

# 피동충수용 혼합형 안전주입탱크의 압력평형에 관한 이론적 해석 및 시험적 연구

류성욱<sup>†</sup> · 유효봉 · 변선준 · 전우진 · 박현식 · 이성재

한국원자력연구원

(2015년 11월 3일 접수, 2016년 1월 18일 수정, 2016년 1월 21일 채택)

## Study on the Pressure Balance of the Hybrid Safety Injection Tank

Sung Uk Ryu<sup>†</sup>, Hyobong Ryu, Sun-Joon Byun, Woo-Jin Jeon, Hyun-Sik Park, Sung-Jae Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 3 November 2015, Revised 18 January 2016, Accepted 21 January 2016)

### 요 약

피동충수용 혼합형 안전주입탱크는 한국원자력연구원에서 제안한 원자력 피동안전계통의 한 종류로, 안전주입탱크의 상부와 가압기를 연결하여 모든 운전압력 조건에서 냉각수 주입이 가능하도록 개선한 시스템이다. 본 연구에서는 피동충수용 혼합형 안전주입탱크, 가압기와 원자력압력용기에 대한 압력 네트워크를 통해 피동충수용 혼합형 안전주입탱크와 가압기의 압력이 평형이 되는 조건을 이론적으로 도출하였으며, 개별효과시험장치를 이용하여 안전주입탱크에서 발생하는 다양한 열수력 현상(증기응축 및 열혼합 현상)들을 파악하였다.

**주요어** : 피동충수용 혼합형 안전주입탱크, 압력 평형, 개별효과시험장치

**Abstract** - The Hybrid Safety Injection Tank is a passive safety injection system that enables the safety injection water to be injected into the reactor pressure vessel throughout all operating pressures by connecting the top of the SIT and the pressurizer(PZR). In this study, the condition for balancing the pressure between the Hybrid SIT and PZR was derived theoretically. The pressure balancing condition was set at the point where the velocity of the Hybrid SIT coolant injected into the Direct Vessel Injection(DVI) line was at or above zero. If the condition was derived from a pressure network for the Hybrid SIT, pressurizer, and reactor pressure vessel, the pressure difference between the pressurizer and SIT is less than 0.07 MPa.

**Key words** : Hybrid Safety Injection Tank, Pressure Balance, Separate Effect Facility

## 1. 서 론

후쿠시마 원전 사고 후, 원전의 안전성 향상에 대한 요구가 날로 증가하고 있다. 그 사고를 통하여, 노심 용융(core melting)을 방지하기 위해서는 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System, RCS)가 고압인 상황

에서의 노심냉각이 매우 중요하며, 소외전원상실(Station Black Out, SBO) 상황에서도 외부전원 공급 없이 자연적인 현상에 의하여 냉각재가 원활하게 공급되어야 한다는 것도 알 수 있었다. 만약 충분한 냉각재가 공급 되지 않는다면, 원자로 trip 상황에서 안전 밸브를 통하여 수증기가 빠져나감으로써, 원자로냉각재가 급격하게 줄어들 것이다.

원전의 안전성 향상을 위한 피동안전주입계통에 대한 연구 중 노심보충탱크(Core Makeup Tank, CMT)의

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Korea Atomic Energy Research Institute  
Tel : 042-868-4919 E-mail: rsu@kaeri.re.kr

설계와 검증관련 실험들은 다양한 기관에서 연구되어 왔다. 핀란드 VTT Energy에서는 PACTEL 시험장치를 이용하여 AP600 설계와 관련된 CMT에 대한 다양한 검증시험을 수행하였다[1,2,3]. 그들은 CMT의 작동모드를 세 종류(recirculation phase, oscillating phase, injection phase)로 구분하고, 각 mode에서 발생하는 다양한 열수력 현상들을 설명하였으며, 15개의 개별효과시험을 통해 파단크기 및 위치, CMT 위치 등의 인자들이 탱크 내에서의 열수력 현상 및 냉각수 주입에 미치는 영향을 파악하였다. KAIST는 CP1300(CARR) 설계에 기반하여 CMT의 개별효과시험과 RELAP/MOD3.1 code 평가를 수행하였으며[3], 중국 NPIC와 일본 JAEA에서도 각각 NPIC CMT 시험장치[4]와 ROSA/LSTF 시험장치[5]를 이용하여 소형냉각재상실사고(Small Break Loss-of-Coolant Accident, SBLOCA)를 모의하기 위한 CMT의 과도상태에 대해 특성 연구를 수행하였다. NPIC CMT 시험장치와 ROSA/LSTF 시험장치는 CP1300(CARR)과 AP600을 축소하여 설계된 시험장치이다.

Figure 1에 표현한 피동충수용 혼합형 안전주입탱크는 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute)에서 제안한 피동안전계통의 한 종류로 신형경수로 APR+ (Advanced Power Reactor +)에 적용하기 위한 목적으로 도입된 것이다.

피동충수용 혼합형 안전주입탱크는 기존의 안전주입탱크(Safety Injection Tank, SIT)의 상부와 가압기 또는 원자로냉각재계통(RCS)를 연결하여 모든 운전조건에서 SIT 냉각수 주입이 가능하도록 개선한 안전시스템

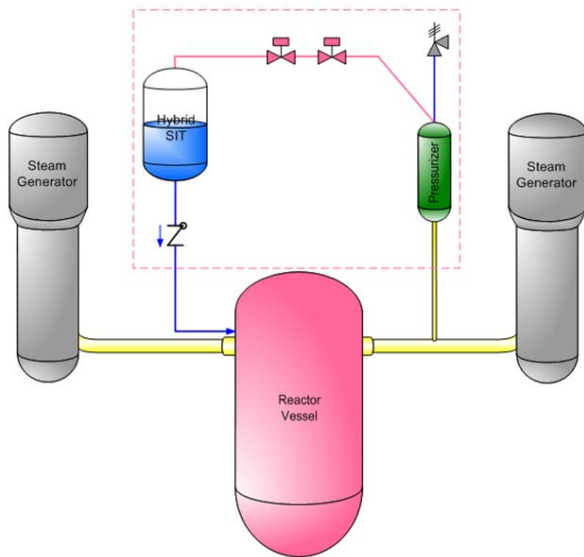


Fig. 1. Schematic of Hybrid SIT

이다. [6,7] 기존 안전주입탱크는 탱크 상부에 질소를 충전하여 중압(일반적으로 610 psia)으로 가압한 설계로서, 원자로냉각재계통(RCS) 압력이 안전주입탱크 압력 이하로 떨어지면, 체크 밸브가 열리고 안전주입탱크 냉각수가 RCS로 주입되는 설계이다. 하지만, 피동충수용 혼합형 안전주입탱크는 질소 충전과 함께, 필요 시에는 안전주입탱크와 가압기 또는 RCS를 연결하는 배관을 통해 안전주입탱크 압력이 RCS와 동등하게 가압될 수 있으며, 이 경우에는 RCS와 안전주입탱크 사이의 수두차에 의해 냉각수 주입이 가능하게 된다. 본 연구는 개별효과시험장치(Separate Effect Test facility)를 이용하여 피동충수용 혼합형 안전주입탱크에서 발생하는 다양한 열수력 현상(steam condensation 및 thermal mixing phenomena/ 냉각수의 thermal stratification 현상)들을 살펴보고, 안전주입탱크와 가압기 가압력평형에 도달하는 시점 등을 이론적으로 도출하기 위한 목적으로 수행되었다.

## 2. 시험장치

Figure 2에 표현한 바와 같이 개별효과시험장치는 가압기, 피동충수용 혼합형 안전주입탱크, 압력평형배관(Pressure Balancing Line, PBL), 질소공급시스템 등으로 이루어져 있다. 개별효과시험장치는 APR+ 원전을 원형으로 하였으며, 선형척도법에 의해 1/5크기를 기준으로 하여 그 일부를 모사하게 제작되었다.

가압기는 최대 200 kW 용량의 히터를 이용해 수증기를 생성하고 장치 가압에 활용된다. 가압기의 지름과 높이는 각각 0.4 m와 6.895 m 이며, 내부체적은 0.77 m<sup>3</sup>이다. 탱크 내부에 삽입된 히터는 설정압력에 맞추어

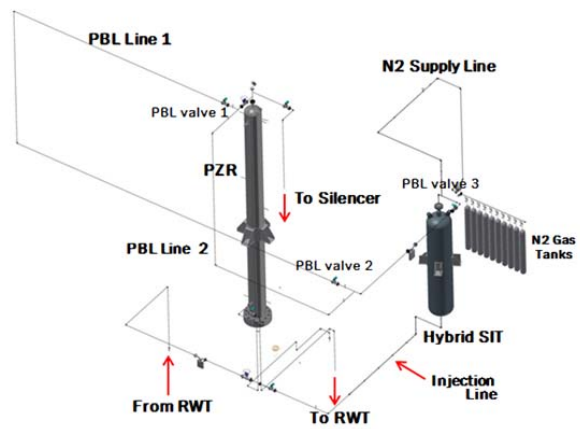


Fig. 2. Schematic of the Hybrid SIT test facility

자동적으로 출력을 조절할 수 있고, 가압기에서 생성된 수증기는 PBL을 통하여 피동충수용 혼합형 안전주입탱크로 주입된다.

피동충수용 혼합형 안전주입탱크와 가압기를 연결하는 PBL의 내경은 0.01184 m 이고, 열손실을 줄이기 위해 단열재로 보온하였다. 배관 내에 흐르는 증기의 유량을 조절하기 위하여 유량조절밸브(Flow Control Valve, FCV)가 PBL에 위치해 있고, 오리피스 삽입이 가능하도록 설계 하였다. 본 실험에서의 FCV 개도율은 15%이다.

피동충수용 혼합형 안전주입탱크의 지름과 높이는 각각 0.56 m와 3.2 m이며, 내부체적은 0.716 m<sup>3</sup>이다. 가압기와 피동충수용 혼합형 안전주입탱크의 체적비는 1.1:1 수준으로 참조원전의 경우와 유사하게 설계되었다. 피동충수용 혼합형 안전주입탱크 재료는 STS-304이며, 설계 온도와 압력은 각각 360 °C, 17.0 MPa이다.

### 3. 압력평형시점에 대한 이론적 분석

본 시험에서 가장 중점적으로 살펴보아야 할 결과는 혼합형 안전주입탱크의 압력이 가압기의 압력과 평형이 되는 시점이며, 이러한 시점을 결정하기 위해서는 선행적으로 압력평형에 대한 기준을 마련할 필요가 있다. 평형 기준을 압력이 완전히 동일해지는 시점으로 정할지, 특정한 값 차이를 허용할 것인지를 판단하는 것은 피동고압충수용 혼합형 안전주입탱크의 냉각수 주입시점과 관련될 것으로 판단된다. 즉, 혼합형 안전주입탱크의 특정압력조건에서 안전주입탱크로부터 원자로

용기 직접주입관(Direct Vessel Injection Line, DVI line)로 주입되는 냉각수 속도를 이론적으로 도출하고, 이 속도가 0 이상이 되는 시점에서의 안전주입탱크 압력조건을 성공적인 압력평형 조건으로 삼는 것은 타당한 기준설정 방안이 될 것이다. 먼저, DVI로 주입되는 냉각수 속도에 대한 관계식을 도출하기 위해 혼합형 안전주입탱크, 가압기와 원자로압력용기(Reactor Pressure Vessel, RPV)에 대한 압력 네트워크를 Fig. 3에 표현하였다. 혼합형 안전주입탱크와 RCS(Reactor Coolant System)에 대해 오일러 공식을 적용하면 각각 식 (1)과 (2)와 같이 표현되며, 두 식을 정리하면 식 (3)과 같은 형태의 관계식을 얻을 수 있다.

$$P_{SIT} + \rho_{SIT} H_{SIT} g = P_1 + H_{LOSS} + \frac{1}{2} \rho_{SIT} V_{inj, DVI}^2 \quad (1)$$

Where,  $H_{LOSS} = \left( f \frac{L}{D} + K \right) \times \frac{1}{2} \rho_{SIT} V_{inj, DVI}^2$

$$P_O + \rho_{PZR} H_{PZR} g + \rho_C H_{HL} g = P_1 + \rho_{DC} H_{DVI} g \quad (2)$$

$$\left( f \frac{L}{D} + K + 1 \right) \times \frac{1}{2} \rho_{SIT} V_{inj, DVI}^2 = \quad (3)$$

$$P_{SIT} - P_O + \rho_{SIT} H_{SIT} g + \rho_{DC} H_{DVI} g - \rho_{PZR} H_{PZR} g - \rho_C H_{HL} g$$

식 (3)을 원자로용기 직접주입관(Direct Vessel Injection Line, DVI line)으로 주입되는 냉각수 속도에 대해 최종적으로 정리하면 관계식 (4)를 얻을 수 있으며, 이 속도 값이 0 이상이 되는 조건을 식 (5)와 같이 도출할 수 있다.

$$V_{inj, DVI} = \left\{ \frac{2g}{f \frac{L}{D} + K + 1} H - \frac{2}{f \frac{L}{D} + K + 1} \times \frac{(P_O - P_{SIT})}{\rho_{SIT}} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

where,

$$H = \left[ H_{SIT} + \frac{\rho_{DC}}{\rho_{SIT}} H_{DVI} - \frac{\rho_{PZR}}{\rho_{SIT}} H_{PZR} - \frac{\rho_C}{\rho_{SIT}} H_{HL} \right]$$

$$0 \leq V_{inj, DVI} \rightarrow 0 \leq gH - \frac{(P_O - P_{SIT})}{\rho_{SIT}} \rightarrow P_O - P_{SIT} \leq \rho_{SIT} gH \quad (5)$$

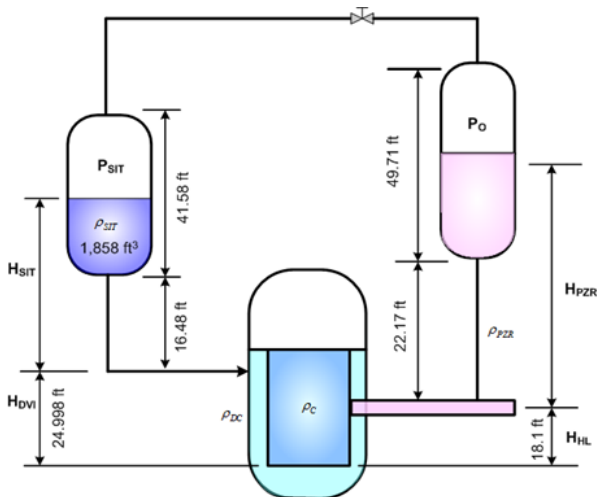


Fig. 3. Pressure balance of the Hybrid SIT, PZR, and RPV

**Table 1.** Assumptions and conditions for the pressure equilibrium condition

<b>Form</b>	$H_{SIT}$	$= 30.35 + 12.5 = 42.85 (ft)$
		Assumption: perpendicular distance between DVI and SIT = 12.5 ft
	$H_{DVI}$	$= 24.998 (ft)$
	$H_{HL}$	$= 18.1 (ft)$
$H_{PZR}$		$= 22.17 (ft)$
		$= 22.17 + 49.71/2 = 47.025 (ft)$
<b>Density</b>	가정	$\rho_C \approx \rho_{DC} \approx \rho_{PZR}$
	$\rho_{PZR}$	$\rho_{PZR} = 594 (kg/m^3)$ at 15.5 MPa saturated condition
	$\rho_{SIT}$	$\rho_{SIT} = 998 (kg/m^3)$ at 20 °C saturated condition
<b>H</b>		$H = [H_{SIT} + \frac{\rho_{PZR}}{\rho_{SIT}}(H_{DVI} - H_{PZR} - H_{HL})]$ $= 42.85 + \frac{594}{998}(24.998 - 47.025 - 18.1) = 18.97 (ft) \cong 5.78 (m)$

**Table 2.** Assumptions and conditions for the pressure equilibrium state

System Variables	Target Value	Average Measured Value
Pressurizer pressure (PT-HPZR-101)	15.51 MPa	15.55 MPa
Pressurizer temperature (TF-HPZR-101)	344.84 °C	345.75 °C
H-SIT pressure(PT-HSIT-101)	4.21 MPa	4.23 MPa
H-SIT N2 temperature (TF-HSIT-201)	20 °C	21.29 °C
H-SIT coolant temperature (TF-HSIT-210)	20 °C	19.68 °C
H-SIT water level(LT-HSIT-101)	2.38 m	2.38 m

$\rho_{SIT}$ ,  $H$ 와 관련된 값들을 식 (5)에 대입하여 속도 값이 0 이상이 되는 조건을 도출하면 가압기와 혼합형 안전주입탱크의 압력차(=  $P_0 - P_{SIT}$ )  $\leq 0.07$  MPa이 된다. 아래 Table 1은 최종적인 압력평형 조건을 도출하기 위해 사용한 형상 및 물성치 조건들을 정리한 것이다.

#### 4. 압력평형시점에 대한 시험결과

##### 4-1. 정상상태 및 과도상태 결과

시험을 수행하기 전에 주요 측정인자는 정상 상태에 도달하여야 한다. 정상상태에 도달하여 시스템을 안정화시킬 수 있는 일정 시간 동안 정상상태 값을 계속하였으며, Table 2는 주요 측정인자들의 정상상태에서의 평균값을 정리한 것이다.

##### 4-2. 압력평형시점에 대한 시험결과 분석

Figure 4와 5는 가압기와 혼합형 안전주입탱크의 압력변화경향과 압력차( $P_0 - P_{SIT}$ )를 각각 나타낸 것이다. 기동밸브 개방 후, 가압기 압력은 설정압력인 15.51 MPa에 대해 0.06 MPa의 평균오차 범위 내에서 적절하게 모의되었다.

Figure 5는 기동밸브(Actuation Valve) 개방(그래프의 0초 지점) 후 초기 1,000초 동안의 가압기와 혼합형 안전주입탱크의 압력차( $P_0 - P_{SIT}$ )를 나타낸 것으로, 삽입 그림은 압력평형 도달시점 근처에서의 확대 그래프이다. 가압기와 안전주입탱크의 압력차가 0.07 MPa 이하가 되는 시점에서 안전주입탱크 냉각수 주입이 시작된다고 가정하면, 기동밸브 개방 후 약 700초 되는 시점에서 압력평형이 이루어졌다고 판단할 수 있다. 우측의 확대 그래프에서 확인할 수 있듯이, 가압기와

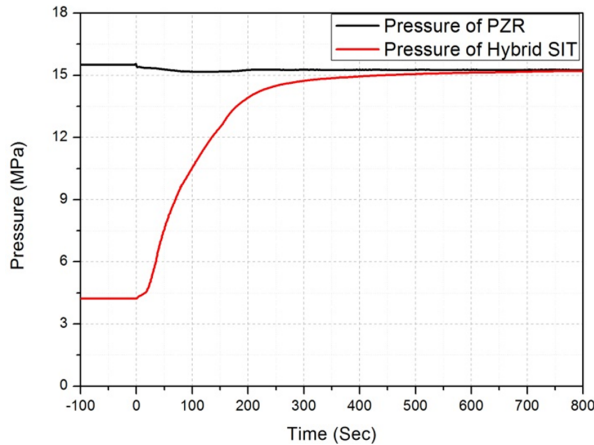


Fig. 4. Pressure of pressurizer(PZR) and Hybrid SIT

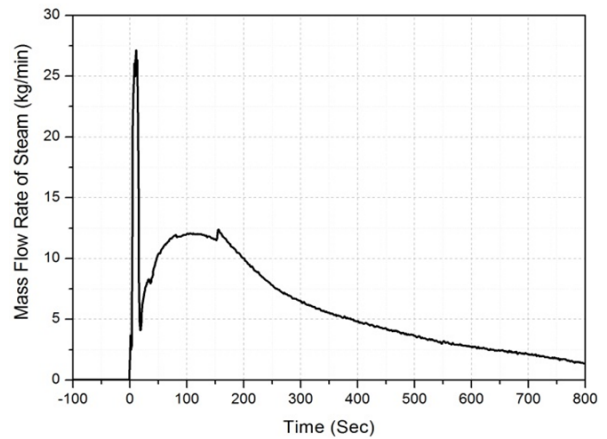


Fig. 6. Mass flow rate of the steam through the PBL

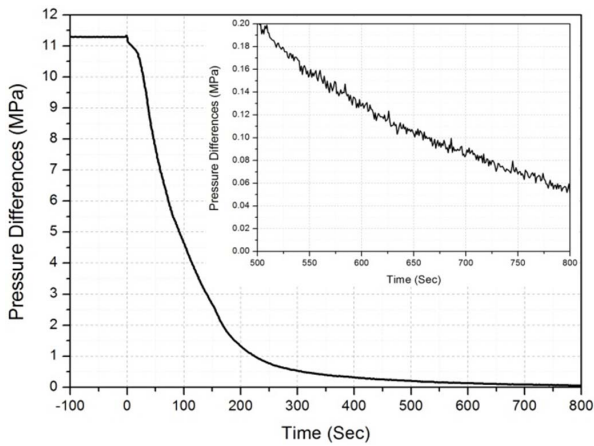


Fig. 5. Pressure difference between pressurizer(PZR) and Hybrid SIT

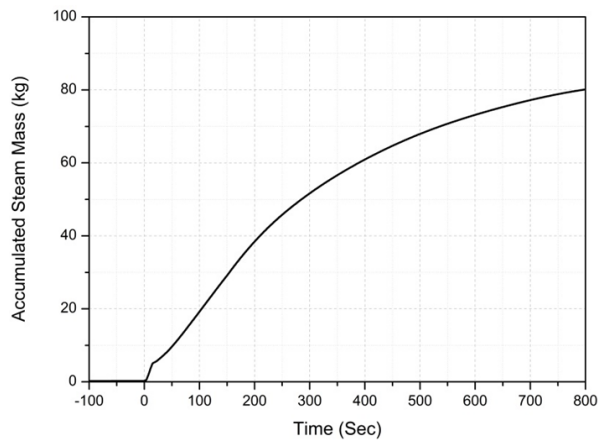


Fig. 7. Accumulated steam mass through the PBL

혼합형 안전주입탱크의 압력차는 시간에 따른 작은 변동(fluctuation) 값이 존재하므로 압력차가 최초로 0.07 MPa 이하가 되더라도 압력변동에 의해 불안정한 냉각수 주입이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 압력변동을 고려하여 냉각수의 안정적 주입이 가능하다고 판단되는 시점을 압력평형 시점으로 평가하였다.

피동충수용 혼합형 안전주입탱크로 주입되는 증기량과 탱크 내부에서 응축되는 증기량의 비를 정상적으로 평가하기 목적으로 질량유량계를 이용해 증기유량을 측정하였으며, 안전주입탱크에 설치한 수위계의 수위변화를 통해 응축된 증기량을 추산하였다.

Figure 6과 7은 압력평형배관에 설치한 유량계를 통해 측정한 증기유량과 총 누적량을 표현한 것이며, Fig. 8은 수위계의 수위변화를 나타낸 것이다. Table 3은 안전주입탱크로 주입된 증기량과 탱크 내부에서

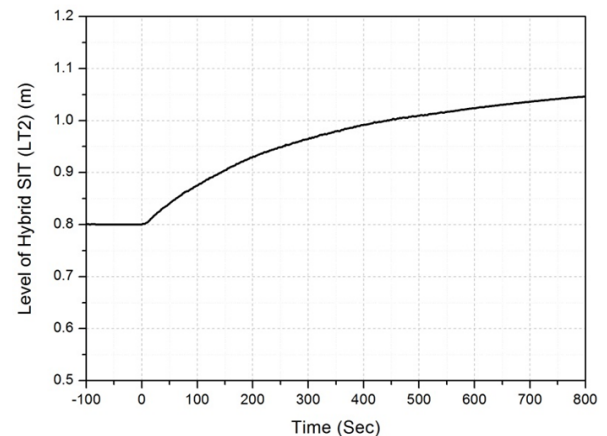


Fig. 8. Water level trends of Hybrid SIT

응축된 증기량을 100초의 시간단위 별로 정리하여 표현한 것이다. 응축된 증기량은 수위변화로부터 추산되었기 때문에 일정 부분의 오차가 포함될 수 있으나, 대략적인 경향을 판단하는데 있어 무리는 없을 것으로

**Table 3.** Comparison of injected steam amount and condensate amount for each time interval

$\Delta t$ (time interval)	Injected steam (kg)	Condensed steam (kg)	Ratio (=condensed amount/ injected amount, %)
0~100초	17.77	14.27	80.3
100~200초	19.69	10.75	54.6
200~300초	13.18	7.44	56.5
300~400초	9.09	5.58	61.4
400~500초	6.55	3.93	60.0

로 판단된다. 오차의 요인은 압력평형배관에서의 증기 응축량과 안전주입탱크 내벽을 따라 이동하지 않고 탱크 상부 헤드 부분에 맺혀있는 응축수에 기인한다고 판단된다.

Table 3을 통해 확인할 수 있듯이 기동밸브 개방 후 100초 동안은 응축된 증기와 주입된 증기의 질량비가 80% 수준이며, 이후 구간에서는 50 ~ 60% 수준으로 낮아진다. 주입 초기에는 증기 열량 중 대부분이 안전주입탱크 냉각수 및 탱크 구조물로 전달되어 증기응축 현상이 활발할 것이며, 응축되지 않은 일부 증기만이 탱크 가압에 기여한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

개별효과시험 장치를 이용하여 피동충수용 혼합형 안전주입탱크에서 발생하는 열수력 현상을 파악하고, 가압기와 피동충수용 혼합형 안전주입탱크의 압력평형에 영향을 미치는 변수들의 효과를 파악하였다. 개별효과시험장치는 참조원전에서의 실제현상을 제대로 모의하기 위해 선형척도법(linear scaling methodology)에 따라 설계 및 제작되었다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 피동충수용 혼합형 안전주입탱크와 가압기의 압력이 평형이 되는 조건을 이론적으로 도출하였다. 평형시점은 피동충수용 혼합형 안전주입탱크의 냉각수가 DVI로 주입되는 속도가 0 이상이 되는 조건으로 설정하였으며, 피동충수용 혼합형 안전주입탱크, 가압기와 RPV에 대한 압력 Network를 통해 조건을 도출하면  $P_0 - P_{SIT} \leq 0.07$  MPa 이 된다.
- 2) FCV 개도량이 15%인 조건에서의 압력평형 시점은 약 700s였으며, 기동밸브 개방 후 100초 동

안은 응축된 증기와 주입된 증기의 질량비가 80% 수준이었다. 주입 초기에는 증기 열량 중 대부분이 안전주입탱크 냉각수 및 탱크 구조물로 전달되어 증기응축 현상이 활발하며, 응축되지 않은 일부 증기만이 탱크 가압에 기여하였다.

## Acknowledgement

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20131510101670)

## References

1. Chang, S.H., NO, H.C., Baek, W.P., Lee, S.I., Lee, S.W., Conceptual design of CARR passive PWR 1300MWe (CP-1300), Nucl. Eng. Int., February, 1997.
2. Tuunanen, J., Riikonen, V., Kouhia, J., Vihavainen, J., Analyses of PACTEL passive safety injection experiments GDE-21 through GDE-25., Nucl. Eng. Des. Vol.180, pp.67-91, 1998.
3. Tuunanen, J., Vihavainen, J., D'Auria, F., Kimber, G., Assessment of passive safety injection systems of ALWRs, Final report of the European Commission 4 th Framework Programme, 1999.
4. Zejun, X., Wenbin, Z., Hua, Z., Bingde, C., Guifang, Z., Dounan, J., Experimental research progress on passive safety systems of Chinese advanced PWR, Nucl. Eng. Des. Vol.225, pp.305-313, 2003.
5. Sibamoto, Y., Summary on natural circulation phenomena observed in ROSA-AP600 test, IAEA-

- TECDOC-1677, 286-298, 2006.
6. Kwon, T., Euh, D.J., Song, C., Baek, W., Passive high pressure safety injection tank system (HPSIT) for responding to station blackout (SBO) and Loss-of-Coolant Accidents (LOCA), US patent. Pub. No. US 2012/0263268, 2012.
  7. Kwon, T, Park C.K., Hybrid SIT for passive safety system, Trans. of the KNS Spring Meeting, Gwangju, Korea, May 30-31, 2013.
  8. Jeon, I.S., Kang, H.G., Development of an operation strategy for a Hybrid Safety Injection Tank with an active system. Nucl. Eng. Technol. Vol.47, pp.443-453, 2015.