 중성자/감마선 수송이론 코드인 HELIOS와 R-Z 2차원 다분 중성자 확산 이론 코드인 SQUID에서의 결과를 이용하였다.

## II. AMBIDSM 코드

AMBIDEXTER는 액체핵연료가 원자로계통을 순환하면서 노심 내에 존재하는 지발중성자의 모체중 수밀도가 감소하므로 기존의 원자로 시스템과 노물리적 동특성이 상당히 차이를 가져오기 때문에 기존의 고체핵연료 노심해석용 코드에 의한 동특성 해석에는 제한이 있다. 이에 AMBIDEXTER의 동력학적 특성을 모사하기 위한 새로운 코드의 개발이 대두되었고, 액체핵연료 순환을 고려한 점원자로 동력학 방정식과 원자로의 안정성 유지를 위한 제어 및 순환계통의 열·유체 역학적 특성을 조합한 시뮬레이터로 AMBISM 코드를 개발·적용하고있다. AMBISM 코드는 원자로계통, 중간열전달계통 및 2차열전달계통을 포함하는 열/에너지수송회로 뿐만 아니라 용융염핵연료 정화계통을 주축으로 하는 방사선/물질수송회로를 함께 다룰 수 있도록 개발하여 플랜트 제어 및 안전계통에 영향을 미치는 모든 요소를 동시에 시뮬레이션할 수 있는 성능을 갖게 될 것이다. 표1 에는 지금까지 개발된 AMBIDEXTER 원자로계통모델을 포함하는 설계값과 노심출력/반응도 응답특성을 해석하기 위해 설정하는 초기조건들이 주어져 있다.

AMBISM 코드는 3개의 함수로 구성된다. MAIN 함수에서는 노심의 주요 설계 변수들과 함께 열유체 역학이론을 바탕으로 노심의 온도천이를 계산하며, 정상 상태 출력의 1.15배를 가지는 운전 정지출력 시스템의 동작 여부를 결정하고 하위 루틴들과 연계해 결과를 출력한다. REACTOR 함수는 원자로의 동특성 방정식을 해석모델에 적용하여, 원자로의 출력 및 반응도의 변화를 계산한다. 마지막 DECAY 루틴은 지발중성자에 의한 열출력을 계산하는 부분으로 RAPID CODE에서의 DECAY 루틴을 참조하였으며, 즉발중성자의 출력이 지발중성자 붕괴 열출력의 절반이 될 때, 전 출력을 지발중성자에 의한 출력으로 가정한다.

### II.1 AMBIDEXTER 노심 동특성방정식

유동 용융염 핵연료 원자로인 AMBIDEXTER는 사양이 동일한 비유동성 핵연료 노심과는 다른 동특성 방정식을 가지게 되는데, 이는 용융염 연료가 노심과 1차 계통 경로를 지나며 일어나는 분열로 생성되는 지발중성자를 고려하여야 하기 때문이다. 본 논문에서는 실험적인 결과를 바탕으로 6군의  $^{233}\text{U}$  지발중성자를 사용하였으며, 이들의 분율과 감쇠상수는 표2에 정리하였다. 노심 내에서 반응을 일으킨 핵분열성물질의 반응 생성물이 용융염의 노심 경과 시간보다 긴 반감기를 갖으면, 노심이 아닌 1차 계통 경로에서 지발중성자를 방출한다. 이와 유사하게 1차 계통 경로에서 일어난 반응 생성물의 반감기가 1차 계통 경로의 경과 시간보다 길면 다시 노심 내로 유입된다. 따라서 기존의 원자로가 가지는 점원자로 동력학 방정식에 위의 두 인자를 첨가하여야 한다. 특히 AMBIDEXTER는 MSBR과는 달리 온라인 정화공정으로 일정 비의 용융염이 우회회로에서 제거되고 다시 핵분열성물질인  $^{233}\text{U}$ 은 용융염으로 첨가되므로 이를 1차 계통 경로의 지발중성자 생성에 감안하여야 한다. 이와 같은 개념들을 첨가하면 아래와 같은 유동 노심 원자로의 동특성 방정식을 구성할 수 있다.

$$\frac{dP(t)}{dt} = \left( \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} \right) P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad \text{----- ( I-1 )}$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i(t) - \frac{C_i(t)}{\tau_c} + \delta \frac{C_i(t - \tau_L)}{\tau_c} e^{-\lambda_i \tau_L}$$

,  $i=1, 2, \dots, 6$  ----- ( I-2 )

여기서 P(t) : t 시간에서의 출력 [MW<sub>th</sub>]

C<sub>i</sub>(t) : t 시간에서의 지발중성자 모핵종의 수 밀도 [MW<sub>th</sub>]

ρ(t) : t 시간에서의 총반응도 [Δk/k]

β : 지발중성자 생성비율의 총합,  $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$

Λ : 즉발중성자 생성 시간 [sec]

λ<sub>i</sub> : i 군 지발중성자 모핵종 유효붕괴 상수 [sec<sup>-1</sup>]

τ<sub>c</sub> : 용융염핵연료의 노심잔류 시간 [sec]

τ<sub>L</sub> : 용융염핵연료의 원자로계통 순환주기 [sec]

δ : 용융염핵연료의 우회유량 비율

그리고 시간 종속 반응도 ρ(t)를

$$\rho(t) = \rho_0 + \frac{1}{k_{eff}} \left[ \left( \frac{\partial k_{eff}}{\partial T_F} \right)_{T_G} \Delta T_F + \left( \frac{\partial k_{eff}}{\partial T_G} \right)_{T_F} \Delta T_G \right] + \rho_{sh}$$

로 표시하였으며, 제환반응도는 천이상태의 핵연료 온도변화 ΔT<sub>F</sub>와 흑연 감속재 온도변화 ΔT<sub>G</sub>의 선형함수로 가정하였다. 그리고 핵연료 온도(T<sub>F</sub>)와 흑연 감속재 온도(T<sub>G</sub>)를 계산하기 위한 노심 열유체 역학 모델은

$$M_F C_P^F \frac{dT_F}{dt} = F_1 C_P^F (T_F^{in} - T_F^{out}) + h_{FG} A_{FG} (T_F - T_G) + (1 - \epsilon) P(t) \quad \text{----- ( I-3 )}$$

$$M_G C_P^G \frac{dT_G}{dt} = h_{FG} A_{FG} (T_F - T_G) + \epsilon P(t) \quad \text{----- ( I-4 )}$$

$$T_F = \frac{1}{2} (F_F^{in} + T_F^{out}) \quad \text{----- ( I-5 )}$$

여기서 M : 노심 장전량

C<sub>P</sub> : 비열

h : 열전달 계수

A : 총 표면적

ε : 흑연 감속재 출력 비율

F<sub>1</sub> : 단위시간당 노심통과 핵연료중량

이며, 첨자 F 및 G는 각각 핵연료와 흑연 감속재를 대표한다. 또 원자로 계통은 순환한 후 노심으로 재 유입되는 지발중성자 모핵종 수밀도의 효과를 고려한  $C_i(t - \tau_L)$ 를

$$C_i(t - \tau_L) \approx C_i(t) - \tau_L \frac{dC_i(t)}{dt}$$

로 선형화하면 식(I-2)는

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda b_i} P(t) - \frac{\lambda_i}{a_i b_i} C_i \quad \text{----- ( I-6 )}$$

여기서  $a_i = \frac{\lambda_i \tau_c}{\lambda_i \tau_c + 1 - \delta \exp(-\lambda_i \tau_c)}$ ,

$$b_i = 1 + \delta \frac{\tau_L}{\tau_c} \exp(-\lambda_i \tau_L).$$

용융염핵연료가 원자로계통 내를 순환하는 동안에 생성되는 붕괴열출력은 노심출력에 직접 기여하지는 않으나 계통출력에

$$M(\infty, t_s) = A t_s^{-a} \quad \text{----- ( I-7 )}$$

$$P_d = 0.005P [M(\infty, t_s) - M(\infty, t_o + t_s)] \quad \text{----- ( I-8 )}$$

와 같이 포함되며 상수값 A 및 a는 각각

$$A = 12.05, a = 0.0639, \quad 10^{-1} \leq t \leq 10^1,$$

$$A = 15.31, a = 0.1807, \quad 10^1 < t \leq 1.5 \times 10^2,$$

$$A = 27.43, a = 0.2962, \quad 1.5 \times 10^2 < t \leq 8 \times 10^8,$$

그리고,  $t_s$  : 운전 정지 시간

$t_o$  : 운전 시간

$M(\infty, t_s)$  : 일정시간 운전 후  $t_s$  에서 발생하는 분열당  $\beta, \Upsilon$  에너지

$P_d$  : 붕괴 열출력

### III. 동특성 해석

#### III.1 반응도삽입 시나리오

원자로의 출력과 직접적으로 연계되는 총 반응도는 사고에 의한 외부 반응도 삽입, 온도 반응도계수와 같은 반응도교환 효과, 제어봉 또는 안전정지봉의 삽입에 의한 반응도 효과로 이루어지는데, 이중 외부로부터의 반응도 삽입은 반응도사고로 노심 내로 양(+)의 반응도가 강제로 삽입될 수 있는 경우로서,

- 1) 운전 중 노내에 삽입된 제어봉의 일출사고
- 2) 온라인  $^{233}\text{U}$  주입량 조절의 상실사고
- 3) 용융염핵연료의 입력온도 강하

4) 온라인 정화계통으로부터 과도한 핵분열생성물질 분리

를 가정할 수 있으나 AMBIDEXTER의 노심특성상 최대 삽입가능 반응도는 대략 2~3mk에 머무를 것으로 평가하여 본 시뮬레이션에서는 0.0~0.1\$(\leq 2.64mk)\$ 범위를 이용하였으며, 선형삽입(ramp insertion)과 계단삽입(step insertion)을 함께 분석하였다.

부(-)의 궤환효과를 가지므로 원자로의 고유안전특성 관점에서 중요한 인자인 온도 반응도 계수는 기존의 원자로 경우 핵연료의 연소도, 감속재의 밀도 및 상변화, 가연성 독물의 농도에 따라 크게 좌우되지만, AMBIDEXTER 원자로는 Th의 속중성자군 핵분열 단면적이 매우 작고 연소에 무관하게 핵연료물질이  $^{233}\text{U}$ 의 단일핵종 일정량을 유지하므로 유체 핵연료와 고체 흑연감속재의 열팽창 특성에 반응도 온도계수에 가장 크게 영향을 미친다. HELIOS/SQUID 코드체계를 이용하여 노심 평균 핵연료 및 감속재 온도계수를 각각  $-4.53 \times 10^{-5}$  및  $-1.24 \times 10^{-5} \Delta k/k$ 로 평가하였으며 함께 계산된 즉발중성자 생성시간  $2.3 \times 10^{-4} \text{sec}$ 을 모든 시나리오 해석에 적용하였다.

본 연구에서는 원자로 정지계통의 성능요건을 해석하기 위해 운전정지봉의 모델을 포함하였는데 총반응도는 1.0mk 및 삽입소요시간을  $1.0 \times 10^{-1} \text{sec}$ 로 추정하고 중력에 의한 자동낙하를 가정한 삽입특성곡선을 입력자료로 제공하였다. 여기서 안전계통의 회로지연시간을  $2.0 \times 10^{-2} \text{sec}$ 로 포함시키므로 가능한 한 현실성과 보수성을 함께 고려하였다.

### III.2 결과 및 분석

본 연구에서는 외부 반응도 유입비 변화에 대해 비유동성 핵연료 노심은 기존의 일점 동특성 방정식을 사용하고, AMBIDEXTER의 경우는 식 (I-1), (I-6)을 사용하여 원자로의 동력학적 천이를 분석하였다.  $250\text{MW}_{\text{th}}$  급 원자로를 기본으로 비유동성 핵연료 노심과 용융염 핵연료 원자로 각각에 대해 즉발중성자 생성시간을  $2.3 \times 10^{-4} \text{sec}$ 와 반응도 삽입비를  $0.5 \times 10^{-3}$ ,  $1.0 \times 10^{-3}$ ,  $1.0 \times 10^{-4} \Delta k/k$ 로 바꾸어가며 시뮬레이션을 수행하여 천이출력을 계산하였다.

그림2는 외부 반응도 삽입비를 선형삽입과 계단삽입 각각의 경우에  $0.5 \times 10^{-3} \Delta k/k$ 를 기준으로 노심출력과 출구온도의 천이를 도시하였다. 외부 반응도 유입비 각 경우에 대하여 e-증배시간과 주기 그리고 로그 출력을 계산하였으며, 이로부터 높은 고유안정성을 지니는 용융염 핵연료 원자로는 소량의 외부 반응도 유입에서 큰 부의 온도궤환효과에 의해 큰 출력의 천이를 보이지 않지만, 복합적인 사고에 의한 다량의 반응도 유입에서는 온도궤환효과와 운전정지봉의 응답시간에 비해 노심은 매우 빠른 출력천이를 가지게 되고, 이는 유동핵연료 원자로가 비유동성 핵연료 노심에 비해 높은 즉발중성자 의존도를 가짐을 보여주어 원자로의 정상상태 운전을 저해할 요소가 된다.

해석 결과를 종합하면, AMBIDEXTER는  $2.3 \times 10^{-4} \text{sec}$  즉발중성자 생성시간,  $0.5 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-4} \delta k/k/\text{sec}$ 의 선형/계단 반응도 삽입을 범위에서 온도의 변화율은 출구온도를 기준으로  $-5 \sim 5^\circ \text{C}$ 의 값을 보였으며, 115%전출력에 도달하는 시간이 0.68~2.53sec로서 0.78~3.06sec의 비유동성 핵연료 노심에 비해 7.5~13.4% 빠르게 나타났고, 원자로주기는 2.668sec~로 비유동성 노심 3.2sec~의 80%에 불과하다.

### IV. 결론 및 토의

원자로 안정성 및 핵확산 저항성의 관점에서 기존의 원자로가 갖는 문제점을 해결하고 중성자 경제성과 열효율이 크게 향상된 열출력 250MW의 일체형 원자로 AMBIDEXTER는 용융염핵연료가 순환하는 노심의 고유 특성인 낮은 지발중성자 수밀도와 짧은 즉발중성자

생성시간 때문에 비유동 노심 원자로에 비해 외부 반응도 삽입에 빠르게 응답하므로 제어 능 평가와 제어계통 설계요건 설정에 보다 엄격한 기준이 요구된다.

AMBISM 코드는 이러한 용융염 핵연료 시스템의 동적 열·유체역학 해석을 위해 시스템의 제어 및 순환공정주기 모두를 고려하여 외부 반응도 유입시에 파생되는 출력 및 온도의 천이를 점원자로 동특성 방정식 및 열·유체역학 모델을 사용하여 계산하도록 개발하였다.

$0.5 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4 \delta k/k/sec$ 의 선형/계단 반응도 삽입을 범위에서 운전 정지 출력에 도달하는 시간이 0.68~2.53sec로서 0.78~3.06sec의 비유동성 핵연료 노심에 비해 7.5~13.4% 만큼 빠른 것으로 나타났으며 원자로주기는 2.668sec~ 로 비유동성 노심 3.2sec~ 의 80%에 불과하고 출구온도를 기준으로 본 온도의 변화는  $-5 \sim 5$  °C로 극미하였다.

본 연구에서 얻은 출력 및 온도의 천이해석 결과로부터 용융염을 핵연료로 하는 원자로가 비유동성 핵연료 노심에 비해 다량의 외부 반응도가 삽입되는 사건 발생시 빠른 출력 증가율을 보이므로 원자로주기가 짧고 최대 천이출력이 상대적으로 높음을 확인하였다. 앞으로 외부 반응도 삽입 시나리오에 대한 다양한 고찰과 정화공정계통을 통해 재 유입되는 핵분열성물질의 유입을 및 시간 간격을 정량화하는 연구와 전체 플랜트시스템과 연계화에 의한 다각적인 원자로 안정성 평가가 요구된다.

## 감사문

본 연구는 98년도 과학기술부 원자력 기초연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 1] 오세기, 정근모, AMBIDEXTER 원자력 복합체-신뢰성 있는 미래 원자력에너지 이용 방안, 한국 에너지공학회, 춘계학술발표회 논문집, 1998
- 2] 조재국, 원성희, 임현진, 김태규, 오세기, 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER 노심의 반응도 특성 및 출력 분포 해석, 한국 에너지공학회, 추계학술발표회 논문집, 1998
- 3] 원성희, "SAMS : 가변재처리 시간 상수를 고려한 용융염 핵연료 원자로 평형 핵종 농도 분석 코드", 공학석사 학위논문, 아주대학교, 1999
- 4] 임현진, "AMBIDEXTER 열수송 시스템의 개념설계에 관한 연구", 공학석사 학위논문, 1999
- 5] S. Glasstone, A. Sesonske, "Nuclear Reactor Engineering", Chapman & Hall, Inc., 1994
- 6] E. E. Lewis, "Nuclear Power Reactor Safety", John Willey & Sons, 1977
- 7] W. H. Sides, Jr., "MSBR Control Studies: Analog Simulation Program", ORNL-TM-3102, 1971
- 8] W. H. Sides, Jr., "Control Studies Of A 1000-Mw(e) MSBR, ORNL-TM-2927, 1970
- 9] Paul R. Kasten, " Safety Program For Molten-Salt Breeder Reactors", ORNL-TM-1858, 1967
- 10] Carl A. Anderson, Jr., " RAPID(Reactor And Plant Integrated Dynamics) Computer Program" LA-3694 UC-80, Reactor Technology TID-4500, 1967

그림1. AMBIDEXTER원자로시스템 계통개념도

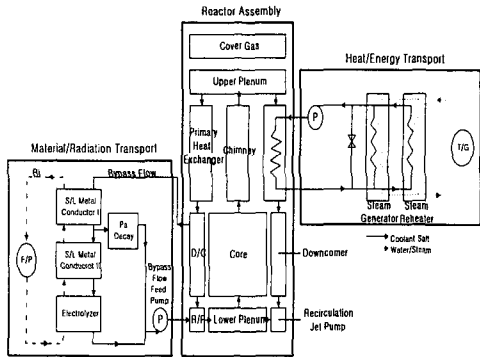


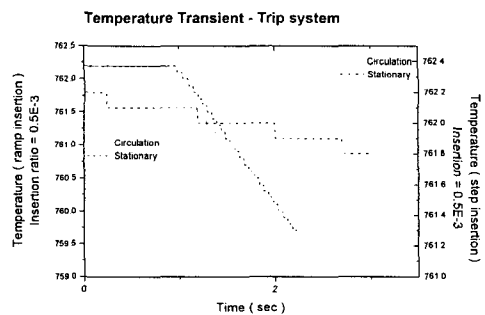
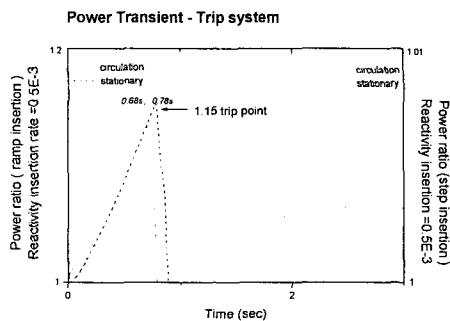
표1. AMBISM CODE 기본 변수값

기본 변수	변수 값	기본 변수	변수 값
정격출력 [MW <sub>th</sub> ]	250.0	우회회로 유량 인자	0.1
Trip Set Point	1.15	감속재 열전달 계수 [Ws/kgK]	1.76
반응도 유입 한계 인자 [mk]	5.0	용융염 열전달 계수 [Ws/kgK]	1.357
노심 입구 온도 [°C]	621.1	노심 전체 유면적 [cm <sup>2</sup> ]	2.033460E6
노심 출구 온도 [°C]	704.4	노심 전체 용융염 부피[CC]	5.205658E6

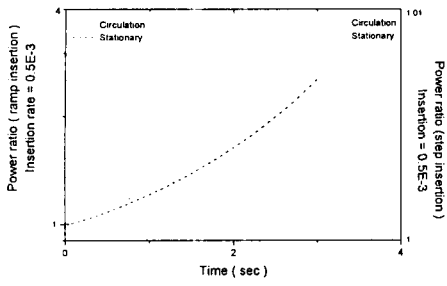
표2. 233U의 지발중성자 붕괴상수 및 분율

지발중성자 군	붕괴상수 ( $\lambda_i$ ) sec <sup>-1</sup>	분율 $\beta_i$
1군	0.01238	0.00023
2군	0.03014	0.00078
3군	0.11178	0.00064
4군	0.30137	0.00074
5군	1.13631	0.00014
6군	3.01368	0.00008

그림2. AMBISM Simulation Graphs.



Power Transient - Non trip system



Temperature Transient - Non trip system

