

〈研修特講〉

인공위성 원격탐사에 의한 지구 수계환경 감시

박 경 윤*

요 약 문

1960년대 초 부터 미 국립항공우주국 (NASA)에 서 기상위성을 지구궤도에 올리면서 시작되고 우주개발 선도국들에 의해 수 없이 발사되어 지구상공을 순회하고 있는 각종 실험위성, 자원탐사위성들로부터 이전까지만해도 지역적이고 단편적인으로 알려지던 지구환경 현황들이 이제는 지구전체에 대한 시시각각의 정보로 확대되고 있다. 기상위성들에 장착된 Sensor들로는 구름과 기상현상의 분포는 물론이고 각 대양의 해수면 온도 분포들이 파악되고 있으며 식물지수에 의한 지상의 식물분포의 계절적 변화양상에서 열대림의 사막화 추세들까지도 분석된다. 특히 위성탐사에 의한 남극 오존홀 (Ozone Hole)의 확인은 최근 악화 되고 있는 지구촌 환경문제에 대한 커다란 주의를 환기시켜 주었다. 대양의 Phytoplankton 분포가 계절에 따라 위성자료에 의해 분석 되므로써 해양의 생산능력 (Productivity)의 변화도 알게되고 있다. 해양수면의 높이를 측정했던 초단파 (microwave)영역의 SAR자료는 구름을 투과하여 지구표면을 전천후 Monitoring할 수 있는 다음 세대의 Sensor로 각광을 받고 있으며 앞으로 유럽과 일본, 캐나다, 소련 등에서 이들 새로운 Sensor들이 탑재 될 자원탐사 위성 (ERS)과 RADASAT등의 위성이 계속해서 개발되고 있어 이들에 의한 지구환경상태 진단은 크게 각광받게 될 것이다. 그외에도 해면풍 운량, 총강우량 분포, 대기 투명도, 대기의 열수지 등

의 계절적 변화에 대한 인공위성자료 해석을 통하여 지구의 온난화문제가 본격적으로 평가되고 있다. 또한 자원탐사위성인 Landsat과 SPOT등의 위성에 의해서는 각대륙의 토지 이용도 변화, 토사의 이도, 지질도 작성, 입체도 제작등과 농산물수확량의 예측 있어서 팔목할 만한 발전이 계속되고 있다. 더욱이 NASA와 일본, 유럽등에서 지구관측을 위해서 준비하고 있는 각종 지구 관측위성(EOS)들이 실용화 될 2000년 대에는 일반 지구환경감시는 물론 수계환경 감시 체계구축에 획기적인 진전이 있을 것으로 기대된다.

1. 머릿말

우리 인류가 거처하고 있는 하나뿐인 행성 지구가 환경위기에 직면해 있다고 하나 지상에서의 관측만으로 지구환경악화의 실상에 파악하는 데는 한계가 있었다.

미국 국립 우주항공국 (NASA)은 1960년대 초 기상위성을 위성궤도에 올리면서 지구대 기권의 Dynamic한 변화현상을 전지구에 걸쳐 매일 매일 파악하기 시작했고 지금은 선진각국이 동참하여 지상관측과 함께 인공위성탐제 Sensor를 통한 지구전반에 걸친 해상, 육상과 대기권에서 일어나고 있는 환경변화들이 규명되고 있으며 각종현상들의 연관성이 체계화된 지구 과학으로 해석되어가고 있다.

지금 지구 주변을 운행중인 주요탐사위성으로는 국제도를 돌거나 적도상공에 정지하고 있

* 한국과학기술연구원 시스템 공학 연구소

는 기상위성, 자원탐사 위성인 미국의 Landsat, 불란서의 SPOT, 일본의 MOS (Marine Observation Satellite)등이 있고 그의 많은 시험위성이 있으며 또한 곧 궤도에 진입할 것으로 예상되는 구주공동체와 일본의 ERS(Earth Resource Satellite), 캐나다의 RADARSAT등이 있다. 이 글에서는 이들 위성에 의한 그간의 지구대기권, 해양 및 육상환경 조사 결과를 간추려 보고, 수계환경 감시에 대한 몇가지 고찰을 제시하였다.

2. 인공위성 원격탐사

인공위성에 탑재된 Sensor를 사용하여 지구 환경변화를 monitoring 하는 것은 원격탐사 (remote sensing)라는 간접적 방법에 의하여 광역의 현상들을 짧은 시간에 일시에 파악하는 것이다. 마치 지표 상공 수백 - 수만 km에서 지구 표면을 향하여 흑백 또는 천연색 사진이나 Video 영상을 찍는 것과 같은 방법으로 순식간에 많은 자료를 취득하고 이것을 Computer와 주변 기기의 도움으로 대기의 현상이나 지상환경과 해양현황을 분석해 낼수있다. 이자료를 분석할 때는 탐사용 Lens에 잡힌 시각안의 영상을 수천 - 수백만의 화소 (picture element:pixel)라는 점으로 분할하여 각 점의 자료를 개별적 또는 몇개의 집단으로 묶어 그점들이 지니고 있는 물성적 특성을 알아내게되는 것으로 직접측정보다 정밀하지는 못하지만 넓은 지역의 수 많은 자료가 한꺼번에 Computer에 의해 분석되는 특징 때문에 지표위의 광역현상을 파악하는데는 필수조사 방법이라 하겠다.

위성에 의한 원격탐사방법은 첨단기술과 우주 과학기술의 발전에 따라 최근 급격히 기술적 향상이 이루어지고 있으며 조사대상물의 수평적 분포뿐만 아니라 수직적 분포 즉 profile까지 파악되고있다. 이 원리는 사용하는 전자파의 각 파장대에서의 반사라던가 복사 특성을 활용 하는 것으로 불투명 표적물에서는 표피의 현상 그리고

반투명 표적물에서는 투과 전자파가 크게 감쇠되지 않은범위에서의 수직 및 수평 변화 현상을 파악할 수 있으나, 그 정밀도에 있어서는 아직도 개선되어야 할 많은 문제점들이 있다.

현재 정규적으로 운행되고있는 환경탐사위성으로는 크게는 2가지로 기상위성과 자원탐사위성으로 나누어 말할 수있다. 기상위성에는 극궤도를 돌며 지구의 곳곳을 일정주기로 돌아다니며 전 세계의 기상현상을 탐사하고있는 위성으로 미국의 TIROS계열 NOAA위성과 소련의 METEOR 위성이 있다. 현재 NOAA위성들로는 NOAA-11까지 궤도에 진입되어 있는데 활동중인 것은 NOAA-10과11이다. 또한 기상위성으로 적도상공에 정지 하면서 계속적으로 같은 지역의 기상현상을 관찰할 수 있도록 기상영상을 방영하고 있는 정지기상위성인데 현재 적도상공 약 75도 간격으로 5개가 배치되어 있다. 발사국으로 보면 미국이 2개, 일본, 인도 및 구주공동체가 각 1개씩이다. 기상위성자료의 특징에는 이 자료를 수신하는 장비만 갖추면 누구나 수신료의 지불없이 자유롭게 수신하고 사용할 수 있는점이다. 이러한 추세는 세계기상기구(WMO)의 기상자료 자유교환 원칙정신에 입각하는 것으로 그 주요 이유는 기상자료가 세계각지의 인류 복지향상에 공통적으로 기여하게 된다는 점이다.

자원탐사위성에는 미국의 Landsat과 불란서의 SPOT위성들이 정규적으로 운행되고 있으며 준정규적인 것으로는 일본의 해양관측위성(MOS)도 있으며 또한 유럽우주 공동체에서 곧 발사할 자원탐사위성과 Canada에서 개발하고 있는 Radarsat등이 대표적인 것으로 말할 수 있다. 다만 자원탐사 위성자료의 수신에는 방대한 자료량을 짧은 시간에 수신해야 하므로, 비교적 값 비싼 수신장비와 자료처리 시설이 필요하고 위성 보유 기관에서 상당한 자료 수신 수수료를 요구하고있다. 이 때문에 자원탐사 위성자료 이용에는 비교적 많은 자료 이용경비가 소요되고 있으나, 광역의 자료를 얻게되는 점을 고려한다

면 단위면적당 지출 경비는 지상 실측치를 얻을 때보다 훨씬 적다.

3. 인공위성에 의한 지구환경탐사

인공위성 탐사가 가장 먼저 실용화된 분야는 구름분포의 관측이다. 가시광선대와 열적외선대를 통한 대기권 구름분포의 지속적인 관측이 가능 해졌고, 지상관측으로 포착하지 못하던 광범위한 지역에 동반되어 일어나는 기상변화 현상과 추세를 일시에 파악되는 점은 광역기상예보에 획기적인 향상을 가져왔다. 그러나 아직도 구름 종류의 식별이라던가 구름에 동반하여 일어나는 강우, 강설, 뇌우 현상들의 추정에는 앞으로 많이 개선되어야 할 과제로 남아있다.

위성의 열적외선 탐사기로는 지구표면이라던가 짙은 구름의 윗면의 온도가 측정되고 있다. 따라서 이 적외선 자료가 가장 적절하게 활용되는 분야는 역시 해수표면 온도 분포로서 매일의 해수면 온도 변화는 해류의 현황이나 어황예측에 좋은 정보가 되고 있다. 특히 대양에서의 평균 해수면온도의 계절적 변화는 장기간의 기후변동에 큰 영향이 미친다는 사실들이 최근에 들어 자주 지적되고 있으며 열대나 아열대 지방의 광역기후변화 요인으로 나타나고 있다. 해수면 온도분포와 병행해서 최근 CZCS (Coastal Zone Color Scanner)에 의해 관측된 해양의 Plankton 분포도는 어군의 소재를 예측하는 좋은 자료가 되고 있을 뿐 아니라 해양생산 능력 (Marine Productivity)의 장기적 평가와 해양환경의 변화분석에 가장 중요한 자료가 되고 있다. 또한 위성 관측에 의해 작성되는 평균해수면의 등고선지도는 해류의 연구와 지구온난화들에 의한 해수면 상승효과등의 분석에 사용되고 있다.

가시광선대와 근적외선 자료의 차를 Normalization하므로서 얻어진 식생지수(VI)는 육상에 성장한 단위면적당 Biomass 총량과 깊은 상관

관계를 갖은 것이 밝혀져 있어 위성으로 부터 얻게되는 주기적인 식생지수 분포도의 분석으로 식생분포의 계절적 변화와 대륙의 사막화 추세를 Monitoring 하는 가장 적절한 수단으로 판단되고 있다. 지역별 인구증가와 식량 문제의 심각성이 대두되는 지역에서 식생지수 분포의 Monitoring은 식량문제의 악화와 환경 파괴를 조기경보하는 자료로서 활용되고 있다.

더욱이 VI와 Marine Productivity분포도는 지구촌 각지역의 식생능력을 나타내는 자료로서 평가되고 있다. 만일 지구촌 전반에 걸친 식생능력이 현저히 저하되어있음이 알려질 때에는 궁극적으로 지구 전체가 인류의 안식처로서 위험 수위에 직면하게 되고 있음을 경고하는 결론에 도달될 것이다. 우리는 다른 광역의 환경변화에도 예의 주시하여야 겠지만 대륙에서의 VI 변화나 Marine Productivity변화 추세에도 깊이 주시할 필요가 있다.

위성탐사에 의해 널리 알려진 사실중의 하나는 남극대륙 상공에서 나타난 오존 홀(Ozone Hole)현상이다. 미 NASA의 위성 Sensor인 TOMS로 지구 전반에 걸친 오존 분포도를 주기적으로 만들어 낼 수 있는 자료가 관측되고 있는데, 지난 10여년간 이 TOMS자료의 분석 결과로 대기권이 오존분포는 극심한 계절적 변화를 하고 있으며, 특히 남극의 오존층이 총량에서 세계 어느곳보다 적은 Hole 현상이 뚜렷하게 나타나고 있음이 알려졌다. 더욱이 놀라운 사실은 지난 10년 사이에 이 Hole 주변의 총 오존량이 절반으로 줄었다는 점이다. 이러한 오존층 파괴는 Freon 가스라는 CFC계열 물질을 대기중에 많이 방출한 결과로 초래된 것이라는 주장 때문에, 이와같은 오존층 감소추세가 계속되고 남극의 Ozone Hole이 타 지역으로 확장된다면 지표면상에 자외선 증가로 인해 피부암발생이 급격히 증가 할 뿐 아니라 각종 생물의 생태계에 큰 변혁이 야기될 것으로 예측되고 있다. 특히 성층권의 오존층 감소는 지구온난화에도 기여 하여 극기의 빙하를

녹이고 해수면 상승을 초래 시킬것이다. 그러므로 위성탐사에 의한 Ozone층의 Monitoring은 계속하여 추진되어야 하겠고 그 변화 추세도 면밀하게 검토되어야 할 것이다.

인공위성 탐사로만 가능할 수 있는 또 한가지는 남극과 북극의 빙하대육의 관찰이다. 혹심한 기온의 변화로 이 두 얼음의 대륙은 계절적으로 크게 변하고 있는데 이들 변화가 지구의 기후 및 기상 변화와 어떤 관계를 가지고 있으며 장기적인 추세가 어떻게 될 것인지는 많은 나라에서 깊은 관심거리가 되어 있다. 왜냐하면 지구기온 상승으로 이 극지의 해빙이 방대하게 일어날 경우 많은 해변국가의 육토들은 해수에 잠길 처지에 있기 때문이다.

지구대류권은 끊임없이 태양의 에너지를 흡수하고 방출하며 남과 북으로 여분의 에너지를 순환시키고 있다. 이러한 현상은 기상변동에 따른 구름의 분포와 이동에 의해 복잡한 역학적 구조를 가지고 있지만 대체로 장기간의 기준으로 볼때 지구 전체에서는 열평형을 이루고 있다. 지구촌의 대규모 환경변화는 이 열평형의 구조를 바꾸고 예기치 못한 기후변화를 초래할 우려도 있으며 강수 pattern의 변화로 지구내의 수(Water)계순환에 큰 변화를 일으킬 수도 있을 것이다. 실험탐사 위성(ERBE)으로 지구의 열복사 평형 연구가 1980년대에 활발히 추진되었으며 미래위성으로는 강수기후를 탐구할 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)위성이 미국과 일본이 공동으로 개발하고 있으며 1996년에는 발사될 예정이다. 대기의 열평형에 주요 요소로 작용하고 있는 탄사가스의 농도분포를 탐사할 수 있는 위성 Sensor도 일본에서 추진되도 있어 이 위성도 또한 90년대 후반에는 실용화 될 것으로 예상된다.

지구표면에서는 끊임 없이 지진과 화산 폭발이 발생하고 있는데 이 원인은 지표겉질이 용암위에 떠있으면서 조각으로 표류하기 때문이라 한다. 이들 지표조각(Plate Tectonic)이 서

로 다른 상대운동을 하고 있음이 위성관측으로 밝혀지고 있는데, 각 지표의 표적 간에 상대적 거리의 계속적인 관측은 지구의 오랜 역사와 먼 장래를 예측할 수 있는 자료가 될 것이다. 지표면의 재난은 지진이나 화산에만 그치지 않고 혹심한 기상변화와 홍수등에 의한 자연재해 그리고 무모한 인간의 환경파괴등에 의해 끊임 없이 발생하고 있다. 그 규모는 지엽 적일 때도 있으나 때로는 대륙적인 규모로 확대 되기도 한다. 인공위성 탐사는 이와같은 예측되거나 예측치 못하는 많은 현상들을 주기적으로 Monitoring 하는데 가장 주요한 수단으로 대두되고 있다.

도시 발전은 끊임 없이 녹지가 파괴되는 결과를 초래시키고 기상이변시 홍수등에 의한 가중적인 피해를 불러오고 있다. 인공위성 탐사로 토지이용도등의 변화추세를 파악하여 도시 개발 전후에 폭우시의 홍수예측을 가능케하고 있으며 토사이동이나 광역의 대기오염 확산등을 위성자료로 부터 추정하는 분석기술도 최근에는 많이 발전하고 있다. 그러나 위성탐사에 대한 기술은 아직도 초기단계에 있다고 판단되며 우주 개발과 첨단 Sensor기술의 발전 그리고 분석기술의 향상으로 닥아오는 2000년대 까지 급격히 발전할 것으로 예상된다. 선진 각국에서는 이러한 기반 기술의 개발 뿐 아니라 지구과학에 관련된 모든 분야를 체계화하여 연계시키고 종합적인 지구 System과학으로서의 접근을 시도하고 있으며 지구환경의 미래 예측방법을 개선해나가고 있다.

특히 주목할 만한 것은 미국이 주축이되어 국제간 협력으로 개발하고 있는 EOS(Earth Observing System)와 기타 지구관측위성들인데 EOS는 그안에 각종 최신 지구환경관측 장비들을 갖추고 지구환경변화를 계속적으로 Monitoring 하겠다는 것으로 여기에 소요되는 예산이 2000년대 까지 무려 \$170억 이 소요된다고 한다. 그외에 다수의 단기간 실험목적의 환경탐사 위성들

도 계속적으로 추진 될 예정이다.

4. 수계 환경의 인공위성 감시

지표면상의 수계를 포함한 많은 지구환경 요소들은 쉬지않고 변하고 있다. 이 변화의 양상이 인류의 서식 여건에 바람직하지 않은 방향으로 진행된다고 판단 될 때 우리는 환경의 악화 또는 파괴하고 까지 말한다. 대기 오염과 산성우 등에 의한 삼림지대의 황폐화 또는 사막화라던가 산업폐기물에 의한 농경지의 불모화, 해양오염에 의한 해양 생태계의 변화, 지구대기권 오존층의 감소등은 최근 심각하게 관측되고 있는 사례들이다. 이러한 요소들의 변화가 광범위하게 일어나고 있음이 여러 운행중인 인공위성 자료에 의해 밝혀지고 있는데 이들은 궁극적으로 지구환경 순환의 맥을 이루고 있는 수계를 변화시키고 생물권의 젖줄인 물의 오염을 유발시키고 있다.

인공위성들에 의해 얻어지는 전지구권의 식생지수 도표에서 수계순환의 계절적 변화와 장기변화의 추세를 주기적으로 점검하고 생태계의 동향을 파악할 수 있을 것이다. 또한 위성탐사에 의한 온대지방의 겨울철이나 양극지방의 적설량 분포도에서는 국지적 또는 장기적 생활용수의 전망을 예측할 수 있고, 적설의 해빙에 따른 대기순환과 해수면의 변화를 예측하고 지구온난화의 진전현상들을 분석할 수 있을 것이다.

우리는 IGBP(International Geosphere-Biosphere Programme)의 핵심 Project인 Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHC)계획에 대해 관심을 가질 필요가 있다. 이 계획에서는 지구상의 물이 어떤 경로를 통하여 식물권과 생태계 기능에 영향을 끼치고 환경 변화를 유발시키는지를 밝히기위해 지상관측망과 Landsat, SPOT, NOAA 위성들의 자료와 미래위성들에 의해 앞으로 얻게될 자료를 활용하여 점진적으로 규명해 나갈 것을 목표로 하고있다. IGBP는 그외

에도 지구 수계권 연구와 관련된 몇가지 핵심계획으로 국제 지구대기화학 (IGAC) Program, 지구 해류연구 (Joint Global Flux Study), 지구 변화 및 자연 생태계 (Global Change and Terrestrial Ecosystems) 계획등에서 인공위성 원격탐사 자료 활용을 추진하고있다. 그러나 아직은 인공위성자료를 수계연구에 활용하는 충분한 기반연구가 부족한 상태이지만 이 방면의 연구 진전이 활발한 속도로 이루어지고 있으므로 여기에 선행되어야할 연구에서 지상관측과 풍선이나 비행기관측 자료가 많이 이용될 것이다.

우리나라에서도 해마다 겪는 막심한 풍수해의 예방과 피해규모의 축소를 위해 인공위성자료 활용이 시급한 실정이다. 부분적으로는 대학교, 연구소, 기상청에서 기상위성자료를 수신하고 활용하는 연구를 추진해오고있으나 기상위성 자료에서는 시간적으로는 수시로 얻을수 있지만 한국의 지형을 정밀히 해석하는데는 분해능이 나쁘다.

SPOT 위성자료에서는 분해능은 좋지만 자료를 취득하는데 너무 장기간이 걸리고 빈번한 구름 때문에 지금까지 이용의 긴급성에서 많은 제한을 받아왔다. 앞으로 자료 취득면에서 신속한 방법이 이루어질 경우 우리나라 수계분석에의한 자원탐사 위성자료의 활용성은 크게 향상될 것이다. 그외에도 미래위성으로 곧 발사될 RADAR 위성들이 실용화 될 때에는 우리나라는 물론 전 지구의 수계 monitoring과 변화예측에 일대혁신이 올것으로 예견된다. 우리나라 수문 학도들도 이에 대비하여 지금부터 이 분야에 대한 연구에 보다 많이 노력해 야 할 것이다.

5. 맺는말

지구생태계를 지탱시키고 있는 광역수계감시와 이를 지원하는 여러 환경요소들의 변화감시가 인공위성 원격탐사 방법의해 최근 활발히 추진되고있는 측면을 살펴보았다. 지금 정규

적으로 운행중인 환경탐사위성인 기상위성과 자
원탐사위성들에 의해서도 광역의 수계감시 가능
성이 충분히 보여졌지만 실용화 단계에는 아직
도 많은 기술개발이 필요한 것으로 나타나고 있
다. 우리나라와 같은 기술개발 도상국이면서도

많은 풍수해 예상지역에서야 말로 인공위성 원
격탐사 시스템이라는 최신의 첨단 정보유통체계
를 통하여 환경과 수계 감시를 할 수 있는 기술
기반이 하루속히 구축되는 것이 바람직하다.