한국해양공학회지 제20권 제2호, pp 29-35, 2006년 4월 (ISSN 1225-0767)

수치모형을 이용한 다원주 주위의 유동 해석

이상화* · 박정호**
*동아대학교 토목 · 해양 공학부
**동아대학교 토목공학과 대학원

Analysis of Flow Around Multi-Circular Cylinders Using a Numerical Model

SANG-HWA LEE*, AND JUNG-HO PARK**
*Division of Civil and Ocean Engineering, Dong-A University, Busan, Korea
**Graduate School of Civil Engineering, Dong-A University, Busan, Korea

KEY WORDS: Flow pattern 흐름 상태, Multi-circular cylinder 다원주, Vortex shedding 보오텍스 박리, FLUENT, Flow visualization Installation 유동가시화 장치

ABSTRACT: *The flow patterns around multi-circular cylinders are studied, in order to obtain a global view on the structure of wave control and circulation of sea flow in coastal regions. The flow force depends upon the vortex shedding exerted on the structure, especially how the vortex shedding affects the erosion when the structure sets on the sand bottom. Therefore, it is necessary that the flow pattern be checked. In order to simulate the flow around multi-circular cylinders, the CFX and FLUENT of the computational fluid dynamics (CFD) program were used and compared with the experimental results of the flow visualization installation. The phenomena of flow around the multi-cylinders will be applied to fundamental data for predicting the flow force acting against the structure, erosion, and sedimentation around cylinders in arrangement.*

1. 서 론

우리나라 인근해역의 해안구조물들은 파랑제어를 중요시하는 측면에서 개발 · 건설 되어 왔다. 이러한 구조물들은 외력제어 측면에서는 효과적이나 해수교환의 관점에서는 문제점을 갖고 있다.

본 논문에서는 해안에서 파력제어와 해수교환이 가능한 구조물로써 원형실린더 형태의 다원주 파일을 착안하고, 다원주 주위의 유동현상에 관해 연구하였다. 원형실린더 주위의 흐름에 대한 연구는 체계적으로 수행되지 못하고 단편적으로 항공공학, 기계공학, 토목공학 등의 여러 분야에서 수행되어 왔다. 이것도 한 개의 원형실린더(김광수 등, 2003; 김경환과 윤영환, 2003; Williamson and Roshko, 1988), 한쌍의 실린더(박운진, 2003; Zdravkovich, 1982), 어긋난 두 개 실린더 배열(Staggered arrangement)인 실린더(김태한, 1999; Kiya et al., 1980; Zdravkovich, 1997)가 2-3개 정도의 단순한 배열에 대한 연구가 대부분이며, 최근 다원주 주위의 유동에 관한 실험적 연구(이상화와 장은철, 2004)가 국내에 소개된 바 있다. 원형실린더 주위에 나타나는 Vortex shedding 현상은 이들 구조물에 미치는 유체력 크기를 좌우하며, 특히 구조물이 사질지반상에 설치되어 있을 때는 주위의 세굴현상에도 영향을 미친다. 따라서 우선적으로 필요한 것이 구조물 주위의 유동현상이라 판단하고, 원형실린더 주위의 유동상태를 모의하기 위해서 상용수치해석 CFD 프로그램인 CFX(CFX-5, 2002)와 FLUENT(이상화와 장은철, 2004)를 이용하였으며, 유동가시화 장치의 실험결과와도 비교 분석하였다.

본 연구의 다원주구조물 주위의 유동현상은 원형실린더에 미치는 유체력과 실린더 배열에 따른 주위의 세굴 및 퇴적현상을 예측하는데 있어서 기초자료로 활용될 것이다.

교신저자 이상화: 부산광역시 사하구 하단동 840
051-200-7627 shlee@daunet.donga.ac.kr

2. 수치해석

본 연구에 이용된 모델은 2-방정식의 난류모델이며 수치해석에 소요되는 시간에 비해 정확성이 뛰어나므로 널리 사용되는 모델이다. 2-방정식 모델은 0-방정식모델보다 훨씬 복잡한 형태를 가지고 있으며, 속도와 길이 스케일에 대해 추가적인 2개의 서로 다른 수송방정식을 풀어야 하므로 2-방정식모델이라고 불린다. k-ε 과 k-ω 등의 2-방정식모델은 난류점성과 평균속도경사로 레이놀즈 응력항을 표현하는 확산경사의 가정을 사용한다. 여기서, 난류점성은 난류속도와 난류길이의 곱으로서 모델링된다. 2-방정식모델에서는 난류속도 스케일이 난류운동에너지로부터 계산되며, 수송방정식의 해로부터 구할 수 있다. 난류길이는 대개 난류운동에너지와 난류운동에너지의 소산율로부터 결정되는데, 소산율은 그 수송방정식으로부터 구해진다.

2.1 CFX 프로그램에 응용된 k-ε 모델

k는 난류운동에너지로서 속도변동의 분산으로 정의되고, 차원은 $[L^2T^2]$이며, 단위는 m^2/s^2이다. ϵ은 Turbulence eddy

dissipation rate이고, 단위시간당 k의 차원을 가지며, 단위는 m^2/s^3이다.

k-ε 모델은 기본방정식에 2 개의 변수가 추가된다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (u_{eff} \nabla U)$$
$$= \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \tag{2}$$

여기서, ρ는 유체밀도, U는 유체속도, t는 시간, T는 Transpose, B는 Body force의 합, μ_{eff}는 난류를 고려한 유효점성이다. 그리고 p'은 다음과 같이 표현되는 수정된 압력항이다.

$$p' = p + \frac{2}{3}\rho k \tag{3}$$

0-방정식모델과 같이, k-ε 모델은 와점성 개념에 기초한다. 따라서 다음과 같이 고려된다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \tag{4}$$

여기서, μ는 분자점성, μ_t는 난류점성이다. k-ε 모델은 난류점성을 난류운동에너지와 소산율을 이용하여 다음과 같이 가정한다.

$$\varepsilon \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

여기서, C_μ는 상수이다.

k와 ε는 난류운동에너지와 난류소산율에 대한 다음의 식으로부터 산정된다.

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k)$$
$$= \nabla \cdot ((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \nabla k) + P_k - \rho \varepsilon \tag{6}$$
$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial_t} + \nabla \cdot (\rho U k)$$
$$= \nabla \cdot ((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \nabla \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \tag{7}$$

여기서, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k 는 모델상수이다.

P_k는 점성과 부력에 따른 난류생성항이며, 다음 식으로 표현된다.

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \triangle U^T)$$
$$- \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \tag{8}$$

위 식에서 P_{kb}는 Buoyancy turbulence이고, 다음의 식으로 표현된다.

$$P_{kb} = \frac{\mu_t}{\rho P_{rt}} g \cdot \nabla \rho \tag{9}$$

여기서, P_{rt}는 Turbulent prandtl number이다. 비압축성 유동에 대해 $\nabla \cdot U$ 는 작고, 오른쪽 두 번째 항은 생성에 크게 기여하지 않는다. 압축성유동의 경우 $\nabla \cdot U$ 는 Shock가 발생하는 구역에서만 큰 값을 갖는다. $3\mu_t$ 항은 "Frozen stress" 가정에 기초한다. 이 값은 k와 ε값이 Shock을 지나면서 매우 크게 변하는 현상을 막아준다.

2.2 CFX 프로그램에 응용된 k-ω 모델

k-ω 모델의 한 가지 장점은 낮은 레이놀즈수 영역인 벽 근처 영역을 효과적으로 계산할 수 있다는 점이다. 이 모델은 k-ε 모델에서 사용하는 복잡한 비선형감쇠함수(Non-linear damping function)를 사용하지 않으면서, 정확성과 신뢰성이 뛰어나다. 낮은 레이놀즈수 k-ε 모델은 전형적으로 y+(벽으로부터의 무차원 거리)<0.2의 벽 근처 해상도를 필요로 하는 반면, k-ω 모델은 적어도 y+<2를 필요로 한다. 이런 이유로 새로운 방법이 k-ω 모델을 위해 개발되었다. 이는 낮은 레이놀즈수 형태로부터 벽함수(Wall function)로 전환하는 방법이다.

k-ω 모델은 난류점성을 다음과 같이 정의한다.

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{10}$$

여기서, ω는 Turbulent frequency이고, 현재 사용되는 모델의 시작점은 Wilcox(CFX-5, 2002)에 의해 제안된 k-ω 모델로써 난류운동에너지 k, 난류파장(Turbulent frequency) ω의 방정식을 이용한다.

k-방정식

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k)$$
$$= \nabla \cdot \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \nabla k\right] + P_k - \beta' \rho k w \quad (11)$$

w-방정식

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U w)$$
$$= \nabla \cdot \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_w}) \nabla w\right] + \alpha \frac{w}{k} P_k - \beta \rho w^2 \quad (12)$$

계산에 사용되는 모델상수는 β', β, α, σ_k, σ_w이다.

2.3 CFX에 적용된 전단응력 수송 모델(Shear stress transport model: SST model)

k-ω 모델과 k-ε 모델에 기초한 SST 모델은 수송을 고려함과 동시에 매끄러운 표면과 역압력경사하에서의 유동박리의 시작과 크기를 정확히 예측할 수 있는 모델이다.

SST 모델은 k-ω 모델과 k-ε 모델의 혼합을 수행하기 위해 노드(Node)로부터 가장 가까운 벽면까지의 거리를 계산해야 한다.

Wall scale 방정식은 벽면까지의 거리를 구하는 식으로써 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi = -1 \quad (13)$$

여기서, ϕ는 Wall scale의 값이며, 벽까지의 거리는 다음의 식으로부터 구해진다.

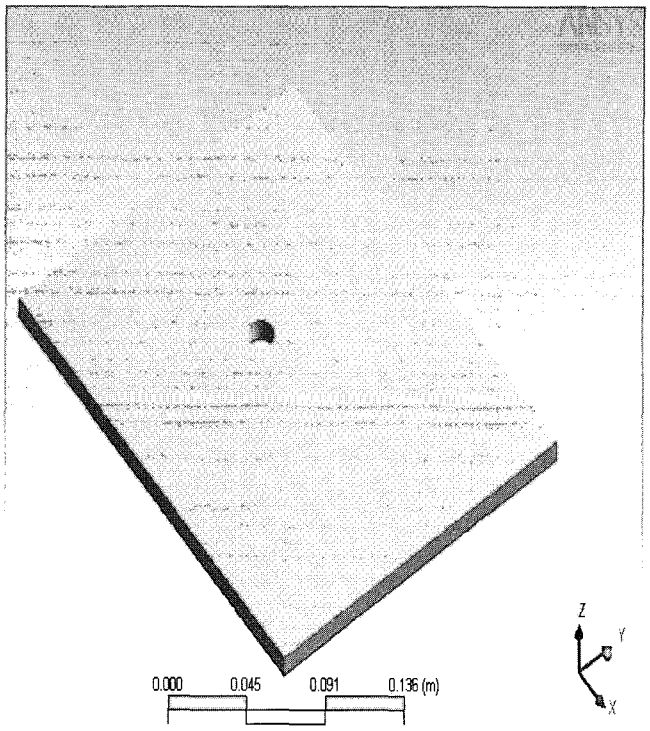
$$Wall \quad Distance = \sqrt{(|\nabla \phi|^2 + 2\phi)} - |\nabla \phi| \quad (14)$$

2.4 FLUENT에 적용된 k-ε 난류모델

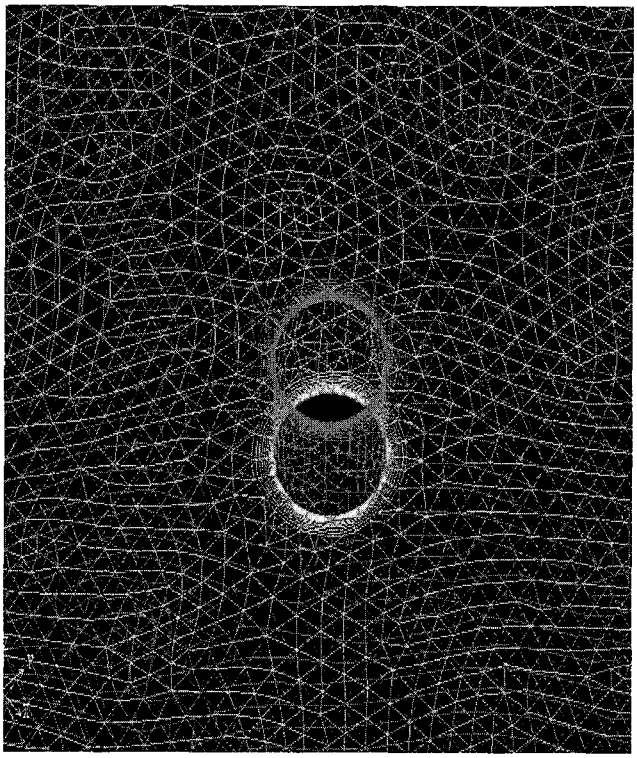
CFX 프로그램에 응용된 k-ε 과정과 동일하다.

2.5 격자생성

수치해석을 위한 격자생성의 수는 실린더 배열형태에 따라서 CFX와 FLUENT 두 경우 비슷하거나 대부분 FLUENT가 많은 경우이다. 격자계로는 비정렬격자계를 사용하였으며 실린더 주위와 곡면부에서는 Wake의 영향을 알아보기 위하여 다른 부분에 비해 상대적으로 조밀한 격자로 구성하였다. 격자망 구성을 요하는 삼각형 수는 CFX를 기준시 단일 실린더인 경우 약 28,000개 이고, 실린더 배열수가 가장 많은 15개 실린더에서는 약 81,000개 정도인데 격자생성 그림으로 두 가지 경우를 아래에 예시하였다.

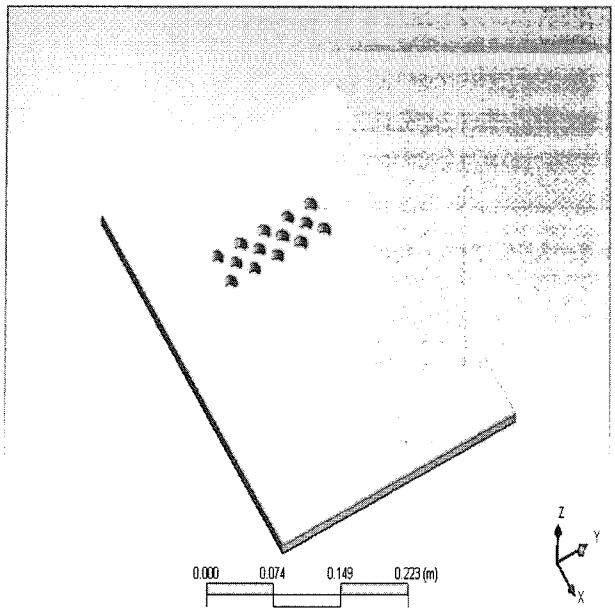


(a) Geometry

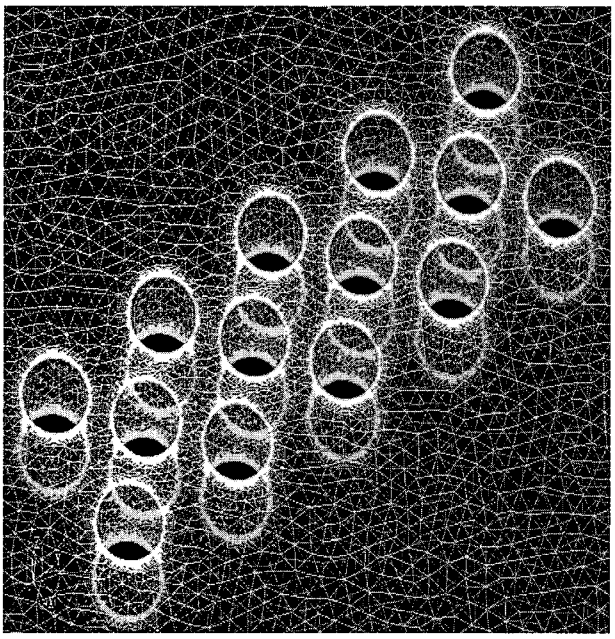


(b) Mesh

Fig. 1 Generation of surface mesh(single circular cylinder)



(a) Geometry



(b) Mesh

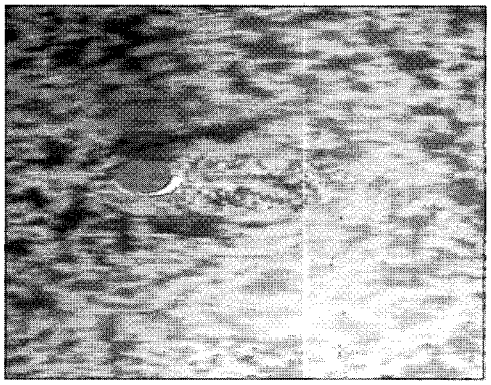
Fig. 2 Generation of surface mesh(multi-circular cylinders)

3. 다원주 주위의 유동현상의 비교

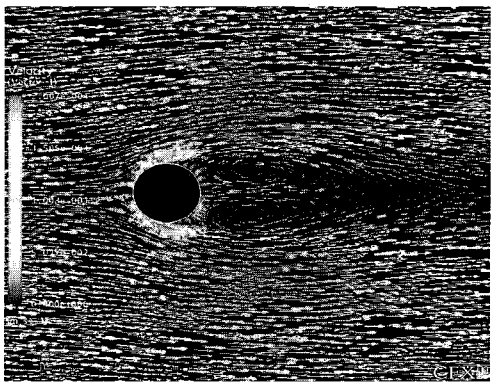
다원주 주위의 유동현상 비교는 수치해석 프로그램인 CFX와 FLUENT를 이용한 계산결과와 유동가시화 장치의 실험결과(이상화와 장은철, 2004)를 상호 비교하였다. 수치계산에서는 유동가시화 실험과 같은 조건인 직경(D)=1.5cm, S/D=2 (S는 각 실린더와의 간격)와 유속(Um)=14.66㎝/s로 수행하였다. 원형실린더 배열은 단일 실린더와 다원주 형태로 이루어졌는데, 다원주 배열상태는 실린더간의 거리가 일정한 정방형 배열과 교차배열(어긋난 배열; 정방형 배열의 대각선 교차지점 중앙에 위치)의 두 가지 경우로 구분하였다.

3.1 단일실린더 유동현상(Single cylinder)

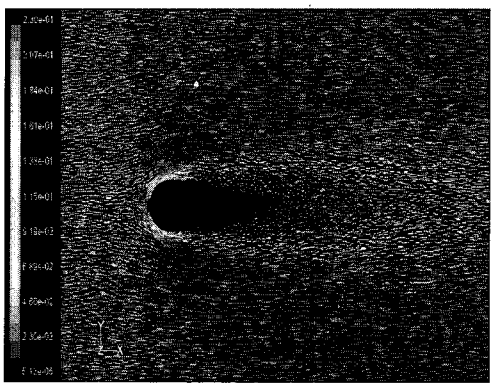
Fig. 3에서 실린더 후면을 살펴보면 CFX가 FLUENT보다 한쌍의 대칭형 Attached vortex가 뚜렷이 나타나고 있으며, 유동가시화장치에 의한 실험결과와도 유사하다. 이는 CFX가 곡면부에 대한 난류특성을 더 잘 처리했다고 생각된다.



(a) Experimental result of the flow visualization installation



(b) CFX(SST model)

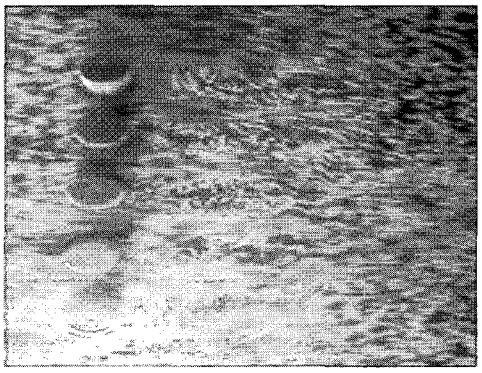


(c) FLUENT(k-ε model)

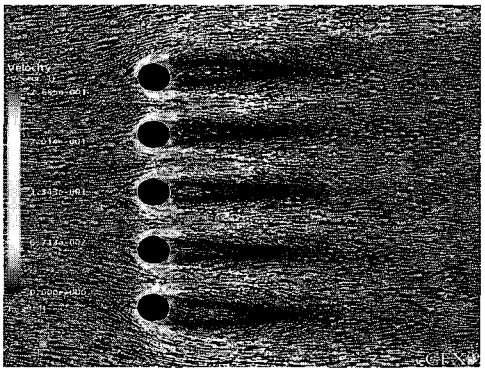
Fig. 3 Single circular cylinder

3.2 정방형배열 유동현상(Regular arrangement)

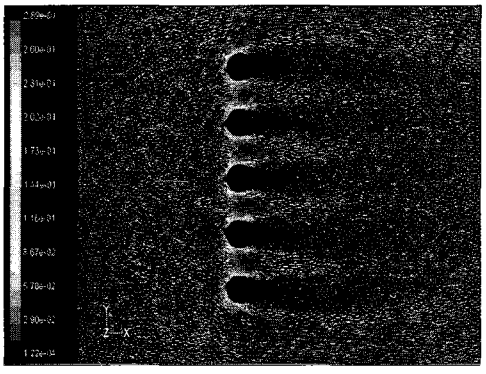
Fig. 4~6에서 전반적으로 CFX가 FLUENT보다 뚜렷한 유동상태를 보여주고 있다. 실린더 좌우부근은 유속이 빨라 Vortex가 생성되지 않으며, 실린더 전후 사이는 단일 실린더에 비해 조금 흐트러진 폭 좁은 한쌍의 비대칭형 Vortex형태를 나타내었고, 그림에서 가장 오른쪽열은 Vortex shedding 현상이 나타나고 있다. 그리고 실린더 배열이 증가됨에 따라 흐름이 더욱 교란되어지는데 이는 배열된 실린더간의 흐름의 간섭효과로 인한 것으로 판단된다.



(a) Experimental result of the flow visualization installation

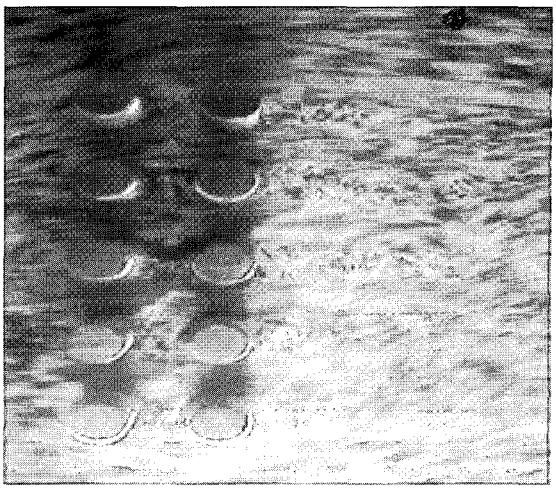


(b) CFX(SST model)

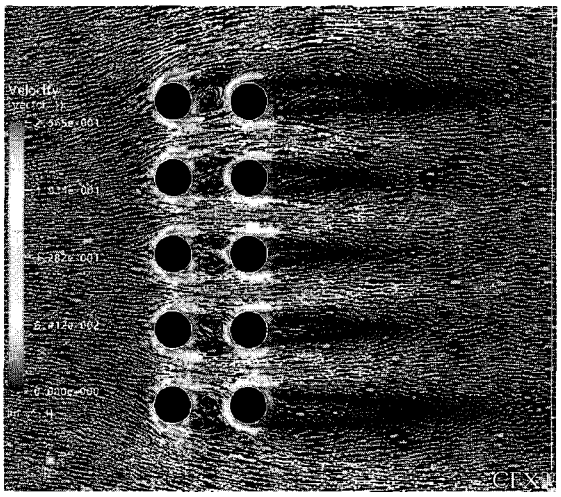


(c) FLUENT(k-ε model)

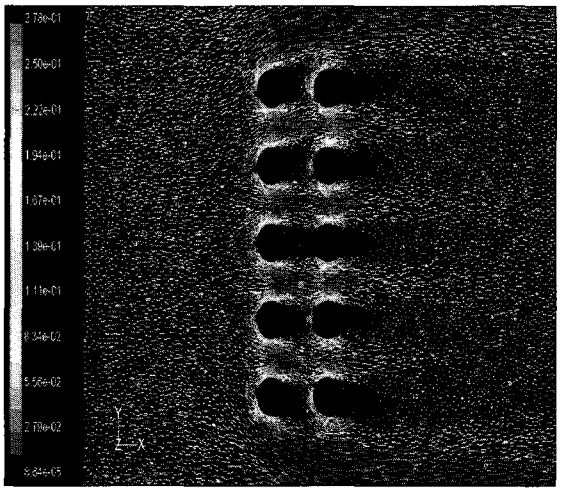
Fig. 4 Regular arrangement (5×1 cylinder array)



(a) Experimental result of the flow visualization installation

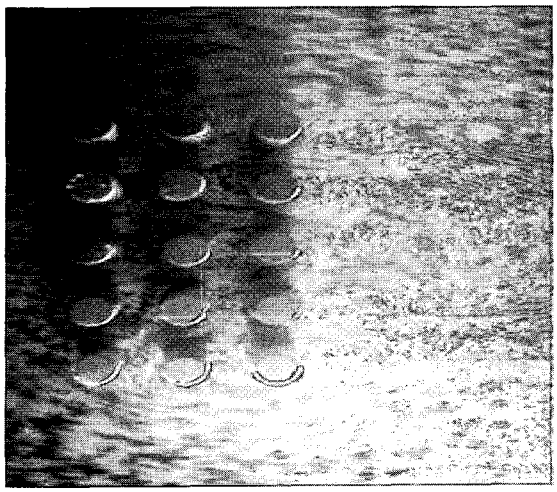


(b) CFX(SST model)

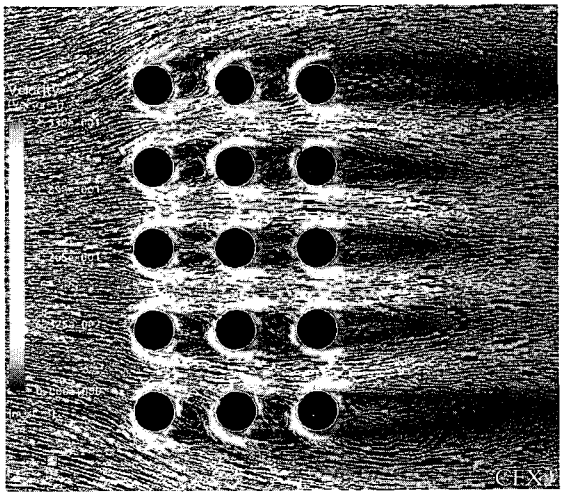


(c) FLUENT(k-ε model)

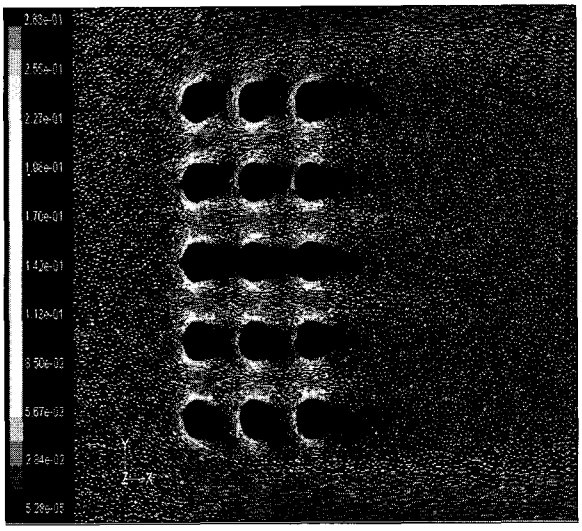
Fig. 5 Regular arrangement (5×2 cylinder array)



(a) Experimental result of the flow visualization installation



(b) CFX(SST model)

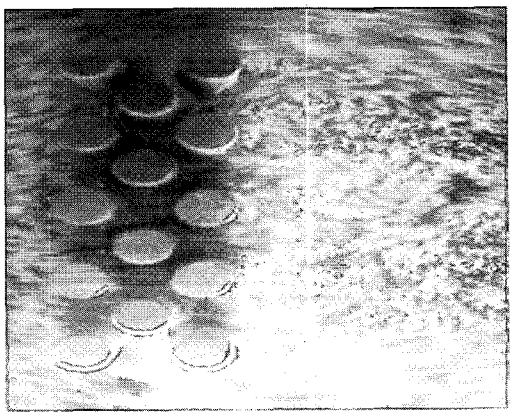


(c) FLUENT(k-ε model)

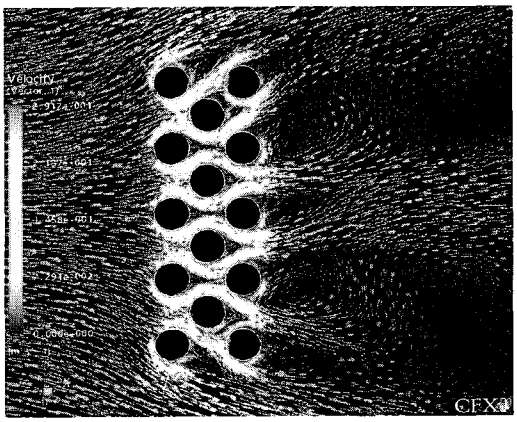
Fig. 6 Regular arrangement (5×3 cylinder array)

3.3 교차배열 유동현상(Staggered arrangement)

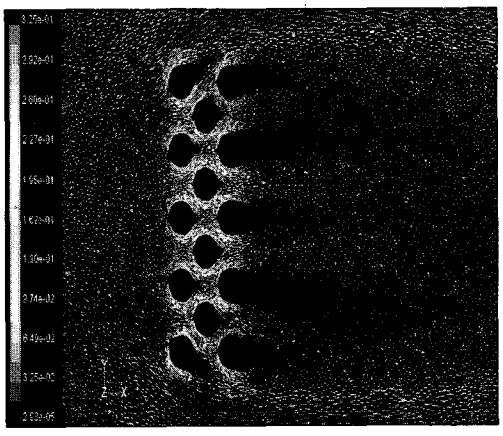
Fig. 7에서도 CFX가 FLUENT보다 실린더 후면의 Vortex shedding 현상을 잘 재현해주고 있다. 실린더 후면의 Vortex shedding 현상은 폭 넓은 후류형태를 보이며, 대칭성이 없는 교란된 후류형태를 보이고 있어 교차배열이 정방형배열에 비해 보다 더 많은 에너지감소효과를 나타낼 것으로 예상된다.



(a) Experimental result of the flow visualization installation



(b) CFX(SST model)



(c) FLUENT(k-ε model)

Fig. 7 Staggered arrangement

수치해석에서 CFX의 SST모델로 수행한 결과가 유동가시화 실험에서 나타난 유동현상과 비교하였을때 FLUENT의 k-ε 모델로 수치해석한 결과보다 유동장이 유사하게 재현됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

유동가시화 장치의 실험에서 나타난 유동현상과 수치해석 결과를 통하여 알 수 있듯이 실린더 배열수의 증가와 배열상태에 따라 실린더 후면에 발생하는 Vortex의 크기가 감소하고, 교란상태의 정도가 심해짐을 알 수 있다. 교차배열시 정방형 배열과 비교하면 실린더 주위의 교란된 상태가 다르게 나타나고 있다. 이는 적절한 실린더 배열수와 배치상태에 따라 상당한 에너지의 감소현상을 예상할 수 있다.

CFX(SST)와 FLUENT(k-ε)의 수치해석결과를 비교하면 SST 난류수송모델로 해석한 유동장의 현상이 유동가시화 실험에 의한 유동장 현상과 매우 유사함을 알 수 있다. 이는 SST 모델은 가장 가까운 벽면까지의 거리와 벽에서부터 Vortex shedding이 생기는 거리까지의 난류상태를 보다 원활히 재현할 수 있기 때문이다.

향후 실린더의 배열과 직경변화에 따라 작용하는 유체력을 측정하여 유동현상과의 상호 비교검토가 필요하다.

후 기

이 논문은 2003학년도 동아대학교 학술연구조성비(국외연구파견)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

김광수, 이승재, 서정천 (2003). "진동하는 원형주상체 주위의 와류 수치모사", 대한조선학회논문집, 제40권, 제2호, pp 21-27.

김경환, 윤영한 (2003). "사각덕트 내에서 원형 실린더를 지나는 유체유동의 측정 및 수치해석에 관한 연구", 설비공학논문집, 제15권, 제12호, pp 1095-1102.

김태한 (1999). "횡유동속의 원주형실린더 군에 작용하는 유체작용력에 관한 수치해석적 연구", 석사학위논문, 충남대학교 기계공학과.

박운진 (1998). "한 쌍의 원형실린더 먼 후방에 형성되는 후류유동장의 실험적 해석", 한국항공우주공학회지, 제27권, 제2호, pp 28-37.

이상화, 장은철 (2004). "다원주 주위의 유동에 관한 실험적 연구(1)", 대한토목학회논문집, 제24권, 제2B호.

CFX-5 (2002). "CFX-5 User's Guide".

FLUENT (1996). "FLUENT 5 User's Guide".

Kiya, M., Arie, M., Tamura, H. and Mori, H. (1980). "Vortex Shedding From Two Circular Cylinders in Staggered Arrangement", Journal of Fluids Engineering, Vol 102, pp 166-173.

Williamson, C.H.K. and Roshko, A. (1988). "Formation in the Wake of an Oscillating Cylider", Journal of Fluids and Structures 2, pp 355-381.

Zdravkovich, M.M. (1982). "Modification of Vortex Shedding in the Synchronization Range", Journal of Fluids Engineering, Vol 104, pp 513-517.

Zdravkovich, M.M. (1997). "Flow Around Circular Cylinders", Oxford University Press, Vol 1, pp 464-474.

2006년 2월 24일 원고 접수
2006년 4월 10일 최종 수정본 채택