'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CONTAIN 2.0 코드를 사용한 KAEVER 에어로졸실험 계산결과의 정확성 분석-ISP44

Analyses of the Accuracy of Calculated Results Obtained by CONTAIN 2.0 Code for the KAEVER Aerosol Tests -ISP44

박재우, 이윤준

제주대학교
제주도 제주시 아라동 1번지

요 약

OECD-CSNI에 의해서 국제표준문제-44(ISP44)로 제안된 KAEVER 에어로졸실험(K123A, K148A, K186A, K188A)을 CONTAIN 2.0 코드를 사용하여 모의하였으며 실험자료와의 비교를 통하여 계산결과의 정확성을 분석하였다. 이들 실험은 모두 수증기 포화도가 높은 조건에서 입자표면에 수증기가 응축하는 경우 성분에 따른 에어로졸의 감소 경향을 분석한 실험이다. 강한 흡습성을 가지는 CsOH 에어로졸인 경우 코드는 실제보다 상당히 느린 에어로졸 감소를 예측하고 있으며 중간정도 흡습성을 갖는 CsI 에어로졸인 경우에도 유사한 경향을 보이고 있다. 반면 비흡습성인 Ag 에어로졸인 경우에 코드는 실제보다 매우 빠른 에어로졸 감소를 예측하였다. 흡습성 성분인 CsOH와 비흡습성 성분인 Ag의 혼합 에어로졸인 경우에 코드 계산결과는 두 성분에 대해서 통상적으로 예견되는 것과 달리 동일한 감소 경향을 보이고 있으며, 전체 에어로졸 농도에 있어서는 실제보다 느린 감소를 예측하고 있다.

Abstract

CONTAIN 2.0 code has been employed to simulate the KAEVER Test series K123A, K148A, K186A, K188A that were proposed as International Standard Problem-44 by OECD/CSNI, and the accuracy of the calculation results has been analyzed. All of these tests were conducted to investigate the behavior of the aerosol depletion with steam condensing on the particle surface under highly saturated steam conditions. The code predicts considerably slower aerosol depletion than the experiment for the CsOH aerosol which is highly hygroscopic, and also showed very similar results for the CsI aerosol which is moderately hygroscopic. For the Ag aerosol which is non-hygroscopic, however, the code predicts much faster depletion compared with the experimental data. For the mixed aerosol of hygroscopic CsOH and non-hygroscopic Ag, the calculation results show the same depletion pattern for both components, which is different from usual anticipation, and do show remarkably slower depletion compared with the experimental data.

1. 서론

원자로 중대사고 해석에 사용되는 많은 코드들이 에어로졸의 거동을 계산하는 과정에서 가장 어려움을 겪는 부분은 입자표면의 수증기 응축에 의한 에어로졸의 성장을 계산하는 과정이다. 특히 흡습성 에어로졸인 경우 상대습도가 아포화 조건에서도 수증기 응축이 급속히 발생할 수 있으므로 이러한 어려움은 더욱 커진다. 이와 관련하여 수증기 응축조건에서 에어로졸의 거동을 분석하는 여러 실험이 실시되었으며 이들 실험을 바탕으로 에어로졸 모델의 정확성 평가가 제한적으로 이루어 졌다.[1] 근래에 있었던 대표적인 예로는 ISP37[2]을 들 수 있다. ISP37로 제안된 에어로졸실험은 흡습성 성분인 NaOH 에어로졸을 사용하여 독일의 Battelle Model Containment에서 실시된 VANAM M3[3] 실험이었다. ISP37에서는 NaOH 에어로졸만을 대상으로 하였고 열수력조건의 불확실성이 에어로졸 계산에 미치는 영향이 컸기 때문에 사용된 모델에 대한 일관된 평가결론을 도출하기가 곤란하였다. 그 결과로 보다 다양한 에어로졸 실험에 바탕을 둔 종합적인 에어로졸 모델의 평가에 대한 필요성이 인식되었다. 이에 따라 독일의 GRS는 OECD/CSNI에 KAEVER 에어로졸 실험을 에어로졸 모델의 평가를 위한 국제표준문제로 제안하였다.

KAEVER(Kernschmelz AErosol VERsuche - Core Melting Aerosol Experiment)[4]는 독일의 Batelle 실험장치에서 실시된 에어로졸실험으로 LWR의 중대사고시에 격납용기로 방출되는 흡습성, 비흡습성, 혼합 성분의 에어로졸이 다양한 수증기농도에서 보이는 거동을 분석하기 위하여 수행되었다. KAEVER 실험은 총 32 종류로 구성되는데, 강한 흡습성 성분인 CsOH, 중간정도의 흡습성을 띤 CsI, 비흡습성 성분인 Ag 및 SnO_2 에어로졸을 대상으로 건조한 상태(RH=0%), 아포화상태(상대습도<100%), 포화상태(상대습도=100%), 과포화상태(상대습도>100%)를 조성하고 이들 조건에서 각 에어로졸이 감소하는 경향을 분석하였다.

OECD/CSNI는 KAEVER 에어로졸실험 가운데 K123A, K148A, K186A, K187A, K188A를 중대사고 해석 코드에 사용된 에어로졸 모델의 정확성을 평가하기 위한 국제표준문제 (International Standard Probem-44)로 채택하였다. 2000년 1월 독일의 GRS 주관으로 쾰른에서 1차 준비회의가 열렸으며 여기에서 코드 입력 작성을 위한 모든 자료가 수록된 ISP-44 시방서[5] 및 CD-ROM이 제공되었다. 위의 실험 가운데 K187A를 제외한 나머지는 모두 open problem으로 계산결과의 정확성 분석을 위하여 실험에서 측정한 열수력 및 에어로졸 자료가 CD-ROM에 포함되어 있으며, K187A는 blind problem으로 입력자료만 주어졌다.

ISP44의 목적은 모든 참여자들이 독자적으로 선택한 코드를 사용하여 제공된 실험자료를 바탕으로 계산을 수행하고 그 결과를 공동으로 비교함으로써 계산결과의 정확성을 객관적으로 평가하는 데 있다. 제안된 KAEVER 에어로졸실험은 강한 흡습성인 CsOH 에어로졸(K188A), 중간정도 흡습성인 CsI 에어로졸(K123A), 비흡성인 Ag 에어로졸(K148A), CsOH 에어로졸과 Ag 에어로졸의 혼합체(K186A), CsOH 에어로졸과 CsI 에어로졸과 Ag 에어로졸의 혼합체(K187A)가 수증기 응축조건에서 보이는 거동을 분석한 실험이다. 따라서 동일한 실험자료를 바탕으로 이들 실험을 모의함으로써 수증기 응축에 의한 입자성장과 그에 따른 에어로졸 감소를 계산하는 각 에어로졸 모델의 성능을 객관적으로 평가할 수 있게 된다.

본 연구에서는 ISP37 이후에 발표된 CONTAIN 2.0코드[6]를 사용하여 ISP-44로 제안된 open problem을 계산하였으며 실험자료와 비교를 통하여 계산결과의 정확성을 분석하였다. 또한 이를 바탕으로 CONTAIN 2.0 에어로졸 모델의 내재한 취약점에 대해서도 분석하였다.

2. KAEVER 에어로졸 실험

실험용기는 그림 1에 보인 바와 같이 전체적으로 수평방향의 원통용기 구조이며 양단에 육방형

출입용 공간이 확보되어 있다. 출입문의 바깥 상부에는 출입문을 동작시키는 장치가 부착되어 있고 원통용기를 받쳐주는 지지대가 용기 아래에 접촉되어 있다. 이들 부착물은 용기로부터 대기로 추가적으로 열을 방출하는 역할을 한다. 원통부분의 내부 지름은 2090mm, 길이는 2500mm, 육방형 출입공간의 길이는 475mm, 출입문의 높이는 1900mm이고 실험용기의 전체 부피는 10.6 m^3이다.

원통부분의 용기벽은 안으로부터 강철판, 전기가열판, 단열층으로 구성되고 출입용 공간의 벽은 강철판으로 이루어진 부분, 강철판+단열층으로 된 부분, 강철판+전기가열판+단열층으로 이루어진 부분으로 나누어 진다(그림 1 참조). 단열층의 외부에는 2mm 두께의 강철 보호판으로 덮여 있으며 용기의 내면은 페인트로 코팅이 되어 있다. 실험용기벽의 각 부위별(그림 1의 번호) 내부 면적, 각 재질의 두께, 방향은 ISP44 시방서[5]에 자세히 주어져 있다. 원통부분의 용기벽 방향은 에어로졸의 부착에 중요한 영향을 미치므로 천장, 바닥, 측벽의 구분이 필요하다. 출입문 부위와 용기 아래의 지지대에 의한 열전달효과를 고려하여 시방서에는 용기벽외에 가공적인 벽을 사용할 것을 제안하고 있다. 실험용기의 내부에는 에어로졸 및 수증기의 주입을 위한 장치와 실험 데이터 수집을 위한 센서들, 그에 필요한 기타 구조물이 설치되어 있으며 이들의 표면은 에어로졸의 부착에 기여하게 된다.

KAEVER 에어로졸 실험과정은 크게 두 단계로 나누어진다. 제 1단계는 실험을 위한 준비과정으로서 수증기를 용기에 주입하면서 전열기를 작동하여 용기를 가열하는 과정이다. 이 과정에서 용기내부에 있던 기체는 펌프를 통하여 밖으로 배출되고 수증기는 용기의 벽면에 응축되어 용기 바닥에 고이게 된다. 바닥의 응축수는 외부로 향하는 배관을 통하여 배출된다. 용기 내부의 기체는 용기 벽면의 온도차에 의한 자연순환과 용기 하부에서 주입되는 수증기의 상승에 의하여 약 1분 이내에 완전히 균일하게 혼합이 이루어진다. 1단계에 소요되는 시간은 약 10시간이다.

제 2단계 초기에는 에어로졸의 주입에 앞서 내부 기체의 열수력 조건을 각 실험에 적합한 상태로 맞추기 위해 수증기를 추가로 주입하는 과정으로서 주입하는 수증기의 양과 온도를 통하여 실험조건을 조절하게 된다. 수증기 주입과 함께 각종 측정용 센서의 원활한 작동을 위하여 세정용 질소기체가 지속적으로 주입된다. 2단계에서는 강제적인 내부공기의 배출은 없으나 출입문의 틈을 통한 기체의 자연누출이 계속적으로 발생한다. K123A 실험의 경우 전기가열기를 사용하여 추가적인 열이 공급된다. 제 2단계의 다음 과정은 에어로졸을 주입하는 과정으로서 외부의 에어로졸 발생기에서 생성한 에어로졸을 질소기체를 운반체로 하여 용기내부로 주입한다. 에어로졸은 에어로졸 물질을 전기유도 가열 도가니에 넣고 가열하여 휘발하는 기체를 운반용 질소기체로 냉각, 응결시켜서 생성된다. 2단계의 마지막 과정은 에어로졸 주입이 중단되고 주입된 에어로졸의 감소가 일어나는 과정으로 에어로졸 성분 및 수증기의 포화도에 따라 감소 속도가 달라진다.

KAEVER 에어로졸실험별로 주입되는 수증기 및 질소기체의 양과 온도 및 엔탈피, 에어로졸 주입량, K123A 실험의 열 공급량 등은 KAEVER 실험자료가 수록된 CD-ROM에 주어져 있으며 이들을 정리한 결과는 문헌[7]에 주어진 바와 같다. 각 실험에 대해서 1단계 종료시점에 측정된 열수력 초기조건은 표 1과 같으며 주입되는 에어로졸의 성분 및 특성치는 표 2에 주어진 바와 같다.

3. CONTAIN 2.0 계산 입력 모델

KAEVER 실험용기는 양단에 위치한 출입용 공간을 포함하여 전체가 하나의 공간으로 연결되어 있고 내부기체의 혼합이 매우 빠르게 이루어지므로 용기 전체를 하나의 cell로 설정하였다(cell-1). 실험 전과정을 통하여 용기의 출입문 틈새를 통하여 대기로 내부 기체의 누출이 발생하기 때문에 외부의 대기를 또 하나의 cell로 설정하였다(cell-2). 용기에서 누출되는 기체는 cell-1과 cell-2를 연결하는 engineered vent로 처리하였다. 수증기가 응축하여 용기의 하부에 고이는 경우

를 대비하여 cell 1은 low cell 모델을 도입하여 pool이 형성되는 것을 허용하였다. 그림 2는 CONTAIN 입력을 위한 cell 모형을 나타낸 것이다. 원통형 용기를 육면체 용기로 나타내기 위해서 에어로졸 부착에 직접 영향을 미치는 천장, 측벽, 바닥의 면적을 ISP44 시방서에 규정된 값과 일치하도록 설정하였다. 원통용기에서 pool의 면적은 응축수의 양에 따라 달라지나 계산에서는 각 실험에 주입되는 수증기가 전부 응축되어 고인다고 가정하여 최대 pool의 면적과 높이를 사용하였다.

용기의 벽면은 열전달이 일어나는 구조물이므로 구성하는 재질의 층을 모두 고려하여 안쪽부터 페인트, 강철판, 단열층, 보호강철판 순서로 나타내었다. 각 층의 두께는 ISP44 시방서에 주어진 값을 사용하였고 페인트와 보호강철판의 두께는 2mm로 설정하였다. 각 실험별로 주입되는 에어로졸의 특성치는 표 2에 주어진 값을 사용하였다.

실험용기에서 대기로 누출되는 기체를 고려하기 위하여 설정된 engineered vent의 단면적과 마찰손실계수는 GRS가 자체 분석을 통하여 구한 자료를 사용하였으며 이는 표 3에 주어진 것과 같다. 용기외면과 대기간의 열전달은 대류 열전달 모델을 사용하였다. 계산에 고려한 에어로졸 입자 크기 영역은 직경 1.0×10^{-8} - 1.0×10^{-4} m 범위이고 10개의 구간이 사용되었다. 이외에 계산에 사용된 입력자료의 자세한 내용은 문헌 [7]에 주어져 있다.

4. 모의 결과

4.1 K123A- CsI 에어로졸 실험

그림 3은 K123A CsI 에어로졸 실험에 대해서 계산한 용기 내부의 압력의 변화를 나타낸 것이다. 측정된 용기 내부 압력은 에어로졸 주입이 시작되기까지 거의 일정하게 유지되고 있으나 코드 계산결과는 처음부터 압력이 서서히 증가하며 에어로졸 주입이 시작되는 동안에는 가파르게 증가하여 전반적으로 측정치보다 높은 압력을 예측하고 있다. 그림 4는 용기 내부의 온도를 계산한 결과이다. 용기중심에서 측정한 온도는 102-105 °C 범위에서 거의 일정하게 유지되는 데 반하여 계산한 온도는 지속적으로 상승하여 실험 후 8시간 무렵에는 약 115 °C까지 상승하였다. 계산결과에서 2.5시간 무렵에 온도 상승속도가 빨라진 것은 이때부터 전열기에 의한 열공급이 이루어졌기 때문이다. 그러나 실험결과에서는 이러한 영향이 나타나 있지 않다. 계산결과에서 오차가 발생한 으뜸 원인으로는 압력 계산결과에서 보듯이 내부 기체의 누출량이 실제보다 낮게 계산되었고 이로 인하여 용기 내부의 열누출이 실제보다 낮게 계산된 것을 들 수 있다.

그림 5는 에어로졸 농도 변화를 계산한 결과이다. 계산결과의 가장 두드러진 특징은 무엇보다도 최대농도 값이 측정치와 상당한 편차를 보이고 있다는 점이다. 최대 농도 도달 이후 농도 감소속도가 측정치보다 느리게 계산되고 있는 점도 주목이 된다. CsI는 흡습성이 어느 정도 있는 물질로서 상대습도가 100%미만인 조건에서도 입자표면에 수증기 응축이 발생하며 이로 인하여 에어로졸의 침전이 증가한다. 따라서 이 계산결과로 미루어 보면 CONTAIN 2.0에어로졸 모델은 흡습성인 CsI 에어로졸의 수증기 응축 성장을 실제보다 느리게 계산한다고 추정할 수 있다.

4.2 K148A- Ag 에어로졸 실험

K148A 실험은 수증기 과포화 상태에서 흡습성이 없는 Ag 에어로졸의 거동을 분석한 경우이다. 그림 6과 7은 각각 용기 내부의 압력과 온도를 계산한 결과이다. 압력 계산결과는 측정치와 근소한 편차로 일치하고 있음을 볼 수 있으며 온도 계산결과는 초기 약 10분동안 급격히 온도가 감소한 후 지속적으로 증가하는 양상을 보여주고 있다. 초기에 온도가 급격히 감소한 이유는 용기내부의 기체 온도보다 매우 낮은 온도의 질소기체가 주입됨으로 인하여 열적 중화작용이 발생하였기 때문으로 여겨진다. 그러나 측정치에서는 이러한 영향이 나타나지 않았으며 실험 전과정을 통하여

거의 비슷한 온도가 유지되고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 Ag 에어로졸의 농도변화를 계산한 결과이다. 이 경우 에어로졸 농도의 최대값은 계산결과와 실험측정치간에 근소한 차이를 보이고 있으나 에어로졸 감소단계에서는 코드계산이 실제보다 매우 빠른 감소를 예측하고 있다. 수증기가 과포화 상태인 경우 CONTAIN 코드에서 포화도를 초과하는 여분의 수증기는 에어로졸 입자 표면에 응축하는 것으로 계산된다. 따라서 K148A인 경우 수증기가 과포화 상태이므로 여분의 수증기는 입자 표면에 응축하여 중력에 의한 침전이 매우 빨리 일어나는 것으로 계산되었다고 볼 수 있다. 그러나 실제에 있어서는 에어로졸 감소가 이보다 훨씬 느리게 진행됨을 알 수 있다. 즉 실제는 입자표면의 수증기 응축이 코드에서 계산한 만큼 일어나지 않는다고 볼 수 있다. Kelvin 효과를 고려하는 경우 CONTAIN 코드는 계산이 중단되는 문제점이 있었기 때문에 본 계산에서는 고려하지 않았다. 따라서 Kelvin 효과를 무시함으로써 수증기 응축에 의한 에어로졸 성장이 실제보다 더 빠르게 계산되었을 가능성도 있다.

4.3 K188A- CsOH 에어로졸 실험

K188A 실험은 수증기 과포화 조건에서 강한 흡습성을 지닌 CsOH 에어로졸의 거동을 분석한 실험이다. 그림 9와 10은 각각 용기 내부의 압력과 온도를 계산한 결과이다. 압력의 경우 코드 계산결과가 실험치보다 다소 높게 계산되었으나 전체적인 변화의 형태는 근접함을 볼 수 있다. 온도에 있어서는 실험 측정치는 시간에 따라 완만하게 감소하는 반면 계산결과는 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 이 경우에도 K123A 실험의 경우와 같이 기체 누출량이 정확하게 계산되지 않는 데에 주된 원인이 있어 보이며 이는 engineered vent의 누출단면적의 크기를 조절함으로써 보다 개선된 결과를 얻을 수 있을 것이다.

그림 11은 에어로졸 농도를 계산한 결과이다. 에어로졸 농도 계산결과의 최대치는 4.0×10^{-4} kg/m^{3}이고 측정치의 최대값은 약 2.5×10^{-4} kg/m^{3}으로서 코드계산은 실제보다 상당히 높은 값을 예측하고 있다. 최대농도 도달 이후 에어로졸 감소단계에서도 코드 계산결과는 실제보다 느린 감소 경향을 보이고 있다. 이 경우 에어로졸 주입이 진행된 약 1시간 40분 동안에도 강한 흡습성을 띤 CsOH 에어로졸은 수증기 응축으로 많은 양이 중력침전으로 제거된다고 볼 수 있다. 결과적으로 코드가 예측한 최대 에어로졸의 농도가 실제보다 상당히 높게 나타난 점과 이후 감소단계에서 실제보다 느린 감소를 예측한 원인은 CsI 에어로졸에서와 같이 강한 흡습성인 CsOH 에어로졸의 수증기 응축에 의한 입자 성장을 정확하게 계산하지 못하는 데 있다고 볼 수 있다.

4.4 K186A- CsOH+Ag 혼합 에어로졸 실험

이 실험은 강한 흡습성인 CsOH 에어로졸과 비흡습성인 Ag 에어로졸의 혼합체가 약한 수증기 과포화 조건에서 전체 에어로졸의 농도 변화를 분석한 실험이다. 에어로졸 주입이 이루어진 시간대는 Ag 에어로졸이 40분에서 1시간40분까지, CsOH가 1시간 6분에서 2시간 13분까지이다. 그림 12와 13은 각각 용기의 압력과 온도를 계산한 결과이다. 압력 계산결과는 약 1시간 30분 이후부터 측정치보다 낮아져서 점점 편차가 증가하고 있음을 볼 수 있다. 온도 계산결과는 3시간 20분 이후부터 측정치보다 다소 높게 계산되었으나 대체적으로 근소한 편차를 보이고 있다. 이 경우 주어진 누출단면적의 크기를 감소시키면 압력 계산결과를 개선시킬 수 있을 것으로 본다. 그림 14는 에어로졸 농도변화를 계산한 결과이다. 에어로졸 농도 계산결과에서 드러난 특징은 흡습성 에어로졸과 비흡습성 에어로졸을 시간차를 두고 주입하였으나 감소하는 경향은 거의 동일하게 나타났다는 점이다. 실험자료에는 개별 에어로졸의 농도 변화가 주어져 있지 않아서 직접 비교는 할 수 없지만 일반적으로 동일한 수증기 농도에서는 흡습성 성분이 수증기 응축이 많이 발생하기 때문에 비흡습성 성분보다 빠르게 감소한다. 그러나 코드 계산에서는 이러한 차이가 보이지 않고 있다. 이것은 우연의 일치로 나타났다고 볼 수도 있으나 다른 한편으로는 코드 모델에 내재한 취약점에서

연유할 수도 있다. 코드가 예측한 전체 에어로졸의 농도는 CsOH 에어로졸의 경우와 매우 유사하게 실제보다 느린 감소를 보이고 있다.

5. 결론

CONTAIN 2.0코드를 사용하여 ISP44로 제안된 KAEVER 에어로졸 실험인 K123A(CsI 에어로졸), K148A(Ag 에어로졸), K188A(CsOH 에어로졸), K186A(CsOH 에어로졸 + Ag 에어로졸)를 모의하였으며 실험데이터와 비교를 통하여 열수력 계산 및 에어로졸 계산 결과의 정확성을 분석하였다. 실험용기의 압력과 온도 계산결과는 전반적으로 실험자료와 상당한 편차를 보였는데 그 주된 원인은 코드에 사용된 열수력 모델의 결함에 있다기보다는 ISP44 시방서에 제시된 누출관련 자료의 부정확성에 있는 것으로 분석되었다.

에어로졸 계산에 있어서 코드 모델은 강한 흡습성인 CsOH 에어로졸과 중간정도의 흡습성인 CsI 에어로졸 모두에 대해서 대체적으로 실제보다 느린 감소를 예측하였으며 실제보다 높은 최대 에어로졸농도를 예측하였다. 이것은 흡습성 에어로졸인 경우 수증기 응축에 의한 에어로졸 성장을 계산하는 데 다소 오차가 있음을 의미한다. 반면 비흡습성 에어로졸인 경우 코드 모델은 실제보다 매우 높은 농도 감소를 예측하였다. 이러한 오차의 원인은 Kelvin 효과를 무시한 데서 연유할 수도 있으나 코드 모델상의 근원적인 결함에서 기인할 수도 있다. 흡습성 에어로졸과 비흡습성 에어로졸의 혼합체인 경우 코드 계산결과는 두 에어로졸이 거의 유사하게 감소하는 것으로 예측하였다. 이것은 일반적으로 흡습성 에어로졸이 더 빨리 감소하는 경향과는 배치되는 결과이다.

참고문헌

[1] J. H. Wilson and P. C. Arwood, "Comparison of predictions of aerosol codes with measurements in LWR aerosol containment experiments LACE test LA4", LACR TR-084, ORNL, 1990.

[2] M. Firnhaber, T. F. Kanzleiter, S. Schwartz, and G. Weber, "International Standard Problem ISP37, VANAM M3 - A multicompartment aerosol depletion test with hygroscopic aerosol material", OECD/NEA, NEA/CSNI/R(96)26, 1996.

[3] T. Kanzleiter, "VANAM Multi-component Aerosol Depletion Test M3 with soluble Material", BleV-R6.098-304, Batelle-Institut e.V., Frankfurt am Main, 1993.

[4] G. Poss, D. Weber, "Versuche zum Verhalten von Kernschmelzaerosolenim LWR-Containment", Batelle Abschlubbericht, BF-R-67863, May, 1997.

[5] M. Firnhaber, K. Fischer, B. Fritsche, "Draft Specification of the International Standard Problem ISP No 44", GRS, 1999.

[6] K. K. Murata, et al. "Code manual for CONTAIN 2.0: A computer code for nuclear reactor containment analysis", Sandia National Laboratory NUREG/CR-6533, SAND97-1735, 1997.

[7] 장순흥, 박재우 외 "제 8차 신형원자로연구센터 연구발표회 논문집: 신형원자로의 개념설계 및 안전성 분석 연구", 한국과학기술원 CARR/SDSA-0001, 2000.

표 1 KAEVER 실험별 열수력 초기조건

항 목	K123A	K148A	K188A	K186A
기체온도(°C)	104	92	109.5	97.8
압력(bar)	1.1	1.04	1.09	0.99
상대습도(%)	87	116	93	110
pool 물의 양(kg)	0	290	4.6	67.3
pool 온도(°C)	101	80	101	94.1
대기온도(°C)	23	20	20	22

표 2 KAEVER 실험별 에어로졸 특성치

	K123A	K148A	K188A	K186A
Aerosol Material	CsI	Ag	CsOH	CsOH+Ag
volume median particle diameter(μm)	1.634	0.996	0.37	0.567
number median particle diameter(μm)	0.691	0.516	0.26	0.402
particle size distribution	LN*	LN	LN	LN
geometric standard deviation	1.80	1.4	1.45	1.2
dry density (kg/m^3)	4510	10510	3675	same as
molecular weight (kg/kmol)	260	108	150	K188A &
surface tension (Kelvin effect) (N/m)	none	0.0512	none	K148A
solubility factor	1.7	none	2.0	//
dynamic shape factor	1.0	1.0	1.0	//
agglomeration shape factor	1.0	1.0	1.0	//

* LN = log-normal

표 3 GRS가 제시한 실험용기의 내부 기체의 누출 단면적

실험명	K123A	K148A	K188A	K186A
누출단면적 (m^2)	5.6E-7	2.6E-7	10.2E-7	1.4E-7
손실계수	2.7			

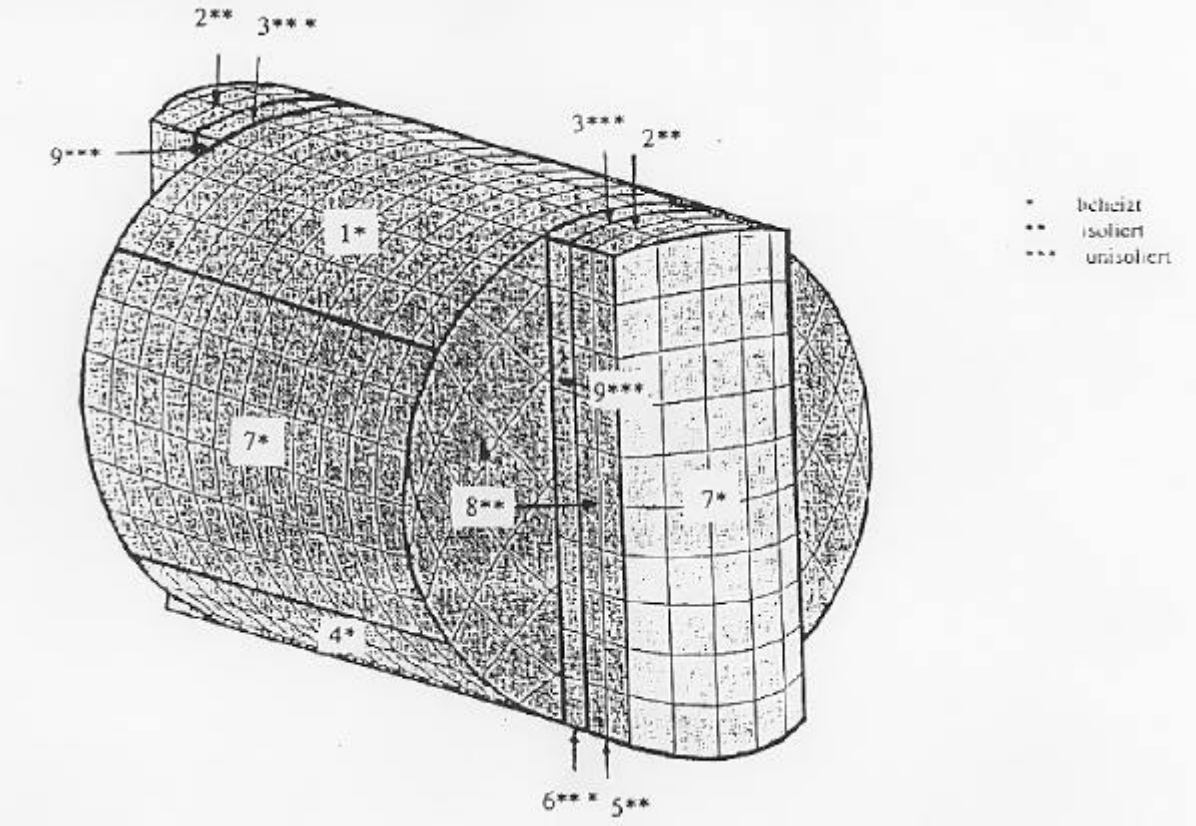

그림 1 KAEVER **실험용기의 외부모양**

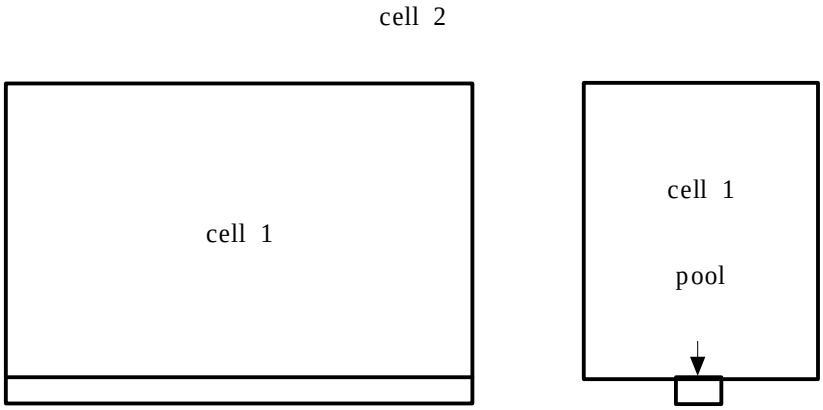

그림 2 **실험용기의** Nodalization

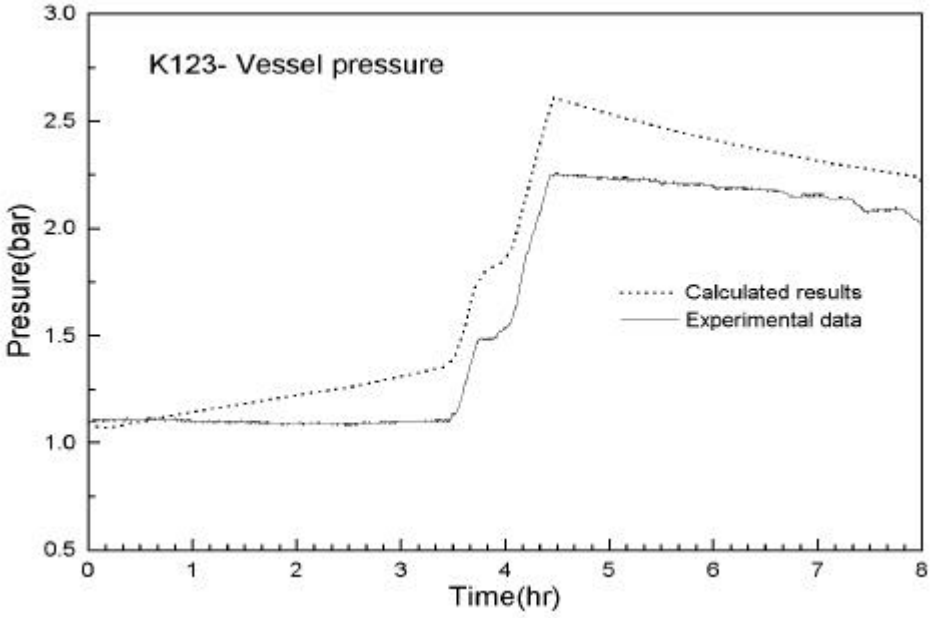

그림 3 K123A CsI 에어로졸 실험의 용기내부 압력계산 결과

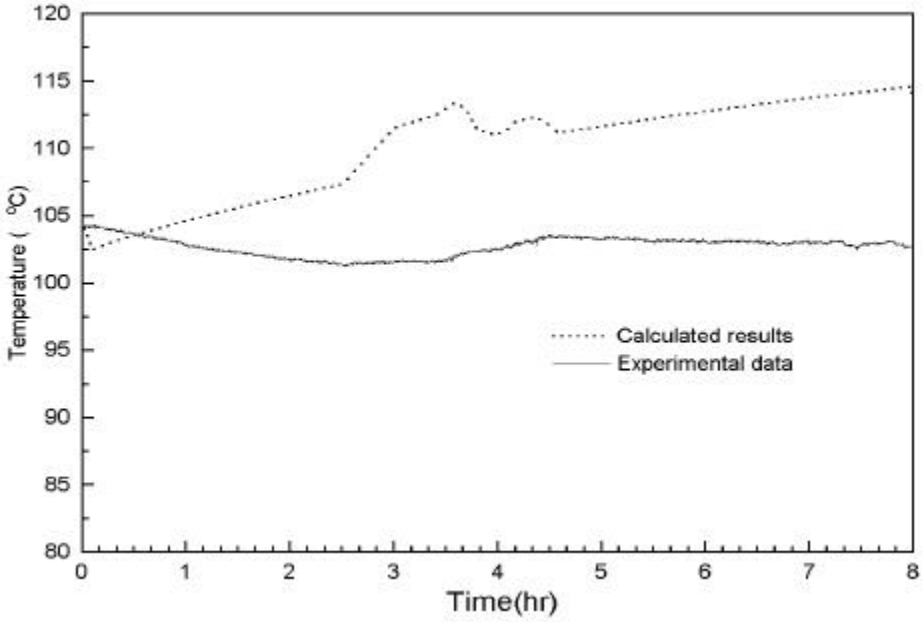

그림 4 K123A CsI 에어로졸 실험의 용기 중심 온도계산 결과

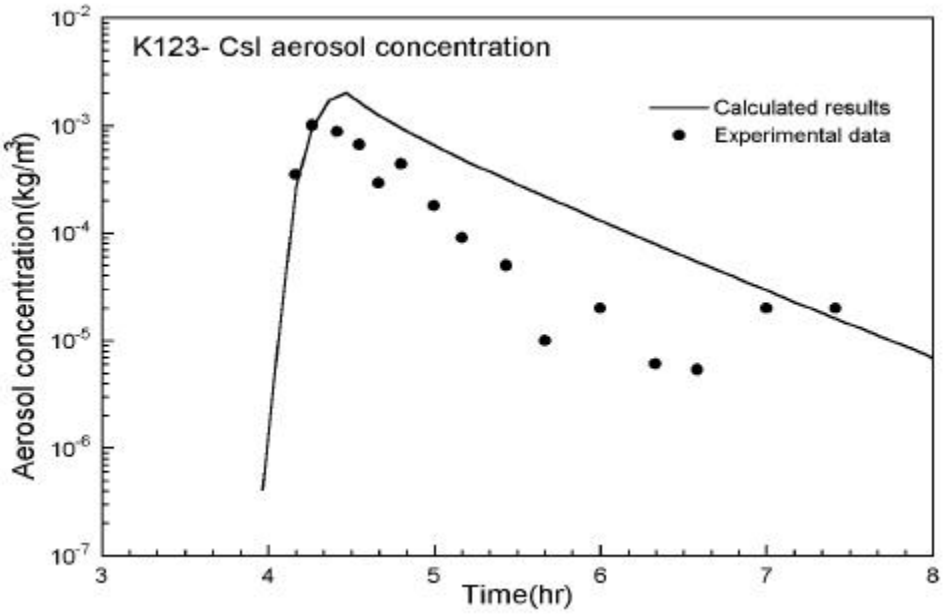

그림 5 K123A CsI 에어로졸 실험의 에어로졸 농도 계산 결과

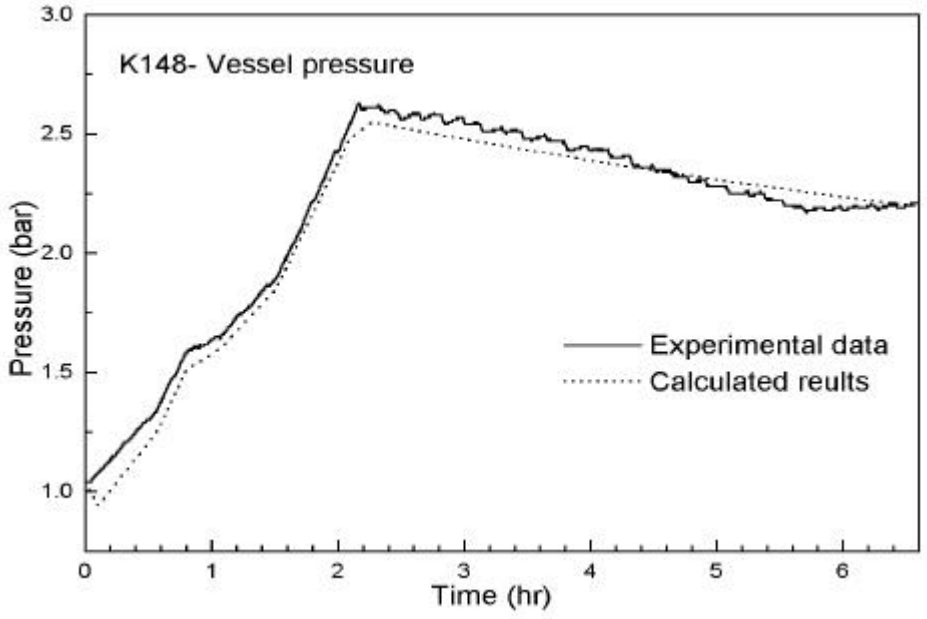

그림 6 K148A Ag 에어로졸 실험의 용기내부 압력계산 결과

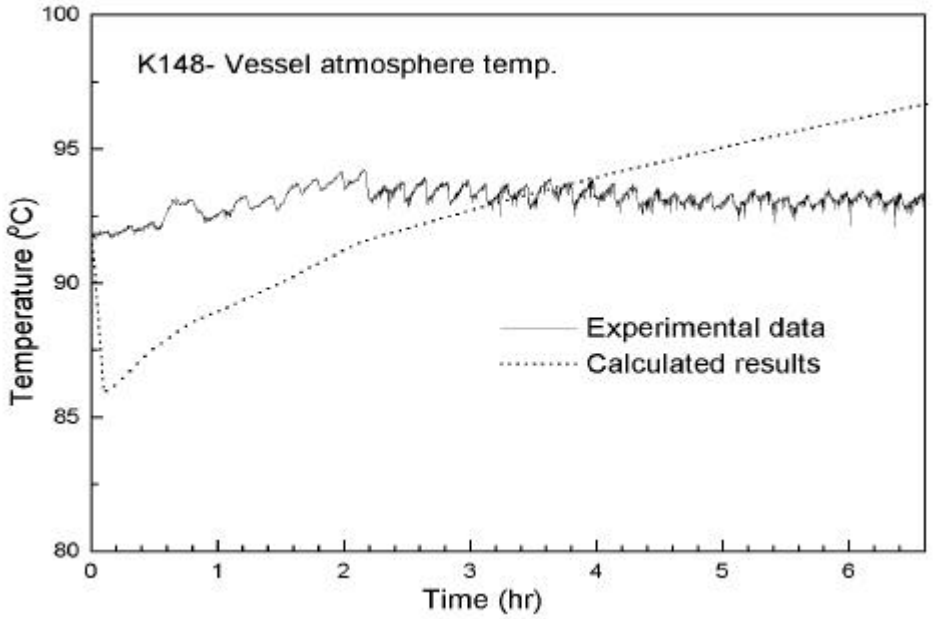

그림 7 K148A Ag 에어로졸 실험의 용기내부 온도계산 결과

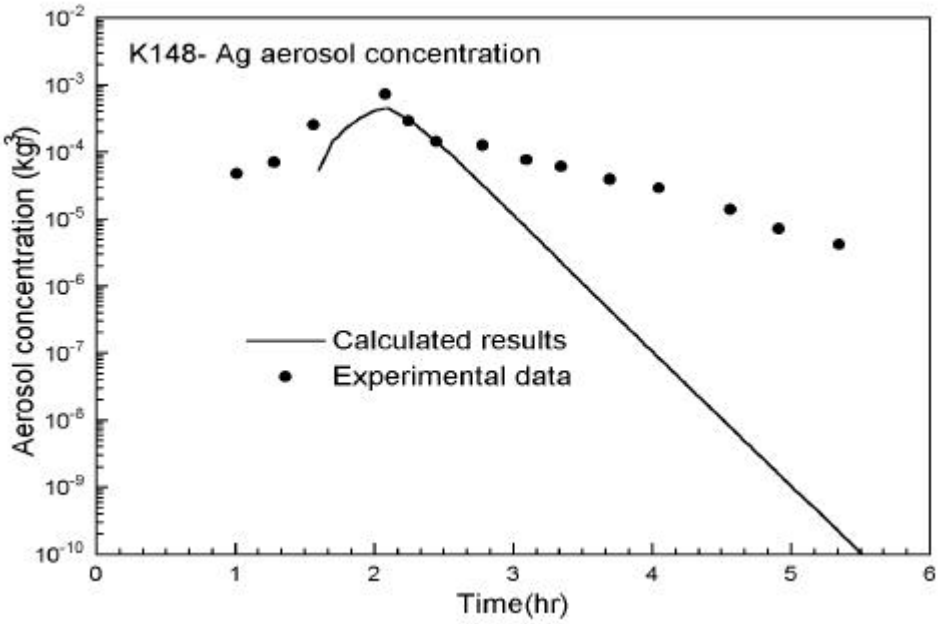

그림 8 K148A Ag 에어로졸 실험의 용기내부 에어로졸 농도 계산 결과

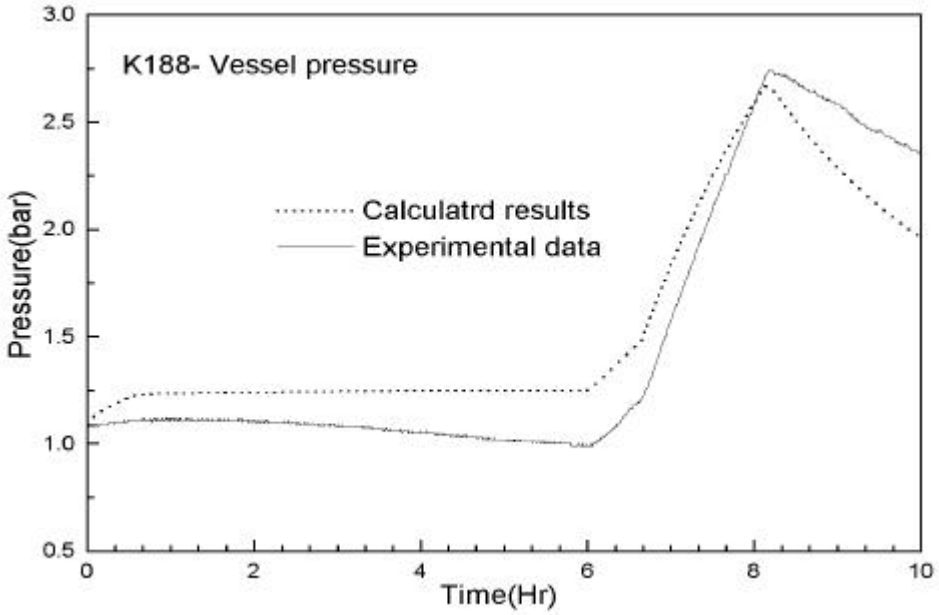

그림 9 K188A CsOH 에어로졸 실험의 용기내부 압력 계산 결과

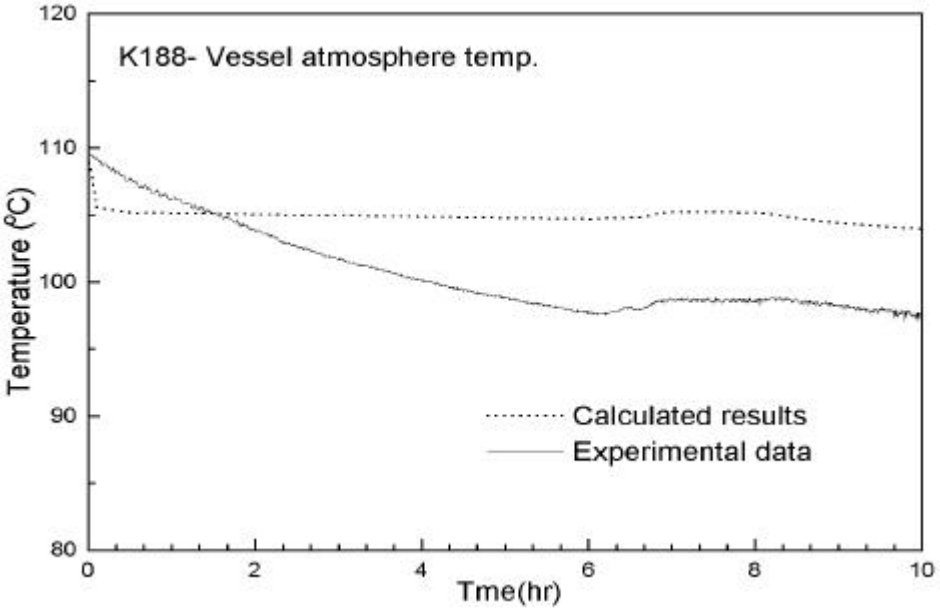

그림 10 K188A CsOH 에어로졸 실험의 용기내부 온도 계산 결과

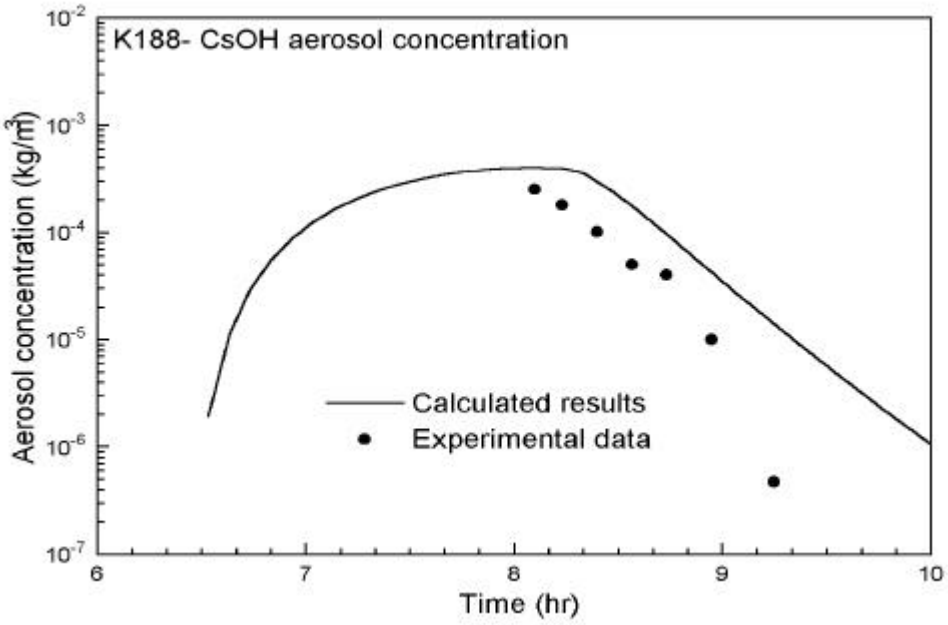

그림 11 K188A CsOH 에어로졸 실험의 에어로졸 농도 계산 결과

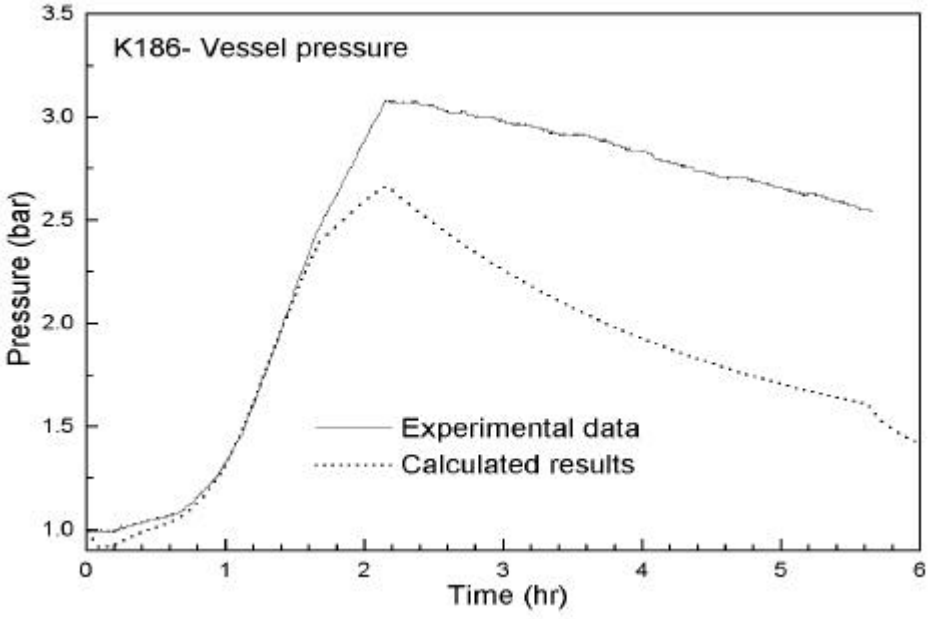

그림 12 K186A CsOH+Ag 혼합 에어로졸 실험의 용기 압력 계산 결과

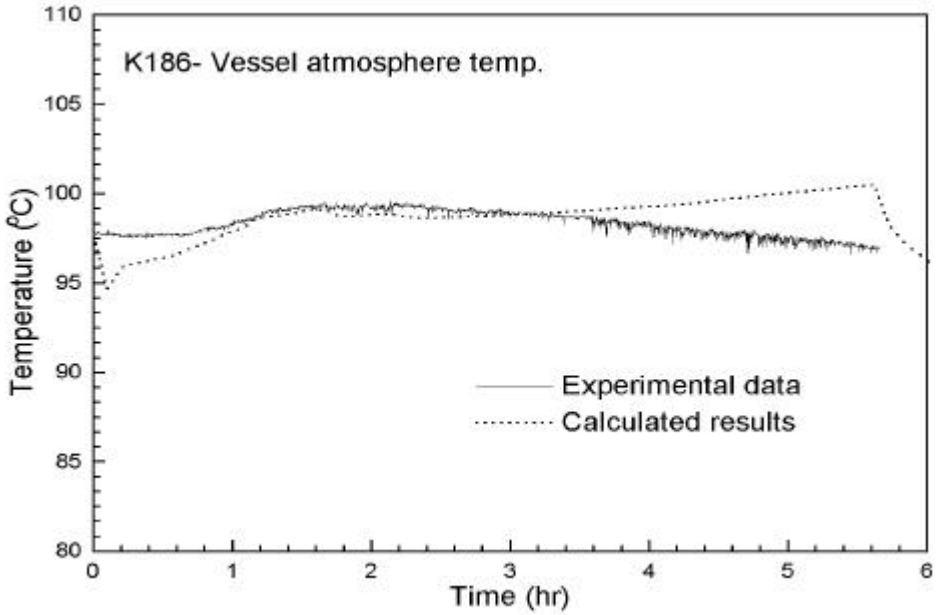

그림 13 K186A CsOH+Ag 혼합 에어로졸 실험의 용기 온도 계산 결과

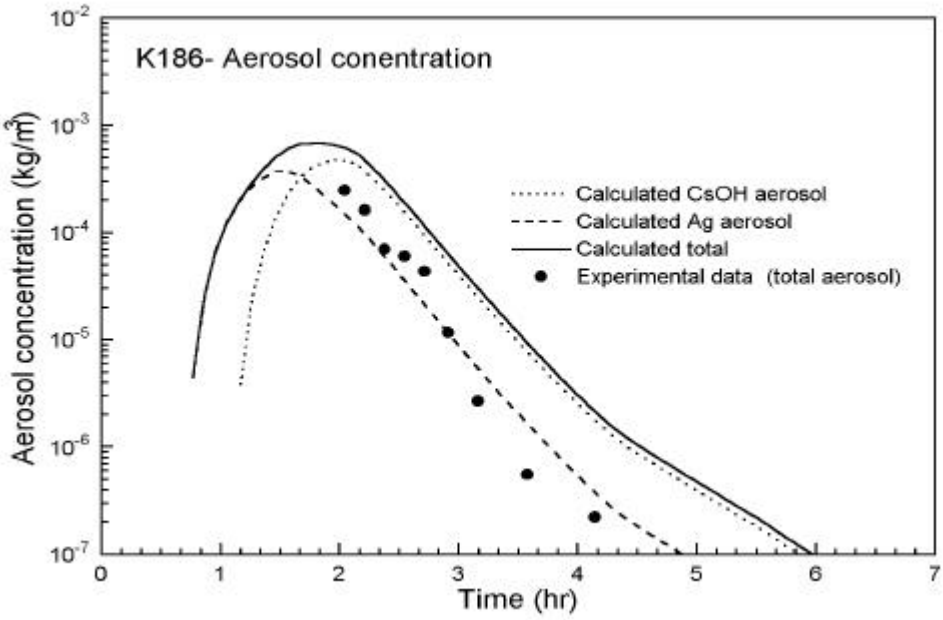

그림 14 K186A CsOH+Ag 혼합 에어로졸 실험의 에어로졸 농도 계산 결과