

## 論文

상대운동이 있는 물체주위의 비정상 유동해석을 위한  
병렬화된 비정렬 중첩격자기법 개발

정문승\*, 권오준\*\*

Development of an Unstructured Parallel Overset Mesh Technique  
for Unsteady Flow Simulations around bodies with Relative Motion

Mun Seung Jung\* and Oh Joon Kwon\*\*

## ABSTRACT

An unstructured parallel overset mesh method has been developed for the simulation of unsteady flows around multiple bodies in relative motion. For this purpose, an efficient and robust search method is proposed for the unstructured grid system. A new data-structure is also proposed to handle the variable number of data on parallel sub-domain boundary. The interpolation boundary is defined for data communication between grid systems. An interpolation method to retain second-order spatial accuracy and to treat the points inside the neighboring solid bodies are also suggested. A single store separating from the Eglin/Pylon configuration is calculated and the result is compared with experimental data for validation. Simulation of unsteady flows around multiple bodies in relative motion is also performed.

## 초 록

비정상 유동의 모사를 위한 병렬화된 비정렬 중첩격자기법을 개발하였다. 비정렬 격자계에서 효율적이고 강건하게 쓰일 수 있는 탐색방법과 병렬경계에서 유동적으로 변하는 데이터의 수를 처리할 수 있는 자료구조를 제안하였다. 격자계간의 정보전달을 위한 삼간경계면을 정의하였고, 공간상의 이차정확도를 유지하기 위한 삼간방법 및 물체내부에 위치하는 삼간점에 대한 처리방법을 제안하였다. 개발된 해석코드의 검증을 위해 Eglin/Pylon 형상에서 분리되는 스토어의 궤적을 해석하여 실험치와 비교하였고, 다 물체간의 상대운동이 있는 비정상유동의 적용을 위해 세 개의 스토어 분리에 대한 해석을 수행하였다.

**Key Words** : Unstructured overset mesh(비정렬 중첩격자), Parallel computation(병렬 처리), Unsteady flows(비정상 유동), Relative motion(상대운동)

## 1. 서 론

† 2004년 8월 12일 접수 ~ 2004년 10월 1일 심사완료

\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

\*\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과  
연락처자, E-mail : ojkwon@kaist.ac.kr  
대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

외부장착물을 장착하고 비행하는 항공기에는 외부장착물과 항공기 날개 사이에 간섭현상이 나타날 수 있으며, 이 간섭현상은 외부장착물의 분리시 자체의 물리적인 특성 및 항공기 주변의 유동조건과 더불어 그 궤적에 큰 영향을 미칠 수

이므로 항공기에서 분리되는 외부장착물의 궤적을 정확히 예측하는 것은 실제 외부장착물의 분리시 항공기와 조종사의 안전을 위해 중요한 데이터를 제공할 수 있으며, 그에 따른 많은 실험과 수치적인 연구들이 진행되고 있다[1,2].

외부장착물의 분리와 같이 상대운동이 있는 물체간의 비정상 유동을 수치적으로 해석하기 위해서는 움직이는 물체의 위치변화에 따른 격자 및 경계면의 처리가 필요로 하며, 이에 대한 대표적인 접근방법은 중첩격자기법을 들 수 있다. 1980년대 초 Steger[3] 등에 의해 제안된 중첩격자기법은 정렬격자계에서 복잡한 형상을 구현하기 위한 다구획격자계(multi-block grid system)의 대안으로 제시되었으나, 격자계간의 독립성으로 인해 복잡한 형상의 구현은 물론 물체간의 상대운동의 적용을 위한 방법으로 크게 발전되었다.

복잡한 형상을 가지는 물체주변의 격자를 생성시키기 위해서는 위에서 설명한 정렬격자계에서의 중첩격자기법 이외에도 비정렬 격자계를 들 수 있다. 비정렬 격자는 격자의 배열에 있어서 규칙성이 요구되지 않으므로 복잡한 물체 형상에 대한 격자생성이 매우 용이하며, 격자 형성의 불규칙성으로 인해 주위에 분포되어 있는 격자들간의 연결고리(connectivity)에 대한 정보만 알 수 있다면 유동장내의 임의의 위치에 원하는 밀도를 갖는 격자를 분포시킬 수 있는 특징으로 최근 많이 선호되고 있는 방법이다.

본 연구에서는 격자가 가지는 유연성으로 복잡한 형상주변의 격자형성이 용이한 비정렬 격자계와 격자계간의 독립적인 구성으로 격자계를 빠르게 이동시킬 수 있는 중첩격자기법을 사용한 비정렬 중첩격자기법을 개발하였다. 비정렬 중첩격자기법은 정렬 중첩격자기법에 비해 복잡한 형상을 위해 필요한 격자계의 수가 극적으로 감소하여, 그에 따른 중첩되는 영역의 감소로 삼각오차를 줄일 수 있으며, 격자계간의 정보전달이 있는 삼각경계면을 빠르게 생성시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 본 연구에서는 보다 실제적인 삼차원 형상의 해석과 계산시간의 절감을 위해서 비정렬 중첩격자기법을 병렬환경에서 구동될 수 있도록 처리하였다. 개발된 해석코드를 이용하여 Egin/Pylon형상에서 분리되는 스토어에 대한 해석을 수행하였다. 스토어의 분리운동은 6 자유도의 운동방정식을 공력값과 연계하여 해석하고 CTS(Captive Trajectory System) 실험결과[2]와 비교하여 코드를 검증하였다. 다 물체간의 적용을 위해 TER(Triple Ejector Rack)에서 분리되는 세 개의 스토어에 대한 해석을 수행하였으며, 해석에

의해 예측된 스토어의 궤적을 타 연구자와의 결과와 비교하였다.

## II. 지배방정식 및 수치기법

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

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

여기서

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

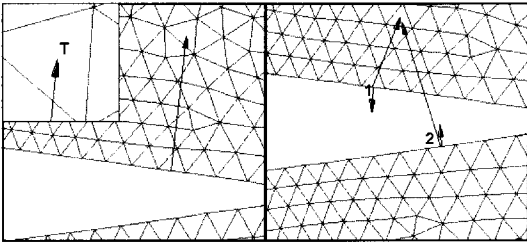
$$F(Q) \cdot \vec{n} = ((\vec{V} - \vec{V}_g) \cdot \vec{n}) \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho h_o \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} 0 \\ n_x \\ n_y \\ n_z \\ 0 \end{pmatrix} \text{이다.}$$

또한  $V$ 는 제어체적을 나타내고,  $\partial v$ 는 제어표면,  $\vec{n}$ 은 제어표면의 바깥방향으로의 법선 벡터,  $\vec{V}_g$ 는 격자속도를 나타낸다. 식 (1)은 비정렬 격자계에서 사용하기 위해 격자 중심 방법의 유한체적법으로 이산화하였다. 비점성 플럭스는 공간에 대한 이차 정확도의 Roe의 평균값을 이용한 FDS 방법을 이용하여 계산하였으며, 시간 적분을 위해 내재적 시간 적분방법의 하나인 Gauss-Seidel 방법을 사용하였다. 정상유동의 해석에서는 해의 수렴성을 향상시키기 위해 국부시간 전진기법을, 비정상유동의 해석에는 이중시간 적분기법을 사용하였다. 경계조건은 원방경계의 적용을 위한 1차원적 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. 계산시간의 단축 및 메모리 제한을 극복하기 위해 코드를 병렬화하였으며, 병렬처리를 위한 영역분할은 MeTiS Library, 각 분할영역간의 자료교환은 MPI Library를 사용하였다.

## III. 비정렬 중첩격자기법

### 3.1 탐색

비정렬 격자계에서의 중첩격자기법은 불규칙적인 자료구조로 인해 격자요소를 구성하는 격자점의 위치 파악을 위한 탐색(searching)을 필요로



(a) 선형형상함수 탐색 (b) 탐색시작점 선택

그림 1. 탐색방법

하게 된다. 탐색을 거쳐 얻어진 격자점의 위치정보는 계산에서 제외될 격자요소를 구분하는 기준이 되며, 삽간되어야 할 격자점 및 경계면에 유동변수값을 가중치에 따라 부여하는 기준이 된다. 본 연구에서는 이웃하는 격자들을 이용하는 이웃간(N2N: neighbor-to-neighbor) 탐색방법 중 강건하고 신속한 탐색을 수행할 수 있는 선형형상함수(linear shape function)를 이용하였다[4]. 이 방법은 탐색의 시작점에서 목표점까지 선형형상함수를 이용하여 이 직선이 통과하는 격자면을 따라 탐색을 진행하는 방법으로, 삼차원에서 직선과 평면의 교점을 찾는 방법을 이용하면 목표점에 근접하는 격자면일수록 교점의 위치를 나타내는 값이 1에 가까워진다. 이 방법을 그림 1의 (a)에서 나타내었다. 또한 이웃간 탐색의 문제점이 될 수 있는 시작점의 올바른 선택을 위해 목표점의 다른 격자계의 물체경계면이나 원방경계면까지의 벡터와 경계면의 수직벡터를 내적(inner product)하여 그 값이 음이 나오는 경계면 중 가장 가까운 거리를 가지는 경계면의 중심을 시작점으로 설정하였고, 이를 그림 1의 (b)에 예시하였다.

### 3.2 홀 컷팅 및 삽간경계면의 구성

본 연구에서 사용하는 격자중심방법에서 중첩 격자기법을 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 벽면에서의 최소거리를 이용하는 Nakahashi[5]의 방법을 사용하였다. 이 방법은 구분하고자 하는 격자점의 물체 벽면에서의 최소거리와 탐색을 통해 얻어진 격자점을 포함하고 있는 타 격자계의 격자요소를 구성하는 격자점들의 벽면에서의 최소거리를 비교하여 격자점

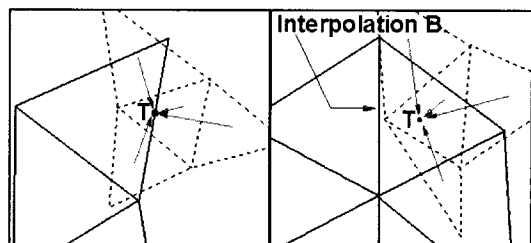
을 구분하는 방법으로, 이 과정을 통해 각각의 격자점은 활성격자점과 비활성격자점으로 구분되어진다. 구분되어진 격자점의 정보를 바탕으로 격자요소를 구성하는 모든 격자점이 활성격자점이면 활성격자요소, 모든 격자점이 비활성격자점이면 비활성격자요소, 활성격자점과 비활성격자점을 모두 가지고 있으면 삽간격자요소로 각각의 격자요소를 구분하며, 비활성격자요소로 구분된 격자요소는 계산에서 제외된다.

격자계간의 중첩되는 영역에서 정보전달을 위해 정의되어야 하는 삽간경계면은 항상 상대 격자계의 계산되는 격자요소의 내부에 위치해야만 정확한 유동변수의 전달이 보장될 수 있다. 본 연구에서는 삽간격자요소와 비활성격자요소를 공유하는 격자면을 삽간경계면으로, 삽간경계면을 구성하는 격자점을 삽간경계격자점으로 정의[4]하여 위의 조건을 만족시켰다.

### 3.3 삽간(Interpolation)

독립적으로 계산되는 격자계간의 정보전달은 삽간경계면에서의 삽간을 통해 이루어지며 삽간에 의한 오차를 줄이는 것은 중첩격자기법을 이용하는 해석코드의 정확도를 유지하기 위해 매우 중요하다. 본 연구에서의 해석코드는 격자중심기법을 사용하여 이차의 공간정확도를 가지는 계산을 수행하기 위해 주변격자요소의 유동변수를 이용한 재구성(reconstruction)과정으로 격자점의 값을 구하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 해석코드의 공간상의 일차정확도를 위한 삽간경계면의 삽간은 물론 해석자의 공간상의 이차정확도를 위한 재구성과정에 필요한 삽간경계격자요소에 대한 삽간을 수행하였다.

본 연구에서는 각각의 삽간점의 삽간을 위해 각각의 삽간점을 포함하는 다른 격자계의 격자요소와 주변격자요소들의 유동변수를 이용하였으며 삽간에 이용되는 가중치는 공간상의 이차정확도를 만족시키는 pseudo-Laplacian 방법[6]에 의



(a) 삽간경계면 삽간 (b) 삽간경계격자 삽간

그림 2. 삽간에 이용되는 격자요소

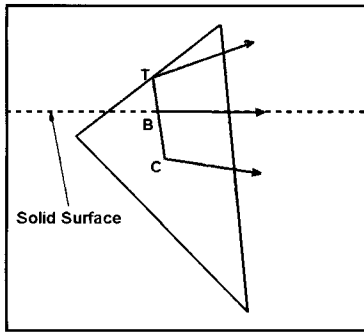


그림 3. 물체경계면 내부의 삼각점 처리

한 가중치를 이용하였다. 이 과정을 통해 삼각점 방법의 공간상의 이차정확도를 유지할 수 있다. 그림 2의 (a)에서는 공간상의 일차정확도를 위해 요구되는 삼각점경계면의 삼각을 위해 다른 격자계에서 사용되는 격자요소들을 나타내었으며, 그림 2의 (b)에서는 공간상의 이차정확도를 위해 삼각점경계격자요소에 유동변수를 기부하는 격자요소를 나타내었다.

비정렬 격자에서는 격자형태의 불규칙한 특성 때문에 물체간의 간격이 매우 작은 경우 홀 컷팅 이후에 불가피하게 삼각이 되어질 삼각 수여자점들이 물체의 내부에 위치하는 경우가 발생한다. 본 연구에서는 이런 경우에 대해 합리적인 값을 부여하여 계산이 수행되도록 하였고, 그림 3에서 이 방법을 나타내었다. 그림의 T점이 물체내부에 위치한 삼각점경계면의 중심이고, C점은 계산된 유동값을 가진 격자요소의 중심이다. B점은 물체의 경계로 유동접선조건을 만족하여 벽면에 수직한 속도성분은 0이다. T점의 삼각을 위해 밀도와 압력은 B점의 값을 가지고 오며, 속도성분들은 T점과 C점으로 B점을 삼각했을때 B점의 속도성분을 만족시킬 수 있도록 T점의 속도성분을 설정한다. 이런 과정을 통해 비록 삼각수여자점이 물체내부에 위치하더라도 합리적인 유동값을 가질 수 있으며, 특히 비정상 유동해석의 이중시간 적분기법의 비정상 잔류항(unsteady residual)을 구하는데 매우 효율적으로 적용되어 해석코드의 시간에 대한 이차정확도를 유지할 수 있다.

### 3.4 중첩격자기법의 병렬화

본 연구에서는 초기에 각각의 격자계에 대해서 격자를 생성시킨 이후에 MeTiS Library를 사용하여 계산영역을 분할하였다. 이 때 나뉘어진 영역의 격자요소의 수가 같도록 분할하는 정적부하균형을 사용하였으며, 병렬통신경계의 경계면과

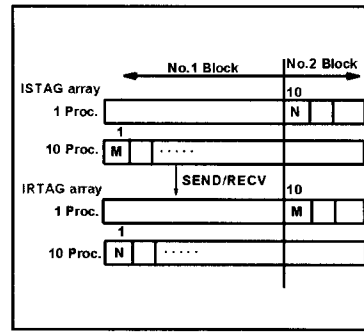


그림 4. ISTAG/IRTAG 배열

격자점에 대한 정보는 전처리 과정을 통해서 얻게 된다. 정적부하균형 방법에서는 초기 영역이 분할되면 이후에는 병렬경계가 변하지 않으므로 초기에 얻은 정보를 그대로 사용할 수 있으나, 탐색 등의 중첩격자기법을 구현함에 있어서 CPU간의 유동적으로 변화하는 데이터 양에 대한 처리가 필요하다. 본 연구에서는 중첩격자기법의 병렬화에 필요한 자료구조를 제안[7]하였으며, 그림 4에서 이 자료구조를 나타내었다.

위의 그림에서 ISTAG 배열은 계산에 사용되는 CPU의 수만큼의 주소를 가지고 있으며 이 주소에 들어갈 값은 각각의 CPU로 보내져야 할 데이터의 개수이다. 즉 1번 프로세서에서는 10번 프로세서에 보내야 할 N개의 데이터를 가지고 있으며, 10번 프로세서에서는 1번 프로세서로 M개의 보내야할 데이터를 가지고 있음을 의미한다. 이 ISTAG 배열의 값을 각각의 CPU로 SEND/RECV 하면 CPU가 각각의 CPU로부터 받게 되는 데이터의 수를 나타내게 되며, 이 값들을 IRTAG 배열에 저장하였다. ISTAG/IRTAG 배열에 저장된 값을 바탕으로 각각의 CPU가 보내고 받아야 할 데이터의 개수와 주소를 정리할 수 있으며 이를 이용하여 데이터의 통신 및 계산이 동시에 수행되어 병렬계산의 효율성을 높일 수 있다.

## IV. 결과 및 토론

### 4.1 하나의 외부장착물 분리

개발된 유동해석코드의 검증을 위해 CTS실현치[1]가 존재하는 Eglin/Pylon 형상에서 분리되는 스토어에 대한 해석을 수행하였으며, 해석에 이용된 형상은 참고문헌 7에 자세히 설명되어 있다. 본 형상에 대해서는 매우 좁은 간격의 파일런과 스토어 사이의 원만한 삼각점경계의 구성을

위해 그 사이에 많은 수의 격자를 분포시켰다. 주 격자계는 관성좌표계를 포함하는 Eglin/Pylon 형상으로 973,733개의 격자요소와 182,878개의 격자점을, 부 격자계는 스토어를 포함하는 형상으로 715,840개의 격자요소와 128,290개의 격자점으로 구성되어 있다. 즉 두 개의 독립적인 격자계를 생성시켜 중첩시켰으며, 스토어가 분리되면서 부 격자계는 이동하게 된다. 계산영역은 주 격자계를 20개의 CPU, 부 격자계를 15개의 CPU에서 계산될 수 있도록 분할하였으며 하나의 CPU에 분할되는 격자요소의 수는 평균적으로 48,000개이다. 정상해를 구하기 위해 계산에 이용된 자유류 마하수는 0.95, 받음각은 0도, 비행고도는 26,000ft이다. 정상해의 수립증진을 위해 국부시간 전진기법을 사용하였으며, 계산은 35개의 Pentium-IV 2.4GHz CPU를 이용하여 2,000번의 반복계산을 수행하여 유동해를 완전 수립시켰다. 계산에 소요된 시간은 4,000 sec 가량이다.

표 1. 스토어와 ejector의 특성치

Center of Gravity	4.65ft aft of store nose
Forward Ejector Location	4.06ft aft of store nose
Rear Ejector Location	5.73ft aft of store nose
Forward Ejector Force	2,400lb
Rear Ejector Force	9,600lb
Ejector Stroke Length	0.33ft
$I_{xx}$	20slug-ft <sup>2</sup>
$I_{yy}$	360slug-ft <sup>2</sup>
$I_{zz}$	360slug-ft <sup>2</sup>
Weight	2,000lb
Freestream Mach Number	0.95
Angle of Attack	0
Altitude	26,000ft

표 1에서 비정상 유동의 해석을 위해 사용된 유동조건과 ejector 및 스토어의 특성치들을 나타내었다. 본 연구에서 ejector force 는 파일런에 고정되어 작용하는 것으로 모델링되었으며, 스토어의 뒷부분에 작용하는 힘이 앞부분에 작용하는 힘보다 네 배가 크도록 정상상태의 위치에서 0.33ft 의 길이만큼 스토어의 표면에 작용한다.

이는 pylon과의 간섭으로 인한 스토어 앞전의 머리속임 모멘트를 상쇄시켜 스토어를 안전하게 분리하기 위함이다. 스토어는 분리되는 시점부터 ejector force 및 중력 그리고 공력에 의한 6 자유도 운동을 시작한다. 스토어의 6 자유도 운동은 Eglin 날개에 부착된 관성좌표계를 기준으로 하였으며, 운동방정식은 4차의 Runge-Kutta 방법으로 계산하였다. 스토어가 분리되는 비정상 유동해석은 이중시간 적분기법을 사용하였으며, 무차원 시간간격은 0.005로 하였다. 반복계산은 3960번을 수행하여 이는 실제시간 0.489 sec에 해당되며, 정상유동 해석에서와 같은 조건의 PC 클러스터를 사용하여 19시간 정도 소요되었다. 그림 5에서 스토어의 무게중심의 궤적을 나타내었으며, 해석결과는 스토어의 궤적을 잘 예측하고 있다. 그림 6은 스토어의 회전변위를 나타낸 것으로 회전각은 관성좌표계를 기준으로 하는 Euler각을 사용하였다. 분리초기의 스토어는 ejector force의 영향으로 머리올림 운동을 시작하나, ejector force가 작용하는 영역을 벗어나며 머리올림의 경향이 감소하며, 핀에 의한 공력의 영향으로 0.2 sec 부근부터 머리속임 운동을 시작한다. 또한 스토어는 분리가 시작되면 스토어의 머리가 바깥쪽으로 회전한다. 그림 7에서 스토어의 회전각속도를 나타내었으며, 피칭운동에 큰 영향을 미치는 Q의 값으로 ejector force가 0.05 sec 부근까지 작용함을 알 수 있다. 그림 8은 스토어의 속도를 나타낸 것이다. 실험치와 잘 일치함을 알 수 있으며, W 속도성분은 ejector force의 영향을 0.05 sec 부근까지 크게 받으며 그 이후부터 자유낙하를 시작함을 알 수 있다. 그림 9는 스토어에 작용하는 공력의 힘계수를 나타내고 있다. 비점성 유동해석의 특성상 축방향 힘계수는 실험치와 차이를 보이고 있으나 일반적으로 양호한 결과를 나타낸다. 그림 10은 스토어의 공력에 의한 모멘트 계수를 나타내었다. 그림 11-14는 정상상태 및 스토어의 분리과정중의 스토어의 표면압력계수를 나타내었다. 그림 11의 0 sec, 즉 정상상태의 표면 압력분포에서 X/C=0.25 부근에서 파일런에 의한 영향을 확인할 수 있고, 스토어가 떨어지면서 그 영향이 없어졌음을 알 수 있다. 그림 15는 0.1sec 간격으로 스토어의 위치에 대해 나타내었다. 해석에 의해 얻어진 결과는 CIS 실험결과와 잘 일치하고 있으며, 약간의 차이는 준 정상상태로 측정된 CIS 실험결과, ejector 모델링의 차이 및 점성의 효과를 고려하지 않았기 때문이다.

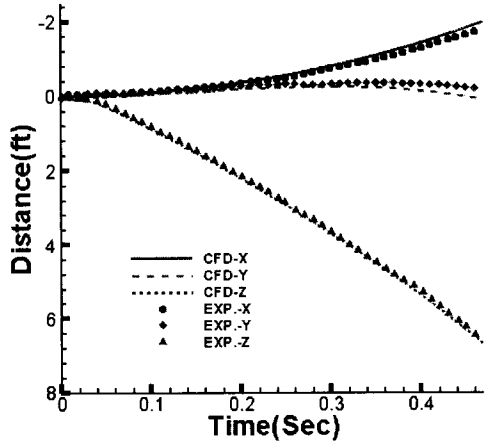


그림 5. 스토어의 궤적

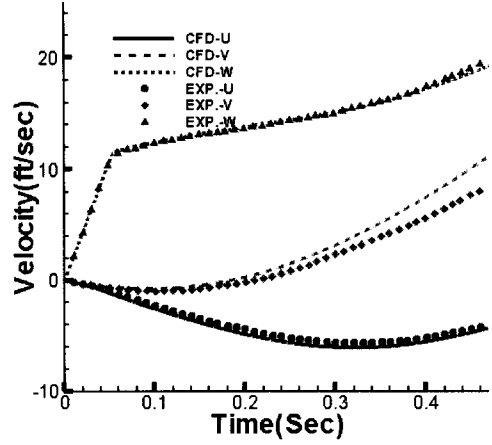


그림 8. 스토어의 속도

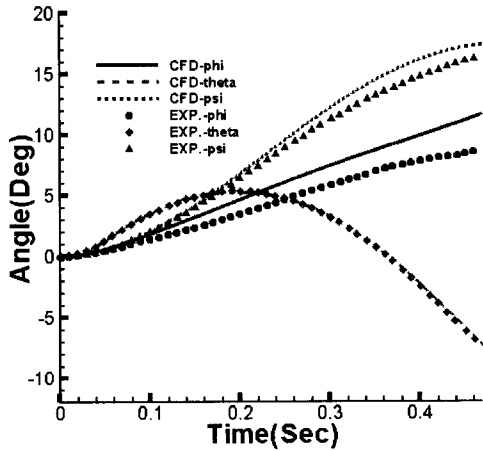


그림 6. 스토어의 회전변위 (Euler 각)

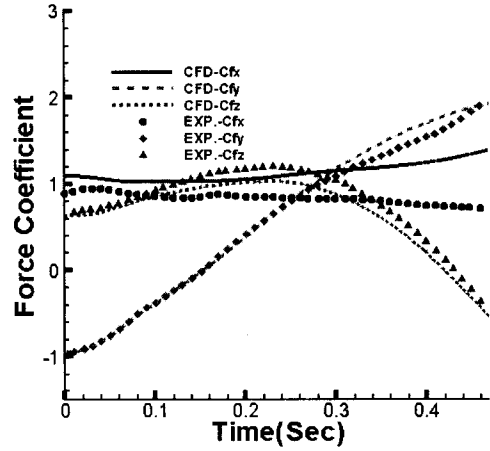


그림 9. 스토어의 힘계수

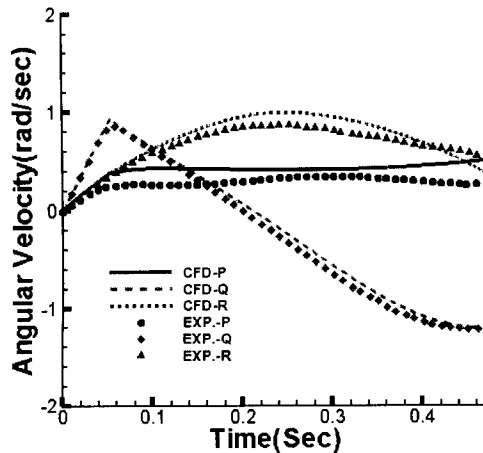


그림 7. 스토어의 회전속도

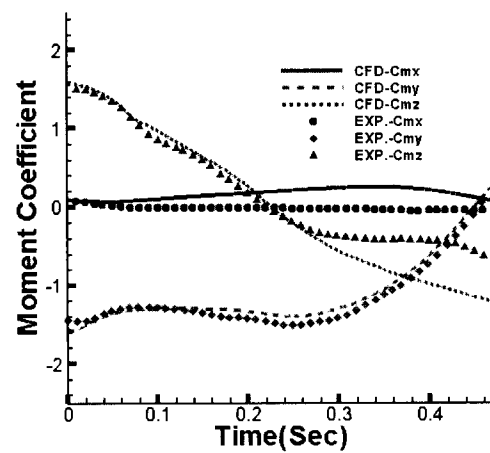


그림 10. 스토어의 모멘트계수

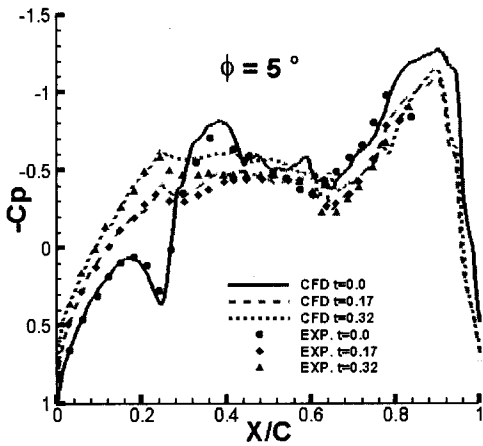


그림 11. 표면압력계수 ( $\phi = 5^\circ$ )

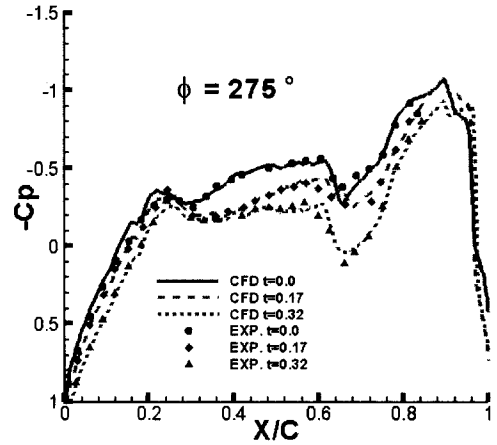


그림 14. 표면압력계수 ( $\phi = 275^\circ$ )

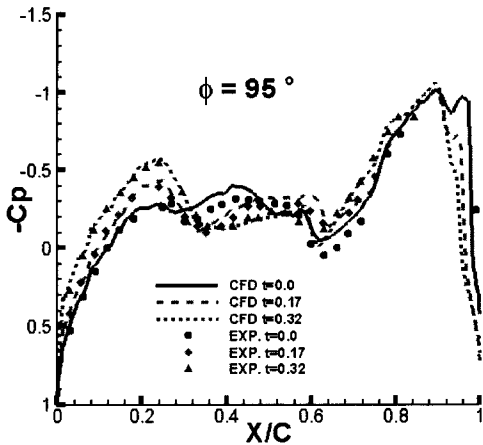


그림 12. 표면압력계수 ( $\phi = 95^\circ$ )

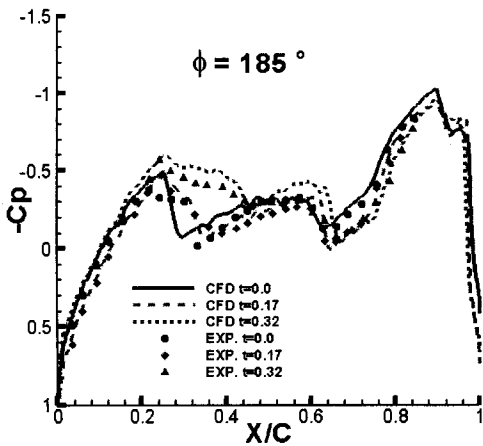


그림 13. 표면압력계수 ( $\phi = 185^\circ$ )

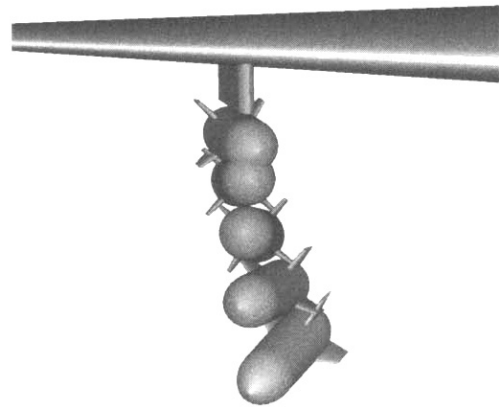


그림 15. 0.1sec 간격의 스토어 분리과정

## 4.2 세 개의 외부장착물 분리

검증된 해석코드를 다 물체간의 상대운동 해석을 위해 확장하여 세 개의 스토어 분리에 대해 적용하였다. 스토어는 하나의 스토어분리에서와 동일한 Eglin/Pylon에서 분리되며, 스토어의 초기 위치는 참고문헌 8에서와 같다. 해석에 사용된 격자계의 수는 총 네 개이며, 주 격자계는 Eglin/Pylon을 포함하는 형상으로 404,738개의 격자요소와 75,709개의 격자점으로 이루어져 있으며 8개의 영역으로 분할되었다. 각각의 부 격자계는 스토어를 포함하며 249,536개의 격자요소와 45,113개의 격자점으로 이루어져 있고 5개의 영역으로 분할되어, 각각의 분할된 영역은 평균적으로 50,600개의 격자요소를 포함하며, 이 경우는 파일런과 스토어 사이의 간격이 충분히 큰 이유로 하나의 스토어 분리에서보다 격자요소의 수

를 감소시킬 수 있었다. 비정상 유동해석의 초기 해의 제공을 위해 정상유동을 해석하였으며, 유동 조건은 자유류 마하수 0.95, 받음각 0도에서 유동해의 완전 수렴을 위해 국부시간전진기법을 사용하여 2,000번의 반복계산을 수행하였으며, 23개의 Pentium-IV 2.4GHz CPU를 사용하여 4,700sec의 계산시간이 소요되었다.

표 2에서는 비정상 유동에 사용된 스토어와 ejector의 특성치를 나타내었다. 스토어에 ejector force가 작용하는 위치, 유동조건 및 고도는 하나의 스토어 분리시와 같은 조건이며, ejector force는 3/4로, 스토어의 질량관성모멘트는 1/2로 줄어 스토어의 운동에 대한 공력의 영향이 커질 것을 예측할 수 있다. Ejector force는 파일런에서 아래(bottom)쪽의 스토어에는 수직으로, 안쪽(inboard)과 바깥쪽(outboard)에 위치한 스토어에는 각각 45° 방향으로 작용한다. 스토어는 0.04sec의 시간간격을 가지고 bottom-outboard-inboard 스토어의 순서로 분리된다.

표 2. 스토어와 ejector의 특성치

Forward Ejector Force	1,800lb
Rear Ejector Force	7,200lb
$I_{xx}$	10slug-ft <sup>2</sup>
$I_{yy}$	180slug-ft <sup>2</sup>
$I_{zz}$	180slug-ft <sup>2</sup>
Weight	1,000lb
Separation Interval	0.04sec

비정상 유동의 해석은 0.005의 무차원 시간간격으로 이중시간 적분기법을 사용하여 3,300번의 반복계산을 수행하였으며 이는 0.408sec에 해당된다. 계산은 정상유동해석에서와 같은 PC 클러스터를 사용하여 17시간이 소요되었다. 이 경우에 대해서는 실험치가 존재하지 않아 본 연구와 동일한 조건을 적용한 타 연구자의 결과와 비교하였다[9]. 그림 16-17은 아래쪽에 위치한 스토어의 위치와 회전변위에 대한 해석결과이다. 이는 하나의 스토어가 분리되는 경우의 결과와 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 18-19에서는 바깥쪽에 위치한 스토어의 변위를 나타내었으며, 45°로 작용하는 ejector force의 영향으로 아래쪽의 스토어보다 Y방향으로 변위가 크게 일어남을 알 수 있다. 회전변위는 역시 ejector force의 영향으로 yaw 각은 초기에 안쪽으로 회

전하다가 이 후 편에 의한 공력과 스토어 안쪽에 생성되는 강한 압력으로 바깥쪽으로 회전한다. 그림 20-21은 안쪽에 위치한 스토어의 변위를 나타낸 그림으로, 바깥쪽 스토어와 같이 ejector force의 영향으로 Y방향의 변위가 크게 일어나며, 회전변위의 경우에는 pitch와 yaw 각이 크게 변하는 것을 알 수 있다. 이는 pitch 각의 경우 스토어가 분리되기 전의 정상상태 유동에서 머리속임 모멘트가 ejector force로 인한 머리올림 모멘트보다 크기 때문이며, yaw 각은 ejector force에 의해 발생하는 스토어의 yaw-out 모멘트에 정상상태에서의 모멘트가 같은 방향으로 더해지기 때문이다. 그림 16-21에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 얻어진 계산결과는 참고문헌 9의 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 22에는 0.1sec 간격의 스토어 분리과정을 나타내었다.

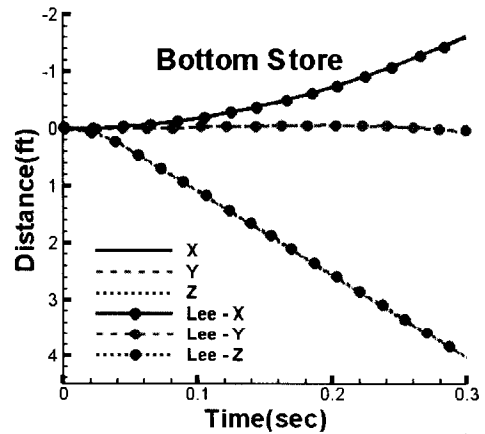


그림 16. Bottom 스토어의 궤적

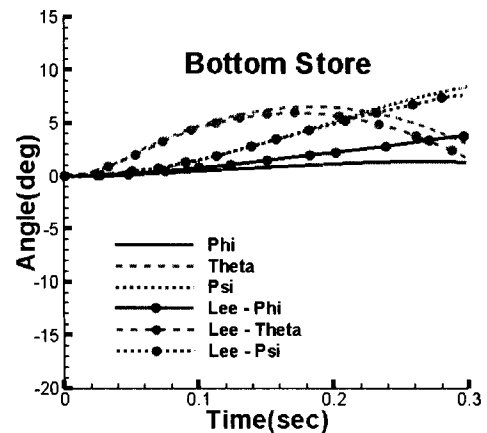


그림 17. Bottom 스토어의 회전변위



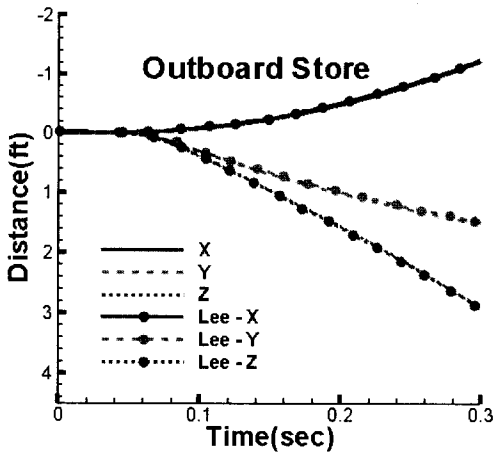


그림 18. Outboard 스토어의 궤적

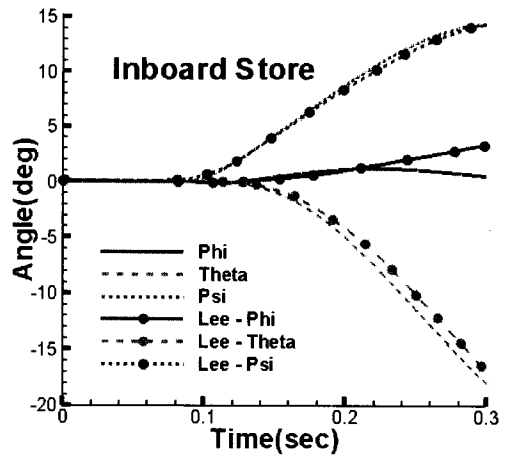


그림 21. Inboard 스토어의 회전변위

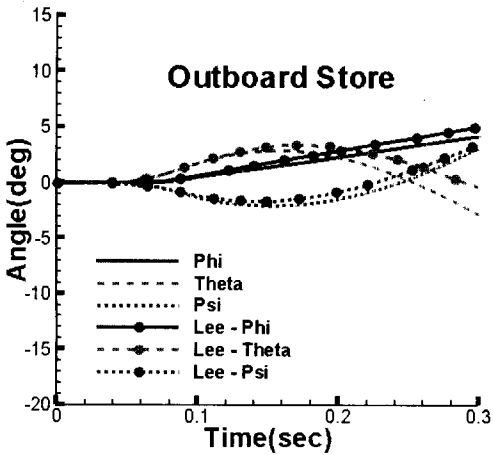


그림 19. Outboard 스토어의 회전변위

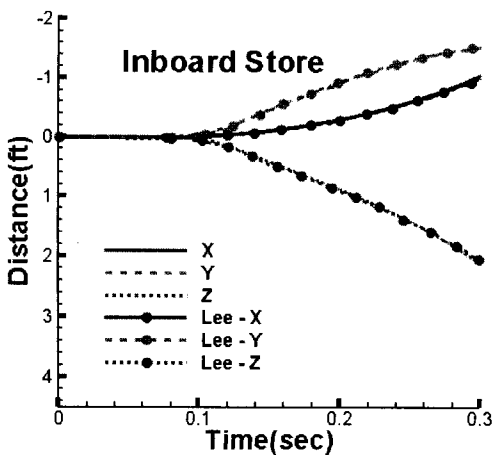


그림 20. Inboard 스토어의 궤적

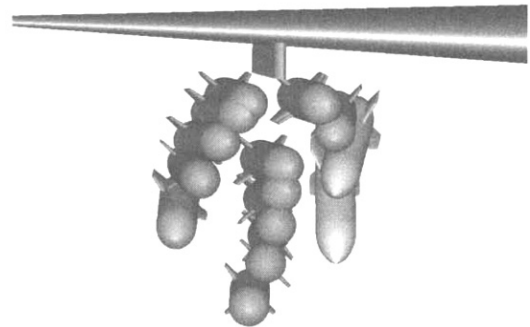


그림 22. 0.1sec 간격의 스토어 분리과정

## V. 결 론

본 연구에서는 상대운동이 있는 복잡한 형상에 대한 비정상 유동해석을 위해 비정렬 중첩격자기법을 개발하였다. 비정렬 격자계에서 신속하고 강건하게 쓰일 수 있는 탐색방법을 제안하였으며, 독립적인 격자계간의 정보전달을 위해 필요한 삼간경계면이 상대 격자계의 계산되는 격자요소의 내부에 위치할 수 있도록 정의하였다. 해석코드의 공간상의 이차정확도를 만족시키기 위한 삼간점의 선택과 삼간방법을 제안하였으며, 물체내부에 위치하는 삼간점의 처리방법을 제안하였다. 또한 개발된 비정렬 중첩격자기법이 병렬환경에서 구동되기 위한 자료구조를 제안하여 해석코드의 효율성을 향상시켰다.

개발된 해석코드의 검증을 위해 CTS 실험치가 존재하는 외부장착물 분리문제에 적용시켰으며, 계산에 의해 얻어진 결과는 실험치와 잘 일치함

을 확인하였다. 다 물체간의 상대운동을 해석하기 위해 해석코드를 확장하였으며, 코드의 적용을 위해 세 개의 외부장착물이 분리되는 문제를 해석하였고, 타 연구자의 결과와 비교하여 그 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

개발된 해석코드는 앞으로 헬리콥터 로터/동체의 유동해석 및 항공기 전기체에서 분리되는 외부장착물 등의 문제에 적용될 것이다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- 1) L. E. Lijewski and N. E. Suhs, "Time Accurate Computational Fluid Dynamics Approach to Transonic Store Separation Trajectory Prediction", *Journal of Aircraft*, Vol. 31, No. 4, 1995, pp. 886-891.
- 2) L. H. Hall and V. Parthasarathy, "Validation of an Automated Chimera/6-DOF Methodology for Multiple Moving Body Problems", AIAA-98-0753, 1998.
- 3) J. L. Steger, F. C. Dougherty, and J. A. Benek, "A Chimera Grid Scheme, *Advances in Grid Generation*", K.N.Ghia and U.Ghia eds., ASME FED-Vol.5, June, 1983.
- 4) 정문승, 권오준, "비정렬 중첩격자를 이용한 이차원 날개주위의 비정상 유동해석", 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, 2003, pp. 631-635.
- 5) K. Nakahashi, F. Togashi, and D. Sharov, "Intergrid-Boundary Definition Method for Overset Unstructured Grid Approach", *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 11, 2000, pp. 2077-2084.
- 6) D. G. Holmes and S. D. Cornell, "Solution of the 2D Navier-Stokes Equations on Unstructured Adaptive Grids", AIAA-89-1932, 1989.
- 7) 정문승, "비정상 유동 해석을 위한 병렬화된 비정렬 중첩격자기법 개발", 석사학위논문, 한국과학기술원, 2004.
- 8) R. D. Thoms and J. K. Jordan, "Investigation of Multiple-Body Trajectory Prediction Using Time-Accurate Computational Fluid Dynamics", AIAA-95-1870, 1995.
- 9) S. Lee, M. Park, K. W. Cho, and J. H. Kwon, "New Fully Automated Procedure for the Prediction of Store Trajectory", *Journal of Aircraft*, Vol. 37, No. 6, 2000, pp. 1038-1049.