

복합안전주입탱크(Hybrid SIT) 설계개념

권태순*† · 어동진* · 김기환*

Design Concept of Hybrid SIT

Tae-Soon Kwon*†, Dong-Jin Euh*, Ki-Hwan Kim*

Key Words : Hybrid SIT(복합 안전주입탱크), Pressure Equalizing Valve(압력평형 밸브), Gravity Head Injection(중력구동안전주입), SBO Core Makeup (전원상실사고 노심충수)

ABSTRACT

The recent Fukushima nuclear power plant accidents shows that the core make up at high RCS pressure condition is very important to prevent core melting. The core make up flow at high pressure condition should be driven by gravity force or passive forces because the AC-powered safety features are not available during a Station Black Out (SBO) accident. The reactor Coolant System (RCS) mass inventory is continuously decreased by releasing steam through the pressurizer safety valves after reactor trip during a SBO accident. The core will be melted down within 2~3 hours without core make up action by active or passive mode. In the new design concept of a Hybrid Safety Injection Tank (Hybrid SIT) both for low and high RCS pressure conditions, the low pressure nitrogen gas serves as a charging pressure for a LBLOCA injection mode, while the PZR high pressure steam provides an equalizing pressure for a high pressure injection mode such as a SBO accident. After the pressure equalizing process by battery driven initiation valve at a high pressure SBO condition, the Hybrid SIT injection water will be passively injected into the reactor downcomer by gravity head. The SBO simulation by MARS code show that the core makeup injection flow through the Hybrid SIT continued up to the SIT empty condition, and the core heatup is delayed as much.

1. 서 론

2011년 후쿠시마 원전사고는 전원완전상실사고(Station Black Out : SBO)시 비상노심냉각수의 고압노심충수기능이 노심용융을 방지하는데 매우 중요함을 보여주고 있다. 기존의 교류전원에 의해 구동되는 펌프기반의 고압안전주입계통(High Pressure Injection System : HPSI)은 전원이 상실되면 작동이 불가능하기 때문에 전원완전상실사고시에는 사용이 불가능하며, 전원이 가용해도 원자로계통의 압력이 고압안전주입계통의 최대 헤드(Head)보다 높은 경우 원자로계통으로 비상노심냉각수의 주입이 불가능하다. 따라서, SBO 조건하의 노심충수는 중력구동이나 기타 피동구동력으로 이루어져야 한다.

전원완전상실사고시 노심의 잔열로 인해 원자로 계통의

압력은 가압기 안전밸브 설정치인 약 17 MPa까지 가압되고, 원자로 냉각수 온도는 포화증기 온도까지 가열이 된다. 가열된 증기는 가압기 안전밸브를 통해 방출되므로 원자로 계통의 냉각수 수위는 지속적으로 감소한다. 이때 노심을 충수시켜주지 않으면 사고 후 약 2~3시간 이내에 노심이 용융될 수 있다.⁽¹⁾

기존의 안전주입탱크(Safety Injection Tank : SIT)는 질소가스로 가압되어 있으며, 대형파단사고(Large Break Loss of Coolant Accident : LBLOCA)시 비상노심냉각수를 저압상태인 원자로계통으로 대량으로 주입하는 기능에 특화된 설계이다. 그러나 SBO사고시, 원자로계통의 압력이 안전주입탱크 압력보다 더 높은 역압력 구배상태가 되므로 안전주입탱크로부터 보다 고압상태인 원자로용기 쪽으로 비상노심냉각수를 주입할 수 없다.

* 한국원자력연구원, 열수력안전연구부(Korea Atomic Energy Research Institute, Thermal Hydraulic Safety Division)

† 교신저자, E-mail : tskwon@kaeri.re.kr

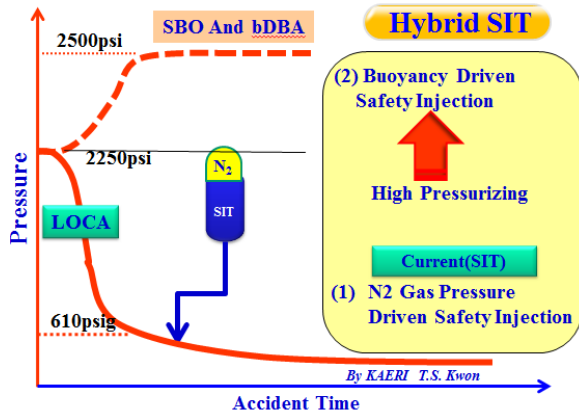


Fig. 1 Hybrid SIT for LOCA and SBO Accident

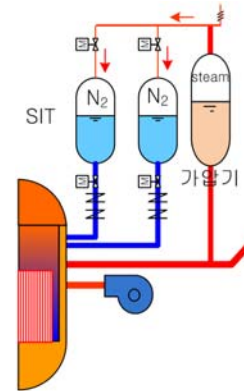
이에 비해 노심충수탱크(Core Makeup Tank : CMT)는 질소가스로 가압되어 있지 않으며, 고압 또는 저압의 원자로 계통과 압력평형 도달후 밀도 및 수두 차이로 비상노심냉각수를 주입한다. 따라서, 대형파단사고시 대량의 비상노심냉각수를 원자로 용기안으로 주입할 수가 없다. 즉, CMT는 대형파단사고시 기존의 안전주입탱크를 대체할 수가 없으며, 따라서, 고압사고에 특화된 고압피동안전주입계통이다. 이러한 설계는 웨스팅하우스의 AP600⁽³⁾, AP1000, 또는 러시아의 VVER1200 원전의 구성 예에서 찾아 볼 수 있다.

복합안전주입탱크(Hybrid SIT)의 신설계 개념은 저압용의 안전주입탱크(SIT)와 고압용의 노심충수탱크(CMT)⁽²⁾ 기능을 하나의 탱크로 수행하는 것으로, 저압에서는 안전주입탱크로, 고압에서는 노심충수탱크로 각각 기능을 전환하여 비상노심냉각수를 원자로계통에 피동으로 주입한다. 따라서, 저압용 안전주입탱크와 고압용 노심충수탱크를 구분하여 탱크를 별도로 설치하지 않고 Hybrid SIT 4 대로 안전주입탱크 4 대 기능과 노심충수탱크 4 대 기능을 각각 수행한다. 예로, AP1000과 같이 노심충수탱크 2 개와 안전주입탱크 2 대를 각각 설치하지 않고 Hybrid SIT 4 대를 설치할 수 있다. 이렇게 하면, 고압사고나 저압사고시 필요한 안전주입탱크나 노심충수탱크 용량을 기준할 때, 2 배의 비상노심냉각수 주입 체적을 확보하는 잇점이 있다.

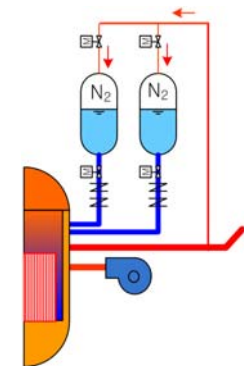
2. 복합안전주입탱크 설계개념

2.1 저압주입과 고압주입 혼합 구성

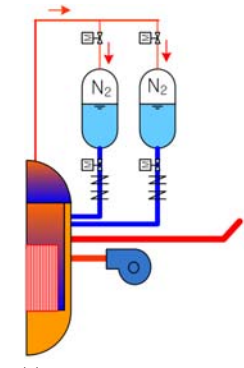
복합안전주입탱크 설계개념에서 기존의 안전주입탱크 기능을 수행하기 위한 기본 구성은 보존한다. 즉 원자로가 정상작동시 복합안전주입탱크는 약 4.3 MPa의 질소가스로 가압되어 원자로계통으로부터 압력 경계를 유지하며 격리된다. 복합안전주입탱크에서 원자로계통으로 비상노심냉각수가 주



(a) PZR to SIT connection



(b) Hotleg to SIT connection



(c) RX to SIT connection

Fig. 2 Pressure equalizing line of Hybrid SIT

입되는 배관과 원자로 계통과의 압력평형 배관에는 격리밸브와 Check밸브가 각각 설치되며, 질소가스 충전 라인에는 고압사고시 질소가스 충전계통을 고압의 원자로계통으로부터 보호하기 위해 자동차단되는 Trip밸브가 설치된다.

원자로가 가압되는 고압사고시(SBO사고 포함) 저압상태의 복합안전주입탱크에 있는 비상노심냉각수를 고압의 원자로용기에 주입하기 위해서는 복합안전주입탱크를 가압시켜 주어야 한다.

Fig. 1은 복합안전주입탱크의 운전 개념을 보여주고 있다. 고압사고시, 원자로계통과 복합안전주입탱크의 상부를 각각 연결하는 압력평형관의 차단밸브를 개방하여 고압의 원자로계통의 증기를 복합안전주입탱크에 주입시켜 가압한다. 또

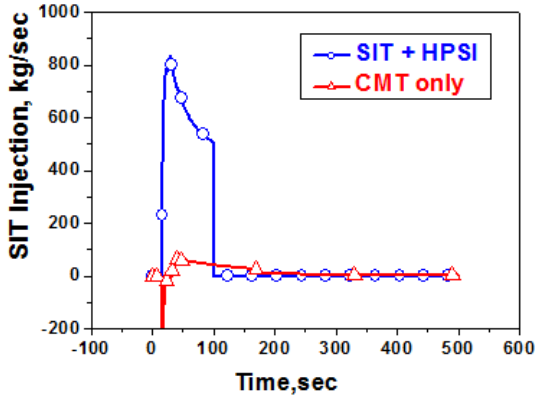


Fig. 3 Safety injection flow rate of SIT and CMT during LBLOCA

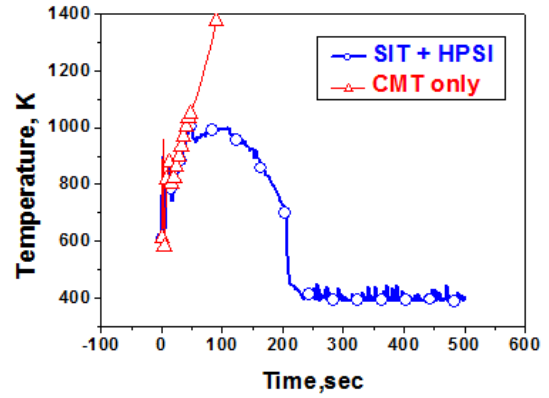


Fig. 4 Core fuel cladding temperature with SIT and CMT during LBLOCA

한 72시간 이상 전원공급이 가능한 전용 배터리를 구비한 모터구동밸브로 차단밸브를 구성한다. 한편, 복합안전주입탱크는 가압기 안전밸브설정 압력까지 가압이 될 수 있으므로 설계압력이 가압기 설계압력과 동일하여야 한다.

2.2 압력 평형관(Pressure Equalizing Line)

Fig. 2와 같이, 저압 상태의 복합안전주입탱크의 가압용 압력평형관은 원자로계통과 복합안전주입탱크 사이에 설치되며, 원자로계통에서의 인출점으로는 (1) 가압기, (2) 고온관, 및 (3) 원자로 용기 등이 고려될 수 있다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 가압기 상부에서 증기를 공급받으면 압력평형밸브 개방시 급격한 압력 진동이 상대적으로 작으므로 바람직하다. 고온관과 복합안전주입탱크를 연결시키면 고온관의 단상 액적이나, 이 상유체가 복합안전주입탱크로 주입될 수 있고, 복합안전주입탱크 상부의 고도가 고온관의 고도 보다 더 높기 때문에 압력평형관의 액주에 의한 압력진동 또는 유동진동 현상이 발생할 수 있다.

한편, 압력평형관은 원자로 용기와 복합안전주입탱크 상부 사이에 설치될 수도 있는데, 원자로 용기로부터의 인출점이 DVI 노즐 고도 이상에 위치하여야 하므로 적당한 위치 선정이 쉽지 않다. 예로, 원자로용기 상부헤드 부위에는 CEDM 노즐이 많이 위치하여 설치 위치를 구하기 어렵고, 원자로용기 밴트용 노즐배관에 압력평형관을 연결시키면 핵연료의 주기적 재장전 작업시 간섭이 발생하여 바람직하지 않다.

가압기의 상부와 복합안전주입탱크의 상부를 연결시킬 때, 밀림관(Surge Line)이 파손되면 복합안전주입탱크의 작동에 필요한 압력평형관이 작동하지 않지만, 이때는 고압충수가 필요한 가압사고가 아니라 원자로 계통이 감압되는 중형파단사고(MBLOCA)이다. 따라서, 압력평형 기능이 필요하지 않은 상황이며 복합안전주입탱크는 종래의 안전주입탱크 기능을 수행하게 된다.

3. 성능 평가 계산

3.1 노심충수탱크의 대형파단사고 대처능력평가

APR1400 원자로의 저온관 대형파단사고(LBLOCA)시 안전계통의 조합에 따른 노심충수탱크의 성능을 MARS 코드를 이용하여 평가하였다. 사고해석은 단일고장사고(Single Failure Assumption)를 적용하여 기존의 사고해석 방법론과 동일하게 진행하였다. AP1000 등의 피동안전계통에서는 펌프구동 고압안전주입(HPSI) 계통을 채택하지 않았다. 따라서, 4대의 노심충수탱크만 있는 경우와 4 대의 SIT와 2 대의 HPSI가 있는 두 경우를 고려하였다.

노심충수탱크만 있는 경우를 고려한 이유는 대형파단사고시 노심충수탱크의 비상노심냉각수 피동충수 기능을 평가하기 위한 것이다. 대형파단사고시 원자로 냉각수가 파단 부위로 빠져 나간 후 원자로를 다시 비상노심냉각수로 급속하게 채워주기 위해 대량의 피동 비상노심냉각수 주입이 필요하며 기존 원전에서는 안전주입탱크가 이러한 기능을 담당하고 있다.

Fig. 3은 대형배관파단사고시 안전주입수 주입성능을 평가하기 위해 계산한 결과 중 안전주입수 유량을 나타낸 그림이다. 기존 안전계통인 안전주입탱크가 질소가스압력에 의해 대량의 비상노심냉각수를 원자로 계통으로 주입시키는 반면에, 압력평형 도달 후 수두차에 의해 비상노심냉각수를 원자로 계통에 주입하는 노심충수탱크에 의한 주입유량은 현저히 작다.

Fig. 4는 기존 안전주입탱크 및 안전주입계통과 노심충수탱크 작동에 따른 노심피복재 온도 거동을 각각 나타낸 그림이다. 기존 안전주입탱크 및 고압안전주입계통은 노심을 충분히 냉각상태로 유지시키는 반면에, 노심충수탱크는 노심을 냉각시키기 충분한 비상노심냉각수를 원자로계통에 공급하지 못해 피복재온도가 1200 K를 초과하여 과열상태에

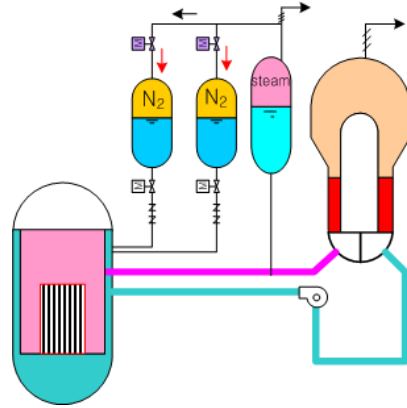


Fig. 5 Hybrid SIT system

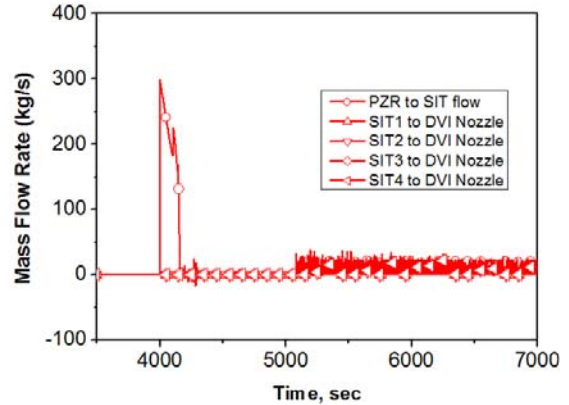


Fig. 7 Passive safety injection flowrate with Hybrid SIT during SBO accident

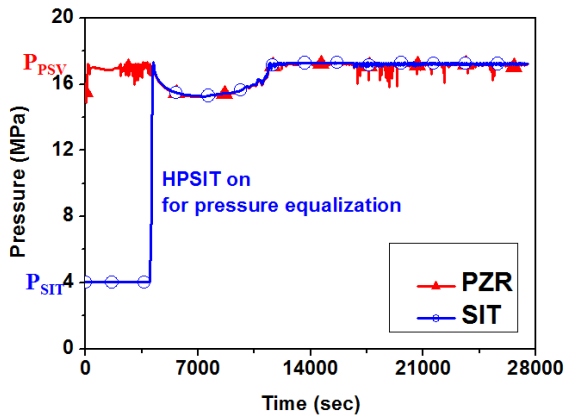


Fig. 6 Reactor primary pressure with Hybrid SIT during SBO accident

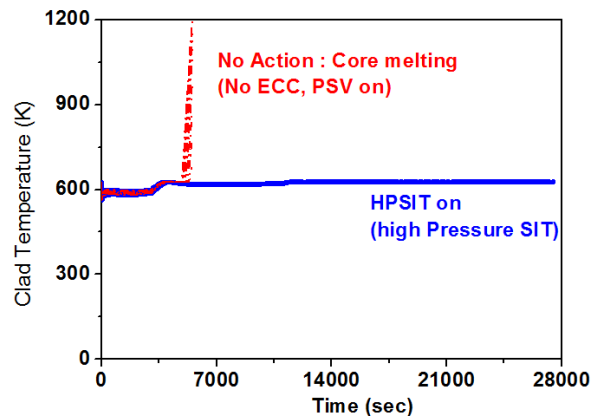


Fig. 8 Core fuel cladding temperature with Hybrid SIT during SBO accident

도달하였다.

3.2 복합안전주입탱크의 전원완전상실사고 대처능력 평가

복합안전주입탱크를 갖는 APR1400에 대해 전원완전상실 사고 조건으로 안전성을 평가하였다. Fig. 5는 평가계산에 적용된 APR1400 원자로의 복합안전주입탱크를 적용한 안전계통의 구성을 나타낸 그림이다. 기존 저압의 안전주입탱크 4 대를 고압의 복합안전주입탱크로 전환시키고 가압기 상부와 탱크를 압력평형관으로 연결시켰다. 압력평형관은 2 인치 직경의 압력관으로 구성되며, 각각의 차단밸브를 안전주입탱크 작동압력에서 개방하여 가압기 압력과 안전주입탱크가 압력 평형을 이루도록 하였다.

전원완전상실사고 조건에서 고압안전주입계통은 작동하지 않고 가압기 안전밸브만 작동하며, 냉각재펌프(RCP)의 밀봉수계통 파단(RCP Seal LOCA)은 고려하지 않았다. 복합안전주입탱크는 4 대로 설정되었다. 압력평형관에 설치된 차단밸브는 가압기 안전밸브 설정치보다 낮은 압력에서 개방

되어 복합안전주입탱크가 가압기의 고압수증기에 의해 가압되어 원자로 계통과 압력 평형이 이루어지도록 설정하였다.

Fig. 6은 전원완전상실사고 조건시 원자로계통의 압력과 복합안전주입탱크의 압력을 나타낸다. 초기 약 4.3 MPa 정도의 복합안전주입탱크의 압력이 압력평형관의 개방이후 가압기의 고압증기로 가압될 때의 압력 거동을 나타내고 있다.

Fig. 7은 전원완전상실사고 조건시 원자로계통으로 주입되는 복합안전주입탱크로부터의 비상노심냉각수 주입유량을 나타내고 있다. 5,000 sec 이후 주입되는 안전주입수는 작은 압력 거동의 진동에 따라 진동하는 형태를 나타내고 있다. 4,000 sec 근처의 유량은 압력평형관의 개방시 가압기로부터 안전주입탱크로 주입되는 증기의 유량을 나타낸다.

Fig. 8은 전원완전상실사고 조건시 노심피복재온도의 거동을 나타내고 있다. 5,000 sec 이후 급격하게 온도가 상승하는 점선은 기존 저압 안전주입탱크와 고압안전주입계통을 갖는 경우의 노심피복재 온도를 나타낸다. 기존 저압 안전주입탱크의 압력은 계통압력보다 낮으므로 비상노심냉각수를 원자로계통으로 주입할 수 없으며, 고압안전주입계통의 경우는 전원완전상실사고 조건이라 교류전원 및 비상디젤발전

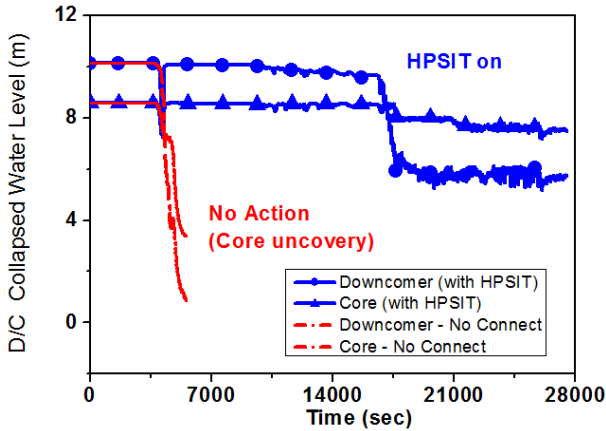


Fig. 9 Downcomer collapsed water level with Hybrid SIT during SBO accident

기가 작동하지 않기 때문에 냉각수를 주입할 수 없다. 설사 전원이 가용한 경우라 해도, 고압안전주입계통의 헤드(Head)가 계통압력보다 작기 때문에 전원완전상실사고 조건하의 고압상태인 원자로계통으로 비상노심냉각수를 주입시킬 수 없다.

Fig. 9는 전원완전상실사고 조건시 원자로의 수위 거동을 나타내고 있다. 5,000 sec 이후 급격한 수위하강 곡선은 기존 저압 안전주입탱크와 고압안전주입계통을 갖는 경우의 수위를 나타낸다. 기존 저압 안전주입탱크와 고압안전주입계통을 갖는 발전소의 경우 비상노심냉각수의 주입이 없기 때문에 가압기 안전밸브를 통한 고압수증기의 유출량에 해당하는 비율만큼 원자로용기의 냉각재 수위가 감소하게 된다. 그러나 복합안전주입탱크가 설치된 경우는 약 28,000 sec까지 수위가 유지되고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 복합안전주입탱크 계통의 기본 구성을 제시하고 비상노심냉각수 주입성능을 대형파단사고와 전원완

전상실사고 조건에서 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 노심충수탱크는 대형파단사고시 원자로의 재충수에 필요한 대량의 비상노심냉각수를 주입하지 못한다. 따라서 대형파단사고시 노심충수탱크의 원자로 재충수 및 원자로 노심 노출방지에 필요한 안전주입기능은 미미하다 할 수 있다.
- 2) 기존의 저압 안전주입탱크와 고압안전주입계통은 전원완전상실사고 조건에서 비상노심냉각수를 전혀 주입하지 못한다. 안전주입탱크는 원자로 계통압력보다 낮으므로 주입이 불가능하며, 고압안전주입계통은 전원상실에 따라 작동이 불가능하다.
- 3) 전원완전상실사고 조건에서 복합안전주입탱크는 가압기와의 압력 평형관의 작동에 따라 저압에서 고압으로 가압이 되어 원자로 계통과 압력평형 도달이후 수두차에 의해 비상노심냉각수를 잘 주입한다. 따라서, 복합안전주입탱크 계통은, 전원완전상실사고 조건하에서, 원자로의 수위 유지와 노심용융 방지 기능을 충분히 오랫동안 발휘할 수 있다.

References

- (1) Tae-Soon Kwon et al., Hybrid High Pressure Injection Tank during SBO, KNDS Spring Meeting, Taebaek, Korea, May 26-27, 2011.
- (2) Sang-il Lee, Hee-Cheon No et al., Assessment of RELAP5/MOD3.1 for Gravity-driven Injection Experiment in the Core Makeup Tank of the CARR Passive Reactor(CO-1300), NUREG/IA-0134, 1996.
- (3) Jinzao Zhang et al., Application of the WCOBRA/TRAC best-estimate methodology to the AP600 large Break LOCA analysis, NED, Vol. 186, p279-301, 1998.
- (4) Tae-Soon Kwon et al., Hybrid SIT for Passive Safety System,, KNS Spring Meeting, Gwangju, Korea, May 30-31, 2013.