Bull. Korean Fish. Soc. 22(2), 79~85, 1989 韓水誌 22(2), 79~85, 1989

대륙붕 지형을 갖는 해양의 바람응력에 대한 초기반응의 수치실험*

이 상 룡
부산대학교 해양과학과

A Numerical Experiment of Transient Response of the Basin with Continental Shelf-like Bottom Topography to Local Wind Stress

Sang-Ryong LEE

Department of Marine Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

The generation and propagation of shelf wave-like oscillations induced by local wind at a basin with continental shelf and slope are studied by a numerical experiment. Three types of vortices are generated along western boundary and they propagate along the boundaries in the counter-clockwise direction. The first vortex is generated at the early stage of wind stress and its center is located off the continental slope. The second type centered on the continetal slope is generated at about the terminating time of wind stress and follows the first one. The third, centered on continental shelf, decays so soon that its propagation pattern is hard to be identified. Each of those vortices is probably to be one of free modes of the model basin.

서 론

비교적 곧은 해안에서 관측되는 관성주기 이상의 저주파 파동현상은 대륙붕파(shelf wave)로 해석되는 경우가 많았으며(Moores and Smith, 1968; Mysak and Hamon, 1969; Lie, 1979 등), 우리나라 동해안의 경우도 몇몇 연구자에 의한 보고가 있었다. Lee와 Chung(1982)은 1978. 4~1979. 4의 일년간의 동해안 4개 검조소의 검조자료를 분석한 후 특히 여름철에 140~250*km*/day의 속도로 동해안을 따라 남하한 0.26 cpd의 대륙붕파의 존재를 보고하였다. Lie(1984, 1987)는 죽변 근처에서의 유속관측 자료와 1980년부터 1982년까지 3년 간의 검조자료의 분석에서 여름철에 0.3 cpd 또는 0.2~0.3 cpd의 파동이 45~50*km*/hr의 속도를 갖고 남하하고 있음을 확인하고 이를 지수함수 형태의 수심분포를 갖는 대륙붕에서의 대륙붕파 분산관계식에 적용시켜 본 결과 이론적으로 얻어지는 대륙붕파보다는 훨씬 빠른 전파속도를 보인다고 보고하였다.

대륙붕파의 발생은 이동성 대기압의 변화(Robinson, 1964)와 바람 특히 해안에 평행한 바람 성분(Adams and Buschwald, 1969; Gill and Schuman, 1974)에 의한 것이라는 이론이 제기 되었으며 근래에 와서 후자에 의한 가능성을 강조하는 연구결과가 제시되고 있다(Mysak, 1980; Lie, 1981).

본 연구에서는 동해에서의 적용을 염두에 두고

* 본 연구는 1987년도 문교부 기초과학육성연구비의 지원에 의한 것임.
* 부산수산대학 해양과학연구소 연구업적 제 223 호

바람에 의한 대륙붕파 또는 이와 유사한 파동의 초기 단계에서의 발생 및 전파를 알아보기 위한 일차적 수치실험이 시행되었다. 연안측후소의 기상관측자료의 분석결과(이, 1983)는 동해 연안을 따라 5~10일 주기의 바람이 우세함을 보여주고 있다. 물론 내륙에 위치한 측후소의 관측자료가 해상풍을 그대로 대표하지는 못하나 풍역대의 규모로 보아 대체적인 바람의 시간적 분포특성〔spectrum〕은 비슷할 것으로 보고 4일간의 바람 지속 시간과 동해 연안에서의 대륙붕파 발생을 고려하여 동해안에 평행한 북풍을 고려하였다.

동해의 모델은 해의 해석을 쉽게 하기 위하여 간단한 기하학적 형태를 갖되, 해도와 가용의 여러 가지 수심에 관한 자료를 참조하여 동해의 대륙붕을 가능한한 근사하게 묘사하도록 하였다. 특히 동해안 대륙붕파 연구의 중심이 되는 37 N 부근의 해저 지형〔Fig. 1〕을 많이 참조하였다. 모델에서는 동해 중앙부의 천소지역을 무시하고 대륙붕과 대륙사면의 형태가 강조되었다. 그리고 동해안에서 발생된 대륙붕파 또는 이와 유사한 파동은 필연적으로 동해남부의 대륙붕을 건너 일본연안으로 전파될 것이므로 동해남부의 대륙붕이 고려되었다.

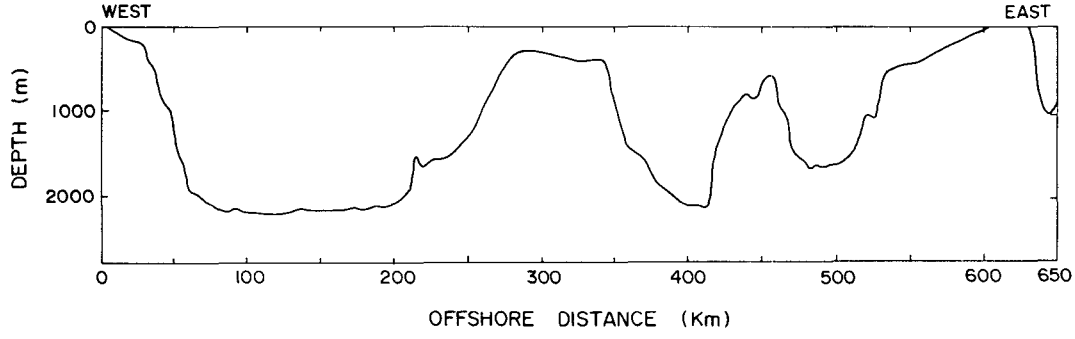

Fig. 1. Bottom topography off the eastern coast of Korea at 37 N.

모델 및 수치해

Fig. 2와 같이 동해를 남북 길이 1,200*km*, 동서 길이 900*km*의 장방형 해양으로 가정하였다. 서쪽해안(한국 동안), 남쪽해안 및 동쪽해안은 해안선 수심을 10*m*, 대륙붕폭 70*km*, 선단에서의 수심 200 *m*, 그리고 폭 30*km*의 대륙사면이 수심 2,000*m*까지 연결되어 있으며 중앙부는 수심 2,000*m*로 균일하게 두었다. 북쪽해안은 대륙붕과 대륙사면이 없이 수직벽으로 두었다. 동쪽을 x 방향, 북쪽을 y 방향으로 하는 수직좌표계에서 균질해양의 선형 유체운동방정식과 연속방정식은 다음과 같이 제시된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -g\frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H\nabla^2 u + \frac{\tau_x}{h} \qquad 1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -g\frac{\partial \eta}{\partial y} + A_H\nabla^2 v + \frac{\tau_y}{h} \qquad 2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \qquad 3)$$

여기서 u, v는 각각 수직 평균한 x 및 y 방향의 속도성분; η는 평균해면으로 부터의 해면변화; τ_x, τ_y는 x 및 y 방향의 바람응력 성분; g는 중력가속도; A_H는 수평혼합계수; h는 수심; f는 Coriolis 계수(f-plane으로 가정하여 상수)를 뜻한다.

rigid-lid 가정 하에서 수송량에 관한 유선 함수

$$hu = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad hv = \frac{\partial \psi}{\partial x} \qquad 4)$$

를 도입하여 위의 식 1)~3)을 정리하면 다음과 같은 vorticity 방정식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + f\left\{\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{h}\frac{\partial \psi}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{h}\frac{\partial \psi}{\partial y}\right)\right\}$$
$$= A_H\nabla^2 z + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{h}\tau_y\right) \qquad 5)$$

단

$$z = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{h}\frac{\partial \psi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{h}\frac{\partial \psi}{\partial y}\right) \qquad 6)$$

위의 정리 과정에서 바람응력의 동서성분 τ_x는 없는 것으로 하여 삭제되었다.

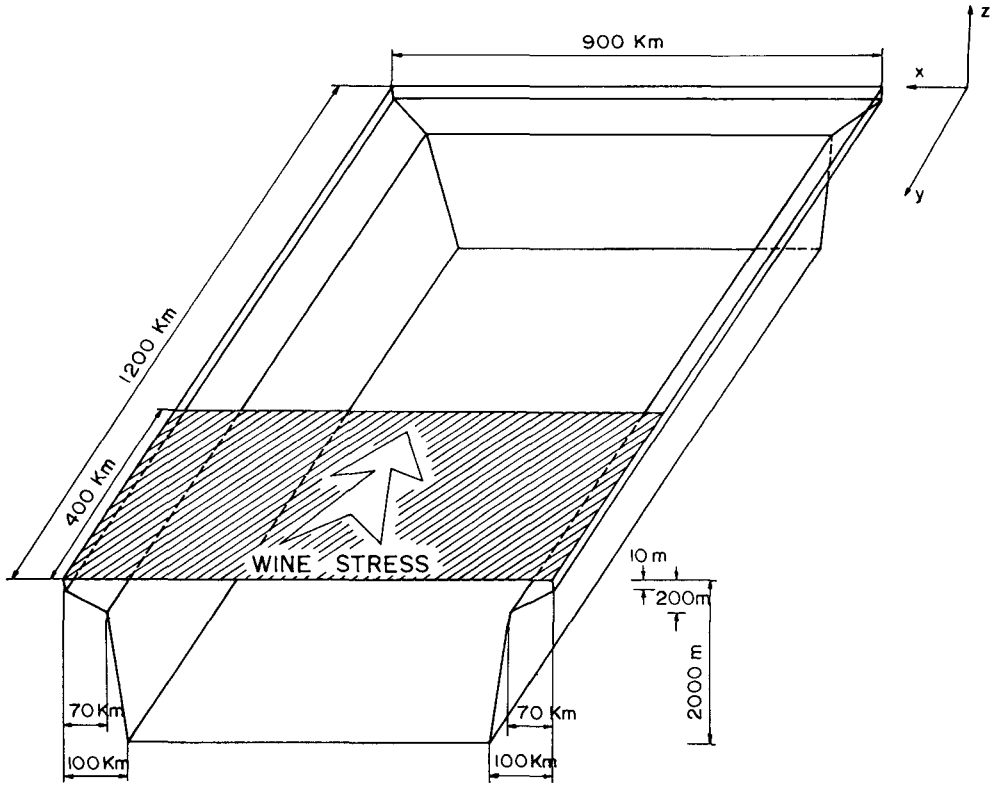

Fig. 2. Schematic view of the model ocean. The coordinates system is reversely represented about Z axis to show easily the bottom topography of the southern coast.

모든 육지 경계면에서의 경계조건은 slip condition으로 경계면에 수직인 속도성분은 0이며 경계면에 평행한 속도성분만 존재하도록 하였다. 바람의 응력은 동서성분은 없는 것으로 하고, 남북성분은 Fig. 3에서와 같이 모델해역 북쪽의 400*km* 대역에서 정현파형으로, 그리고 반주기를 100시간으로 하는 정현파형으로 초기 100시간 동안 북풍이 서서히 그 크기가 증가하다가 다시 감소하여 100

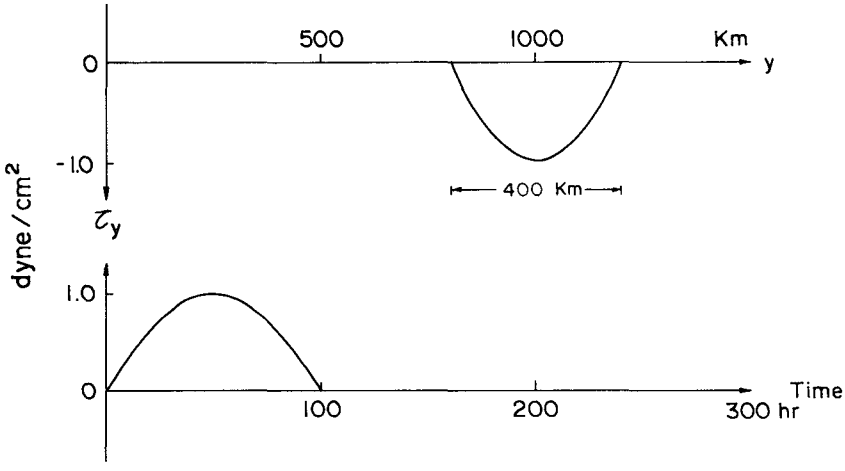

Fig. 3. Distribution of τ_y as a function of Y(upper) and of time(lower).

시간 후에는 바람의 응력이 없어지는 것으로 하였다. 여기서 바람 응력이 가해지는 대역의 폭을 400 *km*로 한 것은 파장 800*km* 또는 그 이내의 파의 발생을 염두에 둔 것이며 100시간의 바람지속시간은 앞에서 언급한 바와 같이 대체적인 바람의 주기를 고려한 것이다. 그리고 바람응력의 최대값은 1 dyne/cm^2으로 하였다. f는 37 N에서의 값으로 고정되었으며, A_H는 $5.\times10^6 cm^2/s$로 했으며 해저마찰에 의한 감쇄는 고려하지 않았다. 격자간격은 Δ_x 및 Δ_y를 각각 5*km*로 두었으며 vorticity 방정식 5)는 Dufort-Frankel scheme(Roache, 1972)을 이용하여 해를 구했으며 유선방정식 6)은 SOR을 사용하여 해를 구했다. 본 모델의 경우 이론적인 relaxation 계수 ω(Roache, 1972)는 1.9 이상이 되나 실제 계산에서 이 값으로는 계산 초기에 발산하는 경향이 보여 1.6으로부터 계산을 시작하여 어느 정도 수렴이 된 후에 1.8로 두어 수렴 속도를 증가시켰다.

Fig. 4에 최초 8일 간의 날짜별 유선함수의 형태가 제시되었다. 제시된 유선의 간격은 $1.\times10^{11} cm^3/sec$이며 실선부분은 반시계방향의 흐름을 그리고 점선은 시계방향의 흐름을 뜻한다. 바람응력이 가해지는 대역의 바로 남쪽 해역의 서쪽해안에 계산 초기부터 반시계방향의 큰 vortex가 생겨 해안을 따라 남쪽으로 진행한다. 동시에 북동쪽 모서리에도 같은 크기의 시계방향의 vortex가 생겼으나 북쪽해안을 따라 진행하지 못하고 오히려 시간이 진행함에 따라 북쪽해안에 반사되어 남쪽으로 진행하는 것처럼 보인다. 서쪽해안 vortex의 중심은 대륙사면을 벗어난 곳에 형성되었다. 바람의 응력이 끝나는 4일째에는 처음 vortex가 생긴 곳과 비슷한 장소에서 역시 대륙사면 밖에 중심을 갖는 시계방향의 vortex가 발생하여 앞서 생긴 반시계방향의 vortex와 같이 진행한다. 이 뒤를 따라 대륙사면에 중심을 두는 약간 작은 규모의 제 2 vortex가 처음 생긴 vortex에서 떨어져 (3일째부터) 발생하여 해안을 따라 앞서와 같은 방향으로 진행한다. 시간이 지날수록 대륙사면에 중심은 두는 제 2 vortex는 더욱 그 세기가 세어져 앞서 발생한 큰 vortex에 겹쳐지며 8일 이후에는 최초의 큰 vortex는 거의 보이지 않는다. 이 vortex는 반시계방향의 것과 시계방향의 것이 교대로 발생하여 완전한 파동 형태를 이루며 파장은 대략 350~400*km*, 전파속도는 앞의 큰 vortex 보다는 약간 늦은 200*km*/day 정도이다. 2일째부터 대륙붕 위에 중심을 두는 아주 작은 규모의 제 3의 vortex가 발생하기 시작하여 5일째에는 완전히 분리된 vortex로 해안을 따라 진행하나 시간이 지날수록 이 vortex는 제 2의 vortex에 묻혀 독립적인 형태를 볼수는 없다.

결과의 고찰 및 토의

서쪽해안을 보면 바람응력이 주어지는 초기에는 대륙사면 밖에 중심을 두는 반시계방향의 큰 vortex(제 1 vortex)가 바람응력 구역 안에서 발생하여 해안을 따라 남쪽으로 전파하며 바람응력이 끝나는 4일째에는 같은 위치에서 시계방향의 vortex도 발생하여 앞서 생긴 vortex와 같이 진행한다. 그러나 곧 대륙사면에 중심을 두며 약간 규모가 작은 vortex(제 2 vortex)가 발생하며 이 역시 해안을 따라 반시계방향으로 전파된다. 대륙붕 지역에 이보다 작은 규모의 vortex(제 3 vortex)가 형성되는 듯하나 그 크기가 매우 작아 뚜렷이 구분되지는 않는다.

바람의 응력이 주어지는 초기에는 제 1 vortex가 가장 뚜렷하나 바람응력이 끝날 때부터 제 2 vortex의 발생이 현저해진다. 제 1 vortex는 발생초기에는 대략 200*km*/day의 속도로 남하하며 남서쪽 모서리에서 약간 늦어지기는 하나 전반적으로 시간이 지날수록 전파속도는 점점 빨라져 7~8일째에는 약 300*km*/day의 속도를 갖는 것으로 보여진다. 제 2 vortex는 바람이 끝날때 쯤부터 보이기 시작하여 점점 커가며 8일 째에는 거의 전 해안에 이 vortex가 우세하다. 이 vortex는 파장 350~400 *km*의 파동 형태로 나타나며 서쪽해안에서 남쪽으로 갈수록 약간씩 길어진다. 전파속도는 제 1 vortex 보다 약간 늦어 200*km*/day 정도이다.

제 1 vortex나 제 2 vortex의 전파속도는 이 해양의 Kelvin파의 전파속도 (수심 2000*m*에서) 500 *km*/hr와는 매우 큰 차이를 갖는다. Kelvin파 이외에 해안선(또는 대륙붕)을 따라 반시계방향으로 진행할 수 있는 장주기파로는 대륙붕파를 들 수 있다. 수심이 지수함수 형태로 깊어지는 대륙붕에서의 대륙붕파의 분산관계(Buchwald and Adame, 1968)는

$$m^2 + k^2 + b^2 + 2bfk/w = 0 \qquad 7)$$

$$\tan(ml) = -m/(b+k) \qquad 8)$$

로 주어지는데(단 m; mode 수, b; 대륙붕의 경사, k; 파 수, w; 파의 전파 각속도, l; 대륙붕의 폭) 본 모델해역의 대륙붕($l=100km$) 조건에서 400*km*의 파장을 갖는 대륙붕파의 경우 위의 분산관계식을 적용하면 대략 240*km*/day의 전파속도를 갖게 된다. 결국 모델해역에서 보이는 전파속도는 대략 대

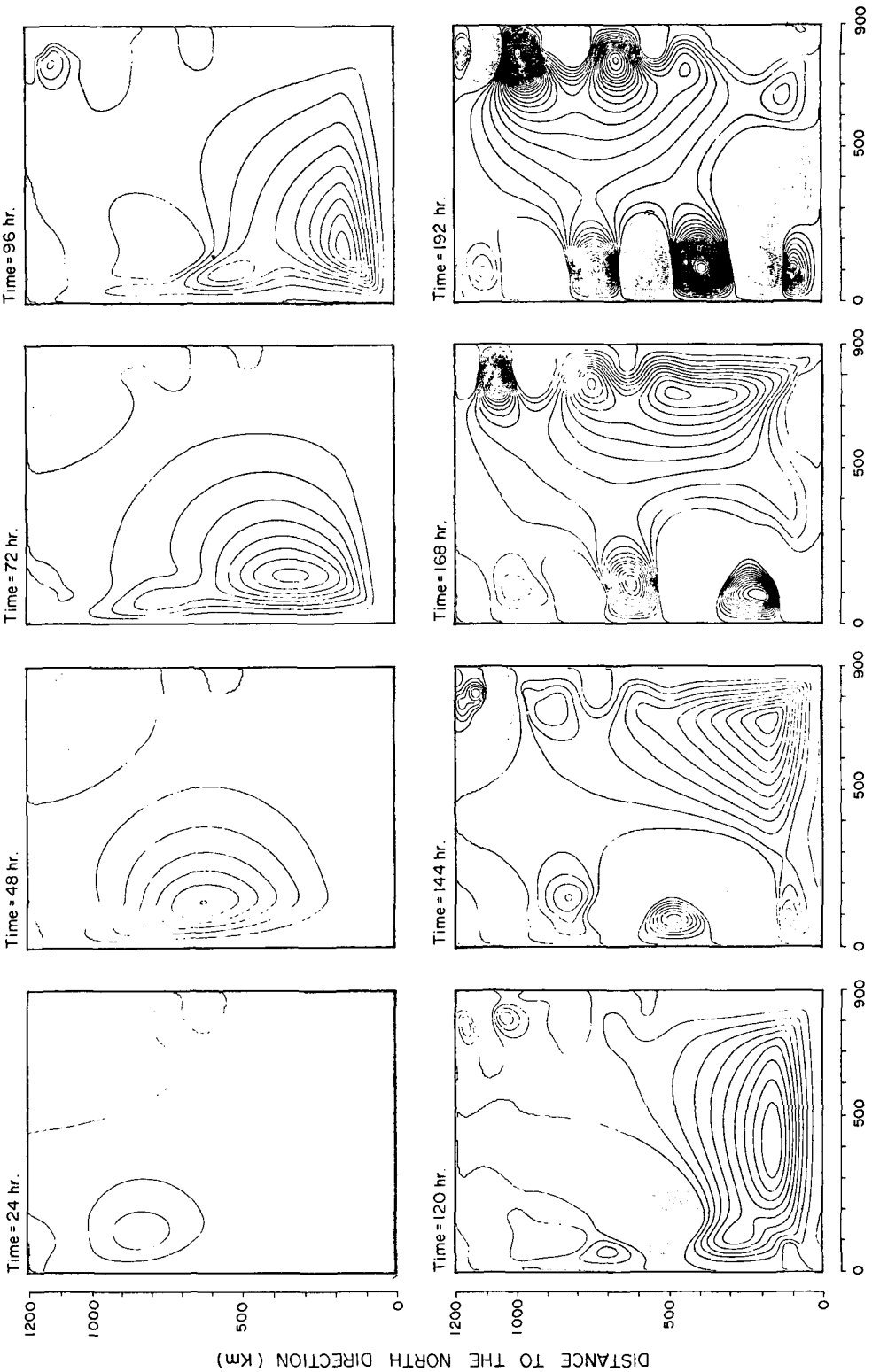

Fig. 4. Sequential pattern of transport stream function from the first through the eighth day. The contour interval is $1.0 \times 10^{11} cm^3/sec$. Solid and dotted lines represent counterclockwise and clockwise circulation respectively.

륙붕파의 범주에 드는 것으로 볼 수 있으며 전파방향도 대륙붕파의 것과 같다. 원래 대륙붕파의 이론은 무한 직선해안의 경우에 수립된 것으로 위에서 얻어진 각각의 vortex들이 대륙붕파의 어느 모드에 해당되는 지는 직접적으로 말할 수는 없으나 전반적인 전파형태는 대륙붕파와 매우 흡사하다. 제 1 vortex는 모델해역이 바람의 응력에 직접 반응하는 하나의 모드로 볼 수 있으며 제 2 vortex는 바람의 응력이 끝난 후에 뚜렷해지며 궁극적으로 제 1 vortex를 대체하는 것으로 보아 이 해역 고유모드 중의 하나인 것으로 생각되어 진다. 그리고 위에서 얻어진 각 vortex들을 대륙붕파와 관련지어 유추해 보면 대륙붕파의 각 모드는 바람이 가해지는 동안 또는 그 후에 선택적으로 발달하여 전파하는 것으로 보여진다. 이 점은 해면관측자료 또는 유속관측자료와 바람자료를 비교분석할 경우에 특히 유의해야할 것이다.

Lie(1984) 및 이(1987)의 관측결과와 자료분석결과에서 보이는 45~50*km*/hr 또는 80*km*/hr 정도의 위상속도를 갖는 파동은 본 모델계산에 나타나지는 않았다. 이러한 파동은 본 모델의 조건에서는 발생할 수 없는 것인지를 뚜렷이는 알 수 없다. vortex의 생성 및 전파형태는 바람응력의 지속시간보다는 대역의 폭에 상당히 민감하게 반응한다. 예를 들면 본고에 제시되지는 않았으나 위와 꼭 같은 모델에서 바람응력이 가해지는 대역을 전해역으로 넓혔을 때는 바람응력이 가해지는 동안은 물론 제 1 vortex가 주를 이루며 독립된 제 2 vortex가 생기기까지는 6일 이상이 걸린다.

초기에 북동쪽 모서리에 발달된 시계방향의 vortex는 시간이 지나도 서쪽으로 전파하지 못하고 계속 그 크기만 증가한다. 오히려 북쪽 해안에 반사되어 동쪽 해안을 따라 시계방향으로 전파되는 듯하여 Proudman wave(von Schwind, 1980)의 형태를 보이기도 하나 뚜렷하지는 않다.

요 약

대륙붕과 대륙사면을 갖는 직사각형 해양의 북쪽 일부분에서 불어오는 바람에 대한 이 해양의 초기 단계에서의 반응이 수치실험을 통하여 관찰되었으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 전반적으로 보아 대륙붕파와 아주 유사한 파동이 발생되었으며 대륙붕을 따라 반시계방향으로 전파되었다.

2. 가장 먼저 대륙사면 밖에 중심을 두는 반시계방향의 vortex가 서쪽해안에 발생하여 해안을 따라 반시계방향으로 전파하며 그 속도는 200~300 *km*/day이다.

3. 바람응력이 끝날 즈음부터 대륙사면에 중심을 두는 일련의 vortex들이 생기나 해안을 따라 전파하며, 이 vortex들은 이 모델해양의 고유 모드 중의 하나와 관련되는 것으로 생각된다.

4. 초기 단계에서의 대륙붕파의 발생은 각 모드별로 시차를 갖고 선택적으로 발달되어 전파되는 것으로 보여진다.

문 헌

Adams, J. K. and V. T. Buschwald. 1969. The generation of continental shelf waves. J. of Fluid Mech. 35, 815~826.

Gill, D. L. and E. H. Schuman. 1974. The generation of long Shelfwaves by the wind. J. of Phys. Oceanography, 3, 73~82.

Lee, J. H. and J. Y. Chung 1982. Continental shelf waves off the eastern coast of Korea. La Mer, 20, 169~180.

Lie, H. J. 1979. Effects of atmospheric pressure and wind stress on daily mean sea level in the Bay of Biscay. Analysis of continental shelf waves. J. Oceanol. Soc. Korea, 14, 45~53.

1981. Barotropic shelf waves generated by longshore wind stress. J. Oceanol. Soc. Korea, 16, 99~107.

1984. Coastal current and its variation along the east coast of Korea. In: Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas. Ed. T. Ichiye, 399~408, Elsevier Sci. Pub. Amsterdam.

Moores, C. N. K. and R. L. Smith. 1968. Continental shelf waves off Oregon. J. Geophys. Res., 73, 549~557.

Mysak, L. A. 1980. Recent advances in shelf wave dynamics. Rev. Geophys. Space Phys., 18, 211~241.

Mysak, L. A. and B. V. Hamon. 1969. Low frequency sea level behavior and continental shelf waves off North Carolina. J. Geophys. Res., 74, 1397~1405.

Robinson, A. R. 1964. Continental shelf waves and the response of sea level to weather systems. J. Geophys. Res., 69, 367~368.

Roache, P. J. 1972. Computational fluid dynamics.

1~446. Hermosa Pub. Albuquerque, N. M.

Schwind, J. J. 1980. Geophysical Fluid Dynamics for Oceanographers. 1~307, Prentice-Hall, Inc.

이홍재. 1983. 한국 연안해역에서 기상자료의 처리 및 분석. 해양연구소와 중앙기상대 연구보고서 BSPE 00053-74-1, 1~108.

이홍재. 1987. 한국동해안에서 일평균 해면변화. 해양연구소 보고서, BSPE 00081-133-1, 1~52.

1988년 11월 25일 접수
1989년 4월 14일 수리