

수치고도 모델을 이용한 사천만 해안지역의 3차원 지형분석*

이민부** · 김남신*** · 한균형****

Three Dimensional Analysis Using Digital Elevation Model on the Coastal Landform of the Sacheon Bay, South Sea of Korea*

Min-Boo Lee** · Nam-Shin Kim*** · Kyun-Hyeung Han****

요약 : 본 논문은 경남 사천만을 중심으로 위성영상과 GIS 기법을 이용하여 수치지형도와 수치해도를 결합한 수치고도 모델(DEM) 제작을 통해 육지와 천해를 연계한 해안지형의 분석을 시도한 것이다. 수치고도모델의 제작은 육지 고도 및 해저 수심 레이어 추출, UTM 재투영, 좌표점의 이동과 보간 등의 과정을 거쳐 이루어 졌다. 조류이동, 천해퇴적, 수심 등 해저지형 분석은 Landsat TM 밴드 육안분석, 육지부 마스킹, 밴드합성, 회귀분석 등을 통해 이루어 졌으며 천해 실측자료는 오차를 수정하여 분석에 이용되었다. 수치고도모델에서 분석된 지형요소들은 하천, 선상지, 조류, 단구, 해저퇴적층 등이다. 연안 퇴적작용은 하천 운반물의 영향을 크게 받고 있는데, 특히 진양호의 배수로인 가화천은 계절적으로 여름철에 공급량이 많으며 조류의 영향이 적은 곳에 퇴적층이 잘 발달하였다. 단구지형이 발달한 만안쪽에는 조류퇴적물의 영향이 크고, 소규모 만입은 해안류에 의한 운반물로 폐쇄되는 특성을 보인다. 사천만 동안의 선상지 지형은 해저까지 연장되어 발달하고 있다. 진주만 뱃크는 잔류 구릉이 침수된 것으로 미립물의 해저 퇴적지 역할을 하고 있다.

주요어 : 3차원지형분석, 수치고도모델 제작, 해안지형요소, Landsat 밴드분석, 수치지형도, 수치해도

Abstract : The process of constructing coastal digital elevation model(DEM), for the 3 dimensional analysis, is composed by abstracting land layers for land elevation and water depth, reprojecting UTM, relocating geographical grid, and interpolating works. The geomorphic set of shallow sea, including tidal current, tidal zone deposition, and water depth distribution, was analyzed by eye-search of Landsat TM image, masking of land zone, band combination and regression analysis. Some horizontal differences, between combined DEM and surveyed data of shallow sea, was corrected for analysis. Analyzed geomorphic elements are stream channel, alluvial fan, coastal terrace, tidal current, and shallow sea bank. Results of analysis present that transported fluvial materials influence tidal sedimentation, especially from Gahwacheon river, for the role of artificial draining flooding waters from Jinyang Reservoir, almost in the summer season. In the coastal area with less tidal current, more fine materials are deposited. The influence of currental deposition are higher on small pockets with west-coast of well developed terraces. The lower skirt of alluvial fans developed into the tidal zone of shallow sea. Small pocket-type bays are closed by coastal current, and less influenced from tidal deposition. The bank of Jinju Bay are developed originally from submerging of remnant erosional mountain ranges, and play on the role of trapping fine materials.

Key words : 3-dimensional geomorphological analysis, DEM construction, coastal geomorphic elements, Landsat band analysis, digital topographic map, digital coastal chart

1. 서론

해안지형은 육지와 해양의 동적 상호작용으로 형성되고 변화하며, 해안지역은 거시적으로 기후 및 지각변동, 그에 따른 해수면변동, 사면작용, 하천수문 변동, 변동에 대한 인위적인 영향 등의 결과물이다(Zenkovich, 1967; Bird, 1984; Trenhaile, 1987).

지리학에서의 해안지형 연구는 주로 해안선을 따라 발달한 지형경관을 중심으로 진행되어왔다. 그러나 육지의 해안지형의 변화와 발달은 조간대(tidal flat zone)와 천해의 지형 발달과 깊은 연관성을 가진다. 즉 육상의 지형 발달 과정이 조간대와 해저지형에 영향을 미치며, 또한 조류, 해류, 해저퇴적물 등 조간대나 해안천해의 발달과정이 해안 지형형성과정에 변화를 가져다 준다는 것은 주

* 본 연구는 한국교원대학교 2001년도 기성회 연구비 지원에 의해 연구되었음.

** 한국교원대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, KNUE)(minblee@cc.knue.ac.kr)

*** 한국교원대학교 강사(Lecturer, Department of Geography Education, KNUE)(kns9027@chollian.net)

**** 한국교원대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, KNUE)(knuegeo@cc.knue.ac.kr)

지의 사실이다(박의준, 2000; 정성민, 2000; 강대균, 2001; 서종철, 2001).

3차원 지형분석은 2차원에서 파악되지 않던 지표면의 다양한 정보를 제공한다. 특히 조간대와 천해 지역의 3차원 지형분석은 해안지형 연구에 있어 육지의 지형변화와의 연관성을 설명할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 지표의 열적, 수리적 반사 특성을 이용하는 원격탐사 자료는 3차원 지형정보와 결합될 때 보다 구체적인 분석이 가능하다. 위성영상은 해상도에 따라 다르지만 Landsat의 경우 밴드조합에 따라 하구, 조간대, 그리고 천해 지역의 부유하중의 이동 및 퇴적되는 상태, 간석지의 지형변화, 사면에서의 침식에 의한 토사유출 등의 해안지형 변화를 분석할 수 있다(안충현, 1989; 조명희·조화룡, 1999; 2000). 또한 Landsat 영상에 의한 다과장대 분석을 통해 천해지역의 상대적인 수심 분석이 가능하며 수심측량 자료와 보안을 통해 해저 지형변화까지도 추적할 수 있다(Jensen, 1986; Yoo, 1986; Lee *et al.*, 2001).

이상의 연구 내용들을 위해, 본 연구는 사천만 일대의 해안 및 천해지역에 대한 3차원 지도를 제

작하여 해안지형을 분석하고자 한다. 분석의 방향은 수치고도모델과 3차원 지도상에서 파악되는 해안지형과 해저지형의 특징을 살펴보고 육지해안 지형발달이 인접 천해 해저지형 변화와 어떤 관련이 있는지를 설명하고자 한다.

2. 지역개관 및 연구방법

연구지역은 서부경남의 하동과 사천, 삼천포, 남해도 및 창선도로 둘러싸인 진주만과 사천만이다(그림 1). 기반암은 경상계 누층군이 주를 이루고 사천만을 중심으로 서편은 퇴적암류가, 동쪽은 산성화산암류가 산지 지형을 이룬다(김대철 외, 1988). 지형적으로는 사천만의 서쪽 해안에 연하여 5~15m 고도의 해안단구면들이 발달해 있는 반면 동쪽은 배후산지의 곡구에서 해안까지 전상지 지형들이 잘 발달하고 있다.

사천만으로 유입하는 하천로는 만의 서쪽에서 가화천, 목곡천, 곤양천들이 있고 길호강, 사천천, 죽천천이 등이 유입한다. 가화천과 길호강이 해안과 합류하는 지역에서는 대규모 간석지가 매립되

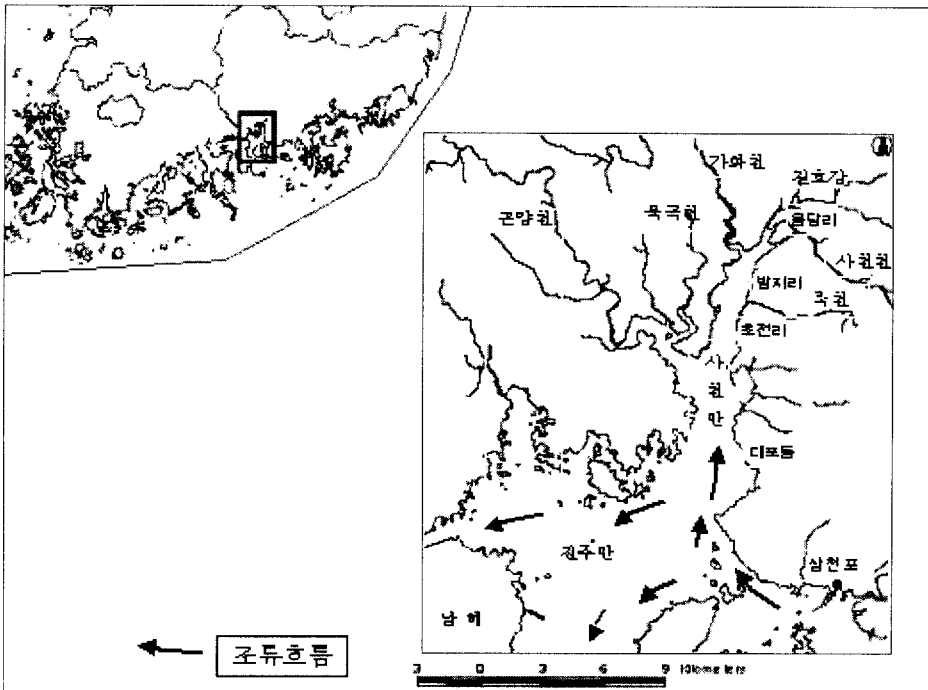


그림 1. 연구지역

어 공항, 공업단지 등으로 이용되고 있다.

사천만으로 유입하는 조류는 삼천포 앞을 통과해 진주만 중앙부의 뱅크<그림 5>에서 일부는 사천만으로 흐르고 남류하며 유속은 1kt 이하이다(장선덕, 1969; 1971)(그림 1). 연구지역의 대조는 3m, 소조는 2.2m이며 평균해수준은 1.65m이다.

연구지역의 지형분석에 사용된 데이터는 2000. 9. 18에 촬영된 30m 해상도 Landsat TM(115-36)과 국립해양조사원에서 1966~1998까지 측량하여 제작한 1:50,000 축척 수치해도(해도번호 236)와 수치지형도 1:25,000 사천, 삼천포, 성내, 설천 도엽이다. 위성영상을 이용하여 주성분분석(PCA)으로 상대적인 수심, 간석지와 천해의 지형, 부유하중 집중정도 등을 분석하였다. 수치해도와 수치지형도를 결합하여 사천만 지역의 3차원 지형분석을 위한 수치고도모델을 제작하였으며 이를 위해 수치해도에서는 등심선과 수심점, 수치지형도에서는 등고선, 고도점을 추출하여 보간하였다. 수치고도모델을 통하여 천해지역의 수심분포도를 작성하고 하천 및 사면지형 해석을 위한 자료를 추출하였으며 이와 병행하여 사천만 지역의 해저단면도를 작성하여 분석작업을 수행하고 이상의 실내분석 작업 결과를 보완하기 위해 현장답사를 실시하였다.

3. 선행연구

해안지형 분석과 관련된 연구는 그 내용에 따라 해안지형, 해저퇴적물, 해류 및 GIS와 원격탐사에 의한 간석지 및 해저 지형분석으로 나누어 볼 수 있다.

사천만 일대의 해안지형에 대한 사례 연구를 살펴보면, 김종욱(1983)의 와룡산 일대 해안선을 따라 발달한 선상지 연구에서, 형태적으로는 층적선상지와 페디먼트의 공통의 특징을 지녔지만 페디먼트의 성격이 강하며 사면의 퇴적물은 포상홍수에 의해 형성된 것으로 분석하였다. 윤순옥(1996)은 삼천포시 향촌동과 사등동 일대 퇴적층에 대해 화분분석 결과 그 형성시기가 홀로세 해수면 변동으로 형성된 것으로 파악했다. 다른 해안 지역의 경우, 정성민(2000)은 순천만의 자연지형 변화 연구에서 만입지의 지형변화가 인간의 간섭으로 토사가 순천만으로 유입됨에 따라 만의 수심이 얕아

져 습지 및 새로운 식생군락이 형성되었다고 보고 있다. 박의준(2000)은 순천만의 퇴적환경변화에 대해 인위적 요인이 크며, 하천영역의 우세지역, 하천과 조류 동적평형지역, 조류의 영향을 받는 지역에 따라서 공간적인 퇴적환경의 변화가 다르다고 하였다.

김대철 외(1988)는 진주만 해저의 퇴적물 기원에 대하여 점토광물 분석 결과 illite, kaolinite, chlorite 등의 비중이 높으며 그 기원은 육상 풍화물로 해석하였다. 사천만 지역의 퇴적물 입도는 가화천을 통한 남강댐 방류의 영향으로 조립질이 우세하고, 남쪽의 진주만 일대는 상대적으로 세립질로 분석되었다. 또한 진주만 중앙부 뱅크에 퇴적된 물질은 관곡천에서 진교만으로 유입된 것으로 보고 있다. 장선덕(1969; 1971)은 진주만에 대한 해양학적 연구에서 해수의 유동은 진주만 중앙에 있는 T자형 뱅크를 중심으로 조류의 방향이 바뀌는데 일부는 사천만으로 유입하였다가 다시 남류하는 것으로 보고 있다. 조류의 교차지역에서는 와동류가 형성되어 상대적으로 깊은 해저 지형을 형성하는 것으로 보고 있다. 그의 연구에서 해저 지질은 이토이고 강하구 부근은 사질성 이토나 패각 및 기타 퇴적물로 구성되어 있다고 하였다.

박의준(2001)은 Landsat TM의 밴드 조합과 NDVI를 분석하여 강화도 간석지 미지형을 조상대, 조간대, 조하대 및 천해 지역으로 구분하였다. 류주형(2001)은 곰소만일대 조간대의 지형변화 연구에서 현장조사 자료, 원격탐사 및 GIS를 이용하여 제작한 수치고도모델을 이용하여 9년간의 지형변화를 분석하였다. 또한 표층퇴적물의 입도분포를 파악하기 위해 Landsat TM과 입도별 밴드와의 상관관계를 구한 결과 5번 밴드에서 높게 나왔으며 특히 입도분석에서는 medium sand class 분포 정도는 파악이 가능하다고 보았다. 류주형 외(2000)는 곰소만을 대상으로 다양한 조석시간대에 촬영된 RADASAT, IRS IC 등의 위성자료를 이용하여 해안경계선을 추출한 다음 해안선 수준측량에서 획득된 자료를 이용하여 조간대의 간석지지형의 수치고도모델을 제작하였다. 양전섭(1997)은 주문진 일대의 해저지형도를 작성하기 위해 Landsat TM 영상을 이용한 주성분분석과 단일밴드 선형 알고리즘을 통하여 20m이내의 수심도를 작성하였

다. 안중현 외(1992)는 여러 시기에 획득된 Landsat TM 영상을 이용하여 수집된 고도자료료를 spline 보 간법을 적용하여 조간대 지역의 수치지형모델을 작성하였다. 조명희·조화룡(1999; 2000)은 줄포만 지역의 간석지 미지형을 분류하기 위해 Landsat TM 영상을 이용하였으며, 여기서 간석지 지형에 대해 ISODATA에 의한 무감독분류 기법을 적용하여 mud flat, mixed flat, sand flat으로 구분하였다.

Wimmer *et al.*(2000)은 네델란드 Wadden 해를 대상으로 InSAR 영상을 이용하여 2.5m 간격의 수치고도모델을 제작하였다. 또한 Greidanus *et al.*(1999)은 Wadden 해 지형을 대상으로 InSAR과 LIDAR를 이용한 수치고도모델의 정확도를 비교분석하였다. Chen and Rau(1998)는 대만의 해안사주의 지형변화를 분석하기 위해 SPOT영상을 이용한 수치고도모델을 제작하였다 Lillesand and Kiefer(2000)은 전자파 감지방식이 다른 위성(Landsat, SPOT 등)과는 달리 InSAR와 같은 능동적 방식을 채택하면 수치고도모델 제작에 그림자가 나타나는 산간지대, 고층건물 지역 및 조간대 등의 접근성에 제약을 받는 지역에 적용하기에 유리하다고 하였다. Lyzenga(1981; 1985)는 위성영상을 이용하여 수심을 측정하는 방법 중에 단일밴드 알고리즘의 원리를 소개하였는데, 파장은 수심이 증가할수록 감소한다는 원리를 이용하여 파장감소지수(attenuation coefficient)를 개발하였다. 한편 Martinez *et al.*(1988)은 다중밴드 알고리즘을 이용하여 밴드비율에 따른 밴드들의 주성분분석을 통한 파장감소지수를 제시했다.

이상의 연구성과들은 천해와 이웃한 지형들과는 분리되어 접근하기 때문에 해안지형 발달에 영향을 미치는 각종 요인들을 분석하거나 해석하는데 직접적인 도움을 주지 못한다. 뿐만 아니라 GIS와 원격탐사에 의한 연구는 기존의 초음파에 의한 수심측량의 정확도를 넘지 못하는 연구단계이기 때문에 기법적인 부분에 치우치는 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 보완하는 방안으로 육지와 천해 지역의 지형을 연계시킬 수 있도록 수치지형도와 수치해도를 결합 수치고도모델 제작하여 지형요소분석을 시도한다.

4. 수치지형도와 수치해도를 이용한 수치고도모델제작

연구에 사용된 수치지형도(dxf 포맷) 제작에는 1:25,000으로 성내, 설천, 사천, 삼천포 도엽과 수치해도(dxf 포맷) 1:50,000 축척 해도번호 236을 사용하였다. 수치지형도는 중부원점(127)과 동부원점(129)를 기준으로 Bessel 타원체를 적용한 횡측메르카토르 도법(TM)을 채택하고 있다. 이에 반해 연구지역의 해도는 Bessel 타원체를 적용한 UTM (Zone 52)을 사용하고 있다. 그리고 수치고도모델을 제작에 필요한 고도정보는 수치지형도에서는 등고선(7111, 7114), 표고점(7217), 삼각점(7311), 수준점(7312) 레이어에, 수심에 관한 정보는 수치해도의 등심선(depcnt), 수심점(soundg) 레이어에 저장되어 있는데, 우선 고도와 수심과 관련된 레이어들을 추출하였다. 그런데 수치고도모델을 제작하기 위해서는 먼저 육상과 해상의 TM과 UTM의 상이한 투영법을 일치시켜야 한다. <그림 2>는 이러한 과정들을 포함한 수치고도모델 제작의 전체 과정을 보여준다.

수치지형도의 경우 연구지역은 투영원점이 128°점이지대에 걸쳐져 있어 4도엽의 TM에 의해 지도들이 합쳐지지 않으므로 UTM 52 WGS84체제로 재투영하여 추출된 레이어를 합쳤다. 수치해도는 UTM Zone 52로 통일하여 WGS84로 통일하였지만 수치지형도와는 일치하지 않고 1,000m의 내외

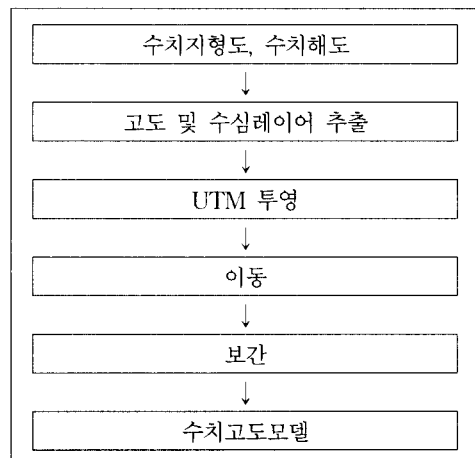


그림 2. 수치고도모델 제작과정

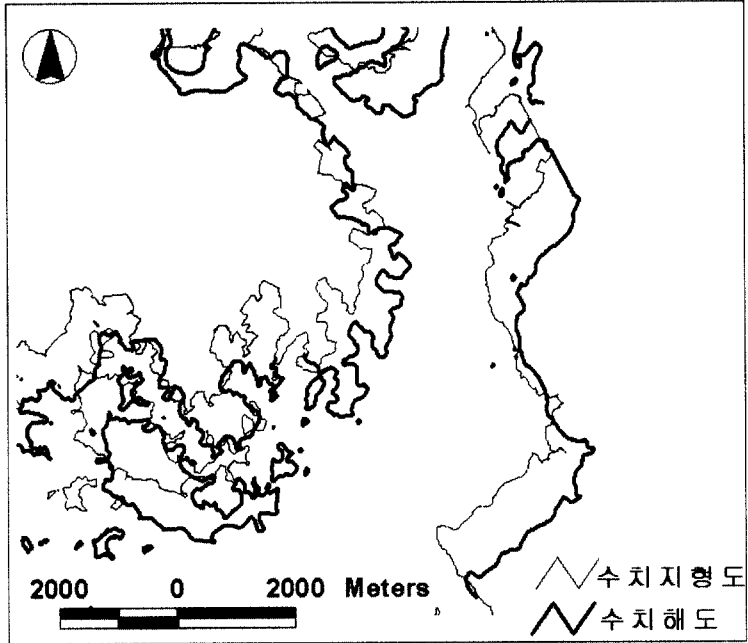


그림 3. 사천만 해안선의 수치지형도와 해도의 수평오차

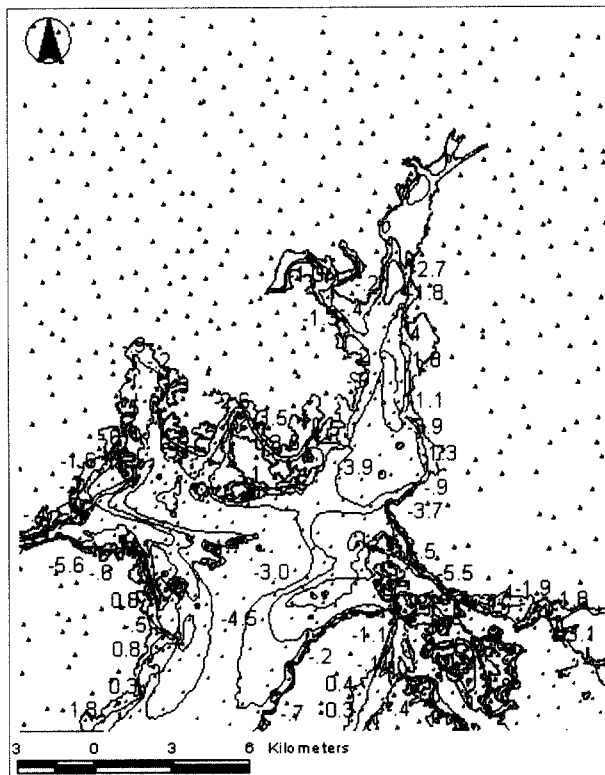


그림 4. UTM에 의한 지도의 결합

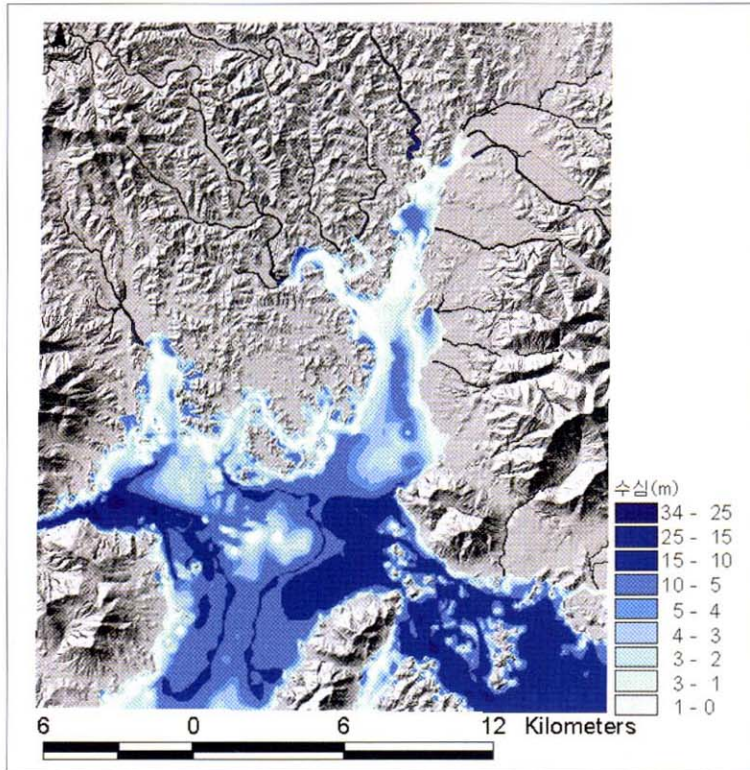


그림 5. 사천만의 수치고도모델

의 수평오차가 발생하였다(그림 3). 두 지도간의 오차에 따른 변위를 일치시키기 위해 수치지형도의 해안선을 기준으로 해도의 수심점과 등심선을 이동시켰다¹⁾(그림 4).

수치지형도와 수치해도의 고도 및 수심관련 레이어들을 각각 결합한 다음에는 수치고도모델을 위한 보간을 실시하였다. 구체적인 3차원 지형을 표현하기 위해 보간과정에서 고도정보 이외의 하천 및 저수지 관련 정보를 사용하였다. 즉 데이터 보간은 Arcinfo의 Topogrid를 이용하여 고도관련 정보와 하천 및 저수지를 입력하여 10m 간격의 수치고도모델을 제작하였다(그림 5).

5. Landsat TM에 의한 해저지형 분석

천해의 해수면은 인근육지 기원 및 조류에 의해 이동되는 물질들이 해수면에 가깝게 부유하면서 이동되고 있음을 위성사진에서 파악할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해저지형 발달에 영향을 미

치는 부유하중의 이동에 대한 경향을 파악하기 위해 천해에 대한 밴드 분석을 실시하였다. Landsat 밴드는 부유물질의 이동과 집적 상태, 10m 내외의 천해에 대한 상대적인 수심의 개략적인 분포를 파악할 수 있다(양전섭, 1997; Lee et al., 2000; Lyzenga and Kiefer, 2000). 또한 이러한 밴드분석 결과와 실측 해도에서 추출된 수심정보를 바탕으로 수심도를 제작하였다. 이 수심도는 밴드 상에서 나타나는 천해지역의 부유하중이 실제로 수심에도 영향을 미치는지에 대한 경향을 파악할 수 있게 해준다.

일반적으로 위성영상에 의한 수심도 제작은 여러 시기의 영상을 이용하여 조간대의 지표환경에 대한 정밀 분석을 한 후에 실시한다(안중현 외, 1992; 조명희·조화룡, 1999; 2000). 그러나 본 연구에서는 부유하중에 의한 해저수심의 변화 과정을 파악하기 위해 밴드분석에 의한 수심 정보에 대해 실측 수심정보를 변수로 한 선형방정식을 통하여 수심도를 구하였다. 이 방법은 상대적으로 수심이 잘

표 1. 주성분분석에 의한 Eigenvalue

주성분 \ 밴드	1	2	3	4	5	7
1	0.85	-0.30	0.15	-0.33	-0.03	-0.19
2	0.32	-0.06	-0.12	0.29	0.14	0.87
3	0.28	0.06	-0.48	0.71	0.01	-0.41
4	0.20	0.59	0.69	0.32	-0.13	-0.02
5	0.17	0.68	-0.36	-0.39	0.45	-0.01
6	0.08	0.27	-0.33	-0.17	-0.8	0.14

나타나는 위성영상 밴드를 독립변수로 하고 실측 수심을 종속변수로 한 회귀방정식을 구해 밴드의 화소값을 수심으로 전환하는 방법이다.

연구지역의 위성영상은 Landsat TM으로 2000년 9월 5일에 촬영된 영상이다. 위성영상은 BIL 형태로 공급된 것으로 Imagine 8.5로 처리하였다. 영상을 통한 사천만 연안의 부유하중 이동관계와 수심 분석과정은 <그림 6>과 같다

Landsat 영상의 기하보정을 위한 지상기준점

(GCP)은 수치지도상에서 인식된 12개의 주요 교차점을 찾아 Image-to-Vector 방식으로 지정, 사용하였으며 RMS Error는 0.5로 Landsat의 해상도인 30m 범위내에서 만족하였다. 이미지의 변환은 cubic convolution으로 샘플링으며, 이미지 보정 후 사천만 해안을 따라 이동되거나 집적되고 있는 부유하중의 경향을 파악하기 위해 육지지역을 마스킹 처리하였다(그림 7).

마스킹 처리된 영상에 대해 주성분 분석을 한

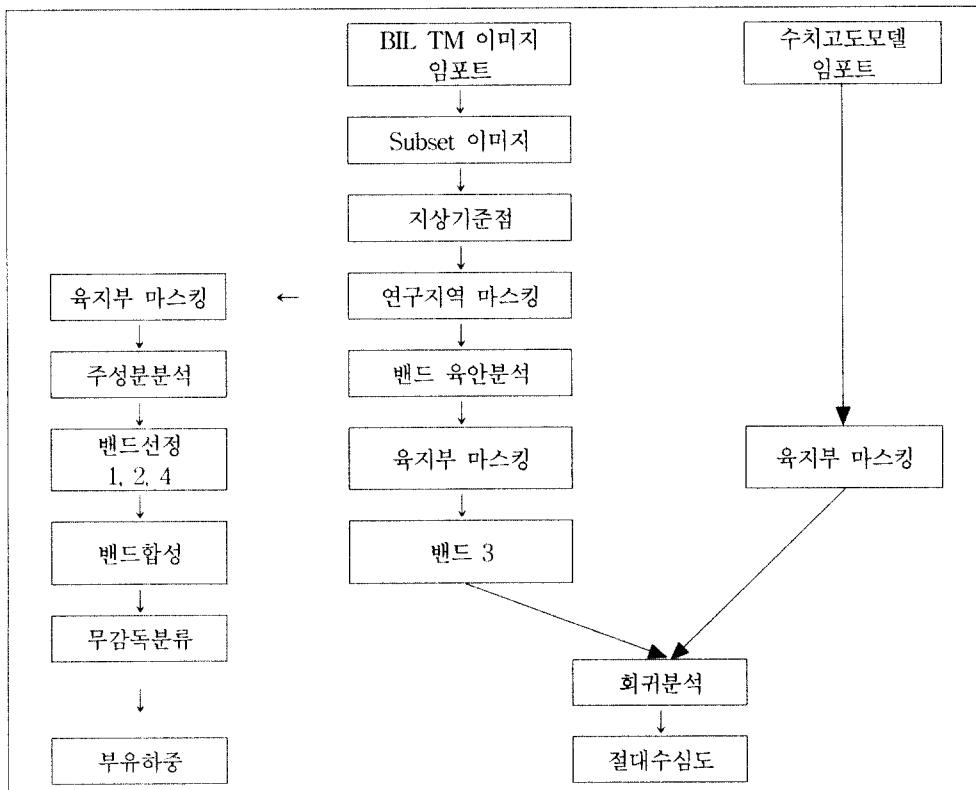


그림 6. Landsat에 의한 해저지형분석

결과 제 1 성분은 총분산의 90%로 설명하는 것으로 분석되었으며 Eigenvalue 값이 높게 나타나는 밴드1(0.85), 밴드2(-0.30), 밴드4(-0.33)을 선택하여 6등급으로 무감독분류를 실시하였다(표 1). 그 결과는 <그림 8>과 같다.

해저의 상대적인 수심을 분석하는 방법에는 기존의 연구에서 적용한 주성분분석 및 다중밴드 선형알고리즘을 적용하는 방법이 있지만 대체로 만족스런 결과를 얻지 못하였다(류주형, 2001; Martinez *et al.*, 1988). 그것은 위성영상의 촬영시기 및 파장에 영향을 미치는 여러 인자에 따라서 결과가 달라질 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 먼저 밴드별 육안관찰을 통해 해안의 미지형(microrelief)과 수심이 잘 드러나는 밴드를 찾아 회귀분석을 실시하였다. 일반적으로 Landsat 영상을 이용한 수심도 제작에서 주로 사용되는 밴드들이 수체의 반사도가 높게 나타나는 가시광선대를 사용하는데, 밴드1이 해안의 수심도에 적합한 것으로 알려져 있다(Douglas, 1996; Web 자료, 1998; Abdullah *et al.*, 2000). 그러나 계절, 탁도, 밀도, 대기의 상태, 지형 등 지표의 열적, 수리적 상태에 따라서 분광적 특성이 다르게 나타날 수 있기 때문에 모든 지역에 적용할 수는 없다(Jensen, 1986; Lillesand and Kiefer, 2000).

수체(wate body)는 밴드 1, 2, 3에서 반사도가 높고 적외선 밴드대에서는 흡수된다. 따라서 회귀 분석에 적용될 밴드들을 육안 분석한 결과, 밴드 1과 2는 반사도가 높아 파장에 의한 색조가 차이가 잘 반영되지 못했고, 밴드 4, 5, 6은 흡수율이 높아 검게 나타났다. 그 결과 육안관찰에서 해저의 상태를 잘 반영하는 3번을 선택하여 분석에 사용하였다. 이 3번 밴드를 독립변수로 하여 수치해도에서 보간처리된 수치고도모델을 마스킹 처리한 후 얻은 수치고도를 종속변수로 하여 다음과 같이 회귀 방정식을 구할 수 있었다.

$$\text{수심} = \text{밴드3(DN)} \times 0.438 - 16.698$$

그 결과는 <그림 9>와 같으며 수치고도모델과의 상관계수는 0.71로, 평균수심은 -10.1m로 계산되었다. 이 값은 실제 측정 자료인 수치해도에서 계산된 평균수심 -7.3m와는 2.8m의 차이를 보이

는데, 이것은 Landsat 영상에서의 분석 한계를 보여주는 것으로, 계산값은 근사치만을 나타낸다고 볼 수 있다.

6. 토론 : 지형요소의 해석

수치고도모델분석의 결과 천해의 해저지형의 발달은 해안지형 요소의 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 여기서는 크게 하천지형, 사면지

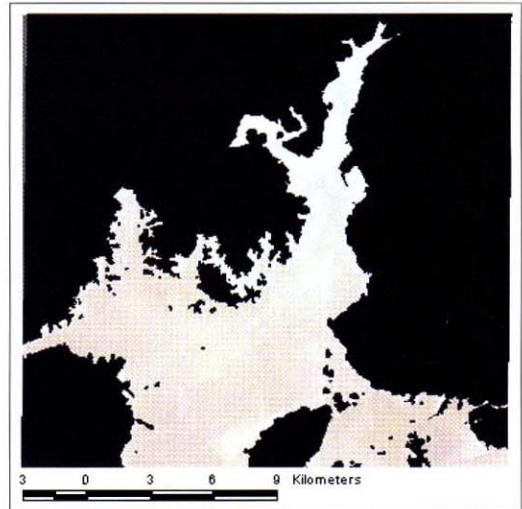


그림 7. 마스킹처리

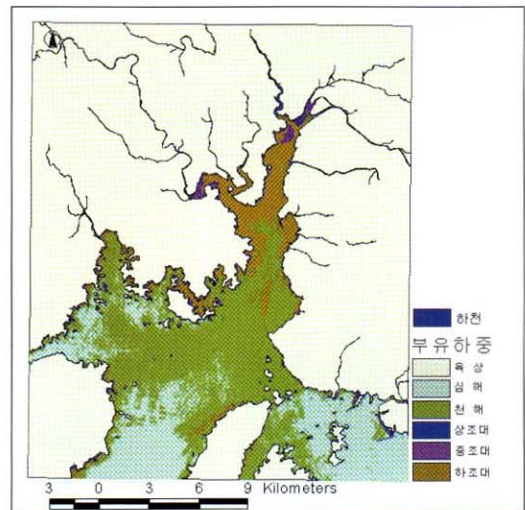


그림 8. 해저의 부유하중

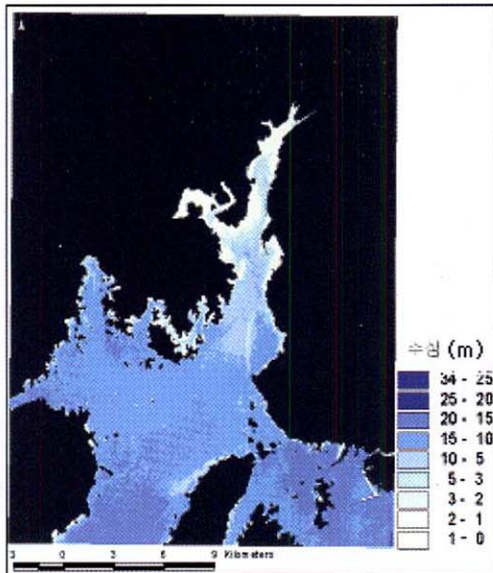


그림 9. 밴드3 분석에 의한 수심

형, 소규모 만입지, 해안단구 그리고 해저뱅크 등을 중심으로 육지지형과 해저지형의 특징들을 비교 분석하였다. 영상분석과 수치계산 등 실내분석 결과를 보완하기 위해 야외조사를 실시했으며 필요한 부분은 단면도로서 해저지형의 윤곽을 파악할 수 있었다(그림 10).

1) 하천에 의해 주도 되는 지역

연구지역의 주된 대상 하천들은 가화천, 길호강, 사천천, 목곡천 등이며 이들 하천에서 운반되는 부유하중들은 천해지역의 주요 퇴적물 공급원이다. 이들 해저 지형은 위성사진 분석에서 간석지로서 나타나고 있다(그림 8). 이들 하천 중 특히 가화천은 계절적인 영향이 뚜렷한 하천이다.

가화천은 원래는 작은 하천이었으나 진주 진양호의 남강댐의 수위 조절을 목적으로 인공적 방류를 위한 배수기능으로 1969년 굴착 조성된 것이다. 댐의 방류 때에는 일시적으로 다량의 물을 방출하기 때문에 하천의 급류에 의해 하천의 곡폭이 원래보다 크게 확장된 상태이다(그림 11의 사진 1). 뿐만 아니라 지속적으로 하천에서 토사를 공급하기 보다는 주로 여름철 호우시에 남강댐 수위가 급상승할 때 실트 및 조립질의 물질을 다량으로

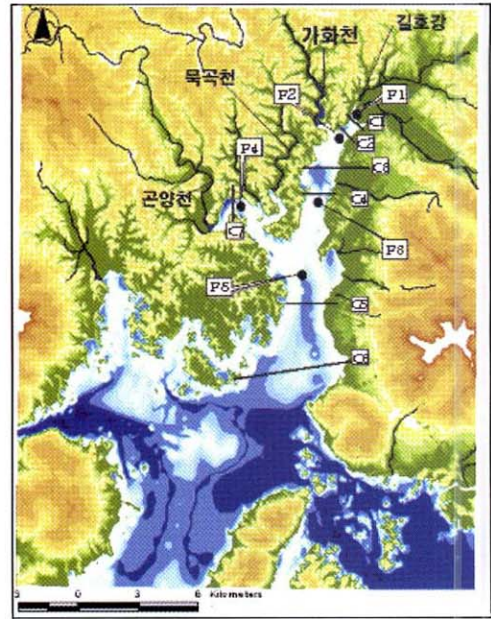


그림 10. 야외조사위치(P)와 단면도번호(C)

사천만의 입구에 배출한다(김대철 외, 1988). 사천만의 용당리 일대 하구지역은 길호강과 사천천에서 지속적으로 공급되는 부유하중 토사들이 퇴적되는 곳이다. 이렇게 조류에 의해 운반되는 토사의 양보다 하천에서 의한 공급량이 많아 간석지가 넓게 발달하고 만입하는 하구내부에서는 망상하도가 발달한다. <그림 12>의 단면도 1은 위성영상에서의 현해수면 상태에서 이루어진 것으로 해면하의 퇴적지형은 만조나 대조시 또는 홍수기에만 잠기는 간석지라 할 수 있다.

2) 조류에 의해 주도되는 지역

방지리의 일대의 가화천 하구 지역은 가화천에 의한 토사의 공급도 많은 지역이지만 진주만에서 복류하는 연안류가 만입에 막혀 급회전하면서 하천류를 만나 와동류(eddy current)가 형성되는 부분이기도 하다. 따라서 이곳에서는 공급된 토사들이 조류에 의해 멀리는 이동하지 못하고 재배치되어 쌓이게 된다. 이때 조류는 만의 중앙부보다는 해안선을 따라 이동하며 중앙부가 오히려 퇴적되는 경향을 보인다(그림 11의 사진 2). 빨지역의 단면도상에서도 이 같은 사실을 확인할 수 있다(그림

12의 단면도 2). 그렇지만 토사의 공급이 계속되면 장기적으로는 만의 중앙부부터 육지해안 쪽으로 퇴적이 진행될 것으로 판단된다. 그림8에서 갯벌지역(하조대)으로 분석된 곳은 현재 1m 정도의 해수면으로 조류에 의해 주도되고는 있지만 계속되는 토사공급으로 해저에는 상당량의 퇴적층이 형성되고 있다.

3) 선상지 사면지형이 발달한 지역

사천만에서 선상지 지형으로 인식되는 곳은 초전리와 대포동 해안지역이다. 사면의 형태는 곡구에서 완만하게 전형적인 선상지 형태의 부채꼴 형태로 사천만으로 이어진다(그림 11 사진 5). 그림 12의 단면도 3(초전리)과 5(대포동)는 선상지의 사면지형이 해저로 연장되어 있는 모습을 보여주고 있는데, 특히 초전리에서는 비교적 경사가 급하게 해저로 이어지고 있다. 초전리 선상지 중앙을 관통하여 흐르는 죽천천에서 토사가 공급되고 있지만 조류에 의해 최후 빙기때 형성된 사면(윤순옥, 1996)의 원지형이 유지되고 있는 모습이다. 이러한 단면은 육지의 선상지 사면의 침식기준면이 해저로 연장되고 있는 것으로 보인다. 마찬가지로 대포동 일대의 해저지형도 이 같은 맥락으로 해석되나 조류에 의한 간석지의 발달이 초전리보다는 잘 이루어져 육지지형의 연장이 희미해지고 있다.

4) 만안 단구에 지역

사공섬을 중심으로 서쪽은 해발고도 10m 내외, 동쪽은 5m 정도의 해안단구가 발달해 있다. 일반적으로 단구퇴적물은 해저의 토사공급원에서 조류에 의해 이동되는 것으로 알려져 있다. 그런데 이곳은 섬의 안쪽으로 거대한 조류의 와동류가 형성되고 있어 만의 중심부가 타원형으로 깊게 나타나고 해안쪽은 토사가 퇴적되는 경향을 보인다. 그렇지만 현재의 영상에서는 인근 조류의 작용이 약하고 인근 하천에서 공급되는 부유하중의 영향으로 만의 중심부가 전체적으로 퇴적되고 있는 상태로 보인다. 이는 <그림 11>의 <사진 3>에서도 중심부에 조립질의 실트와 모래들이 퇴적되고 있음을 알 수 있다. <그림 12>의 단면도 4에서도 이 같은 해저

지형의 단면 특징이 확인된다. 즉 만의 외곽에 미약한 조류의 갯골이 형성되어 있고 중앙에는 퇴적층의 모습이 보인다. 이는 갯골의 중심부는 조류가 빠르고 갯골에서 멀어질수록 흐름이 느리기 때문에 주로 퇴적물이 중앙부에 집중되기 때문으로 보인다.

5) 소규모 만입 지역

해안선의 굴곡이 있는 소규모 만입지역에서는 만의 내부가 깊고 만의 입구쪽은 얇은 경향을 보인다. 이는 조류들이 유속의 관성에 의해 해안선 기복을 무시하고 직진하면서 부유물의 퇴적으로 만입을 막아 내부지역을 고립시키기 때문으로 보인다. 즉 만입부 지역은 조류의 흐름이 느려지면서 이동된 토사들의 퇴적이 진행되고 오히려 내부는 퇴적이 적게 진전되는 형태이다. 그렇지만 시간이 지나면서 만의 내부도 인접사면에서 공급되는 조립질의 물질과 조류에 이동되어온 부유하중으로 매립이 진전되는 것으로 판단된다(그림 11의 사진 5; 그림 12 단면도 7). 단면도 상에서도 만의 내부는 깊게 나타나고 있지만 만입부로 향하면서 낮아지는 형태를 관찰할 수 있다.

6) 해저퇴적지역

사천만과 진주만이 접하는 중앙부에는 해저 뱅크가 발달되어 있다. 뱅크는 원래 지난 빙기 말에 침식과정에서 남아있는 잔유 구릉들이 해진기 때 해저에 남아 있는 것이다(Lee, 1987). 그런데 뱅크가 발달한 지역은 조류의 흐름 방향을 변화시키거나 일시적으로 정체시키는 역할을 하기 때문에 조류를 따라 이동되는 점토 중심의 미립토들을 퇴적시키는 기능을 한다. <그림 12>의 단면도 6에서와 같이 전체적으로 비교적 수심이 깊지만 뱅크를 중심으로 낮은 것을 확인할 수 있다.

7. 결론

수치지도와 수치해도를 UTM 도법으로 결합하여 제작된 수치고도모델과 Landsat TM 위성영상과 GIS를 이용하여 육지 및 해저지형을 연계한 해안지형을 분석하였다. Landsat TM의 밴드분석 자

료와 실측 해저자료와는 약간의 차이가 있으나 이들을 결합하여 사천만 연안에서의 하천퇴적물, 조류 및 부유물 이동 등을 분석하였다.

수치고도모델 분석의 대상이 된 해안지형 요소들은 하천지형, 사면지형, 소규모 만입지형, 단구지형, 갯골과 해저 뱅크 등이다. 하천운반물 중 조립

질은 진양호 수위 조절을 위한 가화천 방류에 의해 많이 유출하고 있다. 진주만과 사천만 중앙부로 유입된 퇴적물들은 조류에 의해 재배치되는데, 특징적인 것은 조류의 흐름이 해안선을 따라 이루어지므로 만의 중앙부에 상대적으로 퇴적층이 잘 형성되고 있다.

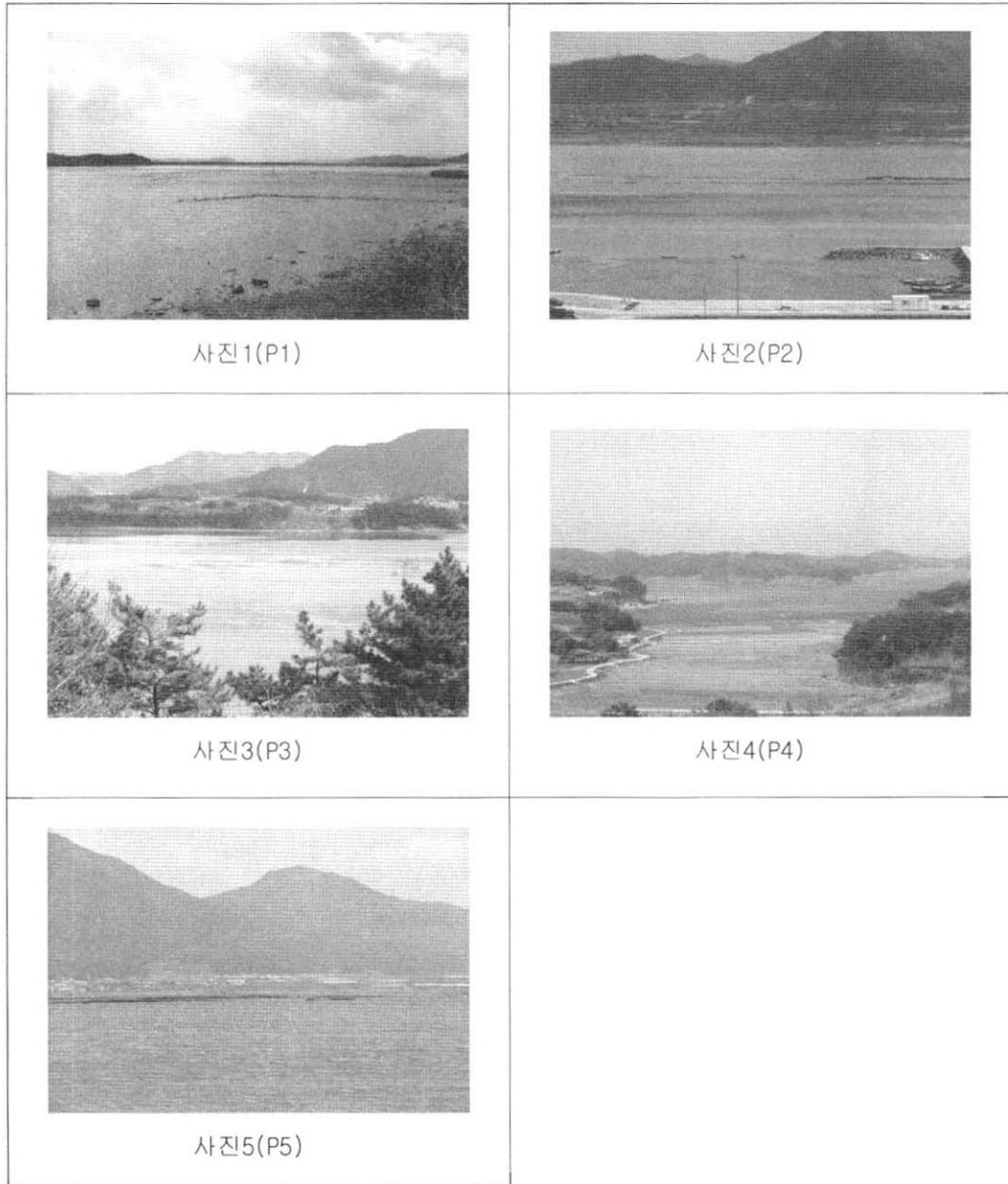


그림 11. 지형요소 해석을 위한 해안 경관사진

수치고도 모델을 이용한 사천만 해안지역의 3차원 지형분석

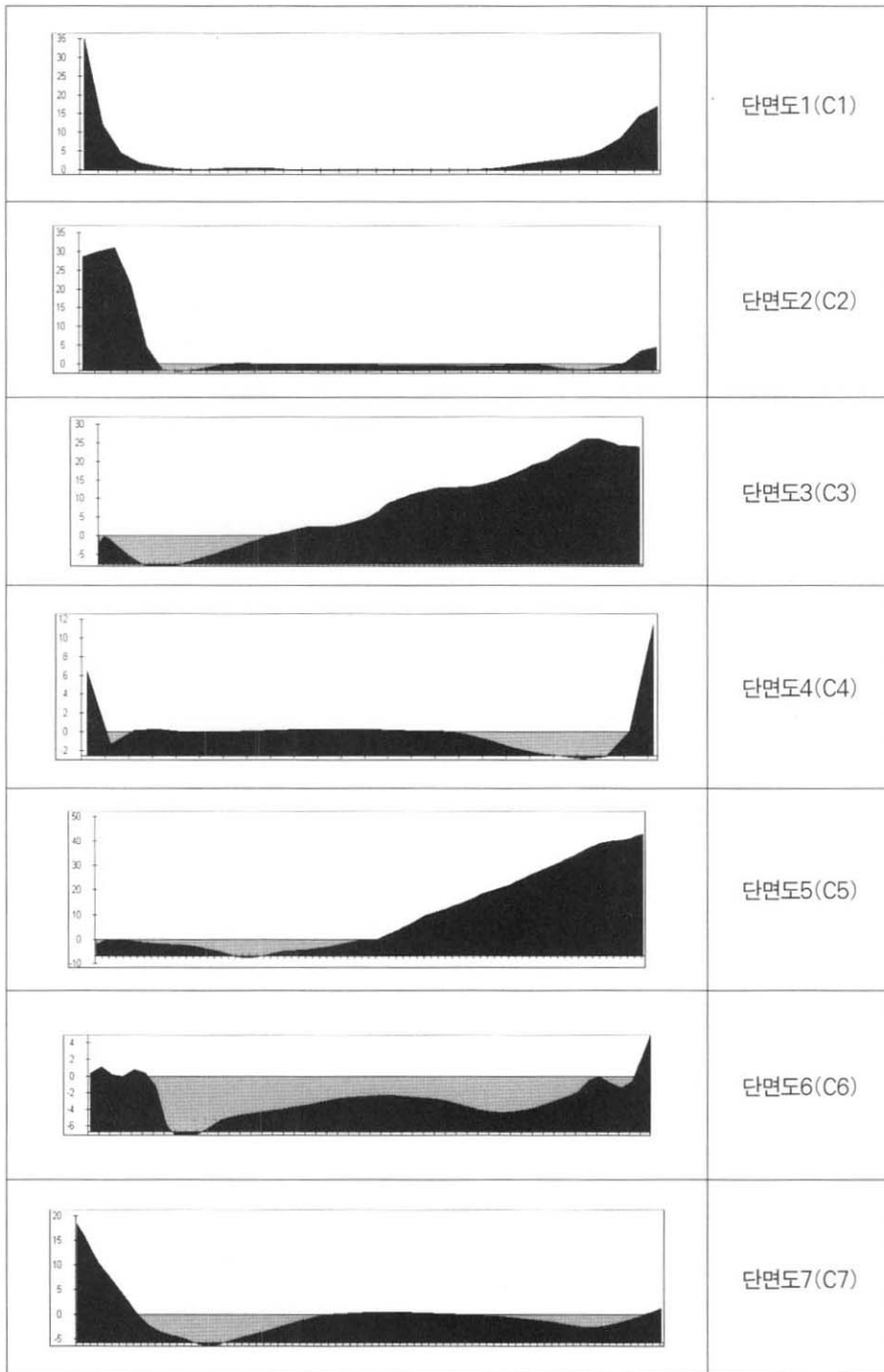


그림 12. 해저단면도

선상지 지형이 발달한 곳에서는 해저쪽으로 침식 기준면이 연장되면서 간석지와 연결되고 있는 모습을 보여준다. 단구지형이 발달한 곳에서는 조류 퇴적물의 공급이 원활하며 해안에서 만의 중앙부 쪽으로 와동류가 형성되면서 수심이 깊어지고 있으며 만의 외곽에 형성된 연안류의 중심부에서 멀어지면서 퇴적층들이 잘 형성된다.

소규모 만입 지역은 조류에 의한 토사이동으로 해저 쪽에 퇴적이 이루어지면서 상대적으로 내만이 깊어 준석호와 같은 역할을 한다. 진주만의 중앙부에는 비교적 대규모의 뱅크가 발달하고 있어 조류이동시 미립질들을 주로 퇴적시키고 있다. 사천만의 전체를 보면 만의 내부부터 퇴적층들이 만 입구쪽을 향하여 발달해 가고 있는 모습이다.

지금까지 육지부쪽 해안지형에 대한 지형학적 연구와 천해의 조류이동, 수심, 퇴적상에 대한 해양학 및 수산학적 연구들이 거의 분리된 채 이루어져 왔으나 본 논문에서는 RS와 GIS를 적용한 수치지형도와 수치해도의 결합 수치고도모델을 통해 육지부와 천해부를 연계한 해안지형 분석을 시도하였다. 이를 통해 보다 유기적이고 3차원적인 해안지형 해석의 가능성을 확인하였다. 차후 보다 정밀한 위성영상, 다양한 밴드조합 분석, 지속적인 시기별 모니터링, 개량된 수치고도모델 제작을 통해 보다 정확한 해안지형 해석이 가능할 것으로 본다.

註

- 1) 이러한 오차의 발생 원인은 다음 두 가지로 추정된다. 하나는 수치해도의 경우 Bessel 타원체를 사용하여 투영했지만 UTM으로 전환과정에서 WGS84를 사용하면서, 발생한 문제, 또 다른 것은 해도 236의 지도제작 과정에서 도곽좌표인 경위선의 위치 지정 오류 등으로 생각해 볼 수 있다. 분석 결과 타원체의 변동과정에서는 상대적인 오차는 낮은 것으로 나타났다. 좌표점의 상이에서 발생된 것으로 분석되었다. 이러한 경우는 수치해도상의 지리사상에 대한 경위도값의 재투영하여 서로 다른 특성의 지도를 결합하기가 어렵다. 따라서 수치지형도를 기준으로 해도의 지리사상을 이동시켜 일치시키는 방법을 적용하였다. 지리사상을 이동시키기 위해서는 두 지도간에 일치하는 지리사상이 필요하다. 이런 경우는 두 지도상에서 공통으로 나타나는 경계선, 교차점을 기준으로 사상들을 이동시키는 것이 적절하다고 본다.

해도는 육지부가 표시되어 있지 않기 때문에 수치지형도와 공통되는 부분은 해안 경계선이었다. 이 해안경계선을 기준으로 하여 수치해도의 해안 경계선을 이동시키면서 그와 동시에 수심점과 등심선을 함께 이동시켜 수치지형도의 해안선과 일치하도록 이동하였다.

文 獻

강대균, 2001, 충청남도의 해안사구, 고려대학교 박사학위논문.

김종욱, 1983, 사천 와룡산 서쪽 산록면의 형상과 형성과정에 관한 연구, 지리학논총, 10, 359-369.

김대철·김희준·송용선·백인성·박맹언·정상용·송시대·황진연, 1988, 진주만 현생퇴적물중 점토광물의 기원에 관한 연구, 한수지, 21(4), 246-258.

류주형·조원진·원중선·이인태·전승수·서애숙·김금란, 2000, 원격탐사 자료로부터 해안선 추출에 의한 조건대 DEM 생성, 대한원격탐사학회지, 16(3), 221-233.

류주형, 2001, 원격탐사를 이용한 곰소만 조건대의 지형변화 및 퇴적물 특성 연구, 연세대학교 대학원 박사학위논문.

서종철, 2001, 서해안 신두리 해안사구의 지형변화와 퇴적물 수지, 서울대학교 대학원 박사학위논문.

안충현·梶原康司·建石隆太郎·유홍룡, 1992, 다시기 위성자료에 의한 조건대 수치지형모델의 작성, 대한원격탐사학회지, 8(2), 131-145.

안충현·이용국·유홍룡·오재경, 1989, 위성자료의 한국 금강하구부근 조건대 지형연구에 대한 응용, 대한원격탐사학회지, 5(1), 1-14.

양전섭, 1997, LANDSAT TM 영상을 이용한 연안 지역의 수심도제작에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문.

윤순옥, 1996, Holocene 후기 삼천포 해양충적평야 지형발달과 환경변화, 한국지형학회지, 3(2), 83-98.

장선덕, 1969, 진주만의 해수유동에 관하여- I, 부산수대연보, 9(2), 95-103.

장선덕, 1969, 진주만의 해저지형에 관하여, 부산수대연보, 9(2), 89-94.

장선덕, 1971, 진주만의 해양학적 연구, 부산수대연보, 11(1), 1-43.

- 정성민, 2000, 순천만 지형 환경변화 연구, 한국교원대학교 석사학위논문.
- 박의준, 2000, 순천만 염하구 퇴적공간의 시공간적 변화, 서울대학교 박사학위논문.
- 박의준, 2001, 간석지 미지형분류에 있어서 위성영상 활용방안에 관한 연구-강화도 지역을 사례로, 지리학연구, 35(2), 139-150.
- 조명희 · 조화룡, 1999, 위성영상을 이용한 출포만 간석지의 미지형분류와 지형적 특성, 대한 원격탐사학회지, 15(3), 217-225.
- 조명희 · 조화룡, 2000 위성원격탐사를 이용한 곰소만 간석지의 미지형과 퇴적물 입도특성 분석, 한국지리정보학회지, 3(1), 44-56.
- Bird, E.C.F., 1984, *Coast*, Basil Blackwell, New York.
- Chen, L.C. and Rau, J.Y., 1998, Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images, *International Journal of Remote Sensing*, 19(17), 3383-3397.
- Douglas, S.L., 1996, Bathymetry from hyperspectral imagery, *Master Degree Thesis*, Naval Postgraduate School, United States Navy.
- Greidanus, H., Huising, E.J., Platschorre, Y., Bree Van, R.J.P., Van Halsema, D. and Vaessen, E.M.J., 1999, Coastal DEMs with cross-track interferometry, *Proceedings of IGARSS*, Hamburg, Germany, CD-ROM.
- Jensen, J.R., 1986, *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Lee, D-S(ed), 1987, *Geology of Korea*, Geological Society of Korea, Kyohak-Sa.
- Lee, K-S., Kim, T-H., Yun, Y-S. and Shin, S-M., 2001, Spectral characteristics of shallow turbid water near the shoreline on inter-tidal flat, *Journal of Korean Society of Remote Sensing*, 17(2), 95-106.
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W., 2000, *Remote sensing and image interpretation*, John Willey and Sons.
- Lyzenga, D.R., 1981, Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data, *International Journal of Remote Sensing*, 2(1), 71-82.
- Lyzenga, D.R., 1985, Shallow-water bathymetry using combined Lidar and passive multispectral scanner data, *International Journal of Remote Sensing*, 6, 115.
- Martinez, A.B., Joy, R.T., Kalcic, M.K., Terrie, G. and Haimbach, S.P., 1988, *Adaptive estimation of water depth using multispectral remote sensing*, Proc. Soc. Photo-opt. Instrum. Eng. 925, 222.
- Trenhaile, 1987, *The geomorphology of rock coasts*, Charendon Press, Oxford.
- Wimmer, C., Siegmund, R. and Moreira, J., 2000, Generation of high precision DEMs of the Wadden sea with airborne interferometric SAR, *IEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2234-2245.
- Yoo, H-R., 1986, Three dimension study of the tidal flat geomorphology in the Kum river estuary by multirate image analysis, *Journal of Korean Society of Remote Sensing*, 2(2), 95-106.
- Zenkovich, V.P. 1967, *Processes of coastal development*, Trans. by Fry, D.G., ed. by Steers, J.A., Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Abdullah, K., Matjafri, M.Z. and Din, Z.B., 2000, Contribution from remote sensing in updating bathymetric chart. <http://www.gisdevelopment.net/aars/2000/ps3/ps311pf.htm>.
- <http://www.geo.wvu.edu/geog455/spring98/06/project/intro.htm> Modeling bathymetry utilizing remote sensed data: bathymetric calculation on the North coast of the Dominican Republic.

(접수 : 2003. 4. 3, 채택 : 2003. 5. 7)