

혼합형 안전주입탱크의 압력평형 예측을 위한 열손실 평가

김명준*[†] · 류성욱* · 김재민* · 박현식* · 이성재*

*한국원자력연구원

(2017년 7월 24일 접수, 2017년 8월 25일 수정, 2017년 8월 30일 채택)

Analysis on Heat Loss of Hybrid Safety Injection Tank to Predict Pressure Equalizing Time

Myoung Jun Kim*[†] · Sung Uk Ryu* · Jae Min Kim* · Hyun-Sik Park* · Sung-Jae Yi*

*Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 24 July 2017, Revised 25 August 2017, Accepted 30 August 2017)

요 약

피동고압충수용 혼합형 안전주입탱크 (Hybrid SIT)의 압력평형시간은 냉각수 주입시기를 결정하는 주요인자이다. 한국원자력연구원 (KAERI)에서는 Hybrid SIT에서의 내부 열수력적 거동을 고찰하기 위해 개별효과시험 장치를 구축하였으며, 다양한 운전조건에서의 압력평형시간에 대한 민감도 시험을 수행하였다. 개별효과시험을 통해 압력평형시간을 결정하는 주요인자들을 도출하였으며, 그 중 증기의 벽면응축 및 냉각재와의 직접접촉응축이 압력평형시간을 결정하는 주요 현상임을 파악하였다. 본 연구에서는 개별효과 시험결과들을 이용하여 각각의 응축현상들이 압력평형에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 혼합형 SIT의 압력평형시간을 예측하기 위한 방법론을 제시하였다.

주요어 : 피동고압충수용 혼합형 안전주입탱크, 압력평형시간, 응축, 열손실

Abstract - In the event of loss of coolant accident (LOCA) and station black out (SBO) in the primary system of a nuclear reactor, the coolant water should be injected to reactor coolant system (RCS) without any intervention of operators or active components. To satisfy the requirements, hybrid safety injection tank (Hybrid SIT) was suggested by Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI). The pressure equalizing time of Hybrid SIT is an important parameter to determine the timing of coolant injection. To predict the pressure equalizing time of the Hybrid SIT, a separate effect test facility was constructed and sensitivity tests were conducted in various conditions. The main parameter determining the pressure equalizing time was obtained from separate effect test (SET) results. The wall of condensation on the inner wall of SIT and direct contact condensation on the water surface affected to the pressure equalizing time very much. In this study, the effect of each condensation phenomena on pressure equalizing time was quantitatively analyzed from results of SET and a prediction method of pressure equalizing time was proposed.

Key words : Hybrid SIT, Pressure equalizing time, Condensation, Heat loss

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-042-866-6239 E-mail : mjkim12@kaeri.re.kr

1. 서론

후쿠시마 원전사고 이후, 원자력 발전소의 안전계통은 능동안전계통에서 피동안전계통으로 변화하고 있다. 이에 한국원자력연구원에서는 상용원전(APR+: Advanced Pressure Reactor+)에 적용할 수 있는 피동안전계통을 개발함으로써 발전소 정전 사고에서도 발전소를 안전하게 유지시킬 수 있는 안전성 연구를 진행 중이다. 그 일환으로 피동고압충수용 혼합형 안전주입탱크(Hybrid SIT) 기술개발이 진행 중이며, 피동고압충수용 혼합형 SIT는 기존 SIT의 저압 구동 방식과 달리 고압조건에서도 운전이 가능한 계통이다. 피동고압충수용 Hybrid SIT는 가압기 상부와 안전주입탱크 상부가 배관으로 연결되어있다. 사고가 발생할 경우, 가압기의 증기는 Hybrid SIT로 주입이 되면서 가압을 하게 된다. Hybrid SIT 내부 압력은 원자로용기와 같아 지게 되므로 원자로 용기로 냉각수 주입이 원활하게 된다.

피동고압충수용 Hybrid SIT의 운전조건에 대한 타당성을 검토하기 위해서 가압기와 SIT의 압력평형시간을 파악해야 한다. 한국원자력연구원에서는 압력평형시간을 예측하기 위해서 Hybrid SIT의 개별효과시험 장치를 구축하였으며, 압력평형시간에 대한 민감도 시험을 수행하였다. 그 결과 SIT 탱크 수위, 배관 길이 그리고 밸브 개도량의 변화에 따라 압력평형시간이 크게 달라지는 것을 확인하였으며, 탱크 내부에서의 증기응축현상이 압력평형시간을 결정하는 중요한 인자임을 파악하였다. 개별효과시험을 통해 증기응축현상에 대한 상세분석을 수행하였으나, 추후 상용원전에 적용될 Hybrid SIT 내부에서 발생하는 증기응축량을 예측하는데 있어 열손실에 관한 분석이 추가적으로 필요한 실정이다.⁽¹⁻⁴⁾

본 연구에서는 개별효과시험 데이터를 토대로 Hybrid SIT 내부에서 일어나는 열손실을 분석하는 것이다. 내부열손실 계산은 기존에 잘 알려진 열전달식을 사용하였으며, Hybrid SIT 내부에서 일어나는 열손실은 탱크 벽면, 냉각수 그리고 압력평형배관으로 구분지어 평가하였다. 밸브의 개도량이 다른 2 가지 조건에서 계측된 온도, 압력 및 유량을 이용하여 열손실을 정량적으로 계산하였다.

2. Hybrid SIT 내부의 열손실 지배 방정식

압력평형배관 및 Hybrid SIT 내부에서 발생하는 열손실량을 분석하였다. 여기서 열손실이라 함은 흔히 정의되는 대기로의 열손실뿐만이 아니라 SIT 가압에 기여하지 못하고 구조물이나 냉각수로 전달되는 열량도 포함된다. 즉, 이러한 관점은 탱크 가압에 직접적으로 기여하는 응축되지 않은 증기의 엔탈피와 비응축가스(N₂)로 전달된 열량을 제외한 모든 열전달량을 열손실로 정의한 것이다. 따라서 열손실을 유발하는 인자는 탱크 벽면, 냉각수 및 압력평형배관 등으로 구분할 수 있다.

압력평형배관 및 Hybrid SIT 내부에서 발생하는 열손실량을 분석하기 위해서는 관련 지배방정식을 도출해야 하며, Fig. 1은 지배방정식 도출을 위한 관련 현상들을 정리한 것이며, 그림에서의 점선은 검사체적을 의미한다.

식 (1)은 과도 과정에 대한 열역학 제 1법칙을 나타내며, 과도과정이 진행되는 동안 t 시간동안 적분하면 식 (2)와 같이 정리된다. 이를 Hybrid SIT에 대해 적용

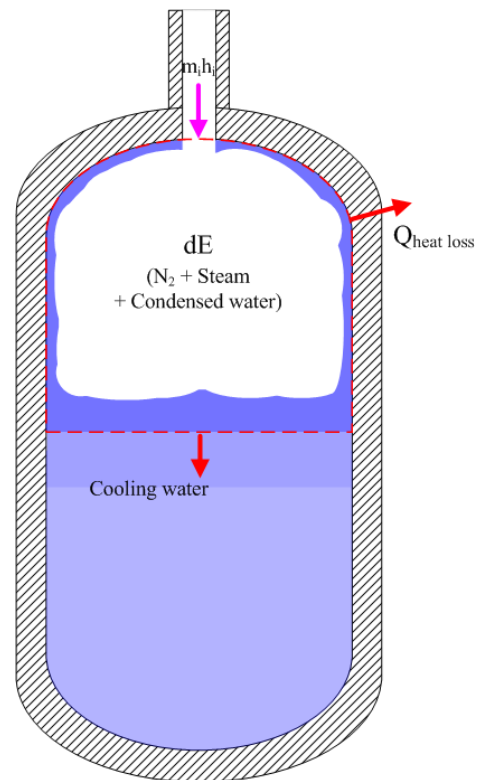


Fig. 1. Distribution of heat transfer in the Hybrid SIT

하면 검사체적 외부로 나가는 질량이 없고 일 또한 없으므로 $m_e h_e$ 와 W 는 0이 되므로, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e \quad (1)$$

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = Q - W + m_i h_i - m_e h_e \quad (2)$$

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = Q + m_i h_i \quad (3)$$

여기서 Q 는 검사체적 외부로의 열손실을 의미하고, $m_i h_i$ 는 SIT 내부로 들어오는 과열증기의 엔탈피, $m_2 u_2 - m_1 u_1$ 은 t 시간동안 진행되는 과도과정에 대한 SIT 내부의 에너지 변화량을 나타낸다. 탱크 내부의 초기 상태는 가압된 질소(4 MPa)만 존재하는 상태이고, 최종 상태는 질소와 비응축 증기, 응축수가 존재하는 상태이므로 이를 고려하면 식 (4)와 같이 최종적인 Hybrid SIT의 열평형 방정식으로 나타낼 수 있다. 최종적으로 남아있는 비응축 증기의 내부 에너지에 대한 식으로 나타내면, 식 (5)와 같은 형태가 된다. 따라서 이 식은 탱크 내부의 비응축 증기가 가지고 있는 총 내부에너지를 나타내는 식이 된다. 여기서, n_{cs} 는 비응축 증기를 나타내고, N_2 는 질소, cdw 는 응축수, i 는 탱크로 들어온 증기를 나타낸다.

$$(m_{N_2,2} u_{N_2,2} + m_{n_{cs},2} u_{n_{cs},2} + m_{cdw,2} u_{cdw,2}) - (m_{N_2,1} u_{N_2,1}) = Q_{loss} + m_i h_i \quad (4)$$

$$m_{n_{cs},2} u_{n_{cs},2} = Q_{loss} + m_i h_i + (m_{N_2,1} u_{N_2,1} - m_{N_2,2} u_{N_2,2}) - (m_{cdw,2} u_{cdw,2}) \quad (5)$$

Hybrid SIT에서 열손실, Q_{loss} 는 크게 두 가지로 나타낼 수 있다. 첫 번째는 Hybrid SIT 구조물 벽면으로 손실되는 열량과, 두 번째는 초기에 채워져 있는 탱크 하부의 냉각수로 전달되는 열량이다. 따라서 열손실은 식 (6)으로 표현한다.

$$Q_{loss} = Q_{wall} + Q_{cw} \quad (6)$$

혼합형 SIT 벽면으로 전달되는 열량(Q_{wall})의 식은 (7)과 같다. c 는 탱크의 재질인 SUS의 비열을 의미하

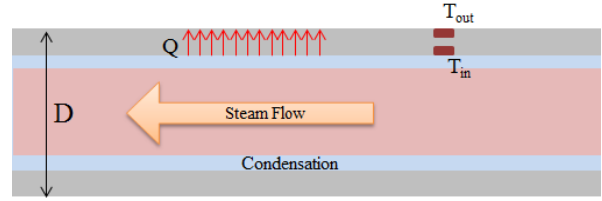


Fig. 2. Heat loss of Pressure balancing line

며 m_{tank} 는 탱크 질량을 의미한다. 식 (8)은 냉각수로 전달되는 열량(Q_{cw})을 의미한다.

$$Q_{wall} = cm_{tank}(T_{w,t} - T_{w,0}) \quad (7)$$

$$Q_{cw} = C_{p,cw} m_{cw} (T_{cw,t} - T_{cw,0}) \quad (8)$$

Hybrid SIT의 가압에 기여하는 증기는 가압기로부터 공급받게 되며, 가압기와 SIT는 압력평형배관(PBL)으로 연결되어 있다. 따라서, 탱크 내부로 들어오게 되는 증기는 PBL에서의 열손실을 제외한 엔탈피를 가지게 되며, 이는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m_i h_i = m_{PZR} h_{PZR} - Q_{PBL} \quad (9)$$

PBL에서 발생하는 열손실은 식 (10)과 같다. 이는 탱크 벽면 SUS에서 발생하는 열량과 같은 식을 이용하였다. c 는 PBL 재질인 SUS의 비열을 의미하며 m_{PBL} 은 PBL의 SUS 질량을 의미한다.

$$Q_{PBL} = cm_{PBL}(T_{w,t} - T_{w,0}) \quad (10)$$

3. 계산 결과 및 열손실 분석

3-1. 시험 장치 및 시험조건

Fig. 3은 피동고압충수용 혼합형 안전주입탱크 개별효과시험 장치의 개념도를 나타내며, 그 구성은 가압기, 안전주입탱크 그리고 압력평형배관으로 이루어져 있다. 개별효과시험 장치의 길이척도비는 참조원전(APR+) 대비 1/5이다. 가압기의 지름은 0.4 m, 높이는 6.895 m이며, 전체 체적은 0.77 m³이다. 안전주입탱크의 지름과 높이는 각각 0.56 m, 3.2 m이며, 전체 체적은 0.716 m³이다. 피동고압충수용 혼합형 안전주입탱크와 가압기를 연결하는 압력평형배관의 내경은 0.01184 m이고, 길이는 31.234 m이다. 배관의 증기

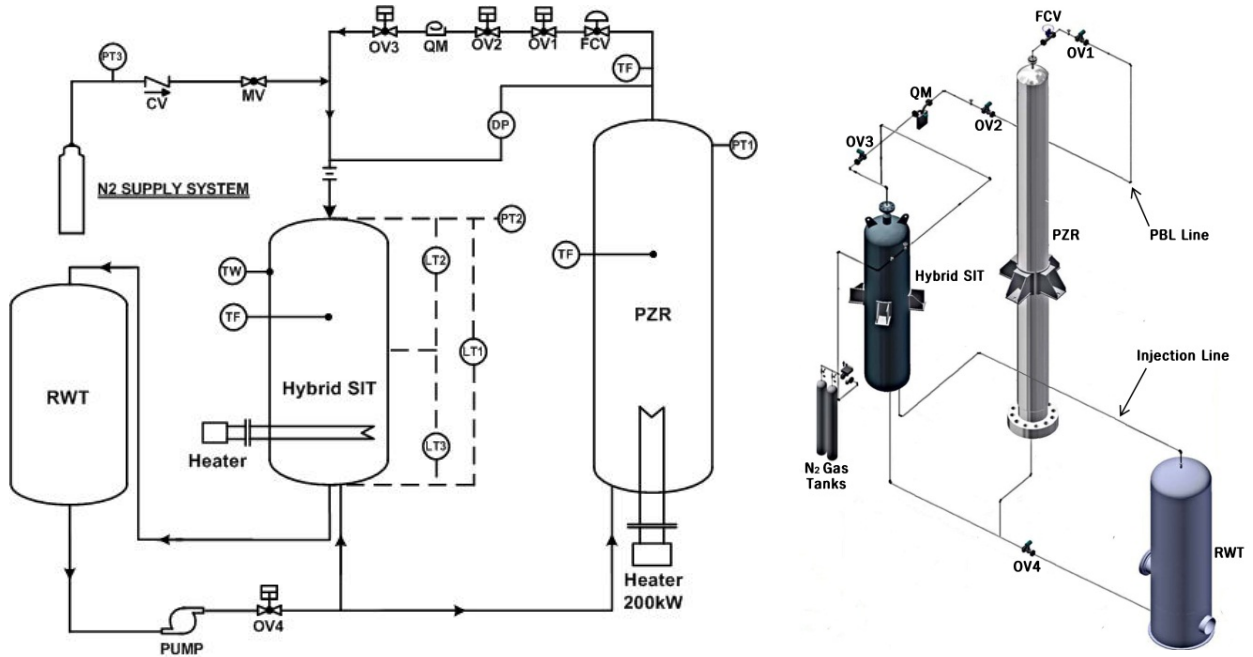


Fig. 3. Hybrid SIT facility

Table 1. Separate effect test condition

	SIT			PZR pressure (MPa)	Valve open (%)
	Temperature (°C)	Level (%)	Pressure (MPa)		
Case A	30	77	4.21	15.51	15
Case B	30	77	4.21	15.51	30

유량을 조절하기 위하여 유량조절밸브를 장착하였으며, 외기로의 열손실을 최소화하기 위해 배관 및 용기 주변에 단열재로 보온하였다.

Table 1은 개별효과시험의 시험조건을 나타낸다. 개별효과 시험에서는 다양한 조건에서 시험을 수행하였지만, 본 연구는 Case A와 Case B를 이용하여 열손실을 분석하였다. Case A와 Case B의 SIT에서 온도, 압력 그리고 수위는 같은 조건이지만, 압력평형배관에 장착된 밸브 개도량이 각 15%, 30%의 조건으로 시험을 수행하였다.

3-2. Case A 열손실 분석결과

시험 결과에서 측정된 온도, 압력, 유량과 열손실 지배방정식을 활용하여 열손실을 분석하였다. Fig. 4는 Case A에서 각 열손실량을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. Q_{PBL} (압력평형배관으로 받는 열량)이 20 초까지

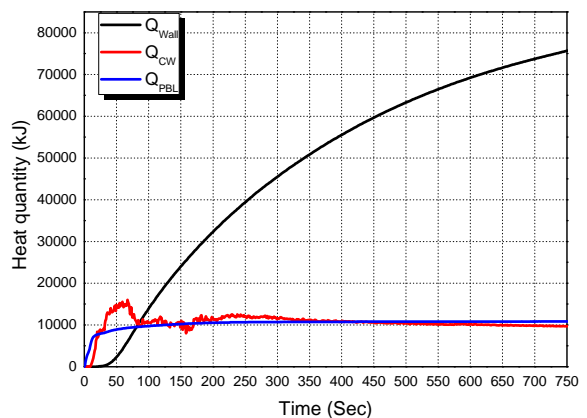


Fig. 4. Results of heat quantity in Case A

상대적으로 가장 값이 높으며, 그 이후 Q_{cw} (냉각수가 받는 열량)의 비중이 커졌다가, 86 초 이후부터 Q_{wall} (벽면으로 받는 열량)이 지배적이게 된다. 압력평형시

간까지 총 열손실량은 약 100,000 kJ로 나타났다.

Fig. 5는 탱크 벽면, 냉각수 및 압력평형배관에서의 열손실 비율($Q_i/Q_{sum} \times 100$)을 정리한 것이다. 과도초반에는 Q_{cw} (냉각수가 받는 열량)이 지배적이지만 기동 밸브 개방 후 400 초가 경과한 시점에서는 Q_{wall} (벽면으로 받는 열량)이 전체열손실 대비 약 70% 이상의 비율을 차지하는 것을 확인할 수 있다.

3-3. Case B 열손실 분석결과

Fig. 6은 Case B에서 각 열손실량을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 대략 11 초 까지 Q_{PBL} (압력평형배관으로 받는 열량)이 상대적으로 가장 값이 높으며, 그 이후 Q_{cw} (냉각수가 받는 열량)의 비중이 커졌다가, 약 100 초 이후 Q_{wall} (벽면으로 받는 열량)이 지배적이게 된다. 압력평형시간까지 총 열손실량은 약 89,500 kJ로 나타나며, 이는 Case A 열손실량보다 약 10,000

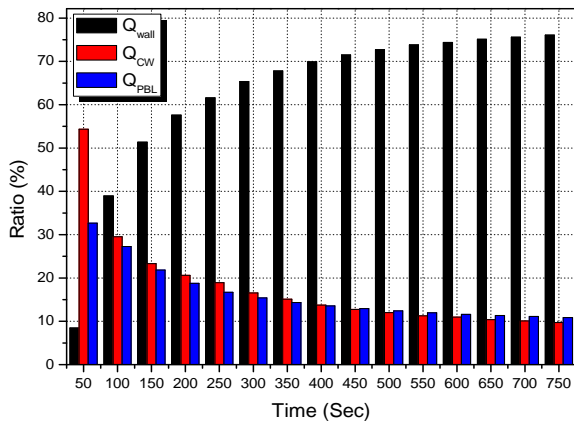


Fig. 5. Results of heat quantity ratio in Case A

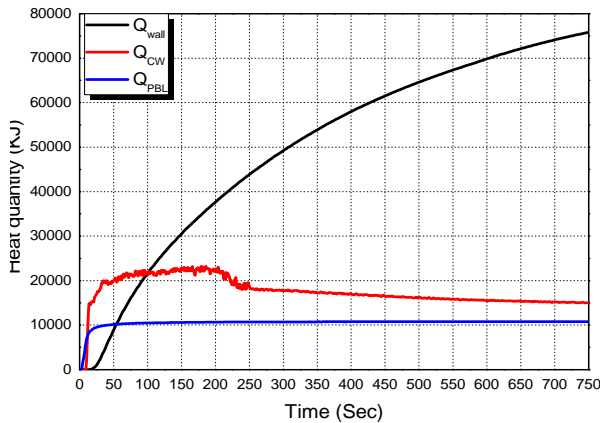


Fig. 6. Results of heat quantity in Case B

kJ 보다 적은 양이다.

Fig. 7은 Case B에서 탱크 벽면, 냉각수 및 압력평형배관에서의 열손실 비율($Q_i/Q_{sum} \times 100$)을 나타낸다. 과도초반에는 Case A와 마찬가지로 Q_{cw} (냉각수가 받는 열량)이 열손실비율이 가장 높지만, 대략 100 초 이후 Q_{wall} (벽면으로 받는 열량)이 지배적이게 된다.

3-4. 각 case 열손실 비교 결과

Fig. 8은 각 Case 조건에서의 벽면 열손실(Q_{wall})의 시간에 따른 변화경향을 비교하여 나타낸 그래프이다. 벽면 열손실은 전 구간에서 Case B가 Case A비해 상대적으로 크게 나타났으며, 압력평형시간을 기준으로 Case B의 벽면 열손실량은 약 62,000 kJ이며, Case A의 벽면 열손실량은 약 76,000 kJ이다.

Fig. 9는 각 Case 조건에서의 냉각수로의 열손실

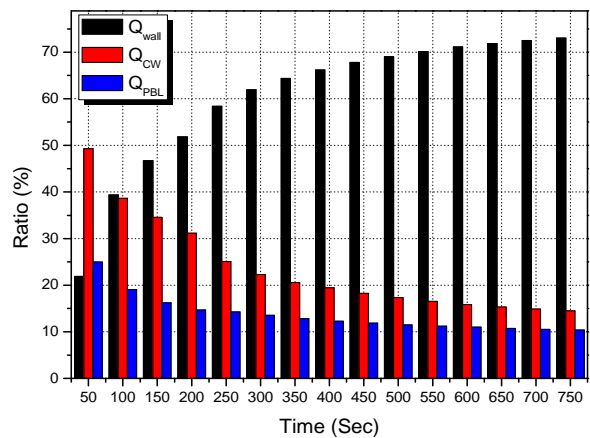


Fig. 7. Results of heat quantity ratio in Case B

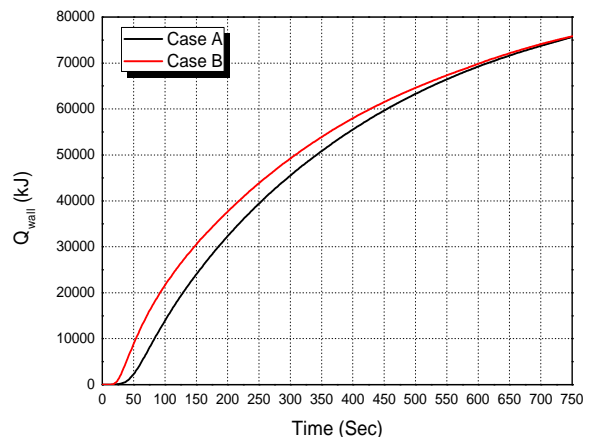


Fig. 8. The comparison of case on the heat loss in wall

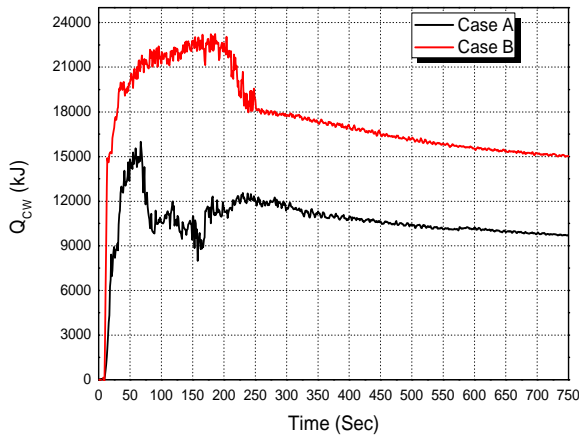


Fig. 9. The comparison of case on the heat loss in cooling water

(Q_{cw})을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. Case B 조건에서 냉각수로 전달된 열손실량은 Case A 조건에서 보다 크게 나타난다. 이는 밸브 개도량이 큰 경우 많은 양의 증기가 탱크 중앙부에 집중적으로 분사되므로 냉각수가 받는 열량이 크게 나타난다. 압력평형시간을 기준으로 Case B의 냉각수에 의한 열손실량은 약 16,400 kJ이며, Case A의 열손실량은 약 9,600 kJ이다.

4. 열손실 분석을 통한 압력평형시간 예측

4-1. 압력평형시간 예측 방법

열손실 분석을 바탕으로 하여 탱크 두께가 기준에 비해 1/5로 얇아졌을 때 압력평형 시점을 예측하였다. Hybrid SIT의 압력은 내부에너지와 밀접한 관련이 있으므로 압력평형시점 예측은 개별효과시험 결과로부터 SIT 압력과 $m_{ncs}u_{ncs}$ (응축되지 않은 증기의 내부에너지)의 관계를 이용하였다. 1/5 두께의 압력평형시간 예측에서는 기존 개별효과시험 결과와 비교하여 벽면 열전달량만 차이가 있다고 가정하고 다음과 같이 진행하였다.

벽면 두께가 1/5로 감소하였을 경우 벽면열손실을 계산하였으며, 냉각수 및 배관에서의 열손실은 시험 결과를 이용하였다. 1/5 두께에서 $m_{ncs}u_{ncs}$ 을 식 (4)를 이용하여 계산하였다. 시험 결과의 $m_{ncs}u_{ncs}$ 와 SIT의 압력 관계식을 이용하여, 1/5 두께의 $m_{ncs}u_{ncs}$ 로부터 SIT의 압력을 결정하였다. 압력평형시점까지 위의 과정을 반복하여 계산하였다.

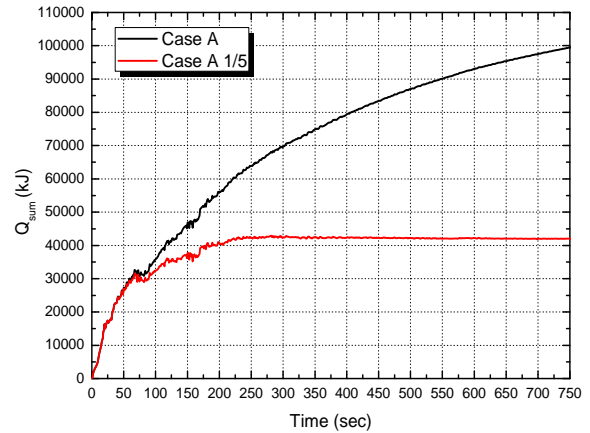


Fig. 10. The comparison of wall thickness on heat loss in Case A

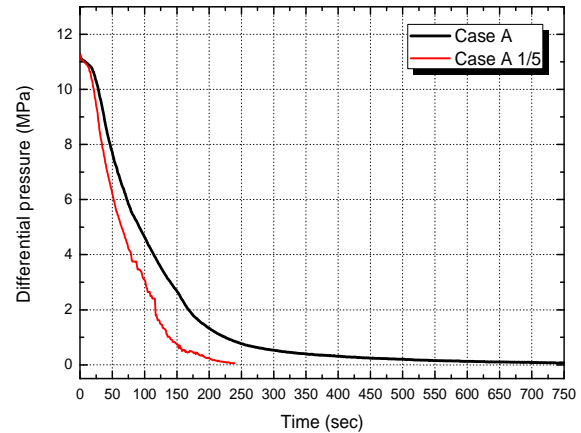


Fig. 11. The comparison of wall thickness on pressure in Case A

4-2. 벽면 열손실 변화를 통한 압력평형시간 예측

Fig. 10은 1/5 두께에서 벽면열손실을 계산한 결과와 Case A의 벽면열손실 시험데이터를 비교한 결과이다. 1/5 두께의 결과를 살펴보면, 약 200 초 지점에서 열량변화가 정상상태로 도달하지만 Case A의 결과에서는 압력평형시점 이후에도 열손실량이 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 11은 1/5 두께의 벽면조건과 Case A 조건에서의 압력변화경향을 비교한 것이다. Case A 조건에서의 압력평형시간은 759 초이며, 1/5 두께의 압력평형시간은 236 초로 나타났다. 1/5 두께가 되면서 벽면으로의 열손실이 크게 감소하여, 압력평형시간이 단축된 것으로 판단된다. Fig. 12는 Case B의 벽면 열손실과 Case B에서 1/5 두께의 열손실량을 비교한 결과이다. Case B의 압력평형시간은 456 초이며, 1/5 두께의 압

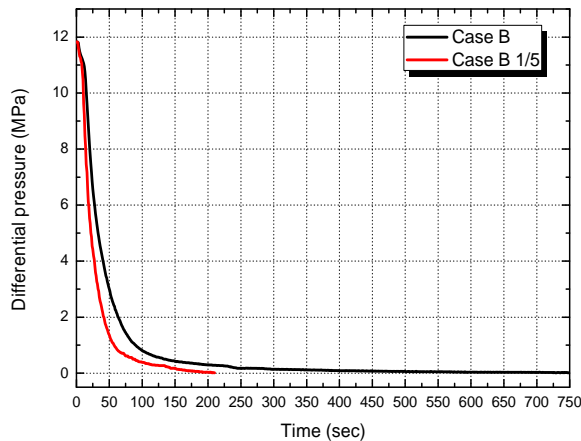


Fig. 12. The comparison of wall thickness on pressure in case B

력평형시간은 180 초로 나타낸다.

4. 결론

본 연구는 개별효과시험으로부터 얻은 데이터(Case A, Case B)를 기반으로 피동고압충수용 혼합형 안전주입탱크 내부의 열손실을 평가하였다. 압력평형시간 예측은 압력차에 의한 증기 주입유량 관계식을 활용하였다. 본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

1. 초기에 탱크 내부의 열손실은 냉각수에 의한 열손실이 크지만, 시간이 흐를수록 벽면 열손실이 큰 것으로 나타났다. 초기에는 많은 양의 증기가 냉각수로 주입되지만 압력차이가 줄어들수록 냉각수로 주입되는 양이 줄어든다.
2. 압력평형시점까지 벽면으로 전달된 열량은 Case A 조건에서 크게 나타났으며, 냉각수에 의한 열손실은 Case B가 Case A 보다 크게 나타났다. 이는 증기의 주입 양 및 냉각수와와의 직접접촉에 의한 응축현상과 관련된 것으로 판단된다.
3. Case A 조건에서의 압력평형시간은 759 초이며, 1/5 두께 벽면조건에서의 압력평형시간은 236 초로 나타났다. 이러한 결과를 통해 벽면 열손실이 압력평형시간에 영향을 주는 주요인자라는 사실을 확인할 수 있다.
4. 각 시험 데이터 분석 결과를 바탕으로 혼합형 안전주입탱크 내부에서 발생하는 열손실을 평가하였다. 탱크 내부의 열손실은 벽면, 냉각수, 압력평형배관 순으로 크게 나타났다. 또한, 탱크 내부의 열손실은 벨

브 개도에 의해 열손실 거동이 달라졌으며, 열손실은 압력평형시점에 큰 영향을 주는 것으로 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20131510101670).

References

1. Ryu, S. U., Ryu, H., Park, H. S. and Yi, S. J., 2016, An experimental study on the thermal-hydraulic phenomena in the Hybrid Safety Injection Tank using a separate effect test facility, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 92, pp. 211-227.
2. Kwon, T., Euh, D.J., Bae, J. and Park, C. K., 2011, Hybrid high pressure safety injection tank for SBO, *Proc. of the KNS Autumn Meeting. Conf.*, Taebaek, Korea.
3. Kwon, T. and Park, C.K., 2013, Hybrid SIT for passive safety system, *Proc. of the KNS Spring meeting. Conf.*, Gwangju, Korea.
4. Kang, S. H and Kim, H. G., 2013, Preliminary performance and sensitivity analysis of hybrid safety injection system for passive emergency core cooling system, *Proc. of the KNS Spring meeting. Conf.*, Gwangju, Korea.