2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고압 중대사고 시 안전주입탱크 냉각수를 이용한 사고완화 효과

Mitigation Effects using Inventory of Safety Injection Tanks for High Pressure Severe Accident Sequence

박수용

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

완전 급수 상실사고가 일어나고 이 때 고압 안전주입계통이 작동하지 않는다면 사고는 노심이 손상되는 중대사고로 진행된다. 그런데 이 경우에도 안전방출밸브를 작동시키고 안전주입 탱크의 냉각수를 노심냉각에 이용하게 되면 원자로 용기 파손을 지연시키는 효과를 볼 수 있다. 몇 개의 방출밸브를 어느시점에 개방함으로써 중대사고 완화효과를 극대화 시킬 수 있느냐가 관심의 대상이 된다. 본 논문에서는 개방밸브의 개수에 따른 민감도분석을 수행하여 가장 효과적으로 판단되는 운전방법을 선정하고, 이 경우와 밸브개방을 하지 않았을 경우를 비교분석 하였다. 차세대 원전에 적용하여 MAAP코드를 이용하여 분석한 결과는 약 7시간정도 원자로용기 파손이 지연되는 효과를 보여 주었다.

Abstract

If high pressure safety injection pumps are not working for a total loss of feed water sequence, then this results in a severe accident inevitably. Nevertheless, a rapid depressurization using the POSRV could still mitigate the severe accident by providing a cooling water into a damaged core from safety injection tanks(SIT) which are passive systems. The purpose of this paper is to estimate how long the reactor vessel failure can be delayed by using the passive safety injection tanks for typical high pressure sequences at the KNGR. Based on MAAP calculation, the results show that the reactor vessel failure can be delayed about 7 hours if the inventory of four SITs is effectively used to remove the decay heat through the primary feed and bleed operation.

I. 개요

완전 급수 상실사고 또는 발전소 정전사고와 같이 원자로 냉각재 계통이 고압으로 유지되고 증기발생기를 이용한 이차측 열제거가 불가능한 사고가 발생할 경우, 원자로 냉각재 계통에 냉각수를 주입하기 위해서는 일차계통을 감압시킬 수 있는 수단이 필요하며 이러한 기능을 보유하고 있는 발전소 들이 많이 있다. 국내 표준형 원전들의 안전감압 계통(Safety Depressurization System) 이나 차세대 원자로의 안전방출밸브 (Pilot Operated and Safety Relief Valve) 들도 이러한 기능을 가지고

있으며 통상 고압 안전주입 펌프와 함께 작동하여 노심노출을 방지할 수 있는 설계기준을 만족하고 있다. 중대사고 측면에서 이들 감압계통들의 일차적인 역할은 고압 안전주입 펌프에 의한 냉각수 공급이기 때문에 이 펌프들이 작동되지 않으면 감압계통도 작동을 시키지 않도록 되어 있다. 이는 냉각수가 공급되지 않는 상태에서는 냉각수의 손실만 가중시킬 수 있기 때문이다. 그런데 안전주입 펌프들이 작동되지 않고 사고가 노심손상 또는 원자로 파손으로 진행될 경우에도 계통의 압력을 감소시켜 안전주입 탱크의 냉각수를 노심 열제거에 활용함으로써 사고완화를 도모할 수 있을 것으로 보인다. 여기에는 두가지 측면이 있다. 즉 계통의 압력이 효과적으로 감소되어 노심 열제거에 도움을 줄 수 있는 반면 감압시키는 과정에서 냉각수 손실이 빨라져서 노심노출이나 노심손상이 빨리 진행될 수 있다. 이러한 현상들은 감압을 위해 개방하는 밸브의 개수와 밸브개방 시간에 따라 영향을 받게 되며 각 발전소에 따라 결과가 달라진다.

본 논문에서는 중대사고 시 안전주입 탱크의 냉각수를 노심 열제거에 활용하기 위해서는 몇 개의 밸브를 개방하는 것이 가장 효과적인지 분석하고자 하였다. 즉 개방하는 밸브갯수에 따라 사고진행에 미치는 영향을 검토하고 효과적인 운전방법을 선택하여 열수력 해석을 수행하였으며 안전주입 탱크의 냉각수를 활용하지 않았을 때와 그 결과를 비교하였다. 대상발전소는 차세대 원전을 채택하였고 분석코드는 MAAP을 사용하였다.

II. 분석 내용

분석 시 이용된 사고 시나리오는 완전 급수상실 사고를 가정하고 고압 안전주입 계통이 작동되지 않는 경우이다. 즉, 증기발생기에 주급수와 보조급수가 공급되지 않아 이차측을 이용한 열제거가 이루어지지 않고 안전 방출밸브와 고압 안전주입 펌프를 이용한 일차측 충배수운전이 불가능하여 노심이 손상되고 결국 원자로 파손이 발생하는 시나리오이다.

개방하는 밸브 개수에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 차세대 원전에는 17.24 MPa의 개방 설정치와 16.36 MPa의 폐쇄 설정치를 갖는 안전방출밸브(POSRV) 4개가 설계되어 있으며 이들은 운전원에 의해 수동작동도 가능하다. 안전주입탱크(SIT)도 4개이고 각 탱크는 52,500 kg 의 냉각수 용량을 갖는다. 민감도 분석에서 Base Case는 안전주입 펌프가 작동하지 않고 방출밸브도 열지 않은 경우이며, Case 1부터 Case 4 는 펌프 주입에 의한 냉각수 보충이 없더라도 안전주입 탱크 냉각수를 이용하기 위해 방출밸브를 1개부터 4개까지 개방한 경우이다. 여기에서 밸브 개방시점은 계통의 압력이 상승하여 방출밸브가 개방설정치 (1.72 MPa)에 도달하여 자동으로 열릴 때이며 일단 열리고 나면 이 후에는 계통압력에 상관없이 개방된 상태이다. 위 모든 경우에 대하여 노심노출, 노심 지지대 파손 및 원자로 용기 파손시간과 용기파손 시 계통의 압력을 계산하였다. 용기파손 시 계통의 압력은 고압용융물 방출에 의한 격납건물 직접가열 현상 여부를 판단하는 척도가 된다. 개방 밸브 개수에 따른 민감도 분석 결과는 밸브갯수를 3개까지 증가함에 따라 원자로 용기 파손시간은 지연되지만 노심이 노출되는 시간은 단축된다. 실제로 원자로 운전시 원자로 파손이 불확실한 상황에서 노심노출을 단축시켜가면서 까지 많은 밸브를 열 수 있을지는 의문시 된다. 따라서 Case 5에서는 노심이 노출되는 시점에 3개의 밸브를 개방하는 경우에 대하여 분석을 수행하였다.

III. 계산결과

개방 밸브 개수에 따른 민감도 분석결과

계산결과는 표 1과 그림 1부터 그림 4에 나타내었다. 그림1에서는 개방하는 밸브가 많은 경우일수록 노심노출 시간이 빨라짐을 보여주고 있다. 이는 방출밸브를 통한 유출량은 많아지지만 노심이 노출될 때까지 계통의 압력이 안전주입 탱크의 냉각수 주입 설정치에 도달하지 않아 보충되는 냉각수가 없기 때문이다. 따라서 이 현상은 충배수 운전을 수행함으로써 나타날 수 있는 부정적인 효과이다. 또한 안전주입 탱크로부터 냉각수가 주입되기 시작하는 시간은 많은 밸브를 개방할수록 빨라지고 주입은 모두 노심노출 이 후에 시작됨을 알 수 있다. 그림 2는 노심손상 시작시간과 노심지지대 파손시간을 나타낸다. Case 3 이 탱크로부터의 냉각수 유입량과 밸브에서의 증기방출량이 노심 열제거에 가장 효과적으로 이용되어 중대사고 진행이 최대한 지연되고 있다. Case 4에서는 필요 이상의 증기를 방출함으로써 단시간에 안전주입 탱크의 냉각수가 고갈되고 따라서 Case 3보다 노심손상과 노심지지대 파손이 빨라진다. 원자로용기 파손시간은 Case 3의 경우 약 35,000초 까지 지연되며 Case 2와 Case 4에서는 약 20,000초 까지 지연된다(그림 3참조). 그림 4는 각 경우에 대하여 원자로용기 파손시 원자로 내부압력을 나타낸다. 이 내부압력이 높으면 용기파손시 용융물이 고압으로 분출되면서 작은 입자를 이루고 격납건물 대기와 급격한 반응을 일으켜 대기압력이 상승하게 된다. 이러한 고압 용융물 분출 현상을 무시할 수 있는 압력은 통상 1.38 - 1.72 MPa 정도로 알려져 있으며 Case 2, Case3 및 Case 4는 이를 만족하고 있다.

Base Case 및 case 5의 비교

개방 밸브 개수에 따른 민감도 분석결과는 원자로 용기 손상측면에서는 Case 3의 경우에 가장 유리한 운전방법이 된다. 반면에 밸브를 많이 열수록 노심노출 시간이 단축되기 때문에 실제로는 급수계통 및 안전주입 계통 재가동 등 운전원이 여러가지 복구조치를 취하고 있는 상황에서는 아직은 불확실한 원자로 용기 파손을 염려하여 노심노출을 조기에 유발할 수 있는 운전방법을 채택하기는 쉽지 않은 것으로 판단된다. 따라서 Case 5에서는 밸브개방 시간을 노심이 노출되는 시점까지 늦추고 이 때 3개의 밸브를 개방하는 경우에 대하여 분석을 수행하였다.

그림5 부터 그림10 에서는 Base case와 Case 5에 대한 계산결과를 비교하여 보여주고 있다. 사고가 시작되고 원자로가 정지되면 증기발생기의 냉각수가 고갈될 때까지는 노심의 잔열이 충분히 제거되지만 그 이후에는 일차계통의 온도와 압력이 증가하여 약 1,500초에 처음으로 가압기의 안전방출 밸브가 열리게 된다. 이 때부터 가압기의 압력은 안전 방출밸브의 개방설정치와 폐쇄설정치를 오르내리며 밸브는 주기적으로 열리면서 증기를 방출하게 된다(그림5 , 그림6 참조). 두 경우 모두 약 2,930초에 노심이 노출되고 Case 5 에서는 이 시점에 3개의 방출밸브를 열게 된다. 밸브를 열게 되면 Case 5의 원자로 수위가 먼저 감소하지만 (그림7 참조) 약 3,600초부터 안전주입 탱크로부터 냉각수가 유입되어(그림8 참조) 노심의 중간 부위까지 차 오르게 된다. Base Case 에서는 약 7,800초부터 노심용융물이 용기하부로 재배치 되고 (그림9, 그림10 참조) 약 8,000초에 원자로용기가 손상된다(그림5 참조). 한편 Case 5 는 약 21,800초에 안전주입 탱크의 유량이 고갈될 때까지 꾸준히 냉각수가 유입되며 (그림8 참조) 약 26,400초부터 하부용기로 용융물 재배치가 이루어지고 약 33,200초에 원자로용기 파손이 일어난다. 중대사고 현상코드가 갖는 불확실성이 크기 때문에 위의 시간값들에 충분한 의미를 부여하기는 어렵지만 MAAP 계산결과는 안전주입 탱크의 유량을 충분히 노심냉각에 이용할 경우와 그렇지 않을 경우에 대하여 원자로 용기 손상시간에 있어서 약 25,000초 정도의 차이를 보여주고 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 증기발생기에 의한 노심 열제거 및 안전주입 펌프를 이용한 충배수 운전이 불가능한 중대사고에서 안전주입탱크의 냉각수를 활용할 경우에 나타나는 완화효과를 평가하고자 하였으며 MAAP 계산결과에 근거하여 다음과 같이 요약할 수 있다. 그러나 아직까지도 노심용융, 용융물 재배치 및 원자로 용기 파손 등의 현상에 많은 불확실성이 존재하기 때문에 숫자 자체가 갖는 신뢰도는 크다고 볼 수 없으며 다만 이러한 경향을 가지고 있기 때문에 추후 사고관리 전략 개발 시 고려할 필요가 있는 요소로 판단된다.

- 안전 방출밸브를 수동으로 개방하여 안전주입 탱크의 유량을 노심냉각에 이용함으로써 원자로 손상을 지연시킬 수 있음
- 전형적인 완전 급수상실 사고의 경우에는 3개의 밸브를 노심노출 이전에 개방하는 것이 유리함
- 3개의 밸브를 개방할 경우에 약 7시간정도의 손상지연을 가져옴
- 2개 이상의 밸브를 개방할 경우, 원자로 손상 시 고압 용융물 방출에 의해 급격한 격납건물 압력상승으로 인한 격납건물 건전성 위협을 막을 수 있음

표 1. 분석경우 및 계산결과

Analysis Cases			Calculation Results			
Case	No. of manually opened POSRV	Opening time of POSRV (sec)	Core uncovery time (sec)	SIT injection start time (sec)	Reactor vessel failure time (sec)	In-vessel pressure at vessel failure (MPa)
Base case	0	N/A	2932	N/A	7959	16.70
Case 1	1	1470	2805	4782	10940	2.36
Case 2	2	1470	2420	3350	22218	1.23
Case 3	3	1470	2213	2758	34921	0.13
Case 4	4	1470	2097	2445	20304	0.13
Case 5	3	2932	2932	3591	33250	0.13

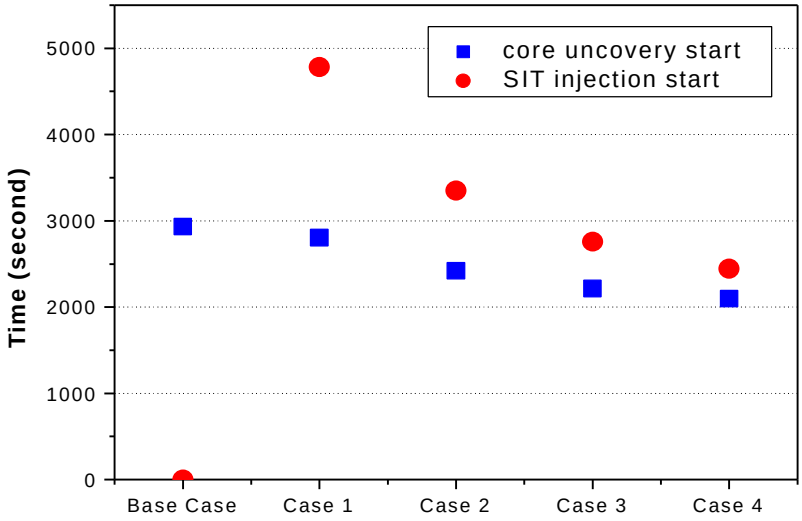

그림 1. 노심노출 / SIT 주입 시작시간 비교

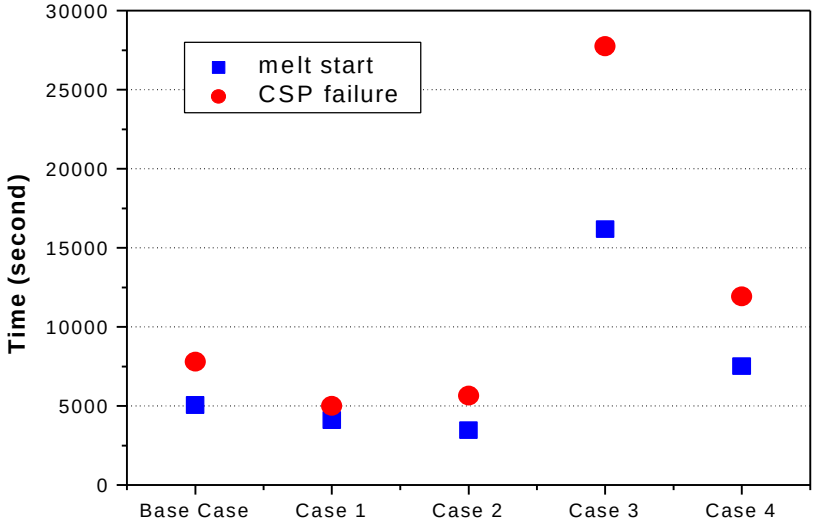

그림 2. 노심용융시작 / 노심지지대 손상 시간 비교

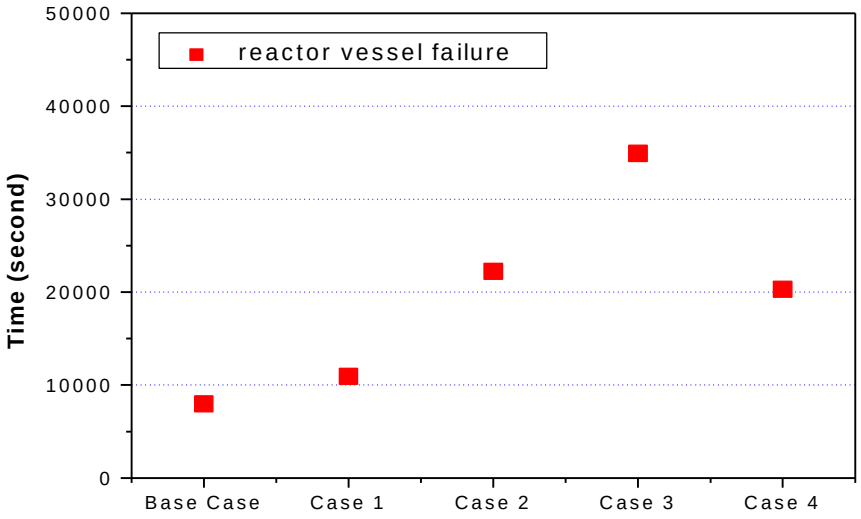

그림 3. 원자로용기 파손시간 비교

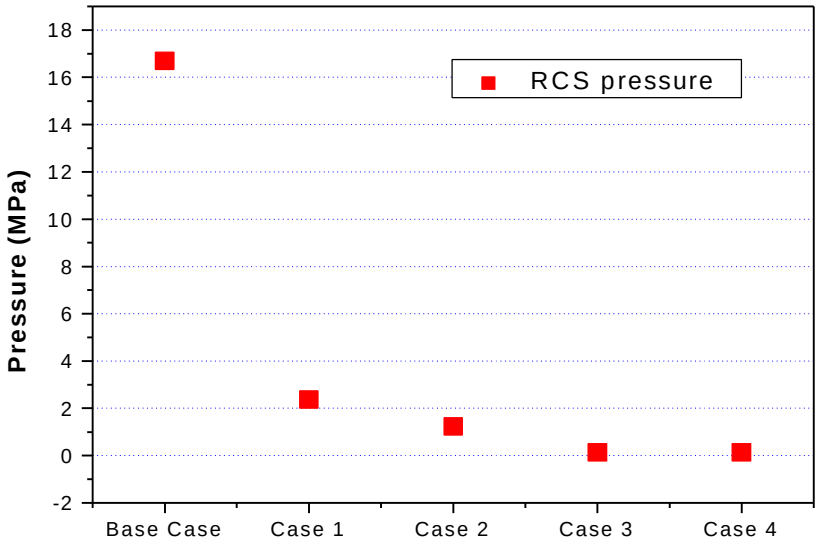

그림 4. 원자로용기 파손시 용기 내부압력 비교

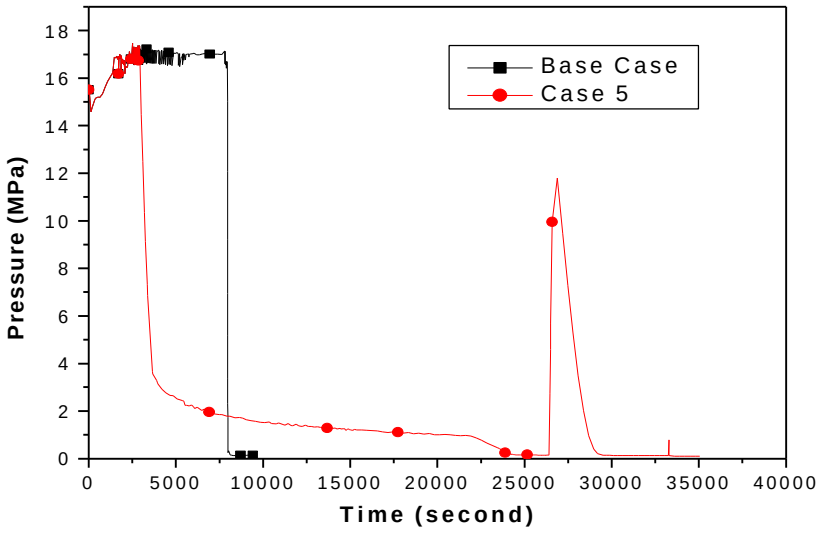

그림 5. 원자로 냉각재계통 압력 비교

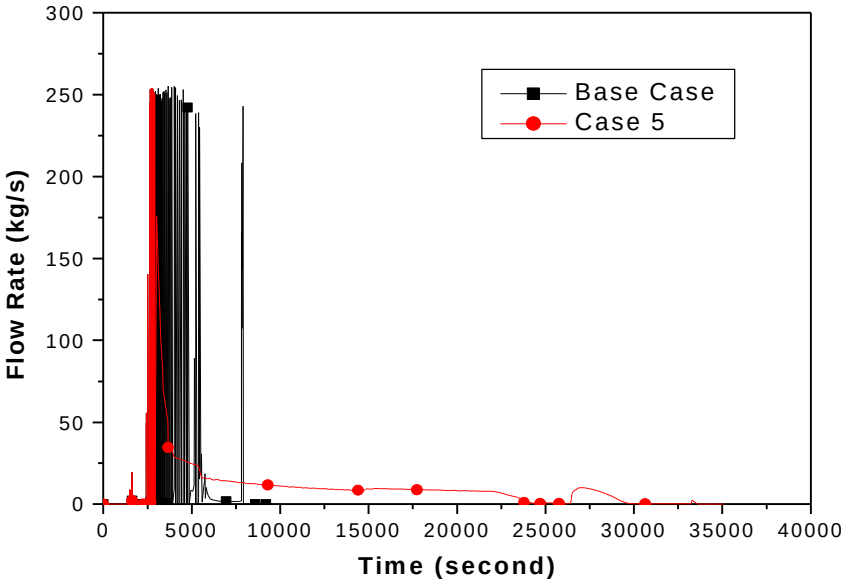

그림 6. 안전방출밸브를 통한 기체유량 비교

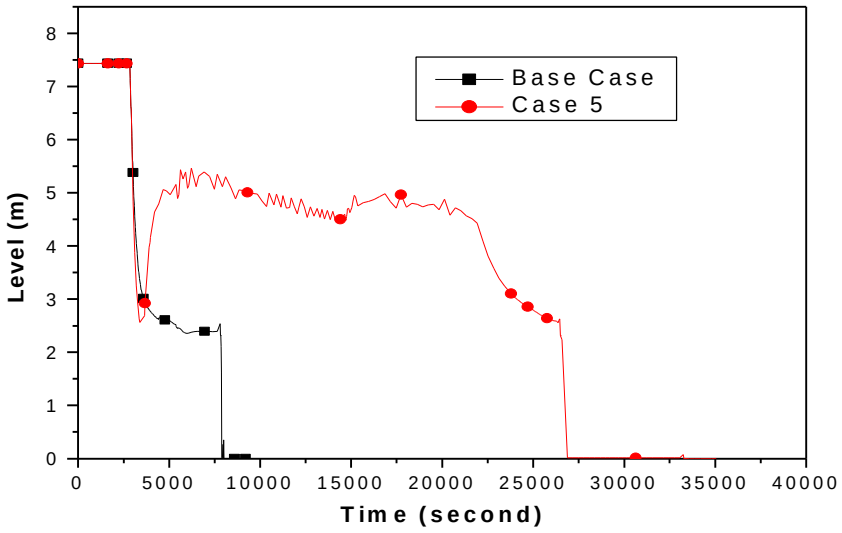

그림 7. 원자로용기 수위 비교

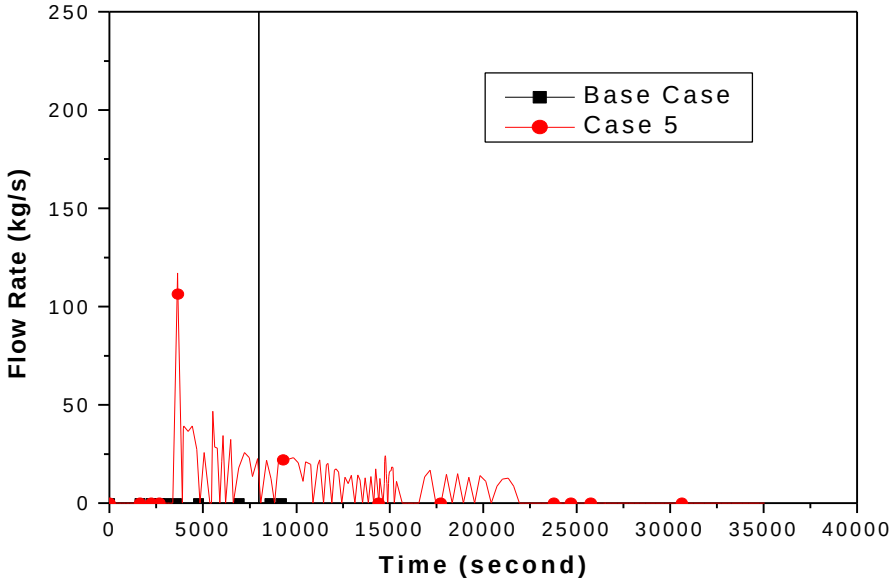

그림 8. 안전주입 탱크로부터의 주입유량 비교

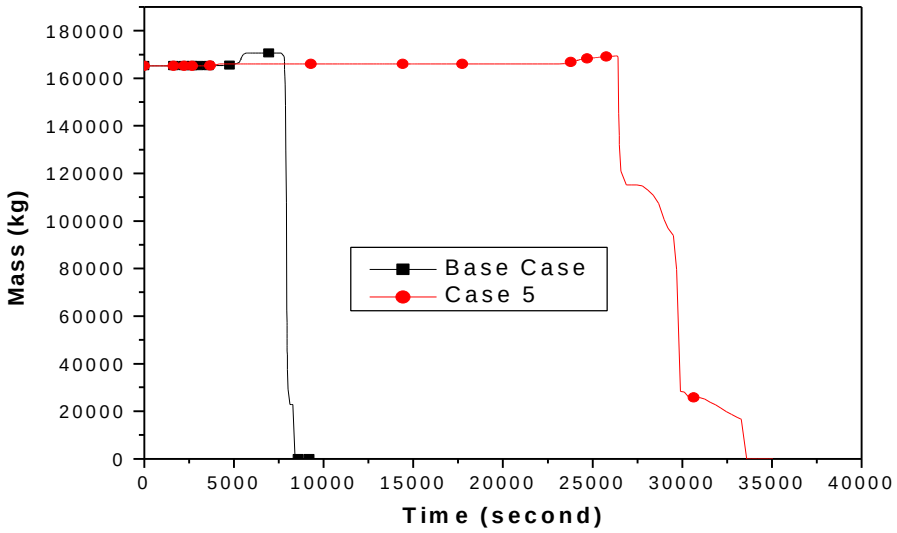

그림 9. 노심질량 비교

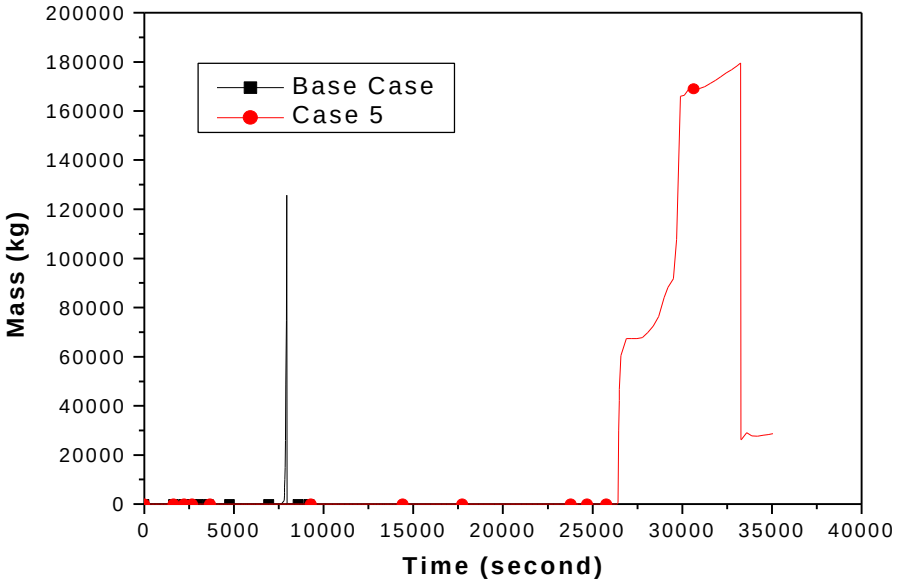

그림 10. 원자로 하부용기에 재배치된 용융물 질량 비교