

## 화재완화를 위한 소듐 루프 건물의 구획화

### Fire Mitigation by Partitioning a Sodium Loop Building

김병호\* · 권상운\* · 정경채\* · 김광락\* · 황성태\*

B.H. Kim · S.W. Kwon · K.C. Jeong · K.R. Kim · S.T. Hwang

(1998년 3월 21일 접수, 1998년 6월 13일 채택)

#### ABSTRACT

Analysis on the study for the sodium fire mitigation was carried out using the CONTAIN-LMR code. Sodium loop building was partitioned into the many cells, in which the safety venting systems were installed for the purpose of improving the sodium fire safety and minimizing its effect on the sodium loop building. The effects of sodium fire on sodium loop building partitioned into the many cells and not partitioned were investigated. The peak pressure and temperature of each cell accompanied by sodium fire in sodium loop building partitioned were lower than those of sodium loop building not partitioned. In the case of partitioning sodium loop building, the pressures, temperatures and aerosols into cells were transferred through propagation path of CONTAIN-LMR sodium fire model simulated by this study, and the effect of sodium spray fire on sodium loop building was mitigated by partitioning building. In addition, the excessive rise of pressure into cells was prevented by installing the over-pressure exhaust valve and under-pressure exhaust valve on the flow path between cells.

#### 1. 서 론

액체금속로는 기존의 경수로나 중수로와는 달리 냉각재로서 소듐을 사용하는데, 소듐은 물에 비하여 약 100배 정도 높은 열전도도와 높은 비점을 가지고 있어 원자로의 운전온도와 압력

을 고온과 저압상태에서 운전할 수 있으므로 기존의 원자로보다 열효율이 높고, 또한 소듐의 자연대류로 인한 냉각능력이 물에 비하여 탁월한 장점이 있다. 그러나, 소듐이 갖는 강한 화학반응성으로 인하여 액체금속로에서 원자로 용기 및 냉각 계통 등이 파열되면 소듐이 누출되어

\* 한국원자력연구소 소듐기술실험

공기 중의 산소와 반응하여 소듐 화재가 발생되며, 이러한 소듐 화재로 인하여 원자로 내 압력이나 온도가 증가됨과 동시에 산소와의 반응생성물인 소듐 옥사이드계통의 에어로졸이 발생되어 원자로 내에 있는 주요 기기 및 부품들을 손상시킬 뿐만 아니라 원자로 내 압력상승으로 인하여 방사선물질이 함유된 에어로졸이 외부로 누출되면 원자로 건물 주위로의 방사선 오염도 야기시킬 수 있는 심각한 문제를 야기 시키게 된다<sup>1)</sup>.

최근에는 일본의 몬주의 액체금속 원형로에서 1995년 12월에 40% 출력시험 중 2차계통의 소듐 누출로 인하여 화재가 발생되어 원자로가 수동 정지되는 사고가 발생한 경우도 있었다. 따라서 액체금속로 개발을 주도하여 온 선진국에서는 다양한 종류의 소듐 화재시험시설을 이용하여 소듐 화재에 대한 연구를 다방면으로 수행함으로써 소듐 화재 및 이때 동반되는 에어로졸의 특성, 온도 및 압력 변화 등에 관한 영향을 고려하여 실제 화재시 결과를 예측, 설계에 반영하여 소듐 화재에 대한 방호대책을 수립하여 오고 있다. 이러한 방호대책 중의 하나로서 소듐 화재의 영향을 최소화하기 위하여 기존 소듐 루프 및 2차계통건물을 구획화하는 것으로서<sup>2)</sup> 이는 소듐 화재가 발생할 경우, 화재 영향을 누출 지역에만 국한하고 산소공급원을 제거함으로써 화재를 조기에 진화하기 위한 것이 목적적이다.

따라서, 본 연구에서는 액체금속로의 소듐 화재 안전 대책 설계 인자를 도출하기 위한 준비 단계로서 소듐 루프 건물(Sodium Loop Building, SLB)을 몇 개의 셀로 구획화하고, 각 구획간에 안전밸브를 설치한 후 구획화된 건물 내에서 소듐 분무형 화재 발생하였을 때 이에 대한 화재 영향 및 화재 완화 현상을 CONTAIN-LMR 전산코드<sup>3)</sup>를 이용하여 예비 계산하여 보고자 한다.

## 2. 이 론

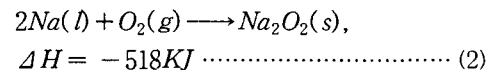
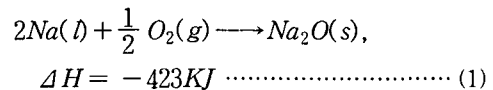
본 연구에 사용된 CONTAIN-LMR/1B-Mod 전산코드는 미국의 Nuclear Regulatory Com-

mission(NRC)의 지원으로 경수로용 중대사고 해석용 코드인 CONTAIN코드를 Sandia National Laboratory(SNL)에서 액체금속로용으로 개발한 코드로서 원자로 내의 물리화학 및 방사학적 조건을 예측하는데 사용되고 있다. 이 코드는 소듐 풀형 및 분무형 화재 모델 뿐만 아니라 소듐-콘크리트반응 모델 등과 같이 소듐에 관련된 여러 모델을 포함하고 있다.

### 2.1 소듐 연소 모델

소듐 화재는 연소 과정에 따라서 크게, 세 가지 유형 즉, 풀형 화재, 분무형 화재와 조합형 화재로 분류된다. 이러한 화재 형태는 누출부분의 기하학적 구조, 누출부위의 모양, 크기 및 위치, 소듐 온도, 분출 속도 및 분출량과 누설 소듐의 상태에 따라 결정된다. 풀형화재는 대량의 소듐이 누설되어 절연부를 즉시 파괴시키고 소듐이 분산되지 않은 상태로 급속히 흘러 용기 하부에 풀을 형성하여 화재를 일으키는 것이고, 분무형 화재는 가압하의 소듐이 누설부위에서 분사, 확산되면서 공기 중에서 연소하는 화재로서, 미세 액적에 의하여 발화 면적이 확장되기 때문에 연소 속도가 일반적으로 크게 된다. 그리고, 풀형 화재와 분무형 화재가 조합된 조합형 화재가 있다.

한편, 공기 분위기에서 다음 두 가지 일반적인 화학반응에 의하여 소듐 화재가 유지된다<sup>4)</sup>.



### 2.2 Flow model

본 연구에서는 소듐 냉각 루프 건물에서 화재 완화를 위한 방편으로 건물을 다중셀로 구획화하고 구획화된 각 셀과 셀 사이에 안전밸브를 설치하여 구획화된 셀에서 화재가 발생되었을 때 화재의 영향을 최소화하기 위한 모델을 설정하였다.

구획화된 각 셀 간의 flow path에서 물질 흐

를 계산하는 데에는 세 가지 방법이 이용되고 있다. 첫 번째 방법은 flow path상에 존재하는 재료의 inertia와 flow path 자체가 가지고 있는 흐름에 대한 마찰 저항을 고려함으로써 flow path상에 존재하는 압력차를 계산하여 각 구획 간의 흐름을 계산하는 방법이고, 두 번째 방법은 flow path상에 존재하는 재료의 inertia를 무시함으로써 flow path를 따라 형성된 압력차로부터 흐름을 계산하는 방법이 있으며, 마지막으로 세 번째 방법은 압력차와는 무관하게 사용자가 mass flow rate와 volumetric flow rate를 설정하여 흐름을 결정하는 방법이 있다.

흐름방정식은 두 개의 셀 i, j 사이에서의 흐름으로 표시되며, 성분 k의 mass flow rate는 다음과 같이 표시된다.

$$W_{k,ij} = m_{k,u} W_{ij} / m_u \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_{ij} = H_u W_{ij} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기에서,  $W_{ij}$ : Total material mass flow rate from i to j

$W_{k,ij}$ : Material mass flow rate of component k from i to j

$m_{k,u}$ : Mass of component k in the upstream cell

$m_u$ : Total mass of the gases and condensable material in the upstream

$Q_{ij}$ : Convective energy transfer rate from i to j

$H_u$ : The cell specific enthalpy

성분이 에어로졸인 경우, 식(5)에 gravitational settling term이 포함된다.

$$W_{k,n,ij} = m_{k,u} W_{ij} / m_u + \rho_{k,n,u} V_{g,n,ij} A_{ij} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기에서,  $\rho_{k,n,u}$ : Aerosol component mass concentration in size class n in the upstream cell

$V_{g,n,ij}$ : Component of the gravitational settling velocity along the flow path axis from i to j

$A_{ij}$ : Flow area

## 2.2.1 The inertial flow model

Inertial flow model은 lumped parameter frictional resistance뿐만 아니라 flow path상에 존재하는 가스의 inertia를 고려한 모델이다. 고정

된 압력차에서 flow path가 갑자기 열리게 되면 inertia에 의하여 흐름속도가 정상상태로 가는 것을 지연시킨다. 두 개의 셀의 압력이 평형에 도달하면 inertia는 다른 형태로 나타나게 되는데, 압력차가 0이 되는 지점에서 유동물질의 inertia 때문에 흐름속도는 일반적으로 유한값을 가지게 된다. Flow path를 따라 형성된 압력차의 방향은 한정된 흐름속도에 의하여 반대로 바뀌지게 되는데 결과적으로 흐름이 역방향으로 흘러가게 되는 것이다. 이러한 조건에서 흐름이 진동하게 된다. Inertial flow model에서 흐름방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$dW_{ij}/dt = (\Delta P - C_{FC}|W_{ij}|W_{ij}/\rho_{ij}A_{ij}^2)A_{ij}/L_{ij} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기에서,  $\Delta P$ : Driving pressure difference

$C_{FC}$ : Turbulent flow coefficient

$\rho_{ij}$ : Gas flow density

$A_{ij}$ : Flow path area

$L_{ij}$ : Flow path length

Turbulent flow coefficient,  $C_{FC}$ 는 무차원수로써 실험적으로 결정되며 방출된 에어로졸을 여과하기 위한 필터의 압력강하와 관련된 상수이다.

$$C_{FC} = \frac{1}{2K^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

본 연구에서는 Inertial flow model을 채택하여 각 구획간 흐름을 계산하였고, 식(7)의  $C_{FC}$ 가 화재에 미치는 영향을 살펴보았다

## 2.2.2 Quasi-State flow model

Quasi-State flow model은 흐름속도가 flow path상에 존재하는 압력차에 알맞은 정상상태값으로 즉시 도달된다고 가정한다. 이때 흐름저항은 linear flow coefficient( $C_{LFC}$ )와 turbulent flow coefficient( $C_{FC}$ )에 의하여 조절된다.

주어진 흐름속도  $W_{ij}$ 에서 흐름저항은 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta P = C_{LFC}W_{ij} + C_{FC}|W_{ij}|W_{ij}/\rho_{ij}A_{ij}^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

## 2.3 소동 분무형 화재 모델<sup>5)</sup>

소동 분무형 화재는 지금까지도 완전하게 규명되고 있지 않은 복잡한 연소 및 열전달 과정을 수반하고 있다. 즉, 액적 간의 상호작용, 분

무영역에서의 산소 소모 등에 관한 연구가 아직도 미진한 상태이다. 단일 액적의 연소 속도는 vapor-phase combustion theory로부터 예측이 가능하며, 소뿔의 분무상태는 액적들이 집단적으로 존재하는 것이기 때문에 분무형 화재의 연소속도는 각 액적의 연소속도를 합한 것으로 나타내어진다. 현재, 연소속도를 결정할 때 액적의 상호작용, 분무지역에서의 가스온도의 비균일성 및 산소 소모에 대한 영향에 대한 이해가 부족한 실정이다.

### 2.3.1 구형 단일 액적의 연소모델

액적의 증발속도에 따라 연소속도가 증가하기 때문에 단일 액적의 mass burning rate,  $\dot{m}$ 은 액적 크기가 감소함에 따라 증가한다.

$$\dot{m} = -\frac{d}{dt} \left( \frac{\pi}{6} D^3 \rho \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{d(D^2)}{dt} = -\frac{4\dot{m}}{\pi\rho D} \dots\dots\dots (10)$$

여기에서, t: Time

D: Droplet diameter

$\rho$ : Density

Burning rate coefficient (evaporation constant), K는 다음과 같이 표시된다.

$$K \equiv -\frac{d(D^2)}{dt} \dots\dots\dots (11)$$

$$\dot{m} = \frac{\pi\rho k}{4} D \dots\dots\dots (12)$$

$$k = \frac{8k}{C_{pp}} \ln(1+B) \dots\dots\dots (13)$$

여기에서, k: Gas mixture thermal conductivity

$C_p$ : Gas mixture specific heat capacity

B: Transfer number

### 2.3.2 자유낙하액적의 연소 모델

강제복사는 연소속도를 증가시키기 때문에 이에 대한 영향을 반드시 고려하여야 하나, 강제대류상태에서 액적의 연소 속도를 분석학적으로 얻기가 매우 어렵기 때문에 자유낙하 중인 액적에 대한 연소식들은 실험적인 상관식이 대부분이다. 일반적으로 사용되는 강제대류와 관련된 부동 액적의 연소 속도식은 다음과 같이 표시된다

$$\dot{m}_f = \dot{m}(1 + C_f Re^{1/2} Pr^{1/3}) \dots\dots\dots (14)$$

$$\dot{m}_f = \frac{2\pi k}{C_p} D(1 + C_f Re^{1/2} Pr^{1/3}) \ln(1+B) \dots\dots\dots (15)$$

여기에서,  $\dot{m}_f$ : Falling droplet mass burning rate

$C_f$ : Empirical constant

Re: Reynolds number

Pr: Prandtl number

### 2.3.3 소뿔 액적 거동

소뿔 액적은 액적의 표면으로부터 흘러나오는 mass flux에 의한 inertia force 때문에 증발하는 소뿔 액적의 운동식은 고정 구형 액적의 운동식과는 구별된다. 즉, 액적의 drag force에 영향을 미친다. 증기가 액적표면으로 나오면서 skin drag는 momentum boundary layer에 의하여 감소한다.

연소하는 액적의 운동식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dV_f}{dt} = g - \frac{3\rho_g V_f^2 C_d}{4\rho D} \dots\dots\dots (16)$$

여기에서,  $V_f$ : Droplet falling velocity

$C_d$ : Drag coefficient

### 2.3.4 액적 크기 분포

액적의 연소속도를 계산하기 위하여 수많은 상관식들이 제시되었으나, 일반적으로 Atomic International(AI)의 실험결과와 상관관계가 양호한 다음과 같은 Nukiyama-Tanasama correlation 이 사용되며, 다른 액적 크기 분포가 다양하게 이용될 수 있다.

$$\frac{dR_v}{dD} = \left( \frac{3.915}{D} \right)^6 \frac{D^5}{120} \exp \left( -\frac{3.915D}{D} \right) \dots\dots\dots (17)$$

여기에서,  $R_v$ : Volume fraction of spray which contains droplets of diameters smaller than D

$\bar{D}$ : Volume mean diameter

### 2.3.5 분무형 연소 모델

소뿔의 단일 액적의 연소방정식은 매우 간단하지만 소뿔 액적이 분무되는 경우, 실제 액적

크기 분포, 액적의 구역 밀도, 구역 산소 농도, 액적 간의 상호작용과 같은 분무형 연소에 영향을 미치는 변수들이 일반적으로 알려져 있지 않다. 분무영역에서 산소의 소모 때문에 분무영역에서의 산소농도는 분무영역 바깥쪽의 산소농도보다 낮지만 가스온도는 분무영역 안쪽에서 발생된 열 때문에 분무지역의 바깥쪽보다 안쪽에서 높다. 액적이 분무되는 지역에서 산소변화를 무시하고 평균온도가 사용한다고 가정하고, 이웃한 액적들의 상호작용을 고려하지 않고 단일 액적들의 연소이론들을 이용하면 분무형 연소속도는 다음과 같이 모든 액적의 연소속도의 합계로 나타내어질 수 있다.

$$\dot{m}_s(t) = \int_{D_i} \int_t \dot{m}_f(D_i, t, t), V_f(D_i, t, t) d^2N \dots\dots\dots (18)$$

여기에서,  $\dot{m}_s$ : Spray mass burning rate  
 N: Total number of droplets  
 $d^2N$ : Number of droplets having diameters between D and D+dD, and having elevations between z and z+dz at time t

$d^2N$ 은 소듐 누출속도와 액적 크기 분포로부터 유도될 수 있다.

$$d_2N = \frac{\dot{m}_l(t)}{\frac{1}{6} \pi D_i^3 \rho_{Na}} \frac{dR_v}{dD_i} dt dD_i \dots\dots\dots (19)$$

$$d^2N = \frac{\dot{m}_l(t)}{\pi D_i^3 \rho_{Na}} \left( \frac{3.915}{D} \right)^6 \frac{D_i^5}{20} \exp \left( - \frac{3.915 D_i}{D} \right) dt dD_i \dots\dots\dots (20)$$

여기에서,  $\dot{m}_l$ : Sodium leak rate  
 $\rho_{Na}$ : Density of sodium  
 $D_i$ : Initial droplet diameter

#### 2.4 소듐 루프 건물에서의 CONTAIN-LMR 분무형 화재 모델

분무형 화재 모델에 사용된 소듐 루프 건물의 용적은 22,680m<sup>3</sup>이고 폭이 18m, 길이가 28m, 높이가 45m로서 소듐정제루프, catch pan, Intermediate Heat Transfer System(IHTS), separator, sodium dump tank, sodium piping,

auxiliary vessel, control/HVAC가 갖추어져 있다. 건물의 천정, 바닥, 벽면의 재질은 콘크리트이며 각 콘크리트 사이에는 단열재가 들어있다. 그리고, 각 셀 내부에는 콘크리트와 소듐의 반응을 차단하기 위한 liner가 설치되어 있고 하부에는 catch pan이 있다. 소듐 루프 건물내 주요 장치는 stainless steel로 제작된 것으로 가정하였고, 각 파이프와 탱크 내에 존재하는 소듐 및 주요 구조재도 heat sink로 간주하였다.

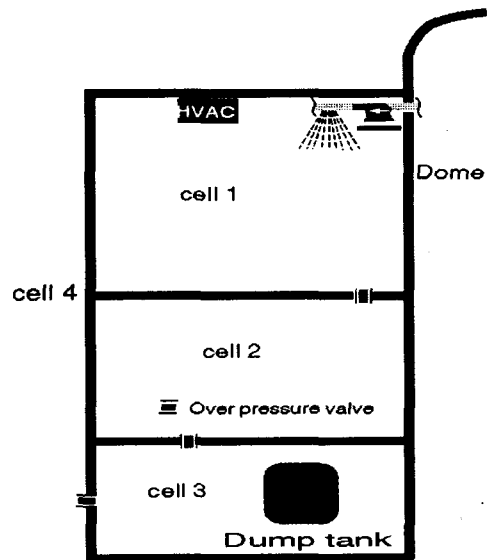


Fig. 1 CONTAIN-LMR model for sodium spray fire in sodium loop building not partitioned by multi-cells

Fig. 1은 소듐 냉각 루프 건물을 구체화하기 전에 소듐 분무형 화재를 모사하기 위한 CONTAIN-LMR 모델을 나타내고 있다. 소듐 분무형 화재가 셀 1에서 발생하여 셀 1의 압력이 상승되면, 셀 1과 셀 2에 설치되어 있는 overpressure exhaust valve가 작동함으로써 그 유로(flow path)를 통하여 셀 2로 열 및 에어로졸 등이 배출되도록 하고, 셀 2에서 압력이 증가하면 위에서 설명한 바와 같이 유로를 통하여 셀 3, 셀 4로 유체의 흐름이 전달되도록 설정하였다. 대기로 유출되는 온도 및 에어로졸의 영향을 살펴보기 위하여 소듐 냉각 루프 건물의 외부를 셀 4로 정의하였다. 또한, 셀 1과 셀 2, 셀 2와 셀 3과 셀 4의 유로상에 설치된 안전밸브의 면적

Table 1 Characteristics of the safety venting systems

Safety venting system		Over pressure valve between cell1 and cell2	under pressure valve between cell1 and cell6	under pressure valve between cell1 and cell5	Over pressure valve between cell2 and cell3	Over pressure valve between cell3 and cell4	Over pressure valve between cell3 and cell5	Over pressure valve between cell5 and cell6	Over pressure valve between cell6 and cell7
With partition	Flow path area (m <sup>2</sup> )	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$\Delta P$ beginning to open(Pa)	1,000	-4,000	-4,000	1,000	13,000	1,000	1,000	1,000
	Turbulent flow coefficient, $C_{FC}$	0.1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Without partition	Flow path area (m <sup>2</sup> )	1.0			1.0	1.0			
	$\Delta P$ beginning to open(Pa)	1,000			1,000	1,000			
	Turbulent flow coefficient, $C_{FC}$	0.5			0.5	0.5			

Table 2 Sodium spray design base leak in sodium loop building

Case	Sodium Leak rate (kg/second)				
	Time (second)				
	1	5	100	200	300
Partitioned	10	10	10	0	0
	10	170	170	0	0
	10	900	900	0	0
not partitioned	10	10	10	0	0
	10	170	170	0	0
	10	900	900	0	0

은 1m<sup>2</sup>이 되게 하였고, 셀 내부에서 압력이 1×10<sup>3</sup> Pa이상 상승하게 되면 안전밸브가 열리도록 설정하였다. 결국 셀 1에서 분무형 화재가 발생되면 열, 에어로졸 등은 셀1, 셀 2, 셀 3, 셀 4로 전달되도록 모사되었다. 한편 식(6)에서 정의된 유로상에 설치된 에어로졸 필터의 압력강하와 관련된 turbulent flow coefficient는 모두 0.5로 하였으며(Table 1), 식(19)에 표시된 소듐 누출량이 화재에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 소듐 DBL(Design Base Leak) table을 Table 2와 같이 작성하였다. 그리고, 소듐 루프 냉각 건물에서 소듐 분무형 화재를 모사하기 위한 일반적인 CONTAIN-LMR코드의 입력 파라미터가 Table 3에 설명되어 있다

Fig. 2는 소듐 냉각 루프 건물을 얼곰 개의 셀로 구획화 하여 소듐 분무형 화재를 모사하기

위한 CONTAIN-LMR 모델을 나타내고 있다.

구획화되기 전의 셀 1을 4개의 셀로 균일하게 나누고 Fig. 2에 나타난 바와 같이 각 셀 사이

Table 3 General parameters and sodium loop building data in CONTAIN-LMR code for sodium fire analysis

Initial Pressure	1.0×10 <sup>5</sup> Pa
Gas Temperature	308 °K
Sodium Temperature	823 °K
Gas composition	N <sub>2</sub> : 79.2 %, O <sub>2</sub> : 20.8 %
Free Volume in each cell	
Partitioned	
Cell 1	2,250 m <sup>3</sup>
Cell 2	2,250 m <sup>3</sup>
Cell 3	8,000 m <sup>3</sup>
Cell 4	5,680 m <sup>3</sup>
Cell 5	2,250 m <sup>3</sup>
Cell 6	2,250 m <sup>3</sup>
Cell 7	1.0e5 m <sup>3</sup>
Not partitioned	
Cell 1	9,000 m <sup>3</sup>
Cell 2	8,000 m <sup>3</sup>
Cell 3	5,580 m <sup>3</sup>
Major Equipment	
Steam Generator	
Control/HVAC and Duct IHTS	
Seperator	
Sodium Dump Tank	
Catch Pan	
Auxiliary vessel	

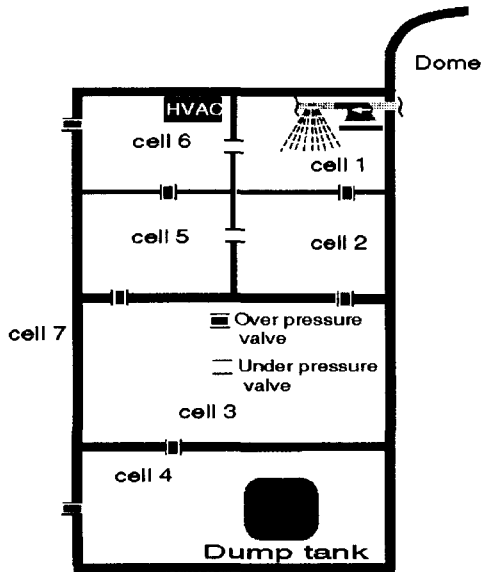


Fig. 2 CONTAIN-LMR model for sodium spray fire in sodium loop building partitioned by multi-cells

에 over-pressure exhaust valve와 under pressure valve를 설치하였다. 여기에서 over-pressure exhaust valve의 기능은 셀 내부의 압력이 상승되었을 때 압력을 배출시키기 위한 것이고, under pressure valve의 기능은 화재가 진행된 후에 셀 내부가 진공상태에 있을 때 이웃한 셀로부터 유체가 유입되도록 하기 위한 것이다. 즉, 셀 1과 셀 2의 압력이  $-4 \times 10^3 \text{ Pa}$  이하가 되면 셀 6에서 셀 1으로, 그리고 셀 5에서 셀 2로 유체가 유입되도록 하였고 밸브의 면적은  $1 \text{ m}^2$ 로 하였다. Over-pressure valve의 경우, 유로상에 설치된 모든 밸브의 면적은  $1 \text{ m}^2$ 로 하였고 밸브가 열리는 압력의 설정치는 모두  $10 \text{ mb}$ 로 하였다. 다만, 셀 3과 셀 4의 압력 설정치는  $1.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 로 하여 셀 3에서 셀 5로 유체가 흐르는 동안 셀 3의 압력이 지나치게 상승하면 셀 4의 압력밸브가 열리도록 하였다. 구획화된 경우, 소듐 화재 발생은 구획화되지 않은 경우와 마찬가지로 셀 1의 같은 위치에서 분무형 화재가 발생한다고 가정하였다. 결국, 구획화된 소듐 냉각 루프 건물에서 화재가 발생하였을 때 열, 압력 및 에어로졸의 배출 순서는 셀 1, 2, 3, 4, 6, 7이 되도록 모사 되었으며, 전산코드에 의하여 계산

된 각 셀에서의 열, 압력, 에어로졸의 배출 흐름 특성을 분석하여, 소듐 냉각 루프 건물의 구획화를 통하여 이웃하는 셀로의 화재 전파를 최소화할 수 있는지를 살펴보았다.

한편, 유로상에 설치된 에어로졸 필터가 화재에 미치는 영향, 즉 식(6)에 설명된 turbulent flow coefficient( $C_{FC}$ )의 영향을 살펴보기 위하여 셀 1과 셀 2의 유로에 두 가지 유형의 필터(서로 다른  $C_{FC}$ 를 가진 필터)를 설치하였다(Table 1). 또한, 소듐 분무형 화재를 모사하기 위한 CONTAIN-LMR모델의 일반적인 입력자료와 소듐 DBL(Design Base Leak)이 Table 1, 2에 나타나 있다.

### 3 연구결과 및 고찰

소듐 냉각 루프 건물에서의 소듐 화재 안전성을 향상시키고 화재의 영향을 완화하기 위한 방안으로써 냉각 루프 건물을 여러 개의 셀로 구획화하고, 어느 한 셀에서 지나친 압력 상승의 차단 및 열, 압력, 에어로졸의 흐름을 최소화하기 위하여 구획화된 각 셀 사이에 안전밸브를 설치하고 소듐 분무형 화재 발생시 구획화된 건물과 구획화되지 않은 건물에서의 화재 영향을 고찰하여 보았다.

본 연소모델은 소듐화재현상이 가장 격렬한 누출 형태인 제트식 분무 즉, 노즐과 같은 단면적을 통하여 압력차에 의해 뿜어져 나와 미세한 액적으로 되면서 공기 중 산소와 반응하는 경우를 기초로 하였다. 셀 1에서의 연소 특성은 셀 내의 산소량에 따라 반응식(1), (2)에 의해 발열된다. 누출량에 따라 양론적으로 산소가 소모되며 과량의 산소가 유지될 때는 반응식(2)에 의해 추가로 높은 발열량을 내며,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ 가 에어로졸의 주성분이 된다. 이러한 소듐 연소에 의하여 생성된 에너지는 소듐의 액적으로부터 대류 및 복사에 의하여 대기로 전달되고 일부는 복사에 의하여 벽면으로 전달된다. 따라서 소듐 연소열의 열전달에 의하여 셀 내부의 온도는 상승하고 압력은 연소에 의하여 증가하게 된다. 소듐의 연소 속도에 영향을 미치는 인자로서는 크게 셀 내부에 존재하는 산소 농도, 소듐 액적의

크기 분포 및 거동, 소듐 누출 부위에서 셀 바닥까지 하강하는 거리 등이 있다. 따라서 건물을 구획화 함으로써 액적의 하강 거리를 줄이고 산소의 공급을 최소화 하여 셀 내부에서 자발적인 화재 진화를 기대할 수 있다. Fig. 3과 4는 셀 1에서의 이러한 소듐 연소 특성을 설명하여 주고 있다. Fig. 3은 소듐 냉각 루프 건물이 구획화되지 않았을 때, 셀 1에 공급된 소듐, 제거된 산소, 연소된 소듐의 양을 시간에 따라 보여 주고 있다. 그림에서 보여진 바와 같이 소듐은 200초까지 25,000kg이 공급되었으나 산소의 소모가 중단되는 약 150초까지 소듐의 2,000kg이 연소되게 된다. 반면에 구획화된 경우(Fig. 4)에는 약 100초에서 산소의 소모가 그림에 따라 소듐의 연소는 중단되며 이때 700kg의 소듐이 연소된다. 구획화되지 않은 경우보다 구획화된 경우에 적은 양의 소듐이 연소되는 이유는 앞에서 설명된 바와 같이 구획화된 경우에는 산소의 결핍으로 인하여 자연적으로 질식되고 누출되는 소듐의 액적의 이동거리가 짧아서 연소속도에 미치는 영향이 적은 것에 기인한다.

한편, 연소 cell 즉, 소듐 누출 셀에서는 압력 상승으로 고온의 질량(에어로졸 포함)이 안전밸브의 허용 개폐 압력차로부터 선형적으로 유로 단면적을 증가시켜 이웃 셀로 질량을 이동시켜 적당한 압력을 유지케 된다. 본 모델은 식(3), (4)

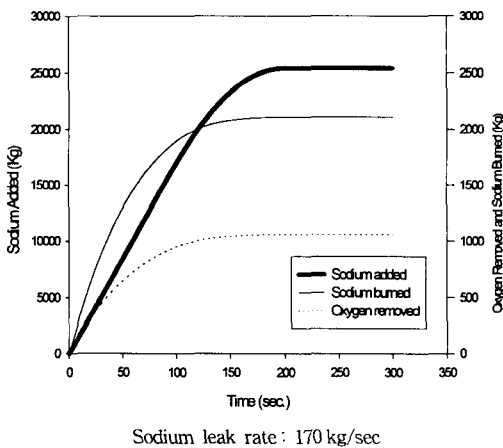


Fig. 3 Sodium added, oxygen removed and sodium burned in cell of sodium loop building not partitioned

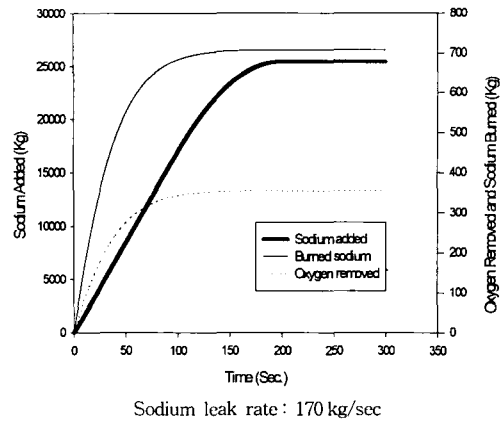


Fig. 4 Sodium added, oxygen removed and sodium burned in cell of sodium loop building partitioned by 7 cells

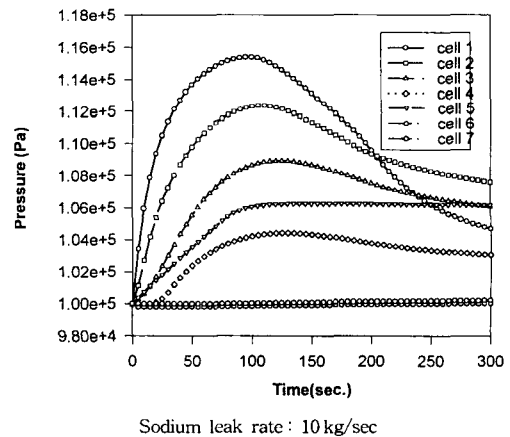


Fig. 5 Pressures in each cell of sodium loop building with partitions

와 같이 셀 간의 질량의 엔탈피 흐름이 주변 셀로 에어로졸 뿐만 아니라 온도와 압력을 상승시킨다. 이러한 주변 셀의 엔탈피 상승은 질량 이동에 의해 선형되며, 벽면 열전달 효과와 미반응 소듐증기, 소듐액적, 소듐 산화물 에어로졸( $\text{Na}_2\text{O}$ ) 등의 2차적 연소 등에 의한 물리적 이외 복합적인 인자를 포함하고 있다. Fig. 5는 7개의 셀로 구획화된 냉각 루프 건물에서 소듐 누출량이 10 kg/sec.이었을 때 시간에 따른 압력 변화를 보여주고 있다. 각 셀에서 압력 변화를 보면, 셀 1의 경우, 화재 발생 후 약 100초가 지나



$1.15 \times 10^5$  Pa의 peak pressure에 도달하고 시간이 지남에 따라 감소하기 시작한다. 셀 2의 경우에도 셀 1의 경우와 마찬가지로 압력이 증가한 후 감소하게 되는데 peak pressure는 셀 1보다 조금 늦은 110초에 나타나고 약 200초가 경과되는 시점에서 셀 2의 압력이 셀 1의 압력보다 높게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 셀 1, 2 사이에 설치된 over-pressure valve가 셀 간의 압력차  $1 \times 10^3$  Pa에서 열려 셀 2로 압력을 상승시키고 미연소 에어로졸, 미세 소듐 액적 등이 동시에 이동된다. 셀 간의 압력차가 줄어들면서 이 valve가 닫히고 셀 1은 공기 중의 산소 소모로 압력이 떨어지게 된다. 셀 1이 셀 6의 압력과 비교하여 부압이( $P=4 \times 10^3$  Pa) 걸리면 under-pressure valve가 열리면서 Fig. 8의 구획화되지 않은 경우처럼 과도하게 압력이 떨어지지 않게 되어 최소한 대기압 이상을 유지하게 된다. 이렇게 압력이 증가한 후 감소하는 현상은 셀 3, 4, 5에서도 동일하게 나타나고, 셀 6과 셀 7에서 압력변화를 보면, 화재 발생 전의 압력과 발생 후의 압력과 거의 동일하다. 즉, 셀 1에서 발생한 분무형 화재에 의하여 압력이 발생되고, 발생한 압력은 본 연구에서 모사된 압력 작용 순서에 따라 셀 1, 셀 2, 셀 3, 셀 5, 셀 6, 셀 7로 압력이 작용되게 되는데, 셀 6과 셀 7에는 압력의 영향이 거의 미치지 않는다고 볼 수 있다. 그리고, 셀 5에서의 압력도 시간이 지남에 따라 증가하는데 이러한 현상은 셀 3에서 형성된 압력이 셀 4보다는 우선하여 셀 5에 작용하지만, 압력의 일부가 셀 3과 셀 4 사이에 설치된 압력밸브가 열리면서 고 엔탈피의 질량이동에 의해 전달되는 것과 미반응 소듐증기, 소듐액적, 소듐산화물 에어로졸( $\text{Na}_2\text{O}$ ) 등의 이차적 연소 등에 의한 물리적 이외 복합적인 인자에 의해 전파되는 것으로 분석된다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 설명된 것과 동일한 조건에서 시간에 따른 온도 변화를 보여주고 있다. 셀 내 온도는 화재가 발생한 셀 1에서 가장 높게 나타났고, 열전달 경로는 압력 작용 경로와 마찬가지로 본 연구에서 모사한 압력 작용 순서에 따라 셀 1, 셀 2, 셀 3, 셀 5, 셀 6, 셀 7로 작용되었다. 그러나, Fig. 5의 셀 1에서 압력변화는

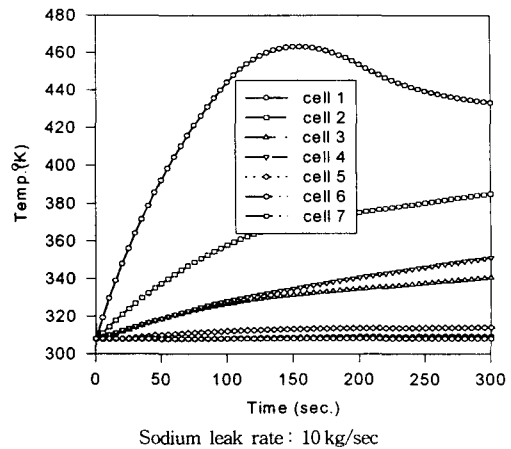


Fig. 6 Temperatures in each cell of sodium loop building with partitions

200초를 지나면서 셀 2, 3보다 낮아지는 반면에, Fig. 6의 셀 1에서 온도변화는 셀 2, 3보다 항상 높게 나타났다. 또한, 셀 1에서 peak pressure는 100초가 지나서 도달되었으나, 셀 1에서 peak temperature는 peak pressure에 도달하는 시간보다 50여초 늦은 150초가 경과된 후에 나타났다. 일반적으로 셀 내부에서의 압력과 온도 변화는 동일한 경향을 보이거나, 상기 결과를 보면 온도와 압력 변화가 약간 다른 경향을 보인다. 이러한 현상은 두 가지로 설명될 수 있는데, 첫 번째는 셀 1에서 셀 2로 전달되고 남아있는 미산화된 소듐 산화물( $\text{Na}_2\text{O}$ )의 2차 연소 및 heat sink로서 작용하는 구조재로부터 셀 대기로의 열전달(복사 및 대류)에 의한 것과 두 번째로는 공간사이에서의 물질전달에 의한 온도와 압력의 변화특성의 차이에 의한 것으로 볼 수 있다. 즉 셀 내부의 온도는 압력과는 달리 셀 내부 가스물질의 혼합시간이 필요하기 때문에 내부적으로 온도분포는 불균일하다. 따라서 압력은 빠른 시간에 균일화 되고 온도는 그보다 많은 시간이 경과된 후 균일화되게 된다. 이러한 이유때문에 셀 1에서 소듐 연소 초기에는 소듐의 연소에 의한 온도 및 압력의 상승 경향은 비슷하게 나타나지만 over-pressure valve가 열리면서 셀 1에서 상대적으로 낮은 온도의 물질이 배출되어 내부 평균온도는 증가하게 됨으로 온도와 압력의

최대값이 나타나는 시간이 달라지게 된다.

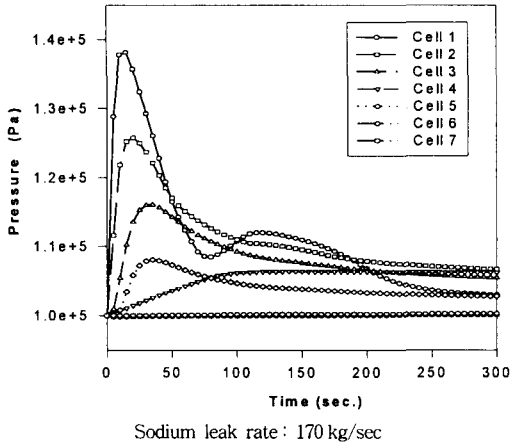


Fig. 7 Pressure in each cell of sodium loop building with partitions

Fig. 7은 구획화된 소듐 냉각 루프 건물에서 소듐이 초당 170 kg씩 누출되면서 셀 1에서 분무형 화재가 발생되었을 때 시간에 따른 압력 변화를 계산한 결과이다. 그림에서 보여진 바와 같이 셀 1에서의 압력 변화를 보면 소듐의 누출량이 10 kg/sec.이었을 때  $1.15 \times 10^5$  Pa의 peak pressure보다 더 높은  $1.38 \times 10^5$  Pa의 peak pressure가 발생되었고, peak pressure에 도달하는 시간도 누출량이 10 kg/sec.이었을 때와 비교하여 볼 때 훨씬 빠른 12초 정도에 나타났다. 이는 식(18), (19)로부터 알 수 있듯이 누출량이 증가하면 소듐의 연소속도의 증가한다는 사실과 일치하며, 압력이 급격히 감소하는 이유는 셀 내 산소농도의 급격한 감소와 셀 2로의 압력이 작용하는 것에 기인한다. 셀 2, 3, 4, 5에서도 같은 경향을 보이고 있으며, 본 연구에서 가정한 작용경로를 따라 압력이 작용됨을 알 수 있다. 셀 1에서 압력은 12초에서 최대압력에 도달한 후 감소하다가 78초에서 다시 증가하고 120초에 다시 감소하기 시작한다. 소듐 누출속도가 10 kg/sec.에서는 볼 수 없었던 이러한 압력 변화의 진동은 셀 1과 셀 6에 설치된 under-pressure valve가 60초를 지나면서 선형적으로 작동한 것에 의한 것에 기인하며, 50초 지점에서 선형적으로 닫혔던 over-pressure exhaust valve는 100

초를 지나면서 열고 난 후, under-pressure valve가 닫힌다. Under-pressure valve는 셀 내부에서 부압이 걸리는 것을 방지하기 위하여 설치되었다. 한편, 셀 5에서 압력은 셀 4의 압력보다 80초까지는 높게 나타나지만 80초가 지나면서 셀 5의 압력이 셀 4의 압력보다 낮아진다. 이러한 이유는 셀 3에서의 압력의 작용에 의한 영향도 있겠지만, 셀 3의 바닥을 통한 열전달에 주로 기인하였다고 볼 수 있다. 또한, 셀 6과 셀 7에서 압력 상승은 누출속도가 10 kg/sec이었을 때와 마찬가지로 아주 미미하게 나타났다.

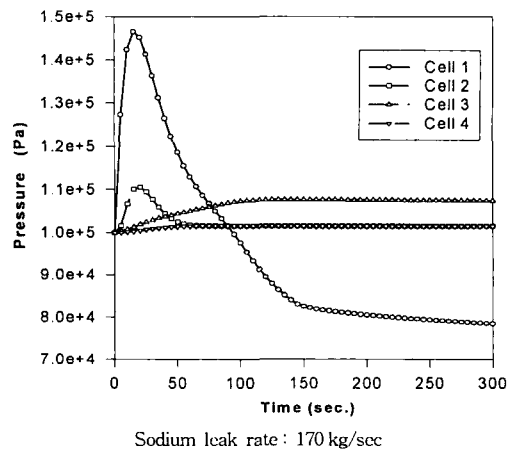


Fig. 8 Pressure in each cell of sodium loop building without partitions

Fig. 8은 구획화되지 않은 소듐 냉각 루프 건물에서 소듐이 초당 170 kg씩 누출되면서 셀 1에서 분무형 화재가 발생되었을 때 시간에 따른 압력변화를 보여주고 있다. 셀 1에서 압력은 빠른 시간안에  $1.47 \times 10^5$  Pa의 peak pressure에 도달하게 되는데, 이는 같은 조건에서 냉각 건물이 구획화된 경우보다 약  $0.08 \times 10^5$  Pa정도 높은 압력이다. 이러한 원인은 첫 번째로 셀의 높이에 있다고 볼 수 있다. 다시 말하면, 분무형 화재는 액적이 하강하면서 액적 크기 분포 및 액적 거동이 달라지고, 이에 따라 액적이 분무하면서 하강하는 이동하는 길이가 길수록 그만큼 액적들의 연소 속도가 증가하게 된다. 따라서 구획화하지 않은 경우에는 구획화된 경우보다 분무형 화재가 지속되는 시간이 길어서 소듐 연

소 속도가 상대적으로 크다고 볼 수 있다. 두 번째로 셀 내부에 존재하는 산소농도에 의한 것으로 볼 수 있다. 소듐 냉각 루프 건물이 구획화되지 않는 경우, 셀 1의 내부에 존재하는 산소의 양은 건물이 구획화된 셀 1에 존재하는 산소의 양보다 4배나 많이 존재하기 때문에 같은 소듐 누출 속도에서 소듐 연소 속도가 높아지게 된다. 즉, 셀 내부에서 압력이 높아지게 되는 것이다. 이러한 현상은 소듐 누출 속도가 클수록 두드러질 것으로 보인다. 그리고, 셀 1에서의 압력변화는 최대 압력을 보인 후 감소하면서 100초에 이르러 진공상태가 되기 시작한다. 이는 소듐과의 반응으로 급격한 산소 소모가 이루어지고 연소반응 후 셀 내부가 냉각되면서 부압이 걸리는 것으로 볼 수 있는데, 건물이 구획화된 경우에는 under-pressure valve의 설치로 인하여 이러한 현상이 관찰되지 않았다.

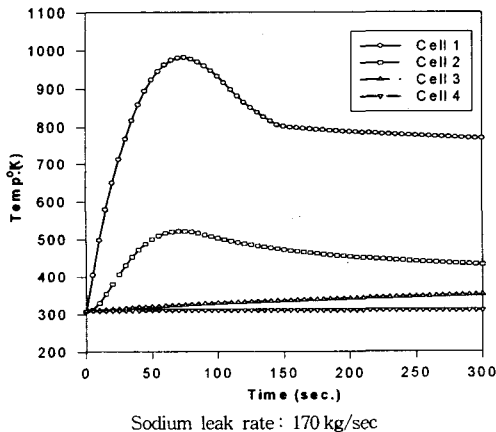


Fig.9 Temperatures in each cell of sodium loop building without partitions

구획화되지 않은 소듐 냉각 루프 건물에서 소듐 누출 속도가 170 kg/sec일 때, 셀 1에서의 시간에 따른 온도 변화를 계산한 결과가 Fig.9에 나타나 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 약 75초가 지난 시점에서 최대 온도 980°K에 도달한 후 급격히 감소하기 시작하다가 150초에서 완만한 온도변화를 보여주고 있다. 이렇게 온도가 완만하게 감소하는 현상은 유로를 통한 압력이 이 시점에서 완만하게 작용되었음을 의미한다.

다. 셀 2의 온도 변화도 거의 같은 경향을 보이고 있으나 셀 3의 온도는 계속 증가하는 경향을 보였다.

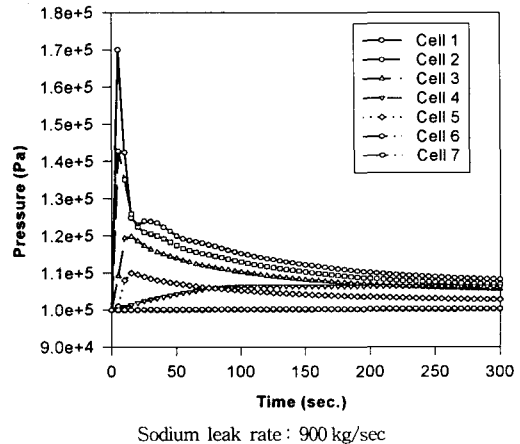


Fig. 10 Pressures in each cell of sodium loop building with partitions

구획화된 냉각 루프 건물에서 소듐 누출속도가 900 kg/sec이었을 때, 각 셀에서 압력변화를 계산한 결과가 Fig.10에 나타나 있다. 같은 조건에서 소듐 누출량이 10, 170 kg/sec.인 경우보다 더 빠른 시간 안에 최대 압력에 도달하였고, peak pressure도  $1.70 \times 10^5$  Pa로서 비교적 높게 나타났다. 각 셀을 통한 압력 작용 현상은 앞에서 가정한 작용 순서에 따라 작용됨을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합하여 보면, 소듐 누출 속도가 증가할수록 셀 내 peak pressure는 증가하며, 소듐 루프 건물이 구획화되지 않는 경우보다 구획화된 경우, 셀 1에서 화재에 의하여 발생된 온도, 압력 및 에어로졸 등이 이웃하는 셀로 배출되는 것이 최소화 되었다. 그러나 건물의 구획화 방법, 구획화를 어느 정도로 할 것인가 혹은 이들이 화재 완화에 미치는 영향에 대한 연구가 앞으로 다루어져야 할 것으로 보인다.

셀 내부에서 파열된 파이프를 통하여 소듐이 누출되었을 때 발생하는 소듐 화재의 연소속도는 소듐이 연소되면서 발생하는 소듐 에어로졸과 밀접한 관련이 있다. 이러한 에어로졸은 산소

Table 4 Aerosol size distribution cell 1 in sodium loop building with partition and without partition at run time 46s

simple aerosol conditions in cell 1, when cells is partitioned by multi-cells				
component densities (kg/m <sup>3</sup> )				
diameter range (m)	na2o	na2o2	nal	net
1.000E-07 to 3.162E-07	3.648E-05	3.648E-05	0.000E+00	7.296E-05
3.162E-07 to 1.000E-06	2.717E-03	2.716E-03	0.000E+00	5.433E-03
1.000E-06 to 3.162E-06	1.011E-01	1.011E-01	0.000E+00	2.021E-01
3.162E-06 to 1.000E-05	4.163E-02	4.163E-02	0.000E+00	8.326E-02
1.000E-05 to 3.162E-05	3.198E-03	3.198E-03	0.000E+00	6.396E-03
3.162E-05 to 1.000E-04	7.805E-05	7.804E-05	0.000E+00	1.561E-04
1.000E-04 to 3.162E-04	4.069E-07	4.069E-07	0.000E+00	8.138E-07
3.162E-04 to 1.000E-03	2.124E-10	2.123E-10	0.000E+00	4.247E-10
1.000E-03 to 3.162E-03	7.955E-15	7.954E-15	0.000E+00	1.591E-14
3.162E-03 to 1.000E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
=====				
component total(kg/m <sup>3</sup> )	1.487E-01	1.487E-01	0.000E+00	2.975E-01
component total(kg)	3.332E-02	3.332E-02	0.000E+00	6.664E-02
=====				
simple aerosol conditions in cell1 when cells is not partitioned by multi-cells				
component densities (kg/m <sup>3</sup> )				
diameter range (m)	na2o	na2o2	nal	net
1.000E-07 to 3.162E-07	3.168E-05	3.168E-05	0.000E+00	6.336E-05
3.162E-07 to 1.000E-06	3.075E-03	3.074E-03	0.000E+00	6.149E-03
1.000E-06 to 3.162E-06	5.374E-02	5.373E-02	0.000E+00	1.075E-01
3.162E-06 to 1.000E-05	1.213E-02	1.212E-02	0.000E+00	2.425E-02
1.000E-05 to 3.162E-05	4.028E-04	4.028E-04	0.000E+00	8.056E-04
3.162E-05 to 1.000E-04	3.825E-06	3.825E-06	0.000E+00	7.650E-06
1.000E-04 to 3.162E-04	9.012E-09	9.011E-09	0.000E+00	1.802E-08
3.162E-04 to 1.000E-03	2.999E-12	2.999E-12	0.000E+00	5.998E-12
1.000E-03 to 3.162E-03	8.942E-17	8.940E-17	0.000E+00	1.788E-16
3.162E-03 to 1.000E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
=====				
component total(kg/m <sup>3</sup> )	6.938E-02	6.937E-02	0.000E+00	1.387E-01
component total(kg)	6.218E-02	6.217E-02	0.000E+00	1.243E-01

와의 반응에 의하여 산화되었을지라도 공기와의 반응성을 가지고 있기 때문에 외부로 누출되어서는 안된다. Table 4는 컴퓨터 run time이 46 초일 때 구획화된 경우와 구획화되지 않은 건물의 셀 1에서의 에어로졸의 크기 분포를 비교한

결과를 보여주고 있다. 표에서 나타난 것처럼 건물이 구획화된 경우와 되지 않은 경우 모두  $1.00 \times 10^{-6} \sim 3.16 \times 10^{-6}$  m 액적 크기의 범위를 가진 에어로졸이 가장 많이 발생되었으나 발생된 에어로졸의 총량은 구획화된 경우가  $6.66 \times 10^2$  kg, 구획화되지 않은 경우가  $1.24 \times 10^3$  kg으로서 건물이 구획화된 경우 에어로졸이 훨씬 적게 발생되었다.

액체금속로에서 화재가 발생하였을 때, 에어로졸이 외부로 누출되어 환경을 오염시켜서는 안된다. 이러한 에어로졸이 외부로 누출되더라도 최소한으로 하기 위하여 본 연구에서 제의된 건물의 구획화가 필요하다. 건물을 여러 셀로 구획화함으로써 에어로졸의 배출을 각 셀에 국한되도록 하는 것이다. Table 5는 건물이 구획화된 경우와 되지 않은 경우에 각 셀에서의 에어로졸 밀도를 보여주고 있다. 건물이 구획화된 경우에는 환경으로 누출되는 에어로졸 밀도가  $8.59 \times 10^{-9}$  kg/m<sup>3</sup>인 반면에 구획화되지 않은 경우에는  $2.33 \times 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup>으로서 구획화되지 않은 경우가 구획화된 경우보다 상당량의 에어로졸이

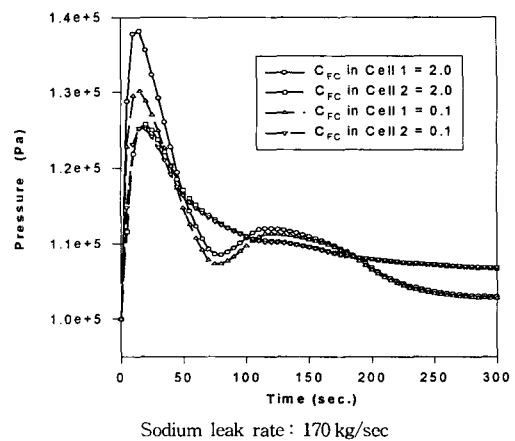


Fig. 11 The effect of CFC on pressures of cell 1 in sodium loop building with partitions

Table 5 Aerosol density in each cell of sodium loop building with partition and without partition

Cell		Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4	Cell 5	Cell 6	Cell 7
Aerosol Density (kg/m <sup>3</sup> )	partitioned	2.97E-01	4.97E-02	3.42E-03	1.53E-06	5.19E-04	5.00E-05	8.59E-09
	not partitioned	1.38E-01	5.35E-02	9.71E-05	2.33E-04			

외부로 누출됨을 알 수 있다.

식(6)에서 설명된  $C_{FC}$ 가 셀 내 압력의 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 셀 1의 유로에 에어로졸 여과능력이 좋은 필터( $C_{FC}=2$ )와 여과능력이 조금 떨어진 필터( $C_{FC}=1$ )를 설치하였다. Fig. 11에서 보여진 바와 같이  $C_{FC}=2$ 인 경우가  $C_{FC}=1$  경우보다 압력이 높게 상승하였다. 이는 에어로졸의 필터의 저항에 의한 것으로 볼 수 있다. 따라서, 여과능력이 좋은 필터를 설치할 것인가 혹은 셀 내 압력을 낮출 것인가를 적당히 고려하여야 할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

소듐 냉각 루프 건물에서의 소듐 화재 안전성을 향상시키고 화재의 영향을 최소화하기 위한 방안으로써 소듐 냉각 루프 건물을 여러 개의 셀로 구획화하고, 구획화된 각 셀에 안전밸브를 설치하여 소듐 분무형 화재 발생시 구획화된 건물과 구획화되지 않은 건물에서의 화재 영향을 살펴 본 결론은 다음과 같다.

- 1) 소듐 루프 건물에서 분무형 화재 발생시 소듐 누출량에 따른 셀 내 최대 압력 및 온도는 건물을 구획하지 않는 경우보다 구획한 경우에 낮게 나타났다.
- 2) 소듐 루프 건물을 구획화한 경우, 화재 발생시 셀 내 압력, 온도 및 소듐 에어로졸은 본 연구에서 모사한 흐름경로를 따라 전달되었으며, 또한 소듐 연소를 구획화된 셀에 국한

시킴으로서 화재에 대한 영향을 완화시킬 수 있었다. 또한, 각 셀 사이에 over-pressure exhaust valve와 under-pressure exhaust valve를 설치함으로써 셀 내 지나친 압력의 상승을 막을 수 있었다.

본 연구비는 1997년도 과학기술부 원자력 연구 개발 과제 연구비로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 황성태 등, "액체금속로 냉각재 안전대책 연구", KAERI/RR-1378/93, 한국원자력연구소, pp. 45~55, 1994
- 2) 김광락, "수퍼피닉스 이차냉각계통 소듐 화재 연구", KAERI/ OR-162/93, 1993
- 3) K.K. Murata, D.E. Carrol, "CONTAIN-LMR/1B-Mod. 1, A Computer Code for Containment Analysis of Accidents in Liquid Metal Cooled Nuclear Reactors", Sandia Report SAND-91-1490, 1993
- 4) K. Sagae and A. Suzuoki, Development of Analytical Model for Sodium Pool Combustion, J. Nucl. Sci. Eng., Vol. 22, No. 11, pp. 870~880, Nov. 1985.
- 5) S.S. Tsai, "The NACOM Code for Analysis of Postulated Sodium Spray Fires in LMFBFRs", NUREG/CR-1405, March, 1980.