

## 마하 2.5 초음속 공기 흡입구의 유동 특성 연구

### I. 서 론

초음속 공기 흡입구는 초음속 유동의 공기를 가능한 손실 없이 감속 압축시켜 안정적이고 균일한 아음속 유동을 연소실에 공급하는 역할을 한다. 따라서 흡입구의 성능이 엔진의 전반적인 성능과 밀접한 연관을 갖게 되므로 흡입구는 초음속으로 비행하는 공기흡입식 추진기관을 설계하는데 있어서 가장 중요한 요소 중 하나로 고려된다. 추진 시스템이 높은 효율을 얻기 위해서는 가능한 작은 정체 압력 손실을 통해 공기를 감속시키는 것이 필수적이다. 따라서 마하 2 이상의 고속에서는 하나의 수직 충격파를 발생시키는 흡입구는 정체 압력 손실 면에서나 외부 항력 면에서 바람직하지 못하기 때문에 하나의 경사 충격파나 여러 개의 연속된 경사 충격파를 통하여 램 압축을 하는 경우가 정체 압력 손실 면에서 바람직하다. 또한 설계 마하수가 높아질수록 여러 개의 경사충격파를 이용하여 압축하는 방식을 택하는 것이 유리하다. 공기 흡입부에서 경사 충격파에 의해 압축된 공기는 초음속 확산부에서 약한 수직 충격파를 거쳐 연소실로 유입된다. 연소실 압력은 공기 흡입구의 배압으로 작용하여 엔진의 전반적인 성능에 직결되는 흡입구 유입 유량과 전압력 회복률에 매우 큰 영향을 미친다. 연소실의 압력이 높아지면 아음속 확산부에 존재하는 종단 수직 충격파는 점점 흡입부 선단으로 접근하면서 전압력 회복률도 차츰 증가하여 전반적으로 엔진의 성능이 증가한다. 이때 종단 충격파가 아음속 확산부 혹은 흡입구 목에 존재하면 초임계(supercritical) 작동 모드, 카울에 존재하면 임계(critical)모드라 하며 전압력 회복률은 임계 모드에서 최대가 된다. 연소실의 압력이 임계 조건보다 더 높아지게 되면 종단 충격파는 흡입구의 초음속 확산부를 벗어나게 되어 공기는 모두 아음속으로 변한 상태에서 공기흡입부로 유입되므로 유량은 감소하고 저항은 증가하면서 전압력 회복률은 다시 감소하여 엔진의 성능은 또한 감소한다. 이와 같이 연소실의 압력 혹은 배압은 유입 유량과 전압력 회복률에 매우 큰 영향을 미치며 엔진의 성능과도 직결된다.[1,2] 배압의 영향 이외에도 유입 유량과 전압력 회복률은 대기조건 변화나 비행체의 기동 등에 따라 변하는 비행 마하수 및 받음각, 요각 등 외부 비행 조건에도 영향을 받는다. 따라서 초음속 공기 흡입구의 설계에 있어서, 배압은 물론 비행 조건에 따른 탈-설계점에서의 유동 특징 및 성능에 대한 이해가 필수적이다.[3]

Patrick E. Rodi et al은 2차원 램제트 엔진 흡입구 모델에서의 흡입구 배압과 흡입구 축소 비율에 따른 Unstart 전과 후의 압력 변화에 관한 연구 및 흡입구 축소 비율과 시동 가능한 최대 흡입구 배압에서 압력 분포와의 영향에 대한 연구를 수행하였다.[4] Yoshinari Enomoto et al은 마하수 5.5의 2차원 흡입구 모델 실험을 통하여 bleeding 시스템이 흡입구 및 엔진에 미치는 영향에 대해 보고한 사례가 있다.[5]

이론적으로 외부 압축이 주로 이루어지는 초음속 흡입구는 설계조건에서 유동의 교란 없이 안정적으로 운용될 수 있으나, 비설계점에서 종단 수직 충격파가 흡입구 카울 외부에 위치하는 아임계(subcritical) 작동에서는 충격파 시스템의 진동형태인 버즈(buzz)라고 불리는 공기역학적 불안정성 문제에 직면하게 된다. 버즈가 일어나는 동안, 흡입구 선단

에는 큰 충격과 진동이 발생함과 동시에 흡입구 후류에 큰 압력 진동이 나타나고, 이는 엔진의 성능감소 혹은 엔진 정지 상태를 일으킬 수 있어 엔진의 운용에 있어서 매우 큰 악영향을 초래한다.[6] 초음속 흡입구가 초임계 상태에서 작동하면 버즈 현상을 피하는 것이 가능하지만, 초임계 상태에서 흡입구는 낮은 성능으로 운용되는 단점을 갖기 때문에 대부분의 설계는 초임계 상태보다는 임계상태에서 이루어진다. 따라서 이러한 설계조건에서 발생하기 쉬운 불안정성을 회피하거나 제어하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 이와 같이 버즈가 일어나는 원인과 그 특성을 이해하기 위한 노력은 버즈가 시작되는 것을 예상하고 성능의 손실 없이 효율적으로 버즈를 피하기 위해서 매우 중요하다. 이러한 중요성 때문에 해외 주요 연구기관에서는 초음속 흡입구에 대한 버즈 현상이 오랜 기간 동안 연구되었지만, 실제 버즈 현상에는 많은 인자들이 관여되기 때문에 그 메커니즘에 대한 이해는 아직까지도 완전하지 못한 채로 남겨져 있다. 또한 버즈 메커니즘이나 버즈 현상 시작의 정확한 예측과 진동 현상에 대한 실제 데이터를 정확하게 제시한 연구 결과도 많지 않다.

버즈에 대한 연구들은 Ferri와 Nucci[7], Sterbentz[8], Trimpi[9], Connor와 Wollett[10], Seddon와 Goldsmith[11], Nagashima[12]에 의해서 수행되었다. 이들 연구에서는 흡입구 압축면 위에 유동의 박리가 없는 Ferri 타입의 버즈에 대한 것으로 경사충격파와 수직충격파의 교차점에서 발생하는 와류면이 흡입구로 유입될 때 불안정한 유동이 시작됨을 입증했다. 한편 Daily는 외류면 유입 이외에도 압축면에서의 박리에 의한 흡입구 초킹이 아임계 불안정성의 주요 원인을 밝혔다.[13]

이와 같이 많은 해외 연구기관에서 램제트 엔진의 흡입구에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 이에 해당하는 연구가 미비하다. 이에 본 연구에서는 실험적 수치적 연구를 수행함으로써 초음속 흡입구 내부 유동의 특성과 버즈의 일반적인 메커니즘 및 그 특성을 밝히고 향후 수행될 흡입구 연구의 기초를 제시하고자 한다. 이런 관점에서 본 연구에서 사용된 흡입구 모델은 하나의 외부 압축면을 갖는 간단한 축대칭 형상으로 self-starting 특성을 갖는다. 버즈 발생 측면에서는 압축면에서 유동의 박리를 갖는 Dailey 타입이다. 받음각이 없는 비설계점에서 배압의 변화에 따른 초음속 흡입구의 버즈 특성 변화를 분석하기 위해서 Shadow graph 가시화와 표면압력 측정을 수행하였다. 실험 결과의 보다 명확한 분석을 위해 몇가지 실험 조건에 대해 2차원 수치해석을 수행하였다.

## II. 실험 장치 및 실험 모델

### 2.1 실험 장치

본 실험은 Semi-Free Jet 타입의 불어내기식 초음속 풍동을 이용하여 수행되었으며, 사용된 초음속 풍동의 개략도를 Fig 1에 나타내었다. 본 연구에서 이용한 초음속 풍동은 압축기를 이용하여 약  $1\text{m}^3$  부피의 저장탱크에 공기를 30atm으로 압축시킨 후 수동 밸브를 이용하여 전방 안정실의 압력을 일정하게 유지하면서 초음속 노즐을 통과시켜 원하는 마하수의 유동을 얻어내는 대표적인 초음속 실험 장치이다. 사용된 초음속 풍동의 시

협부 단면 크기는 50mm×100mm이고, 실험 시 전방 안정실의 전압력은  $P_0=8 \text{ kgf/cm}^2$  ( $\pm 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ )를 유지하도록 하였다. 가변 노즐을 이용하여 마하수를 1.5~3.3까지 변화시킬 수 있으나, 본 연구에서는 마하수를 2.5로 고정시켰다. 전방 압력실의 전압력이 일정하게 유지되는 시험 시간은 약 5~6초 정도로 Fig 2와 같다. 압력 데이터의 취득은 계기 압력 0~20 kgf/cm<sup>2</sup>의 스트레인 게이지 방식의 압력 센서를 이용하였다.

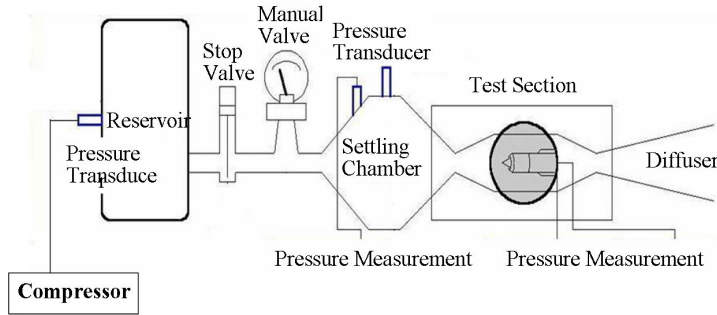


Fig 1. Schematic of Supersonic Wind Tunnel

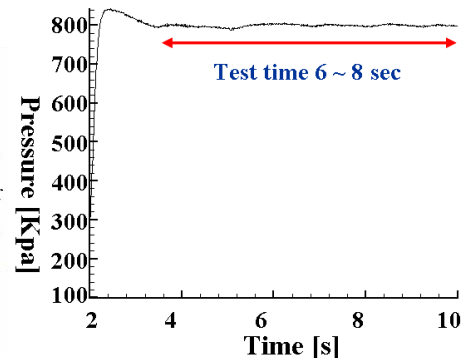


Fig 2. Test time

## 2.2 실험 모델 설계 방법

실험 모델은 마하수 2.5에 맞추어 설계되었다. 마하수 2.5의 이하의 경우 Fig 3에 나타난 바와 같이 1개의 경사충격파를 사용하는 것과 2개의 경사충격파를 사용하는 것 사이의 전압력 회복률의 차는 그다지 심하지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 1단 꺾임각이 있는 축대칭의 3차원 모델로 제작하였으며, 이때 Fig 4와 같이 Oswatitsch등이 수행한 결과에 의하면 1단 꺾임각의 흡입구의 경우 최적 반각은 30도이다[14].

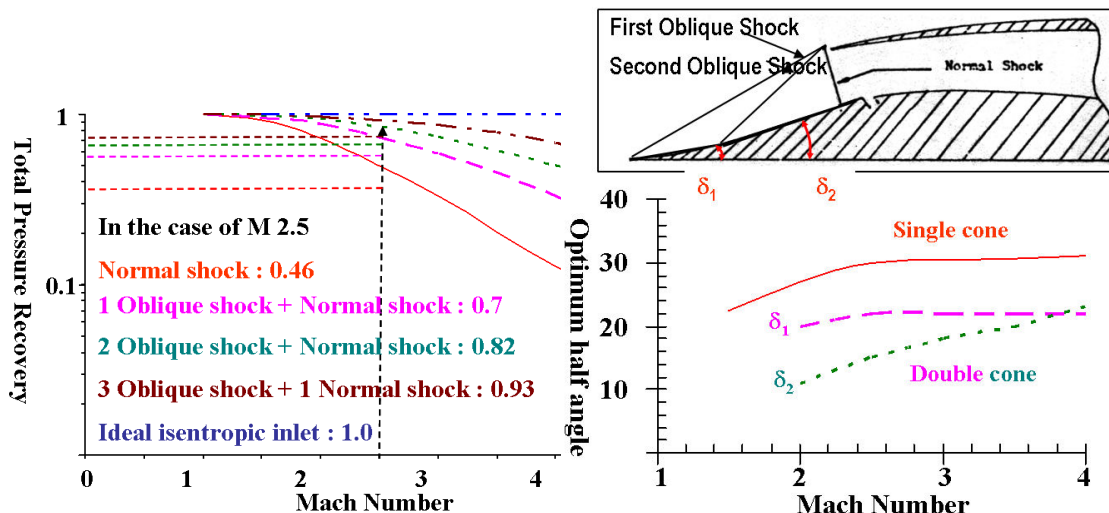


Fig 3. Total Pressure recovery as Mach Number

Fig 4. Optimum half angle as Mach number

2차원형 흡입구의 설계와는 달리 축대칭형 형상에 대해서는 1차원 이론 계산이 어렵기 때문에 최적 반각이 결정된 후, 흡입구 목의 크기 등을 결정하는 나머지 설계과정에서는 간단한 Euler 수치 해석을 이용하여 흡입구 선단에서 포획된 유량이 흡입구 내 최소 면적을 이루는 목에서 유동의 질식이 일어나지 않도록 설계하였다. 설계된 모델의 전체 길이는 약 170mm, 외경은 28mm이며 SUS로 제작하였다. 흡입구 목의 내경은 15.6mm 이고 아음속 확산부에 균일한 유동을 제공하도록 흡입구 목의 길이는 5mm가 되도록 하였고 아음속 확산부에서 유동의 박리가 발생하지 않도록 아음속 확산부의 각은 5°로 설계하였다. 모델은 adapter를 통하여 풍동의 strut에 지지되고 연소실의 압력 변화를 모사하기 위하여 blockage adjuster plug를 모델 출구에 부착하였다. 배압 변화는 blockage를 모델의 후반부에 체결한 후 면적비율을 변화시킴으로써 이루어진다. 면적 비율(Area ratio, AR)는 출구 유로 면적과 흡입구 목에서의 유로 면적의 비로 정의하였으며 본 실험의 case로는 1.34~0.366까지 면적비율에서 수행되었다. 표면 압력을 측정하기 위해서 모델 외부에 6개의 정압홀과 2개의 전압홀을 두었으며 시험 모델에 대한 개략도는 Fig 5에 나타내었고 압력 측정 지점은 Fig 6에 나타내었고 Fig 7은 초음속 풍동에 장착된 모델의 사진이다.

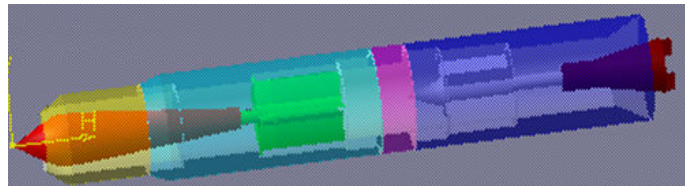


Fig 5. Model Schematic

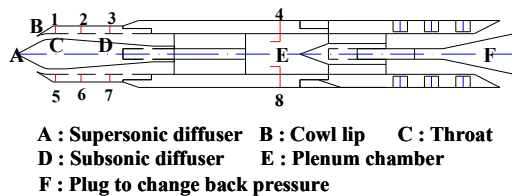


Fig 6. Position of pressure measurement

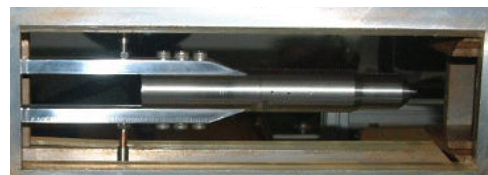


Fig 7. Model installed in wind tunnel

### 2.3 가시화 기법

흡입구 내부의 유동 특성을 파악하기 위해 배압을 변화시킨 실험에 대해서는 쉘리렌 및 웨도우 가시화 장치를 이용하였다. Fig. 8는 쉘리렌 시스템의 구성도를 나타낸다. 오목 거울의 초점거리에서 나오는 제논 백색 광원의 빛이 오목 거울에 반사되어 평행광을 이룬다. 이 평행광은 풍동의 테스트 부를 통과하게 되고 다시 오목거울에 반사된 후 흑백 나이프 에지(knife-edge)를 통과한다. 나이프 에지를 거친 빛을 통해 카메라에 밀도 구배에 해당하는 이미지가 받아들여짐으로써 충격파 및 팽창파의 이미지를 촬영할 수 있다. 이미지는 초당 6000 프레임의 초고속 카메라를 이용하여 촬영하였다.

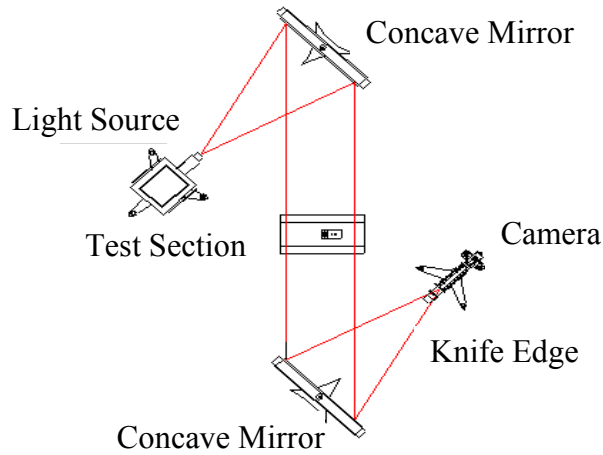


Fig 8. Schematic of Schlieren system.

## 2.4 수치해석 방법

실험 결과를 검증하고 비교하기 위하여 RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes) 방정식을 이용한 전산 유체 해석을 수행하였다. 배압에 따른 영향을 파악하기 위해 수행된 수치해석에서는 계산의 편의를 위하여 2차원 해석을 통하여 살펴보았다. 유입 유동 조건은 실험과 동일하게 설정하였으며, 벽면 경계에서는 점착 조건을 이용하였다. 수치 기법으로는 Roe’s FDS를 이용한 3차 정확도의 공간 차분과 완전 내재적 시간 적분 기법을 이용하였으며, Menter의 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 이용하였다. Fig 9은 수치 해석을 위해 사용된 격자 그림으로 총 40,010개의 격자를 이용하였다.

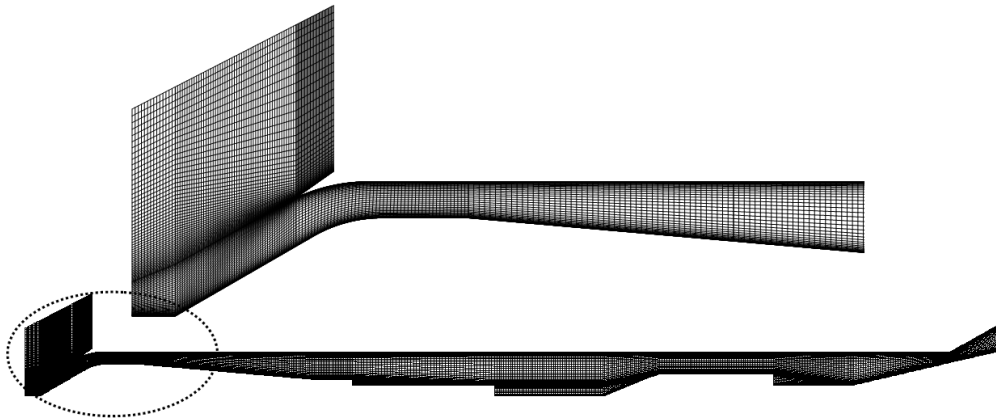


Fig 9. Two-Dimensional Computational Grid.

## Ⅲ. 실험 결과 및 논의

### 3.1 실험 조건 요약

앞서 언급한 바와 같이 배압을 변화시키기 위하여 흡입구 후방의 블라키지를 원하는 간격만큼 밀거나 후퇴시켜가면서 면적 비율을 변화시켰다. 면적 비율(Area Ratio: AR)은

흡입구 목 면적에 대한 노즐 출구의 면적비로 정의하였으며 식(1)과 같다. 즉 면적 비율이 작아짐은 흡입구 출구 제트의 유로 면적이 작아짐을 의미하므로 배압이 증가함을 의미하게 된다.

$$AR = \frac{\text{Exit Jet Area}}{\text{Inlet Throat Area}} \quad \text{식(1)}$$

배압에 따른 유동 특성을 파악하기 위해 AR=1.34~0.366까지 기본적으로 1mm 간격으로 블라키지를 움직여가면서 실험을 수행하였으며 버즈 발생에 관여한 부분에서는 0.1mm 단위의 매우 미세한 조절로 실험을 수행하였고 수치해석은 AR=0.904~0.703까지 3가지 경우에 대해서 수행하였다.

### 3.2 운용 모드에 따른 흡입구 유동 특성

#### 3.2.1 초임계 모드(Supercritical mode)

Fig 10는 AR=1.34인 초임계 모드의 쉐도우 사진 및 시험 시간에 대한 지점별 압력선도이다. 초임계 모드는 종단 수직 충격파의 위치가 아음속 확산부에서 흡입구 목에 위치하는 경우로 흡입구가 안정적으로 작동하기 위한 마진을 크게 갖는 반면 전압력 회복률은 상대적으로 낮아 흡입구 성능면에서는 불리한 운용 조건이다. 종단 수직 충격파가 카울 밖으로 나오기 전이므로 작동 시간 내 외부 경사충격파의 위치는 일정하지만 면적 비율이 낮아짐에 따라, 전압력 회복률은 증가한다. 이로써 배압이 증가함에 따라 흡입구내 종단 수직 충격파가 흡입구 선단으로 이동해 옴을 예측할 수 있다. 본 연구의 실험조건에서는 AR 1.34~1.26이 초임계 모드였으며 전압력 회복률은 60%~62.5%이다.

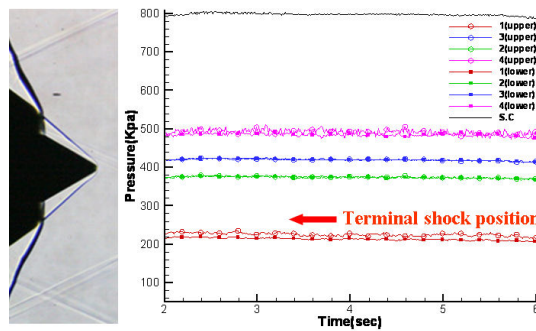


Fig 10. Shadowgraph and Pressure distribution of Supercritical Mode

#### 3.2.2 임계 모드(Critical mode)

Fig 11은 임계 모드의 쉐도우 사진 및 시간에 따른 압력선도이다. 임계모드는 수직 종단 충격파가 흡입구의 목에서 카울립 사이에 존재하므로 배압의 압력 변화에 민감하게 흡입구가 unstrat가 될 수 있으나 전압력 회복률은 가장 높아 흡입구의 성능면에서는 가장 유리한 운용조건이다. Fig 10와 Fig 11의 압력선도를 비교하면 흡입구 목에서의 압력 값의 급격한 상승을 확인할 수 있다. 이로써 수직 종단 충격파가 흡입구 목과 카울 사이에 위치하고 있음이 예측 가능하며 이때 전압력 회복률이 65%이다.

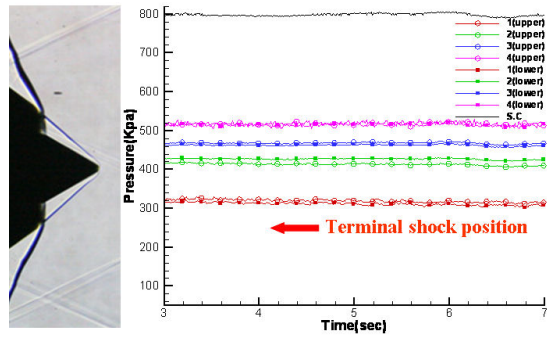


Fig 11. Shadowgraph and Pressure distribution of Critical Mode

### 3.2.3 아임계 모드(Subcritical mode)

Fig 12는 AR=0.998인 아임계 모드의 쉐도우 사진 및 압력선도이다. 아임계 모드는 중단 충격파가 카울 밖으로까지 밀려나와 배압에 영향에 매우 민감하게 작용하여 쉽게 흡입구 불안정성이 유발될 수 있는 운용 조건이다. 따라서 배압의 미세한 변화에 따라 중단 충격파가 움직이지만, Buzz현상과 같이 중단 충격파가 흡입구 내부까지 들어갔다 다시 밀려나오는 진동 현상은 발생하지 않았다. 본 실험의 경우 면적비율 1.089~0.998까지의 조건에서 아임계 모드로 나타났으며 이때 전압력 회복률은 임계 모드와 유사하거나 근소하게 증가였으며 최대 67.5%였다. 임계 모드와 비교하여 아음속 확산부 및 plenum chamber에서의 정압은 크게 달라지지 않았으나 흡입구 목에서의 압력은 매우 크게 증가하는 특성을 보였다.

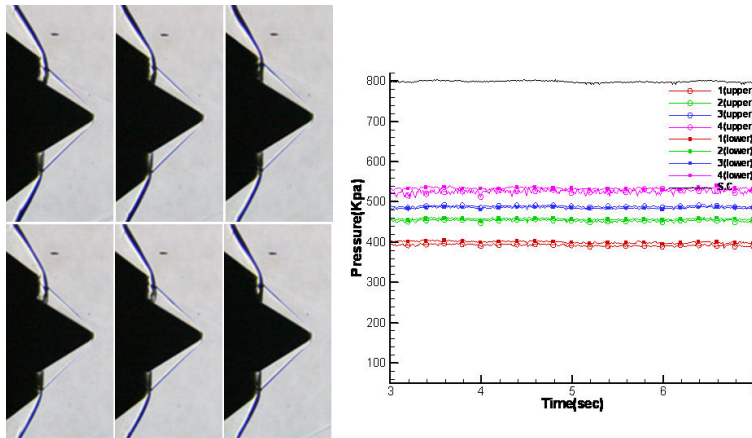


Fig 12. Shadowgraph and Pressure Distribution of Subcritical Mode

### 3.2.4 버즈 (Buzz Phenomenon)

Fig 13은 AR=0.805에서 관찰된 버즈 현상에 대한 쉐도우 사진이다. 1/8000의 셔터 스피드로 1초간 7~8 프레임이 연속 촬영 가능한 디지털 카메라를 이용하여 촬영한 연속된 10 프레임이다. 받음각이 존재하지 않는 실험임에도 불구하고 버즈가 시작되면서 윗면과 아랫면으로 나오는 충격파가 비대칭적으로 진동하는 현상을 보였다. 비록 실험

조건이 받음각이 존재하지 않는다고 할지라고 풍동의 유입 유동과 실험 모델이 정확히 받음각 0°가 되지 않을 가능성이 존재하며 모델 내부의 중심체 지지대(strut) 부분과 같은 자체의 비대칭성이 존재할 수 있다. 실제 과거 많은 연구기관에서 수행된 결과에서도 버즈가 발생하는 동안 충격파 시스템은 모델의 형상과 유입 유동의 조건에 따라 매우 민감하게 변하는 사례가 흔하다.

Fig 13의 3번 가시화 결과를 참조하면 종단 수직 충격파가 앞으로 밀려 나오면서 흡입구 중심체면에 큰 박리와 그로 인한 램다 형태의 충격파가 발생함을 볼 수 있다. 박리의 발생과 함께 종단 충격파가 흡입구 선단으로 밀려가며 박리의 소멸과 함께 종단 충격파가 흡입구 내부로 들어간다. 따라서 버즈 현상과 박리의 발생은 밀접한 연관이 있는 것으로 판단된다. Buzz 발생 시 압력은 아임계 모드와 비교하여 정압과 전압 모두 감소하였으며 AR을 더욱 감소시킬수록, 즉 배압이 증가할수록 전압도 감소하는 경향이 나타났으며 충격파가 움직이는 속도(Buzz 진동 주파수)도 증가하였다.

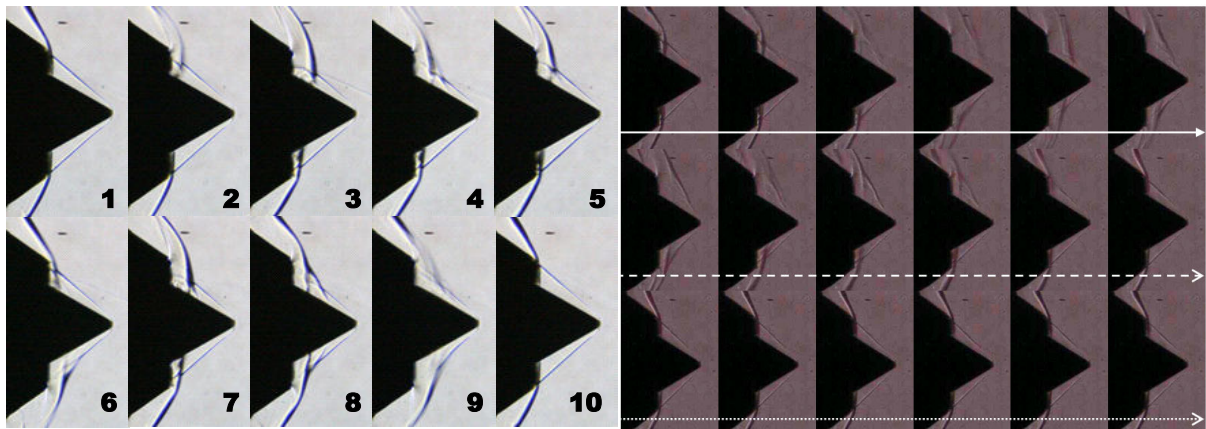


Fig 13. Buzz Shadowgraph(AR 0.805) Fig 14. Shadowgraph of Buzz (AR=0.904)

### 3.3 배압에 따른 버즈 특성

#### 3.3.1 버즈 사이클 해석

AR=0.904에서 나타난 버즈에 대한 쉐도우 결과를 Fig. 14에 나타내었으며 제시된 가시화 결과는 1/6000프레임을 촬영하는 고속 카메라를 이용하여 촬영된 사진들이다. 가시화 결과로부터 일반적인 버즈의 사이클은 세 가지 주요 구간으로 구성된다. 1) 아임계 모드로 충격파가 흡입구 선단으로 이동하면서 압축면에 박리가 발생 (실선 화살표 영역); 2) 아임계 모드로 압축면에 발생한 박리가 여전히 존재하며 충격파가 흡입구 후류로 이동(긴 점선 화살표 영역); 3) 흡입구가 초임계 모드로 re-start되면서 압축면에 박리가 제거(짧은 점선 화살표 영역); 버즈는 위 세 모드가 계속해서 반복된다.

#### 3.3.2 Low Frequency Buzz

Fig 15는 AR=0.952에서 1/6000 프레임으로 관찰된 버즈 모드로 본 연구에서 관찰된 버즈 모드 중 충격파가 움직이는 속도뿐만 아니라 버즈가 야기되는 간격 역시 가장 느



린 모드이다. 전체적인 싸이클은 약 0.08~0.1초 동안 아임계 모드 상태로 흡입구 내부 챔버에 유입 공기가 쌓이면서 챔버의 압력이 일정한 구간(Long time Fill-up)이 존재하였다가 1~3회의 버즈가 200Hz의 주파수로 연속적으로 나타난 후 다시 0.1초 동안 다시 공기가 쌓이는 Long time Fill-up 시간을 갖는 현상이 반복된다. 이 모드에서 전체적인 절차는 대부분의 시간동안 아임계 모드를 유지하다가 간헐적으로 버즈가 발생하였으며 버즈는 10~12Hz의 주파수로 야기되었다. 일회에 해당하는 가시화 결과인 Fig 15를 분석하면 1~10까지 종단 수직 충격파가 앞으로 밀려온 후 11~15까지 다시 충격파가 후퇴하고 16~26까지 흡입구 내부에 유동이 다시 쌓이게 되는 임계 모드의 Fill-up 시간을 갖은 후 다시 충격파가 앞으로 밀려나오는 것(27~30)을 반복한다. 버즈가 일어나기 전에 아임계 상태에 해당하는 구간을 Long time Fill-up으로 명명하였고 버즈의 한 사이클 동안 발생하는 임계 모드 상태를 Fill-up 시간으로 명명하였다.

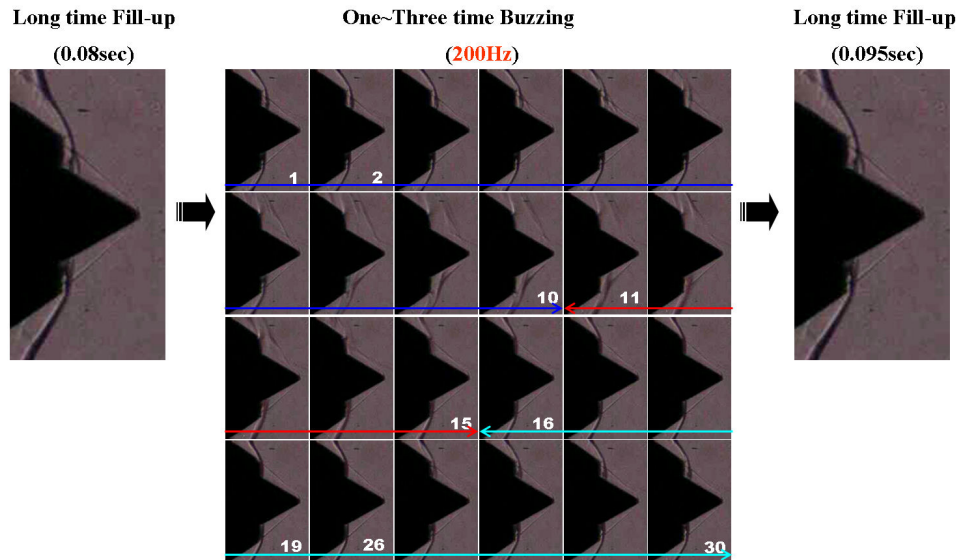


Fig 15. Low Frequency Buzz Mode (AR=0.952)

### 3.3.3 Transient Buzz Mode

배압이 달라지면 Buzz가 시작되는 주기와 충격파가 움직이는 시간이 달라지는 현상이 관찰되었다. Low Frequency Buzz 모드의 면적비율보다 미세하게 면적비율을 감소시켜 배압을 증가시키면 긴 시간 공기가 챔버에 쌓이게 되는 Long Time Fill-up 시간이 감소하고 버즈가 발생하는 빈도는 증가했다. 이는 면적비율이 감소하게 됨에 따라 출구에서 빠져나가는 유량이 감소하게 되므로 결국 충격파를 흡입구 선단으로 밀어내는데 필요한 압력을 형성하는 Fill-up 시간은 감소하게 되고 버즈가 야기되는 주기는 커지게 되는 것으로 판단된다. Fig 16에 AR=0.904에서 발생한 버즈 주기를 제시하였다. AR=0.904에서 유동은 0.017~0.033초의 Long Time Fill-up 시간을 갖은 후 약 300Hz의 주파수를 갖는 버즈가 4~6회의 연속적으로 발생하였다. 이 후 0.0033~0.009초의 Short Time Fill-up 시간을 지난 후 다시 동일한 버즈가 4~6회 발생하고 다시 Long Time Fill-up 과정을 반복하였다. 실제 버즈가 4~6회 발생한 후 Long Time Fill-up 과정과 Short

Time Fill-up 과정은 무작위하게 반복되었고 버즈의 발생은 30~58Hz 혹은 111Hz~300Hz로 시작되었다. 연속적으로 버즈가 발생하지 않고 흡입구 내부에 유동이 쌓이는 Fill-up 시간을 필요로 하는 버즈 모드를 transient 모드라 명명하였고 AR=0.904~0.884가 이 모드에 해당한다. 면적비율이 감소함에 따라 Long Time Fill-up 과 Short Time Fill-up은 점차 감소하였으나 발생하는 버즈의 주파수는 300Hz로 동일 하였다.

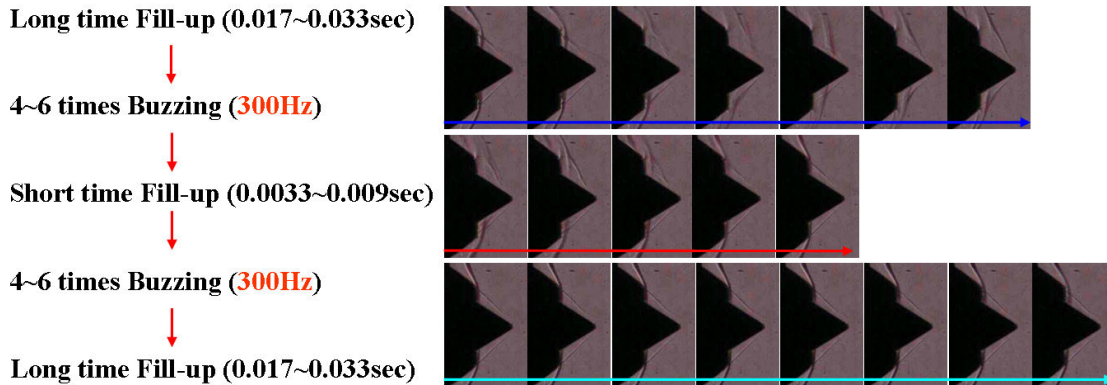


Fig 16 Transient Buzz (AR=0.904)

### 3.3.4 High Frequency Buzz Mode

Transient Buzz모드를 일으키는 면적비율보다 더 면적비율을 감소시키게 되면 Long time Fill-up 구간이나 Short time Fill-up 구간이 사라지게 되면서 버즈가 일정한 주기를 가지고 연속적으로 발생하였다. 발생한 버즈의 주파수는 앞서 제시한 transient Buzz 모드보다 증가하였다. AR=0.855에서부터 아임계 모드를 유지하면서 챔버에 공기가 긴 시간 쌓이게 되는 Long time 또는 Short time Fill-up 과정이 관찰되지 않았고 가시화 결과로부터 관찰한 발생한 버즈의 주파수는 315Hz였다. 이후 면적비율이 감소함에 따라 버즈의 주파수가 점차 증가하는 현상을 보였고 AR=0.703에서 375Hz로 최대 주파수가 관찰되었다. Fig 17은 AR=0.805에서 관찰된 버즈의 한 사이클에 대한 가시화 결과이다. 충격파가 흡입구 선단으로 밀려나온 후 다시 후퇴하고 초임계 모드 상태에서 챔버에 공기가 Fill-up되는 과정이 반복되는 것으로 다른 모드에서 발생한 버즈와 동일하다.

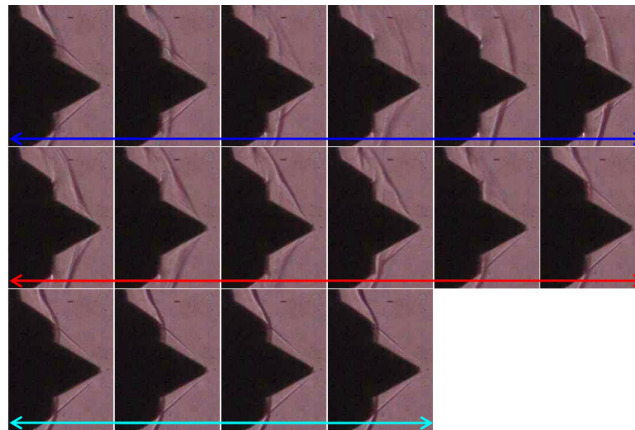


Fig 17. High Frequency Buzz Mode (AR=0.805)

### 3.3.5 Unstart Mode

Fig 18은 AR=0.597에서 관찰되는 초음속 흡입구의 Unstart 현상이다. 앞서 제시한 세 가지 버즈 모드에서 면적 비율에 따라 충격파의 움직이는 속도 및 주파수등은 다르게 관찰되었으나 버즈가 발생하는 한 사이클에 대한 일련의 과정은 모두 동일하였다. 그러나 High Frequency Buzz가 발생하는 면적비율보다 더 낮은 면적비율에서는 충격파가 흡입구 카울 밖으로 밀려나왔다가 다시 후류로 들어간 후 초임계 모드 혹은 임계 모드를 유지하면서 유동이 내부에 쌓이게 되는 Fill-up 구간이 관찰되지 않았다. 즉 흡입구 내부에는 계속해서 아음속 유동으로 일종의 질식상태로 흡입구 전구간에 걸쳐 압력이 거의 일정한 상태를 유지한다. 이는 흡입구 출구에서 빠져나가는 유량이 매우 작음으로 인해 흡입구 내부로 유동이 전혀 유입되지 못하기 때문이다.

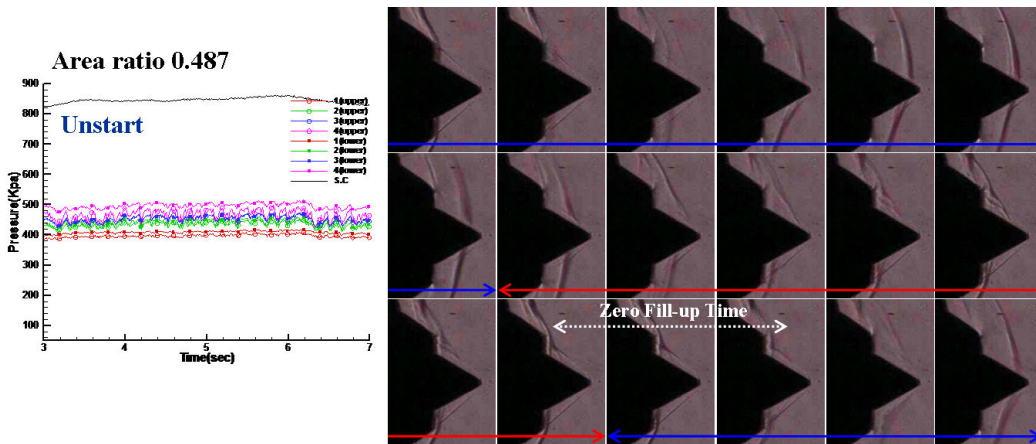


Fig 18. Inlet Unstart

### 3.3.6 실험 결과 요약

표 1 면적비율에 따른 버즈 모드 분류 및 특성

Area Ratio	1*	2*	3*	4*	분류 모드
0.952	80~95	1.5	200	10~12	Low Frequency Mode
0.904	17~33	1.33	300	30~58	Transient Mode
	3.3~9			111~300	
	0.894			9.3~13	
0.884	2~4.7	1.33	300	214~300	High Frequency Mode
0.855	Not exit	1.17	315	continuously	
0.805	Not exit	1	353	continuously	
0.703	Not exit	0.67	375	continuously	
0.597	Not exit	0			Unstart

1\* Long or Short time Fill-up

2\* 버즈가 발생하는 동안 초임계 또는 임계 상태로 유동이 Fill-up 되는 시간

3\* 버즈 주파수

4\* 버즈가 야기되는 주파수

표1에 면적비율에 따른 버즈 특성 및 관찰된 분류 모드를 나타내었고 관찰된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 아임계 모드에 가까운 면적비율에서는 버즈가 몇회 발생한 후 상당한 시간을 아임계 모드 상태를 유지하면서 흡입구 내부에 유동이 쌓이게 되는 Long time Fill-up 구간이 존재하고 버즈는 간헐적으로 발생한다.

2) 면적비율이 점차 감소함에 따라 Long time Fill-up이 감소하고 Long-time Fill-up 시간보다는 훨씬 작은 Short time Fill-up 구간도 존재하면서 버즈가 야기되는 주파수도 증가한다. 어느 면적비율 이하에서는 이같은 구간이 존재하지 않으며 버즈가 연속적으로 발생하게 된다.

3) 버즈가 연속적으로 발생하는 High Frequency Mode에서도 면적비율이 감소함에 따라 발생하는 버즈의 주파수는 증가하였다.

4) 흡입구 Unstart는 충격파가 흡입구 내부로 더 이상 유입되지 못하면서 아임계 모드를 유지하면서 흡입구 내부에 유동이 쌓이는 Fill-up 과정이 존재하지 않게 되어 흡입구 내부 전체가 일종의 질식 상태에 이른다. Unstart의 경우 흡입구 내부 전 구간에 걸쳐 압력차가 매우 작으며 전압력 회복률의 급격한 감소가 나타난다.

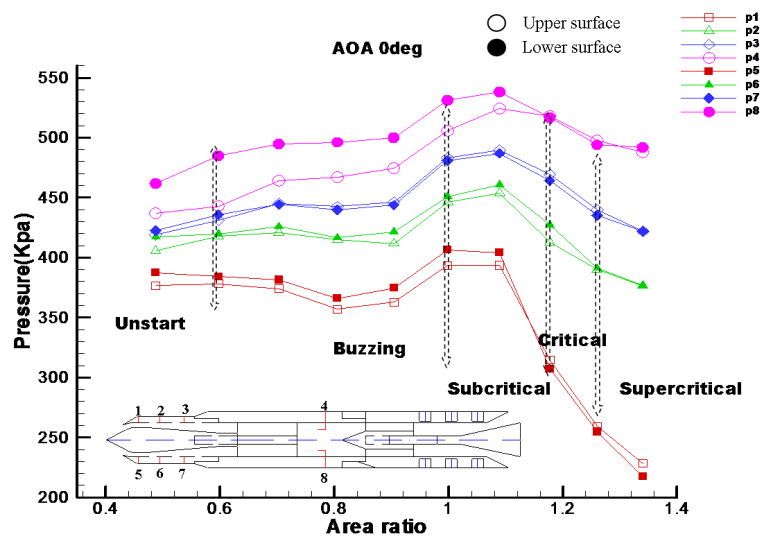


Fig 19. Pressure Distribution as Area ratio

## IV. 수치해석 결과 및 논의

### 4.1 배압에 따른 버즈 특성

Fig 20과 21은 AR=0.904에서 수행한 수치해석 결과로 압력선도와 압력선도에 표시한 시간에서의 마하선도이다. 실험 결과 AR=0.904에서는 Low Frequency Buzz Mode가 관찰되었으며 아임계 모드를 유지하는 Long time Fill-up 구간이 관찰되었으나 수치해석 결과 그러한 구간은 관찰되지 않았다. 이는 흡입구 후방 노즐 목에서의 유동이 빠져나가

는 실제 유로의 면적이 실험의 경우보다 조금 더 작게 형성되었기 때문으로 판단된다. 미세한 면적비율에 따라 주파수 및 특성이 매우 다른 버즈의 특성 때문에 실험과 동일한 면적 비율로 수치해석을 수행하였으나 실험 결과와 완전하게 일치하지 않았으며 버즈가 연속적으로 발생하는 High Frequency Buzz Mode가 발생하였다.

Figure 20의 지점별 압력선도 가운데 표시한 점선은 250 $\mu$ s의 시간간격을 나타내며 각각의 시간에서의 마하선도를 Fig. 21에 나타내었다. 충격파가 흡입구 목에서 경계층 박리를 야기한 후, 흡입구 목 위에 램다 충격파가 형성되고 목 위쪽에 박리 영역이 발생한다. 발생된 박리 영역이 유입 유량을 막게 되고, 흡입구 근처에서 압력이 급격히 상승하면서 충격파 시스템의 불안정을 야기한다. 이후 흡입구 목 근처의 압력상승이 종단 충격파를 흡입구 선단으로 밀어내면서 P1과 P2를 제외한 모든 영역에서 압력이 상승하며 Fig. 21의 1~3까지 경우에 해당한다. 이후 흡입구 선단에서 유입 유량의 방출이 발생하면서 흡입구 후류 챔버에서의 압력이 감소하지만 흡입구 목에서 발생한 박리의 영향으로 목에서의 압력은 여전히 증가하고 충격파는 계속해서 흡입구 상류로 밀려간다 (4~6). 충격파가 밀려나오에 따라 흡입구 목에서의 박리 영역이 감소하게 되면서 유로가 넓어지게 되고 충격파는 후류로 후퇴한(7~11) 후 같은 현상을 반복하게 되고 이것이 버즈의 한 사이클이 된다.

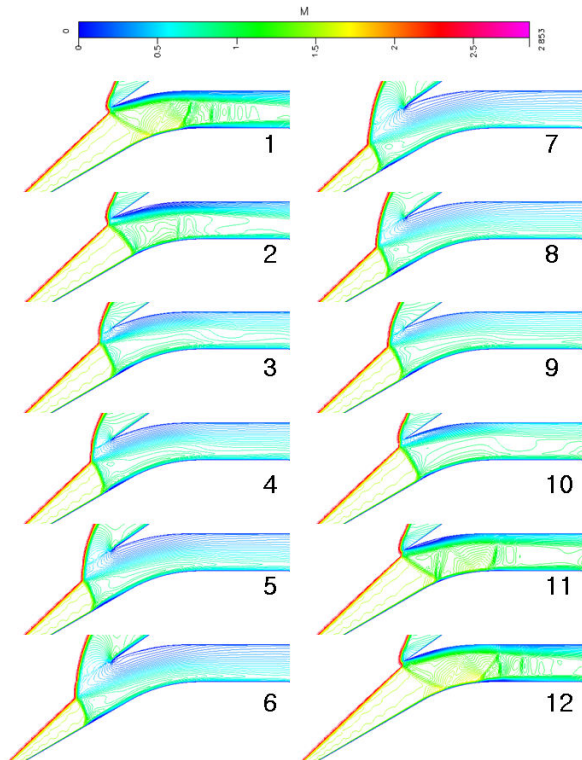
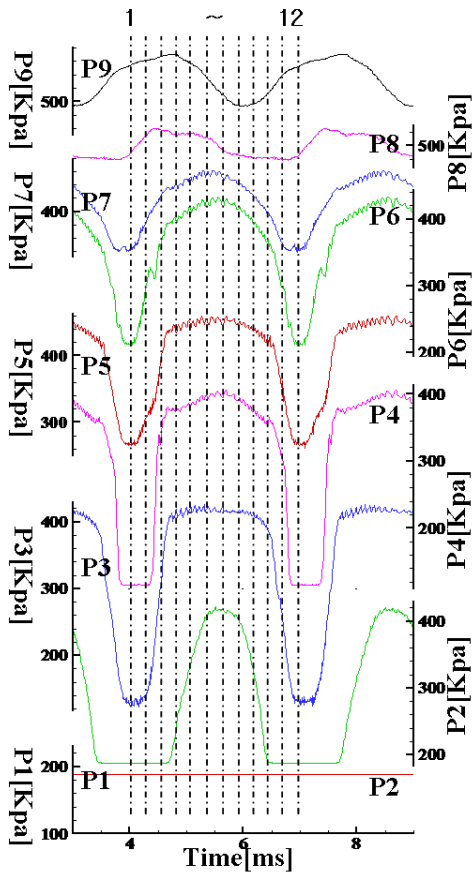
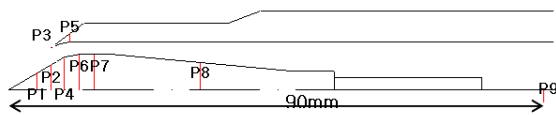


Fig 20. Pressure Distribution (AR=0.904)

Fig 21. Mach Contour (AR=0.904)

Fig 22과 23는 AR=0.805에 해당하는 수치해석 결과이다. AR=0.904와 비교하여 흡입구 내부의 모든 지점에서 더 큰 압력 진동 현상이 관찰되었고 종단 충격파가 이동하는 거리 역시 증가했다. P1에 해당하는 압력 지점의 선도로부터 AR=0.904의 경우 충격파가 P1 지점에 도달하지 않아 일정한 값을 유지하는 반면 AR=0.805의 경우 심한 압력의 심한 진동 현상을 보인다. 흡입구 목에서의 유동의 박리로 인한 질식 현상 유발과 그로 인해 흡입구 후류에서의 압력은 감소하지만 흡입구 목에서는 압력이 증가하는 현상은 AR=0.904의 결과와 동일하다.

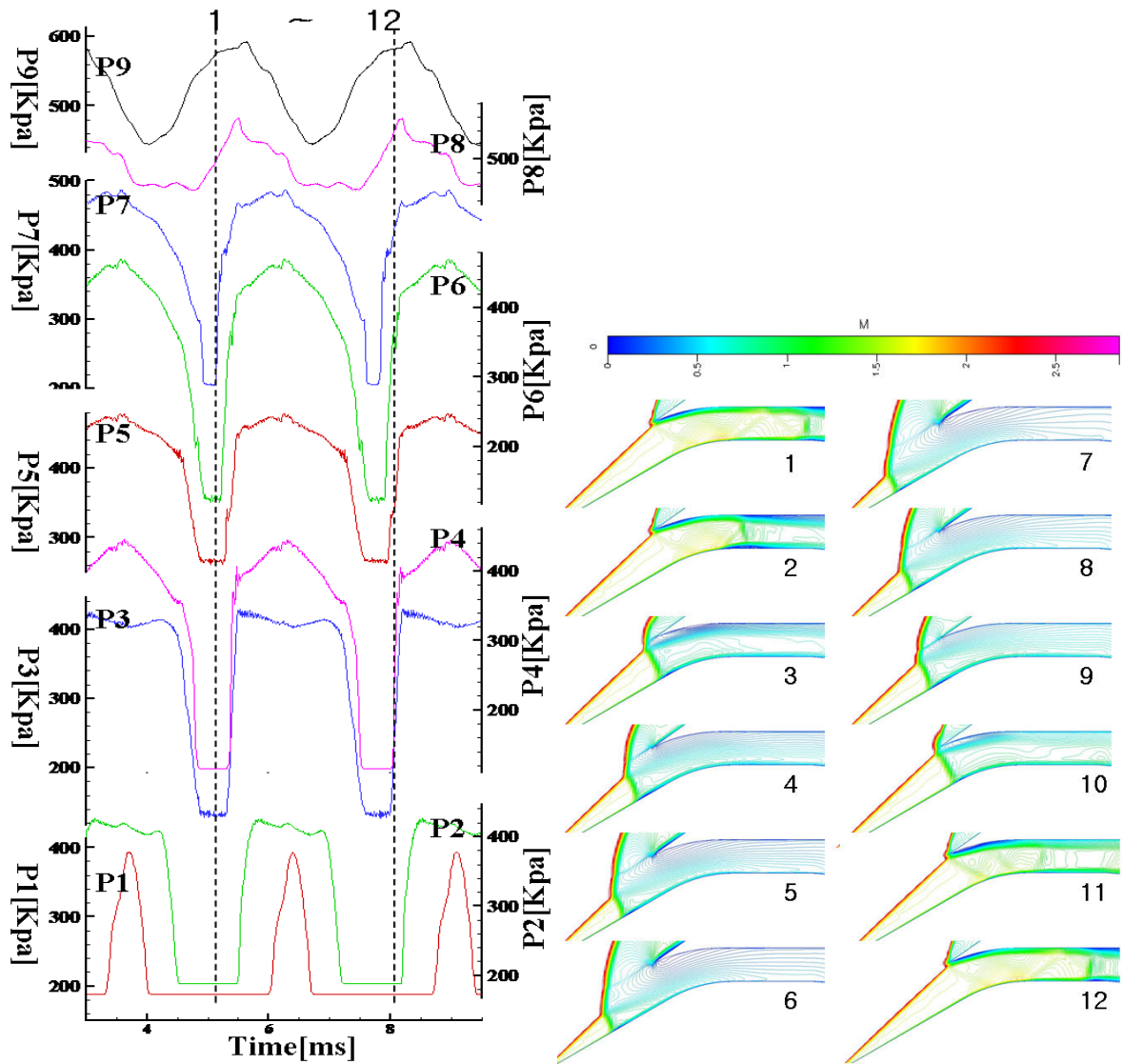


Fig 22. Pressure Distribution (AR=0.805)      Fig 23. Mach Contour (AR=0.805)

Fig 24과 25는 AR=0.703의 수치해석 결과이다. 면적비율이 감소함에 따라 충격파의 이동 거리는 더더욱 커지는 현상은 앞서 언급한 것과 동일하다. AR= 0.805의 결과와 비교하면 흡입구 목에 위치하던 충격파가 흡입구 선단 최대 지점까지 밀려 나오는데 걸리는 시간은 동일했다. 즉 면적 비율이 감소함에 따라 충격파의 이동 속도가 점차 빨라지

고 있음을 의미한다. 또한  $AR=0.904$ 의 결과와 비교하면 흡입구 선단으로 밀려왔던 충격파가 다시 후류로 후퇴한 후 초임계 및 임계 모드를 유지하면 챔버에 유동이 쌓이는 걸리는 시간이 점차 감소하고 있음을 관찰할 수 있다. 이는 앞서 제시한 실험 결과와 동일하며 이는 Fill-up 시간이 버즈가 발생하는 주파수와 밀접한 연관이 있음을 제시한다. 즉 챔버에 유동이 쌓이는 Fill-up 시간이 짧을수록 버즈의 발생 주파수와 진동 크기가 증가한다.

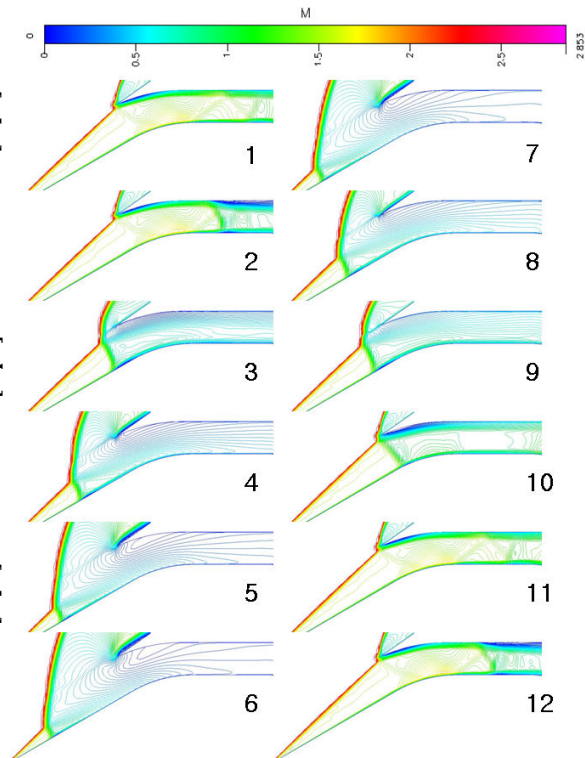
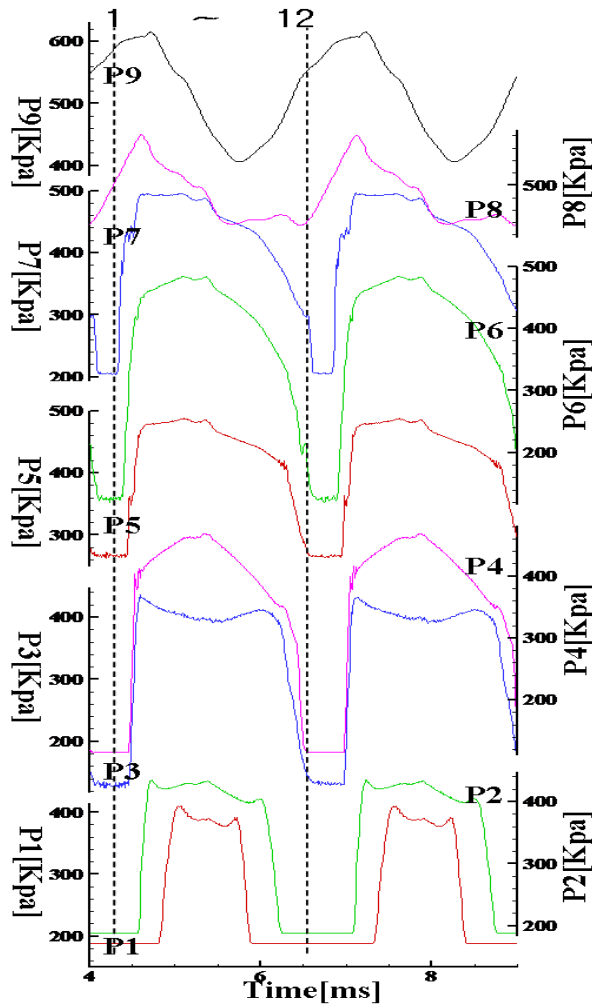


Fig 24. Pressure Distribution (AR=0.703)      Fig 25. Mach Contour (AR=0.703)

Fig 25은 압력 진동에 대한 주파수 분석 결과로서 면적비율에 따른 버즈 주파수의 특성을 나타내었다. 그림에서 나타낸 P1~P9은 Fig. 20에 제시되어 있는 압력 지점과 동일하다. 모든 AR의 경우에서 흡입구 후류에 해당하는 p9 지점보다 흡입구 선단에서 보다 큰 압력 진동을 보이는데 이는 Fig. 20, 22, 24의 지점별 압력선도로부터 이미 예상 가능한 결과이다. AR에 따른, 즉 배압에 따른 버즈 주파수에 대한 관찰된 특성을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 각각의 AR에 따라 모든 위치에서 압력은 동일한 주파수를 가지고 진동하지만 AR이 감소할수록 진동 주파수는 점차 증가한다.

2) AR이 감소할수록 흡입구 압축면과 카울에서의 압력 진동 거동에 대한 크기는 크게 다르지 않지만 흡입구 후류 챔버에서의 압력 거동은 크게 증가한다. 실험 결과로부터 이러한 챔버에서의 압력 거동이 현상이 흡입구의 Unstart와 밀접한 연관이 있을 것으로 판단된다.

3) AR이 감소함에 따라 각 지점에서의 진동 주파수가 증가하지만 각각의 AR에서 진동하는 고주파수와 저주파수간의 차이는 일정하게 선형적으로 증가한다.

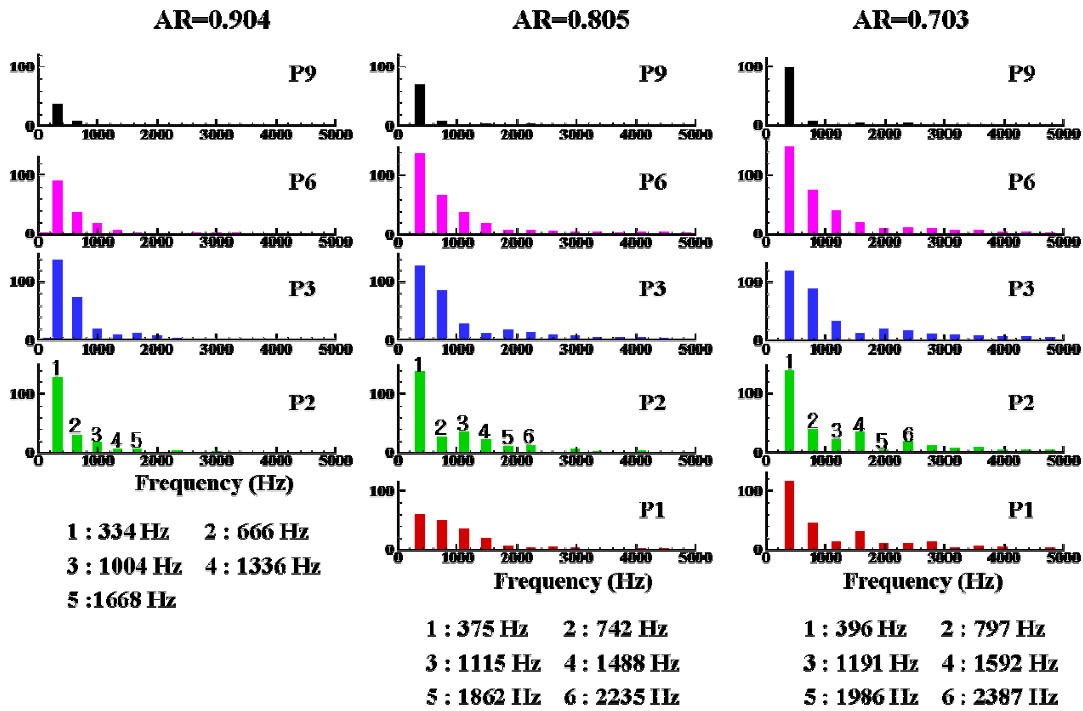


Fig 26. Frequency Characteristics of Buzz as AR

## V. 결론

본 연구에서는 마하수 2.5를 설계점으로 하는 초음속 공기 흡입구를 설계하고, 초음속 풍동을 이용하여 설계점에서 내부 비행조건, 즉 배압 변화에 따른 흡입구의 유동 특성과 성능을 파악하기 위해 실험과 수치해석을 수행하였다. 실험의 분석 및 수치 해석 결과와의 비교를 통하여 흡입구 내부의 유동특성과 버즈의 발생과 특성 및 흡입구 성능변화의 기본적 특징을 파악할 수 있었다. 또한 높은 배압에서 나타나는 여러 모드의 버즈와 그 특성을 관찰할 수 있었고 버즈가 야기되는 일반적인 메커니즘을 파악할 수 있었다.

면적 비율이 증가함에 따라, 즉 배압이 증가함에 따라, 종단 충격파가 흡입구 목 가까이 이동하며 전압력 회복률은 증가한다. 그러나 종단 수직 충격파가 카울을 벗어나는 배압 조건부터는 유동의 분출이 발생하면서 버즈 현상이 관찰되고 전압력 회복률이 급격하게 감소하여 흡입구의 성능이 낮아진다. 이보다 더 높은 배압에서는 종단 수직 충격파가 첫 번째 썩기 앞까지 이동하면서 unstart를 야기하였다.

버즈의 발생은 배압이 증가하면서 충격파가 흡입구 선단으로 밀려온 후, 밀려온 충격파



가 흡입구 목에서 경계층 박리를 야기한다. 경계층 박리로 인해 흡입구 목 위에 람다 충격파가 형성되고 목 위쪽에도 큰 박리 영역이 발생한다. 발생한 박리 영역이 유입 유량을 막게 되고, 흡입구 근처에서 압력이 급격히 상승하면서 충격파 시스템의 불안정을 야기한다. 이후 흡입구 목 근처의 압력상승이 중단 충격파를 흡입구 선단으로 밀어내면서 흡입구 모든 영역에서 압력이 상승한다. 이후 흡입구 선단에서 유입 유량의 방출이 발생하면서 흡입구 후류 챔버에서의 압력이 감소하지만 흡입구 목에서 발생한 박리의 영향으로 목에서의 압력은 여전히 증가하고 충격파는 계속해서 흡입구 상류로 밀려간다. 충격파가 밀려나오며 따라 흡입구 목에서의 박리 영역이 감소하게 되면서 유로가 넓어지게 되고 충격파는 후류로 후퇴한 후 같은 현상을 반복하게 되고 이것이 버즈의 한 사이클이 된다.

흡입구 유동은 아임계 모드에 가까운 면적비율에서는 버즈가 수 회 발생한 후 상당한 시간을 아임계 모드 상태를 유지하면서 흡입구 내부에 유동이 쌓이게 되는 Long time Fill-up 구간이 존재하고 버즈는 간헐적으로 발생한다. 면적비율이 점차 감소함에 따라 Long time Fill-up이 감소하고 버즈가 야기되는 주파수도 증가하다가 어느 면적비율 이하에서는 이 같은 구간이 존재하지 않으며 버즈가 연속적으로 발생하게 된다. 버즈가 연속적으로 발생하는 모드에서도 면적비율이 감소함에 따라 발생하는 버즈의 주파수는 증가하였다. 흡입구 Unstart는 충격파가 흡입구 내부로 더 이상 유입되지 못하면서 아임계 모드를 유지하면서 흡입구 내부에 유동이 쌓이는 Fill-up 과정이 존재하지 않게 되어 흡입구 내부 전체가 일종의 질식 상태에 이른다. Unstart의 경우 흡입구 내부 전 구간에 걸쳐 압력차가 매우 작으며 전압력 회복률의 급격한 감소가 나타난다.

버즈는 각각의 면적비율에 따라 모든 위치에서 압력은 동일한 주파수를 가지고 진동하지만 면적비율이 감소할수록 진동 주파수는 점차 증가한다. 면적비율이 감소할수록 흡입구 압축면과 카울에서의 압력 진동 거동에 대한 크기는 크게 다르지 않지만 흡입구 후류 챔버에서의 압력 거동은 크게 증가한다. 면적비율이 감소함에 따라 각 지점에서의 진동 주파수가 증가하지만 각각의 면적비율에서 진동하는 고주파수와 저주파수간의 차이는 일정하게 선형적으로 증가하는 특성을 보였다.

향후, 램제트 엔진 및 흡입구의 성능과 버즈의 특성을 정확하게 파악하기 위해서는 연소실에서 실제 연소가 일어났을 때 나타나는 버즈와 버즈로 인해 연소실에서 나타나는 현상이 함께 연구되어야 할 것이다. 또한 흡입구의 내부 조건에 해당하는 배압 혹은 연소실 압력에 따른 특성 뿐 아니라 받음각 혹은 유입 유동의 마하수의 변화 등 외부 조건에 따른 버즈 특성과 버즈로 인해 나타나는 흡입구의 성능에 대한 연구도 역시 진행되어야 할 것이다.

## VI. 참고문헌

- [1] Webster, F. F., "Liquid Fueled Integral Rocket Ramjet Technology Review," AIAA 1978-1108, AIAA/SAE 14th Joint Propulsion Conference, Las Vegas, Nevada, July 25-27, 1978.
- [2] Webster, F. F., "Ramjet Development Testing:" Journal of Propulsion and Power, Vol. 5, No. 5, 1987, pp. 565-576
- [3] Dunsworth, L. C. and Reed, G. J., "Ramjet Engine Testing and Simulation Techniques," Journal of Spacecraft, Vol. 16, No. 6, Nov.-Dec., 1979, pp.382-388.
- [4] Patrick E. Rodi, Saied Emami & Carl A. Trexler, "Unsteady Pressure Behavior in a Ramjet/Scramjet Inlet," Journal of Propulsion and Power, Vol. 12, No. 3, May-June 1996
- [5] Yoshinari Enomoto, & Ryoji Yanagi, "Experimental Study of Mach 5 Fixed Geometry Inlet for Subscale Ramjet Engine Test," Thirteenth international symposium on air breathing engines, pp. 212-222, 1997
- [6] Surber, L.E., and Numbers K.E., "Tactical Fighter Inlets", Intake Aerodynamics Vol. I. Von Karmen Institute of Fluid Dynamics Lecture Series 1988-04, 1988.
- [7] Ferri, A. and Nucci, L., "The Origin of Aerodynamic Instability of Supersonic Inlets at Subcritical Conditions ," NACA RM L 50K30, 1951.
- [8] Sterbentz, W.H. and Evvard, J.C.," Criterion for Prediction and Control of Ramjet Flow Pulsations," NACA TN 3506, August 1955.
- [9] Trimpi, R.L., "An Analysis of Buzzing in Supersonic Ramjets by a Modified One-dimensional Non-stationary Wave Theory," NACA TN 3695, 1956.
- [10] Connors, J.F., and Wollett, R.R., "Performance Characteristics of Several Types of Axially Symmetric Nose Inlets at Mach Number 3.85," NACA RM E52I15, November 1952.
- [11] Seddon, J. and Goldsmith, E.L., Intake Aerodynamics, AIAA Education Series, AIAA, New York, 1985.
- [12] Nagashima, T., Obokata, T., and Asanuma, T., "Experiment of Supersonic Intake Buzz," ISAS Report No. 481, University of Tokyo, May 1972.
- [13] Dailey, C.L. "Supersonic diffuser instability," CIT PhD Thesis, 1954
- [14] Oswatitsch, K., "Pressure Recovery for Missiles with Reaction Propulsion at High Supersonic Speeds", NACA TM-1140, 1948