공주 공산성 원형연못의 지반에 대한 탄성파 굴절법 탐사

변성환, 오진용, 서만철

공주대학교 문화재비파괴진단연구실, 2004class@hanmail.net

요 약

탄성파 탐사는 인공지진파를 이용하여 지표면 하부의 물성을 알아내는 지구물리탐사로서 20세기 초부터 석유탐사와 공학적 지반조사에 가장 널리 사용되었다. 굴절법 탄성파 탐사는 지층의 탄성파 속도를 알아내는 방법으로서 최근에는 석조문화재 등의 지반특성 조사에서 사용된 예가 있다. 이번 연구에서는 공주 공산성의 쌍수정 광장에 위치하는 공산성 원형연못 주변의 지반에 대하여 굴절법 탐사를 실시하였다. 쌍수정 광장은 기존의 발굴조사를 통하여 백제 추정왕궁지가 위치한 곳으로 알려졌으며, 광장 남쪽에 원형연못(상면직경 7.3 m, 바닥직경 4.78 m, 높이 3 m)도 발굴되었다. 원형연못 주변에 5개 탄성파 측선을 설치하였고, 해머 타격점과 수신기의 배열을 3가지 다른 방식을 적용하여 24 m, 31 m, 48 m 측선 길이의 굴절법 자료를 얻었다. 대체로 공산성 원형연못 주변의 지반은 3개 층으로 구성되어 있다. 각 층의 겉보기 속도는 약 261~391 m/s, 약 591~992 m/s, 약 1950~3230 m/s이며, 첫 번째와 두 번째 층의 두께는 각각 약 2~2.4 m 와 4.6~8.6 m이다. 일반적으로 최하부 층의 속도는 기반암, 상부층들의 속도는 풍화토에 대응한다. 그러나 두 번째 층의 주시곡선 형태와 속도범위는 국내 석탑 문화재 하부의 것과 유사한 것으로 보아 공산성 연못 주변은 인공적인 기초지반의 가능성을 제기하며, 그렇다면 공산성 원형연못은 파내려 간 것보다는 쌓아 올렸을 것이다.

주요어 : 탄성파 굴절법 탐사, 공산성 원형연못, 지반특성

1. 서 론

고고학 및 문화재 관련 분야에서는 발굴 및 보존하기에 앞서 정밀한 진단이 우선적으로 요구되기 때문에 지구물리탐사의 활용 기회는 점점 커지고 있다. 특히, 탄성파 탐사를 비롯한 지구물리탐사는 비파괴 진단이 주요 장점이며, 향상된 측정계기의 등장으로 고해상(high resolution)의 지반환경 조사가 가능하다. 국내에서도 지구물리학적 방법을 이용하여 유적지를 찾아내거나(서만철·이남석, 2000; 김기현·서만철, 2001), 유적지에 대한 지속적인 관찰을

하거나(Suh, 2001), 석조문화재 주변의 지반을 조사하거나(류제라·서만철, 2001; 오선환·서만철, 2001; 이성민 외, 2002; 서만철 외, 2003), 석조물 자체의 물성을 측정하였다(서만철 외, 2002).

이 연구의 목적은 충청남도 공주시 공산성내에 위치한 쌍수정 광장 (혹은 공산성 운동장) 및 광장 남쪽에 위치한 원형연못 부근의 천부 지반구조를 밝히는 것이다. 쌍수정 광장은 기존의 문화재 발굴조사를 통하여 백제 추정왕궁지가 위치한 곳으로 알려졌으며, 이 때에 원형연못(상면직경 7.3 m, 바닥직경 3 m, 높이 4.78 m)도 발굴되었다 (안승주·이남석, 1987). 탄성파 굴절법탐사는 2003년 4월과 5월에 쌍수정 광장에서 원형연못을 중심으로 설치한 측선을 따라서 실시하였다. 연구 결과는 쌍수정 광장의 조성 및 공산성 원형연못의 축조에 대한 이해를 높이는데 도움을 줄 것이다.

2. 공산성과 원형연못

공산성 쌍수정은 인조대왕이 1623년 이괄의 난을 피하여 공산성으로 일시 파천하여 머물렀던 장소였다. 이와 관련하여 영조 10년에 쌍수정이 건립되었고, 이후 몇 번의 수축과 개축이 있었으나 건물의 형태가 많이 손상되어 1970년에 전면 해체하고 새로이 복원하여 현재에 이르고 있다 (안승주·이남석, 1992). 쌍수정 앞에 광장은 표고 85m. 너비 약 6,800㎡의 면적인데 (Fig. 1), 공산성내에서 비교적 넓은 이 광장 전 지역에 걸쳐 1985년과 1986년에 걸쳐 발굴조사를 실시하였다 (안승주·이남석, 1987). 발굴 결과 건물지를 비롯하여 원형연못과 목곽고 및 저장구덩이 등이 발굴되었는데 이들 유구는 모두 백제시대에 만들어진 것이다. 건물지는 추정왕궁지로 알려져 있으며, 추정왕궁지의 중앙에서 남쪽으로 치우쳐 위치한 원형연못은 위치의 외형상으로 조경 시설 또는 왕궁에서 쓰는 용수(用水)를 외부에서 길어다 저장하던 시설로 추정하고 있다. 지금까지 규명된 원형연못의 구조는 지면을 깊게 파고 그 안에 자연석의 원형을 쌓아 만든 형태이다. 발굴 당시 연못 안에는 흙이 완전히 채워져 있었으며, 기와 종류를 비롯하여 토기, 개물, 등잔, 벼루 등 다수의 백제유물들이 출토되었다.

3. 탄성파 굴절법 탐사

3.1. 굴절법 탐사 원리

탄성파 굴절법은 해머 등에 의하여 만들어진 인공지진파가 지하를 통과하여 지표면에 도달하는 시간을 일정한 간격으로 설치된 수진기에서 측정하여 통과한 지하의 탄성파 속도구조를 밝히는 방법이다. 탄성파의 전파과정에서 속도가 낮은 층에서 속도가 높은 층에 입사하는 파는 층의 경계면에서 반사, 굴절 및 회절을 한다. 굴절파 중에서 굴절각이 90°(임계굴절)가 되면, 경계면 하부층 속도로 전파되어, 상부층으로만 전달되는 직접파보다 빨리 수진기에 도착하게 되는 선두파가 생성된다. 탄성파 굴절법은 직접파와 선두파의 도달시간으로부터 주시곡선(time-distance graph)을 만들고, 여기에 나타난 직접파와 굴절파의 기울기의 역수를 취하면 각 층의 속도를 구할 수 있으며, 절단시간 등을 이용하여 각 층의 두께를 구해 낼 수 있다 (민경덕 외, 1986). 수평 경계면을 갖는 지하 구조에서는 주시곡선의 기울기로부터 구한 속도는 지층의 실제 속도를 나타내지만, 경사진 경계면일 때는 지층의 실제

속도가 아닌 겉보기속도가 된다. 이 겉보기속도는 발파점과 수진점의 배열 방향에 따라 달라지는데, 그 값은 실제 속도보다 오르막 경사(up-dip)일 때 큰 값을 갖고, 내리막 경사(down-dip)일 때 작은 값은 갖는다. 대체로 10도 미만의 작은 경사에서는 두 겉보기 속도의 평균값이 실제 속도와 거의 같다 (손호웅 외, 1999). 일반적으로, 굴절법 탐사에서 구한 속도는 겉보기 속도로 취급하며, 이 논문에서는 사용한 속도는 탄성파 P파의 겉보기속도를 의미한다.

3.2. 탐사자료 획득

탄성파 탐사에 이용되는 발파점(에너지원 위치)-수신기 전개방식에는 여러 가지가 있다. 이번 조사에서는 3가지 다른 방식을 시도하였다 (Fig. 1). 끝점발파(end-on shot)는 흔히 사용되는 방법으로 발파점을 측선의 양단에 위치시킨다. 수신기이동방식(walk-away method)은 끝점발파의 변형으로 발파점을 고정시키고 수진기배열(geophone array)을 한 단위씩 이동시킨다. 공통수신점 배열(common receiver point array)는 초창기 해양 굴절법 탐사에서 사용되었던 방법으로 수신기 하나를 고정시키고 발파점을 한 방향으로 이동시킨다.

공산성 원형연못을 중심으로 주변에 5개의 탄성파 굴절법 측선을 설정한 후, 각 측선에 맞는 발파점-수신기 전개방식을 선택하였다 (Fig. 2). 각 측선의 방향, 전개방식, 트레이스(trace) 간격, 발파점-수신기 최대 거리(maximum offset)를 Table 1에 나타내었다. 사용된 에너지원은 2kg sledge hammer 이었으며, 자료기록은 1 회 타격 후 도달되는 파형을 관찰하여 결정하였고, 중합(stack)을 실시하지 않았다. 수진기는 고유주파수 100 Hz의 수신기와 24채널 OYO GEO-SPACE사의 DAS-1 system을 사용하여 0.125ms 간격의 자료를 0.512초 길이로 기록하였다. 주시곡선의 작성을 위하여서는 탄성파 파형의 미세한 왜곡 가능성 때문에 아무런 자료처리를 하지 않은 야외자료를 주로 이용하였으며, 자료 제시를 목적으로 필터링(filter ing)과 이득조절(gain control)을 자료처리 기법을 적용하였다. 사용된 자료처리 프로그램은 SU(Seismic Unix)이다. 각 야외자료에서 읽혀진 초동시각(first arrival time)은 주시곡선에서 기울기가 달라지는 구간을 나누어 최소자승법을 이용한 직선 방정식을 얻었다. 이 직선식에서 기울기의 역수를 취하여 각 층의 겉보기속도를 구하였으며 절편 값을 이용하여 각 층의 두께를 구하였다.

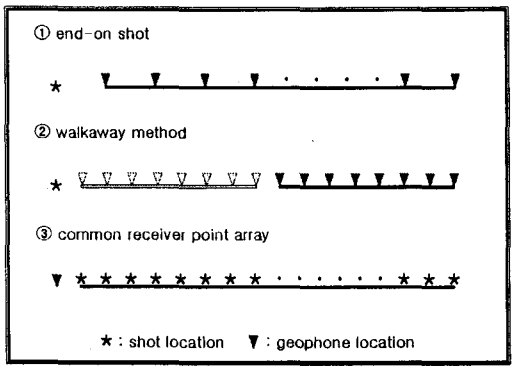

Fig. 1. Three kinds of shot-geophone arrays which are applied for this study

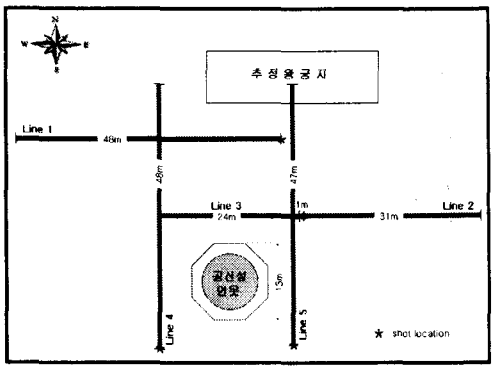

Fig. 2. Survey lines for the seismic refraction method.

Table 1. Survey line configuration. See Fig. 3 for the location of lines.

Line	Direction	shot-geophone configuration	trace interval	maximum offset
Line 1	EW	walkaway method	1 m	48 m
Line 2	EW	end-on shot	1 m	24 m
Line 3	EW	common receiver point array	1 m	31 m
Line 4	NS	end-on shot	2 m	48 m
Line 5	NS	end-on shot	2 m	47 m

4. 탄성파 속도구조

공산성 원형연못 주변의 지반에 대한 탄성파 굴절법 탐사에서 얻어진 각 측선의 야외자료를 Fig. 3 (측선 1), Fig. 4 (측선 2), Fig. 5 (측선 3), Fig. 6 (측선 4), Fig. 7 (측선 5)에

제시하였다. 아울러 각 야외자료에서 결정된 초동시각을 이용한 주시곡선과 이로부터 얻어진 각 층의 탄성파 속도와 두께를 함께 나타냈다. 전체 종합된 탄성파 속도구조의 결과를 Table 2에 정리하였다. 공산성 원형연못 주변의 천부지반의 탄성파 속도구조가 보여주는 가장 특징적인 점은 전체적으로 3층 구조를 보여주고 있다. 다만, 측선 4에서는 중간층이 보이지 않는 대신에 첫 번째 층이 두꺼운 것으로 나타났다. 세부적으로 첫 번째 층은 약 261 ~ 391 m/s 속도를 가진 2.0 ~ 2.4 m 두께의 층이며, 중간층은 약 591 ~ 992 m/s 속도와 4.6 ~ 8.6 m 두께를 보인다. 최하부층은 1950 ~ 3230 m/s의 속도를 보여준다. 따라서 최하부 경계면까지의 깊이는 약 7 ~ 10.5 m의 범위를 보여준다.

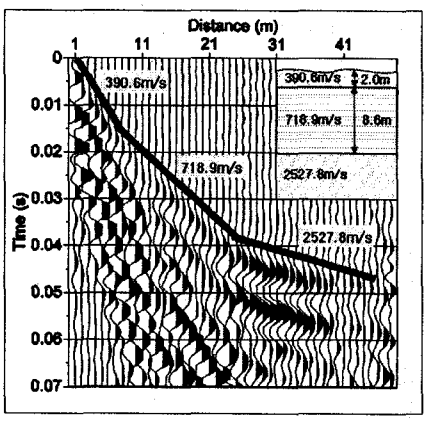

Fig. 3. Field data of Line 1 after filtering and gain control. Velocities are calculated from the least-fitting linear equation of the selected first arrivals using its raw data. Inside box shows the resultant velocity structure. See Fig. 3 for the location.

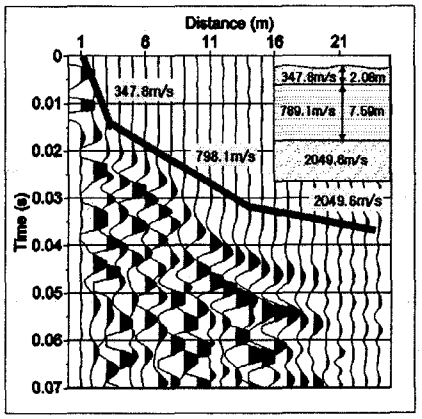

Fig. 4. Field data of Line 2 after filtering and gain control. For explanation, refer to the caption of Fig. 4.

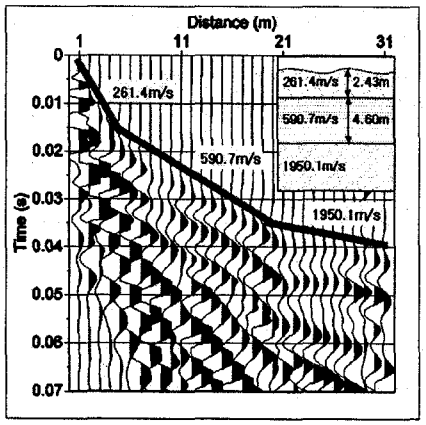

Fig. 5. Field data of Line 3 after filtering and gain control. For explanation, refer to the caption of Fig. 4.

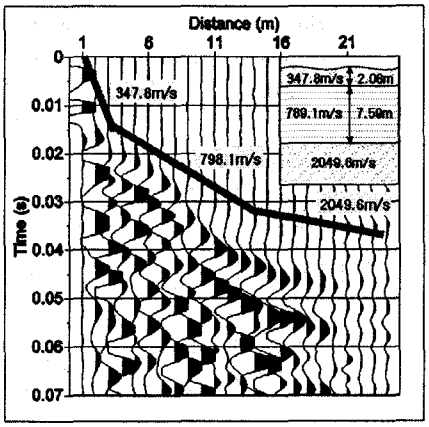

Fig. 6. Field data of Line 5 after filtering and gain control. For explanation, refer to the caption of Fig. 4.

5. 탄성파 속도와 지반과 대비

일반적으로 탄성파 속도를 기준으로 지반특성을 분류할 수 있다. 대표적인 예로써, 건설교통부 표준품셈의 암반기준 분류에 의한 탄성파속도 범위가 있다. 약 200~700 m/s의 속도범위는 다져지지 않은 풍화토이며, 약 700~1200 m/s의 탄성파 속도는 풍화암층에 해당하며, 약 1200~1900 m/s의 속도는 연암층, 그 이상의 탄성파 속도를 갖으면 보통암층에 해당한다. 따라서 이와 같은 기준에서 본다면, 공산성 원형연못 주변은 탄성파 속도구조에 나타난 첫 번째 층은 풍화토 에 해당하며, 중간층은 풍화암층, 그리고 최하부는 연암 혹은 보통암인 기반암으로 해석될 수 있다. 그러나 이러한 분류는 암석의 종류에 따라서 많은 편차가 존재하기 때문에 절대적인 기준이 될 수는 없으며, 단지 자연적인 지반에 대한 일종의 경험적인 분류일 뿐이다.

Table 2. Subsurface velocity structure near the Kongsansung Circular Pond.

Line	Apparent velocities of P wave (m/s)			Thickness (m)	
	1st layer	2nd layer	3rd layer	1st layer	2nd layer
Line 1	390.6	718.9	2527.8	1.98	8.56
Line 2	261.4	590.7	1950.1	2.43	4.60
Line 3	314.0	992.1	2288.3	2.43	6.58
Line 4	280.2		3229.8	7.12	
Line 5	347.8	798.1	2049.6	2.08	7.59

원형연못이 위치한 쌍수정 광장은 동서로 약 110m, 남북으로 90m 정도의 둥그런 형태의 대체로 평탄한 광장이다. 광장의 북쪽에는 광장보다 6~7m의 높은 대지에 쌍수정이 있는데, 광장과는 계단으로 연결되며 계단 주변에 기반암이 노출되어있다. 광장의 남쪽에는 원형연못이 있으며, 급한 사면의 남단과 공산성 사이에 소계곡이 발달되어있다. 1935년 일제시대에 운동장이 조성되면서 원형이 훼손이 시작된 이래 1985년과 1986년 발굴조사 전까지 계속적인 지표면의 훼손이 진행되었다고 여긴다 (안승주·이남석, 1987).

따라서 발굴조사 결과를 바탕으로 굴절법 탄성파조사에서 밝혀진 결과로는 쌍수정 광장의 기반암 위에 놓인 천부지반의 인공적인 조성 가능성을 제시한다. 우선 약 >2000 m/s의 속도를 보이는 최하부층은 쌍수

정 주변에 노출된 기반암의 연장으로 해석한다. 그리고 <2.5 m의 두께에 <400 m/s의 속도를 갖는 첫 번째 층의 일부는 일제시대의 운동장 조성 및 발굴조사 후 복토에 기인한다고 여긴다. 약 600~1000 m/s 속도의 중간층은 인공적인 다짐층으로 해석한다. 그 이유로는 탄성파 굴절법 야외조사자료에서 관찰되는 주시곡선의 특성이 평탄한 경계면이라는 것을 의미한다. 또한, 국내 석탑 문화재에 대한 기존의 조사에 의하면 석탑 하부에 다짐층이 존재하는데, 다짐층의 탄성파 속도와 대응되는 것이다 (예를 들면, 다보탑 지반 500~800 m/s; 서만철 외, 2002).

6. 결론

공산성 쌍수정 광장의 남쪽에 위치한 원형연못 주변에서 탄성파 굴절법을 5개의 측선을 따라서 수행하였다. 주시곡선의 분석결과 구한 천부지반은 대략적으로 3층으로 구성되어있다. 첫 번째 층은 약 261~391 m/s 속도를 가진 2.0~2.4 m 두께의 층이며, 중간층은 약 591~992 m/s 속도와 4.6~8.6 m 두께를 보인다. 최하부층은 1950~3230 m/s의 속도를 보여준다. 따라서 최하부 경계면까지의 깊이는 약 7~10.5 m의 범위를 보여준다. 최하부층은 쌍수정 주변에 노출된 기반암의 연장으로 해석한다. 기반암 위의 지반은 주시곡선 형태와 속도범위가 국내 석탑 문화재 지반의 것과 유사한 것으로 보아 인공적인 다짐층으로 해석한다. 따라서 공산성 연못 주변은 인공적인 기초지반의 가능성을 제기하며, 그렇다면 공산성 원형연못은 파내려 간 것보다는 쌓아 올렸을 것이다.

참고문헌

김기현, 서만철, 2001, 공주 능치지역 천부 지하구조에 대한 지구물리학적 연구, 대한지구물리학회, 지구물리 4, 2, 103-111.

김지수, 송영수, 윤왕중, 조인기, 김학수 (번역), 2003, 물리탐사의 활용, 시그마프레스, 790.

류제라, 서만철, 2001, 익산미륵사지 지반특성에 대한 지구물리학적 연구, 대한지구물리학회, 지구물리 4, 1, 1-10.

민경덕, 서정희, 권병두, 1986, 응용지구물리학, 도서출판 우성, 772.

서만철, 송인선, 최희수, 2001, 암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전진단, 지구물리 4, 1, 57-69.

서만철, 오진용, 최희수, 2002, 불국사 석탑의 지반 특성에 대한 지구물리탐사, 지구물리 5, 2, 143-151.

서만철, 이남석, 2000, 매장문화재 확인을 위한 자력탐사 및 발굴 비교연구: 충남 천안시 두정동 발굴지역, 대한지구물리학회, 지구물리 3, 3, 175-184.

손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서남철, 김기영, 조인기, 김학수 (편저), 2000, 지반환경물리탐사 (개정판), 시그마프레스, 751.

안승주, 이남석, 1987, 공산성 백제추정왕궁지 발굴조사보고서, 공주사범대학 박물관, 320.

안승주, 이남석, 1992, 공산성 건물지, 공주대학교 박물관, 308.

오선환, 서만철, 2001, 방어산 마애여래입상의 안전진단을 위한 지구물리탐사, 대한지구물리학회, 지구물리 4, 1, 11-20.

이성민, 이수곤, 권경원, 백용진, 서만철, 2002, 충주 미륵리 사지내 석굴석축의 구조, 문화재과학기술, 1, 1, 101-115.

Suh, M. 2001, Conservation of the Muryong Royal Tomb of Baekje dynasty, Korea, The Ohio State University, on Campus. 30, 14, 6-10.