

## 다중 Port로 연결된 다중 격실 Vent 해석 기법 개발

옥호남\* · 김인선\*\*

### Development of a Vent Analysis Method for Multiple Compartments Connected Through Multiple Ports

Honam Ok\* Insun Kim\*\*

**Keywords :** Vent Analysis(환기 해석), Multi Port(다중 포트), Multi Compartment(다중 격실), Analysis Method(해석 기법), Launch Vehicle(발사체), Payload Fairing(탑재물 페어링, PLF), Energy Equation(에너지 방정식)

#### Abstract

An analysis method is developed for the prediction of venting in multiple compartments which are connected in series or parallel through multiple ports. The existing method by the authors is modified to remove the limitation in number of ports and compartments, and the more general polytropic relation or solution of the additional energy equation replaces the previous isentropic relation allowing the prediction of pressure rise in addition to pressure drop. The accuracy of the method is verified by comparison with the results by NASA Flap code for the problem of pressure drop in a payload in the Space Shuttle cargo bay. It is expected that this method will be a useful tool in prediction of the pressure variation in a payload or payload capsule without mentioning the payload fairing itself.

#### 1. 서론

발사체의 고도가 높아짐에 따라 지상 대기압을 유지하는 격실(Compartment) 내부의 공기와 외부 대기압과의 압력차는 점점 더 커지게 되고, 이로 인해 격실 벽은 구조 하중을 받게 된다. 이러한 구조 하중 및 부수적인 문제점들을 방지하기 위해서는 격실에 적절한 환기(Vent)가 이루어지도록 하는 것이 일반적인 발사체 설계 기법이며 [1], 격실의 종류에 따라 특별한 압력 요구 조건이 없는 경우에는 단순한 사각형, 혹은 원이나 타원형의 구멍(Vent Hole)을 뚫어 주는 것만으로도 충분하다. Vent Hole 설계에 있어서 중요한 3가지 요소는 Vent Hole의 크기, 종류 및 위치이며 [2], 이 세 가지 요소가 결정되고 발사체의 비행 궤적 및 공력 조건이 주어지면 격실의 압력 변화 예측이 가능해진다. 예상되는 다양한 조건에 대하여 격실 내부의 압력 변화를 예측하여 격실 내부 압력의 범위를 설정하여야 하며, 따라서 압력 예측 기법은 정확도뿐만 아니라 계산의 효율성 역시 요구된다. Vent Hole을 통한 격실 내부의 압력 변화를 예측하는 기법들은 이러한 요구 조건을 만족하기 위해 대부분 준 1차원 등엔트로피 관계식(Isentropic Relation)을 이용한다. 참고문헌 [2,3]에서도 발사체 PLF 내부의 압력 하강을 예측하기 위해 이와 같은 해석 방법을 사용하였으며, 한 개의 격실에 1개의 Vent Hole이 있는 경우에 대한 해석이 가능하다. 발사체 PLF에는 보통 여러 개의 Vent Valve가 장착되어 있고, 또한 단연결부(Interstage)와의 공기

흐름이 가능한 틈새 등도 있으므로 이 기법을 그대로 적용하기에는 한계가 있다. 그러나 발사체의 받음각이 매우 작고 PLF의 형상이 대칭에 가까우며, 또한 틈새의 크기가 작은 경우에는 이러한 기법의 적용이 가능하다. 받음각이 있는 경우에 대해서는 압력이 가장 높은 곳과 낮은 곳에 있는 것이 전체를 대표한다고 보고, 압력 변화의 상한과 하한을 설정할 수 있다. 이와 같은 방법으로 발사체 PLF 내부의 압력 변화를 상당한 정확도로 예측할 수 있었으며, 여러 가지 조건에 대하여 효율적인 예측이 가능하였다. 하지만 예측 압력의 범위를 더욱 좁혀 나가고, 다양한 문제에 대한 해석을 위해서는 예측 기법의 정확도 향상 및 적용 범위의 확대가 필요하다.

본 연구에서는 참고문헌 [2,3] 등에서 이미 개발하였던 한 개의 격실에 1개의 Vent Hole이 있는 경우에만 적용 가능한 압력 하강 예측 기법을, 여러 개의 격실이 직렬 혹은 병렬로 여러 개의 Vent Port를 통해 연결되어 있는 문제에도 적용 가능하도록 확장하였다. 또한 이전에는 압력 하강만이 예측 가능하였으나, 여기서는 그런 제한이 없이 Vent Port 좌우의 압력에 따라 압력 상승 및 하강이 모두 가능하도록 하였다. 그리고 기존 기법에서 등엔트로피 관계식을 사용함으로써 온도 예측의 엄밀성이 떨어지는 부분을 보완하였으며, 특히 에너지 방정식의 해석을 추가함으로써 격실 벽을 통한 열전달이나 내부의 발열이 있는 문제에도 적용할 수 있게 하였다. 이렇게 개발된 기법의 정확도를 문헌에 다른 기법에 의한 해가 주어지지 않는 문제에 대하여 적용함으로써 확인할 수 있었다.

#### 2. 격실 압력 변화 예측 기법

Vent에 의한 격실 내부 압력 변화 예측 기법은 대부분 다음

\* 한국항공우주연구원, honam@kari.re.kr

\*\* 한국항공우주연구원, iskim@kari.re.kr

의 2단계 해석 과정을 거친다. 먼저 Vent Port 좌우에 압력차가 존재하는 경우, 이 Vent Port를 통한 질량 유량( $\dot{m}_i$ )을 예측한다. 질량 유량은 준 1차원 등엔트로피 관계식(Isentropic Relation)을 사용하여 구하며, 여기에는 Port 좌우의 압력차에 의한 유동 현상이 좌우 격실 내부의 압력 평형에 비해 한 오더(Order) 빠른 속도로 일어난다는 가정이 깔려 있다. 격실 내부의 열역학적 상태에 대한 미지항이 압력(p), 온도(T), 밀도( $\rho$ )의 3개이고 상태 방정식이 주어져 있으므로 이제 1개의 추가적인 방정식이나 가정이 필요하다. 이 두 번째 단계는 Polytropic 변화를 가정해 주거나 아니면 에너지 방정식을 해석하는 두 가지 기법으로 나뉘게 된다. 본 연구에서는 이 두 가지 기법 모두를 사용하고 있으며, 동일한 조건(등온 혹은 단열)에 대해서는 그 결과가 같음을 보여주고 있다. 계산의 효율성 및 해석의 유용성 등을 위해 비압축성 관계식을 사용하여 닫혀진 형태의 해(Close-Form Solution)를 최근까지도 사용하고 있으나 [3,4], 압축성 기법도 컴퓨터의 성능 향상 및 계산 기법의 효율성 증대 등으로 인하여 매우 효율적인 계산이 가능하므로 비압축성 기법은 더 이상 고려하지 않았다.

여러 개의 격실이 여러 개의 Vent Port로 연결되어 있으므로 어떤 구조로 해석 프로그램을 구성할 것인가 하는 점을 충분히 고려해야 하며, 여기서는 비정렬 격자 전산유동해석(CFD) 기법을 참고하여 Vent Port를 격자면(Face)으로, 격실을 격자(Cell)로 간주하였다. Vent Port i의 좌우에 있는 격실을 각각 jl 및 jr로 표시하고, jl의 압력이 jr보다 높거나 같다고 가정하면 i를 통한 질량 유량은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{m}_i = A_i K_i \sqrt{2p_{jl}\rho_{jl}} \left(\frac{p_{jr}}{p_{jl}}\right)^{1/\gamma} \times \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1} \left\{1 - \left(\frac{p_{jr}}{p_{jl}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right\}} \quad (1)$$

$$\text{if } \frac{p_{jr}}{p_{jl}} \geq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\dot{m}_i = AK\sqrt{2p_{jl}\rho_{jl}} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \quad (2)$$

$$\text{if } \frac{p_{jr}}{p_{jl}} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

위 식에서  $A_i$ 는 Vent Port의 면적,  $K_i$ 는 방출 계수(Discharge Coefficient),  $\gamma$ 는 등엔트로피 계수(Isentropic Coefficient)이다. 이 관계식들은 대부분의 압축성 유체역학 교과서에서 찾아 볼 수 있으며, Vent 해석과 관련해서는 참고문헌 [3]에 그 과정이 자세히 기술되어 있다. 격실 jr의 압력이 더 높을 경우에는 위 식들에서 jr과 jl을 바꾸면 되고, 모든 Vent Port에 대하여 질량 유량을 구한 후 이를 jr과 jl 전체의 질량 유량에 더하거나 빼 주면 된다. 이 과정은 마치 CFD 기법에서 격자면에서의 Flux를 구한 후 이를 각 격자로 배분하는 것과 동일하며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_j = \sum_i \dot{m}_i \quad (3)$$

격실 j 내부의 밀도 변화는 Vent Port를 통해 배출된 질량에 의한 것이므로 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{d\rho_j}{dt} V_j = -\dot{m}_j \quad (4)$$

위 식에서  $V_j$ 는 격실 j의 체적이며, 이 식의 우변을 차분화하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\rho_{j,t+\Delta t} - \rho_{j,t}}{\Delta t} = -\frac{\dot{m}_j}{V_j}$$

$$\rho_{j,t+\Delta t} = \rho_{j,t} \left(1 - \frac{\Delta t}{\rho_{j,t} V_j} \dot{m}_j\right) \quad (5)$$

이로써 격실 내부의 압력 변화 예측을 위한 첫 단계는 얻어졌으며, 다음에는 Polytropic 변화를 가정한 경우와 에너지 방정식을 해석하는 각각의 경우에 대하여 기술하고자 한다.

## 2.1 Polytropic 변화

식 (5)에서 시간 t에서  $t + \Delta t$ 로의 격실 내 열역학적 물성치의 변화가 Polytropic 과정을 통하여 일어난다고 가정하면 밀도의 변화를 다음과 같이 압력의 변화로 표시할 수 있다.

$$p_{j,t+\Delta t} = p_{j,t} \left(1 - \frac{\Delta t}{\rho_{j,t} V_j} \dot{m}_j\right)^n \quad (6)$$

이 식에서 n은 Polytropic 계수를 나타내며, 그 값이 1인 경우 등은 변화를,  $\gamma$ 인 경우는 등엔트로피 변화를 의미한다.

이전에는 이러한 Polytropic 계수의 도입 없이 등엔트로피 변화로 일단 가정하였으며 [3], 이 후 등온 과정인 경우 온도를 주어진 값으로 설정하여 이에 필요한 에너지의 양을 산출해 내었다. 그 방법도 계산 시간 간격이 작아 충분한 정확도를 나타내었으나 본 방법이 좀 더 물리적으로 엄밀한 접근 방법으로 볼 수 있어 이를 채택하였다.

시간 t에서의 상태를 이용하면 식 (1)과 (2), 그리고 식 (3)으로부터 모든 격실에 대하여 질량 유량을 얻을 수 있으며, 이를 식 (6)에 대입하면 쉽게 시간  $t + \Delta t$ 에서의 압력을 얻을 수 있다. 이 압력과 상태 방정식, 그리고 Polotropic 관계식을 이용하면 밀도 및 온도가 구해진다. 이와 같이 반복 계산이 없는 경우가 양의 적분법이 되며, 시간 간격  $\Delta t$ 를 아주 작게 할 경우 안정적인(Stable) 해를 얻을 수 있다.  $\dot{m}_j$ 의 계산에 있어서 단순히 시간 t에서의 값이 아닌  $t + \Delta t$ 에서 구한 값을 함께 사용하게 되면 이는 음의 적분법이 되며, 시간 적분의 정확도 역시 2차로 높일 수 있다. 예를 들어 식 (1)과 (2)에 사용되는 압력을 다음 식과 같이 기호 위 막대(Over Bar)로 나타낸 값을 사용할 수 있다.

$$\bar{p}_j = \theta p_{j,t+\Delta t} + (1-\theta)p_{j,t} \quad (7)$$

이 식에서  $\theta$ 의 값이 0이면 양의 적분법, 1이면 1차 정확도의 음의 적분법, 0.5이면 2차 정확도의 음의 적분법이 된다. 압력 및 온도에 대해서도 동일한 관계식을 이용할 수 있으며,  $p_{j,t+\Delta t}$ 가 계산으로 구해져야 하는 값이므로 반복 계산을 수행해야 한다. 이러한 반복 계산 기법으로 Newton 기법이 가장 효율적이거나, 이 정도의 방정식은 현재의 개인용 컴퓨터로도 단시간에 해를 구할 수가 있으므로 단순히  $p_{j,t+\Delta t}$ 의 변화가 기준치 이하가 될 때 까지 식 (6)을 반복하여 풀었다. 대부분의 경우  $p_{j,t+\Delta t}$ 의 변화량이  $10^{-11}$  이하로 떨어지기까지 10번 이내의 반복 계산이면 충분한 것으로 나타났다.

## 2.2 에너지 방정식 해석 기법

Vent Port i를 통한 좌측 격실에서 우측 격실로의 Energy Flux는  $\dot{m}_i h_{oi}$ 로 주어지며, 만약 우측 격실의 압력이 더 높을 경우는 앞에서의 질량 유량에서와 같이 모든 계산식에서 jr과 jl을

서로 바꾸어 계산하면 된다. 여기서 총 에너지(Total Energy)  $h_{oi}$  는 Vent Port에서의 값을 사용해야 하나, 앞에서 식 (1) 및 (2)를 구하기 위한 과정에서와 같이 등엔트로피 가정을 사용하여 격실 내부의 총 에너지는 유선을 따라 일정하다고 볼 수 있다. 또한 격실 내부에서는 평균적으로 유속 자체의 값이 매우 작으므로 무시할 수 있으며, 따라서  $h_{oi}$  는  $h_{jl}$  로 대체된다. 즉 Vent Port i 를 통한 Energy Flux는  $\dot{m}_i h_{jl}$  로 나타낼 수 있으며, 우측 격실의 압력이 높으면  $j$ 이 아닌  $jr$ 이 되어야 한다. 이제 식 (4)에서와 같이 격실 내부의 에너지 변화를 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dE_i}{dt} = - \sum_i \dot{m}_i h_{jl} + A_{wj} H_{wj} (T_{Rj} - T_{wj})$$

위 식에서 E는 총 내부 에너지(Total Internal Energy),  $A_{wj}$ 는 격실 j의 표면적,  $H_{wj}$ 는 이 벽면에서의 열전달 계수,  $T_{Rj}$ 는 이 벽면에서의 회복 온도(Recovery Temperature),  $T_{wj}$ 는 벽면의 온도를 의미한다. 앞에서와 같이 격실 내부에서의 유동 속도는 매우 작으므로 총 내부 에너지는 내부 에너지로 대체하고 회복 온도 역시 온도로 표시할 수 있으며, 비열(Specific Heat)을 이용하여 에너지 및 엔탈피를 나타내면 위 식은 다음과 같이 된다.

$$c_v \frac{d}{dt} (V_j \rho_j T_j) = - \sum_i \dot{m}_i c_p T_{jl} + A_{wj} H_{wj} (T_j - T_{wj}) \quad (8)$$

만약 격실 내부에서의 발열이 있는 경우 식 (8)의 우변에 단순히 그 값을 더해 주지만 하면 되므로 따로 나타내지는 않았다. 이 식에서  $H_{wj}$ 의 값을 0으로 할 경우 단일 조건이 되어 앞에서 구한 등엔트로피 가정과 같은 결과를 나타내야 하며, 그 값이 무한대인 경우 격실 내부 온도가 벽면 온도와 항상 같게 나타나게 된다. 만약 벽면 온도가 격실 초기 온도와 동일하고, 이 값 역시 시간에 따라 변하지 않는 것으로 가정한다면 앞에서 나타낸 n의 값이 1인 경우와 동일한 결과가 얻어질 것이다. 그러나 이 방법은 벽면 온도의 시간에 따른 변화를 나타낼 수 있으므로 앞의 Polytropic 관계식에 비하여 좀 더 넓은 범위의 문제에 적용될 수 있음을 알 수 있다.

식 (5) 및 식 (8), 그리고 상태 방정식을 이용하면 3개의 미지수를 구할 수 있는 3개의 방정식이 주어진 셈이며, 이의 해석 과정은 다음과 같이 요약된다. 먼저 모든 Vent Port에 대하여 이를 통한 질량 유량 및 Energy Flux를 구하고, 좌우 격실의 압력에 따라 그 값을 더하거나 빼 줌으로써 각 격실에서의 질량 유량 및 Energy Flux를 구한다. 이때 계산에 필요한 물리량은 식 (7)에서 나타낸 것과 같이 반복 계산 과정에서 얻어진 값 및 시간 t에서의 값을 사용하여 얻는다. 다음으로 식 (5)를 이용하여 밀도의 값을 구하고, 식 (8)에서는 온도의 값을 얻을 수 있다. 상태 방정식을 이용하면 압력이 얻어지며, 이로써 한번의 반복 계산이 이루어진 셈이다. 식 (5)와 (8)을 엮어서(Coupling) 한꺼번에 해석하는 기법이 더 효율적이긴 하나, 이렇게 분리하여(Decoupling) 순차적으로 해석하여도 충분히 효율적인 계산 결과를 얻을 수 있어 이를 선택하였다. 또한 이 방법은 에너지 방정식의 형태를 손쉽게 달리 할 수 있으므로 앞으로의 프로그램 수정의 편의성을 제공한다는 장점도 가지고 있다.

### 3. 계산 결과

개발된 해석 기법의 정확도를 검증하기 위해 참고문헌 [5]에 나타난 Space Shuttle의 Cargo Bay 내부에 있는 탑재물의 배기

문제를 해석하고 그 결과를 비교하였다. Space Shuttle의 상승에 따른 Cargo Bay 내부의 압력 하강이 주어질 경우, 체적이 500 in<sup>3</sup>이고 직경 0.05 in의 Vent Hole이 뚫린 탑재물 내부의 압력 변화를 예측하는 것이 그 목적이며, 참고문헌 [5]에서는 FLAP이라는 NASA의 Vent 해석 전용 코드를 이용하여 얻은 결과가 주어졌다. 본 연구의 주된 목적이 기존에 개발하였던 단일 격실 단일 Vent Port를 대상으로 한 해석 프로그램을 다중 격실 다중 Vent Port의 경우까지로 확장하는 것이므로 이를 먼저 검증해야 한다. 그런데 이러한 경우에 대한 이론이나 기존 계산 결과를 찾기가 어려워, 우선 앞에서 말한 문제를 다중 격자 다중 Port의 경우로 확장해서 해석해 보았다. 이를 위해 하나의 격실을 체적이 다른 여러 개의 격실로 분할하였으며, 각 격실들이 서로 연결되어 있는 형상으로 나타내었다. 또한 Vent Hole도 체적에 대한 비가 일정하도록 각 격실로 할당하였다. 이렇게 인위적으로 만들어진 형상에 대하여 Vent 해석을 수행하였으며, 그 결과는 지면 관계상 여기에 따로 나타내지는 않았으나 모든 격실이 일정한 압력을 나타내고 격실 간에는 유동의 흐름이 없는 것으로 나타났다. 격실 사이에 유동이 있는 경우에 대한 검증은 기존 문헌에 비교 대상을 찾기가 어려우며 앞으로 전산유동해석 결과와의 비교를 통해 좀 더 많은 검증을 수행할 예정이다.

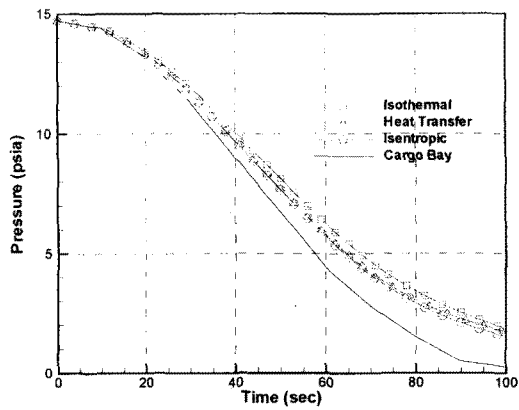
그림 1과 2에는 본 연구에서 개발된 해석 기법(M2Vent)과 NASA Flap Code에 의한 결과를 각각 나타내었다. 시간에 따른 탑재물 내부의 압력, 압력 하강률, 질량 유량, 그리고 온도의 변화를 비교하였으며, 두 해석 기법의 결과가 거의 동일함을 알 수 있다. 이외에도 Polytropic 관계식을 이용한 결과와 동일한 조건에 대한 에너지 방정식 해석 기법의 결과를 비교하였으며, 두 기법이 같은 조건에 대해서는 완전히 동일한 것으로 나타났다.

### 4. 결론

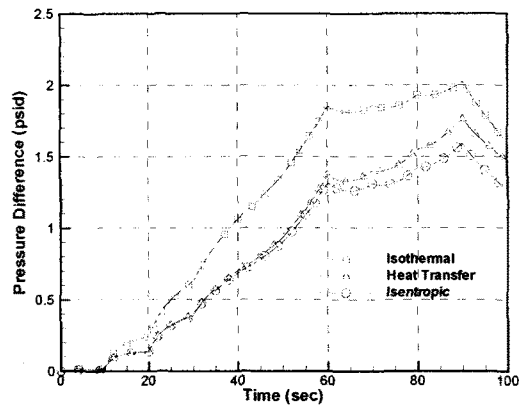
여러 개의 격실(Compartment)이 직렬 혹은 병렬로 여러 개의 Vent Port를 통해 연결되어 있는 경우의 격실 내 압력 변화를 예측할 수 있는 해석 기법(M2Vent)을 개발하였다. 해석 기법 자체에 있어서도 기존의 등엔트로피 관계식 보다 적용 범위가 넓은 Polytropic 관계식 혹은 추가적인 에너지 방정식의 해법을 도입하였으며, 압력 하강 뿐 아니라 압력 상승의 경우도 해석할 수 있도록 하였다. 개발된 기법의 검증을 위해 Space Shuttle Cargo Bay에 탑재된 탑재물 내부의 압력 변화를 예측하여 이를 NASA Flap Code 결과와 비교하여 그 정확도를 확인하였다. 이렇게 개발된 기법은 단순히 발사체 PLF 내부의 압력 하강 외에도, PLF에 탑재되어 있는 탑재체나 탑재체 캡슐 내부 압력 변화의 예측 등에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

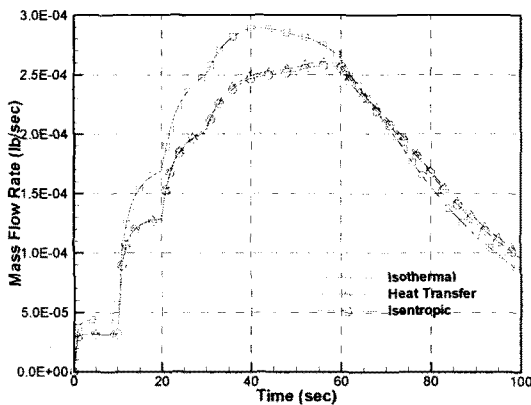
- [1] "Compartment Venting," NASA SP-8060, NASA Space Vehicle Design Criteria (Structures), NASA, Nov. 1970.
- [2] 옥호남, 김인선, 라승호, 오범석, "발사체 노즈 페어링 벤트 홀 설계," 제 5회 우주발사체기술 심포지움, 2004.
- [3] 옥호남, 김인선, 라승호, 오범석, "벤트 홀을 통한 격실 내부 압력 하강 예측 기법 연구," 제 3회 유체공학회, 2004.
- [4] Sanz-Andres, A., Santiago-Prowald, J., and Ayuso-Barea, A., "Spacecraft Launch Depression Loads," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 34, No. 6, 1997, pp. 805-810.
- [5] Owen, W., "Thermal Analysis Handbook," NASA TM-103568, January 1992.



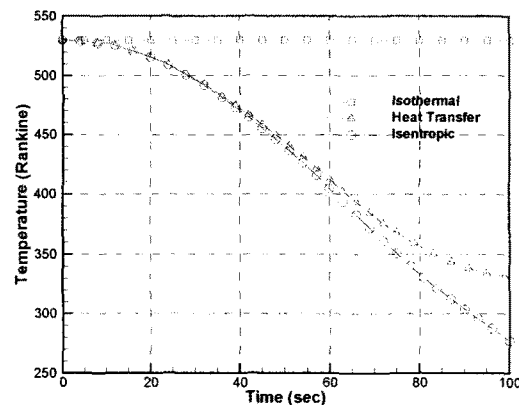
(a) Pressure Drop History



(b) Pressure Difference History

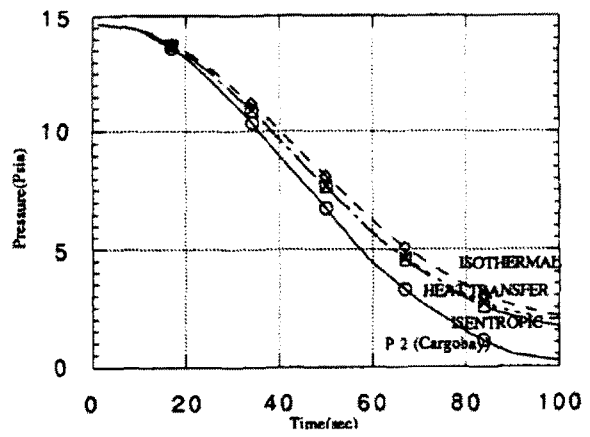


(c) Mass Flow Rate History

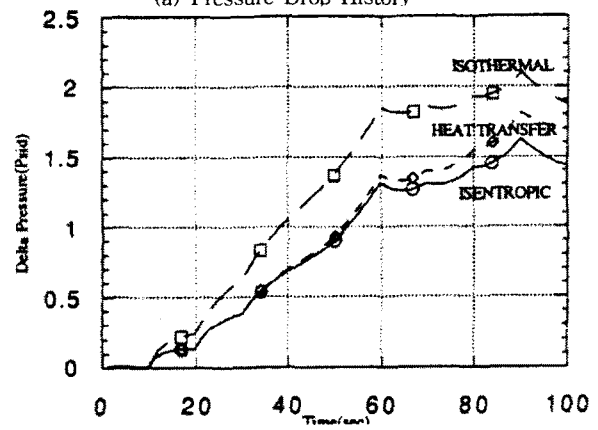


(d) Temperature History

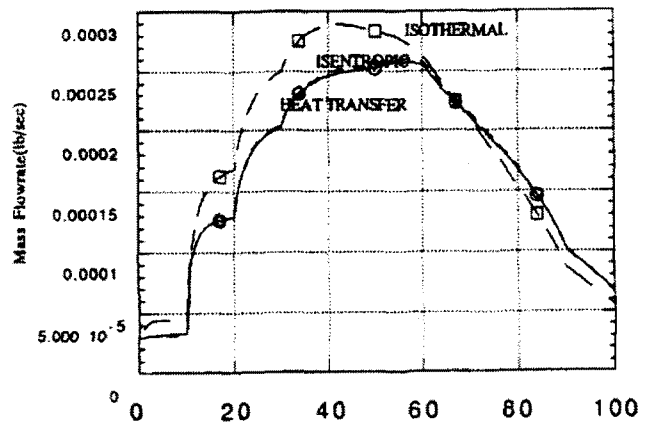
Fig. 1 Vent Analysis Result Using M2Vent



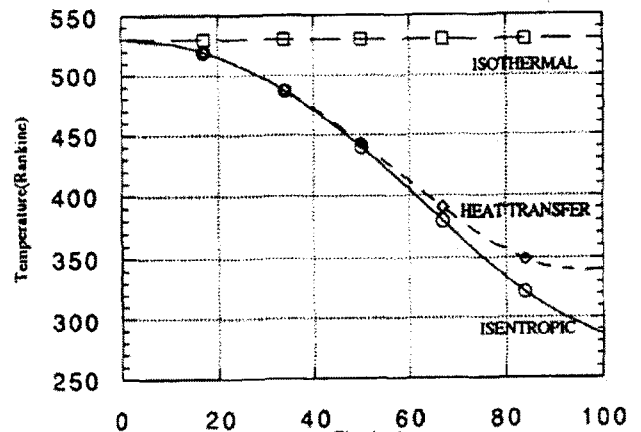
(a) Pressure Drop History



(b) Pressure Difference History



(c) Mass Flow Rate History



(d) Temperature History

Fig. 2 Vent Analysis Result by NASA Flap Code