

# 우리나라 서남해안의 천해조

강주환 (목포대학교 토목공학과 부교수)

## 1. 서론

외해에서의 조석파는 조위와 조류속이 동일 위상을 갖는 진행파의 형태가 되지만, 하구입구에 도달하게 되면 반사파의 영향으로 조위와 조류속이 90°의 위상차를 갖는 정상파가 형성된다. 또한 선형파이론에서 볼 수 있듯이 마찰이 없는 경우 조석파와 같은 천해파의 파속은  $c_0 \approx (gH)^{1/2}$  로서 상류로 갈수록 총 수심 H가 감소하므로 파속 역시 느려지게 된다. 또한 수심이 얇은 상류지점에서는 조위에 따라 수심이 크므로 그에 따라 파속의 차이도 커져서 고조의 파속이 저조의 파속보다 현저하게 빨라진다. 이러한 지점에서는 고조가 빨리 오고 저조가 늦어져 창조지속시간이 짧고 낙조지속시간이 길어지게 된다. 이 경우 창조시 최대조류속이 낙조시 최대조류속보다 빠른 창조우세가 되는 반면, 조간대가 발달된 하구에서는 고조시에만 드넓은 조간대 상을 조석파가 진행하게 되므로 고조시 파속이 오히려 저조시보다 느려지게 되므로 반대의 현상인 낙조우세가 발생하게 된다. 대부분의 국내외 감소하천에서 상류로 갈수록 바닥마찰에 의해 창조우세를 보이는 것이 일반적이어서 금강하구의 경우 창조지속시간이 3시간 정도에 불과하는 곳도 있으나, 조간대가 매우 발달된 목포해역에는 낙조지속시간이 4시간 여에 불과하는 곳도 있다.

이러한 조석왜곡현상은 하구에서의 유사이동에 매우 중요한 요소이며 본 고의 주제인 천해조와 밀접한 관계가 있는 것으로서, 천해조에 대한 전반적인 이해를 통해 연안해역 및 감소하천에서 시행되고 있는 각

종 토목공사 설계시 지금까지는 간과해 왔던 천해조의 중요성을 부각시키고 설계에 반영될 수 있는 근거와 지침을 제공하고자 한다. 또한 최근 사회적, 경제적으로 큰 관심대상이 되고 있는 갯벌에 대한 보존방안이나 활용방안 수립에 관한 기본적인 정보도 제공할 수 있을 것이다.

## 2. 천해조의 발생

조석파가 연안해역에 접근하게 되면 바닥마찰이나 수심의 감소에 따른 조위의 비선형 효과 및 육지와외 경계부분에서 발생하는 흐름의 곡률 등 여러 가지 요인에 의해 파의 진행에 변화가 야기되며(Pugh, 1987), 이에 따라 동일 천문조의 간섭에 의해 나타나는 overtide, 또는 2개 이상의 천문조간 상호 간섭에 의해 나타나는 compound tide와 같은 천해조가 발생하게 된다. 이러한 천해조는 주기가 보름인  $M_{sf}$  분조로부터 일주조( $MP_1, SO_1$ ), 반일주조( $MNS_2, 2MS_2$ ), 1/3일주조( $MO_3, MK_3$ ), 1/4일주조( $MN_4, M_4, MS_4, S_4$ ), 1/8일주조( $M_8$ ) 등이 발생할 수 있는데, 다음은  $M_2$  분조와  $S_2$  분조의 비선형성에 따른 천해조 발생예이다.

$$\begin{aligned}
 & k(H_{M_2} \cos \omega_{M_2} t + H_{S_2} \cos \omega_{S_2} t)^2 \\
 & = k[(H_{M_2}^2 + H_{S_2}^2)/2 + H_{M_2}^2/2 \cdot \cos 2\omega_{M_2} t \\
 & + H_{S_2}^2/2 \cdot \cos 2\omega_{S_2} t + H_{M_2} H_{S_2} \cos(\omega_{M_2} + \omega_{S_2}) t \\
 & + H_{M_2} H_{S_2} \cos(\omega_{S_2} - \omega_{M_2}) t]
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $k$ 는 비례상수이고  $H_{M_2}$ 와  $H_{S_2}$ 는 각각  $M_2$  분조와  $S_2$  분조의 진폭이며  $\omega_M$ 과  $\omega_S$ 는 지각이다. 이 식으로부터  $M_2$  분조와  $S_2$  분조의 비선형성에 의해 주변에서 보듯이 평균해수면이 상승될 수 있음을 알 수 있고(1항),  $M_4$  분조(2항)와  $S_4$  분조(3항) 및  $MS_4$  분조(4항), 그리고 장주기조인  $M_{sf}$  분조(5항)와 같은 천해조가 각각 생성됨을 알 수 있다. 이와 같은 천해조의 발생은  $M_2$  분조와  $S_2$  분조간에만 국한되는 것이 아니고 각 분조 자체간(overtide) 또는 서로 다른 모든 천문조간(compound tide)에 2승, 3승, 4승 및 그 이상의 멱승의 형태로 발생할 수 있다.

### 3. 조석비대칭 현상

#### 3.1 유사이동에 미치는 영향

천문조 중 반일주조가 우세한 해역에서 1/4일주조에 해당하는 천해조가 작용할 경우 창조시간과 낙조시간에 차이가 발생하는 조석곡선의 비대칭성이 유발될 수 있다. 낙조시간이 창조시간보다 긴 경우 최강창조류가 최강낙조류보다 크게 되어 창조우세(flood dominant) 현상이 나타나고 반대의 경우 낙조우세(ebb dominant) 현상이 나타나게 된다. 하상에서 토사의 움직임은 토사의 크기가 큰 경우 유속의 1.5승에서부터 가는 모래의 경우 유속의 6승에 비례한다고 알려져 있어(Ackers와 White, 1973) 조석곡선의 약간의 비대칭성이라도 창·낙조시 토사의 이동량에는 커다란 차이가 발생하게 된다. 따라서 창조우세를 보이는 만이나 하구에서는 비교적 큰 입자의 토사가 퇴적되는 경향이 있는 반면 낙조우세를 보이는 곳에서는 퇴적현상보다는 세굴현상이 더 우세하게 되어 안정된 해저상을 유지하게 된다(Friedrichs와 Aubrey, 1988). 또한 조석왜곡에 의한 비선형성은 부유사나 부유유기물질의 이동에도 복잡한 형태로 작용되어(Aubrey와 Speer, 1985) 퇴적물 이동 현상 뿐 아니라 오염물질의 이송 및 확산 거동에도 많은 영향을 미치게 된다. 이와 같이 천해조는 그 크기 자체가 비록 그리 크지 않더라도 조석의 비대칭성을 유발하여 퇴적물 이동이나 오염확산에 미치는 영향이 지대하므로

근래에 천해조에 대한 관심이 높아지고 있으며 이들에 대한 수치해석적 연구가 독립적으로 이루어지고 있는 추세이다(Uncles, 1991; Walters와 Werner, 1991).

#### 3.2 1차원적 기준연구

천해조는 그 모체가 되는 천문조와 상호간섭에 의해 조석곡선의 비대칭성이 유발되는데, 이는 천문조와 천해조의 진폭과 지각으로부터 개략적인 파악이 가능하다. 예를 들어  $M_2$  분조와  $M_4$  분조가 동시에 작용되면 두 분조의 합  $H$ 는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$H = H_{M_2} \cos(\omega_M t - \theta_{M_2}) + H_{M_4} \cos(2\omega_M t - \theta_{M_4}) \quad (2)$$

여기서  $\theta_{M_2}$ 와  $\theta_{M_4}$ 는 각각 양분조의 지각이다. 비대칭성을 파악하는 지표로 양분조의 진폭비  $\epsilon$  ( $=H_{M_4}/H_{M_2}$ )과 상대지각  $\psi$  ( $=2\theta_{M_2} - \theta_{M_4}$ )을 도입하면 식 (2)는 식 (3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} H/H_{M_2} &= \cos(\omega_M t - \theta_{M_2}) + \epsilon \cos(2\omega_M t - 2\theta_{M_2} + \psi) \\ &= \cos(\omega_M t - \theta_{M_2}) + \epsilon \cos \varphi \cos(2\omega_M t - 2\theta_{M_2}) \\ &\quad - \epsilon \sin \varphi \sin(2\omega_M t - 2\theta_{M_2}) \end{aligned} \quad (3)$$

이 식으로부터 진폭비  $\epsilon$ 이 0이면 조석의 왜곡이 발생하지 않음을 알 수 있으며, 윗식 우변의 처음 두 항은 대칭이며 마지막항이 비대칭을 유발한다는 점을 감안하면 진폭비  $\epsilon$ 이 0보다 클 경우에도 상대지각  $\psi$ 이  $0^\circ$ 이거나  $180^\circ$ 이면 조석의 비대칭은 발생하지 않는다. 다만 상대지각이  $0^\circ \sim 180^\circ$ 인 경우 비대칭항에 의해 만조시간은 빨라지고 저조시간은 늦어져 창조우세 현상이 야기되며 상대지각이  $180^\circ \sim 360^\circ$ 인 경우 반대인 낙조우세 현상이 야기된다. 두 경우 모두 진폭비  $\epsilon$ 이 커지면 이러한 조석왜곡현상이 더욱 심화된다.

Friedrichs와 Aubrey(1988)는 하구에서의 평균수심에 대한  $M_2$  분조 진폭의 비( $a/h$ )와 평균해수면에 해당되는 해수량에 대한 저조위와 만조위 사이에

존재하는 해수량의 비( $V_s/V_c$ ) 등 두 개의 무차원 매개변수를 도입해 조석 비대칭의 특성을 분석한 바 있다. 이에 따르면  $a/h$ 는 하구의 상대적 천수정도를 나타내는 지표로서 이 값이 클수록 바닥 마찰에 의한 비선형성이 크게 나타나게 되어 만조시보다 저조시에 바닥마찰이 훨씬 커진다.  $V_s/V_c$ 는 하구에 저류되는 수량에 관한 지표로서 조간대의 규모가 클수록 이 값이 커지는데 저조시에는 저수로를 통해 어느 정도 수심이 유지되지만 만조시에는 조간대의 수심이 그리 깊지 않아 저조시보다 오히려 만조시에 바닥마찰이 크게 작용되므로 이 값이 커질수록  $a/h$ 와는 반대로 낙조우세의 형태에 가깝게 된다. 즉, 진폭에 비해 수심이 작은 경우 저조시와 만조시 바닥마찰 저항에 의한 조석과의 전파속도의 차이가 상대적으로 더 크므로 하구의 입구부에서 상류쪽으로 저조가 전파되는 속도보다 만조가 전파되는 속도가 빠르기 때문에 수심이 작아지는 상류쪽에서는 만조시각이 빨라지는 창조우세현상이 발생하게 된다. 진폭에 비해 수심이 깊은 반면 조간대가 넓게 형성되어 있는 하구에서는 저조시보다 만조시에 마찰저항이 더 크게 되므로 만조의 현상이 발생된다. Friedrichs와 Aubrey (1988)는 또한 1차원 수치모형을 통해 두 개의 매개변수에 대한 비대칭 특성을 분석하고 관측치를 통해 이를 검증한 바 있는데 그 결과는 다음과 같다.  $a/h$ 가 0.3보다 크면 창조우세가 되고 0.2보다 작으면 대체적으로 낙조우세가 되며 그 사이의 값인 경우  $V_s/V_c$ 에 따라 이 값이 크면 낙조우세, 작으면 창조우세가 된다.

### 3.3 낙조지속시간

외해역에 비해 연안해역으로 접근할수록 천해조의 발달로 인해 조석비대칭현상이 두드러지게 되며, 이는  $M_2$  및  $S_2$ 와 같은 반일주조 성분과  $M_4$  및  $MS_4$ 와 같은 천해조의 상대적 위상에 따라 창조우세 또는 낙조우세의 현상으로 나타나게 된다. 대부분의 해역에서  $M_2$  분조와  $M_4$  분조 만의 해석을 통해 이의 분석이 가능하며(Boon과 Byrne, 1981 ; Speer와 Aubrey, 1985),  $M_2+S_2$  분조와  $MS_4$  분조와의 간

섭양상이  $M_2$  분조와  $M_4$  분조의 양상과 유사(Speer 등, 1991)하기 때문에 여기서는  $M_2$ 와  $M_4$  분조간의 조석비대칭 현상만에 대하여 분석하였으며, 낙조지속시간은 다음과 같이 산정할 수 있다.

동쪽과 북쪽 방향 조류속을 각각  $U$ 와  $V$ 라 하면 총 유속  $Q = U + iV$ 로 표현할 수 있고,  $\omega$ 의 각속도를 갖는 임의의 분조에 대한 조류타원도는 식(4)와 같이 된다.

$$Q(t) = A[\cos \Psi(t) + ei \sin \Psi(t)] \exp i\theta \quad (4)$$

여기서  $A$ 는 장축의 반경,  $e$ 는 편심률,  $\theta$ 는 장축 방향이 동쪽과 이루는 각이며,  $\Psi(t) = \omega t - \phi$ ,  $\phi$ 는 지각이다. 잔차류인  $Z_0$ 분조와  $M_2$ 분조 및  $M_4$ 분조를 고려하면 식(4)는 식(5)와 같이 된다(Aldridge, 1997).

$$Q(t) = A_2[\cos \Psi_2 + e_2 i \sin \Psi_2 + \delta \exp i \Delta \theta_0 + \epsilon(\cos \Psi_4 + e_4 i \sin \Psi_4) \exp i \Delta \theta_4] \exp i \theta_2 \quad (5)$$

여기서 하첨자 0, 2, 4는 각각 상기 3개 분조를 의미하며  $\delta = A_0/A_2$ ,  $\epsilon = A_4/A_2$ ,  $\Delta \theta_0 = \theta_0 - \theta_2$ ,  $\Delta \theta_4 = \theta_4 - \theta_2$ 이다. 만일  $M_2$ 분조만 고려한다면 최강 창조와 최강낙조는  $\Psi_2 = 0$ 과  $\Psi_2 = \pi$ 에서 발생될 것이며, 3개 분조가 모두 고려된다면 최강류가 발생하는 시점은  $\phi'$ 만큼 변화되어  $\Psi_2 = \phi'$ 과  $\Psi_2 = \pi - \phi'$ 에서 발생될 것이다. 편의상  $\theta_2 = 0$ 을 취한 상태에서 식(5)를  $U$ 와  $V$ 로 표현하면 각각 식(6.a) 및 (6.b)와 같이 된다.

$$U = A_2[\cos \Psi_2 + \delta \cos \Delta \theta_0 + \epsilon \cos \Delta \theta_4 \cos(2\Psi_2 + \Psi')] - \epsilon e_4 \sin \Delta \theta_4 \sin(2\Psi_2 + \Psi') \quad (6.a)$$

$$V = A_2[e_2 \sin \Psi_2 + \delta \sin \Delta \theta_0 + \epsilon \sin \Delta \theta_4 \cos(2\Psi_2 + \Psi') + \epsilon e_4 \cos \Delta \theta_4 \sin(2\Psi_2 + \Psi')] \quad (6.b)$$

여기서  $\Psi' = 2\phi_2 - \phi_4$ 로서 상대지각이며, 우변의 둘째항 이하를 각각  $R_u$ ,  $R_v$ 라 하면  $Q^2 (= U^2 + V^2)$ 은 식(7)과 같이 된다.

$$Q^2 = \cos^2 \Psi_2 + 2R_u \cos \Psi_2 + e_2^2 \sin^2 \Psi_2 + 2R_v e_2 \cos \Psi_2 + O(\delta^2, \epsilon^2, \delta\epsilon) \quad (7)$$

$\Psi_2 = \phi'$  일 때  $dQ^2/dt = 0$  의 식에서  $\sin \phi' \simeq \phi'$ ,  $\cos \phi' \simeq 1 - \phi'^2/2$  으로 근사시킨 후  $\phi'$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  의 고차항을 무시하면 다음 식(8)과 같이  $\phi'$  을 구할 수 있다.

$$\phi' = \epsilon[(e_2 - 2e_4)\cos \Psi' \sin \Delta\theta_4 - (2 - e_2e_4)\sin \Psi' \cos \Delta\theta_4]/(1 - e_2^2) \quad (8)$$

즉, 최강창조시각( $t_f$ )과 최강낙조시각( $t_e$ )은 식(9.a) 및 (9.b)와 같게 된다.

$$t_f = (\phi_2 + \phi')/\omega_2 \quad (9.a)$$

$$t_e = (\phi_2 + \pi - \phi')/\omega_2 \quad (9.b)$$

또한 식(9.a)와 (9.b)를 식 (5)에 대입하면 최강창조류  $Q(t_f)$ 와 최강낙조류  $Q(t_e)$ 는 다음 식(10)과 같이 된다.

$$|Q(t_f)|^2 = A_2^2[(1+p)^2 + q^2] + O(\delta^2, \epsilon^2, \delta\epsilon) \quad (10.a)$$

$$|Q(t_e)|^2 = A_2^2[(1-p)^2 + q^2] + O(\delta^2, \epsilon^2, \delta\epsilon) \quad (10.b)$$

여기서  $p = \delta \cos \Delta\theta_0 + \epsilon(\cos \Delta\theta_4 \cos \Psi' - e_4 \sin \Delta\theta_4 \sin \Psi')$ ,  $q = \delta \sin \Delta\theta_0 + \epsilon(e_2 \phi' + \sin \Delta\theta_4 \cos \Psi' + e_4 \cos \Delta\theta_4 \sin \Psi')$ 이다.

즉,  $p$ 가 양수이면 창조우세, 음수이면 낙조우세가 되며, 잔차류를 무시한 1차원 흐름의 경우  $\cos \Psi'$ 의 부호에 따라 창조우세 또는 낙조우세가 결정된다.

한편 식(5)~(9)의 과정을 조위에도 그대로 적용할 수 있는데, 이 경우 전절에서 제시한 바 있는 1차원 흐름의 경우와 일치하게 된다. 즉, 조류타원의 편심률이 0이고 각 분조의  $\theta=0$  이므로 식(9)의 좌변은 각각 만조시각( $t_h$ )과 저조시각( $t_l$ )이 되므로 낙조지속시간( $t_l - t_h$ )은 다음 식(11)과 같이 된다.

$$t_l - t_h = (\pi - 2\phi')/\omega_2 = (\pi + 4\epsilon \sin \Psi')/\omega_2 \quad (11)$$

이와 같이 창조우세 또는 낙조우세는 조위의 경우  $\sin \Psi'$ , 조류속의 경우  $\cos \Psi'$ 의 부호에 의해서 결정되며, 조류속과 조위가 90°의 위상차가 있음을 감안하면 이는 동일한 결과인 것이다.

## 4. 우리나라 서남해안에서의 천해조

### 4.1 서남해안의 창조/낙조우세

식(11)을 이용해 우리나라 각 해역의 창조/낙조우세 현황을 분석하기 위하여 수로기술연보와 한국해양연구소의 연구보고서 및 일반회사의 조석관측결과 등에 제시되어 있는 분조해석 결과물을 총망라한 한국해양연구소(1996) 자료를 이용하였다. 이에 따른 결과를 그림 1.에 제시하였는데, 동해안과 남해안의 적은 조차를 감안하면 금강하구를 중심으로 한 근산해역의 창조우세와 영산강하구를 중심으로 한 목포해역의 낙조우세가 특히 두드러짐을 알 수 있다.

상류로 갈수록 마찰로 인한 에너지 감쇠와 비선형 효과에 의한  $M_4$  분조로의 에너지 전이에 의해  $M_2$  분조의 진폭은 줄어들게 되는 반면  $M_4$  분조의 진폭은 커지게 된다(Aubrey와 Speer, 1985). 또한 Friedrichs와 Aubrey(1988)에 따르면 하구의 상류 방향으로 상대지각의 변화는 미소하여 창조우세 또는 낙조우세가 상류방향으로 지속되는 경향이 있다

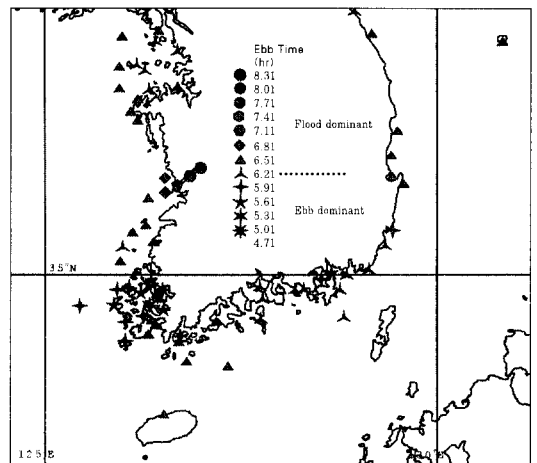


그림 1. 우리나라 연안에서의 낙조시간(강주환, 2000a)

고 하였다. 한편 상대지각이 일정한 상태에서 진폭비가 커지면 조석왜곡이 심화되는데(강주환 등, 1998), 우리나라 금강하구와 영산강하구 및 목포해역에 위치한 4단계 방조제 해역에서의 관측결과인 표 1.을 보면 이러한 사실을 확인할 수 있다. 즉, 상류로 갈수록  $M_2$  분조의 퇴조와  $M_4$  분조의 성장에 따라 진폭비가 증가하는데 비해 상대지각은 비교적 일정하게 유지되어 조석왜곡이 심화되고 있어 창조우세인 금강하구에서는 창조시간이 더욱 짧아지고 있으며 낙조우세인 영산강하구를 포함한 목포해역에서는 낙조시간이 더욱 짧아지고 있다.

#### 4.2 천해조의 근원

Brown(1973)에 따르면 삼면이 폐쇄된 만으로 유입되는 파의 주기가 Poincaré wave의 한계주기보다 작을 경우 Poincaré wave는 진행파가 되며 그 반사파가 Kelvin wave의 반사파보다 우세하게 된다. 또 이와 함께 반사된 Poincaré wave가 Kelvin wave의 입사파와 동일한 측경계면으로 집중되어 비대칭성이 야기되며, 입사파의 주기가 작으면 작을수록 이 현상이 심화됨을 밝힌 바 있다.

황해의 평균수심  $H=50m$ , 폭  $B=600km$ 이며 북위  $36^\circ$  (Coriolis 계수  $f=8.56 \times 10^{-5} rad/sec$ )인 경우에 Poincaré wave의 한계주기는 다음 식(12)에 의해  $n=1, 2, 3$ 일 때 각각 12.1hr, 7.1hr, 4.9hr가 된다(Kang, 1984).

$$T_c = \frac{2\pi}{(f^2 + gHn^2\pi^2/B^2)^{1/2}} \quad (12)$$

$M_4$ 분조의 주기가 6.2hr이므로  $M_4$ 분조는  $n=1$ 과  $n=2$ 인 Poincaré wave의 한계주기보다 짧게 되므로 황해에서  $M_4$ 분조의 비대칭성이 야기되어 Kelvin wave의 입사파와 Poincaré wave의 반사파가 황해의 동쪽 해안인 우리 나라 서해안으로 집중된다. 따라서 우리 나라 서해안에서  $M_4$ 분조의 발달이 두드러지며, Poincaré wave의 반사파가 지배적이므로 남쪽에서 북쪽으로 전파되는  $M_2$ 분조와는 달리, Kang 등(1998)도 지적하였듯이,  $M_4$ 분조는 북쪽에서 남쪽으로 전파되는 경향을 갖게 된다. 물론  $M_2$ 분조와 달리  $M_4$ 분조는 바닥마찰이나 수심의 감소에 따른 비선형 효과 및 흐름의 곡률 등과 같은 요인에 의한 지역적인 발생특성이 외부로부터 전파되어 온 천해조에 비해 비교적 더 큰 비중을 갖는 것이 일반적이다. 따라서 우리 나라 서해안에서 관측을 통해 산정된  $M_2$ 분조와  $M_4$ 분조의 지각을 분석한 결과 그림 2.에 도시한 바와 같이  $M_2$ 분조의 북쪽에서의 전파는 뚜렷한 반면  $M_4$ 분조의 남쪽에서의 전파는  $M_2$ 분조만큼 뚜렷하게 나타나고 있지는 않고 있다. 이러한 두 분조의 상반된 전파방향에 따라 상대지각  $\Psi' (=2\phi_2 - \phi_4)$ 도 북쪽을 향하는 경향을 갖게 되며 그림 2에서와 같이 3개 군 A, B와 C로 구분된다. 여기서 A는 목포해역 부근, B는 군산해역 부근이며 C는 인천해역 부근으로서 각 군의 상대지각은 대략  $250^\circ, 90^\circ$  및  $160^\circ$

표 1. 진폭비( $\epsilon$ )와 상대지각( $\Psi'$ )으로부터 계산된 낙조시간

지 점	진폭(cm)		위상( $^\circ$ )		$\epsilon$	$\Psi'$	낙조시간(hr)	우세	
	$M_2$	$M_4$	$M_2$	$M_4$					
금강하구 (22km)*	하구연	192.3	19.0	95.5	121.5	0.10	69.5	6.94	창조
	입포	113.5	29.1	178.2	289.0	0.26	67.4	8.08	
영산강하구 (24km)*	목포항	134.6	23.3	57.5	250.2	0.17	224.8	5.25	낙조
	명산	116.5	27.1	90.8	316.0	0.23	225.6	4.90	
목포해역 (7km)*	A**	156.4	28.3	58.2	225.0	0.18	251.4	4.85	낙조
	B**	150.6	28.9	65.0	236.9	0.19	253.1	4.76	

\* 두 지점간의 거리

\*\* Kang(1999) 참조