

LES를 이용한 열린 공동 유동과 공동 내 물질 확산의 수치적 모사

장경식^{1*}, 박승오², G Constantinescu³

LARGE EDDY SIMULATION OF FLOW AND MASS EXCHANGE PROCESSES BETWEEN A CHANNEL AND AN OPEN CAVITY

K.S. Chang, S.O. Park and G. Constantinescu

Fully three-dimensional Large Eddy Simulation calculations of the flow past 2D cavity are conducted to study the purging of neutrally buoyant or dense miscible contaminants introduced instantaneously inside the cavity. The length to depth ratio(L/D) is 2 and Reynolds number based on the depth is 3,360. Fully developed turbulent inflow are fed at the inlet from precursor simulation of channel flow. Mean flow pattern and unsteady features are investigated based on the experimental data of Pereira and Sousa. From the study of mass exchange processes, it is found that the mechanism of removal of the contaminant is very different between the non-buoyant and buoyant cases. In the buoyant case, internal wave motion which interacts with a strong cavity vortex is dominant in the ejection mechanism of the contaminants.

Key Words: 대외류모사법(LES), 열린 공동(open cavity), 층류(Stratified flows), 물질 확산(scalar transport)

1. 서론

많은 환경 공학적 문제에서 공동 유동의 형태가 나타나는 데, 예를 들어 강 또는 호수 바닥에 움푹 패인 곳을 지나는 물의 흐름, 또는 도시 협곡과 같은 공동의 형상과 닮은 지역을 흘러가는 공기의 유동 등이다. 이러한 경우 주된 유동의 특성에 대한 이해는 공동과 그 위를 흐르는 유동 사이의 물질 교환에 초점을 두고 있으며, 특히 공동 내 물질의 확산과 혼합 mechanism이 중요한 관심사이다.

일반적으로 공동 내의 유체는 공동 밖을 흐르는 유체와 같은 밀도를 가지는 경우이지만 환경학적 차원에서는 그렇지 않을 수도 있는데 그 예는 염분이 섞인 물, 도시 협곡 내의 찬 공기 그리고 공동내의 부유물 등이다.

많은 연구자들이 실험을 통해 공동 내부에 염료와 같이 밀도 차가 없는 물질 또는 염분이 섞여 바깥 밀도 보다 무거운 물질이 있을 경우 어떠한 mechanism을 가지고 빠져나가는지

에 대해 알아보았다. (Briggs et al.[1], Debler and Imberger [2], Strang and Fernando [3]) Ujttewall et al.[4]은 다양한 형태의 공동에 대해 물질이 빠져나가는 비율에 대한 실험식을 제안하였다. Walton and Cheng [5]은 LES와 $k-\epsilon$ 을 이용하여 urban canyon에 대해 수치해석을 수행하였으며 내부 재순환 영역의 에디와 물질의 혼합에 대해 연구하였다.

2. 수치해석

2.1 수치적 방법

본 연구에서는 비압축성 열린 공동(L/D=2) 유동에 대해 Large Eddy Simulation 방법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 3차원 비압축성 Navier-Stokes 지배 방정식을 엇갈림 격자계에 대해 finite volume method를 이용하여 차분하였으며 fractional step method를 사용하여 해를 구하였다. 2차의 정확도를 가지고 시간과 공간에 대해 적분하기 위해 semi-implicit iterative 방법을 적용하였다. Passive scalar transport 방정식을 풀기위해 convective 항에 대해서는 QUICK scheme을 적용하

1 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

2 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

3 Assistant professor, University of Iowa IIHR

* Corresponding author E-mail: kschang76@kaist.ac.kr

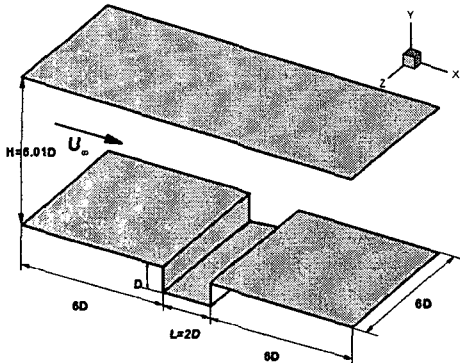


Fig.1 Computational domain.

였다. Subgrid scale 점성항(ν_{SGS})과 확산항(α_{SGS})을 구하기 위해 Lilly[6]와 Pirece and Moin[7]의 dynamic procedure를 이용하여 구하였다.

공동 내부와 바깥의 밀도 차에 대한 부력 효과를 고려할 경우, 운동량 방정식에 $\Delta b = ((\rho - \rho_0)/\rho_0) \cdot g$ 의 원천항이 나타나게 되는데 무차원화 시키면 Richardson number 를 포함한 다음과 같은 식이 생기게 된다.

$$(\rho - \rho_0)/(\rho - \rho_0) \cdot Ri = C \cdot Ri \quad (1)$$

C는 밀도에 대한 무차원 변수로써 초기에 공동 내부에는 1의 값을 나머지 영역에서는 0의 값을 가지게 하였다. 이번 연구에서는 Ri 수가 0.0과 0.2 인 경우에 대하여 수치적으로 모사하여 그 결과의 차이를 살펴보고자 한다.

2.2 유동조건 및 격자

본 연구에서의 유동 조건 및 공동의 형상은 Pereira and Sousa[8]의 실험을 바탕으로 정하였다. 열린 공동의 길이대 깊이비(L/D)는 2 이며 공동의 깊이를 기준으로 한 레이놀즈 수는 3,360의 값을 가진다. 완전 발달된 난류 유동이 흐르는 채널($Re_H=20,470$) 내부에 열린 공동이 존재하는 형상으로 전체적인 형상과 계산 영역은 그림 1 과 같다. 채널의 높이는 6.092D 이며 spanwise 방향 크기는 6D 이다.

계산 격자는 X,Y,Z 방향으로 320×224×192 격자계로 구성되었으며 벽 근처 유동의 충분한 모사를 위해 벽으로부터 $y_1^+ = 0.15$ 가 되게 격자 지점을 위치 시켰다.

입구 조건으로 채널 내부의 완전 발달된 난류 유동을 주기 위해 precursor simulation [9] 방법을 이용하였다. 이 방법은 채널 내부의 완전 발달된 난류 유동에 대해 또 다른 Large Eddy Simulation을 통해 얻은 속도 데이터를 충분한 시간 (60D/U) 동안 저장하여 실제 유동과 가까운 속도 값을 입구 조건으로 이용하는 방법이다.

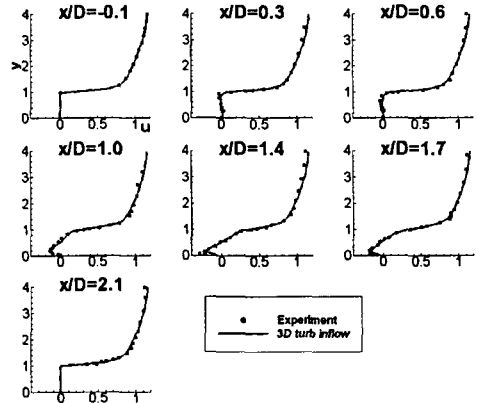


Fig.2 Mean velocity profiles.

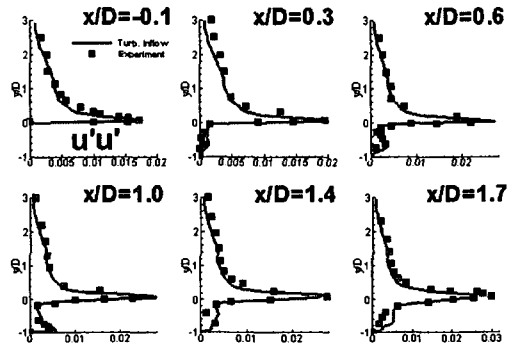


Fig. 3 Streamwise normal stresses.

3. 결과 및 고찰

3.1 Validation

Richardson 수가 0.0인 경우에 대해 얻은 결과를 Pereira and Sousa[8,10]의 실험 결과와 비교함으로써 수치해석 결과가 얼마나 잘 예측하는지에 대해 알아보았다. 그림 2와 그림 3은 공동 내부와 그 주위의 평균 속도 형상과 streamwise normal stress 형상을 비교한 것으로 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 평균 속도 형상을 통해 공동 내부의 재순환 에디(recirculation eddy)의 크기와 위치를 잘 예측하고 있으며 그림 3을 통해 수직 응력(normal stress)의 최대값과 전단층을 따라 나타나는 감소율을 정확히 모사하고 있다. Pereira and Sousa[8]의 실험에서는 채널 중앙을 흐르는 유동의 난류 강도가 4%로 측정되었는데, 이 번 연구에서는 3.6% 예측되었다. 이는 그림 3에서 채널 영역에 응력의 크기를 조금 작게 예측하는 결과를 나타내게 된다.

그림 4는 공동 뒷전 근처($x/L=1.75$)에서의 수직 속도 성분에 대해 FFT를 이용하여 PSD(Power Spectrum Density)를 구한

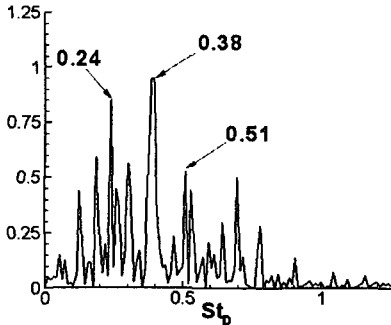


Fig.4 Velocity power spectra at $(x/D,y/D)=(1.75,0.0)$ point

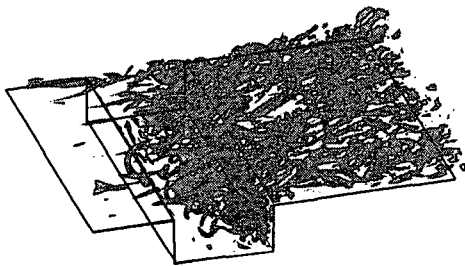


Fig. 5 Instantaneous coherent structures using Q-criteria

결과이다. 입구에서 들어오는 완전 발달된 난류 유동 때문에 광범위한 에너지 스펙트럼 형태를 나타내는데 최대값(dominant peak)은 무차원 진동수($St=fU/D$)가 0.38 인 지점에서 나타난다. 이는 Rockwell[11]이 선형 안정성 이론(linear stability theory)을 이용하여 공동 유동의 진동수를 예측한 결과에서 1번째 모드에 해당하는 것이며, Lin and Rockwell[12]이 수행한 난류 입구 유동장에서의 공동 유동 실험 결과($St=0.35$)와 비슷한 결과를 가진다.

3.2 유동의 구조

공동의 앞전에서 충류 유동이 흘러 들어올 경우, 앞전에서 박리가 일어나면서 큰 와류 구조(large vortical structure)가 spanwise 방향을 따라 떨어져 나오게 되고 이 구조가 뒷전과 부딪치며 일부는 공동 내부로 나머지는 공동 뒤 평판으로 흘러가는 partial clipping 현상이 일어난다. 하지만 입구에서 완전 발달된 난류 유동이 들어 올 경우에는 이 유동의 구조가 더 지배적이어서 앞전에서 규칙적으로 떨어지는 와류 구조를 볼 수 없다. 대신에 그림 5와 같이 앞전에서 흘러들어오는 난류 유동의 유동 구조가 지배적이며 뒷전의 영향을 받아 partial clipping 뿐만 아니라 complete escape 또는 complete clipping이 발생한다. 그림 5는 Hunt [13]가 제안한 Q-criteria를 이용하여 어느 순간의 coherent structure를 살펴본 것이다.

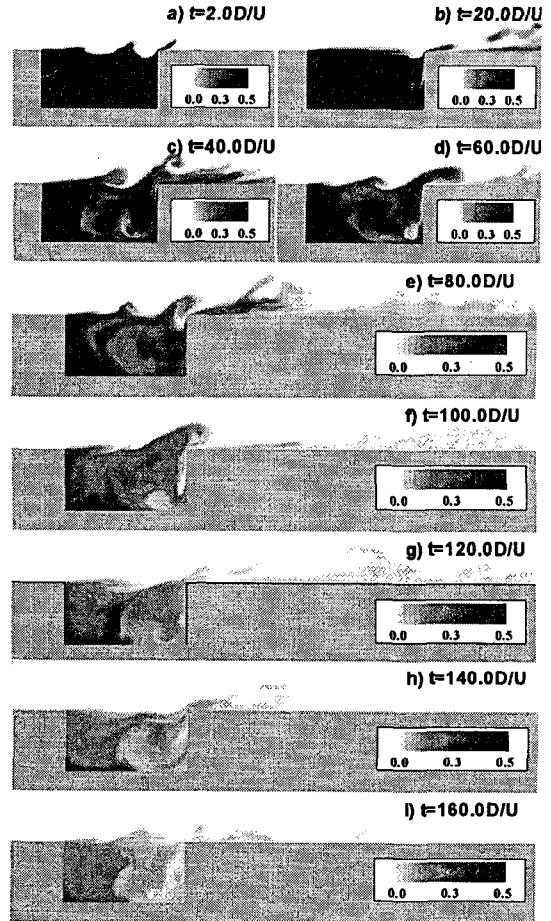


Fig. 6 Contaminant contours history ($Ri=0.0$ case)

3.3 Contaminant removal

3.3.1 Non-buoyant ($Ri=0.0$) case

그림 6은 시간에 따른 등농도선도(concentration contour)를 나타낸 것으로 초기에는 공동 내부의 무차원 농도(C) 값이 1 이고 바깥은 0으로 두고 계산하였다. 초기에는(Fig. a and b) 공동과 채널 사이에 흘러가는 와류에 의한 경계에서 물질 전달이 일어나다가 그 이후부터는 공동 내부에 있는 높은 농도의 물질과 바깥의 낮은 농도의 물질과 혼합이 발생하며 물질 전달이 발생한다. 이때 공동 뒷벽을 따라 흘러 들어오는 낮은 농도의 물질은 공동 유동에서 나타나는 jet-like 유동 형태(Lin and Rockwell [12]) 로 설명이 된다. Chang et al.[14]의 연구에서처럼 입구에서 충류가 들어올 경우에는 일련의 규칙적인 낮은 밀도의 vorticity patches가 재순환 영역으로 들어와 혼합하게 되는데, 완전 발달된 난류가 흘러들어 오게 되면 난류 유동에 의한 혼합 효과와 complete clipping 현상에 의해 이러

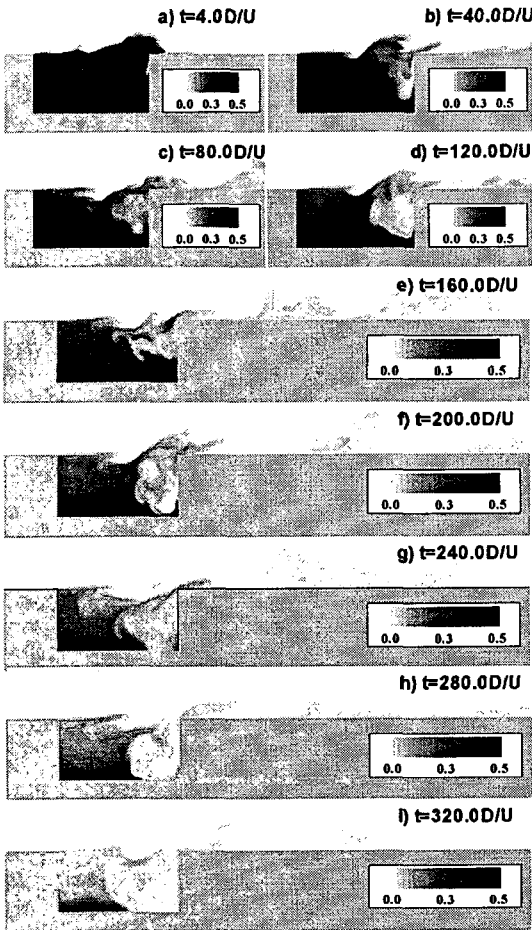


Fig. 7 Contaminant contours history (Ri=0.2 case)

한 규칙성이 깨어지는 것을 알 수 있다. 우선 가장 큰 재순환 영역에서의 높은 농도의 물질이 전단층에 의해 먼저 일부 빠져나간 후 공동 앞벽 근처의 두 번째 재순환 영역에 존재하는 물질이 전단층과 혼합되어 빠져나가는 것을 알 수 있다.

3.3.2 Buoyant (Ri=0.2) case

그림 7은 Richardson 수가 0.2인 경우 시간에 따른 xy 평면에 대해 등농도선도를 나타낸 것이다. Ri=0.2 인 경우는 바깥 유동에 비해 큰 밀도의 유체가 공동 내부에 있기 때문에 Ri=0.0 인 경우에 비해 빠져나가는 데 더 오래 걸리는 것을 알 수 있으며 공동 내의 유동의 형태 또한 달라진다. Ri=0.0 인 경우에는 공동 내부에 전형적인 전단층 모드(shear layer mode) 형태를 보이면서 큰 재순환 에디와 두 번째 재순환 에디의 크기가 큰 변화없이 물질 전달이 이루어지지만, Ri=0.2 경우에는 뒷전 근처에서 발생하는 에디에 의해 발생하는 전단층에 의해 내부 높은 밀도의 물질이 빠져 나가고 있으며

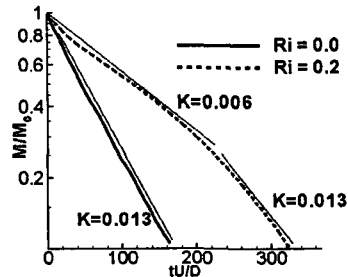


Fig. 8 Variation of contaminant volume in time

이 에디의 크기와 위치는 시간에 따라 변화하면서 점점 커지는 것을 알 수 있다. 이때 공동 내부에 에디가 위치하지 않는 영역에서는 공동 길이 방향의 밀도 차에 의한 층을 형성하면서 내부 물질이 빠져 나가는 것을 알 수 있다. 주 에디의 크기가 점점 저지면서 에디 영역의 밀도 층은 깨어지고 나머지 앞부분의 물질이 에디 경계에서 혼합되어 서서히 빠져나간다.

3.4 Mass exchange rate

그림 8은 공동 내부에 존재하는 오염 물질의 전체 양의 변화를 시간에 따라 나타낸 값이다. 전단층과의 작용으로 물질이 빠져 나가면서 시간에 따라 그 양이 줄어들고 있는데 내부 물질의 밀도가 큰 경우에는 그 시간이 더 오래 걸리는 것을 알 수 있다. 전체 물질의 80%가 빠져나가는데 Ri=0.0의 경우에는 110D/U가 걸린 반면 Ri=0.2 인 경우에는 260D/U 가 걸린다.

공동 내부와 채널 사이의 물질 교환을 Uijtjewall *et al.*[4]의 간단한 1D 모델식으로 나타내면 $M/M_0 = \exp(-t/T)$ 로 나타내어지는데 M 은 공동 내부의 scalar 총량이며 T는 characteristics time scale이다. 이때 1/T을 속도 U와 공동 길이 D로 무차원화시키면 non-dimensional exchange coefficient ($k=D/UT$)를 구할 수 있다. 그림 8에서 두 경우 모두 log-scale에 대해 선형적으로 나타나고 있는데 이는 모델식의 가정을 뒷받침하는 것이며 시간에 따른 변화량 즉 기울기가 exchange rate이 된다. Ri=0.0 인 경우에는 $k=0.013$ 의 mass exchange rate을 가지는 것을 알 수 있는데 이는 Valentine and Wood [15]의 공동 실험에서 얻은 exchange rate의 값이 0.01~0.03의 범위에 든 것과 비슷하다. Ri=0.2인 경우에는 시간에 따라 다른 exchange rate으로 빠져나가고 있는데, 초기에 공동 내부에 물질이 많은 경우에는 빠져나가는 비율이 $k=0.006$ 으로 Ri=0.0인 경우의 절반속도를 유지하다가 70% 정도 빠져나간 후에는 Ri=0.0인 경우와 같은 비율 $k=0.013$ 으로 빠져 나가게 된다. 이는 만약 공동 내부에 다른 밀도의 물질이 매우 적은 양이 있다면, 전체 평균 밀도는 바깥 유동의 밀도와 차이가 없게 되고 그 경우에는 Richardson 수에 크게 영향을 받지 않는다고 볼 수 있다.

4. 결 론

길이대 깊이버가 2 인 비압축성 열린 공동 유동에 대해 Large Eddy Simulation을 수행하였다. 채널 입구에서 완전 발달된 난류 유동을 주기 위해 LES를 통한 결과 data를 이용하였다. 공동 내부의 물질이 바깥 유체의 물질과 밀도 차이가 있는 경우($Ri=0.2$)에 대해 그렇지 않은 경우의 물질 혼합과 확산 현상과의 차이에 대해 알아보았다. 우선 밀도차가 없는 경우 열린 공동 유동의 평균 속도장과 비정상 특성들을 살펴보고 실험치와 비교하여 잘 일치함을 보였다. 이 경우 공동 내부의 물질은 전단층과의 작용으로 큰 재순환 에디 영역에서 먼저 빠져나가고 그 다음 앞부분의 에디 영역에서 빠져나가는 것을 알 수 있었다. $Ri=0.2$ 인 경우에는 밀도차에 의해 앞전에서 떨어져 나온 와류의 크기와 위치가 변하면서 와류 영역의 물질이 빠져나가게 되는데 와류의 크기는 점점 커지면서 아래로 내려가게 된다. 공동 내부 물질의 시간에 따른 감소량을 살펴보면 밀도차가 존재하는 경우 그렇지 않은 경우보다 느리게 빠져나가다가 일정량 이후에는 밀도차가 없는 경우와 같은 비율로 빠져나가는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구원의 '제6차 전략 과제 지원 프로그램'을 통해 수행되었음. 컴퓨팅 자원을 제공해 준 슈퍼컴퓨팅센터와 기술지원을 해 준 이상민 박사께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Briggs, G.A., Thompson, R., and Snyder, W.H., 1990, "Dense gas removal from a valley by crosswinds," *J. Hazardous Material*, Vol.24, p.1-38.
- [2] Debler, W., and Imberger, J., 1996, "Flushing criteria in estuarine and laboratory experiments," *J. Hydraulic Eng.*, Vol.97, p.728-734.
- [3] Strang, E.J., and Fernando, H.J.S., 2004, "Shear-induced mixing and transport from a rectangular cavity," *J. Fluid Mech.*, Vol.520, p.23-49.
- [4] Uijttewaal, W., Lehmann, D., and van Mazijk, A., 2001, "Exchange processes between a river and its groyne field: Model experiments," *J. Hydraulic Eng.*, Vol.127, p.928-936.
- [5] Walton, A., and Cheng, A.Y.S., 2002, "Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon-Part II: Idealized canyon simulation," *Atmospheric Environment*, Vol. 36, p.3615-3627.
- [6] Lilly, D.K., 1992, "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method," *Phys. Fluids. A*, Vol.4, p.633-635.
- [7] Pierce, C. D., and Moin, P., 2001, "Progress-variable approach for large-eddy simulation of turbulent combustion," *Mech. Eng. Dept. Rep. TF-80*, Stanford University.
- [8] Pereira, J.C.F., and Sousa, J.M.M. 1995, "Experimental and numerical investigation of flow oscillations in a rectangular cavity," *J. Fluids Eng.* Vol.117, p. 68-73.
- [9] Pierre Sagaut, 2002, "Large Eddy Simulation for incompressible flows: An introduction," *Springer*.
- [10] Pereira, J.C.F., and Sousa, J.M.M. 1994, "Influence of impingement edge geometry on cavity flow oscillations," *AIAA J.* Vol.32, p. 1737-1740.
- [11] Rockwell, D., 1977, "Prediction of oscillation frequencies for unstable flow past cavities," *J. Fluids Eng.* Vol. 99. [294-300.
- [12] Lin, J.C. and Rockwell, D., 2001, "Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity," *AIAA J.*, Vol.39, p.1139-1151.
- [13] Hunt, J.C.R., Wray, A.A., and Moin, P., "Eddies, stream and convergence zones in turbulent flows," in *Preceeding of the 1988 summer program*(CTR, Stanford, CA, 1988).
- [13] Chang, K., and Constantinescu, G., and Park, S., 2005, "Flow and mass exchange processes between a channel and a cavity filled with a neutrally buoyant or a dense miscible contaminant," *XXXIst IAHR Congress*, Seoul, Korea, September 2005.
- [14] Valentine, E.M. and Wood, I.R., 1977, "Longitudinal dispersion with dead zones," *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol.103, p.975-990.