

# 초음속 연소에서 연료 분사구 형상에 따른 연소성능 변화에 대한 실험적 연구

이경재\* · 강상훈\* · 이양지\* · 양수석\*

## A Study on the Combustion Performance with Variation of Fuel Injection Hole Configuration at Supersonic Combustion

Kyungjae Lee\*<sup>†</sup> · Sanghun Kang\* · Yangji Lee\* · Sooseok Yang\*

### ABSTRACT

In order to investigate the effect of fuel injection hole configuration within the scramjet combustor, experiment and quasi-one-dimensional analysis was performed. And the results were compared with experiment and analysis result which were performed in 2008 with same facility and test condition. Fuel injection hole size was decreased and quantity was increased. However the depth of fuel penetration and fuel flow were maintained. As a test result, combustion performance was increased significantly with no-cavity injector and slightly with plain-cavity. However, combustion performance with zigzag-cavity was decreased.

### 초 록

초음속 연소에서 연료를 분사하는 분사구의 형상에 따른 연소 성능의 변화를 파악하기 위하여 실험과 준일차 해석(Quasi-One Dimensional Analysis)을 수행하였으며, 결과 값을 본 팀에서 동일 설비 및 조건으로 2008년에 시험을 수행한 데이터와 비교해 보았다. 연료 분사구 형상은 2008년 수행하였던 시험모델과 비교하여 연료 분사구의 크기를 줄이고 개수를 증가시켰으며, 연료 분사구의 크기 및 개수는 동일한 연료 압력에서 연료의 분사량과 침투깊이가 동일하도록 결정되었다. 실험결과 공동이 없을 시에는 연료 분사구의 크기를 줄이고 개수를 늘렸을 때 연소성능이 큰 폭으로 증가하였지만, 일자형 공동에서는 그 영향이 미미하였다. 하지만 지그재그형 공동에서는 연료 분사구의 크기를 줄이고 개수를 늘렸을 때 오히려 연소성능이 저하되었다.

Key Words : Scramjet(스크램 제트), Supersonic Combustion(초음속연소), Fuel Injection(연료분사), Hydrogen(수소), Combustion Efficiency(연소효율)

\* 한국항공우주연구원 추진기관팀  
† 교신저자, E-mail : lucia01@kari.re.kr

스크램제트 엔진은 극초음속 영역에서 구동이 가능한 공기흡입식 차세대 엔진이다. 로켓 엔진의 무게 중 큰 부분을 차지하는 산화제 탱크가 필요하지 않아 로켓엔진을 대신하여 저비용-재사용 발사체로 사용이 가능하며, 전세계의 1일 생활권화를 가능하게 하는 극초음속 항공기의 엔진에도 사용이 가능하다[1].

스크램제트 엔진을 설계하는데 있어서 중요한 설계요소는 항력의 발생을 줄이는 것이다. 미국은 2004년 X-43A의 성능시험을 성공적으로 수행하였지만, 극초음속 상황에서의 항력 때문에 가속운전은 구현하지 못하였다. Spalding and Chi의 이론이 따르면 전체 비행체에서 발생하는 표면항력 중 60%가 초음속 연소기에서 발생하며, 이는 전체 항력의 28% 수준이라고 한다[2]. 이 때문에 초음속 연소기에서는 연소기의 길이를 줄여 연소기에서 발생하는 항력을 감소시키는 것이 매우 중요하다.

항공우주연구원에서는 극초음속 추진에 대한 연구를 수년간 진행하여 왔으며, 국내 및 국외의 여러 설비를 이용하여 성능시험을 수행하였다. 특히 2008년에는 여러 가지 형상의 공동을 적용한 스크램제트 연소기 지상성능시험을 통하여 초음속 연소를 구현하였으며, 공동 형상에 따른 연소 성능의 변화에 대한 연구를 성공적으로 수행하였다[3]. 또한 2009년 일본 JAXA에서 수행한 스크램제트 엔진 지상성능시험에서는 실제의 순추력을 얻는 연구결과를 달성하였다[4].

## 2. 시험장치 구성

### 2.1 시험설비

Figure 1은 항공우주연구원에서 본 시험을 위해 개발한 초음속 연소기가 일본 JAXA의 불어내기식 초음속 풍동인 RAMSYS에 설치된 모습이다. 고온의 전온도 획득을 위하여 RAMSYS에 설치되어 있는 Vitiated Heater를 사용하였다.

본 시험에 사용된 시험설비인 RAMSYS는 마하수 2.5의 유동의 구현이 가능하며, 시험설비의 자세한 사양은 Table 1.에 나타난 바와 같다[5].

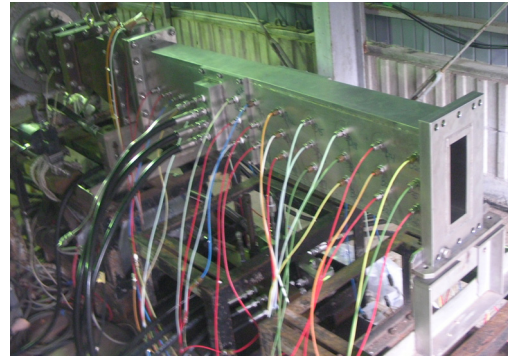


Fig. 1 Test Model with Test Facility

Table 1. Specification of the RAMSYS

Description	Value
전압력	1 ~ 1.5 Mpa
전온도	800 ~ 2,000 K
마하수	2.5
노즐 출구 면적	147.3 mm × 32 mm
시험시간	4초

### 2.2 시험모델

Figure 2는 본 시험에 사용된 시험모델의 형상이다. 2008년에 수행된 시험모델은 한 곳에서 연료를 분사하였지만, 본 시험에 사용된 시험모델은 두 곳에서 연료를 분사할 수 있도록 설계되었다. 하지만 본 시험에서는 연료 분사구 형상에 대한 비교를 위하여 후방 연료 분사구에는 더미 분사구를 장착하고 시험을 수행하였다. 연소압을 측정하기 위하여 시험모델의 윗면과 아랫면에서 정압력을 측정하였으며, Fig 1의 검은색 연료라인을 통하여 설비로부터 수소연료를 공급받아 연소에 사용하였다. 연료 분사구에는 연료의 공급압을 측정하기 위한 정압홀이 있으며, 시험 중 연료의 공급압을 측정하여 정확한 연료가 공급되었는지 확인하는데 사용하였다.

연료 분사구의 형상에 따른 연소 성능의 변화를 관찰하기 위하여 세 가지 형상의 공동이 적용된 연료 분사구가 시험에 사용되었다. 공동의 형상은 2008년 시험 때와 동일하지만, 분사구의 크기가 감소하고, 개수가 증가되었다. 분사구의 크기 및 개수는 같은 압력의 연료가 공급되었을 때, 동일한 연료량과 동일한 침투깊이를 갖도록

결정되었다. 편의상 그래프에서는 공동이 없는 형상의 연료 분사구를 N이라 칭하고, 일자형 공동은 P, 지그재그형 공동은 W라 구분하기로 하며, 대문자 영문 뒤에 붙어 있는 1, 2로 2008년 결과값과 2010년 결과값을 구분하였다.

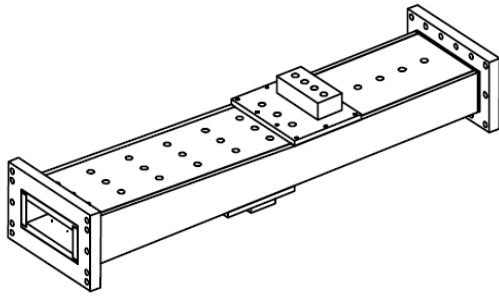


Fig. 2 Configuration of the Supersonic Combustor

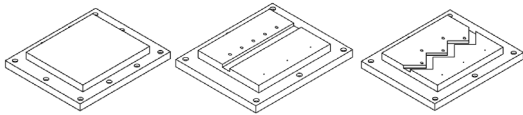


Fig. 3 Configuration of the Fuel Injector

### 3. 시험결과

초음속 연소기의 지상성능시험은 Table 2의 조건으로 수행이 되었다.

Table 2. Supersonic Combustor Test Condition

Description	Value
전압력	1.2 Mpa
전온도	2,000 K
마하수	2.5
정압력	70 kPa
정온도	889 K

#### 3.1 무공동 시험결과

가장 먼저 공동이 없는 형상에 대한 성능시험을 수행하였다. Figure 4는 공동이 없는 형상에 대한 성능시험 수행 결과를 나타낸 그래프이다. 공연비 증가에 따른 연소 압력의 증가가 관찰되었으며, 0.46의 공연비로 연료를 분사하였을 때

에는 열질식으로 인하여 연료 분사구 전단까지 압력증가가 계측되었다.

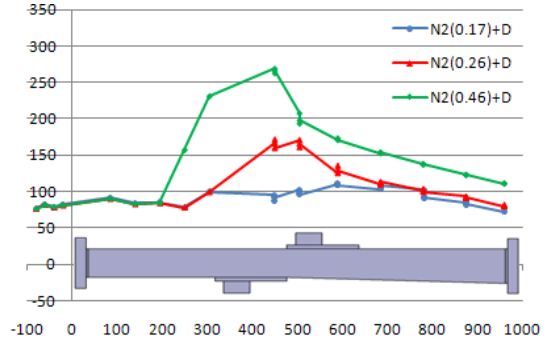


Fig. 4 Wall Pressure Distribution with No-Cavity

Figure 5부터 Fig. 7까지는 공동이 없는 연료 분사구 형상에서 연료량의 변화에 따른 연소 압력 변화를 비교한 그래프이다. Figure 5는 공연비를 0.17로 하여 분사하였을 때의 그래프이다. 그래프를 보면 2008년 결과값과 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이를 통하여 분사구의 형상이 바뀌어도 공동이 없을 때에는 0.17의 공연비에서 연소가 발생하지 않음을 알 수 있다.

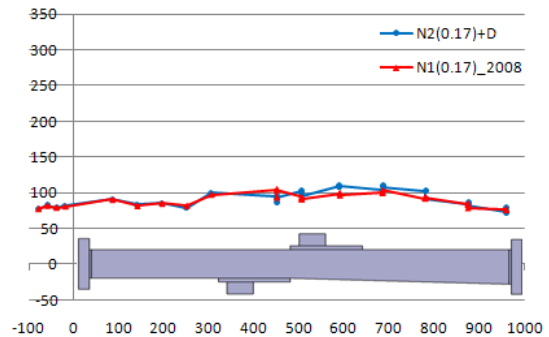


Fig. 5 Comparison of No-Cavity with  $\phi = 0.17$

Figure 6은 공연비를 0.26으로 설정하여 분사하였을 때의 그래프이다. 2008년 시험에서는 공동이 없는 형상에서 0.26의 공연비에서는 연소현상이 관측되지 않았지만 연료 분사구의 형상을 바꾸어 시험을 수행하였을 때에는 연소압력의 증가를 통하여 연소가 이루어졌음을 알 수 있었다. 이는 연료 분사구의 크기를 줄이고 개수를

증가시켰을 때 연료가 공기에 접촉하는 면적이 증가하게 되고, 이를 통하여 연소 성능이 증가되었기 때문인 것으로 보인다.

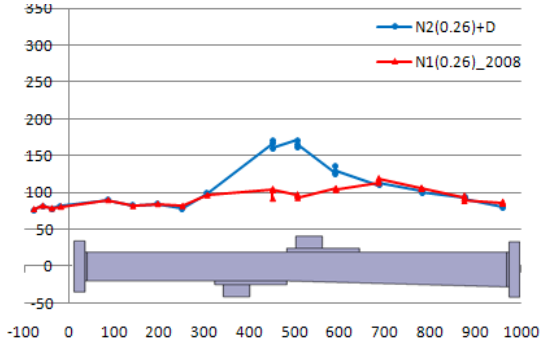


Fig. 6 Comparison of No-Cavity with  $\phi = 0.26$

Figure 7은 0.46의 공연비로 연료를 분사하였을 때의 그래프이다. 모든 결과에서 열질식으로 인한 압력상승이 계속되었으며, 2008년 그래프와 비교하였을 때 별다른 성능의 변화는 계속되지 않았다.

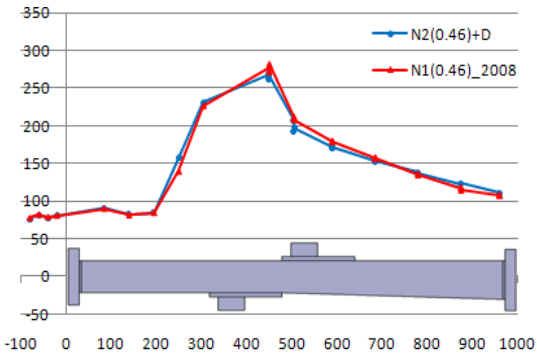


Fig. 7 Comparison of No-Cavity with  $\phi = 0.46$

### 3.2 일자형 공동 시험결과

두 번째로 일자형 공동 형상에 대한 성능시험을 수행하였다. Figure 8은 일자형 공동 형상에 대한 성능시험 수행 결과 그래프이다. 공동이 없을 때의 결과와 마찬가지로 공연비 증가에 따른 연소 압력의 증가가 관찰되었으며, 공동이 없을 때와는 다르게 0.17의 공연비에서도 연소현상에 따른 연소압력의 상승이 계속되어, 이 영역에서도 연소가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

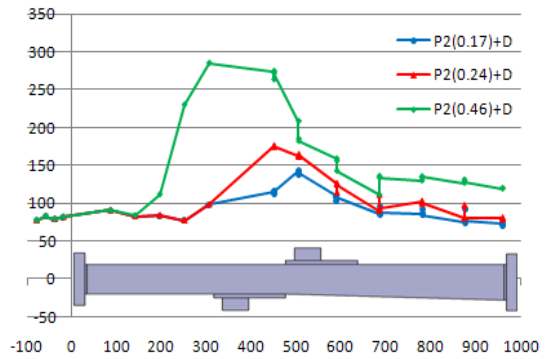


Fig. 8 Wall Pressure Distribution with Plain-Cavity

Figure 9부터 Fig. 11까지는 일자형 공동의 연료 분사구 형상에서 연료량의 변화에 따른 연소 압력 변화를 비교한 그래프이다. Figure 9는 0.17의 공연비로 연료를 분사하였을 때의 결과를 비교한 그래프이다. 2008년 결과에서는 매우 약한 연소현상이 계속되었지만 변경된 형상의 연료 분사구를 사용하였을 때에는 미약하나마 연소압력의 증가가 계속되었다. 이를 통하여 공연비 0.17로 연료를 분사할 때 분사구의 형상에 따라 연소 성능의 증가가 있으나, 그 변화량은 미미하다는 것을 알 수 있다.

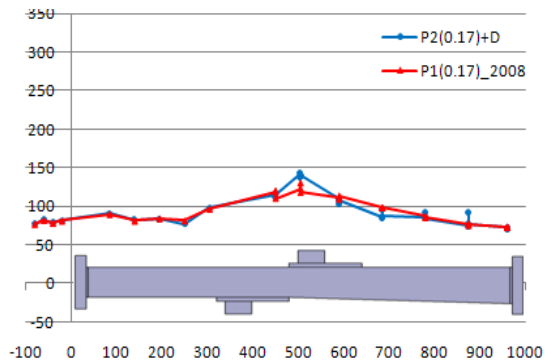


Fig. 9 Comparison of Plain-Cavity with  $\phi = 0.17$

Figure 10은 0.26의 공연비로 연료를 분사하였을 때의 결과값을 비교한 그래프이다. 공동이 없는 형상에서는 0.26의 공연비에서 연료 분사구 형상의 변화에 따라 매우 큰 연소압력의 증가가 관찰되었으나, 일자형 공동에서는 그러한 연소압력의 증가가 관찰되지 않았다. 이는 일자형 공동

을 사용하였을 때에는 일자형 공동으로 인한 연료의 혼합이 연소에 미치는 영향에 비해 연료 분사구 형상의 변화로 인한 영향이 미미하기 때문인 것으로 보인다.

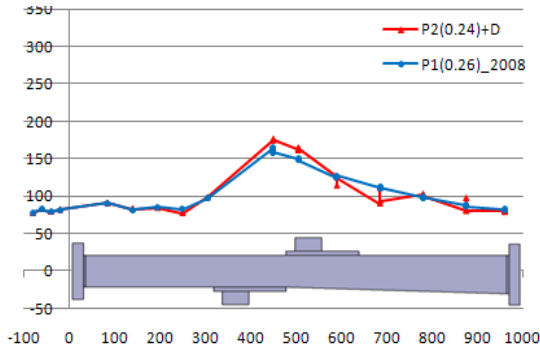


Fig. 10 Comparison of Plain-Cavity with  $\phi = 0.26$

Figure 11은 0.46의 공연비로 연료를 분사하였을 때의 결과값을 비교한 그래프이다. 두 가지 결과값 모두 열질식으로 인하여 연료 분사구 전단까지 압력이 상승하는 결과를 보여주고 있으며, 연소압력의 상승 또한 비슷한 양상을 보여주고 있다.

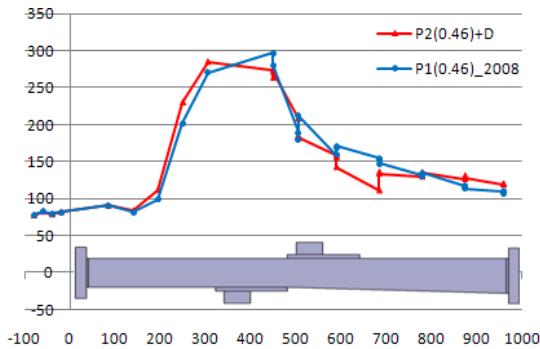


Fig. 11 Comparison of Plain-Cavity with  $\phi = 0.46$

위의 결과값들을 종합해 보면 공동이 없을 때와는 달리 일자형 공동에서는 연료분사구의 형상의 변경으로 인한 연소성능의 변화가 있으나 그 영향이 미미함을 알 수 있다.

### 3.3 지그재그형 공동 시험결과

마지막으로 지그재그형 공동 형상에 대한 성

능시험을 수행하였다. Figure 12는 지그재그형 공동 형상에 대한 성능시험 수행 결과를 나타낸 그래프이다. 앞의 두 가지 공동형상의 결과와 마찬가지로 공연비 증가에 따른 연소 압력의 증가가 관찰되었으며, 0.46의 공연비에서는 열질식으로 인하여 연료분사구 전단까지 압력이 상승하였음을 알 수 있다.

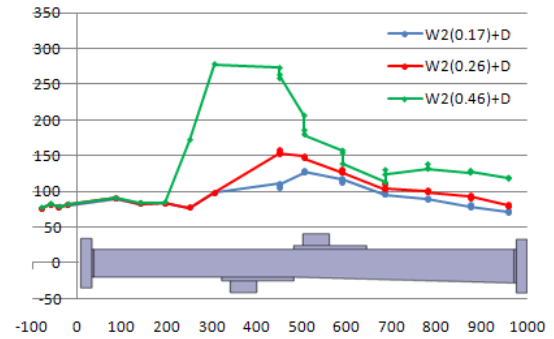


Fig. 12 Wall Pressure Distribution with Zigzag-Cavity

Figure 13부터 Fig. 14까지는 지그재그형 공동 형상에서 연료량의 변화에 따른 연소 압력 변화를 비교한 그래프이다. Figure 13은 공연비를 0.17로 하여 연료를 분사하였을 때의 결과를 비교한 그래프이다. 두 가지 결과값 모두 약한 연소압력의 상승을 보이고 있다. 하지만 앞에서 언급한 무공동과 일자형 공동의 결과와는 달리 오히려 연료 분사구의 형상이 변경된 후 연소압력이 약간 감소하였다.

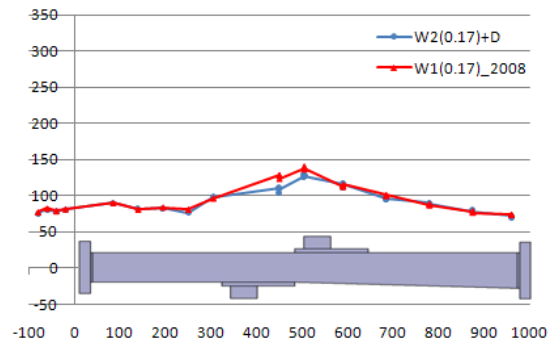


Fig. 13 Comparison of Zigzag-Cavity with  $\phi = 0.17$

Figure 14는 0.26의 공연비로 연료를 분사하였

을 때의 결과값을 비교한 그래프이다. 0.17의 공연비로 연료를 분사하였을 때와 마찬가지로 두 결과 모두 연소압력의 상승이 예측되었으나, 2008년의 결과값이 오히려 높은 연소압력을 보여주고 있다. 2008년 시험당시 지그재그형 공동은 일자형 공동과 공동이 없는 형상보다 더욱 높은 연소압력의 상승을 보여주었다. 이는 지그재그형 공동의 불규칙성에 의한 가로방향 압력 분포에 의한 것인데[1], 이러한 가로방향 압력 분포가 연료 분사구의 형상의 변화에 따른 연소성능 증가를 방해하고 오히려 감소시키고 있는 것으로 보여 진다.

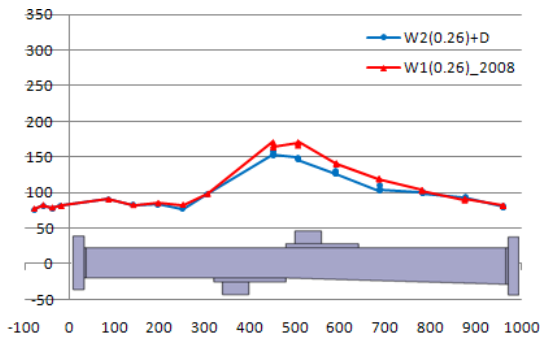


Fig. 14 Comparison of Zigzag-Cavity with  $\phi = 0.26$

Figure 15는 0.46의 공연비로 연료를 분사하였을 때의 결과값을 비교한 그래프이다. 두 가지의 결과값 모두 열질식으로 인하여 연료 분사구 전단까지 압력이 상승하는 결과를 보여주고 있으며, 연소압력의 상승또한 비슷한 양상을 보여주고 있다.

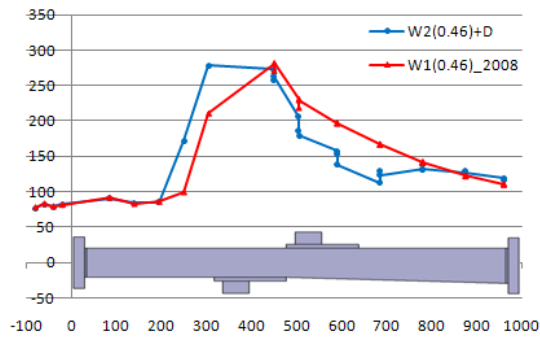


Fig. 15 Comparison of Zigzag-Cavity with  $\phi = 0.46$

위의 결과값들을 종합해 보면 지그재그형 공동에서는 연료분사구의 형상을 변경하였을 때, 지그재그형 공동의 특징인 가로방향의 압력 분포에 의한 영향으로 오히려 연소압력이 감소하였고 이에 따라 연소성능이 저하되었음을 알 수 있다.

#### 3.4 시험결과 종합

Figure 16은 0.17의 공연비로 연료를 분사하였을 때 모든 형상의 연료 분사구에서 발생한 연소압력을 비교한 그래프이다. 앞서서도 언급하였다시피 공동이 없을 때에는 연료분사구의 형상의 변경에도 불구하고 두 경우 모두 연소압력의 증가가 발생하지 않았으며, 일자형 공동에서는 연료 분사구 형상의 변화에 따라 연소압력의 증가가 관찰되었으나 그 효과는 미미하였다. 하지만 지그재그형 공동에서는 오히려 연소압력의 감소가 관찰되었다. 이러한 결과를 비교한 Fig 16을 보면 2008년 시험에 사용된 지그재그형 공동형상의 연료 분사구가 0.17의 공연비에서 가장 좋은 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

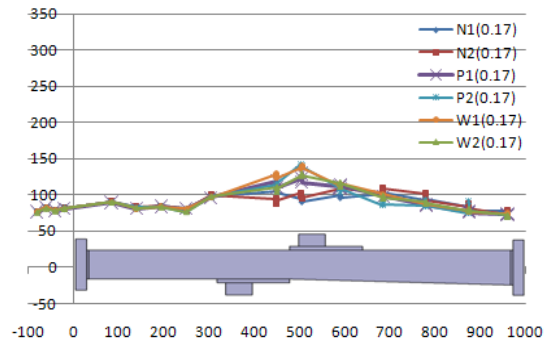


Fig. 16 Comparison Pressure Distribution with  $\phi = 0.17$

Figure 17은 공연비 0.26으로 분사하였을 때의 결과값을 비교한 그래프이다. 0.26의 공연비를 분사하였을 때에는 공동이 없는 형상에서 가장 큰 연소성능의 변화가 예측되었다. 최대 연소압력이 예측된 지점에서 약 80%의 연소압력의 증가를 보여주었다. 일자형 공동을 사용하였을 때에는 연료 분사구의 형상 변경에 따라 연소압력이 증가하였으나, 약 7%정도로 공동이 없었을



때와 비교하여 미미한 증가를 보여주었다. 하지만 지그재그형 공동을 사용하였을 때에는 오히려 연소압력이 약 8%정도 감소하였다.

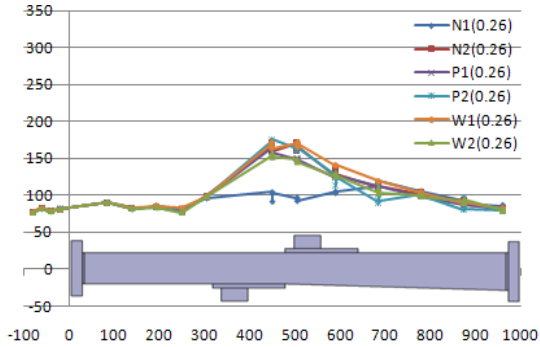


Fig. 17 Comparison Pressure Distribution with  $\phi = 0.26$

Figure 18은 공연비 0.46으로 연료를 분사하였을 때의 결과값을 비교한 그래프이다. 모든 결과값에서 열질식으로 인하여 연료 분사구 전단까지 압력이 상승하는 결과를 관찰할 수 있다.

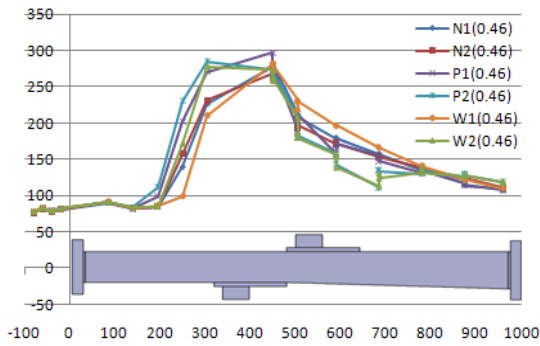


Fig. 18 Comparison Pressure Distribution with  $\phi = 0.46$

Figure 16에서 Fig 18까지의 결과를 종합하여 보면 2008년에 사용된 지그재그형 공동의 연료 분사구가 열 질식이 발생하지 않는 영역에서 가장 좋은 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 준일차 해석

초음속 연소기의 연소압력 상승에 따른 연소 성능을 추측하기 위하여 준일차 해석을 수행하

였다[6]. 준일차 해석은 연소압력을 바탕으로 수행되었으며, 2008년 시험결과를 바탕으로 한 준일차 해석에서는 지그재그형상의 공동을 사용한 연료 분사구가 가장 좋은 연소효율을 보여주었다[1].

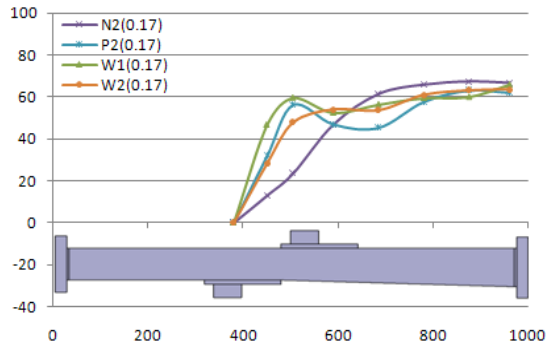


Fig. 19 Estimated Combustion Efficiency with  $\phi = 0.17$

Figure 19는 0.17의 공연비로 연료를 분사하였을 때의 연소압력 결과값을 이용하여 준일차 해석을 수행한 결과 그래프이다. 비교를 위하여 2008년 해석 결과 중 가장 좋은 연소효율을 보여주었던 지그재그형 공동에 대한 연소효율을 함께 나타내었다. 모든 연료 분사구 형상에서 약 60%에 가까운 최종 연소 효율을 보여주고 있다. 그 중 공동이 없는 형상의 연료 분사구가 후방에서 높은 연소효율을 보여주었다. 이는 공동이 없을 시에는 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어지지 않아 연소기 후방에서 연료의 연소가 이루어졌음을 보여주는 결과이며, 이를 통하여 공동이 없는 형상의 연료 분사구를 사용하면 연소기의 길이가 다른 연료 분사구를 사용하였을 때와 비교하여 길어져야 한다는 것을 알 수 있다. 이는 연소기에서 발생하는 항력을 증가시켜 전체 스크램제트 엔진의 성능을 저하시킬 수 있다. 일자형 공동에 대한 해석 결과값을 보면 지그재그형 그래프와 마찬가지로 연료 분사구 바로 후방에서 높은 연소효율을 보여주었다. 이는 공동의 영향 때문에 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어졌기 때문으로 판단된다. 지그재그형 공동에 대한 해석결과를 보면 연소압력 결과와 마찬가지로 연료 분사구의 형상변화에 따른 연소성능의 저

하를 관찰할 수 있다. Figure 19를 종합적으로 보면 앞에서 연소압력 결과를 토대로 유추한 분석과 마찬가지로 2008년 시험에서 사용된 지그재그형 공동의 연료 분사구가 가장 좋은 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

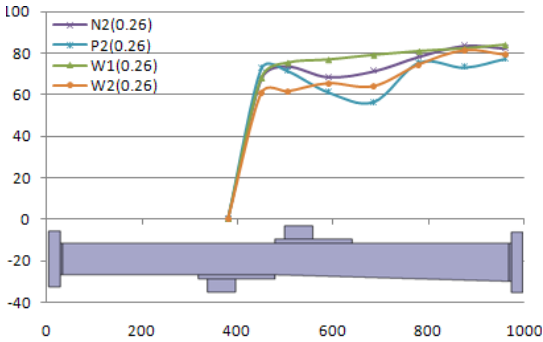


Fig. 20 Estimated Combustion Efficiency with  $\phi = 0.26$

Figure 20은 0.26의 공연비로 연료를 분사하였을 때의 연소압력 결과값을 이용하여 준일차 해석을 수행한 결과 그래프이다. 모든 연료 분사구가 연소기 후방에서 약 80%의 최종 연소효율을 보여주고 있다. 하지만 연료가 분사된 직후의 연소효율 값을 보면 형상이 변경된 지그재그형 연료 분사구는 다른 연료 분사구에 비해 낮은 연소효율을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 앞에서 언급했듯이 형상이 변경된 지그재그형 연료 분사구의 가로 방향 압력 변동이 연료 분사구 형상의 변화에 따른 효과와 결합하여 오히려 연소 성능을 저하시키고 있음을 알 수 있다. 이는 변경된 지그재그형 연소기를 사용하기 위해서는 초음속 연소기의 길이가 다른 연료 분사구를 사용했을 때에 비하여 길어져야 한다는 것을 의미하며, 이는 전체 연소기의 항력증가를 통한 성능의 저하를 가져올 수 있다. 연료 분사구의 형상이 변경된 일자형 공동과 무공동에 대한 결과값을 보면 연소기가 끝나는 지점에서의 연소효율은 예전 지그재그형 연소기의 연소효율과 비슷한 값을 보여주고 있으나, 가로방향 500 ~ 800 mm의 범위에서는 예전 지그재그형 연료 분사구의 연소효율에 비하여 낮은 값을 보여주고 있으며, 이를 통하여 형상이 변경된 연료

분사구와 무공동 또는 일자형 공동을 함께 사용하여 예전 지그재그형상과 동일한 연소성능을 구현하기 위해서는 연소기의 길이가 길어져야 함을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급하였듯이, 스크램제트 엔진의 성능저하를 유발할 것이다. Figure 19와 Fig. 20의 결과값을 종합하여 판단할 때, 지그재그형 공동을 가지고 있는 예전 형상의 연료 분사구가 가장 높은 성능을 가지고 있다고 말할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 초음속 연소기의 연료 분사구 형상변경에 따른 연소성능 변화를 파악하기 위한 지상성능시험을 일본 JAXA의 불어내기식 초음속풍동을 이용하여 수행하였다. 초음속 연소기의 입구조건은 마하수 2.5로 고정하였으며, 설비에 장착되어 있는 Vitiated Heater를 이용하여 2,000K의 공기를 공급하여 시험을 수행하였다. 형상변경은 연료 분사구의 크기를 줄이고 개수를 늘이도록 설계 되었으며, 형상이 변경되어도 같은 압력의 연료공급 시 연료의 침투깊이와 연료량이 동일하게 유지될 수 있도록 하였다.

시험결과 공동이 없는 형상에서는 형상변경을 통하여 연소성능의 확연한 증가가 관찰되었으며, 일자형 공동에서는 연소 성능의 증가가 보이나 그 영향은 공동이 없는 형상에 비하여 미미하였다. 하지만 지그재그형 공동에서는 오히려 형상변경 때문에 연소 성능의 저하가 관찰되었다. 이러한 모든 결과를 종합하였을 때, 공동이 없을 때와 일자형 공동에서의 연소압력 상승에도 불구하고 예전 지그재그형 연료 분사구가 제일 좋은 성능을 보여줌을 알 수 있었다.

이러한 결과는 연소압력을 바탕으로 수행하였던 준일차 해석에서도 명확하게 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Sanghun Kang, Yangji Lee, Sooseok Yang,



- “Scramjet Engine Combustor Tests in a Supersonic Wind Tunnel with a Vitiated Air Heater,” AIAA-JPC, 2010
2. D.B. Spalding, S. W. Chi, “Skin Friction Expected by a Compressible Fluid Stream on a Flat Plate,” AIAA Journal, AIAA, 1963, Vol 1, No. 9, pp 2160-2161
  3. Yangji Lee, Sanghun Kang, Sooseok Yang, “Ground Test Result Analysis of the Model Scramjet Engine and Components,” AJCPP, 2010
  4. 강상훈, 이양지, 양수석, “ahepf 스크램제트 엔진의 성능개선 및 지상시험,” 한국추진공학회지, 제14권, 제2호, 2010, pp 10-18
  5. Tomioka, S., Kobayashi, K., Kudo, K., Murakami, A. and Kanda, T., “Performance of Supersonic Combustors with Fuel Injection in Divergence Sections,” Journal of Propulsion and Power, AIAA, 2006, Vol. 22, No. 1, pp 370-380
  6. Heiser, W. H., Pratt, D. T., “Hypersonic Airbreathing Propulsion,” AIAA Education Series, AIAA, 1994, pp 277-385