

韓國 南西海域 潮汐前線의 變化 Variation of Tidal Front in the Southwestern Sea of Korea

趙揚基* · 崔秉昊** · 鄭紅和**

Yang-Ki Cho*, Byung Ho Choi** and Hong Wha Chung***

要 旨 : 한국 남서해역 조석전선의 대조기별 변화를 이해하기 위하여 수치실험을 실시하였다. 기존의 연구들에서 전선역으로 제시된 성층계수($\log H/U^3$) 1.5~2.0인 지역의 위치는 대조기 때가 소조기 때보다 약 30~50 km 외해 쪽이다. 인공위성 자료로부터 얻어진 표층수온 분포에서 나타난 전선의 이동거리는 약 20~60 km로 모델결과와 비교적 일치한다. 서해 쪽의 경우 관측된 전선의 위치가 모델로 추정된 위치보다 약 10~30 km 외해 쪽이고, 제주해협 쪽에서는 오히려 연안 쪽이다. 조류에 의한 수직혼합 외에 용승작용과 여름철 제주해협을 지나는 저염에 의한 성층화 등이 조석전선의 위치에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

Abstract □ To investigate the variation of tidal front in the southwestern sea of Korea, tidal currents were simulated. Tidal front proposed by a criterion parameter ($\log H/U^3$)=1.5~2.0 was found further offshore by about 30~50 km in spring tide than in neap tide. This variation is comparable with the observed about 20~60 km by satellite image of sea surface temperature (SST). Observed front by satellite is further offshore by about 10~30 km than calculated region in southwestern region of Yellow Sea. Surface cold water was found little by SST in the Cheju Strait, whereas the model result suggests a possibility of tidal mixing region at the northern part of the Strait. It is thought that the upwelling induced by tidal current and stratification due to the less saline water passing the Cheju Strait in summer may affect the formation of the tidal front in addition to the vertical mixing by tide.

1. 서 론

여름철 태양복사에 의한 표층수온의 상승과 담수 유입으로 인하여 해수가 성층화된다. 그러나 연안역의 수심이 얇고 조류가 강한 곳은 해저마찰로 인하여 성층구조가 파괴되어 수직적인 혼합이 잘 이루어지게 된다. 이때 성층화된 외해역과 수직적으로 혼합이 잘 이루어진 연안역 사이에 수온과 염분의 수평구배가 매우 큰 조석전선이 형성된다.

한국 남서해역은 수심이 얇고(Fig. 1) 조류가 매우 강한 곳으로(최대 5 m/sec) 조석전선이 잘 발달되어 있고 이에 대한 연구가 많이 수행되었다. Fig. 2는 1994년 7월 21일 인공위성에 의해 얻어진 한국 남서해역의 표층수온분포도이다. 대부분의 해역이 30°C 이상의 고온인데 제주도 서안과 한반도 연안에 25°C

이하의 저온수가 출현한다. 제주해협 쪽의 경우 전선의 위치가 연안에서 20~30 km 거리에 존재하고 서해 쪽의 경우 30~60 km 거리에 존재한다. Kim과 Lee(1982)는 제주도 서안에 출현한 수직적으로 균일한 해수를 조석혼합과 용승으로 해석함으로써 이 해역에서 조석전선의 존재 가능성을 처음으로 시사하였다. Choi(1984)는 황해 및 동지나해를 대상으로 성층·혼합 모델을 수행하여 한국 서해안의 조석에너지 손실률이 큼을 지적하고 이로 인한 조석전선의 존재 가능성을 제시하였다. Lie(1989)는 CTD 자료와 인공위성으로 얻어진 표층수온 자료를 분석하여 한국 남서해역 조석전선의 위치와 구조를 자세하게 설명하였으며, 관측된 해류자료를 이용하여 Simpson과 Hunter(1974)가 이용한 조석혼합에 대한 성층계수, $\log H/U^3$ (여기에서 H는 수심, U는 조류의 수심평균 유속)

*서울대학교 海洋學科 (Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742 Korea)

**成均館大學校 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon 170, Korea)

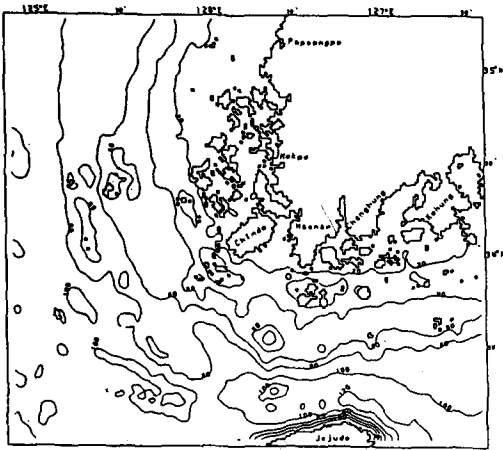


Fig. 1. Bottom topography of the study area.

가 1.0~1.4의 범위를 갖는다고 하였다. 영국 주변 해와 펀디만에서 조석전선이 나타나는 지역은 성층계수($\log H/U^3$)가 1.5~2.0인 지역과 일치한다는 연구결과들을(Fearnhead, 1975; Garrett 등, 1978; Pingree와 Griffiths, 1978; Simpson 등, 1978) 고려하면 한국 남서해역에서 Lie(1989)에 의해 계산된 성층계수가 이 해역이 수직적으로 잘 혼합된 곳을 시사하며 동시에 조석전선의 존재 가능성을 보인다. 정과 이(1990)는 인공위성 자료를 분석하여 한국 서남해역에 나타나는 조석전선의 수온 수평구배가 0.05~0.1 °C/km라고 보고하였다.

조석전선의 위치를 파악하기 위하여 Lie(1989)와 정과 이(1990)는 자료분석 외에 조석 수치모델을 수



Fig. 2. Satellite image of sea surface temperature on July 21, 1994.

행하였다. 그들은 황해와 동지나해를 모두 포함하는 광범위한 해역을 대상으로 수치실험을 실시하여 $\log H/U^3$ 값이 작아 조석전선이 형성될 가능성이 있는 해역들을 제시하였는데 그 중 한 곳이 한국 남서해역이다. 그러나 그들이 이용한 모델의 격자크기는 약 20 km로 전선의 정확한 위치를 파악하기가 어려웠다. 더욱이 정과 이(1990)는 인공위성 관측 표층수온 분석으로부터 조석전선의 위치가 대조와 소조에 따라 변하고 있음을 제시하고 있어 정확한 조석전선의 위치와 변화를 파악하기 위해서 보다 조밀한 격자의 수치모델 실험이 필요하다고 생각된다.

전선은 물리학적 특성뿐만 아니라 식물플랑크톤과 영양염류의 분포 그리고 오염물질의 확산 등과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있어(Bowman과 Esaias, 1977) 그 정확한 위치를 이해하는 것은 매우 중요한 일이라고 생각된다. 본 연구에서는 한반도 주변 해역 중 조석전선이 가장 잘 발달한 한국 남서해역을 대상으로 수십적분된 2차원 조석 모형을 수립하여 대조-중조-소조에 따른 조석전선의 위치와 변화를 추정하였다.

2. 연구방법

이용된 수치모형은 최 등(1995)의 것과 같은 것이다. 격자크기 1250 m, 총 격자 35422개(가로 199개, 세로 178개)로 구성되어 있고, CFL 안정조건을 고려하여 τ 는 10초를 취하였다. 대조-중조-소조를 구별하여 성층계수를 구하여 조석전선의 위치를 추정하였다. 본 연구에서 이용된 격자의 크기는 본 해역에서 조석전선의 위치를 파악하기 위하여 실시되었던 과거의 연구들에서(Lie, 1989; 정과 이, 1990) 사용된 약 20 km의 격자보다 약 16배 조밀하다.

성층계수(S_s)는 Simpson and Hunter(1974)가 제시한 아래와 같은 관계식을 사용하였다.

$$S_s = -\log_{10}\{u_T^3/h\}$$

여기서 u_T 와 h 는 각각 조류의 유속과 수심을 나타낸다.

3. 계산결과

Fig. 3은 수치모델에 의해 산정된 대조와 소조시

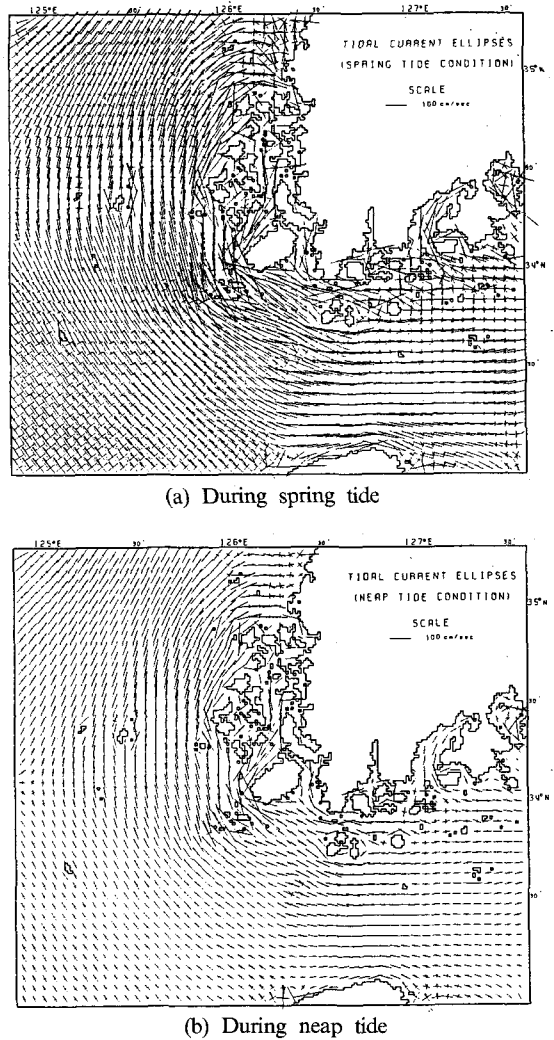


Fig. 3. Computed tidal ellipse.

조류의 장축과 단축의 길이이다. 대조와 소조시 모두 제주해협에서는 조류의 운동이 주로 동서방향으로 이루어지고, 해협의 서편해역에서는 운동방향이 북서-남동으로 바뀌고, 북위 34° 이북의 서해에서는 남북 방향이다. 반장축의 길이는 최강유속을 나타내며 대조시 수십 cm/sec의 크기를 보인 반면 반단축의 길이는 최저유속을 나타내며 그 크기는 수 cm/sec이다. 소조시 유속은 대부분의 해역에서 대조시 유속의 약 절반의 크기를 갖는다.

Fig. 4는 M_2 조석에 의한 해저 마찰력에 의해 소산되는 에너지 양을 나타낸다. 유속이 상대적으로 작은 외해역은 50 N/m 이하의 값을 나타내고 유속이

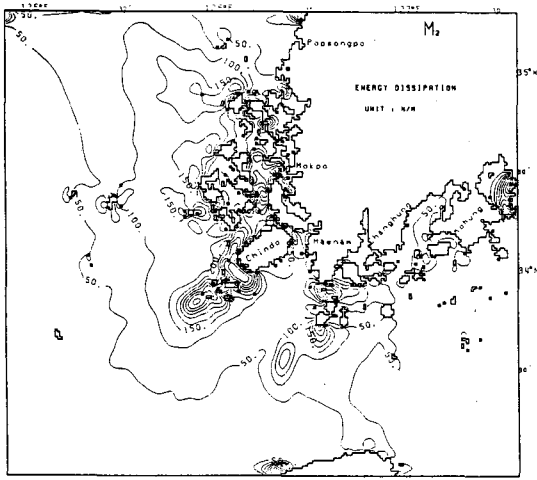
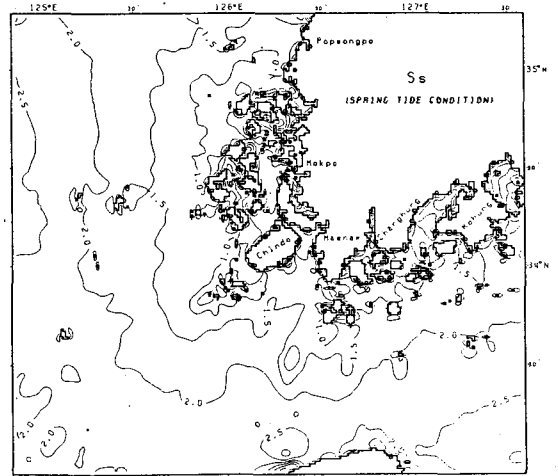
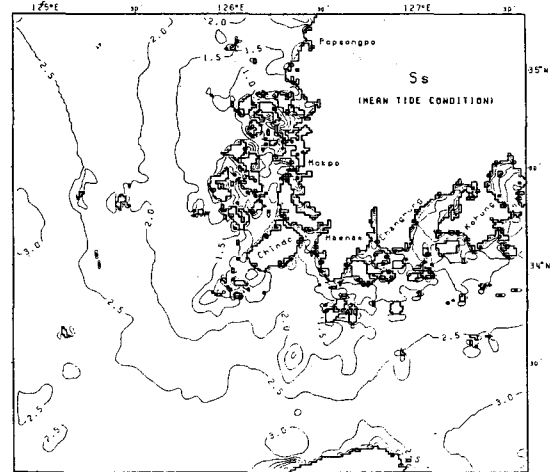


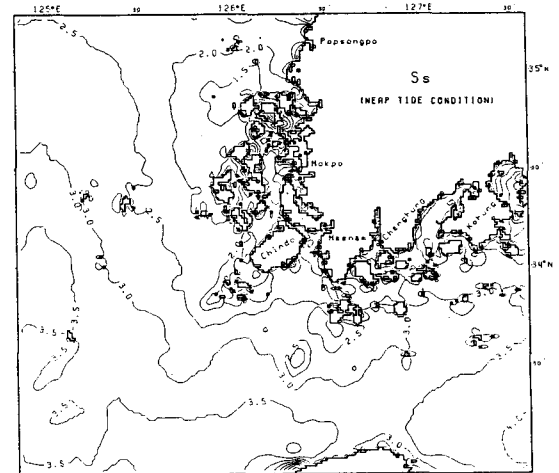
Fig. 4. Contour of time-averaged energy dissipation for the M_2 tide.



(a) During spring tide



(b) During mid tide



(c) During neap tide

Fig. 5. Distribution of computed S_s .

상대적으로 큰 제주해협과 연안에서는 100 N/m의 값을 나타낸다. 특히 명량수도 등 연안의 작은 섬들 사이에 존재하는 좁은 수로들에서는 유속이 커 200 N/m 이상의 높은 값을 나타낸다. 높은 에너지 소산 지역은 해저 마찰력이 커서 해수가 수직적으로 혼합이 잘 이루어질 수 있는 해역임을 시사한다.

Fig. 5는 조석모델을 이용하여 구한 조류의 유속을 이용하여 대조-중조-소조별 성층계수 S_s 를 구한 결과이다. 대조시 외해역의 경우 약 2.5, 연안에는 약 1.0이다. 영국 주변 해와 편디만에서 제시된 조석전선역의 성층계수($\log H/U^3$) 1.5~2.0의 값은 서해 쪽에서는 동경 125°30'을 따라 남북으로 나타나고 제주해협에서는 북위 33°30'을 따라 동서 방향으로 나타난다. 이 분포는 수심 40~60 m 등수심선과 대체로 일치한다. 중조시는 전 해역에서 조류의 유속이 대조 때에 비해 작아짐에 따라 외해역의 경우 약 3.0, 연안에서는 약 1.5로 거의 모든 해역에서 S_s 가 약 0.5씩 높아졌다. 성층계수 1.5~2.0의 값은 제주해협에서는 거의 나타나지 않고 서해 쪽에서는 동경 125°40'을 따라 남북으로 나타나 대조에 비해 연안 쪽으로 약 10~30 km 이동되어 나타난다. 수심 20~40 m 등수심 분포와 대체로 일치한다. 소조시는 조류의 유속이 가장 작은 시기로 외해역의 경우 약 3.5, 연안은 약 2.0의 값으로 대조에 비해 전 해역에서 약 1.0씩 높아졌다. 성층계수 1.5~2.0의 값은 동경 125°50' 부근의 목포 연안에서만 조금 나타나 대조에 비해 30~

50 km 연안 쪽으로 이동되어 나타난다. 수심 20 m 이하의 해역이 이에 해당된다.

4. 표층수온 분포와 비교

Fig. 6은 정과 이(1990)가 1990년 8월과 9월에 인공위성으로 얻어진 표층수온을 대조-중조-소조별로 나타낸 것으로 조석전선의 위치와 변화를 보여주고 있다. 대조의 경우 수온의 수평구배가 1~2°C/20 km인 전선이 서해의 34° 이북에서는 동경 125°20' 부근에 남북으로 존재하며 그 이남에서는 동경 125° 부근에 존재하고 34° 이남의 제주해협 쪽은 거의 나타나지 않는다. 모델에서 구한 성층계수($\log H/U^3$) 1.5~2.0의 값은 서해의 경우 125°30' 부근에서 나타나 관측된 전선보다 약 10~30 km 연안 쪽에 나타난다. 그러나 제주해협 쪽의 경우는 전선이 거의 관측되지 않고 있는데 비해 계산된 결과는 연안으로부터 20~30 km 떨어진 곳에 전선의 존재 가능성을 시사하고 있다.

중조 때는 서해의 경우 대조 때보다 10~30 km 연안으로 이동된 동경 125°20'과 125°30' 사이에서 전선이 관측되고 34° 이남의 제주해협 쪽에서는 거의 나타나지 않는다. 계산된 결과는 동경 125°40' 근처에 전선의 존재 가능성을 제시하고 있어 대조 때의 경우처럼 관측치 보다 약 10~30 km 연안 쪽에 나타난다. 소조 때는 대조 때보다 20~60 km 연안으로 이동된 동경 125°30'과 동경 125°40' 사이에 전선이 관측된다. 계산된 결과는 동경 125°50' 부근에 전선의 위치가 존재할 가능성이 있는 것으로 나타나 관측치 보다 10-20 km 연안 쪽에서 나타난다.

5. 토의 및 결론

황해에서 M_2 조석의 평균 마찰 손실은 전 세계 해양의 약 3.6%에 달한다(Choi, 1980). 이러한 해역 내에 위치한 한국 남서해역의 해저 마찰계수는 외해의 경우 50 N/m이고 연안의 수심이 얕고 조류가 강한 곳에서는 200 N/m의 큰 값을 나타낸다. 해저마찰력이 크게 나타나는 연안의 경우 활발한 수직 혼합을 기대할 수 있다. 연안의 수직혼합이 잘 이루어진 곳과 외해의 성층화된 해역 사이에 조석전선이 존재한다.

영국 주변 해와 펀디만의 경우 성층계수($\log H/U^3$)가 1.5~2.0의 값으로 알려져 있다. 모델에서 얻어진

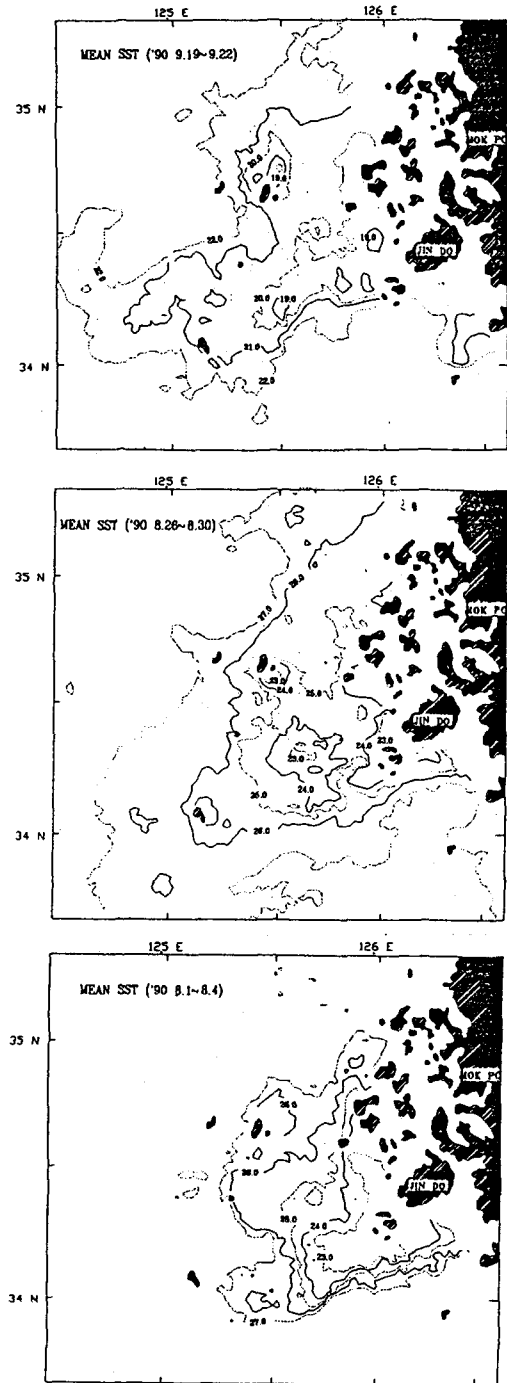


Fig. 6. Distribution of sea surface temperature during spring tide (upper), mid tide (middle) and neap tide (lower) after Chung and Lee (1990).

조류의 유속으로부터 구한 성층계수($\log H/U^3$) 1.5~2.0의 값은 대조시 서해의 경우 동경 125°30'을 따라

남북방향으로 나타나고 제주해협을 경우 북위 33°30'을 따라 동서방향으로 나타난다. 조류의 유속이 약한 소조의 경우는 연안의 혼합역이 크게 줄어 제주해협 쪽에는 나타나지 않고 서해 쪽의 경우 조석전선의 위치가 대조 때에 비해 약 30~50 km 동쪽으로 이동된 동경 125°50' 부근에서 나타남을 제시한다.

Guo와 Xia(1984)는 돌출된 산동반도를 우회하며 흐르는 조류에 의해 외해 쪽으로 원심력이 생겨 연안에서 용승이 일어나 표층에 냉수가 출현한다고 보고하였다. 본 해역에서도 남서방향으로 돌출된 육지를 우회하며 흐르는 조류에 의해 생긴 원심력에 의한 용승이 일어날 수 있다. 이러한 경우 표층의 냉수가 조류의 세기에 의해 결정된 수직혼합역보다 더 외해 쪽까지 출현하리라고 생각한다. 직접 관측된 전선의 위치는 성층계수(log H/U³) 1.5~2.0의 값으로 추정되는 조석전선의 위치보다 대조-중조-소조시 모두 서해 쪽에서 10~30 km 외해 쪽이다.

제주해협 쪽의 경우 인공위성으로 구한 표층수온 분포에서는 표층 저온수가 연안으로부터 10~20 km 거리에 존재함을 보여주는데 모델결과는 연안으로부터 20~30 km 떨어진 지점에 조석전선의 존재 가능성을 제시한다. 여름철 표층의 가열에 의한 성층효과 외에 제주해협을 통과하는 중국대륙 연안 기원의 저염수에 의하여 성층이 더욱 강화되어 수직혼합이 억제된다고 생각된다.

모델 결과에 의하면 대조에 비해 소조 때 전선의 위치가 약 30~50 km 연안 쪽으로 이동되는 것으로 추정된다. 이는 인공위성 자료로 구한 표층수온 분포에 의해 제시된 전선의 이동거리 약 20~60 km와 비슷한 값이다. 이러한 결과는 조류의 세기에 따라 조석전선의 위치가 수 십 km씩 이동될 수 있음을

보여준다. 전선의 위치 변화는 생물량과 오염물질의 분포 등과도 밀접한 관련이 있으므로 조류의 체계를 변화시킬 수 있는 대규모 매립, 댐건설 등이 행해질 때 그 영향을 사전에 충분히 예측하여야 할 것이다.

참고문헌

정종률, 이태신, 1990. NOAA자료를 이용한 여름철 한국 서안의 조석 전선 연구, 한국지구과학회지, 11: 276-282.

최병호, 1984. 황해 및 동지나해의 성층·혼합모델, 대한토목학회논문집, 4(2): 125-132.

최병호, 정홍화, 조양기, 1995. 한국 남서해역의 조석산정, 한국해양·해양공학회지, 심사중.

Bowman, M.J. and Esaias, W.E., 1977. Oceanic fronts in coastal processes, Springer-Verlag, pp. 114.

Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, Report 80-02, Korea Ocean Research and Development Institute.

Fearhead, P.G., 1975. On the formation of fronts by tidal mixing around the British Isles, Deep-Sea Research, 22: 311-321.

Garrett, C.J.R., Keeley, J.R. and Greenberg, D.A., 1978. Tidal mixing versus thermal stratification in the Bay of Fundy and Gulf of Maine, Atmosphere-Ocean, 16: 403-423.

Lie, H.J., 1989. Tidal fronts in the southeastern Hwanghae (Yellow Sea), Continental Shelf Research, 9: 527-546.

Pingree, R.D. and Griffiths, D.K., 1978. Tidal fronts on the shelf seas around the British Isles, J. Geophysical Research, 83(C9): 4615-4622.

Simpson, J.H., and Hunter, J.R., 1974. Fronts in the Irish Sea, Nature, 250: 404-4061.

Simpson, J.H., Allen, C.M. and Morris, N.C.G., 1978. Fronts on the continental shelf, J. Geophysical Research, 83(C9): 4607-4614.

Simpson, J.H., and Bowers, D., 1979. Shelf sea fronts' adjustment revealed by satellite IR imagery, Nature, 280: 648-651.