

서남해안의 해수면 상승 실태 분석

Analysis of Sea Level Rise at the Southwestern Coast

강주환*, 오남선**
Ju Whan Kang, Nam Sun Oh

요 지

지구온난화에 의해 전세계적으로 평균해수면이 상승하고 있는데, 이는 지반의 융기 또는 침강 등을 비롯한 여러가지 지역적 차이 때문에 지역적으로 적지 않은 차이를 보이고 있다. 분석결과에 따르면 서남해안은 1~3mm/yr 정도의 비슷한 값을 보이고 있으며 제주도의 경우 3~5mm/yr로 서남해안 지역에 비하여 약간 큰 값을 보이는 등 전지구적 상승량인 1~2mm/yr 보다는 다소 크게 나타나고 있다. 이와 함께 방조제와 같은 해안구조물 건설에 의해서도 평균해수면 뿐 아니라 고조위 및 저조위의 변화가 유발된다. 서남해안에서는 군산항과 목포항에서 특히 방조제 건설후에 각각 조위상승과 조석확폭현상이 발생하여 만조위 상승이 유발된 것으로 나타나고 있는데, 여기에 기인하여 목포 인근해역에서는 침식현상이 초래되고 있을 뿐 아니라 연중 해수면 변화가 심해짐에 따라 고극조위가 더욱 커져 저지대 범람이 특히 우려되고 있는 실정이다.

핵심용어 : 해수면 상승, 평균해수면, 고극조위, 하구언, 서남해안

1. 서 론

지구는 태양으로부터 방사된 복사열을 흡수하여 대기온도가 상승되며, 이렇게 사용된 에너지는 다시 우주공간으로 방사된다. 지구전체로 보면 이러한 열에너지는 유입된 양과 방출된 양이 균형을 이루게 된다. 그러나 산업화가 진행되면서 이산화탄소와 메탄과 같은 많은 양의 온실가스가 배출되면서 우주공간으로 방사되는 열에너지를 억제시키는 '온실효과'로 인해 지구 전체의 기온이 상승하게 되었다. 이러한 지구 전반적인 기온상승으로 인하여 평균해면의 상승이 유발되는데 과거 100년 동안 관측 자료와 모델 결과에 의하면 지구 전체적으로 평균 1~2mm/yr 의 상승률(Church 등, 2001)을 보이고 있다. 또한 모델을 이용해 평가된 상승률은 -0.8~2.2mm/yr (IPCC, 1996)의 결과를 보이고 있어 최대값이 관측치와 거의 일치하는 것으로 나타나고 있다. 모델에 의한 상승률은 해양의 열팽창, 산악빙하, 그린란드 빙상 및 남극빙상 등 4가지 주요 요소를 반영하고 있다.

GCM(General Circulation Model)과 같은 3차원 기후모델을 사용하여 21세기 해수면 상승을 예측한 결과에 따르면 모델에 따라 약간씩 차이를 보이고 있어 0.9~8.8mm/yr 정도로 예측되고 있다. 이 범위의 중간값인 4.8mm/yr 정도라 할지라도 과거 100년간 상승률에 비해 훨씬 가속화된 결과를 예측하고 있다. 이 결과는 1990년까지의 상승률은 1~2mm/yr 이지만 1990년대의 결과는 해양의 열팽창이 2mm/yr 에 달할 수도 있어 총 4mm/yr 까지 상승될 수 있다는 결과(Church 등, 2001)와도 일맥상통하고 있다. 또한 Cabanes 등(2001)이 1993~1998년의 위성자료를 분석한 결과 3.2mm/yr 의 높은 상승률을 보이는 것도 21세기 들어서 해수면 상승이 더욱 가속화될 가능성을 시사하는 증거라 볼 수 있다.

이상과 같은 내용은 전부 전지구적 평균치와 관련된 사항이며, 지역적으로는 이러한 평균치보다 커질수도 또는 작아질수도 있는 것이다. 이러한 지역적 차이가 유발되는 주요인으로서 지각운동과 밀도

* 정회원 · 목포대학교 토목공학과 교수 · E-mail : jwkang@mokpo.ac.kr

** 정회원 · 목포해양대학교 부교수 · E-mail : sun@mmu.ac.kr

및 순환양태 등과 같은 해양특성의 변화를 꼽을 수 있다. 지역적 상승량을 예측하기 위한 여러 가지 모델이 개발되었지만 각 모델 간의 결과에 유사성이 별로 없는 것으로 보아 지역적 상승량 예측은 신빙성이 매우 떨어진다고 보인다. 통상적으로 전지구적 평균치의 50%를 가감한 정도가 제안(Hulme 등, 2002)되고 있는 실정이라서 최악의 경우 2100년까지 1.3m 상승에다가 지각운동까지 포함된 상승량을 고려할 수도 있을 것이다.

본 연구에서는 우리나라 서남해역에서도 이러한 경향이 나타나고 있는지를 확인하는 동시에 90년대 중반까지 연구된 결과에 그 이후의 자료를 포함시켜 최근의 상승동향을 파악하고자 하였다. 이와 함께 하구언이나 방조제와 같은 대규모 건설에 따른 해수면 상승 영향성을 파악하기 위하여 금강하구언(1990년 완공)이 건설된 군산해역과 영산강하구언(1981년 완공)과 영암방조제(1991년 완공) 및 금호방조제(1994년 완공)가 건설된 목포해역에서 평균해수면을 비롯하여 평균고조위 및 평균저조위 등의 변화에 대한 분석을 시행하였다.

2. 자료처리방법

본 연구에서 해수면 변화를 고찰하기 위한 방법으로 회귀분석법을 사용하였는데, 이러한 분석을 통해 특정해역에서 평균해수면의 상승 또는 하강 경향 뿐 아니라 연주기 변화 및 반년주기 변화를 정량적으로 파악할 수 있다(Thompson, 1980). 자료가 충분한 경우에는 대기압과 풍속과 같은 기상학적 요소에 의한 영향도 추출해낼 수 있고 장기간의 자료가 축적되어 있을 경우 달의 공전평면과 관련된 18.6년 주기의 nodal effect와 pole tide와 같은 장주기 성분도 파악할 수 있다. 이러한 기법을 사용하여 특정 해역의 평균해수면 변화양상을 파악한 연구는 1980년대에 집중적으로 이루어졌다. Chelton 등(1982)은 미국 서해안에서 기압, 풍속, 엘니뇨 등에 의한 월별 변화를 파악한 바 있고, Thompson(1986)은 다중회귀분석법을 북대서양 연안에 적용한 바 있다. 이 외에도 Stravisi 등(1986)이 Trieste 만에서 100년간의 자료를 분석한 바 있고, Lanfredi 등(1988)은 남반구인 아르헨티나에서 유사한 연구를 수행한 바 있다. 한편 Stumpf 등(1988)은 평균고조위를 동일한 방법으로 분석한 바 있는데 특정 해역에서 조차가 점점 증가함에 따라 고조위 역시 증가하는 현상에 대한 연구를 수행한 바 있다.

80년대 후반 무렵 한반도 주변 해역에 대한 연구도 심도있게 진척되어 왔다. Kang 등(1985)은 평균해수면의 계절별 변화를 분석하였는데 한국 연안 평균해면이 여름에 높고 겨울에 낮은 이유가 대기압 및 해수밀도 변화에 기인하는 것으로 파악하였다. 그 중 대기압 변화에 의한 영향은 한국 연안 어디에서나 거의 균일하며 연주기 진폭이 약 8.5cm인 반면, 수온변화에 의한 효과는 4~8cm로서 서해안에서 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 계절풍의 영향으로 인하여 평균해면의 연교차가 동해의 20cm에 비해 서해에서는 40cm까지 벌어지는 것으로 나타났다. Oh 등(1993)은 한국, 러시아, 일본을 모두 포함하는 동해 46개 관측점에서 계절별 해수면 변동을 분석하였는데, 우리나라 동해안의 연교차인 20cm에 대부분 미달하는 것으로 나타났다. Pang 등(1994)은 이 자료를 대폭 보완하여 103개 지점에서 계절별 연교차 뿐 아니라 수개월 내지 24개월 주기의 특성을 분석하였고, 최근 Choi 등(1999)은 동해 자료에 중국 연안 자료를 추가하여 계절별 변화와 연별 변화를 세밀하게 고찰한 바 있다.

이와 같이 한반도 주변에서의 평균해수면과 관련된 연구는 계절별 변화를 분석한 자연과학적 접근이 주류를 이루고 있다. 본 연구에서는 해수면 상승에 민감할 수밖에 없는 갯벌이 크게 발달된 서남해안에서 기존 연구에서 파악했던 제반 특성을 최신의 추가된 자료가 보완된 상태에서 다시 한번 재조명함은 물론이고, 하구언이나 방조제 건설에 따른 해수면 변화 및 고조위 변화와 같은 공학적 측면의 연구를 시행하였다.

이를 위해 우리나라 서남해역에서 30년 이상의 검조기록이 갖춰져 있는 군산, 목포, 여수, 흑산도, 제주 등 5개 검조소에 대하여 평균해수면 자료를 수집하였다. 결측치는 선형보간에 의해 처리하였고 목포와 흑산도의 경우 1982년과 1980년 기본수준면을 각각 20cm와 28cm 하향조정하였기 때문에 기본수준면 변화 이전 자료를 변화 이후 자료로 환산하였다. 본 연구에서는 지구온난화 효과 분석을

위해서는 월별 평균해수면 자료만 분석한 반면, 건설에 따른 영향성 파악에 있어서는 월별 평균고조위 및 월별 평균저조위 자료도 분석하였다. 평균해수면 자료는 매시간 자료를 한달간 평균한 것이며, 평균고조위 및 평균저조위는 일별 고조 및 저조를 각각 한달간 평균한 것이다. 이와 함께 고조조위의 분석도 병행하였는데 월별 고조조위는 한달간 최대고조위 자료이며 연별 고조조위는 1년간 최대고조위 자료이다.

3. 서남해역의 해수면 변화

3.1 평균해수면 변화

서남해역의 평균해수면 변화를 관찰하기 위하여 군산, 목포, 여수, 흑산도, 제주 등 5개 검조소의 월별 평균해수면 자료에 대하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석은 6개월 주기와 1년 주기의 계절적 변화를 포함하였으며 이용된 식은 다음과 같다.

$$MSL = a_0 + a_1M + c_{1c}\cos\left[\frac{2\pi M}{12}\right] + c_{1s}\sin\left[\frac{2\pi M}{12}\right] + c_{2c}\cos\left[\frac{2\pi M}{6}\right] + c_{2s}\sin\left[\frac{2\pi M}{6}\right] \quad (1)$$

군산과 목포의 경우 하구언과 방조제 건설로 인하여 주변 해역의 흐름이 크게 변화하였다. 따라서 건설로 인한 해수면의 변화를 고려하여 건설이전과 이후의 시기로 구분하여 분석하였다. 분석결과 도출된 해수면 변화의 경향을 그림1(생략)에 나타내었다.

분석결과에서 얻어진 해수면 상승률은 기존의 연구결과와 비교하여 표1에 나타내었다. 회귀분석의 결과는 분석기간과 시기 등에 따라 큰 차이를 보일 수 있으며 그 때문에 연구결과가 서로 다르게 나타난 것으로 판단된다. 다른 연구결과와 큰 차이를 보여 신빙성이 다소 결여되는 Choi 등(1999)의 결과를 제외하고는 전반적으로 서남해안은 1~3mm/yr 정도의 비슷한 값을 보이고 있으며 제주도의 경우 3~5mm/yr로 서남해안 지역에 비하여 약간 큰 값을 보이는 등 전지구적 상승량인 1~2mm/yr 보다는 다소 크게 나타나고 있다. 군산의 경우 금강하구언 건설후 해수면 상승률이 다소 둔화되는 반면 목포의 경우 영산강하구언, 영암방조제와 금호방조제의 건설후 해수면 상승이 급격하게 증가한 것으로 나타났는데 이러한 결과는 건설이후의 기간이 너무 짧아 자료의 오차가 분석결과에 큰 영향을 주었기 때문으로 판단된다. 따라서 향후 충분한 자료에 의한 분석과 지속적인 관심이 필요할 것으로 보인다.

또한 각 해역에서 평균해수면의 연간 변화를 나타내는 지표가 되는 식 (1)의 계수를 기존 연구결과와 비교하여 표 2(생략)에 제시하였는데 기존 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이로부터 평균해수면의 계절별 변화는 기존 연구와 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었고 최근 십여년간 계절별 변화의 변동도 없는 것으로 파악되었다.

표 1. 평균해수면 상승률(mm/yr)의 변화

출처	본 연구	Pang 등(1994)	Choi 등(1999)	서병덕 등(2000)
자료 기간	1960-2003	1965-1985	1978-1992	1960-1998
군산	5.3 ^a	0.8	6.0	1.0
	2.9 ^b			
목포	0.8 ^c	0.8	6.4	0.8
	2.0 ^d			
	12.2 ^e			
여수	2.2		5.3	1.6
흑산도	3.9		4.7	
제주	5.4	4.7	3.1	4.4

a: 금강하구언 건설전(1960-1987), b: 금강하구언 건설후(1991-2003), c: 영산강하구언 건설전(1960-1980), d: 영산강하구언 건설후(1981-1990), e: 영암/금호 방조제 건설후(1994-2003)

3.2 1990년대 이전과 이후의 해수면 변화

전술한 바와 같이 해수면 상승이 1990년대 이후 심화되고 있다는 결과가 발표되고 있다. 따라서 우리나라의 경우 시기별로 해수면 상승률의 변화가 있는지를 파악하기 위하여 여수, 흑산도, 제주 지역에 대하여 1990년 이전과 이후로 구분하여 회귀분석을 실시하고 그 결과를 분석하였다. (결과생략)

3.3 건설에 따른 해수면 변화

건설에 따른 해수면 변화를 고찰하기 위하여 군산과 목포에서의 연평균해수면과 연평균고조위 및 연평균저조위의 변화상을 그림 2(생략)에 도시하였다. 이를 보면 군산의 경우 하구언 건설에 따라 3가지 조위 모두 상승한 반면 목포의 경우 고조위는 상승, 저조위는 하강하였으며 평균해수면은 큰 변화를 보이지 않는 등 조석확폭현상이 발생하고 있다. 조석과가 내측수역으로 진행하다가 하구언과 같은 장애물을 만날 경우 속도수두 만큼 조위가 올라가는 것이 일반적이며 군산은 이러한 현상으로 설명이 되는 반면, 목포의 경우에는 조석확폭현상의 원인이 목포구의 'tidal choking effect' 기능의 소멸에 기인하고 있는 것(강주환, 1996; Kang, 1999)으로 알려져 있다.

또한 건설에 의한 고극조위 상승 역시 그림 3(생략)에 보인 바와 같이 군산과 목포의 공통적 현상이며, 고극조위의 경우 그 상승 뿐 아니라 표 3(생략)에 보인 바와 같이 연중변화폭이 증가하였다는 것에도 주목할 필요가 있다. 즉 하절기 태풍 등과 같은 기상조로 인한 해수면 상승이 건설전에는 하구언 내측 수역에서 어느 정도 완충되었던 것이 건설에 따라 그 완충 기능이 소실되어 평균해수면은 그렇지 않은 반면 고극조위만 그 연중변화폭이 커진 것으로 분석된다.

4. 결 론

서남해역의 해수면 변화를 파악하기 위하여 군산, 목포, 여수, 흑산도, 제주 등 5개 검조소의 해수면 자료에 대하여 회귀분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기존 연구결과가 하구언 등의 건설로 인한 상승효과를 평균해수면 상승에 포함시킨 오류만 제외하면, 본 연구에서 파악된 평균해수면 상승률과 연간진폭 등은 기존 연구결과와 부합하는 결과를 보이고 있다.
- (2) 서남해안은 1~3mm/yr 정도이고 제주도는 3~5mm/yr 정도로 서남해안 지역에 비하여 약간 큰 값을 보이는 등 전지구적 상승량인 1~2mm/yr 보다는 다소 크게 나타나고 있다.
- (3) 하구언 건설에 따라 군산은 전체조위가 상승된 반면 목포는 확폭현상을 보이고 있다.
- (4) 건설에 따라 고극조위가 상승하였을 뿐 아니라 연중변화폭도 커져 범람 가능성이 매우 우려되는 실정이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10164-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. 서병덕, 허룡, 임관창 (2000). 우리나라 연안의 해수면 변화. 국립해양조사원 연구보고, pp. 3-8.
2. Bruun, P. (1962). "Sea-level rise as a cause of storm erosion", *Proc. of ASCE, J. of Waterways and harbors Div.*, Vol. 88, pp. 117-130.
3. Cabanes, C., Cazenave, A. and Le Provost, C. (2001). "Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations, *Science*, Vol. 294, pp. 840-842.

4. Chelton, D.B. and Davis, R.E. (1982). "Monthly mean sea-level variability along the west coast of North America", *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 12, pp. 757-784.
5. Choi, B.H., Roh, S.J., Lee, J.H. and Fang, G. (1999). "An analysis on the mean sea level change of the seas adjacent to Korea", *Acta Oceanologica Sinica*, Vol. 18, No. 3, pp. 337-353.
6. Church, J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D. and Woodworth, P.L. (2001). Changes in sea level. In *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. eds., Cambridge University Press, p. 881.
7. Hulme, M., Jenkins, G., Lu, X., Turnpenny, J.R., Mitchell, T.D., Jones, R.G., Lowe, J., Murphy, J.M., Hassell, D., Boorman, P., McDonald, R. and Hill, S. (2002). *Climate change scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report*, Tyndall Centre for Climate Change Research, p. 120.
8. IPCC (1990). *Climate change, The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, p. 365
9. IPCC (1996). *Climate change 1995, Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses*, Cambridge University Press, pp. 365-398.
10. Kang, Y.Q. and Lee, B.D. (1985). "On the annual variation of mean sea level along the coast of Korea", *The Journal of the Oceanology Society of Korea*, Vol. 20, No. 1, pp. 22-30.
11. Lanfredi, N.W., D'Onofrio, E.E. and Mazio, C.A. (1988). "Variations of the mean sea level in the southwest Atlantic Ocean", *Coastal Shelf Research*, Vol. 8, No. 11, pp. 1211-1220.
12. Nicholls, R.J. and Leatherman, S.P. (1994). Global sea-level rise, In *As climate changes: Potential impacts and implications*, Strzepek, K. and Smith, J.B. eds., Cambridge Univ. Press, Cambridge.
13. Oerlemans, J. and Fortuin, J.P.F. (1992). "Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming", *Science*, Vol. 258, pp. 115-117.
14. Oh, I.S., Rabinovich, A.B., Park, M.S. and Mansurov, R.N. (1993). "Seasonal sea level oscillations in the East Sea", *The Journal of the Oceanology Society of Korea*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-16.
15. Pang, I.-C. and Oh, I.-S. (1994). "Long-period sea level variations around Korea, Japan, and Russia", *Bull. Korean Fish. Soc.*, Vol. 27, No. 6, pp. 733-753.
16. Stravisi, F. and Ferraro, S. (1986). "Monthly and annual mean sea levels at Trieste 1890-1984", *Bollettino Di Oceanologia Teorica Ed Applicata*, Vol. 4, No. 2, pp. 97-104.
17. Stumpf, R.P. and Haines, J.W. (1988). "Variations in tidal level in the Gulf of Mexico and implications for tidal wetlands", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 46, pp. 165-173.
18. Thompson, K.R. (1980). "An analysis of British monthly mean sea level", *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, Vol. 63, pp. 57-73.
19. Thompson, K.R. (1986). "North Atlantic sea level and circulation", *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, Vol. 87, pp. 15-32.
20. Van Goor, M.A., Stive, M.J.F., Wang, Z.B. and Zitman, T.J. (2001). "Influence of relative sea level rise on coastal inlets and tidal basins", *Proceedings of Coastal Dynamics 2001*, ASCE, New York, pp. 242-251.