2004 춘계학술발표회 논문집
학국원자력학회

부분충수 운전중 잔열제거기능 상실사고시 중력 충수 분석

The Study of Gravity Makeup to RCS for the Loss of RHR Event during Mid-loop Operation

오형숙, 윤덕주, 하상준, 이창섭

전력연구원
대전 유성구 문지동 103-16

요약

전출력 상태와 달리 많은 계통 및 장비의 작동이 불가능한 정지운전 중에 특히, 부분충수 운전시에는 RHR 펌프 트립 및 전원상실 등 다양한 원인으로 잔열제거기능 상실사고가 발생할 가능성이 높다. 이 같은 잔열제거기능 상실사고 발생시 사고완화를 위하여 재장전수 저장 탱크(RWST)의 냉각수를 중력을 이용하여 원자로냉각재계통에 공급하는 방법이 있다. 따라서, 본 논문에서는 노심비등 및 노심노출을 막기 위해 요구되는 최소 충수유량을 RWST 의 냉각수 온도에 따라 계산하였고, 중력주입 가능 경로를 검토하여 노심노출을 방지할 수 있는 충수 가능 시간을 평가하였다. 또한, 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량 주입시, 냉각수 주입 위치에 따른 사고완화 과정을 RELAP5/MOD3.2.2beta 코드를 이용하여 분석하였다. 분석 결과, 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량(약 20m^3/hr)을 저온관에 주입할 경우에는 노심 수위가 잘 회복되지 않으므로, 저온관으로 충수를 할 경우에는 노심비등을 방지하기 위한 유량(약 20m^3/hr) 이상으로 충수하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

Abstract

In case of the loss of Residual Heat Removal System (RHR) event during mid-loop operation, one of the mitigation actions to prevent core uncovery is gravity makeup to the RCS. This study includes the mitigation actions for gravity makeup to the RCS for 3-loop nuclear power plant, minimum gravity makeup flow for prevention of core boiling and core uncovery and possible pass of gravity make up. Also, the evaluation of minimum gravity makeup to prevent core boiling and core uncovery was performed using the RELAP5/MOD3.2.2beta code. The results of this study show that the minimum flow to prevent core uncovery in case of cold leg injection (about 20m^3/hr) is too small to recover the core water level. So, our conclusion is that the minimum flow to prevent core boiling (about 170m^3/hr) is enough to recover core water level.

1. 서론

원전 정지운전 기간 중에 증기발생기의 점검과 보수를 위한 노즐댐 설치 및 제거, 원자로 냉각재계통 관련 체크밸브나 원자로냉각재펌프 등의 시험 및 보수 작업시 원자로내의 냉각수를 고온관 중간 수위 근처까지 배수시키게 된다. 이와 같은 운전상황에서 원자로에서 발생하는 열은 잔열제거계통(Residual Heat Removal System, RHR)에 의해 제거된다. 잔열제거계통의 운전은 냉각재를 원자로냉각재계통(RCS)의 고온관에서 흡입하여 잔열제거펌프, 열교환기를 거친 후 RCS 저온관으로 보내 준다. 이 운전 모드를 부분충수운전(Mid-loop Operation)이라 하며, 전출력 상태와 달리 많은 계통 및 장비의 작동이 불가능한 상태이다. 이 때, 수위지시계 고장이나 오작동으로 냉각재가 과다하게 배출되어 잔열제거펌프로 공기가 흡입되거나, 잔열제거계통 밸브의 자동 잠김, RHR 펌프 트립 및 전원상실 등 다양한 원인으로 잔열제거계통의 기능이 상실되게 되면 원자로 내부는 비등으로 인해 물이 증발하여 원자로 내의 수위가 감소되고 핵연료의 노출을 초래하게 되어 중대사고로 이어질 가능성이 높아진다.

전원상실사고 등으로 인한 잔열제거기능 상실사고 발생시 노심노출에 이르는 시간을 지연하고 수위회복과 같은 사고완화를 위하여 운전원이 취할 수 있는 조치중의 하나로 재장전수탱크(Refueling Water Storage Tank, RWST)의 냉각수를 중력을 이용하여 RCS 에 공급하는 방법이 있다. 따라서, 본 논문에서는 노심비등 및 노심노출을 막기 위해 요구되는 최소 충수유량을 RWST 의 냉각수 온도에 따라 계산하였고, 3-loop A 발전소 관련 도면을 참조하여 중력주입 가능 경로를 검토하고 각 경로별 주입유량 및 노심노출을 방지할 수 있는 충수 가능시간을 평가하였다. 또한, 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량을 RCS 에 주입했을 경우, 냉각수 주입 위치(고온관 주입과 저온관 주입)에 따른 사고완화 과정을 RELAP5/MOD3.2.2beta 코드를 이용하여 분석하였다.

2. 최소 충수유량 분석

노심비등 및 노심노출을 막기 위해 요구되는 최소 충수유량은 충수원인 RWST 의 냉각수 온도에 따라 다르므로, 여기에서는 RWST 온도를 최대 48.89℃(120℉)에서 최소 4.44℃(40℉)까지 분석하였다. 또한, 유량 분석은 원자로정지 후 2 일부터 30 일 후의 사고를 대상으로 하였고, 이때 사용된 붕괴열 곡선은 Framatome 의 잔열제거계통 설명서의 Figure 5.1 과 5.2 를 인용한 것이다. 최소 충수유량을 구할 때 원자로냉각재계통에 있는 금속의 열용량(Heat Capacity)을 무시하였다. 노심비등을 막기 위한 최소 충수유량은 붕괴열을 노심 입구에 유입되는 재장전수(Refueling Water)의 엔탈피와 포화되어 나가는 노심 출구의 엔탈피 변화량으로 나누어 계산하였다. 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량은 증발되어 방출되는 만큼의 재장전수를 공급하면 된다고 가정하여 붕괴열을 증발잠열로 나누어 계산하였다. 계산 결과는 표 1 과 그림 1 에 나타내었다. 원자로정지 후 4 일을 기준으로 할 때, 노심비등을 막기 위한 최소 충수유량은 RWST 의 온도가 4.44℃(40℉), 26.67℃(80℉), 48.89℃(120℉)일 때 각각 101.66, 132.86, 191.51 m^3/hr 이고, 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량은 16.31 m^3/hr (4.53 kg/s)로 계산되었다. 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량에서 잔열제거기능 상실사고 후 노심 수위 회복이 가능한지에

대한 평가는 제 4 절에서 RELAP5/MOD3 코드로 수행하였다.

3. 중력 충수 분석

전원상실사고 등으로 인해 펌프를 이용한 냉각재 충수방법이 상실된 상황에서 운전원은 RWST 의 냉각수를 중력을 이용하여 RCS 에 공급하거나 안전주입 탱크(Accumulator Tank)에 있는 물을 RCS 에 공급할 수가 있다. 그러나, 안전주입탱크에 있는 물을 이용할 경우 운전원이 주입유량을 쉽게 조절할 수 없고 고압의 안전주입탱크 물의 공급으로 인하여 노즐댐 파손 가능성이 있으므로 본 논문에서는 중력을 이용하여 RWST 의 물을 RCS 로 공급하는 방법만을 고려하였다. RWST 에서 RCS 로 물을 공급할 수 있는 유로는 다양하지만, 3-loop A 발전소의 Isometric Drawing 을 검토하여 RCS 내로 물 공급이 가능한 4 가지의 중력충수 경로를 선정하였다. 표 2 는 이들 충수 경로별 주요 Component 및 총길이를 간략하게 기술한 것이고 이들 경로에 대한 설명은 Loop-1 로 주입되는 경로를 기준으로 한 것이다. 단, 경로 2 의 고온관 주입은 Loop-1 로의 주입이 불가능하므로 Loop-2 로의 주입 경로를 나타내었다. 경로 1 은 핵연료재장전수 탱크(PTR001BA)의 바닥 배수노즐에서 저압안전주입펌프(RIS001PO, 002PO)를 거쳐 각 Loop 의 저온관에 위치한 Safety Injection Nozzle 으로 주입되는 경로이다. 또한, 경로 2 는 PTR001BA 에서 LHSI Pump 를 거쳐 Loop2/Loop3 의 고온관을 통하여 RCS 내로 주입되는 경로이다. 이에 반하여 경로 3 과 경로 4 는 고압안전주입펌프(RCV001PO, 002PO, 003PO)를 경유하는 경로로써, 경로 3 은 핵연료재장전수 탱크(PTR001BA)에서 HPSI Pump 를 거쳐 저온관으로 주입되며, 경로 4 는 고온관에 위치한 Safety Injection Nozzle 로 주입된다는 점에서 차이가 있다.

고압안전주입펌프를 경유하는 경로 3 과 4 의 유로에 대한 중력 충수시 주입량을 평가한 결과, 주입유량이 3 kg/s 이하로 노심노출을 방지할 수 있는 유량인 4.53 kg/s 보다 적은 값이므로(표 1) 사고완화를 위한 중력 충수경로로는 부적절한 것으로 판단되었다. 경로 1 의 중력 충수유량은 초기 RWST 수위가 94.3 %(정상수위)이고 RCS 수위가 8.92m 일 때 102 m^3/hr (28.4 kg/s)이였고, 경로 2 의 경우 동일한 조건하에서 중력 충수유량을 평가하면 108 m^3/hr (30 kg/s)이였다. 이들 유량은 표 1 에 보인 바와 같이, 노심비등을 방지할 수 있는 유량값과 유사하였다.

또한, 경로 1 과 경로 2 를 이용하여 노심노출을 막을 수 있는 최소 충수유량에 도달되는 시간을 평가하였다. 평가시 RCS 압력은 대기압으로 유지되고, 유로 내의 모든 밸브가 최대로 열려있다고 가정하였다. RCS 내 압력은 가압기 Manway 가 제거되어 있고 저온관에 큰 개구부가 있거나 증기발생기 입구 혹은 출구 Manway 가 개방되어 있다고 가정하면, RCS 압력은 대체로 대기압 근방의 압력을 유지하고 있다고 가정할 수가 있다. 표 3 의 분석 결과, 원자로정지 후 4 일에 RCS 초기 수위가 고온관 중심선에 있고 RWST 의 초기 수위가 94.3%일 때를 가정하면 잔열제거기능 상실사고 발생 후 최소 13.39 시간 동안 4.53 kg/s 이상의 RWST 붕산수를 중력 충수를 이용하여 저온관에 공급할 수 있고, 고온관 공급은 최소 12.68 시간 동안 가능함을 알 수 있었다.

4. 충수에 의한 수위 회복 과정 분석

GL88-17 은 저수위운전 중 잔열제거기능 상실사고 발생시 노심비등이나 노심노출을 막기 위한 수단으로 최소한 1 대의 고압안전주입펌프와 대체 충수(Makeup) 수단을 요구하고 있다. 3-loop A 발전소는 저수위운전 중 RWST 의 최대 수위가 고온관 중심보다 상당히 높은 곳에 위치하고 있으므로 대체 충수 수단으로 중력충수가 가능하다. 제 2 절에서 기술한 노심비등 및 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량 평가 결과에 따라, 가압기 Manway 개방(PMO Case) 및 저온관 상단의 개구부 개방(CLO Case) 상태에서 잔열제거기능 상실사고시 최소유량을 고온관 또는 저온관으로 RCS 에 주입할 경우, 냉각수 주입 위치에 따른 수위회복 과정을 RELAP5/MOD3.2.2beta 코드를 이용하여 분석하였다. 충수 시점은 보수적인 결과를 얻기 위하여 노심노출이 발생하는 순간에 충수를 시작한다고 가정하였다. RELAP5/MOD3 코드 분석에 사용된 충수유량은 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량인 4.53 kg/s(표 1 참조)와 1 대의 고압안전주입펌프 유량인 44.0 kg/s (160 m^3/h)를 선택하였다. 또한, 이 유량들이 저온관(Cold Leg, CL)으로 주입되는 경우와 고온관(Hot Leg, HL)으로 주입되는 경우로 나누어서 분석을 수행하였다.

4.1 초기조건 및 경계조건

3-loop A 발전소 부분충수운전 중 잔열제거기능 상실사고 해석에 사용되는 초기 및 경계조건은 표 4 에서 정리하였다. 관련 원전의 P&I Diagram 을 참조하여 가압기 Manway 와 증기발생기 Inlet 및 Outlet Manway 의 내경은 16"를 사용하고, 저온관 개구부의 크기는 원자로냉각재펌프 Seal 수리시 형성될 수 있는 크기로 저온관 단면적의 1%에 해당된다고 가정하였다. 사고는 원자로정지 후 4 일(0.4032 %FP) 후로 발생하며, RCS 초기 수위는 고온관 중심선이라고 가정하였다. 고온관 및 저온관의 온도는 각각 57.22℃(330.37K)와 31.21℃(304.36K)이고, RCS 일차측 초기 압력은 1bar 이다. 또한, 증기발생기 이차측의 압력 및 온도는 각각 1bar, 48.89℃(322.04K)로 가정하였고, RWST 온도와 붕소 농도는 각각 48.89℃(322.04K), 2400ppm(1.3733 wt%)로 가정하여 계산을 수행하였다.

4.2 RELAP5/MOD3 모델링

부분충수 운전시 RELAP5/MOD3 Nodalization 은 그림 2 에서 보여주고 있다. 이 그림에서 정상적인 부분충수 운전시 모델링된 Volume 및 Junction 의 총수는 각각 269 개와 291 개이고, Heat Structures 의 수는 356 개이다. 세 개의 일차측 루프를 Loop-1, Loop-2, Loop-3 로 표시하였고 각각의 루프는 고온관(HL), 증기발생기(SG), 펌프흡입관(Crossover Leg), 원자로냉각재펌프(RCP), 저온관(CL)으로 구성되어 있다. 여기에서, 원자로냉각재펌프는 잔열제거기능 상실사고시 펌프의 수체적만을 모사하도록 모델링 되었으며, 가압기와 밀림관은 Loop-1 에 설치되어 있다. 원자로용기, 가압기, 밀림관, 증기발생기 및 루프 등의 금속질량은 RELAP5 Heat Structure 모델링을 사용하여 모사하였다. 또한, 가압기 Manway, 증기발생기 이차측 배기유로 및 증기발생기 입구/출구 Manway, 저온관 개방구 등은 RELAP5 Valve Component 를 이용하여 모델링 하였다.

4.3 RELAP5/MOD3 분석 방법

RELAP5/MOD3.2.2beta 코드를 사용하여 부분충수운전 중 잔열제거기능 상실사고 분석시 사고 직전의 정상상태 초기조건을 얻기 위하여 1000 초 동안 잔열제거펌프를 정상적으로 운전한 후, 0.1 초 내에 잔열제거펌프가 정지되면서 사고가 발생하는 것으로 가정하였다. 그러나, 분석결과를 기술할 때는 초기 1000 초 동안의 정상운전 상태에서의 분석결과는 제외하였으므로 분석결과를 기술한 그림에서 0 초는 잔열제거기능 상실사고가 발생한 시점으로 보면 된다. 여기에서는, 잔열제거기능 상실사고시 가압기 Manway 개방(PMO Case) 및 저온관 상단의 개구부 개방(CLO Case)된 상태이며 노심노출이 시작되는 순간에 고온관 또는 저온관을 통하여 RCS 내로 충수가 시작된다고 가정하여 충수에 의한 수위 회복 과정을 분석하였다. RELAP5/MOD3 코드 분석에 사용된 충수유량으로 노심 노출을 막기 위한 최소 충수유량인 4.53 kg/s(표 1 참조)와 1 대의 고압안전주입펌프 유량인 44.0 kg/s (160 m^3/h)을 선택하였다. 또한, 이 유량들이 저온관(Cold Leg, CL)으로 주입되는 경우와 고온관(Hot Leg, HL)으로 주입되는 경우로 나누어서 분석을 수행하였다.

밀림관 입구 Junction 을 제외한 원자로냉각재계통내의 모든 Junction 은 Choking Option 을 사용하지 않았고, RCS 외부와 연결된 다양한 배기유로 Junction 에는 Choking Option 및 Abrupt Area Change Option 을 사용하였다. 또한, 고온관과 밀림관을 연결하는 Junction 에는 Centrally side Location Junction 에 Horizontal Stratification Entrainment/ Pullthrough Option 을 적용하였고, 밀림관과 가압기를 연결하는 Junction 에는 Kutateladze CCFL Model, U-Tube 의 입구 Junction 에는 Wallis CCFL Model 을 사용하였다.

잔열제거기능 상실사고시 중력충수로 인한 사고완화 과정을 살펴보기 위하여 노심상부 플레넘(그림 2 의 Volume 210-1)의 압력, 노심 비등시간, 노심 노출시간, 가압기 수축수위, 노심의 수축수위 등 사고시 주요 열수력학적 인자들을 비교하였다. 본 논문에서는 노심 비등시간을 노심상단 node(그림 2 의 Volume 178-1)의 Liquid Fraction 이 1 보다 작아지는 시간으로 정의하였고, 노심 노출시간은 노심상부 플레넘(그림 2 의 Volume 190)의 Liquid Fraction 이 0 이 되는 시간으로 정의하였다.

4.4 분석 결과

가. PRO Case 시 충수에 의한 수위 회복 과정

PMO Case 는 원자로냉각재계통 수위가 고온관 중심선이고 가압기 상부에 위치한 가압기 Manway 가 개방되어 있는 상태에서 잔열제거기능 상실사고가 발생한다고 가정한 Case 이다. 모든 Loop 에는 노즐댐이 설치되어 있지 않으며 3 대의 증기발생기 이차측은 충수되어 있지 않은 상태이다. PRO Case 에 대하여 노심이 노출되기 시작하는 순간에 충수를 할 때, 충수에 의한 수위 회복 과정 분석 결과들은 그림 3 에서 그림 7 에 나타내고 있다.

그림 3 은 노심상부 플레넘의 압력 변화를 보여 주고 있다. 사고 후 11.8 분(705 초)에 노심 상단에서 순간비등(Incipient Boiling)이 발생한 이후 가압율이 크게 증가하면서 노심상부 플레넘의 압력이 급격히 증가하였다. 사고 후 48.8 분(2930 초)에는 밀림관과 가압기 연결부에서 처음

으로 CCFL 이 발생하면서 가압율이 다소 감소하지만 압력은 계속하여 증가하여 77.2 분(4630 초)에 1.70345bar.a 까지 도달하였다. 그 이후 가압기 Manway 를 통하여 다량의 물과 증기가 방출됨으로써 RCS 내 압력은 감소하지만, 이 같은 압력 변화는 노심 상부에 냉각수가 완전히 사라질 때까지 계속 반복되었다. 충수를 하지 않는 경우, 냉각수가 노심 상부에서 완전히 사라진 이후에는 많은 양의 붕괴열이 증기생성이 아닌 연료봉 가열에 사용되므로 RCS 압력은 급격히 감소하게 된다. 최소 충수유량이 저온관을 통하여 RCS 에 주입되면 노심상부 플레넘의 압력은 섭동하면서 천천히 감소하지만, 고온관을 통하여 주입된 경우에는 주입 시작시에는 감소하였다가 일정 압력을 유지하였다. 이에 반하여 고압안전주입펌프 유량을 RCS 내로 주입하면 다량의 차가운 물이 주입됨으로써 주입시 순간적으로 압력이 감소하지만 다시 급격하게 증가하여 대략 2.3 bar.a 근처에서 섭동하면서 그 압력을 유지하였다.

그림 4 는 충수로 인한 가압기 수축 수위의 변화를 나타내는데, 27.4 분(1645 초)부터 가압기로 냉각수가 유입되기 시작하여 59.3 분(3560 초)에는 최대 수위인 6.0536m 까지 상승하다가 개방된 가압기 Manway 을 통하여 다량의 냉각수와 증기가 방출되면서 수위는 감소하는 경향을 보이지만, 충수를 하지 않는 경우에는 사고 종료시까지 대략 3.2m 의 가압기 수위가 유지되었다. 최소 충수유량이 RCS 에 주입되면 가압기 수축수위 변화가 거의 없지만, 1 대의 고압안전주입펌프 유량이 주입되면 RCS 계통내의 압력 상승으로 인하여 가압기로 많은 물이 밀려들어가 개구부로 많은 양의 물과 증기가 빠져나갔다.

그림 5 및 그림 6 은 충수 이후 노심이 회복되는 과정을 보여주고 있다. 노심상부 플레넘의 액적율을 나타내고 있는 그림 5 에서와 같이, 노심노출 현상은 사고 후 116.5 분(6990 초)에 발생함을 알 수 있었다. 노심의 수축 수위의 변화를 보여 주고 있는 그림 6 에서 0.0m 은 노심 바닥을 의미한다. 사고 초기에는 노심 비등으로 인하여 노심의 수축수위는 다소 증가하지만, 가압기로 다량의 냉각수가 유입되면서 충수를 하지 않을 경우에는 수위가 계속 감소하였다. 저온관으로 최소 충수유량을 주입하면 노심 노출후 약 2000 초 동안 노심 노출 현상이 계속 지속되다가 수위가 회복되었다. 그러나, 1 대의 고압안전주입펌프를 이용하거나 고온관으로 최소 충수유량을 주입하면 노심 수위는 충수 직후에 바로 회복되는 것을 알 수 있었다.

낮은 온도의 재장전수가 고온의 RCS 내에 주입될 때 원자로용기에서 보론이 석출되는지의 여부를 확인하기 위한 그림 7 은 재장전수 주입으로 인하여 보론이 석출되지 않음을 나타내고 있다. 이 그림에서 Boron Solubility Margin 이 음수가 되고 RELAP5/MOD3 Volume 에 물이 존재하면 붕소가 석출되는 것으로 의미하는 것이다. 그림 5 를 보면 노심상부 플레넘의 Liquid Fraction 이 0 이 되면 Boron Solubility Margin 은 급격히 0 이하로 떨어지는 것으로 나타나는데, 이는 Volume 에 물이 없기 때문에 나타나는 것이며 붕소가 석출됨을 의미하는 것은 아니다.

나. CLO Case 시 충수에 의한 수위 회복 과정

CLO Case 는 초기 원자로냉각재계통 수위가 고온관 중심선이며 가압기 Manway 가 개방되어 있고 저온관 상단에 저온관 면적의 1%에 해당되는 크기의 개구부가 존재하는 상태에서 잔열제거기능 상실사고가 발생한다고 가정한 경우로써 노즐댐이 설치되기 전 원자로냉각재펌프 Seal 수리시 발생할 수 있는 사고를 모사한 것이다. PMO Case 와 마찬가지로, 모든 Loop 에는

노즐댐이 설치되어 있지 않으며 3 대의 증기발생기 이차측은 충수되지 않는 상태이다. 앞서 분석한 PMO Case 시 충수에 의한 수위 회복과정 분석과 동일한 방법으로 분석이 수행되었다. CLO Case 에 대하여 노심이 노출되기 시작하는 순간에 충수를 시작할 때, 충수에 의한 수위 회복 과정 분석 결과들은 그림 8 에서 그림 12 에 나타내었다.

그림 8 은 노심상부 플레넘의 압력 변화를 보여 주고 있다. 노심상부 플레넘의 압력은 저온관 상부에 존재하는 개구부로 인하여 PMO Case 와 비교하여(그림 3) 크게 상승하지 않았다. 사고 후 10.8 분(650 초)에 노심 상단에서 순간 비등(Incipient Boiling)이 발생한 이후 압력은 서서히 증가하여 저온관이 빈 이후(110.3 분)에는 1.4809bar.a 까지 상승하였다. 최소 충수유량이 고온관/저온관을 통하여 RCS 에 주입되면 노심상부 플레넘의 압력은 주입 당시의 압력을 유지하면서 아주 서서히 증가하는 추세를 보였다. 하지만, 고압안전주입펌프를 이용한 경우에는 주입시 압력이 감소하였다가 다시 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 저온관으로 주입된 경우에는 주입초기 감소하던 압력이 급격히 증가하였다가 다시 감소하였다. 이에 반하여 고온관 주입 경우에는 계산 종료시까지 압력이 계속하여 증가하였다.

충수로 인한 가압기 수축 수위의 변화는 그림 9 에서 나타내고 있다. 충수 이전에는 사고 후 29.1 분(1745 초)부터 혼합물이 가압기로 유입되기 시작하여 수위가 2.1443m 까지 이르게 된다. 하지만, PMO Case 와 비교하여 추가적으로 저온관에 개구부가 존재함으로써 가압기로 유입되는 혼합물의 양은 많지 않았다(그림 4). 최소 충수유량이 원자로냉각재계통에 주입되면 가압기 수축수위 변화가 거의 없지만, 1 대의 고압안전주입펌프 유량이 고온관을 통하여 주입되면 차가운 물이 RCS 내로 유입되면서 계통압력이 감소하여 가압기 수위가 감소하였다가 계통 압력이 상승하면서 가압기 수위도 급격히 증가하였다. 저온관으로 고압안전주입펌프 유량이 주입된 경우에는 심한 섭동현상과 함께 수위가 증가하여 가압기 상부까지 물로 채워졌다가 Manway 로 다량의 물이 배출되면서 수위가 감소하였다.

그림 10 및 그림 11 은 충수 이후 노심이 회복되는 과정을 보여주고 있으며, 노심노출은 사고 후 158.5 분(9510 초)에 발생함을 알 수 있었다. 1 대의 고압안전주입펌프를 이용하여 충수유량을 주입하면 노심 수위는 충수 직후에 바로 회복되었다. 한편, 저온관으로 최소 충수유량을 주입하면 반복적으로 노심노출 현상이 발생하여 수위가 회복되지 못하였고, 고온관으로 주입하면 수위는 출렁거리지만 노심노출이 지속되지 않음을 알 수 있었다. 또한, PMO Case 와 동일하게 CLO Case 역시 낮은 온도의 재장전수 주입으로 인한 보론 석출은 발생하지 않음을 알 수 있었다.

5. 결론

부분충수운전 중 잔열제거기능 상실사고 발생시 사고완화 조치 중 하나인 RWST 냉각수의 중력주입에 관한 분석을 수행하였다. 노심비등 및 노심노출을 방지하기 위해 요구되는 최소 충수유량을 RWST 의 냉각수 온도에 따라 계산하고, 3-loop A 발전소 관련 도면을 참조하여 중력주입 가능 경로를 검토하고, 각 경로별 주입유량 평가 및 노심노출을 방지할 수 있는 충수 가능시간을 평가하였다. 또한, 노심비등 및 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량을 원자로냉각재계통에 주입했을 경우, 냉각수 주입 위치(고온관 주입과 저온관 주입)에 따른 사고완화 과정

을 RELAP5/MOD3.2.2beta 코드를 이용하여 분석하였다.

원자로정지 후 4 일 후에 잔열제거펌프가 상실되고 초기 원자로냉각재계통의 수위가 고온관 중심에 있을 때, 노심노출을 막기 위한 최소 충수유량은 4.53 kg/s (16.31 m^3/hr)이지만 이 유량을 저온관에 주입할 경우에는 노심 수위가 잘 회복되지 않았다. 따라서, 저온관으로 충수를 할 경우에는 노심비등을 방지하기 위한 유량 이상으로 충수하는 것이 바람직하다. 또한, RWST 에서 저온관으로 주입되는 중력충수 유로를 이용하면, RWST 의 초기 수위가 94.3 %이고 고온관 중심 수위일 때 최소 13.39 시간 동안 중력충수를 이용할 수 있었다. 한편, 고온관으로 주입되는 중력충수 유로를 이용하면 최소 12.68 시간 동안 중력충수가 가능함을 알 수 있었다.

REFERENCES

1. U. S. NRC, Generic Letter 88-17, Loss of Decay Heat Removal – 10 CFR 50.54, Oct. 17, 1988
2. U. S. NRC, RELAP5/MOD3.2.2Beta Code Manual: User's Guide and Input Requirements, SCIENTECH, Inc., NUREG/CR-5535, Volume 1~5, 1998
3. K. W. Seul, Y. S. Bang and H. J. Kim, "Plant behavior following a loss-of-residual-heat-removal event under a shutdown condition", Nuclear Technology, Vol. 126, p265-278, Jun. 1999
4. K. W. Seul, Y. S. Bang and H. J. Kim, "Evaluation of the gravity-injection capability for core cooling after a loss-of-SDC event", proceeding of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Pohang, 1999.
5. Y.I. Kim, Y.S. Bang and K.W. Seol, " Analysis of loss of residual heat removal (RHR) event during mid-loop operation", NTHAS2, Fukuoka, 2000.
6. H.S. Oh and S.J. Ha, "Safety Analysis of Loss of RHR Event During Mid-Loop Operation for Younggwang Units 1&2", Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Cheju, 2001.
7. Framatome, Document type: System Description, Residual Heat Removal System, Chapter 5, Operating Parameters, EPPP-DC-0702.
8. C. J. Choi, K. S. Han, "Analysis of Loss of RHR Events during Mid-loop Operation of UCN 3&4 Nuclear Power Plants," KOPEC/NED/TR-1, February 1997.
9. "울진 1,2 호기 잔열제거상실 안전해석 보고서, " 전력연구원, TM.01NS12.P2003.139, 2003.5.

표 1. 노심 비등 및 노심 노출을 방지하기 위한 최소 충수 유량

원자로정지 후 시간 (일)	충수 유량 (kg/s / m^3/hr)			
	노심비등 방지 4.44℃ (40°F)*	노심비등 방지 26.67℃ (80°F)*	노심비등 방지 48.89℃ (120°F)*	노심노출 방지 †
2	36.89 / 132.82	48.22 / 173.58	69.51 / 250.22	5.92 / 21.31
3	31.60 / 113.78	41.30 / 148.69	59.54 / 214.34	5.07 / 18.25
4	28.24 / 101.66	36.90 / 132.86	53.20 / 191.51	4.53 / 16.31
5	25.70 / 92.52	33.59 / 120.92	48.42 / 174.31	4.12 / 14.84
6	23.72 / 85.39	31.00 / 111.60	44.69 / 160.87	3.81 / 13.70
7	22.28 / 80.19	29.11 / 104.80	41.96 / 151.07	3.57 / 12.87
8	20.83 / 75.00	27.23 / 98.01	39.25 / 141.28	3.34 / 12.03
9	19.82 / 71.36	25.90 / 93.26	37.34 / 134.43	3.18 / 11.45
10	18.81 / 67.72	24.58 / 88.50	35.44 / 127.57	3.02 / 10.86
11	18.18 / 65.46	23.77 / 85.56	34.26 / 123.33	2.92 / 10.50
12	17.56 / 63.21	22.95 / 82.61	33.08 / 119.08	2.82 / 10.14
13	16.93 / 60.96	22.13 / 79.67	31.90 / 114.84	2.72 / 9.78
15	16.31 / 58.70	21.31 / 76.72	30.72 / 110.59	2.62 / 9.42
17	15.68 / 56.45	20.49 / 73.78	29.54 / 106.35	2.52 / 9.06
20	14.89 / 53.62	19.46 / 70.07	28.06 / 101.01	2.39 / 8.60
25	13.73 / 49.42	17.94 / 64.59	25.86 / 93.11	2.20 / 7.93
30	12.34 / 44.42	16.12 / 58.05	23.24 / 83.68	1.98 / 7.13

*) RWST 의 붕산수 온도
†) 노심 노출방지 유량은 보수적으로 잠열만 고려하였음.

표 2. 중력 충수 경로

경로	경로상 주요 component	총길이 (m)
1	PTR001BA (RWST) → RIS010VB → RIS075VB FAI → RIS076VP → RIS001PO (LHSI Pump) → RIS057VP → RIS059VP → RIS061VP FAI → RIS071VP → RIS008DI → RIS072VP → RCP122VP → Cold Leg 1	152.8
2	PTR001BA (RWST) → RIS010VB → RIS075VB FAI → RIS076VP → RIS001PO (LHSI Pump) → RIS057VP → RIS059VP → RIS063VP FAI → RIS003DI → RIS069VP → RCP320VP → Hot Leg 2	98.4
3	PTR001BA (RWST) → RIS050VB → RIS013VP FAI → RIS017VP → RCV037VP → RCV002PO (HHSI Pump) → RCV040VP → RCV043VP → RIS020VP FAI → RIS026VP → RIS037VP → RIS040VP → RCP122VP → Cold Leg 1	200.6
4	PTR001BA (RWST) → RIS010VB → RIS012VP FAI → RIS011VP → RCV036VP → RCV001PO (HHSI Pump) → RCV039VP → RCV042VP → RIS021VP FAI → RIS043VP → RIS046VP → RCP120VP → Hot Leg 1	172.0

표 3. 중력 충수시 충수 가능 시간 평가

RWST 초기 수위 (%)	원자로냉각재계통 초기 수위가 고온관 중심일 때 RWST 초기 수위와의 높이 차 (m)	사고 후 원자로냉각재계통이 대기압을 유지할 때 노심 노출을 막기 위한 최소 충수유량에 도달하는 시간 (Hour)	
		경로 1	경로 2
100.0	8.30	14.33	13.57
97.0	7.83	13.85	13.11
94.3	7.40	13.39	12.68
90.0	6.73	12.65	11.99
80.0	5.16	10.76	10.22
70.0	3.59	8.55	8.15
60.0	2.02	5.77	5.55
50.0	0.45	1.36	1.43

표 4. 잔열제거기능 상실사고시 초기 조건 및 경계 조건

Parameter	Value
PZR manway diameter	0.4064 m (16" I.D.)
SG manway diameter	0.4064 m (16" I.D.)
Cold leg break area	0.003832 m^2 (1% of the cold leg cross sectional area)
Decay heat	**11.189425 MWt** (0.4032% of the nominal core power, 2775 MWt)
RCS pressure	1 bar.a (= 0.101325 MPa)
RCS hot leg temperature	57.22 ℃ (= 330.37 K)
RCS cold leg temperature	31.21 ℃ (= 304.36 K)
RCS liquid level	Centerline of the hot leg
RCS boron concentration	1.3733 wt% (= 2400 ppm)
Secondary pressure	1 bar.a (= 0.101325 MPa)
Secondary temperature	48.89 ℃ (= 322.04 K)
Containment pressure	1 bar.a (= 0.101325 MPa)
RWST temperature	48.89 ℃ (= 322.04 K)
RWST boron concentration	1.3733 wt% (= 2400 ppm)

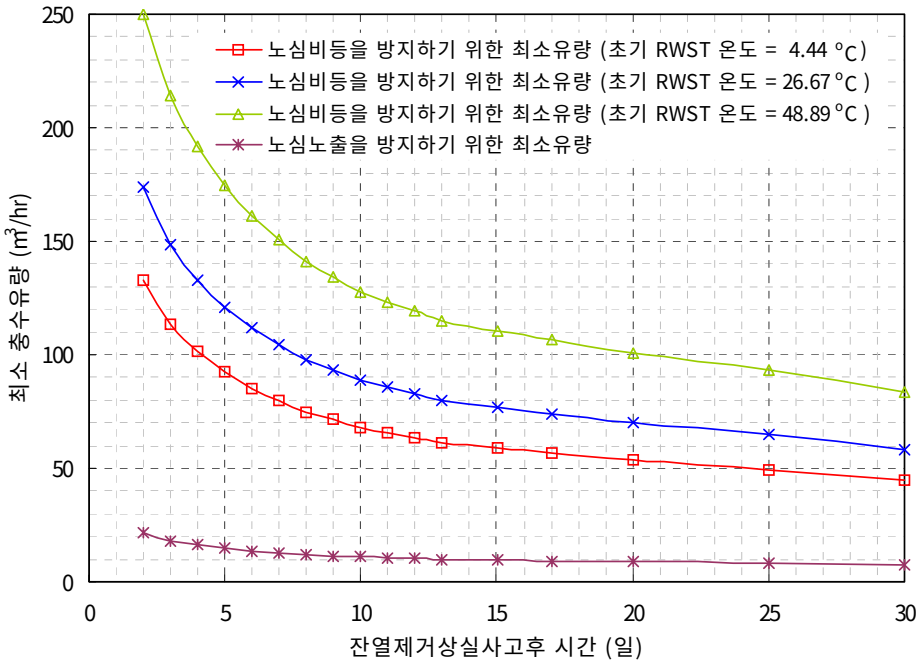

그림 1. 노심 비등 및 노심 노출을 방지하기 위한 최소 충수 유량

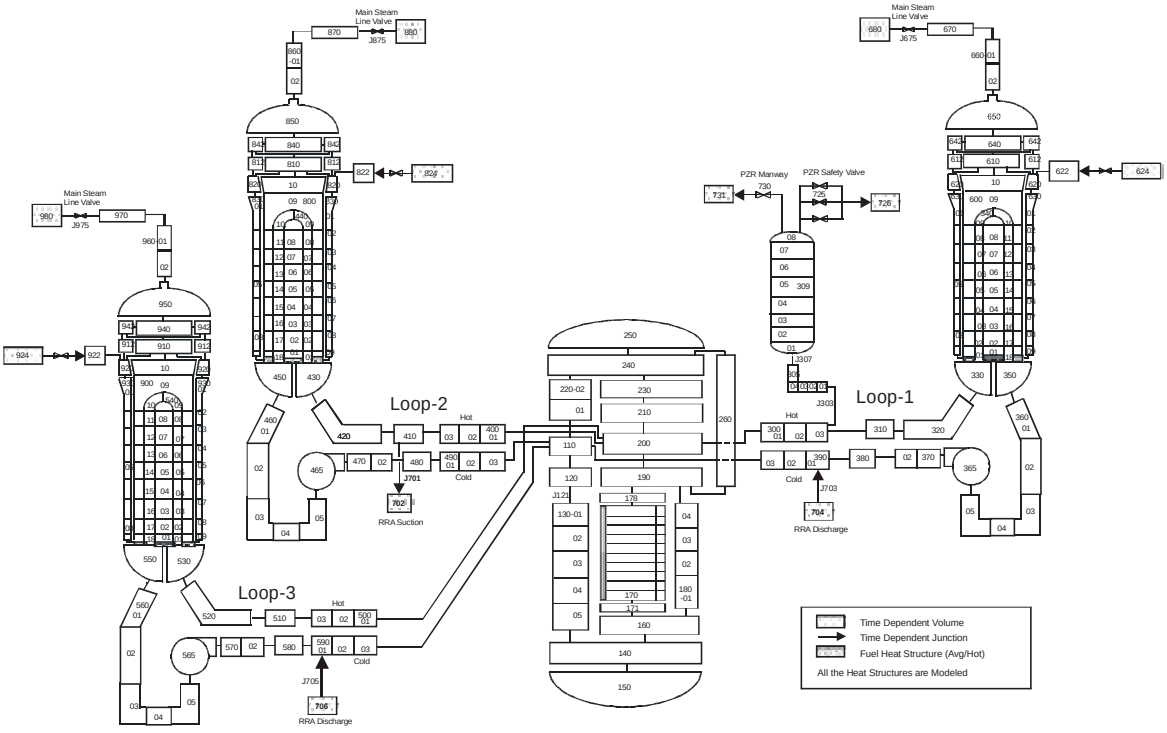

그림 2. 부분충수 운전시 RELAP5/MOD3 Nodalization

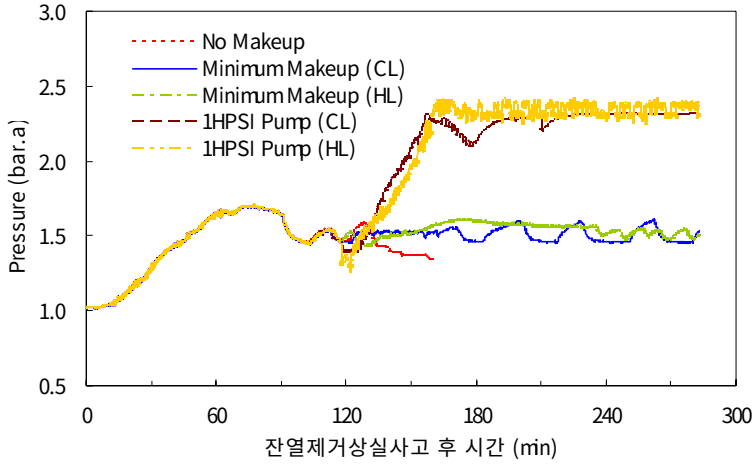

그림 3. 다양한 충수 방식에 따른 노심상부 플레넘의 압력 변화 (PMO Case)

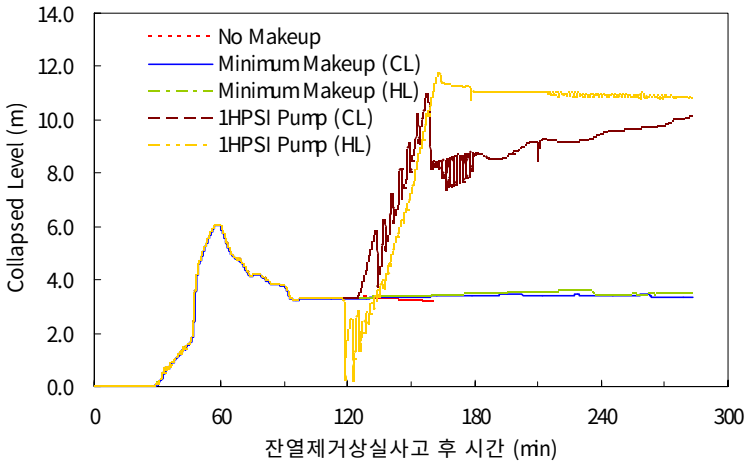

그림 4. 다양한 충수 방식에 따른 가압기의 수축 수위 변화 (PMO Case)

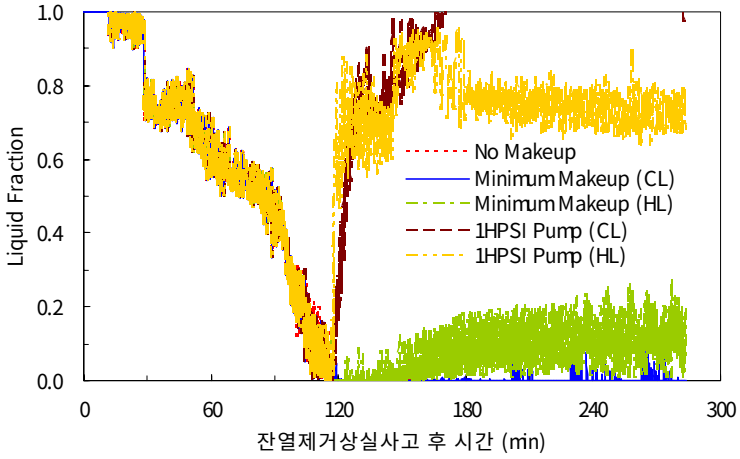

그림 5. 다양한 충수 방식에 따른 노심의 수축수위 변화 (PMO Case)

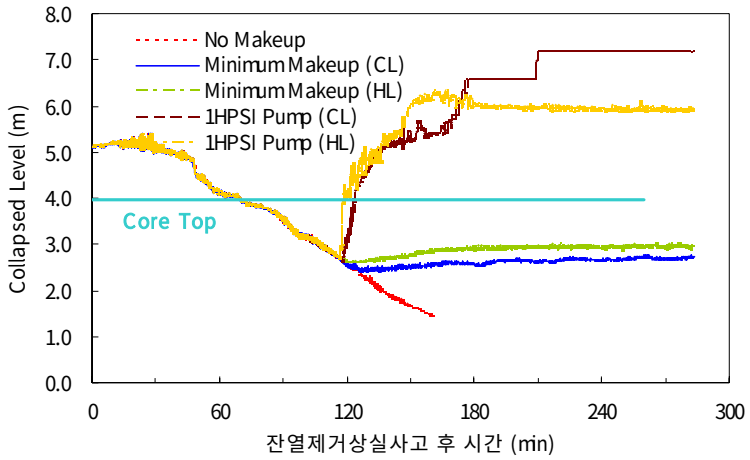

그림 6. 다양한 충수 방식에 따른 노심상부 플레넘의 액적율 변화 (PMO Case)

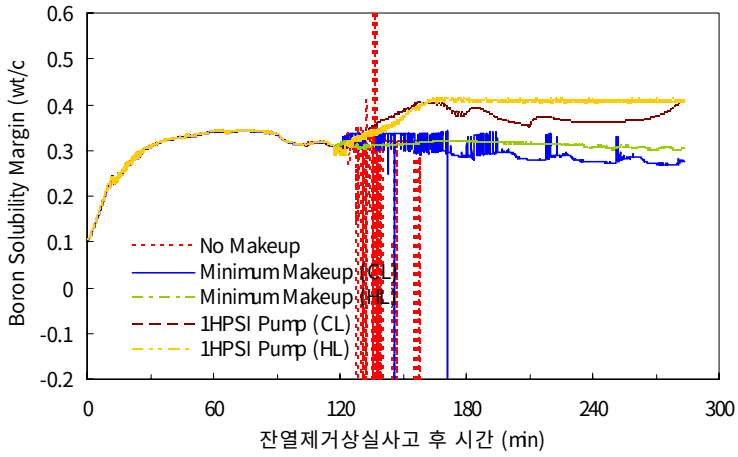

그림 7. 다양한 충수 방식에 따른 원자로용기내의 붕소 용해여유도 변화 (PMO Case)

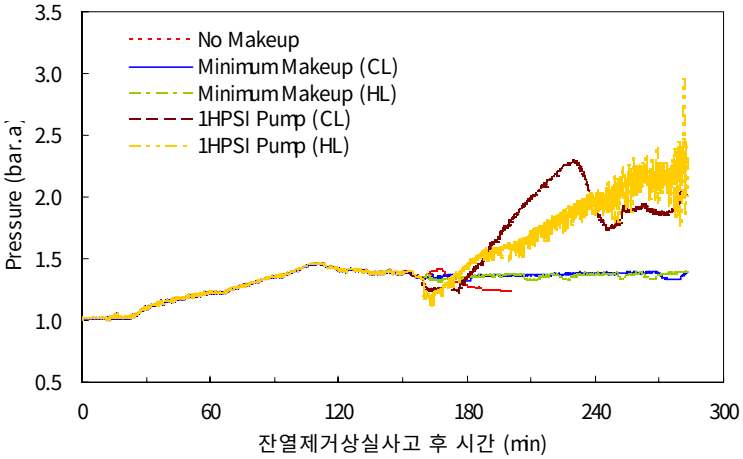

그림 8. 다양한 충수 방식에 따른 노심상부 플레넘의 압력 변화 (CLO Case)

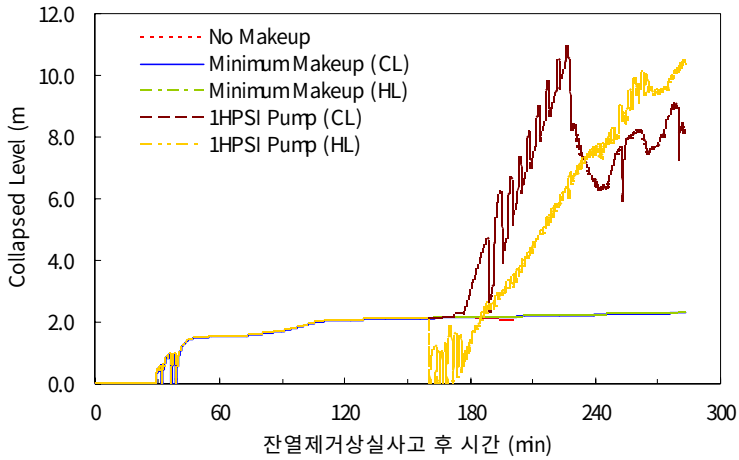

그림 9. 다양한 충수 방식에 따른 가압기의 수축 수위 변화 (CLO Case)

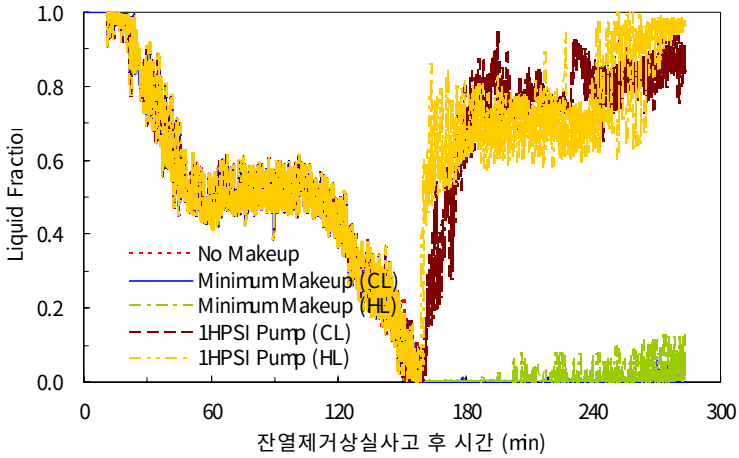

그림 10. 다양한 충수 방식에 따른 노심의 수축수위 변화 (CLO Case)

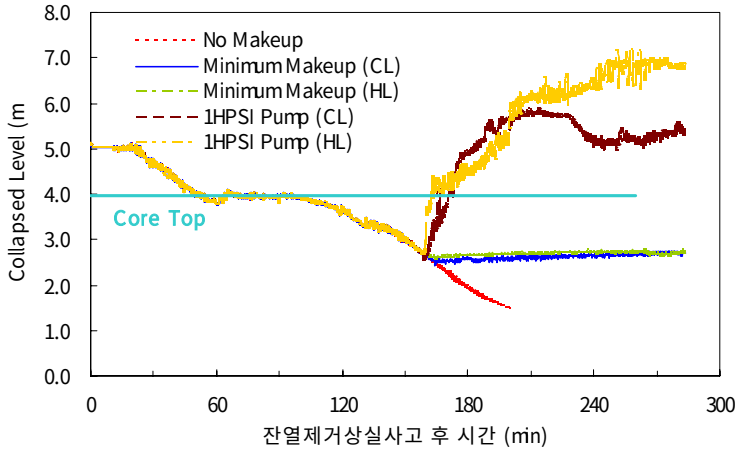

그림 11. 다양한 충수 방식에 따른 노심상부 플레넘의 액적율 변화 (CLO Case)