

크리징 모형을 이용한 西海 設計 基準 潮位面의 推定에 관한 研究

The Estimation of Design Tide Level over the West Coast of Korea Based on the Kriging Model

이 재 형* / 박 종 찬**

Lee, Jea Hyoung / Park, Jong Chan

Abstract

The history of Tidal Bench Mark(TBM) at four major tide observation stations on the the Korea West Coast is reviewed. The data concerned with the local mean sea level(LMSL), the datum level(DL), and TBM is collected and checked. The values of LMSL surveyed by Rural Development Corporation(RDC), Office of Hydrographic Affair(OHA), and Office of Port Affair(OPA) are compared so that their unbiased MSLs at four stations are determined. Kriging model is introduced to estimate the design levels for tide: DL, MSL, and high water spring tide(HWOST). The estimated design level is well fitted with the sample data. The value of the identified drifts increase with the latitude. The estimated semi-variograms $\gamma(h)$ show self similarity. The values of the $\gamma(h)$ for DL and HWOST are 0.005 times as much as the values of $\gamma(h)$ of MSL.

Keywords: design tide level, Kriging model, semi-variogram, tidal bench mark

요 지

4개 주요 검조소의 기본수준점표 설정연혁을 개괄하였다. 이 검조소의 검조의 영점표고, 기본수준고, 그리고 조위기준점(Tidal Bench Mark)의 자료를 수집검토했다. 농어촌진흥공사, 수로국, 항만국 등이 조사한 지역평균海面고(Local Mean Sea Level)를 비교하여 이들 4개 검조소지점(인천, 군산내·외항, 목포)의 평균海面고로 정의하였다. 기본수준면(DL), 평균海面(MSL), 대조평균만조면(HWOST) 등의 설계조위면을 추정하기 위하여 크리징 모형을 소개하였다. 추정한 설계조위면이 표본값을 잘 표현하고 있음을 확인하였다. 이 과정에서 설계조위면의 공간경향이 평가되었으며 설계조위의 확률구조를 대표하는 반-자기분산식 $\gamma(h)$ 이 얻어졌다. 이 결과에서 설계조위들이 자기상사 특성을 보였다. 즉, 기본수준면과 대조평균만조위의 반-자기분산값은 평균海面의 반-자기분산값의 0.005배였다.

핵심용어: 설계기준조위, 크리징 모형, 반-자기분산식, 조위기준점

* 전북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 농어촌진흥공사 조사설계처 과장

1. 서론

우리 나라의 수직기준을 설정하기 위하여 조선총독부 임시 토지조사국은 청진, 원산, 목포, 진남포, 인천 등 5개항에서 1911년부터 3년에 걸쳐 조위를 관측하여 각 항의 수준기점을 정의하였다. 이때의 검조활동에서 일부 수준기점간(부산~목포, 원산~진남포) 연결수준측량이 실시되었으나 인천항의 수준원점은 정의되지 않았으며, 5개항을 연결하는 전국수준망 형성이나 網조정이 이루어지지 않았다(최병호, 1994). 해방후 내무부 토목국은 조선총독부에서 사용하던 조선삼각점과 수준점을 이용하여 파괴된 수준점을 복구하고 수준망을 정비하려 하였다. 그러나 日帝時代의 측량 原자료를 처리한 文獻이 남아있지 않아 뜻을 이루지 못하였다.

이리하여 수로국의 각종 검조활동은 지역평균해면과 기준검조소의 수직기준에 準하여 이루어지고 있다. 그 결과 검조지점간 그리고 육상수준점과의 수직관계가 연결되어 있지 않다. 따라서 수로국은 수준기점의 지역기 본수준면을 해도의 수직기준으로 삼고 있으며 연안개발 사업시에 각 항만에서 독자적으로 공사기준면을 사용하여 왔다. 한편 농어촌진흥공사(이하 농진)는 연안을 개발하기 위하여 해당지역에서의 단기 검조활동을 실시하였다. 수로국과는 달리 농진은 검조지점의 평균해면고를 건설부 육상표고(M.O.C표고)와 연결 지었다.

이와 같이 우리 나라의 수직기준체계는 二元化되어 있다. 이로 인하여 육상과 해상의 연계가 불가피하여 연안지역의 건설활동에 지장이 초래되고 있으며, 이를 是正하기 위해서 주요검조소와의 연결측량을 수행한 바도 있다(건설부, 1980~82). 그러나 간척사업 등 연안 개발사업시 배수시설 등 시설물 설계에 여전히 애로사항이 남아있다(최병호, 1994). 그동안 장·단기의 조석관측 실적이 상당히 축적되어 있기 때문에 미관측지점의 설계기준조위 등을 추산할 수 있으며, 또 이원체계의 수직기준 문제를 어느정도 해소할 수도 있다. 박승우(1986, 87, 88.) 등은 위도와 경도값으로 미관측지점의 평균해면 등을 추정할 수 있는 회귀모형을 제안하였다. 서해해역을 인천, 군산, 목포를 기준으로 3개 권역으로 분할한 다음, 旣在의 조위관측자료를 활용하여 선형 회귀계수를 추정하였다. 이 모형의 단점은 권역간의 연계성이 없다는 점과 해도의 수직기준과 육상표고기준의 관계가 반영되지 않았다는 점이다. 또 지역 기본수준면이나 대조평균만조면 등에 대한 추정식이 제시되지 않았다.

본 연구 목적은 기본수준면, 지역평균해면, 그리고 대조평균만조면 등 서해의 설계기준조위면을 육상표고기준으로 통일하여 추정하는데 있다. 이를 위하여 서해 기준검조소의 검조의 영점표고를 조사 확인하여 신뢰성 있는 표고를 선택하고, 설계조위면을 추정하기 위한 기법을 기술하며, 추정에 필요한 자료를 수집 분석한다. 또한 자료가 갖는 확률구조의 특성치를 평가하고 설계조위 기준면을 추정하고 그 결과에 대한 분석을 실시한다.

2. 높이기준

우리 나라의 높이기준은 해도와 지형도의 높이기준으로 二元化 되어있다. 해도의 높이기준은 기본수준면(Datum Level)이며 지형도의 높이기준은 인천항의 중등조위(Mean Sea Level)이다. 따라서 임의의 항만의 평균해면은 건설부표고(M.O.C)의 영점(영점표고)과는 일치하지 않는다. 육상과 해상의 높이 설계기준을 통일하고, 지점조위(관측소지점)를 조위면(해역)으로 변환하기 위해서는 높이기준들간의 연계성 확보가 필요하다. 따라서 본장에서는 조위면의 추정에 필요한 지역 기본수준면(Local D.L), 지역평균해면(Local M.S.L), 지역대조평균만조면(Local H.W.O.S.T) 등의 기준조위를 명시하고 있는 조위표와 기본수준점(TBM)의 영점표고 현황을 조사분석한다.

2.1 기본수준점 설정연혁

기본수준면은 연평균해면에서 4개 주요분조의 반조차의 합만큼 내려간 면이다. 연평균해면은 해당지점에서 1년이상의 검조기록을 每時 조위 평균한 값이다. 기본수준면은 원칙적으로 수로국이 기본수준표로 작성하여 告示하고 있다. 기본수준표가 없는 경우 기본수준면은 1개월 이상의 검조자료로 4개분조의 조화상수를 계산하여 월평균 해면을 구하고, 기준검조소의 평균해면자료를 이용하여 연평균해면으로 보정하여 결정한다. 검조의 영점표고를 확인할 수 있는 서해 주요항의 기본수준점 설정내력은 다음과 같다.

인천항의 수준기점(Original Bench Mark: BM)은 1914년 5월 29일에 설치되었다. 인천기준검조소의 기본수준점 No. 1은 1959년 5월 5일 舊船渠 부근에 설치되었다. 그러나 이것은 인천항개발로 인하여 수준기점과 함께 망실되었으며, 검조소가 월미도로 이전함에 따라 1973년 12월 31일에 수준점 No. 2가 설치되었으나 도로건설로 인하여 망실되었고 이후 수준점 No. 7까지 설치되었다. 수준기점의 표고는 기본수준면상

표 1. 주요검조소의 기본수준점표(단위 cm)

검조소명	현검조소 위치	4개 분조반조차			검조 시기	기준 TBM	T B M			TBM 설치 년월일	연속관측 개시일	현행값
		M2, S2, K1, O1	계	MSL상			DL상	차				
인천	37 28 08 126 35 51	286.2, 112.7, 39.4, 25.2	463.5	43.- 44.	No.2	547.7	1011. 2	463.5	73.12.31	60.1	463.5	
군산	내항 35 59 24 126 42 48	212.8, 74.4, 31.2, 25.0	343.5	24.4.- 26.4	No.1	436.1	777.1	341.0	59.12.1	59.1	341.0	
	외항 35 58 06 126 37 36	219.7, 81.7, 34.2, 25.8	361.4	81.3.- 82.3	No.1	480.3	842.6	362.3	80.6.21	80.2	362.3	
목포	34 46 41 126 23 33		214.8	60.- 65	No.1	250.9	465.7	214.8	52.8.30	52.9	233.8	

1011.2cm로 정의되어 있다. 이는 인천항 海圖 기준표고가 평균해면상 5.477m상에 있다는 기록과 關重雄이 1943~1944년 인천항의 조위를 관측 분석한 결과 4개 주요분조의 합이 4.635m라는데 근거하고 있다(최병호, 1984). 해방후 현재까지 우리 나라 표고기준은 당시의 인천항 평균해면이다. 인천항에서의 조석을 연속적으로 관측하기 시작한 것은 1952년 9월이며 최병호는 長期檢潮(62~77년)자료의 분석결과를 토대로 인천항의 평균해면이 4.58m로서 초기에 정의된 原수준기점하 5.477m보다 5.5cm가 더 낮은 5.532m로 재조정할 필요가 있다고 주장하였다(최병호, 1994).

군산항의 기본수준점 No. 1은 1959년 12월 1일 군산항 인근의 평균해면상 436.1cm 기본수준면상 777.1cm에 설치되었다(수로국, 1995). 現業에서는 평균해면상 343.7cm, 기본수준면상 777.1cm(이석우, 1988)가 사용되고 있는데, 이 값은 검조표척에 의하여 1924년 4월부터 1926년 4월까지 783일간 검조표척에 의하여 조위를 관측하여 4개 주요분조의 반조차 합 343.5cm를 산출한 것에 근거한 것이다(이석우, 1994). 군산외항의 기본수준점 No.1은 1980년 6월 21일 군산외항 인근의 평균해면상 480.3cm, 기본수준면상 842.6cm에 설치되었다(수로국, 1995). 現業에서 군산외항 기본수준점의 높이는 평균해면상 481.2cm가 사용되고 있다(이석우, 1988). 이 값은 수로국이 1981년 3월부터 1982년 3월까지 369일간의 조위를 관측하여 4개 주요분조의 반조차 합 361.4cm를 산출한 것에 근거한 것이다. 평균해면고에서 0.9cm 차가 발생하도록 기본수준점이 정의되었는지는 의문의 여지가 있다.

목포항의 기본수준점은 1952년 8월 30일 평균해면상 250.9cm, 기본수준면상 465.7cm에 설치되었다. 목포항의 기본수준면은 1960년과 1961년의 년평균해면과 4회에 걸친 각 1개년의 4개분조 반조차의 평균값

214.8cm를 이용하여 결정되었다(이석우, 1994). 한편, 수로국은 1977년 10월 21일 15시에 목포항 검조소 검조위의 편을 0.9cm 하향 조정하였으며, 1983년 12월 28일 09시에 다시 20cm 상향 조정한 바 있다(박기진, 1995). 현재 목포항의 기본수준면은 평균해면하 233.8cm 아래에 있다. 이상에서 설명한 검조 당시 4개 분조 반조차의 합, 기본수준점상의 값, 그리고 현행 값을 표1에 비교하여 수록하였다.

2.2 기본수준점의 표고조사

농진이 조사한 기본수준점표는 대부분 건설교통부표고(이하 표고)에 準하고 있다. 그러나 수로국의 기본수준표 중에서 기본수준점의 표고를 확인 할 수 있는 곳은 서해 10개소의 기준검조소 중 인천, 군산내·외항, 목포항 등 4개소에 불과하다. 현재 인하대에 설치된 육상측량의 기준점은 1910년대의 수준기점으로부터 이설되었으며, 인천의 기본 수준면상 3132.16cm, 평균해면상 2668.71cm로 정의되었다.

건설부 국립지리원(1980~82)은 1980년경, 교통부 항만국(최영박, 1984)은 1984년경에 주요검조소의 기본수준점과 육상표고 기준점간의 연결측량을 실시한 바 있다. 그 결과에 의하면 인천항 기본수준점 No. 1의 표고는 547.70cm로 차이가 없으나, 군산내항 기본수준점 No. 1의 표고의 경우 국립지리원의 측량결과는 466.00cm, 항만국의 수준측량결과는 431.80cm로 큰 차이를 보였다.

한편, 이석우(1988)는 군산내항 검조소 지점과 군산외항 검조소 지점의 수면경사를 계산하기 위하여 수준측량을 실시한 바 있다. 그는 군산내항 검조소의 평균해면과 기본수준면이 군산외항보다 각각 7.1cm, 24.8cm 높다고 하였다. 그러나 수로국에서 고시한 군산외항의 기본수준점 No. 1의 높이를 평균해면상

표 2. 서해안 기준항의 BM과 TBM 관계 (단위cm)

항명	수준점 명칭	해상 표고기준		육상	육상	비고
		기본수준면	평균해면상	표고기준	표고차	
인천	원점 BM	1011.2	547.7	547.7	0.0	항만국
				547.7	0.0	국립지리원
군산 내항	TBM No.1	777.1	436.1	431.8	-4.3	항만국
				466.0	+29.9	국립지리원
군산 외항	TBM No.1	842.6	480.3	469.8	-10.5	항만국
				506.6	+26.3	국립지리원
목포	TBM No.1	465.7	250.9	229.2	-21.7	항만국
				268.35	+17.45	국립지리원
				230.7	-20.2	농진공

480.3cm로 계산한 결과 두 지점의 평균해면 차이는 6.2cm이다. 목포항 기본수준점 No. 1의 경우 국립지리원의 측량결과는 268.35cm인 반면 항만국의 수준측량 결과는 229.20cm로 상당한 차이가 있다. 농진은 이를 규명하기 위하여 수준측량을 실시하였는데, 그 결과 기본수준점 No. 1의 표고는 230.70cm로 항만국의 측량성과와 비슷하였다.

2.3 높이기간의 관계

기준검조소에 설치되어 있는 검조의 영점표고를 각 연구기관의 측량성과별로 비교하였다. 군산항의 경우 항만국의 측량성과에 의하면 평균해면은 인천항의 중등조위면에 비하여 4.3cm가 낮은 반면 국립지리원의 연안해역기본조사 성과에 의하면 29.9cm가 오히려 높다. 즉, 항만국과 국립지리원의 측량성과는 34.2cm차이가 있다. 군산외항의 평균해면은 인천항의 평균해면에 비하여 항만국의 경우 26.3cm가 높고, 국립지리원의 경우 10.5cm 낮다. 또 목포항의 경우 항만국의 측량성과에 의하면 인천 중등조위면에 비하여 21.7cm 낮으나, 농진의 측량성과에 의하면 20.2cm 낮으며, 국립지리원의 측량성과에 의하면 오히려 17.45cm 높다.

이상을 종합하여 표2에 게재하였으며, 그림 1은 인천 기본수준면상의 연구기관별 측량성과와 농진이 실시한 임시검조소의 평균해면고를 圖示한 것이다. 그림 1에서 국립지리원의 측량성과에 의한 평균해면은 동떨어져 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 항만국의 측량성과를 채택하였다.

3. 기준 조위면의 추정 모형

조위는 시·공간의 변동특성을 보이며 경향, 주기 그리고 추계성분 등을 갖는다. 연안 구조물 설계의 기준

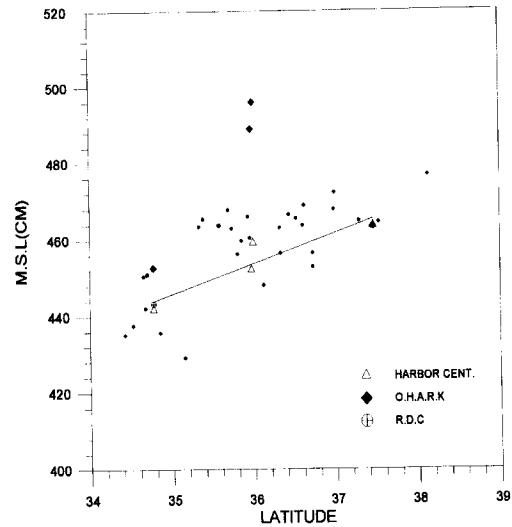


그림 1. 인천 기본수준면상의 평균해면고 비교도

으로 삼고 있는 설계기준조위(지역기본수준면, 지역평균해면 그리고 지역대조평균조위면)는 공간변동 특성이 논의의 대상이 된다. 따라서 무작위장에서 설계기준조위를 정의하고 무작위변수(random variable)의 확률구조를 기술하고 미관측지점의 설계기준조위를 추정할 수 있는 크리징 모형을 기술한다. 크리징 기법은 이재형 등(1984, 1986)이 대수층 전달계수의 추정, 강우의 공간분포 추정 등을 위해서 활용되어 그 유용성이 높게 평가된 바 있다(수로국, 1995; 해운항만청, 1993)

3.1 조위 무작위장의 표현

해면의 주기적인 승강운동을 조석이라고 하는데 천문조석(astronomical tide)과 기상조석(meteorological tide)이 있다. 본 연구 대상의 조석은 천문조석에 국한한다. 천체의 운항에 따른 기조력은 독립적이며 이로 야기되는 조위를 선형결합으로 나타낼 수 있다. 즉, 임의시각 t 와 임의지점 $x(\varphi, \psi)$ 의 연직조위 $\xi(\varphi, \psi)$ 는 조화항의 합으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\xi(x, t) = Z_0(x) + \sum_{i=1}^n f_i H_i(x) \cos(x, t, \cdot) \quad (3.1)$$

여기서, $Z_0(\cdot)$ 는 임의지점의 기준면으로부터 높이인 평균해면이며, f_i 는 수정인자이다. 조화상수 H_i 는 i 분조의 진폭(amplitude)이고, 분조의 수는 대단히 많이 있으나 본 연구에서는 설계기준조위에 관련된 4개 주요분조 즉, 主太陰半日週潮(M_2), 主太陽半日週潮(S_2), 日月合成日週潮(K_1), 主太陰日週潮(O_1) 등을 분석대상으

로 하였다. 적법한 절차에 의하여 지점 조화상수 (harmonic constant)가 결정되면, 이것은 물리적 상황이 변하지 않는 한 상수이어야 한다. 본 연구에서 대상으로 하는 지점 조화상수는 수로국이 고시한 값이므로 시간에 대하여서는 상수이지만, 공간에 대해서는 상수가 아니다. 공간의 함수인 기본 수준면 $Z_d(\cdot)$ 와 대조평균만조면 $Z_k(\cdot)$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} Z_d(\cdot) &= Z_0(\cdot) \\ &- [H_m(\cdot) + H_s(\cdot) + H_0(\cdot) + H_k(\cdot)] \\ Z_k(\cdot) &= Z_d(\cdot) \\ &+ 2[H_m(\cdot) + H_s(\cdot)] + H_0(\cdot) + H_k(\cdot) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$Z(\cdot)$ 는 관측값에 의하여 산정된 값이기 때문에 단기관측, 잡음, 계산, 측정오차 성분 등이 포함되어 있으며 환경변화 등에 의하여 변형된 값으로 측정될 수도 있다. 따라서 $Z(\cdot)$ 는 결정론적 변수와 추계학적 변수의 성분을 동시에 가지고 있다. 즉, $Z(\cdot)$ 는 공간경향 성분과 무작위 성분을 갖는 변수이다. 그러므로 설계기준조위는 공간추계학적 과정이라 할 수 있다. 각각의 무작위 변수는 자신의 확률밀도함수(probability density function)를 가진다. 따라서 그 과정을 완전히 기술하려면 전 영역에 대한 결합확률분포의 지식을 필요로 한다. 그러나 공간표본이 하나일 경우 이것을 구한다는 것은 사실상 불가능하다. 그러므로 이 추계학적 과정은 확률밀도함수를 특징짓는 제한된 갯수의 통계 매개변수로 기술된다. 공분산구조의 확률과정을 추정하기 위하여 흔히 자기분산(Variogram) 분석을 사용한다. 자기분산 $\gamma(h)$ 의 반-자기분산(semi-variogram)은 다음과 같이 정의된다(이재형, 1988).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(x+h) - Z(x))^2] \quad (3.3)$$

여기서, x 는 앞에서 정의한 위치벡터이고, h 는 거리벡터이다. 식(3.3)의 기대치는 $E[(\widehat{Z}(h)^2)]$ 이고 이것은 지체거리 0에서 $\widehat{Z}(h)$ 의 공분산이거나 $\widehat{Z}(h)$ 의 분산이다. 즉, 자기분산은 확률과정의 점들간 차분분산(variance of differences)의 일종이다. 지체거리(lag distance) 0에서 $\gamma(0) = 0$ 이다. 지체거리가 더 커질수록 차분값의 변동량은 증가하여 최대 분산값에 도달하게 된다. 자기분산은 공분산함수를 뒤집어 놓은 것과 유사하고 다음과 같은 공분산 항으로 표현될 수 있다.

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (3.4)$$

자기분산 분석은 공분산 추정과정에서 선형 공간경향(drift)의 영향을 받지 않기 때문에 공분산 분석보다 더 효과적이다.

3.2 범용 공분산 함수

무작위장 $Z(x)$ 의 가용자료가 많으면 평균, 분산 등은 무작위장의 각 점에서 계산될 수 있다. 정상 확률과정은 모멘트들이 공간이동에 대해서 불변임을 의미하며 표본 측정치가 아닌 공간측정치를 토대로 추정될 수 있다. 비정상 무작위장은 평균 $m(x)$ 를 빼면 정상 무작위장이 된다. 실제로 공간 무작위장의 표본이 하나인 경우가 많다; 예를 들어, 광맥의 분포, 대수층이나 석유부존 지역의 특성 등의 경우, 대상 무작위장의 통계치를 산출하기 위해서 정상성(stationarity) 가정을 하게된다. 내재 무작위 함수(Intrinsic Random Function: IRF)의 이론(Mathern, 1973)은 단 하나의 실현만이 가능한 상황을 다룰 수 있게 개발되었다. 즉, $Z(x)$ 자체보다는 $Z(x)$ 의 증분을 다룬다. 그 결과 식(3.3)과 같은 반-자기분산은 평균을 포함하지 않는다. $m(x)$ 가 상수가 아니면 고차차분을 고려하면 되며, 범용증분의 개념이 된다. 범용 k 차 증분은 k 차까지의 다항식을 걸러내는 선형결합 $\sum_i \lambda_i Z(x_i)$ 으로 정의된다. k 차의 범용증분이 정상이라면 $Z(x)$ 는 k 차 내재 무작위 함수이다. IRF-k는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z(x) = Z^0(x) + P_k(x) \quad (3.5a)$$

$$P_k(x) = \sum_{i=1}^k a_i f^i(x) \quad (3.5b)$$

여기서, $Z^0(x)$ 는 공분산 함수 $C(h)$ 를 갖는 평균이 0인 무작위 함수이고, $P_k(x)$ 는 임의의 계수를 갖는 k 차 다항식 함수이다. f^i 은 기본함수이고 a_i 은 미지계수이다.

$Z(x)$ 는 다항식의 범용공분산(Generalized Covariance: GC) 함수 $K(h)$ 를 갖는 IRF-k라 할 수 있으며, 이 경우 $C(h)$ 와 같다. 모든 함수 $K(h)$ 는 범용공분산으로 취급되지 않지만, 가용함수의 종류는 보통의 공분산 함수보다 더 많다. 다항식 범용 공분산은 홀수 승의 항을 포함하며, 거리벡터 h 의 크기 $|h|$ 에만 의존하기 때문에 등방성(isotropic)이다. 다항식 GC는 동정하기가 쉽기 때문에 매우 유용하다. 대부분의 공간무작위장이 표3에 제시된 IRF의 0, 1, 2차 다항식 범용 공분산식으로 기술될 수 있다(Delfiner, 1976).

표 3. Polynomial GC Models

Order of IRF	GC Model	drift
IRF-0	$K(h) = c\delta + a_1 h$	constant
IRF-1	$K(h) = c\delta + a_1 h + a_3 h^3$	linear
IRF-2	$K(h) = c\delta + a_1 h + a_3 h^3 + a_5 h^5$	quadratic
Constraints	$c \geq 0, a_1 \leq 0, a_5 \leq 0, a_3 \geq (-10/3) \sqrt{a_1 a_5}$	

3.3 크리징 시스템

대상해역에 n 개 관측소의 관측값 $Z(x)$ 가 주어지 있다. 문제는 미관측지점 p 에서 무작위 변수 값 Z_p 를 추정하는 것이다. 이 변수의 확률구조는 IRF로 특징지워진다. 그러므로 무작위 변수 $Z(x)$ 의 선형결합 $\sum_i \lambda_i Z(x_i)$ 인 Z_p^* 를 한 무작위 변수의 실현치로써 간주할 수 있다. 즉,

$$Z_p^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad i = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

여기서, p 는 추정지점이고, i 는 관측지점이며, λ_i 는 가중치(weight)이다. 또 Z_i 는 지점 x_i 에서 관측치이다. 여기서 문제는 최적 추정치를 제공하는 가중치 λ_i 를 구하는 것이다. 가중치 λ_i 는 Z_p^* 가 불편 추정치(unbiased estimate)이어야 하며 최적값이어야 한다는 조건을 만족하여야 한다. 즉, 과소 또는 과대평가가 되어서는 안되고 평균자승오차(mean square error)가 최소가 되어야 한다. 또 식(3.5b)에서 미지계수 a_l 에 대한 제약조건을 만족해야 한다. 이 개념을 수학적으로 표현하면 다음식이 된다(Delfiner, 1976).

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{ij}(x_i - x_j) + \sum_{l=1}^k \mu_l f^l(x_i) = \gamma_{i0}(x_i - x_0)$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j f^l(x_j) = f^l(x_0) \quad l = 1, \dots, k \quad (3.7)$$

식(3.7)을 크리징 시스템이라고 한다. $n+k$ 개의 연립방정식의 해와 $n+k$ 개의 미지수는 n 개의 가중치 λ_i 와 k 개의 라그랑지 승수 μ_l 이다. $\gamma_{ij}(\cdot)$ 는 식(3.4)에서 정의된 자기분산이고 $f^l(\cdot)$ 는 식(3.5b)에서 정의된 기본함수이다.

4. 추정 결과 분석

한반도 주변해역의 조석특성은 서해, 남해, 동해로 대

별된다. 이 중에서 분석대상 해역은 서해이다. 본절에서는 대상해역의 조위 관측소 분포, 분석에 이용될 수 있는 자료현황 등을 개괄하고, 실제 기준조위의 확률구조를 대표하는 공간경향과 자기분산 분석결과를 기술한다. 또 확률분석으로부터 얻은 결과를 이용하여 미계측지점의 설계기준조위를 추정하고 그 정도를 평가한다.

4.1. 조위 관측소 분포와 가용자료

기본수준점 성과가 고시되어 있는 곳은 남한의 47개 주요항만인데 이중 10개소가 서해에 위치하고 있으며, 다수의 임시검조소에 준기본수준표가 있다. 서해안의 기본수준표가公表된 곳은 대흑산도, 목포, 군산외항, 군산, 장항, 대천, 고정, 평택, 인천, 연평도 등 10개소이다(해운항만청, 1993). 이 중에서 검조의 영점표고를 확인할 수 있는 목포, 군산내·외항, 인천 등 4개소의 기본수준점성과(수로국, 1995)를 이용하였다. 또한 농진과 수로국은 조사 대상지역에 75개소의 임시검조소를 설치하여 1~4개월의 단기 조위관측을 실시한 바 있다. 이중 농진에서는 1978년~1988년 사이에 47개소, 수로국은 1982년~1994년 사이에 28개소의 임시관측소를 설치 운영하였다. 임시검조소에 대해서는 75개소의 기본 수준점성과(농진공, 1987,89; 수로국 1981~1995)가 있다. 연구대상 해역의 면적은 40500km²이고, 원점 좌표는 (33°, 124°)이다. 육상표고를 확인할 수 있는 검조소는 기준검조소 4개소와 농진에서 운영한 임시검조소 47개소 등 총 51개소로 관측소 1개당 점유면적은

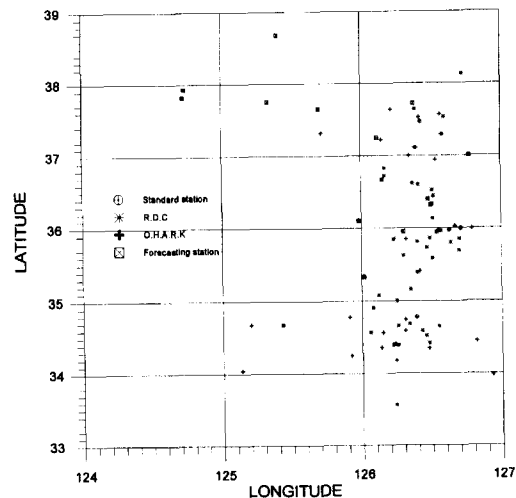


그림 2. 대상 해역과 관측소 분포

794.12km²이다. 각 검조소간의 최소거리는 0.001km, 최대거리는 416km, 평균거리는 190.5km이다. 또 여기에 육상표고를 확인 할수 있는 수로국 임시검조소 27개소를 더하면 관측소는 총 78개소이고 관측소 1개당 점유면적은 519.3km²이며, 검조소간 최소거리는 0.001km, 최대거리는 558.4km, 평균거리는 239.7km이다.

4.2 확률 구조의 특성

본 연구에서는 조위 무작위장의 공간경향을 분석하기

위하여 평균해면, 기본수준면, 그리고 대조평균만조 위면 등을 경도와 위도의 함수로 선형회귀분석을 실시하였다. 그 결과 각 기준조위면은 위도에 따른 경향만 나타났다(그림 3). 위도 50°의 Newlyn과 위도 57°의 Dunbar간의 영국 평균해면(British M. S. L)은 5.15cm/°의 상향경향을 보였다. 이 사실과 기준검조소라는 점을 고려하여 대상해역의 평균해면을 평면으로 간주하고 인천(37° 28' 08", 126° 25' 51"), 군산(35° 25' 06", 126° 37' 36") 그리고

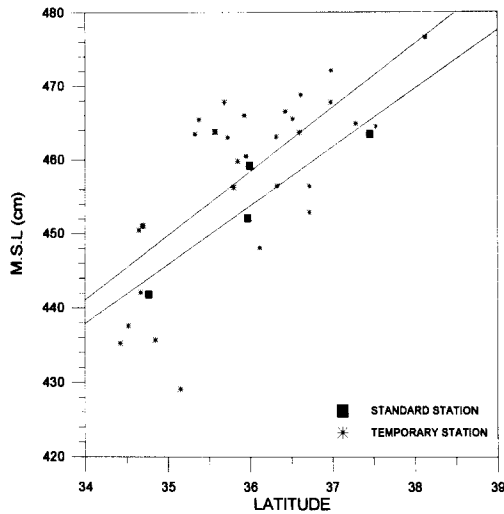


그림 3(a). 평균해면고의 공간경향(위도방향)

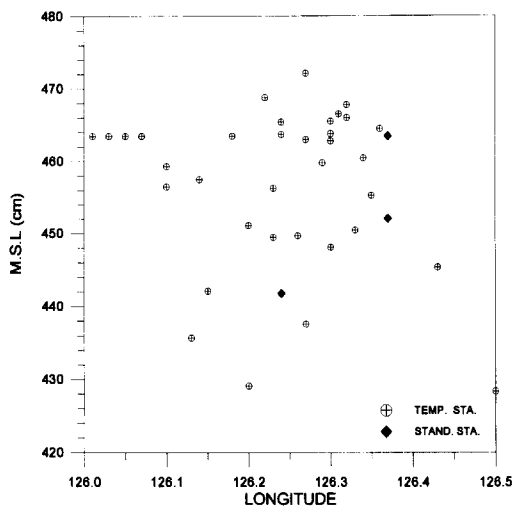


그림 3(b). 평균해면고의 공간경향(경도방향)

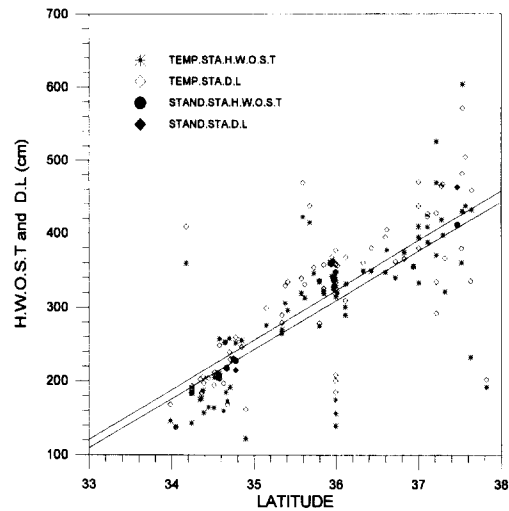


그림 3(c). D.L과 H.W.O.S.T의 공간경향

목포(34° 46' 41", 126° 23' 33") 등의 3개점의 영점표고에 가장 근접한 평면을 신뢰성 있는 평면으로 간주하였다. 이 평균해면고의 평면과 농진 40개소의 평균해면이 최소자승오차를 가지도록 조정한 결과 농진 자료값은 평균 7cm 높았다. 따라서 농진의 평균해면고는 이값만큼 하향조정하여 사용하였다. 그러나

기본수준면과 대조평균만조위면은 기준점조소의 자료와 임시점조소의 자료가 구별되지 않았다.

평균해면고의 회귀분석 결과 위도방향으로 8.661cm/°

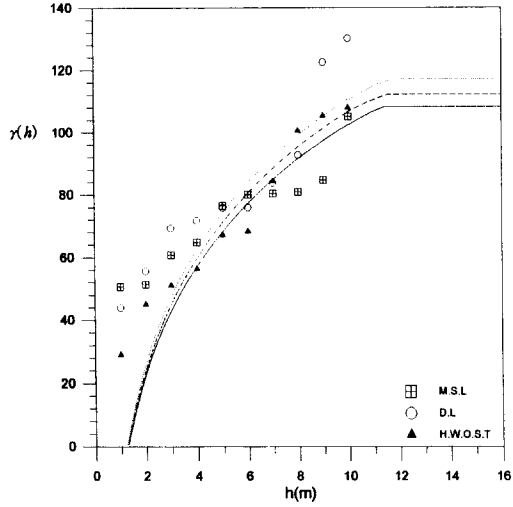


그림 4. 자기분산도

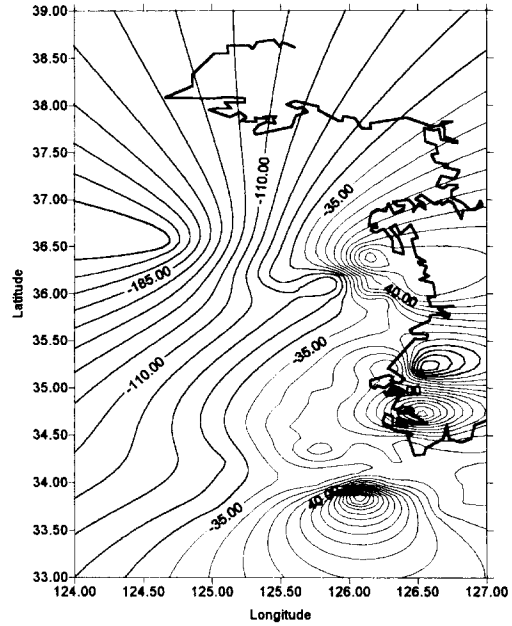


그림 4(b). 등기본수준면도

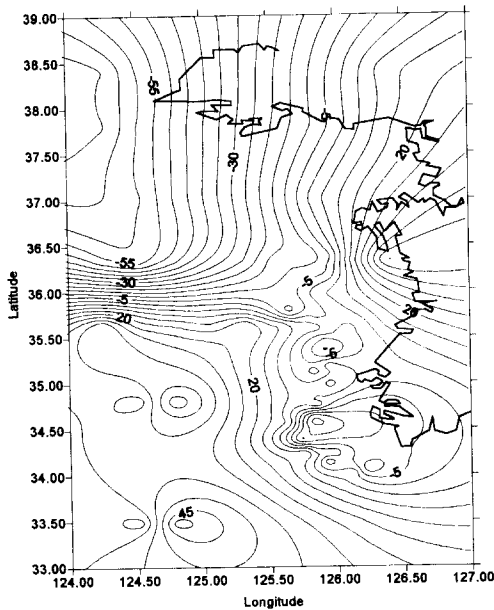


그림 4(a). 등평균해면고도

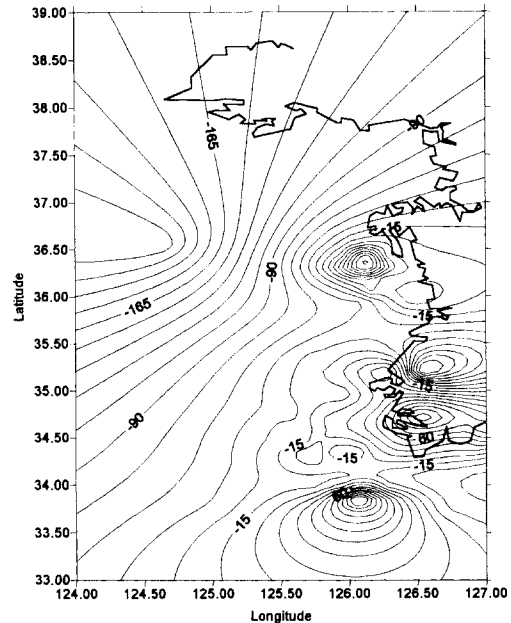


그림 4(c). 등대조평균 만조면도

표 4. 공간경향 분석결과

기준 Drift	\hat{a} \hat{c}	원점 좌표 (위도, 경도)	결정 계수	비 고
평 균 해 면 고	8.661 , 146.61	33° , 124°	0.85	7cm조정
기 본 수 준 면	67.502 , -2107.03	33° , 124°	0.96	-
대조평균 만 조 면	66.716 , -2092.34	33° , 124°	0.55	-

의 상향경사를 보였다. 또한 기본수준면과 대조평균 만조위면은 각각 67.502cm/°, 66.716cm/° 의 상향경사를 보였다.

각 기준 조위면의 확률구조를 대표하는 자기분산식의 차수와 계수를 평가하였다. 차수를 결정하기 위한 기준은 Jackknife가 1.0에 가까운지의 여부를 판정기준으로 채택하였으며 자기분산식의 계수를 산정할 때 관측점의 수를 변경하면서 Jackknife계수의 변동을 고려하였다. 즉 본 연구에서는 Jackknife계수를 산정할 때 18개, 12개, 6개 등의 관측점 수를 변환하면서 계산한 결과 12개의 관측점을 고려하였을 때 Jackknife계수가 가장 적절한 값이었다. 즉 식(3.7)에서 n 이 12로 평가되었다. 그 결과 3개 설계기준조위면이 3차 자기분산식으로 평가되었다. 즉, 식(3.7)에서 k 가 3이다. 이와 같이 평가한 자기분산식의 계수와 Jackknife계수를 표4에 게재하였다. 그림4는 원 자료로부터 산정한 자기분산값과 추정한 자기분산식을 비교한 것이다. 이 그림에서 3개 설계기준조위의 확률구조는 상사임을 시사한다. 기본수준면의 자기분산값과 대조평균만조면의 자기분산값은 평균해면의 자기분산값에 0.005배 한 값이다.

4.3 등 조위면의 특성

본 절에서는 앞 절에서 평가된 자기분산식을 이용하여 서해의 등평균해면고, 등기준수준면, 등대조평균만조위면 등을 크리징기법에 의하여 추정하였다. 기준 조위면을 추정할 때 높이기준을 통일하기 위하여 2.3절에서 신뢰성있다고 판단된 항만국의 측량성과를 기준으로 하였으며, 크리징의 대상영역은 33° ~ 39° E, 124° ~ 127° N이다. 본 대상영역에서 군산내항의 평균해면고를 검증지점으로 채택하였다. 박승우가 제시한 회귀식은 지역 평균해면의 추정식이며, 독립변수로 기준항과 추정지점간의 경·위도 차를 채택하였다. 이식에 의하여 군산내항의 평균해면을 추정해 본 결과 346.6cm였다. 군산내항의 지역평균해면은 343.7cm와 비교하였을

때 2.9cm의 차가 있다. 본 연구에서 추정된 군산내항의 평균해면고는 -10.6cm로 평가되었는데, 군산내항의 평균해면고 -11.4cm와 비교한 결과 0.8cm의 차가 발생하였다. 한편, 기본수준면의 경우 본 연구에서 추정된 값은 -19.0cm이며, 군산내항의 기본 수준면 -19.3cm와 비교하였을 때 0.3cm차가 발생하였으며 대조평균만조위면의 경우 본 연구에서 추정된 값은 34.5cm이며, 군산내항의 대조평균만조위면 33.09cm와 비교하였을 때 1.41cm차이가 발생하였다.

본 연구에서 수행한 등평균 해면고, 등기준 수준면, 등대조 평균 만조위면도는 그림 4(a), 4(b), 4(c)에 게재 하였다. 그림4(a)의 추정 평균해면 값은 관측 평균해면의 공간경향 평면값(그림 3(a))을 뺀 추정 잔차 등치선도이다. 즉, 임의의 점의 평균해면 값을 얻으려면 그림 4(a)의 등치선도의 값에 공간 경향 값을 합하면된다. 기본 수준면과 대조평균만조위에 대해서도 마찬가지이다.

5. 결 론

서해의 검조소분포를 개괄하고 각 검조소의 평균해면 자료와 주요 4개분조 자료를 수집하였다. 수로국이 운영하고 있는 기준검조소와 임시검조소의 수직기준은 지역평균해면이며, 농진의 임시 검조소 수직기준은 M.O.C. 표고이다. 군산과 목포 검조소의 검조의 영점 표고를 조사하여 검토하였다. 既往의 측량성과를 종합 정리하여 가능한 조위관측 기준을 M.O.C 표고기준으로 통일시켰다. 그 결과에 따라 지역평균해면값을 전역 평균해면값으로 변환하였으며 평균해면, 기본수준면, 그리고 대조평균만조면 등의 설계조위기준면을 무작위 변수로 간주하고 확률구조를 분석하였다. 공간확률구조를 대표하는 자기분산 함수를 동정하고 크리징 기법에 의하여 설계 조위기준면을 추정하였다. 이상을 종합하면 다음과 같다.

(1) 농진의 확인 측량 그리고 그 동안 농진이 조사해 놓은 임시 검조소의 영점 표고 등에 의하여 4개 주요 검조소의 T.B.M과 B.M의 관계를 비교해 본 결과 항만국의 측량성과가 보다 신뢰성 있는 것으로 평가되었다.

(2) 설계 기준 조위면을 무작위장에서 기술하고 미관측 지점의 설계 기준 조위를 추정하기 위하여 크리징 시스템을 기술하였다.

(3) 설계평균해면의 공간경향은 위도 1°에 대하여 8.661cm씩 증가하고 있으며, 기본수준면의 지표인 4개 분조의 반조차 값은 위도 1°에 대하여 67.50cm 확폭되

고 있다. 그리고 대조평균만조위의 경우 위도 1°당 66.72cm 확폭되고 있다.

(4) 자기분산 함수식은 3차이며 평균해면, 기본수준면, 그리고 대조평균만조면에서 같은 유형을 보였다.

(5) 미계측 지점에 대한 추정결과를 확인하기 위해서 군산내항 검조소지점을 검증지점으로 택하여 추정해 본 결과 지역평균해면은 2.9 cm, 평균해면고는 0.8cm, 기본수준면은 0.3cm, 대조평균 만위의 경우 1.41cm의 차가 각각 발생하여 참값과 근사했으며, 既往의 연구결과와 비교해 본 결과 유용하다고 판단된다.

본 연구에 사용된 검조자료에는 몇가지 문제가 있다. 첫째, 검조시기가 다르다. 인천항의 경우 1910년대 자료이며 임시검조소의 경우 최근의 자료이다. 둘째, 검조 정도가 다르다. 검조초기의 검조표적, 중기의 간이 검조 의에서 최근의 정밀 검조의까지 다양하다. 검조자료가 기준검조소 주변환경변화로 균질하지 않다. 셋째, 검조 기간이 상이하다. 기준검조소의 검조자료가 1년전후의 장기자료 분석결과인데 반하여 임시검조소의 경우 한달 전후의 단기자료 분석결과이거나 기준검조소값에 의하여 보완한 것이다. 이상에서 추정한 설계기준조위는 연안역 개발을 위한 조사와 예비조사시 또는 연안역 개발에 관련한 조사 또는 설계기준으로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구의 동기는 서울대학교 심재문화재단의 "서해안 간척개발에 관한 연구"에서 비롯된 것이며, 본 연구의 성과를 얻게 한 동재단의 지원에 감사한다.

참 고 문 헌

- 건설부 국립지리원 (1980-82). 연안해역기본조사 보고서(인천, 목포지구).
- 농어촌진흥공사 (1987). 서남해안 조사설계지구 조위 자료, 농어촌진흥공사간척부.
- 농어촌진흥공사 (1989). 서남해안 조사설계지구 조위 자료, 농어촌진흥공사간척부.

박기진 (1995). "하구역에서 지형변화에 따른 조석체계의 변화." 석사학위논문, 부산대학교.

박승우 (1986). 해수면 및 해저퇴적층 변화예측 연구 I.

박승우 (1987). 해수면 및 해저퇴적층 변화예측 연구 II.

박승우 (1988). 해수면 및 해저퇴적층 변화예측 연구 III.

수로국 (1981-1995). 수로기술연보.

수로국 (1995). 조석표.

李錫祐 (1988). 금강 하구 수리 현상 조사, 군산항 건설 사무소.

李錫祐 (1994). 한국 항만 수리지, 집문당.

이재형, 박영기, 황만하 (1984). "피압대수층의 전달계수 동정." 한국수문학회지, 제17권, 제4호.

이재형, 박영기 (1988). "Kriging 해석에 의한 한강유역 호우의 공간분포특성." 전북대학교 논문집, Vol. 30, 자연과학편.

崔秉昊 (1984). "우리나라 精密水準網에 관한 연구." 국립지리원.

崔秉昊 (1994). "우리나라 水準網開發의 沿革과 仁川의 標高 基準." 한국해안해양공학회 소식지.

최병호 (1986). "금강하구의 관측조석." 항만, Vol. 10-3.

최영박 (1984). 항만공학. 문운당.

해운항만청 (1993). 항만시설물설계기준서.

Delfiner, P. (1976). "Linear estimation of nonstationary spatial phenomena." *Advanced Geostatistics in the Mining Industry*, Edited by Guarascio, M., David, M. and Huijbregts, CH.J.D., Reidel Pu. Co., Hingham, MA.

Lee, J.H. (1986). "Aquifer parameter identification with geostatistical technique and numerical model in the ian." *5th Congress IAHR*, Korea.

Matheron, G. (1973). "Intrinsic random functions and their applications." *Adv. Appl. Prob.*, No. 5, pp. 439-468.

〈최종본 접수일 : 1997년 9월 22일〉