

성층화된 수로에서 3차원 Hill에 의한 유속장 변동

박성은 · 김동선 · 이충일 · 황재동* · 윤종휘** · 조규대***

부경대학교 해양산업개발연구소, *국립수산업과학원 해양연구과

한국해양대학교 해양경찰학과, *부경대학교 해양학과

Numerical Study of Stably Stratified Flow over a Three-dimensional Hill in a Channel

Sung Eun Park · Dong Sun Kim · Chung Il Lee · Jae Dong Hwang* ·
Jong Hwi Yun** · Kyu Dae Cho***

Research Center for Ocean Industrial and Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

*Oceanography division, National Fisheries and Development Institute, Busan 619-902, Korea.

**Dept. of Maritime Police Science, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

***Dept. of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요 약 : 본 연구에서는 성층화된 수로에서 3차원 hill과 같은 해저지형이 유동장에 미치는 효과를 수치실험을 통해 밝히고자 하였다. 계산결과 hill 주위의 유동장은 지형과 성층의 효과를 복합적으로 받는 것으로 나타났다. hill 배후에서 형성된 칼만와류는 성층효과로 인해 저층에서만 나타났다. 이러한 와류는 hill 중심의 밀도를 감소시켜 성층화된 열염구조를 불안정하게 하는 역할을 하였으므로 인하여 등밀도선을 따라 흐르는 흐름은 hill 전면의 경우 깊어지는 등밀도선을 따라 하강한 뒤, 그 후면에서는 다시 등밀도선을 따라 상승하는 패턴을 나타내었다. 그 결과 연직유속은 hill의 전면에서는 침강류, 그 후면에서는 용승류가 형성되는 특징을 나타냄과 동시에 수평적으로 보았을 때 hill의 측면을 통해 가장 활발하게 용승이 발생하지만 표층까지 영향을 크게 미치지 않는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 지형효과, 성층화, 칼만와류

Abstract : This study focuses on illustrating the effect of a hill on current filed at a channel, and the topographic effects of the hill were studied with various numerical experiments. The model experiments showed that stratification as well as bottom topography had influence on current fields around the hill. Due to stratification effect, Karman vortex formed behind the hill by bottom topography made effects on water movement only in the deep layer. The vortex reduced density field around the hill which resulted in the stratification in the water column, and which also resulted in the movement of isopycnic surface to deep layer both in front and back of the hill. The water in the back of the hill moved upward along isopycnic surface afterward. From these effects, velocity pattern in vertical direction around the hill showed opposite direction, downward in front of the hill and upward in the back. However, the upward flows did not seem to have any significant influence on the water conditions in the surface layer, even though strong upward flows were found on both side of the hill.

Key words : topographic effects, stratification, Karman vortex

1. 서 론

유체의 흐름이 hill과 같은 돌출된 지형을 만날 때 생기는 변화는 유체역학분야 뿐만 아니라 실제 현장, 즉 해양이나 기상분야의 현상을 설명하는 데에도 매우 중요하다. 그 예로 해양에서 해중산(seamount) 주위의 순환문제나 기상에서 mountain flow와 관계된 오염물질 확산문제 등은 이와 밀접히 관련되어 있는 현상들이라 할 수 있다.

Long (1953, 1955)은 hill 위를 지나는 유체의 흐름을 최초

로 실험하였으며 그 결과는 이후 다양한 분야에 적용되었다. 그러나 최근까지도 활발히 이루어지고 있는 유체역학적인 수치실험은 주로 점성이 없는 완전유체를 대상으로 가장 단순한 상태의 유체거동을 해석한다. 뿐만 아니라 2차원적인 유체를 다루기 때문에 해양과 같은 현장의 복잡한 현상들을 상세하게 설명하기 어렵다. 특히 해중산과 같이 원뿔형의 3차원 hill 주위에서 나타나는 순환은 더욱 복잡하다. 관측된 결과에 의하면 수평흐름의 대부분이 해중산을 돌면서 Taylor column 형태의 순환을 보이고(Castro et al., 2003), 그 측면에서는 용승 및 침강 과정이 일어나기도 하며(Roden and Taft, 1982), 중저층의 내부파 밴드가 강해지기도 하는(Eriksen, 1991) 등 유

체역학실험으로는 보기 힘든 매우 복잡한 패턴을 나타낸다.

본 연구는 수치모델을 이용하여 해중산과 같은 3차원 hill 지형이 흐름에 미치는 영향을 연구한 것으로 단순 수로상에서 연직방향의 밀도성층을 고려한 뒤 수평 및 연직유동장의 변동을 밝히는 것을 목적으로 하였다.

2. 수치모델

본 연구에서 사용된 모델은 Blumberg and Mellor (1987)에 의해 개발된 POM(Princeton Ocean Model)으로 Fig. 1과 같이 연직방향으로 σ -좌표계를 채택하고 있으며 모드분리기법(time split method)을 사용하여 다음과 같이 해를 구한다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv \\ = -\rho_0^{-1} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K_M \frac{\partial u}{\partial z}) + F^x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu \\ = -\rho_0^{-1} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (K_M \frac{\partial v}{\partial z}) + F^y \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_H \frac{\partial T}{\partial z}) + F^T \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_H \frac{\partial S}{\partial z}) + F^S \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S) \quad (7)$$

여기서 u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속, p 는 압력, T 는 수온, S 는 염분, ρ 는 현장밀도, ρ_0 는 평균밀도(reference density), f 는 코리올리 파라메타, g 는 중력가속도, K_M 은 연직와동점성계수, K_H 는 연직와동확산계수, F^x, F^y 는 수평와동마찰항, 그리고 F^T, F^S 는 수평와동확산항이다.

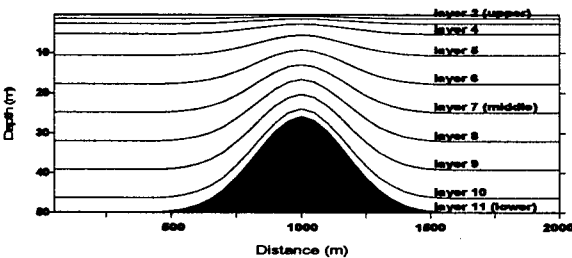


Fig. 1. The sigma coordinate system and vertical distribution of sigma layers in this study.

모델에서는 부시네스크 및 정수압 근사를 가정하며 Knudsen 식을 사용하여 식 (7)을 푼다. 또 K_M 과 K_H 는 Mellor and Yamada level 2.5 turbulence closure model (Galperin et al., 1988)에 의해 결정되며, 수평 마찰 및 확산항은 Smagorinsky(1963)에 의해 주어진 A_M 및 A_H 와 함께 Laplacian 형태로 주어진다. 연직방향의 σ -layer는 총 11개 (0.000, -0.018, -0.036, -0.071, -0.143, -0.286, -0.429, -0.571, -0.714, -0.857, -1.000)로 layer 2, 7, 10을 각각 표, 중, 저층으로 표현하였다.

모델영역은 Fig. 2와 같이 수심 50m의 수로 중앙에 높이 25m, 지름 1000m의 완만한 hill 형태의 해저지형을 고려하였고 경계는 남쪽과 북쪽이 폐경계, 동쪽과 서쪽을 개방경계로 하여 계산하였다. 경계값으로는 서쪽경계에서 20cm/s의 동향류를 지속적으로 부과하였으며 총 계산시간은 충분히 안정화를 이룬 1일로 하였다. 이때 수온은 저층에서 표층까지 25~30℃로 주었으며 기타 계산 조건에 대해서는 Table 1.에 나타내었다.

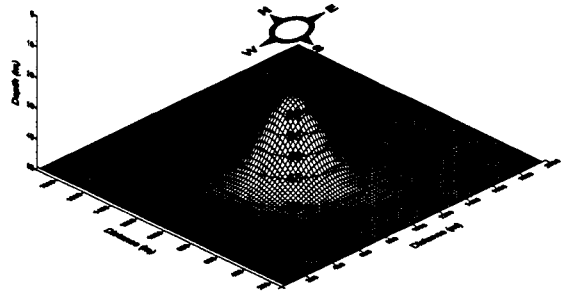


Fig. 2. The diagram of the model topography.

Table 1. Computational conditions in 50m grid channel

Conditions and Parameters	Used Values
Channel Length	2 km
Channel Width	2 km
Depth	50 m
Division of Depth	11 layers
Computational Grid System	IM=40, JM=40
Grid Spacing	$\Delta x = \Delta y = 50m$
Internal Time Step	DTI= 9 sec
External Time Step	DTE=0.3 sec

3. 결 과

Fig. 3은 동서방향의 연직 단면상에서 수평유속 및 연직유속장의 분포를 나타낸 것으로 각각 유속의 u, v, w 성분을 나타내며 각 유속성분의 (+)값은 음영으로 표시하였다. 즉 u 성

분은 동향류, v 성분은 북향류, 그리고 w 성분은 용승류가 음영으로 표현되어 있다.

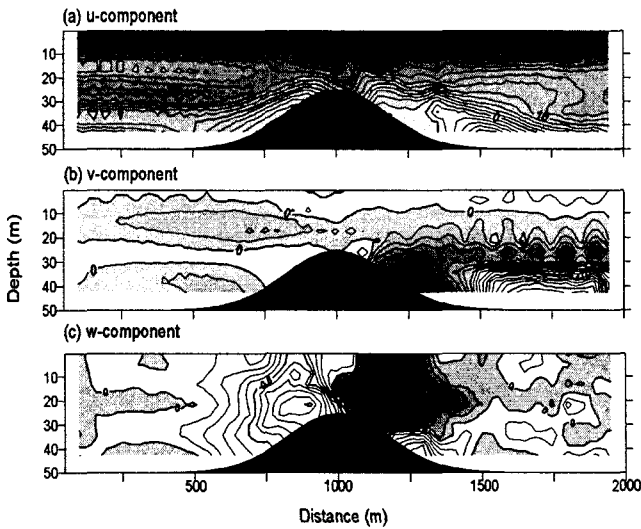


Fig. 3. Vertical distributions of horizontal and vertical velocity fields. Flow is from left to right, and areas with positive ((a) eastward, (b) northward, (c) upward) values are shaded.

먼저 수평유속의 u 성분을 보면 전 수층에서 동향류가 나타나며 그 유속은 수심이 깊어질수록 감소하여 연직적인 shear가 크게 나타남을 볼 수 있다. 특히 표층 최대유속이 약 34cm/s인데 반해서 hill 표면에서는 약 4cm/s 이하로 유속이 급격히 감소한다. 이때 hill 배후의 해저면에서는 반대방향인 서향류가 최대 약 16cm/s로 나타나는데 이것을 v 성분과 비교해보면 수심 약 25m의 중층 이하에서 시계방향의 와류가 존재함을 알 수 있다. 즉 v 성분의 경우에는 hill 전면에서는 뚜렷한 변화가 나타나지 않고 그 배후의 사면을 따라 x 방향 약 1500m 부근을 중심으로 북향류와 남향류가 동시에 나타나고 있다. 이것을 저층의 수평유속장(Fig. 4c)과 비교해보면 hill을 지나면서 발생하는 시계방향의 와류가 존재함을 확인할 수 있다. 그러나 표층으로 갈수록 이러한 와류는 거의 나타나지 않는다.

한편, Fig. 3c에서 연직유속 w 성분은 hill 전면에서 침강하고, 정상부를 지나면서 용승되는 패턴을 보이는데 그 최대유속은 약 1cm/s 정도였다. 이것을 Fig. 4와 비교해보면 hill 주위에서 나타나는 연직유속장의 변동을 보다 입체적으로 파악할 수 있는데 hill 전면과 후면에서 각각 침강 및 용승이 발생함과 동시에 hill의 측면을 중심으로 용승류의 유속이 강하게 나타남을 볼 수 있다. 또 연직유속의 층별 최대유속을 표·중·저층으로 구분하여 보면 표층(level 2)에서 0.02cm/s, 중층(level 5) 0.07cm/s, 그리고 저층(level 10)에서는 0.2cm/s로 나타나 저층으로 갈수록 연직유속값이 증가하고 그 유속경사가 커짐을 알 수 있다.

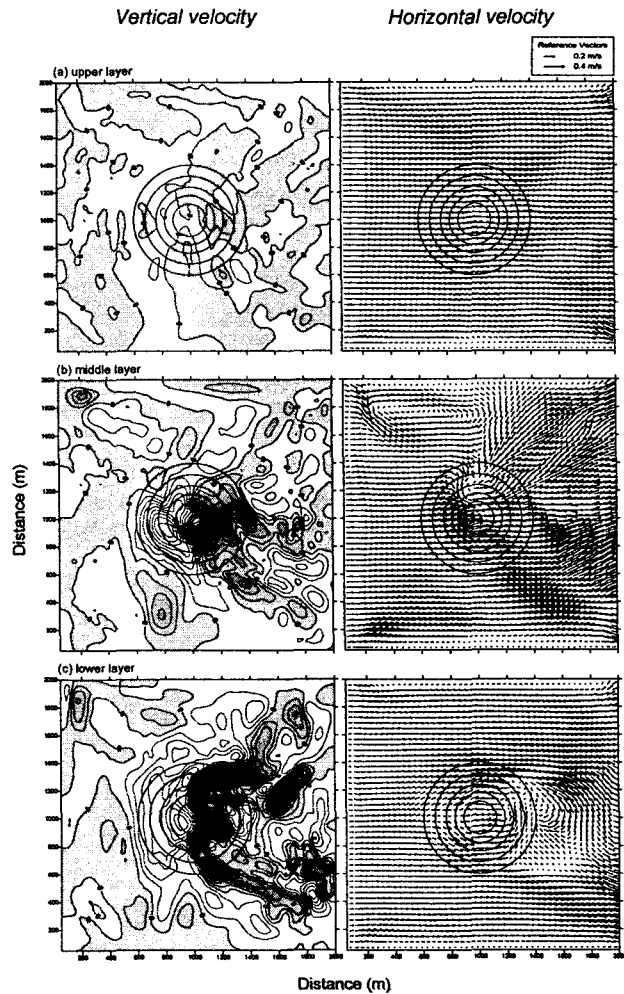


Fig. 4. Vertical and horizontal velocity fields in sigma layers. Plots are the (a) upper (b) middle, and (c) lower layer. The shaded zone represents upwelling part. Contour interval is 0.01 cm/s.

Fig. 5는 수온과 밀도의 연직분포도를 나타낸 것으로 모델에서 기본적으로 부여한 연직성층 상태를 잘 보여주고 있다. 그러나 hill을 중심으로 등온선 및 등밀도선이 모두 깊어지는 연직적인 수렴이 나타남을 볼 수 있는데 이는 hill에 의해 발생하는 와류와 같은 해수유동구조가 hill 정상부의 열염구조를 매우 불안정하게 만드는 역할을 하고 있다는 것을 말해주고 있다.

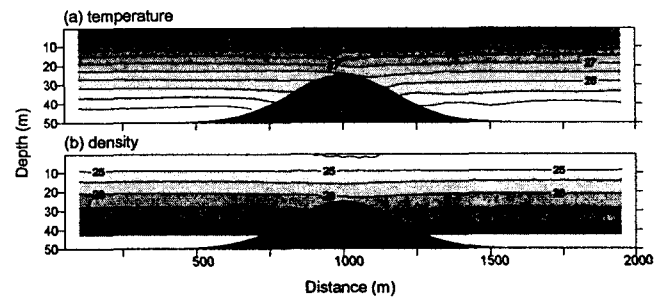


Fig. 5. Vertical distributions of (a) temperature and (b) density.

4. 고찰

해양에서 흐름이 hill과 같은 해저지형 위를 지날 경우 그 주위에서 나타나는 유동 변화는 수평적으로나 연직적으로 매우 복잡하므로 이것의 전체적인 구조를 효과적으로 밝히기 위해서는 수치모델을 이용하는 것이 적합하다. 그러나 유체역학적인 수치실험들은 2차원 hill을 고려하거나 점성이 없는 완전 유체를 대상으로 가장 단순화된 상태의 유체거동을 해석하므로 해양의 복잡한 유동구조를 상세하게 재현하기는 어렵다. 또 해양모델 가운데 z-level 모델은 저층이 계단모양으로 구성되므로 해저면에서의 유동을 현실에 가깝게 고려하지 못한다 (Gerdes, 1993; Winton et al., 1998; Pacanowski and Gnanadesikan, 1998). 그러나 본 연구에서 사용된 3차원 해수 유동모델 POM은 Fig. 1과 같이 연직좌표계가 해저지형을 따라 형성되는 σ -좌표계를 도입하고 있어 실질적인 해저지형을 다룰 수 있으므로 특히 해저면에서의 유동장을 재현하는 데에 매우 유용하다(Ezer et al., 2002).

계산결과 해중산과 같은 3차원 hill 지형을 만날 경우 수평 흐름은 Fig. 3a,b 및 Fig. 4c와 같이 저층에서 시계방향의 와류를 형성하는 것을 볼 수 있다. 이 와류는 강한 성층에 의해서 저층에서만 형성되는데 이러한 성층은 마치 hill 위에 덮개를 씌운 것과 같은 효과를 주어 상하층의 유동구조를 다르게 하는 원인이 된다. 먼저 수평유속 u 성분(Fig. 3a)을 보면 수심 약 15~20m까지는 약 30cm/s 이상의 강한 동향류가 존재하지만 해저면에서는 4cm/s 이하로 유속이 빠르게 감소하여 연직적으로 강한 shear가 존재함을 볼 수 있다. 이것을 v 성분(Fig. 3b)과 비교해보면 수심 약 25m를 중심으로 하층에서는 와류에 의한 큰 유속구배를 보이는 반면 그 상층에서는 v 성분의 변화가 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉 상층에서는 경계에서 부여된 동향류 성분이 강하게 나타나고 그 하층에서는 hill을 지나면서 와류가 발달하는 구조를 보인다. 이 와류는 강한 성층에 의해 hill 높이 이하의 수심에서 hill이 장애물의 역할을 하면서 형성되는 칼만와류로 hill 중심부의 밀도를 감소시켜 열염구조를 불안정하게 하는 역할을 한다(Fig. 5). 즉 hill 중심부의 밀도가 감소되면서 등온선과 등밀도선이 hill 상부에서 깊어지는 열염구조를 형성시키게 되는데 이것은 Castro et al.(2003)이 실제 seamount 상부에서 관측한 결과와 매우 유사하다.

이 열염구조는 연직유속 w 가 hill 전면에서 침강하고 후면에서 용승되는 현상과도 깊이 관련되어 있다. 왜냐하면 등밀도선을 따라 흐르던 흐름은 hill 전면에서 깊어지기 시작하는 등밀도선을 따라 하강한 뒤, 그 후면에서는 다시 등밀도선을 따라 상승하기 때문이다. 따라서 유속의 w 성분만을 보면 Fig. 3c와 같이 hill의 전면에서는 침강류, 그 후면에서는 용승류가 형성되는 것을 알 수 있는데 이것은 유체역학실험이나 수리모형실험 결과와는 상이한 결과이다. 예를 들면 연직 2차원적 공간(x - z)상에서 2차원 hill에 대하여 실험한 경우 유속

의 v 성분은 고려할 수 없으므로 본 계산결과에서 hill 배후에 나타난 칼만와류 등은 재현되지 않는다는 차이점을 가진다.

연직유속장의 위와 같은 특성으로 인하여 용승류는 수평적으로 보았을 때 Fig. 4와 같이 hill의 측면을 통해 가장 활발하게 일어난다. 이러한 결과는 Roden and Taft(1982)가 Emperor seamount의 경우 전면이 아닌 측면(flank)에서 용승이 발생한다고 보고한 현상을 설명할 수 있는 결과라 할 수 있다. 그러나 연직유속의 수평적인 경사는 표층에서는 거의 나타나지 않는다. 이것은 hill에 의해 저층에서부터 발생하는 용승류가 표층까지 영향을 미치기에는 약하다는 것을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 성층화된 수로에서 3차원 hill과 같은 해저지형이 유동장에 미치는 효과를 수치실험을 통해 밝히고자 하였다. 계산결과 hill 주위의 유동장은 지형과 성층의 효과를 복합적으로 받은 것으로 나타났다. 지형의 영향으로 hill 배후에서 형성된 칼만와류는 성층효과로 인해 저층에서만 나타났다. 이러한 와류는 hill 중심의 밀도를 감소시켜 성층화된 열염구조를 불안정하게 하는 역할을 하였고 이로 인하여 등밀도선을 따라 흐르는 흐름은 hill 전면에서 깊어지기 시작하는 등밀도선을 따라 하강한 뒤, 그 후면에서는 다시 등밀도선을 따라 상승하는 패턴을 나타내었다. 그 결과 연직유속은 hill의 전면에서는 침강류, 그 후면에서는 용승류가 형성되는 특징을 나타냄과 동시에 수평적으로 보았을 때 hill의 측면을 통해 가장 활발하게 용승이 발생하지만 표층까지 영향을 크게 미치지 않는 것으로 나타났다. 이상의 결과들은 모두 성층효과와 관련되어 있으므로 차후 연직혼합 상태의 계산결과와비교를 통해 성층효과를 상세히 고려할 필요가 있다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 “인공용승류를 활용한 어장환경조성에 관한 연구”사업 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부분으로 한국과학재단 지정 우수공학연구 센터인 부경대학교 해양산업개발연구소에서 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Long, R.R., 1953. Some aspects of the flow of stratified fluids. I. A theoretical investigation. *Tellus* 5: 42.
- [2] Long, R.R., 1955. Some aspects of the flow of stratified fluids. III. Continuous density gradients. *Tellus* 7: 341.
- [3] Castro, A.T., G.G.D. Velasco, A.V. Levinson, R.G. Armas, A. Muhlia and M.A. Cosio, 2003. Hydrographic

- observations of the flow in the vicinity of a shallow seamount top in the Gulf of California. *Estuarine Coastal and Shelf Sci.*, **57**: 149~162.
- [4] Roden, G.I. and B.A. Taft, 1982. Effect of Emperor Seamounts on the mesoscale thermohaline structure during the summer of 1982. *J. Geophys. Res.*, **90**: 839~855.
- [5] Eriksen, C.C., 1991. Observations of amplified flows atop a large seamount. *J. Geophys. Res.*, **96**: 15,227~15,236.
- [6] Blumberg, A.F. and G.L. Mellor, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Three Dimensional Coastal Models (N.S. Heaps, ed.), American Geophysical Union, Washington, D.C., 1~16.
- [7] Galperin, B., L.H. Kantha, S. Hassid and A. Rosati, 1988. A quasi-equilibrium turbulence energy model for geophysical flows. *J. Atmos. Sci.*, **45**: 55~62.
- [8] Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equation, I. The basic experiment. *Mon. Wea. Rev.*, **91**: 99~164.
- [9] Gerdes, R., 1993. A primitive equation ocean circulation model using a general vertical coordinate transformation. 1. Description and testing of the model. *J. Geophys. Res.*, **98**, 14,683~14,701.
- [10] Winton, M., R. Hallberg and A. Gnanadesikan, 1998. Simulation of density-driven frictional downslope flow in z-coordinate ocean models. *J. Phys. Oceanogr.*, **28**, 2,163~2,174.
- [11] Pacanowski, R.C. and A. Gnanadesikan, 1998. Transient response in a z-level ocean model that resolves topography with partial cells. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 3,248~3,270.
- [12] Ezer, T., H. Arango and A.F. Shchepetkin, 2002. Developments in terrain-following ocean models: intercomparisons of numerical aspects. *Ocean Modelling* **4**, 249~267.

원고접수일 : 2003년 12월 05일

원고채택일 : 2003년 12월 30일