

수치모델을 이용한 제주도 무릉리 주변해역의 조류 및 온배수확산특성

이병걸 · 양성기 · 방익찬*

제주대 해양토목공학과 *제주대 해양학과

Tidal Current and Thermal Diffusion Characteristics on the Coastal Zone of Murung-Ri, Cheju Island Using Numerical Models

Byung-Gul Lee · Sung-Kee Yang and Ig-Chan Pang*

Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

**Department of Oceanography, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea*

The numerical models based on the shallow water wave equation and the diffusion equation were applied to the coastal zone of Murung-ri, Cheju Island to find out tidal current and thermal diffusion phenomena. Computed maximum tidal current velocity during ebb and flood tide was almost 100 cm/sec and main directions of tidal current were South-East in flood and North-West in ebb tide, that was similar to the observation one. The thermal diffusion length of horizontal and vertical directions from coastal zone were 3 km and 1 km, respectively during 1 tidal cycle based on numerical diffusion model. The diffusion pattern during tidal cycle was strongly related to tidal current velocity patterns.

Key words : numerical model, shallow water wave equation, diffusion equation, tidal current, thermal diffusion, ebb and flood tides.

서 론

제주도 남쪽에 위치하고 있는 무릉리 앞바다 (Fig. 1)는 제주도의 서남해역으로서 북쪽의 다른 해역에 비하여 비교적 수온이 높은편으로, 무릉리와 가까운 위치에 있는 서귀포 해역의 수온변동을 살펴보면 8월은 거의 29.0℃까지 이르며, 9월에는 약 22.0~24℃, 11월 중에는 18.4~20.7℃인 것으로 나타났다(수진원, 1978~93). 그리고 염분은 4계절에 걸쳐 대체적으로 33.9~34.1‰로 나타났다(수진원, 1978~93). 또한 이 해역은 외해와 직접적으로 연결되어 조류 뿐만 아니라 바람에 의해 야기되는 해류의 영향을 많이 받을 수 있는 입지적 조건을 가지고 있다. 한국전력주식회사(1995)에서 약 1달간 실시한 조석, 조류, 저질입경분석결과를

살펴보면, 조석의 4개 분조중에서 주태음반일주가 가장 탁월하며, 조석형태수(Tide Factor)는 0.39로서 반일주조가 일주조보다 강한 특성을 보여 주고 있다. 조류는 15일간 유속계를 계류시켜본 결과 대개 조석의 최강류는 약 86cm/sec로 나타났다. 조류의 방향은 해안선을 따라서 북서와 동남방향이 탁월하게 나타났다. 조석 반일주조의 유속은 약 75.9 cm/sec로서 다른 성분에 비하여 탁월하게 컸다. 그리고 항류는 약 3.5cm/sec내외로 관측기간동안 항류는 매우 약하게 나타났다. 부유사는 2.8~8.4ml/l로서 비교적 낮은 농도분포를 보여주고 있다. 한국전력(1995)에서 조사된 수온분포는 11월 중에 약 18℃내외로 나타났으며, 염분은 34‰내외로 약간 높은편으로 서귀포해역과 비슷하였다. 그러나 이러한 지금까지의 연구는 관측지점이 한·두지점

으로 한정되어 있어서, 무릉리 앞바다의 전반적인 유동구조를 파악하기에는 미흡한 점이 있으며, 나아가 해수유동에 의하여 주로 결정되는 부유사이동경로나 온배수확산과정을 추적하기에는 어려운 점이 있다.

본 연구에서는 지금까지 밝혀진 해양관측결과를 토대로 수치모델을 이용하여 무릉리 앞바다의 조류(M₂ 조)에 의한 전반적인 유동특성을 파악하고, 이 조류모델결과를 온배수확산모델에 적용하여 제주도 무릉리 연안역의 온배수확산특성을 파악하고자 한다.

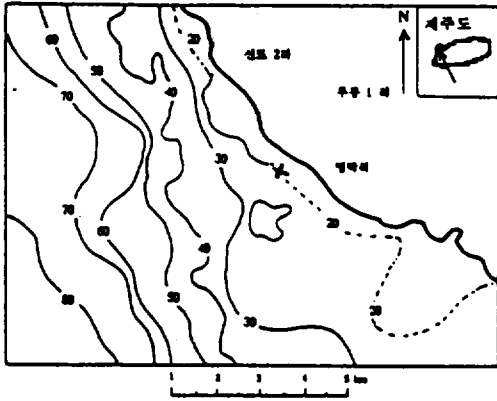


Fig. 1. Location of Tidal Current Observation Station at Murung-ri in Cheju Island.

수치모델

조류수치모델 결과

본 연구에 이용된 모델의 운동방정식과 경계조건은 다음과 같다(Heaps, 1978; Robinson, 1983).

운동방정식

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial uU}{\partial x} + \frac{\partial uV}{\partial y} - fV = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \gamma u (u^2 + v^2) \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial uU}{\partial x} + \frac{\partial uV}{\partial y} + fU = -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \gamma v (u^2 + v^2) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서 U, V 는

$$U = \int_{-h}^{\zeta} u dz, \quad V = \int_{-h}^{\zeta} v dz$$

t : 시간

x, y : 직교 좌표계에서 수평 및 연직방향의 좌표

u, v : 연직적으로 평균된 x 및 y 방향의 유속

h : 평균해면부터의 수심

ζ : 평균해면으로부터 연직상방의 해면 변위

H : 수심 (= $h + \zeta$)

η : 모델 적용해역의 기준 위도 ($33^\circ N$),

f : 코리올리 인수 ($f = 2\Omega \sin \eta = 8.13 \times 10^{-5} s^{-1}$)

Ω : 지구 자전 각속도 ($\Omega = 7.27 \times 10^{-5} s^{-1}$)

g : 중력가속도 (980 cm s^{-2})

γ : 해저 마찰계수 (= 0.003),

A_h : 와확산계수 (= $106 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$).

경계조건

육상에서의 경계조건은 유속과 수온에 대하여 다음과 같이 Neumann식 경계조건으로 주어졌다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

방정식 (1), (2), (3), (4)에 근거를 두고 공간적으로 Arakawa-C격자를 이용하였고, 시간적으로는 leap frog 방법을 이용하였다. 모델의 안정조건은 CFL조건을 만족하도록 하였다. Fig. 2는 발전소를 건설하고자 하는 무릉리 주변의 수치모델영역과 수심특성을 나타내고 있다. 이 해역의 크기는 해안선을 따라 12km, 해안선에서 바다쪽으로 6km이며, 모델의 격자크기는 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 로 하였다. 모델계산의 시간간격은 3초로 하였다.

모델의 수심변동을 살펴보면 발전소 후보지역의 좌측편 즉 남동쪽은 약 50m 이상의 깊은 수심을 나타내는 반면 우측편 즉 북서쪽은 약 20m로 대체로 얕은 수심대를 이루고 있음을 알 수 있다. Fig. 2의 수심값과 식(1), (2), (3)의 천해파방정식을 이용하여 계산된 무릉리 주변의 해수유동특성을 Fig. 3, 4, 5, 6에 각각 나타내었다. Fig. 3은 조류의 저조위 1시간 ($L_w + 1^h$)과 2시간 경과 후 ($L_w + 2^h$)의 그림이다. 그림에서 보면 저조후 1시간 경과 후는 조류의 운동이 동남방향으로 흐르기 시작하며 육지에서 가까운 해역부터 흐름이 시작되는 형태를 보여주고 있다. 유속의 크기는 10cm/sec 내

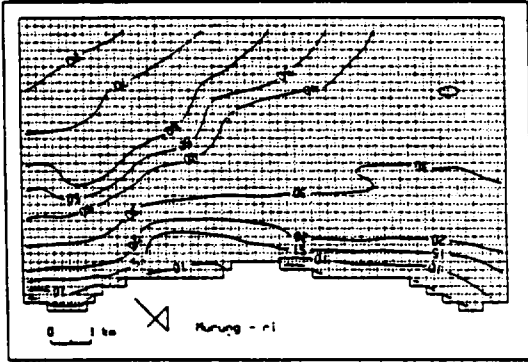


Fig. 2. Numerical Domain and Depth.

외이다. 저조후 2시간후는 유속이 점차 강해지며 완전히 동남방향으로 약 20cm/sec의 크기로 흐르고 있다. Fig. 4는 저조후 3시간과 4시간이 경과된 후의 조류로서, 유속이 거의 100cm/sec의 크기로 흐름을 알 수 있다. 특히 관측점이 있는 연안역은 약 80cm/sec로 관측치와 비슷한 크기를 보여주고

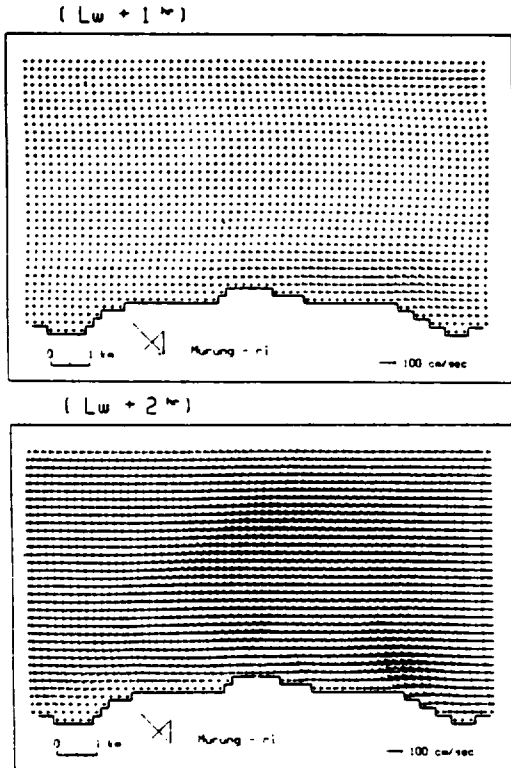


Fig. 3. Tidal Current Velocity Distributions at 1 and 2 Hours after Low Tide.

있다. 흐름의 형태는 동남방향을 그대로 유지하고 있다. Fig. 5는 저조후 7시간과 8시간이 경과된 후의 유속분포도이다. 동남방향과 북서방향의 흐름이 혼합되어 나타나며, 주목되는 것은 무릉리 좌측편부터 북서방향의 흐름이 발생되고 있다. 이 그림을 보면 조류의 방향만 반대이고 Fig. 3과 비슷한 양상을 보여주고 있다. Fig. 6은 저조후 9시간과 10시간이 경과한 후의 유속분포를 보여주고 있다. 이 그림도 Fig. 4와 거의 같은 양상을 보여주며, 유향은 반대이다. 유속의 크기도 100cm/sec 내외임을 알 수 있다.

이상의 해안선에 평행한 유속변동형태는 Fig. 7의 한전(1995)에서 조사한 유속 결과와 유사함을 알 수 있다. 이 그림에서 사각형 박스에 표시된 화살표는 관측된 유향과 유속의 크기를 나타내고 있다.

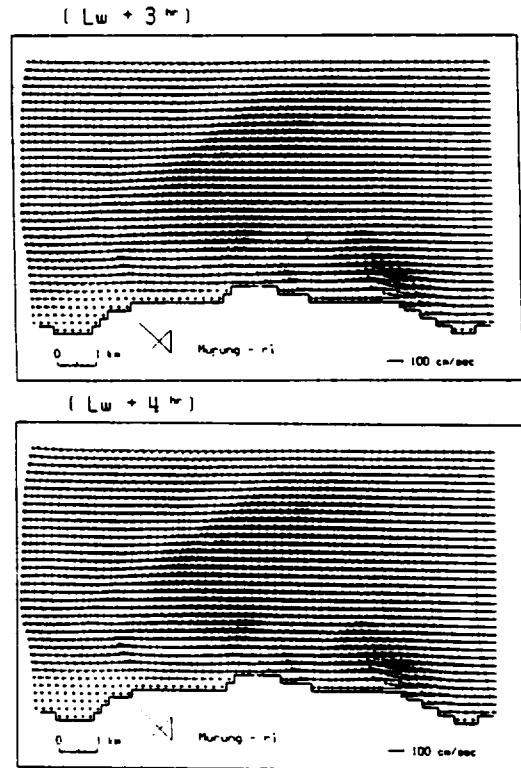


Fig. 4. Tidal Current Velocity Distributions at 3 and 4 Hours after Low Tide.

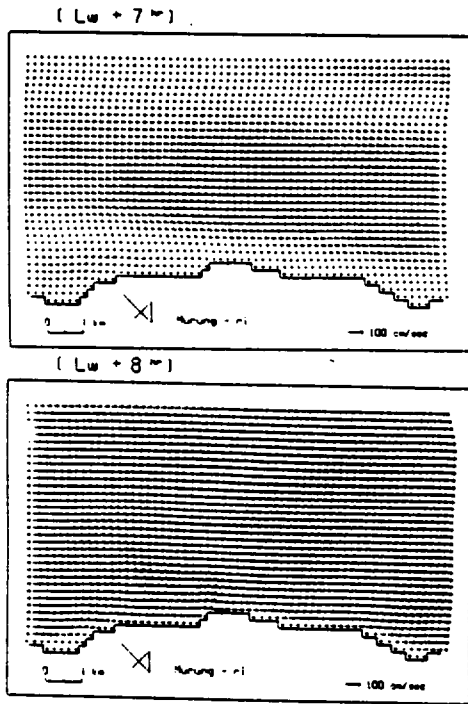


Fig. 5. Tidal Current Velocity Distributions at 7 and 8 Hours after Low Tide.

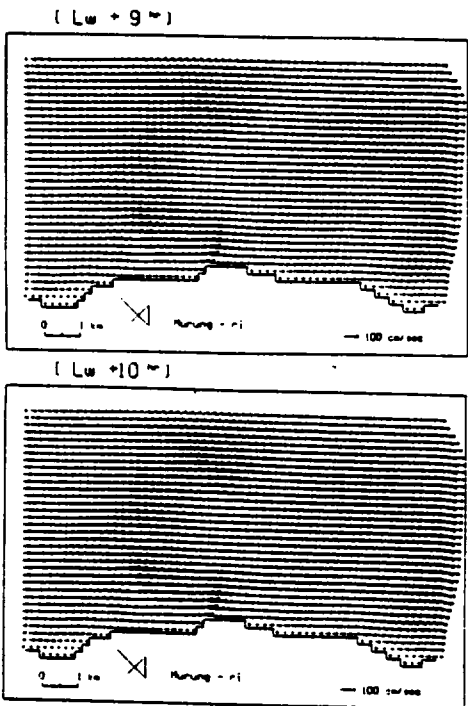


Fig. 6. Tidal Current Velocity Distributions at 9 and 10 Hours after Low Tide.

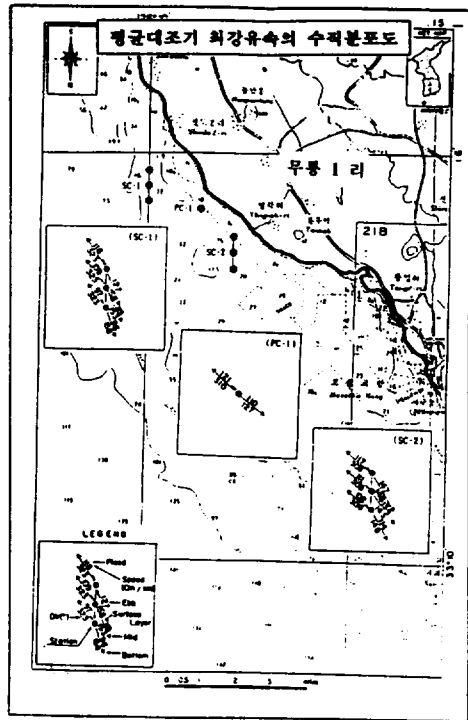


Fig. 7. Observed Tidal Current Velocity Distributions (from Korea Power Plant Company, 1995).

온배수확산수치모델 결과

무릉리 앞바다에 발전소를 건설할 경우 이 부근에는 발전소에서 유출되는 온배수의 영향을 받게 될 것이다. 본 연구에서는 이러한 해역에 발전소가 건설되면 조류에 따른 온배수 확산범위를 어느정도 파악하는 것은 매우 중요한 일일 것으로 사료된다. 이를 파악하기 위하여 조류모델에서 계산된 유속값을 다음의 2차원 확산방정식에 적용하여 온배수확산을 계산하였다(Hoffman, 1989).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = A_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\rho C_p} \quad (5)$$

여기서

T : 수온(°C)

A_T : 열확산계수(1m²/sec)

Q : 단위시간당 열수지

수치모델을 이용한 제주도 무릉리 주변해역의 조류 및 온배수확산특성

ρ : 물의 밀도
 C_p : 물의 비열

식(5)의 대기와 해양과의 온도차에 의해서 발생되는 해면의 수온 상승과 하강에 관련된 항으로써 본 연구에서는 대기와 해양의 수온이 같다고 보고 계산하였다. 왜냐하면 이러한 해양 대기의 온도차에 따른 연구를 실시하기 위해서는 장기간에 걸쳐 (약 1년간) 이 해역에서의 수온과 기온의 편차를 계산해야 하기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 우리나라 발전소의 냉각수의 수온과 해양의 수온차는 년평균 약 7°C인 것으로 밝혀져 있으므로 이 수온차를 토대로 온배수 확산 모델링을 실시하였다.

Table 1. 본 수치모델에 사용된 온배수 모델링 조건

구분	온배수량 (m ³ /hr)	취배수 온도차	비 고
4기	66,240	7°C	1기당 16,560 m ³ /hr (75 MW 급기준)

그 계산 결과를 Fig. 8~12에 나타내었다. 본 연구에서는 확산범위를 설정할 때 반일주조의 한조 석주기 동안에 퍼져나간 온배수량을 기준으로 계산하였다. 왜냐하면, 발전소가 설치되는 주변해역은 12시간 주기를 가지는 반일주조성분의 조류가 탁월하므로, 이 조류가 1주기동안에 퍼져나간 온배수 영향범위를 계산함으로써 어느정도 주변해역의 온배수 영향범위를 충분히 평가할 수 있기 때문이다.

Fig. 8은 온배수가 방출된 후 1시간과 2시간이 경과된 후의 주변 해역과 온배수와 온도차를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면, 발전소에서 나온 수온과 주변해역과의 수온차 0.5°C가 발전소 주변 반경 약 500 m 내외로 퍼져가고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 온배수가 방출된 후 3시간과 4시간이 경과된 후의 주변 해역과 온배수와 온도차를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면, 발전소에서 나온 수온과 주변해역과의 수온차 1°C가 발전소에서 좌측 약 2km내외로 퍼져가고 있음을 알 수 있다. 이는 좌측으로 흐르는 강한 조류의 흐름으로 인하여 나타난 것이다.

Fig. 10은 온배수가 방출된 후 7시간과 8시간이 경과된 후의 주변 해역과 온배수와 온도차를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면, 발전소에서 나온 수

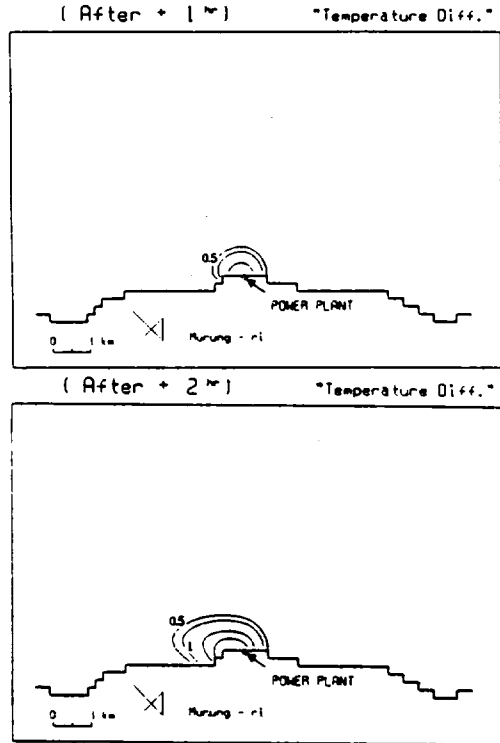


Fig. 8. Thermal Diffusion Pattern at 1 and 2 Hours after Low Tide.

온과 주변해역과의 수온차 1°C의 분포값이 점차적으로 다시 우측으로 이동되는 경향을 보여 주고 있다. 이는 조류가 좌우방향의 왕복성 성격이 강함으로 인해 우측으로 온배수가 점차 이동하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 11은 온배수가 방출된 후 9시간과 10시간이 경과된 후의 주변 해역과 온배수와 온도차를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면, 발전소에서 나온 수온과 주변해역과의 수온차 1°C가 발전소의 우측방향으로 약 3km정도 퍼져나가며 해안선의 직각방향으로 약 1.5km정도로 퍼져나감을 알 수 있다.

이상의 결과를 보면 1°C이하의 온배수확산은 해안선에 수평방향으로는 발전소를 중심으로 최대 약 3km이상으로 퍼져나가고, 직각방향으로는 1km내외로 퍼져나가고 있음을 알 수 있다.

그러나 이러한 계산결과는 온배수가 연직으로 혼합이 되지않고 표층 1m 정도의 두께로 온배수가 퍼져나갈때의 결과이다. 따라서 연직혼합정도를 어느정도 고려하느냐에 따라서 확산범위가 상당히 차이가 날 수 있을 것으로 사료된다. 그리고

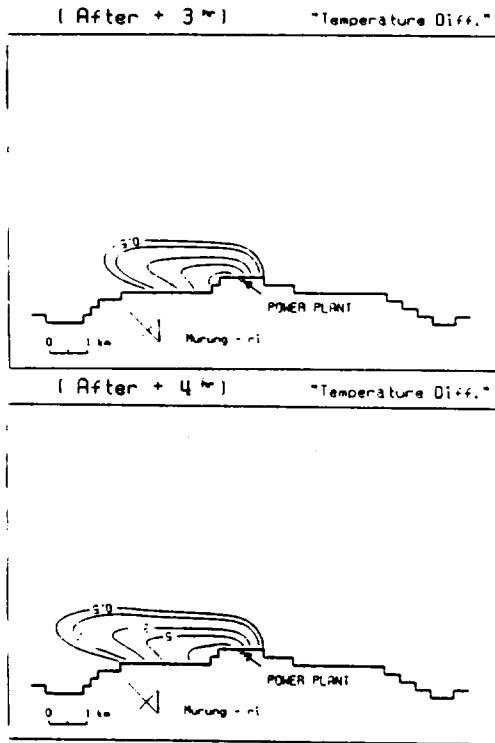


Fig. 9. Thermal Diffusion Pattern at 3 and 4 Hours after Low Tide.

이러한 확산범위(Fig. 8~11)는 시간에 따른 순간적인 확산범위를 계산하여 나타낸 것이다. 그런데 실제로 해양환경에 영향을 줄 수 있는 온배수의 영향범위는 지속적인 온도변화를 주는 해역이다.

본 연구에서는 1조석주기 동안 계속적으로 1°C 이상과 이하로 영향을 주는 해역을 알아보기 위하여 12시간동안 얻어진 온배수의 값으로 부터 1조석 주기 동안의 평균을 취하여 온배수의 확산범위를 계산하여 보았다.

그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 이 그림을 보면 1조석주기 동안 지속적으로 1°C 이상으로 영향을 주는 해역은 대체적으로 발전소를 중심으로 해안에 직각방향으로는 약 1km에 이르고 있고 수평방향으로는 반경 3km 정도로 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과를 보면 발전소 건설에 따른 온배수의 직접적인 영향권을 1°C로 볼 때 반경 약 1~3km 이내 해역은 해양환경변화에 어느정도 영향을 줄 것으로 사료된다.

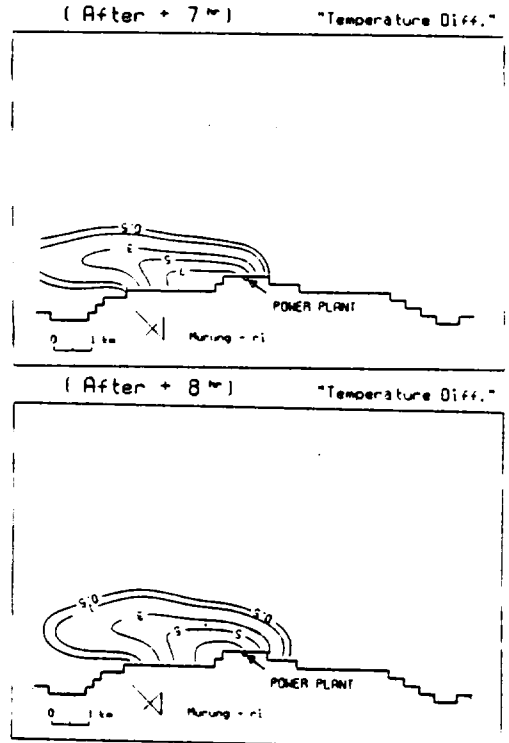


Fig. 10. Thermal Diffusion Pattern at 7 and 8 Hours after Low Tide.

결 론

본 연구에서는 온배수 확산 범위를 설정하는데 있어서 단지 조류에 의한 온배수의 확산범위를 평가하였다. 그 이유는 해류관측결과에 따르면 이해역이 다른 어떤 해류보다도 반일주조 성분이 탁월한 조류가 우세하였기 때문이다. 그리고 본 연구에서 제시된 수치모델의 결과는 한국전력에서 제시한 관측결과와도 잘 일치되어 유동모델은 무릉리 앞바다의 조류특성을 잘 나타낸 것으로 사료된다. 따라서 이 조류에 의한 온배수의 확산범위만을 계산하였다. 그 결과 대체적으로 발전소를 중심으로 수평방향(해안선에 평행한 방향)으로는 반경 약 3km내의, 연직방향(해안선에 직각방향)으로는 1km내외로 영향을 직·간접적으로 주고 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 수온의 직·간접적인 영향은 해양환경적인 조건에 의하여 어느정도 좌우될 수 있을 것으로 사료된다.

또한 본 연구에서는 이해역의 수온과 기온의 관

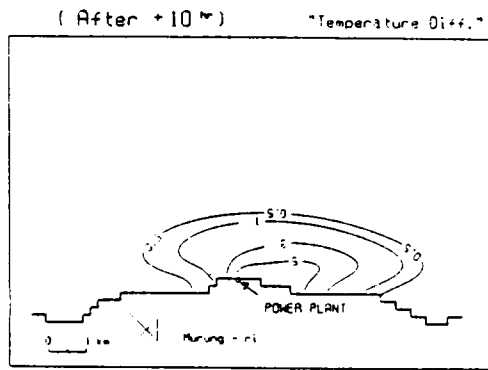
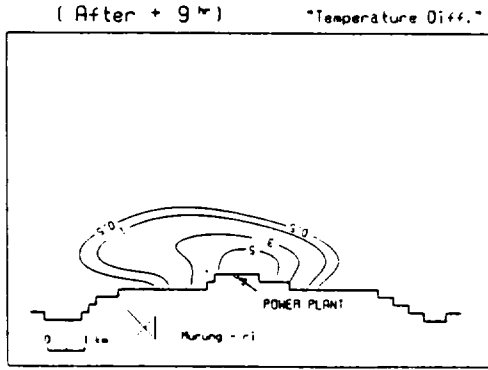


Fig. 11. Thermal Diffusion Pattern at 9 and 10 Hours after Low Tide.

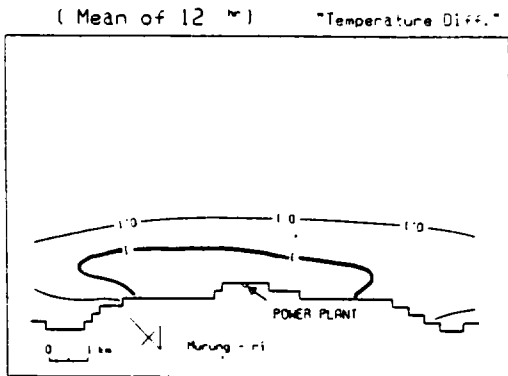


Fig. 12. 12 Hours Averaged Thermal Diffusion Pattern.

측자료의 부족으로 수온과 기온차에 의한 온배수 확산범위의 변동특성을 배제하고 있으며, 겨울철과 같이 강한 북서풍이 불때 바람장에 의한 해류 변동특성도 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서

밝혀진 온배수 확산범위는 이러한 영향에 의하여 다소 차이가 있을 것으로 사료된다. 그리고 계절에 따라 발전소 주변의 해황이 바뀔때 따라 온배수 확산범위가 다를 수 있다. 예를들면 겨울철에는 상하층의 수괴가 잘 혼합되어 온배수의 확산이 연속적으로 강하게 나타날 수 있고, 여름철에는 성층이 발달하여 겨울철에 비하여 수평적으로 온배수가 더욱 퍼져나갈 수 있다.

참고 문헌

수산진흥원, 1978~93. 해양조사연보.
 한국전력공사, 1995. 제주신규화력지점 해양환경 조사자료, 한국전력공사, p.171.
 Heaps, N.S., 1978, Linearized Vertically-Integrated Equations for Residual Circulation in Coastal Seas. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Jahrgang 31, Heft 5, 147~169.
 Hoffmann, K.A., 1989. Computational Fluid Dynamics for Engineers. Engineering Education System, Austain TX, p.567.
 Robinson, I.S., 1983, Tidally Induced Residual Flows. in Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas Edited by B. Johns, Elsevier Science Pub, 321~356.