

단분리 비정상 유동장의 수치적 해석

윤용현¹, 권기범¹, 홍승규²

UNSTEADY FLUID FIELD ANALYSIS OF STAGING SYSTEM

Y. H. Yoon, K. B. Kwon and S. K. Hong

The unsteady flow analysis of staging system is conducted. This study focuses on comparing the results of two different governing equations between Euler equations and Navier-Stokes equations. The Chimera grid scheme is applied to moving simulations for unsteady flow analysis with dynamic simulation. As a result, it is certified that inviscid simulation have capabilities enough to analyze the present staging problem.

Key Words: 동역학적 모사(Dynamic Simulation), 단분리(Staging), 전방 분출 제트(Forward Jet), 유동 해석 모델(Flow Analysis Model)

1. 서 론

다단의 단분리 메카니즘(staging mechanism)이 적용되는 미사일과 같은 비행체는 적절한 단분리 시스템을 이용함으로써 원하는 비행거리 또는 사정거리의 자유도를 가지도록 설계된다. 단분리 시스템은 무엇보다 안정적인 분리가 보장되어야 하며 분리 후에도 비행체가 의도된 임무를 수행할 수 있는 성능을 가져야 한다. 따라서, 정확한 해석과 그에 따른 단분리 거동의 형태에 대한 특성을 사전에 이루어져야 한다.

비정상 단분리 거동 해석 문제는 기본적으로 공기역학적인 문제와 운동역학적인 문제가 중첩(coupling)되는 물리현상의 해석에 관한 것이다. 이러한 응용문제들은 비행체로부터의 미사일 발사 분리, 로켓 부스터의 분리, 유사시 비행체로부터의 조종사 탈출 등 다양한 분야에서 관심사가 되어 온 것으로 모체로부터 분리되는 물체와 모체와의 공기역학적 상호작용 및 분리시 동역학적 거동을 해석하는 것이 중심과제이다. 공기역학적 현상들은 매우 복잡한 비정상, 압축성 유동을 동반하며 분리 거리 등 다양한 유동조건에 지배를 받게 된다.

단분리 현상은 기본적으로 비정상상태의 해석에 해당되며

수치적으로 해석하기 위해서는 정상상태 해석과는 달리 움직이는 격자 시스템과 물체의 동역학적 운동을 해석하는 모듈과의 연계가 필요하다. 6개의 자유도를 가지는 강체의 운동방정식이 유동방정식과 연계될 수 있으며, Chimera 격자 기법이 이러한 연계된 해석의 효율성을 극대화하기 위해 사용될 수 있다. 또한 막대한 계산량과 계산시간이 소요되며 이러한 계산비용을 감소시키기 위해 다중 CPU를 사용한 병렬기법이 흔히 사용된다.

분리 문제와 관련된 연구들은 비록 다단의 부스터를 가진 발사체가 오랫동안 널리 사용되어지고 있음에도 불구하고 그다지 많지 않았다. Palmer[1]등은 붙어있는 부스터에 대해서 여섯 개의 부스터가 장착된 Conestoga 1620 발사 비행체 주위의 유동장을 해석한 바 있고, 2개의 부스터를 가진 Titan IV, 4개의 부스터를 가진 AVLS 발사 비행체에 대해서는 Taylor[2]와 Azevedo[3]에 의해 수행되었다. 분리문제에 관한 비정상 연구의 경우는 수치해석적 방법이나 또는 실험적 방법으로 수행된 바 있다. NASA Ames의 Meakin은 space shuttle의 SRB(solid rocket booster)의 분리 문제를 Navier-Stokes Solver로 공력을 해석한 후 본체의 비행궤적을 해석하는 동역학적 분석을 수행하였으며[4]. Lochan과 Adimurthy[5]는 공기역학적 힘에 대해 풍동 실험 데이터를 사용하여 로켓본체에 장착된 부스터의 분리 동역학을 해석하였다. Lijawski[6]는 삼각형 날개로부터 외부장착물이 분리되는 현상을 비정상 상태의 시뮬

1 정회원, 공군사관학교 항공우주공학과

2 정회원, 국방과학연구소

* Corresponding Author E-mail: airborne@afa.ac.kr

레이션을 하는 기술을 크게 발전시켰다.

본 연구의 해석 대상 비행체는 1회의 단분리를 통해 전방 기체와 후방기체인 모터부분으로 구성된 미사일 형태이다. 분리 신호에 의해 전방기체와 후방기체인 모터사이에 설치되어 있는 피스톤이 전방기체와 모터를 밀어내는 작용과 함께 분리가 시작되며, 분리가 진행되면서 전방기체와 모터 앞부분 위아래에 설치된 포트마개를 연결하는 고정된 길이의 연결줄의 장력에 의해 포트의 입구가 개방되게 된다. 포트는 직접적으로 모터의 챔버와 연결되어 있으며 포트 개방과 함께 분리 전 전체 비행체의 추력을 담당하던 모터의 비행체 후방방향으로의 체트분출이 포트를 통해 일부분 전방으로 분출되게 함으로써 분리가 잘 이루어지도록 한다.

이러한 형태의 단분리 과정은 자유흐름과 모터의 전방 분출흐름과의 복잡한 비정상적(unsteady) 천이과정과 전방기체와 모터간의 공기역학적 상호작용에 의해 해석을 더욱 어렵게 만들며 막대한 계산량과 계산시간이 소요된다. 따라서 안정적 인 분리에 대한 신뢰도를 높이고 분리 후 전방기체가 주어진 임무를 원활히 수행하기 위해서는 단분리 과정에서 발생하는 자유흐름과 모터의 전방분출체트와의 상호작용에 의한 비정상 공기역학적 현상과 이로 인해 나타나는 전방기체와 모터의 거동에 대한 정확한 예측이 반드시 이루어져야 한다.

본 연구의 중점은 고려하는 비행체의 단분리 과정에 대한 공기역학적 현상과 단분리 거동에 대해 예측을 비점성 유동 지배방정식과 점성 유동지배방정식의 해석 결과를 비교해 봄으로써 유동 해석 모델에 따른 단분리 해석 결과의 차이점을 분석하고자 하였다.

2. 해석방법

2.1 유동해석 및 동역학적 거동 해석 방법

단분리 과정을 시뮬레이션하기 위해 사용된 비정상 공력해석 및 동역학적 거동 해석 도구는 CFDRC사의 상용 소프트웨어인 CFD-FASTRAN(이하 FASTRAN)이다. FASTRAN은 두 물체가 분리되는 문제에 대한 공력해석 및 동역학적 거동 해석과 관련된 공학적 설계(Engineering Design)에 적합한 것으로 알려져 있으며 이를 위해 Chimera 격자계에 대한 해석을 수행할 수 있다. 또한 6 자유도(Degree of Freedom)의 비정상 동역학적 거동 해석 모듈을 포함하고 있다.

2.2 시뮬레이션 모델링(Simulation Modeling)

단분리 과정에 대한 비정상 유동해석과 함께 동역학적 시뮬레이션을 수행하기 위해서 Chimera 격자 시스템을 적용하였다. 전방기체와 모터에 대해 각각의 격자를 구성하고 중첩시킨다. 사용된 전방기체와 모터의 개략도와 Chimera 격자 시

스템을 Fig. 1에 나타내었다.

전방기체와 모터 각각에 대한 Chimera 격자의 생성방법은 Half-O Topology를 사용하였다. 이를 Fig. 2에 나타내었다. 총 격자수는 비점성 해석의 경우 630,000여개이며 점성해석의 경우는 880,000여개이다.

동역학적 시뮬레이션을 위해 먼저 주어진 초기 조건에서 정상 유동의 해를 계산한 다음 이 해를 동역학 시뮬레이션의 시간 $t = 0$ (분리 거리 127 mm , $0.33 D_{ref}$, D_{ref} : 비행체의 직경)일 때의 해로 놓고 운동방정식을 시간증분에 따라 적분하게 된다. 시뮬레이션 $t = 0$ 는 피스톤에 의한 분리 작용이 끝난 시점이며 이 때는 모터로부터의 전방분출체트가 완전히 성장된 상태(fully developed state)이다. 동역학 시뮬레이션을 위해서는 각 시간단계에서 계산된 유동해석과 그에 따른 공기역학적 힘의 계산이 필수적이다. 고려하는 비행체의 모터의

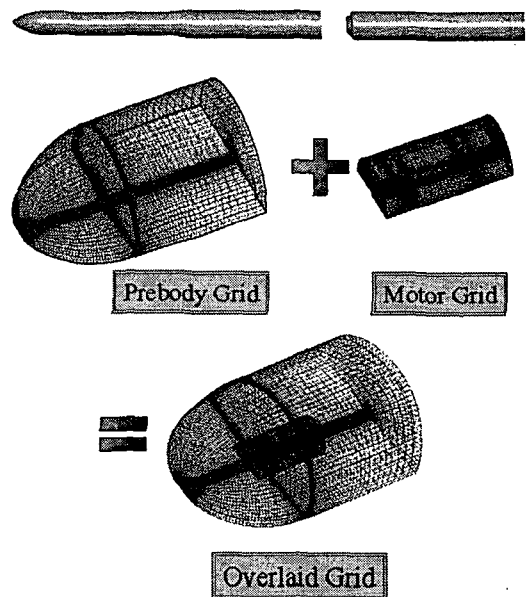


Fig. 1 비행체의 개략도와 Chimera 격자계

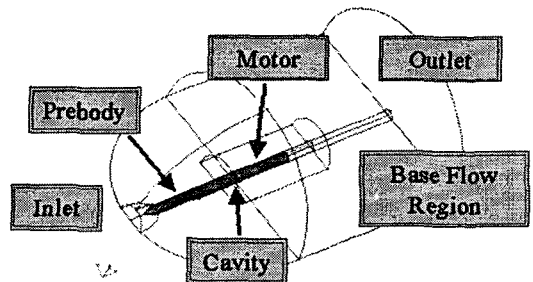


Fig. 2 Chimera 격자 Topology

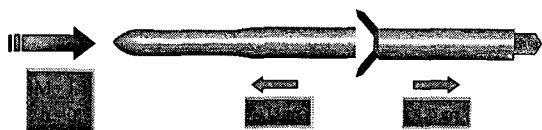


Fig. 3 초기 조건

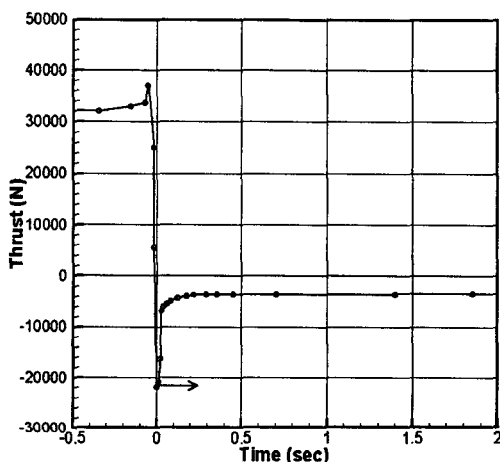


Fig. 4 시간에 따른 모터 추력 변화

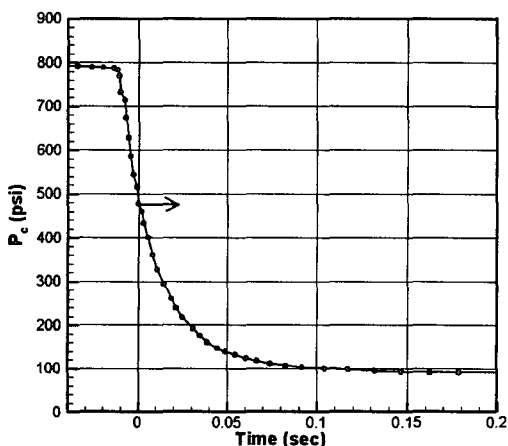


Fig. 5 시간에 따른 모터 챔버압력 변화

챔버와 후방으로의 분출 제트에 대해서는 실제로 모델링하지 않고 전방 제트 분출로 인한 시간에 따른 모터 챔버의 전체 압력의 변화, 모터의 추력 변화는 실험 데이터를 직접 FASTRAN의 동역학 모듈에 입력하여 그 효과를 구현하였다.

비행체의 분리시 초기조건을 Fig. 3에 나타내었다. 자유흐름 마하수는 1.5이며 받음각은 0°에서 단분리가 실행된다고 가정한다. 초기의 전방기체와 모터의

상대속도 값은 단분리 메카니즘에 따라 피스톤에 의해 발생된 값이며 실험데이터로부터 얻어진 값이다.

분리 시간에 따른 전방분출로 인한 모터 추력값의 변화와 모터 챔버 압력의 시간에 따른 변화를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

유동 지배방정식은 비점성의 경우 비정상, 3차원, 압축성, Euler 방정식을 사용하였으며 점성의 경우는 동일한 조건에서 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 각 경우 동일하게 대류항에 대해 Roe의 플럭스 차분화 기법을 공간차분화 기법으로 사용하였으며 공간정확도는 1차로 하였다.

3. 해석 결과 및 토론

3.1 시뮬레이션 결과 비교

비점성 유동장 해석에 의한 동역학적 거동 시뮬레이션 결과와 점성 유동장 해석에 의한 시뮬레이션 결과를 대칭면의 마하수 분포에 대해 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6과 Fig. 7의 비점성 유동모델과 점성 유동 모델에 의한 단분리 비정상 해석 결과를 비교해보면 비슷한 분리 시간대에 비슷한 형태의 마하수 분포 변화를 나타내고 있다. 몇 가지 차이점을 볼 수 있는데 첫째, 전방기체의 뒷부분에 모터의 전방 분출로 인해 발생하는 자유류의 충격파 형태이다. 점성 유동의 경우 충격파의 아래부분이 전방기체의 몸체 벽면 경계층에 의해 확장된 것을 알 수 있다. 둘째, 모터의 전방 분출류가 분출되는 끝단의 후류가 점성 유동 해석의 경우 굽어서 예측되었음을 알 수 있다. 셋째, 모터의 기저 흐름의 재순환(recirculation) 영역에서 상류방향의 흐름속도가 비점성 유동 해석의 경우 더 빠르게 예측하고 있다.

전방기체와 모터 사이의 공동(Cavity)영역에 대한 대칭면의 유동 구조를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다.

Fig. 8은 초기 분리거리에서의 유동장 해석 결과를 비교한 것으로 전방기체의 벽면에서 떨어진 부분에서는 비점성 유동 해석과 점성 유동해석의 경우 모두 비슷하게 충격파의 위치를 예측하고 있다.

또한, 비점성 유동해석의 경우는 모터의 분출 제트 끝단의 급격한 흐름방향의 전환으로 뒷부분에 와류가 형성되나 점성 유동해석의 경우에는 다소 완만히 유동 방향이 바뀔므로 해서 비점성 유동해석 결과에서 관측되었던 와류는 보이지 않는다.

모터의 전방 분출류의 형태나 전방기체와 모터사이의 유동 등의 전체적인 유동장의 형태에 대해서는 점성 유동해석의 결과와 비점성 유동해석의 결과가 거의 동일한 형태를 보여 주고 있다.

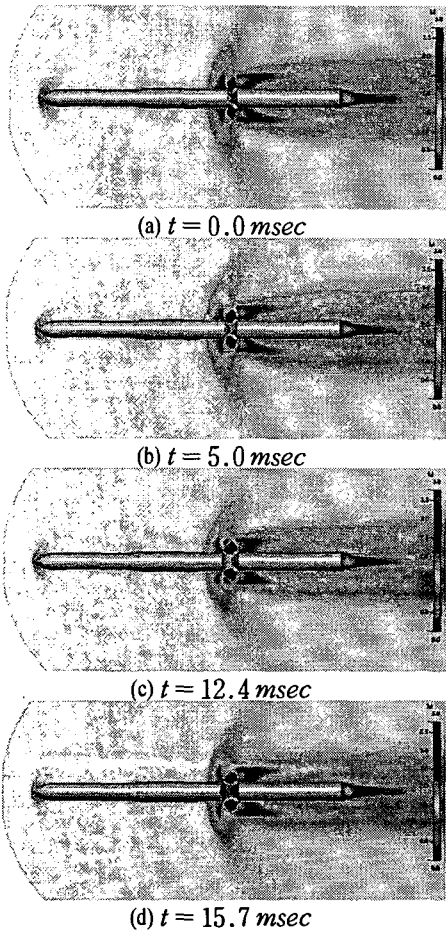


Fig. 6 마하수 분포 변화(Inviscid Case)

전방기체의 기저면에 작용하는 압력계수는 비점성 유동의 경우 $C_{p_{base}} = 0.67$ 이며 점성 유동해석의 경우 $C_{p_{base}} = 0.60$ 으로 계산되어 비슷한 값으로 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 일정 분리 거리 후의 비점성 유동해석 결과와 점성 유동해석 결과를 비교한 것이다. 비점성 유동해석의 경우 분리 시간이 $15.7 msec$ 경과한 후의 결과이며 점성 유동해석의 경우 $15.8 msec$ 경과한 후로 분리거리는 약 $0.7 D_{ref}$ 이다. 분리거리가 거의 동일한 조건에서 차이점은 전방기체와 모터 사이 공동영역에서의 유동 현상이다. 초기 분리거리에서 공동영역 내부의 유동 현상이 점성 유동해석 결과와 비점성 유동해석 결과가 비슷했지만 일정 분리 후에는 다소 다르게 나타나는 점이다. 점성 유동해석의 경우 상하로 회전하는 와류가 관측되고 있지만 비점성 유동해석 결과에서는 전방기체의 기저면에 작은 스케일의 와류가 관측될 뿐이다. 점성 유동

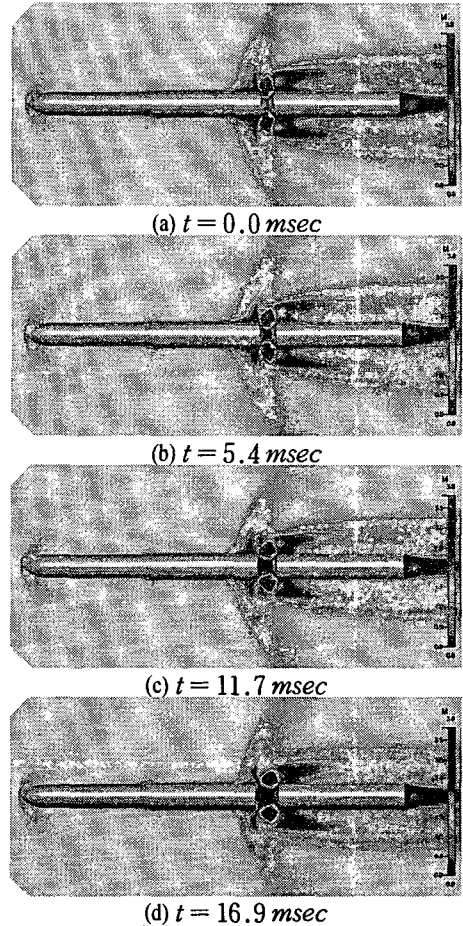
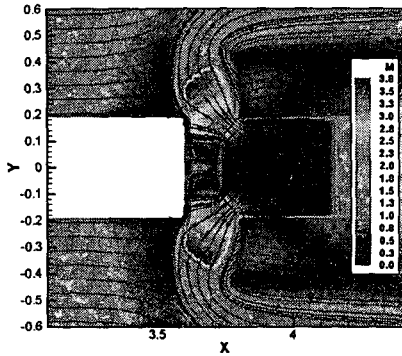


Fig. 7 마하수 분포 변화(Viscid Case)

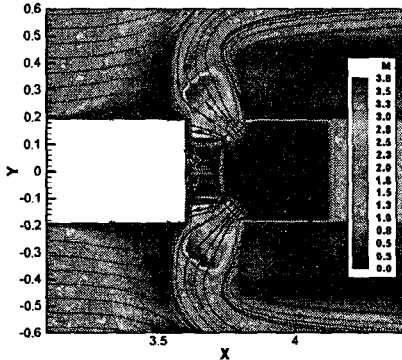
해석의 경우 벌써 전방기체 주위의 자유흐름이 공동내부로 유입되고 있음을 알 수 있다. 비점성 흐름의 공동영역내의 흐름현상은 대칭면의 90° 방향으로 흐름이 많이 유실됨을 나타낸다. 물론 최근 연구[7]에 의하면 비점성 유동의 경우에서도 분리가 진행됨에 따라 전방기체의 자유흐름이 공동내부로 진입하여 점성 유동의 해석 결과와 동일한 형태로 진행하게 된다. 따라서, 비슷한 분리 거리에서 점성 유동해석의 결과가 좀 더 일찍 자유흐름의 유입을 예측하고 있음을 알 수 있다. 그러나 전방기체의 기저면에 작용하는 압력계수의 값은 비점성의 경우 0.23 이고 점성 유동해석의 경우 0.26 으로 계산되었다.

3.2 분리거리의 변화 비교

시간에 따른 전방기체와 모터의 변위와 분리 거리를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 11은 시간에 따른 분리 거리의 변화를 D_{ref} 의 비로 나타낸 그림이다.

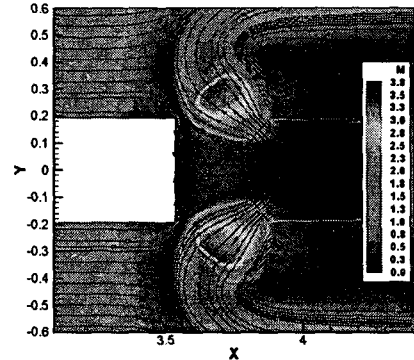


(a) Inviscid Case

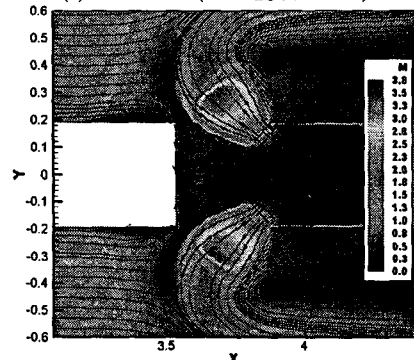


(b) Viscid Case

Fig. 8 마하수 Contour와 유선 ($t = 0.0 \text{ msec}$)



(a) Inviscid Case ($t = 15.7 \text{ msec}$)



(b) Viscid Case ($t = 15.8 \text{ msec}$)

Fig. 9 마하수 Contour와 유선

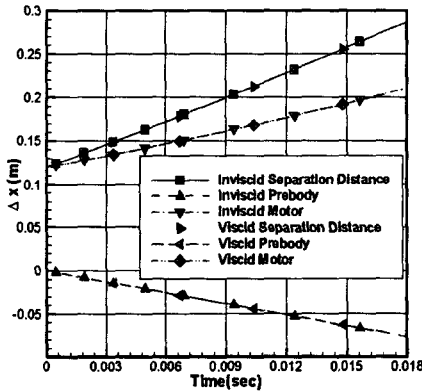


Fig. 10 시간에 따른 분리거리의 변화

Fig. 10과 Fig. 11로부터 전방기체와 모터의 운동은 전방과 후방으로 각각 거의 일정하게 멀어지고 있음을 알 수 있으며 이에 따라 분리거리도 선형적으로 증가됨을 확인할 수 있다. 따라서, 두 유동 모모델의 해석 결과로부터 단분리의 안정성과 신뢰성을 확인할 수 있다. 또한, 비점성 유동해석 결과와 점성 유동해석 결과의 시간에 따른 분리거리의 경향성은 매우 일치함을 알 수 있다.

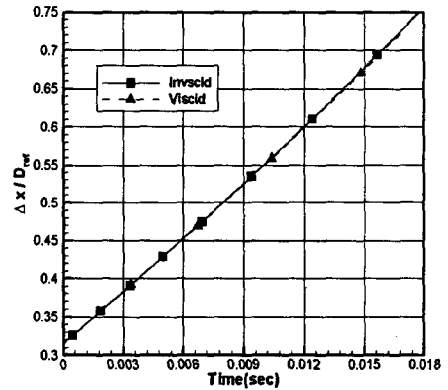


Fig. 11 시간에 따른 분리거리 (D_{ref} 의 비)의 변화

3.3 전방기체 기저면의 압력계수 변화 비교

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 시간과 D_{ref} 에 대한 비로 나타낸 분리거리에 따른 전방기체 기저면의 압력계수의 변화를 나타낸 그림이다.

Fig. 12와 Fig. 13으로부터 비점성 유동해석에 의해 시뮬레이션된 전방기체 기저면의 압력계수 값의 변화와 점성 유동

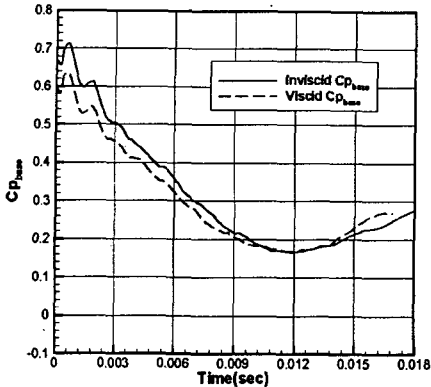


Fig. 12 시간에 따른 압력계수의 변화

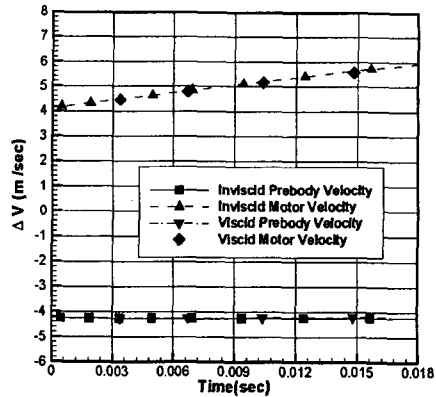


Fig. 14 전방기체와 모터의 속도변화 변화

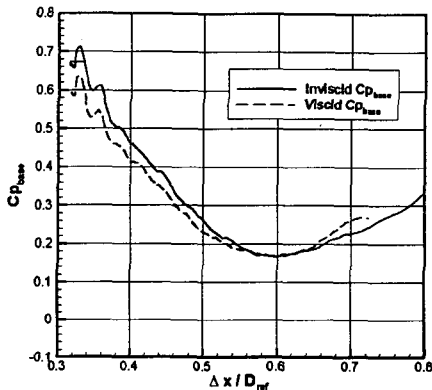


Fig. 13 분리거리 (D_{ref} 의 비)에 따른 압력계수의 변화

해석에 의한 결과와 거의 동일한 경향성을 보여주고 있음을 알 수 있다. 동일하게 모터의 챔버 압력의 강하에 따라 압력 계수 값이 강하하다가 다시 상승하는 경향성을 동일하게 보이고 있다. 최근의 연구[8] 결과로부터 이러한 경향성은 전방기체의 자유흐름이 전방기체와 모터 사이의 공동영역에 유입되면서 모터의 전방 분출제트의 상호작용에 의해 전방기체의 기저면에 와류가 발생되며 이 와류의 상류흐름이 전방기체 기저면의 중심부에서 압력을 상승시키는 효과 때문이다. 물론 전방분출이 없이 단순한 Cavity에서도 이러한 현상이 발생하나 그 효과는 작다[9].

3.4 동역학적 특성 변화 비교

Fig. 14는 단분리 과정동안 시간에 따른 전방기체와 모터의 상대속도 변화를 나타낸 그림이다.

모터의 속도변화는 지속적으로 Fig. 4에 나타난 역추력과 모터의 항력에 의해 증가함을 알 수 있으며 전방기체의 속도는 모터와의 분리에 의해 추력이 더 이상 작용하지 않는 상

태에서 항력만이 작용하게 되므로 초기의 상대속도보다 줄게 되나 모터의 전방 분출에 의한 기저면의 압력 증가로 그 양은 크지 않다.

4. 결론

비정상 공기역학적 해석과 동역학적 거동 해석의 연계를 통해 고려하는 비행체의 단분리 과정에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 공기역학적 해석시 유동모델을 달리하여 그 차이를 비교, 분석하였다.

단분리 유동의 복잡성은 본 연구에서 수행한 영역과 같이 초기의 단분리 과정에 집중되어 나타난다. 본 연구의 결과로부터 초기 단분리 과정에서 전방기체와 모터의 거동과 공력 해석에 대한 비점성 유동해석과 점성 유동해석 결과가 유사함을 알 수 있었다. 본 연구의 수행 장비인 클러스터(8노드)로 비점성 유동해석 모델에 의한 단분리 시뮬레이션은 약 2주가 소요되었으며 점성 유동해석 모델에 의한 시뮬레이션은 이의 4배인 약 8주가 소요되었다. 이러한 단분리 과정에 대한 비정상 동역학적 거동을 해석할 때 소요되는 막대한 계산시간과 컴퓨터 자원을 생각할 때 점성 유동해석을 수행하기보다 효율적인 비점성 유동 해석을 통하여 계산하더라도 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

따라서, 많은 시간과 자원을 소요하는 점성 유동해석 방법보다는 비점성 유동해석 방법을 통해 이와 같은 단분리 시스템을 가지는 비행체의 설계과정에서 많은 시간과 자원을 절약할 수 있을 것으로 예상된다. 차후에는 이러한 결론의 타당성을 높이기 위해 본 연구에서 사용된 난류 모델링인 $k-\epsilon$ 모델외에 다른 종류의 난류 모델링을 이용한 시뮬레이션의 결과와도 비교·검증이 요구된다.

후 기

본 연구는 국과연의 연구 지원으로 수행되었습니다. 국방 과학연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Grant Palmer and Pieter Buning, 1996, "Three- Dimensional Computational Analysis of Complex Launch Vehicle Configurations," *AIAA Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 33, No. 1, Jan.-Feb., p.49~53.
- [2] Stephen Taylor and Johnson C.T. Wang, 1996, "Launch-Vehicle Simulations Using a Concurrent, Implicit Navier-Stokes Solver," *AIAA Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.33, No.5, p.601~606.
- [3] J.L. Azevedo and P. Moraes Jr., 1996, "Code Validation for High-Speed Flow Simulation over Satellite Launch Vehicle," *AIAA Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.33, No.5, p.15~21.
- [4] Robert L. Meakin and Norman E. Suhs, 1989, "Unsteady Aerodynamic Simulation of Multiple Bodies in Relative Motion," *AIAA 89-1996-CP*.
- [5] Rajeev Lochan and V. Adimurthy, 1997, "Separation Dynamics of Strap-On Boosters in the Atmosphere", *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol.20, No.4, p.633-639.
- [6] Lijewski, L.E., Suhs, N.E., 1994, "Time-Accurate Computational Fluid Dynamics Approach to Transonic Store Separation Trajectory Prediction," *Journal of Aircraft*, Vol.31, No.4, p.886-891.
- [7] 권기범, 윤용현, 홍승규, 2004, "전방 분출이 있는 단분리 유동해석," *한국전산유체공학회 추계학술대회*.
- [8] 권기범, 윤용현, 홍승규, 2005, "움직이는 격자를 이용한 비정상 단분리 유동해석," *한국전산유체공학회 춘계학술대회*, p.182~185.
- [9] 권기범, 윤용현, 홍승규, 2003, "초음속 유동장에 놓인 공동 유동에 대한 연구," *한국전산유체공학회 춘계학술대회*, p.139~143.