

최적계산코드를 이용한 대형 냉각재상실사고시 유량조절기 성능평가에 관한 연구

전우철* · 이재훈 · 이상중

한전원자력연료(주) 안전해석처 사고해석실

(2004년 10월 18일 접수, 2004년 12월 23일 채택)

Computational Study for the Performance of Fluidic Device during LBLOCA using TRAC-M

Woochong Chon[†], Jae Hoon Lee and Sang Jong Lee

Nuclear Safety Analysis Department, Korea Nuclear Fuel Co. LTD

(Received 18 October 2004, Accepted 23 December 2004)

요 약

한국형 신형원자로1400(APR1400)은 3983 MWt 급의 2×4 루프 개량형 가압경수로(PWR)로서 대형 냉각재상실사고 발생시 안전주입수의 원자로용기 직접주입(DVI) 방식을 채택하고 있으며, 안전주입수탱크(SIT) 내부에 유량조절기(Fluidic Device, FD)를 장착하고 있다. 본 연구에서는 신형원자로 1400의 안전주입계통에 새로이 적용된 주요 특징 중 하나인 유량조절기에 대하여 최적안전해석코드인 TRAC-M/F90, 3.782버전을 이용한 성능평가 및 민감도 분석을 수행 하였다. 연구결과 유량조절기가 안전주입수의 원자로 유입을 적절하게 조절하고 있음을 확인 하였으며, 안전주입수탱크 내부의 압축질소체적 감소가 안전주입수체적 감소에 비하여 노심의 급냉 완료 시점을 빠르게 하였다. 또한 안전주입계통의 전체 저항계수(K factor)가 최소 또는 최대일 때 노심의 급냉 완료 시점은 평균값인 경우보다 다소 늦어졌으나, 피복재 최고온도(PCT)는 상대적으로 큰 차이가 발생하지 않았다.

주요어: 최적계산코드, 신형원자로 1400, 유량조절기, 냉각재상실사고

Abstract — The APR1400 is an Advanced Pressurized Water Reactor with 3983 MWt power, 2×4 loops, and direct vessel injection system. The Fluidic Device (FD) is adopted to regulate the safety injection flow rate in a Safety Injection Tank (SIT) of APR1400. The performance of a newly designed Fluidic Device is evaluated by analyzing a Large Break Loss-of-Coolant Accident (LBLOCA) using TRAC-M/F90, version 3.782. The analysis results show that the TRAC-M code reasonably predicts the important phenomena of blowdown, refill and reflood phases of LBLOCA. The sensitivity studies about gas/water volume changes in a SIT and K factor changes in a SI system were also done to understand the important phenomena with a Fluidic Device in APR1400.

Key words: TRAC-M, APR1400, Fluidic device, LOCA

[†]To whom correspondence should be addressed.

Nuclear Safety Analysis Department, Korea Nuclear Fuel Co. LTD

Tel: 016-9875-1201

E-mail: wcchon@knfc.co.kr

1. 서 론

1980년대 이후부터 원자력 발전관련 산업에서는 기존의 원자로보다 안전성 및 경제성 측면에서 우수한 형태의 진보된 경수로 발전소(Advanced Light Water Reactor, ALWR)를 개발하기위한 노력이 지속적으로 이어져 왔다. 전형적인 진보된 경수로 발전소의 예를 들면 ABB-CE사에서 개발한 System 80+, 제너럴일렉트릭사의 ABWR, 그리고 웨스팅하우스사의 AP600 등을 들 수 있다. 국내에서도 21세기 초에 발생할 추가 전력 수요에 대비할 새로운 원자력 발전소의 건설을 준비하기 위해 1992년부터 Korea Next Generation Reactor(KNGR) 프로그램의 수행과 함께 진보된 경수로 발전소 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 이에 따라 건설계획 중인 신고리 3, 4 호기는 진보된 경수로 발전소형에 기초를 둔 국내 최초의 원자력 발전소 형태이다. Advanced Power Reactor 1400(APR1400, 신형원자로 1400)으로 불려지는 신고리 3, 4호기는 1400 MWe의 전기출력을 갖는 혁신적인 형태의 경수로이며 2011년 준공을 목표로 건설을 추진 중이다. 신형원자로 1400은 비상 안전주입방식으로 원자로용기 직접주입(Direct Vessel Injection, DVI) 방식을 채택하였고, 안전주입수탱크(Safety Injection Tank, SIT) 내부에 유량조절기(Fluidic Device, FD)를 장착하였다. 이 외에 In-containment Refueling Water Storage Tank (IRWST)를 채택하였으며, 유량조절기의 적용으로 안전주입수의 효율적 사용이 가능하게 됨으로써 대형 냉각재상실사고시 사용되던 저압안전주입펌프(LPSIP)를 제거하는 등 기존의 발전소와 일부 다른 형태를 취하고 있는데, 위와 같은 주요 디자인 변화로 Design Basis Accidents(DBA) 발생시에 발전소에서 발생하는 열수력적 특성이 지금까지의 발전소와 다르게 나타날 것으로 예상된다.

본 연구에서는 위에서 언급한 몇 가지 새로운 디자인 중 안전주입수탱크에 설치된 유량조절기가 대형 냉각재상실사고 발생시 신형원자로 1400의 열수력적 현상에 어떠한 영향을 미치고 있는가를 미국 원자력규제위원회(USNRC)에서 개발한 최적안전해석코드인 TRAC-M/F90을 이용하여 평가하였다. 유량조절기는 수동형 안전유량조절기로서 안전주입수탱크 내부의 하단에 설치되어 있으며, 대형 냉각재상실사고 발생시 노심으로 유입되는 안전주입유량을 고유량 구간과 저유량 구간으로 이분화하여 자동 조절하는 기구이다. 안전주입수는 사고발생 초기 고유량으로 안전주입수탱크로부터 흘러나오다 원자로의 하향유로를 다 채우는 시점에 저유량으로 변환되어 주입된다. 이는 안전주입수의 방출시 불필요한 유출 등에 의한 손실을 줄이고, 안전주입수탱크의 고갈시점을

늦춤으로써 방출시간을 최대한 연장시켜 보다 효율적인 안전주입수의 사용이 가능하도록 하기 위함이다. 또한 안전주입수탱크의 고갈 시점이 늦추어 지면서 저압안전주입수의 기능을 동시에 수행할 수 있게됨으로써 저압안전주입펌프 등이 제거되어 계통을 보다 단순화 시킬 수 있는 장점이 있다.

또한, 본 연구에서는 고정된 안전주입수탱크 체적내에 유량조절기가 추가로 설치됨으로 인하여 발생하는 탱크내 안전주입수 또는 압축질소가스의 체적감소에 대한 영향도 비교 평가하였으며, 고유량 및 저유량 구간에서 전체 안전주입계통의 최대/최소 저항계수(K-factor) 값에 대한 영향 평가도 TRAC-M 코드를 이용하여 동시에 수행하였다. 본 연구의 결과는 유량조절기의 적용에 따른 신형원자로 1400 발전소의 대형 냉각재상실 사고 발생시 열적 여유도를 결정하기위하여 사용될 수 있다.

2. 개 요

2-1. 신형원자로 1400(Advanced Power Reactor 1400)

신형원자로 1400은 혁신적인 가압경수로이다. 신형원자로 1400의 안전주입시스템 개발에 있어서 주요 디자인 고려사항 중의 하나는 소형 냉각재상실사고와 같은 실제적인 상황에 대한 대응을 증진시킴과 동시에 전체 시스템의 동작을 단순화 하는데 있다. 신형원자로 1400은 4개의 기계적으로 동일한 안전주입계통을 가지고 있다. 각 계통은 안전주입펌프와 안전주입수탱크를 가지고 있으며, 각각 독립적으로 동작하도록 구성되어있다. 안전주입펌프는 소형 냉각재상실사고시와 같이 높은 노심 냉각계통압력이 발생할 경우 안전주입수를 노심에 주입시킨다.

신형원자로 1400은 대형 냉각재상실사고 발생시 노심 냉각을 위한 몇 가지 개선된 기능을 가지고 있다. 첫째는 안전주입수탱크 내부에 유량조절기를 설치하였다는 것이며, 둘째는 안전주입수가 원자로용기직접주입장치(Direct Vessel Injection, DVI)에 의해 하향유로로 직접 주입된다는 점이다. 현재 대부분의 가압경수로는 안전주입수가 저온관을 통하여 노심으로 유입(Cold Leg Injection, CLI)되도록 설계되어있다. 이 경우 저온관 파단사고 발생시에 대부분의 안전주입수가 저온관 파단부위를 통하여 손실되는 경우가 발생할 수 있는 반면 원자로용기직접주입방식을 적용하면 이러한 안전주입수 누출을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 유량조절기의 설치로 저압안전주입펌프가 필요 없게 됨으로써 전체적인 시스템의 단순화가 이루어졌다.

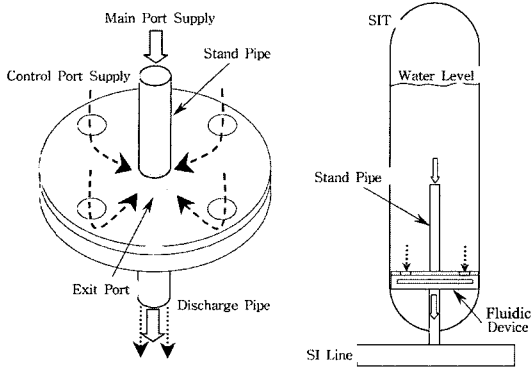


Fig. 1. The schematic view of fluidic device and installation in SIT.

2-2. 유량조절기(Fluidic Device, FD)

유량조절기는 기기 자체 내에 구동전원이 전혀 필요 없는 순수한 피동기로서 2개의 각기 다른 유입구를 가지고 있다. Fig. 1은 신형원자로 1400의 안전주입수 탱크 내부에 부착될 유량조절기와 유량조절기가 탱크 내부에 설치된 모습을 개략적으로 보여주고 있다. 유량조절기는 본체인 하단 챔버로 유입되는 유류의 방향에 따라 챔버내에서 형성되는 와류의 강도가 바뀌고 이에 따라 압력강하가 크게 변화되도록 하여 안전주입수 탱크에서 방출되는 유량을 각각 다르게 조절하는 기구이다. 본체인 와류 챔버에는 반경방향 공급구, 접선방향 제어구 및 축방향 토출구등의 세 가지 유로가 설치되어있다. 대형 냉각재상실사고 발생 후 먼저 반경방향 공급구로부터 안전주입수가 챔버내로 주입된 후 축방향 토출구로 방출되면서 유체의 유동저항이 감소되어 결국 전체 토출유량은 최대로 되며, 일정시간 이후 접선방향으로 부착된 제어구를 통해 안전주입수가 챔버내로 주입되면 강한 와류에 의한 유체의 유동저항이 증가하게 되어 축방향 토출구로 방출되는 유량이 최소가 된다.

유량조절기는 기존의 ABB-CE형 발전소에는 없는 개념으로 결국 안전주입수의 방출량을 시간 경과에 따라 적절히 조절하는 역할을 수행함으로써 냉각재상실사고 시 안전주입수의 총 주입 시간을 연장시킬 수 있을 뿐만 아니라 효율적인 안전주입수의 사용으로 안전주입수탱크의 용량을 감소시킬 수도 있다. 또한 안전주입수가 일정시간 후 고유량에서 저유량으로 전환됨으로써 원자로 압력용기를 우회하여 저온관으로 누출되는 안전주입수의 양은 감소시키고 노심으로의 유입량은 증가시켜 피복재 최고온도도 낮출 수 있는 등의 장점을 가지고 있다.

3. TRAC-M 모델링

3-1. 신형원자로 1400 발전소 모델링

본 연구에서는 미국 USNRC에서 개발한 냉각재상실 사고 최적안전해석코드 중 하나인 TRAC-M/F90 3.782 버전을 사용하였다. TRAC-M 코드는 노심을 3차원으로 모델링하여 해석할 수 있으며, 노심을 제외한 영역은 2차원으로 모델링하도록 구성되어 있다^[1]. 신형원자로 1400 발전소를 모델링하기 위하여 34개의 Heat Structure와 76개의 Junction 등 총 97개의 모델링 요소(Component)들을 사용하였다. 노심은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 3차원 원통좌표계를 사용한 VESSEL Component로 모델링 하였다. 노심은 21개의 수직(z)방향 격자, 5개의 반경(r) 방향 격자, 그리고 6개의 원주(θ)방향 격자로 구성하였으며, 전체 3차원 노심 격자의 수는 630개이다. 반경방향 5개의 격자 중 중심으로부터 3개의 격자는 노심을 모델링한 것으로 high, medium 그리고 low power 영역을 나타내고 있으며, 4번째 격자는 안전주입수의 노심우회

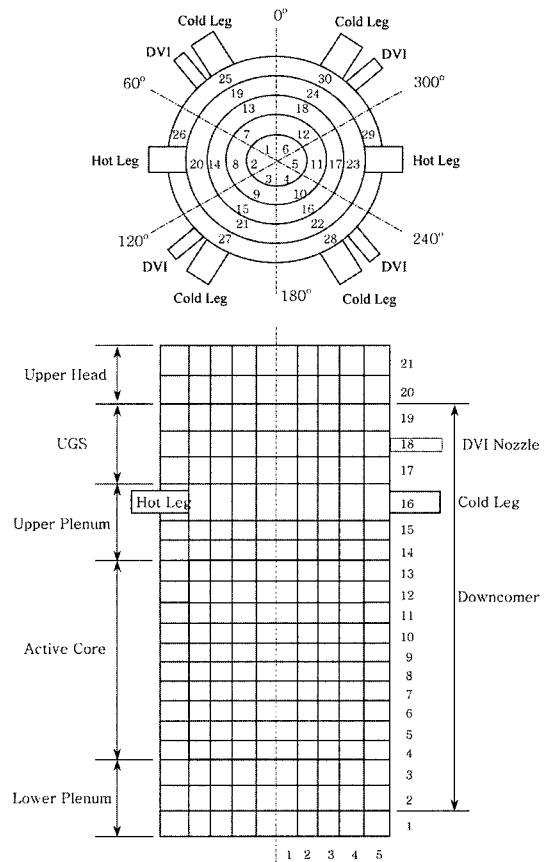


Fig. 2. Schematic view of VESSEL component noding.

(Core By-pass)유로영역을, 마지막 5번째 격자는 하향유로를 각각 모델링 하였다. 수직방향의 격자 중 하단의 3개 level은 하부플레넘을 나타내고 있는데 sweepout 효과와 flow skirt 영향 등 적절한 노심 특성을 모델하기 위해서는 최소한 2개 이상의 level로 하부플레넘을 모델하는 것이 적절한 것으로 판단되어 본 연구에서는 하부플레넘의 물리적 구조에 따라 총 3개의 level을 두었다. 노심은 level 4에서 13까지 총 10개의 level로 구성하였으며, 노심의 전체 길이는 3.810 m이다. 노심의 최상단인 level 14부터 상부헤드의 하단인 level 19까지 총 6개의 level은 상부플레넘을 모사 하였다. level 16에는 저온관과 고온관이 연결되어 있으며 level 18에는 노심직접주입관(DVI)이 연결되어 있다. level 20부터 21까지 2개 level은 상부헤드를 나타낸다. 반구 형태의 하부플레넘 및 상부 헤드는 각 격자에 대한 체적비를 적용하여 원통형 격자로 변환하였다. 각각의 격자는 기본적으로 급격한 격자의 체적 변화를 일으키지 않는 범위에서 열수력적 현상들을 가장 잘 모사할 수 있는 크기 및 개수를 선택하였다. 격자의 민감도 검토는 본 연구에 앞서 별도로 수행 하였으며, 이에 대한 구체적 추가 검증작업이 진행 중이다.

VESSEL Component에는 4개의 독립적인 루프를 모델 하여 연결하였으며, 4번째 저온관의 펌프 모사기와 노심연결부위 사이에 파단이 발생한 것으로 설정 하였다. 각 루프에는 고온관, 증기발생기 1차측 및 2차측 유동체적 및 열전달 효과 등을 고려하였으며, 이 밖에 안전주입수탱크와 고압안전주입계통 등을 모사 하였다. 고온관은 노심과 증기발생기의 입구플레넘 사이를 연결하고 있으며 4개의 고온관중 하나에는 TEE Component를 이용하여 압력조절기를 별도로 모사하였다. 노심직접주입장치(DVI)는 TEE Component로 모사하여 안전주입밸브와 연결되어 있다. 이 밖에 TRAC-M에서 사용가능한 Blasius interfacial drag 상관식을 적용하였고, ANS-79

decay heat standard와 metal-water 반응에 대한 계산도 적용하였다¹¹⁾. Table 1은 주요 입력 초기조건을 나타내고 있다.

3-2. 유량조절기 모델링

TRAC-M/F90 3.782버전에는 유량조절기를 위한 별도의 모델링 구성요소는 없다. 본 연구에서는 실제 유량조절기가 유동저항의 변화에 따라 유량을 조절하므로 현재 코드에서 사용가능한 Valve Component를 이용하여 유동저항의 변화에 따라 밸브의 유동 면적을 변화시키는 방법으로 모델링 하였다. 유량조절기 모사를 위한 Valve Component는 4개의 각 루프에 안전주입수탱크 하단에 연결하여 추가로 모델링 하였다. 안전주입수탱크는 1개의 Pipe Component로 모사되어있는데 초기 안전주입수 체적으로부터 일정 양의 안전주입수가 방출되면 코드입력의 TRIP에서 자동적으로 안전주입수탱크 하단에 연결된 유량조절기 모사 밸브의 유동면적을 초기값으로부터 설정값으로 자동 변경하여 모든 안전주입수가 방출될 때까지 유지하게 된다. 이때의 유동면적은 한국원자력연구소(KAERI)에서 실시한 유량조절기 실험과 EM(Evaluation Model)코드로 계산된 유량값 등을 고려하여 결정하였다¹³⁾. Fig. 3은 본 연구에서 모사된 안전주입계통에 대한 개략적인 노딩을 보여준다.

3-3. 계산 입력 및 해석 방법

본 연구에서는 먼저 유량조절기가 냉각재상실사고시 노심의 냉각성능에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 신행원자로 1400 발전소 모델링 중 유량조절기 모사를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대한 비교 평가를 수행하였다. EM 코드의 계산 결과 및 실험평가에 따르면 유량조절기를 설치한 신행원자로 1400 안전주입계통의 총 저항계수의 범위는 Table 2와 같이 주어진다¹³⁾. Table

Table 1. The selected initial input for transient model.

Input parameters	Desired values	Calculated values
Core power, 102% (MWt)	4062.7	4062.7
System pressure (MPa)	15.51	15.51
Primary system fluid thot (K)	598.6	598.7
Primary system fluid tcold (K)	564.8	564.9
Peak linear power (kW/m)	45.932	47.092
S/G secondary pressure (MPa)	6.9	6.9
Nitrogen pressure (MPa)	4.3072	4.3738
Water temperature (K)	308.0	308.0
Loop flow rate/pump (kg/s)	5247.8	5220.0

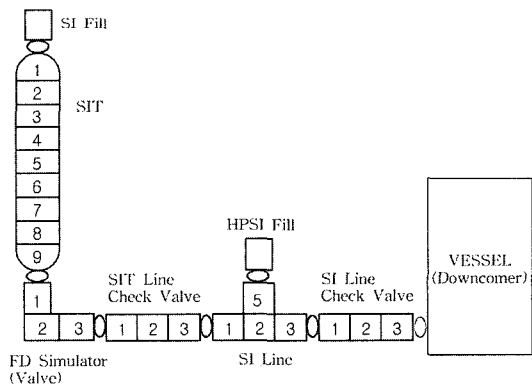


Fig. 3. Schematic view of safety injection line noding.

Table 2. K factor value ranges for APR1400.

Flow region	K factor for FD	K factor for piping
High flow rate region	10~15	5~12
Low flow rate region	95~110	5~12

2에 따르면 유량조절기는 고유량시에 10~15까지의 저항 계수 범위를 가지며, 저유량시에는 95~110의 범위를 가진다. 이때 유량조절기를 제외한 전체 안전주입계통의 배관 저항계수는 유량에 관계없이 5~12 사이의 값을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 유량조절기 및 배관 저항계수가 모두 최소값인 경우와 최대값인 경우에 대하여 각각의 열수력적 현상 평가를 수행하였다.

안전주입수탱크의 전체체적 68.1307 m³이 고정된 상태에서 탱크의 내부에 유량조절기를 부착하게 되면 탱크의 전체체적 중 유량조절기 체적 4.2476 m³ 만큼이 감소하게 된다. 유량조절기 설치에 의한 감소체적은 안전주입수탱크에 저장된 안전주입수 체적이나 압축질소 체적 중 일부의 감소를 필연적으로 초래하게 된다. 본 연구에서는 이와 같이 안전주입수 또는 압축질소 체적의 감소가 냉각재상실사고시 냉각성능에 어떠한 영향을 주는지에 대해서도 검토하였다.

각 계산에 사용된 저항계수의 초기 입력값을 Table 3에 나타내었다. TRAC-M에 의한 해석은 정상상태와 과도상태로 나누어 수행하였으며, Table 1에서와 같이 정상상태 계산 결과가 APR1400 발전소의 실제 운전 설계값과 유사하도록 초기 입력값을 설정하였다. 정상상태 계산의 주요 결과는 과도상태 계산을 위한 입력값으로 사용하였으며, 과도상태의 계산은 냉각재상실사고 발생시 주요 열수력 현상이 완료되는 600초까지 수행하여 각각 다른 입력조건에서의 결과와 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 유량조절기 설치 유무에 대한 비교평가

Fig. 4는 유량조절기를 설치한 Case 1과 설치하지 않

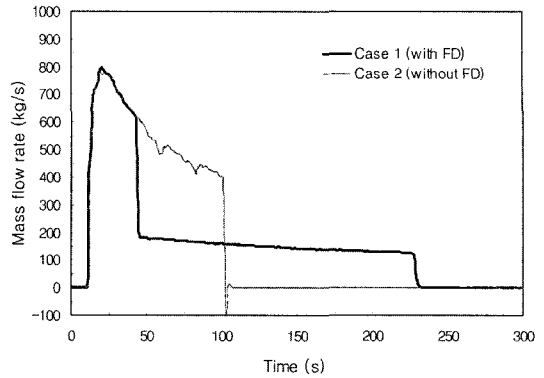


Fig. 4. Comparison of SIT total mass flow rate between case 1 and 2.

은 Case 2의 안전주입수 총 방출유량을 도시한 그림이다(Table 3 참조). Case 1은 유량조절기의 작동에 따라 고유량 방출시간이 약 50초경 끝나고, 이후 저유량 방출이 시작되어 약 220초까지 유지되었다. 이때 고압 안전주입수는 동일하게 주입된다. 유량조절기가 없는 Case 2는 안전주입수 방출초기의 작은 저항계수값이 안전주입수 고갈시점까지 동일하게 유지됨으로써 고유량의 유동만 존재한다. 따라서 안전주입수탱크내에 저장된 안전주입수는 약 100초경 모두 고갈되고 고압안전주입수만 노심으로 유입되게 된다. 이때 최고 유량은 약 800 kg/s이며 이는 유량조절기가 설치된 Case 1의 경우와 큰 차이가 없다. Fig. 4는 유량조절기가 고유량 방출시기와 저유량 방출시기를 명확하게 구별하여 동작하고 있음을 보여주며, 안전주입수탱크 내부의 안전주입수 완전 방출 시간도 약 120초 연장되어 노심에 주입되고 있음을 알 수 있다. Case 1에서는 유량조절기의 체적을 고려하지 않음으로써 안전주입수탱크의 총 체적과 안전주입수의 체적은 두 경우 모두 동일하도록 설정하였다.

Fig. 5는 위의 두 경우에 대한 고온 연료봉의 피복재 최고온도 곡선 비교를 나타내었다. 그림에서 보면 Case 1의 피복재 최고온도는 약 1185 K이었으며 Case 2의 피

Table 3. K factors for each test cases.

Case No.	Fluidic device K factor		SI line K factor	Remark
	High flow rate	Low flow rate		
1	12.5	102.5	8.5	Base Case (Normal K)
2	12.5	12.5	8.5	No fluidic device
3	10	95	5	Base Case+Min. K
4	10	95	5	Gas volume small
5	10	95	5	Water volume small
6	15	110	12	Base Case+Max. K

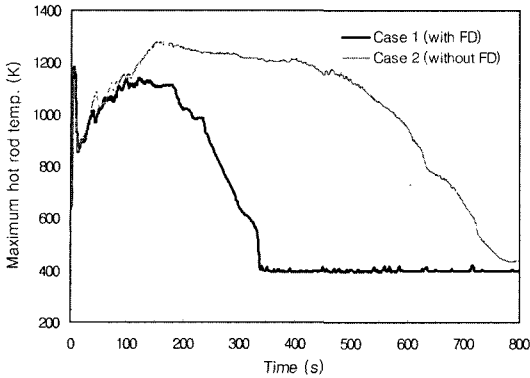


Fig. 5. Comparison of maximum hot rod temperature between case 1 and 2.

복재 최고온도는 1281 K로 유량조절기가 설치됨으로써 약 100 K의 온도 감소효과가 발생하였음을 보여준다. 고온 연료봉의 급냉 완료 시점차이는 더욱 커 Case 1의 경우가 Case 2의 경우에 비하여 약 400초가량 빨라지고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 4와 5의 유량조절기 설치에 따른 현상 비교그림에서 보는바와 같이 본 연구에서 모사한 유량조절기는 설계의 목적에 따라 적절하게 모델링 되었다고 판단된다. 또한 냉각재상실사고 초기에 고유량의 안전주입수가 단시간에 방출 완료되는 것은 오히려 피복재 최고온도를 상승시키는 현상을 초래하고 있으며, 재충수기간 이후에는 안전주입수가 노심으로 장시간 유입되는 것이 노심냉각에 보다 효과적임을 나타내고 있다.

유량조절기의 설치는 안전주입수탱크로부터 방출되는 안전주입수의 고유량 방출시간을 단축시키는 반면 총 방출시간은 연장시킴으로써 피복재 최고온도는 낮추고 연료봉의 급냉 완료 시점은 빠르게 하는 효과가 있음을 보여준다.

4-2. 압축질소와 안전주입수 체적의 영향 평가

유량조절기가 체적이 고정된 안전주입수탱크(68.1307 m³) 내부에 설치됨으로써 발생하는 안전주입수 또는 압축질소 체적감소에 따른 영향이 Fig. 6과 7에 나타나 있다. Fig. 6에서 보면 최소의 저항계수값을 사용하고 유량조절기의 체적을 고려하지 않은 Case 3과 동일한 저항계수값을 사용하였으나 안전주입수 체적이 감소한 Case 5의 경우 안전주입수 방출초기의 유량은 매우 유사하다. 그러나 전체 안전주입수의 방출시간은 Case 5의 경우가 약 185초로 다른 경우에 비하여 짧게 나타나 있다. 이는 유량조절기 체적 4.2476 m³ 만큼의 안전주입수량이 감소함으로 인하여 나타나는 현상이다. Case 4는 안전

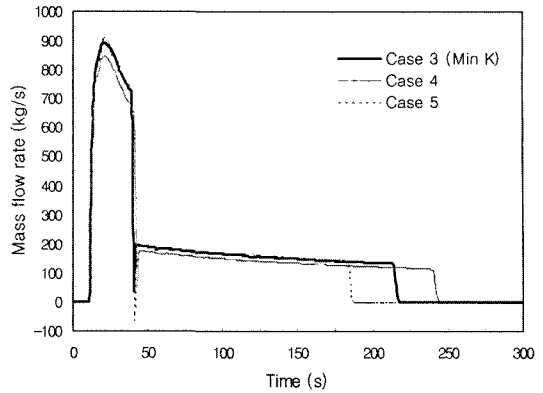


Fig. 6. Comparison of SIT total mass flow rate for different gas/water volume.

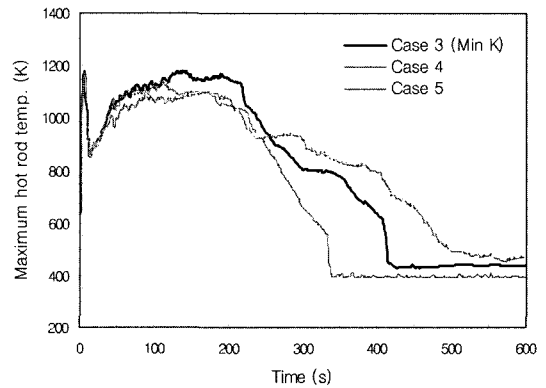


Fig. 7. Comparison of maximum hot rod temperature for different gas/water volume.

주입수 체적은 Case 3과 동일하나 유량조절기의 체적이 압축질소의 체적을 감소시켜 총 압축질소량이 감소했을 경우에 대한 계산이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 전체적으로 동일 시간에서의 안전주입수의 방출유량이 감소하였으며 이에 따라 총 방출시간은 약 240초까지 지속되어 Case 3에 비하여 약 25초 정도 연장되었다. 이는 압축질소체적의 상대적 감소로 인하여 안전주입수탱크 내부로부터 안전주입수를 방출시키는 압력이 감소하였음을 나타낸다.

Fig. 7은 위의 세 가지 경우에 대한 고온 연료봉의 피복재 최고온도 비교를 보여주고 있다. 그림에서 보면 피복재 최고온도는 Case 3이 다소 높게 나타나고 있으나 차이는 상대적으로 작으며, 연료봉의 급냉 완료 시점에 있어서는 압축질소의 체적이 감소한 Case 5의 경우에 약 500초로 다른 경우보다 늦게 나타났다. 안전주입수의 체적이 감소한 경우 급냉 시점은 약 330초경으로 Case 3

보다 약 80초 빠르게 나타났다. 이는 초기 고유량의 감소가 적정유량범위 이상에서 발생했을 경우는 피복재 최고온도에 큰 영향을 미치지 않으며, 특히 고유량 구간의 시간차이는 피복재 최고온도에 상대적으로 큰 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 그림에서 Case 3과 4의 온도가 완전히 냉각되지 않은 것으로 보이는 이유는 TRAC-M에서 설정된 변수의 특성상 피복재 최고온도를 가지는 한 지점에 대한 온도분포곡선이 아닌 동일 시간 고온 연료봉에서 발생하는 최고온도를 연료봉의 위치에 관계없이 나타냄으로써 보여 지는 것으로 출력 데이터 상에서 각각 410초와 490초경에 피복재 최고온도 발생 위치의 급냉이 완료되었음을 확인 하였다.

위의 두 그림에서 보면 유량조절기의 설치로 인한 안전주입수 또는 압축질소의 체적감소는 연료봉의 급냉 완료 시점에는 다소 영향을 주고 있으나 피복재 최고온도의 증가에는 미미한 영향을 주고 있으며, 안전주입수의 체적 감소시보다 압축질소의 체적 감소시에 상대적으로 빠른 급냉 완료 시간을 보여주고 있다.

4-3. K factor 변화에 따른 영향 비교평가

Fig. 8과 9는 유량조절기 및 안전주입계통배관의 총 저항계수가 각기 다른 경우에 대한 영향 비교가 도시되어 있다. Case 3은 최소의 저항계수값을 사용하였으며 Case 6은 최대값을 그리고 Case 1은 두 경우에 대한 평균값을 사용하여 계산을 수행하였다(Table 3 참조). 저항계수 이외의 다른 조건은 세 경우에 대해서 모두 동일하다. Fig. 8에서 총 방출유량은 최소 저항계수값을 사용한 Case 3의 경우 고유량 영역에서 상대적으로 많은 양의 방출이 발생하고 최대 저항계수값을 사용한 Case 6의 경우 적은 방출유량을 보여준다. 그러나 저유량 영역에서는 세 경우 모두 유량에서 상대적으로 미소한 차

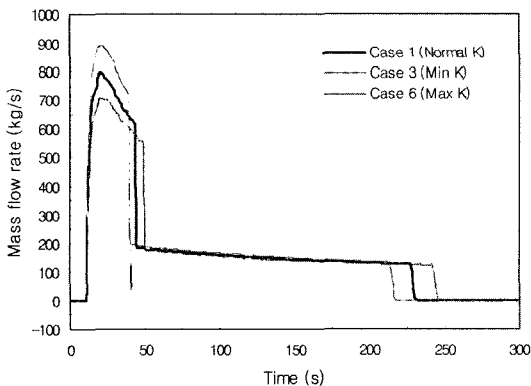


Fig. 8. Comparison of SIT total mass flow rate for different K factors.

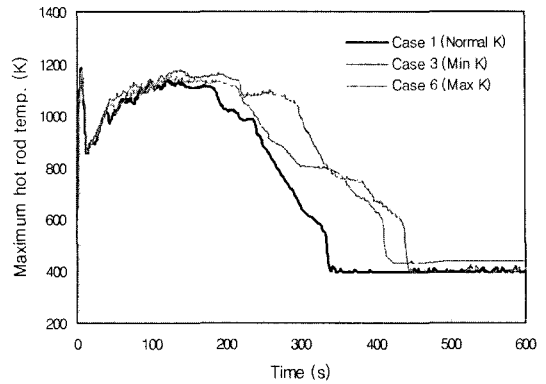


Fig. 9. Comparison of maximum hot rod temperature for different K factors.

이를 보여주고 있다. 따라서 고유량 영역에서 발생한 방출량의 차이는 안전주입수의 총 방출 완료시점의 차이를 발생시키게 됨으로써 Case 6의 경우 가장 늦은 방출완료 시간을 보여주고 있으며 Case 3의 경우 다른 경우들 보다 빠르게 안전주입수 방출이 완료되고 있다.

Fig. 9는 위의 세 가지 경우에 대한 고온연료봉의 피복재 최고온도 분포 곡선을 보여준다. 저항계수값이 최소인 Case 3의 경우에 피복재 최고온도가 다소 높게 나타나고 있으나 그 차이는 크지 않았다. 또한 Case 3의 급냉 완료시점은 약 410초로써 Case 6의 445초에 비하여 35초 빠르게 발생하였다. 그러나 평균 저항계수값을 사용한 Case 1의 경우가 Case 3이나 Case 6에 비하여 온도가 낮고 급냉 완료 시점도 상대적으로 빠른 것은 저항계수값에 대하여 임의의 최적값이 존재하고 있음을 간접적으로 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내에 새로이 건설 예정인 신형원자로 1400, 신고리 3, 4호기에 대하여 대형 냉각재상실사고 발생시 유량조절기의 역할과 성능에 대한 평가를 3차원 최적안전해석 코드인 TRAC-M을 이용하여 수행하였다. 연구 결과 TRAC-M 코드를 사용한 해석은 안전주입수의 방출 유량 곡선과 고온 연료봉의 피복재 최고온도를 도시한 온도분포 곡선 등을 비교해본 결과 신뢰할만한 결과를 보여주고 있다고 판단된다. 유량조절기 성능평가에 대한 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 신형원자로 1400 발전소의 안전주입수탱크 내부에 설치된 유량조절기를 모사하여 해석한 결과 TRAC-M이 유량조절기의 동작성능을 적절히 모사하고 있음을 알 수 있었으며, 유량조절기가 설치되지 않았을 경우에 비하여

고유량 및 저유량 방출영역을 명확히 구분하여 작동함으로써 총 안전주입수 방출시간이 크게 연장되어졌다. 또한 유량조절기 설치 결과 상대적으로 낮은 피복재 최고 온도를 나타내었으며, 고온 연료봉의 급냉 완료 시점도 크게 빨라졌다.

2) 유량조절기의 설치로 인한 안전주입수탱크 내부 안전주입수 또는 압축질소 체적 감소에 대한 영향을 평가한 결과 압축질소의 체적이 감소한 경우가 안전주입수 체적이 감소한 경우에 비하여 안전주입수 방출시간이 연장됨과 동시에 고온연료봉의 급냉 완료 시점도 빠르게 단축시킬 수 있었다. 따라서 유량조절기 설치로 인한 안전주입수탱크 내부 체적감소가 요구될 경우 안전주입수의 체적은 그대로 유지하고 압축질소의 체적을 감소시키는 것이 노심냉각에 보다 효과적인 것으로 판단된다.

3) 각각 다른 범위의 안전주입계통 전체 저항계수값에 대한 계산을 수행한 결과 전체 저항계수값이 최대인 경우에 안전주입수의 방출완료시점이 지연되었고, 고온 연료봉의 급냉 완료시점도 다른 경우보다 늦게 발생하였다. 최소의 저항계수값을 가지는 경우에는 방출완료시점이 가장 빨랐고, 연료봉의 급냉 완료 시점은 저항계수값이 최대인 경우보다 다소 빨랐으나 평균값을 가지는 경우보다는 지연되었다. 그러나 저항계수의 변화에 따른 연료봉온도의 차이는 크지 않았다.

본 연구 결과에서 알 수 있는 바와 같이 신청원자로 1400 발전소의 안전주입계통에 유량조절기를 적용하였을 경우 유량조절기 및 안전주입계통 배관의 전체 저항

계수 범위에서 과학기술부고시 및 Appendix K에서 제한하는 피복재 최고온도 1204°C(1477 K)를 초과하지 않고 있음을 보여준다⁶⁾. 본 연구에서 수행된 계산 결과들은 이후 유량조절기의 보완 및 추가 민감도 분석에 사용될 수 있다.

참고문헌

1. Steinke, R.G. *et al.* "TRAC-M/FORTRAN 90 (Version 3.0) User's Manual", Los Alamos National Laboratory, 2001, NUREG/CR-6722.
2. Song, J.H.; Kim, T.Y.; Choi, H.R.; Choi, C.J.; Seo, J.T. "Effects on LOCA Mass and Energy Release of the SIT Fluidic Device for SKN 3&4", NURETH-10, Seoul, Korea, 2003.
3. Korea Atomic Energy Research Institute. "Fluidic Device Performance Test using the VAPER Test Facility", VAPER-QLR-005, 2003.
4. Lee, S.W.; Oh, S.J. "Investigation of APR1400 Large Break Loca Scenario using Relap5/Mod3", NURETH-10, Seoul, Korea, 2003.
5. Korea Atomic Energy Research Institute. "Scaling Analysis of the Thermal Hydraulic Test Facility for the Large Break LOCA of KNGR", KAERI/TR-1878/2001, 2001.
6. 과학기술부. "가압경수로의 비상노심냉각계통의 성능에 관한 기준", 과학기술부고시, 2001, 제2001-39호.