

## APR1400 모의를 위한 ATLAS 안전주입탱크의 주입 성능에 관한 특성 시험

박현식\* · 최남현 · 박춘경 · 김연식

한국원자력연구원 열수력안전연구부

(2008년 2월 27일 접수, 2008년 3월 26일 수정, 2008년 4월 4일 채택)

### Characterization Tests on the SIT Injection Capability of the ATLAS for an APR1400 Simulation

Hyun-Sik Park\*, Nam-Hyun Choi, Choon-Kyung Park and Yeon-Sik Kim

*Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea*

(Received 27 February 2008, Revised 26 March 2008, Accepted 4 April 2008)

#### 요 약

열수력 종합효과 실험장치인 ATLAS가 한국원자력연구원에 구축되었으며, 최근 대형 냉각재 상실사고(LBLOCA) 시의 재관수 현상에 대한 시험이 본격적으로 수행되었다. LBLOCA 재관수 단계에서 APR1400의 열수력 현상을 제대로 모사하기 위해서는 안전주입수 유량이 척도비에 맞춰 축척되어야 한다. 또한 ATLAS 장치에는 안전주입탱크(SIT) 내부에 자동제어 유량조절기구인 Fluidic Device가 장착되지 않았기 때문에 SIT의 고유량 및 저유량 주입 성능을 모사하기 위한 별도의 방안이 마련되어야 한다. 따라서 ATLAS의 주입 성능을 기준 발전소인 APR1400의 성능과 일치시키기 위하여 ATLAS 안전주입탱크의 특성 시험을 수행하였다. ATLAS SIT의 고유량 주입 성능은 주입 배관에 최적의 Orifice를 설치하여 일치시키고, 저유량 주입 성능은 유량조절밸브의 개도를 조절함으로써 일치시킬 수 있었다. 이러한 특성 시험을 통해 ATLAS 안전주입계통이 APR1400에서 요구하는 SIT 고유량 및 저유량을 잘 모의할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

**주요어** : ATLAS, 안전주입계통, APR1400, 대형 냉각재 상실사고, 종합효과실험

**Abstract** — A thermal-hydraulic integral effect test facility, ATLAS (Advanced Thermal-hydraulic Test Loop for Accident Simulation), has been constructed at KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute). Recently several integral effect tests for the reflood period of a LBLOCA (Large Break LOss of Coolant Accident) of the APR1400 have been performed with the ATLAS. In the APR1400 a high flow condition is changed to a low flow condition due to an fluidic device during an operation of the SIT. As the self-controlled fluidic device was not installed in the ATLAS, a set of characterization tests was performed to simulate its injection capability from the SIT for the APR1400 simulation. In the ATLAS the required SIT flow rate in the high flow condition was acquired by installing orifices with an optimized flow area to throttle the SIT discharge line and the low flow condition was achieved by changing the opening of the flow control valve in the SIT injection line. The test results showed that the safety injection systems of the ATLAS could simulate the required high and low flow rates of the SIT for the APR1400 simulation efficiently.

**Key words** : ATLAS, Safety injection system, APR1400, LBLOCA, Integral effect test

\*To whom correspondence should be addressed.  
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero,  
Yuseong, Daejeon 305-600, Korea  
Tel: 042-868-8615  
E-mail: hspark@kaeri.re.kr

## 1. 서 론

APR1400<sup>1)</sup>은 한국 산업계에서 개발한 약 4000 MWt의 열출력을 가지는 신형경수로이며, 원자로 냉각재계통은 원자로용기, 증기발생기, 가압기, 2개의 고온관과 4개의 저온관 등으로 구성되었다. APR1400은 4개의 기계적으로 독립된 안전주입계통, 원자로 직접주입(DVI, Direct Vessel Injection), SIT 내부에 장착된 Fluidic Device 및 IRWST(In-containment Refueling Water Storage Tank)와 같은 새로운 개념의 안전주입계통을 채택하고 있으며, 저압주입펌프는 제거되었다. APR1400의 안전주입계통<sup>2)</sup>은 발전소 비상시 일차계통에 저온의 냉각수를 주입하여 노심의 노출을 억제하고, 피복재 온도를 기준치 이하로 유지시키기 위한 계통이다. APR1400에는 각각의 DVI 관에 독립적으로 안전주입펌프와 안

전주입탱크(SIT, Safety Injection Tank)가 하나씩 할당된다. 저압주입펌프가 수행하는 저유량의 주입 기능은 SIT 내부에 장착된 피동 유량 조절기구인 Fluidic Device가 담당한다.

APR1400을 기준 원전, OPR1000을 참조 원전으로 하는 열수력 종합효과 실험장치 ATLAS(Advanced Thermal-hydraulic Test Loop for Accident Simulation)가 한국원자력연구원에 설치되어 운영<sup>3)</sup>되고 있다. 또한 ATLAS에서의 대형 냉각재 상실사고(LBLOCA, Large Break Loss-Of-Coolant Accident), DVI관 파단사고(DVI Line Break) 및 주증기관 파단사고(Main Steam Line Break) 등에 대한 코드 해석이 이루어져, APR1400의 해석결과와 비교<sup>4)</sup>되어졌다. 최근에는 ATLAS를 이용하여 대형 냉각재 상실사고시의 재관수 현상에 대한 실험<sup>5)</sup>을 수행하였다. 대형 냉각재 상실사고 재관수 기간에서 APR1400

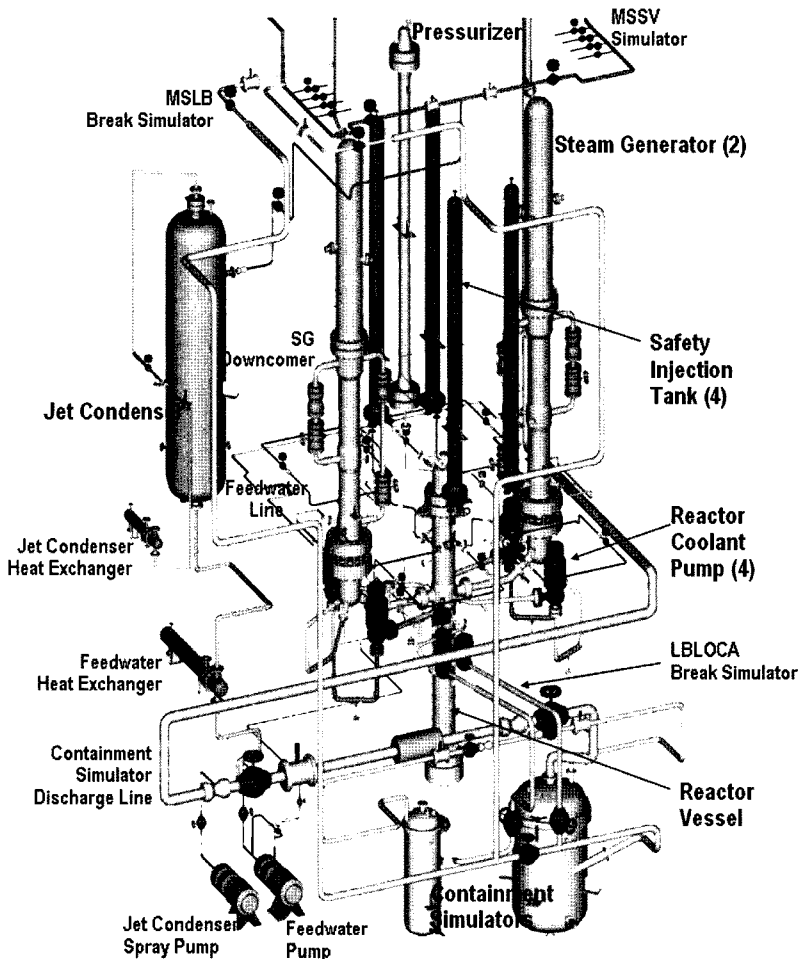


Fig. 1. Schematic diagram of the ATLAS.

의 열수력 현상을 제대로 모사하기 위해서는 안전주입수가 축척에 맞게 주입되어야 한다. 특히 ATLAS에서는 기준 원전인 APR1400의 SIT에 내장된 Fluidic Device<sup>[7]</sup>가 장착되지 않았고 배관 구성도 다르기 때문에 SIT 고유량 및 저유량 주입 성능을 모사하기 위해서는 별도의 특성시험이 필요하다.

본 연구는 ATLAS SIT의 주입 성능을 APR1400의 주입 성능과 일치시키기 위한 것이다. 즉 Fluidic Device가 장착된 APR1400 SIT의 유동 특성을 ATLAS SIT 배관에 적절한 직경의 Orifice를 설치하고, 유량조절밸브의 개도를 제어함으로써 모의할 수 있다는 것을 확인하기 위한 것이다. 본 연구 결과는 ATLAS를 이용한 대형 냉각재 상실사고 재관수 실험<sup>[8]</sup>에서 ATLAS SIT로부터의 고유량 및 저유량을 APR1400의 축척된 설계값과 일치시키기 위해 필수적이다.

## 2. 열수력 종합효과 실험장치 ATLAS

열수력 종합효과 실험장치 ATLAS는 원자력발전소의 원자로계통 및 안전계통 등을 상세하게 축소 제작한 시설로 한국표준형원전(OPR1000)과 신고리 3, 4호기에 적용되는 신형경수로(APR1400) 등 국내에서 가동 중이거나 건설될 시설에 대한 여러 가상 조건에서의 열수력 거동을 종합적으로 모의할 수 있다.

ATLAS는 Ishii 등의 3단계 축소모의 방법론<sup>[9]</sup>을 채택하여 설계되었으며, APR1400과 대비하여 높이는 1/2, 부피는 1/288이며, 압력 및 온도는 실제 원자로와 같이 18.5 MPa, 370°C의 압력과 온도 조건을 구현할 수 있다. ATLAS는 신형경수로 APR1400을 기준 원전으로 채택하여 2개의 고온관과 4개의 저온관 배열을 가지는 냉각재계통, 일체형 원자로용기 강수부 및 안전주입수의 원자로용기 직접주입(DVI)을 모사할 수 있다. 또한 저온관 주입(CLI) 및 안전주입펌프 등과 같은 OPR1000의 설계 특성이 추가로 반영되었다. Fig. 1은 ATLAS의 개략도를 보여준다. ATLAS의 주요 구성기기로는 원자로 모의용기, 2개의 고온관 및 4개의 저온관을 갖는 일차계통 배관, 4개의 냉각재펌프, 2개의 증기발생기, 가압기, 격납용기 모의장치, 안전주입탱크(SIT), 고압안전주입(HPSI) 펌프 등의 비상노심냉각계통(ECCS), 정지냉각계통, 기기냉각수계통 및 보조계통 등이 있다. 노심 출력은 전기 히터에 의해 모의되며, 최대 공급 전력은 정상 출력의 약 10%인 2.0 MW이다. ATLAS 장치의 주요 척도비는 Table 1과 같다.

ATLAS에는 현재 1,236개의 계측기가 설치되었으며, 제어 및 자료처리계통으로는 분산제어계통(DCS, Distributed Control System)을 사용하고 있다. 약 1,500개의 제어 판

Table 1. Major scaling parameters of the ATLAS.

Parameter	Scaling factor	ATLAS scaling value
Length	$l_{or}$	1/2
Diameter	$d_{or}$	1/12
Area	$d_{or}^2$	1/144
Volume	$l_{or} \cdot d_{or}^2$	1/288
Temperature difference	$\Delta T_{or}$	1
Velocity	$l_{or}^{1/2}$	$1/\sqrt{2}$
Time	$l_{or}^{1/2}$	$1/\sqrt{2}$
Power/volume	$l_{or}^{-1/2}$	$\sqrt{2}$
Heat flux	$l_{or}^{-1/2}$	$\sqrt{2}$
Core power	$l_{or}^{1/2} \cdot d_{or}^2$	$1/(144 \cdot \sqrt{2})$
Flow rate	$l_{or}^{1/2} \cdot d_{or}^2$	$1/(144 \cdot \sqrt{2})$
Pressure drop	$l_{or}$	1/2

련 입출력 신호가 사용되고 있으며, 처리 속도는 10 Hz 이상이다. ATLAS 유체계통에 따라 구분되어 구현된 43개의 공정화면이 HMI(Human Machine Interface)로써 사용되며, 또한 ATLAS에는 다양한 감시 및 보호계통이 장착되었다.

ATLAS를 이용하여 모의 예정인 주요 사고 및 운전 조건으로는 대형 냉각재 상실사고, DVI관 파단 사고, 소형 냉각재 상실사고, 증기발생기 세관 파단 등의 LOCA 관련 사고, 증기관 파단 및 급수관 파단 사고와 여러 과도상태 및 비상 운전 절차서 개발을 위한 다양한 비정상 운전 조건에서의 운전 등이 있다. 최근에는 2013, 2014년 준공을 목표로 건설될 예정인 최초의 APR1400형 원자로인 신고리 3, 4호기의 인허가 관련 안전 현안 해소를 위해 ATLAS를 이용하여 대형 냉각재 상실사고 재관수 시험을 수행하였으며<sup>[8]</sup>, 향후 DVI관 파단 사고, 소형 냉각재 상실사고 및 증기발생기 세관 파단에 대한 모의실험을 수행할 예정이다.

## 3. ATLAS 안전주입탱크의 상세 설계

### 3-1. APR1400 SIT의 설계 사항

Fig. 2는 APR1400 안전주입탱크<sup>[10]</sup>의 개략도를 보여준다. APR1400의 SIT에는 안전주입수의 저유량 주입을 위해 Stand Pipe와 Fluidic Device가 장착된다. APR1400 SIT는 질소로 가압되어 있어, 일차계통 압력이 초기에 설정된 압력 이하로 강하하였을 때 작동한다. APR1400 SIT는 기준 수위(Nominal Level, Level 1)에서 초기에 4.3 MPa로 가압된다. 안전주입수의 수위가 Stand Pipe 상부인 Level 2 이상에서는 Stand Pipe를 통과하여 Supply Port를 관통하는 유로와 Fluidic Device에 설치된 Control Port를 통과하는 두 유로가 존재한다. 그러나 수위가 Level 2 이하로 내려가면 Stand Pipe를 통과하는 유로는 막히

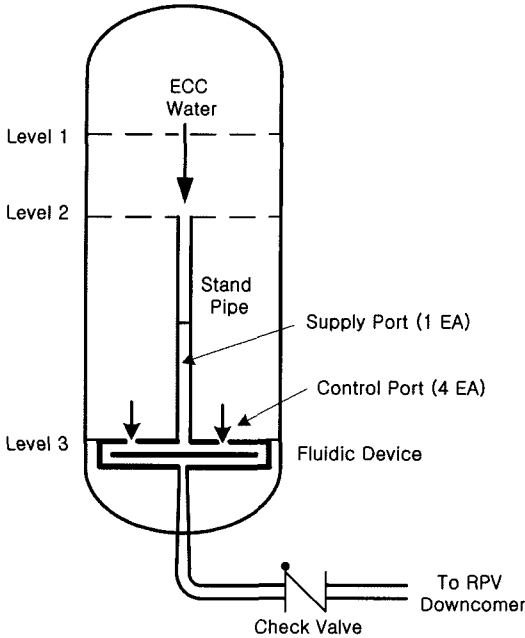


Fig. 2. Schematic diagram of the APR1400 SIT.

고 Control Port로만 유로가 형성된다. Control Port를 통과하는 유량은 Fluidic Device 내부에서 형성되는 외류

에 의한 유동저항의 증가로 Supply Port를 통과하는 유량에 비해 현저히 작다. 즉 Level 2에서 고유량에서 저유량으로의 피동적인 천이가 발생된다. 또한 Dead Band 인 Level 3 이하에서는 안전주입수의 주입이 중지되며, 안전주입수의 고갈로 질소의 유입이 시작된다.

Fig. 3은 APR1400 및 ATLAS 안전주입탱크의 주요 치수를 보여준다. APR1400 SIT 1 개의 전체 부피는 2406  $\text{ft}^3$ 이며, Dead Band 및 Stand Pipe 하단의 부피는 각각 153 및 990  $\text{ft}^3$ 이다<sup>[7]</sup>. Stand Pipe 상부에 확보해야할 최소 부피는 800  $\text{ft}^3$ 이며, 기준 조건에서의 물 및 질소의 부피는 각각 1858 및 395  $\text{ft}^3$ 이다. 허용되는 최소 및 최대 물 부피는 각각 1790 과 1927  $\text{ft}^3$ 이며, 이때의 초기 압력은 각각 4.03 및 4.46 MPa이다. APR1400 SIT의 고 유량 및 저유량의 설계값은 각각 800 및 200  $\text{kg/s}$ 이다.

### 3-2. LBLOCA 사고시의 SIT 주입유량

Fig. 4는 LBLOCA시의 APR1400 안전주입수 유량의 개념도를 보여주고 있다. SIT로부터 주입되는 안전주입수는 두 단계를 거쳐 원자로용기 상부 플레넘에 주입된다. 먼저 주된 유로는 Stand Pipe를 통과하여 형성되나, 수위가 Stand Pipe 아래로 떨어지면 유로가 SIT 하단의 Control Port 만으로 바뀐다. Control Port의 역할은 안전주입수의 유동에 외류를 발생시킴으로써 유동 저항을

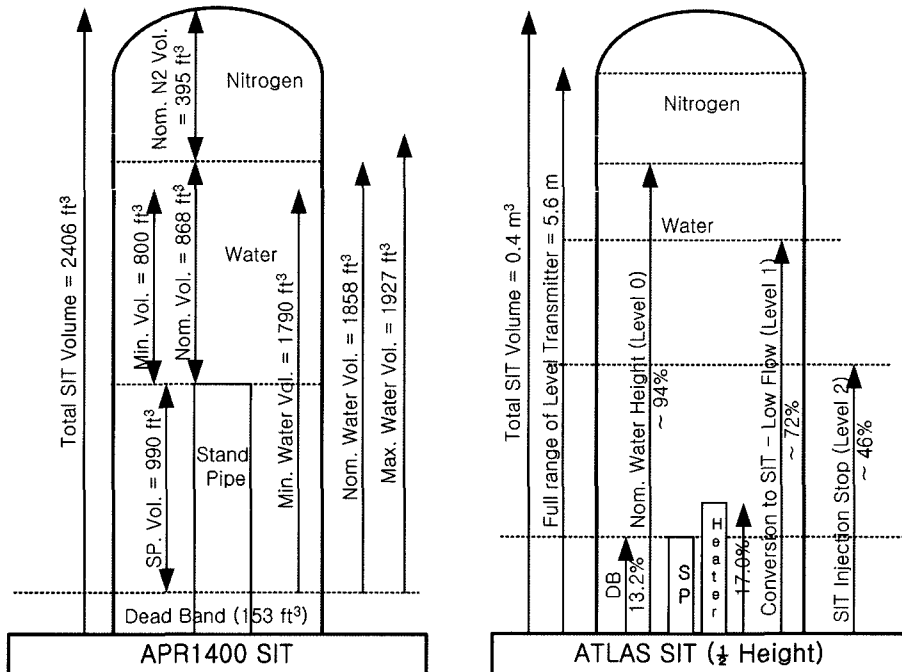


Fig. 3. Major geometric dimensions of the APR1400 and ATLAS SITs.

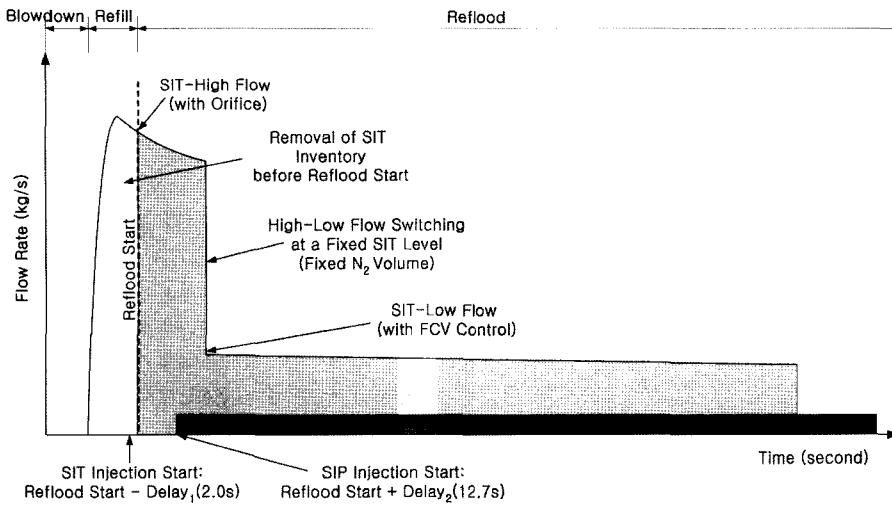


Fig. 4. Schematics of an ECC injection during a LBLOCA scenario for the APR1400.

Table 2. ECC flow rates for the APR1400 design and their scaled values in the ATLAS during the LBLOCA scenario.

Time (s)	APR1400		Time (s)	ATLAS		Description
	SIT	HPSI		SIT	HPSI	
0	0	0	0	0	0	LBLOCA (Start)
16	0	0	11.3	0	0	SIT-High Flow (Start)
29	735	0	20.5	3.61	0	SIT-High Flow (Peak)
36	692	0	25.5	3.40	0	Reflood Period (Start)
54	562	53	38.2	2.76	0.26	HPSI Injection (Start)
61	512	58	43.1	2.51	0.28	SIT-High Flow (End)
62	203	58	43.8	1.00	0.28	SIT-Low Flow (Start)
205	171	65.6	145.0	0.84	0.32	SIT Low Flow (End)
206	0	65.6	147.1	0	0.32	HPSI Injection (Continue)

증가시켜 유량을 피동적으로 조절하는 것이다. 또한 재관수가 시작되고 일정한 지연시간 후에 고압주입펌프를 이용하여 고압 안전주입수를 주입한다.

Table 2는 LBLOCA 각 시점에서의 APR1400 안전주입수의 주입 유량 및 ATLAS의 축척된 시간 및 유량을 보여주고 있다. 이는 APR1400의 LBLOCA 전 사고 시나리오에 대해 최적안전해석코드 MARS<sup>TM</sup>를 이용하여 분석한 결과이다. MARS 입력 자료에서 SIT와 HPSI Pump는 각각 Accumulator 및 Time Dependent Junction Component로 모의되었으며, MARS 코드는 APR1400의 사고 모의에서 요구하는 SIT 및 HPSI 주입유량을 잘 모사하였다. APR1400 기준으로 사고시작 후 16초에 발생하는 SIT 주입신호와 함께 안전주입수 주입이 시작된다. 주입 유량은 APR1400 기준으로 13초 후(사고시작 후

29초)에 최고치에 이르며, 초기의 SIT 고유량 주입은 Fluid Device의 작동에 의해 저유량으로 전환(사고시작 후 61초)되고, APR1400 기준으로 사고시작 후 205초에 주입이 종료된다. 노심에서의 재관수 현상은 사고 시작 36초에 발생되며, 고압 주입펌프에 의한 고압 안전주입(HPSI, High Pressure Safety Injection)은 사고시작 54초 후에 작동된다.

### 3-3. ATLAS SIT의 척도해석

ATLAS 안전주입계통의 설계<sup>[26]</sup>에서 고려된 주요 열수력 과정 및 현상은 안전주입 냉각수 유량과 SIT의 열수력적 특성 등이다. 이러한 열수력적 현상은 노심의 냉각 성능에 지대한 영향을 준다. 주입되는 냉각수량은 일차계통 압력에 따라 변한다. 냉각재계통 압력이 높으면

냉각수 주입량이 작으며, 압력이 낮아질수록 냉각수 주입량이 증가한다. 냉각수 주입량은 주입펌프 성능, SIT 압력 및 배관의 압력손실 등의 함수이다. APR1400 SIT에 설치된 Fluidic Device는 냉각수 주입 유량을 자체적으로 조절하는 기능을 갖기 때문에 SIT 수위 및 압력에 따라서 공급 유량이 변화한다. ATLAS에서 APR1400 안전주입계통의 작동을 모의하기 위해서는 일차계통으로 주입되는 유량이 보존되어야 한다. 주입 유량은 일차계통의 압력 조건과 주입계통에서의 압력 손실 및 펌프의 특성에 따라 변한다. 따라서 SIT로부터 DVI 주입배관까지의 배관 체적 및 압력손실 특성이 보존되어야 한다. ATLAS 장치에서 안전주입수의 유량은 원형의 1/203.6으로 설계되어야 하며, SIT 내부 및 배관 내부의 유체 체적비는 원형 대비 1/288이다. ATLAS 장치에서의 운전 압력 및 온도 조건은 APR1400에서의 압력 및 온도 조건을 그대로 모사하고, Fluidic Device의 성능은 원형의 성능과 같아야 한다. 또한 ATLAS에서는 APR1400과 비교하여 높이가 1/2이고, 사코는 1.414배 빠르게 진행된다.

### 3-4. ATLAS SIT의 설계사양

Fig. 5는 ATLAS 안전주입탱크<sup>12)</sup>의 개략도를 보여준다. ATLAS SIT는 대부분 APR1400과 동일하게 배치되

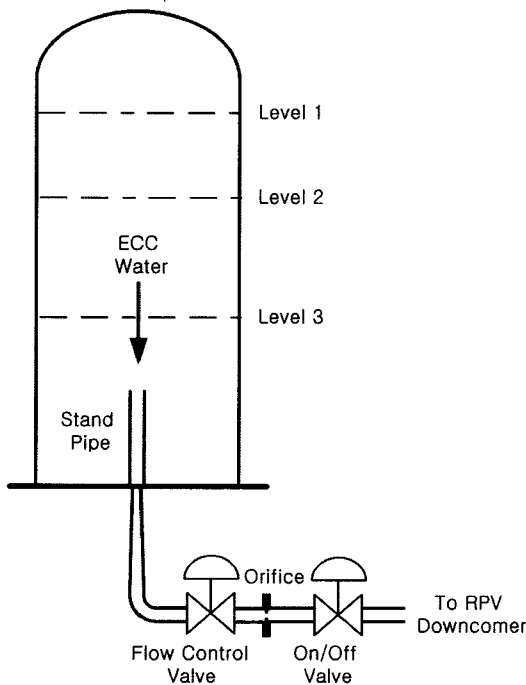


Fig. 5. Schematic diagram of the ATLAS SIT.

었으나, APR1400 SIT와는 달리 Fluidic Device가 장착되지 않았다. Fluidic Device의 성능은 SIT 후단에 설치된 유량제어밸브의 개도로 모의할 수 있다. ATLAS SIT는 기준 수위(Nominal Level, Level 1)에서 초기에 4.3 MPa으로 가압된다. APR1400에 대한 척도해석을 통해 ATLAS 내부의 초기 질소량 및 초기 수위(Level 1), 저유량으로의 전환 수위(Level 2) 및 Dead Band에서의 수위(Level 3)가 결정된다. SIT 작동신호에 따라 유량조절밸브 및 On/Off 자동제어밸브가 개방된다. 이때 유량조절밸브의 개도는 100%이며, 수위가 Level 2에 이르면 유량조절밸브의 개도가 정해진 값으로 조절되면서 저유량으로 전환된다. Level 3 이하는 Dead Band로써 Level 3 이하에서는 안전주입수 주입을 중지시키기 위해 On/Off 자동제어밸브가 닫힌다.

ATLAS에서 고압주입펌프는 펌프 1 대가 두 곳의 DVI 관을 담당하도록 배치되었다. SIT는 4 대가 설치되며, 최대 운전온도 및 압력은 100°C와 5.0 MPa이다. 탱크 내부는 초기에 약 80%의 물로 채워지고, 상부는 최대 4.5 MPa까지 질소로 가압된다. SIT 내부에는 내부 유체 온도를 조절할 수 있도록 전기 가열봉이 설치된다. ATLAS SIT의 체적은 APR1400의 1/288로 설계되었다. Fig. 3은 ATLAS 안전주입탱크의 주요 치수를 보여준다. ATLAS SIT 1 개의 부피는 0.4 m<sup>3</sup>이며, SIT 수위계의 전체 범위는 5.6 m이다. SIT 수위계의 범위를 넘는 SIT 상부에서의 부피는 SIT 1, 2, 3, 4 각각에 대해 0.0201, 0.0193, 0.0167, 0.0171 m<sup>3</sup>이다. ATLAS에는 Fluidic Device가 장착되지 않았기 때문에 Stand Pipe 이하는 Dead Band로써 이때의 수위는 13.2%이다. 척도해석을 통해 APR1400의 SIT 조건으로부터 ATLAS의 기하학적 치수 및 운전 조건을 결정하였다. ATLAS에서 기준 조건(Nominal condition)의 수위는 SIT 1, 2, 3, 4 각각에 대해 95.1, 94.9, 94.2, 94.3%, Fluidic Device의 역할에 의한 저유량으로의 전환시점 수위는 SIT 1, 2, 3, 4 각각에 대해 72.8, 72.6, 72.0, 72.1%이고, SIT 주입 종료시점에서의 수위는 SIT 1, 2, 3, 4 각각에 대해 47.4, 47.2, 46.6, 46.7%이다.

### 3-5. ATLAS SIT 주입배관에서의 차압분포를 이용한 Orifice 설계

4개의 ATLAS SIT 배관은 조금씩 차이는 있으나 대략적인 구성은 일치한다. 기존 실험결과로부터 Orifice가 설치되기 전 SIT 주입배관의 저항계수(Resistance Coefficient)  $K_{org}$  값을 구하고, ATLAS SIT 유량을 측정된 APR1400 SIT 유량과 일치시키기 위해 추가되어야 할 저항계수  $K_{add}$ 를 계산하였다. 식 (1)은 배관을 통한 저항계수, 유량 및 차압의 관계를 보여준다.

$$\Delta p = K \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 = K \cdot \frac{\dot{m}^2}{2\rho A^2} \quad (1)$$

여기서  $\Delta p$ ,  $K$ ,  $\rho$ ,  $u$ ,  $\dot{m}$  와  $A$ 는 각각 차압, 저항계수, 밀도, 속도, 질량 유량 및 유동 면적을 의미한다.

Orifice 설치 전의 차압분포에 대한 실험데이터를 바탕으로 ATLAS SIT 배관에 추가되어야 할 저항계수  $K_{add}$ 를 계산하였다. 기존 실험결과는 SIT의 초기 압력이 4.3 MPa인 조건에서 유량조절밸브를 100% 개방했을 때, 유량은 약 7.0 kg/s 임을 보여준다. SIT 주입 배관은 1.5 인치 Schedule 160인 배관이므로, Orifice가 설치되지 않은 조건에서의 저항계수  $K_{org}$ 는 151.3이었다. 기존 실험의 차압분포로부터 추정된 저항계수  $K_{org}$ 는 ATLAS 주입 배관에 설치된 모든 Elbow, Branch, Gate Valve, 및 Check Valve를 통한 형상 저항계수 및 배관에서의 마찰 저항계수를 합한 값(약 22.9)보다 훨씬 큰 값을 보이는데, 이는 Check Valve의 저항계수의 불확실성이 크기 때문으로 보인다. 식 (1)에서 Orifice가 설치되기 전과 후인 조건에 대해 계산할 수 있으며, 이를 일치시키면 식 (2)와 같고, 최종적으로 저항계수  $K_{add}$  값에 대한 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\Delta p = K_{org} \cdot \frac{\dot{m}_{org}^2}{2\rho A^2} = (K_{org} + K_{add}) \cdot \frac{\dot{m}_{add}^2}{2\rho A^2} \quad (2)$$

$$K_{add} = K_{org} \cdot \left( \frac{\dot{m}_{org}^2}{\dot{m}_{add}^2} - 1 \right) \quad (3)$$

여기서  $K_{org}$ ,  $\dot{m}_{org}$ ,  $K_{add}$  및  $\dot{m}_{add}$ 는 각각 Orifice가 설치되기 전의 저항계수 및 질량유량, 추가된 저항계수 및 Orifice가 설치된 이후의 질량유량을 의미한다.

목표로 하는 SIT 고유량이 약 4.0 kg/s이므로, 식 (3)으로부터 구한 저항계수  $K_{add}$ 는 311.7이다. 요구되는 저항계수를 얻기 위해서는 1.5인치 Schedule 160 배관에서 내경이 약 10.2 mm인 Orifice가 설치되어야 함을 보여준다. 계산에 사용된 Square-Edged Orifice의 유동 저항계수는 식 (4)로 표현된다<sup>[13]</sup>.

$$K_{add} \sim \frac{1-\beta^2}{C^2\beta^4} \quad \text{where, } C = \frac{0.61}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (4)$$

여기서  $\beta$  및  $C$ 는 각각 직경비 및 방출 계수를 의미한다. 이와 같이 식 (3)과 (4)를 이용하여 ATLAS SIT 배관에 추가될 Orifice의 내경이 결정되었으며, ATLAS SIT 고유량을 충족된 APRI400 설계값과 일치시키기 위한 반복적인 SIT 특성실험을 거쳐 최적의 Orifice 내경이 최종적으로 결정된다.

#### 4. ATLAS SIT의 주입유량 특성시험

##### 4-1. SIT 주입유량 모의방안

Fig. 4에 나타난 바와 같이 SIT 고유량 조건의 초기 유량은 SIT 주입 배관에 Orifice를 설치하여 조정하였으며, SIT 저유량 조건의 유량은 SIT 주입 배관에 설치된 유량제어밸브의 개도의 조정을 통해 결정되어진다. 이를 위해 ATLAS SIT 주입배관에서의 차압분포에 대한 분석이 이루어졌으며, 이를 바탕으로 Orifice의 설계가 이루어졌다.

##### 4-2. 특성 시험 결과

주어진 조건에서 목표 유량을 제공하기 위해 최적의

Table 3. Summary of the ATLAS SIT/FD characterization tests.

Test ID	실험 결과	적용 시험
SIT/FD Test 1	고유량 개도 : 30%/35%/40%/30%	ATLAS Test No. 8
SIT/FD Test 2	저유량 개도 : 19%/27%/20%/17%	
SIT/FD Test 3		
SIT/FD Test 4		
SIT/FD Test 5	Orifice 내경 : 12.0/13.5/11.2/11.5 mm	ATLAS Test No. 9~11
SIT/FD Test 6	저유량 개도 : 15%/26%/24%/14%	
SIT/FD Test 7		
SIT/FD Test 8		
SIT/FD Test 9	Orifice 내경 : 11.5/10.5/11.5/11.5 mm	ATLAS Test No. 12~13
SIT/FD Test 10	저유량 개도 : 16%/23%/24%/14%	
SIT/FD Test 11	Orifice 내경 : 11.6/11.6/11.0/11.5 mm	ATLAS Test No. 14
	저유량 개도 : 18%/27%/24%/14%	

Orifice 직경과 유량조절밸브의 개도를 결정하기 위한 시험이 먼저 각 SIT별로 수행되었다. 최종적으로 4개의 SIT가 모두 주입되는 조건에서 최적의 Orifice 직경과 유량조절밸브의 개도가 결정되었다. ATLAS Test No. 8을 위한 시험인 SIT/FD Test 1 및 2에서는 유량제어밸브의 개도만으로 고유량 및 저유량을 모두 조절하였다. 그러나 이 경우에는 유량조절의 불확실성이 매우 컸기 때문에 이후의 경우에는 Orifice 직경으로 고유량을 조절하고, 유량조절밸브의 개도로 저유량을 조절하였다. Table 3은 ATLAS SIT 특성 모의시험의 내용을 보여주며, 대표적인 경우로써 SIT/FD Test 7에 대한 설명은 다음과 같다. 최적적인 Orifice의 직경은 SIT 1, 2, 3, 4에 대해 각각 12.0, 13.5, 11.2, 11.5 mm이었으며, 유량조절밸브의 개도는 SIT 1, 2, 3, 4에 대해 각각 15%, 26%, 24%, 14%이었다. 개별적인 SIT 시험에서는 Orifice의 내경이 10.2 mm에 가까웠으나, 최종적으로 결정된 Orifice의 직경은 보다 큰 내경을 필요로 하였다. 이는 4개의 SIT가 동시에 주입될 때는 유동 저항이 증가하기 때문이다.

Fig. 6은 ATLAS 안전주입탱크의 주입 특성에 대한 실험결과를 보여준다. 초기에 설정된 SIT의 압력 및 수위는 각각 4.3 MPa 및 5.264 m(94%)이었으며, 최대 유량은 각각 3.54, 3.79, 4.30, 4.41 kg/s이었다. 저유량으로의 전환은 SIT 수위가 약 4.032 m(72%)인 지점에서 이루어졌으며, 저유량에서의 최대 유량은 각각 1.02, 1.06,

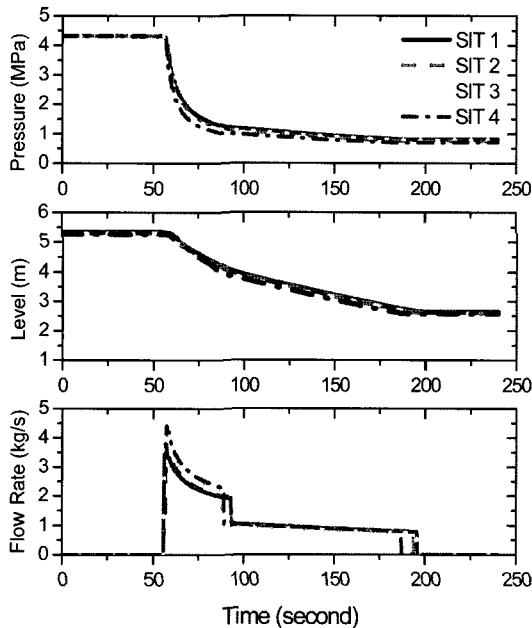


Fig. 6. Test results for the injection characteristics of the ATLAS safety injection tanks (SIT/FD Test 7).

0.98, 1.06 kg/s이었다. 그리고 APR1400의 축척된 수위를 맞추기 위해, SIT 수위가 2.576 m(46%)에서 주입이 종료되었다.

고유량 조건에서 얻어진 유량이 목표치인 4.0 kg/s에서 다소 큰 범위의 오차를 갖는 것은 SIT 주입 배관에 설치된 체크밸브 등의 영향에 기인하는 것으로 판단되었으며, 또한 저유량 조건에서 목표치인 1.0 kg/s를 비교적 잘 모의할 수 있다는 것을 관찰하였다. 따라서 Orifice의 최적화 및 유량조절밸브의 개도 조절을 통해 각각 SIT 고유량 및 저유량을 잘 모의할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 다만 보다 정량화된 유량 모의를 위해서 체크밸브의 작동에 의한 유량 변동을 최소화하기 위한 조치가 필요하다. 따라서 체크밸브의 작동에 의한 유량 변동을 최소화하기 위해서는 ATLAS 실험에서 최소한으로 필요로 하는 밸브를 제외하고는 체크밸브를 제거하여야 한다.

4-3. ATLAS 재관수 실험에서의 SIT/FD 특성

SIT/FD 특성 모의시험을 통해 최적화된 Orifice 직경과 유량제어밸브의 개도를 ATLAS SIT에 적용함으로써 APR1400에서 요구하는 축척된 유량을 ATLAS에 적절히 공급할 수 있다. 실제 ATLAS를 이용한 대형 냉각재 상실사고 재관수 시험에서 SIT를 통한 비상노심냉각수(Emergency Core Cooling Water)의 주입유량 곡선은 SIT/FD 특성시험에서 얻어진 값과 약간의 차이가 발생할 수 있다. Fig. 7은 ATLAS Reflood Test No. 9에서의 SIT/FD 주입유량 특성을 보여준다. ATLAS SIT를 통

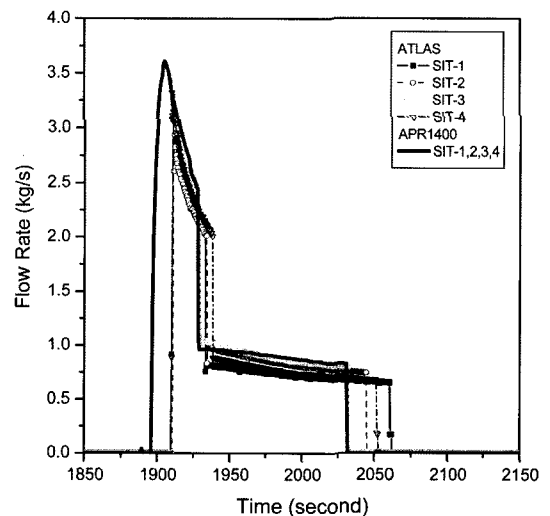


Fig. 7. SIT/FD flowrate characteristics during ATLAS Reflood Test No. 9.



한 주입유량의 특성은 APR1400의 고유량 및 저유량 조건을 잘 모의하고 있다. ATLAS SIT 배관에 설치된 터빈 유량계는 40 bar에서 Full range의 약 0.6%의 오차를 갖는다<sup>[16]</sup>. 따라서 터빈 유량계로 측정된 SIT 주입유량의 최대 오차는 0.035 kg/s이다. 그리고 ATLAS SIT 4개로부터 측정된 전체 주입유량은 APR1400에서 요구되는 축척 유량보다 고유량 및 저유량에서 최대 5.5% 및 7.5%만큼 낮은 값을 보였다.

## 5. 결 론

대형 냉각재 상실사고의 재관수 기간에서 APR1400의 열수력 현상을 제대로 모사하기 위해서는 안전주입수의 유량이 척도비에 맞춰 축척되어야 한다. 그러나 ATLAS 장치에는 SIT 내부에 자동유량 제어기인 Fluidic Device가 장착되지 않았기 때문에, APR1400에서 요구하는 SIT로부터의 고유량 및 저유량 주입 성능을 실험적으로 구현하기 위한 별도의 주입유량 특성시험이 수행되었다. 즉 ATLAS SIT 주입유량에 관한 특성시험을 통해 ATLAS SIT의 고유량 주입 성능은 주입 배관에 Orifice를 설치하여 일치시킬 수 있었으며, 저유량 주입 성능은 유량조절밸브의 개도를 조절함으로써 일치시킬 수 있었다. 이러한 일련의 Orifice 직경의 최적화 및 유량조절밸브의 개도 조절을 통해 ATLAS 안전주입계통은 APR1400에서 요구하는 SIT 고유량 및 저유량을 잘 모의할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. ATLAS SIT 주입성능에 관한 특성시험을 통해 얻어진 전체 주입유량은 고유량 및 저유량 조건에서 APR1400에서 요구하는 축척 유량과 비교하여 최대 5.5% 및 7.5%의 오차를 가졌다. 본 연구를 통해 얻어진 SIT 유량 구현 방안은 ATLAS를 이용한 대형 냉각재 상실사고 재관수 실험에 적용되어 SIT로부터 DVI로의 주입유량 특성을 APR1400과 같도록 모의하는데 사용되었다.

## 감사의 글

한국원자력연구원 ATLAS 실험 그룹에게 감사드립니다. 본 논문은 ATLAS를 이용한 LBLOCA 재관수 실험 과정에서 생산된 결과를 바탕으로 작성되었습니다. 본 연구는 교육과학기술부의 원자력기술개발사업에 의하여 지원되었습니다.

## 기호설명

A : 유동 면적[m<sup>2</sup>]  
C : 방출 계수[-]

d : 직경[m]  
d<sub>1</sub> : Orifice 직경[m]  
d<sub>2</sub> : 배관 직경[m]  
K : 저항계수[-]  
l : 길이[m]  
ṁ : 질량 유량[kg/s]  
ΔT : 온도차[K]  
u : 속도[m/s]

## 그리스 문자

Δp : 차압[Pa]  
ρ : 밀도[kg/m<sup>3</sup>]  
β : 직경비, d<sub>1</sub>/d<sub>2</sub>[-]

## 하첨자

add : added, 추가 설계  
org : original, 현 설계  
R : scaling ratio

## 참고문헌

1. Cho, S.J.; Kim, B.S.; Kang, M.K.; Kim, H.G. The development of passive design features for the korean next generation reactor, nuclear engineering and design, 2000, 201, 259-271.
2. Baek, W.P.; Song, C.H.; Yun, B.J.; Kwon, T.S.; Moon, S.K.; Lee, S.J. KAERI integral effect test program and the atlas design, nuclear technology, 2007, 152, 183-195.
3. Kim, Y.S.; Choi, K.Y.; Park, H.S.; Cho, S.; Yun, B.J.; Kwon, T.S.; Kang, K.H.; Baek, W.P. Commissioning of the ATLAS Thermal-Hydraulic Integral Test Facility, 2007 ANS/ENS International Meeting, Washington, D.C., USA, November 11-15, 2007.
4. Choi, K.Y.; Park, H.S.; Euh, D.J.; Kwon, T.S.; Baek, W.P. Simulation capability of the ATLAS facility for major design-basis accidents, nuclear technology, 2006, 156, 256-269.
5. Park, H.S.; Choi, K.Y.; Cho, S.; Kang, K.H.; Choi, N.H.; Euh, D.J.; Kim, Y.S.; Baek, W.P. Recent ATLAS Test Results on the Late Reflood Period of the Large-Break LOCA for APR1400, IAEA Topical Meeting on Advanced Safety Assessment Methods for Nuclear Reactors, Daejeon Korea, 30 October - 2 November, 2007.
6. Park, H.S.; Choi, K.Y.; Cho, S.; Kang, K.H.; Choi, N.H.; Euh, D.J.; Kim, Y.S.; Baek, W.P. An Integral Effect Test on the Reflood Period of a Large-Break

- LOCA for the APR1400 Using the ATLAS, Proceedings of ICAPP'08, Paper 8129, Anaheim, CA USA, June 8-12, 2008.
7. KOPEC, Design Specification for Safety Injection Tank, 3L186-FS-DS601, DDS-2, Rev. 0, 2004.
  8. Park, H.S.; Choi, K.Y.; Cho, S.; Kang, K.H.; Kim, Y.S. Quick-Look Data Report of ATLAS Test No. 9 (An Integral Test for the Reflood Phase of a LBLOCA), ATLAS-QLR-003, KAERI, 2008.
  9. Ishii, M.; Kataoka, I. Similarity Analysis and Scaling Criteria for LWRs under Single Phase and Two-Phase Natural Circulation, NUREG/CR-3267, ANL-83-32, Argonne National Laboratory, 1983.
  10. Chu, I.C.; Song, C.H.; Cho, B.H.; Park, J.K. Development of passive flow controlling safety injection tank for APR1400, nuclear engineering and design, 2008, 238, 200-206.
  11. Jeong, J.J.; Ha, K.S.; Chung, B.D.; Lee, W.J. Development of a multi-dimensional thermal-hydraulics system code, MARS 1.3.1. annals of nuclear energy, 1999, 26(18), 1611-1642.
  12. Park, H.S.; Moon, S.K.; Yun, B.J.; Kwon, T.S.; Choi, K.Y.; Park, C.K.; Cho, S.; Hong, S.D.; Yi, S.J.; Kim, Y.S.; Song, C.H.; Baek, W.P. Calculation sheet for the basic design of the ATLAS Fluid System, KAERI/TR-3333/2007, KAERI, 2007, 226-251.
  13. Crane Co., Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe, Technical Paper No. 410, 1985.
  14. Yun, B.J.; Chu, I.C.; Euh, D.J.; Kang, K.H.; Kim, Y.S.; Song, C.H.; Baek, W.P. Instrumentation and measurement method for the ATLAS test facility, KAERI/TR-3336/2007, KAERI, 2007, 12-17.