

# 격자변환기법을 이용한 이동물체 주위의 유동해석

김 태 군\* · 허 남 건†  
(2000년 11월 2일 접수, 2001년 2월 7일 심사완료)

## A Numerical Analysis on Flows Around a Moving Body Using a Mesh Transformation Method

Tae Gyun Kim and Nahmkeon Hur

**Key Words:** Mesh Transformation Method(격자변환기법), Moving Body(이동 물체), Fluid/Solid Interaction(유동/구조 상호 작용)

### Abstract

A flow analysis is performed in the present study for the moving body problem by proposing a mesh transformation method for the movement of the body in the fluid medium. Unlike other moving mesh techniques, a mesh itself is not moving but changes its property as time marches in a mesh transformation method. The flow field results are compared with those by other moving mesh technique, and showed good agreements. The movement of a floatable body in the flow field caused by the moving body is also studied in the present study by using a mesh transformation technique and a fluid/structure interaction method.

### 기호설명

- $\vec{v}$  : 속도 벡터
- $p$  : 압력
- $A$  : 격자의 면적
- $S$  : 생성항
- $M$  : 질량
- $F_n$  : 수직력
- $F_s$  : 수평력
- $M_z$  : 회전 모멘트
- $a_x, a_y$  : x, y축 방향의 가속도
- $I$  : 관성 모멘트
- $\Delta x, \Delta y$  : x,y축 방향으로의 이동 거리
- $\Delta t$  : 시간 간격
- $\theta$  : 회전 각도
- $\rho$  : 밀도
- $\mu$  : 점성

### 1. 서 론

고속으로 진행되는 열차나 자동차는 주변에 큰 운동량을 생성하게 된다. 이 운동량은 열차나 자동차가 터널, 정거장 등을 통과할 때, 높은 압력으로 바뀌어 주위 벽면이나 물체에 힘을 미치게 된다. 열차 등은 주기적으로 진행하므로 압력이 터널 벽이나 열차 정거장 등에 주기적인 힘을 주어 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 따라서 이동하는 물체와 주변의 정지되어 있는 물체 사이의 유동장과 압력장의 해석은 중요할 것이다. 이러한 유동장은 유동이 구조물에 작용하는 힘과 힘을 받은 구조물이 변형되거나 이동하면서 유동장에 미치는 영향이 있을 것이다. 따라서 이러한 현상을 해석하기 위해서는 유체가 구조물에 미치는 힘과 그에 따른 구조물의 변형이 유동장에 미치는 영향을 동시에 고려해야 할 것이다.

물체의 이동이나 변형에 대한 수치해석을 위하여 이동 격자를 표현하는 방법이 많이 개발되어 왔다. 즉, Demirdzic 와 Peric<sup>(1)</sup>은 비정상 상태에

\* 서강대학교 대학원 기계공학과  
† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과  
E-mail : nhur@ccs.sogang.ac.kr  
TEL : (02)705-8637 FAX : (02)712-0799

서의 Navier-Stokes 방정식과 격자의 이동에 의해 생기는 인공적인 오류를 제거할 수 있는 공간 보존 방정식(Space conservation law)을 이용하여 이동 물체를 해석 할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 Ogawa와 Fujii<sup>(2)</sup>는 이동 다중 격자(Sliding Multi Block Method)를 이용하여 열차가 터널을 통과할 때 주위의 압력 변화와 터널내에서 압력 파의 진행에 대하여 연구하였다. 이 방법은 계산 영역을 다중 블록으로 지정하여 격자를 생성한 다음 격자끼리 미끄러져 나가도록 계산을 진행하는 것이다. 이러한 경우는 블록과 블록 사이에 격자점들이 어긋나게 되므로 물리량을 경계면 사이를 가로질러 전달시키는 특별한 방법이 필요하다. Gosman<sup>(3)</sup>은 격자의 추가·제거 방법(Addition/Deletion Method)을 이용하여 실린더 내부 유동에 대하여 수치 해석을 수행하였다. 이 경우 격자의 수가 변함으로 인해 각 격자에서 계산된 값을 적절히 보간 하여 재배치하게 된다. Tuncer<sup>(4)</sup>는 중첩 격자(Overset grid, Chimera grid)를 이용하여 상하로 이동하는 에어 포일에 대하여 수치 해석을 진행하였다. 이 경우는 형상이 복잡한 물체의 이동에 대하여 격자 형상, 부피 변화 없이 해석할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 내부 반복이나 보간등의 복잡한 절차를 거쳐야 함으로 상대적으로 계산 시간이나 격자 작성의 문제 등이 존재한다. 위와 같은 방법이 대부분이 이동 격자를 구성하는 방법이다.

본 연구에서는 이동 격자를 구현하기 위한 한 방법으로 물체가 이동하는 방향으로 격자의 성질을 유체에서 고체로 바꾸어 주고 이동 물체 주위에서 적절한 이산화 방정식을 택하는 방법인 격자변환기법을 고안하였다. 이 방법은 격자의 부피 변화나 내부 반복 계산 등과 보간 등을 거치지 않고 간단한 형상 등에 대하여 이동하는 물체를 해석 할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 고안된 격자변환기법의 유용성을 보이기 위하여 이동 물체와 고정된 물체간의 상호작용에 대한 2차원 유동 해석을 수행하였다.

## 2. 지배 방정식 및 수치 해석 방법

### 2.1 지배 방정식

본 연구에서의 지배 방정식은 비정상 상태 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 식 (1)은 질

량 보존식을 나타내며, 식 (2)는 운동량 보존 방정식을 나타낸다. 식 (3)은 스칼라 보존 방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = s_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \text{div}(\rho \vec{v} \otimes \vec{v} - \underline{\underline{T}}) = \vec{s}_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \text{div}(\rho \phi \vec{v} - \vec{q}) = s_\phi \quad (3)$$

위 식에서  $\rho$ 는 밀도,  $\vec{v}$ 는 속도 벡터,  $s_m$ ,  $\vec{s}_v$ ,  $s_\phi$ 는 각각 질량, 운동량, 그리고 스칼라의 생성항을 나타낸다. 또한  $\underline{\underline{T}}$ 는 응력 텐서이며 다음과 같다.

$$\underline{\underline{T}} = -\left(p + \frac{2}{3}\mu \text{div} \vec{v}\right)\underline{\underline{I}} + 2\mu \underline{\underline{D}} \quad (4)$$

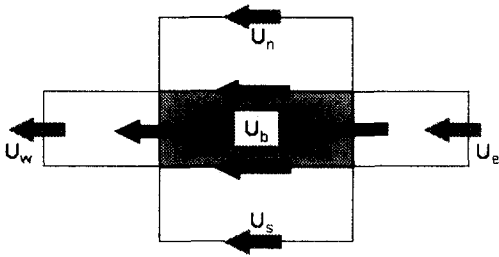
여기서  $p$ 는 압력,  $\mu$ 는 점성 계수,  $\underline{\underline{D}}$ 는 변형 텐서이다. 본 연구에서는 격자변환기법 적용의 한 예로서 물속에서 이동하는 물체 주위의 유동장을 해석하기 위하여 유체의 밀도  $1000 \text{ kg/m}^3$ 와 점성 계수  $0.001 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 을 사용하였다. 계산은 본 연구실에서 개발 중인 TURBO-3D<sup>(5)</sup>를 이용하였으며, 난류 모델은 표준  $k-\epsilon$  모델을 이용하였다. 비정상항의 이산화 방법으로는 수렴의 안정성과 계산 시간을 절약하기 위하여 Fully implicit 방법을 이용하였다.

### 2.2 격자 변환 기법

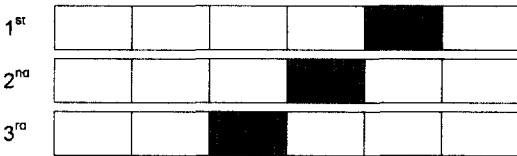
물체가 유동장 안을 움직이게 되면, 물체의 벽면의 속도는 Fig. 1(a)와 같이 물체의 이동 속도  $U_b$ 와 같은 값을 가진다. 이것은 이동 물체 주변 격자에서 운동량 생성항으로써 작용하게 된다. 따라서 전체 유동장에 물체가 이동하면서 생기는 운동량 생성에 대한 부분을 적절하게 대입해 주면 될 것이다.

$$S = S_U - S_F \phi_P = \frac{\rho A U_B (U_B - U_P)}{\text{Vol}} \quad (5)$$

운동량 생성항은 위 식과 같이 선형화 된다. 여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $A$ 는 격자면의 면적,



(a) The velocity at moving block wall



(b) Modelling of block movement

Fig. 1 The mesh transformation method

Vol은 부피,  $U_B$ 는 물체가 움직이는 속도  $U_p$ 는 유체의 속도를 나타낸다. 고체 블록의 이동은 Fig. 1(b)와 같이 시간 단계에서 이동하고자 하는 방향으로 격자의 성질을 변화시켜 구현하였다. 즉, 진행방향 전방의 유체격자는 고체격자로 변환되며 이동물체 후미의 고체격자는 유체격자로 변환시키는 방법을 사용하였다.

물체의 형상이 직사각형이 아니고 일반적인 형태인 경우, 변환되는 유체격자의 크기가 고체격자의 크기와 같지 않을 수 있다. 이 경우는 유체격자의 위치와 형태를 변경시켜 변환시키면 되며, 위치의 변화에 따른 유동장의 보간이 필요하게 된다.

2.3 유체·구조물 상호 작용

Fig. 2는 물체에 작용하는 힘과 이로 인한 물체의 회전 운동과 직선 운동을 나타낸 자유 물체도이다. 물체는 국소적인 변형을 갖지 않는 직사각형의 강체로 가정하였으며, 유체의 작용에 의한 힘 이외의 외력은 없는 것으로 하였다. 물체는 주위에서 미치는 압력에 의해 직선 운동과 회전 운동을 하게 된다. 물체의 각 모서리에서 직선 운동과 회전운동에 의한 변위  $\Delta x_{total}$ 과  $\Delta y_{total}$ 을 구하여 물체의 위치와 형태를 파악하였다. 물체에 수직하게 작용하는 힘의 평형식은 아래와 같다.

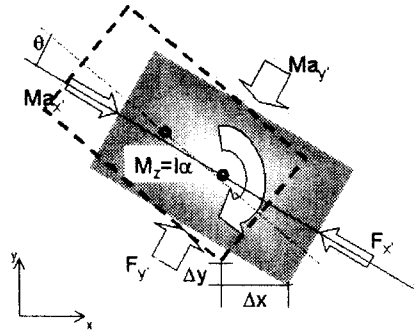


Fig. 2 Free body diagram of a solid body

$$F_x - Ma_x = 0, \quad F_y - Ma_y = 0 \quad (6)$$

식 (6)은 각각  $x'$ ,  $y'$ 방향에서의 힘의 평형식이다. 여기서 좌표축  $x'$ ,  $y'$ 는 블록의 한 꼭지점을 원점으로 하고 그 꼭지점에 연결된 모서리 방향을 축으로 하는 물체에 부착된 좌표계이다. 여기서  $F_x$ ,  $F_y$ 는 물체에 작용하는 힘을 나타내며  $M$ 은 질량,  $a_x$ ,  $a_y$ 는 가속도이다. 물체의 중심에서의 모멘트에 대한 식은 아래와 같다.

$$\vec{r}_x \cdot F_{sx} + \vec{r}_y \cdot F_{sy} + \vec{r}_y \cdot F_y + \vec{r}_x \cdot F_x = I_z \cdot \alpha \quad (7)$$

여기서  $I_z$ 는 관성 모멘트를  $\alpha$ 는 각 가속도를 나타내며,  $F_{sx}$ ,  $F_{sy}$ 는 전단력을 나타낸다. 벡터  $\vec{r}$ 은 모멘트의 중심에서 힘이 작용하는 작용점까지의 벡터이며, 모멘트는 벡터  $\vec{r}$ 과 힘의 외적으로 나타낼 수 있다.  $\vec{x}'$ ,  $\vec{y}'$ 는 힘  $F_x$ 와  $F_y$ 의 작용점까지의 거리이다.

힘의 중심이 물체의 중심과 일치하지 않는 경우 물체에 모멘트를 발생시킨다.  $I_z$ 는 블록의 관성 모멘트이며,  $b$ 와  $h$ 는 물체의 변의 길이,  $\alpha$ 는 각가속도이다. 위 식들을 이용하여 물체의 이동 변위를 얻을 수 있다. 식 (8), (9)는 각각 힘의 평형 관계식에 의해  $x'$ ,  $y'$ 방향으로의 이동거리  $\Delta l_x$ ,  $\Delta l_y$ 를 나타낸다.

$$P_x \cdot A_x = M \cdot a_x, \quad \frac{P \cdot A \cdot \Delta t^2}{M} = \Delta l_x \quad (8)$$

$$P_y \cdot A_y = M \cdot a_y, \quad \frac{P \cdot A \cdot \Delta t^2}{M} = \Delta l_y \quad (9)$$

이것을 기준 좌표계에서의 이동 거리로 변환하여 기준 좌표계에서의 이동 거리  $\Delta x_{trans}$ ,  $\Delta y_{trans}$ 를 구한다. 모멘트에 의한 물체의 회전량은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\pi(\frac{1}{2}(bF_{sy} + hF_{sx}) + r_n F_n + r_l \cdot F_l) \Delta t^2}{180 \cdot I_z} = \theta \tag{10}$$

위와 같이 회전한 각도를 얻어 회전에 의한 좌표값의 변화량  $\Delta x_\theta, \Delta y_\theta$ 를 얻을 수 있다. 따라서, 기준 좌표계에 대한 물체의 전체 이동 거리  $\Delta x_{total}$ ,  $\Delta y_{total}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x_{total} &= \Delta x_{trans} + \Delta x_\theta \\ \Delta y_{total} &= \Delta y_{trans} + \Delta y_\theta \end{aligned} \tag{11}$$

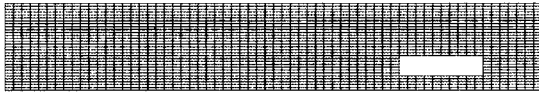


Fig. 3 Computational mesh for calculation of flows around moving block

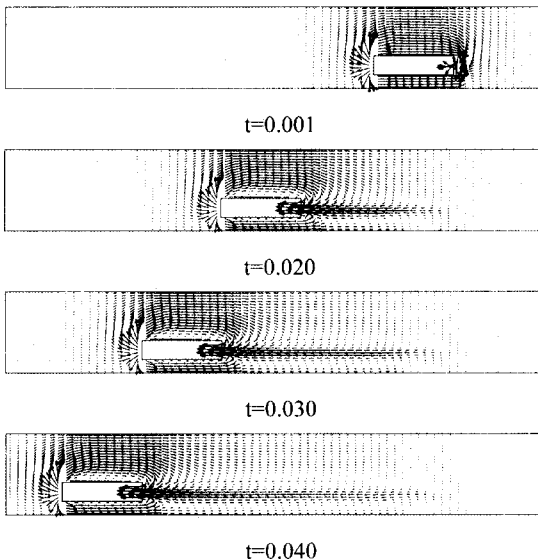


Fig. 4 Velocity vector plot around moving block for variation time

이렇게 물체의 새로운 위치가 결정되면 이에 맞추어 주위 격자를 재배치하여 다음 time step으로 넘어가게 된다.

위와 같은 격자변환기법과 유체·구조물 상호작용 기법을 사용하여 본 연구에서는 이동물체 주위의 유동해석과 이동물체에 의해 야기되는 유동장에 의한 주위 물체의 움직임을 해석하였으며 그 결과를 다음에 설명하였다.

### 3. 계산 결과 및 토의

물체가 관내를 이동하는 형상을 계산하기 위한 계산 격자를 Fig. 3에 나타내었다. 물체의 이동 속도는 30m/s이다. 총2010개의 격자를 이용하였으며, 경계 조건은 관의 양끝에 대칭 경계 조건 나머지는 벽면 경계 조건을 이용하였다.  $\Delta t$ 는 0.001이며, 총 40time step을 계산하였다. 본 연구실의 SGI O<sub>2</sub> (R5K CPU, 128MB memory, 6GB HDD)를 이용하여 계산하였다.

Fig. 4는 속도 벡터이다. 물체가 초기에 순간적으로 출발하므로  $t$ 가 0.001일 때 물체의 앞쪽에서 갑자기 높은 속도가 나타난다. 이후 이동 물체 주위로 박리 영역을 형성하며, 물체가 진행하고 있다. Fig. 5는 본 연구의 속도 분포 결과를 상용 프로그램인 STAR-CD<sup>(6)</sup>의 격자 추가·제거 방법을 이용한 결과와 비교한 그림이다. 여기서  $x^*$ 는 계산 영역의 전체 길이와 출구 방향에서 떨어진 거리의 비이다. 본 연구의 결과와 STAR-CD에 의한 결과가 비슷한 값을 나타내고 있어 격자 변환기법의 타당성을 입증할 수 있다.

이동하는 물체에 의해 야기된 유동장에 의한 주위 물체의 움직임을 격자변환기법과 유체·구조물 상호작용 기법을 사용하여 해석하였다. 이 경우 계산은 총 4000개의 격자를 이용하였으며, 본 연구실의 Origin 2000 Workstation을 이용하여,  $\Delta t$ 는 0.001로 총 70time step을 계산하였다. 전체 계산 시간은 약 2시간 정도 소요되었다. 해석 결과를 Fig. 6에서 10에 나타내었다.

Fig. 6은 이동 물체 주변의 압력 분포 및 정지되어 있던 물체의 이동과 회전을 보여주는 그림이다. 이 경우 이동물체의 크기는 7cm x 30cm이며, 정지물체의 크기는 7cm x 18cm이고 무게는 5kg이다. 물체의 회전은 이동하는 물체가 출발하는 초기에 물체는 반시계 방향으로 회전을

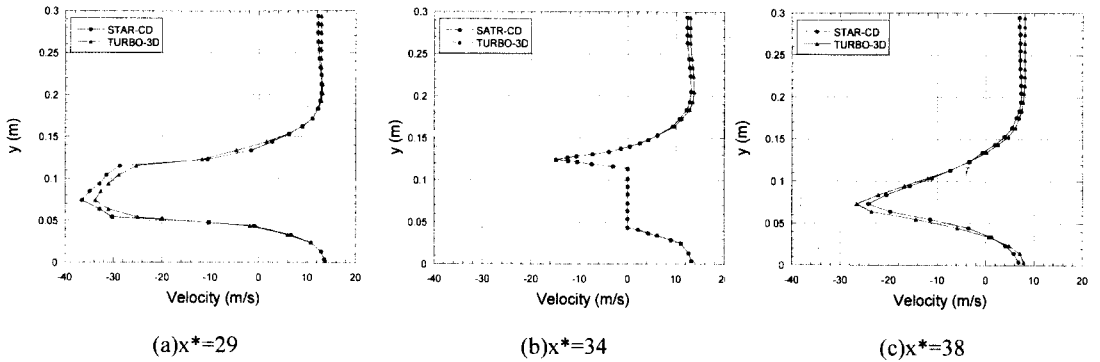


Fig. 5 Comparison of present computed velocity distribution with STAR-CD results ( $t=0.002$ )

시작하며, 이동 물체가 정지되어 물체의 밑으로 들어오게 되면서, 다시 시계 방향으로 회전하게 된다. 또한 중심의 이동은 시계 방향으로 회전하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7과 8은 물체의 질량 변화에 따른 물체 중심의 궤적과 회전을 각각 나타낸 그래프이다. 여기서  $M^*$ 는 기준질량(1kg)으로 무차원화 한 값이며,  $M^*$ 가 3, 4, 5인 경우에 대하여 해석하였다. Fig. 7로부터 시간이 지남에 따라 물체의 중심은 시계 방향으로 회전하고 있음을 볼 수 있다. 또한 질량이 작을 수록 중심의 궤적은 큰 변위를 가지게 되며, 그와 반대로 질량이 커질수록 궤적은 작아 지게 된다. 이는 물체에 같은 힘이 작용할 때 질량이 커지므로 가속도가 작아 지게 되고 따라서 물체의 변위 또한 작아 지기 때문이다. 또한, Fig. 8로부터 질량이 작을수록 관성 모멘트가 작아지게 되므로 물체의 회전량은 커지게 됨을 볼 수 있다.

Fig. 9와 10은 이동 물체의 크기 변화에 따른 주위 물체 중심의 궤적과 회전을 각각 나타낸 그래프이다. 이 경우 이동 물체의 폭은 모두 변화 없이 7cm이며 길이가 30cm일 때를 기준(1D)으로 물체의 길이를 0.5, 1, 1.5, 2D로 변화 시켰다. y 방향으로서는 대부분 비슷한 값만큼 이동을 하고 있음을 볼 수 있으나 이동하는 물체가 길어질 수록 x방향으로의 변위가 길어지는 것을 볼 수 있다. 이동 물체의 길이가 길어질수록 정지되어 있던 물체 옆을 지나는 시간이 크게 되므로 이동 물체가 긴 경우 오랜 시간 힘을 미치게 되어 물체가 뒤쪽으로 점점 길게 이동하게 된다. Fig. 10은 물체의 회전 이동 결과 값을 예측한 것이

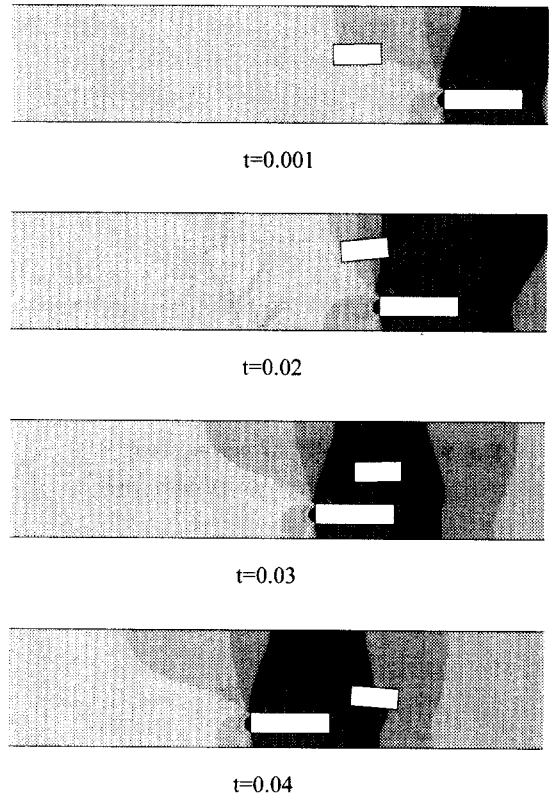


Fig. 6 Predicted pressure contour plot for various times when moving block passed by movable block

다. 대체적으로 초기의 반시계 방향으로 회전하는 각도는 동일한 값을 보이나 이후 시계 방향으로 회전하는 과정에서 이동 물체의 길이가 짧

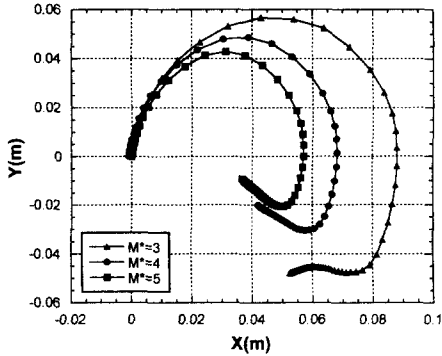


Fig. 7 Effect of mass of movable body on locus of center of movable body

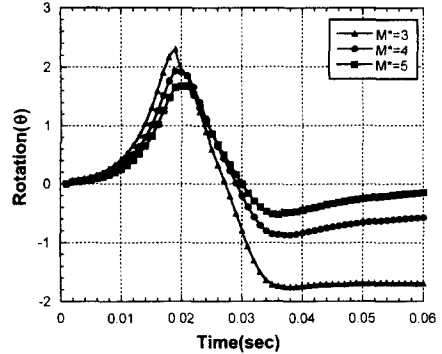


Fig. 8 Effect of mass of movable body on rotation of movable body

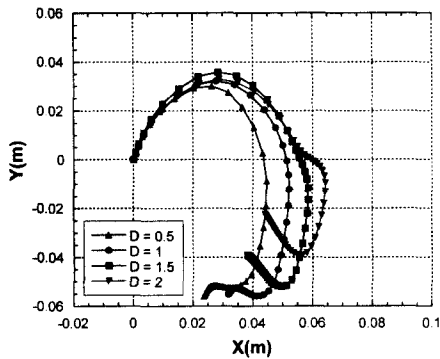


Fig. 9 Effect of size of moving body on locus of center of movable body

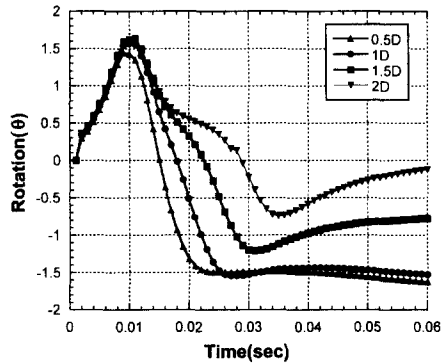


Fig. 10 Effect of size of moving body on rotation of movable body

을수록 더 큰 각도로 회전함을 볼 수 있다. 이것은 이동 물체의 길이가 길어질수록 물체에 작용하는 모멘트의 영향이 적기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 격자 변환 방법을 제안하여 이동하는 물체 주위의 유동에 대하여 해석을 수행하였다. 이동하는 물체 주위의 유동장 해석을 위한 일반적인 이동 격자 방법은 시간에 따라 격자가 움직이는 방법이지만 본 연구에서 제안한 방법은 시간에 따라 격자가 움직이지 않고 대신 격자의 성질 즉, 유체 또는 고체의 성질을 변환시키는 방법이다. 해석 결과는 이동격자 방법에 의한 STAR-CD의 결과와 비교하여 좋은 일치

보였다. 또한, 이동하는 물체 주변의 유동장의 영향에 의한 주위의 물체의 움직임을 격자 변환 방법과 더불어 유체와 구조물간의 상호 작용 기법을 이용하여 해석하였다. 이동 물체의 크기와 정지물체의 무게변화에 따른 물체의 움직임을 해석하여 타당한 결과를 얻을 수 있음을 보였다. 본 연구의 결과는 향후 이동 물체 주변에 정지되어 있는 물체가 탄성체인 경우, 그리고 3차원 다양한 형상의 이동물체 주위의 유동 등에 대하여 확장될 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 연구는 서강대 산업기술연구소의 일부 연구비 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께

감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Demirdzic, I., and Peric, M., 1998, "Space Conservation Law Finite Volume Calculations of Fluid," *Int. J. Numer. Meth. Fluid*, Vol. 8, pp.1037~1050.
- (2) Ogawa, T., and Fujii, K., 1997, "Numerical Investigation of Three Dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel," *Computer & Fluids*, Vol. 26, pp.565~585.
- (3) Gosman, A.D., 1998, "Development in Industrial Computational Fluid Dynamics," *Trans. IChemE.*, Vol. 76, pp.153~161.
- (4) Tuncer, I.H., 1997, "Two Dimensional Unsteady Navier-Stokes Solution Method with Moving Overset Grid," *AIAA Journal*, Vol. 35, pp. 471~476.
- (5) 허남진, 조원국, 윤성영, 김광호, 1994, "일반 비직교 좌표계를 사용한 3차원 범용 유동 해석 프로그램의 개발," *대한기계학회논문집*, 18권 12호, pp.3345~3356.
- (6) STAR-CD Manual Version3.0, 1996, *Computational Dynamics Limited*.