

Gaussian 액적 크기 분포 함수를 이용한 분무형 화재 현상 해석

김병호[†], 한도희^{*}, 서승역^{**}

*한국원자력연구소 유체공학연구부, **계명대학교 화학공학과

Analysis of Sodium Spray Fire Using Gaussian Droplet Size Distribution

B.H. Kim[†], D.H. Hahn^{*}, S.H. Suh^{**}

**Fluid Engineering Department, Korea Atomic Energy Research Institute
150 Dukjin-dong, Yusong-gu, Daejeon, 305-353, Korea*

***Department of Chemical Engineering, Keimyung University
1000 Shindang-dong, Dalseo-gu, Daegu, 704-701, Korea*

ABSTRACT

Study on the analysis of sodium spray fire using Gaussian drop size distribution, which redistributes a droplet spectrum with given mean diameter if its size classes with critical diameter($D > 8\text{mm}$) occur, was carried out. In this case, the oversized droplets were reduced to a stable diameter. Results calculated by the code using Gaussian drop size distribution were in better agreement with AI experimental results than those of NACOM and SPRAY code. The effect of variance on pressure in the test cell appeared greatly by introducing Gaussian function, which could represent various sodium droplet size distribution. The increase of the variance with mean droplet size resulted had an important effect upon the pressure in the test cell.

주요기술용어 : Sodium Spray Fire (소듐 분무형 화재), Liquid Metal Reactor (액체 금속로), Gaussian Droplet Size Distribution (가우시언 액적 크기 분포)

1. 서론

에너지 자원이 부족한 국가에서 신산업혁명을 주도할 성장 동력으로 부상하고 있는 액체금속로

(Liquid Metal Reactor)는 열효율이 높고 기존 원자로 보다 우라늄 자원의 이용 효율을 60배 이상 제고시킬 수 있어 21세기의 유망한 신에너지원으로 기대되고 있다. 액체금속로에서 사용되는 소듐은 경수로에서 냉각재로 사용되는 물과 달리 탁월한 열전도도와

[†] Corresponding author : bhkim1@kaeri.re.kr

높은 비등점으로 인하여 원자료를 저압상태에서 운전이 가능하고, 기존 원자료보다 열효율이 높다. 그러나 원자로 용기 혹은 배관 등이 파열되어 소듐이 누출될 경우 소듐이 갖는 강한 화학 반응성으로 인하여 공기 중의 산소 및 수분과 반응하여 높은 열을 동반한 화재가 발생된다. 이때 반응생성물인 소듐 옥사이드 계통의 에어로졸 및 가성소다 등이 생성되어 소듐 누출 주위의 주요 기기 및 부품들을 손상시킨다. 또한 화재에 의하여 발생된 고온의 열 때문에 원자로 건물 내 온도와 압력을 상승시켜 방사선 물질이 함유된 에어로졸이 원자로 건물 외부로 누출되는 위험을 초래할 수 있다. 이러한 이유 때문에 액체금속로를 개발하고 있는 여러 나라에서는 소듐 화재에 대한 연구를 다양하게 수행하여 액체금속로의 설계에 반영하고 있다¹⁾.

액체금속로의 소듐 관련시설에서 소듐이 누출되면 화재가 발생되는데, 이러한 화재는 연소과정에 따라서 일반적으로 풀형, 분무형, 조합형화재로 구분할 수 있다. 풀형화재는 소듐이 분사되지 않고 건물이나 용기의 바닥에 흘러 풀을 형성하여 화재를 발생시키는 것이다. 분무형 화재는 가압상태에 있는 소듐이 절단된 파이프를 통하여 액적상태로 분무, 확산되면서 화재를 일으킨다. 따라서 풀형화재보다 분무형 화재의 연소속도가 일반적으로 크게 나타난다^{2,3)}. 소듐 분무형 화재는 지금까지도 완전하게 규명되고 있지 않은 복잡한 연소 및 열전달 과정을 수반하고 있다. 이 때문에 액적간의 상호작용, 분무영역에서의 산소 소모 등이 소듐의 연소에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구 등이 아직도 명백하게 밝혀지지 않고 있다. 종래에는 소듐 분무형 화재의 모델링은 단일 액적의 열전달 및 연소과정에 바탕을 두고 있으며, 단일 액적의 연소 속도를 예측하는데 vapor-phase combustion theory가 적용된다. 그리고 소듐의 분무상태는 액적들이 집단적으로 존재하는 것이기 때문에 분무형 화재의 연소속도는 각 액적들의 연소속도를 합산하여 나타내어진다.

그러나 이러한 방법에 의하여 연소속도를 결정할 때 액적의 상호작용, 분무지역에서의 가스온도의 비균일성 및 산소 소모에 대한 영향이 무시되기 때문에 정확한 연소속도를 계산할 수 없다. 이러한 몇 가지 문제점을 개선하기 위하여 SPRAY코드⁴⁾는 액적의 연소속도와 그리고 액적으로부터 셀 가스로의 열전달을 계산하기 위하여 volume mean drop size와 log-normal drop size distribution으로부터 유도되는 surface mean drop size를 사용한다. SPRAY-3 코드는 수증기와 산소의 반응 속도상수를 사용하여 다양한 산소농도에서의 소듐 연소과정을 해석하였으나, 낮은 산소농도에서 실험결과와 계산결과는 커다란 오차를 보였다. Krolikowski's diffusion 모델을 채택한 SOMIX-2⁵⁾ 코드는 공기분위기에서 소듐의 연소속도를 계산하기 위하여 개발되었다. 연소속도는 산소가 연소지역으로 확산하는 속도에 의하여 결정되며 소듐 증기의 확산은 무시된다. 따라서 소듐연소속도는 실제보다 낮게 나타나고, 단일 액적 크기만으로 분무형 화재를 분석하기 때문에 셀내 압력상승에 있어서 상당한 오차가 발생함을 지적한바 있다.

한편 NACOM 코드는⁶⁾ SPRAY코드에서 사용된 vapor-phase combustion theory과 조금 다르게 단일 액적의 vapor-phase combustion theory를 채택하고 있다. 이러한 이론은 탄화수소 연료의 액적을 위한 연소이론으로 알려져 있다. NACOM 코드는 액적이 분무되면서 곧바로 액적이 vapor phase에서 연소한다고 가정한 SPRAY, SOMIX코드와 달리 액적의 preignition phase model을 고려함으로써 좀더 정확한 연소과정을 예측 가능하게 하였다. 또한 합리적인 액적 크기 분포를 사용함으로써 분무형 화재의 연소속도를 계산하는데 정확성을 기하였다. 이상에서 살펴본 바와 같이 분무형 화재에서 소듐액적의 거동 및 액적 크기 분포는 소듐 연소속도에 중요한 영향을 미친다.

본 연구에서는 NACOM코드의 연소모델을 간단으로 하여 소듐의 액적이 안정적으로 존재할

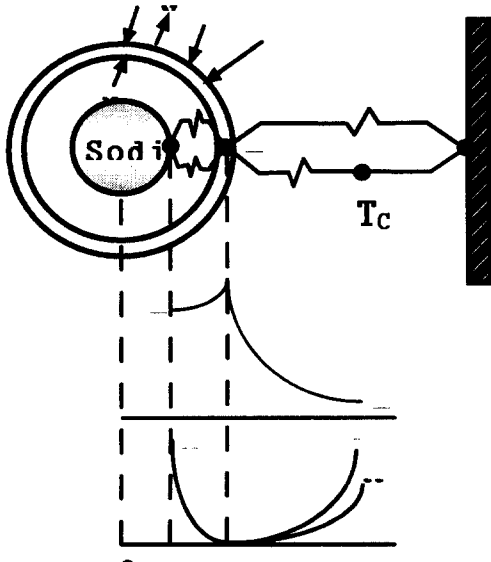


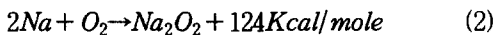
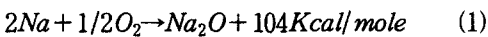
Fig.1 Reaction model for sodium droplet.

수 있는 한계 액적 직경을 정의하고 한계직경을 초과한 액적 분포들을 한계직경이하의 분포도에 포함시켜 액적 크기분포를 정규화하고 이에 대한 화재특성을 AI(Atomics International)의 실험결과와 비교, 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 소듐의 연소특성

소듐은 상온에서 공기 중의 산소와 아주 쉽게 반응한다. 다양한 산화물들이 여러 실험조건에서 얻어질 수 있지만, 소듐의 연소반응에서 중요한 것은 산화나트륨(Na_2O)과 과산화나트륨(Na_2O_2) 2종류이며, 이들의 생성 반응식은 다음과 같다⁷⁾.



그러나 건조 공기 하에서는 산화물들이 보호막을 형성하기 때문에 표면에서만 일어나며 산소공

급이 부족하고 온도가 160°C 이하일 경우에는 산화나트륨만이 형성된다. 과산화나트륨은 건조공기에서 일차적으로 산화나트륨으로 변화하고 다음에 산화나트륨이 과량의 산소에 의하여 과산화나트륨으로 산화되는 두 단계 반응에 의해 생성된다. 이때의 반응온도는 $300\sim 400^\circ\text{C}$ 이다.

2.2 구형 액적의 분무형 화재 연소모델

소듐의 산화를 모사하기 위하여 Fig. 1과 같이 단일 소듐 액적을 고려하였다. 액적으로부터의 열 전달 및 물질전달을 계산하기 위해 소듐 액적은 구형이며 대칭이라고 가정하였는데 실제로는 액적의 운동으로 인하여 대칭성은 다소 영향을 받게 된다. 경계층 내부에서는 소듐 증기가 액적 표면으로부터 밖으로 확산되어 내부로 확산되는 산소와 연소지역에서 만나 화학양론비적으로 반응한다. 연소지역의 위치를 나타내는 반경 r_B 는 화학양론에 필요한 소듐 증기와 산소 및 수증기의 전달속도에 의해서 결정되어진다.

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

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

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

Burning rate coefficient, K 는 다음과 같이 표시된다.

$$K \equiv -\frac{d(D^2)}{dt} \quad (5)$$

$$\dot{m} = \frac{\pi\rho k}{4} D \quad (6)$$

D^2 와 시간, t 가 선형적인 관계를 가진 D^2 법칙을 따른다고 가정하면,

$$D^2 = D_i^2 - Kt \quad (7)$$

현재 수많은 quasi-steady-state vapor-phase combustion theory가 보고되어 있다. 이 이론들은 일반적으로 D^2 법칙을 따르며 Spalding에 의하여 제의된 이론이 잘 확립되어 있다

$$k = \frac{8k}{C_p \rho} \ln(1+B) \quad (8)$$

$$B = \frac{1}{h_{fg}} \left\{ C_p(T_g - T_s) + \frac{H_c Y}{i} \right\} \quad (9)$$

2.3 자유낙하액적의 연소모델

SPRAY와 SOMIX-2코드는 소뿔 누출직후 소뿔 액적이 곧바로 연소한다고 가정하여 액적의 preignition 단계를 무시하였다. Preignition 동안 표면 산화공정에 의하여 액적 표면에 산화물의 거친 막이 형성되고 이때 형성된 열은 대기 중으로 전달되는 것보다 다시 액적표면으로 전달되어 액적의 온도가 신속하게 증가한다. 그 후 액적은 발화하게 된다. Preignition oxidation model 액적 표면으로의 산소확산을 예측하는데 이용되며 Ranz-Marshall 상관식이 사용된다.

Preignition 동안 소뿔 액적의 연소속도식은 다음과 같이 oxygen flux와 양론비로 표시된다.

$$\dot{m}_f = \frac{\pi C D_d Y D}{i} (2 + 0.6 Re^1 Sc^{1/2}) \quad (10)$$

액적이 점화된 후 증기상에서 액적이 연소하게 된다. 증기상에서 연소하는 단일 부동 액적에 연소속도식은 식(6) 및 식(8)에 의하여 얻어진다. 실험자료에 의하여 연구한 강제대류와 관련된 부동 액적의 연소속도식은 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{m}_f = \dot{m} (1 + C_f Re^1 Pr^{1/2}) \quad (11)$$

실험상수, C_f 는 물질에 따라 약간 차이가 나지만 0.24에서 0.31범위에 존재한다. 식(11)에 식(6) 및 식(8)을 대입하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\dot{m}_f = \frac{2\pi k}{C_p} D (1 + C_f Re^1 Pr^{1/2}) \ln(1+B) \quad (12)$$

2.4 소뿔 액적 거동

소뿔 액적은 액적의 표면으로부터의 mass flux에 의한 inertia force 때문에 증발하는 소뿔 액적의 운동식은 고정 구형 액적의 운동식과 구별된다. 즉 액적의 drag force에 영향을 미친다. 증기가 액적 표면으로 나오면서 skin drag는 momentum boundary layer에 의하여 감소한다. 다음과 같이 부동 구형 액적에 적용된 drag coefficient가 일반적으로 사용되고 있다.

$$C_d = \begin{cases} 24/Re & Re < 0.1 \\ 2.6 + 23.71/Re & 0.1 \leq Re < 6 \\ 18.5/Re^{0.6} & 6 \leq Re < 500 \\ 4/9 & Re \geq 500.0 \end{cases} \quad (13)$$

그리고 연소하는 액적의 운동식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{dV_f}{dt} = g - \frac{3\rho_g V_f^2 C_d}{4\rho D} \quad (14)$$

2.5 액적 크기 분포

SPRAY코드는 volume mean drop diameter로부터 surface drop diameter를 계산하기 위하여 log-normal drop size distribution을 사용한다. 이러한 surface drop diameter는 액적의 연소속도를 계산하는데 사용된다. 단일 액적 크기만을 사용하여 분무형 연소속도를 계산할 때 실제적으로 많은 오차가 발생된다. SPRAY코드에 사용된 log-normal drop size distribution을 Atomic International(AI)¹⁰의 실험결과와 비교한 결과 큰

오차가 발생되었기 때문에 AI의 실험 자료와 비교적 상관관계가 양호한 다음과 같은 Nukiyama-Tanasama correlation¹¹⁾이 사용되며 다른 분포들이 다양하게 이용될 수 있다.

$$\frac{dR_v}{dD} = \left(\frac{3.915}{D}\right)^6 \frac{D^5}{120} \exp\left(-\frac{3.915D}{D}\right) \quad (15)$$

2.6 Spray combustion

단일 액적의 연소방정식은 매우 간단하지만 액적이 다중으로 분무되는 경우 실제 액적 크기 분포, 액적의 구역 밀도, 구역 산소 농도, 액적간의 상호작용과 같이 분무형 연소에 영향을 미치는 변수들이 복잡하게 관련된다. 분무영역에서 산소의 소모 때문에 분무영역에서의 산소농도는 분무영역 바깥쪽의 산소농도보다 낮지만 가스온도는 분무 영역 안쪽에서 발생된 열 때문에 분무지역의 바깥쪽보다 안쪽에서 높다. 액적이 분무되는 지역에서 산소변화 및 이웃간 액적들의 상호작용을 고려하지 않고 평균온도를 사용한다고 가정하고 앞에서 언급한 단일액적들의 연소이론들을 이용하면 분무형 연소속도는 다음과 같이 모든 액적의 연소속도의 합계로 나타내어질 수 있다.

$$\dot{m}_s(t) = \int_{D_i} \int_{t_i} \dot{m}_f(D_i, t_i, t) V_f(D_i, t_i, t) d^2N \quad (16)$$

d^2N 은 시간, t 에서 높이가 z 와 $z+dz$ 사이에서 D 와 $D+dD$ 범위의 액적직경을 가진 액적의 수로서 소뿔 누출속도와 액적 크기 분포로부터 유도될 수 있다.

$$d^2N = \frac{\dot{m}_s(t)}{\frac{1}{6} \pi D_i^3 \rho_{Na}} \frac{dR_v}{dD_i} dt dD_i \quad (17)$$

식(15)를 식(17)에 대입하면

$$d^2N = \frac{\dot{m}_s(t)}{\pi D_i^3 \rho_{Na}} \left(\frac{3.915}{D}\right)^6 \frac{D_i^5}{20} \exp\left(-\frac{3.915D_i}{D}\right) dt dD_i \quad (18)$$

평균 액적 직경이 가장 큰 것과 가장 작은 것으로 이루어진 집단간에 존재하는 액적들을 각 분무높이에 위치한 모든 집단의 연소속도를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{m}_s = \sum_i \sum_j \dot{m}_f \Delta N_{ij} \quad (19)$$

2.7 열전달

2.7.1 가스로의 열전달

소뿔이 분무되어 연소되면 주위가스로 연소열이 방출된다. 연소가 심하지 않은 저 농도의 산소 분위기에서는 현열만이 주위에 전달된다. 분무가 vapor-phase combustion일 때는 연소열의 일부가 적 표면에 전달되어 소뿔을 증기화시키고 나머지 열은 주위가스로 전달된다.

Preigniton이 진행되는 동안 소뿔액적으로부터 가스로 전달되는 열전달 속도는 Ranz-Marshall 상관식으로부터 유도된다.

$$q_g = \frac{k}{D} (2 + 0.6Re^1 Pr^{1/3}) (T_s - T_g) \quad (20)$$

Preignition 단계를 지난 후 액적들은 증기상에서 연소한다. 이때 가스로 전달되는 열전달속도는 다음과 같다.

$$q_g = \frac{2\pi k}{C_p} D (1 + 0.3Re^{1/2} Pr^{1/3}) (H_c - h_{fg}) \ln(1 + B) \quad (21)$$

분무된 소뿔으로부터 주위 가스로 전달되는 열은 액적으로부터 가스로 전달되는 전체 열의 합계로 나타낼 수 있다. 즉,

$$Q_g = \int \int q_g d^2N \quad (22)$$

2.7.2 벽면으로 열전달

가스로부터 용기의 벽면으로 전달되는 열은 셀내부에서의 가스 순환, 가스와 벽면의 온도에 따라 달라진다. 가스의 순환 흐름계를 구하기 위하여 모멘텀과 에너지 보존 방정식 및 물질이동 방정식의 해를 구하여야 한다. 벽면에서의 열전달 속도는 열전달상수항으로서 표시된다.

$$Q_w = hA(T_g - T_w) \quad (23)$$

2.7.3 가스상에서 열수지

액적으로부터 셀가스로 열이 전달되면서 가스 온도와 압력을 증가시킬 것이다. 분무지역 내에서의 가스온도는 분무지역바깥쪽에서의 가스온도보다 높다. 셀내 압력상승을 계산하기 위하여 평균 가스온도를 결정하는 것이 중요하다. 에너지 보존의 법칙에 의하여 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$m_g C_{v,g} \frac{dT_g}{dt} = Q_g - Q_w \quad (24)$$

이상기체방정식으로부터 용기내 가스압력이 결정된다.

$$P = CRT_g \quad (25)$$

2.7.4 벽면에서의 열수지

벽면으로의 열전달은 주로 가스에서 벽면으로 대류에 의하여 전달되는 열에 기인하므로 대류열 전달만이 고려된다. 벽면에서의 온도는 균일하고 셀의 외부는 단열재로 단열된다고 가정하면 벽면에서의 에너지 보존방정식은 다음과 같다.

$$m_w c_{v,w} \frac{dT_w}{dt} = Q_w \quad (26)$$

3. 연구결과 및 고찰

분무 상태에서 소뿔 액적 크기에 따른 분산도를 나타내는 액적 크기 분포곡선은 분무형 화재 코드 계산에 주요한 인자 중의 하나이다. SPRAY 코드에서는 체적 평균 액적 크기로부터 면적 평균 액적 크기를 계산하기 위하여 log-normal 형태의 분포 곡선을 사용하였다. 여기서 액적 크기는 일정한 단일 평균값을 갖는다고 가정하였다. 단일 평균값에 기인되는 오차를 수정하기 위하여 NACOM 코드에서는 소뿔 액적 분포에 관한 경험적 상관식인 Nukiyama-Tanasama 분포곡선을 이용하여 연소열 등을 계산하였다. 체적 평균 액적 크기 D_m 을 포함한 식(15)와 같은 함수 형태의 상관식으로 표시된다.

Morewitz 등의 분무형 소뿔 액적 크기 분포에 관한 실험에 의하면 소뿔 액적 크기는 임의의 한계 직경을 초과하지 않는다고 보고된 바 있다. 한편, Wallis¹²⁾에 의하면 Weber number 값이 12 이상 초과되는 경우 일정 크기 이상의 분무형 액적은 안정화되지 않으며, 한계 직경 D_{cr} 은 다음과 같은 관계식으로 표현될 수 있다.

$$D_{cr} \approx 2 \sqrt{\frac{\sigma_{Na}}{g \rho_{Na}}} \quad (27)$$

여기에서 g 와 σ_{Na} 는 각각 중력 가속도 및 액체 소뿔의 표면 장력을 의미한다. 소뿔의 경우 이 식으로부터 추정된 액적의 한계직경은 약 8mm로 계산된다.

Fig. 2에 Nukiyama-Tanasama 분포 곡선을 액적 직경의 함수로 도식화하였다. 여기서 실선, 점선, 일점 쇄선은 각각 소뿔 체적 평균 액적 크기가 $D_m = 3.69mm, 4.57mm, 5.33mm$ 의 경우이며, 이로부터 계산된 소뿔 한계 직경 8mm를 초과하는 분포도는 각각 15.3%, 32.1%, 46.7%이다. 평균 액적 크기가 증가할수록 초과 분포값이 증가됨을 알 수 있다. 이와 같이 액적 한계 직경을 초과하

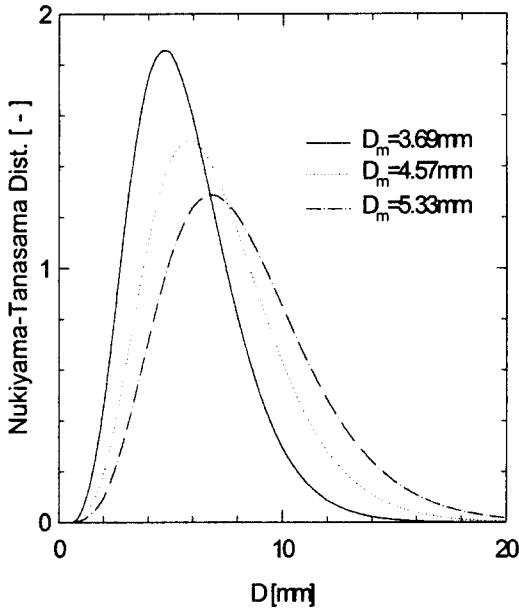


Fig.2. Nukiyama-Tanasama distribution with drop diameter

는 경우에는 특정 분포 곡선은 보정이 요구된다.

본 계산에서는 소듐 액적 크기 분포를 체적 평균값 D_m 과 분산값 σ 의 두 가지 변수를 갖는 아래와 같은 Gaussian 분포 함수로 가정하고¹³⁾,

$$\frac{dR_G}{dD} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{D-D_m}{\sigma}\right)^2\right) \quad (28)$$

소듐 한계 직경 8mm 이상의 경우 초과 분포를 8mm 이하의 분포도에 포함하여 이를 정규화하였다. 이러한 Gaussian 분포 함수는 식(15)의 Nukiyama-Tanasama 분포 함수에 비하여 분산값 σ 를 포함하고 있기 때문에 보다 다양한 분산 형태를 재현할 수 있는 장점이 있다.

Table 1에 서로 다른 세 가지 조건에서 초기 입력값을 수록하였으며, 각각의 조건에서 전체 소듐 분사량은 2.72kg, 4.08kg, 5.62kg으로 주어졌다. 이들 입력 값들은 SPRAY 및 NACOM 전산 코드와 Atomics International(AI)에서 수행한 실험값들과 직접 비교하기 위하여 동일한 조건에서 계산을 수행하였다.

Fig. 3과 4에 각각 초기 입력 조건에서 계산된 실험용기내 압력 증가 곡선을 시간의 함수로 도식화하였다. 이들 그림에서 실선은 Nukiyama-Tanasama 분포 곡선을 직접 이용한 계산값이며, 점선으로 나타난 값들은 Nukiyama-Tanasama 분포 곡선에서 계산된 분산값 (σ_{NT})을 변화하여 동일한 D_m 에서 Gaussian 분포 함수에 분산도를 각각 0.5배, 1배, 2배 가증하고 정규화한 분포 함수에서 계산된 압력 증가 곡선을 의미한다. 각각의 조건에서 얻어진 최대 압력 증가 값을 AI 실험치와 함께 표 Table 2에 수록하였다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이, $D_m=3.69\text{mm}$ 및 σ_{NT}

Table 1. Initial parameters for sodium spray fire codes.

	Run #1	Run #2	Run #3
Volume mean droplet diameter [mm]	3.69	4.57	5.33
Mean sodium leak rate [g/sec]	824.6	1511.1	985.96
Initial sodium temperature [°C]	538	532	532
Initial cell gas pressure [atm]	1.07	1.07	1.07
Initial cell gas temperature [°C]	23.9	20.0	23.9
Initial oxygen mole fraction [%]	0.8	1.5	0.0
Sodium spray duration [sec]	3.3	2.7	5.7

Table 2. Comparison between computational results and AI experimental Data.

	Maximum pressure rise [atm]			
	SPRAY	NACOM	this work ($\sigma=0_{NT}$)	AI experiment
Run #1	0.038	0.043	0.029	0.034
Run #2	0.044	0.043	0.035	0.051
Run #3	0.045	0.041	0.041	0.040

=0.2309(Run #1)의 조건에서 $\sigma=0.5\sigma_{NT}$ 와 $\sigma=0_{NT}$ 에서의 압력 증가 곡선은 상호 변화가 거의 일치하는 반면 $\sigma=2\sigma_{NT}$ 에서 압력 증가는 감소됨을 알 수 있다. NACOM 코드 계산에서 최대 압력 증가는 0.043atm이며 SPRAY 코드 계산에서는 0.038 atm로 보고 되고 있으나, Gaussian 분포 함수의 $\sigma_G=0_{NT}$ 에서 최대 압력 증가는 0.029atm로 계산되었다. 이는 AI에서 수행한 실험값인 0.034atm과 비교할 때 비록 정확한 예측 값은 아니나 NACOM 코드와 비교하여 분산의 효과가 고려된 계산 값으로 실험값에 보다 가까운 결과임을 알 수 있다. 특히, 전술한 바와 같이 액적 크기가 일정한 단일 평균값을 갖는다고 가정한 SPRAY 코드와 이를 개선하고자 경험적 분포 함수를 도입한 NACOM 코드의 결과를 서로 비교할 때, NACOM 코드 결과가 SPRAY 코드 결과 보다 실험값에 보다 큰 오차를 보이고 있음은 액적 분포 함수의 영향이 매우 크다는 점을 알 수 있다. 이러한 추이는 평균 액적의 크기 및 상관 분산도가 변화함에 따라 더욱 두드러짐을 보인다. 즉, Fig. 4의 $D_m = 4.57\text{mm}$, $\sigma_{NT}=0.2859$ (Run #2) 및 Fig. 5의 $D_m = 5.33\text{mm}$, $\sigma_{NT}=0.3335$ (Run #3)의 조건에서 분산 값의 변화에 따른 압력 증가 곡선에 미치는 영향은 더욱 가중된다.

평균 액적 크기가 증가함에 따라 일반적으로 다양한 크기의 액적이 분포되어 있음을 의미하며 결과적으로 이는 경험적 상관식에서 측정 분산도의 증가로 나타난다. 또한, 소뿔 한계 직경 8mm를 초과하는 분율이 증가함에 따라 보정 분산도

의 영향이 더욱 커짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 $\sigma=0.5\sigma_{NT}$, $\sigma=0_{NT}$ 및 $\sigma=2\sigma_{NT}$ 계산 값을 상호 비교할 때 평균 액적 크기가 작은 조건 (Fig. 2)에서는 비록 무시할 수 있으나, Fig. 4 및 Fig. 5에 나타난 바와 같이 평균 액적 크기가 증가함에 따라 압력 증가에 미치는 영향이 점진적으로 증가하는 사실과 일치한다. 특히, $D_m = 5.33\text{mm}$ 의 조건 (Fig. 5)에서 $\sigma=0.5\sigma_{NT}$ 일 때의 압력 증가는 NACOM 계산 값보다 높게 나타나며 이러한 경우 분산도가 미치는 영향은 무시할 수 없다. 실험 값과 계산 값과의 직접적인 비교는 소뿔 액적 크

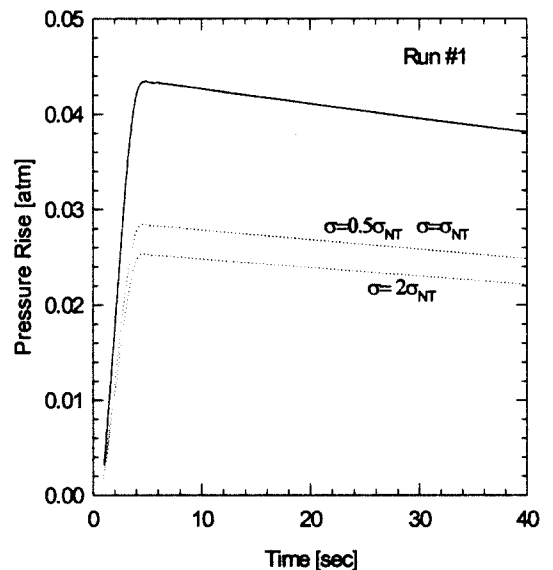


Fig.3. Effect of variance on pressure with time.

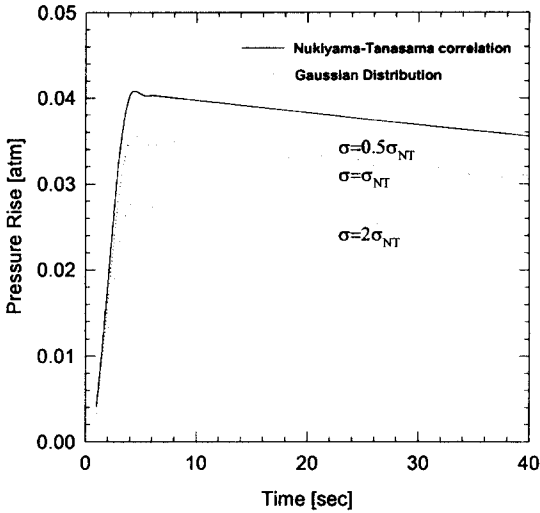


Fig. 4. Prediction of pressure rise with variances

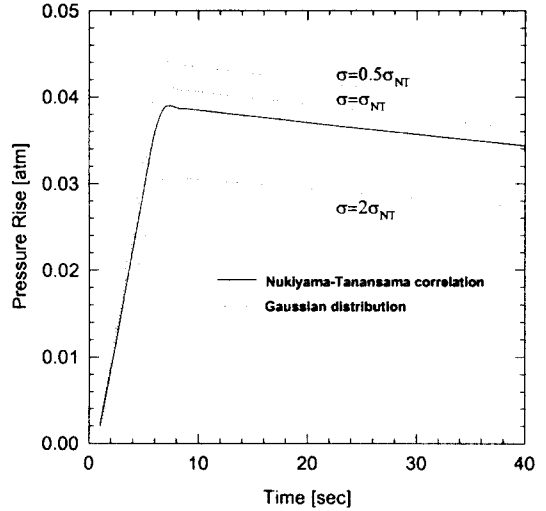


Fig. 5. Prediction of pressure rise with variances.

기에 관한 분포 함수 이 외에도 시간에 따른 소듐 분사율의 정밀 측정, 반응물의 Na2O2 비율 측정 등이 요구된다. 또한, 보고된 AI 수행 실험값들은 동일한 조건에서도 초기 상대 습도에 따른 영향이 매우 크다고 실측되었다. 따라서 이러한 점들을 고려할 때 보다 정밀한 조건에서의 분무형 소듐 화재 실험값들이 필요하며, 이상의 결과로부터 얻어진 코드들과의 상호 비교를 위하여 소듐 액적 크기에 관한 분포 측정이 선행되어야 할 것이다.

4. 결 론

소듐 분무형 화재 코드 계산에 있어서 소듐의 액적 크기 분포는 중요 고려 사항중 하나이다. 본 연구에서는 소듐의 액적이 안정적으로 존재할 수 있는 한계 액적 직경을 정의하고 한계직경을 초과한 액적 분포들을 한계직경이하의 분포도에 포함시켜 액적 크기 분포를 정규화하고 이에 대한 화재특성을 실험결과와 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Nukiyama-Tanasama 분포 곡선에서 한계 직경 8mm를 초과하는 분포도는 평균 액

적 크기가 증가할수록 초과 분포 값이 증가되었다.

- 2) 다양한 소듐 액적 크기 분포의 재현이 가능한 Gaussian 분포 함수를 도입하여 화재 영향을 계산한 결과, 액적의 분산을 고려하지 않은 NACOM, SPRAY 코드와 비교하여 실험값에 보다 가까운 결과를 보였으며, 평균 액적 크기가 증가함에 따라 분산도의 증가로 인하여 실험용기내 압력에 미치는 영향이 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발과제 및 계명대학교 저공해자동차 부품기술개발센터의 연구비 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 황성태 등 : “액체금속로 냉각재 안전대책 연구”, KAERI/RR-1694/96, 한국원자력 연구소, 1996.
- 2) S. Suzuokia. : J. Nucl. Sci. Technol., Vol.

- 22, No. 11, 1985, p. 870.
- 3) M. Klimm : "IAEA IWGFR Specialists' Mtg. on Sodium Fires, Design and Testing", Richland, Summary Reports, Sess, Vol. II, 1982.
 - 4) P. R. Shire : SPRAY Code User's Report, HEDL-TME 76-94, 1977.
 - 5) M. P. Heisler and K. Mori : SOMIX-1 Users Manual for the LAB CDC 7600 Computer, N707TI130045, Atomics International, 1976.
 - 6) S. S. Tsai : "The NACOM Code for Analysis of Postulated Sodium Spray Fires in LMFBRs", NUREG/CR-1405, 1980.
 - 7) M. Silberberg : "Spray Burning Experiments, Annual Technical Progress Report", LMFBR Safety Program, GFY 1971, AI-AEC-13006, Atomics International, 1971.
 - 8) JANAF Thermochemical Tables, Dow Chemical Co., Midland, Michigan, 1968.
 - 9) S. S. Tsai : Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 27, 1977, p. 524
 - 10) Quarterly Technical Progress Report, LMFBR Safety Programs, January-March 1971", AI-AEC-12992, Atomics International, 1972.
 - 11) E. Mayer : "Vaporization Rate Limited Combustion in Bipropellant Rocket Chamber", ARS Journal, 1959.
 - 12) G. B. Wallis : "One Dimensional Two Phase Flow", McGraw-Hall, New York, NY, 1969.
 - 13) S. H. Suh and K. R. Ha : J. Korean Hydrogen Energy Soc., Vol. 9, No. 3, 1998, p. 119.