탄성파 탐사를 이용한 전곡리 퇴적층 조사

최광희 · 김종욱
서울대학교 지리교육과

1. 서론

1) 배경

'탄성파 굴절법 탐사(Seismic Refraction Method 또는 Refraction Seismics)'는 20세기 초부터 석유탐사와 암염돔 탐사 등 지하 자원 탐사에 널리 이용되어 왔으며, 오늘날에도 여러 지구물리학적 탐사와 더불어 지하구조 해석 및 각종 탐사와 지반공학에 활용되고 있다(Palmer, 1986). 특히 지질학은 물론, 고고학 등 지형학의 유관 학문에서도 그 활용 사례가 증가하고 있는데, 비파괴적인 방법으로 지하구조에 대한 정보를 비교적 용이하게 얻을 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 탄성파 탐사를 토대로 전곡리 지역에 퇴적된 제4기 퇴적층의 심도와 그 하부에 놓인 기반암의 형태를 분석하였다.

2) 연구지역

연구지역은 연천군 전곡리로 한탄강 유원지 부근이며, 한탄강과 장진천(=차탄천)의 합류지점으로 용암대지와 하안단구 및 범람원 등 다양한 지형이 나타나는 곳이다(그림 1). 또, 구석기 유적 발굴에 따라, 상당수의 수직단면이 조사·보고되어 탄성파 자료 해석시 비교자료로 사용할 수 있었다. 특히, 상부의 토양층과 하부의 현무암과 편마암은 음향임피던스와 매질의 속도차가 크기 때문에 굴절법 탐사에 유리하며, 발굴 단면을 이용하여 자료 해석시 보정할 수 있기 때문에 최적의 연구지역이다.

3) 연구방법

연구지역내에서 다양한 지형과 지질정보를 고려하여 한탄강 양안의 4개 지점을 선정하여 탄성파 탐사를 시행하였는데, 현무암 용암대지위의 퇴적층, 현 장진천의 범람원, 한탄강의 하안단구 지형이 포함된다. 실제 탄성파탐사에는 비교적 평탄하고 장애물이 없으며, 매질간의 음향임피던스가 큰 곳이 유리하기 때문에 야외조사를 통해 이러한 조건에 맞는 지역을 선정하였다.

한편, 용암대지 퇴적층에는 구석기 발굴현장이 있어서 수직 단면을 관찰할 수 있었는데(그림3), 탄성파 탐사 분석시 자료의 검증을 위해, 수직심도를 측량하고 여기서 6개의 토양시료를 채취하여 입도분석을 시행하였다.

야외 탐사에는 '동일선 전개 방식(in-line spread)'을 사용하였으며, 사용된 측선(spread)[1]의 길이는 각 탐사구간별로 30~90m로, 약 7~20m 정도의 심도를 측정하였다. 탄성파 에너지원은 해머(약 7kg)를 사용하였으며, 신호를 증폭하기 위해 5회 연속발파(stacking)를 시행하였다. 해석방법으로는 'Time-term Inversion'과 'Ray tracing Method' 등을 이용하였는데, 일본 OYO사의 Seisimager2D라는 굴절법 해석 프로그램을 사용하였고. 토모그래피를 통해 각 층의 두께와 특성을

1) 보통 지구물리학에서는 '전개'라는 용어를 사용

분석하여, 알려진 암석의 속도정보를 참고하여 각 층의 구성물질을 추정하였다.

2. 매질의 특성

1) 입도 분석

구석기 발굴 현장(지점1)에서 채취한 시료에 대한 입도 분석을 통해 현무암 위에 퇴적되어 있는 퇴적층의 구성물질을 확인하였다. 시료는 바닥(54m)에서부터 수직으로 1m 간격을 두고 표층(60m)까지 채취하였고, 유기물은 과산화수소를 이용하여 제거하였으며, 하이드로미터를 이용하여 분석(Magee and Alexander, 2000)하였다.

입도분석(grain size distribution analysis) 결과, 퇴적층의 구성물질은 대부분 실트와 점토로 구성되어 있었으며, 수직단면상에 별다른 편차는 보이지 않았다. 구성물질중 실트와 점토의 비율은 비슷하였으며 약 90%를 차지한 반면, 모래(sand)의 비율은 10%정도로 나타났다(그림3). 이러한 분포는 이전 연구자의 결과(오경섭, 1994)와 일치하였다. Lindholm(1987)의 분류에 의하면, 이것은 진흙(mud)에 속하는 것으로 현무암 상부의 퇴적층의 구성물질이 범람원 퇴적물일 가능성임을 말해준다[2].

2) P파의 속도 분포

탄성파 속도는 파가 통과하는 매질의 구성물질 특성에 좌우되는데, 일반적으로 파가 통과하는 매질의 밀도에 비례하는 경향이 있다(민경덕외, 1996). 특히 퇴적암의 경우, 속도는 퇴적된 심도와 연대에 따라 증가한다(Sjögren, 1984).

연구지역의 경우, 표층의 속도는 300~700m/s로, 심도는 1m 안팎이며, 이는 공극이 많고 수분으로 포화되지 않은 토양과 모래 층 등에서 관찰되는 것으로 알려져 있으며(Sjögren, 1984; Milson, 1986), 대개의 굴절법 탐사시 표층은 이와 비슷한 정도의 속도를 나타낸다.

두 번째 층의 속도는 1200~2200m/s로 나타났으며 지형적으로 두 가지로 크게 구분되는데, 범람원과 하안단구가 그것이다. 현무암 상부의 퇴적층과 편마암우에 놓인 현 범람원 퇴적층의 탄성파 속도는 1500m/s~2000m/s로 나타났으며, 구성물질은 주로 실트 및 점토 등 세립물질로 추정된다. 두 층의 속도분포가 유사한 것으로 보아 매질의 성질이 유사할 것으로 추정할 수 있다. 하안단구의 경우, 1200~1500m/s의 속도로 범람원에 비해 다소 느리게 나타났는데, 상당히 풍화되었거나, 모래나 자갈 등의 비교적 조립 물질이 퇴적되었을 것으로 보인다.

세 번째 층의 속도는 4000~5500m/s로 상당히 빠른데, 이는 일반적으로 기반암에서 관찰되는 속도분포와 유사하다. 특히, 현무암으로 추정되는 층은 약 5000m/s의 속도분포를 보였는데, 이는 다른 연구결과(Sjögren, 1984)와 일치했다. 범람원 하부(편마암)의 경우에도 현무암에서 관찰한 것과 비슷한 속도를 보였는데, 이 또한 알려진 속도분포에 잘 부합한다. 하안단구의 경우 3500~4000m/s의 속도를 갖는 것으로 보아, 매질의 성질이 현무암 또는 편마암과는 다를 것으로 추정되는데, 상당히 풍화를 받은 암석이거나, 풍화된 퇴적암 등으로 추측할 수 있으나, 탄성파 정보만으로 암석 자체를 판단하는 것은 무리하다고 판단된다.

---

2) Zhao외(1999)에 따르면 영국의 Severn강의 하도에서 100m 정도 떨어진 범람원의 퇴적물의 입도분포가 이와 비슷한 수치를 보였다.

3. 퇴적 심도(Depth)와 기반암에 대한 분석

1) 주시곡선과 토모그래피

탄성파의 도달거리와 시간을 통해, 파의 속도와 경계면(굴절된 곳)까지의 거리를 추정할 수 있는데, 특히 음향임피던스의 차가 클수록 이러한 추정이 용이하다. 각 수진기에 가장 먼저 도착하는 선두파를 거리와 시간의 그래프로 표현한 것(그림4)을 주시곡선도(time-distance plot)라 하는데, 이를 통해 지하구조를 파악할 수 있으며, 주시곡선을 이용하여 작성한 토모그래피 분석을 통해 각 구간별로 기반암의 형태와 퇴적 형상을 파악할 수 있었다.

각 조사지점별 전개길이가 30 - 90m였기 때문에 각 토모그래피의 심도는 7 ~ 20m 정도가 되었으며, 각각 3개의 층으로 구분되었다. 하지만, 첫 번째층과 두 번째층의 속도차는 크지 않으므로 비슷한 구성물질로 이루어져 있다고 판단할 수 있는데, 같은 물질이라도 수분의 포화정도와 공극의 분포에 따라 탄성파 속도에 영향을 주기 때문이다. 일반적으로 하부 퇴적물일수록 밀도가 크기 때문에 탄성파의 속도도 빠르게 나타난다. 세 번째 층의 경우엔 현무암 또는 편마암 등의 기반암으로 토모그래피를 통해 경계면의 형태를 추정할 수 있었다.

2) 지형별 퇴적 심도와 기반암의 형태

현무암 상부 제4기 퇴적층에 대한 조사지점(Site 1)은 현재 한탄강에서 약 1km정도 떨어져 있으며, 구석기 발굴현장에서 약 1m 정도 떨어진 지점이다. 조사결과 퇴적심도는 5~7m로 추정되는데 이는 구석기 발굴현장에서 관찰한 실측 자료와 일치하였으며(그림 5), 경계면, 즉 현무암의 표면은 다소의 굴곡은 있으나 대체로 평탄한 형태를 보였다.

현 장진천의 범람원은 98년 홍수시에도 수해를 입은 지역으로 조사지점(Site 2)은 장진천의 서쪽으로 500m 정도 떨어져 있는 지점이다. 퇴적층 두께는 5~6m로 분석되었으며, 하천에 가까워질수록 심도가 깊어지는 모습을 보였다. 특히 경계면의 경사를 연장해 보면 기반암의 고도와 장진천의 하상 고도가 대략 일치하게 되어, 하천의 수평적 이동을 가늠할 수 있었다.

여기서, 현 장진천의 범람원 퇴적층에서의 탄성파 속도(1700m/s)가 현무암 위에 퇴적되어 있는 퇴적층의 그것(1800m/s)과 유사하다는 것은 구성물질의 특성이 비슷하다는 것을 짐작케 한다. 따라서 현재 구석기 발굴작업이 진행중인 현무암 위에 퇴적되어 있는 퇴적층은 과거 범람원이었을 가능성이 있다. 또한 이는 범람원 퇴적물에 대한 다른 탄성파 연구결과(Reynolds, 1997)[3]에 부합되는 것으로, 구성물질에 대한 입도분석과 더불어 충적층의 증거가 된다.

하안단구면(Site3)에서 측정한 퇴적층은 4m정도의 심도로 추정되나, 탄성파 탐사 도중 잡음 발생이 많아 전개길이가 짧아 전체적인 경향성을 파악하는 데는 무리가 있다. 대략적인 기반암의 형상은 하천방향으로 9.5°정도 기울어져 있으며, 지표면의 경사와 비슷하게 나타났다. 황천마을 부근(Site 4)에서는 하부 암석이 현무암이었으며, 퇴적층의 두께는 5~10m로 나타났는데, 경계면의 형태가 사면쪽은 평탄하다가 하천 방향으로 급한 경사를 이루어, 침식 받은 흔적을 보인다.

4. 요약 및 결론

굴절법 탐사를 이용하여 제4기 퇴적층의 심도를 비롯한 다양한 지형 및 지질정보를 알 수 있었다. 특히 현무암 위에 퇴적되어 있는 퇴적층은 현 장진천의 범람원 퇴적물과 비슷한 탄성파 속도분

3) 범람원 퇴적층에 대한 P파의 속도는 1800-2200m/s로 알려져 있다.

포를 보여 과거 범람원이었을 가능성을 시사한다. 즉, 용암대지 퇴적층(site 1)의 경우, 하부에 놓인 현무암과의 경계면이 평탄하고, 자갈층이 잘 발견되지 않은 점은 과거 한탄강의 유로에서 비교적 멀리 떨어져 있던 범람원의 일부로 추정할 수 있다.

탄성파 탐사를 통해 밝혀진 퇴적층의 심도는 구석기 발굴 현장의 실측자료와 거의 일치하여 신뢰할 만한 탐사방법임이 증명되었다. 단층 및 사면 안정성에 관련된 연구는 타학문 분야에서 이미 활발하게 진행되어 오고 있으며, 유적 발굴 등에도 활용되고 있다. 해머를 사용하는 방법은 안전하고 비파괴적이며 비교적 다루기 쉬운 방법이다. 탄성파 탐사는 단구, 패디먼트, 선상지, 범람원 등을 비롯하여 퇴적층과 기반암과의 관계가 지형 연구에 중요한 열쇠가 되는 모든 분야에 응용될 수 있다.

참고문헌

민경덕, 서정희, 권병두, 1996, 응용지구물리학, 도서출판 우성.

현병구외, 1995, 물리탐사용어사전, 선일문화사.

Lindholm, R., 1987, *A Practical Approach to Sedimentology*, London: Allen & Unwin.

Magee, B. J., Alexander, M. G., 2001, Simple test method to assess the relative effectiveness of plasticising chemical admixtures, *Cement and Concrete Reasearch*, 31, pp.303-307.

Milsom, 1996, *Field Geophysics*, New York : John Wiley & Sons, pp.141-177.

Palmer, D., 1986, *Refraction Seismics*, London : Geophysical Press.

Reynolds, J. M., 1997, *An introduction to applied and environmental geophysics*, Chichester; NewYork; John Wiley.Sjögren, 1984, *Shallow Refraction Seismics*, Chapman and Hall.

Zhao, Y., Marriott, S., Rogers, K., Iwugo, 1999, A preliminary study of heavy metal distribution on the floodplain of the River Severn, UK by a single flood event, *The Science of the Total Environment*, 243/244, 219-231.

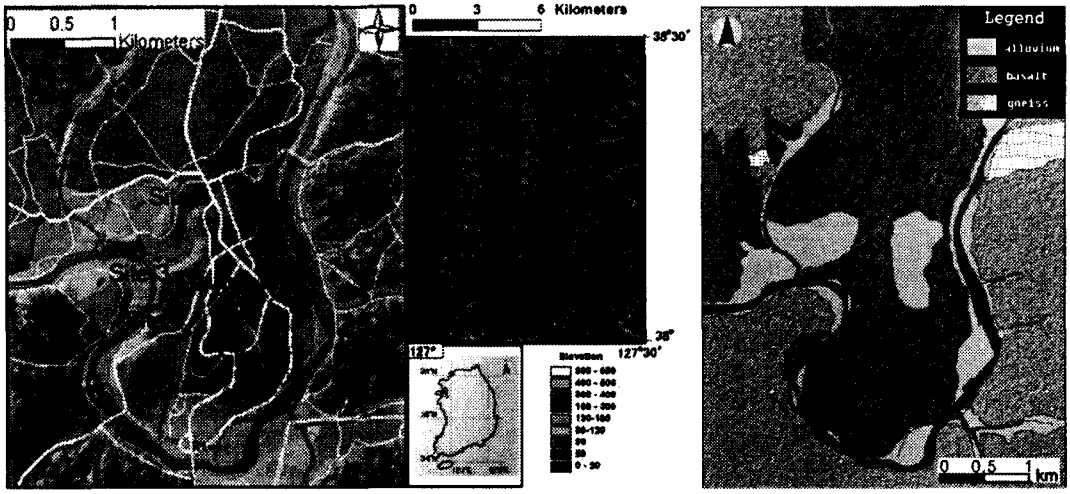

그림 1. 연구지역의 지형 및 지질

그림 2. 구석기 발굴현장의 수직단면

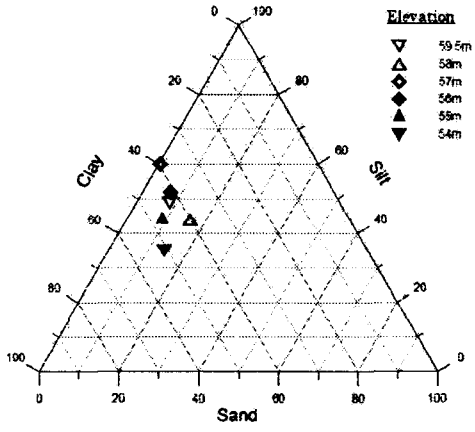

그림 3. Site 1의 입도분석 결과

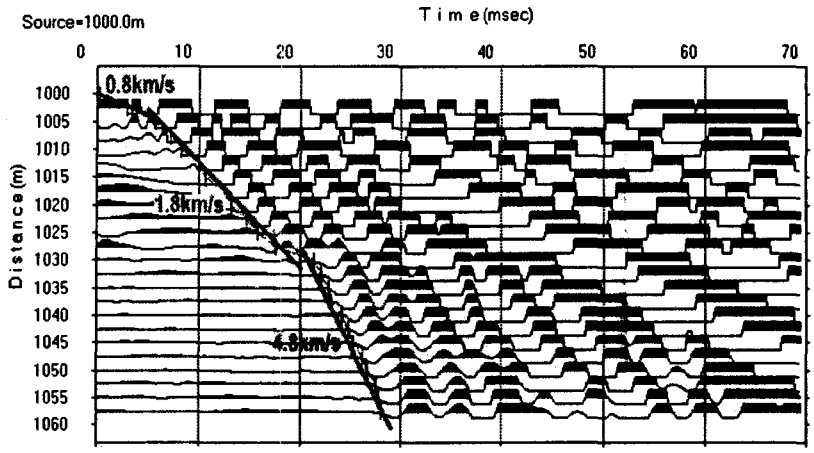

그림 4. Site 1의 파형 데이터

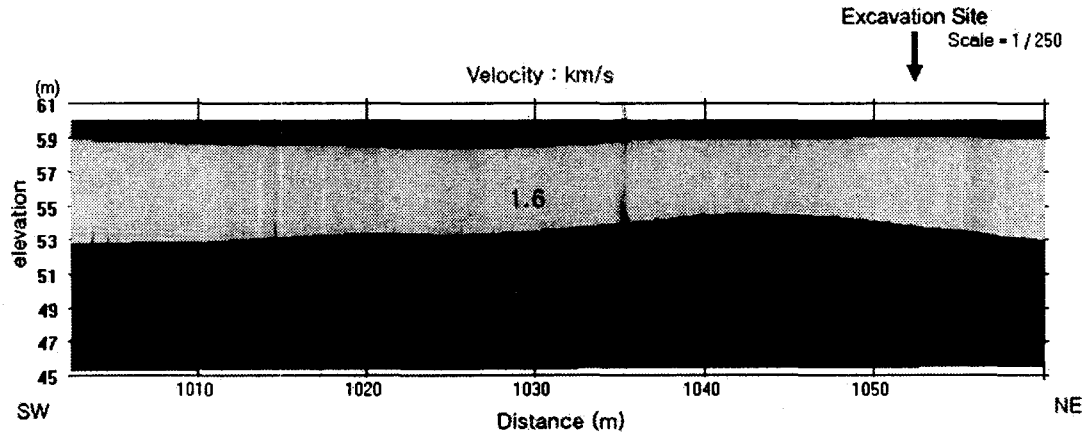

그림 5. Site 1의 토모그래피