

두만강 하류 사구의 분포와 변화에 관한 연구*

이민부** · 김남신*** · 이광률*** · 한 옥**** · 金石柱*****

A Study on the Distribution and Changes of Sand Dune at the Lower Reach of Duman River, North Korea

Min-Boo Lee**, Nam-Shin Kim***, Gwang-Ryul Lee***, Uk Han****, and Jin Shizhu*****

요약 : 본 연구는 두만강 하류 지역에 대규모로 발달한 사구 지형의 분포 및 지표 환경, 퇴적물의 특성, 기원 및 형성과정을 밝히고, 두만강 하류 일대의 하천 및 해안 환경변화를 고찰하고자 한다. 이를 위해, Landsat, Spot 영상을 이용하여 지표피복을 분석하고, 2회의 현지 야외조사를 실시하였으며, 입도분석 및 현미경 관찰을 통해 사구 퇴적물 시료를 분석하였다. 위성영상에서 파악된 사질 퇴적지형 요소들은 삼각주, 사취, 이동사구, 정착사구, 사주, 사주피복 수변식생으로 구분되었다. 사구 퇴적물에 대한 입도 분석 결과, 조사 지역 중 가장 상류 쪽에 해당하는 DM3과 DM4에서 하성보다는 해성 모래와의 상관성이 높게 나타났다. 이는 현재 사구를 이루는 모래의 입도 특성이 두만강 하류 지역의 현재 자연환경을 반영하고 있지 않음을 의미하는 것이다. 현미경 분석 결과, 모든 시료에서 풍화에 가장 강한 석영의 비율이 65~83%로 가장 높았다. 그러나 30~40%를 차지하는 광물 입자의 표면은 화학적 풍화를 받아 황색의 물질로 표면이 코팅되어 있으며, 물리·화학적 풍화에 의한 바늘 및 그물 모양의 거친 표면 형태와 에칭 피트가 나타난다.
주요어 : 위성영상, 사구, 입도분석, 입자의 표면 특성, 현미경 관찰

Abstract : This study deals with geomorphological process of the sand dune landform including the distribution and surface environments, characteristics of sediments, origins and moving processes in lower reach and mouth delta of Duman River, Northeast Korea and China. The methodology of the study includes image analysis of Landsat TM(1992.10) and ETM(2000.9) and Spot(2005.4) for analysis of land cover, 2 times field survey for recognition of landform and acquisition of sediments raw data materials, and grain analysis and exoscopy about raw data materials. The geomorphic elements from satellite image analysis are composed of the delta, sand spit, active and stable dune, sand bar and riparian vegetated zone. Results of the grain analysis indicate the sediments originated from marine coastal zone than riverine one. This means that present sand dune not so much reflect present climatic and geomorphic environments. Result of the exoscopy analysis show that ratio of quartz, which is comparatively resistant to environment, is highest as 65~83% out of sediments. But the surface of the 30~40% of mineral grains was coated by yellow-colored stained materials, due to chemical weathering. Some grains show rough skin, looking as acicular, network structure and etching pits, affected by physical and chemical weathering.

Key Words : Landsat and Spot images, sand dune grain analysis, grain surface characteristics, exoscopy

* 이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-072-BS2078).

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

*** 한국교원대학교 통일교육연구소 전임연구원(Researcher Fellow, Institute of Education for National Unification, KNUE)

**** 육군사관학교 환경학과 교수(Professor, Department of Environmental Science, KMA).

***** 연변대학교 지리학과 부교수(Associate professor, Department of Geography, Yanbian University).

1. 서론

두만강 하류는 러시아, 중국, 북한 3국의 국경이 접하는 곳으로 하천의 유로 변화로 인해 오랫동안 국경 문제로 갈등을 빚어온 곳이며, 광대한 규모의 삼각주, 석호, 범람원, 사구 등의 총적지형이 발달되어 있다(이기석 외, 2002; 권혁재, 2003; 안재섭, 2004).

두만강은 길이 521km, 유역 면적 10,513km²로, 백두산에서 발원하여 북동 방향으로 갑입 곡류하며 흐르다가 온성을 지나면서 남동쪽으로 유향을 바꾸어 상대적으로 넓은 하폭을 형성하고 있다. 온성 이하의 두만강 하류는 중국과 북한의 국경지대를 따라 산지로 분리된 온성, 훈춘 등의 크고 작은 분지가 발달해 있다. 분지에는 범람원, 저습지, 호수, 구하도 등의 다양한 하천지형들이 남아 있다.

최근 10여년 동안 두만강 지역은 식량문제 해결을 위한 농경지 개간이 급경사지, 고도가 높은 산간지역으로 확대되고(이민부 외, 2003), 수출용 벌목으로 인해 급격히 산림이 감소되어 왔다. 이로 인해 지표침식이 증가하고 토사퇴적이 늘어나면서 부분적으로 망상하도가 발달하고 있다. 특히, 분지가 넓고 주변산지가 낮은 훈춘 지역에서는 하상과 하도에 퇴적된 세립 퇴적물들이 북서계절풍의 영향을 강하게 받아 주변으로 침식·운반되어, 하도와 하천 양안의 범람원에 사구, 사주, 사구 습지 등이 발달되어 있다. 또한 이러한 사질 퇴적체는 이동성이 높아, 때로는 기존의 농경지와 시설물들을 잠식하기도 한다.

사구는 바람에 의해 쌓인 모래로 이루어진 언덕을 말하며, 사구의 길이는 1m에서 수십km까지, 높이는 10cm에서 150m까지 다양하다(Pye and Tsoar, 1990). 사구는 바람, 파랑, 조류의 영향으로 모래의 이동과 집적을 통해 발달된 지형이다. 사구가 형성되기 위해서는 충분한 모래의 공급원, 탁월풍, 평탄하고 넓은 지형, 식생이 거의 없는 건조한 지표면 등의 자연 조건이 필요하다(Mainguet, 1994). 우리나라에서 해안사구가 발달한 지역은 겨울철 탁월풍인 북서풍에 면한 서해안 사빈의 배후 지역과 파랑의 힘이 강하고 사빈의 모래 공급이 풍부한 동해안 지역이다(서종철, 2003). 또한 제주도는 국지적으로 강한 탁월풍에 의해서 해안사구

가 발달되기도 한다(박 경 외, 2004).

북한의 두만강 하류지역은 하상과 범람원에 인접하여, 사구, 사취 등의 지형이 발달해있다. 두만강 하류 사구 지형의 분포는 훈춘의 하류부터 하구까지에서 나타난다. 훈춘에서부터 두만강은 하상경사와 해발고도가 낮은 분지를 흐르기도 하고, 소규모 산지들의 사이에 반복적으로 좁은 협곡을 형성하며 흐른다. 사구는 범람원 및 현 하상비고 5~10m 정도의 높이에서 다수 관찰된다. 이러한 사구들은 자연환경 조건에 영향을 받아 일정한 방향으로 규칙적인 분포 특징을 보이며, 전반적으로 북서계절풍의 영향에 의해 북서-남동 주향의 능선을 이루는, 폭 10~30m, 길이 0.5~3km의 수십 개 사구열이 길게 발달되어 있다. 또한 사구가 발달한 곳의 지형 환경은 곡류부 활주사면과 그 동쪽 맞은편, 좁은 곡폭을 형성했던 하도가 넓은 범람원을 통과하면서 펼쳐지는 지역, 그리고 지류하천이 합류하는 지역으로 분류된다. 해발고도 20m 이하인 두만강 하류에 형성된 사구 지형은 바람, 하천, 그리고 동해안 해수면 변화의 조건이 복합적으로 영향을 미치고 있다.

본 논문은 두만강 하류의 사구 지형에 대한 분포와 지표 환경, 퇴적물의 특성을 파악하여, 사구의 기원과 형성과정을 규명하고, 이를 통해, 인간간섭에 의한 두만강 하류의 지형 환경 변화를 유추하고자 한다.

2. 연구방법 및 연구지역

1) 연구방법

두만강 하류지역 사구지형의 분포와 지형 및 퇴적환경을 파악하기 위해, 위성사진 분석, 현지 조사, 퇴적물의 입도 분석 및 입자 표면에 대한 현미경 관찰(exoscapy)을 실시하였다.

위성영상 분석은 해상도 30m의 Landsat(path 115-30) TM(1992.10.17)과 ETM(2000.9.29) 영상을 그리고 해상도 2.5m의 Spot 5호(2005.4.13) 영상을 이용하였다.

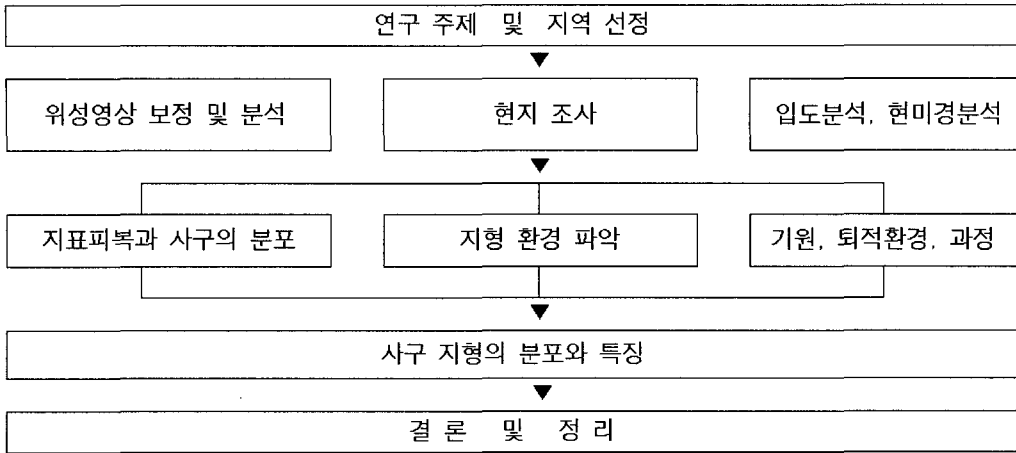


표 1. 연구의 흐름

Landsat 영상은 두만강 하류지역의 지표피복 변화와 사구 퇴적지형의 변화 경향 분석에 사용하였으며, Spot 영상은 사구 지형분포도를 제작하는데 이용하였다.

위성영상은 최신 북한 1:50,000 지도(경인문화사, 1997)를 바탕으로 16개의 GCP를 선정하여 UTM WGS84(52 zone)으로 투영하였으며, 0.06으로 보정하였다. 영상의 분류는 1:50,000 지도를 참고로 훈련 지역을 설정, 감독분류를 실시하였다.

사구 지형의 분포 경향을 살피기 위해 영상에 대한 태슬모자변형(T-Cap)을 실시하였다. 태슬모자변형은 영상이 갖고 있는 광학적 정보를 증폭시켜 밝기지수(brightness), 녹색지수(greenness), 수분지수(wetness)를 분석하기 위한 것이다(jensen, 1996). 명도지수가 높은 지역은 나대지나 모래 퇴적지형의 분석에 유리하고, 녹색지수는 식생 분포 지역에 유리하며, 수분지수는 토양수분과 관련되므로 범람원이나 사구 내의 습지를 파악하는데 유리하다.

현지 조사는 2회(2005.10.17~10.21, 2006.3.27~3.29)에 걸쳐 실시하였다. 첫 답사에서는 주로 사질 퇴적 지형의 분포와 노두를 관찰하였으며, 두 번째 답사는 상대적으로 바람이 강한 겨울을 지난 직후 사구 지형의 변화 관찰과 시료 채취 및 분석을 위해 진행하였다.

사질 퇴적물에 대한 현미경 분석 및 촬영은 연변대학교 농과대학 농학원 실험실에서 전처리 과정을 거치

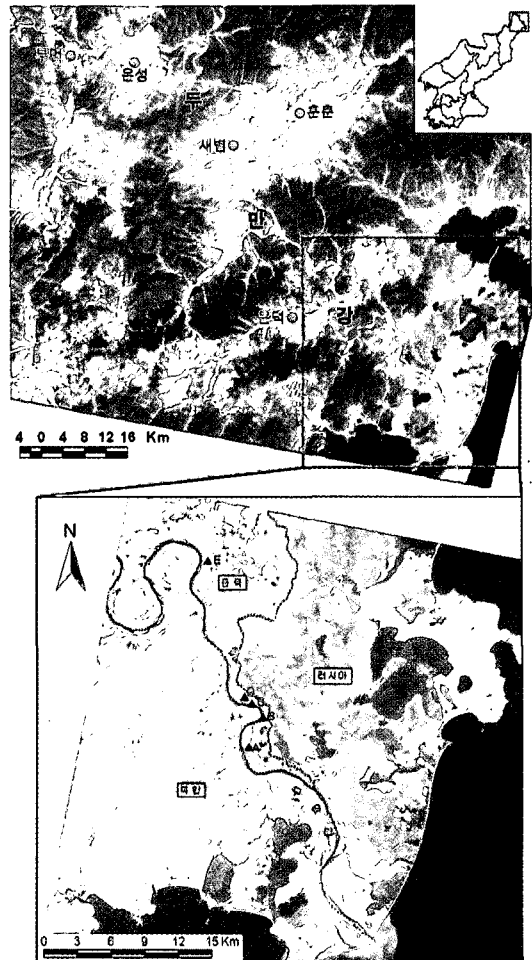


그림 1. 연구지역과 시료 채취 지점(A~E)

지 않은 상태에서 1차로 실시하였다. 배울 8, 16, 32배로 모래 입자의 표면을 관찰하고 촬영하였다. 이후 시료들을 교원대학교 통일교육연구소 실험실에서 110℃의 오븐에 10시간 동안 건조시킨 이후, 체질(sieving)을 통해 입도 분석을 실시하고, 조립의 모래를 분류하여 40배의 편광 현미경을 이용, 모래 입자의 표면 형태를 재관찰하여, 광물 동정을 실시하였다. 입도분석은 퇴적환경을 유추하기 위한 것이고, 현미경 분석은 모래의 표면 형태, 구성광물 분석을 통해 모래의 기원과 시기, 형성과정을 파악하기 위한 것이다. 연구 분석의 과정은 표 1과 같다.

2) 연구지역

연구지역은 두만강 하류로, 북한, 중국, 러시아 3국의 국경이 인접하고 있으며, 수리적 위치는 130°30'E, 43°00'N ~ 130°50'E, 43°30'N이다. 두만강 하류 지역은 중국의 태평양 진출로 확보와 북한의 개방 및 경제개발, 한국과 일본의 시베리아 교통로 진출 등 동북아 여러 국가들의 이해가 얽혀있는 지정학적 요충지이다. 이러한 점에서 두만강 하류 지역에 대한 연구는 지역지리, 지역개발과 자연보존을 위한 연구 자료로 의의가 있다고 볼 수 있다(한국과학재단, 1999; 서울대 사범대 지리교육과, 2001). 북한에서 두만강에 인접한 도시인 온성, 새별, 은덕 지역은 식량생산을 위한 농경지 개간의 역사가 오래된 지역이다(그림 1; 이민부 외, 2003).

이 지역은 조선시대에 여진족들이 두만강을 넘어 침략해오기도 했지만, 우리 선조들이 강을 건너 농경지를 개척하여 영농을 하기도 했다. 조선 후기에 발간된 많은 고지도들, 예를 들면, 조선 전도, 함경도지, 함경도 관방도에는 훈춘 지역의 호소들이 팔지(八池)라고 기재되어 있다(국립지리원 · 대한지리학회, 2000; 그림 2). 이 호소들은 현재 6개로 통합되어 남아있는 것으로 확인된다.

두만강 하류 일대를 이루는 지질은 고생대 화강편마암과 퇴적암, 중생대의 퇴적암과 관입된 화강암, 신생대 제3기 퇴적암 등이다(Kim, et al., 1993; 대한지질학회, 1999; 그림 3). 사구가 잘 발달한 훈춘보다 하류쪽

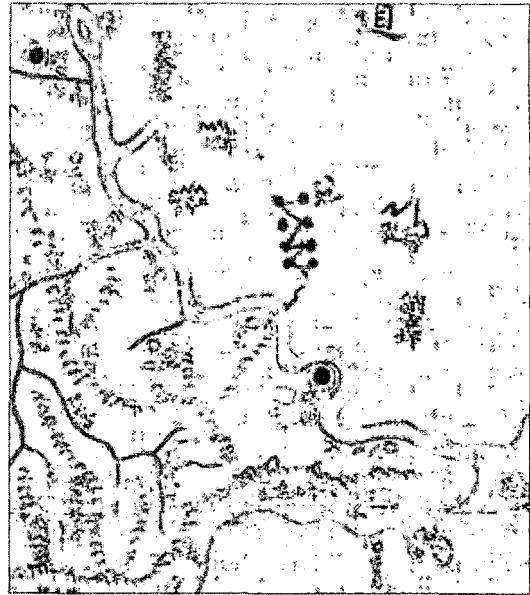


그림 2. 동국지도(18세기 중엽)

함경북도 편에 표현된 팔지(八池, 그림의 중앙부)

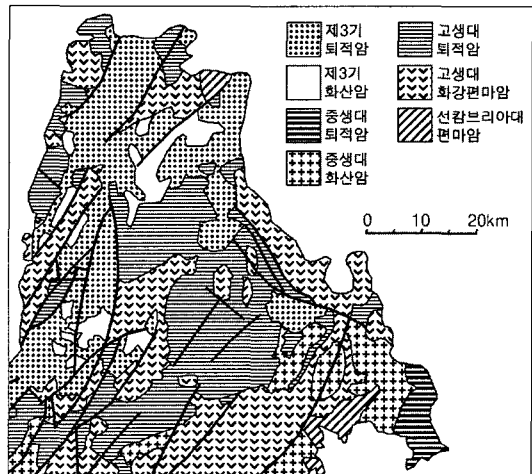


그림 3. 연구지역 중 북한 지역의 지질

에는 고생대 화강편마암과 고생대 퇴적암이 차례로 분포하며, 두만강의 하구 일대는 중생대 백악기 퇴적암으로 이루어져 있다. 연구지역의 고생대 퇴적암 지역은 상대적으로 침식에 강하여 높은 산지를 이루고 있으며, 고생대 화강편마암 지역은 오랫동안 침식을 받아 저평한 구릉지나 분지를 이루고 있는 곳이 많다. 따

라서 두만강은 연구지역에서 고생대 화강편마암으로 구성된 넓은 분지를 지난 후 고생대 퇴적암 지역을 만나면서 좁은 협곡을 형성하며, 다시 화강편마암의 넓은 분지를 흐르고 있다.

3. 두만강 하류의 지표 피복

두만강 하류지역 사구 지형 분포의 변화를 파악하기 위해, 사구의 이동과 안정에 영향을 미치는 지표 피복 현황을 위성영상을 통해 살펴보았다. 위성영상은 Landsat TM(1992), ETM(2000)을 이용하여 지형도와 Spot 위성을 통해 지형지물을 확인한 후 감독분류를 실시하였다. 감독분류에서 분류 항목은 산림, 농경지, 습지, 초지관목, 수체, 사구, 나대지, 수변식생, 주거지 등의 9가지로 분류하였다(표 2; 그림 4)

두 시기에 대한 지표피복 비교에서 두드러진 것은 습지가 30% 정도 증가하였고 초지관목은 35% 정도 감소한 것으로 분석되었다. 이는 하천 및 해안의 지형 변화와 관련하여 습지와 초지 지역의 환경이 보다 습지성 환경으로 변형되었기 때문인 것으로 추정된다. 이에 반해, 사구 지형은 TM에서 251km², ETM에서 239km²로 나타났는데, 이는 9년 동안의 실질적인 감소를 의미한다기보다는, 1992년에는 두만강의 하상에 발달한 사구가 유량의 감소로 인해 위성영상에서 사구

와 같은 파장으로 구분되었으나, 2000년에는 수변 식생이 늘어나고, 사구의 표면에 식생이 정착단계에 들어서 있어, 사구의 면적이 감소된 것처럼 측정된 것으로 판단된다.

TM과 ETM 영상에 대하여 태슬모자변형(T-Cap)을 실시하였다(그림 5). 태슬모자변형에서 밝기(birghtness)를 1번(red) 밴드로 배치하여 비교한 결과 A, B, C, D 지역에서 차이가 있는 것으로 나타났다. 태슬모자변형에서 밝기지수는 일반적으로 토양의 밝은 정도를 반영하여, 밝을수록 토양이 건조하거나 반사도가 높다는 것으로 해석된다. 여기서는 이 밝기지수를 이용하여 사구나 사구 지형이 발달된 곳을 두 시기 영상을 통해 비교하고자 하였다.

TM 영상의 A 지역은 활주사면의 하안에 사주들이 발달해 있어 붉게 나타나고 있으며, 부분적으로는 활주사면의 북서-남동 방향의 열상으로 나타나기도 한다. ETM 영상에서 사력의 붉은 색은 줄고 오히려 활주사면으로 모래들이 이동되어 붉은색 계통으로 변한 것을 알 수 있다. TM 영상의 B 지역은 붉은 부분이 적지만, ETM에서는 비교적 넓게 확산되고 있음을 알 수 있다. C 지역은 북한쪽에서 지류가 유입하는 곳으로, 사주의 발달이 미약하지만, ETM 영상에서는 본류의 하상에 사주가 발달한 것을 볼 수 있다. D 지역은 TM에서는 비교적 안정된 곳으로 두만강이 곡류하는 지점에 사주 및 사구가 발달했지만, ETM 영상에서는 이 사질 퇴적체의 분포가 내륙쪽으로 붉게 확대되고 있는 모습을 나타낸다.

표 2. 두만강 하류의 지표 피복 변화(단위 : km²)

시기 \ 분류항목	TM (1992.10.17)	ETM (2000.9.29)
산림	276	296
농경지	136	130
습지	206	263
초지관목	192	124
수체	299	298
사구	251	239
나대지	33	13
수변식생	21	32
주거지	17	24

4. 사구의 분포와 지형환경

두만강 하류 지역에서 사질 퇴적지형은 본류의 하도와 양안을 따라 분포한다. Spot 위성영상에서 파악된 사질 퇴적지형 요소들은 삼각주, 이동사구(active dune), 정착사구(stable dune), 사주(bar, 모래톱), 사취, 사주피복물로서의 수변식생으로 구분된다(그림 6).

하천 사주는 두만강의 활주사면, 북한쪽에서 유입하는 지류의 하구, 곡곡이 확대되는 구간에 발달하고 있다. 하천 사주는 하상비고 1~3m 정도로 발달하고 있

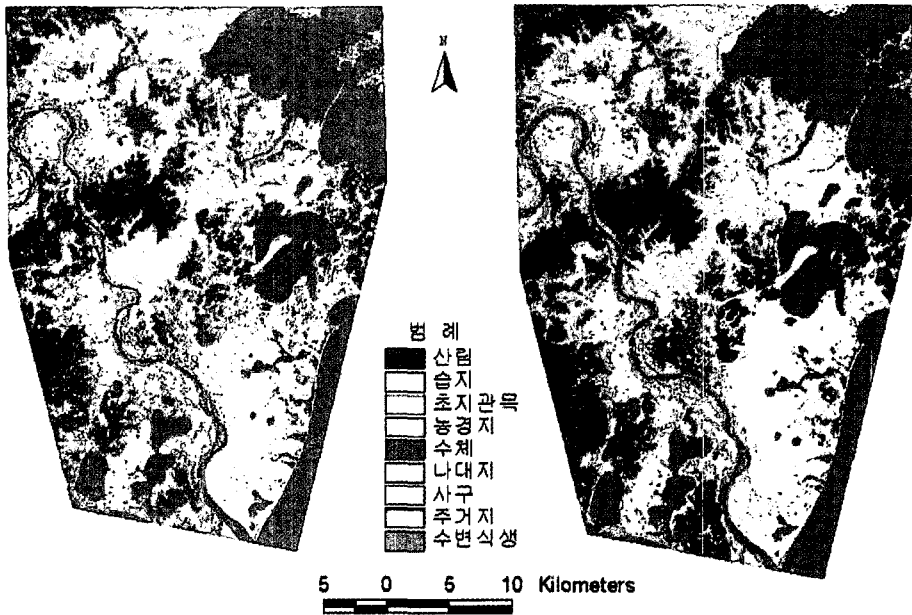


그림 4. 두만강 하류의 지표 피복(좌: 1992년 TM, 우: 2000년 ETM)

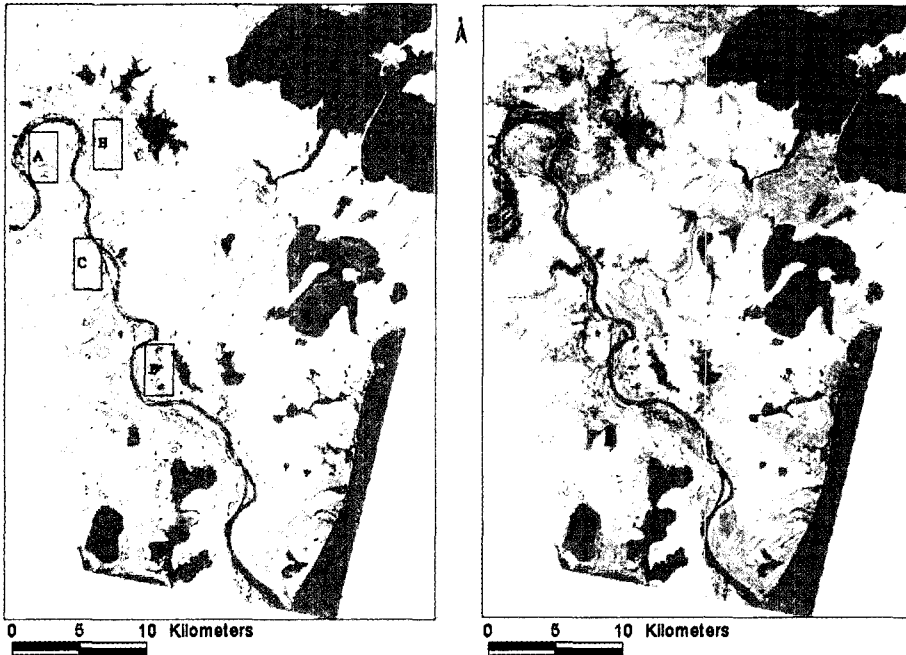


그림 5. 태슬모자변형을 통한 사질 퇴적지형의 비교

는데, 이는 대량의 토사들이 두만강으로 유입되고 있음을 의미하는 것이다. 곡폭이 확대되는 지역에서는

작은 협곡을 빠르게 통과한 유수가 유속이 느려지면서 하천 양안에 토사를 퇴적시키고 있는 양상이다. 또한

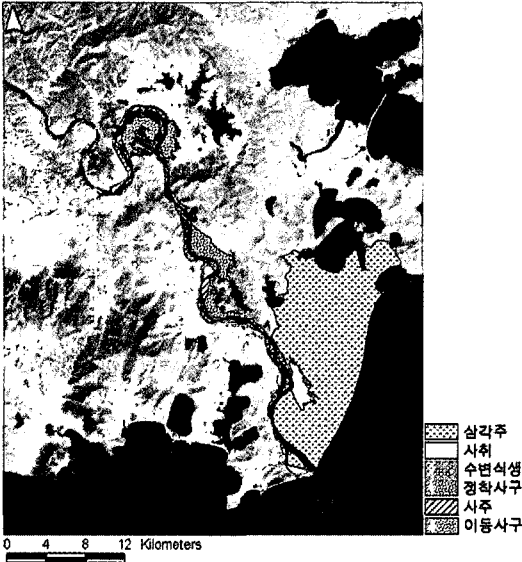


그림 6. 사질 퇴적지형 분포도



그림 8. 수변식생 배후에 발달한 사구



그림 9. 이동사주의 분포 (범례는 그림 6 참조)



그림 7. 사주상의 수변식생 정착

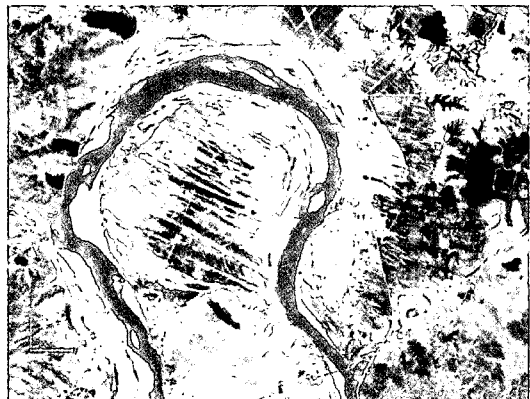


그림 10. 이동사주의 확대에 의한 농경지 잠식

사주 중에서 하상비고가 2~3m로 비교적 높은 지점에서 수변 식생이 정착되어 숲을 이루고 있는데(그림 7) 수변 식생이 정착된 지형의 배후에는 5~20m 정도의 사구들이 불규칙적으로 발달해 있다(그림 8).

사구지형은 이동사구와 정착사구로 나뉘어 진다(그림 9). 이동사구는 우리나라의 겨울 계절풍인 북서계절풍의 방향과 일치하는 서북서에서 동남동 방향으로 길게 발달하였다. 이동사구는 하천의 활주사면을 따라 형성된 사주에서 풍식에 의해 공급된 모래들이 최근에도 북서계절풍 방향을 따라 계속 이동되고 있어, 하안 남동쪽의 농경지와 도로가 잠식당하고 있다(그림 10,

11). 이들의 사구의 하상비고는 약 3~5m 정도로 골(trough)과 능(ridge)이 뚜렷이 나타난다(그림 12). 사



그림 11. 도로를 덮고 있는 사구와 주민들이 도로에서 모래를 제거하는 모습



그림 12. 사구의 능선과 골



그림 13. 사구의 골에 발달한 습지



그림 14. 사구 내부의 고사구층

구의 골 부분은 습지(back swamp)가 발달해 있으며 골과 능선의 비고는 2~5m의 고도차를 보인다(그림 13). 사구의 단면에서 표층부의 약 1~2m는 최근에 퇴적된 모래로 고화 정도가 약하지만, 하층으로 가면서 단단해지는 경향을 보인다. 특히, 사구의 중심부에는 고사구 퇴적물로 추정되는 흑갈색의 고화된 점토질 모래층이 나타나며, 이층은 단단해서 바람의 영향을 많이 받지 않는다고(그림 14).

정착사구는 좁은 협곡을 흐르던 두만강이 넓은 범람원으로 확대되는 지역에 서북서-동남동 방향으로 발달하고 있다(그림 15). 정착사구의 해발고도는 10~15m 정도이고 식생이 정착되어 관목과 초본류들이 자라고 있다(그림 16). 정착사구의 퇴적층은 이동사구와 마찬가지로 고화되지 않은 상태이며, 표층은 부

식질의 토양이 발달해있다. 또한 정착사구와 배후 산지가 접하는 접이시대에는 바람에 이동된 2차 사질 퇴적층이 발달한 곳도 있다(그림 17).

특히, 정착사구 지대에서는 위성영상과 지형도를 통해 판독할 때, 과거 이곳에서 두만강이 북동류하였을 것으로 추정되는 구유로 지형이 발견되고 있다(그림 18, 19). 이 구유로의 하도는 상·하류부가 거의 동일한 고도를 유지하고 있어, 대규모 사구의 발달로 인해 유로의 입구가 막히면서, 현재와 같은 상태로 두만강의 유로가 변경되었을 가능성이 제시된다.

사구는 모래 공급의 원천인 하천으로부터 가까운 하천 양안의 범람원 상에 위치한다. 즉, 두만강 하류의 넓은 범람원에서도 하도에 가까운 지역은 사구가 발달하여 고도가 높고 지형 기복이 복잡하지만, 그 후면에

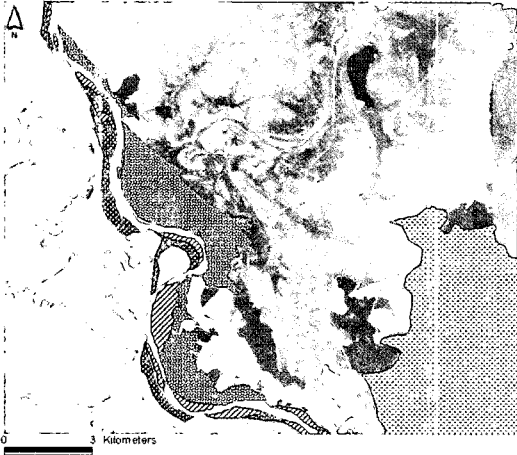


그림 15. 정착사구의 분포

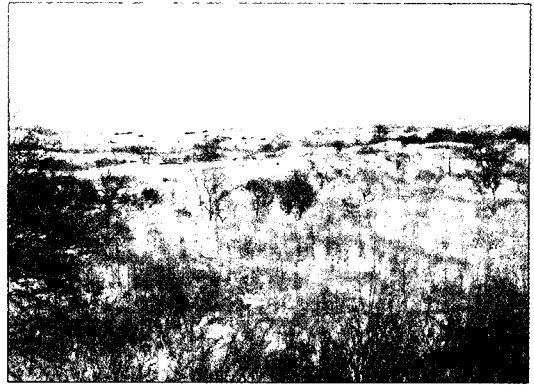


그림 16. 정착사구의 식생 경관

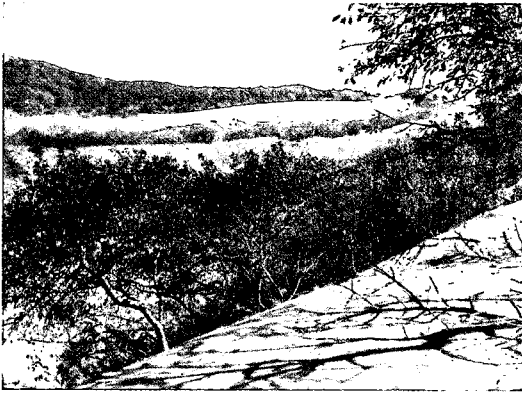


그림 17. 정착사구의 배후에 발달한 사구



그림 18. 구유로 흔적

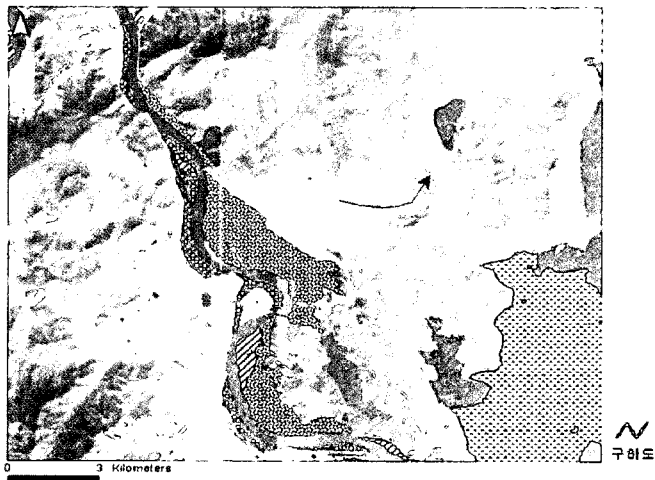


그림 19. 사구 배후의 저수지 및 호수와 구하도(범례는 그림 6 참조)



그림 20. 사구의 배후 호소

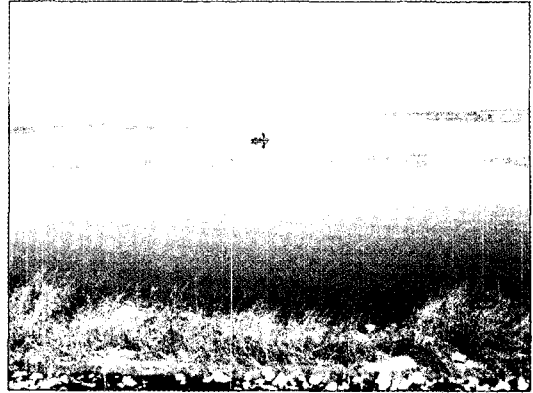


그림 21. 사구 배후 호소의 전경

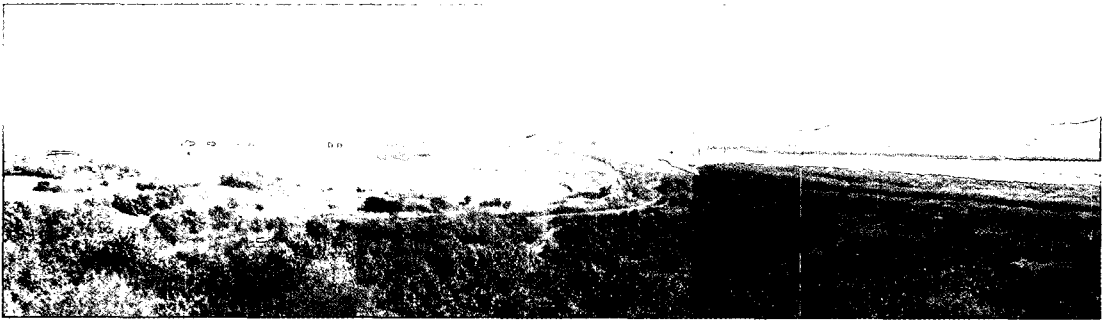


그림 22. 두만강 하구의 삼각주와 석호의 전경.

오른쪽은 두만강 본류로 북한과 중국 및 러시아의 국경이며, 왼쪽은 러시아 지역의 석호이다. 북한과 러시아간의 두만강교가 보이며, 사진 중앙부 멀리 동해가 보인다.

위치한 사구와 배후 산지 사이의 범람원과 범람원으로 흐르는 소규모 지류 하천의 곡구부는 상대적으로 고도가 낮고 평탄한 지형을 이루고 있다. 따라서 지류 하천의 곡구부이자 두만강 범람원의 배후습지에 해당하는 지역에는 넓은 호소와 저습지들이 발달되어 있다. 이러한 호소들은 앞서 설명한 조선시대의 여러 지도에서도 '팔지'로 표현되고 있는 것으로 보아, 지류 하천의 하구부가 사구의 발달로 인해 막히어, 자연적으로 형성된 배후습지성 호소로 볼 수 있다(그림 20, 21).

두만강 하구에는 첨상 삼각주(cusped delta)가 대규모로 발달되어 있다. 위성영상으로 추정된 두만강 삼

각주의 면적은 165km²이며, 삼각주 해안에서는 사빈이 분포하고, 사빈에 막힌 저지대들에서는 석호, 습지 등이 나타난다. 삼각주 내에는 망상의 유로가 바다를 향하여 확장되면서 사질 퇴적지를 발달시키고 있다. 하도의 흔적들은 열상의 습지를 이루기도 하지만, 식생이 고착되면서 육화되어 있다. 석호, 습지들은 해발 고도가 1m 정도이기 때문에, 두만강의 유량과 파랑의 영향에 따라 지속적으로 변화되고 있다(그림 22).

5. 사구 퇴적물의 특성

두만강 하구에 퇴적된 사구 퇴적물 입자의 물리적 특성을 살펴보기 위해 시료를 채취하여 입도 분석과 현미경 관찰을 실시하였다(그림 1).

1) 입도의 특성

DM1-0.2와 0.5는 가장 하류 쪽 정착사구의 모래 시료로, -0.2는 표층이며, -0.5는 바로 그 하부의 퇴적물이다. 입도의 평균값은 -0.2가 2.17 ϕ , -0.5가 2.57 ϕ 로 계산되었다. 육안 관찰 및 입도 분석 결과, 하층(DM1-0.5)의 경우는 fine sand에 해당하는 입자가 많으나, 표층(DM1-0.1)은 중립 모래(medium sand)에 해당하는 보다 조립질의 입자가 많다.

따라서 DM1 지점의 퇴적구조는 상향 조립화(upward-coarsening) 현상을 나타내고 있다.

풍성 사구와 같은 입자의 상향 조립화 또는 수직적 역점이 현상에 대한 설명으로는, 분산압에 의해 큰 입자들은 전단변형을 가장 적게 받는 입자류의 표면으로 이동하고, 작은 입자들은 전단변형이 가장 큰 입자류 하부로 이동하기 때문이라는 주장과, 입자들 사이에 체질(sieving) 효과가 발생하여, 큰 입자들의 공극 사이로 작은 입자들이 떨어져서 발생한다는 주장이 있다(조성권 외, 1995).

DM2-0.1은 초본 및 관목류가 무성하게 자라는 정착

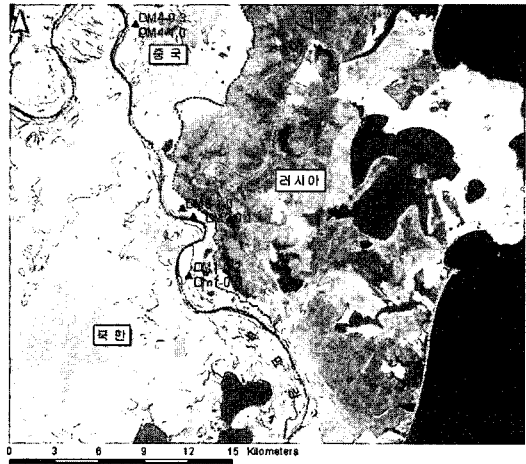


그림 23. 시료 채취 지점

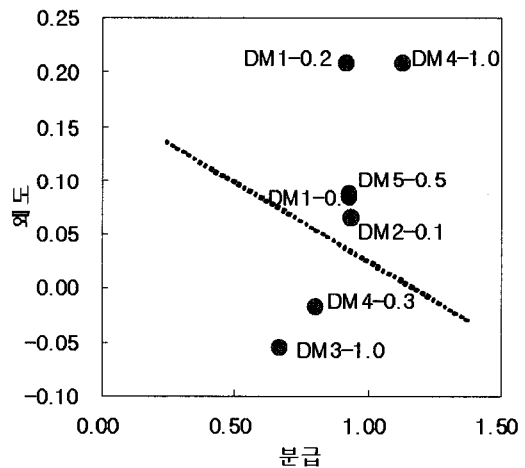


그림 24. 두만강 하류 사구 시료의 분급과 왜도

표 3. 두만강 하류 사구 시료의 입도 통계 및 토색

시료명	입도의 구성비(%)		입도 통계(ϕ)				토색
	sand	silt	평균	분급	왜도	첨도	
DM1-0.2	94.2	5.7	2.17	0.92	0.21	0.99	10yr4/3
DM1-0.5	93.6	6.4	2.57	0.93	0.08	1.18	10yr5/3
DM2-0.1	93.7	6.3	2.34	0.93	0.07	1.14	10yr5/3
DM3-1.0	97.9	2.1	2.38	0.67	-0.06	1.36	10yr5/3
DM4-0.3	94.8	5.2	2.37	0.80	-0.02	1.42	10yr5/3
DM4-1.0	83.3	16.7	2.77	1.13	0.21	1.01	10yr3/2
DM5-0.5	92.6	7.4	2.51	0.93	0.09	1.47	10yr5/3
평균	92.9	7.1	2.44	0.90	0.08	1.22	

사구 표면의 시료로서, 시료 내부에 유기물이 다량 포함되어 있어, 사구를 구성하는 무기물 입자의 순수한 특성을 파악하는 데는 약간의 한계가 있는 것으로 보인다. 그러나 입도의 평균은 2.340로, DM1과 거의 유사하게 나타났다.

DM3-1.0은 7개의 시료 중 실트(silt)의 함량이 2.1%로 가장 낮으며, 따라서 분급은 0.67로 상대적으로 좋은 편이다. 왜도는 음의 값을 나타내고 있어, 입도의 최빈값이 보다 세립질에 집중되어 있다.

DM4-0.3과 1.0은 대규모로 나타나는 이동사구 지역으로, 수십 개의 사구열이 북서-남동 방향을 따라서 발달되어 있는 곳이다. -0.3은 표층의 시료이며, -1.0은 깊이 1m 지점의 시료로, 주로 세립의 입자가 흑갈색을 나타내며, 고화가 어느 정도 진행되어 있는 것으로 볼 때, 현생 모래입자가 아닌, 고환경에서 퇴적된 고사구 입자로 추정된다.

-0.3은 다른 시료와 거의 유사한 특징을 가지고 있지만, 왜도는 DM3-1.0과 유사하게 음의 값을 나타내고 있다. -1.0은 입도의 평균이 2.770이며, 실트의 비율이 16.7%로서, 7개 시료 중 가장 세립질이다. 또한 손으로 강하게 누르면 부수어지긴 하지만, 상당히 딱딱하게 고화되어 있으며, 황갈색을 띠는 다른 시료들과는 달리, 흑갈색을 이루고 있어, 퇴적 이후 상당한 기간 동안 매적 또는 침수되면서, 환원 환경을 경험한 것으로 추정된다.

DM5-0.5는 DM4의 사구열을 따라 남동방향으로 약 200m 가량 떨어진 지점의 표층 시료이다. 입도 특성은 DM4의 -0.3과 -1.0의 중간 정도의 값을 나타내고 있어, DM4를 지점을 이루고 있는 다양한 입자의 모래들

이 바람에 의한 침식·운반작용을 거치면서 이동 및 혼합되어 퇴적된 것으로 판단된다.

그림 24는 7개 시료의 분급과 왜도를 그래프로 표현한 것이다. 일반적으로 해변의 모래는 음의 왜도와 양호한 분급을, 하천의 모래는 양의 왜도와 불량한 분급을 갖는 것으로(조성권 외, 1995) 설명되는 경향이 있다. 이러한 점에 비추어 보았을 때, 두만강 하류의 사구 구성물질도 두 가지의 형식으로 구분이 가능하다. 즉, DM3-1.0과 DM4-0.3은 음의 왜도와 양호한 분급을 가져서 해성 모래와의 상관성이 높으며, 나머지 5개 시료는 양의 왜도와 불량한 분급을 나타내어, 하성 모래와의 상관성이 더 높은 것으로 설명된다.

그러나 DM3과 DM4는 조사 지역 중 가장 상류 쪽에 해당되는 곳으로, 지형 조건으로 볼 때는 분석 결과와는 반대로 오히려, 해성보다는 하성의 영향이 높아야만 한다. 이는 현재 사구를 이루는 모래의 입도 특성이 두만강 하류 지역의 현재 자연환경을 대변하고 있지 않음을 의미하는 것이다. 즉, 현재보다는 보다 과거의 기후 및 해수면 변화가 영향을 미쳤을 것으로 추정할 수 있다.

2) 광물 조성

사구 시료 중 비교적 상태가 좋은 DM1-0.5, DM3-1.0, DM4-0.3, DM4-1.0, DM5-0.5에 대하여 현미경 관찰을 실시해 광물의 개수를 기초로 광물 조성비를 계산하였다(표 4).

그 결과, 모든 시료에서 풍화에 가장 강한 석영의 비율이 65~83%로 가장 높았으며, 다음으로는 장석류가

표 4. 두만강 하류 사구 시료의 광물 조성비(%)

	석영			장석류			운모류	유색 광물
	전체	신선	풍화	전체	신선	풍화		
DM1-0.5	71.6	41.9	29.7	21.6	10.8	10.8	1.4	5.4
DM3-1.0	82.5	54.0	28.6	11.1	3.2	7.9	0.0	6.3
DM4-0.3	75.4	36.1	39.3	18.0	1.6	16.4	0.0	6.6
DM4-1.0	68.3	31.7	36.6	22.0	2.4	19.5	2.4	7.3
DM5-0.5	64.6	27.1	37.5	29.2	2.1	27.1	2.1	4.2

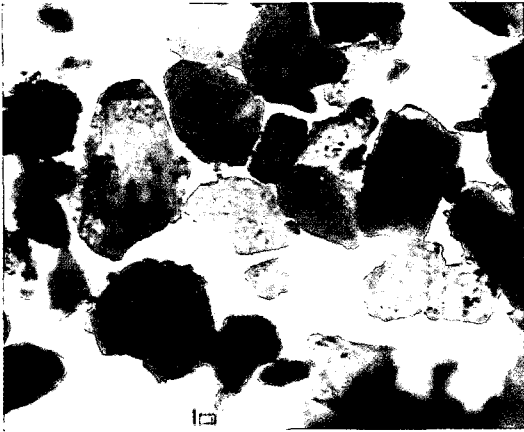


그림 25. DM1-0.5



그림 26. DM3-1.0



그림 27. DM4-0.3



그림 28. DM5-0.5

10~30%, 유색광물이 4~7%, 운모류가 가장 낮은 0~2%의 비율을 나타내고 있다.

석영은 표면의 거칠기가 구분될 정도로 풍화를 받지 않은 신선한 입자가 높은 비율을 차지하지만, 화학적 풍화를 받아 황색의 물질로 표면이 코팅된 입자도 전체의 29~39% 정도로 상당수 발견되고 있다. 석영보다 풍화에 상대적으로 약한 장석에서는 표면이 신선한 것 보다는 풍화된 것이 더 많았다. 특히, 사구의 규모가 가장 크고 고사구를 포함하고 있는 지역인 DM4-0.3와 DM5-0.5에서는 전체의 1/3 이상이, 고사구인 DM4-1.0에서는 거의 절반 이상의 광물 입자에서 동정이 불가능할 정도로 풍화가 매우 심한 표면구조가 나타난

다. 그러한 광물 입자의 표면은 바늘 모양 또는 섬유상 입자가 그물 모양을 하고 있으며, 그 사이사이에는 염 풍화(slat weathering)와 관련성이 있는 미세한 구멍인 에칭 피트(exching pit)가 나타나고 있다. 이러한 에칭 피트는 지속적인 수산화작용을 받아 계속 성장하면 벌집풍화(honeycomb) 현상을 나타낸다(Taylor and Eggleton, 2001).

사구가 발달한 지역들은 해발고도가 대체로 10m 내외이며, 조사 지역에서도 가장 상류쪽에 위치한 사구에서 입도의 특성이 하성보다는 해성 작용에 의한 모래일 가능성이 높게 나타났으며, 일부 모래의 표면에서 염 풍화와의 관련성을 생각해 볼 수 있을 정도로 매

우 거친 표면과 구멍이 나타나고 있는 점으로 보아, 두 만강 하류의 사구는 현재보다 고해수준기에 해안으로부터 다양한 기구를 통해 공급된 모래들이 현재까지 재이동 및 재퇴적을 거치면서 발달하고 있을 가능성을 생각해 볼 수 있다. 그러나 보다 정확한 사구의 형성 과정에 대해서는, 본 연구 결과에 추가하여, 이 일대의 광범위한 사구 지역을 대상으로 다양하고 정밀한 지형 및 퇴적물 분석을 보완할 때에 가능할 것으로 본다.

6. 결론

두만강 하류 지역의 하상과 범람원에 인접하여 이동사구와 정착사구, 고사구 등 많은 사구지형들이 발달하고 있다. Landsat TM(1992.10)과 Landsat ETM(2000.9) 위성영상으로 이 지역의 지표 피복 변화 과정을 살펴보면, 습지가 증가하고, 초지는 감소하고 있으며, 사주지역을 따라 수변 식생은 늘고, 인접하여 사구도 안정화 단계에 있는 것으로 보인다.

태슬모자변형의 밝기지수로서 사주 및 사구의 변화를 보면, 1992년 TM 영상에서는 북한쪽의 A 지역 활주사면에 북서-남동 방향의 열상 사구가 나타나고, 보다 하류인 D 지역에 정착사구가 잘 발달하고 있다. 8년 뒤의 영상인 ETM에서는 A 지역에서의 사구 이동, C 지역에서의 본류 하상에서의 사주 발달, D 지역에서의 내륙쪽에서의 사구 이동 등의 변화가 나타나고 있다.

Spot 위성영상(2005.4)으로 파악한 최근의 두만강 하류 지형은 삼각주, 이동사구와 정착사구, 사주, 사취, 수변 식생대 등으로 구분된다. 하천 사주는 현재에도 대량의 토사 유입으로 발달하고 있으며, 이들이 가장 많이 퇴적되는 활주사면에서 이동사구가 북서-남동 방향으로 발달하고, 내륙쪽으로 이동하여 식생피복으로 안정되면서 정착사구도 나타나며, 사구 지역의 중심부에서는 고화되고 유기물을 함유한 고사구도 나타난다.

입도분석과 현미경 관찰을 통해 밝혀진 사구 퇴적물의 특성을 살펴보면, DM1에서는 역점이 퇴적구조가 나타나고, DM2는 정착사구로서, 유기물을 포함하고 있으나, 입도는 DM1과 유사하다. DM3는 이동사구의

세립질 모래이며, DM4는 보다 세립질의 환원환경을 경험한 고사구 입자로 추정된다. DM5는 입자 특성이 중간적 성격을 보여주는데, 침식·운반과 이동·혼합의 퇴적과정을 반영하고 있는 것으로 보인다. 입자의 특성은 석영질의 경우 신선한 편이나, 1/3 정도는 황색 코팅과 거친 표면 및 에칭 피트가 나타나고 있어, 물리·화학적 풍화의 영향을 많이 받은 것으로 보인다.

본 연구에서 두만강 하류의 사구 지형 분석을 통하여, 두만강 하류 지역의 지형 분포 및 특성과 발달과정을 추정할 수 있었다. 또한 인간활동에 의한 지형 변화 측면에서 보면, 북한의 산림 훼손과 광산 개발 등으로 인한 사면에서의 토사 공급, 사구지형 자체에서의 토지이용으로 하상 퇴적작용과 해안지형에 상당한 영향을 미치고 있는 것으로 보인다.

연구 지역에 대한 인문적 여건에 따른 시·공간적 접근의 어려움이 있었지만, 차후 여건이 개선되면, 사구 지형 형성과정과 환경변화에 따른 영향 등을 보다 정확하고 정교하게 밝힐 수 있을 것으로 기대한다.

사사

본 연구에서 모래 시료의 현미경 분석에 도움을 주신 연변대학교 농과대학 농학원 부원장 여용석(呂龍石, Lu Longshi) 교수께 감사드립니다.

文獻

- 경인문화사, 1997, (最近)北韓 五萬分之一 地形圖(上), 경인문화사.
- 국립지리원·대한지리학회, 2000, 한국의 지도, 국립지리원.
- 권혁재, 2003, 한국지리, 법문사.
- 대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 시그마프레스.
- 박경, 손일, 장은미, 2004, "제주 김녕-월정 사구의 발달과정에 관하여," 한국지역지리학회지, 10(4), 851-864.
- 서울대 사범대학 지리교육과, 2001, 북한 개방지역에 관한 연구-나진-선봉 지역을 중심으로, 서울대 사범대학 지리교육과.
- 서종철, 2003, "해안사구에서의 유효풍속과 지형변화," 한

- 국지역지리학회지, 10(3), 667-681.
- 안재섭, 2004, "두만강 하류지역의 토지이용에 관한 연구-러시아 핫산지역과 녹둔도를 중심으로," 국토지리학회지, 38(2), 155-165.
- 이기석 · 이옥희 · 최한성 · 안재섭 · 남영, 2002, "나진-선봉 경제 무역지대의 입지 특성과 지역구조," 대한지리학회지, 37(4), 293-316.
- 이민부 · 김남신 · 강철성 · 신근하 · 최한성 · 한욱, 2003, "다시기 위성영상을 이용한 두만강 하류 지역의 농경지 개간의 공간적 특성 분석," 대한지리학회지, 38(2), 630-639.
- 조성권 · 이철우 · 손영관 · 황인걸, 1995, 퇴적학, 우성.
- 한국과학재단, 1999, 두만강(도문강)유역 토지자원 종합평가-수출자유지역단지 개발을 중심으로-, 한국과학재단.
- Jensen, J.R., 1996, *Introductory digital image processing - A remote sensing perspective*, Prentice Hall.
- Kim, S-J, 1993, *Geology of Korea*, Foreign Languages Book, Publishing House, Pyongyang.
- Manguet, M., 1994, *Desertification*, Springer-Verlag.
- Pye, K. and Tsoar, H., 1990, *Aeolian sand and sand dunes*, Unwin Hyman.
- Taylor, G. and Eggleton R.A., 2001, *Regolith Geology and Geomorphology*, John Wiley & Sons.
- 교신 : 이민부, 363-791, 충북 청원군 강내면 한국교원대학교 제2대학 지리교육과(이메일 : minblee@knue.ac.kr, 전화 : 043-230-3630)
- Correspondence : Min-Boo Lee, Professor, Department of Geography Education, Korea National University of Education, Cheongwon-Gun, Chungbuk, 363-791, Korea(e-mail : minblee@knue.ac.kr, Tel : 043-230-3630)

최초투고일 06. 5. 16.

최종접수일 06. 6. 12.