論文

3차원 비정렬 중첩격자계를 이용한 서로 겹쳐진 물체들 간의 상대운동 해석기법에 관한 연구

안상준*, 정문승*, 권오준**

An Unstructured 3-D Chimera Technique for Overlapped Bodies in Relative Motion

Sang Jun An*, Mun Seung Jung* and Oh Joon Kwon**

ABSTRACT

In the present study, A 3-D chimera technique for overlapped bodies in relative motion is studied using unstructured meshes. If all node points of a mesh element at solid boundary are in another body, this element is excluded from computational domain. For computation of unsteady flow, non-active cells have proper variables using interpolation and extrapolation. These variables are used in next time step. The motion of a launching trajectory ejected from a wing and the motion of deploying fins of a trajectory which have not been simulated are computed to conform practicality of this technique.

초 록

본 연구에서는 3차원 비정렬 중첩격자계를 이용한 서로 겹쳐진 물체들 간의 상대운동 해석기법에 대한 연구를 수행하였다. 홀 컷팅 과정에서 격자요소를 구성하는 모든 격자점들이 다른 물체의 내부에 위치하는 물체 경계의 격자요소들을 계산에서 제외하였고, 일부분이 다른 물체의 내부에 위치하는 격자요소들은 계산영역에 포함하였다. 비정상 유동의 계산을 위해 계산에서 제외되는 비활성 격자요소들에 내삽과 외삽을 통해 적절한 유동값을 부여하여, 상대운동이 진행됨에 따라 다음 시간단계에서 새롭게 활성 격자로 분류될 때 이전 시간에서의 유동값으로 이용될 수 있도록 하였다. 해석기법을 이용하여 기존에는 해석이 불가능했던 3차원 날개의 내부에서 발사체가 사출되는 운동과 발사체의 동체에서 다수의 핀이 전개되는 운동을 해석하였다.

Key Words : Unstructured overset mesh(비정렬 중첩격자), Relative motion(상대운동), Overlapped bodies(겹쳐진 물체들)

Ⅰ. 서 론

중첩격자기법은 전체 유동장을 부영역으로 분할한 후 각각의 부영역을 독립적인 격자계들로 생성하여 중첩시키고, 삽간을 이용하여 각 격자계간의 정보를 전달하는 방법이다. 이 방법은 각각의 부영역에 대하여 독립적으로 격자를 구성하기 때문에 복잡한 형상을 구현하기가 용이하다는

† 2006년 4월 7일 접수 ~ 2006년 6월 26일 심사완료
* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원
** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
연락저자, E-mail : ojkwon@kaist.ac.kr
대전시 유성구 구성동 373-1번지

장점이 있다. 또한 독립적인 격자계의 구성으로 인하여 격자계를 원하는 대로 이동시킬 수 있어 상대운동의 해석에 있어서도 큰 장점을 지닌다.

정렬 격자계에서의 중첩격자기법은 Steger 등[1]에 의해 처음 체계화 되었으며, 복잡한 형상을 구현하고, 조밀한 격자계를 삽입하여 해의 해상도를 높이기 위한 목적으로 시도되었다. 비정렬 격자계에서의 중첩격자기법은 Nakahashi 등[2]에 의해 처음 시도되었으며, 비정렬 격자가 가지는 유연성으로 인해 정렬 격자계에서와 같이 복잡한 형상을 구현하기 위한 목적보다는 물체들 간의 상대운동이 있는 비정상 유동해석을 위해 발전되어 왔다. 그러나 현재까지는 주로 물체들 사이에 초기간극이 존재하는 문제들이 해석되어졌다. 이는 실제 문제를 해석하기 위하여 단순화하는 과정에서 물체들 사이에 초기간극이 존재하는 것으로 가정하기 때문이다. 그러나 유동해석이 요구되는 문제들 중에서는 초기간극이 존재하는 것으로 단순화 할 수 없는 경우가 있다. 그 대표적인 예로는 가변형 날개를 갖는 기체의 날개 전개운동을 들 수가 있다. 이와 같은 문제들은 기존에는 기술적인 어려움으로 인하여 해석이 시도되지 않았지만, 물체들이 서로 겹쳐져 있는 상태로 가정한다면 해석이 가능할 것이다. 실제 문제들을 물체들이 서로 겹쳐진 상태로 가정하기 때문에 오차가 발생할 수 있지만 관심의 대상이 되는 많은 문제들의 유동특성을 예측하는데 활용될 수 있을 것으로 판단하여 이에 대한 연구를 수행하였다.

서로 겹쳐지는 물체들에 대한 중첩격자기법의 적용은 주로 복잡한 형상을 구현하기 위한 방법으로 이용되어 왔다. 정렬격자계에서는 Parks 등[3]이 물체들이 교차되는 영역에 collar grid라는 부격자계를 추가하는 방법을 제안하였고, Levy 등[4]은 변화하는 형상의 구현을 위해 collar grid의 자동생성 알고리즘을 개발하였다. 그러나 이처럼 부격자계를 추가하는 방법은 격자생성 과정이 복잡하고, 물체들의 상대운동에는 적용하기가 어렵다. 비정렬 격자계에서는 Togashi 등[5]이 물체 내부에 위치하는 격자점들에 합리적인 유동값을 부여하는 방법을 이용하여 날개-동체 형상을 구현하였고, 서로 접촉한 초기상태에서 분리되는 부스터의 상대운동을 해석하였다[6]. 그러나 비정렬 격자계에서도 물체들의 겹침 영역 및 상대운동 범위가 큰 문제에 대한 연구는 시도되지 않고 있다.

본 연구에서는 기존의 비정렬 중첩격자기법을 응용하여 서로 겹쳐진 물체들 간의 상대운동 해석기법에 관한 연구를 수행하였다. 임의의 격자요소들을 계산영역에서 제외하는 홀 컷팅 과정에서 격자요소를 구성하는 모든 격자점들이 다른 물체의 내부에 위치하는 물체 경계의 격자요소들을 계산에서 제외하였고, 일부분이 다른 물체의 내부에 위치하는 격자요소들은 계산영역에 포함하였다. 비정상유동의 해석을 위해 계산에서 제외되는 비활성 격자요소에 유동값을 부여하여 상대운동이 진행됨에 따라 비활성 격자요소들이 새롭게 계산영역에 포함될 때 격자요소들의 이전 시간에서의 유동값으로 이용되도록 하였다. 해석기법을 이용하여 기존에는 해석이 불가능했던 날개의 내부에서 발사체가 사출되는 운동과 다수의 핀이 동체 내부에서 사출되며 전개하는 발사체의 운동을 해석하여 본 연구의 실용성을 확인하였다.

II. 지배방정식 및 수치해석 기법

상대운동이 있는 유동장을 해석하기 위한 비정상, 압축성 유동을 지배하는 Euler 방정식을 적분형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_v Q\,dV + \oint_{\partial v} F(Q)\cdot\vec{n}\,dS = 0 \qquad (1)$$

여기서

$$Q=(\rho\ \ \rho u\ \ \rho v\ \ \rho w\ \ e_o)^T$$

$$F(Q)\cdot\vec{n} = ((\vec{V}-\vec{V_g})\cdot\vec{n})\begin{pmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho w\\ \rho h_o\end{pmatrix} + p\begin{pmatrix}0\\ n_x\\ n_y\\ n_z\\ 0\end{pmatrix}$$ 이다.

여기서 V는 제어체적을 나타내고, ∂v는 제어표면, $\vec{n}$은 제어표면의 바깥방향으로의 법선 벡터, $\vec{V_g}$는 격자속도를 나타낸다. 식 (1)은 비정렬 격자계에서 사용하기 위해 격자 중심의 유한체적법으로 이산화하였다. 비점성 플럭스는 공간에 대한 이차 정확도의 Roe의 평균값을 이용한 FDS 방법을 이용하여 계산하였고, 시간적분을 위해 내재적 시간 적분방법의 하나인 Gauss- Seidel 방법을 사용하였다. 정상유동의 해석에서는 해의 수렴성을 향상시키기 위해 국부시간적분기법을, 비정상유동의 해석에는 이중시간적분기법을 사용하였다. 경계조건은 원방경계의 적용을 위한 1차 원적 유동에 대한 Riemann invariant를 이용하였고, 비점성 경계면에 대해서는 유동접선조건(flow tangency condition)을 이용하였다. 또한 벽면이

운동하는 경우에는 벽면에 대한 유동의 상대속도가 유동접선조건을 만족하도록 하였다.

III. 비정렬 중첩격자기법

3.1 탐색

비정렬 격자계에서의 중첩격자기법은 불규칙적인 자료구조로 인해 격자요소를 구성하는 격자점의 위치 파악을 위한 탐색(searching)을 필요로 하게 된다. 탐색을 거쳐 얻어진 격자점의 위치정보는 계산에서 제외될 격자요소를 구분하는 기준이 된다. 본 연구에서는 이웃하는 격자들을 이용하는 이웃간(N2N: neighbor-to-neighbor) 탐색 방법 중 강건하고 신속한 탐색을 수행할 수 있는 선형형상함수(linear shape function)를 이용한 탐색 방법을 사용하였다[7]. 이 방법은 시작점에서 목표점까지 직선을 그어 그 직선이 통과하는 격자면을 따라 탐색을 진행하는 방법이다.

3.2 홀 컷팅

중첩격자기법을 구현하기 위해서는 독립적으로 구성된 격자계에서 임의의 격자요소를 계산에서 제외시키는 과정을 필요로 하게 되는데 이 과정을 홀 컷팅(hole cutting)이라 하며, 홀 컷팅을 하기 위해서는 각각의 격자요소를 구성하는 격자점을 구분하여야 한다.

본 연구에서는 격자점을 구분하기 위한 기준으로 Nakahashi[2]가 제안한 Distance To Wall 조건을 적용하였다. Distance To Wall 조건은 격자점의 물체 경계면까지의 최소거리와 격자점이 위치하는 다른 격자계의 격자를 구성하는 격자점들의 물체 경계면까지의 거리를 비교하여 격자점을 구분하는 방법이다.

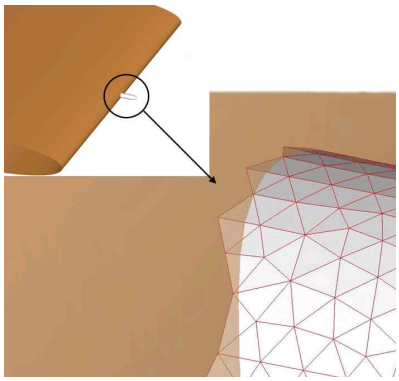


Fig. 1. Hole-cutting for overlapped bodies

물체들이 서로 겹쳐진 경우에는 다른 물체의 내부에 위치하게 되는 물체경계의 격자요소들을 계산에서 제외하여야 한다. 본 연구에서는 격자요소를 구성하는 모든 격자점들이 다른 물체의내부에 위치하는 물체 경계의 격자요소들을 계산에서 제외하였고, 일부분이 다른 물체의 내부에 위치하는 격자요소들은 계산영역에 포함하였다. Fig. 1은 서로 겹쳐진 물체들에 대하여 홀 컷팅 과정 이후에 계산영역에 포함되는 물체경계를 나타내고 있다.

3.3 삽간

독립적으로 계산되는 격자계 간의 정보전달은 삽간을 통해 이루어진다. 본 연구에서는 각각의 삽간점의 삽간을 위해 삽간점을 표함하는 다른 격자계의 격자요소와 주변격자요소들의 유동변수를 이용하였으며 삽간에 이용되는 가중치는 pseudo-Laplacian 방법[7]에 의한 가중치를 이용하였다. 서로 겹쳐진 물체들은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 불가피하게 물체 경계의 일부가 다른 물체의 내부에 존재하게 되며, 삽간이 되어질 삽간 수여자점들도 물체의 내부에 위치하는 경우가 발생한다. 이러한 경우에는 정확한 유동값을 정의할 수는 없지만 합리적인 값을 부여하여 계산이 수행되도록 하였고[7], 유동값을 부여하는데 사용되는 방법을 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 A점은 물체 내부에 위치한 삽간점이며, C점은 계산된 유동값을 갖는 격자요소의 중심이다. B점은 물체의 경계로 유동접선조건을 만족하여 벽면에 수직한 속도성분은 0이다. A점의 삽간을 위해 속도성분들은 C점과 B점에서의 유동값을 이용하여 외삽하였다. 밀도와 압력은 외삽을 통해 유동값을 구하는 경우에 음의 값이 얻어질 수 있기 때문에 계산과정에서의 강건함이

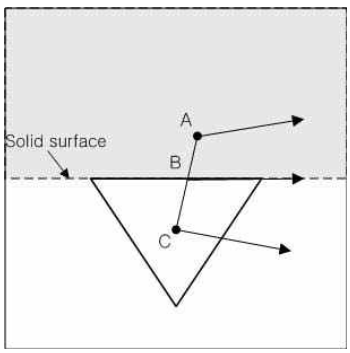


Fig. 2. Treatment of interpolation points inside solid surface

유지될 수 있도록 B점의 값과 동일한 유동값을 부여하였다. 이러한 과정을 통해 비록 삽간수여 자점이 물체내부에 위치하더라도 합리적인 유동값을 가질 수 있도록 하였다.

Ⅳ. 비활성 격자요소들에 대한 유동값 부여

비정상 유동의 계산에서는 각 격자점들의 이전 시간에서의 유동값을 이용한다. 따라서 홀 컷팅 과정을 통해 계산에서 제외되는 비활성 격자들도 상대운동의 진행에 따라 다음 시간단계에서 새롭게 계산영역에 포함될 때 이용될 수 있는 적절한 유동값을 가지고 있어야 한다. 격자중심기법을 사용하는 경우에는 비활성 격자들의 격자중심에 유동값을 부여해야 하므로, 홀 컷팅을 위한 탐색 과정에서 얻은 격자점들의 정보를 이용하여 3.3절에서의 삽간을 통해 각 격자요소를 구성하고 있는 격자점들의 유동값을 구한 후 이 격자점들에서 격자중심까지의 거리에 반비례하는 가중치를 이용하여 격자요소의 중심에 유동값을 부여하였다.

유동값의 부여가 요구되는 격자요소를 구성하는 격자점들 중에서 다른 물체의 내부에 위치하는 격자점은 이 격자점에서 계산영역에 포함되는 다른 물체경계의 격자면들 중 가장 가까운 거리에 있는 격자면과 이 격자면을 포함하는 격자의 중심의 값을 이용하여 3.3절에서의 외삽방법을 통해 유동값을 부여하였다.

물체의 형상이 복잡한 경우에는 물체의 내부에 위치한 격자점들 중에서 Fig. 3과 같이 가장 가까운 거리에 위치한 격자면을 포함하는 격자요소의 중심에서 물체 내부의 격자점까지 직선으로 연결했을 때 이 격자면을 지나지 않아 외삽을 이용할 수 없는 경우가 있다. 이러한 격자점들은 가장 가까운 거리에 위치한 격자면과 동일한 유동값을 갖도록 하여 계산과정에서 강건함이 유지되도록 하였다.

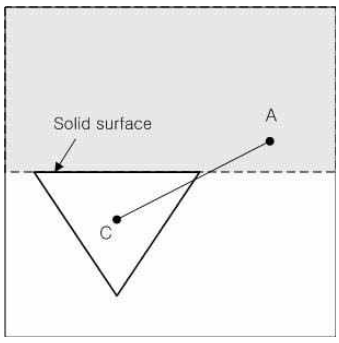


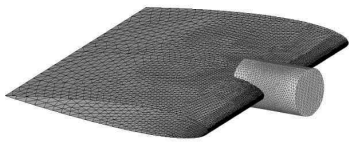
Fig. 3. An unusable case of extrapolation

Ⅴ. 결과 및 검토

5.1 3차원 날개의 내부에서 사출되는 발사체의 상대운동

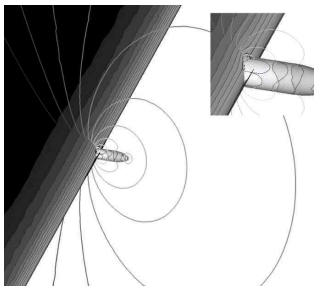
해석기법을 3차원 날개에서 발사체가 사출되는 운동을 적용하였다. 상대운동의 해석에 앞서 해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 날개와 발사체가 서로 겹쳐진 상태에서의 정상유동을 해석하여 동일한 형상에 대하여 생성된 단일격자를 이용한 해석결과와 비교하였다. 주격자계는 날개 주위에 944,343개의 격자요소로 구성되며, 부격자계는 발사체 주위에 980,862개의 격자요소로 구성된다. 두 물체가 겹쳐지는 영역에서의 삽간오차를 최소화하기 위하여 날개의 앞전부근과 발사체의 표면에 조밀한 격자를 분포시켰다. 발사체는 상대운동과정 중에 물체 표면전체가 날개와 겹쳐지기 때문에 부격자계에서는 다소 많은 수의 격자요소를 형성하였다. 물체들의 형상과 계산에 사용된 초기격자를 Fig. 4에 나타내었다. 유동조건은 자유류의 마하수가 0.8, 받음각은 0도를 적용하여 계산을 수행하였다. 유동해석 결과로서 물체 표면과 유동장 내의 압력분포를 단일격자를 이용한 해석결과와 함께 Fig. 5에 나타내었다. 두 결과가 매우 유사한 압력 분포를 보여주고 있으며, 해석기법의 타당성을 확인할 수 있었다.

(a) Overlapped bodies

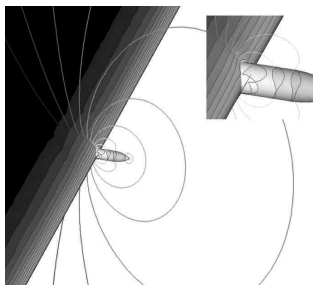


(b) Initial mesh

Fig. 4. Geometry of bodies and initial mesh

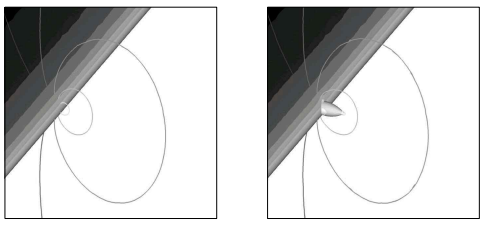


(a) Overset mesh

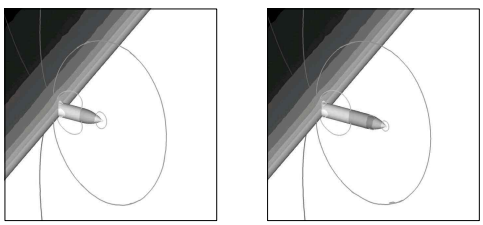


(b) Single mesh

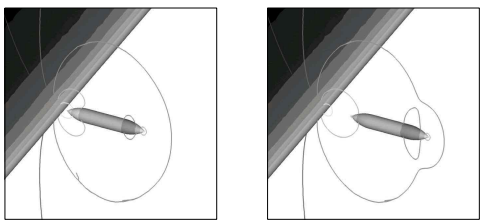
Fig. 5. Comparisons of pressure contour



(a) t = 0 (b) t = 0.3



(c) t = 0.6 (d) t = 0.9



(e) t = 1.2 (f) t = 1.5

Fig. 6. Pressure contour at different time levels

발사체의 초기위치가 날개의 내부에 위치하도록 하여 날개의 외부로 사출되는 상대운동을 해석하였다. 발사체의 상대속도는 마하수 0.1로 설정하였고, 총 20개의 CPU를 이용하여 계산을 수행하였다.

각 시간 단계에서 계산을 통해 얻은 물체표면과 유동장 내의 압력분포를 Fig. 6에 나타내었으며, 발사체가 날개의 외부로 사출되면서 두 물체들 간의 상호 간섭에 의해 나타나는 유동의 변화를 볼 수 있다. 발사체가 사출되는 초기단계에는 날개의 앞전부근에서의 국부적인 아음속 유동의 영향만을 받게 되고 발사체가 완전히 사출되어 두 물체가 분리된 후에는 발사체도 천음속 유동인 자유류의 영향을 받게 된다.

5.2 핀이 전개되는 발사체

발사된 후 핀이 전개되는 발사체의 운동에 해석기법을 적용하였다. 해석에 사용된 물체들은 하나의 동체와 3개의 핀으로 구성되며 이를 Fig. 7에 나타내었다. 핀은 날개 단면이 NACA0008인 삼각날개 형상이며 동체의 0.8c지점에 위치한다. 초기에는 모든 핀이 동체의 내부에 위치하고, 상대운동이 진행되면 동체의 외부로 사출되어 전개된다. Fig. 8은 동체와 3개의 핀 주위에 형성된 4

Fig. 7. Geometry of overlapped bodies

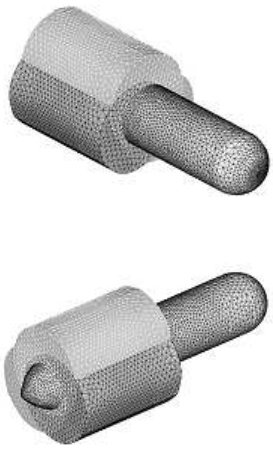
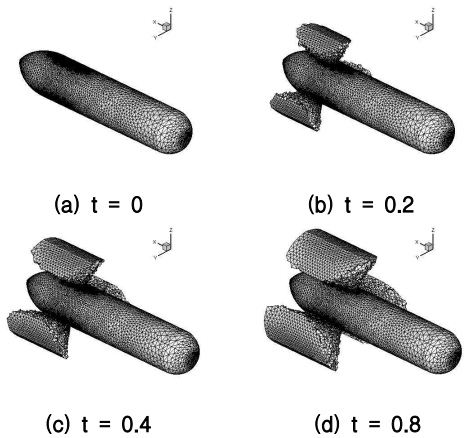


Fig. 8. Initial Mesh

개의 격자계가 중첩된 초기 격자를 나타내고 있으며, Fig. 9은 핀의 상대운동에 따라 홀 컷팅을 통해 계산영역에 포함되는 격자를 나타내고 있다.

초기에는 3개의 핀이 동체의 내부에 존재하므로, 부격자계들의 모든 격자요소는 계산에서 제외되며, 핀들이 동체의 외부로 사출되면 부격자계들의 일부가 계산영역에 포함된다. 유동조건은 자유류의 마하수가 0.8, 받음각은 0도이고, 핀의 전개속도는 마하수 0.1을 적용하였다.

Fig. 10은 비정상 유동해석을 위한 초기 정상유동의 계산결과이며 물체 표면과 유동장 내에서의 압력분포를 나타내고 있다. Fig. 11은 핀의 전개운동이 진행되는 과정 중에 변화하는 물체 표면의 격자상태와 계산을 통해 얻은 물체 표면에서의 압력분포를 나타내고 있다. 핀이 전개함에 따라 핀 주위의 유동이 가속되는 현상과 핀과 동체 표면에 형성된 압력선도가 부드럽게 연결된 상태로 변화하는 것을 볼 수 있고, 이는 물리적으로도 타당한 것으로 판단된다.



(a) t = 0 (b) t = 0.2

(c) t = 0.4 (d) t = 0.8

Fig. 9. Mesh after hole-cutting at different time levels

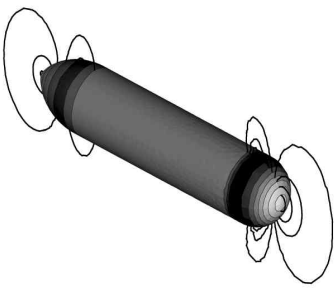
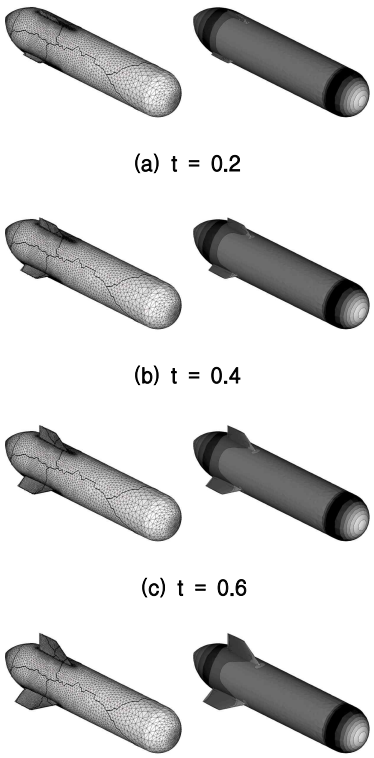


Fig. 10. Pressure contour



(a) t = 0.2

(b) t = 0.4

(c) t = 0.6

(d) t = 0.8

Fig. 11. Surface meshes and pressure contour at different time levels

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 기존의 비정렬 중첩격자기법을 응용하여 서로 겹쳐지는 물체들 간의 상대운동 해석기법에 대한 연구를 수행하였다. 격자요소를 구성하는 모든 격자점들이 다른 물체의 내부에 위치하는 물체 경계의 격자요소들을 계산에서 제외하였고, 일부분이 다른 물체의 내부에 위치하는 격자요소들은 계산영역에 포함하였다. 비정상 유동해석을 위하여 계산에서 제외되는 비활성 격자에 대하여 유동값을 부여하여 이 격자들이 상대운동에 따라 새롭게 계산영역에 포함될 때 이전 시간에서의 유동값으로 이용될 수 있도록 하였다. 해석기법을 이용하여 기존에는 해석이 불가능했던 날개의 내부에서 발사체가 사출되는 운동과 다수의 핀이 동체 내부에서 사출되며 전개하는 발사체의 운동을 해석하였다. 기존에는 이와 같은 문제를 해석한 사례가 없기 때문에 불가피하게 해석결과에 대한 검증은 생략하였다. 본

연구에서의 해석기법을 이용하여 보다 다양한 문제들에 대한 유동특성을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 비행체 기술 특화센터의 '전기체 비정상 공력 해석 연구(VT-21)' 과제의 지원에 의한 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1) Steger, J. L., Dougherty, F. C., and Benek, J. A., "A Chimera Grid Scheme, Advances in Grid Generation", K. N. Ghia and U. Ghia eds., ASME FED-Vol. 5, June, 1983.

2) Nakahashi, K., Togashi, F., and Sharov, D., "Intergrid-Boundary Definition Method for Overset Unstructured Grid Approach", AIAA Journal, Vol. 38, No. 11, pp. 2077-2084, 2000.

3) Parks, S. J., Buning, P. G., and Steger, J. L., "Collar Grids for Intersecting Geometric Components within The Chimera Overlapped Grid Scheme", AIAA Paper 91-1587, 1991.

4) Levy, Y., "Numerical Simulation of Dynamically Deforming Aircraft Configurations Using Overset Grids", Journal of Aircraft, Vol. 38, No. 2, pp. 349-354, 2001.

5) Togashi, F., Ito, Y., Nakahashi, K., and Obayahi, S., "Overset Unstructured Grids Method for Viscous Flow Computations", AIAA Paper 2003-3405, 2003.

6) Togashi, F., Fujita, T., Ito, Y., Nakahashi, K., and Makino, Y., "CFD Computations of NAL Experimental Airplane with Rocket Booster Using Overset Unstructured Grids", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 48, No. 8, pp. 801-818, 2005.

7) 정문승, 권오준, "비정렬 중첩격자를 이용한 이차원 날개주위의 비정상 유동해석", 한국항공우주학회지, 제 33권, 제 2호, pp. 1-10, 2005.