

‘98 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

입구유속의 진폭이 층류유동에서 사각실린더 주위의 와류shedding과 공진현상에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

정영중, 심석구
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

강신형
서울대학교
서울시 관악구 신림동

요 약

유체내의 물체 주위에서 유동박리로 인해 생성되는 와류shedding은 열전달이나 물질전달을 촉진시키는 이점이 있으나, 항력을 증가시키거나 유동 및 온도의 요동에 의해 구조물을 손상시키는 단점이 있다. 특히 물체와 주위 유동 사이에 공진이 일어나면 항력값이 증가하면서 항력과 양력의 진폭이 급격히 증가하여 물체에 심각한 손상을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 레이놀즈수 200 이하의 층류유동에서 공진시 물체 주위의 유동현상과 이로 인한 양력과 항력의 변화들을 수치해석방법을 통하여 분석하였다. 수치해석은 일반좌표계에서 유한체적법을 적용하여 Navier-Stokes 방정식을 차분화하였다. 이때 방정식의 종속변수로는 공변속도를 채택하였으며, 이산화된 방정식은 분리단계법을 이용하여 수치해를 구하였다.

입구유속의 강제진동에 의한 사각실린더 주위의 와류shedding시 공진이 발생하는 강제진동수의 범위는 원통실린더의 경우와 유사하였으나 상대적으로 폭이 더 좁았다. 그리고 공진이 발생하는 강제진동수의 범위는 진폭이 증가할수록 증가하였다. shedding 진동수가 일정하면서 입구유속의 진폭이 증가하면 이에 비례하여 실린더 주위의 유속이 상대적으로 증가하게 되어 와도가 강해지면서 입구유속 진폭에 비례하여 항력의 평균값 뿐 아니라 항력과 양력의 진폭도 증가하였다. 그리고 실린더 뒷면의 와류 생성영역은 진폭에 비례하여 감소하였다. 진폭의 변화에 따라 상변화가 서로 상이한 것은 실린더 뒤쪽의 와류들이 상하면의 압력차이를 변화시켰고 이것이 진폭변화에 따라 상변화를 상이하게 나타나게 한 원인으로 진폭이 클수록 실린더 뒤쪽에서 압력변화가 심하게 변화하면서 실린더 앞쪽까지 더 많은 영향을 미쳤기 때문이다.

1. 서 론

유체내의 뾰족한 물체 (bluff body) 주위에서 유동박리로 인해 생성되는 와류shedding (vortex shedding)은 열전달이나 물질전달을 촉진시키는 이점이 있으나, 항력이 증가하거나 유동 및 온도의 요동 (fluctuation)에 의해 구조물을 손상시키는 단점이 있다. 따라서 와류shedding으로 인하여 물체에 작용하는 힘의 평균값이나 요동의 범위 및 그 특성을 이해하는 것은 학문적인 측면 뿐 아니라 실제 응용면에서 중요한 분야 중에 하나이다. 원자력 발전소와 같이 최신의 고도 기술이 집약되어 있는 설비에는 고속의 유체가 흐름으로써 유동에 의한 진동이 일본의 문주 액체금속로와 같이 매우 중요한 문제로 대두되었을 뿐 아니라 구조물과 유체사이의 동력학적 상호작용도 중요한 문제이다. 이와 같은 문제들을 해결하기 위해서는 공진의 근본원인을 규명하고, 공진시 항력과 양력의 변화를 보다 면밀히 분석할 필요가 있다.

몽푁한 물체가 유연성이 있거나 유연하게 설치되어 있으면 균일한 유동장내에서 공진 (synchronization)이 발생할 수 있다. 이와 같이 유동장의 와류쇄딩과 물체 또는 입구유속 강제진동수 사이의 공진을 일반적으로 lock-on 또는 lock-in이라 부른다. 물체 주위에 와류쇄딩시 공진의 제반현상은 Bearman[1], Griffin and Hall[2], Naudascher and Wang[3]등에 의하여 심도 있게 검토되었다. 공진은 실린더 입구유속의 변화와 와류 생성사이에 어떤 일정한 관계가 있음 (phase-locking)을 의미한다. 물체 주위 유동의 진동수가 실린더의 강제진동수 또는 입구유속의 강제진동수와 공진하게 되면 (i) 와류의 강도가 더욱 강해지고, (ii) 와류쇄딩의 상관관계도 더 긴밀해 진다. 또한 (iii) 실린더에 작용하는 양력의 진폭과 항력의 평균값도 증가할 뿐 아니라 (iv) 몽푁한 물체나 몽푁한 물체로 구성된 구조물의 파손을 촉진시킬 수 있다.

본 연구에서 2차원 층류유동에 대한 와류쇄딩을 분석하였다. 3차원 계산은 물체와 후류 사이에서 일어나는 상호작용을 더 잘 모의할 수 있지만 실린더 가까이 후류의 구조는 2차원성이 강하며, 입구유속이 강제진동하는 경우는 2차원성이 더욱 크기 때문에 2차원 유동해석을 통하여 보다 쉽게 실린더 주위의 쇄딩에 의한 유동특성은 분석할 수 있기 때문에 2차원 유동해석을 수행하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구는 비정상, 비압축성 층류유동에 대하여 2차원 수치해석 방법을 이용하여 수행하였다. 지배방정식인 연속방정식과 Navier-Stokes방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

여기서 x_i 는 직교 좌표계이고 u_i 는 각 방향의 속도성분을 p 는 압력을 나타낸다. 계산의 경계면은 입구 경계면, 출구 경계면, 유동장의 상하 경계면 및 벽 경계면으로 구성된다. 계산영역에 대하여 해를 구하기 위해서는 경계면에서 각 방향의 속도와 압력이 결정되어야 하는데, 입구 경계면과 유동장의 상하 경계면에서의 속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= U_{in}(1 + a \sin 2\pi ft) \\ v &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 U_{in} 은 입구 평균유속이고 a 는 입구유속의 무차원 진폭, f 는 강제 진동수를 나타낸다. 그리고 실린더의 벽에서는 점착조건 (no slip condition)을 사용하였고, 출구 경계면은 다음과 같이 표현되는 대류경계조건을 사용하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + c \frac{\partial u_i}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

여기서 c 는 출구면에서 유동방향 유속의 평균속도이다[4]. 본 연구에서 사용된 격자계는 엇갈림 격자계이다. 지배방정식 (1)과 (2)에서 압력을 속도로부터 분리하기 위하여 분리단계 (fractional step) 방법을 사용하고, 시간 적분방법으로는 Crank-Nicolson의 방법을 사용하였다. 공간 적분시 대류항은 선형 상류 차분법 (linear upwind method)을 사용하고 확산항은 이차 중심 차분법 (central difference method)을 사용하였다. 차분화된 비선형 운동량방정식은 Newton 방법을 사용하여 그 해를 구하고, 압력은 Poisson 방정식을 SOR (successive over relaxation) 방법을 사용하여 해를 구하였다.

3. 계산결과 분석

입구유동의 주기운동에 의한 공진현상과 항력, 양력 등에 미치는 영향을 계산하기에 앞서 균일한 무한 유동장내에서 사각실린더 주위 유동의 와류쇄딩을 계산하였다. 식 (3)에서 경계면을 제외한 초기 유동장은 균일유동 ($u=U_{in}$, $v=0.0$, $a=0.0$)에 약간의 교란 ($0.0 \sim 0.01U_{in}$)을 더하여 $t=0.0$ 에서 교란된 유동장을 만든 후 실린더 후류가 일정한 주기상태를 나타낼 때까지 계산하였다. $t=100H/U_{in}$ 이상이 되면 유동은 완전한

주기상태가 되었으며, 이때 실린더에 작용하는 항력과 양력계수는 그림 1 같이 일정한 상관관계를 유지한다. 레이놀즈수 100은 층류유동이 가능한 레이놀즈수로서 항력과 양력의 관계가 분명하게 나타난다. Arnal등[5]이 지적한 바와 같이 실린더의 앞면과 뒷면의 압력차이가 두 번 변하는 동안 윗면과 아래면의 압력차이는 한 번 변하기 때문에 항력계수의 진동수는 양력계수 진동수의 2배가 된다. 그리고 형상이 입구유속에 대하여 대칭이므로 양력은 평균값이 0이고 요동값만 존재하며, 항력은 평균값이 약 1.51로 일정한 진폭을 가지면서 시간에 따라 규칙적으로 변한다. 실린더 주위의 쉘딩진동수를 이용하여 얻어진 유동의 스트롤수 ($f_s H/U_m$)와 레이놀즈수 ($U_m W/\nu$)의 관계를 다른 연구자들의 계산 및 실험결과와 비교하여 그림 2에 나타냈다. 본 연구에서의 계산결과들은 기존 연구결과와 산포를 고려할 때 이들과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

입구유동이 식 (3)과 같이 주기운동을 하는 유동장에서 사각실린더 주위의 와류쉐딩을 계산하였다. 이 경우 유동에 영향을 미치는 주요 매개변수는 유동의 진폭 ($\Delta u = aU_m$), 강제진동수, 레이놀즈수 등이 있는데 본 연구에서는 유동의 진폭이 와류쉐딩에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 3은 쉘딩진동수를 고유진동수로 무차원시킨 경우로 요동이 없는 균일한 정상 입구유속에서부터 입구유동의 강제진동수를 서서히 증가시키면 쉘딩진동수는 공진이 일어날 때까지 고유 진동수와 유사한 값을 유지하다가 과도기간 동안 쉘딩진동수가 감소하여 공진이 시작되면 강제진동수의 반이 된다. 공진이 시작되는 강제진동수는 진폭이 증가할수록 더 작아지는 경향을 보이고 있다. 공진기간 동안 유동의 쉘딩진동수와 입구유속의 강제진동수의 관계는 $f_s/f \approx 0.5$ 의 값을 유지하다가, 공진이 끝난 후에는 강제진동수의 크기에 관계없이 천이영역을 거쳐 다시 고유진동수 값으로 환원된다. 이것은 기존의 원통실린더 실험자료들의 결과와 매우 유사한 경향이다. 그림 4는 일정한 입구유속의 진폭에 대하여 강제진동수 변화에 따른 공진 발생영역을 나타낸다. 이 그림에는 기존의 원통실린더에서 입구유속이 강제진동하는 경우와 실린더가 유동방향으로 강제진동하는 경우의 공진영역뿐 아니라 사각실린더에서 수행한 Okajima et al. [6], Minewitsch et al. [7]의 결과도 함께 표시하였다. 사각실린더와 원통실린더의 공진이 일어나는 영역을 비교하면 같은 레이놀즈수인 경우 사각실린더가 대체로 더 좁게 나타났으며, 진폭이 증가함에 따라 공진 영역이 더 커지는 경향은 원통실린더와 동일한 경향이다. 본 계산서에서 수행한 정량적인 계산결과는 다음과 같다. 레이놀즈수 100에서 공진이 일어나는 강제진동수의 범위는 $\alpha=0.1$ 인 경우는 고유진동수의 180%~210%이고, $\alpha=0.2$ 인 경우는 160%~220%이고, $\alpha=0.4$ 인 경우는 140%~230%이다.

입구유속의 강제진동에 의한 사각실린더 주위의 유동은 주기적으로 와류가 생성·소멸되는데 강제진동수가 작을 경우는 정상유동에서의 쉘딩과 유사한 형태를 보이나, 강제진동수가 어느 값 이상으로 증가하면 입구유속의 주기와 실린더 후류의 쉘딩주기 사이에 일정한 상관관계가 나타나고 항력계수와 양력계수간에도 규칙성이 생긴다. 진동수가 더 크게 되면 다시 입구유속의 강제진동수와 쉘딩주기의 상관관계는 없어지고 항력계수와 양력계수의 관계도 규칙성을 잃게 된다. 강제진동시 입구유속의 속도변화가 자유유동 (free stream)의 압력구배를 형성시키게 되기 때문이다. 자유유동에서 압력구배는

$$-\frac{\partial p}{\partial x} \approx \rho \frac{\partial u}{\partial t} = 2\pi f \rho U_m a \cos 2\pi f t \quad (5)$$

이므로, 주기적으로 실린더에 정 압력구배와 역 압력구배를 발생시켜 압력의 평균값은 진폭과 강제진동수에 비례함을 알 수 있다.

그림 5는 레이놀즈수 100, 강제진동수 2.0에서 진폭 변화에 대한 상변화를 보여 준다. 예측했던 바와 같이 항력과 양력간에는 강한 규칙성을 가지고 있으면서 강제진동수의 진폭에 비례하여 양력과 항력의 진폭이 증가하면서 항력의 평균값이 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 항력과 양력에 영향을 미치는 가장 중요한 인자가 압력이기 때문에 실린더 주위의 압력분포를 그림 6에 나타냈다. 사각실린더의 경우 평균압력의 최대값은 실린더 앞면 정체점에서, 최소값은 유동박리가 일어나는 앞쪽 상하 모서리에서, 항상 나타나는데 최소값과 최대값의 절대치는 진폭에 비례하여 증가하였다. 압력은 실린더 앞면 정체점에서 최대값을 가지고 앞면 모서리에서 최소값이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 진폭변화에 따른 압력의 변화 폭이 정체점 부근인 앞쪽보다 후류영역인 뒤쪽에서 더 크게 변하고 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 진폭이 증가할수록 실린더 후면의 압력이 더 많이 감소한 것이 평균항력을 증가시킨 원인이다. 그림 6에서 양력변화에 영향을 주는 실린더 상하

면의 평균압력 분포가 진폭변화에 따라 선형적으로 감소했는데도 불구하고 양력의 변화는 그림 5에서 나타난 것처럼 단순히 선형적으로 증가하지 않았다. 이것은 그림 7에 나타낸 실린더 상하면 사이의 압력차이가 진폭에 비례하지 않고 비선형적으로 많이 변화했기 때문이다. 진폭의 변화에 따라 상변화가 서로 상이한 것은 실린더 뒤쪽의 와류들이 상하면의 압력차이를 변화시켰고 이것이 진폭변화에 따라 상변화를 상이하게 나타나게 한 원인으로 진폭이 클수록 실린더 뒤쪽에서 압력변화가 심하게 변하면서 실린더 앞쪽까지 더 많은 영향을 미쳤다. 상류유동은 입구유속 변화에 따라 선형적으로 변화하지만 실린더 하류에서는 비선형적으로 변하기 때문에 진폭변화에 따른 속도 요동값들이 변화하고 이들이 항력과 양력에 영향을 미치게 된다. 그림 8은 레이놀즈수가 100이고 강제진동수가 2.0일 때 실린더 뒷면으로부터 $3H$ 떨어진 위치에서 진폭변화에 대한 유동방향 평균속도의 분포를 나타낸다. u_{ave} 는 실린더의 중심선에서 항상 최소값을 가지는데 진폭이 증가할수록 최소값의 크기는 증가한다. 일정한 강제진동수에서 진폭이 증가할수록 와도의 강도와 요동값들이 증가하는데 이것은 유동의 shedding 주기가 일정하면서 진폭이 증가하면 진폭이 증가한 정도에 비례하여 국부유속의 속도가 빨라졌기 때문이다. 그림 9는 유동방향 요동속도 (u')_{ave} 최대인 지점에서 유동방향 요동속도의 분포를 나타낸다. 유동방향 요동속도가 최대인 위치는 진폭이 증가함에 따라 실린더쪽으로 이동하면서 최대값은 증가하였다. 진폭변화에 따른 요동정도는 와류영역뿐 아니라 자유유동영역에서도 진폭에 비례하여 증가하였으며, 정상 입구유속인 경우는 자유유동에서 유속이 일정하기 때문에 요동값도 0임을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 수치해석 방법을 이용하여 레이놀즈수 100인 경우 입구유속의 강제진동으로 인하여 사각실린더 주위 유동장에서 공진이 발생할 때 유동장의 특성과 항력 및 양력의 변화를 고찰하였다.

유동은 일반 좌표계에서 Navier-Stokes 방정식에 대하여 유한체적법을 사용하여 차분화하고, 운동량 방정식의 종속변수는 공변속도 성분을 채택하였다. 이산화된 방정식은 분리단계법을 사용하여 수치해를 구하였으며 사용된 프로그램은 정상 입구유속인 경우 사각실린더 주위의 유동해석을 통하여 기존의 실험 및 수치해석 결과들을 적절히 예측할 수 있었다.

입구유속의 강제진동에 의한 사각실린더 주위의 와류shedding시 공진이 발생하는 강제진동수의 범위는 원통실린더의 경우와 유사하였으나 상대적으로 폭이 더 좁았다. 그리고 공진이 발생하는 강제진동수의 범위는 진폭이 증가할수록 증가하였다. shedding 진동수가 일정하면서 입구유속의 진폭이 증가하면 이에 비례하여 실린더 주위의 유속이 상대적으로 증가하게 되어 와도가 강해지면서 입구유속 진폭에 비례하여 항력의 평균값뿐 아니라 항력과 양력의 진폭도 증가하였다. 그리고 실린더 뒷면의 와류 생성영역은 진폭에 비례하여 감소하였다. 진폭의 변화에 따라 상변화가 서로 상이한 것은 실린더 뒤쪽의 와류들이 상하면의 압력차이를 변화시켰고 이것이 진폭변화에 따라 상변화를 상이하게 나타나게 한 원인으로 진폭이 클수록 실린더 뒤쪽에서 압력변화가 심하게 변하면서 실린더 앞쪽까지 더 많은 영향을 미쳤기 때문이다.

본 연구는 실제의 응용면에서 원자력 발전소와 같이 레이놀즈수가 큰 경우 고속 유체 유동에 와류형성으로 인한 진동이 구조물에 미치는 영향에 활용될 수 있도록 향후 이 분야의 연구가 촉진되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Bearman, P. W., 1984, "Vortex shedding from oscillating bluff bodies," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 6, pp. 195-222
- [2] Griffin, O. M. and Hall, M. S., 1991, "Review-vortex shedding lock-on and flow control in bluff body wakes," *J. Fluids Eng.*, Vol. 113, pp. 526-537
- [3] Naudascher, E. and Wang, Y., 1993, "Flow-induced vibrations of prismatic bodies and grids of prisms," *J. of Fluids and Structures*, Vol. 7, pp. 341-373
- [4] Pauley, L. L., Moin, P. and Reynolds, W. C., 1990, "The structure of two-dimensional separation", *J.*

Fluid Mech., vol. 220, pp. 397-411

- [5] Arnal, M. P., Goering, D. J. and Humphrey, J. A., 1991, "Vortex shedding from a bluff body on a sliding wall," *J. Fluids Eng.*, Vol. 113, pp. 284-398
- [6] Okajima, A., Kitajima, K. and Ueno, H., 1993, "Numerical study on wake pattern and aerodynamic forces of an oscillating cylinder with a circular and rectangular cross-section," *J. Wind Engng. and Inds. Aerodyn.*, Vol. 50, pp. 39-48
- [7] Minewitsch, S., Franke, R. and Rodi, W., 1994, "Numerical investigation of laminar vortex shedding flow past a square cylinder oscillating in line with the mean flow," *J. of Fluids and Structures*, Vol. 8, pp. 787-802

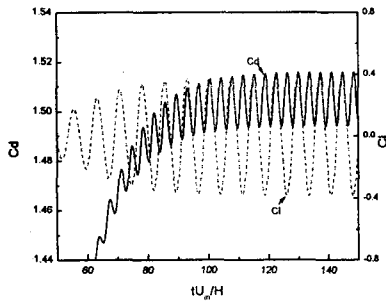


그림 1. 시간 경과에 따른 항력 및 양력계수

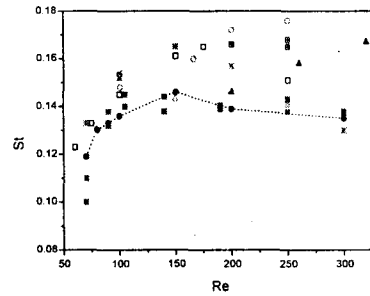


그림 2. 스트로울수와 레이놀즈수의 관계

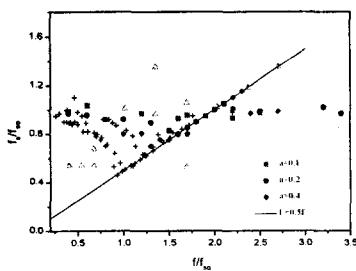


그림 3. 강제진동수 변화에 따른 웨딩진동수

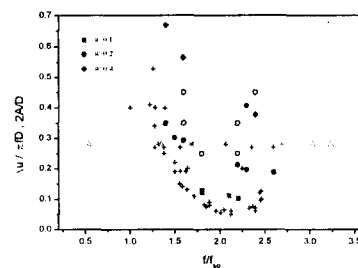


그림 4. 강제진동수 변화와 공진영역

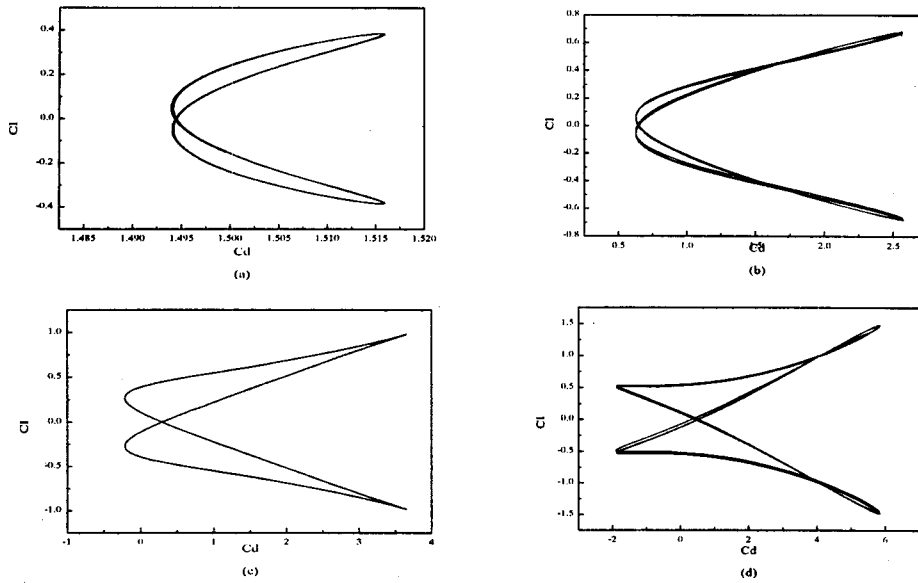


그림 5. 진폭변화에 따른 항력 과 양력계수의 상변화

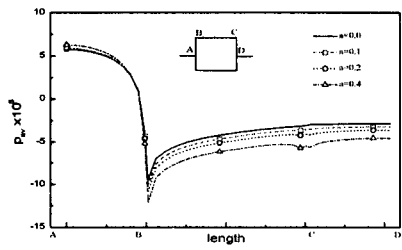


그림 6. 실린더 표면에서 압력변화

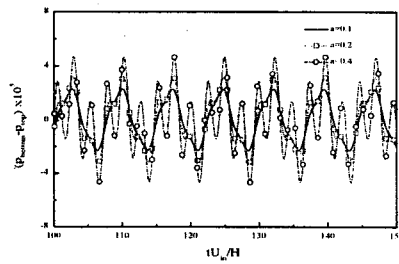


그림 7. 실린더 뒷면에서 상하면의 압력차이

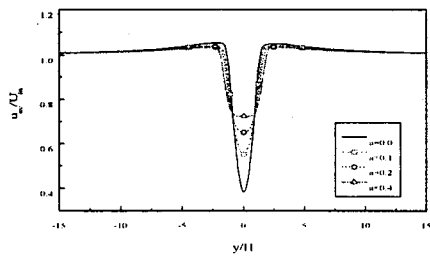


그림 8. $x=3H$ 에서 평균속도 분포

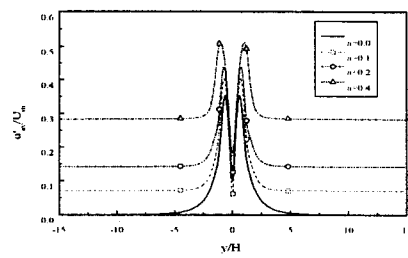


그림 9. $x=3H$ 에서 요동속도 분포