

## KSR-III 화염 편향기의 유동해석

## Flow Computation over KSR-III Flume Deflector

\*최 성 욱<sup>1)</sup>, 김 인 선<sup>2)</sup>

S. W. Choi and I. S. Kim

Flow computations have been conducted to study the impingement flowfield over the KSR-III flume deflector. To validate Euler solver for the jet impingement flowfield, the jet flow over a double wedge deflector have been calculated and showed reasonable agreement with experimental data. The transient flow behavior of flume over deflector have been investigated and the flume from the rocket nozzle proved to be getting out of the deflector safely and the thermal effect on the base region of rocket was not considerable.

## 1. 서 론

발사체의 발사시는 배기화염, 즉 초음속 제트가 노즐로부터 배출되는데, 이 제트는 지상구조물과 충돌하게되고 때로는 발사체 쪽으로 역류하게된다. 이러한 초음속 제트의 지면 또는 화염편향장치와의 충돌시 발생하는 유동현상에 대해서는 참고문헌 [1-2]에 여러가지 경우에 대한 실험결과가 소개되어 있는데, 이러한 유동의 특성은 주로 제트의 팽창비, 노즐과 평판 또는 화염편향기와의 거리, 편향각도에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. KSR-III(기본형)의 발사도 노즐에서 분출되는 화염이 화염편향기 위에서 이루어지도록 되어있다. 본 연구에서는 KSR-III를 위해 설계된 화염편향기의 배출능력을 확인하고, 발사대 출발시 배기화염이 로켓 본체에 미치는 공력 및 열적 영향을 파악하기 위해 로켓 노즐과 화염편향기를 3차원 형상화하고, 시간에 따른 발사화염의 전파 과정을 수치해석하였다.

KSR-III 기본형의 발사는 Fig. 1과 같이 설계된 화염편향기 위에서 이루어지도록 함으로써 엔진에서 분출된 화염이 발사체 하부와의 간섭 없이 안전하게 빠져나갈 수 있도록 한다. 따라서 본 화염편향기에 대한 유동계산의 목적은 발사체의 지상 발사 단계에서 노즐에서 분출된 고온 고압의 제트가 분출 및 지상 구조물과의 충돌 과정에서 역류된 흐름의 일부가 발사체의 하부에 위치하는 부품에 공력 및 열적으로 얼마나 영향을 미치는가를 파악하는 것이다. 유동계산은 상용코드인 CFD-FASTRAN[3]을 이용하였으며, 적용된 지배방정식은 압축성 비점성 방정식인 Euler 방정식이다. 충돌제트에 의해 생성되는 복잡한 유동구조를 이해하고, KSR-III 화염편향기에 대한 계산결과의 신뢰성 확보를 위해 본 KSR-III 화염편향기의 형상과 유사하고 실험치가 존재하는 웨지 편향기(double wedge deflector)에 분출되는 제트류[2]에 대한 유동계산을 먼저 수행하였다.

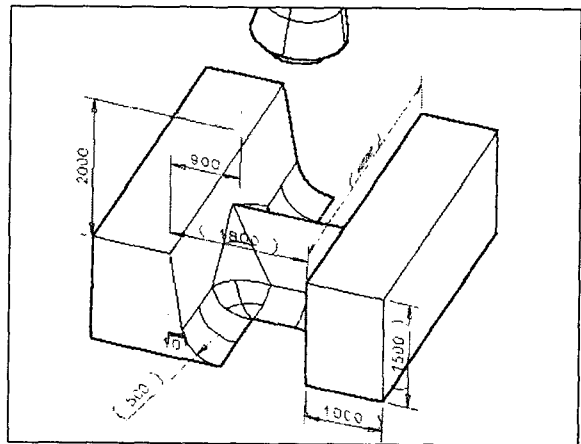


Fig. 1 KSR-III flume deflector

1) 한국항공우주연구원 공력성능연구그룹 (305-333 대전시 유성구 어은동 52-8 Tel : 042-860-2315)

2) 한국항공우주연구원 공력성능연구그룹 (305-333 대전시 유성구 어은동 52-8 Tel : 042-860-2316)



## 2. 수치적 방법

CFD-FASTRAN의 수행을 위해 설정된 수치적 방법 및 기본적인 변수들은 다음과 같다.

- Numerical Method
Euler Equation, Roe's FDS
2nd order, minmod limiter, Fully implicit
- Steady Calculation
CFL No.=0.1-2, No. of sub-iteration=20
- Unsteady Calculation
CFL No.=5-50, No. of sub-iteration=20

## 3. 분출류 해석을 위한 코드검증

KSR-III 화염편향기 유동계산에 앞서 유동해석을 위해 사용된 CFD-FASTRAN의 분출류 계산에 대한 정확도 및 비점성(Euler) 유동계산의 적합성을 파악하기 위해 참고문헌[2]에서 제시된 웨지 편향기 분출되는 제트의 유동계산을 수행하였다. 실험에 사용된 웨지 편향기의 전체적인 형상 및 제원은 Fig. 2에 나타나 있으며, 계산에 사용된 유동조건은 다음과 같다.

노즐 출구 마하수( $M_{jet}$ ) :	3.1
노즐 출구 팽창비( $P_{jet}/P_{\infty}$ ) :	0.81
노즐 출구 직경( $D$ ) :	23mm
노즐 출구 반각( $\theta_N$ ) :	15°
노즐 출구 위치( $Z_c/D$ ) :	2, 3D

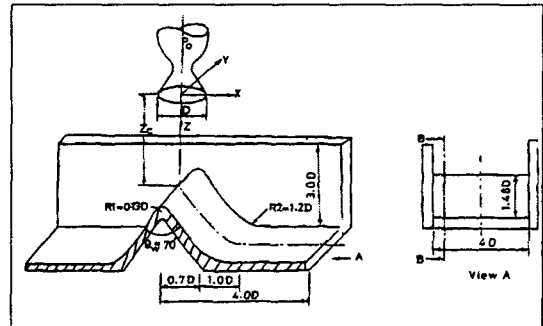


Fig. 2 Wedge deflector model

위에서 제시된 바와 같이 실험에 사용된 노즐은 출구 압력비가 0.81로써 과대팽창(over-expanded) 초음속 제트유동으로 정의될 수 있으며, 이 팽창비와 출구직경, 그리고 등엔트로피 관계식을 적용하여 노즐의 3차원 형상을 구현하였다. 이와 같은 분출류 유동 계산시에 주어진 노즐의 출구조건만을 경계조건으로 적용하여 계산을 수행할 수도 있으나, 이 경우 노즐의 전체 출구 면이 균등한 유동 값을 가지게 되어 실제 노즐의 출구 특성과는 다르게 나타남으로써 전체적인 계산 결과의 엄밀성이 저하될 수 있음을 수치적 실험을 통해 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 본 검증문제 및 KSR-III 화염 편향기에 대해 노즐의 형상을 생성하여 모든 계산이 노즐의 정체면으로부터 이루어지도록 하였다.

본 검증형상은 x 및 y 평면에 대한 대칭 형상으로서 노즐의 중심축을 기준으로 1/4부분에 대해서만 격자를 생성하여 유동계산을 수행하였다. 격자는 Gridgen[4]을 이용하여 6개의 블록에 총 격자수 261,950개( $Z_c/D=2$ ) 및 370,250개( $Z_c/D=3$ )로 생성하였다. 여기서  $Z_c/D=3$  경우의 격자수 증가는 노즐의 수직높이 증가에 따른 것으로서 전체적인 격자형태는  $Z_c/D=2$ 와 동일하다. 생성된 웨지 편향기에 대한 격자개는 Fig. 3에 나타나 있다. 본 검증 유동계산은 국부시간간격(local time step)에 의한 정상(steady) 유동계산으로 이루어 졌으며, 두 가지의 노즐 위치( $Z_c/D=2, 3$ )에 대해 계산을 수행하여 실험 결과와 비교하였다.

출구 압력비가 1이하인 과대팽창 노즐로부터 분출되는 초음속 제트가 웨지 편향기에 충돌하면서 나

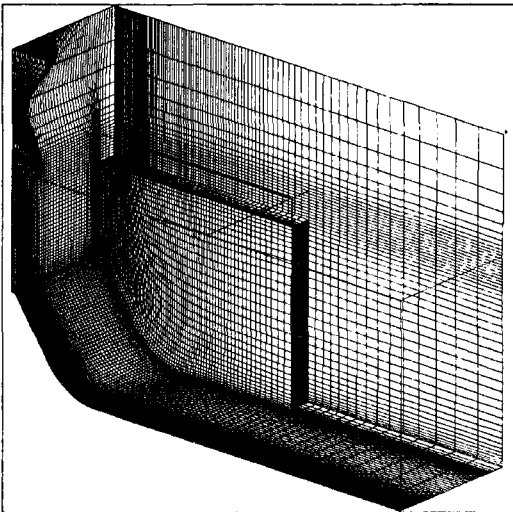


Fig. 3 Grid system of wedge deflector

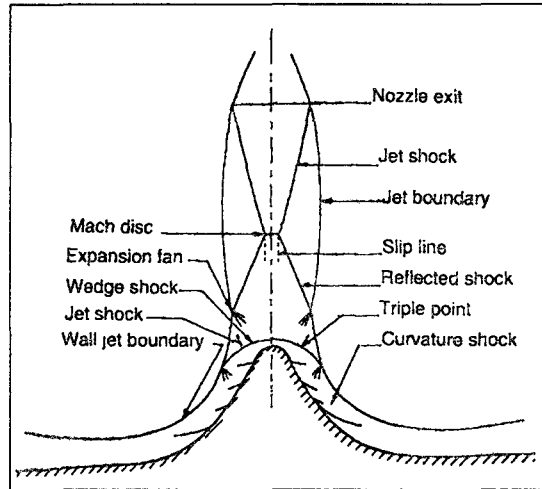


Fig. 4 Flow structure of jet impingement

타나는 유동의 형태는 Fig. 1과 같이 복잡한 유동구조로 생성되어 나타난다. 이 그림으로부터 제트 유동장은 대표적으로 제트 충격파(jet shock), 마하 디스크(Mach disk), 미끄럼 선(slip line), 그리고 반사 충격파(reflected shock) 등과 같은 다양한 형태의 파로 구성되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5와 6은  $Z_c/D=2$  및 3에 대한 계산 결과(밀도분포)를 실험의 쉐리렌 사진과 비교한 것이다. Fig. 5 ( $Z_c/D=2$ )의 경우, 계산된 밀도 분포에서 나타나는 제트의 제트 경계면, 제트 충격파, 그리고 마하 디스크가 실험의 경우와 그 형태와 위치가 매우 유사하게 나타남을 볼 수 있으며, 웨지가 끝나는 지점에서 또 하나의 압축파 포켓이 형성되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 6은  $Z_c/D=3$ 의 경우로써, 마하 디스크의 수직 위치에서 다소 차이가 있기는 하지만 전체적인 유동장의 형태는 실험과 유사하게 나타나고 있다. 특히, 웨지 정점의 상부에서 발생하는 웨지 충격파의 형태가 확연히 나타나고 있다. 또한,  $Z_c/D=2$ 의 경우와 마찬가지로 웨지 끝부분의 압축파 포켓이 형성되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 7과 8은 웨지 편향기 중심선상에서의 정압분포를 나타낸 곡선으로서 중심선상에서의 정압을 노즐의 챔버 압력으로 나눈 것이다. Fig. 7 ( $Z_c/D=2$ )의 경우에 웨지 정점근처의 최대압력은 계산치가 다소 낮게 나타나고 있으며, Fig. 5에서 언급한 웨지의 끝단 부분의 압축파에 의한 압력의 2차 상승도 그 경향은 비슷하지만 정량적으로는 계산치가 낮게 예측하고 있음을 볼 수 있다. 전체적으로 압력의 패턴이 실험의 경우와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 8에서 보여주는  $Z_c/D=3$ 의 정압분포에서는 웨지 정점근처에서의 압력 피크는 실험치와 매우 유사한 형태로 나타나고 있으나, 웨지 끝 부분에서 발생하는 2차 압력상승의 피크는 그 위치에서 실험치와 많은 차이를 나타내고 있다. 즉 계산은 실험에 비해 보다 먼저 2차의 압력의 상승이 일어나는 것으로 예측되었다.

Fig. 9와 10은 웨지 편향기 주위의 전체적인 밀도 분포를 보여주는 것으로서 특히 웨지 벽면에서 형성되는 유동장의 형태를 보여주고 있다. Fig. 9 ( $Z_c/D=2$ )의 경우에 제트에 의해서 웨지 벽면에 나타나는 최대 압력의 피크점은 웨지 중심부의 정점에서 다소 벗어난 지점에서 형성되고 있는데, 이러한 현상은 실험에서도 관찰되었다. Fig. 5를 통해 언급되었던 웨지 끝단 부분의 압축파에 의한 압력의 상승은 웨지 벽면의 y 방향으로까지 연장되어 일종의 "압축파 담"(compression wave wall)을 형성함을 볼 수 있는데, 이러한 현상은 Fig. 10 ( $Z_c/D=3$ )의 경우에서도 유사하게 나타나고 있다. Fig. 10의  $Z_c/D=3$ 의 경우에는 Fig. 9의  $Z_c/D=2$ 에서 나타났던 웨지 정점에서 이탈된 압력의 피크영역이 웨지의 중심 정점까지 연결되어 나타남을 볼 수 있다.

검증문제인 웨지 편향기의 형상은 본 연구에서 최종적으로 해석 하고자 하는 KSR-III 화염편향기와

형상 및 유동조건에서 유사한 것으로서, 이상과 같은 검증예제에 대한 결과는 Euler 방정식을 이용한 화염 편향기에 대한 유동해석의 타당성을 입증하는 결과를 제시하였다.

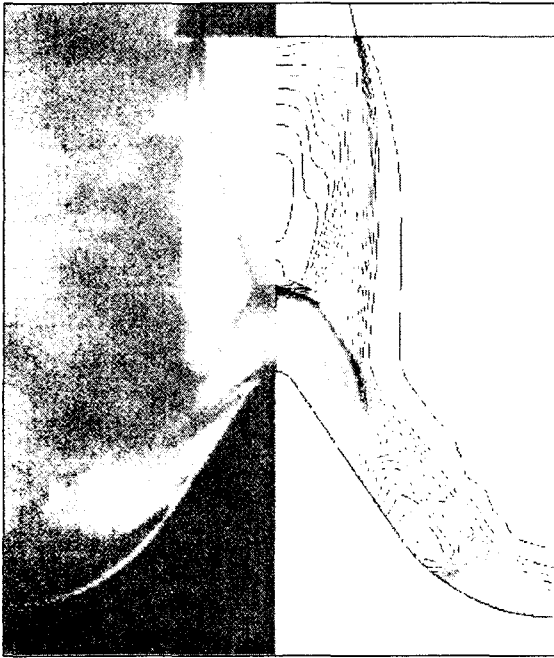


Fig. 5 Comparison of two flowfields ( $Z_c/D=2$ )  
L: Schlieren, R: Density Contour

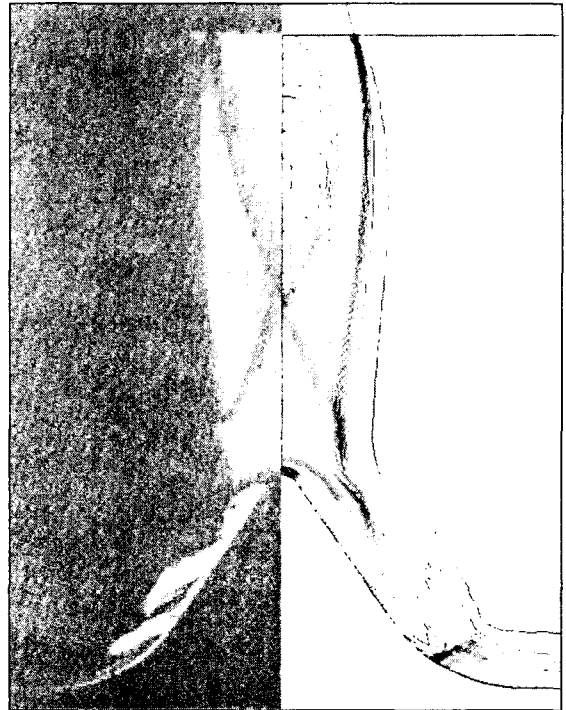


Fig. 6 Comparison of two flowfields ( $Z_c/D=3$ )  
L: Schlieren, R: Density Contour

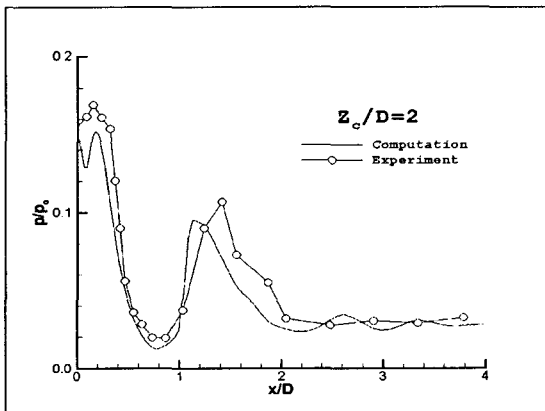


Fig. 7 Centerline static pressure ( $Z_c/D=2$ )

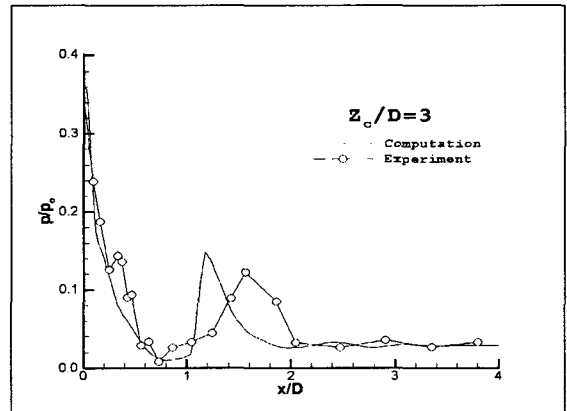


Fig. 8 Centerline static pressure ( $Z_c/D=3$ )

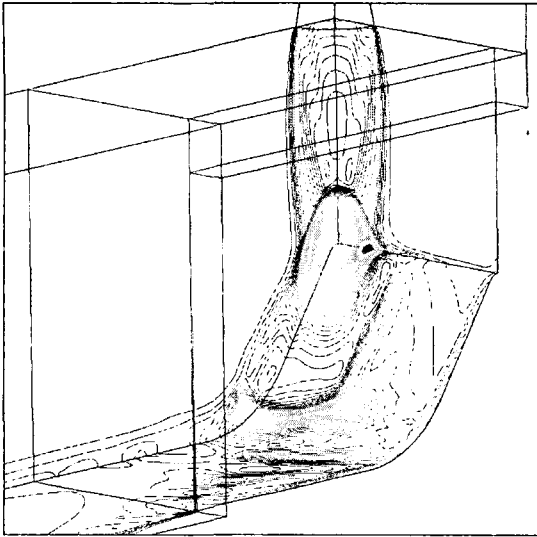


Fig. 9 Density distribution over wedge deflector ( $Z_c/D=2$ )

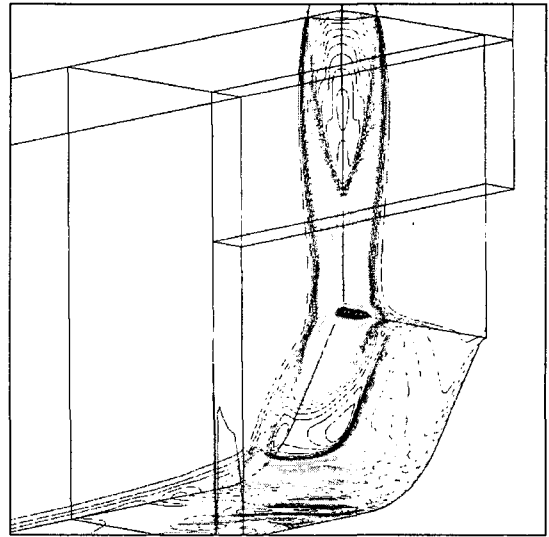


Fig. 10 Density distribution over wedge deflector ( $Z_c/D=3$ )

#### 4. KSR-III 화염 편향기 유동해석

KSR-III 발사대의 화염편향기에 대한 유동해석은 압축성 비점성 방정식을 이용하여 시간 정확도를 갖는 비정상 계산으로 이루어 졌다. 유동계산은 노즐의 챔버 조건( $P_c=200\text{psi}$ ,  $T_c=3,388\text{K}$ )으로부터 시작하여 풀림이 시간에 따라 노즐을 지나 화염편향기에 부딪혀 나오기까지 수행되어 시간에 따른 풀림의 거동을 파악하도록 하였다. 따라서 유동의 초기조건은 노즐의 챔버면을 제외하고는 전 영역에 대해 속도가 없는 지상 대기조건을 적용하였다.

유동계산에 사용된 격자계는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 노즐의 내벽 및 외벽, 그리고 화염편향기에 대해서 생성되었으며, 유동의 대칭성을 고려하여 전체의 형상의 반(y축 대칭)에 대해서만 격자계를 구성하여 계산하였다. 생성된 격자계의 블록 수는 6개로 구성되었으며, 총 격자수는 332,800개이다.

본 화염 편향기에 대한 유동계산의 목적은 발사체의 지상 발사 단계에서 노즐에서 분사된 고온 고압의 제트가 지면에 충돌하면서 역류된 흐름의 일부가 발사체의 하부에 위치하는 부분품에 광력 및 열적으로 얼마나 영향을 미치는가를 파악하는 것이다. Fig. 12는 노즐의 챔버면으로부터 성장하는 풀림의 시간에 따른 온도분포를 보여주는 것으로서 이것을 통해 풀림이 발사체의 기저부에 미치는 영향을 정성적으로 파악할 수 있다.

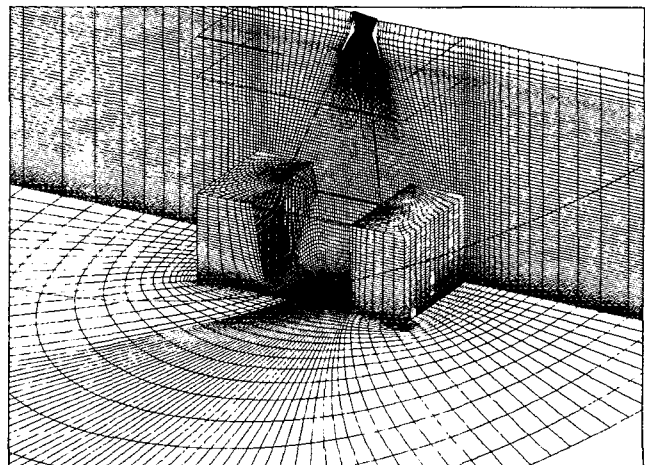


Fig. 11 Grid system of KSR-III flame deflector

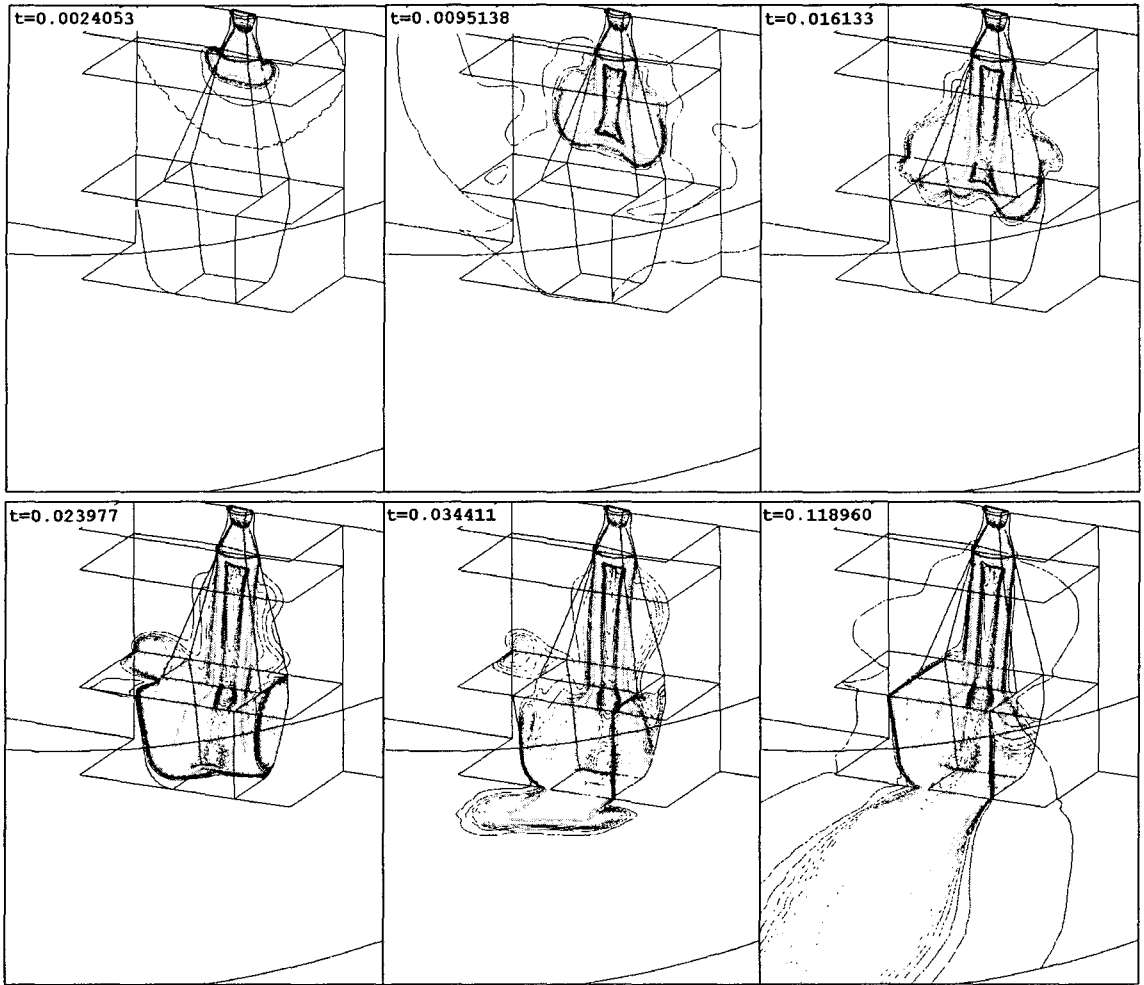


Fig. 12 Transient behavior of flume (Temperature distribution)

시간 0.00951초를 지나 플룸은 노즐을 완전히 빠져 나와 버섯형태의 플룸의 열 경계면을 형성하게 되지만 화염편향기에는 열적인 영향을 미치지 않는다. 시간 0.0161초에 플룸의 열 경계면은 화염편향기에 도달하게 되고 플룸의 일부가 윗 방향으로 역류되기는 하지만 그 영향이 매우 작음을 볼 수 있다. 시간 0.0239초에 플룸은 화염편향기의 중앙에 위치하는 썩기 형태의 편향기에 의해 둘로 쪼개지게 되고 화염은 화염편향기의 바닥까지 도달한다. 플룸이 분출된지 0.0349초에 플룸의 열 경계면은 화염편향기의 내부를 빠져 나와 방출되기 시작하지만 수직방향으로의 플룸의 역류량은 매우 작다. 시간이 더욱 경과되면서 플룸은 화염편향기를 완전히 빠져 나오게 되고, 시간 0.119초 정도에서는 플룸의 거동이 거의 변화되지 않는 정상상태로 도달하게 된다. 이러한 정상상태(steady state)는 유동계산을 시간정확도를 가지지 않는 정상(steady)의 유동계산을 통해서 도출된 유동패턴과 일치함을 확인할 수 있었다. Fig. 13에서는 노즐에서 방출되는 비정상 상태의 플룸이 로켓의 하부에 미치는 열적 영향을 파악하기 위해 노즐 주위의 온도변화를 시간에 따라 도시한 것이다. 노즐 주위의 최고 온도는 플룸이 노즐에서 빠져나오기 시작하는 0.002305초에서 약 430 °K로 나타났으며, 시간이 지나면서 온도는 점차로 감소하여 최종적으로는 대기온도 수준인 280 °K로 접근하였다. Fig. 14는 시간에 따른 편향기 내부의 수직력( $F_z$ ) 변화를 보여 주는 것으로서 위의 Fig. 12에서 언급한 바와 같이 0.11초 이후에 화



염의 거동은 거의 정상상태로 유지됨을 볼 수 있으며, 초기의 압력변동에 의한 수직력의 언더슈트 및 오버슈트 현상이 나타나고 있음을 볼 수 있다.

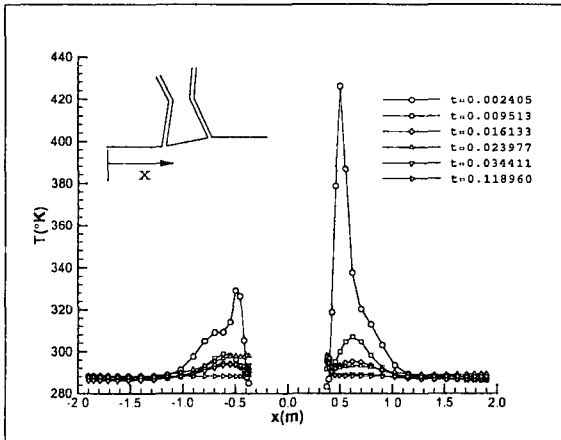


Fig. 13 Temp. variation around nozzle exit

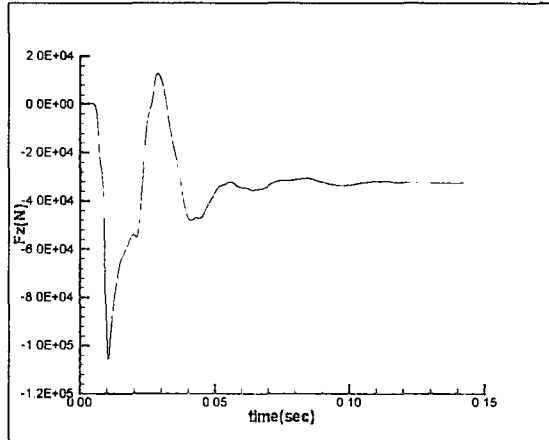


Fig. 14 Transient normal force in deflector

본 유동계산을 통해 플룸이 화염편향기에 도달하는 과도적 상태(transient state)는 물론이고, 플룸이 완전히 성장한 후에도 플룸의 윗 방향으로의 역류는 거의 나타나지 않고 매우 순조로운 방향으로 화염이 방출되는 것을 볼 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 KSR-III 화염편향기에 분출되는 제트의 천이적 유동장을 Euler 방정식을 이용하여 해석하였다. 충돌제트에 대한 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 실험치가 존재하는 웨지 편향기에 대한 유동해석을 수행하여 실험치와의 양호한 일치성을 확인하였다. 노즐과 화염편향기를 3차원 형상화하고 시간에 따른 발사화염 전파 현상을 수치해석하여 발사대 출발시의 배기화염이 화염편향기를 통해 순조롭게 방출됨은 물론이고, 플룸 유동장이 발사체 하부에 미치는 공력 및 열적 영향은 미소함을 확인하였다.

### 참고문헌

[1] Lamont, P. J. and Hunt, B. L., "The impingement of underexpanded, axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plate," Journal of Fluid Mechanics, vol. 100, 1980, pp 471-511.  
 [2] Prasad, J. K., Mehta, R. C., and Sreekanth, A. K., "Experimental study of overexpanded supersonic jet impingement on a double wedge deflector," Aeronautical Journal, June/July 1993, pp 209-214  
 [3] CFD-FASTRAN Version 3.0 User's manual, CFD Research Corporation  
 [4] Gridgen Version 13.3 User's manual, Pointwise Inc.