

## APR1400 모의를 위한 ATLAS 장치의 안전주입탱크 주입 성능에 관한 실험

최남현, 박현식, 박춘경, 민경호, 김연식\*  
한국원자력연구원 열수력안전연구센터\*

### Experiments on the SIT Injection Capability of the ATLAS Facility for APR1400 Simulation

N. H. Choi, H. S. Park, C. K. Park, K. H. Min, Y. S. Kim\*

Korea Atomic Energy Research Institute, Thermal Hydraulics Safety Research Center\*

#### 1. 서론

APR1400의 안전주입계통은 발전소 비상시 일차계통에 저온의 냉각수를 주입하여 노심의 노출을 억제하고, 피복재 온도를 기준치 이하로 유지시키기 위한 계통이다. OPR100에는 4대의 SIT, 2대의 고압주입펌프, 2대의 저압주입펌프, 격리밸브, Check Valve와 배관으로 구성된다. APR1400에는 OPR100과는 달리 저압주입펌프가 없으며, 각각의 DVI 관에 독립적으로 안전주입펌프와 안전주입탱크(Safety Injection Tank, SIT)가 하나씩 할당된다. 저압주입펌프가 수행하는 저유량의 주입 기능은 SIT 내부에 장착된 피동 유량 조절기구인 Fluidic Device가 담당한다.

APR1400을 기준원전, OPR100을 참조원전으로 하는 열수력종합효과실험장치 ATLAS (Advanced Thermal-hydraulic Test Loop for Accident Simulation)가 한국원자력연구원에 설치되어 운영되고 있다. (Baek et al, 2005; Kim et al, 2007) 또한 ATLAS에서의 LBLOCA, DVI Line Break 및 Main Steam Line Break 등에 대한 코드 해석이 이루어져, APR1400의 해석결과와 비교되어졌다. (Choi, et al, 2006) 최근 ATLAS 장치를 이용하여 대형냉각재상실사고 (Large Break Loss-Of-Coolant Accident, LBLOCA)시의 재관수 현상에 대한 실험을 수행하고 있다. (Park et al, 2007) 재관수 단계에서 APR1400의 열수력 현상을 제대로 모사하기 위해서는 안전주입수가 축척에 맞게 주입되어야 한다. 특히 ATLAS에서는 기준원전인 APR1400의 SIT에 내장된 Fluidic Device가 장착되지 않았기 때문에 SIT의 고유량 및 저유량의 주입 성능을 모사하기 위한 별도의 노력이 필요하다. 본 연구는 ATLAS의 주입 성능을 APR1400의 성능과 일치시킬 수 있도록 하기 위한 노력의 일환이다. ATLAS SIT의 고유량 주입 성능은 주입 배관에 Orifice를 설치하여 일치시키고, 저유량 주입 성능은 유량조절밸브의 개도를 조절함으로써 일치시킬 수 있다.

#### 2. APR1400의 안전주입탱크

##### 2-1. APR1400 SIT의 설계사양

APR1400의 SIT에는 안전냉각수의 저유량 주입을 위해 Fluidic Device(Chu et al, 2007)가 장착된다. (KOPEC, 1999) APR1400 SIT는 질소로 가압되어 있어, 일차계통의 압력이 초기에 설정된 압력 이하로 강하하였을 때 작동한다. APR1400 SIT는 Nominal 수위 기준으로 초기에 4.3 MPa로 가압된다. 그림 1은 APR1400 및 ATLAS 안전주입탱크(SIT)의 개략도를 보여준다. APR1400 SIT 1개의 전체 부피는 2406 ft<sup>3</sup>이며, Dead Band 및 Stand Pipe 하단의 부피는 각각 153 및 990 ft<sup>3</sup>이다. Stand Pipe 상부에 확보해야할 최소 부피는 800 ft<sup>3</sup>

이며, Nominal 조건에서 물 및 질소의 부피는 각각 1858 및 395 ft<sup>3</sup>이다. 허용되는 최소 및 최대 물 부피는 각각 1790 과 1927 ft<sup>3</sup>이며, 이때의 초기 압력은 각각 4.03 및 4.46 MPa이다. APR1400 SIT의 고유량 및 저유량의 설계값은 각각 800 및 200 kg/s이다.

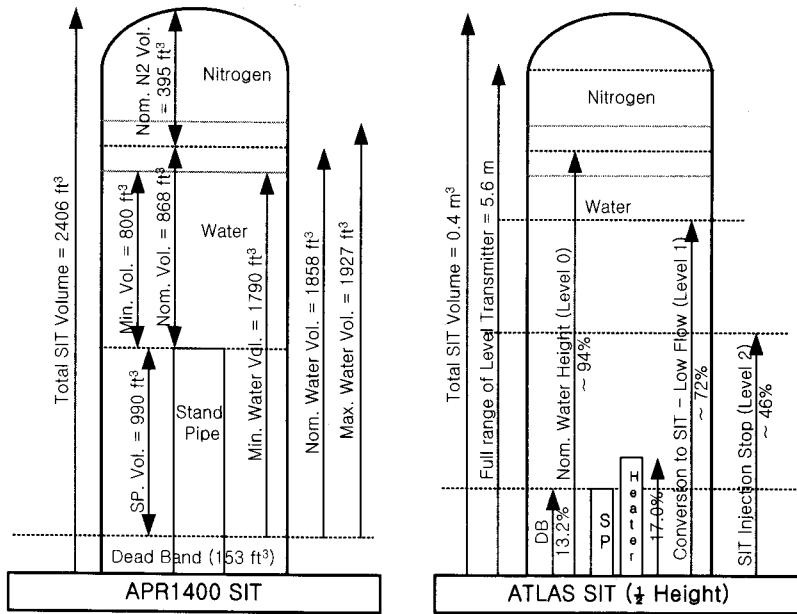


그림 1. APR1400 및 ATLAS 안전주입탱크(SIT)의 개략도

## 2-2. LBLOCA 사고시의 SIT 주입유량

그림 2는 LBLOCA시의 APR1400 안전주입수 유량의 개념도를 보여주고 있고, 표 1은 LBLOCA시의 APR1400 안전주입수 유량 및 ATLAS에서의 축척된 유량을 보여주고 있으며, 이는 APR1400의 LBLOCA 전 사고 시나리오에 대해 최적안전해석코드인 MARS를 이용하여 분석한 결과이다. SIT 주입신호(사고시작 후 16s, APR1400 기준)와 함께 주입되는 SIT 주입유량은 13초 후(at 29s)에 최고치에 이르며, 초기의 SIT 고유량 주입은 Fluid Device의 작동을 모사하는 저유량으로 전환(at 61s)되고, 205초에 종료된다. 노심에서의 재관수 현상은 사고 시작 36초 후에 발생되며, 주입펌프에 의한 고압안전주입(HPSI, High Pressure Safety Injection)은 사고시작 54초 후에 작동된다. 각 시점에서의 APR1400의 주입 유량과 ATLAS의 축척된 값이 표 1에 나타나 있다.

표 1. LBLOCA시의 APR1400 안전주입수 유량 및 ATLAS에서의 축척된 유량

APR1400		ATLAS		Description
Time (s)	Flow (kg/s)	Time (s)	Flow (kg/s)	
16	0	11.3	0.00	SIT-High Flow (Start)
29	735	20.5	3.61	SIT-High Flow (Peak)
36	692	25.5	3.40	Reflood Start
54	53	38.2	0.26	HPSI Injection (Start)
61	512	43.1	2.51	SIT-High Flow (End)
62	203	43.8	1.00	SIT-Low Flow (Start)
62	58	43.8	0.28	HPSI Injection (Continue)
205	171	145.0	0.84	SIT Low Flow (End)
208	65.6	147.1	0.32	HPSI Injection (Continue)

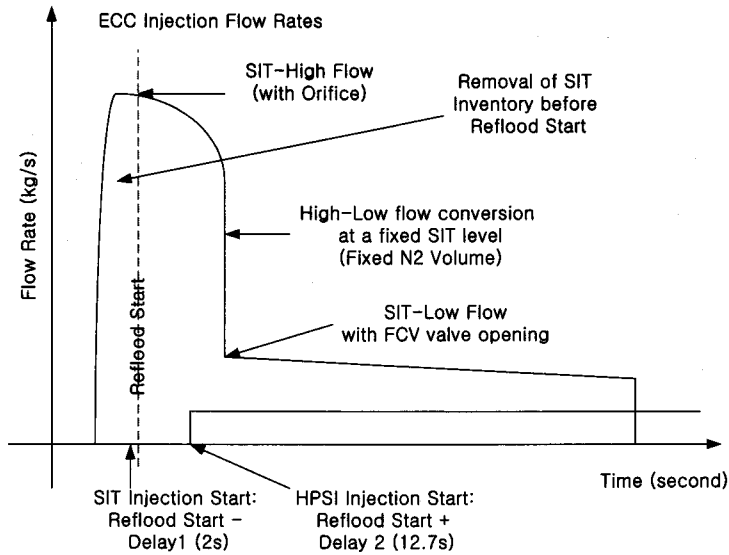


그림 2. LBLOCA시의 APR1400 안전주입수 유량의 개념도

### 3 ATLAS의 안전주입탱크

#### 3-1. ATLAS SIT의 척도해석

ATLAS의 안전주입계통 설계에서 고려된 주요 열수력 과정 및 현상은 안전주입 냉각수 유량과 SIT의 열수력적 특성 등이다. (박현식 외, 2007) 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. APR1400에서 SIT에 설치된 Fluidic Device는 냉각수 주입유량을 자체적으로 조절하는 기능을 갖기 때문에 SIT 수위 및 압력에 따라서 공급유량이 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 주입라인까지의 배관 체적 및 압력손실 특성이 보존되어야 한다. ATLAS 장치에서 안전주입수 유량은 원형의 1/203.6으로 유지되도록 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. ATLAS에서는 APR1400과 비교하여 높이비가 1/2이고, 사고는 1.414배 빠르게 진행된다.

#### 3-2. ATLAS SIT의 설계사양

ATLAS SIT는 APR1400과 동일하게 배치되며, Fluidic Device의 성능은 SIT 후단에 설치된 유량제어밸브의 개도로 모의한다. ATLAS SIT의 체적은 APR1400의 1/288으로 설계되었다. 고압주입펌프는 펌프 1대가 두 곳의 DVI 관을 담당하도록 배치되었다. SIT는 4대가 설치되며, 최대 운전온도 및 압력은 100°C, 5.0 MPa이다. 탱크 내부는 초기에 약 80%의 물로 채워지고, 상부는 최대 4.5 MPa까지 가압된다. SIT 내부에는 내부 유체온도를 조절할 수 있도록 전기 가열봉이 설치된다. 그림 1은 ATLAS 안전주입탱크(SIT)의 주요 치수를 보여준다. ATLAS SIT 1개의 부피는 0.4 m<sup>3</sup>이며, SIT 수위계의 전체 범위는 5.6 m이다.

SIT 수위계의 범위를 넘는 SIT 상부해더의 부피는 SIT 1, 2, 3, 4 각각에 대해 0.0201, 0.0193, 0.0167, 0.0171 m<sup>3</sup>이다. ATLAS에는 Fluid Device가 장착되지 않았기 때문에 Stand Pipe 이하는 Dead Band로써 이때의 수위는 13.2%이다. 척도해석을 통해 APR1400의 SIT 조건으로부터 ATLAS의 기학적 치수 및 운전 조건을 결정하였다. ATLAS에서 Nominal 조건의 수위는 SIT 1, 2, 3, 4 각각에 대해 95.1, 94.9, 94.2, 94.3%, Fluid Device가 작동되는 저유량 전환시점에서의 수위는 SIT 1, 2, 3, 4 각각에 대해 72.8, 72.6, 72.0, 72.1%, 및 SIT 주입 종료시점에서의 수위는 SIT 1, 2, 3, 4 각각에 대해 47.4, 47.2, 46.6, 46.7%이다.

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

4 개의 SIT 배관은 조금씩 차이는 있으나 대략적인 구성은 일치한다. 기존 실험결과로부터 현재 설치된 SIT 주입배관의 저항계수(Resistance Coefficient)  $K_{org}$  값을 구하고, 유량을 감소시키기 위해 추가되어야 할  $K_{add}$ 를 계산하여 이를 만족시키는 Orifice의 직경을 결정하고자 한다.

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

기존의 실험결과는 SIT의 초기 압력이 4.3 MPa인 조건에서 유량조절밸브를 100% 개방했을 때, 유량은 약 7.0 kg/s 임을 보여준다. SIT 주입 배관은 1-1/2 인치 Schedule 160인 배관이므로, Orifice가 설치되지 않은 조건에서의  $K_{org} = 151.3$ 이다. 이 측정값은 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 계산하고, 이를 일치시키면 식 (2)를 얻을 수 있다.

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

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

목표로 하는 SIT 고유량의 값이 약 4.0 kg/s이므로, 식 (2)로부터  $K_{add} = 311.7$ 의 값이 얻어진다. 해당되는 K 값을 얻기 위해서는 1-1/2 인치 Schedule 160 배관에서 내경이 약 10.2 mm인 Orifice가 설치되어야 함을 보여준다. 계산에 사용된 Square-Edge Orifice에서의 유동 저항계수는 식 (3)으로 표현된다. (Crane Co., 1985)

$$K_{orifice} \sim \frac{1 - \beta^2}{C^2 \beta^4} \quad \text{where} \quad C = \frac{0.61}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3)$$

## 4. ATLAS SIT의 주입유량 특성시험

### 4-1. SIT 주입유량 모의방안

그림 2에 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. 시험 결과

최적의 Orifice 직경과 유량조절밸브의 개도를 결정하기 위한 시험이 각 SIT별로 수행되었고, 또 4 개의 SIT가 동시에 주입되는 조건에서의 시험을 통해 최종적으로 Orifice의 직경과 유량조절밸브의 개도가 결정되었다. 최종적인 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 4 개의 SIT가 동시에 주입될 때는 유동 저항이 증가하기 때문이다.

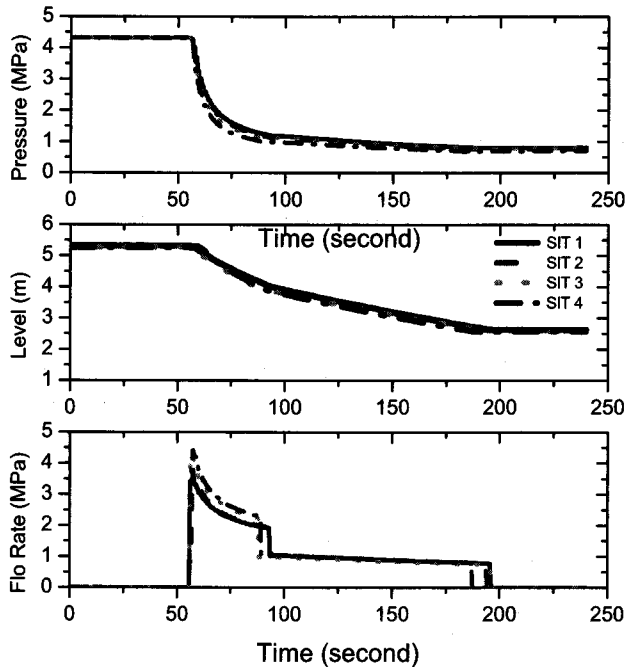


그림 3. ATLAS 안전주입탱크(SIT)의 주입특성 시험결과

그림 3은 ATLAS 안전주입탱크(SIT)의 주입 특성에 대한 실험결과를 보여준다. 초기에 설정된 SIT의 압력 및 수위는 각각 4.3 MPa 및 5.264m(94%)이었으며, 최대 유량은 각각 3.54, 3.79, 4.30, 4.41 kg/s이었다. 저유량으로의 전환은 SIT 수위가 약 4.032m(72%)인 지점에서 이루어졌으며, 저유량에서의 최대 유량은 각각 1.02, 1.06, 0.98, 1.06 kg/s이었다. 그리고 APR1400의 축척된 수위를 맞추기 위해, SIT 수위가 2.576m(46%)에서 주입이 종료되었다. 고유량 조건에서 얻어진 유량이 목표치인 4.0 kg/s에서 다소 큰 범위의 오차를 갖는 것은 SIT 주입 배관에 설치된 Check Valve 등의 영향에 기인하는 하는 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 Check Valve의 작동에 의한 유량 변동을 최소화하는 노력이 필요하다.

## 5. 결론

LBLOCA 재관수 단계에서 APR1400의 열수력 현상을 제대로 모사하기 위해서는 안전주입수의 유량이 척도비에 맞춰 축척되어야 한다. ATLAS 장치에는 SIT 내부에 Fluidic Device가 장착되지 않았기 때문에 SIT의 고유량 및 저유량 주입 성능을 모사하기 위한 별도의 특성시험이 수행되었다. ATLAS SIT의 고유량 주입 성능은 주입 배관에 Orifice를 설치하여 일치시키고, 저유량 주입 성능은 유량조절밸브의 개도를 조절함으로써 일치시킬 수 있었다. 이러한 일련의 Orifice 직경의 최적화 및 유량조절밸브의 개도 조절을 통해 APR1400에서 요구하는 SIT 고유량 및 저유량을 잘 모의할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

## 6. 참고문헌

1. Baek, W.P., Song, C.H., Yun, B.J., Kwon, T.S., Moon, S.K., and Lee, S.J., KAERI Integral Effect Test Program and the ATLAS Design, Nuclear Technology, 2007, 152, 183-195,
2. 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, 2007, 11-15
3. Choi, K.Y., Park, H.S., Euh, D.J., Kwon, T.S., and Baek, W.P., Simulation Capability of the ATLAS Facility for Major Design-Basis Accidents, Nuclear Technology, 2006, 156, 256-269
4. 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
5. Chu, I.C., Song, C.H., Cho, B.H., and Park, J.K., Development of Passive Flow Controlling Safety Injection Tank for APR1400, Nuclear Engineering and Design, accepted for publication, doi:10.1016/j.nucengdes.2007.07.002, 2007
6. 박현식; 문상기; 윤병조; 권태순; 최기용; 박춘경; 조석; 홍성덕; 이성재; 김연식; 송철화; 백원필. 아틀라스(ATLAS) 유체계통 기본설계 계산서, KAERI/TR-3333/2007, 한국원자력연구원, 2007, 226-251
7. KOPEC, Design Data Parameter Lists for Plant Safety, Performance and Containment Analysis for Korean Next Generation Reactor, N0797-SA-DD140, Rev. 0, 1999
8. Crane Co., Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe, Technical Paper No. 410, 1985