

방조제 건설에 따른 낙조우세적 조류특성의 변화

강주환*

1. 서론

조석파가 연안해역에 접근하게 되면 바닥마찰이나 수심의 감소에 따른 조위의 비선형 효과 및 육지와의 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_{st} 분조로부터 일주조(MP_1, SO_1), 반일주조($MNS_2, 2MS_2$), $\frac{1}{8}$ 일주조(MO_3, MK_3), $\frac{1}{4}$ 일주조(MN_4, M_4, MS_4, S_4), $\frac{1}{8}$ 일주조(M_8), ... 등이 발생할 수 있는데, 천문조 중 반일주조가 우세한 해역에서 $\frac{1}{4}$ 일주조에 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 유사의 움직임은 유사의 크기가 큰 경우 유속의 1.5승에서부터 가는 모래의 경우 유속의 6승에 비례한다고 알려져 있어(Ackers and White,1973) 조석곡선의 약간의 비대칭성이라도 창조·낙조시 유사의 이동량에는 커다란 차이가 있을 수 있다. 또한 조석왜곡에 의한 비선형성은 부유사나 부유유기물질의 이동에도 복잡한 형태로 작용되어(Aubrey and Speer,1985) 유사 뿐 아니라 오염물질의 이송 및 확산 거동에도 많은 영향을 미치게 된다. 이와 같이 천해조는 그 크기 자체가 비록 그리 크지 않더라도 조석의 비대칭성을 유발하여 유사이동이나 오염확산에 미치는 영향이 지대하므로 근래에 천해조에 대한 관심이 높아지고 있으며 이들에 대한 수치해석적 연구가 독립적으로 이루어지고 있는 추세이다(Uncles,1991;Walters et al.,1991).

대부분의 국내의 감조하천은 바닥마찰의 영향 등으로 인해 상류로 갈수록 창조우세인 경향을 보이는데 반해 국내에서 유일하게 목포해역은 창조시간이 낙조시간보다 길어 낙조우세를 보이고 있으며 창조 중간에 해면상승률이 급증하는 현상을 나타낸다(이석우,1994b). 목포해역은 수심이 복잡하고 수많은 섬들로 둘러싸여 있으며 조간대가 광범위하게 펼쳐져 있어 천문조 뿐 아니라 천해조의 발달도 두드러진 해역이다. 목포항에서의 조석예보 적중률은 부산항이나 인천항에 비해 다소 떨어진다고 알려져 있는데(이석우,1994a) 이와 무관치 않을 것이다. 더욱이 최근 이 해역에서는 대규모 간척사업이 시행된 바 있는데, 1981년 2월 영산강하구언이 건설되었고 1991년 4월과 1994년 3월에 영암방조제와 금호방조제가 각각 체결된 바 있어 각각 35km^2 , 130km^2 , 60km^2 의 감조수역의 감소가 초래된 바 있다(강주환,1996). 본 연구에서는 목포해역에서 관측되는 조석왜곡의 원인과 범위를 파악한 후 하구언과 방조제 건설에 따른 이 현상의 변화에 대한 연구를 통해 차후 유사이동이나 오염확산에 관한 토대를 마련코자 한다.

2. 조석 비대칭 현상

심해로부터 연안해역으로 전파되는 조석파는 M_2 분조와 S_2 분조 등과 같은 천문조에 있어서 수심과 지형의 영향을 받아 진폭의 변화가 발생하는 동시에 바닥마찰이나 여타 물리적 현상에 의해 조위의 자승 또는 그 이상의 역승으로 표현되는 비선형효과에 따른 천해조가 발생하게 된다. M_2 분조와 S_2 분조의 비선형성을 예로 들면

* 목포대학교 토목공학과

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

여기서 k 는 비례상수이고 H_{M_2} 와 H_{S_2} 는 각각 M_2 분조와 S_2 분조의 진폭이며 ω_M 과 ω_S 는 지각이다. 이 식으로부터 M_2 분조와 S_2 분조의 비선형성에 의해 우변에서 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... 등의 형태로 발생할 수 있다.

또한 이러한 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.a)와 같이 표현된다.

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

여기서 θ_{M_2} 와 θ_{M_4} 는 각각 양분조의 지각이다. 비대칭성을 파악하는 지표로 양분조의 진폭비 $A(=H_{M_4}/H_{M_2})$ 와 상대지각 $\varphi(=2\theta_{M_2} - \theta_{M_4})$ 를 도입하면 식(2.a)는 식(2.b)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}
H/H_{M_2} &= \cos(\omega_{M_2} t - \theta_{M_2}) + A \cos(2\omega_{M_2} t - 2\theta_{M_2} + \varphi) \\
&= \cos(\omega_{M_2} t - \theta_{M_2}) + A \cos \varphi \cos(2\omega_{M_2} t - 2\theta_{M_2}) \\
&\quad - A \sin \varphi \sin(2\omega_{M_2} t - 2\theta_{M_2}) \quad (2.b)
\end{aligned}$$

이 식으로부터 진폭비 A 가 0이면 조석의 왜곡이 발생하지 않음을 알 수 있으며, 뒷식 우변의 처음 두 항은 대칭이며 마지막항이 비대칭을 유발한다는 점을 감안하면 진폭비 A 가 0보다 클 경우에도 상대지각 φ 가 0° 이거나 180° 이면 조석의 비대칭은 발생하지 않는다. 다만 상대지각이 $0^\circ \sim 180^\circ$ 인 경우 비대칭항에 의해 만조시각은 빨라지고 저조시각은 늦어져 창조우세 현상이 야기되며 상대지각이 $180^\circ \sim 360^\circ$ 인 경우 반대인 낙조우세 현상이 야기된다. 두 경우 모두 진폭비 A 가 커지면 이러한 조석 왜곡현상이 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 淺水 정도를 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 조석파의 전파속도의 차이가 상대적으로 더 크므로 하구의 입구 부에서 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 반대의 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. 목포해역의 낙조우세

목포 인근해역은 수많은 섬들로 둘러싸여 있어서 여타 해역에 비해 천해조의 발달이 두드러지는데,

목포항 검조소의 1981년 3월부터 1년간 관측된 조위자료의 조화분석에 의해 추출된 분조 자료(이석우, 1992) 중 주요 4개분조와 진폭이 5cm 이상인 천해조만을 표 1(생략)에 수록하였다. 목포항 조석의 형태수(form factor)는 0.35로서(0.25<0.35<1.50) 반일주조가 우세한 혼합조이므로(이석우, 1994b) M₂분조가 가장 우세하며 이에 따라 표 1(생략)에서도 나타나듯이 천해조 중 M₄분조가 가장 크게 작용되고 있다. 그러나 M₄분조 외에 여타 천해조에 의해서도 조석 비대칭 현상이 유발될 수 있다는 점과 표 1(생략)의 MS₄분조의 진폭도 무시할 수 없을 정도로 크기 때문에 M₂+S₂분조와 MS₄분조의 상호 간섭에 의한 조석 비대칭도 적지 않은 양이 될 것으로 추정된다. 그러나 본 연구에서는 M₂분조와 M₄분조의 상호간섭만을 검토하였는데, 기존 연구(Boon and Byrne, 1981; Speer and Aubrey, 1985)에 따르면 대부분의 해역에서 조석 비대칭성이 M₂분조와 M₄분조의 상호간섭만의 해석으로 설명이 가능하다는 점과 전세계 여러 해역에서 실제 현장관측을 통해 얻은 M₂+S₂분조와 MS₄분조의 상대지각이 M₂분조와 M₄분조의 상대지각과 그리 큰 차이를 보이지 않고 있다는 점(Speer et al., 1991)에 의해 이의 타당성이 부여될 수 있을 것이다.

표 1(생략)에서 상대지각 $\phi (=2\theta_{M_2} - \theta_{M_4})$ 는 $2 \times 45.7^\circ - 232.0^\circ = 219.4^\circ$ 로서 180° 보다 크므로 낙조우세에 해당되며 이는 목포항의 실제현상과도 부합된다. 이러한 낙조우세는 국내에서도 이 부근 해역에만 국한되는 것으로 낙조우세 해역의 범위를 파악하기 위하여 수로기술연보와 한국해양연구소의 연구보고서 및 일반회사의 조석관측결과 등에 제시되어 있는 분조해석 결과물을 총망라한 한국해양연구소(1996) 자료를 이용하였다. 제시되어 있는 자료 중 M₄분조도 조사되어 있는 자료에 한해 우리나라 서남해역에 해당되는 자료만을 선택하여 M₂분조와 M₄분조의 진폭비 A와 상대지각 ϕ 를 표 2(생략)에 제시하였다. 또한 주어진 M₂분조와 M₄분조의 진폭과 지각으로부터 두 분조를 합성한 후 수치해석을 통해 구한 낙조시간을 표 2(생략)에 함께 제시하였다. 이를 보면 상대지각이 180° 가 넘는 것은 예외없이 낙조시간이 6.21시간보다 작은 낙조우세임을 확인할 수 있으며 목포항을 비롯해 양화리와 월내리의 낙조우세가 최근 들어 더욱 심해진 결과를 나타내고 있다.

표 2(생략)의 결과를 그림 1(생략)에 도시하였는데 이를 보면 낙조우세를 보이는 해역이 목포 인근 해역에 국한되어 있음을 알 수 있다. 즉, 임자도 이남과 울돌목 서쪽 및 진도 남단의 서쪽 영역에서만 낙조우세를 보이고 있다. 이와 같이 목포항 인근 해역에서만 낙조우세를 보이는 원인은 이 해역에 조간대가 광범위하게 분포되어 있기 때문이며 이 해역의 조간대를 그림 2(생략)에 도시하였다. 그림 2(생략)에서 두 개의 실선 사이가 조간대로서 영암방조제 내측 수역과 금호방조제 내측 수역 및 목포항 서북단 해역의 조간대 발달이 두드러져 이로 인해 이 해역이 낙조우세를 보이게 되는 것이다. 표 2(생략)에서 하구언이나 방조제 건설이전인 1963년 당시의 목포항의 낙조시간에 비해 영암방조제 상류지점인 연구리와 금호방조제 상류지점인 우항리 및 하구언 상류지점인 명산에서의 낙조시간이 더 짧게 나타난 점이 이 사실을 뒷받침하고 있다.

4. 조류특성 변화가 주변 환경에 미치는 영향

따라서 하구언과 방조제 건설이후에는 이들 구조물에 의해 광활한 조간대가 격리되어 목포항에서의 낙조시간이 길어질 것이라고 예측할 수 있다. 그러나 창조시간과 낙조시간의 연별 변화를 도시한 그림 3(생략)에서 볼 수 있는 바와 같이 목포항에서의 낙조우세는 하구언과 방조제 건설에 의해 더욱 심화되고 있다. 이 자료는 수로국에서 관측한 목포항의 실측 조위자료로부터 매 조석주기마다 창조시간과 낙조시간을 계산하여 이를 1년동안 평균하여 얻은 값으로서 M₂분조와 M₄분조의 간섭뿐 아니라 목포항에 작용되고 있는 모든 천해조에 의한 비선형성이 다 포함되어 있어 M₂분조와 M₄분조 분석만에 의한 비대칭성보다는 완화된 조석왜곡을 보이고 있다. 이를 보면 하구언 건설이전('58~'80)의 평균낙조시간이 5.55시간인데 비해 하구언 건설이후('81~'90) 5.46시간으로 감소하였으며 영암방조제 건설이후('91~'93) 5.40시간으로, 금호방조제 건설이후('94~'96)에는 5.33시간으로 각각 감소하였다. 즉, 표 3(생략)에서 보듯이 하구언 건설이전에는 창조시간에 비해 낙조시간이 1시간 19분 정도 짧았었는데 하구언과 방조제 건설에 따라 이 차이가 더욱 심해져서 금호방조제 건설 이후에는 낙조시간이 창조시간보다 1시간 46분이 짧아져 창·낙조의 편차가 27분이나 증가하였다.

이와 같이 하구언과 방조제 건설 이후 조간대의 감소에도 불구하고 낙조시간이 더욱 짧아진 원인은 강주환(1996)의 연구결과와 드넓은 조간대가 발달되어 있어 4단계 방조제가 계획되고 있기도 한 목포항 서북부 해역의 조류특성을 고려하여 설명될 수 있다. 그 연구에 따르면 하구언과 방조제 건설에 따라 목포구의 조석필터효과가 상실되어 건설전의 30분 이상 되던 목포구 전후의 조석과의 위상차가 건설후에는 거의 없어져 외해에서의 조위변화가 여과없이 목포항 해역에 바로 전달된다고 하였다. 또한 4단계 방조제 해역은 압해도 동남쪽인 목포항쪽과 압해도 북쪽 수로로 연결되어 있는 시아해의 북단으로 통해 있는데(그림 2(생략) 참조), 조간대가 광범위하기 때문에 이 해역의 낙조우세라는 조류특성은 인근 해역보다 심할 것으로 판단되며 이 사실은 표 2(생략)에서 이 해역의 시아해 북부쪽 입구에 해당하는 지점인 울래에서의 낙조우세가 주변보다 심하다는 점과 목포항쪽 연결수로에 위치한 목도에서의 낙조우세가 목포항보다 심하다는 점에서도 확인된다. 이 두 가지 전제하에 하구언과 방조제 건설전에는 4단계 해역의 조류특성이 목포항쪽보다는 시아해 북부쪽으로 더욱 상호영향을 미치고 있었기에 목포항에서의 조류특성은 이 해역의 영향을 크게 받고 있진 않았으리라 판단된다. 그러나 하구언과 방조제 건설후 목포구의 조석필터효과 상실에 의해 4단계 방조제 해역의 조류특성이 목포항쪽으로도 전달되어 목포항에서의 낙조우세가 더욱 심해진 것이라고 추정된다.

그림 4(생략)는 본 연구의 선행연구(강주환,1996)의 결과물 중 a)는 하구언 건설이후 영암방조제 건설이전(1983-1991), b)는 금호방조제 건설이후(1994-현재)의 창조시 유속장을 각각 도시한 것이다. a)에서 볼 수 있듯이 방조제 건설이전에는 압해도 북단의 조류속이 동쪽보다 큰 점으로 미루어 4단계 방조제 해역과의 해수교환은 주로 압해도 북단쪽의 수로를 통해 이루어졌다고 볼 수 있다. 그러나 금호방조제 건설이후를 도시한 b)를 보면 북단의 조류속은 현격히 감소했음에도 불구하고 동남단의 조류속은 오히려 증가하여 양측의 조류속이 거의 비슷하게 형성되어 있음을 알 수 있다. 즉, 4단계 방조제 해역의 조류특성이 과거와는 달리 목포해역에 직접적으로 영향을 미치게 된 것이다. 수로국(1983,1994)에서 측정한 조류속 자료에 따르면 주변해역에서는 전체적으로 조류속이 감소된 반면 압해도 동남쪽에서만 동기간 동안 50% 정도 증가된 조류속을 보이고 있어 이 사실을 뒷받침하고 있다.

이와 같이 목포항 인근 해역에서의 조류특성이 하구언과 방조제 건설에 따라 현격히 변화되었으며, 압해도 북단의 조류속이 상당히 감소된 점 외에도 부분적으로 확인된 바 있듯이 표 2(생략)의 양화리와 월내리에서도 낙조우세가 심해진 것으로 보아 이 변화는 시아해 전반에 걸쳐 영향을 미치고 있다고 판단된다. 특히 그림 4(생략)에서 볼 수 있듯이 방조제 건설에 따른 목포해역의 조류속 격감과 함께 이 해역의 더욱 심해진 낙조우세현상은 이 해역에서의 유사이동 양상에 큰 변화를 야기시켰을 뿐 아니라 오염확산에 대한 거동에도 적지 않은 변화를 초래하여 연안습지의 토사가 지속적으로 유실되거나 유속의 정체성으로 인해 주변 해역에서 오염의 가속화 등이 유발되어 주변 생물상에도 심각한 영향을 미칠 수 있는 상태가 되었다.

또한 4단계 방조제가 건설될 경우 전술한 효과의 상실과 함께 인근 조간대의 현격한 감소에 따라 목포해역의 낙조우세 현상은 급격히 둔화될 것이며 시아해 전반에서도 낙조우세가 다소 감소될 것으로 추측할 수 있다. 이에 따라 이 해역에서의 유사이동 양상의 변화는 더더욱 심해질 것이다.

5. 결론

- 1) 천해조 분석을 통해 목포 인근해역의 낙조우세 범위를 파악한 결과 북으로는 입자도 부근에서부터 남으로는 울돌목 부분 및 진도 남단 부근까지가 낙조우세를 보였다.
- 2) 이러한 낙조우세 현상은 이 해역에 조간대가 광범위하게 발달되어 발생된 것인데, 관측치를 분석한 결과 하구언과 방조제 건설에 따라 목포항에서의 낙조우세가 오히려 더욱 심화되었다.
- 3) 조간대의 감소에도 불구하고 낙조우세가 심해진 이유는 목포구의 조석필터효과 상실에 따라 목포항 해역이 4단계 방조제 건설예정 해역의 조류특성에 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 추정되며, 이는 관측결과와 수치해석을 통해 부분적으로 입증되었다.
- 4) 하구언과 방조제 건설에 따른 목포해역의 낙조우세 현상은 시아해에까지 영향을 미치고 있는데,

특히 본 연구과제의 적용대상 해역 부근에서는 조류특성의 변화가 극심하여 이 해역에서의 유사이동과 오염확산 양태에 커다란 변화가 초래되었다.

5) 4단계 방조제가 건설될 경우 목포해역의 낙조우세 현상은 급격히 둔화되어 유사이동 양상이 크게 변화될 것으로 추정된다.

참고문헌

1. 강주환(1996). "하구언 및 방조제 건설에 따른 목포해역의 환경변화," 대한토목학회논문집, 제16권 제II-6호, pp.611-619.
2. 수로국(1983). 수로기술연보, pp.150-178.
3. 수로국(1994). 수로기술연보, pp.107-149.
4. 이석우(1992). 한국근해해상지, 집문당.
5. 이석우(1994a). "영산강하구둑 건설에 따른 목포항의 조위의 변화," 항만, 3월호, pp.27-37.
6. 이석우(1994b). 한국항만수리지, 집문당
7. 한국해양연구소(1996). 한반도 주변 조석 조화상수 자료집.
8. Ackers,P. and W.R.White(1973). "Sediment Transport: New Approach and Analysis," *J. of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol.99, No.HY11, pp.2041-2060.
9. Aubrey,D.G. and P.E.Speer(1985). "A Study of Nonlinear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems. Part I:Observations," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.21, pp.185-205.
10. Boon,J.D. and R.J.Byrne(1981). "On Basin Hypsometry and the Morphodynamics Response of Coastal Inlet Systems," *Marine Geology*, Vol.40, pp.27-48.
11. Friedrichs,C.T. and D.G.Aubrey(1988). "Nonlinear Tidal Distortion in Shallow Well Mixed Estuaries: A Synthesis," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.26, pp.521-545.
12. Pugh,D.T.(1987). *Tides, Surges and Mean Sea Level: A Handbook for Engineers and Scientists*, John Wiley & Sons.
13. Speer,P.E. and D.G.Aubrey(1985). "A Study of Nonlinear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems. Part II:Theory," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.21, pp.207-224.
14. Speer,P.E., D.G.Aubrey and C.T.Friedrichs(1991). "Nonlinear Hydrodynamics of Shallow Tidal Inlet/Bay System," *Tidal Hydrodynamics*, B.B.Parker ed., John Wiley & Sons, pp.321-339.
15. Uncles,R.J.(1991). "M₄ Tides in a Macrotidal, Vertically Mixed Estuary: The Bristol Channel and Severn," *Tidal Hydrodynamics*, B.B.Parker ed., John Wiley & Sons, pp.341-355.
16. Walters,R.A. and F.E.Werner(1991). "Nonlinear Generation of Overtides, Compound Tides, and Residuals," *Tidal Hydrodynamics*, B.B.Parker ed., John Wiley & Sons, pp.297-319.