

벤트 홀을 통한 격실 내부 압력 하강 시험 결과 분석

옥호남*, 라승호**, 최상호***, 김인선****

Analysis of the Measurements of Pressure Drop In a Compartment Through Vent Holes

Ho-Nam Ok*, Seung-Ho Ra**, Sang-Ho Choi***, In-Sun Kim****

Abstract

A test was performed to collect the data to validate an analytic method for vent hole sizing on the nose fairing of a launch vehicle. The bake-out chamber at KARI was used to simulate the ambient pressure drop, and pressure difference data were collected for a model with various kinds of vent holes which was installed in the chamber. The characteristics of the test facility and measurement equipments were evaluated for the measurement of the transient behaviors. The measured data were processed in consideration of the characteristics of the facility and equipments, and the effects of vent hole size and configuration on the pressure variation in the model were analyzed based on the data.

초 록

발사체의 노즈 페어링 벤트 홀 크기 결정 기법의 정확도를 검증하기 위한 시험을 수행하였다. 한국항공우주연구원 우주비행시험그룹이 보유한 열진공 챔버(Bake-Out Chamber)를 이용하여 챔버 내부 압력을 대기압에서 진공으로 떨어뜨렸으며, 그 속에 다양한 벤트 홀이 설치된 모델을 넣고 모델 내외부의 압력 및 온도 변화를 측정하였다. 시험 과정에서 나타난 시험 설비 및 측정 장비의 특성을 검토하고 이들이 얻어진 시험 데이터의 정확도 및 신뢰도에 미치는 영향을 분석하였다. 설비 및 측정 장비의 한계 내에서 최대한의 정확도를 얻을 수 있도록 데이터를 처리하였으며, 이렇게 얻어진 시험 결과로부터 벤트 홀 면적 및 배치에 따르는 영향을 분석하였다.

키워드 : 벤트 홀(vent hole), 압력 하강(pressure drop), 발사체(launch vehicle), 격실(compartment), 해석적 기법(analytic method), 검증(validation), 측정(measurement), 압력차(pressure difference), 벤트 면적(vent area), 크기 결정(sizing)

* 열공력그룹/honam@kari.re.kr

** 열공력그룹/ra@kari.re.kr

*** 열공력그룹/sahchoi@kari.re.kr

**** 열공력그룹/iskim@kari.re.kr

1. 서 론

발사체에는 외부 대기와의 유동이 차단되어 있는 격실이 존재하며, 적절한 환기를 통해 외부와의 압력 차이를 완화시켜주지 않으면 여러 가지 구조적 문제점이 발생할 수 있음이 잘 알려져 있다 [1]. 압력 차이를 완화시켜 주기 위한 대표적인 방법이 적절한 크기의 벤트 홀(Vent Hole)을 적절한 위치에 설치하는 것이며, 격실 내의 압력 하강 요구 조건에 맞추어 벤트 홀의 크기를 결정하기 위한 해석적 기법이 개발되어 있다. 참고문헌 [2]에는 KSLV-1 노즈 페어링(Nose Fairing) 벤트 홀 설계에 필요한 해석적 기법의 개발 과정 및 축대칭 전산유체역학(CFD) 기법에 의한 검증 결과 등이 자세히 기술되어 있으며, 발사체 선진국에서도 유사한 기법을 사용하고 있는 것으로 보인다 [3]. 그러나 이렇게 개발된 기법이 아직까지 최소한 지상 시험을 통해서도 검증된 바 없으며, 따라서 이러한 기법을 이용하여 결정한 벤트 홀의 크기가 어느 정도 신뢰도를 가지는지 확인할 필요가 있다. 본 시험은 이러한 벤트 홀 크기 결정 기법의 정확도를 검증하기 위한 것으로, 대기압에서 진공으로 압력을 떨어뜨릴 수 있는 챔버(Chamber)에 밀폐된 용기를 넣고 용기 벽면에 설치된 다양한 벤트 홀을 통한 용기 내부의 압력 하강을 측정하는 것이다. 실제 발사체의 노즈 페어링 및 벤트 밸브(Vent Valve)와 유사한 구조에 발사체의 상승에 따른 대기 압력 하강 조건을 그대로 모사할 수 있으면 가장 좋으나, 한편으로는 복잡한 문제를 단순화 시켜 여러 설계 변수들의 영향을 정확히 파악할 수 있도록 하는 것이 벤트 홀 크기 결정 기법의 정확도 및 한계를 파악하는데 더 적합할 것으로 보인다. 본 시험은 이러한 목적에 맞도록 단순화된 밀폐 용기 및 벤트 홀 형상을 만들고 벤트 홀 크기와 배치를 변화시켜가며 시험을 수행하였다. 여기서는 시험 설비 및 시험 모델, 그리고 시험 내용에 대하여 간략히 기술하고, 그 결과를 분석해 보고자 한다. 특히 시험 설비나 측정 장비에 있어서의 문제점을 파악하여 다음에 있을 시험에서는 더욱 정확도 및

효율성을 높일 수 있도록 하고자 하며, 이러한 한계를 인식하고 얻어진 결과로부터 최대한의 정보를 이끌어 낼 수 있도록 자료를 처리 분석하고자 한다.

2. 시험 모델 및 설비

본 시험은 벤트 홀 크기 결정 기법의 정확도를 확인하기 위한 것으로, 다양한 크기의 벤트 홀을 통해 모델 내부의 압력이 외부의 압력 변화에 어떻게 반응하는지를 측정함을 주 목적으로 하고 있다. 따라서 발사체의 노즈 페어링 혹은 다양한 격실(Compartment)을 나타낼 수 있는 밀폐 용기 시험 모델을 만들고, 그 표면에 쉽게 열고 닫을 수 있는 벤트 홀을 설치하였다. 벤트 홀 모델 외부 압력은 가급적 발사체의 비행 시험에서 실제로 나타나는 변화를 그대로 모사하는 것이 바람직하나, 이 경우 엄청난 펌프 용량을 필요로 할 것으로 보인다. 모델의 크기 역시 노즈 페어링의 유효 체적에 비교적 접근할 수 있도록 하는 것이 얻어진 자료의 유용성을 높이는 것이기는 하나, 진공 챔버의 크기에 의해 제한을 받을 수밖에 없다.

벤트 홀 시험 모델 외부 압력의 변화는 한국항공우주연구원 우주비행시험그룹이 보유한 직경 1.8m, 깊이 2.5m 열진공 챔버(Bake-Out Chamber)를 이용하여 모사하였다. 이 챔버는 인공위성이나 발사체 탑재체에 묻어 있는 오염 물질을 진공 상태에서 열을 가해 휘발시키기 위해 사용되는 것으로, 고진공의 유지가 그 주요 기능으로 되어 있다. 따라서 이러한 설비 및 측정 장비는 본 시험에서 요구하는 지상 대기압에서 진공으로의 급격한 압력 하강 및 시간적 변화가 심한 압력 및 온도의 측정에 적합하도록 구성되어 있지는 않다. 특히 챔버 내 압력 변화의 경우 펌프를 최대 용량으로 가동하여도 실제 발사체의 경우에 비하여 약 4배 정도 느린 값이 얻어진다. 또한 챔버 크기의 제한으로 직경 1m인 모델도 설치에 상당한 어려움이 있었다. 이러한 한계로 인해 금번 시험은 실제 비행 모델에 대한 검증은 될 수 없으나, 반면에 벤트 홀 크기 결정

기법의 정확도를 검증하는데 필요한 데이터를 충분히 얻을 수 있을 것으로 예측되었다.

진공 챔버의 크기에 의해 벤트 홀 시험 모델의 최대 크기는 직경 1m로 설정되었으며, 그 깊이는 전체 체적이 1m³이 되도록 하였다. 그림 1에는 열진공 챔버에 설치된 모델을 나타내었으며, 직경이 2, 6, 4mm인 벤트 홀이 각각 10개씩, 총 30개가 12도 간격으로 배치되어 있다. 또한 모델 길이 방향 중앙에는 직경 4mm 벤트 홀 10개를 배치하여 축 방향 배치의 영향을 알아 볼 수 있게 하였다. 각각의 홀은 나사를 풀거나 잠금으로써 벤트 홀의 열고 닫힘을 나타낼 수 있도록 하였으며, 시험의 효율성을 높이기 위해 쉽게 형상의 변경이 가능하도록 하였다. 모델의 크기가 열진공 챔버에 넣을 수 있는 거의 최대의 값으로 설정되어 있어서 한번 설치된 모델을 시험 중간에 들어내어 형상을 바꾸는 일이 없도록 모델을 설계하였다.

본 시험의 주요 목적은 벤트 홀 시험 모델 외부 압력의 변화에 대하여 모델 내부 압력이 어떻게 반응하는가 하는 것이며, 이는 챔버 내부의 절대압 및 모델 내외부의 차압을 측정함으로써 알아 볼 수 있게 하였다. 챔버 내부의 절대압은 열진공 챔버에 이미 장착되어 있는 것을 그대로 사용하였으나, 앞에서 잠시 언급한 한계로 인해 절대압 센서가 높은 시간 응답 특성 및 정확도를 가지고 있지는 못한 것으로 나타났다. 모델 내부의 압력은 절대압을 측정하는 대신 내외부의 차



그림 1. 항우연 Bake-Out 챔버 내부에 설치된 용기 모델

압을 측정함으로써 압력의 측정 범위를 줄일 수 있으며, 이에 따라 차압 센서의 정확도 및 시간 응답 특성을 높일 수 있도록 하였다. 그러나 이 차압을 절대압으로 환산함에 있어서 챔버 내 절대압 측정값이 사용되는데, 이것의 정확도가 떨어지거나 3차원적 특성이 나타나는 경우 전체적인 측정 정확도가 저하될 우려가 있다. 차압 센서는 진공에서 작동하여야 하므로 그 선택에 세심한 주의를 기울여야 하며 참고문헌 [4]에 차압 센서에 대한 특성이 잘 기술되어 있다. 차압은 모델 내부에서 3차원적 특성이 나타나는지를 알아보기 위해 모델 표면 및 내부의 3곳에서 측정하였다.

3. 시험 내용

초기 시험 계획의 수립 과정에 있어서는 용기 내부의 압력 하강에 영향을 미칠 수 있을 것이라 예상되는 다양한 변수에 대한 시험을 계획하였으나, 진공 챔버의 기능의 제한, 모델 제작 및 정밀도 확보의 어려움, 시험 시간 및 예산의 제약 등으로 인해 다음 세 가지 변수의 영향만을 살펴보기로 하였다.

- 벤트 홀 총 면적의 영향
- 동일 벤트 홀 면적에 대한 벤트 홀 배치의 영향
- 동일 벤트 홀 면적에 대한 개개 벤트 홀의 크기 변화의 영향

이러한 목적에 맞도록 모델을 설계/제작하고 표 1과 같은 시험표(Run Log)에 따라 시험을 수행하였다. Gauge 2는 2번 차압계의 최대 용량을 나타내는 것으로 15.0 psi인 것은 따로 표기 하였으나, 1.0 psi 인 것은 따로 나타내지 않았다. Test ID가 31번까지로 되어 있으나 시험 시간의 제약으로 인해 일부 중요도가 떨어지는 시험들은 수행하지는 못하여 표 1에 나타내지 않았으며, 반면에 일부 시험들은 시험 중간의 대략적 결과 분석을 통하여 필요하다고 생각되면 추가하기도

하였다. 개개의 시험(Run) 혹은 시험들이 갖는 물리적 의미는 결과 분석 부분에 나타나 있다.

4. 시험 결과

4.1 챔버 압력 하강 특성

그림 2에는 벤트 홀 면적 대 용기 체적 비 (A/V , 단위 $1/m$)가 각각 6.2832×10^{-5} (ID22), 1.2566×10^{-4} (ID3), 5.0265×10^{-4} (ID5)인 경우의 챔버 내 압력 변화를 비교하였다. 압력의 변화가 지상 대기압에서부터 진공까지 광범위하게 변하므로 그 차이를 나타내기 어려워, 그림의 우측에는 압력의 로그값을 함께 나타내었다. 면적비(A/V)의 값이 가장 작은 ID22의 경우에는 다른 것들과 비교하여 상당한 차이를 나타내나 면적비의 값이 커 질수록 그 차이는 점점 작아짐을 알 수 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 모델이 챔버 내부에서 차지하는 체적이 상당하므로, 동일한 조건으로 진공 펌프를 가동하여도 A/V 의 값이 작아 모델의 환기가 원활히 이루어지지 못할수록 챔버 내의 압력 하강 속도는 작아지는 것으로 나타났다.

그림 3에는 챔버 내부의 압력, 모델 내외부의 압력차, 그리고 온도의 변화를 자세히 관찰할 수 있도록 짧은 시간에 대하여 나타내었다. 본 시험에 사용된 자료 획득 시스템(Data Acquisition System)의 특성에 의해 압력은 초당 약 18개, 온도는 9개 정도의 센서로부터의 신호를 처리하고 있다. 먼저 챔버 압력 신호(Pchamber)를 보면 대

부분의 시간에 대해 약 2초 동안 어떤 일정한 값에 대하여 잡음(Noise)으로 까지 볼 수 있는 진동을 나타내다 다음 일정한 값으로 갑작스런 변화를 보임을 알 수 있다. 이는 Bake-Out 챔버에 설치되어 있는 절대압 센서가 본 시험과 같은 비정상(Unsteady) 현상의 측정을 위해 선택된 것이 아니라서 이와 같은 급격한 압력의 변화를 나타내는데 한계가 있기 때문인 것으로 보인다. 또한 일정한 값을 기준으로 한 압력의 진동 폭이 약 1 kPa 정도에 해당하여, 실제 발사체의 벤트 홀 면적 결정 시의 설계 요구 조건들이 수 kPa 정도의 크기를 가지는 것을 고려하면 상당한 크기의 측정 오차를 나타낸다고 볼 수 있을 것이다. 정밀한 시험 결과를 얻기 위해서는 챔버 내부의 압력 변화 속도를 충분한 정확도로 나타낼 수 있는 절대압 센서를 사용하는 것이 필요할 것으로 보이며, 1개의 센서로 넓은 압력 범위에서 요구 정확도를 얻지 못할 경우 압력 범위별로 몇 개의 센서를 사용하는 것도 고려해 보아야 할 것으로 보인다. 그러나 본 시험의 목적이 벤트 홀 면적 결정 기법의 정확도를 검증해 보기 위한 것으로, 이러한 오차를 감안하여 계산을 수행함으로써 충분히 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

그림 3에서 시간 0은 진공 펌프의 작동을 기준으로 한 것이 아니라 차압계의 값이 0 혹은 평형 상태에서부터 변화를 나타내기 시작하는 시점을 의미하며, 챔버의 밸브가 열리고 펌프의 작동이 시작되어 실제로 감압이 시작된 시점과는 미세한 차이를 가질 수 있다. 그런데 이 그림에서 흥미

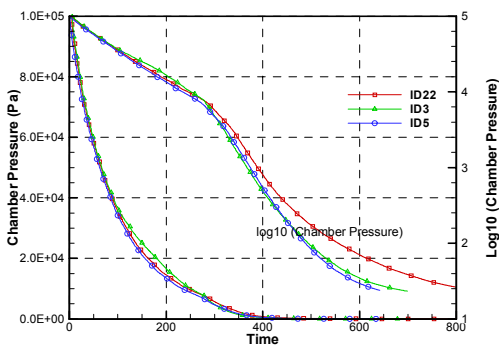


그림 2. 챔버 내부 압력 변화 비교

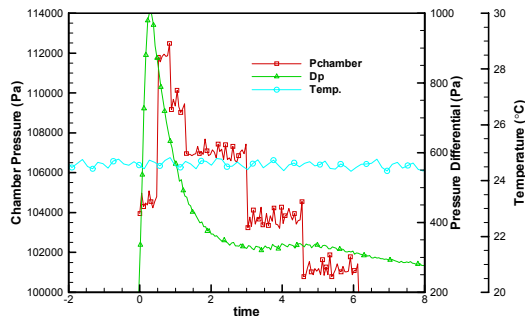


그림 3. 챔버 압력(Pchamber), 모델 내외부 압력차(Dp) 및 온도(Temp.) 신호 특성

로운 점은 챔버 내부 압력 측정 절대압 센서의 정확도를 감안한다 하더라도 감압의 시작 시점에서는 오히려 챔버 내부 압력이 증가되는 것으로 나타난다는 점이다. 이것이 챔버 내부의 압력이 밸브 및 펌프의 작동과 더불어 실제로 일시적 증가를 나타내기 때문인지, 아니면 평균적으로 압력은 감소하나 센서가 장착된 지역에 국부적으로 압력이 증가된 탓인지는 불확실하다. 또한 국부적인 압력의 변화가 있다면 이것이 밸브 및 펌프의 작동 초기에 나타나는 과도기적 현상인지 아니면 계속해서 유지되는지 역시 현재의 시험 결과만으로는 알 수 없다. 이를 알아보기 위해서는 챔버 내부의 압력을 여러 지점에서 측정해 보아야 하며, 뒤에 나타낼 벤트 홀의 위치에 따른 모델 내부 압력 변화로부터 간접적으로 추정해 볼 수도 있을 것이다.

또 한 가지 흥미로운 점은, 그림 3에서 볼 수 있듯이 챔버 내부의 절대압은 아직 변화가 없으나 차압계에서 측정된 모델 내외부의 차압은 이미 상승을 시작하고 있다는 것이다. 대부분의 경우 차압이 절대압 보다 약 0.5초 이상 앞서서 상승이 시작되고, 이후에 절대압이 변화를 나타내기 시작한다. 우선 센서 자체의 정밀도와 시간 응답 특성을 고려할 때 차압의 변화가 챔버의 배기 순간을 나타낸다고 보아야 하며, 절대압 센서는 그 정밀도 및 응답 속도가 느려 이런 경향을 나타낼 수밖에 없는 것으로 보인다.

챔버 내부의 압력은 벤트 홀 크기 결정 프로

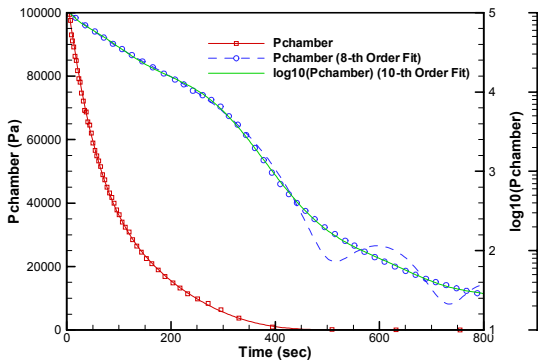


그림 4. 다차 함수에 의한 시간에 따른 챔버 내부 압력 변화 모사(Curve-Fitting)

그램에 있어서 외부 대기압으로서 입력되며, 이 경우 그림 3에 나타난 값들을 그대로 사용할 경우 계산된 모델 내외부의 차압은 엄청난 진동을 나타낼 것이다. 또한 이 프로그램에 있어서 외부 압력은 계속적으로 감소하는 것으로 가정하고 있기 때문에 고주파의 압력 진동을 그대로 나타낼 경우 계산 자체가 불가능하다. 따라서 어떤 형태로든 시험 데이터를 가공할 필요성이 있으며, 이때 압력의 고주파 진동을 효율적으로 제거할 수 있어야 할 것이다. 그림 4에는 챔버 압력 그 자체와 이에 로그(log10)를 취한 값에 대한 8차 및 10차 함수를 이용한 근사(Curve Fitting) 결과를 나타내었다. 먼저 압력 그 자체(Pchamber)를 8차 다항식을 이용하여 나타 낼 경우(붉은색 실선) 시험 결과를 제법 잘 근사하는 것으로 보이나, 이를 로그 축에 대하여 나타낼 경우(푸른색 파선) 저압 영역에서 상당한 괴리 및 진동을 보임을 알 수 있다. 따라서 먼저 압력의 값에 로그(log10)를 취한 후 이에 대하여 10차 다항식을 이용하여 근사를 시켰으며(초록색 실선), 고압 및 저압 영역 모두에서 시험 결과를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 벤트 홀 크기 결정 프로그램의 입력으로는 이와 같은 방법으로 구한 10차 다항 근사식(10-th Order Polynomial Fitting) 뿐만 아니라 고주파 진동 영역에서 대푯값 하나씩 만을 택한 데이터를 따로 추출하여 사용하기도 하였다.

4.2 차압 신호 특성

모델 내외부의 압력 차이(차압) 값도 챔버 절대압처럼 고주파 진동 특성을 보이고 있으며 그림 3에서 잘 나타나지는 않으나 약 7 Pa 정도의 진동을 보이고 있다. 본 시험에서 의미 있는 차압의 값이 kPa 단위임을 고려하면 이 정도의 진동은 별도의 고주파 필터링(Filtering)을 통하여 처리하지 않아도 시험 데이터의 신뢰도에는 전혀 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

4.3 모델 내 외부 차압 특성

그림 5에는 벤트 홀 시험에서의 압력 변화를

A/V의 값이 6.2832×10^{-5} 인 ID22에 대하여 나타내었다. 챔버 내부 압력의 변화를 제 2 종축에 로그값으로 나타내었으며, 이러한 외부 압력 변화에 대한 모델 내외부의 차압을 제 1 종축에 나타내었다. 앞에서 설명한 바와 같이 모델 표면 2곳, 그리고 유동장 내부 1곳으로 총 3개 지점에서 모델 내외부의 차압을 측정할 수 있도록 센서(Sensor)를 배치하였으며, 각각의 결과를 함께 나타내었다. 차압의 값이 커 질 경우 Dp1과 Dp3의 측정 범위를 벗어나므로 그 값이 표시되지 못하며, 표 1에 나타난 것처럼 측정 범위가 넓은 Dp2만이 차압을 제대로 측정하고 있음을 알 수 있다. Dp1과 Dp3는 최대 측정 차압이 1 psi로 되어 있으나 그림에서 보듯이 이를 약 30% 가량 넘어서 차압에 대해서도 정확한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 최대 측정 차압이 15 psi인 Dp2와 그 보다 정밀한 Dp1 및 Dp3의 측정값이 거의 같음을 알 수 있다. 동일한 지점에서 측정 범위가 다른 압력계로 반복 측정을 해야만 차압계의 종류에 따른 측정 정밀도를 비교할 수 있으나, 그림 5에서 볼 때 정밀도의 차이는 본 시험의 목적을 고려할 때 없다고 보아도 될 것이다. 그리고 차압계 3개의 설치 위치를 고려해 보면 벤트 홀 시험 모델 내부에서의 유동 현상이 뚜렷한 3차원적 특성은 갖지 않는다고 판단해도 될 것으로 보인다. 대용량 차압계는 표 1에 나타내었듯이 A/V의 값이 작은 경우에만 사용하고 차압이 작은 A/V 값이 큰 경우에 대해서는 Dp2 역시 1 psi용 차압계로 대체하여 측정

하였다. 그림 5에서 차압 측정값이 약 300초 부근에서 감소하다 갑자기 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 챔버의 진공도를 더 낮추기 위해 부스터 펌프(Booster Pump)가 작동되기 시작하는 시점과 일치한다. 챔버 내부 압력의 하강 기울기도 역시 이 지점에서 더욱 가파르게 나타남을 알 수 있다.

4.4 반복성

시험 결과의 반복성 정도를 확인해 봄으로써 측정된 값의 정밀도를 가늠해 볼 수 있으며, 표 1의 ID 22와 23, 그리고 29와 30이 이러한 경우에 해당한다. 반복성 시험은 어떤 형상 및 시험 조건을 완전히 별개로 재구성하여야만 시험 전 과정에 걸친 반복성을 확인할 수 있으나, 여기서는 시험 결과의 정확도를 측정할 수 있는 지표로 그 의미를 국한시키고자 한다. 그림 6에는 동일한 시험을 연이어 반복한 ID29와 ID30에 대한 압력 변화를 나타내었으며, 동일한 조건임에도 불구하고 챔버 절대압 및 모델 내외부의 차압이 제법 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. ID30을 ID29에 연이어 시험한 이유는 앞에서 잠시 언급한 부스터 펌프(Booster Pump)의 작동 시기를 약 300초 부근에서 0초로 이동시키기 위한 시도였으나, 이를 실행하기 위해서는 시험 설비의 설정에 상당한 변화를 주어야만 하는 것으로 나타났다. 따라서 기본적으로 펌프의 작동 및 이에 의한 챔버의 압력 변화가 동일하여야 하나, 그림

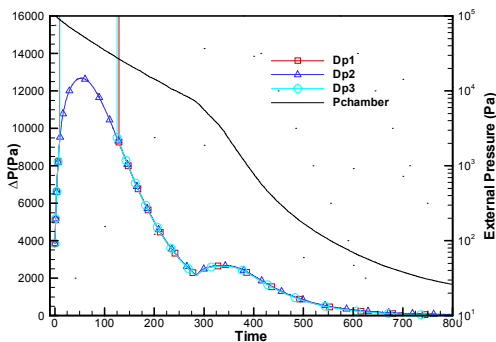


그림 5. 벤트 홀 시험에서의 압력 변화 (ID22, $A/V=6.2832 \times 10^{-5}$)

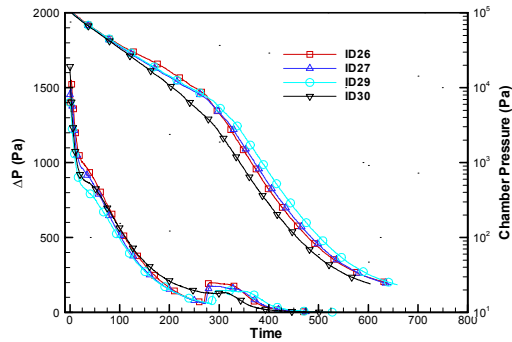


그림 6. 동일 면적비에 대한 압력 변화 비교 ($A/V=2.5133 \times 10^{-4}$)

에서 보듯이 300초 부근에서 최대 약 4.5 kPa 정도의 차이를 나타내고 있다. 외부 압력은 전반적으로 ID29가 ID30보다 높게 유지되나, 모델 내부의 차압은 오히려 ID30이 약 70 Pa 정도 더 높게 나타났다. 그림 7에도 동일한 면적비에 대하여 압력 변화를 비교하였으며, 표 1에서 알 수 있듯이 이 중 ID22와 ID23은 벤트 홀의 배치가 동일한 반복 시험 결과이다. 이 두 경우를 비교해 보면 챔버 내의 절대압의 편차는 앞의 경우와 유사하나 차압은 훨씬 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

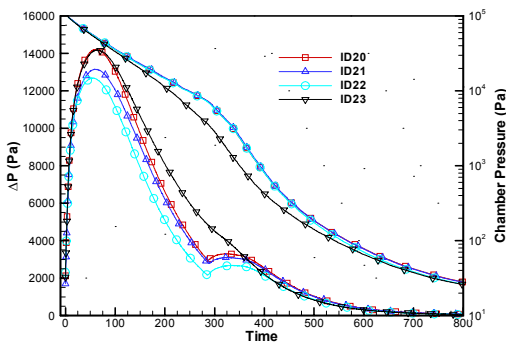


그림 7. 동일 면적비에 대한 압력 변화 비교 ($A/V=6.2832 \times 10^{-5}$)

이 두 가지 경우에서 알 수 있듯이, 폐회로 루프 제어(Closed Loop Control)을 통하지 않고 단순히 펌프를 최대 용량으로 작동시켜 챔버 내의 압력을 떨어뜨리는 것은 그 반복성 정도가 압력 편차 약 4.5 kPa 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러므로 동일한 면적비를 갖는다 하더라도 챔버 내부 압력의 변화가 동일하지 않으므로 단순히 모델 내외부의 차압만을 비교하는 것은 의미가 없음을 알 수 있다. 극단적으로 보면 현재의 챔버로는 원하는 모델 외부 압력의 변화를 만들어 주기가 어려우므로, 앞에서 언급한 시험의 주요 목적 3가지를 달성하기는 쉽지 않을 것임을 알 수 있다. 그러나 기본적으로 측정된 챔버 압력 및 모델 내외부 차압을 이용하면 벤트 홀 면적 결정 기법의 정확도를 확인할 수 있을 것으로 볼 수 있을 것이다.

4.5 동일 면적에 대한 홀 배치의 영향

동일한 벤트 홀 총면적을 같은 크기의 벤트 홀만으로 구성할 경우 그 배치에 따라서 압력 및 온도 변화가 어떻게 달라지는지를 파악해 보고자 하였다. 표 1에 나타난 ID로 표시하면, (9,10), (11,12), (15,16), (20,21,22,23), (26,27), (29,30) 등이 이에 해당한다. 같은 크기의 벤트 홀만 사용하 이유는 벤트 홀 크기에 따른 Reynolds수와 같은 스케일(Scale) 효과를 배제시키기 위한 것으로, ID (9,10)과 (11,12)를 동시에 비교하지 않는 이유가 이에 해당한다.

그림 8에는 면적비가 6.2832×10^{-5} 인 ID (20, 21, 22, 23)의 경우를 함께 나타내었으며, 앞에서 언급한 바와 같이 챔버 내부의 절대압 자체의 반복성이 높지 않아 결과의 비교가 어렵다. 그러나

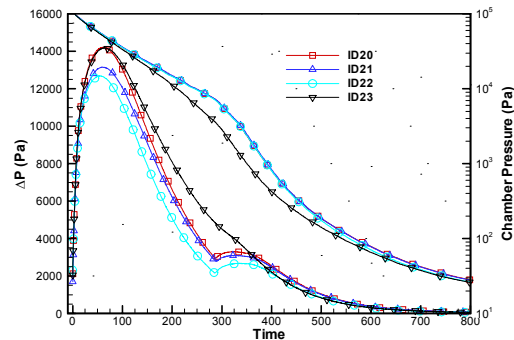


그림 8. 동일 면적비에 대한 압력 변화 비교 ($A/V=6.2832 \times 10^{-5}$)

ID23을 제외하고 나머지 세 경우는 모두 챔버 압력은 비슷한 경향을 나타내므로 동일 면적에 대한 벤트 홀 배치의 영향을 어느 정도 확인 할 수 있을 것이다. ID21은 직경 2.0mm의 벤트 홀 10개 중 원주 방향으로 상부 5개를 열어 둔 것이며, ID22는 반대로 하부 5개만을 열어 둔 것이다. 이 두 경우를 보면 차압이 대략 0.6 kPa 정도의 차이를 일관되게 나타내고 있다. 이것이 절대압의 차에 의한 것인지 아니면 챔버 내의 압력이 3차원적 분포를 보이며 감소하기 때문인지는 불확실하다. 다만 그림 9의 ID 11과 12, 그림 15의 ID 15와 16을 비교해 봐도 상부 쪽 벤트 홀

이 많이 열릴수록 차압은 하부 쪽 벤트 홀을 열어 둔 것에 비해 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 반면에 그림 8에서 ID 20은 상하부 벤트 홀을 골고루 섞어서 열어 두었음에도 불구하고 차압은 ID21과 22의 중간값이 아닌 가장 높은 값을 나타내고 있음이 흥미롭다. 원주 방향이 아닌 축 방향 배치의 차이에 의한 영향을 알아보기 위한 것이 그림 6에 나타낸 ID26과 ID 29이며, ID29는 그림 1에서 직경 4.0mm인 벤트 홀을 축 방향으로 모델 중앙에 배치시킨 것이다. 이 두 경우는 절대압 분포에서 약간의 차이가 있음에도 차압의 변화는 거의 동일한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이러한 벤트 홀 배치에 따른 차압 특성의 변화는 앞에서 설명한 챔버 내부 온도 분포에서 어느 정도 드러났듯이 챔버 내부의 압력 하강이 축 방향 보다는 원주 방향으로 어느 정도 3차원적 현상을 나타내고 이루어진다는 것을 의미하는 것으로 보인다. 따라서 벤트 홀 크기 결정 기법의 검증에 있어서도, 이 기법이 외부 압력의 3차원적 변화를 고려하지 못함을 감안하여 그 결과를 서로 비교해야 할 것이다.

4.6 개개 벤트 홀 크기 변화의 영향

앞에서는 동일한 크기의 벤트 홀의 배치만을 달리 했을 때의 영향을 살펴보았으나, 여기서는 동일한 면적비를 크기가 다른 벤트 홀을 사용하여 구성하였을 때의 변화를 살펴보고자 한다. 이

에 해당하는 것이 표 1에서 ID (9,10)과 (11,12), 그리고 (15,16)과 17이 이에 해당한다. 그림 9의 ID 9와 11은 우선 챔버 절대압 자체가 차이를 나타내고 있어서 비교가 어려우나, 적은 수의 직경이 큰 벤트 홀을 사용하는 것이 많은 수의 직경이 작은 벤트 홀을 사용하는 것에 비해 높은 차압을 나타내고 있다. 그런데 그림 10의 ID 16과 17을 비교해 보면 오히려 이와 반대되는 경향을 보이고 있으며, 따라서 이 효과에 대해서는 결론을 내리기가 힘들다. 데이터 자체에 앞서 언급한 챔버 절대압 변화의 반복성, 챔버 절대압 센서의 정밀도, 챔버 내 압력 변화의 3차원적 특성 등이 모두 복합적으로 나타나고 있어서 자료의 정밀한 분석을 매우 어렵게 하고 있다.

4.7 벤트 홀 면적에 따른 차압 특성

본 시험의 가장 중요한 목적이 벤트 홀 면적의 변화에 따라서 모델 내외부의 차압 특성이 어떻게 변하는지를 파악하는 것이며, 앞에서 분석한 것들은 이 데이터의 신뢰도가 얼마나 있는지, 아니면 그 결과에 영향을 미치는 요소들이 무엇이 있는지를 알아보기 위한 것이다. 그림 11에는 면적비의 값이 다른 5개의 경우를 비교하였으며, 예측했던 대로 면적비의 값이 커질수록 차압의 값이 현저히 줄어들게 됨을 알 수 있다. 면적비의 값이 매우 작은 ID20의 경우는 챔버 절대압의 변화 양상도 조금 다르게 나타나며, 앞에서 이미 언급한 바와 같이 면적비의 값이 점점 커질수록 챔버 절대압은 비슷한 변화를 보임을 알 수

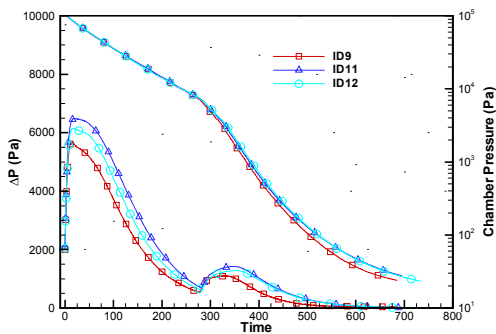


그림 9. 동일 면적비에 대한 압력 변화 비교
($A/V=1.1310 \times 10^{-4}$)

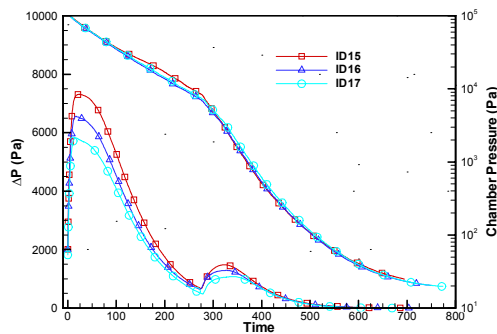


그림 10. 동일 면적비에 대한 압력 변화 비교
($A/V=1.0053 \times 10^{-4}$)

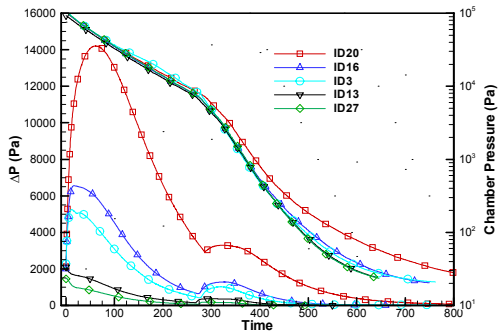


그림 11. 면적비의 변화에 따른 모델 내외부 차압 특성 비교

있다. 또한 면적비가 작을수록 최대 차압이 나타나는 시간은 늦어지고, 면적비가 매우 크면 최대 차압은 펌프의 작동과 동시에 나타남을 알 수 있다.

벤트 홀의 크기 결정에 있어서 내외부 차압의 크기와 함께 또 다른 중요한 설계 변수가 내부에서의 압력 하강 속도이다. 벤트 홀의 면적을 크게 하면 내외부 차압을 줄일 수 있으나, 반면에 고도 상승에 의한 대기압의 하강 속도가 그대로 내부로 전파된다. 만약 발사체의 가속도가 큰 경우 이는 탑재물에 심각한 영향을 미칠 수 있으며, 따라서 벤트 홀 면적을 제한함으로써 내부의 압력 하강 속도를 늦추어 주어야 한다. 그림 12에는 벤트 홀 시험 모델 내부의 압력 및 이 값을 단순히 시간에 대하여 미분해 준 압력 하강 속도를 함께 나타내었다. 시험 모델 내부 압력은 챔

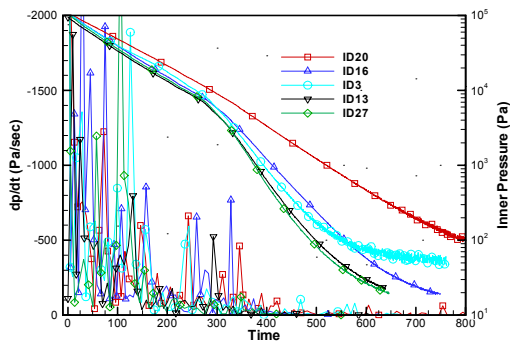


그림 12. 면적비 변화에 따른 모델 내부 압력 하강 속도 비교

버 내부 절대압에 모델 내외부 차압의 값을 더해 줌으로써 얻어 졌으며, 그림 3에서 볼 수 있듯이 절대압 및 차압의 값이 모두 고주파 진동을 나타내고 있다. 따라서 이를 단순히 미분해 주게 되면 엄청난 잡음(Noise)가 생성될 것이며, 이렇게 얻어진 값이 물리적 의미를 지니지는 못 할 것이다.

그림 13에는 고주파 진동이 포함된 모델 내부 압력을 각 구간별로 선형 함수로 피팅(Linear Fitting)함으로써 구한 압력 하강 속도를 비교하였다. 매 시간 마다 그 전후로 일정한 수의 데이터를 선형 함수로 근사하였으며 데이터의 수를 늘릴수록 진동은 제거되나 전반적으로 압력 하강 속도의 변화가 완만하게 변화된다. 여기서는 고주파 진동을 상당히 감소 시키면서도 압력 하강 속도의 전반적 양상이 크게 변하지 않는 30개의 데이터를 선형 근사에 사용하였다. 압력 하강 속도는 벤트 홀의 면적이 너무 작아서 챔버 내부 절대압 자체가 상당히 다른 값을 가지는 ID20을 제외한 나머지 4가지 경우는 전반적으로 거의 동일한 변화를 나타내고 있으며, 벤트 홀 면적이 커 질수록 압력 하강 속도의 최대값은 작아진다. ID20은 최대값이 약 1250 Pa/sec가 되며 ID27은 약 1900 Pa/sec 정도의 값을 나타낸다. 이 그림에서 압력 하강 속도의 최대값이 시간 0에서 나타나는 것으로 되어 있으나, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 챔버 내부의 압력이 진공 펌프의 작동과 함께 순간적으로 높아지기 때문인 것으로 보인다.

5. 결 론

발사체의 노즈 페어링 벤트 홀 크기 결정 기법의 정확도를 검증하기 위한 시험을 수행하였다. 한국항공우주연구원 우주비행시험그룹이 보유한 열진공 챔버(Bake-Out Chamber)를 이용하여 챔버 내부 압력을 대기압에서 진공으로 떨어뜨렸으며, 그 속에 다양한 벤트 홀이 설치된 모델을 넣고 모델 내외부의 압력 및 온도 변화를 측정하였다. 벤트 홀 크기 결정 기법의 검증에

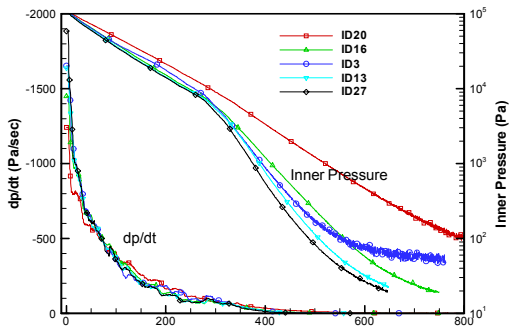


그림 13. 선형 피팅(Fitting)에 의한 압력 하강 속도 처리 결과

필요한 시험 데이터를 얻는 것이 주 목적이지만, 반면에 시험 설비 및 측정 장비의 특성을 이해하여 이후 있을 시험에서는 좀 더 결과의 신뢰도 및 정확도를 높이는 것도 중요한 의의를 갖는다.

직경이 약 1.8m인 열진공 챔버에 넣을 수 있는 최대 크기인 직경 1.0m, 체적 1.0m³인 실린더 모양의 모델을 제작하였으며, 챔버 내부의 절대압, 챔버 내부의 온도, 모델 내외부의 차압, 그리고 모델 내외부 및 표면에서의 온도를 측정하였다. 챔버 내부의 절대압은 시험 모델 외부 압력으로 작용하고, 모델에 장착된 차압 센서에서 측정된 값을 이용하여 모델 내부의 절대압을 산정하는데 기준이 된다. 그러나 챔버의 주 용도가 저진공 상태를 유지하는데 있으므로 모든 설비 및 측정 장비가 이에 맞도록 되어 있어, 본 시험과 같은 시간에 따른 물리적 변화를 측정하는데는 다소 미흡한 부분이 있었다. 특히 절대압 센서의 느린 응답 및 고주파 진동 특성은 측정의 정밀도를 높이기 위해서는 반드시 개선되어야 할 것으로 보인다.

모델 내외부의 차압 및 온도 신호 역시 고주파 진동 특성을 가지고 있으나 그 진폭이 작아 본 시험에서 필요로 하는 정밀도를 충분히 갖고 있는 것으로 판단되었다. 모델 내부의 유동 특성이 평균적으로 1차원적인 특성을 보이는지 확인하기 위해 세 지점에서 차압을 측정하였으며, 그 값은 거의 차이를 나타내지 않아 이러한 가정이 타당한 것으로 나타났다. 그러나 다양한 지점에

서 측정된 온도 분포는 원주 방향 위치에 따라 다른 변화를 나타내고 있다. 이것이 유동 현상에 기인한 것인지를 알아보기 위해 벤트 홀의 위치를 정반대로 하여도 거의 동일한 온도 분포를 얻을 수 있었다. 따라서 모델 내부의 온도 분포가 3차원적 유동 현상에 기인한 것으로 볼 수 없으며, 그 원인은 현재로서는 파악하기 힘들다. 챔버 내부의 온도 측정 결과를 보면 모델 내부에서의 온도 분포와 동일한 원주 방향 위치에 따른 변화를 보이고 있다. 그러나 모델 내부의 온도는 벤트 홀 위치에 따른 유동 및 모델 벽면에서의 온도에 의해 결정되어야 하므로, 챔버 내부의 온도가 모델 내부의 온도에 영향을 미칠 수는 없다고 보아야 할 것이다.

챔버 내부의 온도 분포로 판단해 볼 때 챔버의 압력 하강은 국부적인 3차원 유동을 일으키며 이루어지는 것으로 판단할 수 있다. 특히 동일한 벤트 홀 면적에 대해서도 벤트 홀 배치에 따라 모델 내부의 차압 특성이 다르게 나타나는 것은, 벤트 홀 위치에 따라 작용하는 외부 압력의 값이 달라지기 때문인 것으로 보인다. 본 시험에 사용한 챔버는 폐회로 제어(Closed Loop Control)를 통한 압력 하강 속도의 조절이 없이, 단순히 진공 펌프를 최대한으로 작동시키 압력을 낮추는 방식을 채택하고 있다. 따라서 동일한 벤트 홀 형상에 대해서도 반복 시험을 할 경우 챔버 내부 압력 하강 특성이 달라진다. 그러므로 시험 결과를 비교 분석함에 있어서 모델 외부 압력 조건이 약간의 차이를 나타낼 수 있다는 점을 고려해야 한다.

본 시험에서 알아보고자 한 주요 설계 변수는, 벤트 홀 총 면적, 동일 면적 동일 벤트 홀 직경에 대한 배치의 영향, 그리고 동일 면적에 대한 직경 변화의 효과의 세 가지이다. 먼저 동일 면적 동일 벤트 홀 직경에 대한 배치의 차이는 약 0.6 kPa 정도의 차압의 차이를 나타낼 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과가 챔버 내 압력의 반복성이 보장되지 않고 또한 챔버 내부 유동의 3차원 특성 가능성이 있기 때문에 단순히 배치의 차이에 기인한 것인지는 분명하지 않다. 동일 면적을 직경이 큰 소수의 홀을 사용하여 구성하는 것과 반대로 직경이 작은 다수의 홀로 하

는 경우는 시험한 두 가지 결과가 서로 상반되는 경향을 나타내고 있으며, 이 역시 앞에서와 같은 시험의 불확실성을 높이는 다양한 요소들이 복합적으로 작용하기 때문인 것으로 보인다.

벤트 홀 전체 면적의 차이에 따르는 모델 내부 압력 하강 특성은 이미 예견되었던 대로 면적이 클수록 차압의 값은 작아지는 경향을 나타낸다. 최대 차압이 나타나는 시간도 면적이 작으면 뒤로, 크면 앞으로 이동되는 특성을 나타낸다. 어느 정도 이상의 면적에서는 최대 차압이 펌프의 작동 시점과 일치하는 것으로 나타나는데, 이는 펌프 작동과 더불어 일시적으로 챔버 내 압력이 증가하는 현상 때문인 것으로 보인다.

벤트 홀 설계 시 고려해야 할 것으로 내외부의 차압뿐만 아니라 내부의 압력 하강 속도 역시 중요한 의미를 지닌다. 모델 내부의 절대압은 측정된 차압을 챔버 내부 압력에 더해 줌으로써 얻어 지는데, 챔버 내부 압력 측정값에 포함된 고주파 진동으로 인하여 이를 시간에 대하여 미분한 값은 거의 잡음(Noise) 수준의 결과를 나타낸다. 따라서 얻어진 모델 내부 절대압을 매 시간 마다 전후로 일정한 숫자의 데이터에 대한 선형 함수로 피팅(Linear Fitting)함으로써 진동은 제거되 과도 특성(Transient Characteristics)은 그대로 나타낼 수 있게 하였다. 벤트 홀의 면적이 변하여도 그 특성은 크게 변하지 않으나, 초기에 나타나는 최대 압력 하강 속도의 값은 벤트 홀 면적이 클수록 크게 나타남을 알 수 있었다.

본 시험의 목적은 벤트 홀 크기 결정 기법의 정확도를 검증할 수 있는 데이터를 얻는데 있으며, 따라서 이 결과를 이용한 검증 노력이 이어질 것이다. 그런데 본 시험 결과를 해석함에 있어서 그 오차 범위를 넓히는 여러 가지 불확실한 요인들이 있음을 고려해야 하며, 시험 및 해석 결과의 비교 검증에 있어서도 이를 충분히 고려해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. "Compartment Venting," NASA SP-8060,

- NASA Space Vehicle Design Criteria (Structures), NASA, Nov. 1970.
2. 옥호남, 김인선, 라승호, 오범석, "벤트 홀을 통한 격실 내부 압력 하강 예측 기법 연구," 제 3회 유체공학회 학술대회, 2004.
3. Thermal Analysis Workbook, Edited by James W. Ower, NASA TM-103568, January 1992.
4. 라승호, "벤트 홀 시험 측정시스템 구성," TR62426PA00000-0001, 한국항공우주연구원, 2004.

표 1. 벤트 홀 시험 Run Log

ID	Hole of Radius 2.0 mm										Hole of Radius 4.0 mm										Hole of Radius 6.0 mm										A/V (1/m)	Gauge 2 (Psi)							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A									
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0000E+00	
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2566E-04	15.0	
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.0265E-04		
9	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1310E-04	15.0	
10	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1310E-04	15.0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1310E-04		
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1310E-04		
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.2619E-04		
15	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0053E-04		
16	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0053E-04		
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0053E-04		
20	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.2832E-05	15.0	
21	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.2832E-05	15.0	
22	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.2832E-05	15.0	
23	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.2832E-05	15.0	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5133E-04		
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5133E-04		
28	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5239E-04		
29	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5133E-04		
30	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5133E-04		
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.3929E-04		