

# 방어산 마애여래입상의 안전진단을 위한 지구물리탐사

오선환 · 서만철

공주대학교 문화재비파괴진단연구소

## 요 약

석조문화재에 대한 지구물리학적 진단방법을 제시하기 위해, 경남 함안군 군북면에 있는 방어산 마애불에 대한 굴절법 탄성파탐사와 전기비저항탐사를 수행하였다. 굴절법 탄성파탐사결과 본 마애불 지역의 상부층은 탄성파속도 308 ~ 366 m/s의 풍화토층, 1906 ~ 2090 m/s의 연암층과 그 하부의 5061 ~ 5650 m/s의 극경암층에 해당하는 기반암이 분포하고 있으며, 마애불 주변부의 풍화토층 및 연암층에 대한 지반보강대책이 설계되어야 할 것으로 판단된다. 전기비저항 탐사결과 마애불 우측부에 남북 ~ 북북동 방향의 131 ~ 226 Ohm-m 의 낮은 비저항대가 발견되며, 이 부분은 강우시에 지하수의 유동통로 역할을 하여 대상 부지 중에서 가장 취약한 연약구간이다.

**주요어:** 굴절법 탄성파 탐사, 전기비저항 탐사, 석조문화재, 탄성파속도, 연약구간

**Seonhwan O, Mancheol Suh, 2001, Geophysical Explorations for Safety Analysis of Bangeosan-Maaebul(Stone Relief Bhaisajyaguru triad at Mt. Bangeosan). Journal of the Korean Geophysical Society, v. 4, n. 1, p. 11-20**

**ABSTRACT:** Seismic refraction and electrical resistivity surveys were conducted in Bangeosan Maaebul site located in Haman, Kyungnam, in order to present geophysical safety analysis method for masonry cultural properties. Seismic refraction exploration revealed that the ground was composed of three layers in term of seismic wave velocity; the upper, medium, and lower layers. The low velocity ranging from 308 to 366 m/sec in upper layer suggests weathered soil, the intermediate velocity from 1906 to 2090 m/sec in the medium layer indicates weathered rocks, and the high velocity from 5061 to 5650 m/sec in the lower layer implies extremely hard rocks. Our seismic result suggests that the upper and medium layers around the Maaebul should be reinforced to support the construct. The result of electric resistivity survey shows that there exists a low resistivity zone, ranging from 131 to 226 Ohm-m, at the right side of the Maaebul with the direction of NE-NNE. This area is the weakness zone as it plays role of the underground water passage in rainy season.

**Key words:** seismic refraction survey, electrical resistivity survey, masonry cultural property, seismic wave velocity, weakness zone

(Seonhwan O and Mancheol Suh, Nondestructive Research Lab. Cultural Property, Kongju National University, Kongju, 314-701, Chungnam, Korea, e-mail: seonano@kongju.ac.kr, mcsuh@kongju.ac.kr)

## 1. 서 론

우리나라에 현존하고 있는 국가지정 문화재중 석조문화재는 약 1,470 여 개나 되며 주로 탑과 부도, 석불, 비석 등이다. 방어산 마애불은 1963년 1월에 보물 제 159 호로 지정된 석조문화재로서, 통일신라 애장왕 2년(서기 801년)에 만들어졌

다. 우리 나라 대부분의 석조문화재는 화강암 또는 화강편마암으로 제작되었으나, 이 불상은 일반적인 석조문화재와는 달리 세립질 퇴적암 기원의 셰일(shale)질 호른펠스(hornfels)로 이루어져 있으며, 마애불이 새겨진 퇴적암은 층리와 이차적으로 발생된 절리에 따른 균열과 박리, 박락현상 및 인위적인 오염에 의해 변색되어있으며, 기상변화

를 피하기 어려운 나대지의 절벽에 노출되어 있다. 또한 마애불의 전신에는 크고 작은 절리면이 발달하여 미관을 해치는 것은 물론이고 구조적인 안정성에 심각한 문제가 발생하고 있다. 이런 암석의 손상이나 풍화속도는 아주 느리나 일단 풍화가 진행되면 박리 또는 박락작용이 심하게 발생하는 것으로 알려져 있다. 암석의 풍화는 근본적으로 물의 영향을 받으며, 물-암석 반응에 따라 풍화잔류물을 남기고 이 잔류물이 결정화되면서 부피가 팽창하여 풍화를 진전시키는 것이다(Chesworth, 1971; Nagano and Nakashima, 1989). 이에 관한 종합적인 연구는 최석원 등(1999)에 의하여 보고된 바 있으며, 김수진 등(1994)에 의하면 국내 화강암의 경우에서도 풍화대는 표면에서부터 약 1m 깊이까지 형성된 것으로 나타나고, 풍화에 의한 점토광물의 생성은 3.5m 깊이에서도 관찰된다고 한다.

불상이나 석탑과 같은 석조문화재의 보존 대책 마련을 위한 지구물리학적 연구가 최근 국내에서도 추진되고 있으나 아직은 미흡한 실정이며, 보다 많은 학자들에 의한 활발한 연구가 절실히

요구되고 있다. 이 연구는 마애불이 새겨져있는 암반과 그 주변에 대한 지질조사 및 굴절법 탄성파탐사, 전기비저항탐사를 수행하여 지반의 상태를 파악함으로써, 방어산 마애불과 같은 석조문화재에 대한 안전성 평가와 보강대책 마련을 위한 지구물리학적이고 지질공학적 구조 안전 진단 방법을 제시하고자 하였다.

## 2. 지형 및 지질

방어산 마애불은 행정구역상 경상남도 함안군 군북면 하림리 산 131번지에 있으며, 방어산 정상에서 남북방향을 갖는 작은 산맥을 따라 동쪽으로 연장된 능선의 상단부에 위치하고 있다. 이 지점은 해발고도 400m로서 서쪽으로 발달한 남사면의 8부 능선이다. 마애불의 전면은 정남에서 약 5° 정도 서쪽을 향하고 있으며, 이 마애불을 중심으로 10m 정도의 좌우측에는 동일 종류의 암석이 절벽을 이루고 있다(Fig. 1).

방어산 일대의 지질은 중생대 백악기 경상누층

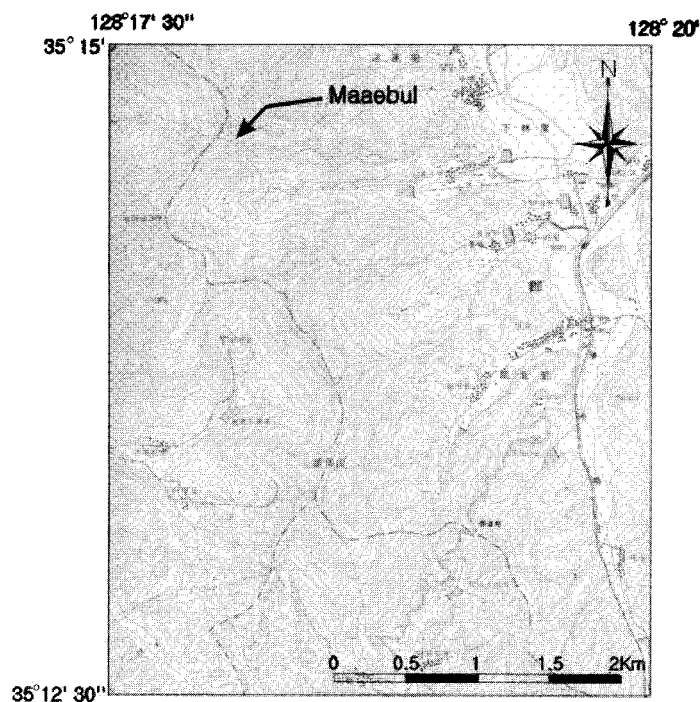


Fig. 1. Topographic map of the study area.

군에 속하는 퇴적암류와 이를 관입한 후기 백악기의 불국사 화성암류로 구성된다(Fig. 2). 퇴적암류로는 자색 사질세일, 회색 니질세일의 호층으로 구성된 함안층과, 이 층을 정합적으로 피복한 회색 세일 및 흑색 세일로 구성된 진동층의 암석이 있다. 화성암류에는 수 cm에서 수 km에 달하는 다양한 종류의 규모와 암상을 갖는 것이 있다. 방어산 지역에는 주로 서쪽 계곡에 암주상의 화강섬록암이 분포하며 암맥상의 섬록반암, 화강반암이 최후기의 관입암류를 이룬다(최유구와 김태열, 1963).

### 3. 자료 획득

#### 3.1. 지형 자료

측선의 위치 및 마애불의 정확한 위치를 파악하기 위해 1 m 간격으로 광과거리 측량기(SET IIB, SOKKIA)를 이용하여 마애불 전면부를 기준

으로 기준점(B.P: Base Point)을 설정하고 기준점에서 2.8 m 이동된 지점을 측량원점 1로 지정하여, 이후 지형적인 영향으로 측량원점 1에서 이동된 측량원점 2, 3, 4, 5, 6에 측량기를 설치한 후 나머지 측량이 가능한 지역을 측정하여 수평거리, 사거리, 지형 고도의 좌표를 측정하였다. 획득된 자료는 실내 작업을 통하여 지형등고선과 측선을 도시화하는데 사용되었다(Fig. 3).

#### 3.2. 탄성과 굴절법 탐사 자료

마애불을 중심으로 상단부에 두 개의 측선(line ww4, line ww8)과 마애불 전면부에 한 개의 측선(line w6)등 모두 세 개의 측선을 설정하여 굴절법 탄성과 탐사를 실시하였다(Fig. 3). 14 Kg sledge hammer를 이용하여 1 회 타격 후 도달되는 파형을 관찰하여 신호가 확인되는 자료를 기록하였다. 수신기는 natural frequency가 14 Hz인 OYO GEOSPACE사의 geophone을 사용하였으며,

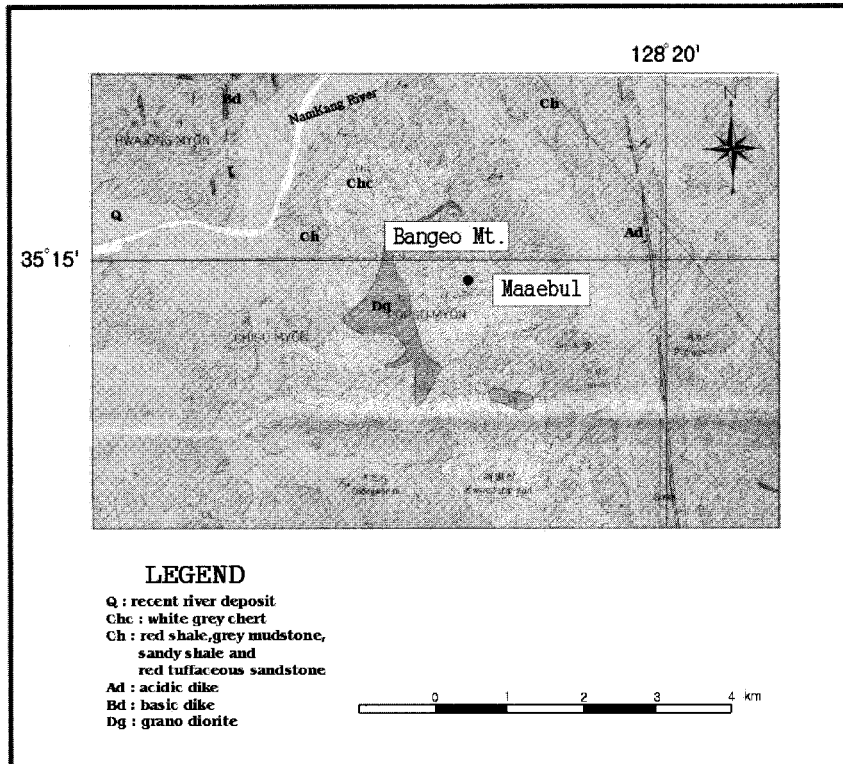


Fig. 2. Geologic map of the study area.

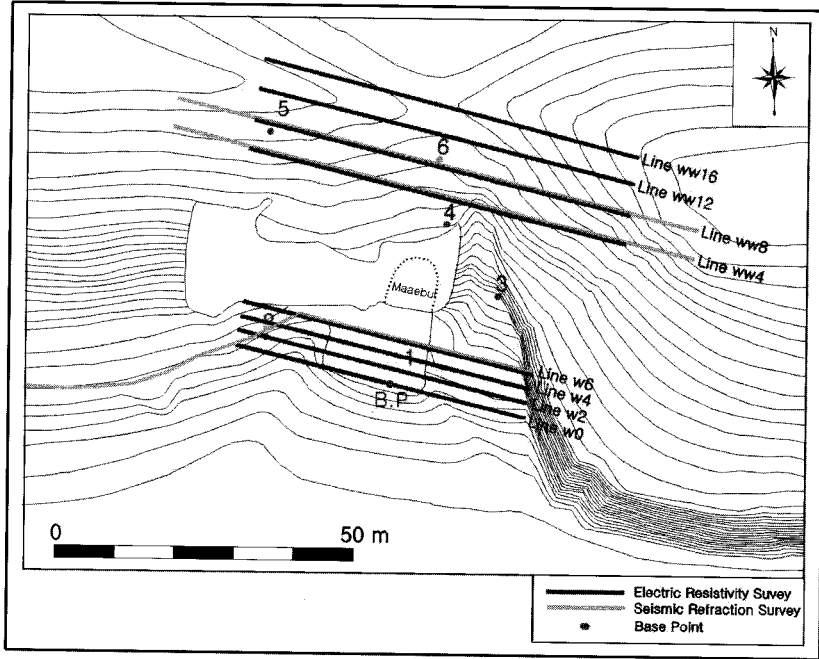


Fig. 3. Topographic map of the study area. Three seismic refraction lines and eight electrical resistivity lines are indicated with lines. six base points are indicated with dots.

탄성파 기록은 OYO GEOSPACE 사의 DAS-1 System(24 channel)을 이용하였으며, 그 외의 탐사에 적용된 자료획득변수는 Table 1 에 요약하였다.

현장에서 기록된 탄성파자료는 디지털 자료로 저장하여 각종분석을 용이하게 하였다. 실험실내에서 대형크기로 plotting하여 각각의 채널별로 초동 시각(first arrival time)을 결정하여 주시도표(Time-Distance diagram)를 작성하였다(Fig. 4). 측정 별로 작성된 T-D diagram 상에서 기울기가 달라지는 구간을 나누어 최소 자승법을 이용한 최적 직선식을 찾아 각 직선의 기울기와 절편을 계산하고, 도시된 결과로부터 기울기의 역수를 취하여 각층의 탄성파 전파속도를 구하였으며 탄성파속도와 절편값을 이용하여 아래의 식으로부터 각 층의 두께를 계산하였다(민경덕외 2인, 1987).

$$h_1 = \frac{t_i}{2} \cdot \frac{V_2 V_1}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}$$

$t_i$  = 절편값,  $V_1$  = 1층의 속도,  $V_2$  = 2층의 속도

Table 1. Field acquisition parameter.

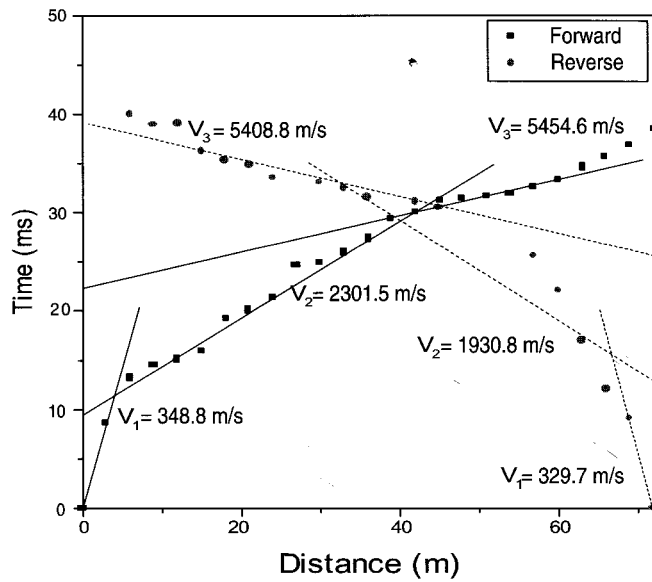
PARAMETER	Refraction Survey
source	14 kg sledgehammer
shooting method	end on
natural freq. of geophone	14 Hz
shot interval	3 m
geophone interval	3 m
near trace offset	3 m
number of channel	24 ch
record length	250 ms
sample rate	0.25 ms
samples/s	1000
analog low-cut filter	open
analog high-cut filter	open
notch filter	none

### 3.3. 전기비저항 탐사 자료

웨너배열 수평탐사는 Line w0, Line w2, Line w4, Line w6, Line ww4, Line ww8, Line ww12, Line ww16 에서 각 측정점에 탐사기를 놓고 전극배

**Table 2.** Electrical Resistivity Survey(Wenner Array).

Method	Line	Length (m)
Horizontal Profiling	Line w0, w2, w4, w6	40×4
	Line ww4, ww8, ww12, ww16	52×4
	sub-total	368
Vertical Sounding	Line w6	72
	Line ww4	72
	sub-total	144
Total		512



Forward	Reverse
D <sub>1</sub> =1.68 m	D <sub>1</sub> =2.12 m
D <sub>2</sub> =14.04 m	D <sub>2</sub> =12.75 m

**Fig. 4.** Seismic refraction data, first-breaking picking and estimated thickness and velocity of the layers.

열간격(a)을 5m로 전위전극 P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>, 전류전극 C<sub>1</sub>C<sub>2</sub>를 설치, 측정 간격은 2m로 하여 한 측정점에서 4회 반복(stack)후, 평균값을 기록하였으며, 측정값이 일정치 않을 경우 16회 반복(stack) 측정으로 조사의 정확성을 기하였다.

수평 비저항 탐사 자료는 웨너배열(wenner array)에 맞는 겘보기 비저항(apparent resistivity) 공식을 유도한  $\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$ 를 이용하여 겘보기 비

저항치로 전환하고, 전환된 겘보기 비저항치들을 이용하여 각 측선별로 지표 하부의 전기비저항 변화경향을 도시하였다(Fig. 5).

웨너배열 수직탐사는 마애불 주변부의 수직적인 전기 분포양상을 파악하기 위하여 탄성파 굴절법 탐사를 실시한 Line w6, Line ww4의 측선에서 수행하였다. 각 측정점에 탐사기를 놓고 전극 배열간격(a)을 1, 3, 5, 7, 9m로 증가시키면서 전

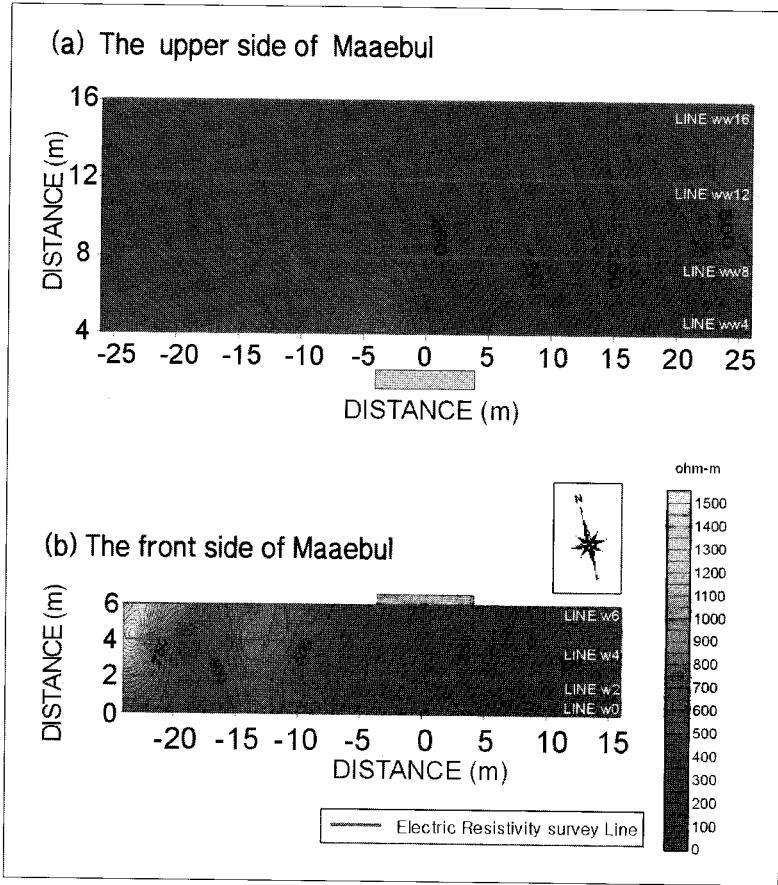


Fig. 5. Horizontal electrical profiling(wenner array, a=5); (a) the upper side of maeabul, (b) the front side of maeabul, and eight survey lines are indicated with straight lines.

Table 3. Velocity distribution of seismic refraction survey.

Line	Velocity (m/s)			Thickness (m)	
	1st layer	2nd layer	3rd layer	1st layer	2nd layer
w6	309 ~ 316	2017 ~ 2090	5525 ~ 5649	1.4 ~ 2.7	9.2 ~ 14.5
ww4	330 ~ 345	1931 ~ 2031	5409 ~ 5455	1.7 ~ 2.1	12.8 ~ 14.1
ww8	345 ~ 367	1906 ~ 2036	5061 ~ 5369	2.1 ~ 2.9	10.9 ~ 14.4

위전극  $P_1P_2$ , 전류전극  $C_1C_2$ 를 설치, 측정 간격은 2m로 하여 한 측정점에서 4회 반복(stack)한 후, 평균값을 기록하였으며, 측정값이 일정하지 않을 경우 16회 반복(stack)측정으로 조사의 정확성을 기하였다.

수직 전기비저항탐사 자료는 수평탐사 자료해석에서 사용된 식을 이용한 겹보기 비저항치들로 각 축선별로 지표하부의 전기비저항 변화경향을

도시하였다(Fig. 6).

#### 4. 자료 처리 및 해석

##### 4.1. 탄성과 굴절법 탐사 자료

굴절법 탄성과 탐사는 Line w6, Line ww4, Line ww8에서 수행되었다. Fig. 4에 보인 바와 같이 굴절법 원리를 적용하여 분석한 각 층의 속

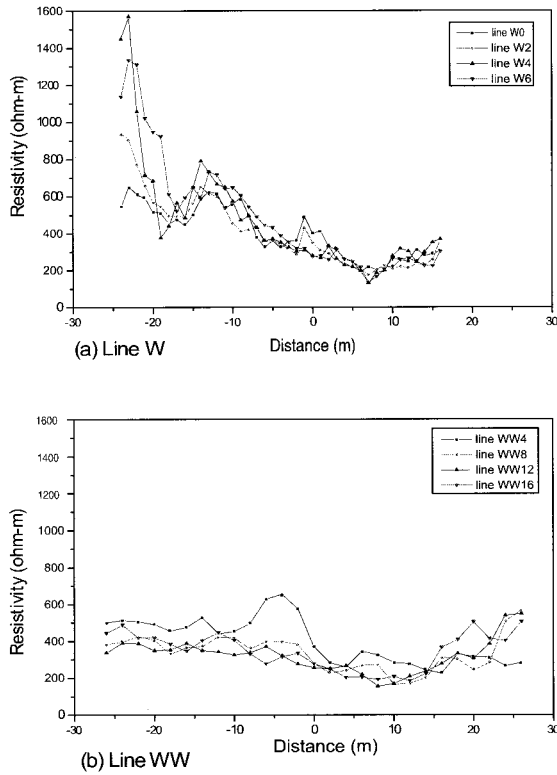


Fig. 6. Vertical electrical sounding(wenner array, a=1,2,3,4,5); (a) Line W is in front of the maebul (b) Line WW is located to the upper side of maebul.

도분포를 축선별로 요약하면 다음과 같다. 축선 Line w6 에 대한 굴절법 탄성파탐사 결과로부터, 1 층은 탄성과 속도가 309 ~ 316 m/s의 범위를 갖는 다져지지 않은 매우 연약한 지반이며 2 층은 2017 ~ 2090 m/s의 탄성과 속도를 갖는 연암(soft rock) 층에 해당하고, 3 층은 5525 ~ 5649 m/s의 탄성과 속도를 갖는 극경암(very hard rock) 층에 해당한다. 이들 층간 경계면은 1 층과 2 층 사이가 지표하 1.4 ~ 2.7 m 내외의 두께 분포를 갖고, 2 층과 3 층 사이는 지표하 9.2 ~ 14.5 m 내외의 두께 분포를 갖는다(Fig. 7(a)).

Line ww4 축선에서 1 층의 탄성과 속도는 330 ~ 349 m/s의 다져지지 않은 연약지반과 2 층에서는 1931 ~ 2032 m/s의 연암(soft rock) 층과 3 층은 5409 ~ 5455 m/s의 극경암(very hard rock) 층으로 구성된다. 그 경계면은 1 층과 2 층이 지표하 1.7 ~ 2.1 m 내외의 두께 분포를 갖고, 2 층과 3

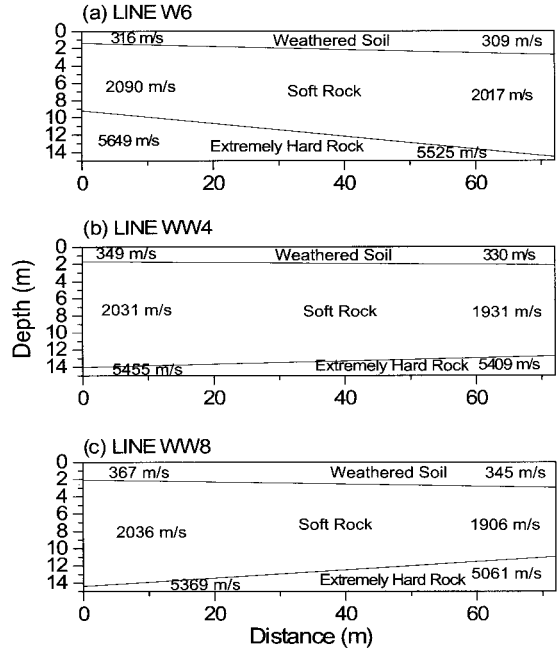


Fig. 7. Seismic refraction section; (a) Line W6, (b) Line WW4, (c) Line WW8, It revealed that the ground was composed of three layers in term of seismic wave velocity; the upper, medium, and lower layers.

층이 지표하 12.8 ~ 14.1 m내외의 두께 분포를 갖는다(Fig. 7(b)).

축선 line ww8 의 경우 1 층의 탄성과 속도가 345 ~ 367 m/s의 다져지지 않은 연약지반과 2 층에서는 1906 ~ 2036 m/s의 연암(soft rock) 층과 3 층은 5061 ~ 5369 m/s의 극경암(very hard rock) 층으로 구성된다. 그 경계면은 1 층과 2 층이 지표하 2.1 ~ 2.9 m 내외의 두께 분포를 갖고, 2 층과 3 층이 지표하 10.9 ~ 14.4 m 내외의 두께 분포를 갖는다(Fig. 7(c)).

#### 4.2. 전기비저항 탐사 자료

전기비저항 분포는 전반적으로 131 ~ 1568.7 Ohm-m 범위를 보이며, 마애불 상단부에서는 X좌표상 -5 ~ -26 지역과 +25 인접지역이 501 ~ 653.2 Ohm-m 범위의 높은 비저항대가 형성되어 있으며 (Fig. 8(a)), 마애불 전면부에서는 X좌표상 -23 m 주변지역이 다른 지역보다 다소 높은 653.2 ~ 1568.7 Ohm-m 범위를 보이고 있으며(Fig. 8(b)), 이 결과로

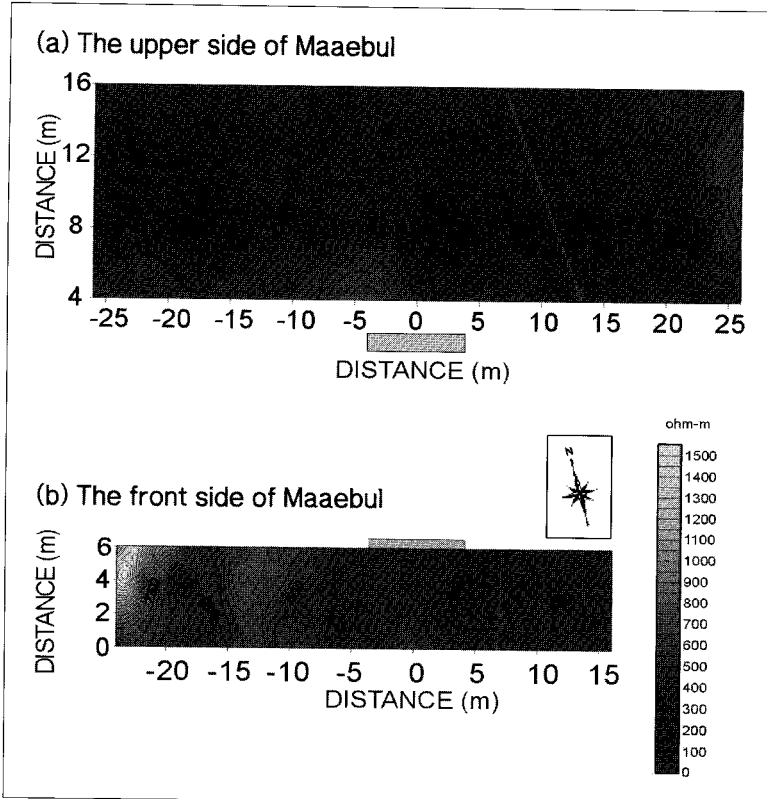


Fig. 8. Horizontal electrical profiling (wenner array, a=5); (a) the upper side of maeabul, (b) the front side of maeabul, and arrow line represent underground water passage.

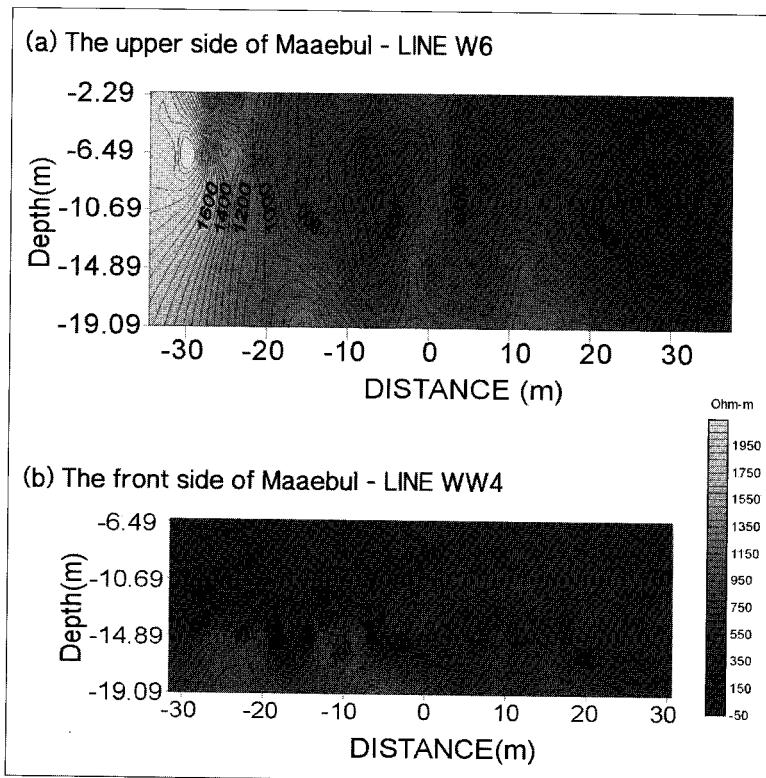


Fig. 9. Vertical electrical sounding (wenner array, a=1,2,3,4,5); (a) Line W6 is in front of the maeabul (b) Line WW is located to the upper side of maeabul.



지하에 넓은 암반체가 존재하고 있음을 알 수 있다.

마애불 전면부를 기준으로 X좌표상 5 ~ 10 m 지점에서 남북 방향의 131 ~ 193.3 Ohm-m의 낮은 비저항대를 형성하는 선구조가 발달되어 있고, 상단부에서는 X좌표상 10 m 지점에서 156.7 ~ 226 Ohm-m의 낮은 비저항 선구조가 북북서 방향으로 발달되어 있다(Fig. 8(b)). 이들 저비저항 선구조는 지하수 유동통로 역할을 하며 강우시 입상주변으로 빗물이 침투하여 지반을 약화시키는 요인이 되고 있다. 특히 입상의 우측에 존재하는 저비저항 선구조는 입상부지의 지반강도에 영향을 직접적으로 미칠 가능성이 높으므로 이곳으로의 빗물 침투를 방지할 필요가 있는 것으로 판단된다.

수직 전기비저항의 분포는 마애불 전면부를 조사한 Line w6 축선의 비저항 분포를 볼 때, X좌표상 -20 ~ -30 지역에서는 전반적으로 지표부근과 하부가 상대적으로 다른 지역보다 높은 711.5 ~ 2309.1 Ohm-m 범위로 지하와 지표면의 암체가 서로 연결되는 경향을 보이고 있고(Fig. 9(a)), 마애불 상단부의 Line ww4 축선은 지하 14 m에서부터 더욱 깊어질수록 비저항 분포가 586 ~ 809 Ohm-m의 범위로 상대적으로 높은 값을 보이며, 이 결과로부터 암체가 넓게 존재하고 있는 것으로 판단된다(Fig. 9(b)).

전기비저항 탐사결과 방어산 마애여래입상을 기준으로 좌측부에는 암반이 분포하고, 마애불 우측부는 구조선이 발달하여 파쇄대가 존재하는 것으로 판단된다(Fig. 8).

## 5. 결론 및 토의

탄성과 굴절법 탐사결과 본 마애불 지역은 탄성파속도 308 ~ 366 m/s의 풍화토층, 1906 ~ 2090 m/s의 연암층과 그 하부의 5061 ~ 5650 m/s의 극경암층에 해당하는 기반암이 분포하고 있으며, 탄성과 속도분포에 근거한 한계평형해석 결과 사면은 일반적으로 안정한 것으로 평가된다. 다만, 마애불 주변부의 풍화토층 및 연암층에 대한 지반보강이 필요한 것으로 판단된다. 또한, 전기비저

항 탐사결과에서는 마애불 우측부에 남북 ~ 북북동의 방향성을 보이는 131 ~ 226 Ohm-m의 낮은 비저항대를 형성하고 있는 선구조가 발견되며, 이 부분은 구조적으로 연약대로써 강우시에 지표수 및 지하수의 유동통로 역할을 하고 있으며, 대상 부지 중에서 우기시 표토의 변위 발생이 우려되는 안정에 가장 취약한 부분이므로, 개선의 필요성이 있는 곳으로 판단되며, 우수의 유도 배수를 위한 조치도 필요하다.

## 사 사

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업으로 지원된 공주대학교 자연과학대학 문화재비과과진단연구실의 사업으로 수행되었으며 재정적 지원에 감사 드립니다. 많은 조언과 도움을 주신 송인선 박사님께 감사드리며, 자료 획득과 처리에 도움을 주신 공주대 대학원생 최희수, 진세화에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김성균, 김영화, 박창업, 서만철, 송무영, 장보안, 정상용, 조봉곤, 1994, 지질공학원론. 교학연구사.
- 김수진, 이민성, 김원사, 이수재, 1994, 서울지역의 자연환경 변화에 관한 연구; 남산화강암의 풍화에 관한 환경광물학적 연구. 지질학회지, 30권, p. 284-296.
- 문화재청, 2000, 문화재 상세정보, 방어산마애불. <http://www.ocp.go.kr/>.
- 민경덕, 서정희, 권병두, 1987, 응용지구물리학, 도서출판 우성, pp. 441-669.
- 최석원, 윤용혁, 서만철, 김광훈, 이찬희, 1999, 충남지역 석조문화재의 현황과 보존대책. 충청남도, 조사연구보고서, 425p.
- 최유구, 김태열, 1963, 의령도폭 지질도(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소, 7p.
- Chesworth, W., 1971, The major element geochemistry and the mineralogical evolution of granitic rocks during weathering. In: Origin and distribution of elements, Ahrens, L.H.(ed.), Pergamon Press, Oxford, p. 305-313.
- Nagano, T. and Nakashima, S., 1989, Study of colors

and degrees of weathering of granitic rocks by visible  
diffuse reflectance spectroscopy. *Geochem. J.*, v.  
23, p. 75-83.

---

2001년 1월 10일 원고접수

2001년 3월 26일 원고채택