

격납용기내에서 분무형 나트륨화재 현상 해석

Analysis of spray sodium fire phenomena in the containment vessel

조 병 렬*·권 선 길*·황 성 태*

Byung-Real Jo · Seon-Gil Kwon · Sung-Tai Hwang

ABSTRACT

A hypothetical accident in the containment vessel of liquid metal reactor could cause a pressure, temperature rise, and a strong aerosol release. The computer codes relating to the modelization of these accident make it necessary to use various input parameter, among which is the dynamic shape factor of aerosols produced. Combustion experiments of sodium spray fire carried out in a closed vessel, which was vertical cylinder made of 1.2m in diameter and 1.8m high with a volume of 1.7m³. The results of theoretical analysis presented here was compared to data obtained from experiments.

The experimental results were summarized as follows.

- 1) The aerodynamic diameter and geometric diameter of aerosols are decreasing with increasing of injection pressure and injection temperature of sodium
- 2) The dynamic shape factor of aerosol is proportional to the aerodynamic diameter for a given particle.
- 3) The correspondence between the aerodynamic diameter and geometric diameter can be as $D_{ae}=0.70 D_{ge}$.
- 4) Peak pressure rose with increase in pressure and temperature of injection sodium, being more sensitive to the injection pressure than the injection temperature.

1. 서 론

자원의 효율적인 활용, 높은 에너지 효율등의 많은 장점을 갖고 있어 미래의 유력한 에너지 원으로 평가받고 있는 액체금속로(liquid metal reactor)는 원자로 열수송계통을 위한 냉각재로 경수로의

물대신 화학적 반응성이 큰 액체나트륨을 사용하기 때문에 액체금속로 기술 개발에 있어서 원자로의 안전성 확보를 위해 나트륨 냉각재 취급기술 확립이 필수적이다. 특히 분무형 나트륨 화재는 액체금속로의 나트륨 계통에서 가압하에 흐르고 있는 용융 나트륨이 배관부의 균열로 말미암아 누

* 한국 원자력 연구소

설, 분사되어 발생할 수 있으며, 용기내에 많은 양의 나트륨 액적(droplet)들의 분사를 초래하여 여러 나트륨 화재중 가장 위험하다. 이것은 연소속도가 풀형 화재에 비해 훨씬 빠르고 분산된 나트륨 액적들이 연소하여 많은 에너지를 방출시키고 압력과 온도를 상승시키기 때문이다. 분무형 화재의 특성은 나트륨 누설량 및 누설속도, 누설분위기, 나트륨 유출압력, 유출된 나트륨 초기온도, 용기내의 초기 산소농도, 누설지점의 용기 크기 및 누설부위 높이 등에 좌우된다.

분무형 화재의 발화온도는 풀형 화재에 비하여 낮는데 약 3~4 기압의 압력으로 용융 나트륨이 0.2~0.5mm의 작은 노즐을 통하여 공기중에 분사될 때 공기중의 수분에 관계없이 120°C에서 발화한다. 분무형 화재에 영향을 끼치는 여러 인자중 용기내의 산소농도는 가장 중요한 인자인데 Jordan 등은¹⁾ 용기내의 산소 농도를 변화시켜 가면서 0.5~40psig의 분사 압력으로 용융 나트륨을 용기내 주입시킬 때 시험용기내의 산소 농도가 5%이하일 경우 분무형 화재가 발생되지 않고, 5~10%일 때 미세 분사일 경우만 화재가 발생하고 10% 이상일 경우 즉각적인 연소가 발생함을 밝혔다. 따라서 나트륨 화재를 예방하기 위해서는 용기내의 산소 농도를 5%로 제한하고 용기벽의 온도를 낮출 필요가 있다. 분무형 나트륨 화재시 주요 연소 생성물은 산화나트륨과 과산화나트륨으로 풀형 화재와 마찬가지로 과산화나트륨이 훨씬 많이 생성된다고 보고되고 있다²⁾.

초기의 소규모 실험으로는 1956년 Hines, Gement 및 Kelly³⁾가 상업용 분무노즐을 사용하여 산소농도를 0.6~21vol%로 변화시키면서 나트륨 분무분출 시험을 수행하였다. 그 결과 최대 압력은 산소농도에 따라 변화하였는데 산소농도가 0.6%인 경우는 8psig이었고 공기 분위기에서는 38psig였다. 그리고 실험은 분사압을 360psig로 하여 454°C인 나트륨 454g를 약 25초에 분사하여 수행하였다. Humphreys는⁴⁾ 공기로 채워진 밀봉된 용기속에 수소-산소 혼합물의 폭발을 이용하여 나트륨 주입량을 다양하게 변화시키면서 분사 실험을 수행하였다. 이 실험에서 관찰된 최고압력은 1, 588°C에서 85psig였고 액적크기는 기록되어 있지는 않았지만 추진압력이 매우 높은 것으로 미루어 보아 매우 작았을(<100 μm)것으로 사료된다. 사

실 이 압력은 액체금속로 나트륨 계통에서 예측되는 분사압력보다 5~10배 정도 높다. Gracie와 Droher는⁵⁾ 부피가 1.36m³인 직사각형의 용기에 산소농도를 0~5%로 낮게 유지한 상태에서 분무산화 시켜 그 결과를 보고하였다. 538°C인 액체나트륨 680g를 50psig 추진압력을 사용하여 약 0.005cm 너비로 갈라진 틈을 통해 분사시켰다. 최대 압력상승은 2% 산소농도에서 1.8psig이었다. Charak과 Smith는⁶⁾ 공기로 채워진 용기내로 649°C인 나트륨 1~2g을 총을 사용하여 방출시켰다. 기록된 최대압력상승은 약 80psig였다.

Garelis와 Nims⁷⁾, Baker와 Tevebaugh⁸⁾ 그리고 Leibowitz^{9~11)}는 나트륨-공기혼합물에 대한 평형 온도, 압력 및 조성을 계산하였는데 모든 조사가 비슷한 결과를 나타내었다. 그런데 이들은 가스 부피에 대해 완전혼합과 단일의 경계조건을 가정하였기 때문에 한정된 이론식에 불과하다. 이들의 실험에서 최고압력은 Leibowitz에 의해 계산된 119psig였고 나트륨과 산소의 몰비는 7:1이었다. Krolikowski¹²⁾는 질소와 산소 혼합물로 채워진 시험용기내로 413°C 나트륨 10g을 분사압 1000~1500psig로 방출하는 실험을 수행하였다. 최대압력은 공기중에서 45psig였다. 그러나 이 압력은 산소혼합물이 4%로 감소함에 따라 2~4psig로 감소하였다. 그리고 나트륨 액적 증기상 연소모델을 설정하여 이론적으로 고찰하였는데 산소농도가 4~21% 범위에서 실험값과 비교적 잘 일치하였다.

Silberberg¹³⁾에 의해서 수행된 일련의 시험은 분무 시험용기 상부에 충돌하는 상업용 20mm의 젯트 노즐을 사용하였는데 평균 액적 직경은 135 μm이었다. 분무 원뿔 접각은 약 12°로 0.44m³의 원주형 용기내에 수직으로 1.5m 아래에 있다. 산소농도 1%에서 5번 그리고 0%에서 2번의 시험이 수행되었는데 이때 나트륨량은 70g으로 538°C로 예열되었으며 약 9초 동안에 주입되어 졌다. 평균압력상승은 0%의 산소농도에서는 3.5±1.3psig였고, 1%의 산소농도에서는 3.7±1.1psig이었다.

Atomics International(AI)¹⁴⁾에 의해서 보고된 일련의 시험에서는 분무시험 용기 상부에 상업용 분무노즐을 부착하여 사용하였고, 이 경우 평균액적 직경은 500 μm 이내였다. 분무-원뿔 외피가 0.44m³ 원주형 용기에서 수직으로 1.5m 내려와 있기 때문에 이것은 작은 각을 이루고 있다. 지속적인

로 수행된 일련의 AI시험에서는 62.3m³나 되는 큰 시험용기내에 설치된 충격판에 대해 수직상향으로 개방된 2.54cm 파이프를 통해 나트륨을 췌트 분사시키는 실험을 수행하였다²⁶⁾. 나트륨 액적크기는 상당히 커서 평균직경이 약 0.457cm나 되었다. 약 4psig의 최대압력이 5%의 산소분위기에서 얻어졌고 보다 낮은 압력은 0~1% 산소분위기에서 나타났다.

1982년 Cherdron등은¹⁵⁾ 0.5m³ 용기에 450°C의 용융나트륨 450g을 분사시켜 산소농도에 따른 압력 및 온도 변화를 조사하는 실험을 수행하였다. 그 결과 분무형 화재에서 나트륨량이 산소와의 화학양론적 반응량보다 적게 분출되는 경우 분출 나트륨량과 용기내 존재하는 산소의 몰비가 증가함에 따라 용기에 분산시킨 단위 나트륨에 대한 압력이 증가한다고 하였다.

공기중에서의 나트륨 액적정지 연소실험은 Richard등¹⁶⁾에 의해서 227°C~327°C의 온도와 초기직경 1, 2, 3mm에서 수행되어졌고 427°C~527°C와 액적직경 6~7mm인 경우에 대한 유사한 시험들은 Atomics International¹⁷⁾에서 수행되어졌다. 나트륨 연소속도와 직경비(mg/sec-mm)를 온도의 역수에 대해 도시하여 기상연소이론에 의해 제시된 것과 같이 나트륨의 융점(97.8°C)에서 영(zero)까지 외삽하여 사용하였다. 일반적인 참고온도인 327°C에서 이 상관식을 이용하여 보면 Richard의 자료는 연소속도와 직경비가 약 1.0임을 나타내 주고 있다. 높은 습도에서 AI자료에 의하면 연소속도와 직경비는 대략 0.9이고 낮은 습도에서는 약 0.6임을 알 수 있다. 나트륨 연소시험은 127°C에서 평균액적 직경이 500 μm이내이고 습도가 낮은 조건에서 상용용 분무노즐을 사용하여 AI에서 수행되어졌다. 이 경우 연소속도와 직경비는 대략 0.012임을 보여준다. 1/T 방법에 의해 327°C의 가스온도까지 외삽하였을 때의 비는 약 0.06이 얻어졌다. Huber등¹⁸⁾에 의해서 수행된 비슷한 시험에서는 직경이 약 1.5mm인 액적은 연소속도와 직경비가 약 0.07이고 평균 227°C에서 분무되어졌다. 연소속도가 이 작은 액적들의 자유 낙하 속도들에 의해서 뚜렷하게 증진되지 않는다면 이것은 단일 액적에 비해 연소효율이 약 10%임을 나타내 준다. 이 효율은 반응속도 상수의 평균으로서 계산모델에서 사용 되어진다. 그러나 대부분의 연구

가 실험상의 어려움으로 인해 실험 자료가 매우 부족한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 가상의 파이프 파열로 인해 용융나트륨의 누출시 나트륨 액적에 대한 수학적 모델을 세워 열 및 물질전달, 액적이동 및 연소 열역학을 조사한 SPRAY-3 전산코드를 해석하여 격납용기내의 압력과 온도 상승을 예측하고, 부피가 1.7m³인 분무형 나트륨 화재 시험용기내에서 나트륨 주입 온도, 나트륨 주입 압력 등을 변화해 가면서 나트륨을 액적상태로 분사시키는 실험을 수행하여, 생성되는 나트륨화재 에어로졸의 특성 및 격납용기내의 온도·압력 특성을 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 분무형 나트륨화재 실험을 할 수 있는 원통형 반응용기, 나트륨을 저장하고 용융시키는 나트륨 저장탱크(Na reservoir tank), 나트륨을 화재 실험 조건에 맞춰 시험용기에 주입시키는 나트륨 공급탱크(Na supply tank), 실험후 나트륨화재 생성물 또는 미반응 나트륨을 스틱 세척처리하여 배출시킬 수 있는 배출탱크(drain tank), 나트륨 화재 실험 및 세정작업시 반응용기의 분위기 가스를 조절시키는 가스조절계통(gas control system), 소화재 성능을 시험하는 소화계통(fire extinguishing system), 나트륨 화재시 시험용기내의 압력, 온도, 산소농도 및 에어로졸 크기변화 등을 측정 기록하는 자료 수집계통(data acquisition system), 나트륨의 주입온도를 조절하고 진공펌프, 전기 구동식 나트륨 밸브 등에 전원을 공급하며 나트륨 화재로 시험용기의 온도가 지나치게 높을 때 경보 신호를 내게 할 수 있는 제어반(control panel), 이밖에 시험용기를 세척하기 위한 증기공급장치(steam generator), 나트륨 저장 및 공급탱크내의 나트륨 산화를 방지하고 나트륨을 이동시키기 위한 질소 공급장치 등이 있다.

반응용기는 나트륨 화재 실험장치의 주요 핵심 부분으로서 이곳에서 나트륨 관련시설에서 발생 가능한 화재를 실험적으로 재현하여 화재 현상을 관찰하고 이 화재로 인한 용기내의 압력 및 온도분포 변화, 용기내 가스의 산소농도 및 에어로졸 크

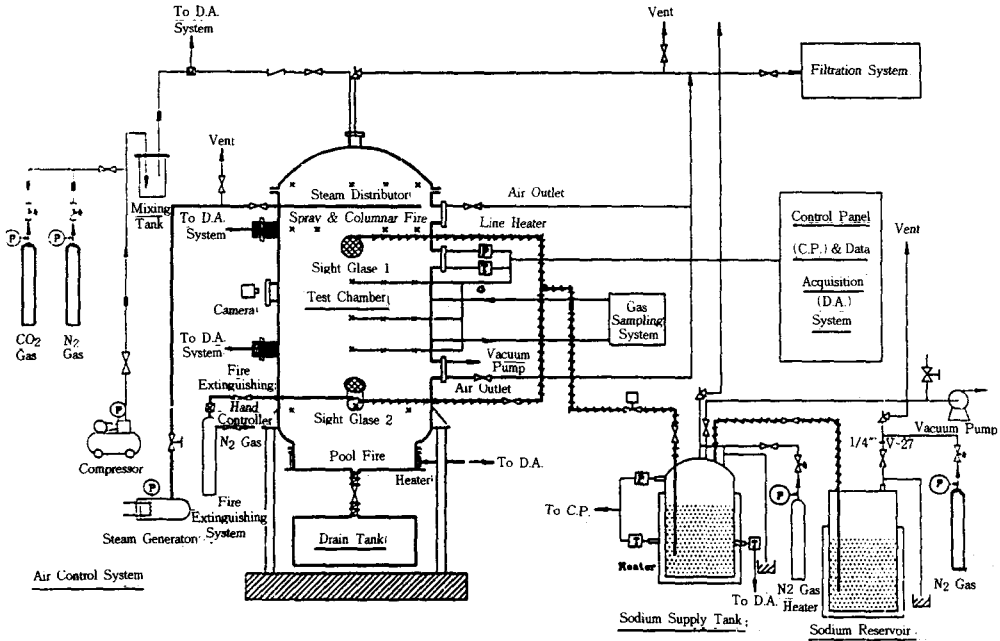


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for sodium spray fire

기 변화 등을 측정하여 나트륨 화재 특성을 파악하기 위한 장치이며, 내경 120cm, 총길이 180cm(원통부위=115cm), 부피 1.7m³인 원통형으로 나트륨에 의한 부식에 잘 견디도록 허용압력(5Kg/cm²) 및 설계온도(500℃)에 맞춰 7mm의 STS 304로 제작하였고, 시험용기의 보호를 위하여 3Kg/cm²로 조정된 안전밸브가 설치되어 있다. 시험용기 내부에 설치되어 있는 파이프는 상부로부터 세정작업시의 스팀, 분무형 화재 실험시의 나트륨 주입 line인데, 파이프는 500W의 cable heater와 단열재에 의해 일정한 온도로 가열 보존된다.

나트륨 저장탱크에서는 상온의 고체 나트륨을 180℃까지 가열하여 용융상태로 만든 후 배관을 통하여 공급탱크로 이송하는 장치이다. 저장탱크로 사용되는 drum은 직경 60cm, 높이 88cm인데 여기에 채워진 나트륨의 양은 약 200kg이다. 이를 20℃에서 180℃까지 가열하는데 걸리는 시간을 7시간으로 하여 5.2Kw용량의 가열기와 열전대가 설치되어 있으며 탱크의 상부에는 점화 plug를 이용한 level 지시기가 부착되어 있다. 그리고 장치 내 공기의 유입방지를 위한 질소공급 및 배기장치

(bubbler or lute)를 설치하였다.

나트륨 공급탱크는 저장탱크에서 이송하여 저장되어 있는 20℃의 나트륨을 실험조건에 필요한 온도까지 가열하여 반응용기에 공급하는 장치로써 500℃의 설계온도와 허용압력 5Kg/cm²로 하여 4mm의 STS 304 제작하였다. 탱크크기는 외경 40cm, 길이 60cm로 부피가 49,480cm³인데 나트륨을 탱크부피의 75% 채운다면 그 양은 약 35Kg에 해당하고 2.8Kw 용량의 가열기와 열전대가 설치되어 있으며 공급탱크의 상부에는 점화 plug를 이용한 level 지시기가 부착되어 있다. 그리고 장치 내 공기의 유입방지를 위한 질소공급 및 배기장치 (bubbler or lute)를 설치하였다.

공기조건 조절계통은 공기압축기, 질소가스와 이산화탄소 실린더, 혼합탱크 그리고 습도계 및 유량계로 구성하여 나트륨 화재시와 세정작업시 시험용기내의 산소농도를 0~21mol%의 범위로 조절할 수 있게 하였다.

자료 수집장치는 나트륨 화재실험시 시험용기내에서 급격히 변화하는 압력 및 온도분포 변화, 산소농도 및 에어로졸 크기 변화를 화재의 진행과 병행하여 측정하고, 이들 측정자료를 컴퓨터에 저장

해석한다. 산소 측정장치는 화재실험시 반응용기 내의 산소농도 변화를 측정하기 위한 장치로서 가스를 시료채취 하기 위한 순환펌프, 나트륨 에어로졸을 여과하는 2개의 filter, 산소센서를 보호하기 위해 가스를 냉각시켜 주는 cold trap, 시험용기 내의 산소농도 변화를 측정하는 산소 감지기가 설치된 측정 탱크 그리고 수소 감지기 등으로 구성되어 있다. 온도와 압력 측정장치는 화재실험시 반응용기내의 가스의 온도분포를 측정하기 위해서 한개의 port에 여러 개의 열전대를 동시에 주입, 밀봉이 유지되면서 용기내의 온도를 측정하도록 되어있는 미국 Conax buffalo사의 multi-probe thermocouple assembly와 압력전달기(pressure transducer)를 사용하였다. 특히 에어로졸 측정 장치중 시료 채취 장치는 반응용기내에 부유된 에어로졸 입자를 측방향 및 반경방향으로 각각 다른 위치에서 채취할 수 있도록 되어 있다. 즉 시험용기 벽에서부터 중앙까지 20cm 간격으로 세 지점, 상부노즐에서 아래쪽으로 20cm간격의 세 지점 등 모두 9곳에서 시료채취가 가능하도록 설치하였다. 시료가 통과하는 관은 1인치 스테인레스 스틸 파이프를 이용하였고, 각 시료채취 포인트는 1/4인치 캡을 설치하여 원하는 포인트만 열어두고 실험할 수 있도록 하였다. 에어로졸 입자크기의 측정장치는 light diffraction와 light scattering의 원리를 이용한 API사(USA)의 제품(모델명 AEROSIZER Mach 2)을 채택하였다.

Control panel은 나트륨 시험시설을 안전하고 효율적으로 운영하기 위해 시설물로부터 일정한 거리가 유지된 안전한 장소에서 나트륨 탱크 및 배관부위 등의 나트륨 가열장치들을 일정온도로 제어하고 반응용기, 나트륨 공급 및 저장탱크의 계기로부터 지시된 온도, 압력 등을 관찰하여 상황을 파악하고 실험을 진행시키면서 비상시에 대비하기 위한 장치로서 주전원 스위치와 더불어 온도 설정치에 의해서 작동되는 12개의 PID 온도조절계 그리고 온도 설정점 이하에서 작동되는 air pump와 온도설정점 이상에서 경보가 울리는 시험용기 스위치가 있으며 액체 나트륨 유량조절용 1개의 자동밸브, 공기압축기와 2개의 진공펌프 전원스위치가 있다. 지시계로는 12개의 PID 온도조절계의 온도지시계, 시험용기 본체의 압력변환기에 연결된 압력지시계, 가스 조절계통의 습도계, 시료채취

계통의 산소 측정기 그리고 공급탱크내 나트륨 수위를 표시하는 3개의 표시등이 있다.

2.2 실험방법

나트륨 저장조에 나트륨 덩어리를 적당량 넣은 후 진공펌프를 작동시켜 나트륨 저장조를 진공으로 한 다음 질소 가스를 주입하여 나트륨 저장조 압력이 15psi 정도로 만든다. 그 다음 배관부, 나트륨 저장조 및 공급조를 7시간에 180℃까지 서서히 가열하면서 진공펌프를 작동시켜 진공으로 한 다음 질소 가스를 다시 주입하여 압력을 15psi 정도로 만든다. 나트륨 저장조에 주입한 나트륨이 용융하여 설정온도(대략 180℃)까지 가열이 완료되면 180℃까지 예열된 배관부를 통하여 질소 가스의 압력으로 예열시킨(대략 180℃) 나트륨 공급조로 이송한다. 나트륨 공급조에 이송된 용융 나트륨을 실험조건에 필요한 온도까지 가열시킨다. 가열하기 전에 시험용 기내에 분무 실험용 nozzle을 설치한 후 공기 조절 계통을 작동시켜 시험용기 내의 압력(15psi)과 산소의 농도를 실험조건에 맞춘다. 분무형 화재용 배관부분을 예열한 후 산소농도 측정용 sampling계통, video camera, 자료입력장치 계통을 작동시키면서 밸브를 열고 나트륨을 주입시킨다. 나트륨 주입 완료후 계속 자료입력 계통을 작동시켜 시험용기내의 압력변화, 산소농도변화, 온도분포 및 에어로졸 크기 변화를 측정한다. 실험 완료 후, 시험용기내를 진공으로 만들고 질소를 주입시켜 15psi를 만든 다음에 증기발생기에서 발생된 수증기를 서서히 주입시켜 나트륨을 NaOH 수용액 상태로 제거시켜 세척한다.

2.3 실험변수

나트륨 분무형 화재 현상 실험은 직경이 1.2mm 이고 분사각이 50°인 분무 노즐을 통해 용융 나트륨을 주입 시켜가며 수행하였다. 나트륨화재 에어로졸 입자크기 및 분포를 측정하는 실험에서 주요 변수는 나트륨 주입온도, 나트륨 분사압력 및 시간 등이다. 실험온도는 300에서 350℃까지의 범위였으며, 각 온도에서 공급 탱크와 노즐의 온도가 일치되도록 하였다. 나트륨 분사압력은 30, 40, 50 및 60psi로 변화시켰으며, 이 압력에 따라 나트륨이 분사노즐에서 분무되는 양상과 나트륨 유속이

달라진다. 산소 농도는 21%에서 수행하였고, 에어로졸 입자의 시료채취 위치는 반응용기 중앙에서 측정하였다. 한편 측정시간은 에어로졸 실험에서 매우 중요한 변수이며, 발화 후 20분 간격으로 실험용기 내부 에어로졸 농도가 분석기로 측정 가능한 약 1시간까지 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 나트륨화재 에어로졸 특성

Fig. 2는 용융 나트륨 주입도가 320°C일때 나트륨 주입 압력을 매개변수로 하여 나트륨화재 에어로졸의 침강특성에 중요한 aerodynamic diameter와 나트륨화재 에어로졸 여파시 중요시되는 geometric diameter의 평균크기를 시간에 따라 보여 주고 있다. 나트륨화재 에어로졸의 aerodynamic diameter와 geometric diameter의 평균크기는 용융 나트륨 주입 압력에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 분무형 화재특성 해석시 중요한 인자는 분무노즐에서 분무 상태에 의해 생성되는 초기 액적크기에 의해 많은 영향을 받을 것으로 생각할 수 있다. 분무 노즐에서 생성 액적 크기는 분무노즐의 형태가 같을 경우 분무조건에 의한 함수로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 Heisler에 의해 제시된 다

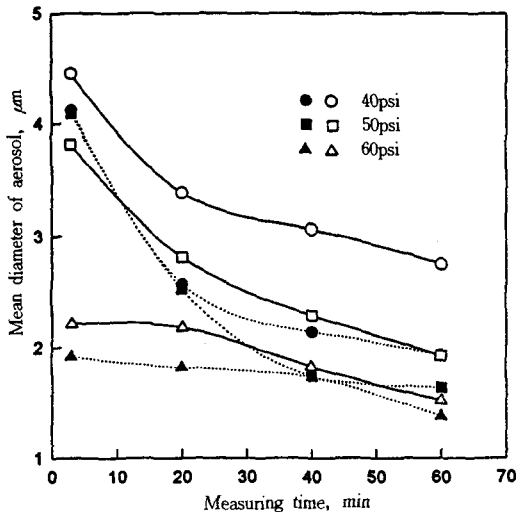


Fig. 2 Effect of injection pressure on aerosol mean diameter (Black-aerodynamic diameter, white-geometric diameter)

음과 같은 식으로 분무액적의 크기와 나트륨화재 에어로졸의 관계를 설명해 보고자한다¹⁹⁾.

$$D_{Na,av} = 1.6 \times 10^{-4} \left(\frac{\sigma}{\mu U_0} \right)^{0.27} (Re_p)^{-0.75} \dots (1)$$

여기서 $D_{Na,av}$ = droplet average diameter, cm

σ = surface tension of sodium, dyne/cm

μ = viscosity of sodium, cP

U_0 = velocity in nozzle, m/sec

Re_p = Reynolds number in pipe

식(1)을 이용하여 분무노즐에서 생성되는 액적 크기를 예측하면 온도가 같으므로 나트륨의 열역학적 특성치들은 같으며 생성되는 분무액적크기는 파이프에서 Reynolds수와 노즐에서 분무속도의 함수로 생각할 수 있다. 따라서 나트륨의 주입압력이 증가하면 노즐에서 용융 나트륨의 속도와 Reynolds수가 증가하므로 생성되는 액적크기가 감소할 것으로 예측되며, 이로 인해 나트륨화재 발생시 생성되는 에어로졸의 크기 또한 감소하는 것으로 생각된다. 한편 시간이 경과해 감에 따라 에어로졸의 aerodynamic diameter와 geometric diameter의 평균크기가 감소하는 것은 에어로졸의 농도에 의한 합체현상(coalescence) 보다 에어로졸의 침강(sedimentation)에 의한 소멸현상이 지배적인 역할을 하기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 3은 용융 나트륨 주입 압력이 40psi일 때 나

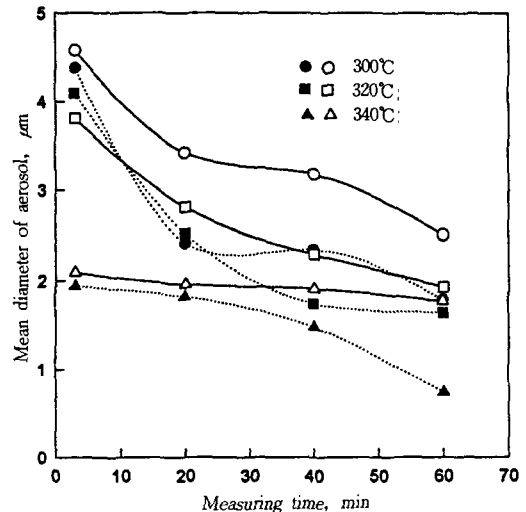


Fig. 3 Effect of injection temperature on aerosol mean diameter (Black-aerodynamic diameter, white-geometric diameter)

트륨 주입 온도를 매개변수로 하여 나트륨화재 에어로졸의 aerodynamic diameter와 geometric diameter의 평균크기를 시간에 따라 보여 주고 있다. 나트륨화재 에어로졸의 aerodynamic diameter와 geometric diameter의 평균크기는 용융 나트륨 주입 온도가 높아짐에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 나트륨의 열역학적 특성치들의 온도 의존성에서 기인한 것으로 생각된다. 다른 연구자들에 의하면 용융 나트륨의 밀도, 점도, 표면장력은 온도가 증가하면 감소한다고 보고되어 있다²⁰⁾. 그러므로 이와 같은 물성치 변화가 분무노즐에서 용융 나트륨이 분무될 때 같은 압력에서 온도가 높을수록 작은 액적을 생성하게 되어 에어로졸 생성에 직접 영향을 주기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 4는 나트륨화재 에어로졸의 aerodynamic diameter와 geometric diameter의 관계를 보여주고 있다. aerodynamic diameter와 geometric diameter의 관계가 선형적이라는 것은 에어로졸의 겉보기 밀도(apparent density)가 에어로졸 크기의 함수라는 것을 의미한다.

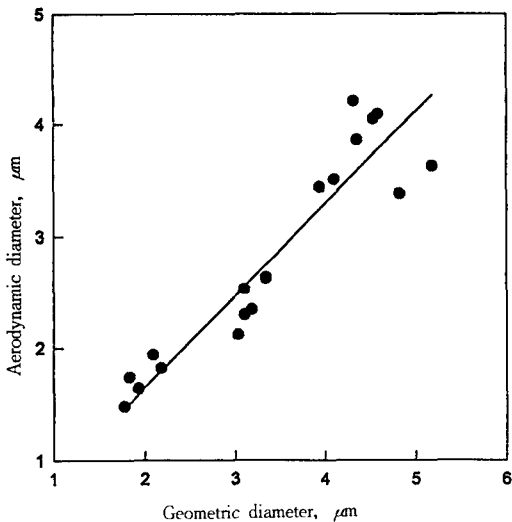


Fig. 4 Aerodynamic diameter vs. Geometric diameter

Fig. 5는 나트륨화재 에어로졸의 aerodynamic diameter와 dynamic shape factor의 관계를 보여 주고 있다. 부유되어 있는 에어로졸 입자의 침강속도(sedimentation velocity)는 에어로졸의 밀도, 크

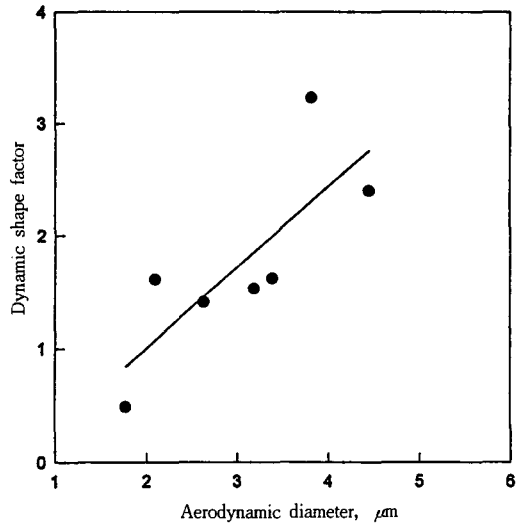


Fig. 5 Dynamic shape factor in terms of aerodynamic diameter

기 등에 영향을 받으며 구형입자(spherical particle)인 경우는 같은 조건에서 크기만의 함수로 특성을 표시할 수 있지만, 비구형 입자(non-spherical particle)인 경우는 dynamic shape factor를 도입하여 설명할 수 있다. dynamic shape factor는 비구형 입자가 어떤 매질속에서 침전 속도, V_t 로 움직일 때 받는 drag force와 같은 부피를 갖는 구형입자가 같은 침전속도로 움직일 때 받는 항력(drag force)의 비율로 정의된다²¹⁾.

$$K = \frac{\rho D_{ge}^2 C(D_{ge})}{\rho_0 D_{ae}^2 C(D_{ae})} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 ρ_0 = unit density, $1g/cm^3$

D_{ge} =geometric diameter

D_{ae} =aerodynamic diameter

$C(D)$ =Cunningham slip correction factor

본 연구에서도 식(2)를 이용하여 dynamic shape factor를 구하였다. Fig. 5에서 알 수 있는 것과 같이 나트륨화재 에어로졸의 aerodynamic diameter이 증가할수록 dynamic shape factor의 값도 증가하였다. 이와 같은 연구결과는 M. Barbe-le Borgne를 제외한 다른 연구자들의 연구결과와는 차이가 나는 것으로 본 연구에서 발생한 에어로졸의 크기가 비교적 다른 연구자들의 에어로졸의 크기($2\mu m$ 이하)보다 크기 때문인 것으로 생각한다. 그러나 M. Barbe-le Borgne는 본 연구와 비슷한 연구 결

과를 보고하였다²²⁾.

3.2 격납 용기내 온도 및 압력 특성

Fig. 6은 나트륨 주입온도 및 초기산소농도를 각각 330°C, 21mol%로 일정하게 유지시키고 주입되는 나트륨 압력을 40psi로 하여 SPRAY-3 코드²³⁾ 계산을 수행하여 같은 실험조건인 40psi의 나트륨 주입 압력에서 수행된 실험값과 비교한 것이다. Fig. 6에 시간에 따른 가스의 압력 변화와 온도변화를 도시하였는데 그림에 나타난 바와 같이 격납용기내 가스의 압력과 온도는 급격히 증가하였다가 감소하였다. 이와 같이 시험용기내 가스의 압력과 평균온도는 짧은 시간에 매우 급격히 상승하였다가 나트륨의 주입이 6초 후 중단되면 급격히 감소하는 것은 작은 액적상태로 분산되어 표면적이 커진 용융 나트륨이 산소와 급격히 반응하였기 때문인 것으로 생각된다. 주입되는 나트륨 압력 40psi인 경우 계산된 가스의 최대압력은 10.53psig로 실험값 11.05psig와 비교적 잘 일치하였고, 계산치와 실험치가 비교적 잘 일치하였다. 그러나 온도의 경우에는 압력과는 달리 계산된 수치와 실험치가 비교적 큰차이가 나타남을 보여주고 있다. 이로부터 SPRAY-3코드의 열전달 모델의 수정·보완이 필요하다는 것을 알 수 있다. Fig. 7에 분사압력에 따른 격납용기내 최고 압력과 액적 크기를 도시하였는데 그림에서 보여 주는 바와 같

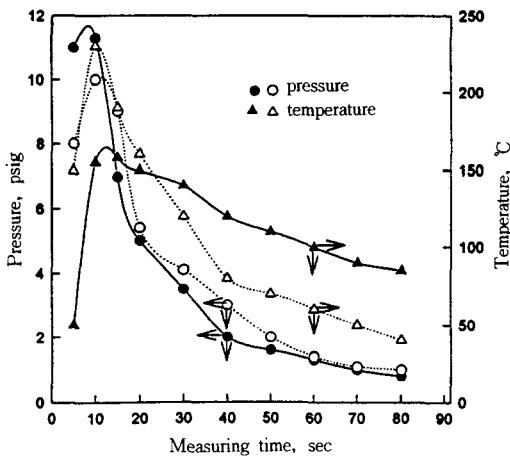


Fig. 6 Pressure and temperature in reactor vessel (Black-experimental value, white-calculated value)

이 용융 나트륨의 분사압력이 증가함에 따라 가스의 최고 압력은 직선적으로 증가하였다. 이는 용융 나트륨의 연소열이나 현열이 용융 나트륨의 량에 비례하기 때문인 것으로 생각된다. 분무되는 나트륨 액적 크기는 나트륨 연소 속도를 결정하는데 주요한 변수이기 때문에 액화질소나 유기액체를 사용하여 나트륨 액적을 포집하여 나트륨 액적 크기를 결정하는 실험들이 수행되었으나 가장 적당한 방법으로는 실제 분무되는 나트륨 액적들을 사진촬영하는 것이라고 보고되고 있다. 이 사진촬영 방법을 이용하여 분무 액적을 측정할 때에는 방해하는 에어로졸 형성을 최소화하기 위해 불활성 분위기에서 행하여진다. 그러나 나트륨 실험이 상당한 기술과 주의를 필요로 하기 때문에 분무 모형에 따른 실험식을 제시하여 사용하려는 경향이 있다. 본 연구에서는 앞의 식(1)을 이용하여 나트륨 액적 크기를 결정하여 사용하였으며, 주입압력이 증가할수록 생성되는 액적크기는 감소하였다. 따라서 생성되는 액적의 크기가 반응기의 최고압력과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

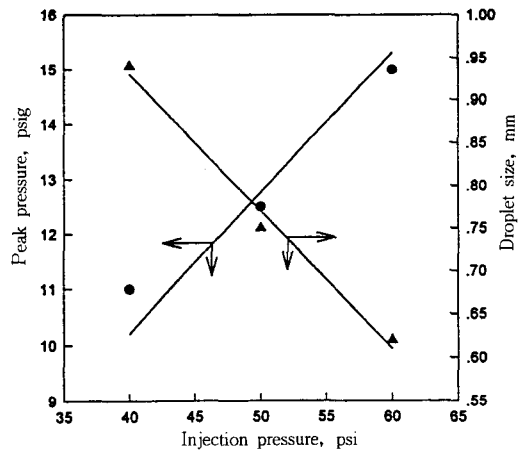


Fig. 7 Effect of injection pressure on peak pressure and droplet size

Fig. 8은 주입온도에 따른 격납용기내의 최고압력과 생성되는 액적의 크기를 나타내고 있다. 주입 온도가 증가하면 격납용기내의 최고압력 또한 증가하며, 액적크기는 감소한다. 주입되는 용융 나트륨의 온도가 상승함에 따라 시험용기내의 가스의 최고압력 값의 변화율이 주입압력 변화에서 보다 적다. 이는 주입되는 용융 나트륨의 온도 차

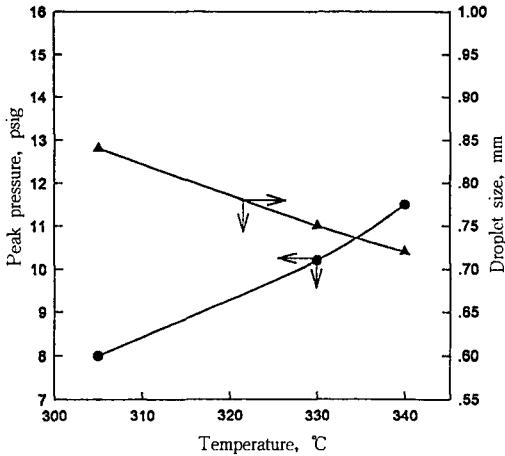


Fig. 8 Effect of injection temperature on peak pressure and droplet size

이가 적어 용융 나트륨의 물성치 변화에 영향이 적었을 뿐만 아니라 용융 나트륨이 분출되어 화재가 발생하면 나트륨 연소열은 현열에 비해 현저히 크기 때문에 나트륨 화재를 발생시킬 수 있는 온도이상에서는 주입되는 나트륨 온도의 영향이 상대적으로 적은 것으로 생각된다.

4. 결 론

액체급속로 격납용기에서 가상사고는 온도, 압력 상승 및 많은 양의 에어로졸을 발생시킨다. 이러한 현상을 모사하기 위한 컴퓨터 코드는 많은 입력자료를 필요로 하며, 에어로졸의 모양인자도 이들 중에 하나이다. 직경 1.2m, 높이 1.8m, 부피가 1.7m³인 격납용기에서 수행한 분무형 나트륨화재 실험결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용융 나트륨의 주입온도와 주입압력이 증가할수록, 나트륨화재 에어로졸의 aerodynamic diameter와 geometric diameter의 평균크기는 감소한다.
- 2) 나트륨화재 에어로졸의 aerodynamic diameter와 geometric diameter의 관계는 $D_{ae} = 0.70 D_{ge}$ 이다.
- 3) 나트륨화재 에어로졸의 aerodynamic diameter의 평균크기가 증가할수록 에어로졸의 dynamic shape factor도 증가한다.
- 4) 용융 나트륨의 주입온도와 압력이 증가할수록

격납용기내 가스의 최고압력은 선형적으로 증가하며, 주입온도보다 주입압력에 더 큰 영향을 받았다.

참 고 문 헌

- 1) S. Jordan, Release of Fission Products from Contaminated Sodium Fire, ISPRAs Courses, 4, p. 1955, 1976.
- 2) Quarterly Technical Progress Report, LMFBR Safety Programs, January-March 1971, AI-AEC-12992, Atomics International, May 31, 1971.
- 3) E. Hines, A. Gemant and J.K. Kelley, How Strong Must Reactor Housings be to Contain Na-Air Reactions, Nucleonics, Vol. 14, No. 10, pp. 38~41, 1956.
- 4) J.R. Humphreys Jr., Sodium-Air Reactions as They Pertain to Reactor Safety and Containment, Proceedings of Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, Vol. 22, p. 177, 1958.
- 5) J.D. Gracie and J.J. Droher, A Study of Sodium Fires, NAA-SR-4383 Atomics International, October, 1960.
- 6) I. Charak and F.A. Smith, Preliminary Evaluation of a Technique to Study Expulsion of Sodium into Air, Proceedings of Conference on Safety, Fuel and Core Design in Large Fast Power Reactors, ANL-7120, p. 868, Argonne National Laboratory, October, 1965.
- 7) E. Garelis and J.B. Nims, Sodium-Air Accident Study for a Sodium Cooled Reactor, AECU-4164, Division of Technical Information Extension, Oak Ridge, Tennessee, July 1959.
- 8) L. Baker and A.D. Tevebaugh, Sodium-Air Reaction Calculations, Reactor Safety, Chemical Engineering Division Annual Report, January-June 1965, ANL-7055, p. 208, Argonne National Laboratory, October, 1965.
- 9) L. Leibowitz, Sodium-Air Reactions, Fast Reactor Safety Studies, Chemical Engineer-

- ing Division Semiannual Report January-June 1966, ANL-7225, p. 201, Argonne National Laboratory, June, 1966.
- 10) L. Leibowitz, Calculations for the Sodium-Air Reaction, Reactor Development Program Progress Report June 1966, ANL-7230, Argonne National Laboratory, 1966.
 - 11) L. Leibowitz, Thermodynamic Equilibria in Sodium-Air System, Journal Nuclear Materials, Vol. 23, pp. 233~235, 1967.
 - 12) T.S. Krolikowski, Violently Sprayed Sodium-Air Reaction in an Enclosed Volume, ANL-7472, 1968.
 - 13) M. Silberberg, Spray Burning Experiments, Annual Technical Progress Report, LMFBR Safety Program, GFY 1971, AI-AEC-13006, Atomics International, Sept. 15, 1971.
 - 14) Quarterly Technical Progress Report, LMFBR Safety Programs, January-March 1972, AI-AEC-13026, Atomics International, May 1972.
 - 15) W. Cherdron and S. Jordan, Physical and Chemical Characterization of Sodium Fire Aerosols, Proceedings of the LMFBR Safety Topical Meeting, pp. III-71-79, Lyon, France, 1982.
 - 16) J.R. Richard et al., Spontaneous Ignition and Combustion of Sodium Droplets in Various Oxidizing Atmospheres at Atmospheric Pressure, 12th Symposium on Combustion, Paris, p. 39, 1969.
 - 17) Quarterly Technical Progress Report, LMFBR Safety Programs, July-September 1975, AI-ERDA-13161, Atomics International, Nov. 1975.
 - 18) F. Huber et al., Behavior of Sodium Fires and Testing of Protective Systems, KfK-1970, Karlsruhe Nuclear Research Center, April, 1974.
 - 19) Annual Technical Progress Report, LMR Safty Programs, AI-ERDA-13155, Atomics International, 1975.
 - 20) C.C. Addison, The Chemistry of the Liquid Alkali Metals, John Wiley & Sons, pp. 1~7, 1984.
 - 21) G. Tarroni et al., Morphological analysis and Evaluation of Dynamic shape Factor of Particles Produced in a Real Scale Sodium Fire, J. of Aerosol Sci., 20, 8, p. 1409, 1989.
 - 22) M. Barbe-Le Borbne et al., Experimental Determination of the Dynamic Shape Factor of the Primary Sodium Peroxide Aerosol, J. of Aerosol Sci., 17, 1, p. 79, 1986.
 - 23) S.T. Hwang et al., A Study on the Safety Measures of LMR Coolant, KAERI/RR-1378/93, pp. 61~118, 1994.
-