

제주도 만장굴에 대한 복합 지구물리탐사 기법의 적용

권병두* · 이희순** · 오석훈* · 이춘기*

Application of Multiple Geophysical Methods in Investigating the Lava Tunnel of Manjanggul in Cheju Island

Byung-Doo Kwon*, Heui-Soon Lee**, Seok-Hoon Oh* and Chun-Ki Lee*

ABSTRACT : Various geophysical methods have been applied to the survey of the lava tunnel of Manjanggul in Cheju Island to study the effectiveness of each method in investigating underground tunnels. The surveys employing gravity, magnetic, electrical, AMT and VLF methods were carried out along seven profiles across the Manjanggul; especially, all the five methods were used on one representative profile. Several aspects of different methods pertinent to their use in investigation of underground tunnels have been noted. The electrical method employing the dipole-dipole array appeared to be the most effective one among five methods. Therefore, we have tested the electrical method more carefully by using various electrode spacings, and obtained successful resistivity sections showing the existence of lava tunnels. The gravity method provided relatively successful responses associated with the tunnel although the gravity readings were contaminated by wind blowing during the survey. The gravity data were also useful for the quantitative modeling study. The magnetic data were also successful in delineating the tunnel qualitatively. The AMT data were not successful because the used frequency band was not appropriate in detecting very shallow target. The VLF data were severely influenced by the neighboring noise sources such as power lines and were not successful in detecting the tunnel responses. The comprehensive result of electrical, gravity and magnetic surveys suggests that undiscovered lava tunnels may exist adjacent to the Manjanggul.

서 론

지하 공동의 탐지에 효율적인 지구물리 탐사기법을 연구하기 위하여 탐사장비나 야외 작업이 비교적 경제적이면서도 유용한 결과를 제공해 줄 것으로 기대되는 몇 가지 방법을 택하여 수치모델링을 통한 이론적 연구와 제주도 만장굴을 대상으로 한 실제 야외탐사 연구를 병행 수행하였다.

만장굴은 제주도 북제주군 구좌읍에 있는 용암동굴로서 총길이가 13,268 m에 달하며, 지층은 신생대 제 3기말에서 제 4기 초에 걸친 화산활동의 분출로 형성된 표선리 현무암층으로 되어있다 (Fig. 1). 만장굴은 그 밑에 계속

되는 금녕사굴과 해안까지 연장되는 금녕절굴, 그리고 전체 끝부분의 굴까지가 동일 용암동굴계임이 한일합동동굴조사단 (1977)에 의하여 확인되어 동굴의 규모는 세계적인 것으로 평가받고 있다 (북제주군, 1993). 동굴 내에는 높이 7.6 m에 달하는 용암주, 77cm의 용암종유, 용암구와 용암교, 용암선반 등이 존재하여 동굴퇴적물 연구에 매우 귀중한 동굴로 명성을 떨치고 있다. 그러나 현재 관광광지로 개발되어 있는 부분을 포함한 일부 지역 외는 동굴의 규모나 심도가 확실하게 알려져 있지 않고, 주굴에서 분기되거나 함께 형성되었을 소규모 용암동굴의 분포도 제대로 파악되지 않은 상태이다. 이러한 동굴의 전체적인 발달상태는 형성 당시의 용암의 유동경로와 고지형을 연구하는데 중요할 뿐만 아니라 지하수 개발을 위한 지하수의 유동 통로를 연구하는 데에도 대단히 중요하다. 또한, 다양한 형태로 나타나는 지하 동굴에 대한 탐사 자료를 얻을 수 있다는 측면에서 물리탐사 연구에서 대단히 유용할 것으로 생각된다.

Fig. 2는 만장굴 관리사무소에서 제공한 도면을 바탕으로

* 서울대학교 지구과학교육과 (Department of Earth Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea), E-mail: bdkwon@mantle.snu.ac.kr

** 인천교육대학교 과학교육과 (Department of Sciences Education, Incheon-National University of Education, Incheon 407-753, Korea)

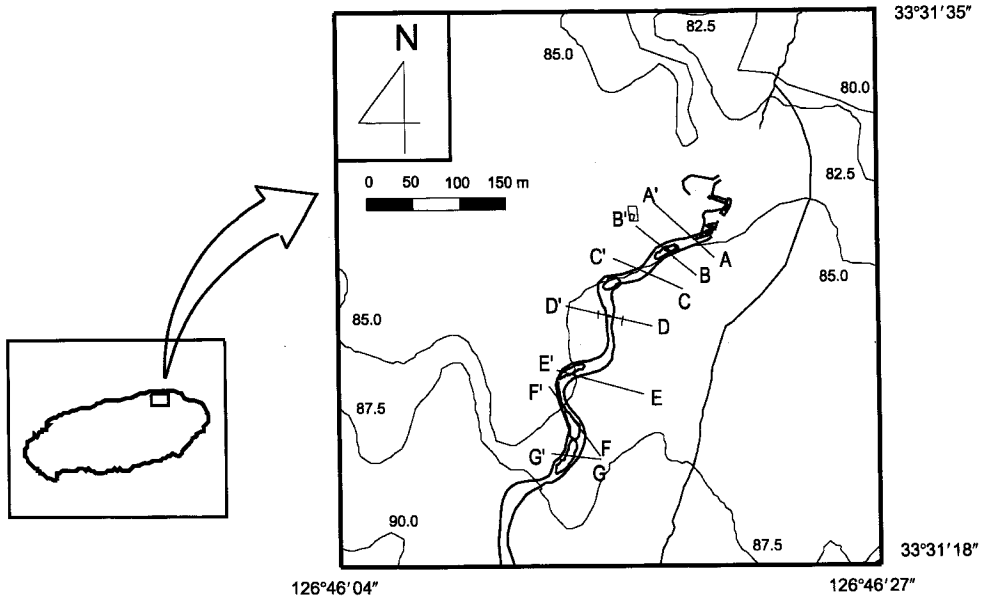


Fig. 1. Location map of the laval tunnel of Manjanggul in Cheju Island. The contour interval of altitude is 2.5 m.

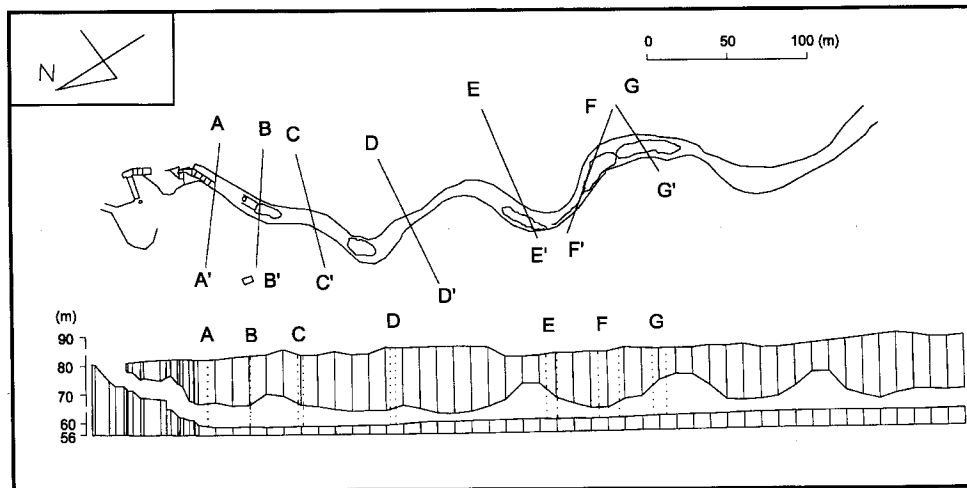


Fig. 2. Plan and section views of the Manjanggul indicating seven profiles along which geophysical surveys were carried out.

로 재구성한 만장굴 제3지구의 평면도와 단면도로서 일반에게 공개되고 있는 지역이며, 지표면에는 하부의 동굴을 나타내는 대략적인 표식이 위치한다. Table 1은 각 측선에서 수행한 지구물리 탐사의 내용이다. 이 지역의 길이는 약 1 km 정도이다. 단면도에서 볼 수 있듯이 만장굴의 높이는 평균적으로 7~8 m 정도를 보이고 있으나 국부적으로 2~3 m 정도로 몹시 낮은 곳도 있고, 분출에 의한 효과 (gas ball)로 12 m 이상 되는 곳도 있다. 넓이는 대부분 높이와 비슷한 규모를 유지하고 있다. 동굴 바닥까지

의 심도는 비교적 일정하여 평균적으로 22~23 m를 유지하고 있으므로 지표에서 동굴 천장까지의 심도는 동굴의 높이에 좌우된다.

복합지구물리 탐사

Fig. 2에서는 복합 지구물리탐사를 수행한 측선들을 도시하였다. Table 1에서 볼 수 있는 것처럼, 총 7개의 측선 중에서 D-D' 측선을 기준 측선으로 선정하여 5가지의 탐

Table 1. Geophysical exploration methods applied to the lava tunnel of Manjanggul in Cheju Island on respective profiles indicated in Fig. 1.

Profile	Geophysical	Remarks
A-A'	DC, VLF	
B-B'	DC, VLF	
C-C'	VLF, Magnetic	
D-D'	DC, VLF, Magnetic, 3 different dipole lengths were used in dipole-dipole DC survey	
(Reference profile)	Gravity, AMT	
E-E'	VLF, Magnetic	
F-F'	DC, VLF, Magnetic	
G-G'	VLF	

사를 모두 실시하였으며, 나머지 측선에 대해서도 G-G' 측선을 제외하고는 2개 이상의 탐사를 복합적으로 수행하였다. D-D' 측선을 기준 측선으로 정한 이유는 지표 지형이 비교적 완만하고 가시덤불과 같은 장애요인이 없었기 때문이다. 그러나, 단면도에서 볼 수 있는 것처럼 다른 측선의 경우보다 상대적으로 동굴의 심도가 깊고 폭과 높이도 평균적 분포보다 작아 지표에서 동굴 천장까지의 심도는 약 20 m이며, 폭과 높이는 약 5~6 m 정도이다. 그외의 다른 측선들에서는 탐사 여건이 불량한 경우 비교적 탐사가 간단한 방법을 적용하였으며, 측선이 만장굴의 공개된 영역에 대해 최대한 다양하게 분포하도록 하였다.

탐사지역의 지표에는 지하동굴의 존재를 나타내는 표식 말뚝이 박혀 있으나, 그 폭이 동굴의 폭보다 훨씬 넓은 10여 m 이상이 되어 실제 동굴의 위치를 정확하게 확인하기는 힘들다.

중력, 자력 및 VLF 탐사

중력 탐사는 대상체와 주변과의 밀도차에 기인하는 효과에 따른 중력변화를 측정하여 지하구조를 해석하는 방법이다. 동굴은 대개 굴 안이 비어 있거나, 물로 차 있게 되는데, 이 경우 주변의 암석과의 밀도차에 따라 나타나는 음의 이상값을 예상할 수 있다. 중력 이상값의 크기는 동굴의 심도와 규모 및 상태에 따라 다르게 나타나므로, 측정 중력계의 분해능, 탐사방법의 복합 적용에 의한 추가 정보의 질에 따라 중력 탐사의 해석 결과가 커다란 영향을 받을 수 있다 (Colley, 1963; Butler, 1984; Arzi, 1978).

이번 탐사에서는 만장굴을 가로지르는 1개의 측선에서 중력 탐사를 실시하였다. 중력 측정에 사용된 중력계는 측정 범위 5000 mgal, 감도 0.001 mgal, 정확도 0.01 mgal인 LaCoste-Romberg G-type이다.

중력측정을 수행한 측선은 본 탐사에서 기준선으로 설

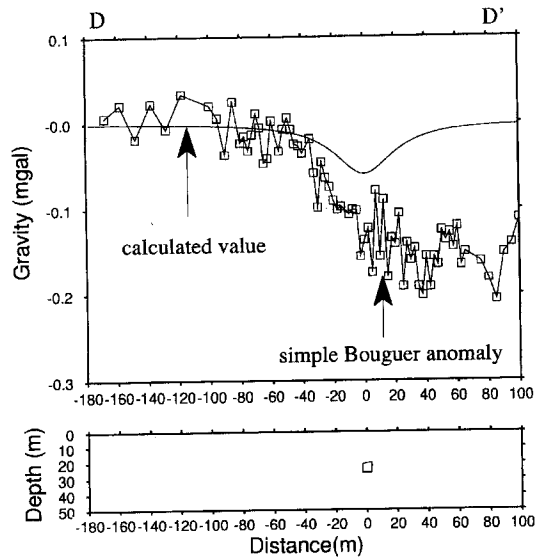


Fig. 3. Observed and calculated gravity anomalies along the reference profile D-D' and the single tunnel model for calculation.

정한 D-D' 측선으로서 굴 내부 조사에 의해 밝혀진 바에 의하면, 굴의 천장 높이가 5 m정도, 폭이 6m정도이며, 굴의 천장은 지표에서 20 m 하부에 위치하고 있다. 이 지역은 주굴이 지나가는 곳 중에서 상대적으로 깊고, 규모가 작은 지역에 해당한다 (Fig. 2 참조).

중력측정은 동굴의 표식 말뚝이 설치되어 있는 부근에서는 2.5 m 간격으로, 동굴지표에서 많이 벗어난 지역에서는

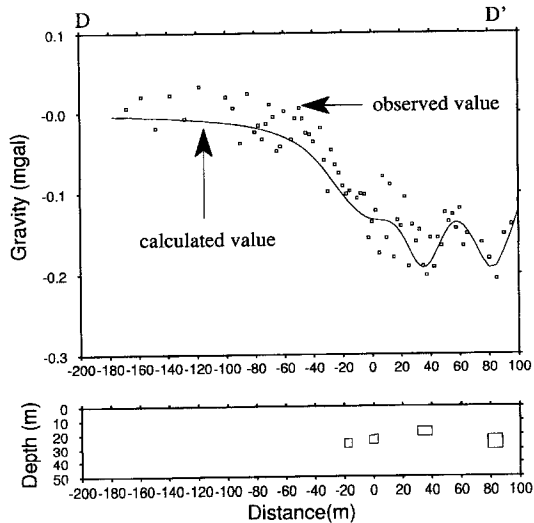


Fig. 4. Observed and calculated gravity anomalies and the model with additional tunnels nearby the Manjanggul for calculation.

5 m, 10 m 간격으로 측정을 실시하였다. 또한 보정에 필요한 고도는 광자기 (RED2A)를 이용하여 측량하였다.

이 측선의 만장굴 도면을 참조로 하여 계산된 중력 이상값은 대략 0.06 mgal 정도로 나타났으나, 실제 탐사 자료에 계기보정, 조석보정, 고도보정, 부계보정을 실시한 결과는 최대 0.2 mgal까지의 이상값을 보이고 있다 (Fig. 3).

단순 부계 이상값의 결과로부터 굴의 존재를 인지할 수 있을 정도의 뚜렷한 변화를 직접적으로 관찰하기는 어렵다. 광역적으로 관찰할 때, 보정을 실시한 후의 이상값이

여전히 측선의 지형을 반영하고 있는 것으로 미루어 대체로 용암이 덮이기 이전의 기반암의 기하학적인 모양이 반영된 것으로 보인다.

한편, 굴이 위치한 오른쪽에서 상대적으로 큰 저이상값이 나타남을 확인할 수가 있는데, 이는 중력탐사결과만을 가지고 단정지을 수는 없지만, 현재 밝혀져 있는 굴 이외의 다른 공동이 존재 할 가능성이 있음을 시사하고 있다. 그래서, 측정 결과와 이러한 중력이상 곡선을 정량적으로 해석하기 위하여 순산모델링 (forward modeling)을 수행

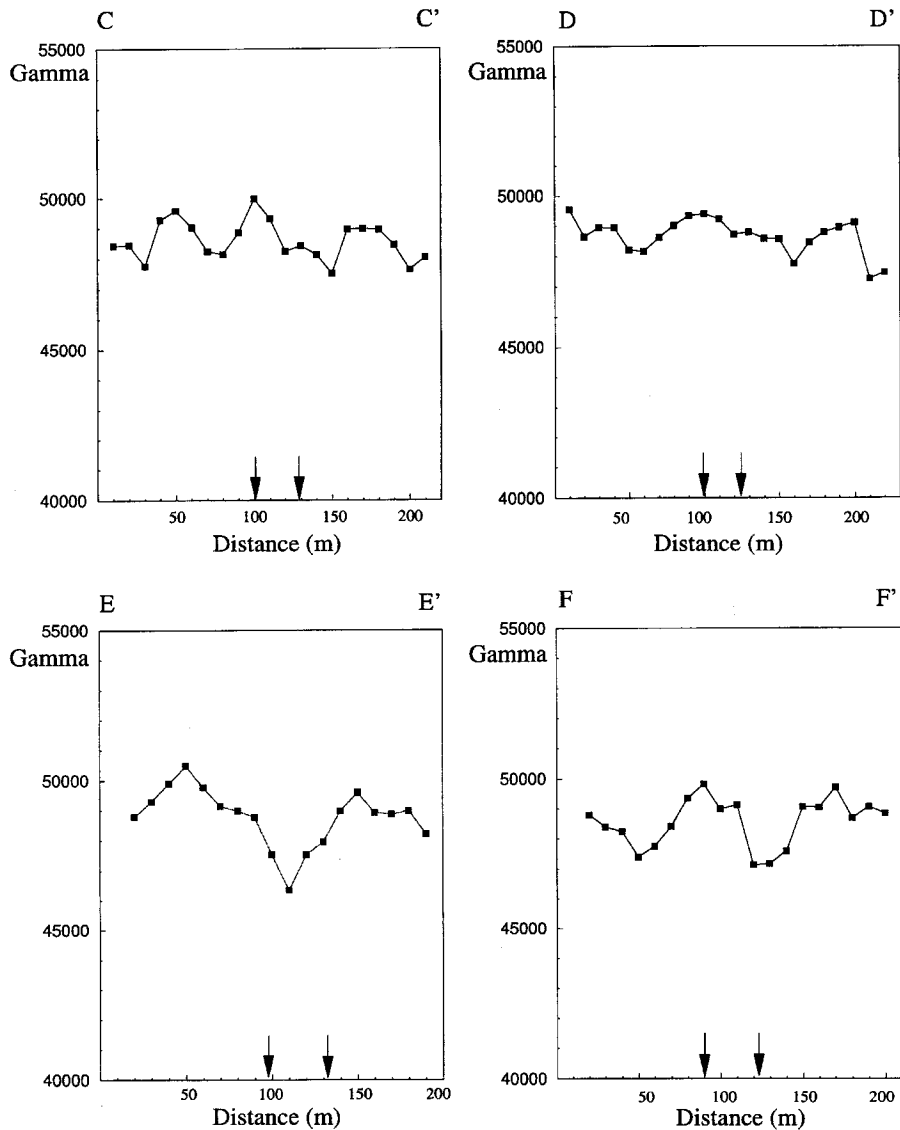


Fig. 5. Total magnetic anomalies observed along various profiles. The arrows indicate the expected range of the tunnel position.

하였다. 중력자료의 경우, 규모, 위치가 서로 다른 주변의 굴들이 유사한 양상을 보일 가능성이 있기 때문에, 다른 탐사 (전기탐사) 결과를 참조하여 가장 적합하다고 생각되는 모델을 선정하였다. 즉, Fig. 4에서와 같이 이미 규모를 알고 있는 주굴이 지나가는 곳의 우측에 주굴보다 규모가 큰 공동 2개, 좌측으로 주굴과 비슷한 규모의 공동을 설정하였다. 이러한 모델링 결과는 다른 탐사자료와 결합하여 동굴의 분포를 종합적으로 해석하는데 유용한 자료로 이용될 수 있을 것이다.

자력탐사는 총 4개의 축선에서 수행하였다. 사용된 자력계는 Scintrex사의 MP-2이며, 총 자력의 세기를 각 축선에서 10 m 간격으로 측정하였다. 지하 공동을 대상으로 자력 탐사를 수행할 때 예상되는 반응의 양상은 동굴을 중심으로 저이상대가 나타나는 것이다. 특히 이 연구가 수행된 제주도 만장굴의 경우 주변이 비교적 대자율이 큰 현무암으로 형성되어 있어서 좋은 결과를 예상하였으나, 탐사 도중 기기가 고장을 일으켜 당초 계획하였던 격자형의 2차원 탐사를 포기하고 축선 탐사로 변경하였다. Fig. 5는 각 축선에서의 총자력값 분포를 나타내며, 그림의 화살표는 지표면에 표시되어 있는 동굴 표식이다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 동굴에 의한 반응을 확실히 구별 하기는 힘들지만 동굴방향의 방향성을 가지고 있음을 뚜렷이 볼 수 있고, 만장굴 도면과 비교하였을 때 동굴의 규모가 큰 축선에서 저이상이 크게 나타남이 확인되었다. 굴의 규모가 상대적으로 큰 지역인 E-E'와 F-F' 축선의 경우, 굴 주변에서 이상값의 변화는 최대 2700, 3700 nT를 나타내고 있다. 이러한 자력탐사의 결과 역시 만장굴 주변이나 천부에 존재하는 다른 동굴들에 의한 영향이 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 추후의 탐사에서는 2차원 탐사를 수행하여 이들 이상대의 연장성을 확인하고, 자력구배 측정이 가능한 기기를 운용하여 조금 더 정밀한 탐사를 시도하고자 한다.

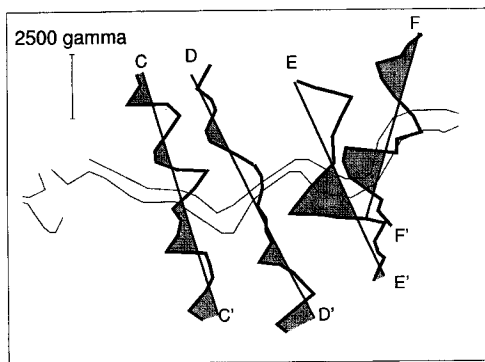
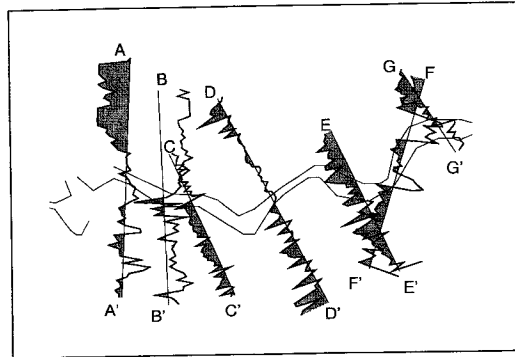
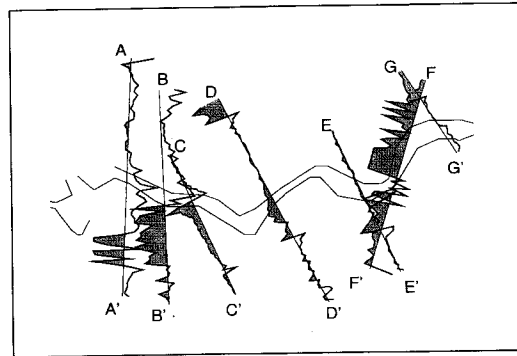


Fig. 6. Composite diagram showing the magnetic anomalies.



(a)



(b)

Fig. 7. Composite diagram showing the VLF anomalies of real part (a) and imaginary part (b).

VLF 탐사는 동굴주변의 전류분포에 의해 유도된 수직 유도자기장의 변화를 기대하여 수행하였으나 (Fig. 7), 탐사지역 주변의 도로를 따라 분포하는 전신주에 의한 잡음이 너무 크게 나타나고 이에 비하여 동굴에 의한 반응은 매우 미약한 것으로 보인다. VLF 탐사는 경제적이고 간편해서 전도성이 양호한 지하 지질 구조 탐지에서는 좋은 결과를 보이지만, 용암 동굴 탐지에는 그리 효과적이지 못한 것으로 여겨진다.

AMT 탐사

동굴 탐지에서 AMT (Audio-frequency Magneto Telluric method) 탐사방법의 적용성을 정량적으로 판단하기 위하여 제주도 만장굴 규모의 동굴에 대한 모델링 연구와 시험적인 야외탐사를 수행하였다. 사용한 탐사기기는 미국 EMI 회사의 IMAGEM 장비로 736~73,600 Hz 까지 총 31개 주파수에서 측정하였다. 제주도 전역에서 천부의 전기비저항 분포를 보면 약 1000 Ω m의 현무암층과 해수면 아래에서 100~200 meter 정도의 두께로 발달

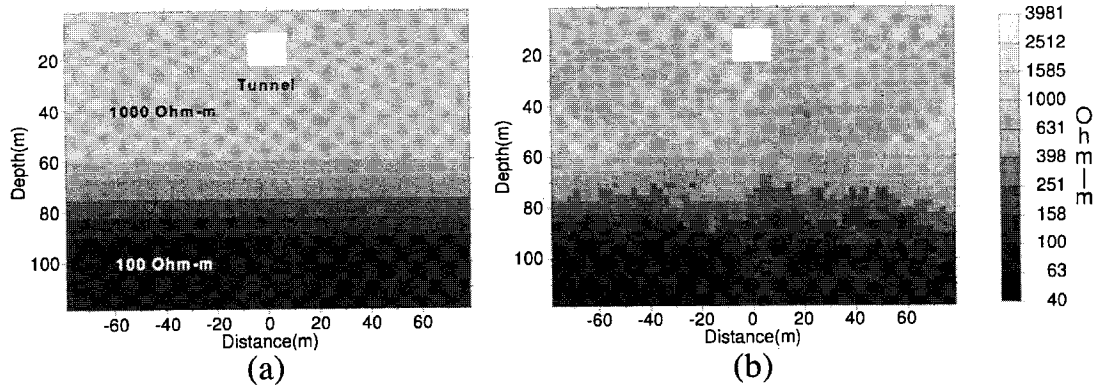


Fig. 8. (a) Tunnel embedded two layer model and (b) 10% Brown noise added to the model used to calculate MT responses.

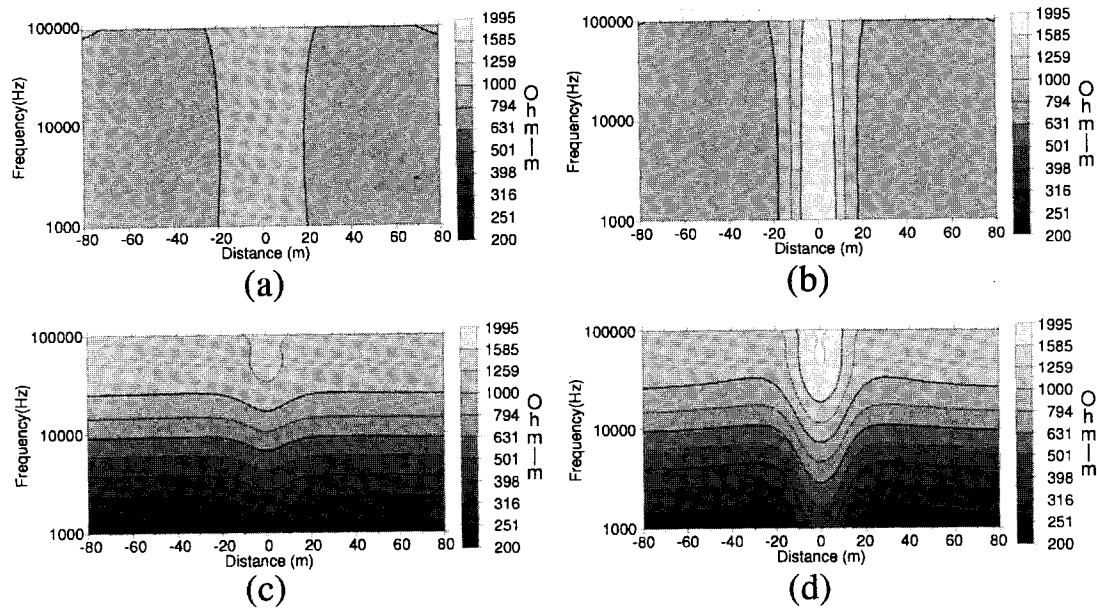


Fig. 9. Apparent TM resistivities calculated for the tunnel in a homogeneous region having 1000 Ωm resistivities ((a) and (b)), and in a two-layer region having 1000 Ωm and 100 Ωm resistivities ((c) and (d)). The tunnels of (a) and (c) have the size of 5 m \times 7 m at 17 m depth, and (b) and (d) have the size of 15 m \times 13 m at 10 m depth.

한 미교결층이 전기전도도가 매우 높은 층으로 나타난다 (권병두 등, 1997). 그 하부에는 다시 기반암이 나오지만 미교결층의 전기전도도가 매우 높아서 미교결층 하부로 전자기파의 에너지가 전파되는 양은 극히 작기 때문에 이번 탐사에서 사용한 주파수 대역에서는 하부 기반암층은 잘 분해되지 않는다. 따라서 이번 탐사자료를 해석하기 위한 지하지질 구조는 단순한 1차원 2층 구조에 2차원 구조인 동굴이 존재하는 모델로 간주할 수 있다. 이 지역의 해발고도를 고려하면 약 80 m 깊이에서 미교결층이 존재할 것으로 생각되며, 이러한 지질구조의 모델로서 1000 Ωm 의 비저항을 가지는 상부층과 100 Ωm 의 하부층, 고

비저항에서 저비저항으로 변하는 60 m~100 m 깊이의 전이구간을 가정하여 Fig. 8(a)와 같은 모델을 설정할 수 있다. 동굴에서의 전기전도도는 엄밀히는 0에 가까운 값을 가져야 하지만, 높은 습도를 보이는 환경과 수치모델링의 한계를 고려하여 $10^{10} \Omega\text{m}$ 의 비저항을 설정하였다.

탐사 측선들 부근에서 만장굴은 대략 5 m \times 6 m~15 m \times 13 m의 단면을 가지며, 10 m~26 m 깊이에 분포한다. 사용된 주파수 대역은 73600Hz~736Hz 이므로 1000 Ωm 의 비저항을 가지는 매질에서 가탐심도의 범위는 포피심도 (skin depth, δ)= $500 \sqrt{\rho/f}$ 로부터 대략적으로 58 m~580 m 이다.

1,000 Ωm의 균질한 매질에 동굴만이 존재하는 모델의 경우, 동굴 크기와 깊이에 따라 TM 반응은 Fig. 9의 (a), (b)와 같이 나타난다. 한편, 100 Ωm의 하부 비저항대를 포함한 2층 구조를 고려하는 경우, Fig. 9의 (c), (d)와 같은 가단면도를 얻을 수 있다. 동굴의 규모가 5 m×7 m인 경우, 배경암의 가비저항에 비해서 최대 약 15%, 15 m×13 m의 경우 약 100% 높은 가비저항 이상을 보이며, 가비저항의 이상은 정적효과에 의한 것이므로 위상의 변화는 매우 작다. 따라서, 작은 규모의 동굴에서는 탐사에서 측정오차가 동굴탐지의 성공여부에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.

실제 야외탐사는 5 m의 측정간격으로 실시하였으며, 동굴을 중심으로 130 m 구간에서 수행하였다. 탐사측선은 야외 작업이 가장 용이한 지역에 위치하는 반면에, 동굴의 크기가 6 m×5 m이고 깊이가 20 m로서 동굴이 깊고 크기가 작은 지역 중의 하나이다. 야외탐사자료로부터 얻어진 Bostick 역산 (George *et al.*, 1964; Word *et al.* 1986) 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 정적효과의 영향이 Bostick 역산 결과에 반영될 것으로 기대하였으나 그 반응은 다른 요인들에 비해 매우 미약하여 탐지가 어렵다. 따라서 AMT 탐사로부터 만장굴과 같은 조건을 가지는 미지의 용암동굴을 찾는 것은 매우 힘들 것으로 생각된다. 그러나 만일 동굴이 담수 또는 낮은 전기비저항치를 가지는 매질로 차있으면, 탐사기거나 주변지역의 조건에 따라 가능할 수도 있다.

이상과 같은 결과는 통상적으로 AMT 탐사에 쓰이는 주파수대역의 상한값의 한계에 기인하며, 그 외의 요인에는 전자기적 잡음에 의한 측정오차가 그 원인일 수도 있다. 또한 이번 연구에서처럼 탐사 대상체의 심도가 매우 얇고 규모가 매우 작은 경우, 탐사지역의 지하매질의 국부적인 비균질성이 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

동굴과 광역적 2층 구조를 제외한 지하 매질의 무작위

적인 비균질성의 영향을 살펴보기 위하여 무작위 잡음이 더해진 비저항 분포 모델을 설정하였다. 무작위 분포를 생성하기 위하여 Gaussian 백색잡음을 사용할 수도 있으나, 일반적으로 암석에 발생하는 공극이나 균열의 분포 등 암석의 물성 변화는 Brown 잡음에 더욱 가까운 것으로 알려져 있다 (Turcotte, 1989; Crossley and Tensen, 1989). 따라서, 공극수의 영향을 크게 받는 비저항 분포 역시 Brown 분포에 가까운 것으로 가정하여 잡음모델을 설정하였다. 잡음모델의 예는 Fig. 8(b)와 같으며, 각각 10%, 30%의 잡음을 포함하는 모델에 대한 수치실험을 수행하였다 (Fig. 11). 결과적으로 10%의 비저항 잡음을 포함하는 경우, 만장굴의 연장부 중, 작은 규모를 가지는 부분은 탐지가 어려울 것으로 예상되며, 30%의 비저항 잡음을 포함하는 경우에는 최대 규모의 부분일지라도 잡음의 영향으로 AMT탐사만으로는 동굴의 존재를 판별하기가 어려울 것으로 예상된다.

쌍극자-쌍극자 전기탐사

이번에 만장굴 지역에서 수행한 여러 탐사 방법 중, 전기탐사법이 동굴탐지에 가장 직접적이고도 비교적 정확한 결과를 보여주고 있다. 전기탐사는 천부의 수직 및 수평 비저항 분포의 조사에 경제적이고 효율적이어서 많은 분야에 대한 연구와 적용이 이루어지고 있다 (Breusse, 1963; Cheng, 1980; Dobecki and Romig, 1985; Spies, 1983). 본 연구에서 전기탐사는 동굴 주변의 2차원 전기전도도 분포를 얻기 위해 쌍극자-쌍극자 (dipole-dipole array) 탐사를 수행하였으며 이용된 탐사기기는 미국 AGI사의 Sting R1 이다. 이 탐사기법은 특히 우리나라와 같이 전기비저항 값이 큰 지역에서 알맞으며 효율적인 2차원 탐사기법으로 알려져 있다 (김정호, 1987). 제주도 지역에서 나타나는 전기비저항의 일반적 특성과 측선 주변에 대한 설명은 앞의 AMT 탐사 부분에서 자세히 설명하였으므로 생략하기로 한다.

Fig. 12~15는 Fig. 2에 나타낸 전기 탐사 측선에서의 결보기 비저항 단면도와 각각의 역산 단면도이다. 설계도면으로부터 알 수 있는 각 측선에서의 동굴심도와 동굴 표식에 의해 추정할 수 있는 동굴 위치의 범위를 역산 단면도에 점선으로 표시하였다. 각 측선은 지표상의 동굴 표식을 따라 되도록 동굴을 가로지를 수 있도록 배치하였으나, 표식이 정확하지 않아 약간 부정확하게 배열된 측선도 있다. 각 측선의 쌍극자 간격은 7.5 m와 7 m이며, 21개의 전극에 대해 n=10까지 측정하였다. 각 측선의 결과에서 볼 수 있듯이 동굴의 크기가 상대적으로 큰 B-B',

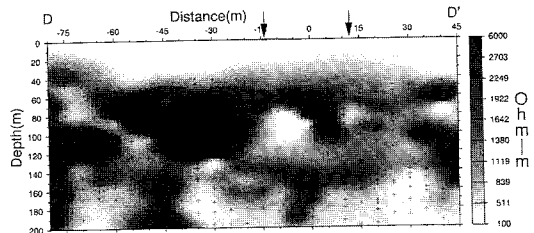


Fig. 10. Bostick inversion result of AMT data obtained along the profile D-D'. The symbol + indicates the calculated depth point transformed from each frequency and measured apparent resistivity. The arrows indicate the expected range of the tunnel position.

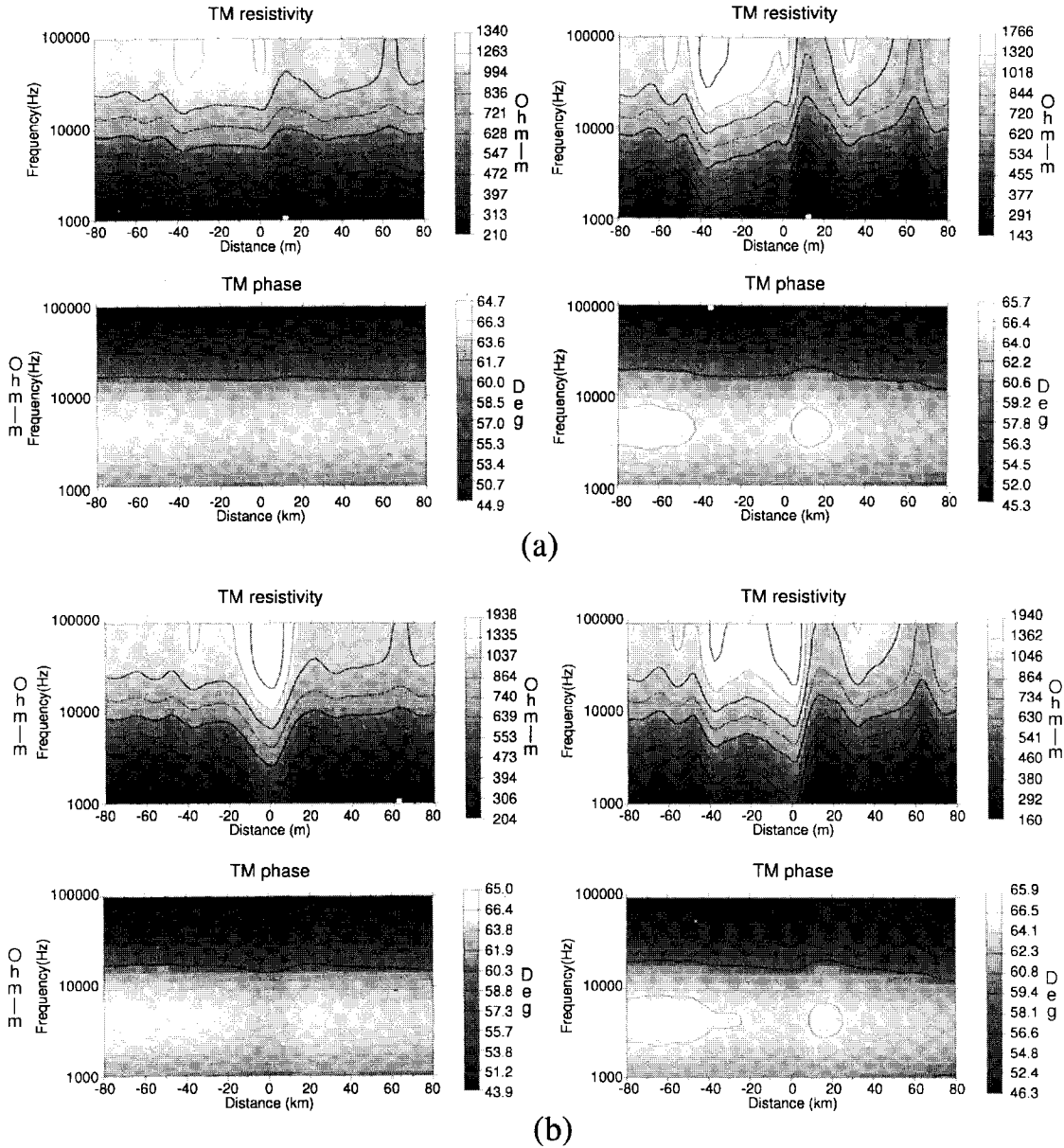


Fig. 11. Model responses of Brown noise added models. (a) 10% noise (left) and 30% noise (right) were added to the model of 5m x 7m tunnel at 17m depth. (b) 10% noise (left) and 30% noise (right) were added to the model of 15m x 13m tunnel at 10m depth.

F-F' 측선에서는 동굴 예상지점에서 고비저항대가 잘 나타나고 있으며, A-A', D-D' 측선에서는 동굴 예상심도보다 천부에서 고비저항대가 감지된다. 특기 할 만한 것은 동굴 예상 지점의 바로 인근에 비슷한 규모의 고비저항대가 나타나는 것이다. 이는 만장굴의 바로 옆을 따라 또 다른 굴이 발달하고 있을 가능성을 보여주고 있다. 또한 대

부분의 측선의 단면도 하부에서 대수층으로 예상되는 저비저항대가 나타나고 있다. 주굴 이외에 다른 굴이 존재할 가능성을 재차 확인하기 위하여 기준선 부근의 측선에서 쌍극자 간격을 각각 10 m, 5 m로 변화시켜 동굴 부근의 비저항 분포도를 다시 조사한 결과가 Fig. 16와 17이다. 그림에서와 같이 7.5 m 간격의 자료와 비교하여도 동

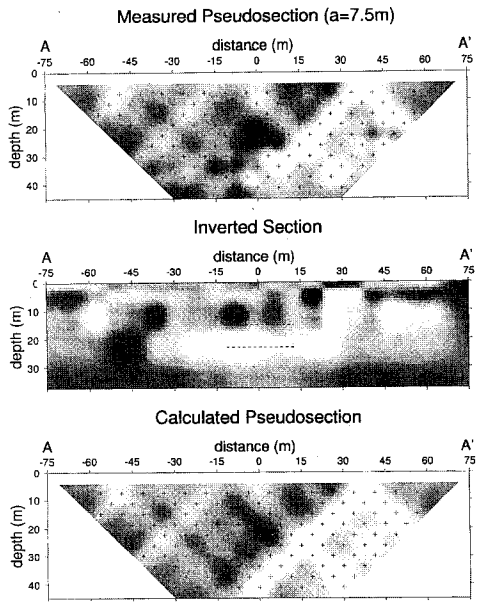


Fig. 12. Dipole-dipole array DC resistivity section along the profile A-A'. Dipole length $a=7.5$ m. The unit of color scales is Ωm . The dashed lines in the inverted section indicate the expected range of the horizontal position and depth of tunnel.

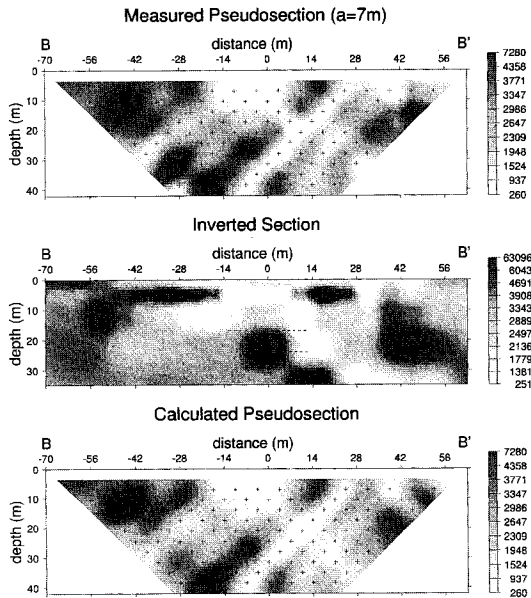


Fig. 13. Dipole-dipole array DC resistivity section along the profile B-B'. Dipole length $a=7$ m.

굴 주변에서 잘 일치함을 알 수 있고, 주굴 주변의 고비저항대가 더욱 명료하게 나타나고 있다. 그러나, 역산 결과 나타나는 동굴 예상대의 깊이가 관리사무소에서 제공한

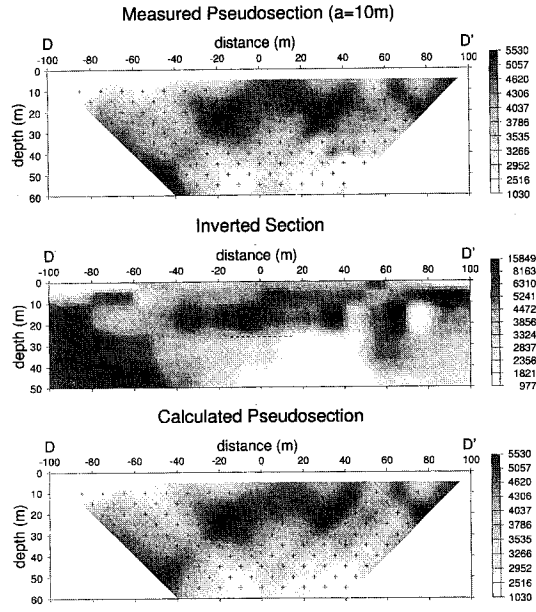


Fig. 14. Dipole-dipole array DC resistivity section along the profile D-D'. Dipole length $a=7.5$ m.

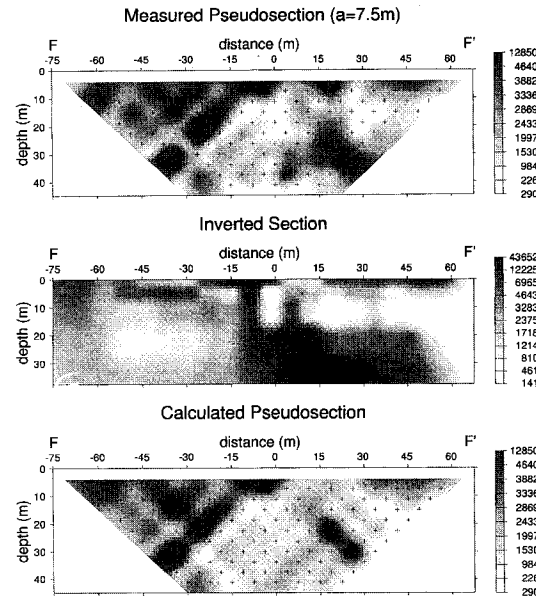


Fig. 15. Dipole-dipole array DC resistivity section along the profile F-F'. Dipole length $a=7.5$ m.

설계도면 자료에 나타나 있는 깊이와 약간의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 차이의 원인은 역산 과정에서 사용되는 블록과 실제 동굴 위치의 차이, 동굴하부에 나타나는 저비저항 이상대의 영향, 천부에 존재하는 다른 동굴들에 의한 영향 등을 고려할 수 있다. D-D'측선의 경

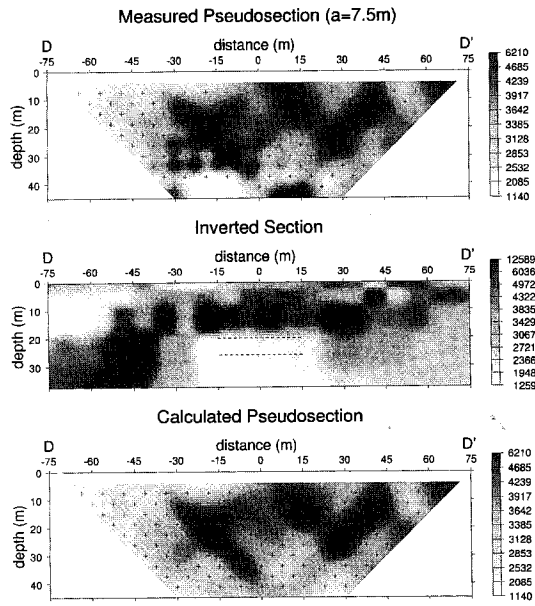


Fig. 16. Dipole-dipole array DC resistivity section along the profile D-D'. Dipole length a=10 m.

우 5 m, 7.5 m, 10 m의 쌍극자 간격을 사용한 모든 경우에서 고비저항대가 실제 동굴위치보다 천부에서 나타나며, 3개 이상의 고비저항대가 관찰되므로 블록의 위치 차이나 하부 저비저항대의 영향보다는 다른 동굴이나 부분적인 동공들이 약 10 m 깊이에 발달해 있을 가능성이 가장 높다. D-D'측선에서는 동굴의 크기가 상대적으로 작은 규모이므로 천부의 공동들보다 미약한 반응을 보이는 것으로 생각된다. 반면, A-A'의 측선에서는 동굴의 크기가 큰 규모이며, 인접한 B-B'측선에서 주굴이 뚜렷하게 감지되는 것으로 보아 블록의 위치 차이나 측정 잡음에 의한 오차로 인하여 역산과정에서 나타나는 해의 비유일성에 의한 것으로 생각된다. 이 측선은 동굴입구와 가깝기 때문에 다소 큰 전기적 잡음이 포함되어 있다. 따라서, 가단면도상의 동굴 예상 심도에서 나타나는 고비저항 이상대가 측정오차와 동굴하부 저비저항대의 영향으로 역산단면도에서는 동굴 예상지점의 상부에서 나타나는 두 개의 고비저항대로 반영된 것으로 추정된다.

이상의 결과와 같이 전기탐사 자료의 해석단면상에서 동굴의 위치를 비교적 정확하게 인지할 수 있었으며, 이 결과는 여타의 전자탐사에 비해서도 우수할 것으로 생각된다. 이 자료는 앞으로 동굴탐사에 보다 효과적인 자료 처리방법에 적용될 필요가 있으며, 추가로 실시할 천부 전자탐사 방법의 자료와 비교할 예정이다. 또한 전기탐사 방법이 동굴 탐사에 적용될 수 있다는 것을 확인하였으

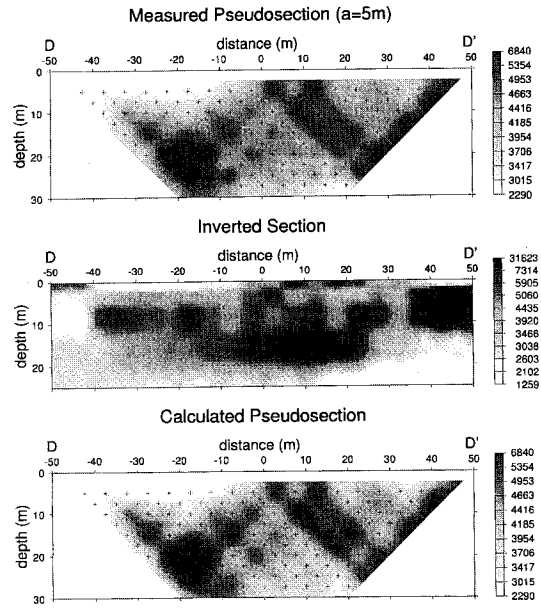


Fig. 17. Dipole-dipole array DC resistivity section along the profile D-D'. Dipole length a=5 m.

나, 추후의 탐사에서 분해능을 높이기 위하여 기존의 배열이나 방법과는 다른 기술을 적용하여 그 효율성을 검토하고자 한다.

결론 및 논의

지하 동굴 탐지를 위한 지구물리 탐사에 있어서 동굴이 물을 함유하고 있는지의 여부에 따라 나타나는 반응이 다양할 수 있다. 전반적으로 고비저항대인 우리 나라에서는 담수로 채워진 상태의 굴의 경우 전기탐사나 전자탐사에 의해 비교적 쉽게 탐지가 될 수 있는 것에 비해, 그 반대의 경우 적절한 탐사기법에 대한 결정이 어려운 것이 사실이다. 이번 탐사를 수행한 만장굴의 경우 물을 함유하고 있지 않은 빈 상태의 동굴로서 대략적인 위치와 전체적인 규모가 어느 정도 밝혀져 있으므로 각 탐사기법의 유용성을 비교 분석하고 새로운 기술의 개발을 위한 탐사 대상체로서는 최적의 지역이다. 본 연구에서는 2년에 걸쳐, 현재 여러 현장에서 많이 사용되고 있는 각종 지구물리 탐사 기법을 만장굴에 적용하여 동굴 탐지에 유용한 기술에 관해 연구·논의하고자 한다. 이번 탐사에서는 우선 중력, 자력, VLF, AMT, 전기탐사 등 5가지의 탐사를 실시하였으며, 이들에 대한 간략한 해석 결과를 토대로 추가적인 탐사의 수행과 변형된 기법의 적용을 결정할 예정이다.

먼저 중력탐사의 결과, 강풍으로 인해 자료의 안정도가

많이 떨어져 있으나 동굴의 존재를 인지할 만한 이상대를 보여주었다. 하지만 본 탐사에서 기준선으로 설정한 측선에서는 설계도면에 의한 모델링 자료의 결과 이상대가 잘 나타나지 않을 것으로 예상되므로 추후의 탐사에서는 측선의 위치를 수정할 예정이며, 바람과 같은 외부 인자에 의한 잡음을 제거하기 위하여 바람막이 시설이 필요할 것으로 생각된다.

동굴지역에서 자력 탐사로부터 기대할 수 있는 결과는 동굴대를 따라 지이상대를 탐지하는 것이다. 제주도는 화산섬으로서 측정지점에 따라 자력값의 변화가 대체로 심하게 나타나는 편이어서 양질의 자료를 획득할 수는 없었으나, 만장굴의 방향성을 가지는 이상대가 나타나므로 추후 보다 정밀한 2차원 격자형 탐사를 수행할 예정이다.

VLF 탐사는 천부 전자 탐사의 일환으로 수행되었으나 주변 전선주의 영향으로 잡음을 많이 타서 좋은 자료를 보여주지 못하였으며, 천부의 고비저항대를 탐지하기에는 어려운 방법이라는 결론을 내릴 수 있었다.

AMT 탐사는 상층부 전자 탐사의 방법으로 적용되었으나, 만장굴의 심도가 탐사 기기의 가탐심도를 밑돌아서 동굴과 관련된 반응을 확인하기 어려웠으며 이번에 사용한 기기의 주파수 대역이 천부의 동굴 탐사에는 부적절하다는 결론을 얻었다.

마지막으로 쌍극자-쌍극자 전기탐사 자료에서는 만장굴의 반응을 나타내는 고비저항대가 뚜렷하게 인지되며, 주변이나 보다 천부에 아직 밝혀지지 않은 또 다른 굴이 존재할 가능성이 있음을 보여준다. 전기탐사 방법은 측정간격을 통해 자료를 얻을 수 있는 진정한 의미의 2차원 탐사이며 직접적으로 전극을 지표에 설치하므로 가장 정확한 반응을 보이는 것으로 여겨진다.

이상의 결과를 살펴보았을 때 탐사 대상체가 고비저항, 저밀도의 특성을 갖는 소규모 동굴인 경우 통상적인 지구물리 탐사 방법으로 탐지하기가 쉽지는 않으나, 화산암 지역에서 만장굴 정도의 규모와 심도를 가지는 지하 동굴에 대하여서는 전기탐사 기법의 효용성이 가장 높은 것으로 나타난다. 하지만 중력이나 자력탐사 자료와 같은 기초 자료가 제공될 경우 보다 정밀한 해석이 가능하므로, 복합물리탐사를 통하여 보다 효율적으로 동굴 탐지를 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구를 통해 제주도 만장굴에서 획득되어진 지구물리 자료에 대한 기초적인 해석을 통해 자료의 특성을 살펴본다. 동굴탐지와 같은 천부 미세구조에 대한 조사는 야외 탐사에서 측정오차를 줄일수 있도록 많은 주의가 필요하며, 보다 높은 분해능을 가지는 처리기법의 개발이 필요하다. 앞으로의 연구에서는 보다 다양한 지구물리 방법이 적

용될 것이며, 보다 높은 분해능의 획득을 위하여 기존의 배열과 다른 전기탐사 방법과 역산기법이 적용될 것이다.

사 사

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 (과제번호: 1997-001-D00393) 연구비 지원으로 이루어진 연구의 일부로 관계자 분들께 감사드립니다. 또한, 현장 조사시 여러 가지로 편의를 제공해 주신 만장굴 관리사무소 김훈 소장님과 김군배 씨께도 감사드립니다.

참고문헌

- 권병두, 이희순 (1997) 화산섬의 지구물리학적 및 환경지질학적 특성 비교연구; 제주도화악이제도. 한국지구과학회지, 18권, p. 217-237.
- 김정호 (1987) 2차원 전기탐사 자료의 역산. 서울대학교 대학원 박사 논문.
- 한일합동동굴조사단 (1977) 제주도 용암동굴 조사. 한국동굴학회지.
- 복계주군 (1993) 만장굴 학술조사 보고서. 한국동굴학회지.
- Arzi, A.A. (1975) Microgravimetry for engineering application. Geophysical Prospecting, v. 23, p. 408-425.
- Breusse, J.J. (1963) Modern geophysical methods for subsurface water exploration. Geophysics, v. 42, p. 562-571.
- Butler, D.K. (1984) Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities. Geophysics, v. 49, p. 1084-1096
- Cheng, Y.W. (1980) Location of nearsurface faults in geothermal prospects by combined head-on resistivity profiling method. Proc. New Zealand Geothermal Workshop, p. 163-166.
- Crossley, D.L., Tensen, O.G. (1989) Fractal velocity models in refraction seismology. In Scholz, C.H. and Mandelbrot, B.B. (ed.), Fractals in Geophysics. Birkh user Verlag Basel, p. 61-76.
- Colley, G.C. (1963) The detection of caves by gravity measurements. Geophysical Prospecting, v. 8, p 1-9.
- Dobecki, T.L. and Romig, P.R. (1985) Geotechnical and groundwater geophysics. Geophysics, v. 50, p. 2621-2636.
- George, C.F. Jr, Smith, H.W. and Bostick, F.X. Jr (1964) Application of inverse filters to induction log analysis. Geophysics, v. 29, p. 93-104.
- Spies, B.R. (1983) Recent developments in the use of surface electrical methods for oil and gas exploration in the Soviet union. Geophysics, v. 48, p. 1102-1112.
- Turcotte, D.L. (1989) Fractals in geology and geophysics. In Scholz, C. H. and Mandelbrot, B.B. (ed.), Fractals in Geophysics. Birkh user Verlag Basel, p. 171-196.
- Word, D.R., Smith, H.W. and Bostick, F.X. Jr (1986) Crustal investigations by the magnetotelluric tensor impedance method. In Vozoff, K. (ed.), Magnetotelluric methods. Soc. Expl. Geophys., p. 626-648.

1998년 10월 9일 원고접수, 1998년 11월 21일 게재승인.