



KR9900124

KAERI/TR-1240/99

KALIMER 예비 격납 성능 분석

Preliminary Performance Analysis of KALIMER Containment

한국원자력연구소

30 - 46

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 1998 년도 “칼리머 안전해석 기술개발” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

1999. 3

과 제 명 : 칼리머 안전해석 기술개발
주 저 자 : 이성욱 (칼리머 설계기술개발팀)
공 저 자 : 권영민 (칼리머 설계기술개발팀)
김경두 (칼리머 설계기술개발팀)
석수동 (칼리머 설계기술개발팀)
장원표 (칼리머 설계기술개발팀)
한도희 (칼리머 설계기술개발팀)

요 약 문

KALIMER 는 KAERI 에서 개발 중인 풀형 신형 액체 금속로이다. 이 설계에는 안전성 향상을 위해, 여러 가지 신형 안전 개념들이 도입되어 있다. 하지만, 궁극적인 안전성 향상을 위해, 격납 돔의 설계가 도입되었고, 이의 성능 분석이 수행되었다. 격납 돔의 설계에 앞서, 기존 액체 금속로에 적용되어 있는 격납 용기 설계들이 검토되었으며, 이들의 성능 분석 방법도 살펴보았다. 그리고, 격납 성능 분석을 위한 분석 체계를 정립하여, 그 사용 가능성을 시험계산을 통해 검증하였다. 성능 분석을 위한 코드에는, 격납 용기의 열수력학적 거동 및 에어로졸의 거동을 분석하는 CONTAIN-LMR 과 격납용기 외부에서의 방사성 영향 평가를 위한 MACCS 코드가 사용되었다.

예비적으로 KALIMER 의 격납 돔 설계를 단일 격납 용기로 하고, 성능 분석에 필요한 분석 대상사고를 소듐 풀 화재와 소듐 스프레이 화재로 선정하였다. 선정된 사고에 대해 각각 방사선원 항을 정의하고, 격납 성능 분석을 하였다.

이때, 격납 돔의 부피를 민감도 변수로 하는 민감도 분석을 같이 수행하였다. 분석 결과, 100kg 의 소듐의 누설에 대한 스프레이 화재를 제외하고는, 격납 돔의 압력이 모두 설계 압력 이하로 유지되는 것으로 나타났다. 그리고, 격납 돔의 압력은 부피 변화에 대해서는 민감하지 않은 것으로 나타났다.

격납 돔 외부에서의 피폭 선량 분석이 각 사고에 대해, 격납 돔 부피를 민감도로 해서 이루어 졌다. 분석 결과, 모두 PAG 제한값을 만족하는 것으로 나타났다. 피폭 선량의 변화는 격납 돔의 압력에 비해서는 격납 돔 부피에 민감한 것으로 나타났다.

격납 성능 분석과 피폭 선량 분석의 결과, 예비 설계된 격납 돔의 설계는 어느 정도 최적화 된 것으로 판단된다.

이를 바탕으로, 설계의 최적화를 위해, 다양한 민감도 분석이 요구된다.

SUMMARY

KALIMER is a pool type advanced liquid metal reactor which is being developed in KAERI. Advanced design features are incorporated into the conceptual design for the enhancement of its safety. However, for the ultimate safety of KALIMER, the containment dome design is introduced and analyzed.

Before the performance analysis, the containment design of existing liquid metal reactor and the analysis methodology is reviewed. The Methodology is established and test run for verification is performed. The codes for analysis are CONTAIN-LMR for containment thermal-hydraulic and aerosol behavior of containment, and MACCS for radiological consequence evaluation outside the containment.

The preliminary containment dome design of KALIMER is determined to be single containment. The accidents for analysis are sodium pool fire and spray fire under HCDA condition.

The source terms are determined for each accident and containment performance analyses have been performed.

The sensitivity studies also have been performed with the containment dome volume.

The results show that except 100kg sodium spray, the containment pressure is well established below the design limit. The containment dome is somewhat insensitive to containment volume.

The exposure dose rates are estimated for each accident, and show that the dose rate are below the PAG limit. The dose rate is more sensitive than containment pressure to containment volume.

From the analysis results, the preliminary determined containment dome design is thought to be rather optimal.

Based on the analysis results, further sensitivity study on various parameters are required for design optimization.

CONTENTS

CHAPTER 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPTER 2 CONTAINMENT DESIGN OF LIQUID METAL REACTOR.....	2
SECTION 1 CONTAINMENT DESIGN OF EXISTING LMR	2
SECTION 2 DIFFERENCE OF CONTAINMENT DESIGN BETWEEN LWR AND LMR.....	5
SECTION 3 CONTAINMENT LICENSING RELATED ITEMS.....	6
SECTION 4 REVIEW OF CRBRP CONTAINMENT PERFORMANCE ANALYSIS	7
SECTION 5 REVIEW OF PRISM CONTAINMENT PERFORMANCE ANALYSIS	15
CHAPTER 3 CODES FOR CONTAINMENT PERFORMANCE ANALYSIS.....	26
SECTION 1 CONTAIN-LMR CODE.....	26
SECTION 2 MACCS CODE.....	31
CHAPTER 4 SET UP OF KALIMER CONTAINMENT CONCEPT.....	34
SECTION 1 PRELIMINARY CONCEPT.....	34
SECTION 2 DETERMINATION OF DESIGN BASIS ACCIDENTS	35
SECTION 3 DETERMINATION OF SOURCE TERMS AND ACCIDENT SCENARIOS	36
SECTION 4 PRELIMINARY CONTAINMENT PERFORMANCE ANALYSIS.....	38
SECTION 5 CALCULATION OF EXPOSURE DOSE RATE AT SITE BOUNDARY	62
SECTION 6 KALIMER CONTAINMENT CONCEPT	65
CHAPTER 5 CONCLUSION.....	67
CHAPTER 6 REFERENCES.....	69

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 액체 금속로의 격납 설계	2
제 1 절 기존 액체 금속로 격납 설계	2
제 2 절 경수로 격납 설계와의 차이점	5
제 3 절 격납 설계 인허가 관련 규정	6
제 4 절 CRBRP 격납성능 분석	7
제 5 절 PRISM 격납설계 분석	15
제 3 장 격납 성능분석을 위한 코드 체계	26
제 1 절 CONTAIN-LMR 코드	26
제 2 절 MACCS 코드	31
제 4 장 KALIMER 격납 개념 설정	34
제 1 절 예비 개념	34
제 2 절 DBA 선정	35
제 3 절 방사선원 항 결정 및 사고 시나리오	36
제 4 절 예비 격납성능 분석	38
제 5 절 피폭량 계산	62
제 6 절 KALIMER 격납 개념	65
제 5 장 결 론	67
제 6 장 참고 문헌	69

표 목 차

표 2.1	액체 금속로 격납설계 유형	3
표 2.2	LMR 과 LWR 의 격납설계 비교	7
표 2.3	CRBRP 방사선원 항	13
표 2.4	Off-site exposure summary for CRBR dose	15
표 2.5	PRISM 격납용기 설계 기준 해석을 위한 방사선원 항	17
표 2.6	PRISM 의 부지 선량 분석 결과	18
표 3.1	PRSIM-A 에 대한 MACCS 시험 계산과 PSID 의 비교.....	32
표 4.1	KALIMER 격납 돔 예비 설계 변수	34
표 4.2	핵종별 억제 인자의 값	37
표 4.3	소듐 풀 화재시 KALIMER 방사선원 항	37
표 4.4	소듐 스프레이 화재시 KALIMER 방사선원 항	38
표 4.5	예비 KALIMER 격납성능분석을 위한 설계 변수 및 초기 조건	39
표 4.6	격납성능분석 결과 요약	62
표 4.7	격납성능분석 결과 핵종들의 외부 누설량 및 누설을	63~64
표 4.8	KALIMER 소듐 화재시 누설 방사능에 의한 영향 평가	65

그림 목 차

그림 2.1	Single Containment	2
그림 2.2	Double Containment.....	2
그림 2.3	Containment/Confinement.....	3
그림 2.4	CRBR 격납용기 개요도.....	3
그림 2.5	PRISM 개념도	5
그림 2.6	소듐 연소율	9
그림 2.7	격납용기 압력	10
그림 2.8	격납용기 대기 온도	10
그림 2.9	격납용기 벽 온도	11
그림 2.10	탱크 셀 내의 압력	11
그림 2.11	탱크 셀 내의 온도	12
그림 2.12	탱크 셀 라이너 벽 온도	12
그림 2.13	탱크 셀 라이너 바닥 온도	13
그림 2.14	격납용기 내 에어로졸 농도	14
그림 2.15	PRISM 격납성능분석을 위한 CONTAIN 에서의 격납용기 모델링	15
그림 2.16	격납용기 압력	19
그림 2.17	셀 수증기 질량	19
그림 2.18	셀 대기 온도	20
그림 2.19	산소 몰 분율	20
그림 2.20	셀 사이 유량	21
그림 2.21	산소 소비율	21
그림 2.22	소듐 연소율	22
그림 2.23	연소 에너지 생성율	22
그림 2.24	구조물의 온도	23
그림 2.25	격납용기 외부 누설율	23
그림 2.26	부착 에어로졸 (소듐 화재 없을 때).....	24
그림 2.27	부유 에어로졸 (소듐 화재 없을 때).....	24
그림 2.28	부착 에어로졸 (소듐 화재시).....	25
그림 2.29	부유 에어로졸 (소듐 화재시).....	25
그림 3.1	PRISM-A 소듐 화재 분석 결과 비교	31
그림 4.1	KALIMER Containment	35
그림 4.2	소듐 풀 화재시 격납 돔의 압력	41
그림 4.3	소듐 풀 화재시 Cell 1 의 수증기 질량.....	41
그림 4.4	소듐 풀 화재시 격납 돔 온도(Cell 1).....	42

그림 목 차(계속)

그림 4.5	소듐 플 화재시 격납 돔 산소 몰 분율(Cell 1).....	42
그림 4.6	소듐 플 화재시 격납 돔 내의 유량(Cell 1 에서 Cell 2)	43
그림 4.7	소듐 플 화재에 의한 산소 소비율	43
그림 4.8	소듐 플 화재에 의한 소듐 연소율	44
그림 4.9	소듐 플 화재에 의한 에너지 생성율	44
그림 4.10	소듐 플 화재시 구조물의 온도(Cell 4 의 지붕).....	45
그림 4.11	소듐 플 화재시 격납 돔 외부 누설율	45
그림 4.12	소듐 화재시 구조물에 부착되는 에어로졸의 양(소듐 화재 없을 때)..	46
그림 4.13	소듐 화재시 대기중에 부유하는 에어로졸의 양(소듐 화재 없을 때)..	46
그림 4.14	소듐 화재시 구조물에 부착되는 에어로졸의 양(소듐 화재시).....	47
그림 4.15	소듐 화재시 대기중에 부유하는 에어로졸의 양(소듐 화재시).....	47
그림 4.16	소듐 스프레이 화재 분석을 위한 격납 돔의 로드	49
그림 4.17	소듐 스프레이 화재시 압력 변화(75kg 스프레이).....	50
그림 4.18	소듐 스프레이 화재시 대기 수증기 질량 변화(75kg 스프레이).....	51
그림 4.19	소듐 스프레이 화재시 대기 온도 변화(75kg 스프레이).....	51
그림 4.20	소듐 스프레이 화재시 산소 몰 분율 변화(75kg 스프레이).....	52
그림 4.21	소듐 스프레이 화재시 커버 가스 영역에서 격납 돔으로의 유량 변화 (75kg 스프레이).....	52
그림 4.22	소듐 스프레이 화재시 플 화재에 의한 산소 소비율(75kg 스프레이)..	53
그림 4.23	소듐 스프레이 화재시 플 화재에 의한 소듐 연소율(75kg 스프레이)..	53
그림 4.24	소듐 스프레이 화재시 플 화재에 의한 연소 에너지 생성율(75kg 스프 레이).....	54
그림 4.25	소듐 스프레이 화재시 격납 구조물의 온도(75kg 스프레이).....	54
그림 4.26	소듐 스프레이 화재시 격납 돔 외부로의 누설율(75kg 스프레이).....	55
그림 4.27	소듐 스프레이 화재시 초기단계 누설핵종의 침전량(75kg 스프레이)..	55
그림 4.28	소듐 스프레이 화재시 초기단계 누설핵종의 부유량(75kg 스프레이)..	56
그림 4.29	소듐 스프레이 화재시 화재단계 누설핵종의 침전량(75kg 스프레이)..	56
그림 4.30	소듐 스프레이 화재시 화재단계 누설핵종의 부유량(75kg 스프레이)..	57
그림 4.31	소듐 분사량의 변화에 따른 격납 돔 압력	58
그림 4.32	소듐 분사량의 변화에 따른 격납 돔 온도	58
그림 4.33	소듐 분사량의 변화에 따른 격납 돔 외부 누설율	59
그림 4.34	소듐 분사량의 변화에 따른 격납 돔 벽 온도	59
그림 4.35	격납 돔 체적 변화에 따른 격납 돔 압력 변화	60
그림 4.36	억제 인자를 1 로 했을 때의 에어로졸 침전량 (75kg 스프레이).....	61

그림 목 차(계속)

그림 4.37 억제 인자를 1로 했을 때의 에어로졸 부유량 (75kg 스프레이).....61

제 1 장 서 론

한국원자력연구소(KAERI)에서는 원자력 중장기 과제의 일부로서, 한국형 액체 금속로의 설계 기술 개발과제를 수행하고 있다. KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor)라고 이름 지어진 액체 금속로는 액체 소듐을 냉각재로 하는 플형의 신형 고속 증식로이다. 여기에는 안전성의 획기적인 향상을 위해 여러가지 신형 안전 개념들이 도입되어 있다. 우선 노심은 금속 핵연료를 장착하여 음의 반응도 궤환 효과를 높였으며, 어떤 사고 조건에서도 안전한 원자로 정지를 보장하는 원자로 정지계통(Self Actuated Shutdown System :SASS), 노심의 붕괴열을 피동적으로 제거하는 피동 잔열 제거 계통 (Passive Safety Decay Heat Removal System : PSDRS)이 설계되어 있다. 그리고 지진에 대비한 면진 설비들도 갖추어져 있다.

이러한 안전계통으로 인해 노심이 용융되는 중대사고는 그 발생 확률이 지극히 낮아졌다. 하지만, 심층방어의 입장에서, 혹시 발생할지도 모르는 중대사고에 대처하기 위한 격납용기 계통이 도입되었다.

본 보고서는 KALIMER 격납용기의 예비 설계 개념 제안 및 이에 대한 성능 분석을 목표로 한다. 그리고 이를 통한 설계 개념의 개선 또한 이루고자 한다. 이를 위해 성능 분석 체계를 마련하고 이를 바탕으로 민감도 분석을 통해 설계 개념들을 정립한다.

연구 수행 절차는 다음과 같다.

먼저 기존의 액체 금속로의 격납 개념들을 검토하여 그 특징들을 파악한다. 그리고 가능하면 특정 설계에 대해서는 성능 분석 방법론, 절차 등의 상세한 부분까지 검토한다. 이를 바탕으로 KALIMER의 예비 격납 개념을 설정하고, 성능 분석을 위한 코드 체계를 확립하여, 그 계산능력을 검증한다.

최종적으로 예비 설계 개념에 대한 성능 분석을 수행하여, 설계의 타당성 및 장/단점을 파악하고, 민감도 분석을 통해 설계의 개선을 이룬다.

제 2 장 액체 금속로의 격납 설계

제 1 절 기존 액체 금속로 격납 설계

1. 액체 금속로 격납 형태 분류

액체 금속로는 그 계통의 특성상 일차 계통의 압력이 그렇게 높지 않기 때문에 가압 경수로(PWR)와 같은 두꺼운 격납용기를 필요로 하지는 않는다. 하지만, 액체 금속로에서, 특히 소듐을 냉각재로 쓰는 원자로에서 가장 큰 문제인 소듐 화재가 발생하면, 격납건물의 압력이 높아져, 일차 계통의 방사성 물질이 격납용기 외부로 규정 이상의 양이 누설될 수도 있다. 이를 막기 위해 격납용기가 설계되어 있다.

액체 금속로에 사용되는 격납 설계는 크게 다음의 네 가지로 분류할 수 있다.

1. 원자로 용기 상부 헤드가 격납용기 대기에 노출되어 있는 단일 격납용기 (Single containment) 형태. 이 형태는 대부분의 PWR 들이 취하고 있는 형태이다.(그림 2.1)
2. 원자로 용기 상부 헤드는 고압의 일차 격납 용기로 감싸져 있고, 이를 다시 외부 격납 건물로 감싸는 이중 격납용기 (Double containment) 형태. 이때,

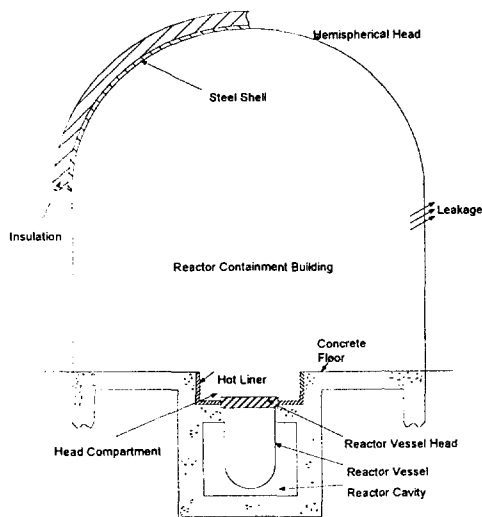


그림 2.1 Single Containment

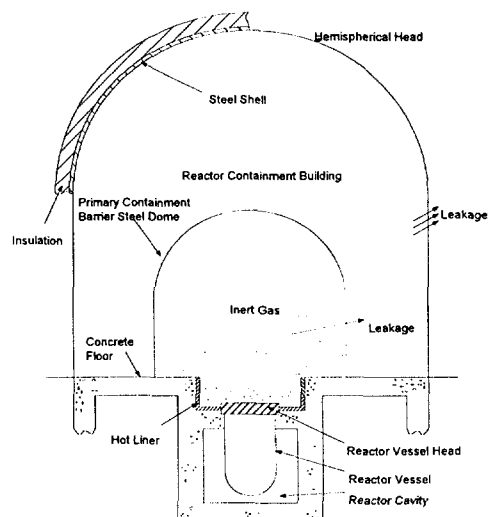


그림 2.2 Double Containment

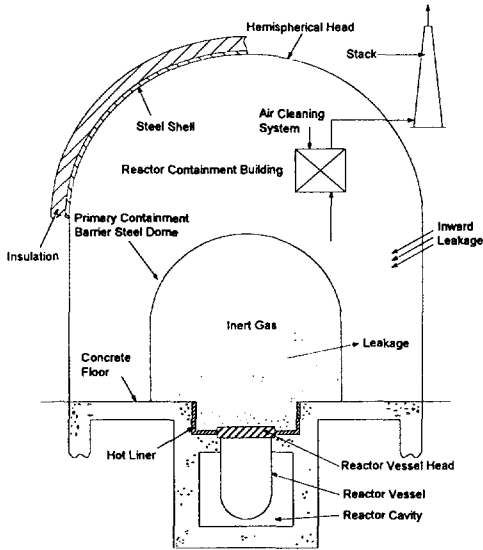


그림 2.3 Containment/Confinement

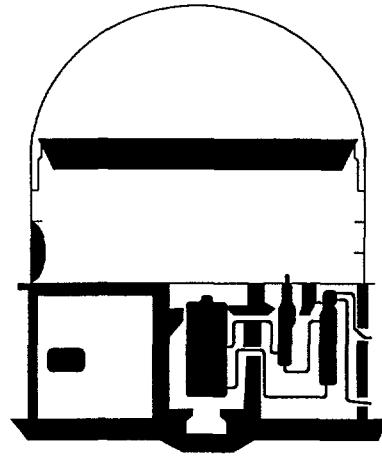


그림 2.4 CRBR 격납용기 개요도

일차 격납용기 내부는 비활성 기체로 가득 채움으로써, 소듐 화재를 원천 봉쇄한다.(그림 2.2)

3. 이중 격납용기와 형태는 유사하지만, 일차 격납용기 내부를 저압으로 유지하고, 외부 격납건물에는 공기정화 계통을 두어 일차 격납용기로부터의 누설물을 여과하는 Containment/Confinement 형태. 이 형태에서는 장기적인 방사성 영향이 현저하게 줄어든다.(그림 2.3)
4. 고압의 일차 격납용기와 이를 둘러싼 한 개 이상의 장벽을 지닌 다중 격납용기(Multiple containment with pump back) 형태. 여기서는, 최외곽 부분에 펌프장치를 두어 일차 격납용기로부터 누설되는 물질을 다시 되돌려 보냄으로써 압력을 대기압 이하로 유지하고, 궁극적으로, 공기 정화계통을 통해

표 2.1 액체 금속로 격납설계 유형

Containment Type	Description	Reactors
Single containment	Open head compartment and low-leakage outer containment building	FFTF, EBR-II, JOYO
Double containment	Sealed, inert high pressure inner containment barrier, surrounded by a low-leakage outer containment building	FERMI, SEFOR
Containment/Confinement	Sealed, low-leakage inner containment barrier, surrounded by a ventilated low pressure outer confinement building with discharge to stack via an air cleaning system	PFR, CRBRP, SUPER PHENIX, BN-350, BN-600
Multiple containment with pumpback	Sealed high pressure inner containment barrier, surrounded by one or more outer barriers, A negative pressure zone is maintained in the outer most space by pumping back leakage to the inner containment space. Eventual venting to a stack via the air cleaning system is provided.	SNR-300

누설물을 걸러서 외부 스택으로 방출한다.

표 2.1 에는 액체 금속로에 적용되어 있는 격납용기 형태를 적용된 원자로들과 함께 유형별로 나타내었다.

2. CRBRP 격납 설계

CRBRP 는 375MWe(975MWt)의 용량을 가진 원형로로서, 1,000MWe 급 LMR 의 실증로를 목표로 설계되었다.

CRBRP 의 격납용기는 철제 용접 구조물로서, 반구형 돔의 모양을 하고 있으며, 평평한 원형 기초와 원통형 벽은 격납 건물의 운전 층 (Operating floor) 아래에 잠겨 있다. 자유 체적은 $113,267\text{m}^3(4 \times 10^6\text{ft}^3)$ 이다. CRBRP 격납용기의 개략도가 그림 2.4 에 나타나 있다.

격납용기의 설계 압력은 0.17Mpa(10psig)이고, 최대 허용 설계 누설율은 설계 압력에서 0.1%(volume)/day 이다. 격납용기의 설계는 10CFR 100 의 선량 기준과 CRBRP 의 예비 안전성 분석 보고서 3.8.2 에 나열되어 있는, CRBR 에 적용 가능한 GDC 들을 만족하도록 설계 되어 있다.

CRBRP 에서 일차 소듐 저장탱크(Primary sodium storage tank)는 격납용기의 안전성 측면에서 중요성을 갖는다. 왜냐하면, 이 탱크에 저장되어 있던 소듐의 완전 누설로 인한 사고가 격납용기내의 온도/압력 조건에 중대한 영향을 미치기 때문이다. 이 탱크는 격납용기 운전 층 아래에 위치해 있고, 이 독실(Cell)은 비활성화 되어 있다.

탱크 아래 바닥의 면적은 $77.1\text{m}^2(830\text{ft}^2)$ 이고, 독실은 두께 1.83m(6ft)의 콘크리트로 이루어져 있다. 내부 표면은 철제 라이너(Liner)로 보호되어 있으며, 바닥 역시 0.95cm(3/8in.)의 철제 라이너가 깔려 있다. 이 라이너는 바닥에서 위로 수직으로 뻗어 있으며, 탱크에서 빠져나가는 소듐을 안전하게 격납할 수 있다. 유지 보수중(Maintenance) 일차 회로중의 하나의 소듐은 완전히 배출되어 이 탱크에 저장된다. 탱크의 용량은 $121.1\text{m}^3(32,000\text{gal})$ 이고, 소듐의 온도는 약 $204^\circ\text{C}(400^\circ\text{F})$ 정도로 유지된다.

3. PRISM 의 격납 설계

PRISM 은 미국 DOE 에서 ALMR 프로그램의 일환으로 개발한 원자로로서, 피동 안전 설비들을 갖추고 있다. 이들은 다시 모드 A 와 모드 B 가 있고, 각각

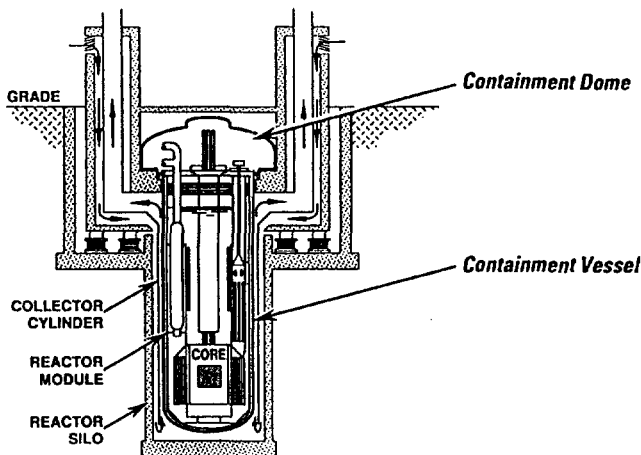


그림 2.5 PRISM 개념도

150MWe 과 300MWe 의 전력 생산능력을 가지고 있다. 여기서는 주로 모드 A 에 대해서 고려하였다.

PRISM 의 격납용기는 원자로로부터의 누설물을 격납할 수 있는 하부 격납용기와 HCDA(Hypothetical Core Disruptive Accident)와 같은 중대사고를 완화할 수 있는 상부 격납 돔으로 구성되어 있다. 상부 격납 돔

은 다시 하부 돔과 상부 돔으로 나뉘는데, 하부 돔은 두께 2.54cm(1in.), 높이 3.66m(12ft), 지름 14.63m (48ft)의 원통형이며, 상부 돔은 두께 3.81cm(1.5in.), 지름 7.32m(24ft)이다. 운전 층에서 상부 돔까지의 최대 높이는 7.32m(24ft)이다. 상부 격납 돔의 설계 누설율은 0.28Mpa(25psig), 371°C(700°F)의 설계 압력/온도 조건에 1%(volume)/day 이다.

하부 격납용기는, 크기는 두께 2.54cm(1in.), 지름 6.04m(19ft 10in.), 높이는 약 18.29m(60ft) 정도이고, 0.53Mpa(60psig), 462.7°C (800°F)에서도 누출 기밀성을 유지하도록 설계되어 있다. 하부 격납용기와 원자로 용기 사이에는 12.7cm(5in.)의 공간이 있으며 아르곤으로 채워져 있다. 따라서 원자로 용기로부터 소듐이 누설되어도 중간 열 교환기의 입구, 노심, 저장된 사용 후 핵연료는 소듐에 잠겨 있도록 설계되어, 일차 소듐의 유로는 그대로 유지되고 RVACS(Reactor Vessel Auxiliary Cooling System)에 의한 잔열 제거는 지속적으로 가능하도록 되어 있다.

격납 설계는 10CFR 100 의 선량 제한과 Part 50 App. A 의 GDC-16, GDC-50 등을 만족하도록 되어 있다.

제 2 절 경수로 격납 설계와의 차이점

원자력 발전소의 격납용기는 기본적으로, 어떠한 사고 조건하에서도 원자로로부터 방출되는 방사성 물질의 격납용기 외부로의 대량 누출을 막는 역할을 한

다. 따라서 격납용기를 설계할 때는, 설계 압력과 설계 누설율이 주어지게 된다. 하지만 이들은 발전소 및 원자로의 형태마다 조금씩 다를 수가 있다. 왜냐하면, 각 원자로 형태마다 격납용기의 설계 기준사고가 다를 수 있고, 그에 따른 방사능 누출양도 다르기 때문이다. 특히 경수로와 액체 금속로는 그 설계면에 있어, 많은 차이가 있으므로, 격납설계의 개념에서도 큰 차이를 보인다.

여기서는 크게 경수로 중에서 가압 경수로에 적용된 격납용기와 액체 금속로에 적용된 격납용기의 주요 설계 변수를 정성적으로 비교해 보았다.

격납용기의 크기는 가압 경수로의 경우 대부분 대형 건식 격납용기를 채택하고 있는 반면, 액체 금속로에서는 그 크기도 소형부터 대형까지 다양하다. 격납용기의 재질은 양쪽 모두 비슷한 재질을 사용한다. 설계 압력이 가장 큰 차이를 보이는 부분인데, 가압 경수로의 경우 일차 계통이 상당한 고압이므로, LOCA 시 그 방출에너지가 아주 크다. 따라서 이를 감당하려면, 격납용기의 설계압력이 높아야 하고 이를 만족하기 위해서는 두꺼워 질 수 밖에 없다. 하지만 액체 금속로는 일차 계통의 압력이 그렇게 높지 않으므로 설계 압력이 가압 경수로의 경우처럼 높을 필요는 없다. 설계 누설율은 비슷한 값을 가지고 있다.

격납용기 설계 기준사고는 가압 경수로의 경우 대형 LOCA 또는 MSLB 인데 비해 액체 금속로에서는 소동 화재가 된다.

제 3 절 격납 설계 인허가 관련 규정

격납용기 설계와 관련하여 10CFR 50 의 부록 A 에는 다음과 같이 격납용기 설계와 설계 기준에 대해 명시하였다.

GDC 16 — *Containment Design*. Reactor containment and associated systems shall be provided to establish an essentially leak-tight barrier against the uncontrolled release of radioactivity to the environment and to assure that the containment design conditions important to safety are not exceeded for as long as postulated accident conditions require.

GDC 50 — *Containment Design Basis*. The reactor containment structure, including access openings, penetrations, and the containment heat removal system shall be designed so that the containment structure and its internal components can accommodate, without exceeding the design leakage rate and with sufficient margin, the calculated pressure and temperature conditions resulting from any loss-of-coolant accident. This margin shall reflect

consideration of (1) the effects of potential energy sources which have not been included in the determination of the peak conditions, such as energy in steam generators and as required by § 50.44 energy from metal-water and other chemical reactions that may result from degradation but not total failure of emergency core cooling functioning, (2) the limited experience and experimental data available for defining accident phenomena and containment responses, and (3) the conservatism of the calculational model and input parameters.

그리고, 방사선 차폐와 관련한 규정이 10CFR 100 에 명시되어 있다. 즉 원자로 부지에서, 배타 지역(Exclusion area)의 경계에서는 가상 사고시 핵분열 생성물의 격납용기 외부 누출이 시작된 지 2 시간 동안 전신 피폭은 25rem, 갑상선 피폭은 300rem 을 초과하지 않아야 되며, 저 인구 지역(Low population zone)의 외부 경계에서 개인이 사고 진행 시간을 통틀어 받는 전신 피폭이 25rem, 갑상선 피폭이 300rem 을 넘지 않아야 한다.

제 4 절 CRBRP 격납성능 분석

1. 격납용기 안전성 분석

CRBR 격납용기 안전성 분석을 위한 설계 기준 사고는 유지 보수 중 일차 소듐 저장 탱크의 가상 파손이다. 이때 탱크가 위치해 있는 독실은 격납용기 대기와 서로 통하여 비활성 기체가 모두 빠져나간 상태라고 가정한다.

사고의 전개 과정 및 가정은 다음과 같다.

1. 유지 보수 중 일차 소듐 저장 탱크가 소듐으로 가득 찼을 때 이 독실을 개방할 필요성이 생긴다.
2. 발전소의 수명이 거의 다된 시점에서 사고가 발생한다.(이때는 일차 소듐 저장 냉각재의 방사능이 잠재적으로 최대값이 된다.)

표 2.2 LMR 과 LWR 의 격납설계 비교

설계 변수	가압 경수로	액체 금속로
격납용기 크기	대형	대/중/소형
격납용기 재질	콘크리트/철	콘크리트/철
격납용기 설계 압력	40~60psig	10~30psig
격납용기 설계 누설율	체적의 0.1%/day	체적의 0.1~1%/day
격납용기 설계 기준 사고	대형 LOCA/MSLB	소듐 화재

3. 독실을 개방하면, 약 $1.95\text{m}^2(21\text{ft}^2)$ 의 문이 개방되고 독실 내부의 비활성 기체가 격납용기 대기로 빠져나가게 되고, 격납용기 대기와 직접 교류하게 된다.
4. 이때 가상적으로 탱크의 완전 파손이 발생하게 되고, 탱크내의 모든 소듐이 공기로 가득 차 있는 독실로 방출된다.

이러한 소듐 화재 조건은 비활성화 되어 있지 않은 격납용기 내부 독실로의 일차 소듐의 최대 누설을 일으키며, 격납용기의 건전성과 관련하여 가장 극단적인 소듐 화재 조건이다.

이 사고를 SOFIRE II 코드를 이용해 분석하여, 소듐 연소율 및 이에 따른 격납용기내의 온도/압력 조건을 계산한다.

이때, 소듐 연소로 인해 생성되는 Na_2O 와 Na_2O_2 의 비율을 각각 60%와 40%로 가정하고 해석을 하였다. 소듐 화재 실험 데이터에 의하면, 연소 시작 후 초기 30분 동안은 Na_2O 의 생성이 지배적이고, 그 이후로는 Na_2O_2 의 생성이 대부분으로 나타난다. 또 Na_2O_2 의 비율이 39%에서 78%정도라고 본다. 본 해석에서 Na_2O_2 의 비율을 40%라고 한 것은 보수적이라고 볼 수 있는데, 이는 같은 양의 산소가 소비될 때, Na_2O 의 경우가 Na_2O_2 생성의 경우보다 약 70% 정도의 열이 더 발생하기 때문이다.

보수적으로 화재 보호계통이 작동하지 않는다고 하였으므로, 사고 후 소듐 연소는 300시간동안 계속된다. 이때는 연소를 위해 가용한 산소 [$\sim 31,752\text{kg}$ ($\sim 70,000\text{ lbs}$)]의 95%가 소비된다. 이때 소듐의 연소율은 $0.49\text{kg/hr}\cdot\text{m}^2(0.11\text{lb/hr}\cdot\text{ft}^2)$ 이다. 300시간동안 연소된 소듐은 약 $65,772\text{kg}(145,000\text{lbs})$ 로 흘러나온 소듐의 60%이다. 이 기간동안 격납용기 내에서 생성된 열에너지는 $6.33\times 10^{11}\text{J}(6.0\times 10^8\text{Btu})$ 이다.

격납용기 내부의 압력을 결정하는 요인은 두 가지가 있는데, 첫 째는 소듐의 연소로서, 격납용기 내부의 온도를 상승시켜 압력을 증가하게 만들고, 두 번째는 산소의 소비로, 이로 인해 격납용기 내의 기체 질량이 줄어들어 압력의 감소에 기여한다. 이 두 요인의 결합으로 격납용기 내부의 압력은 빨리 상승하고 빨리 줄어든다.

격납용기 압력은 소듐의 누설이 있는 후 75시간에 첨두 압력에 도달하며, 그 값은 $0.116\text{Mpa}(1.8\text{psig})$ 이다. 그 이후 275시간 만에 대기압으로 떨어진다. 격납용기 벽으로의 우세한 열 전달 메커니즘은 격납용기 대기에서의 기체 대류이다. 따라서 격납용기 내 기체의 온도와 격납용기 벽의 온도는 유사한 거동을 보인다. 격납용기 기체의 첨두 온도는 사고 125시간 만에 $120^\circ\text{C}(248^\circ\text{F})$ 가 되고, 격납용기 벽의 첨두 온도 또한 125시간에 $116^\circ\text{C}(240^\circ\text{F})$ 가 된다. 이후에는 약 400시

간 만에 온도는 82°C(180°F)정도로 떨어진다. 격납용기 최대 온도는 최대 압력보다 시간적으로 지연되어 나타나는데, 이는 급속한 산소의 고갈이 압력의 변화에는 중요한 영향을 미치지 않지만, 온도의 변화에는 그렇지 않기 때문이다. 온도의 감소가 상대적으로 느린 것은 격납용기 외부 벽 표면에 spray-foam 단열이 적용되었기 때문이다.

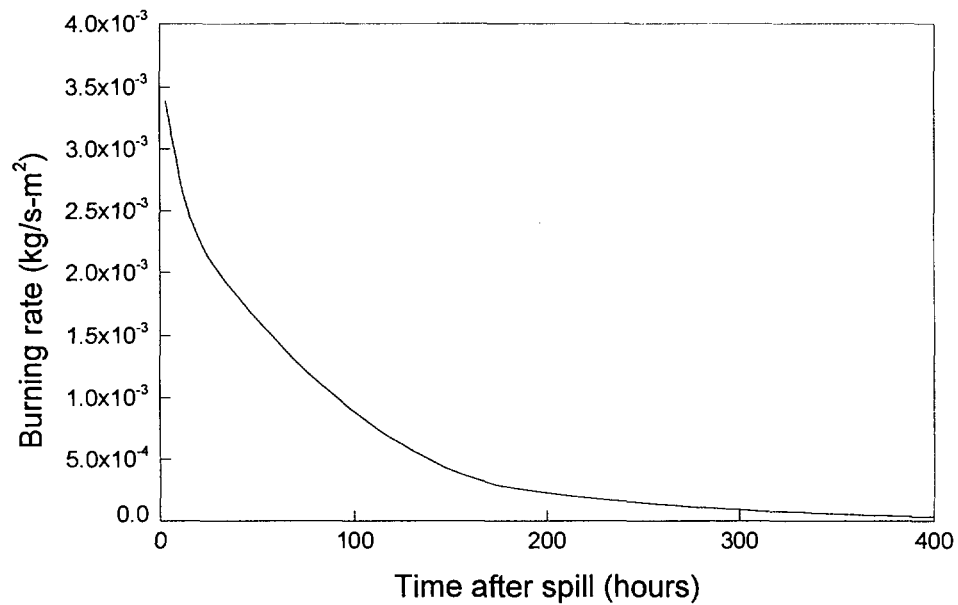


그림 2.6 소듐 연소율

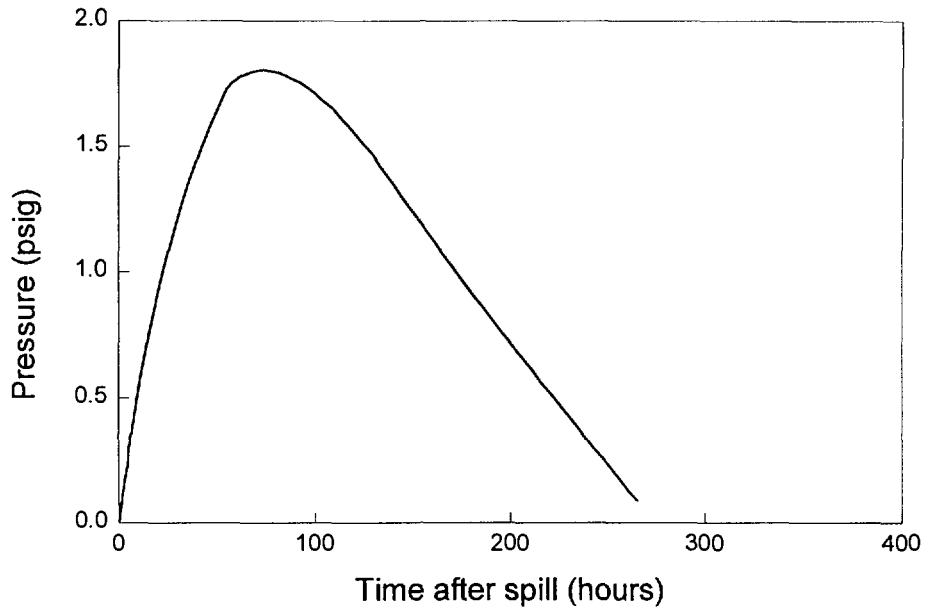


그림 2.7 격납용기 압력

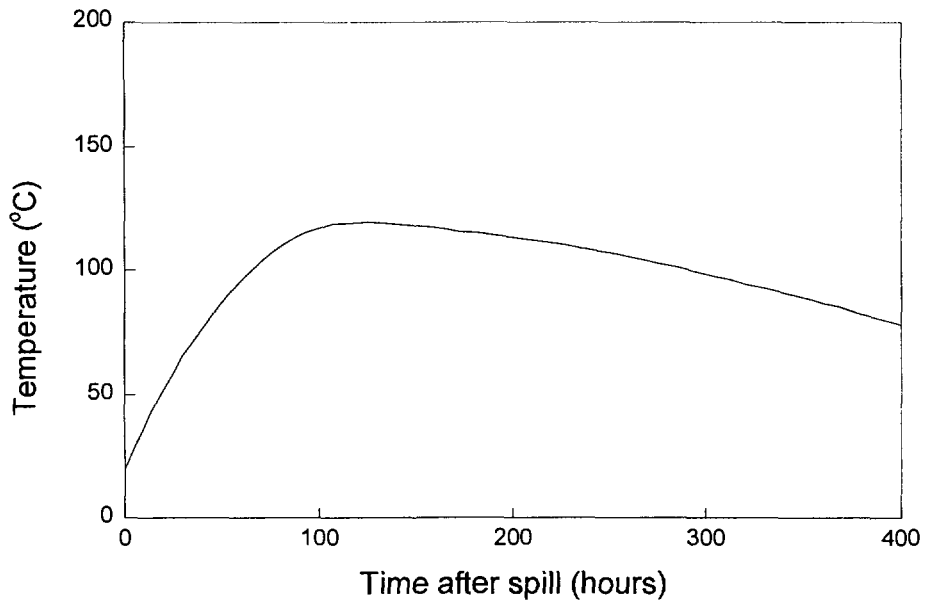


그림 2.8 격납용기 대기 온도

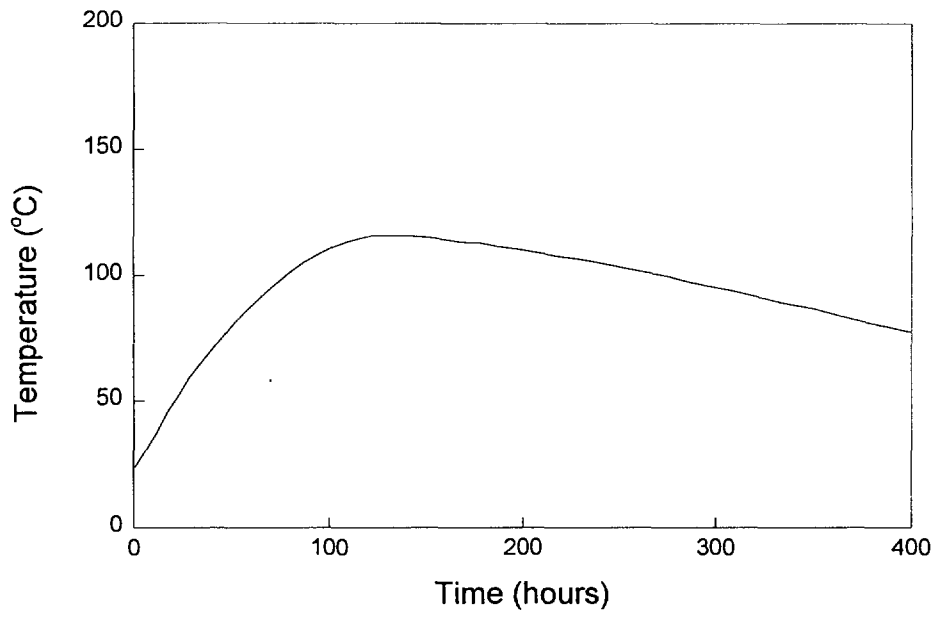


그림 2.9 격납용기 벽 온도

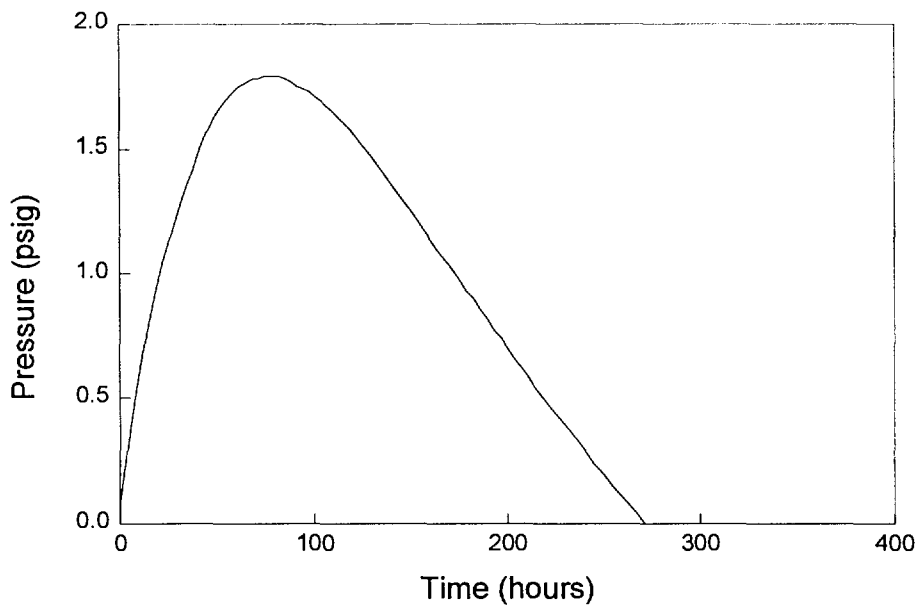


그림 2.10 탱크 셀 내의 압력

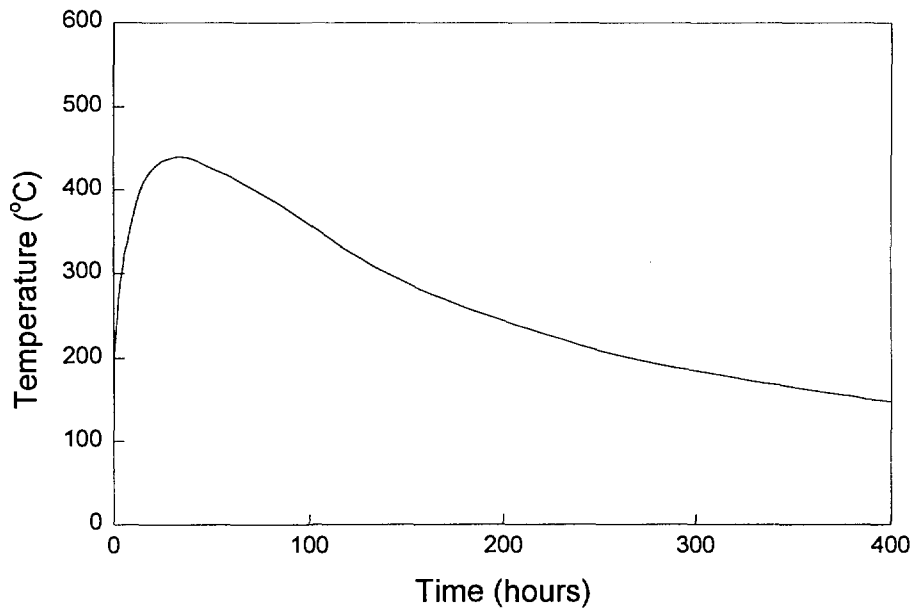


그림 2.11 탱크 셀 내의 온도

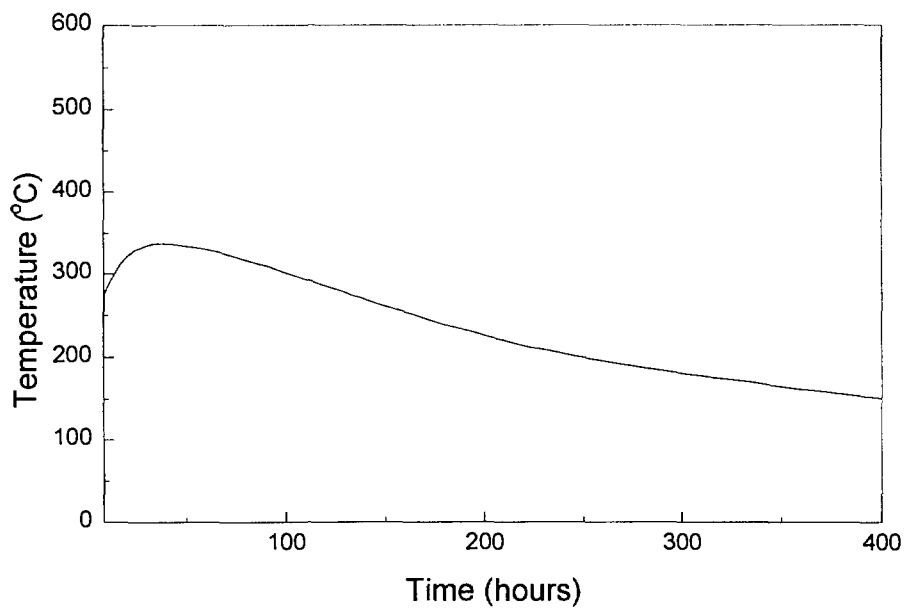


그림 2.12 탱크 셀 라이너 벽 온도

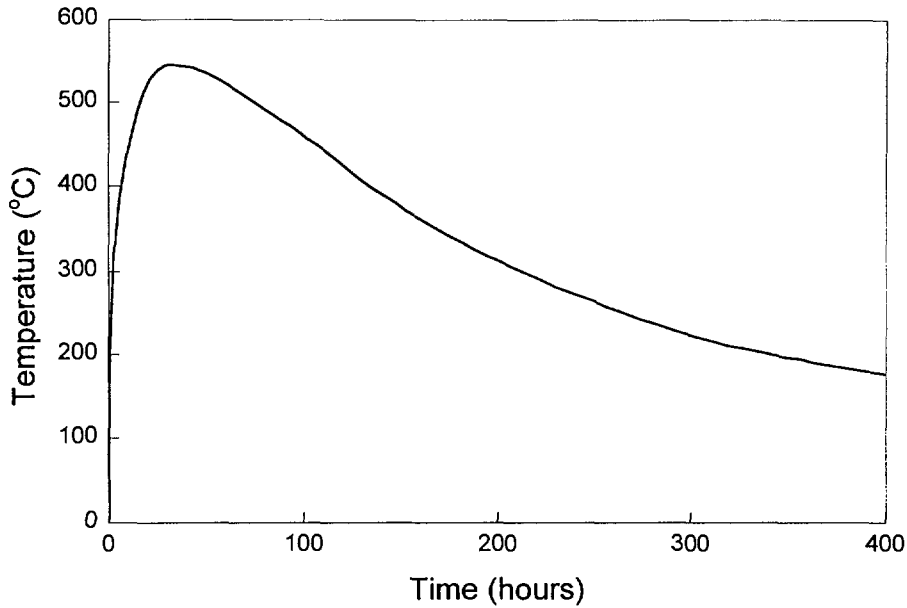


그림 2.13 탱크 셀 라이너 바닥 온도

2. 방사선 피폭량 분석

CRBR 에서 격납용기 외부 방사선 피폭량은 다음과 같은 가정과 절차를 이용해 수행된다.

먼저 표 2.3 과 같은 방사선원 항이 노심으로부터 격납용기 대기로 빠져 나온다고 가정한다. 이때 이들은 격납용기 내로 즉각적으로 빠져 나오고 균일하게 분포한다. 즉 CRBR 에서는 TID-14844 의 방사선원 항을 그대로 이용한다.

이때, 노심 재고량은 평형 노심의 End-of-cycle 을 기준으로 한다.

방사선 피폭량 분석을 위한 격납용기에서의 누설은 보수적으로, 격납 용기 설계 압력에서 발생한다고 가정한다.

피폭량 분석은 HAA-3 코드와 COMRADEX-II 코드를 이용한다. 먼저 HAA-3 를 이용하여 앞에서 결정된 방사선원 항에 의해 격납건물 내부로 누설되는 핵

표 2.3 CRBRP 방사선원 항

100%	Nobel gas inventory (Xe, Kr)
50%	Halogen inventory (25% airborne) (Br, I)
1%	Solid fission product inventory (All remaining fission products)
1%	Fuel (including plutonium)

종들의 에어로졸의 시간에 따른 거동과 감소 인자를 계산한다. 그림 2.14 에 HAA-3 코드의 계산 결과인 격납 용기 내 에어로졸 농도의 시간에 따른 거동이 나타나 있다.

이 결과를 COMRADEX-II 에 입력하여, 격납용기로부터의 누설율이 설계 누설율인 0.1% (vol.)/day 라는 가정하에, 격납용기로부터 누설되는 풍매 방사성 물질의 피폭선량을 계산한다.

소듐의 연소로 인해 생성되는 에어로졸은 주로 Na_2O 와 Na_2O_2 로 이루어진다. 에어로졸 내의 방사성 물질은 에어로졸 내의 방사성 동위원소의 농도가 탱크 내에 저장되어 있던 소듐에서의 농도와 같다는 가정 하에서 결정된다. 부유 에어로졸 농도의 감소는 중력에 의한 침전(settling), 도금(plating), 그리고 브라운 운동/중력에 의한 응집(agglomeration)과 같은 메카니즘에 의해서 이루어진다.

에어로졸의 침투 농도는 $6.5\mu\text{g}/\text{cc}$ 로서 화재 발생 직후에 도달한다. 이후에 계속 감소하여 270 시간 (source cut-off time)만에 $1.0\mu\text{g}/\text{cc}$ 이하로 떨어진다. 그리고 400 시간 만에 $0.3\mu\text{g}/\text{cc}$ 이하가 된다. 에어로졸에 포함된 방사능의 침투값은 $7.1 \times 10^4 \mu\text{Ci}/\text{cc}$ 이다. 방사성 붕괴를 무시하면, 400 시간 만에 $3.4 \times 10^5 \mu\text{Ci}/\text{cc}$ 로 감소된다.

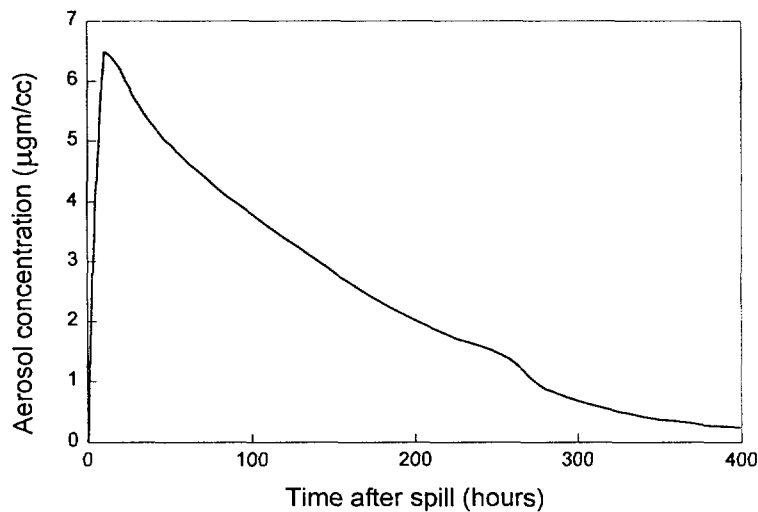


그림 2.14 격납용기 내 에어로졸 농도

표 2.4 Off-site exposure summary for CRBR Dose (Rem)

Organ	10CFR 100	2-Hour Site Boundary (0.42miles)	Accident Duration Low Population Zone (2.5miles)
Bone	150*	9.3	5.3
Lung	75*	4.1	2.3
Thyroid	300	17.7	9.6
Whole Body**	25	3.5	1.5

*Equivalent to 10CFR 100 guidelines

**Includes inhalation, external gamma cloud, and direct gamma shine exposure

제 5 절 PRISM 격납설계 분석

PRISM의 격납 성능 분석을 위한 대상 사고는 HCDA 시의 소듐 풀 화재이다.

사고 전개 과정은 다음과 같다.

먼저, 어떤 미지의 원인에 의해 원자로 상부의 closure에 상대적으로 큰 틈이 형성된다. 그러면, 비활성 기체(Xe, Kr)의 100%, 할로젠(Br, I)의 0.1%, 알칼리 금속(Cs, Rb)의 0.1%, Te과 Ru의 0.1%, 다른 분열 생성물(Sr, Ba)과 핵연료의 0.1%가 사고 발생 후 10초 이내에 격납용기 돔으로 방출된다. (First phase)

이때, 원자로 closure의 틈이 충분히 커서 원자로 내의 He커버 가스가 격납용기 돔으로 빠져나가고 공기가 원자로 내부로 유입된다. 따라서 소듐 풀 화재가 발생하여 돔 내의 산소가 모두 고갈될 때까지 계속된다. 그러면 1차 소듐의

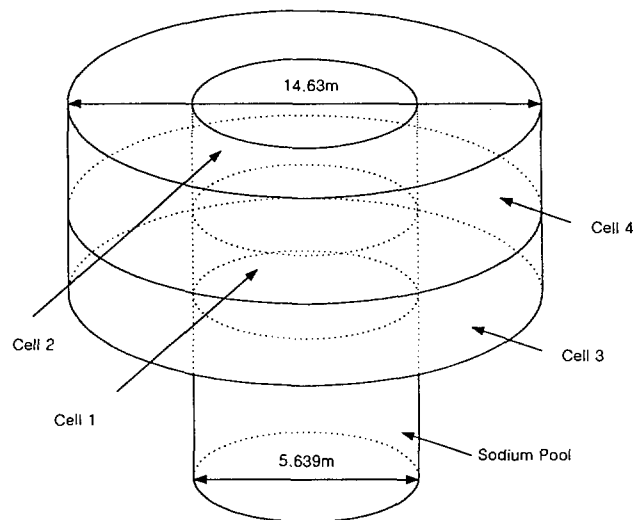


그림 2.15 PRISM 격납용기 성능 분석을 위한 CONTAIN에서의 격납용기 모델링

연소에 의해 연소물(소듐, 에어로졸, 뜨거운 공기)과 함께 방사성 동위 원소들이 격납용기 돔으로 방출된다.

보수적으로 소듐 화재 이전에 핵분열 생성물들이 1 차 소듐 내에 균일하게 분포하고 있으며, 노심이 모두 녹아 내린다고 가정하면, 할로겐의 0.8%, 알칼리 금속의 1.6%, Te 과 Ru 의 0.004%, Sr 과 Ba 의 0.0016%, 핵연료의 0.0008%가 격납용기 돔으로 빠져 나오고, 더불어 소듐의 동위 원소인 Na22 와 Na24 의 0.4%도 빠져 나온다. 이러한 현상이 소듐 화재 이후 6 시간동안 지속된다. (Second phase)

PRISM 의 격납성능 분석은 다음과 같은 순서에 입각하여 수행한다.

먼저 ORIGEN-2 를 이용하여 EOEC 에서의 노심 내의 방사성 물질 재고량을 계산하고, 이들이 격납용기로 빠져나가는 비율 즉 Release parameters 를 산정한다. 그리고, 이 Release parameters 와 CONTAIN-LMR 코드를 이용해 격납용기 안전성을 분석한다. 즉 격납용기내의 온도, 압력등과, 에어로졸의 거동 그리고 격납용기 외부로 빠져나가는 누설율 등을 계산하게 된다. 마지막으로 CONTAIN-LMR 의 분석결과(격납용기외부로의 누설율)와 SMART 코드를 이용하여 부지 경계에서의 선량을 계산한다.

격납 성능 분석의 결과는 다음과 같다.

먼저 CONTAIN-LMR 을 이용한 분석의 결과를 살펴보면 다음과 같다.

그림 2.16 에는 시간에 대한 격납용기 내의 압력이 나타나 있다. 첨두압력은 0.17Mpa (10psig)을 넘지 않으며, 50 에서 60 분 사이의 커브의 섭동은 격납용기 대기에 존재하던 수증기와 풀 화재에 의한 산화 나트륨의 반응이 끝났기 때문에 나타나는 것으로 보인다.

그림 2.17 에는 시간에 따른 격납용기내의 수증기량의 변화가 도시되어 있다. 초기에 습도가 100%라고 가정하고, 수증기의 고갈로 수증기와 산화 나트륨과의 반응이 끝나는 것은 격납용기 대기로의 에너지 생성원 중의 하나가 없어지는 것을 의미한다. 이 반응은 첨두 압력이후에 격납용기 압력 감소에 기여한다.

그림 2.18 에는 각 Cell 의 온도를 나타내었다.. 핵분열 생성물이 생성되는 곳 인근의 Cell 에서는 온도가 높게 나타나며(Cell 1), Cell 2 에서는 Cell 1 과 공기 유동에 의한 빠른 에너지 교환으로 약간의 온도차이가 난다. Cell 2 옆의 Cell 4 와 Cell 3 은 부피가 크고, 외부와의 열 교환에 의해 온도가 더 낮게 나타난다.

격납용기 내의 산소 몰 분율이 그림 2.19 에 나타나 있다. 산소 몰 분율은 소듐 풀 화재에 의해 계속적으로 감소하며, 모든 산소가 사고발생 후 약 400 분 만에 모두 소비된다. 격납용기 내의 산소 고갈은 압력의 감소에도 기여한다.

그림 2.20 은 Cell 사이의 유량을 나타내고, 그림 2.21 은 격납용기 내에서의 산소 소비율을 나타낸다. 그리고, 그림 2.22 와 그림 2.23 은 각각 소듐 연소율과 소듐 연소에 의한 에너지 생성율을 도시하였다. 그림 2.24 는 사고 진행동안 여러 구조물에서의 온도 변화를 보여준다. Cell 3 이 가장 높은 온도를 보여주는데 300 분에서 177°C(350°F)이다.

격납용기 벽은 사고 후 180 분에 110°C (230°F)에서 132°C (270°F)의 침투 온도를 보인다.

그림 2.25 는 격납용기에서 외부 대기로 누설되는 유량을 나타낸다. 최대 누설율은 사고발생 얼마 후 0.13lbs/min 까지 증가한 후 400 분이 안되어 거의 0 으로 떨어진다. 누설율의 거동의 경향은 압력의 거동과 비슷한 것으로 나타났다.

그림 2.26 와 그림 2.27 에는 소듐 화재 발생이 없을 경우 핵분열 생성물의 에어로졸이 격납용기 벽이나 바닥에 부착되는 경우와 격납용기 대기에 부유하는 양을 각각 나타낸다. 격납용기 대기로 방출되는 에어로졸의 대부분이 초기 20 분 이내에 모두 부착되거나 누설됨을 알 수 있다.

그림 2.28 과 그림 2.29 에는 소듐 화재시의 에어로졸 부착량과 부유량이 각각 나타나 있다.

에어로졸 부유량은 약 120 분까지는 최대치로 증가하는데 이는 지속적인 소듐 연소와 에어로졸의 방출 때문이다. 120 분 후에 연소율이 줄어들면서, 생성되는 에어로졸보다 부착되는 에어로졸의 양이 많아지게 된다. 따라서 대기중에 부유하는 에어로졸의 양이 급격히 줄어들어 200 분 내에 0 이 된다.

표 2.5 PRISM 격납용기 설계 기준 해석을 위한 방사선원 항목

Item	Magnitude	
	Early phase (0~10sec)	Sodium fire phase (10sec~6hr)
Material released to containment through reactor closure		
Noble gas (Xe, Kr)	100%	0%
Halogens (Br, I)	0.1%	0.8%
Alkali metals (Cs, Rb)	0.1%	1.6%
Te, Ru	0.1%	0.004%
Sr, Ba	0.01%	0.0016%
Fuel & other fission products	0.01%	0.0008%
Na22, Na24	None	0.4%
Energy sources		
Sodium fire (within reactor)	None	
Decay heat	Yes	~773kg(1700lbs)
Leakage rate (containment dome)	<1%/day @172kPa(25psig), 645K(700°F)	

표 2.6 PRISM의 부지 선량 분석 결과

Organ	PAG Dose Limit (Rem)	Weather Type					
		ALMR 50 th Percentile		ALMR 95 th Percentile		Reg. Guide 1.3 & 1.4	
		Dose (Rem)	% PAG	Dose (Rem)	% PAG	Dose (Rem)	% PAG
Whole Body	1.0	2.2E-2	2.2	9.8E-2	9.8	1.9E-1	18.6
Bone Marrow	1.25	2.6E-2	2.1	1.2E-1	9.3	2.2E-1	17.6
Lung	1.25	5.0E-2	4.0	3.0E-1	23.7	5.1E-1	40.7
Thyroid	5.0	8.3E-2	1.7	5.2E-1	10.0	8.7E-1	17.3

격납용기로부터의 누설이 400 분 이전에 끝나는 것은 소듐 화재로 인한 격납용기 돔 내의 산소 소비의 직접적인 결과이다. 따라서, 비활성 기체의 누설율은 0.1%이하로 유지된다.

다른 핵분열 생성물과 핵연료 에어로졸의 격납용기 내 부착으로 인해 이러한 물질들의 외부 누설율은 0.005%로 유지된다.

사고의 결과로 격납용기 외부에 피폭되는 방사선 선량의 크기를 PGA 제한값과 비교하여 표 2.6에 정리하였다.

GE에서 수행한 PRISM 격납 성능 분석에 대한 NRC의 검토 결론(SER 15.6.8.7)은 다음과 같다.

“먼저, GE의 CONTAIN을 이용한 격납 성능 분석의 결과는 합리적인 것으로 보인다. 따라서 현재까지는, PRISM의 격납 돔은 가장 심각한 경우의 소듐 풀 화재를 상당히 여유 있게 감당할 수 있다고 본다. 그러나, 핵분열 생성물의 누설 분율과 부지 경계에서의 피폭 선량에 대해서는 상당한 불확실성이 수반되어 있다. GE는 부지 경계에서의 선량이 PAG(Protective Action Guideline)의 1%에서 40%라고 하였으나, 이러한 결과는 소듐 풀에서 격납 돔으로 빠져 나오는 핵분열 생성물과 연료의 양이 상대적으로 작기 때문이다. 이러한 누설율을 뒷받침해주는 데이터 베이스가 불완전하기 때문에, 예측된 선량은 상당한 공학적 판단(Engineering Judgement)에 의존하고 있으며 따라서 적용하는데 세심한 주의가 필요하다.”

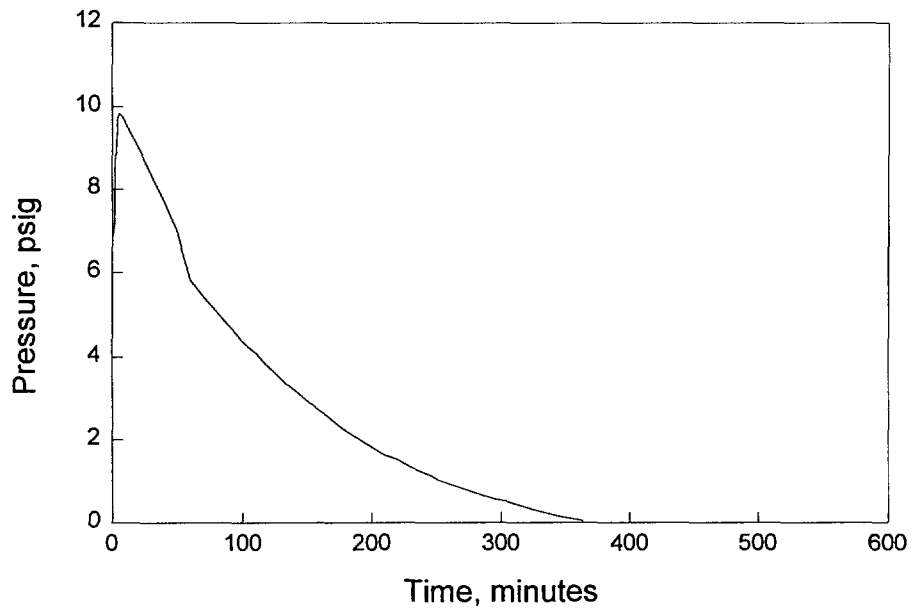


그림 2.16 격납용기 압력

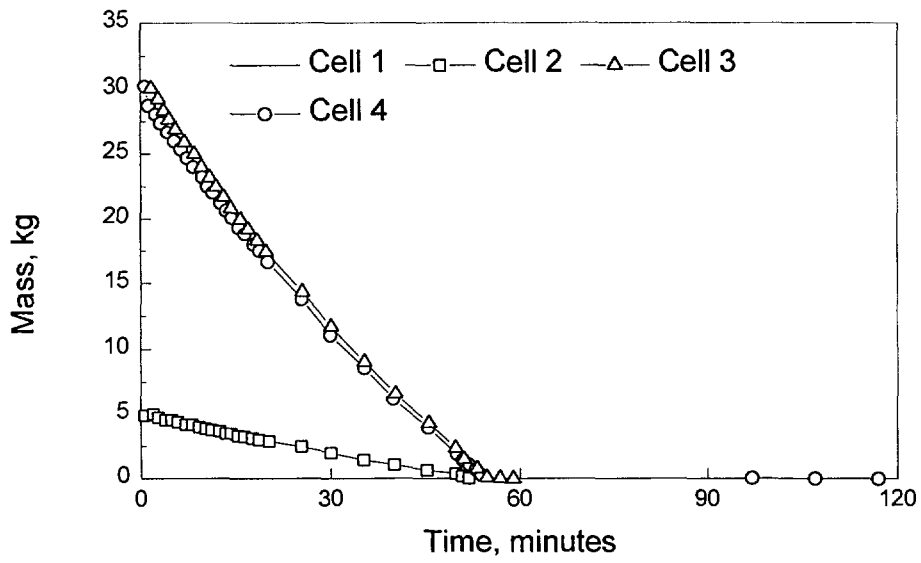


그림 2.17 셀 수증기 질량

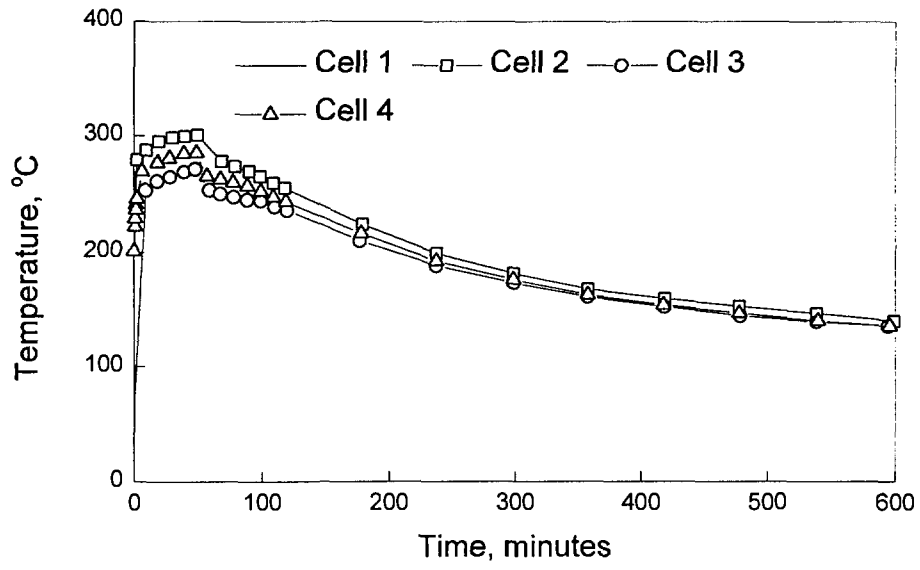


그림 2.18 셀 대기 온도

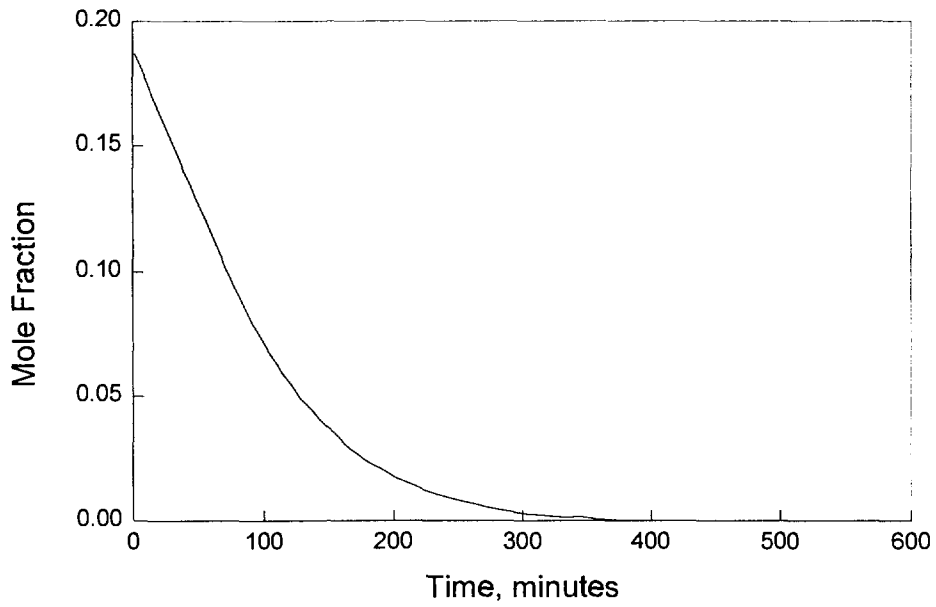


그림 2.19 산소 몰 분율

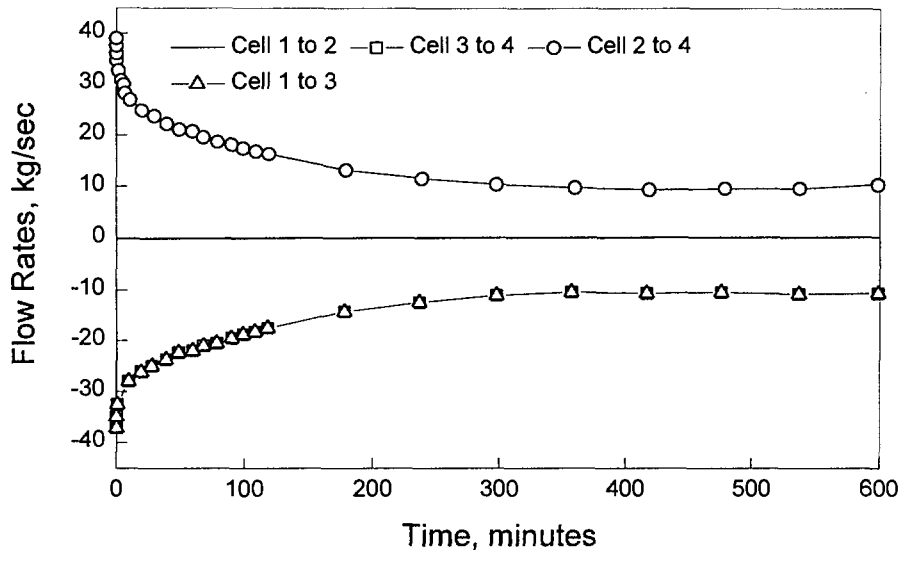


그림 2.20 셀 사이 유량

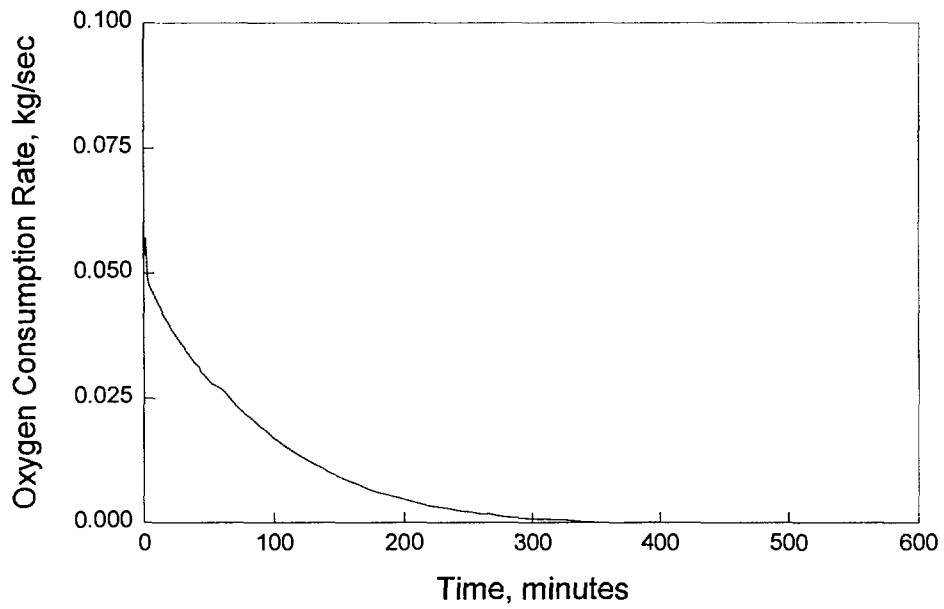


그림 2.21 산소 소비율

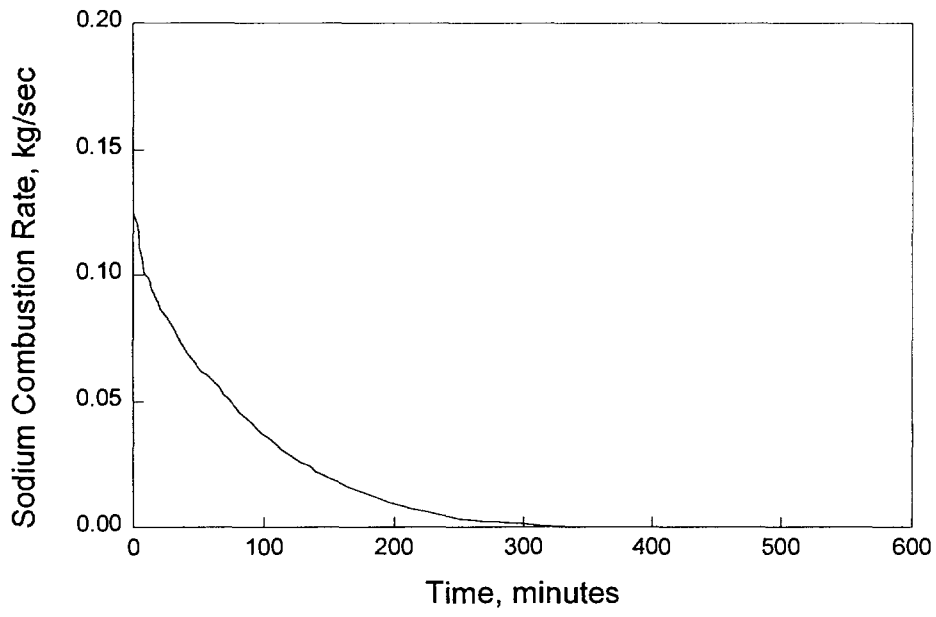


그림 2.22 소듐 연소율

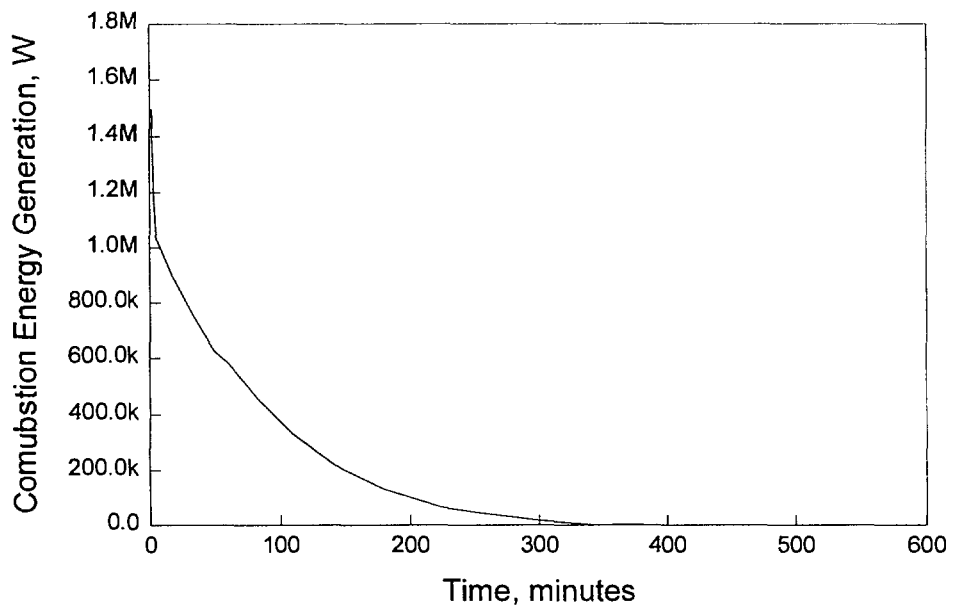


그림 2.23 연소 에너지 생성율

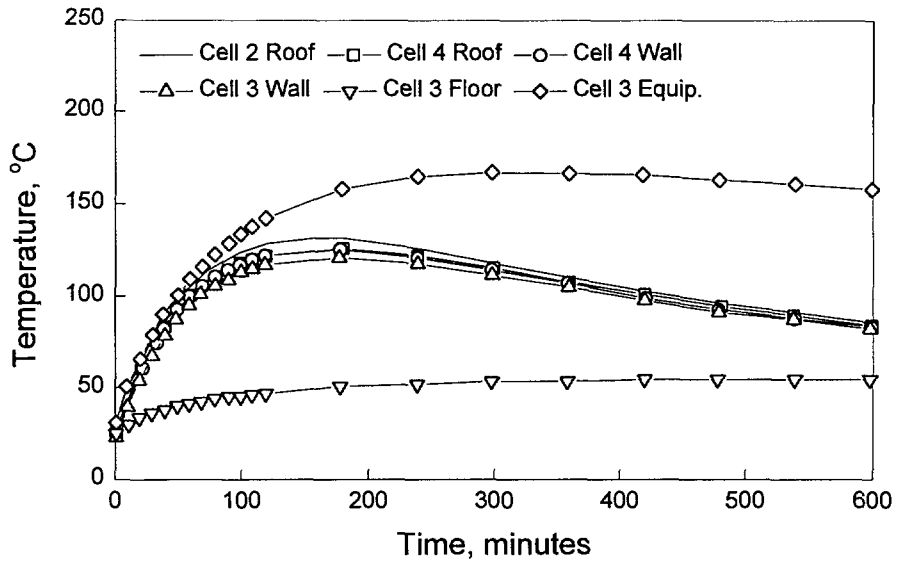


그림 2.24 구조물의 온도

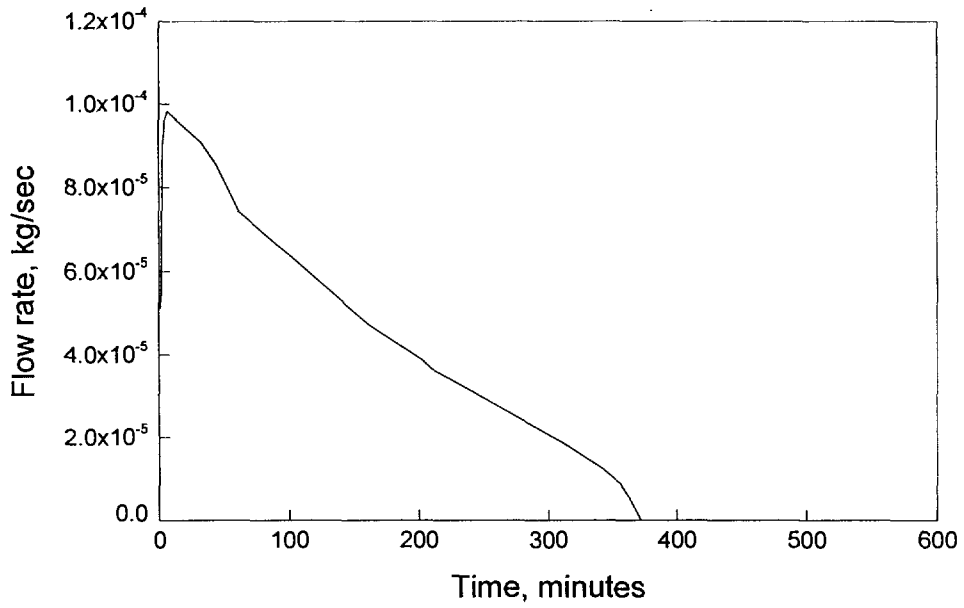


그림 2.25 격납용기 외부 누설율

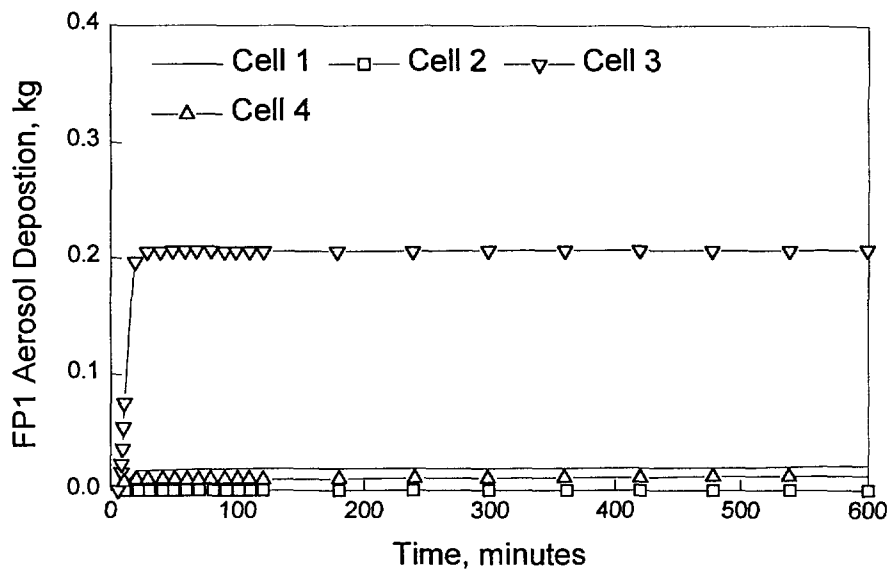


그림 2.26 부착 에어로졸 (소듐 화재 없을때)

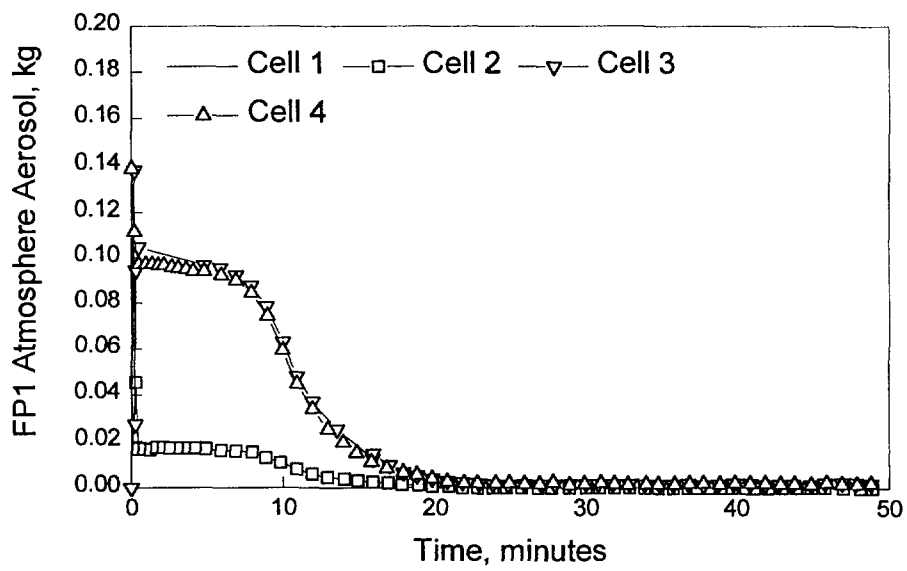


그림 2.27 부유 에어로졸 (소듐 화재 없을 때)

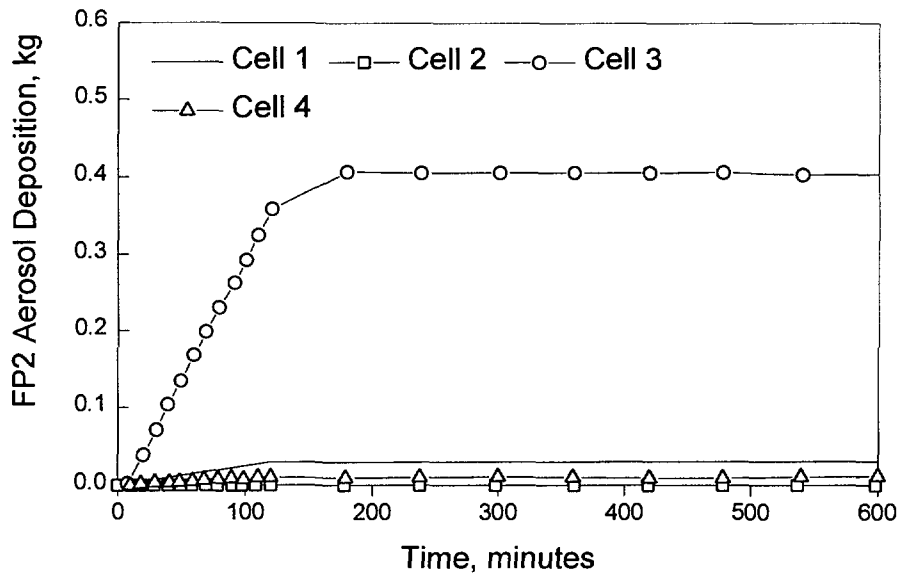


그림 2.28 부착 에어로졸 (소듐 화재시)

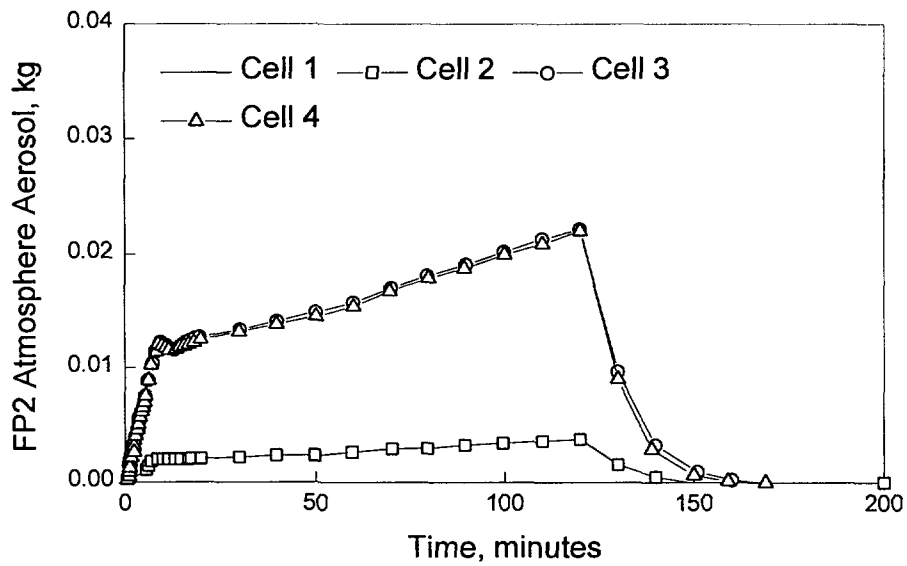


그림 2.29 부유 에어로졸 (소듐 화재시)

제 3 장 격납 성능분석을 위한 코드 체계

제 2 장의 기존 액체 금속로의 격납 성능 분석 방법론의 검토 결과, KALIMER 의 격납 성능 분석을 위해서, CONTAIN-LMR 과 MACCS, 두 가지 코드를 이용하기로 하였다. 본 분석에서는 계산의 편의성을 위해, 두개의 코드를 기존의 워크스테이션 버전에서 IBM-PC 버전으로 바꾸었다.

본 장에서는 이 두 코드들의 간단한 특성 및 모델, 성능 분석 절차등에 대해 소개한다. 그리고 시험 계산을 수행하고, 그 결과와 기존의 결과를 비교하였다.

제 1 절 CONTAIN-LMR 코드

1. 개요 및 모델

CONTAIN 코드는 사고 시 격납용기 대기의 열수력학적 거동 및 원자로로부터 방출되는 핵분열 생성물의 거동을 예측할 수 있도록 개발된 코드이다. CONTAIN-LMR 은 이 CONTAIN 코드를 액체 금속로에 적용할 수 있도록 하여, 액체 금속로에서 격납용기 안전성과 관련하여 중요한 사고인 소듐화재를 해석할 수 있게 만든 것이다.

이러한 격납 성능 분석을 위해, CONTAIN 에서는 격납용기 계통을 서로 연결된(interconnected) 격실 혹은 "셀"들의 네트워크로 다룬다. 이 셀들은 상호간에 질량을 교환할 수 있고, 사이에 있는 구조물에 의한 열전도 또한 일어날 수 있다. 계산의 완벽성을 위해, 격납 건물 외부의 대기가 하나의 셀로 생각될 수 있다. 대기로의 방사성 누출은 이 셀로의 유량으로 나타난다. 각 셀은 두 부분으로 나눌 수 있다: 상부 셀과 하부 셀. 상부 셀은 기체상의 대기 및 이와 접촉하고 있는 열전달 구조물로 이루어지고, 하부 셀은 냉각재 풀, 핵연료 파편(fuel debris), 용융 금속, 용융 콘크리트, 그리고 콘크리트 바닥을 포함할 수 있다. 이 하부 셀은 옵션이며, 어떤 셀은 오직 상부 셀로만 이루어 질 수도 있다.

가. 셀 대기

CONTAIN 에서의 셀 대기 모델은 사고 시 격납용기 대기 거동에 주요한 역

할을 할 것으로 예상되는 현상들을 취급한다. 이러한 현상들에는 열역학, 응축과 증발, 구조물로의 열전달, 에어로졸 거동, 화학반응(즉 수소 연소), 그리고, 셀 간의 기체, 핵분열 생성물, 에어로졸의 유동 등이 포함된다. 이 때, 한 셀 내의 대기는 완전히 혼합되어 있는 상태라고 가정한다. 침전 풀(원자로 공동)이 존재하는 셀에서는, 그 풀이 그 셀의 대기로의 기체, 에어로졸, 열에너지의 중요한 공급원(source)으로 작용한다. 셀 내의 구조물들(바닥, 벽 지붕 등)과 물리적 물체들은 열 공급원이나 제거원(sink)으로 취급된다. 셀 사이의 유로, 하부 셀 모델, 사용자 정의 소스 테이블을 통해 물질들이 그 셀로 더해지거나 제거된다.

(1) 대기열역학(Atmospheric Thermodynamics)

온도, 압력, 엔탈피와 같은 상태 변수들이 평형 열역학에 의해 계산된다. 냉각재의 상 변화 및 외부로부터의 열 공급원과 제거원이 고려된다. 대기로의 열 공급원에는 구조물로부터의 열 전달, 기체 혹은 에어로졸 내의 핵분열 생성물로부터의 열전달, 대기에서의 화학반응에 의한 열, 하부 셀로부터의 에너지, 다른 셀로부터의 유량, 사용자 정의 공급원 등이 포함된다.

(2) 표면 열전달(Surface Heat Transfer)

각 셀에서 임의의 수의 구조물들이 취급될 수 있다. 바닥, 벽, 지붕 뿐만 아니라 펌프나 다른 기기를 감싸는 물체의 표면 등도 그 물체에 가장 가까운 형태를 선택하여 입력함으로써 근사될 수 있다. 입력을 위한 형태에는 평판, 반구, 그리고 반 원통형 등이 있다. 각 구조물은 다른 물질들의 층의 임의의 결합으로 구성될 수도 있다. 한 물체나 구조물의 표면으로 유입되는 열은 저장되는 에너지로 취급될 수도 있고, 이 표면이 다른 셀로의 열전달 면적을 의미하기도 한다. 에어로졸 부착에 의한 핵분열 생성물의 표면 부착에 의한 열도 고려된다.

(3) 표면응축(Surface Condensation)

구조물 표면으로의 응축 또는 표면으로부터의 증발 또한 모델링이 되어있다. 응축/증발율에 영향을 줄 수 있는 구조물의 방향 지향성(spatial orientation)이 입력에 명세된다. 비응축성 기체는 응축성 기체의 표면 확산을 방해하기 때문에 고려된다. 구조물에서의 응축/증발은 에어로졸에서의 응축/증발과 동시에 발생한다.

(4) 복사열전달(Radiative Heat Transfer)

복사 열 전달은 여러 중대사고 시나리오에서 중요하다. CONTAIN 은 구조물에서 셀 대기의 증기, CO, CO₂로의 복사를 단순한 모델로 취급한다. 이 단순한 모델에는 하부 셀에서 구조물로의 복사를 포함할 수도 있다. 좀 더 자세한 해석을 요구하는 문제를 위해, 표면들 사이의 복사가 좀 더 완전한 net enclosure 모델을 이용하여 고려될 수도 있다.

나. 에어로졸 거동

CONTAIN 코드의 주요한 목적중의 하나는 격납용기 파손 사고시의 방사선원 항의 묘사이다. 방출되는 핵분열 생성물은 기체와 풍매(airborne) 에어로졸에 의해 가장 효과적으로 격납용기 내에서 외부 대기로 전달된다. CONTAIN 에서의 에어로졸 모델은 MAEROS 의 모델에 기초를 두고 있는데, 여기서는 에어로졸을 multisectional multicomponent 로 취급한다. Multisection 은 입자 크기의 분포가 이산적이고 따라서 입자의 모양을 가질 수 있다는 것이다. Multicomponent 는 각 입자 크기의 부류가 몇 개의 성분 물질에 대하여 다른 구성을 가질 수 있다는 것이다. 이러한 특징은 부유 에어로졸의 방사성 결과를 평가하는데 중요하다. CONTAIN 에서의 또 다른 특징은 에어로졸에서의 물의 응축/증발이 대기 열역학적 계산과 일관성이 있도록 모델되어 있다는 것이다. 이러한 일관성은 흡습성(吸濕性) 에어로졸 물질이 존재할 때 특히 중요하다.

CONTAIN 에서 에어로졸의 취급은 세 가지 응집작용 (agglomeration)을 포함한다. Brownian, 중력, 그리고 난류. 수증기의 에어로졸에서의 응축/증발 모델은 용해성과 Kelvin 효과를 포함한다. 부가적으로, 4 가지의 부착 과정이 고려된다. 중력 침전, diffusiophoresis, thermophoresis, 그리고 입자 확산.

다. 핵분열 생성물 거동

원자로 노심 내의 핵분열 생성물 재고량의 구성은 power history 와 burn-up 코드의 적용을 통해서 아주 정확하게 결정될 수 있다. 그러나, 노심 용융 사고동안에는 방사성 핵종의 물리적 배치가 아주 불확실하다. CONTAIN 은 원자로 용기 내의 현상을 해석하지 않기 때문에, 초기의 격납용기내의 방사성 물질 재고량의 위치는 사용자 또는 다른 코드에 의해 입력되어야 한다. 이러한 관점에서, CONTAIN에서는 핵분열 생성물 거동의 세 가지 관점이 모델링된다: 전달 (위치를 결정), 붕괴(각 동위원소의 재고량을 결정), 가열(열수력학적 거동과 관련).

(1) 핵분열 생성물 전달(Fission Product Transport)

방사성 핵종의 위치를 결정하기 위해, CONTAIN 은, 이들이 "호스트" 물질에 물리적으로 부착되어 있는 것으로 간주하고 추적한다. 이러한 방법을 쓰는 이유는, 핵분열 생성물의 양이 종종 호스트의 양과 비교해 볼 때 아주 작기 때문이다. 이러한 경우, 폼해 핵분열 생성물의 전달이, 비방사성 기체나 에어로졸 호스트 물질의 움직임의 열수력학적 모델에 의해 지배된다. 요오드 제거를 위해 살수에 의한 mechanistic 모델과 액체 유로에서의 핵분열 생성물 전달을 위한 semi-mechanistic 모델 또한 가능하다. 이러한 mechanistic 한 모델 이외에도 각 핵분열 생성물은 한 호스트에서 다른 호스트로 전달될 수 있다. 전달되는 형태는 호스트의 온도에 따를 수도 있고, 특정한 값을 줄 수도 있다. 이렇게 핵분열 생성물 전달 모델에 유연성을 두는 이유는 핵분열 생성물의 물리적 화학적 형태와 여러 가지 호스트 물질에 대한 친화력에 상당한 불확실성이 있기 때문이다.

(2) 핵분열 생성물 붕괴 및 가열 (Fission Product Decay and Heating)

핵분열 생성물의 붕괴와 호스트 물질의 가열은 CONTAIN 에서 핵분열 체인 물질의 반감기와 power 계수로 모델링 되어 있다. 핵분열 생성물의 parent-daughter 관계는 붕괴 체인 구조를 일련의 선형 체인으로 입력에 명세함으로써 정의된다. 핵분열 생성물의 반감기와 power 계수도 비슷하게 입력에서 정의된다. 핵분열 생성물에 의한 가열은, 각각의 방사성 핵종의 붕괴열이 각각의 호스트 물질에 부착되어 있기 때문에, 열수력과 연관되어 있다. 그러나 각 power 계수를 정할 수 있는 유연성에도 불구하고, 붕괴 열에 의한 가열에 기여하는 모든 방사성 핵종을 자세하게 명세하는 것은 매우 어려운 일이다. 보통, 보전 물리등에 중요한 핵종만이 입력에 명세가 되고, 나머지는 포괄적으로 취급된다. 즉 표준 붕괴열 곡선을 이용하여 총 붕괴열을 계산하고, 여기서 명세되어 있는 핵종에 의한 효과를 감해주면, 나머지는 사용자에게 의해 명세된 위치에 부착되게 된다. 이런 표준 붕괴열 곡선을 이용하면, 계산이 아주 간단해 질 수 있다.

라. 격실 상호간 유동

셀 사이의 유동은 사용자의 입력 또는 압력차에 의한 오리피스 유동으로 모델링된다. 사용자는 인접해 있는 두 셀 사이에 유동을 명세하거나, 유로의 형상을 명세한다. 유로가 열리거나 닫히는 시간도 정해 줄 수가 있다. 또는 시초

(threshold) 압력을 주어 열리게 할 수도 있다. 이러한 트리거(trigger)는 rupture 디스크나 두 기기 사이의 구조장벽의 파손을 묘사할 수 있다. 또한 시간에 따른 그리고 압력에 따른 유로의 특성(즉 면적)이 명세될 수 있어서, 격납용기 파손과 단방향 유량의 실제적인 모델이 가능하다.

유로를 따라 전달되는 물질은 격실 상부 대기 부분이다. 기체상의 핵분열 생성물은 기체의 속도와 같은 속도로 움직인다. 사용자의 옵션으로, 에어로졸은 기체 속도에만 따라 전달되거나, 기초속도와 유로의 축에 평행한 에어로졸 침전 속도의 합에 따라 전달될 수 있다.

유량을 계산하는 데는 두 가지 형태의 해법이 있다. 하나는 explicit Runge-Kutta 방법이고 하나는 implicit 한 방법이다. Explicit 한 방법에서는, 유량에서 관성 효과를 고려하거나, 고려하지 않는 모델을 선택할 수 있다. implicit 한 방법에서는 일차적으로 관성을 고려하지만, 특별한 경우에는 무시한다.

Implicit 한 방법은 그 계산상의 효율 때문에, 대부분의 문제해결에 있어서 선호하는 방법이다. 여러 가지 이유로 해서 어떤 형태에서는 이 방법만이 유효한 경우가 있다. 이러한 경우에는 (1) 중력 유도 기체 유동 (2) 기체 내 물의 응축에 있어서 instantaneous liquid dropout 모델 (3) 임계 유량 (4) 유로를 통한 에어로졸 침전 (5) 유량 방정식과 동시에 푸는 풀 비등 모델 (6) 공학적 배기 옵션 (7) BWR의 억제폴 배기 계통.

공학적 배기는 ENGVENT 라는 입력 블록에 명세되는데, FLOWS 입력 블록에 명시된 일반적인 유로와 대부분 비슷하다. 하지만 몇 가지 옵션을 더 가지게 된다. 일반적인 유로와는 달리, 하나 이상의 공학적 배기가 주어진 셀 쌍에 연결된다.

BWR의 억제폴을 통한 기체, 에어로졸, 그리고 핵분열 생성물의 유량은 건정과 습정을 나타내는 셀 사이의 특별한 유로를 통해 모델링된다. 공학적 배기가 억제폴에 의해 둘러싸이면, 에어로졸과 이에 부착된 핵분열 생성물들이 하향 셀로 유입되기 전에 풀에서 포집된다.

2. 시험 계산

기존 코드를 PC 버전으로 바꾼 뒤 그 설치 타당성을 검토하기 위해, 시험 계산을 수행하였다. 대상은 PRISM-A의 소듐 풀 화재시 격납 성능 분석이다. 분석 결과 워크스테이션용 코드를 수행한 결과와 PC 버전을 수행한 결과는 완전히

일치하였다.

참고적으로, 문헌의 결과와 비교하기 위해, 시험 결과를 PSID의 결과와 비교하였다. 그림 3.1에는 격납 돔의 압력 거동이 PSID의 결과와 비교되어 있다. PSID에 나와있는 분석 결과와 거의 일치함을 볼 수 있다. 다른 변수들도 거의 유사한 거동을 보이는 것을 확인하였다. 따라서, CONTAIN-LMR 코드의 설치 성공적이며, 입력 또한 잘 작성된 것이라고 볼 수 있다.

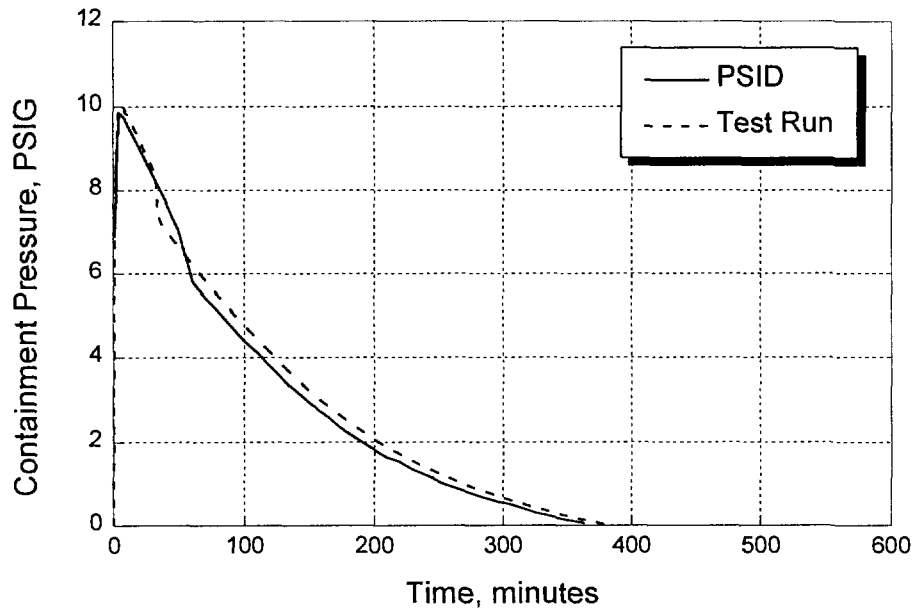


그림 3.1 PRISM-A 소듐 화재 분석 결과 비교

제 2 절 MACCS 코드

1. 개요

MACCS(MELCOR Accident Consequence Code System) 코드는, 방사성 물질이 격납용기 외부 대기로 누출되는 중대사고때, 부지 외에서의 방사성 영향을 평가하기 위한 코드이다. 이런 중대사고가 발생한다면, 방사성 구름 기둥(plume)내의 방사성 기체와 에어로졸들이 대기에 확산되며 바람에 따라 수송된다. 환경은 구름 기둥에서 침전된 방사성 물질에 의해 오염되며, 거주자들이 방사선에 노출될

것이다. MACCS 계산의 목적은, 방호 조치 없는 방사선 피폭에 의한 보건 효과의 확률과 범위와 오염된 환경의 결과로 인한 경제적 비용 및 손실의 평가이다.

MACCS의 조직에는 두 가지 기본적인 관점이 있다. 먼저 사고 후의 시간 척도는 여러 “단계”로 나누어지고 원자로 주위의 지역도 극좌표계에서 여러 부분으로 나뉜다.

본 연구에서는 MACCS 코드를 이용해 주로 발전소 부지에서의 피폭선량을 보고자 한다. 따라서 다음과 같은 입력이 주어져야 한다.

- 사고 발생시(원자로 정지), 발전소 외부 결과 계산에 중요한 영향을 미치는 방사성 핵종(예를 들어 노심의 한 주기의 끝에는 I131의 양이 약 10^{18} Bq)의 재고량.
- 사고에 의해 생산되는 대기의 방사선원 항 (방출되는 방사선 구름 기둥(plume)의 구획(segment)의 수, 현열(sensible heat), 비상조치가 발효되어야 하는 시간, 그리고 각각의 중요한 방사성 핵종에 대해, 각 구름 기둥 구획과 함께 방출되는 그 핵종의 재고량의 분율.
- 발전소 부지 지역의 기상학 데이터 특성들 (대개 1년 동안의 그 부지 또는 가장 가까운 국립 기상대에서 기록된 시간당 풍속, 대기 안전성, 강우량). 이상의 데이터를 가지고 MACCS에서 다음이 평가된다.
- 파손된 격납용기로부터 외부 환경으로 방출되는 방사성 물질의 순풍에 의한 전달, 분산, 그리고 침전.
- 직접(cloudshine, 구름기둥, 호흡, groundshine, 그리고 재부유에 의한 호흡)적인 그리고 간접적인(섭취) 경로를 통해 피폭된 인구가 받는 단기와 장기적인 방사선량.

2. 시험 계산

MACCS 코드의 설치 및 계산 타당성을 위해, 시험 계산이 행해졌다. 대상은 PRISM-A에서의 소듐 폴 화재에 의한 방사성 물질의 격납 돔 외부로의 누출시 발전소 부지 경계에서 사람이 받는 피폭량의 계산이다. 그 결과는 다음의 표 3.1

표 3.1 PRISM-A에 대한 MACCS 시험 계산과 PSID의 비교

기관	PSID	시험 계산	PAG	10CFR
전신	0.19	0.11	1.0	25
골수	0.22	0.11	1.25	150
폐	0.51	0.11	1.25	75
갑상선	0.87	0.13	5.0	300

과 같다.

계산 결과가 PSID와는 다르게 나타났는데, 이는 시험 계산에 도입된 발전소의 데이터, 부지 데이터 및 기상 데이터가 PSID와는 다르기 때문인 것으로 생각된다.

제 4 장 KALIMER 격납 개념 설정

제 1 절 예비 개념

기존 격납 개념 안의 검토를 통해, KALIMER의 격납용기의 형태는 예비적으로 단일 격납용기 개념으로 선정하였다. 그 이유는, 먼저 여러 가지 안전 설계의 도입으로 HCDA의 발생 확률이 지극히 낮아졌고, 설사 발생하더라도, 원자로 용기의 파손 없이 그 에너지를 감당할 수 있을 것으로 보임으로 격납 계통이 그다지 복잡할 이유가 없다고 판단했기 때문이다.

KALIMER의 격납 개념은 기본적으로 PRISM의 개념과 유사하게 원자로 용기를 감싸는 하부 격납용기와 상부의 격납 돔으로 이루어진다.

격납 용기의 예비 설계 변수들이 다음 표에 정리되어 있고, 개념도가 도시되어 있다.

KALIMER의 예비 격납성능은 다음과 같은 순서로 분석한다.

- 1) 노심해석코드의 결과 또는, 기존의 데이터를 이용하여, 평형 노심에서의 각종 방사성 핵종들의 재고량을 결정한다.
- 2) 선택된 예비 격납 개념에 대해, CONTAIN-LMR을 이용하여, 사고시 열수력학적인 격납성능을 분석한다. 이때 격납용기내의 압력/온도 및 누설율, 그리고 각 핵종 및 에어로졸의 거동이 분석된다.

표 4.1 KALIMER 예비 설계 변수

설계 변수		설 명
모 양 (shape)		원통형 + 반구형
형 태 (Type)		단일 격납용기
재 질 (Material)		탄소 강 (SA516 Grade 70)
설 계 압력/온도		134.4kPa/645K
체 적		1111.4m ³
설계 누설율		1%(vol.)/day at design condition
상 부 돔	높 이	3.67m
	직 경	7.32m
	두 께	3.81cm
하 부 돔	높 이	3.67m
	직 경	14.63m
	두 께	2.54cm

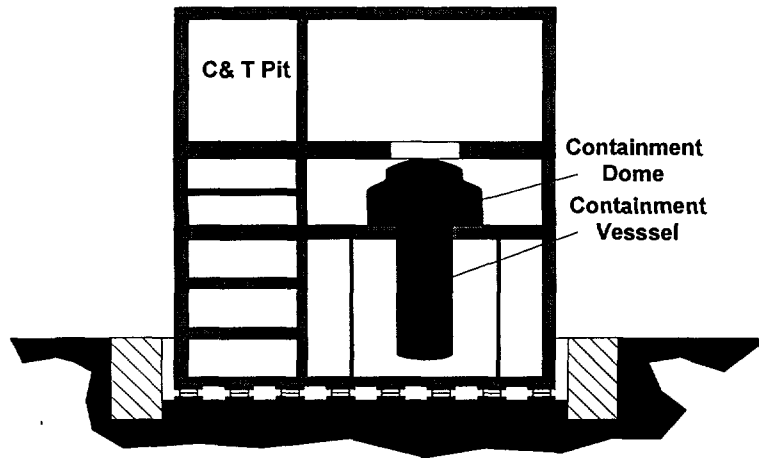


그림 4.1 KALIMER Containment

- 3) 각 핵종의 격납용기 외부로의 누설량을 이용하여, 각종 정보들과 함께, MACCS 코드를 이용해서 발전소 부지에서의 피폭선량을 계산한다.

제 2 절 DBA 선정

KALIMER 는 액체 소듐을 냉각제로 사용하는 액체 금속로이다. 따라서, 격납용기의 건전성에 악영향을 미칠 가능성이 있는 사고는 격납용기 대기에 소듐이 노출되어 연소 되는 소듐 화재 사고이다. 소듐이 연소 되면서 방출하는 에너지는 격납용기를 가압 시키고, 일차 계통의 소듐이 격납용기 대기로 빠져 나오기 때문에 노심내의 방사성 핵종들이 같이 빠져 나오고, 이들이 격납용기 외부로 누설된다. 따라서 소듐 화재 사고는 격납용기의 건전성 측면 뿐만 아니라, 궁극적인 발전소의 안전성 측면에서도 중요하게 고려되어야 한다. KALIMER 에서 일차 소듐이 격납용기 대기와 접촉 할 수 있는 가능성 중에서 가장 위험한 경우는 원자로 용기 헤드부위의 파손으로 인한 경우이다. 그리고, KALIMER 에서 원자로 용기의 헤드가 파손될 만한 사고는 HCDA 에 의한 경우가 유일하다. 이때 HCDA 의 에너지에 따라 헤드의 파손 양상이 달라지고 이에 따라 발생하는 소듐화재의 특성도 다르게 된다. 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

먼저, HCDA 에 의한 에너지가 아주 크고, 원자로 용기 헤드의 취약한 부분에 국부적인 압력을 가한다면, 비교적 미세한 틈이 생길 것이고, 이 틈을 통해 여분의 에너지에 의해 소듐의 분사가 격납용기 대기로 이루어 질 것이다. 이때에는 소듐 스프레이 화재가 발생하게 된다. 반면에 헤드에 가해지는 에너지가 비교

적 균일하다면, 미세한 틈 대신 에너지의 크기에 따라 비교적 큰 구멍이 만들어지게 되며, 소듐의 분사는 없을 것으로 생각된다. 이때에는 격납용기의 공기가 커버 가스 영역으로 들어와서 소듐의 표면과 접촉하게 되고, 결과적으로 소듐 풀 화재가 발생할 것이다.

아직 HCDA 에 대한 정확한 분석이 이루어지지 않은 상태이므로, 여기서는 두 가지의 화재를 모두 설계 기준 사고로 고려하여 분석하였다.

제 3 절 방사선원 항 결정 및 사고 시나리오

KALIMER 를 위한 방사선원 항을 결정하기에 앞서, 기존 경수로에 적용되고 있는 방사선원 항 결정 방법인 TID-14844 의 내용은 다음과 같다.

“MCA(Maximum Credible Accident)시 핵연료에 존재하는 핵분열 생성물 중에서 100%의 불활성 기체, 50%의 할로겐 원소(옥소), 1%의 고체 핵종이 격납용기 내 대기중으로 방출되고 이들은 다시 격납용기의 설계 누설율로 주위 환경으로 방출된다.”

실제적으로, 사고시 노심내 핵종들의 누설 분율을 결정하려면, 여러 가지 복잡한 물리적 요인들을 고려하여 접근을 해야 하나, 그 분석 방법론이 완벽하지 못하고, 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에, 지금까지는 TID-14844 의 방법을 따라왔다. 하지만 여기에는 누설 분율이 너무 보수적으로 정해져 있어 현실성이 거의 없다는 판단아래, 어느 정도 보수성을 지니고 있지만, 실제 현상을 반영할 수 있는 방법이 제시되었다. PRISM 의 격납 성능 분석에서 쓰인 방법은 억제 인자(Retention factor)에 의해 방사선원 항을 결정하는 것이다. KALIMER 에서도 이와 같은 방법으로 노심내 방사성 핵종의 누설 분율을 결정하였다.

HCDA 가 발생하면, 노심은 완전히 녹아 소듐 풀 내에 균일하게 분포한다고 가정한다. 이때, 소듐 화재가 발생하면 소듐이 연소하여 에어로졸을 형성하며, 격납용기 외부로 빠져나간다. 방사성 핵종들도 에어로졸과 함께 빠져 나오는데, 그 비율은 각 핵종들의 물리적 및 화학적 성질에 따라 달라지게 된다. 그런데 각 핵종별로 누설율을 결정하는 것이 어려우므로, 화학적 성질에 따라 핵종들을 몇 개의 그룹으로 나누고, 각 그룹의 억제 인자를 실험으로 구하여 방사선원 항 설정에 반영한다. 즉 어느 그룹의 억제 인자는 소듐 에어로졸에 포함되어 있는 그 핵종 그룹의 양에 대한 소듐 풀내에 억제되어 있는 양의 비로서 표현된다. 억제 인자가 크면 클수록 그 핵종 그룹은 소듐 풀 내에 억제되기 쉬운 것이다. 표 4.2 에는 PRISM 의 방사선원항 결정에 사용된 핵종 그룹과 그에 따른 억제 인자

표 4.2 핵종별 억제 인자의 값

억제 인자	값
할로겐 (I, Br)	0.5
Cs, Rb	0.25
Ru, Te, Rh	100
Sr, Ba, 희토금속	250
핵연료 및 악티나이드	500

의 값이 나열되어 있다.

소듐 풀 화재 발생시의 방사선원 항을 살펴보면 다음과 같다.

HCDa 에 의해 원자로 헤드에 구멍이 생기면, 최초 얼마간은 커버 가스가 격납용기 대기로 빠져나가므로, 소듐 화재가 발생하지 않는다. 이때 이 영역에 존재하던 핵종들의 일정 비율도 같이 빠져나가게 된다. 본 분석에서는 이 시간을 10 초로 보고, 빠져나가는 핵종의 비율은 PRISM 에서와 같은 값으로 주었다. 이후 커버 가스가 빠져나간 부분에 공기가 들어오게 되면 소듐 풀 화재가 발생한다. 이 과정에서 소듐 에어로졸이 생성되고 핵종들이 빠져나가는데, 빠져나가는 양은 앞서 제시한 억제 인자와 연소된 총 소듐의 양, 그리고 초기 소듐 풀내의 액체 소듐 양을 고려하여 계산하게 된다. 그 결과가 표 4.3 에 제시되어 있다. 소듐 풀 화재시 연소되는 소듐의 총량은 격납 돔의 부피에 따라 달라지겠지만, 본 분석에서는 PRISM 과 같은 크기의 격납 설계를 도입했으므로, 총 연소량을 PRISM 과 같은 770kg 정도로 보고 누설분율을 결정하였다.

소듐 스프레이 화재시의 방사선원항도 풀 화재와 유사하게 정의할 수 있다. 즉 격납용기로 분사되는 소듐의 양과 억제인자를 고려하여 핵종들의 누설율을 결정하였다. 이때, 초기 단계, 즉 커버가스가 빠져 나오는 시간은 풀 화재와 마찬가지로 10 초로 가정하였다. 그러나, 소듐의 분사는 아주 짧은 시간내에 이루어질

표 4.3 소듐 풀 화재시 KALIMER 격납 성능 분석을 위한 방사선원 항

Item	Magnitude	
	Early phase	Sodium fire phase
Noble gas (Xe, Kr)	100%	0%
Halogens (Br, I)	0.1%	0.37%
Alkali metals (Cs, Rb)	0.1%	0.73%
Te, Ru	0.1%	0.0018%
Sr, Ba	0.01%	0.00073%
Fuel & other fission products	0.01%	0.00037%
Na22, Na24	None	0.18%

것이라고 생각되므로, 본 분석에서는 이 시간을 1 초로 가정하였다. 그리고, 분사되는 소듐의 양에 대한 민감도를 보기 위해 분사되는 소듐의 양이 50, 75, 100kg 일때, 격납 성능 분석을 행하였다. 소듐 스프레이 화재시의 방사선원항이 표 4.4에 나타나 있다.

스프레이 화재 현상에 대해, 다시 생각해보면, 풀 화재와는 달리 원자로 헤드에 구멍이 생기면, 초기 단계가 없이 바로 소듐의 분사가 일어날 가능성이 높다. 그리고, 풀 화재와는 달리 소듐이 격납 돔에서 연소하는 것이므로, 억제인자가 풀 화재와는 다를 것으로 예상된다. 따라서, 한가지 시나리오와 방사선원 항을 더 정의하였다. 즉, 표 4.4의 마지막 경우처럼, 초기 단계는 없고, 억제 인자가 모두 1인 경우이다.

제 4 절 예비 격납성능 분석

앞서 정의된 방사선원 항을 이용하여 격납 성능 분석을 수행하였다. 분석에 사용된 격납 돔의 설계 변수 및 초기 조건들은 표 4.5와 같다.

1. 소듐 풀 화재

먼저, 소듐 풀 화재가 발생했을 때, 격납 돔의 열수력학적 거동 및 에어로졸의 거동을 CONTAIN-LMR을 이용하여 분석하였다. 이때, 격납 돔의 부피에 따른 주요 변수들의 민감도를 보기위해, 격납 돔의 부피를 기본 설계의 80%, 120%로 변화를 주면서, 민감도 분석도 병행하였다.

기본적인 모델링은 PRISM의 경우와 같이 하였다.(그림 2.15 참조) 다만 소

표 4.4 소듐 스프레이 화재시 KALIMER 격납 성능 분석을 위한 방사선원 항

Item	Magnitude				
	Early phase	Spray fire phase	Spray fire phase	Spray fire phase	Spray fire Phase
	0~10sec	10~11sec	10~11sec	10~11sec	0~1sec
Material released to containment dome					
Noble gas (Xe, Kr)	100%	0%	0%	0%	100%
Halogens (Br, I)	0.1%	0.024%	0.034%	0.046%	0.118%
Alkali metals (Cs, Rb)	0.1%	0.046%	0.071%	0.095%	0.118%
Te, Ru	0.1%	0.00012%	0.00018%	0.0024%	0.118%
Sr, Ba	0.01%	0.000048%	0.000071%	0.000095%	0.0218%
Fuel & other FPs	0.01%	0.000024%	0.000036%	0.000048%	0.0218%
Na22, Na24	None	0.012%	0.018%	0.024%	0.018%
Burned sodium	None	50kg	75kg	100kg	75kg

돔 풀의 지름을 KALIMER 설계인 6.92m 로 변경하였다.

격납 돔의 압력 거동은 그림 4.2 와 같다. PRSIM 의 경우와 유사하지만, 첨두압력이 11.9psig 로서, 다소 높게 나타났다. 이는 소듐 풀의 면적이 PRISM 보다 넓기 때문에, 소듐 화재시 소듐의 연소율이 더 높기 때문이다. 그림에서 약 30 분 정도에 보이는 섭동은 이 시간에 소듐-물 반응이 끝나서, 에너지 생성원 중의 하나가 없어졌기 때문이다. 이는 그림 4.3 에서 볼 수 있다. 그리고, 격납 돔의 부피를 20% 늘이면(Case 1), 첨두 압력은 11.3psig 로 줄었고, 80%로 줄이면(Case 2), 12.6psig 로 증가하였다. 이때, 첨두 압력이 발생하는 시간은 부피가 클수록, 지연되는 것을 볼 수 있다. 그림 4.4 에는 격납 돔의 온도 변화가 나타나 있다. 첨두 온도는 400°C 미만인것을 볼 수 있고 돔의 부피가 커질수록 낮아진다.

시간에 따른 산소 몰 분율의 변화가 그림 4.5 에서 보여지고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 약 300 분 내외에서 산소의 몰 분율이 0 이 되는 것을 알 수 있다. 이는 이 시간에 소듐 화재가 끝남을 알려준다. 즉 화재 발생 지속시간은 격납 돔의 부피에 따라 약 5 시간에서 6 시간 사이가 된다.

사고 진행 과정 중, 격납 돔 내에는 대류가 형성된다. 즉 소듐 풀 부분에서는 뜨거워진 기체 등이 위로 상승하고(Cell 1 에서 Cell 2), 상승한 공기 및 에어로졸은 격납 돔 벽을 타고 내려오면서 냉각되게 된다(Cell 2 → Cell 3 → Cell 4 → Cell

표 4.5 예비 KALIMER 격납성능 분석을 위한 설계 변수 및 초기 조건

Design parameters	
Containment dome	
Volume	1111.4m ³
Inner diameter	14.63m
Initial temperature	38°C
Initial pressure	0psig
Relative humidity	100%
Design pressure	25psig
Design temperature	370 °C
Sodium pool	
Mass	421,000kg
Inner diameter	6.92m
Temperature	485°C
Cover gas region	
Volume	90.3m ³
Inner diameter	6.92m
Initial pressure	16.9psig
Initial temperature	485 °C
Gas material	He
Outside environment	
Temperature	25 °C

1). 그림 4.6 에서는 Cell 1 에서 Cell 2 로의 유량이 나타나 있다.

그림 4.7 부터 그림 4.9 까지는 소듐 폴 화재로 인한 산소의 소비율, 소듐의 연소율, 그리고 소듐이 소비됨에 따라 발생하는 에너지의 생성율이 부피를 민감도 변수로 하여 도시되어 있다. 모두 비슷한 양상을 보여주며, 부피가 커질수록 그 비율이 커짐을 알 수 있다.

그림 4.10 에는 격납 돔 내의 구조물의 온도 중, Cell 4 의 지붕의 온도변화를 보여 준다. 전반적으로 약 150 분 정도까지는 상승하다가, 그 이후에는 감소하는 양상을 보여준다. 격납 돔의 부피가 커질수록, 침투 온도에 도달하는데 걸리는 시간은 지연되지만, 그 이후 온도가 감소하는 비율은 더 빨리 나타난다. 이는 격납 돔 외부로의 열전달 면적이 더 커지기 때문인 것으로 생각된다.

그림 4.11 에는 시간에 따른 격납 돔 외부 누설율이 도시되어 있다. 압력과 비슷한 거동을 보이며 400 분 내외에서 누설율이 0 이 되는 것을 볼 수 있다.

그림 4.12 부터 그림 4.15 까지는 Base case 에 대해, 에어로졸의 거동들을 각 Cell 별로 도시하였다. 그림 4.12 와 4.13 에는 초기 단계 즉 소듐 화재가 발생하기 전에 격납 돔으로 빠져나온 핵종들을 포함하는 에어로졸의 시간에 따른 구조물로의 부착(Deposition), 및 부유(Suspension) 정도를 나타낸 것이다. 부착되는 에어로졸의 양은 약 20 분이 지나면 변화가 없고, 부유하는 에어로졸의 양은 20 분이 지나면 0 이 됨을 알 수 있다. 즉, 초기에 빠져나온 핵종들은 약 20 분이 지나면, 격납 돔 내의 구조물에 부착되거나, 외부로 빠져나가게 됨을 알 수 있다. 그림 4.14 와 4.15 에서는 소듐 화재 진행중의 에어로졸 거동을 나타내고 있다. 약 150 분 정도에서 격납 돔 내의 모든 에어로졸들이 구조물에 부착되거나 외부로 빠져나감을 알 수가 있다.

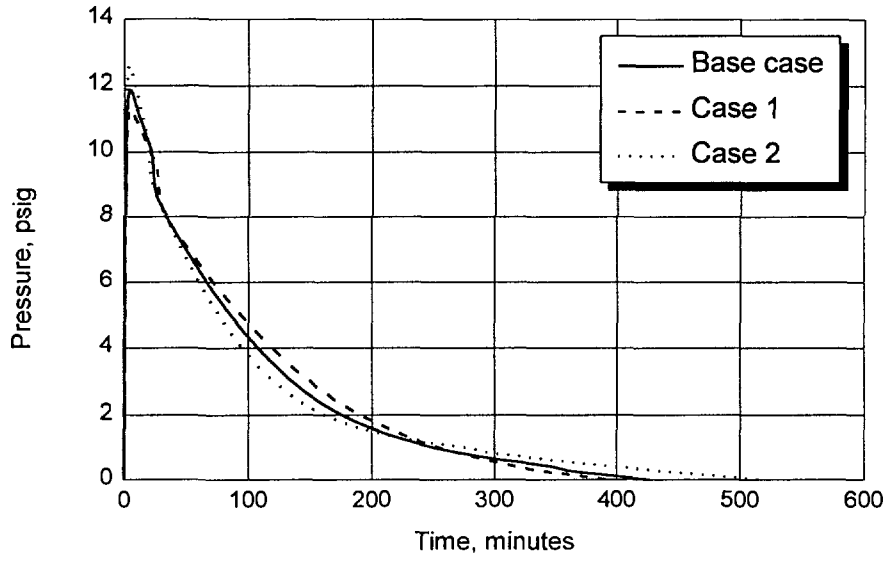


그림 4.2 소듐 풀 화재시 격납 돔의 압력

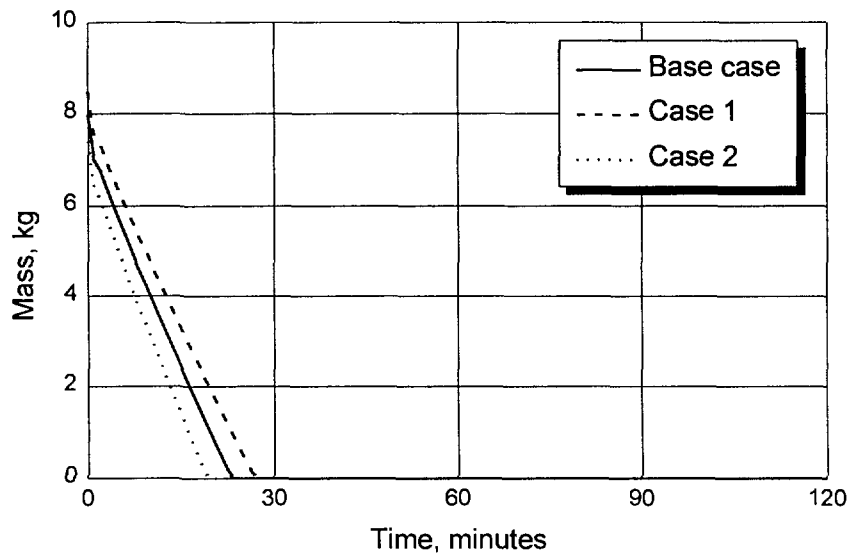


그림 4.3 소듐 풀 화재시 Cell I 의 수증기 질량

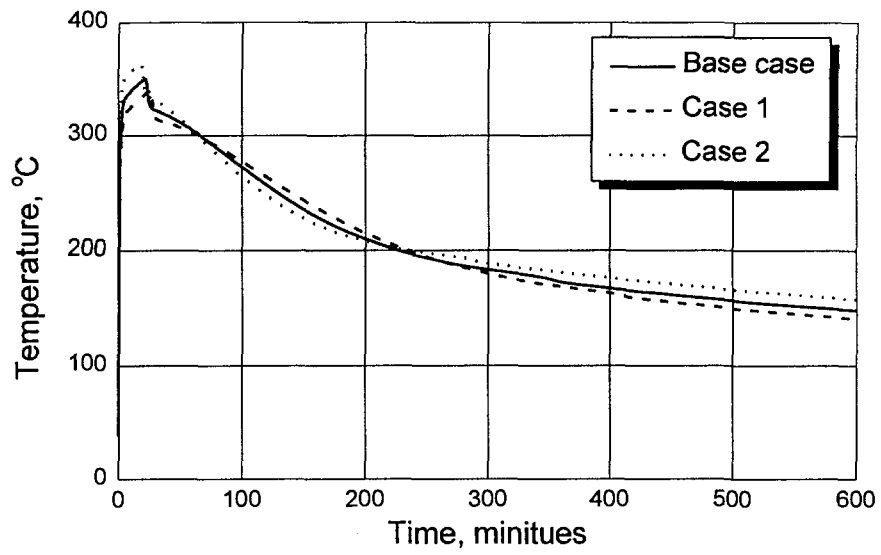


그림 4.4 소듐 폴 화재시 격납 돔 온도(Cell 1)

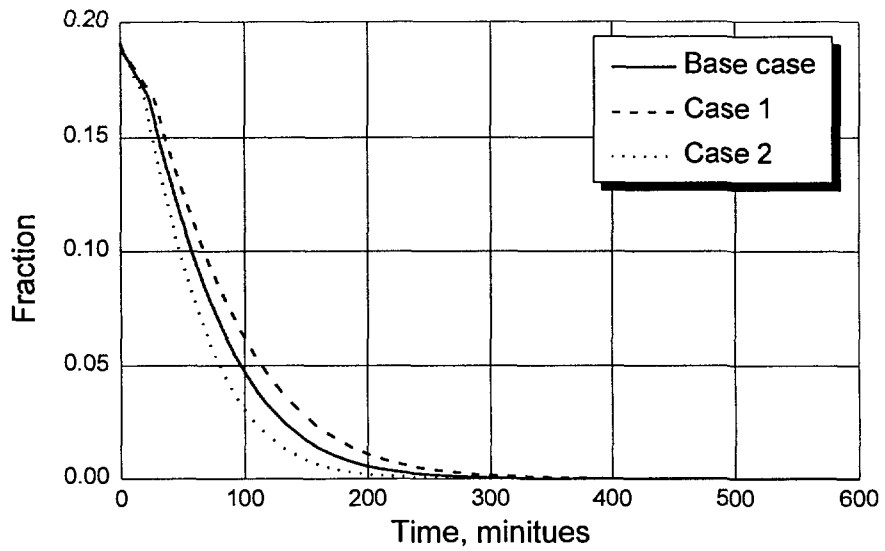


그림 4.5 소듐 폴 화재시 격납 돔 산소 물 분율(Cell 1)

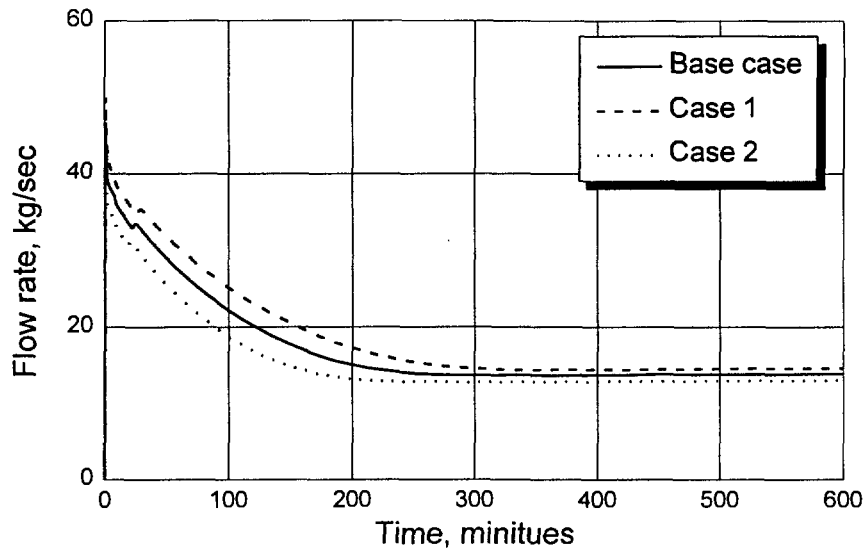


그림 4.6 소듐 풀 화재시 격납 돔 내의 유량(Cell 1에서 Cell 2)

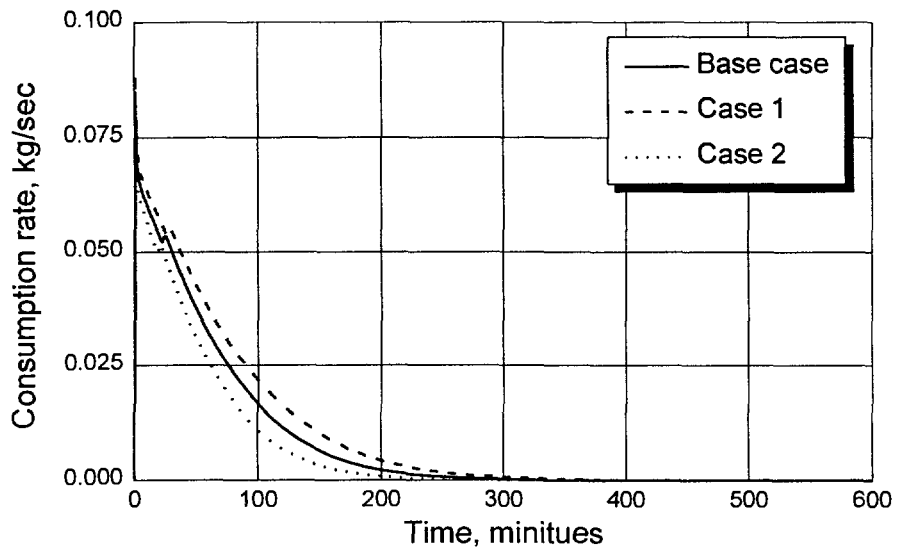


그림 4.7 소듐 풀 화재에 의한 산소 소비율

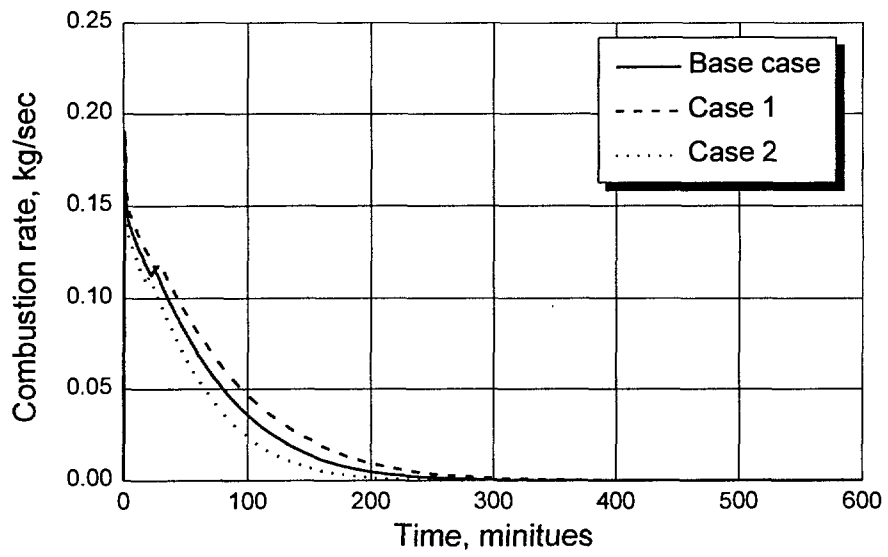


그림 4.8 소뚝 풀 화재에 의한 소뚝 연소율

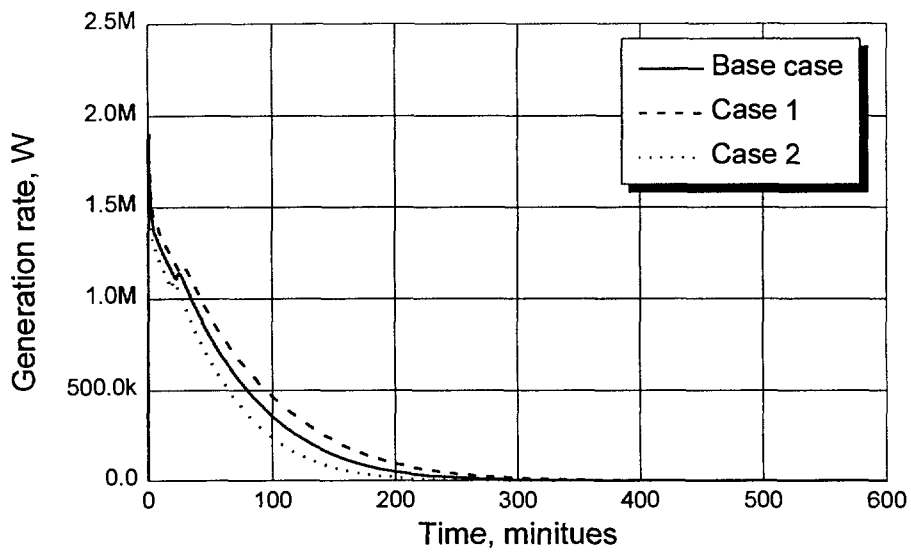


그림 4.9 소뚝 화재에 의한 에너지 생성율

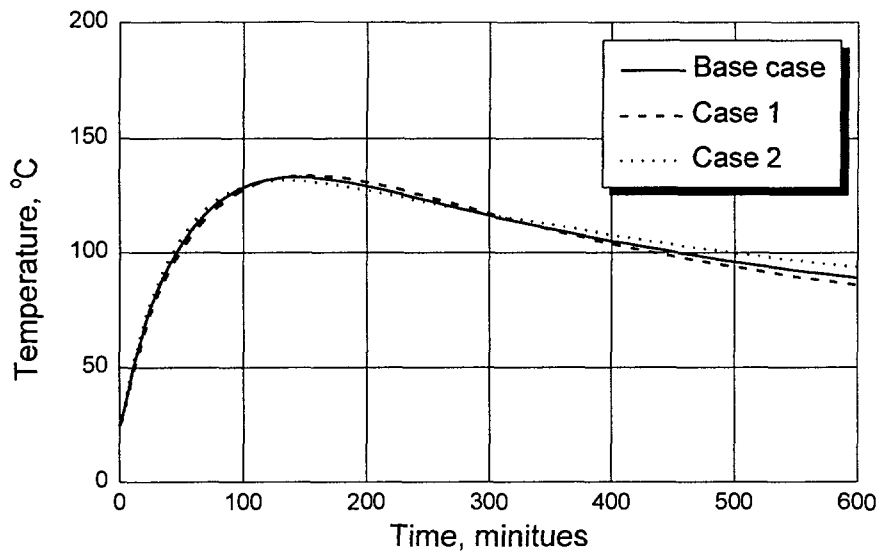


그림 4.10 소담 풀 화재시 구조물의 온도, (Cell 4 의 지붕)

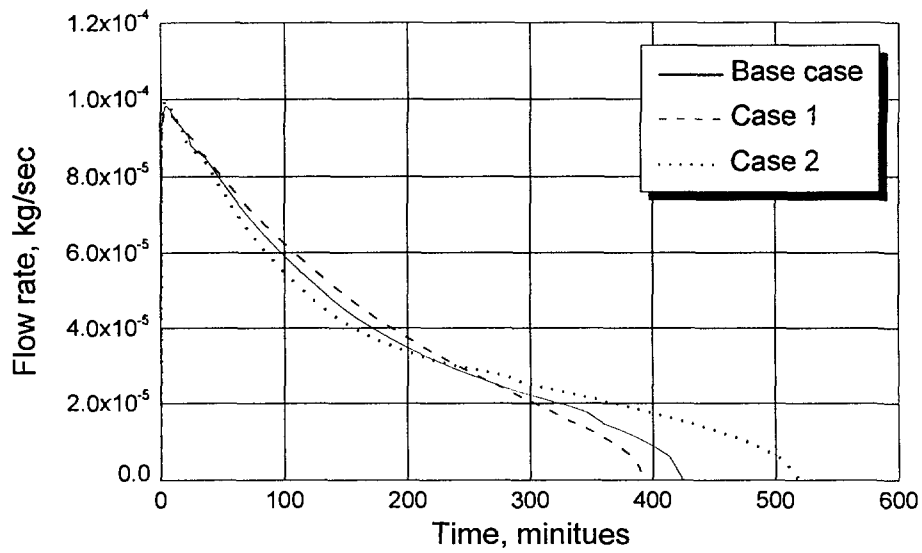


그림 4.11 소담 풀 화재시 격납 돔 외부 누설율

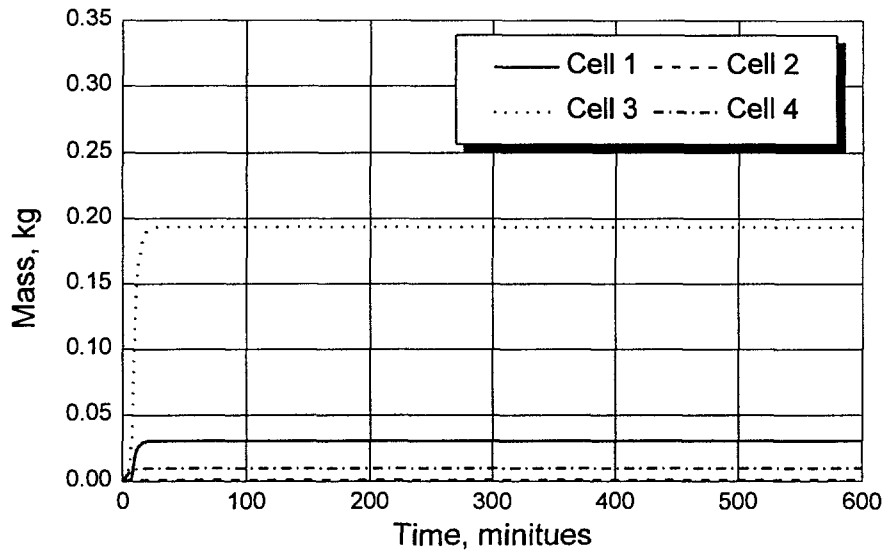


그림 4.12 소듐 화재시 구조물에 부착되는 에어로졸의 양 (소듐 화재 없을 때)

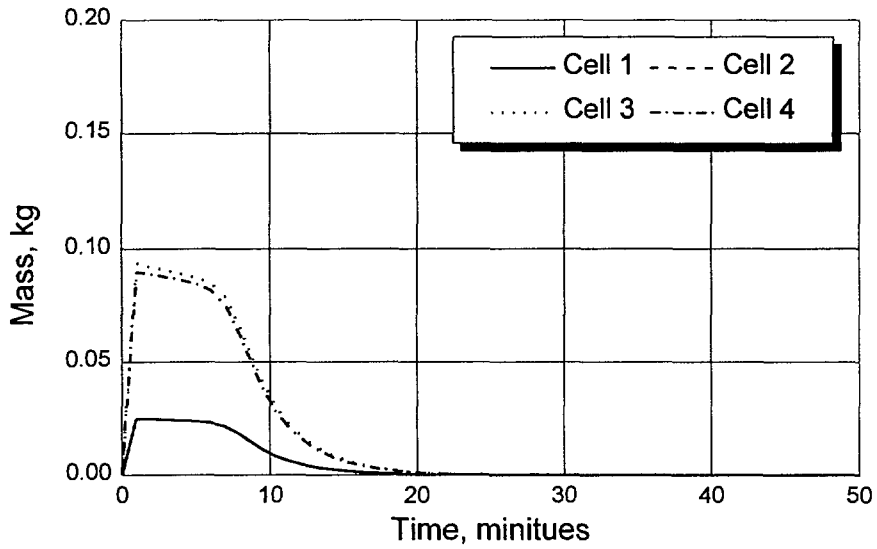


그림 4.13 소듐 화재시 대기중에서 부유하는 에어로졸의 양 (소듐 화재 없을 때)

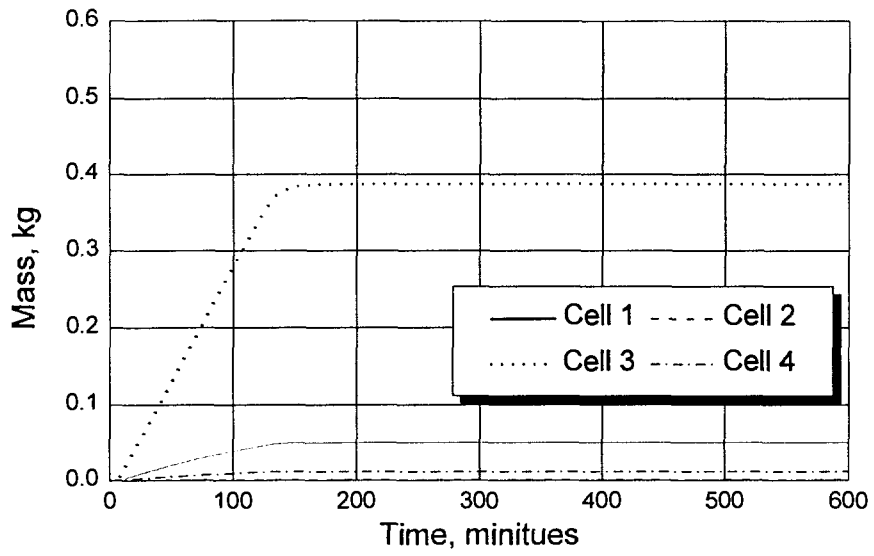


그림 4.14 소듐 화재시 구조물에 부착되는 에어로졸의 양 (소듐 화재시)

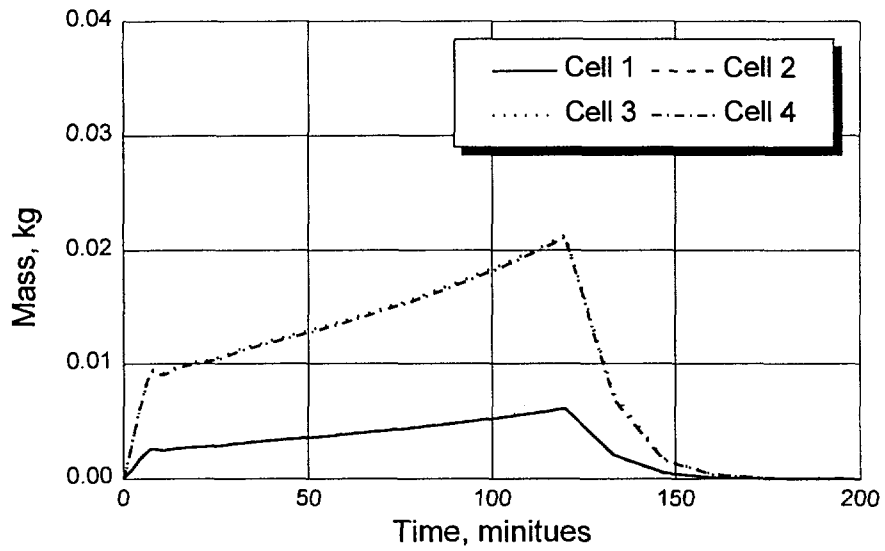


그림 4.15 소듐 화재시 대기중에서 부유하는 에어로졸의 양 (소듐 화재시)

2. 소듐 스프레이 화재

소듐 스프레이 화재시의 격납 돔의 모델링은 그림 4.16 과 같다. 풀 화재시의 모델링과는 달리 격납 돔 전체를 하나의 셀로 모델링 하였는데, 그 이유는 다음과 같다.

풀 화재의 경우, 소듐의 연소는 소듐 풀의 표면에서만 발생한다. 이로 인해, 그 주위의 대기가 뜨거워지면서, 자연 대류를 형성하게 된다. 즉 격납 돔내의 열 전달 메커니즘이 주로 대류로 이루어지므로, 이를 반영하여 격납 돔의 노드를 구분해야 한다. 따라서 그림 2.15 와 같이 모델을 하게 되었다. 하지만, 스프레이 화재에서는, 소듐이 격납 돔 대기로 직접 분사되어 연소되므로, 에너지가 격납 돔 대기로 직접적으로 전달되게 된다. 따라서 이를 반영하여, 격납 돔을 하나의 셀로 모델링하였다.

이 모델을 CONTAIN-LMR 코드에 구현하고, 앞에서 정의된 방사선원 항을 이용하여 격납 성능 분석을 수행하였다. 결과는 75kg 의 소듐 스프레이 화재에 대한 분석 결과 그림을 주로 도시하고, 나머지에 대해서는 주요 변수에 대해 비교하는 그림을 도시하였다.

먼저 커버 가스 영역과 격납 돔의 압력 변화는 그림 4.17 과 같다. 격납 돔의 압력은 급격하게 상승하여 거의 설계 압력까지 접근하였다가, 다시 감소하는 경향을 보인다. 커버 가스 영역의 압력은 0.2 분까지는 감소율이 다소 크지만 그 이후부터 약 2 분까지는 감소율이 둔화된다. 이는, 처음 0.2 분까지는 커버 가스 영역에서 격납 돔으로 유량이 빠져나가기 때문에 압력이 빨리 감소하지만, 그 이후에는 유동의 방향이 역전되어 돔에서 이 영역으로 공기가 주입되기 때문이다. 그리고 약 5 분에서 7 분 사이에 곡선에 극대가 형성되는데, 이는 주입된 공기에 의한 소듐 풀 화재의 영향 때문이다. 10 분 이후에는 두 영역의 압력이 같아지면서 감소하여 약 200 분 후에는 대기압으로 떨어진다.

그림 4.18 에는 격납 돔 내의 수증기 질량의 변화가 나타나 있다. 풀 화재때와는 달리 수증기가 완전히 없어지지 않는다. 이는 75kg 의 소듐에 의한 반응으로는 수증기가 모두 반응하지 않기 때문이다.

그림 4.19 에는 격납 돔 대기와 커버 가스 영역의 온도 변화가 도시되어 있다. 압력의 변화와 유사하게 스프레이 화재가 발생하면 급격하게 증가하였다가 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 4.20 에는 산소 몰 분율이 나타나 있다.

그림 4.21 에는 커버 가스 영역에서 격납 돔으로의 유량이 나타나 있다. 초기에는 커버 가스 영역에서 격납 돔으로 유량이 형성되다가, 스프레이 화재가 발생하여, 격납 돔의 압력이 급격히 증가하면서, 유량의 방향이 역전되어, 커버 가스 영역으로 격납 돔내의 공기가 주입된다. 격납 돔의 스프레이 화재가 끝나면 압력은 서서히 감소하게 되고, 커버 가스 영역에서는 주입된 공기로 인해, 소듐 풀 화재가 발생하여, 압력이 증가하게 된다. 따라서, 이 영역으로 주입되는 공기의 유량이 점점 감소하게 된다. 그러다가 다시 유량이 증가(음의 방향으로)하는 것을 볼 수 있는데, 이는 이시간에 소듐 풀 화재에 의한 에너지가 감소하여(그림 4.24), 압력이 감소하기 때문이다. 이후 다시 풀 화재에 의한 에너지가 증가하여, 유량의 방향이 바뀌는 것을 볼 수 있고, 점차 두 영역의 압력이 같아기 때문에, 유량이 0 이 된다.

그림 4.22 에서 4.24 까지는 격납 돔에서 커버 가스 영역으로 공기가 주입됨으로써 부수적으로 발생하는 소듐 풀 화재에 의한 산소 소비율, 소듐 연소율 및 이에 따른 연소 에너지 생성율이 나타나 있다. 약 0.2 분 정도에서 격납 돔에서 유입된 산소에 의해 풀 화재가 발생하게 되고 2분까지는 연소율이 증가하다가, 감소하여 5 분에는 최소가 된다. 이후 다시 증가하여, 7~8 분에 다시 침두값이 되었다가 이후 느리게 감소하는 경향을 보여준다. 즉 소듐 스프레이 화재 발생시, 풀 화재도 동반하여 발생하고, 그 기간은 0.2 분에서 약 200 분까지이다. 이전에 살펴본 소듐 풀 화재에 의한 격납 성능 분석 결과와 비교해 보면(그림 4.7 에서 4.9) 크기는 10% 미만인 것을 볼 수 있다.

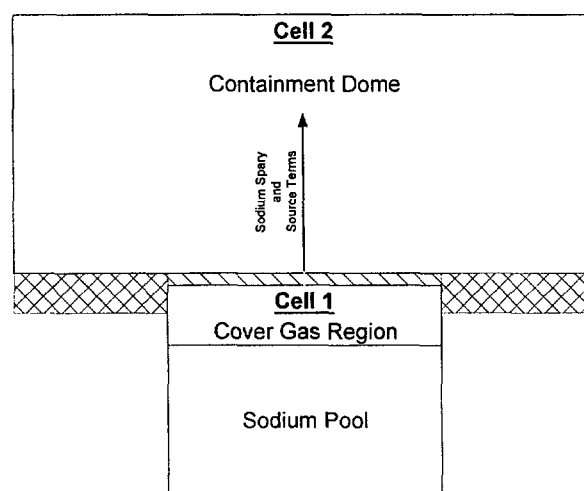


그림 4.16 소듐 스프레이 화재 분석을 위한 격납 돔의 노드

그림 4.25 에는 격납 돔 내부의 구조물들의 온도 변화를 나타낸 것이다. 구조물의 온도 변화는 격납 대기 온도나 압력의 거동과는 많이 다른 것을 볼 수 있다. 그리고, 최대 온도도 소듐 풀 화재때와 비교해서 상당히 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 스프레이 화재가 상당히 순간적으로 발생하는 현상이기 때문에, 그 영향이 구조물의 온도에는 늦게 전달되었기 때문인 것으로 생각된다.

격납 돔 외부로의 누설율이 그림 4.26 엔 나타나 있다. 외부 누설율은 압력의 거동과 유사성을 보이며, 시간이 지남에 따라 감소함을 볼 수 있다.

그림 4.27 부터 4.30 까지는 소듐 스프레이 화재시 노심으로부터 누출된 핵종들의, 에어로졸로서의 거동을 나타내고 있다. 그림 4.27 과 28 에는 초기 단계, 즉 소듐 화재가 일어나지 전에 커버 가스 영역에 존재하고 있던 핵종들이 격납 돔 대기로 방출된 후의 거동을 나타내고 있으며, 4.29 와 30 에는 스프레이 화재가 발생했을 때 방출 되는 핵종들의 거동을 나타내고 있다.

두 단계에서 누출된 핵종들은 모두 비슷한 거동을 보이며, 약 100 분 정도에 모두 격납 돔 내에 침전되거나, 외부로 빠져나가는 것으로 나타났다.

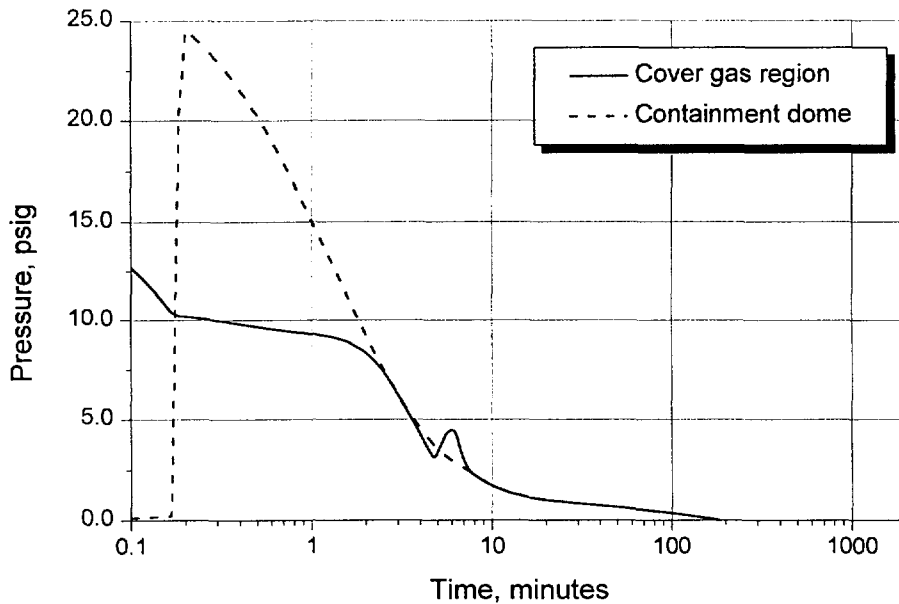


그림 4.17 소듐 스프레이 화재시 압력 변화 (75kg 스프레이)

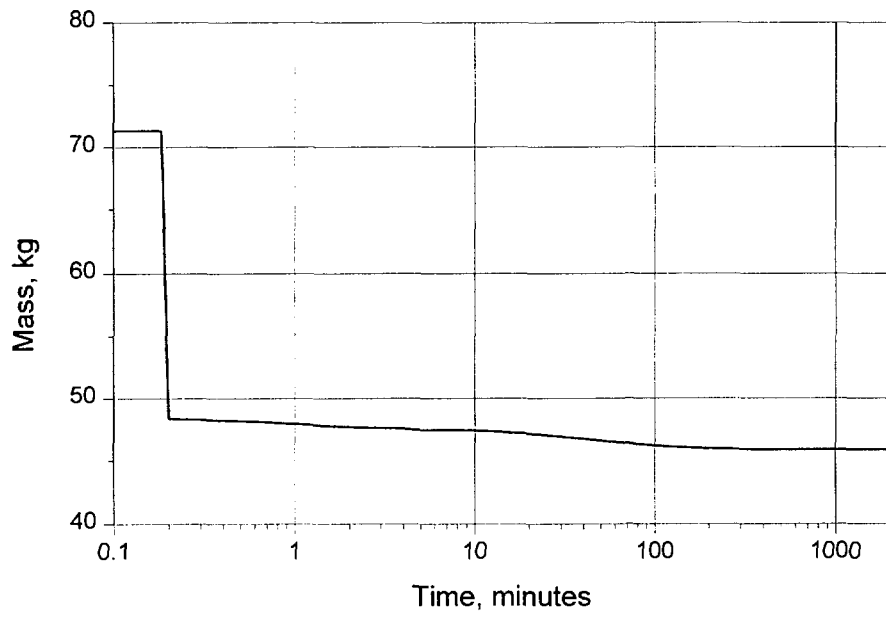


그림 4.18 소듐 스프레이 화재시 대기 수증기 질량 변화 (75kg 스프레이)

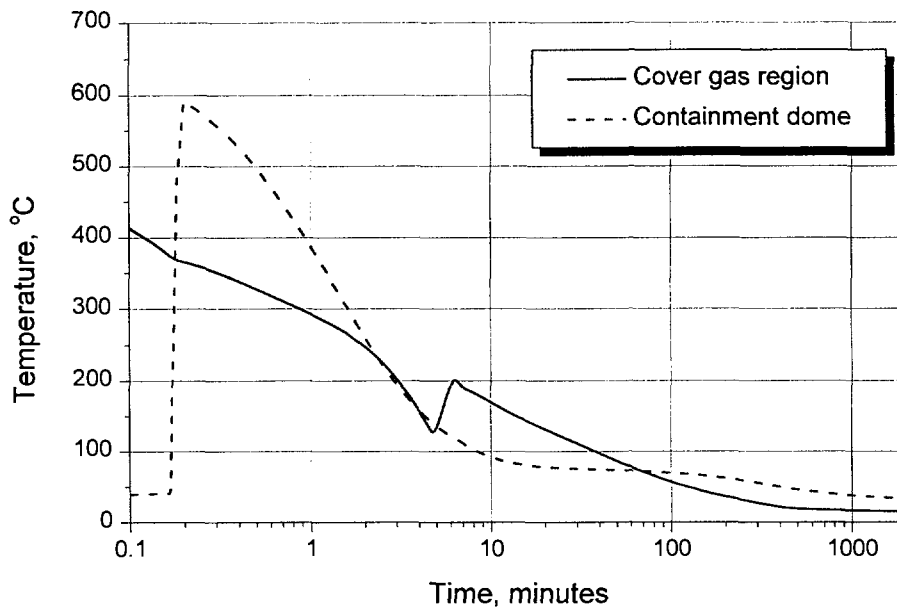


그림 4.19 소듐 스프레이 화재시 대기 온도 변화 (75kg 스프레이)

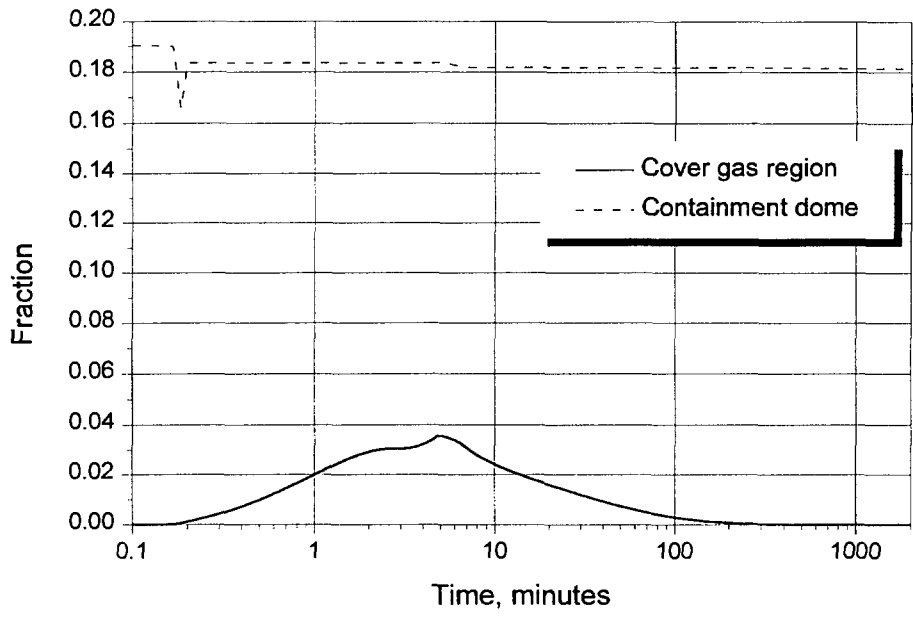


그림 4.20 소뿔 스프레이 화재시 산소 물 분을 변화 (75kg 스프레이)

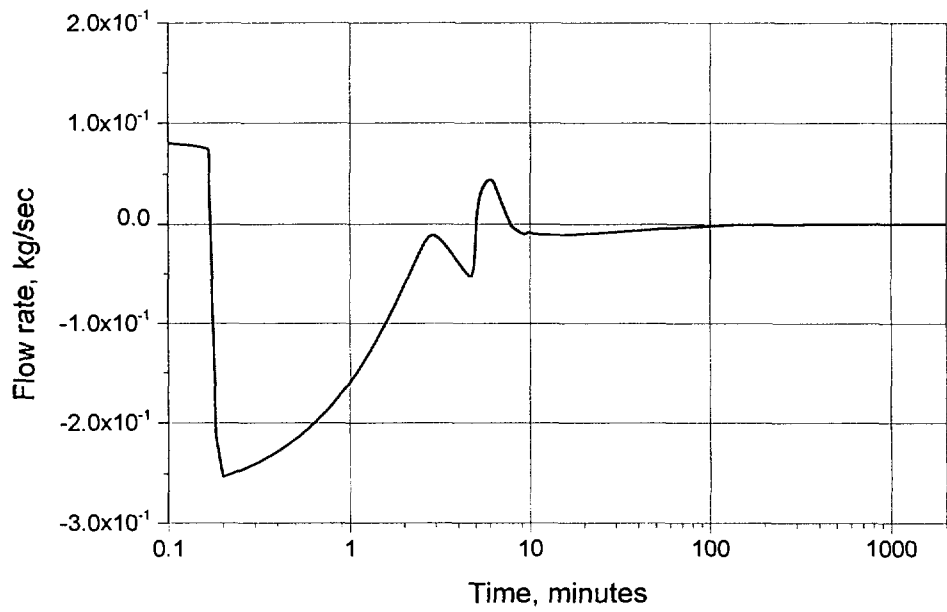


그림 4.21 소뿔 스프레이 화재시 커버 가스 영역에서 격납 돔으로의 유량 변화 (75kg 스프레이)

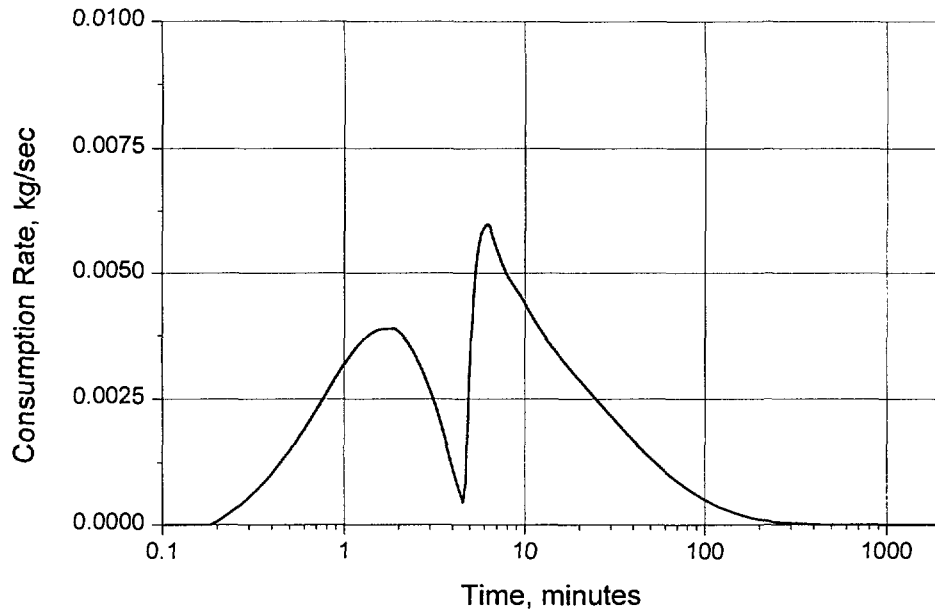


그림 4.22 소듐 스프레이 화재시 풀 화재에 의한 산소 소비율 (75kg 스프레이)

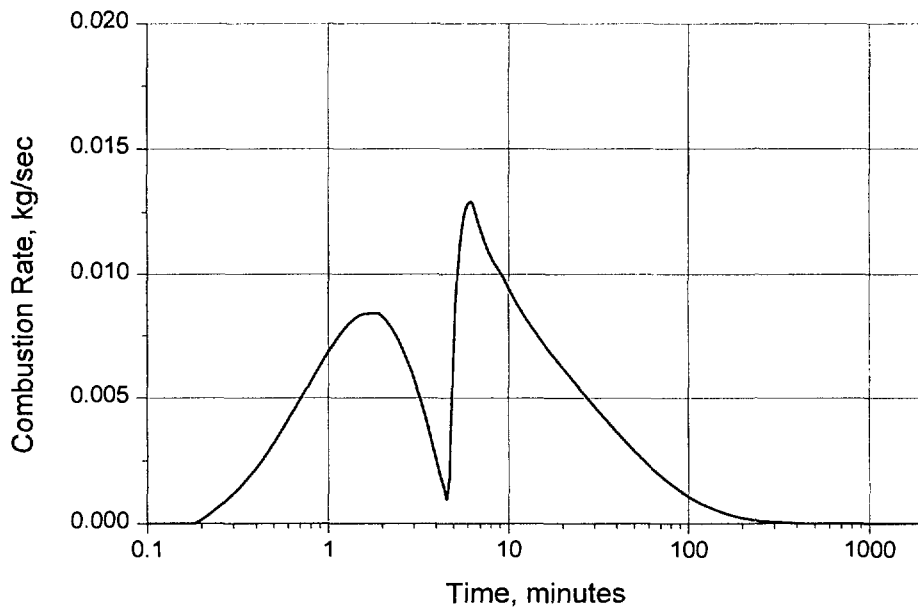


그림 4.23 소듐 스프레이 화재시 풀 화재에 의한 소듐 연소율 (75kg 스프레이)

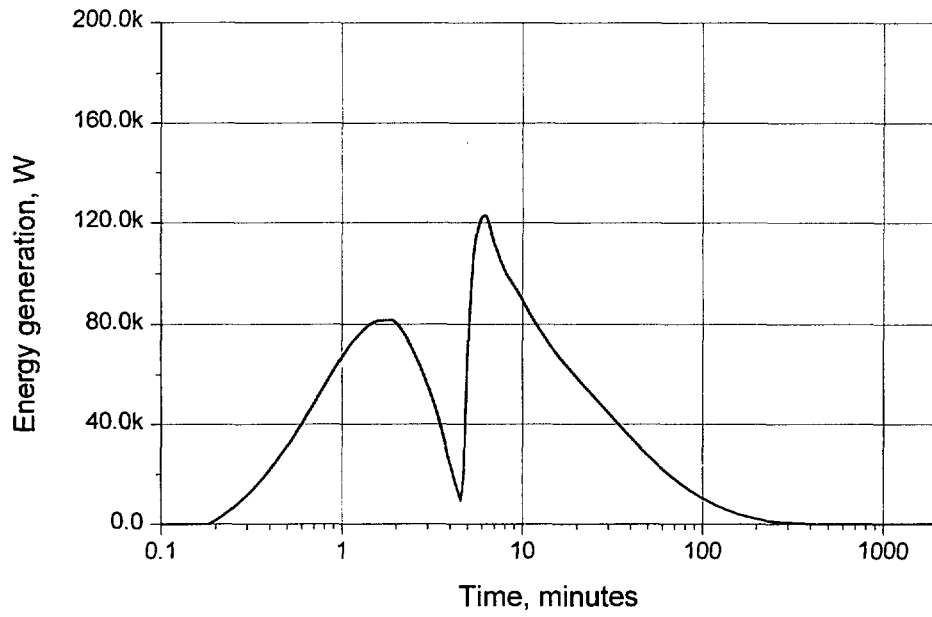


그림 4.24 소듐 스프레이 화재시 풀 화재에 의한 연소 에너지 생성을 (75kg 스프레이)

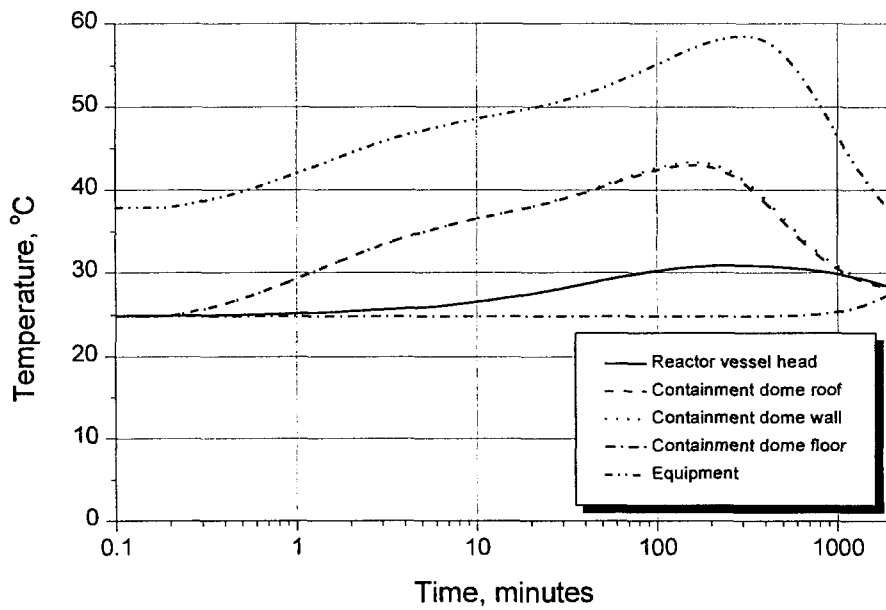


그림 4.25 소듐 스프레이 화재시 격납 구조물들의 온도 (75kg 스프레이)

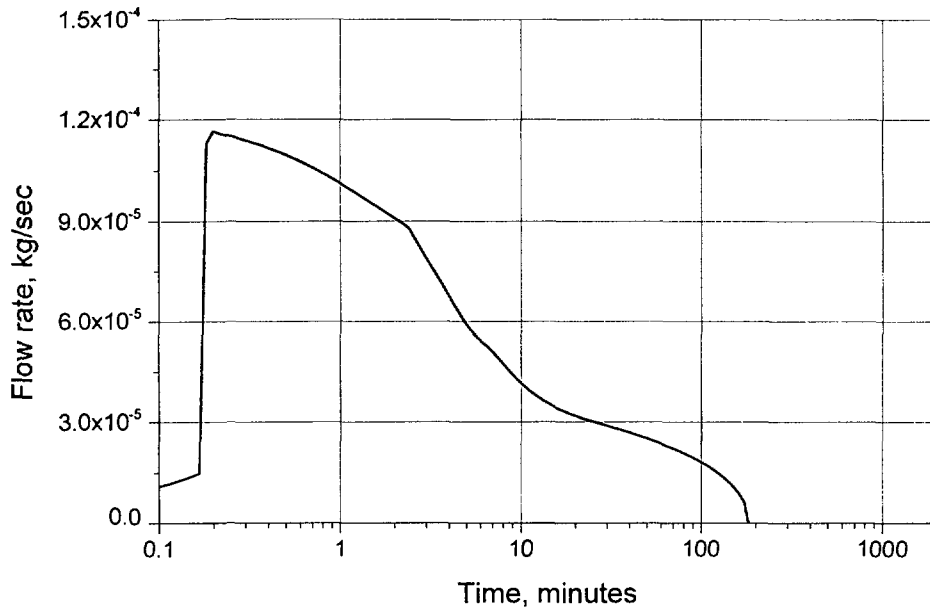


그림 4.26 소뿤 스프레이 화재시 격납 돔 외부로의 누설율 (75kg 스프레이)

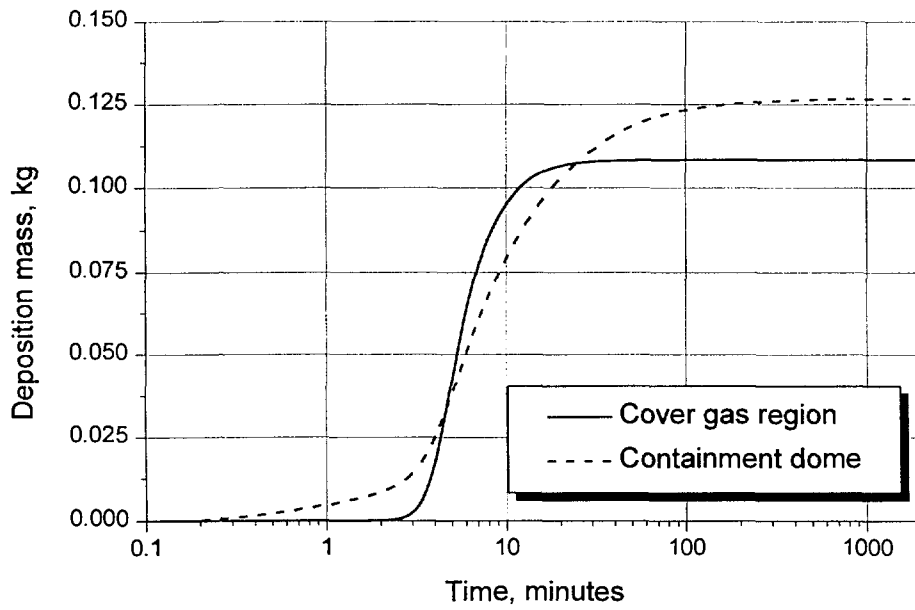


그림 4.27 소뿤 스프레이 화재시 초기 단계 누설 핵종의 침전량 (75kg 스프레이)

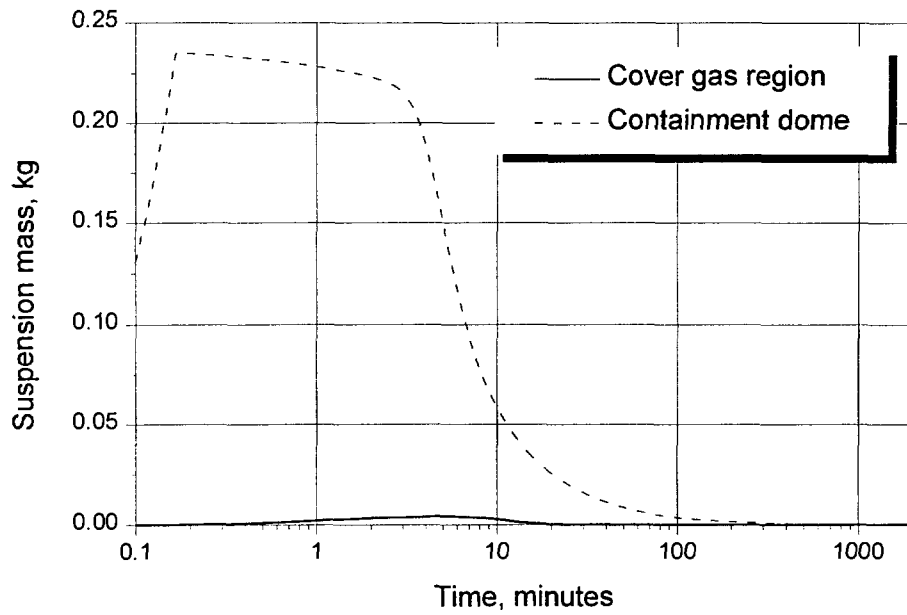


그림 4.28 소듐 스프레이 화재시 초기 단계 누설 핵종의 부유량 (75kg 스프레이)

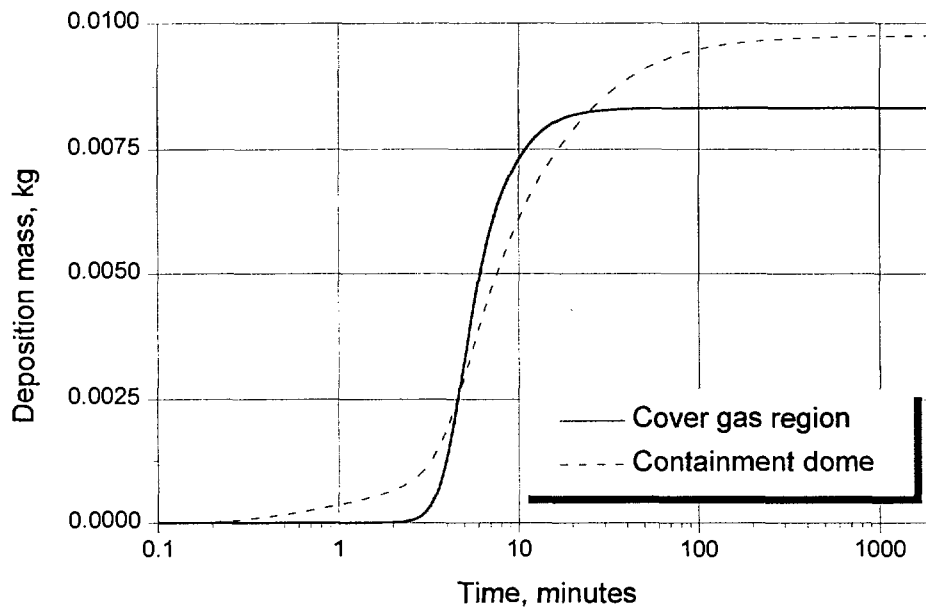


그림 4.29 소듐 스프레이 화재시 화재 단계 누설 핵종의 침전량 (75kg 스프레이)

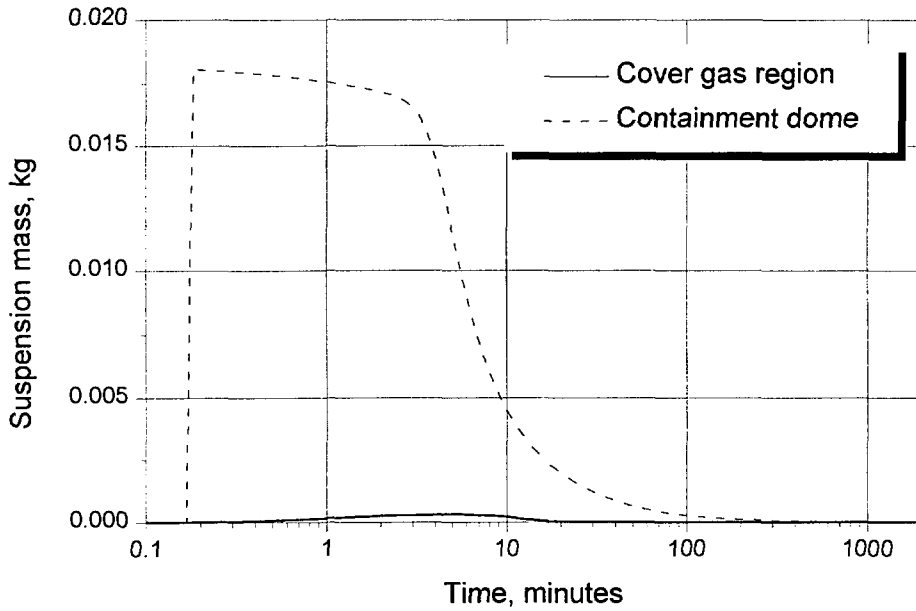


그림 4.30 소듐 스프레이 화재시 화재 단계 누설 핵종의 부유량 (75kg 스프레이)

지금까지는 75kg의 소듐이 격납 돔 내로 분사될 때 발생하는 소듐 스프레이 화재에 대한 격납 성능 분석 결과를 살펴보았다. 이제, 소듐의 양을 변화시켰을 때, 격납 성능의 변화를 살펴보겠다.

그림 4.31에는 스프레이 되는 소듐의 양에 따른 격납 돔의 압력 변화가 나타나 있다. 예상했던 대로 분사량을 50kg으로 하면 침투 압력이 17.2psig 정도로 낮아지고, 100kg으로 양을 늘이면, 31.3psig로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 압력은 설계 압력을 넘어서는 것이다.

그림 4.32의 온도 변화 또한 유사한 거동을 보인다.

그림 4.33에는 격납 돔 외부 누설율이 비교되어 있다. 소듐 분사량이 늘어날수록, 유동의 진폭이 커짐을 알 수 있다.

그림 4.34에는 격납 돔 내의 구조물 중의 하나인 격납 돔 벽의 온도가 소듐 분사량에 따라 어떻게 변화하는지를 나타내었다. 구조물의 온도는 소듐의 분사량에 따라 크게 변화가 없음을 알 수 있다.

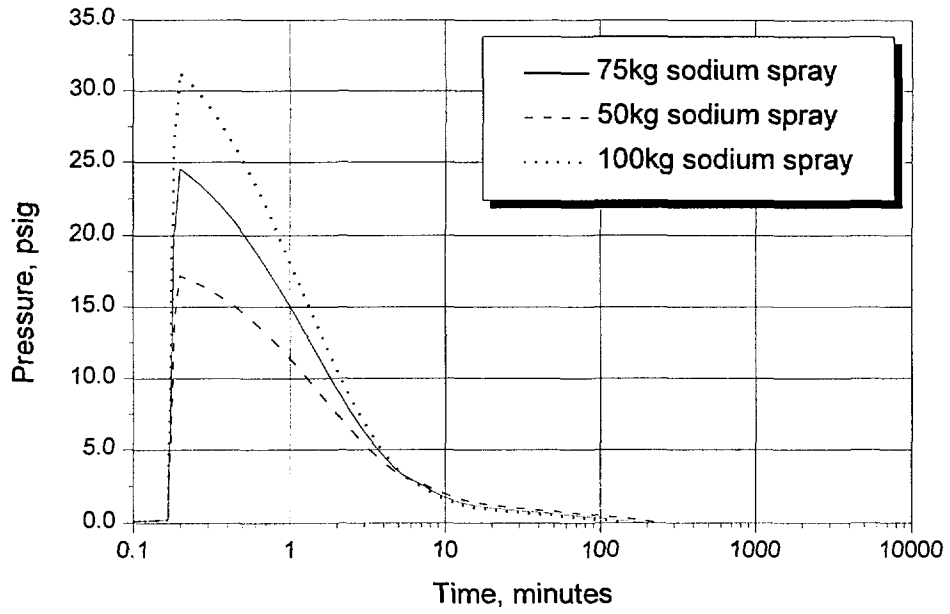


그림 4.31 소듐 분사량의 변화에 따른 격납 돔 압력 변화

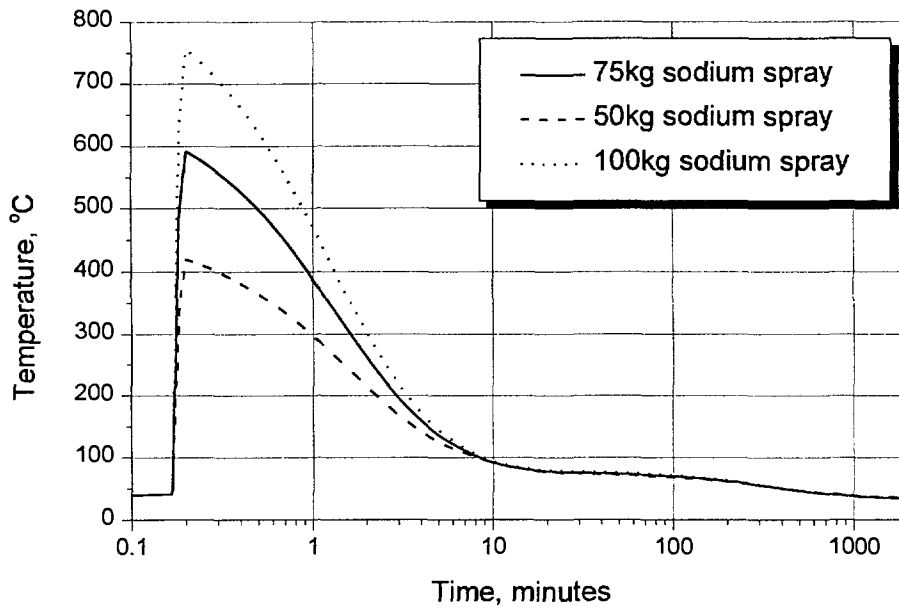


그림 4.32 소듐 분사량의 변화에 따른 격납 돔 온도 변화

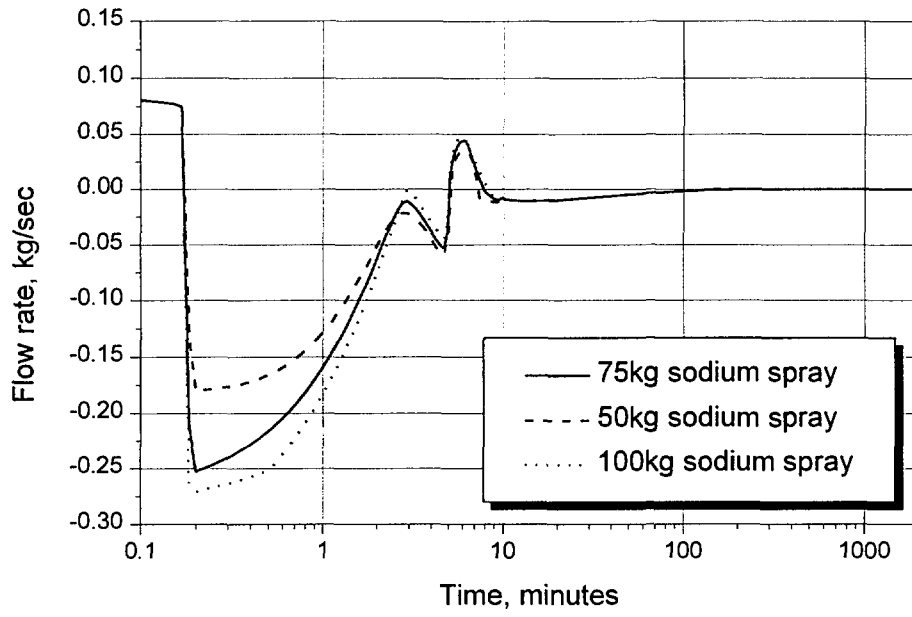


그림 4.33 소듐 분사량의 변화에 따른 격납 돔 외부 누설율 변화

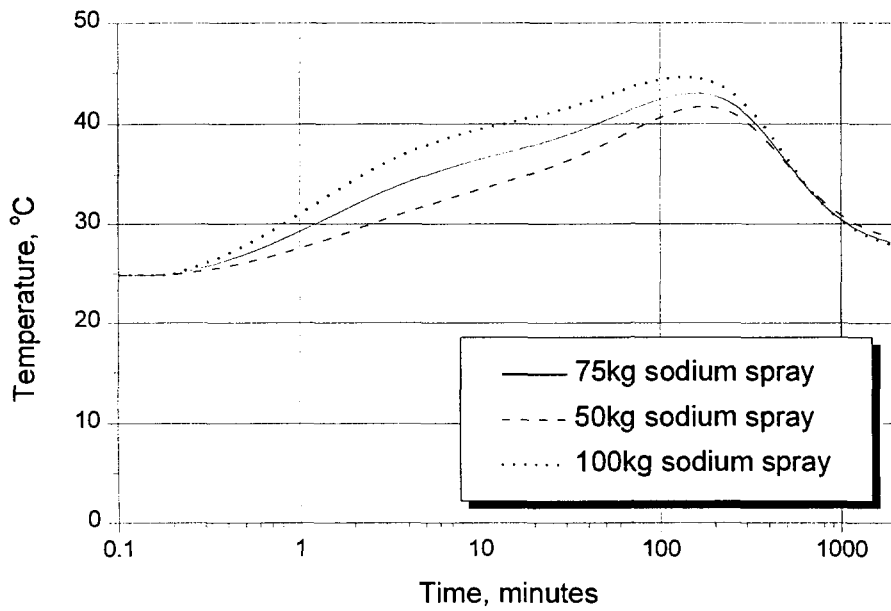


그림 4.34 소듐 분사량의 변화에 따른 격납 돔 벽 온도 변화

격납 돔의 부피 변화가 격납 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해, 민감도 분석을 행하였다. 75kg의 소듐이 분사될 때 격납 돔의 압력이 거의 설계 압력까지 올라가므로, 이 경우에 대해, 돔의 부피를 120%로 증가시켰을때, 침투 압력이 어떻게 변화하는지 살펴보았다.

그림 4.35에서 보듯이, 침투 압력은 약 8% 감소하는 경향을 보여주었다. 하지만, 격납 돔의 부피 증가에 비해, 압력 감소율은 다소 작은 것으로 나타났다. 이는, 체적이 증가함에 따라, 에너지를 감당할 수 있는 능력도 늘어나지만, 격납 돔 내의 산소 양 또한 늘어나므로, 소듐 화재에 의한 에너지의 생성량도 증가하기 때문인 것으로 보인다.

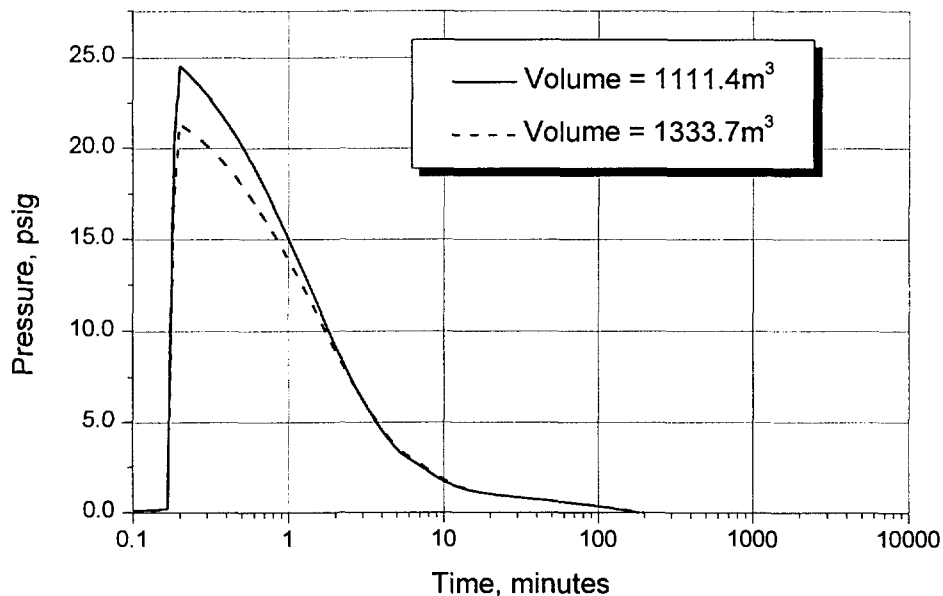


그림 4.35 격납 돔 체적 변화에 따른 격납 돔 압력 변화 (75kg 스프레이)

그림 4.36과 4.37에는, 억제 인자를 1로 하고, 초기 단계가 없다고 가정한 경우에 대한 결과가 나타나 있다. 열수력학적인 결과들은 방사선원항의 정의에는 크게 상관없이 거의 같은 결과를 보여주기에 때문에, 다시 나타내지 않았고, 에어로졸의 거동은 큰 차이를 보이므로 이에 대해 나타내었다.

그림 4.36에는 격납 건물 내에서 침전되는 에어로졸의 양을 나타내었다. 억제 인자를 1로 하면, 침전되는 양이 더 많은데, 이는 누설되는 핵종들의 분율이 많기 때문이다. 마찬가지로 결과가 그림 4.37에 보인다.

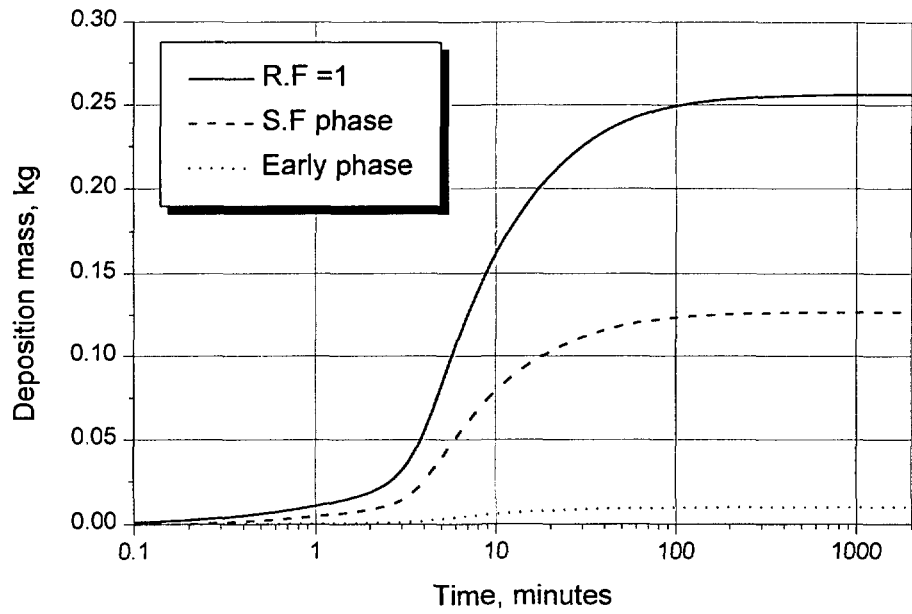


그림 4.36 억제 인자를 1로 했을 때의 에어로졸 침전량 (75kg 스프레이)

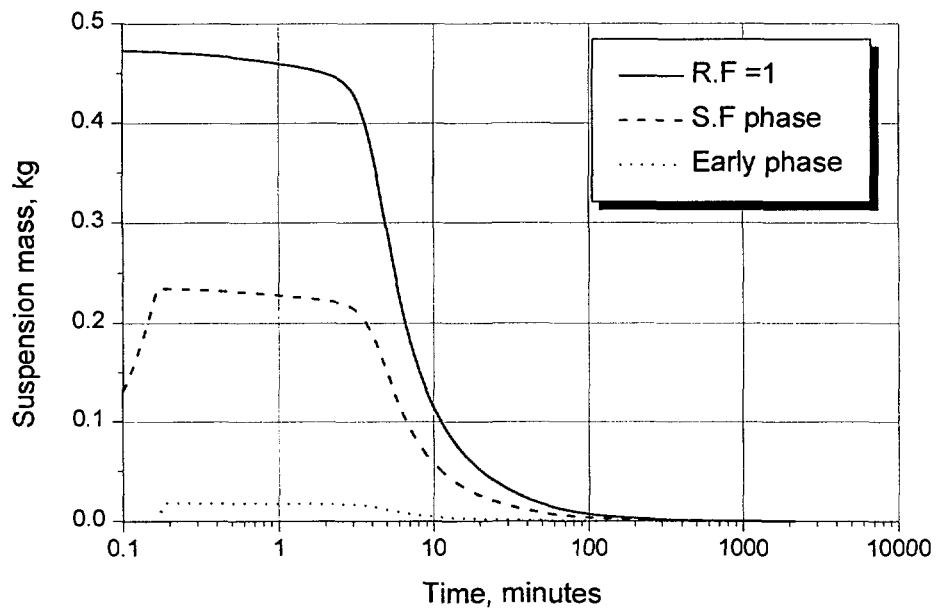


그림 4.37 억제 인자를 1로 했을 때의 에어로졸 부유량 (75kg 스프레이)

표 4.6 격납 성능 분석 결과 요약

	설 명	침투압력(psig)/ 시간(min.)	침투온도(°C)/ 시간(min)
Case 1	소듐 폴 화재시 기존 격납 돔 설계	11.0/5	350/22
Case 2	Case 1 + 격납 돔 체적 120%	11.3/5	340/26
Case 3	Case 1 + 격납 돔 체적 80%	12.6/4	364/18
Case 4	소듐 스프레이 화재시 기존 격납 돔 설계 + 50kg 소듐 스프레이	17.232/0.2	420/0.2
Case 5	Case 4 + 75kg 소듐 스프레이	24.5/0.2	592/0.2
Case 6	Case 4 + 100kg 소듐 스프레이	31.3/0.2	756/0.2
Case 5-1	Case 5 + 격납 돔 체적 120%	21.4/0.2	517/0.2
Case 5-2	Case 5 + 억제인자 1	24.5/0.02	592/0.02

지금까지의 소듐 폴 화재와 스프레이 화재 결과를 주요 변수와 함께 표 4.6에 요약하여 정리하였다.

제 5 절 피폭량 계산

원자력 발전소의 궁극적인 안전성은 사고시 격납 돔 외부로 누출되는 방사선 양에 의해 판단된다. 따라서 격납 성능의 판단 기준 또한 외부 방사성 영향 평가 결과라고 할 수 있다.

본 절에서는 4 절의 격납 성능 분석결과를 바탕으로 하여, 격납 돔 외부에서의 방사성 영향을 분석하여 격납 돔의 성능을 평가하였다. 이를 위하여 먼저, KALIMER의 노심 재고량과 방사선원 항 그리고, CONTAIN-LMR의 분석 결과인 외부 누설율을 이용하여, MACCS의 주요 입력인 핵종 그룹 당 외부 누설율을 결정하였다. 여기서 핵종 그룹은 MACCS의 입력에서 정해진 그룹으로, 노심 핵종들을 그 특징에 따라, 총 9개의 그룹으로 나누어 각 그룹의 누설율을 입력으로 주게 된다. 다음 표 4.7에 각 핵종들의 격납 돔 외부 누설량과 누설율, 그리고 핵종당 누설율이 나타나 있다. 본 분석에서는, 폴 화재에 대해서 체적을 80%에서 120%로 변화시켰을때와, 스프레이 화재(75kg 스프레이)시 체적을 100%와 120%로 바꿨을때, 그리고 억제 인자를 1로 하였을 때의 방사성 영향 평가를 수행하였다.

표 4.7 격납 성능 분석 결과 핵종들의 외부 누설량 및 누설율(1/2)

	Nuclide	Core Inventory (kg)	Released Mass to Environment (kg)					
			Pool fire V=80%	Pool fire V=100%	Pool fire V=120%	Spray fire V=100%	Spray fire V=120%	Spray fire RF=1
Group 1	Kr85	2.5601E-01	1.7840E-04	1.6210E-04	1.5020E-04	1.7490E-05	1.5590E-05	6.3720E-05
	Kr85m	2.4230E-04	1.0810E-07	9.3500E-08	8.2560E-08	1.4320E-08	1.2590E-08	3.1990E-08
	Kr87	1.1734E-04	2.5230E-08	2.0540E-08	1.7270E-08	5.0530E-09	4.3410E-09	7.0450E-09
	Kr88	1.2670E-04	4.5830E-08	3.8780E-08	3.3590E-08	6.9120E-09	6.0320E-09	1.2900E-08
	Xe133	1.1303E-01	5.8220E-06	5.0270E-06	4.4620E-06	3.0730E-06	2.8220E-06	3.4820E-06
	Xe135	8.8156E-03	4.4320E-07	3.8190E-07	3.3840E-07	2.2680E-07	2.0730E-07	2.4240E-07
Sum								
Group 2	I131	9.8422E-02	2.2040E-08	1.8680E-08	1.6310E-08	3.6360E-09	3.3390E-09	3.6060E-09
	I132	1.5890E-03	2.6810E-10	2.2900E-10	2.0070E-10	5.5350E-11	5.0580E-11	5.7290E-11
	I133	1.8329E-02	3.8880E-09	3.3020E-09	2.8850E-09	6.5920E-10	6.0390E-10	6.2490E-10
	I134	8.2632E-04	6.8730E-11	5.8820E-11	5.1490E-11	2.3240E-11	2.0900E-11	2.0620E-11
	I135	5.6911E-03	1.0780E-09	9.1850E-10	8.0370E-10	1.9520E-10	1.7820E-10	1.7990E-10
Sum								
Group 3	Rb86	9.7590E-04	3.8860E-10	3.2860E-10	2.8610E-10	4.5580E-11	4.1870E-11	3.5990E-11
	Cs134	7.7804E-01	3.1090E-07	2.6280E-07	2.2880E-07	3.6390E-08	3.3430E-08	2.8890E-08
	Cs136	1.0278E-02	4.0880E-09	3.4560E-09	3.0100E-09	4.7980E-10	4.4070E-10	3.7790E-10
	Cs137	1.8980E+01	7.5840E-06	6.4120E-06	5.5830E-06	8.8780E-07	8.1560E-07	7.0480E-07
Sum								
Group 4	Sb127	6.8269E-03	1.2050E-09	1.0170E-09	8.8410E-10	8.4440E-11	7.7520E-11	5.8100E-11
	Sb129	7.8238E-04	1.1150E-10	9.4700E-11	8.2570E-11	8.7770E-12	7.9970E-12	5.6260E-12
	Tel27	6.8586E-04	7.5290E-11	6.3840E-11	5.5750E-11	1.8130E-11	1.6600E-11	2.2690E-11
	Tel27m	2.5781E-02	1.3530E-09	1.1680E-09	1.0360E-09	7.0570E-10	6.4820E-10	9.5620E-10
	Tel29	2.0917E-04	2.3910E-11	2.0180E-11	1.7550E-11	4.8670E-12	4.4160E-12	5.6740E-12
	Tel29m	2.1543E-02	1.1290E-09	9.7450E-10	8.6480E-10	5.8940E-10	5.4130E-10	7.9680E-10
	Tel131m	2.3109E-03	1.1850E-10	1.0230E-10	9.0730E-11	6.1950E-11	5.6790E-11	8.0180E-11
	Tel132	5.2831E-02	2.7240E-09	2.3520E-09	2.0880E-09	1.4350E-09	1.3170E-09	1.8960E-09
Sum								
Group 5	Sr89	7.2228E-01	3.9750E-09	3.4280E-09	3.0390E-09	1.9870E-09	1.8250E-09	6.3150E-09
	Sr90	4.7129E+00	2.5980E-08	2.2400E-08	1.9860E-08	1.2970E-08	1.1920E-08	4.1320E-08
	Sr91	2.3367E-03	1.1840E-11	1.0210E-11	9.0510E-12	6.0670E-12	5.5450E-12	1.7930E-11
Sum								
Group 6	Mo99	3.9200E-02	2.3060E-10	1.9860E-10	1.7580E-10	1.0800E-10	9.9090E-11	3.3050E-10
	Te99m	3.1304E-03	1.9890E-11	1.7120E-11	1.5150E-11	9.1720E-12	8.4250E-12	2.8910E-11
	Ru103	6.5410E-01	3.4280E-08	2.9600E-08	2.6270E-08	1.7900E-08	1.6440E-08	2.4210E-08
	Ru105	2.3508E-03	1.1560E-10	9.9470E-11	8.7990E-11	5.8080E-11	5.2910E-11	7.1780E-11
	Ru106	3.3716E+00	1.7700E-07	1.5280E-07	1.3560E-07	9.2310E-08	8.4790E-08	1.2520E-07
	Rh105	1.8679E-02	1.7930E-10	1.5450E-10	1.3690E-10	8.7990E-11	8.0820E-11	1.9670E-10
Sum								
Group 7	Y90	1.2379E-03	6.8140E-12	5.8760E-12	5.2090E-12	3.4060E-12	3.1280E-12	1.0830E-11
	Y91	3.4421E-01	1.8970E-09	1.6360E-09	1.4500E-09	9.4750E-10	8.7030E-10	3.0170E-09
	Zr95	7.0396E-01	3.8750E-09	3.3420E-09	2.9630E-09	1.9370E-09	1.7790E-09	6.1590E-09
	Zr97	8.6066E-03	4.4100E-11	3.8070E-11	3.3770E-11	2.2860E-11	2.0920E-11	6.8500E-11
	Nb95	3.8395E-01	2.1160E-09	1.8250E-09	1.6180E-09	1.0570E-09	9.7080E-10	3.3660E-09
	La140	3.0171E-02	1.6620E-10	1.4330E-10	1.2700E-10	8.3030E-11	7.6270E-11	2.6410E-10
	Pr143	2.0267E-01	1.1170E-09	9.6320E-10	8.5390E-10	5.5790E-10	5.1240E-10	1.7760E-09
	Nd147	8.5819E-02	4.6990E-10	4.0530E-10	3.5930E-10	2.3560E-10	2.1640E-10	7.4370E-10
	Am241	1.3964E+01	7.4550E-08	6.4330E-08	5.7070E-08	3.8310E-08	3.5190E-08	1.2250E-07
	Cm242	6.1152E-01	3.2630E-09	2.8160E-09	2.4980E-09	1.6770E-09	1.5400E-09	5.3570E-09
	Cm244	1.0181E+00	5.4350E-09	4.6900E-09	4.1600E-09	2.7920E-09	2.5650E-09	8.9250E-09
	Sum							
Group 8	Ce141	5.9654E-01	3.2800E-09	2.8290E-09	2.5080E-09	1.6410E-09	1.5070E-09	5.2090E-09
	Ce143	2.0915E-02	1.1000E-10	9.4890E-11	8.4150E-11	5.6470E-11	5.1770E-11	1.7200E-10
	Ce144	3.3196E+00	1.8290E-08	1.5770E-08	1.3980E-08	9.1370E-09	8.3930E-09	2.9090E-08
	Np239	1.4651E+00	7.6100E-09	6.5690E-09	5.8280E-09	3.9730E-09	3.6450E-09	1.2300E-08
	Pu238	1.1409E+01	6.0910E-08	5.2560E-08	4.6630E-08	3.1300E-08	2.8750E-08	1.0010E-07
	Pu239	1.2414E+03	6.6280E-06	5.7200E-06	5.0740E-06	3.4070E-06	3.1290E-06	1.0890E-05
	Pu240	2.9536E+02	1.5770E-06	1.3610E-06	1.2070E-06	8.1010E-07	7.4420E-07	2.5890E-06
	Pu241	2.6268E+01	1.4020E-07	1.2100E-07	1.0730E-07	7.2050E-08	6.6180E-08	2.3030E-07
	Sum							
Group 9	Ba140	2.2743E-01	1.2460E-09	1.0750E-09	9.5300E-10	6.2470E-10	5.7370E-10	1.9740E-09
Sum								

표 4.7 격납 성능 분석 결과 핵종들의 외부 누설양 및 누설율(2/2)

Released Fraction					
Pool fire V=80%	Pool fire V=100%	Pool fire V=120%	Spray fire V=100%	Spray fire V=120%	Spray fire RF=1
6.9684E-04	6.3317E-04	5.8669E-04	6.8317E-05	6.0896E-05	2.4889E-04
4.4614E-04	3.8589E-04	3.4073E-04	5.9100E-05	5.1960E-05	1.3203E-04
2.1502E-04	1.7505E-04	1.4718E-04	4.3063E-05	3.6995E-05	6.0039E-05
3.6172E-04	3.0608E-04	2.6511E-04	5.4554E-05	4.7609E-05	1.0182E-04
5.1509E-05	4.4475E-05	3.9476E-05	2.7188E-05	2.4967E-05	3.0806E-05
5.0274E-05	4.3321E-05	3.8386E-05	2.5727E-05	2.3515E-05	2.7497E-05
1.8215E-03	1.5880E-03	1.4176E-03	2.7795E-04	2.4594E-04	6.0108E-04
2.2393E-07	1.8980E-07	1.6572E-07	3.6943E-08	3.3925E-08	3.6638E-08
1.6872E-07	1.4412E-07	1.2631E-07	3.4833E-08	3.1832E-08	3.6054E-08
2.1213E-07	1.8015E-07	1.5740E-07	3.5965E-08	3.2948E-08	3.4094E-08
8.3176E-08	7.1183E-08	6.2312E-08	2.8125E-08	2.5293E-08	2.4954E-08
1.8942E-07	1.6139E-07	1.4122E-07	3.4299E-08	3.1312E-08	3.1611E-08
8.7738E-07	7.4664E-07	6.5296E-07	1.7017E-07	1.5531E-07	1.6335E-07
3.9820E-07	3.3671E-07	2.9317E-07	4.6706E-08	4.2904E-08	3.6879E-08
3.9959E-07	3.3777E-07	2.9407E-07	4.6771E-08	4.2967E-08	3.7132E-08
3.9773E-07	3.3624E-07	2.9285E-07	4.6681E-08	4.2876E-08	3.6767E-08
3.9958E-07	3.3783E-07	2.9415E-07	4.6775E-08	4.2971E-08	3.7134E-08
1.5951E-06	1.3486E-06	1.1742E-06	1.8693E-07	1.7172E-07	1.4791E-07
1.7651E-07	1.4897E-07	1.2950E-07	1.2369E-08	1.1355E-08	8.5105E-09
1.4251E-07	1.2104E-07	1.0554E-07	1.1218E-08	1.0221E-08	7.1909E-09
1.0977E-07	9.3080E-08	8.1285E-08	2.6434E-08	2.4203E-08	3.3083E-08
5.2480E-08	4.5304E-08	4.0184E-08	2.7373E-08	2.5142E-08	3.7089E-08
1.1431E-07	9.6477E-08	8.3903E-08	2.3268E-08	2.1112E-08	2.7126E-08
5.2406E-08	4.5234E-08	4.0142E-08	2.7359E-08	2.5126E-08	3.6986E-08
5.1279E-08	4.4269E-08	3.9262E-08	2.6808E-08	2.4575E-08	3.4697E-08
5.1560E-08	4.4519E-08	3.9522E-08	2.7162E-08	2.4928E-08	3.5888E-08
7.5083E-07	6.3889E-07	5.5934E-07	1.8199E-07	1.6666E-07	2.2057E-07
5.5034E-09	4.7461E-09	4.2075E-09	2.7510E-09	2.5267E-09	8.7431E-09
5.5126E-09	4.7529E-09	4.2140E-09	2.7520E-09	2.5292E-09	8.7675E-09
5.0671E-09	4.3695E-09	3.8735E-09	2.5964E-09	2.3731E-09	7.6734E-09
1.6083E-08	1.3869E-08	1.2295E-08	8.0995E-09	7.4290E-09	2.5184E-08
5.8826E-09	5.0663E-09	4.4847E-09	2.7551E-09	2.5278E-09	8.4311E-09
6.3539E-09	5.4690E-09	4.8397E-09	2.9300E-09	2.6914E-09	9.2353E-09
5.2408E-08	4.5253E-08	4.0162E-08	2.7366E-08	2.5134E-08	3.7013E-08
4.9176E-08	4.2314E-08	3.7430E-08	2.4707E-08	2.2508E-08	3.0535E-08
5.2497E-08	4.5320E-08	4.0218E-08	2.7379E-08	2.5148E-08	3.7134E-08
9.5992E-09	8.2715E-09	7.3292E-09	4.7107E-09	4.3269E-09	1.0531E-08
1.7592E-07	1.5169E-07	1.3446E-07	8.9847E-08	8.2335E-08	1.3288E-07
5.5046E-09	4.7468E-09	4.2080E-09	2.7515E-09	2.5269E-09	8.7488E-09
5.5111E-09	4.7529E-09	4.2125E-09	2.7527E-09	2.5284E-09	8.7650E-09
5.5046E-09	4.7474E-09	4.2090E-09	2.7516E-09	2.5271E-09	8.7491E-09
5.1240E-09	4.4233E-09	3.9237E-09	2.6561E-09	2.4307E-09	7.9590E-09
5.5111E-09	4.7532E-09	4.2141E-09	2.7529E-09	2.5284E-09	8.7667E-09
5.5086E-09	4.7496E-09	4.2094E-09	2.7520E-09	2.5279E-09	8.7535E-09
5.5115E-09	4.7526E-09	4.2133E-09	2.7528E-09	2.5283E-09	8.7631E-09
5.4755E-09	4.7227E-09	4.1867E-09	2.7453E-09	2.5216E-09	8.6659E-09
5.3389E-09	4.6070E-09	4.0871E-09	2.7436E-09	2.5201E-09	8.7728E-09
5.3359E-09	4.6049E-09	4.0849E-09	2.7423E-09	2.5183E-09	8.7601E-09
5.3385E-09	4.6067E-09	4.0861E-09	2.7424E-09	2.5194E-09	8.7665E-09
5.9664E-08	5.1467E-08	4.5635E-08	3.0143E-08	2.7677E-08	9.5470E-08
5.4984E-09	4.7424E-09	4.2043E-09	2.7509E-09	2.5262E-09	8.7321E-09
5.2595E-09	4.5370E-09	4.0235E-09	2.7000E-09	2.4753E-09	8.2239E-09
5.5097E-09	4.7505E-09	4.2113E-09	2.7524E-09	2.5283E-09	8.7631E-09
5.1942E-09	4.4837E-09	3.9779E-09	2.7118E-09	2.4879E-09	8.3954E-09
5.3386E-09	4.6068E-09	4.0870E-09	2.7434E-09	2.5199E-09	8.7736E-09
5.3390E-09	4.6076E-09	4.0872E-09	2.7444E-09	2.5205E-09	8.7721E-09
5.3393E-09	4.6080E-09	4.0866E-09	2.7428E-09	2.5197E-09	8.7656E-09
5.3373E-09	4.6064E-09	4.0849E-09	2.7429E-09	2.5194E-09	8.7674E-09
4.2816E-08	3.6942E-08	3.2763E-08	2.1889E-08	2.0097E-08	6.9193E-08
5.4786E-09	4.7267E-09	4.1903E-09	2.7468E-09	2.5225E-09	8.6796E-09
5.4786E-09	4.7267E-09	4.1903E-09	2.7468E-09	2.5225E-09	8.6796E-09

표 4.8 KALIMER 소듐 화재시 누설 방사능에 의한 영향 평가 (rem)

기관	Pool fire 0.8V	Pool fire 1.0V	Pool fire 1.2V	Spray fire 1.0V	Spray Fire 1.2V	Spray Fire RF=1	PGA	10CFR
전신	1.08E-1	0.95E-1	0.85E-1	0.17E-1	0.15E-1	0.44E-1	1.9E-1	25
골수	1.28E-1	1.12E-1	1.00E-1	0.22E-1	0.19E-1	0.43E-1	2.2E-1	150
폐	1.39E-1	1.21E-1	1.08E-1	0.26E-1	0.23E-1	0.51E-1	5.1E-1	75
갑상선	2.01E-1	1.74E-1	1.54E-1	0.36E-1	0.32E-1	0.62E-1	8.7E-1	300

MACCS 코드를 이용한 방사성 영향 평가에 쓰인 가정은 다음과 같다.

먼저, 발전소 부지와 기상 데이터는 영광 3/4 호기에 대한 것을 이용하였고, 풍속은 1m/s 로 일정하다고 가정하였다.

결과는 표 4.8 에 정리되어 있다.

플 화재에 의한 영향이 스프레이 화재에 의한 영향보다 큰 것으로 나타났다. 스프레이 화재는 반응은 플 화재보다 격렬하지만, 지속 시간이 너무 짧아서, 격납 돔 외부로 빠져나가는 핵종들의 양이 플 화재에 비해 적기 때문인 것으로 파악된다.

각 사고시 격납 돔의 부피 변화에 따른 방사성 영향의 변화를 보면 다음과 같다. 먼저, 플 화재시에는 격납 돔의 부피를 80%로 줄였을 때, 피폭 선량은 14% 증가(전신 피폭 기준)하는 것으로 나타났고, 120%로 증가시켰을때는, 약 11%정도 감소하는 것으로 나타났다. 즉 예비적으로 결정된 격납 돔의 부피가 분석 범위 내에서는 어느 정도 최적화 된 것이라고 볼 수 있다.

스프레이 화재에서는, 전신 피폭 기준으로, 격납 돔의 부피를 120%로 증가시켰을 때, 피폭 선량은 약 12% 감소하는 것으로 나타났다.

스프레이 화재시 억제 인자를 1로 하였을때의 피폭 선량은 다소 크지만, 플 화재에 비해서는 여전히 작은 것으로 나타났다.

제 6 절 KALIMER 격납 개념

제 4 절과 5 절에서, 예비 설계된 KALIMER 격납 돔의 설계에 대한, 성능 분석 및 방사성 평가를 수행하였다. 이 결과들을 종합적으로 살펴보면, 다음과 같다.

격납 성능의 중요 변수인 격납 돔의 압력은 플 화재보다 스프레이 화재시 훨씬 많이 올라가는 것을 알 수 있었다. 이는 스프레이 화재의 반응 특성때문이다. 격납 돔의 건전성 측면에서 볼 때, 스프레이 화재가 더 중요한 사고라고 판

단된다. 반면에, 방사성 영향 평가의 측면에서 살펴볼 때, 제 5 절의 결과에서 알 수 있듯이, 스프레이 화재 보다는 풀 화재시, 피폭 선량이 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 궁극적인 KALIMER 격납 설계의 성능 및 안전성의 평가를 위해서는 풀 화재와 스프레이 화재 모두를 설계 기준 사고로 분석해야 한다.

소듐 풀 화재에서 격납 돔의 부피 변화는 안전 관련 변수인 압력/온도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다. 즉, 부피의 변화율에 대해, 침투 압력의 변화율이 그만큼 크지 않은 것으로 보인다. 반면에 피폭 선량은 부피를 감소시키면, 증가율이 커지고, 증가시키면, 감소율이 작아진다. 따라서, 예비 결정된 KALIMER 격납 설계가 풀 화재에 대해서는, 최적화된 것이라고, 예비 결론을 내릴 수가 있다.

스프레이 화재에 대해서는, 스프레이 되는 양에 대한 침투 압력의 변화는 큰 편이었고, 100kg 의 소듐이 격납 돔으로 스프레이 될 때는, 압력이 설계 압력 이상으로 올라가는 것을 알 수 있었다. 격납 돔의 부피 변화에 따른 침투 압력의 변화 또한, 풀 화재와 마찬가지로 그렇게 크지 않았으며, 피폭선량의 변화가 더 민감하였다.

따라서, 예비적으로 KALIMER 격납 설계는 기존의 설계를 그대로 유지하고, 좀 더 심도 있는 분석을 통해, 설계를 최적화하는 것이 바람직하다고 생각된다.

제 5 장 결 론

본 보고서에서는, KALIMER 격납 개념 설정을 위한 연구를 수행하였다.

먼저, 기존 액체 금속로의 격납 개념을 유형별로 살펴보고, PRISM 과 CRBRP 에 대해서는 심층 분석을 하였다.

이를 바탕으로, 격납 성능 분석을 위한 분석체계를 확립하고, 시험 계산도 수행하였다. 그리고, KALIMER 의 예비 격납 개념을 설정하였다.

예비 설정된 격납 개념에 대한 성능 분석을 위해, 방사선원 향을 정의하고, 분석 대상 사고를 선정하였다. 대상 사고로는 HCDA 조건하의, 소듐 풀 화재와 스프레이 화재가 선정되었다.

풀 화재에 대해서 격납 돔의 부피를 민감도 변수로 하는 민감도 분석이 행해졌고, 스프레이 화재에 대해서는, 스프레이되는 소듐의 양과, 격납 돔 부피에 대한 민감도 분석이 이루어졌다.

각 사고마다, 격납 돔 외부로 누출되는 핵종의 양을 계산할 수가 있고, 이를 바탕으로 방사성 영향 평가를 수행하였다.

분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

격납 성능의 중요 변수인 격납 돔의 압력은 풀 화재보다 스프레이 화재시 훨씬 많이 올라가는 것을 알 수 있었다. 이는 스프레이 화재의 반응 특성때문이면, 격납 돔의 건전성 측면에서 볼 때, 스프레이 화재가 더 중요한 사고라고 판단된다. 반면에, 방사성 영향 평가의 측면에서는 스프레이 화재 보다는 풀 화재가 더 중요함을 알 수 있다. 따라서, 궁극적인 KALIMER 격납 설계의 성능 및 안전성의 평가를 위해서는 풀 화재와 스프레이 화재 모두를 설계 기준 사고로 분석해야 한다.

소듐 풀 화재에서 격납 돔의 부피 변화는 안전 관련 변수인 압력/온도에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다. 즉, 부피의 변화율에 대해, 침투 압력의 변화율이 그만큼 크지 않은 것으로 보인다. 반면에 피폭 선량은 부피를 감소시키면, 증가율이 커지고, 증가시키면, 감소율이 작아진다. 따라서, 예비 결정된 KALIMER 격납 설계가 풀 화재에 대해서는, 최적화된 것이라고 판단할 수 있다.

스프레이 화재에 대해서는, 스프레이 되는 양에 대한 침투 압력의 변화는 큰 편이었고, 100kg 의 소듐이 격납 돔으로 스프레이 될 때는, 압력이 설계 압력 이상으로 올라가는 것을 알 수 있었다. 격납 돔의 부피 변화에 따른 침투 압력

의 변화 또한, 풀 화재와 마찬가지로 그렇게 크지 않았으며, 피폭선량의 변화가 더 민감하였다.

본 분석의 결론은 다음과 같다.

KALIMER의 설계 특성상 HCDA 발생확률이 지극히 낮기 때문에, 격납 돔의 설계를 단일 격납용기 형태로 하는 것이 바람직하며, 각 사고에 대한 민감도 분석의 결과, 예비적으로 결정된 격납 돔의 부피는 어느 정도 최적화 된 값이라고 생각된다.

앞으로 연구해야 할 일은, 좀 더 다양한 형태의 민감도 분석을 통해, 설계를 최적화를 해 나가는 것이다.

제 6 장 참고 문헌

Preapplication Safety Evaluation Report for the Power Reactor Innovative Small Module (PRISM) Liquid-Metal Reactor(NUREG-1368)

PRSIM Preliminary Safety Information Document(PSID), General Electric Advanced Nuclear Technology.

Clinch River Breeder Reactor Project Preliminary Safety Analysis Report”, *Project Management Corporation*, 1979.

C. K. Park, et. al. “KALIMER Design Concept”, *KAERI/TR-888/97*.

Alan E. Waltar et. al., :Fast Breeder Reactors”, *Pergamon Press*, 1981.

K. K. Murata, et. al., “User’s manual for contain 1.1, A Computer Code for Severe Nuclear Reactor Containment Analysis”, *NUREG/CR-5026 SAND87-2309*.

D. I. Chanin, et. al., “MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS) User’s Guide”, *NUREG/CR-4691-Vol. 1 TI90 009797*.

10CFR50 App. A, 10CFR100

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-1240/99			
제 목 / 부 제			
KALIMER 예비 격납 성능 분석			
주 저 자		이 성 옥 (칼리머 설계기술개발팀)	
연구자 및 부서명		권영민, 김경두, 석수동, 장원표, 한도희 (칼리머 설계기술개발팀)	
출 판 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소
발행년	1999. 3.		
페 이 지	p. 68	도 표	있음(○), 없음()
크 기	29.7 cm		
참고사항			
비밀여부	공개(○), 대외비(), 급 비밀	보고서종류	기술보고서
위탁연구기관		계약 번호	
초록(15-20 줄내외)			
<p>KALIMER 는 KAERI 에서 개발 중인 풀형 신형 액체 금속로이다. 이 설계에는 안전성 향상을 위해, 여러 가지 신형 안전 개념들이 도입되어 있다. 하지만, 궁극적인 안전성 향상을 위해, 격납 돔의 설계가 도입되었고, 이의 성능 분석이 수행되었다. 격납 돔의 설계에 앞서, 기존 액체 금속로에 적용되어 있는 격납 용기 설계들이 검토되었으며, 이들의 성능 분석 방법도 살펴보았다. 그리고, 격납 성능 분석을 위한 분석 체계를 정립하여, 그 사용 가능성을 시험계산을 통해 검증하였다. 성능 분석을 위한 코드에는, 격납 용기의 열수력학적 거동 및 에어로졸의 거동을 분석하는 CONTAIN-LMR 과 격납용기 외부에서의 방사성 영향 평가를 위한 MACCS 코드가 사용되었다.</p> <p>예비적으로 KALIMER 의 격납 돔 설계를 단일 격납 용기로 하고, 성능 분석에 필요한 분석 대상사고를 소듐 풀 화재와 소듐 스프레이 화재로 선정하였다. 선정된 사고에 대해 각각 방사선원 향을 정의하고, 격납 성능 분석을 하였다.</p> <p>이때, 격납 돔의 부피를 민감도 변수로 하는 민감도 분석을 같이 수행하였다. 분석 결과, 100kg 의 소듐의 누설에 대한 스프레이 화재를 제외하고는, 격납 돔의 압력이 모두 설계 압력 이하로 유지되는 것으로 나타났다. 그리고, 격납 돔의 압력은 부피 변화에 대해서는 민감하지 않은 것으로 나타났다.</p> <p>격납 돔 외부에서의 피폭 선량 분석이 각 사고에 대해, 격납 돔 부피를 민감도로 해서 이루어 졌다. 분석 결과, 모두 PAG 제한값을 만족하는 것으로 나타났다. 피폭 선량의 변화는 격납 돔의 압력에 비해서는 격납 돔 부피에 민감한 것으로 나타났다.</p> <p>격납 성능 분석과 피폭 선량 분석의 결과, 예비 설계된 격납 돔의 설계는 어느 정도 최적화 된 것으로 판단된다.</p> <p>이를 바탕으로, 설계의 최적화를 위해, 다양한 민감도 분석이 요구된다.</p>			
주제명키워드 (10 단어내외)			
액체금속로, 칼리머, 격납용기, 격납성능 분석, 소듐 화재, 방사선원 향			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-1240/99					
Title / Subtitle					
Preliminary Performance Analysis of KALIMER Containment					
Main Author		SeongWook, Lee (KALIMER Design Team)			
Researcher and Department		Y.M. Kwon, K.D. Kim, S.D. Suk, W.P. Chang, D.H. Hahn (KALIMER Design Team)			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI		Publication Date
					1999. 3.
Page	p. 68	Ill. & Tab.	Yes(o), No()		Size
					29.7 cm
Note					
Classified	Open(o), Restricted(), Class Document		Research Type	Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)					
<p>KALIMER is a pool type advanced liquid metal reactor which is being developed in KAERI. Advanced design features are incorporated into the conceptual design for the enhancement of its safety. However, for the ultimate safety of KALIMER, the containment dome design is introduced and analyzed.</p> <p>Before the performance analysis, the containment design of existing liquid metal reactor and the analysis methodology is reviewed. The Methodology is established and test run for verification is performed. The codes for analysis are CONTAIN-LMR for containment thermal-hydraulic and aerosol behavior of containment, and MACCS for radiological consequence evaluation outside the containment.</p> <p>The preliminary containment dome design of KALIMER is determined to be single containment. The accidents for analysis are sodium pool fire and spray fire under HCDA condition.</p> <p>The source terms are determined for each accident and containment performance analyses have been performed.</p> <p>The sensitivity studies also have been performed with the containment dome volume.</p> <p>The results show that except 100kg sodium spray, the containment pressure is well established below the design limit. The containment dome is somewhat insensitive to containment volume.</p> <p>The exposure dose rates are estimated for each accident, and show that the dose rate are below the PAG limit. The dose rate is more sensitive than containment pressure to containment volume.</p> <p>From the analysis results, the preliminary determined containment dome design is thought to be rather optimal.</p> <p>Based on the analysis results, further sensitivity study on various parameters are required for design optimizaiton.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)					
		LMR, KALIMER, Containment, Sodium Fire, Source Terms			