

동해의 M_2 조석 무조점 체계에 대한 기조력의 영향

이종찬·정경태

1. 서론

동해는 Korea Strait, Tsugaru Strait, Soya Strait, Mamiya Strait의 좁은 해협으로 동중국해의 북동해역, 태평양 및 Okhotsk 해로 연결되나, 해협부의 폭과 수심이 작아 폐쇄된 해역으로 볼 수 있다. 동해에 대한 조석현상을 파악하기 위해서는 Ogura(1933)와 Nishida(1980)의 한국 주변해역(동아시아)에 대한 경험적인 조석도를 참고할 수 있으며, Odamaki(1989a)는 대한해협에서의 자료를 재편집하여 개선된 조석도를 제시하였다. 동해의 조석에 대한 수치모형을 이용한 연구 중, Kang 등(1991)은 기조력을 동해의 조석현상을 지배하는 요인으로 제시하였다. 즉 그들 연구에는 기조력을 무시된 결과는 대한해협 근처의 무조점은 북측으로 대폭 이동하여 한국 동해안에 연하여 나타났고 Tartary 해역의 무조점은 나타나지 않았지만, 기조력을 고려한 결과는 대한해협의 무조점은 남측으로 이동되었고 Tartary 해역의 무조점도 재현되었다. 이러한 결과와는 반대로, 최와 이(1993)의 연구에서는 기조력을 무시한 결과는 Tartary 해역의 무조점이 뚜렷히 재현되었으나 기조력을 무시한 결과는 Tartary 해역의 무조점이 소련 연안에 치우쳐 나타나지 않았다. 이와 같이 기조력의 포함 여부에 따라 동해의 무조점 체계는 상당히 다르게(상반되게) 나타났다.

본 연구에서는 Defant(1961) 및 Garret(1975)의 정의에 따른 독립조석(기조력에 의한 대상해역의 조석), 공진조석(개방경계에 부여된 조석에 의한 대상해역의 조석) 및 공진조석에 기조력을 포함한 경우를 수치실험을 통하여 살펴보았다. 이와 함께 모형의 내부에 정의된 기조력에 의한 교란을 개방경계를 통하여 방사시키는 방사경계조건을 사용하여 기조력의 영향을 살펴보았다. Odamaki(1989b)는 Garret(1975)의 정의에 의한 동해의 독립조석을 1차원 수치모형을 이용하여 연구하였는데, 1차원 모형을 사용하였기 때문에 독립조석의 무조점의 회전 방향을 파악할 수 없었다. 본 연구에서는 일정 수심의 폐쇄해역에 대한 수치실험을 통하여 독립조석의 무조점의 회전방향에 대한 수심(또는, 자유진동주기)의 영향을 살펴보았다.

2. 수치 실험 및 토의

위도에 따른 전향력의 변화 및 기조력(tide generating force)의 경·위도에 따른 변화를 고려하기 위하여 구면좌표계 하의 수심적분된 선형의 연속방정식 및 운동방정식을 Arakawa-C 격자체계 하에서 반음해법인 ADI 방법을 사용하여 유한차분화하였다. 이류항을 포함한 차분식은 이 등(1996)을 참고할 수 있다. 폐쇄경계조건은 육지경계의 범선유속

을 0으로 하였으며, 개방경계조건은 해수위를 부여한 경계조건과 방사경계조건(Flather, 1976) 2가지를 사용하였다.

연구대상 해역은 127°E-142°E, 33°N-52°N로 동해 전역을 포함하며, 4개의 해협이 개방 경계로 정의되었다. 격자 크기는 위도방향으로 1/8°, 경도방향으로 1/6°의 분해능을 갖는다. 수심자료는 DBDB5를 주로 이용하였으나 연안역의 수심은 재편집하여 사용하였다. 수치모 형에 사용된 최대수심은 약 3,500m, 평균수심은 약 1,600m, 계산영역의 약 10%는 100m 이 하의 수심으로 구성되었다. 계산시간 간격은 372.6초로 M₂의 1 주기는 120번의 계산으로 완료된다. 모든 수치실험은 해수위와 유속이 0인 초기조건으로부터 수행되어, 해가 수렴한 40조석 이후의 결과를 논의하였다.

동해의 독립조석

Fig. 1은 Defant(1961)의 정의에 따른 독립조석의 조석도이다. 동해의 중앙부에 시계방 향으로 회전하는 뚜렷한 무조점이 나타났으며, Mamiya 해협의 등진폭은 약 10cm에 달하 고 있다. Kang 등(1991)에 의해 제시된 기조력의 영향은 약 135°E의 소련 연안에 탈무조 점(deamphidromic point)의 형태로 반시계방향으로 회전하는 양상으로 나타났으며, 본 결 과와는 다른 결과를 보이고 있다. Fig. 2는 Garret(1975)의 정의에 따른 독립조석의 조석도 이다. Mamiya 해협의 등진폭은 약 95cm에 달하고 있으며, 이러한 값은 Odamaki(1989a)의 조석도에 의한 진폭(약 80cm)보다도 큰 값이다. (139°E, 47°N) 근처와 대한해협 근처에 반 시계방향으로 회전하는 2개의 무조점과 나타났다. (139°E, 47°N) 근처의 무조점은 Odamaki (1989b)의 결과와 유사함을 알 수 있다. 즉 Odamaki(1989b)의 1차원 결과도 기조력에 의한 node는 Soya 해협 북쪽에서 발생함을 보이고 있다.

개방 경계에 해수위를 지정한 경우의 공진조석

Fig. 3a는 기조력을 무시한 경우에 대한 조석도이다. 대한해협의 무조점은 기존 조석 도와 거의 같은 위치에 재현되었으나, Tartary 해역의 무조점은 사할린 섬에 치우쳐 나타 났다. Kang 등(1991)에 의해 제시된 조석도에는 대한해협 근처의 무조점은 본 결과에 비 해 북서방향으로 약간 치우쳐 나타났으며, Tartary 해역의 무조점은 나타나지 않았다. 최 와 이(1993)에 의한 결과는 대한해협 근처의 무조점은 Kang 등(1991)의 결과보다도 북쪽 에 나타났으나, Tartary 해역의 무조점은 중앙에 뚜렷히 재현되었다. 최와 이(1993)의 대한 해협 근처의 무조점이 북쪽에 나타난 것은 Mamiya 해협의 개방경계 해수위로 작은 값을 사용하였기 때문으로 추정된다.

개방경계에 해수위 뿐만 아니라 기조력도 함께 고려한 결과는 Fig. 3b와 같다. 대한해 협 근처의 무조점이 Fig. 3a에 비하여 남서쪽으로 이동하였으나 그 차이는 매우 작음을 볼 수 있다. 그러나 Tartary 해역의 무조점은 소련 연안에 치우쳐 탈무조점의 형태로 나타났

다. 즉 본 결과에 의하면, 기조력은 무조점을 서쪽으로 치우치게 하는 효과를 보이고 있다. 이러한 경향은 최와 이(1993)의 결과에서도 볼 수 있다. Kang 등(1991)의 결과는 기조력의 영향이 무조점을 동쪽으로 치우치게 하는 상반된 결과를 보이고 있다.

방사 개방 경계 조건을 사용한 경우의 공진조석

개방경계에 해수위를 지정하고 기조력을 포함할 경우에는 기조력에 의한 교란이 개방 경계를 통하여 방사되지 못하여 기조력의 영향을 적절히 재현한 것으로 보기 어렵다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 방사경계조건을 사용하여 공진조석 및 기조력의 영향을 살펴 보았다.

Fig. 4a는 기조력을 무시한 경우에 대한 조석도이다. 대한해협 근처 무조점의 약간의 위치 차이를 제외하고는 Fig. 3a와 거의 같음을 보이고 있다. 즉 개방경계의 입력조건 (q_T, ζ_T)이 비교적 타당하게 설정되었음을 알 수 있다. Fig. 4b는 기조력이 포함된 경우에 대한 조석도로, Fig. 4b와 Fig. 3b를 비교해 보면 개방경계조건에 따라 기조력의 영향은 상당히 다르게 반응함을 알 수 있다. 해수위를 지정한 경계조건을 사용할 경우의 기조력의 영향은 Tartary 해역 근처의 무조점을 서쪽(소련 연안)으로 치우치게 하였는데, 방사경계 조건을 사용할 경우의 기조력의 영향은 Tartary 해역 근처의 무조점을 남쪽으로 치우치게 함을 보이고 있다. 기조력이 포함되었음에도 계산된 Tartary 해역 근처의 무조점은 Tartary 해역 중앙에 뚜렷히 재현되었다.

등수심 폐쇄해역에 대한 독립조석

등수심 폐쇄해역에 대한 조석방정식의 해석해가 존재하나 (Pnueli and Pekeris(1968)는 저면마찰을 무시한 경우에 대하여 power-series expansion을 이용하여 해석해를 구하였다), 이들 해석해로부터 무조점의 회전방향을 파악하기가 쉽지 않아 본 연구에서는 수치 실험을 통하여 수심에 따른 무조점 체계를 살펴보았다. 기존의 조석도 및 개방경계에 조석을 부여한 계산결과에는 동해에 2개의 뚜렷한 무조점이 제시되어 있다. Garret(1975)의 정의에 의한 독립조석(Fig. 2)에도 2개의 무조점이 나타났다. 이러한 2개의 무조점은 어떠한 경우 형성되는가와 함께 시계방향으로 회전하는 무조점(Fig. 1)은 어떠한 경우 형성되는가를 살펴보기 위하여 동해의 제원을 갖는 일정수심의 직사각형 폐쇄해역에 M_2 분조의 기조력만에 의한 등진폭도 및 등조시도를 살펴보았다.

Fig. 5a는 수심이 250m로 일정할 경우에 대한 등진폭도 및 등조시도이다. 이 경우 Merian 식($T=2L/(gh)^{1/2}$, ϕ 방향의 길이(L)는 약 2000km)에 의한 (지구의 자전을 무시한) 자유진동주기는 약 22.5시간으로 M_2 주기인 12.42시간의 약 2배에 해당한다. 북반구에서 흔히 볼 수 있는 반시계방향으로 회전하는 2개의 무조점이 남쪽과 북쪽에 재현되었다. 즉 2개의 무조점이 형성되기 위해서는 자유진동주기가 M_2 주기의 2배와 거의 같아야 하며,

또한 경계의 진폭이 상당히 커야 함을 알 수 있다(Defant(1961)의 정의에 의한 독립조석으로는 2개의 무조점이 형성되지 않는다). Fig. 5b는 공명(resonance)이 발생하도록 수심을 750m로 한 경우의 등진폭도 및 등조시도이다. 공명된 경우의 등진폭선은 거의 대칭인 원형으로 폐쇄해역의 중앙에 나타났으며, 반시계방향의 회전을 보이고 있다. Fig. 5c는 수심 1,200m에 대한 것으로 자유진동주기는 약 10시간으로 M_2 주기보다 작다. 반시계방향으로 회전하는 무조점이 나타났다. 대상해역의 자유진동주기가 외력(여기서는 M_2 조석)의 주기보다 작을 경우 시계방향의 회전이 나타남을 알 수 있다. 수심 2,400m에 대한 결과는 Fig. 5d와 같다. 이 경우의 진폭은 수심 1,200m인 경우에 비하여 약간 감소하였으나, 무조점의 회전방향은 시계방향으로 나타났다. 실제의 동해(평균수심은 1,600m)에 대한 Defant(1961)의 정의에 의한 독립조석(Fig. 1)은 Fig. 5c 또는 Fig. 5d와 거의 같은 결과를 보였다.

3. 결론

동해의 무조점 체계에 대한 기조력의 영향은 무시할 수 없는 것으로 나타났다. 이러한 기조력의 영향을 적절히 파악하기 위해서는 기조력에 의한 교란을 적절히 방사시킬 수 있는 개방경계조건 선정이 매우 중요하였다. 개방경계에 해수위를 지정하는 경계조건을 사용한 경우의 기조력의 영향은 Tartary 해역의 무조점을 서쪽으로 상당히 편향시켜 탈무조점의 형태를 형성하였으나, 방사개방경계조건에 의한 기조력의 영향은 Tartary 해역의 무조점을 서쪽으로 약간 치우치게 하였으나 Tartary 해역의 중앙에 재현하였으며, 기존조석도의 무조점 위치와 거의 일치하였다.

Coriolis 힘을 포함한 일정 수심의 폐쇄해역에 대한 수치실험을 통하여 수심(또는 자유진동주기)에 따른 독립조석의 회전 방향이 바뀔 수 있음을 살펴보았다. 즉 대상해역의 자유진동주기가 외력의 주기에 비해 약 2배 정도일 경우는 2개의 반시계방향으로 회전하는 무조점이 나타나며, 자유진동주기가 외력의 주기에 비해 작을 경우는 시계방향으로 회전하는 1개의 무조점이 형성되었다. 이러한 결과는 Hamblin(1979)의 해석 모델에 의한 결론과 일치한다(자유진동주기가 외력의 주기보다 짧을 경우, 대상해역의 운동은 주어진 외력의 회전방향과 같은 방향으로 운동한다).

4. 참고문헌

- Choi, B.H. and Lee, H.J., 1993. A Tidal model of the East Sea, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean engineers, 5(3) : pp. 250-262. (in Korean)
- Defant, A., 1961. Physical Oceanography, Vol. 2, Pergamon Press, Oxford, 598 pp.
- Flather, R.A., 1976. A tidal model of the north-west European continental shelf, Mem. Soc. R. Sci. Liege, ser 6, 10, 141-164.
- Garrett, C., 1975. Tides in gulfs, Deep-Sea Research, 22 : pp. 23-35.

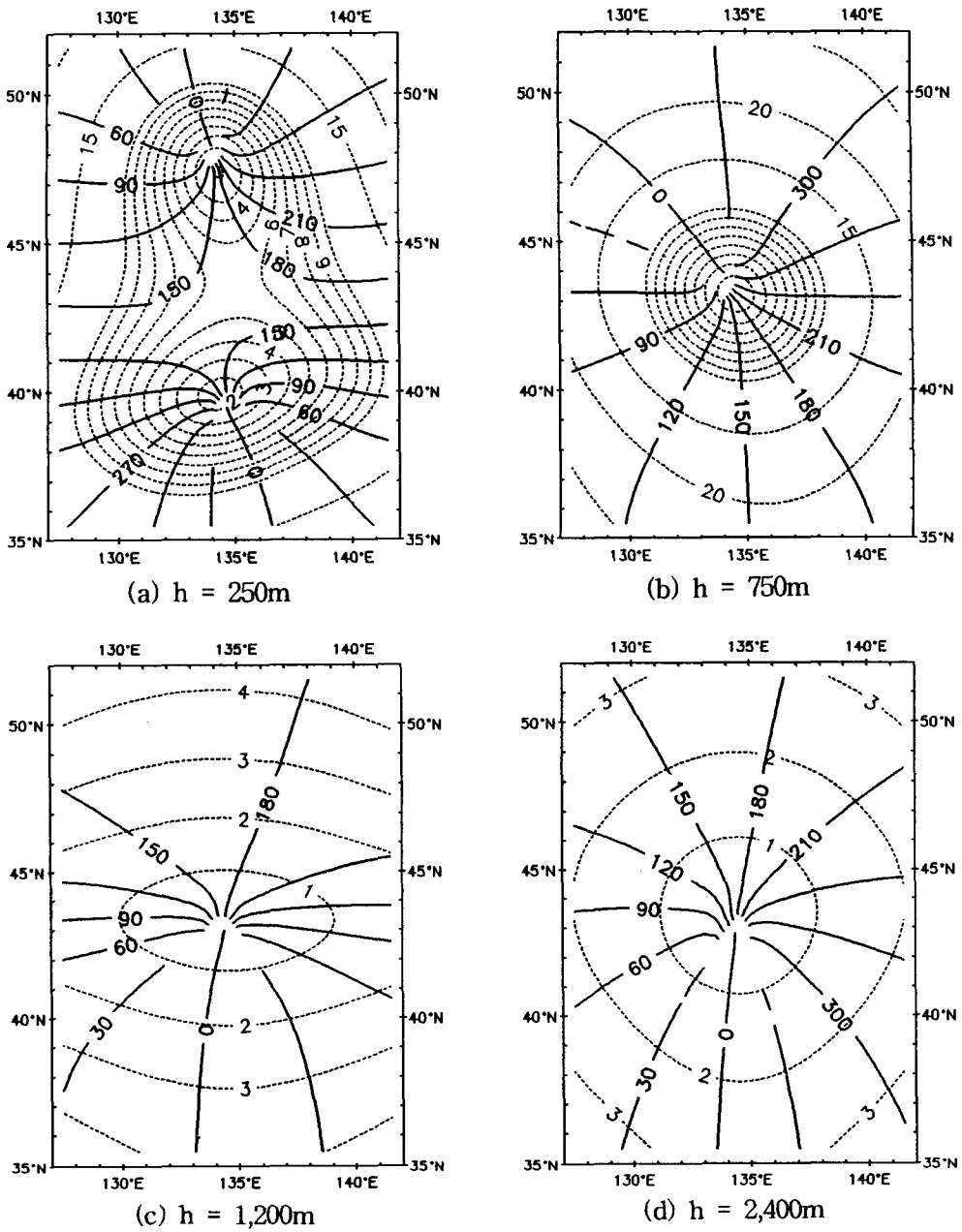


Fig. 5 Independent tide in a closed rectangular basin with different depth.

- Hamblin, P.F., 1976. A theory of short period tides in a rotating basin, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 281, 97-111.
- Kang, S.K., Lee, S.R. and Yum, K.D., 1991. Tidal computation of the East China Sea, the Yellow Sea and the East Sea, In *Oceanography of Asian Marginal Seas* (ed) K. Takano, pp. 25-48.
- Lee, J.C., Jung, K.T. and Choi, B.H., 1996. Effect of nonlinear terms on the generation of M_2 tide residual elevation and M_4 tide in the Yellow Sea and the East China Sea, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean engineers.* (in print)
- Nishida, H., 1980. Improved tidal charts for the western part of the North Pacific Ocean, *Report of Hydrographic Researches.* 15 : pp. 55-70.
- Odumaki, M., 1989a. Tides and tidal currents in the Tusima Strait, *Journal of Oceanographical Society of Japan,* 45 : pp. 65-82.
- Odumaki, M., 1989b. Co-Oscillating and independent tides of the Japan Sea, *Journal of Oceanographical Society of Japan,* 45 : pp. 217-232.
- Ogura, S., 1933. The tides in the Seas adjacent to Japan, *Bull. Dep. Imp. Jap. Navy,* 7 : 1-189.
- Pnueli, A. and Pekeris, C.L., 1968. Tides in oceans of the form of a cross, *Proc. Roy. Soc. A.* 305 : 219-233.

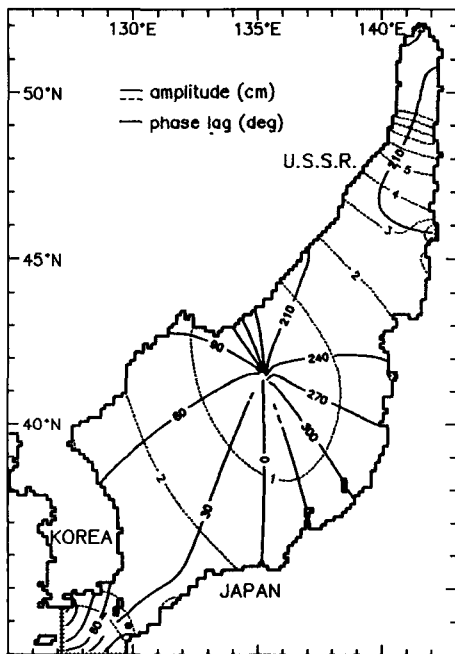


Fig. 1 Independent tide according to Defant(1961)'s definition.

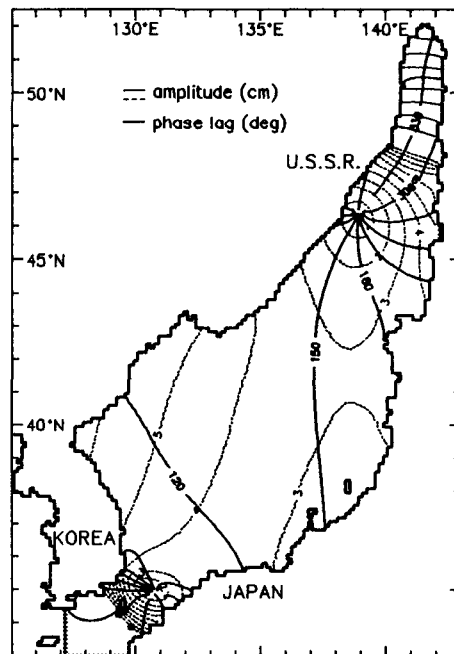


Fig. 2 Independent tide according to Garret(1975)'s definition.

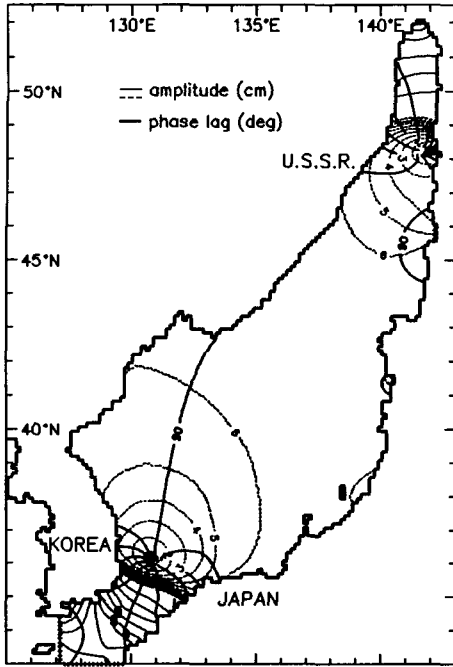


Fig. 3a Co-oscillating tide without TGF using a clamped OBC.

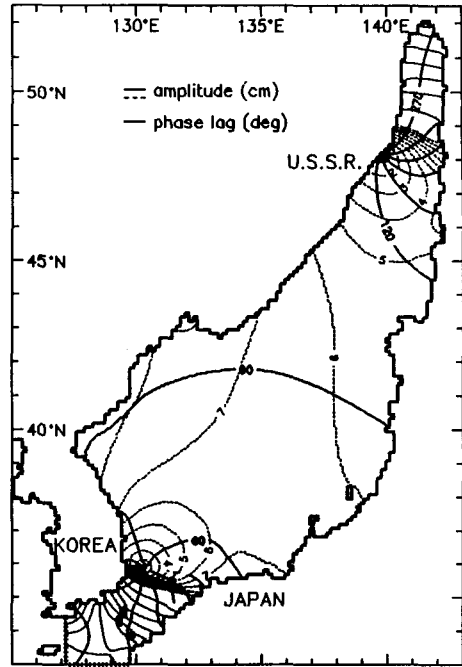


Fig. 3b Co-oscillating tide with TGF using a clamped OBC.

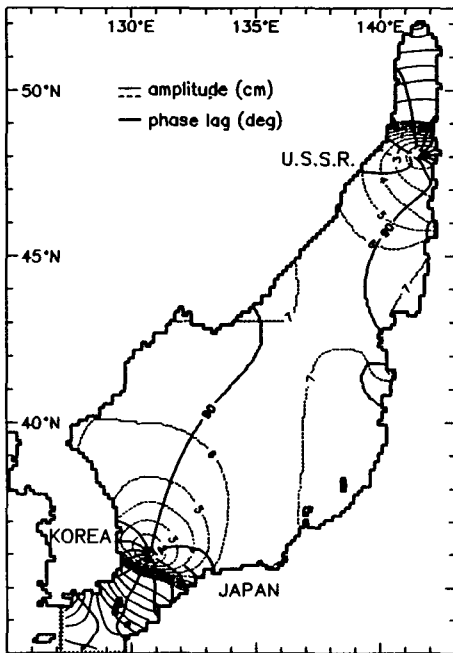


Fig. 4a Co-oscillating tide without TGF using a radiation OBC.

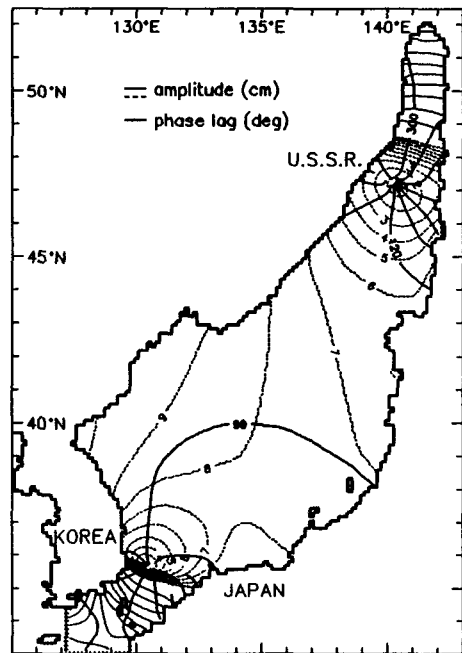


Fig. 4b Co-oscillating tide with TGF using a radiation OBC.