

## 중대사고시 안전주입 탱크가 노심손상 후기과정에 미치는 영향

### Effect of the Safety Injection Tank on Late Phase Melt Progression in Severe Accidents

박래준, 강경호, 김상백, 김희동

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

본 연구에서는 중대사고 발생시 안전주입 탱크의 냉각재 주입이 노심손상 후기과정에 미치는 영향을 상세히 분석하였다. 즉, 고압안전 주입이 되지 않는 2 inch 파단과 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우와 작동하지 않는 경우에 대하여 사고초기부터 원자로용기가 파손될 때까지를 SCDAP/RELAP5/MOD3.3 전산코드를 이용하여 최적계산하였다. 그 결과, 안전주입 탱크가 작동하는 경우는 약 6시간 후에 노심 하부에 형성되었던 대규모 용융풀이 원자로용기 하반구로 재배치되어 원자로용기가 creep으로 파손되었다. 그러나 안전주입탱크가 작동되지 않으면 2 inch 파단사고는 약 2시간, 3 inch 파단사고는 약 1시간에 각각 원자로용기가 creep으로 파손되어 고압안전 주입이 되지 않는 소형파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 원자로용기 파손시간을 약 4-5시간 크게 연장시키는 것으로 나타났다.

#### Abstract

Effect of coolant injection by SIT (Safety Injection Tank) operation on late phase melt progression under core melt accidents has been estimated in the present study. Best estimate calculation from initiating events of 2 inch and 3 inch break SBLOCA (Small Break Loss of Coolant Accident) without a high pressure safety injection to reactor vessel failure has been carried out using the SCDAP/RELAP5/MOD 3.3 computer code in conditions with and without SIT operation. The calculation results have shown that the large size of corium pool in the bottom of core region at 6 hours was relocated to the lower plenum in condition with SIT operation, which results in the reactor vessel failure by creep. The SIT operation leads to postpone the reactor vessel failure time of 4 or 5 hours, namely, the reactor vessel in the 2 inch and 3 inch break LOCA accidents without SIT operation was failed at 1 hour and 2 hours, respectively.

#### 1. 개요

원전에서 중대사고 발생시 노심손상 과정은 사고초기부터 핵연료 용융까지의 전기과정과 노심용융 이후부터 원자로용기 파손까지의 후기과정으로 구분할 수 있다. 노심손상 전기과정에서는 노심노출 후의 핵연료 피복재의 부풀음(ballooning) 및 파손, 핵연료 피복재 산화 및 수소 생성, 노심 상부의 증기 부족현상(steam starvation), 노심 물질 들간의 eutectic 형성, 제어봉 용융, 핵연료봉 용융 등의

물리적 현상들이 진행된다. 노심손상 후기과정(late phase melt progression)은 노심용융 후의 용융물의 노심하부로의 재배치, 재배치 용융물의 물과 반응, 용융 pool의 형성 및 성장, 용융물 피막층 및 노심과편층 형성, 노심용융물의 원자로용기 하반구로의 재배치, 노심용융물과 원자로용기 하반구와의 기계적.재료적.화학적 반응, 원자로용기 파손 기구 등의 물리적 현상이 있다. 노심손상 전기과정은 지금까지 PBF[1], FLHT[2], Phebus[3], CORA[4], OECD-LOFT[5] 등의 수행으로 물리적 현상들이 규명되었고 전산코드들도 물리적 현상들을 잘 모의하고 있다. 그러나 노심손상 후기과정은 물리적 현상들과 사고 전개과정이 복잡하기 때문에 아직도 많은 불확실성을 가지고 있으며, 한국원자력연구소의 SONATA 프로그램[6]과 OECD/NEA 주관의 MASCA 프로그램[7] 등 많은 연구들[8]이 현재 수행되고 있다.

노심손상 후기과정에 대한 불확실성을 규명하기 위해서는 각 현상에 대한 개별 효과 실험을 수행하여 규명할 수 있다. 이와 같은 각 개별현상들에 대한 실험수행 만으로는 중대사고가 전개되는 종합적인 내용을 판단할 수 없기 때문에 전산코드를 이용하여 노심손상 후기과정을 종합적으로 분석하는 것이 필요하다. 가압경수형 원전에서는 대형과단 냉각재 상실사고를 대비하여 안전주입 탱크(SIT: Safety Injection Tank)를 설치하고 있다. 고압안전 주입이 되지 않는 소형과단 냉각재 상실사고에서는 노심손상 이후에 안전주입 탱크가 작동하기 때문에 이의 작동이 노심손상 후기과정에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 사고초기부터 원자로용기가 파손될 때까지 주요 과정을 최적계산(best estimate)하는 SCDAP/RELAP5/MOD3.3 전산코드[9]를 사용하여 고압안전 주입이 되지 않는 등가직경 2 inch 과단과 3inch 과단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 노심손상 후기과정에 미치는 영향을 평가하기 위하여 탱크가 작동하는 경우와 작동하지 않는 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

## 2. 해석내용 및 입력모델

본 연구에서는 안전주입 탱크가 노심손상 후기과정에 미치는 영향을 모의하기 위하여 최적평가용 종합 전산코드인 SCDAP/RELAP5.MOD3.3을 이용하여 대표 가압경수형 원전의 고압 안전주입이 되지 않는 소형과단 냉각재 상실사고를 분석하였다. 즉, 초기 사고로서 저온관에 등가직경 2 inch와 3 inch의 소형과단이 발생하였으나 고압안전 주입이 되지 않아 노심용융의 중대사고로 전개되는 과정을 모의하였다. 안전주입 탱크는 일반적으로 피동적으로 작동되기 때문에 작동할 수 있으나 본 해석에서는 고압안전 주입이 되지 않는 소형과단 냉각재 상실사고에서 안전주입 탱크가 중대사고 전개에 미치는 영향을 평가하기 위하여 탱크의 냉각재가 주입되는 경우와 주입되지 않는 모든 경우를 계산하였다.

본 연구에 사용한 전산코드는 미국의 INEEL이 USNRC의 후원으로 개발하여 2001년에 국제 공동연구 회원국에게 배포한 SCDAP/RELAP5/MOD3.3 전산코드이다. SCDAP/RELAP5는 계통의 열수력을 상세하게 모의하는 RELAP5/MOD3 전산코드[10], 노심손상 과정을 상세하게 모의하는 SCDAP/MOD1 전산코드[11], 원자로용기 하반구에서의 열전달 과정에 대하여 유한요소법(Finite

Element Method)을 이용하여 모의하는 COUPLE 모델[12] 등을 결합하여 만든 종합 최적평가용 전산코드로서 원전의 사고 초기부터 원자로용기가 파손될 때 까지를 계산할 수 있다. SCDAP/RELAP5 전산코드는 1988년도에 최초 version인 MOD0가 개발된 이후 계속 주요 물리 현상들을 모의할 수 있는 모듈들을 추가하였다. 2001년에 배포된 SCDAP/RELAP5/MOD3는 노심용융물이 재배치될 때 물과 반응하는 FCI(Fuel Coolant Interaction) 모델 첨가, 원자로용기 외벽냉각시 열전달 모델, 원자로용기 하반구의 노심용융 pool 내에서 층분리 현상 및 자연대류 열전달 모델 등이 개선되었다.

SCDAP/RELAP5/MOD3.3 전산코드를 이용하여 안전주입 탱크가 노심용융 후기과정에 미치는 영향을 미치기 위하여 입력모델을 설정하였다. 본 입력모델에서는 대표 가압경수형 원전의 원자로용기, 원자로 냉각재 계통, 증기발생기, 가압기, 원자로 냉각재 펌프, 주 증기 배관 등을 모의하였다. 노심손상 과정과 관련하여 중요한 노심 입력에서는 노심을 3개의 channel 로 분리하였고 각 channel은 cross flow junction을 사용하여 서로 유로가 있게 하였다. 노심 물질들은 3개의 핵연료 component와 3개의 제어봉 component등 6개로 분리하였고 축방향으로는 10개의 node를 설정하였다. 노심 각 component는 핵연료봉인 경우에는 6개, 제어봉인 경우에는 2개의 node를 각각 설정하였다. 노심용융물이 원자로용기 하반구로 재배치되었을 때 열전달을 모의하기 위하여 COUPLE 입력도 설정하였다. 소형파단 냉각재 상실사고 시작과 동시에 원자로, 원자로 냉각재 펌프, 주급수 펌프 등은 정지되는 것으로 가정하였으며, 증기발생기 2차측 압력은 증기발생기 안전밸브의 작동으로서 조절된다고 모의하였다. 안전주입 탱크가 작동되는 경우에는 원자로냉각재 계통이 안전주입 탱크 작동압력까지 감압되면 작동되고 노심에서의 증기 생성으로 압력이 상승하면 작동되지 않아 작동과 미작동이 반복되도록 모의하였다.

### 3. 해석결과 및 고찰

표 1은 대표 가압경수형 원전의 고압안전 주입이 되지 않는 등가직경 2 inch와 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우와 작동하지 않는 경우에 대한 주요 중대사고 경위 발생시간과 노심용융물 양에 대한 SCDAP/RELAP5/MOD3.3 계산결과를 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 파손 등가직경이 2 inch인 경우에는 노심물질이 용융되는 시간은 4,385초로서 다소 빨리 나타났으나 곧 안전주입탱크가 작동하여 노심이 quenching되었기 때문에 원자로용기는 21,470 초에 creep이 발생되어 파손되었다. 파손 등가직경이 3 inch인 경우에는 안전주입 탱크가 빨리 작동하였기 때문에 노심용융 시간은 7,639초로 2 inch 파단인 경우보다 늦게 나타났으나 안전주입 탱크 냉각수가 빨리 고갈되었기 때문에 원자로용기 파손은 2 inch와 비슷한 21,835초에 발생하였다. 2 inch와 3 inch 파단의 두 경우 모두 안전주입 탱크가 작동하지 않은 경우에는 원자로용기기가 6,135초와 3,675초에 각각 파손되었다. 즉, 파손 등가직경 2 inch와 3 inch의 소형파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크의 작동은 노심용융을 방지할 수 없지만 원자로용기 파손을 15,335 초(약 4.3시간)와 18,160 초(약

5.0시간) 각각 지연시켰다. 원자로용기는 노심 하부에서 노심용융 pool을 형성하였던 대규모 노심용융물이 원자로용기 하반구로 재배치된 수분 후에 creep 발생으로 파손되었다.

그림 1은 등가직경 2 inch와 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우의 가압기 압력변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 안전주입 탱크가 작동하면 노심에서의 증기생성으로 가압기 압력이 상승하여 탱크 작동이 중단되고 파단부를 통한 냉각재 상실로 압력이 감소되면 다시 작동하여 작동과 미작동을 반복하는 모습을 보이고 있다. 등가직경 2 inch 파단인 경우는 3 inch 파단인 경우보다 노심온도가 많이 진전된 상태에서 안전주입 탱크가 처음 작동하였고 파단부를 통한 냉각재 상실량이 적기 때문에 압력변화가 크게 나타났다. 많은 양의 노심용융물이 원자로용기 하반구로 재배치되었을 때는 원자로용기 하반구에 있던 냉각재 비등으로 발생하는 증기때문에 가압기 압력이 상승하였다. 그림 2는 등가직경 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 가압기 압력변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 안전주입 탱크가 작동되지 않으면 압력이 곧 감소하였으나 원자로용기 하반구에 있던 냉각재 비등으로 발생하는 증기 때문에 일시적으로 압력이 상승하였다.

그림 3은 등가직경 2 inch와 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우의 핵연료 피복재 최고 온도변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 등가직경 3 inch 파단인 경우에는 노심의 온도가 많이 상승하기 전에 안전주입 탱크의 작동으로 노심이 quenching된 것을 알 수 있고 등가직경 2 inch 파단인 경우에는 상부에서 용융이 발생한 이후에 안전주입 탱크가 작동되었기 때문에 노심용융 pool이 형성된 상태에서 더 이상 사고가 더 진행되지 않고 장시간 지속되는 것을 알 수 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 안전주입 탱크가 작동되지 않는 경우에는 사고시작 후 곧 노심의 온도가 상승한 것을 알 수 있다. 그림 5는 등가직경 2 inch와 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우의 핵분열 생성물 방출량을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 2 inch 파단의 경우가 3 inch 파단 경우보다 노심이 빨리 용융되었기 때문에 핵분열 생성물이 빨리 방출되었으나 전체 방출량은 핵연료 내에 있던 핵분열 생성물이 외부로 많이 방출되기 전에 노심용융 pool이 형성되었기 때문에 적게 나타났다.

그림 6은 등가직경 2 inch와 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우의 핵연료 피복재 산화로 발생하는 수소 생성량 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 2 inch 파단 경우가 3 inch 파단 경우보다 노심의 온도가 빨리 상승하였기 때문에 수소가 빨리 생성되었으며, 파단부를 통한 냉각재 상실량이 적기 때문에 전체 수소생성량도 572 kg으로 544kg의 3 inch 파단보다 많이 나타났다. 표 1에서 보는 바와 같이 안전주입 탱크가 작동하지 않는 경우는 작동하는 경우보다 냉각재 양이 적기 때문에 수소생성량도 적게 나타났다. 그림 7은 등가직경 2 inch와 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우의 원자로용기내 냉각수 수위변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 안전주입 탱크가 작동하면 수위가 상승하고 작동하지 않으면 감소되는 것을 안전주입 탱크가 작동할 때까지 계속 반복하는 것을 알 수 있다. 파단부를 통한 냉각재 상실량 차이 때문에 2 inch 파단 경우가 3 inch 파단 경우보다 수위변화가 크게 나타났다. 안전주입 탱크가 작동하지 않는 경우에는 그림 8에서 보는 바와 같이 수위가 사고시작 후 곧 감소하게 된다. 그림 9는 등가직경 2

inch와 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크 작동으로 원자로냉각재 계통 내에 주입된 냉각재 총량을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 3 inch 파단 경우가 2 inch 파단인 경우보다 안전주입 탱크가 빨리 작동하였고 자주 작동과 미작동을 반복하는 것을 알 수 있다. 그러나 냉각재 주입총량은 거의 같다.

그림 10은 등가직경 2 inch와 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우의 원자로용기 하반구에 재배치된 노심용융물의 높이변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 3 inch 파단 경우가 2 inch 파단 경우보다 노심용융물이 원자로용기 하반구로 재배치될 때 냉각재가 더 적었기 때문에 원자로용기 하반구로 처음 용융물이 재배치되어 대규모 재배치될 때까지 시간이 더 길게 나타났다. 원자로용기 하반구에 초기에 재배치된 노심용융물은 거의 제어봉 물질이었고 대부분의 핵연료 용융물은 노심 하부에서 용융 pool을 형성하였던 많은 노심용융물이 원자로용기 하반구로 재배치될 때 재배치되었다. 그림 11은 등가직경 2 inch와 3 inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우의 원자로용기 하반구에 재배치된 노심용융물의 최대 온도 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 그림 10의 노심용융물이 원자로용기 하반구로 재배치되는 시점부터 온도가 상승하여 원자로용기 하반구로 많은 노심용융물이 재배치되는 시점에 용융물의 온도가 급격하게 상승하였다. 이와 같은 노심용융물 내의 온도변화는 그림 12에서 보는 바와 같이 원자로용기에도 그대로 전달되어 원자로용기를 creep으로 파손되게 하였다.

#### 4. 결론

안전주입 탱크가 노심손상 후기과정에 미치는 영향을 평가하기 위하여 고압안전 주입이 되지 않는 등가직경 2 inch 파단과 3inch 파단 냉각재 상실사고시 안전주입 탱크가 작동하는 경우와 작동하지 않는 경우에 대하여 SCDAP/RELAP5/MOD3.3 전산코드를 사용하여 원자로용기가 파손될 때까지 최적계산을 수행하였다. 계산결과, 노심용융은 2 inch 파단 사고가 3 inch 파단 사고보다 빨리 되었으나 안전주입 탱크 작동 영향으로 두 사고 모두 약 6시간 후 원자로용기가 파손되었다. 즉, 두 사고 모두 노심 하부에 형성된 대규모 용융풀에 있던 노심용융물이 대부분 원자로용기 하반구로 재배치되고 수분 후에 원자로용기는 creep으로 파손되었다. 안전주입탱크가 작동되지 않으면 2 inch 파단사고는 약 53분, 3 inch 파단사고는 약 102분에 각각 원자로용기가 파손되어 안전주입 탱크 작동이 원자로용기 파손시간을 약 4-5시간 크게 지연시키는 것으로 나타났다. 그러나 안전주입 탱크의 작동은 고온의 노심용융물에 냉각재 주입으로 발생하는 증기 때문에 탱크를 작동되지 않는 경우보다 수소를 더 많이 발생시켰다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

## 참고문헌

1. D. A. Petti et al., "PBF Severe Fuel Damage Test 1-4 Test Results Report," NUREG/CR-5163, EGG-2542, December 1986
2. D O. Lanning and N. J. Lombardo, "Data Report for Full Length High Temperature Experiments," PNL-6540, April 1988
3. G. Repetto et al., "The First PHEBUS Fission Product Experiment FPT0 General Aspects of the Experimental Sequence Concerning the Fuel Bundle Degradation and FP Release," ANS Int. Topical Meeting on the Safety of Operating Reactors, Seattle, Sep. 17-20, 1995
4. S. Hargen et al. "Results of SFD Experiment CORA-13 (OECD International Standard Problem 31)," KfK 5054, Kernforschungszentrum Karlsruhe, February 1993
5. D. Osetek, "Overview of the OECD LOFT FL-2 Test," Presented at the SFD/ST Research Program Review Meeting, Idaho Falls, Idaho, April 10-14, 1989
6. S. B. Kim, K. Y., Suh, "Progress in SONATA-IV," OECD/NEA CSNI Special Meeting on In-Vessel Debris Coolability and Lower Head Integrity, Paris, France, 1996
7. OECD/NEA, "Agreement on the OECD MASCA Project," 2000
8. Kim Y. H., Suh K. Y., "Sensitivity Analyses for Maximun Heat Removal from Debris in the Lower Head," J. of the Korean Nuclear Society 32 (4), 395-409, 2000
9. L. J. Siefken et al., "SCDAP/RELAP5/MOD3.3 Code manual," NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, January 2001
10. The RELAP5 Development Team, "RELAP5/MOD3 Code Manual," NUREG/CR-5535, INEL95/0174, August 1995
11. C. M. Allison et al. "SCDAP/MOD1/V0: A Computer Code for the Analysis of LWR Vessel Behavior During Severe Accident Transients," IS-SAAM-83-002, July 1984
12. E. C. Lemmon, "COUPLE/FLUID: A Two Dimensional Finite Element Thermal Conduction and Advection Code," EGG-ISD-SCD-80-1, February 1980