

지하 동굴 탐지에 효율적인 지구물리탐사기법 연구: 제주도 만장굴을 대상으로

권 병 두¹ · 이 희 순² · 이 규 호¹ · 임 형 래¹ · 오 석 훈¹

¹서울대학교 지구과학교육과, 152-742 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

²인천교육대학교 과학교육과, 407-753 인천광역시 계양구 계산동 산 59-12

Effective Geophysical Methods in Detecting Subsurface Caves: On the Case of Manjang Cave, Cheju Island

Byung-Doo Kwon¹ · Heui-Soon Lee² · Gyu-Ho Lee¹ · Hyoung-Rea Rim¹ · Seok-Hoon Oh¹

¹Department of Earth Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Department of Science Education, Incheon National University of Education, Incheon 407-753, Korea

Abstract: Multiple geophysical methods were applied over the Manjang cave area in Cheju Island to compare and contrast the effectiveness of each method for exploration of underground cavities. The used methods are gravity, magnetic, electrical resistivity and GPR(Ground Penetrating Radar) survey, of which instruments are portable and operations are relatively economical. We have chosen seven survey lines and applied appropriate multiple surveys depending on the field conditions. In the case of magnetic method, two-dimensional grid-type surveys were carried out to cover the survey area. The geophysical survey results reveal the characteristic responses of each method relatively well. Among the applied methods, the electric resistivity methods appeared to be the most effective ones in detecting the Manjang Cave and surrounding miscellaneous cavities. Especially, on the inverted resistivity section obtained from the dipole-dipole array data, the two-dimensional distribution of high resistivity cavities are revealed well. The gravity and magnetic data are contaminated easily by various noises and do not show the definitive responses enough to locate and delineate the Manjang cave. But they provide useful information in verifying the dipole-dipole resistivity survey results. The grid-type 2-D magnetic survey data show the trend of cave development well, and it may be used as a reconnaissance regional survey for determining survey lines for further detailed explorations. The GPR data show very sensitive response to the various shallow volcanic structures such as thin spaces between lava flows and small cavities, so we cannot identify the response of the main cave. Although each geophysical method provides its own useful information, the integrated interpretation of multiple survey data is most effective for investigation of the underground caves.

Key words: gravity survey, magnetic survey, electric resistivity survey, GPR survey

요약: 지하의 공동탐사에 효과적인 지구물리탐사 기법에 대해서 연구하기 위하여 제주도 만장굴을 대상으로 복합적인 지구물리탐사를 수행하였다. 이번에 사용한 방법은 탐사장비나 야외작업이 비교적 경제적이면서도 지하 공동에 의한 반응을 잘 보여줄 것으로 기대되는 중력, 자력, 전기 비저항, GPR(지하레이더) 탐사 등이다. 현지의 탐사여건을 고려하여 7개의 축선을 선정하고, 각 축선별로 몇 종류의 탐사를 복합적으로 실시하였다. 자력탐사의 경우는 2차원 격자형탐사도 함께 수행하였다. 각 탐사자료상에는 탐사법에 따른 여러 특징들이 잘 나타나고 있어, 그 효율성을 비교 분석할 수 있었다. 이번에 사용한 방법 중 동굴 탐사에 가장 효과적인 탐사법은 전기비저항탐사로 나타났으며, 쌍극자-쌍극자 배열법은 2차원적인 고비저항대로 나타나는 동굴의 존재를 잘 보여준다. 중력, 자력 탐사의 결과는 화산암 지역에서 나타나는 다양한 잡음의 영향으로 동굴의 위치나 규모를 해석해 내기가 쉽지 않지만, 전기비저항탐사 자료에서 인지되는 동굴의 위치와 규모가 적절한지를 검증하는 데에 효과적으로 이용될 수 있었다. 한편, 2차원 격자형 자력탐사 자료는 동굴의 경향성을 잘 보여주므로, 정밀 탐사축선을 결정하는데 유용하다. GPR탐사 자료에는 천부에 존재하는 미세한 틈새들과 소규모 공동들에 의한 반응이 강하게 나타나 상대적으로 심부에 위치하는 주동굴의 존재를 확인하기는 힘들었다. 이번 연구의 결과는 제한된 수의 탐사법만을 적용하였기 때문에 어떤 결정적인 결론을 내리기는 어렵지만, 지하 동굴의 경우는 복합적인 탐사를 수행하고 그 자료들을 상호보완적으로 사용함으로써 해석결과의 신뢰도를 높일 수 있는 것으로 나타났다.

주요어: 중력탐사, 자력탐사, 전기비저항탐사, 지하레이더탐사

서론

지하 공동은 폐광과 같이 인공적으로 만들어진 것과 석회암동굴이나 용암동굴과 같이 자연적인 지질과정에 의하여 만들어진 것이 있다. 이러한 지하 공동의 존재는 그 위 지표 상에 산업시설을 건설할 때 여러 가지 문제를 야기할 수 있으므로 사전에 그 위치나 규모 등을 밝혀 대비책을 마련해야 할 것이다. 한편, 자연적인 지질과정에서 형성된 동굴은 당시의 지질환경이나 지구조적 특성을 이해하는데 중요한 정보를 제공해 주고, 관광지로나 지하공간의 활용에 도움이 될 수 있으므로 학문적으로나 경제적 측면에서 두루 연구의 관심이 될 수 있다. 또한, 지하공동은 탐사대상으로는 비교적 단순한 형태를 띠고는 있으나, 공동의 규모, 심도, 공동의 내부상태와 주위 지질과의 관계 및 공동의 형성과정에서 야기되는 인접한 부분의 물성변화나 구조의 복잡성 때문에 지구물리탐사 전문가들에게는 공동 탐사가 대단히 흥미있는 영역의 하나로 여겨지고 있다.

이 연구에서는 저자들이 그동안 경험한 여러 가지 지구물리탐사 기법 중 탐사장비나 야외 작업이 비교적 경제적이면서도 지하공동 탐사에 유용한 결과를 제공할 것으로 생각되는 몇 가지 방법을 택하여, 제주도에 위치하는 용암동굴인 만장굴을 대상으로 야외탐사 및 모델링 연구를 수행함으로써 각 방법의 효용성을 비교 검토하였다. 이번 논문은 권병두 등(1998)에 이은 연속 과제로서 기존의 탐사에 추가하여 중력, 자력, 전기 비

저항, GPR 탐사 등을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

만장굴은 제주도 북제주군 구좌읍 동김녕리 산 7번지 일대에 위치한 용암동굴로서 그 길이가 13,422m에 달하는 세계 최장의 동굴로 알려져 있다. 만장굴을 형성하고 있는 현무암은 제주도 동단부근 북해안 저지대에 대지상으로 넓게 분포하고 있는 표선리 현무암이며, 시대적으로는 신생대 제 3기 말에서 제 4기 초에 걸쳐서 형성되었다(한일합동동굴조사단, 1977). 농어촌진흥공사가 1971~1975년에 걸쳐 제주도 해안가에서 실시한 시추 결과에 의하면, 만장굴 입구에서 동남쪽으로 약 2.3km 거리에 위치한 지점에서는 표선리 현무암의 두께가 90m에 이른다. 이렇게 두꺼운 현무암층은 한번에 유출된 것이라기 보다는 여러 번에 걸쳐 분출되어 중첩된 것으로 보고있다.(북제주군, 1993).

탐사를 실시한 곳은 만장굴 연장 구간 중 제 3지구에 해당하며, 이 지역은 동경 126°46', 북위 33°32', 해발고도 65m 지점에 해당되는 제 2 입구로부터 남서방향으로 뻗어 제 3 입구까지 이르는 지역으로 관광지로 개발되어 일반인에게 공개되고 있는 곳이다(Fig. 1). 이 지역의 지표에는 동굴을 보호하기 위하여 제 2 입구에서 동굴내부의 용암석주가 위치하는 곳까지 약 1km에 걸쳐 황색의 표식말뚝을 동굴 좌우편에 동굴의 실제 크기보다 조금 더 넓게 박아두고 있다.

Fig. 2는 만장굴 관리사무소에서 제공한 1992년에 작성된 만장굴 보강공사 도면을 바탕으로 재구성한 만장굴의 평면도와 단면도이고, 그 위에 지구물리탐사를 수행한 측선들을 표시하였다. 단면도에서 볼 수 있듯이 만장굴 내부의 높이는 평균적으로 7~8m 정도이며, 국부적으로는 2~3m 정도로 매우 낮은 곳도 있고 분출에 의한 효과로 12m 이상 되는 곳도 있다. 폭은 대체로 높이와 비슷한 규모를 이루고 있으며, 지표에서 동굴바닥까지의 평균 심도는 비교적 일정하며 평균적으로 22~23m를 유지하고 있으므로 동굴천정의 심도는 동굴의 높이에 좌우되고 있다. Table 1에는 각 측선에서 수행한 지구물리탐사법의 종류와 각 측선이 가로지르는 주 동굴의 단면 규모를 정리하였다.

복합지구물리탐사

중력탐사

만장굴과 같이 밀도가 큰 현무암 지역에서 속이 비어

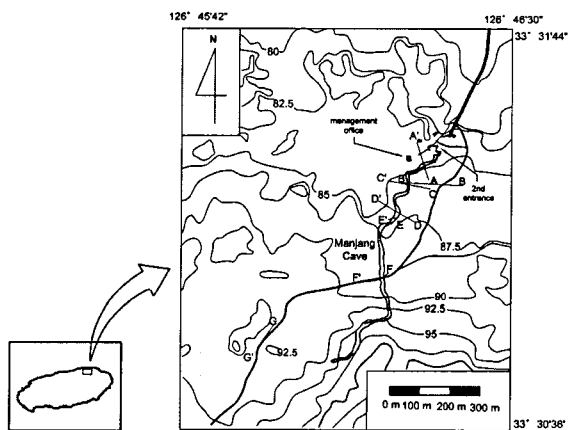


Fig. 1. Topographic map of the Manjang Cave in Cheju Island showing geophysical survey lines. The main cave extends southwestly from the 2nd entrance. Contour interval of height is 2.5m.

있는 동굴은 큰 밀도 차이로 인하여 중력 이상을 유발하나, 공동의 규모, 상태 및 심도 등에 따라 분해능과 신호대 잡음비(S/N비)가 상이한 반응을 나타낸다(Arzi, 1975 ; Butler, 1984).

중력탐사는 만장굴의 공개된 지역 위쪽에서 3개, 공개되지 않은 지역에서 1개의 측선을 택하여 총 4개의 측선상에서 LaCoste-Romberg G-type의 중력계를 이용하여 수행하였다. 이 중력계로는 측정범위 5000mgal, 감도 0.01mgal, 정확도 0.01mgal까지 측정 가능하나, 탐사 당시의 바람의 세기 등에 따른 환경변화 때문에 잡음의 영향을 받을 수 있다. 탐사를 수행한 각 측선의 대략적인 규모는 Table 1에 정리되어 있고, 각 측선에서의 측정 간격은 Table 2와 같다. 탐사측선 상의 중심점은 지표에 설치한 동굴 지표석의 중앙으로 택하였으나, 동굴지표와 주동굴의 중심점이 완전하게 일치한다고 보기는 어렵다.

중력측정값에 대하여서는 계기보정, 조석보정, 고도보정, 부계보정을 실시하였으며, 고도보정에 필요한 고도는 복제주근 구좌읍 월정리에 설치된 수준점(고도: 40.937m)으로부터 RED2A 광파거리 측정기와 Nikon LEVEL S-2 수준기를 이용하여 측정하였다.

Fig. 3은 A-A' 측선의 탐사 결과이다. 그림 (a)는 주동굴만을 고려한 순산 모델링의 계산치와 실제측정치를 비교한 것이며, (b)는 주동굴 주변에 존재할 가능성이 있다고 보여지는 천부의 소규모 공동을 함께 고려한 순

Table 1. Dimension of the Manjang Cave(the main cave) at each profile and conducted geophysical surveys.

Profile	Survey methods	Height	Width	Depth to ceiling	Remarks
A-A'	Gravity	10m	5m	20m	
B-B'	Schlumberger array	.	.	.	Absence of main cave
C-C'	Gravity, Dipole-dipole array, Schlumberger array	5m	6m	20m	
D-D'	Dipole-dipole array, Schlumberger array, GPR(50MHz)	6m	14m	16m	
E-E'	GPR(100MHz)	15m	5m	20m	
F-F'	Gravity, Magnetic, GPR(50MHz)	10m	14m	14m	
G-G'	Gravity, Magnetic, GPR(50MHz)	.	.	.	Unknown

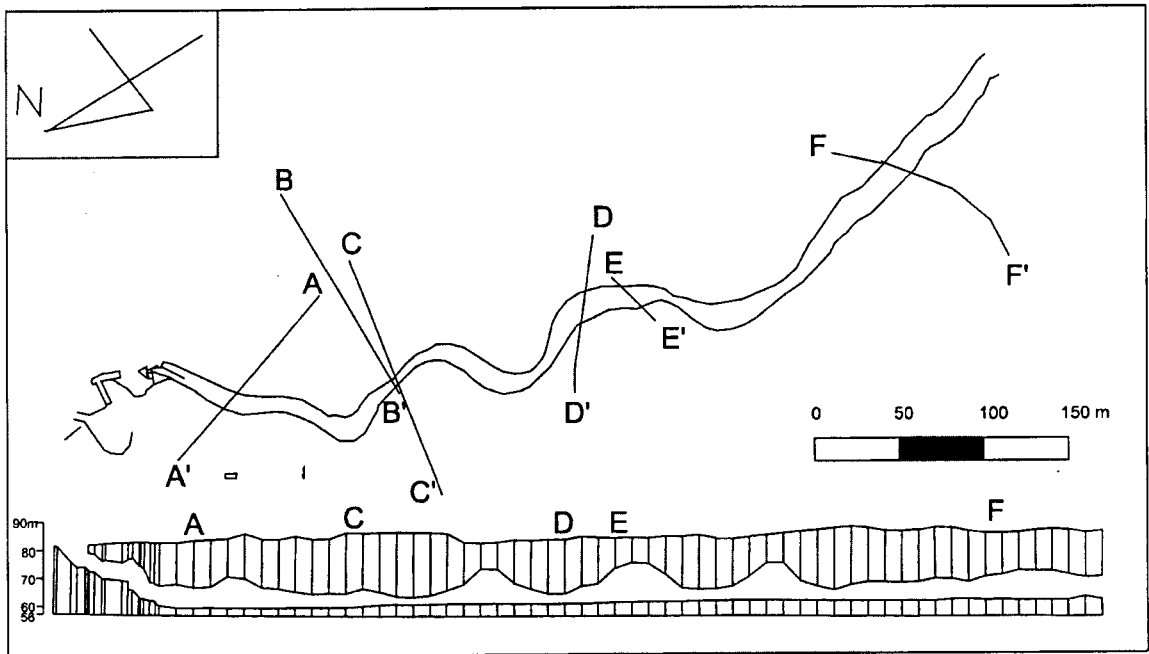


Fig. 2. Plan map and cross-section of the Manjang cave showing the locations of survey lines, which cross the cave, based on the survey report made for reinforcement work.

산모델링의 계산치와 측정치를 비교한 그림이다. 모델링시 주동굴의 크기와 깊이는 만장굴 보강공사보고서의 단면도를 이용하여 결정하였으며, 주변의 천부 공동들은 전기탐사 특히 쌍극자-쌍극자 배열의 결과를 고려하여 결정하였다. 중력모델링에 사용된 밀도치는 제주도 현무암 평균밀도인 2.7g/cm^3 이고, 주변 현무암층 내에서 나타날 수 있는 밀도의 변화 등은 고려하지 않았다. (+)로 표시된 것은 각 측정점에서의 단순부게이상값으로 잡음의 영향이 크게 나타나며 최대 0.2mgal 의 차이를 보인다. 모델링 해석결과에서 볼 수 있듯이 주동굴의 존재만으로는 계산치와 측정치가 잘 일치하지 않으나, 주변의 천부 공동들을 고려하는 경우에는 계산치와 측정치의 양상이 어느 정도 부합되게 나타남을 볼 수 있다. 측정치의 분포가 복잡하게 나타나는 것은 주변 암석의 밀도변화나 측정당시의 잡음의 영향으로 보이나 이번 모델링에서는 이들의 효과는 무시하였다.

Fig. 4는 C-C' 측선의 탐사결과이다. (a), (b)는 각각 주동굴만을 고려한 경우와 주변 공동들을 함께 고려한 경우이다. 이 측선은 주동굴의 규모가 작아서 단순부게이상의 최대 차이는 0.1mgal 정도로 나타난다. Fig. 4의 경우도 Fig. 3의 경우와 마찬가지로 주변에 소규모 동굴을 넣었을 때 계산치와 측정치가 보다 유사해짐을 알 수 있다.

Fig. 5의 (a)는 F-F' 측선의 탐사결과이다. 주동굴만을 고려한 상태에서의 산모델링의 계산치와 측정치가

Table 2. Interval of measured points on each gravity profile.

line	Station interval
A-A'	3m from center of line to 30m, 6m farther than 30m
C-C'	3m
F-F'	2.5m from center of line to 40m, 5m farther than 40m
G-G'	5m

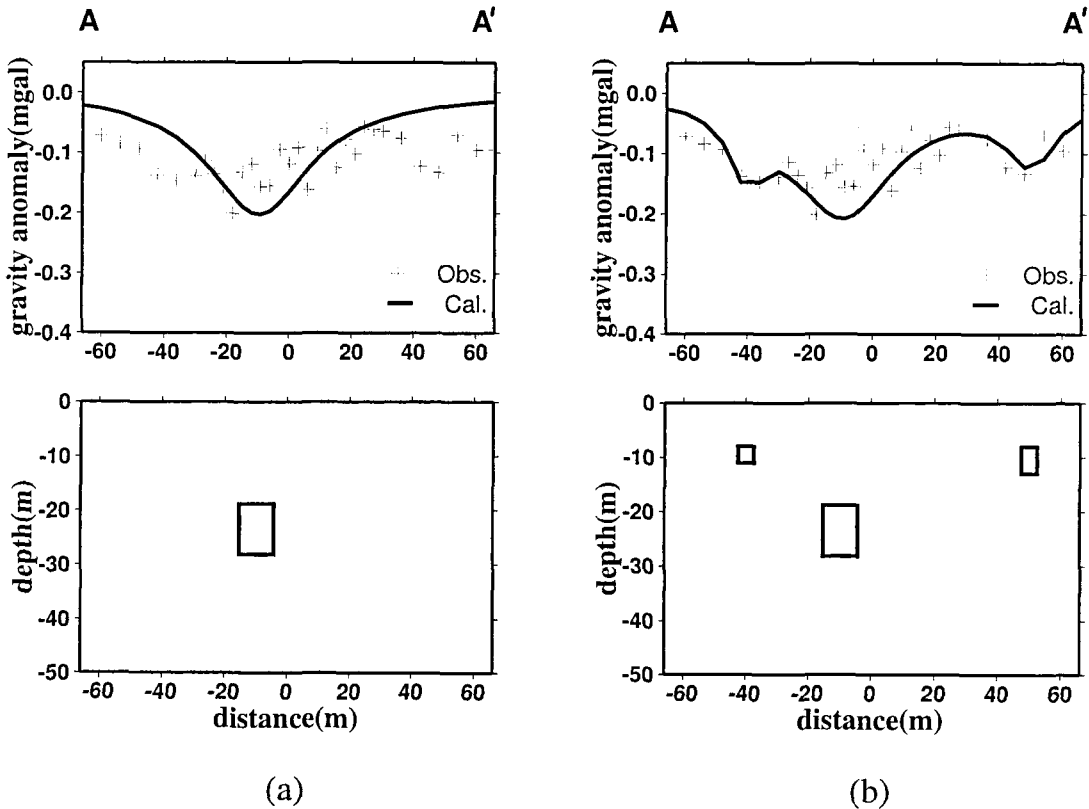


Fig. 3. Comparison between observed and synthetic gravity anomalies along the A-A' line. (a) Synthetic gravity anomaly by using the main cavity only model. (b) Synthetic gravity anomaly by using the model including both the main cavity and other shallow small cavities which are inferred from the dipole-dipole resistivity survey data.

비교적 유사하게 나타나며, 중력이상곡선이 중심점으로부터 거의 대칭적으로 변화하는 양상을 보인다. 이 축선의 인접부에는 주동굴에 의한 이상에 영향을 줄 수 있을 정도의 다른 공동은 존재하지 않는다고 해석된다. Fig. 5의 (b)는 G-G' 축선의 탐사 결과이다. 이 축선은 주동굴의 단면도가 없는 곳이므로, 전기탐사의 결과를 참조하여 주동굴을 비롯한 여타 공동의 규모와 위치를 결정하였다. 그 결과 순산모델링의 계산치와 측정치가 유사한 양상을 보이거나, 부계이상값의 최대차이를 보이는 지역은 축선의 중심으로부터 한 쪽으로 치우쳐 나타난다. 이는 이 축선상에는 지표에 동굴표식이 없어서, 탐사시 중심점의 선택과 연장을 적절하게 취하지 못했기 때문이다.

이상과 같은 4개의 중력축선에 대한 탐사결과를 종합해 본다면, 만장굴의 경우 주동굴의 영향이 대체적으로는 잘 나타나나, 주변에 위치하는 작은 동굴들의 영

향이 잡음으로 작용하고 있기 때문에 중력탐사만으로는 주동굴의 확실한 위치나 규모를 결정하기에는 어려움이 있는 것으로 생각된다. 그렇지만 다른 탐사자료 상에 나타나는 동굴효과들을 검증하는 데는 매우 효과적인 탐사라고 생각되며, 지질조건이 양호할 경우 중력탐사만으로도 동굴의 존재를 확인하는 것이 충분히 가능하다.

자력탐사

동굴내의 공기와 주변의 현무암은 커다란 대자율 차이를 보이므로 자력탐사도 동굴탐사에 유용하게 이용될 수 있다. 자력탐사는 만장굴의 공개된 지역 위에서 100×123m 면적을 대상으로 축점간격 3m, 축선간격 5m로 2차원 격자탐사를 실시하였고, 중력탐사자료와 직접적인 대비를 위하여 F-F', G-G' 축선 상에서 3m 간격으로 Scintrex ENVI GRAD 핵 자력계를 이용하여 총

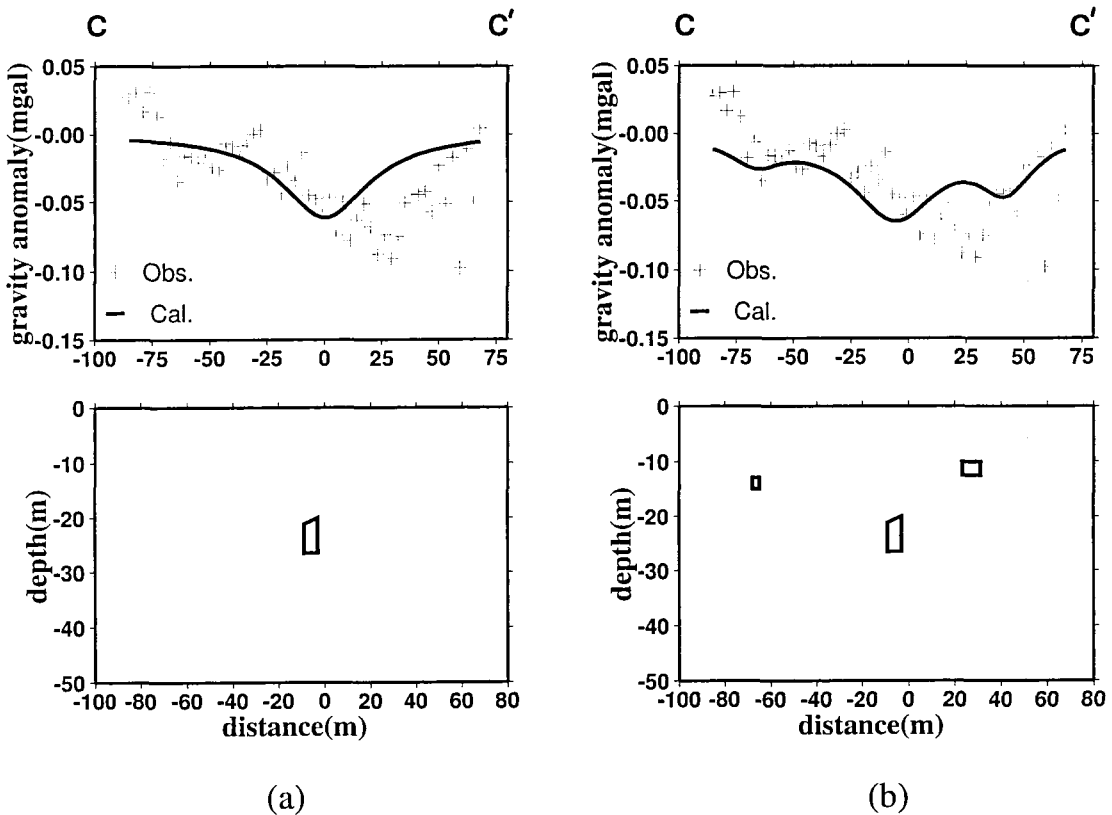


Fig. 4. Comparison between observed and synthetic gravity anomalies along the C-C' line. (a) Synthetic gravity anomaly by using the main cavity only model. (b) Synthetic gravity anomaly by using the model including both the main cavity and other shallow small cavities which are inferred from the dipole-dipole resistivity survey data.

자력과 1m 고도 차이에 의한 수직자력구배를 함께 측정하였다. 지구자기장의 일변화에 의한 영향을 보정하기 위하여 자력기준점을 운영하였고, 탐사기간 중 지구자기의 일변화량은 최고 20~30nT 정도로 관측되었으며, 자기폭풍과 같은 탐사에 영향을 미칠만한 현상은 없었다.

자력탐사를 수행한 지역의 대부분은 평지로 이루어져 있으나, 주동굴의 위치는 탐사지역의 우측부에 치우쳐 있다. 이는 주동굴의 우측으로 지표면이 갑자기 낮아지는 지형변화가 있으며, 관광지의 시설물을 비롯한 주변 상황으로 인하여 충분히 먼 곳까지 측정을 하지 못하였기 때문이다.

측정자료의 해석을 위하여 먼저 IGRF (International Geomagnetic Reference Field) 보정과 자극화변환 (Reduction to the pole)을 시행하였다. Fig. 6(a)는 IGRF 보정과 자극화변환을 실시한 2차원 격자 탐사의 총자력 이상도이고, (b)는 수직자력구배도이다. 우선 총

자력 이상도를 살펴보면 측정값은 최대 5000nT정도 차이를 보이고 있으며, 서쪽(동굴의 우측)으로 동굴의 방향과 대체로 나란한 경향성을 보이는 음의 이상대가 나타나고 있다. 그러나 이상대의 위치가 정확하게 동굴의 위치와는 일치하지 않고 있다. 이는 동굴 동쪽에서 계단 형태로 나타나는 갑작스러운 지형의 변화(Fig. 6c)로 인한 효과로 생각된다. 또한, 동굴 서쪽은 주변 여건상 측정을 수행하지 못한 곳은 내삽 및 외삽을 통해 이상도를 작성하였으므로 이로 인한 왜곡도 어느 정도 영향을 미쳤으리라 생각된다.

자력이상도에서 또 하나 특기할 사항은 동쪽(동굴의 좌측) 평지 지역에서 나타나는 음의 이상대로써 이는 서쪽 주동굴과 연관된 음의 이상대와 거의 같은 크기의 값을 보이고 있다. 이러한 이상대는 두가지 경우로 해석을 할 수 있는데, 첫째는 천부에 작은 규모의 공동이 존재를 하는 경우이고 둘째는 심부 즉 주동굴의 깊이 정도에서 주동굴 규모의 동굴이 존재하고 있는 경우이다.

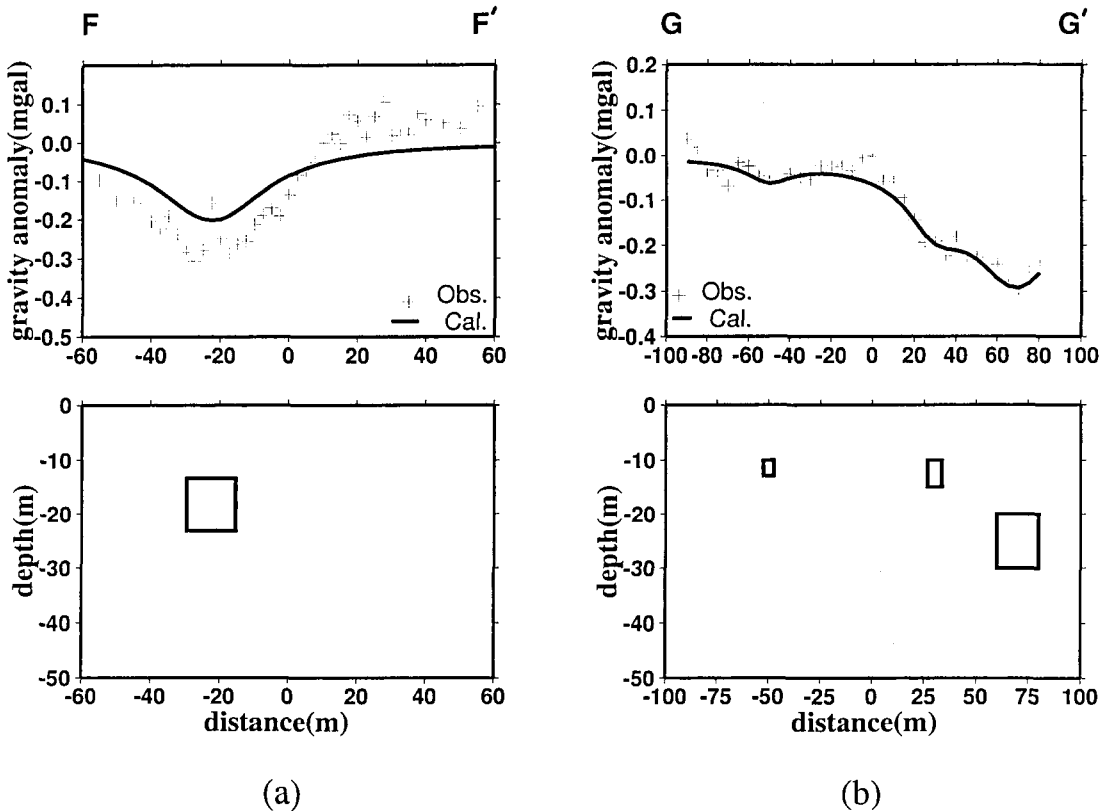


Fig. 5. Observed and synthetic gravity anomalies along the F-F' (a) and G-G' (b) lines with respective subsurface cavity models.

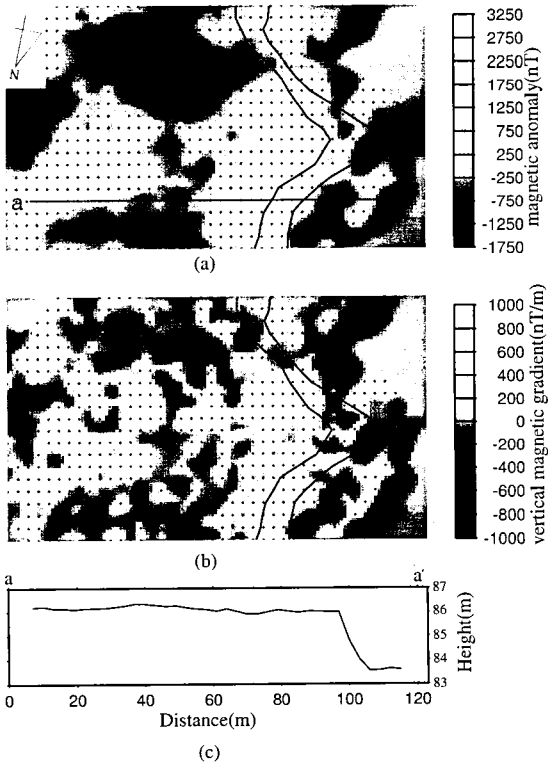


Fig. 6. Maps showing total magnetic anomalies (a) and vertical gradient magnetic anomalies (b) with terrain section (c).

같은 지역의 수직자력구배도(Fig. 6b)는 단위높이당 자기력 차이를 도시한 것으로 그 단위는 nT/m이며, 동굴이 위치하는 곳에서는 이상값의 양과 음의 부호가 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 양상이 다른 여러 곳에서도 나타나는 것으로 보아 주동굴 주변에 많은 수의 공동이 존재하고 있음을 가정할 수 있다. 그러나 이상값의 부호 변화가 너무 심하고 대자율이 높은 현무암의 자성의 불균질성을 고려할 때, 수직자력구배도로부터 동굴의 위치를 정확하게 해석한다는 것은 무리라고 생각된다.

격자탐사와는 별도로 F-F', G-G' 축선에서도 총자력이상과 수직자력구배를 측정하였으나, 앞에서 언급했듯이 수직자력구배는 변화가 심하게 나타나 총자력이상곡선 Fig. 7의 (a)와 (c)만을 해석하여 중력탐사 결과와 비교하였다. 그림의 (b)와 (d)는 중력자료 해석에서 사용한 2차원모델을 똑같이 사용하여 계산한 자력이상곡선이다. 그림에서도 확인할 수 있는 바와 같이 동일한 모델

이 중·자력 자료 해석에서 두루 유효하다고 하겠다.

복합지구물리탐사의 특성상 주어진 시간에 많은 탐사를 수행하여야 하기 때문에 매우 정확한 자료를 획득하기는 힘들지만 광역적인 효과를 개략적으로 살펴보는 데에는 자력탐사가 효과적이다. 따라서 정밀탐사 대상지역을 선정하기 위한 선행작업으로서의 자력탐사의 효용성을 평가할 수 있다고 생각된다.

전기비저항탐사

우리 나라의 기반암들은 전기비저항값이 대체로 크기때문에 쌍극자-쌍극자배열 전기비저항탐사가 비교적 효과적인 것으로 알려져있다(김정호, 1987). 화산섬인 제주도는 상부층이 주로 평균 전기비저항값이 약 1000Ωm인 현무암층으로 이루어져 있으며, 해수면 아래에서 100~200m 정도 두께로 발달한 미교결층은 전기전도도가 매우 높은 층으로 이루어져 있다(권병두, 이희순 1997). 만장굴은 비교적 고비저항대에 위치하고 있지만, 속이 비어있기 때문에 동굴의 전기비저항값이 주변보다도 훨씬 더 커 쌍극자-쌍극자 배열과 같은 2차원 전기비저항탐사는 동굴탐사에 유용할 것으로 기대된다.

이번 야외탐사에서는 미국 AGI사의 Sting R1을 사용하여 쌍극자-쌍극자 배열과 슬럼버져 배열로 탐사를 수행하였다. 쌍극자-쌍극자 배열을 통해서 2차원 전기비저항분포를 조사하고, 슬럼버져 배열에 의한 수직탐사를 통해 심도에 따른 전기비저항의 변화를 살펴보았다. 쌍극자-쌍극자 배열의 전극간격은 각 그림의 상단에 표시하였으며, 슬럼버져 배열을 이용한 수직탐사는 기본적으로 동굴과 평행한 방향과 동굴을 가로지르는 방향으로 탐사하였으나 탐사 여건상 한 방향만을 수행한 곳도 있다.

Fig. 8은 C-C' 축선의 쌍극자-쌍극자 전기비저항탐사 결과이며, 이 축선은 앞서 언급한 것처럼 탐사여건은 가장 좋았던 반면 주동굴의 규모는 가장 작다. 역산모델을 살펴보면 주동굴의 깊이보다 약간 상부지역에 고비저항대가 분포하고 있다. 이는 서론에서 기술한 것처럼 이 지역의 현무암이 한번의 분출로 이루어진 것이 아니라 여러 차례에 걸친 분출의 결과이므로 각 유출경계에서 발생할 수 있는 작은 틈새와 산재하는 작은 공동들의 효과라고 보여진다. 같은 축선의 슬럼버져 배열에 의한 탐사결과(Fig. 9)에서도 천부의 고비저항대와

심도가 약 8~20m 정도인 곳에서 고비저항대가 나타난다. 이처럼 천부에 여러 작은 공동의 효과가 나타나기 때문에 조금 더 자세히 분석해보기 위해서 Fig. 10과 같이 쌍극자-쌍극자 배열의 전극 간격을 5m로 줄여서 탐사하였다. 그 결과 심도 15~20m 부근에서 고비저항 지역이 더욱 뚜렷이 보이며, 주공동 주위에도 10m 내외의 심도에서 고비저항대 드러나고 있다. 이러한 양상은 이 지역 하부에 주공동이외에 여러 공동들이 산재하고 있을 가능성을 보여준다.

Fig. 11은 D-D 축선의 쌍극자-쌍극자 탐사결과이며, 이 축선의 연산모델을 살펴보면 주공동이 예상되는 깊이보다 하부인 심도 약 15~40m 사이에 고비저항대가 분포하고 있다. 다른 축선과 마찬가지로 천부의 고비저항대가 나타나고 있는 있으나, 이전 축선들처럼 주위 공동으로 여겨질 만큼 크게 나타나지는 않다. 즉, 이 축선은 주변의 동굴의 영향을 받기는 했으나 그 정도가 심하지 않은 곳이어서 주공동에 의한 효과가 많이 반영되었다고 생각되어진다. 실제로 이 축선은 여러 탐사축선들 중에서 주공동의 폭이 가장 넓고 주공동을 가로지르는 축선의 길이도 긴 축선이어서 주공동의 영향이 많이 반

영되었을 것이다. 슬림버저 배열에 의한 탐사결과(Fig. 12)에서 보이는 고비저항대의 심도는 약 10~30m로서 쌍극자-쌍극자 탐사결과와 고비저항대와 비교하면 주공동의 깊이는 약 20m 내외 존재할 것으로 예상되고 이는 실제 도면상에 주공동이 존재하는 지역과 유사하다. 쌍극자-쌍극자 탐사의 역산결과에서 심도 30m 이하의 고비저항대는 역산과정에서 심부로 갈수록 사용되는 불력을 크게 만드는 과정에서 생기는 오차로 보인다.

Fig. 13은 B-B' 축선의 탐사 결과로, 이 축선은 주공동을 벗어난 평지에 위치하므로 슬림버저 탐사만을 수행하였다. 이곳에서 탐사를 수행한 이유는 주공동이 지나가지 않은 곳에서의 비교 자료로 삼기 위해서였으나, 탐사결과와 양상은 주공동이 지나가는 곳에서의와 다소 유사한 형태를 보이고 있다. 그러나 2차원 자력격자탐사의 결과에서도 볼 수 있듯이 주공동 정도 규모의 공동이 비슷한 심도에 존재한다면, 이와 같은 결과가 나타날 수도 있다.

다른 탐사결과와 비교해 볼 때, 전기비저항탐사 자료의 역산결과는 다른 탐사에 비해서 비교적 동굴의 위치를 보여주는 분해능이 높다. 특히 쌍극자-쌍극자 배열

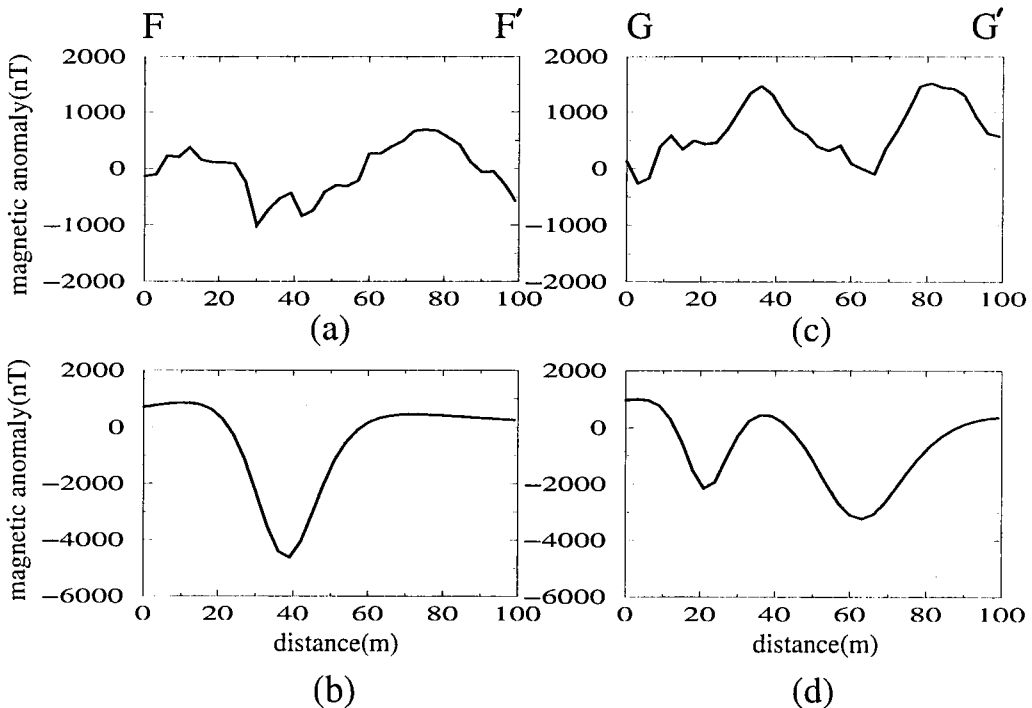


Fig. 7. Observed total magnetic anomalies and calculated anomalies along the F-F' (a and b) and G-G' (c and d) lines. The underground cavity models used for forward calculation are same as the models of Fig. 5.

은 심도뿐만 아니라 수평적으로도 여러 작은 천부 공동들의 존재에 대한 정보를 제공해주며, 슬럼버져 배열은 심도에 따른 전기비저항 변화에 대한 추가적인 정보를 제공해 준다.

이상의 결과를 보면, 동굴탐사를 위하여 복합적인 지구물리탐사를 수행할 경우에는 우선 자력탐사를 통해서 광역적인 이상대의 분포양상을 파악한 다음 분해능이 높은 전기비저항탐사를 수행하면 보다 효과적일 수 있다. 한편, 전기비저항탐사 자료의 해석결과는 중력과 자력 탐사자료의 해석시 순산모델링의 모델로 이용될 수 있으므로, 결과를 서로 대비해 봄으로써 상호 검증

이 가능하다.

GPR(Ground Penetrating Radar)탐사

GPR탐사는 고주파의 전자기파를 지하에 투과하여 반사된 파를 수신하여 지하단면도를 얻는 방법으로서 탐사방법과 해석이 용이하다는 장점이 있다. 현무암과 공기의 유전상수는 큰 차이를 나타내므로 그 경계면은 GPR자료 상에 좋은 반사체로 나타날 수 있다. GPR탐사를 위해서 pulseEKKO 100 system을 사용하였고, D-D', F-F', G-G'측선에는 50MHz를 사용하였고, E-E'측선에서는 100MHz를 사용하였다.

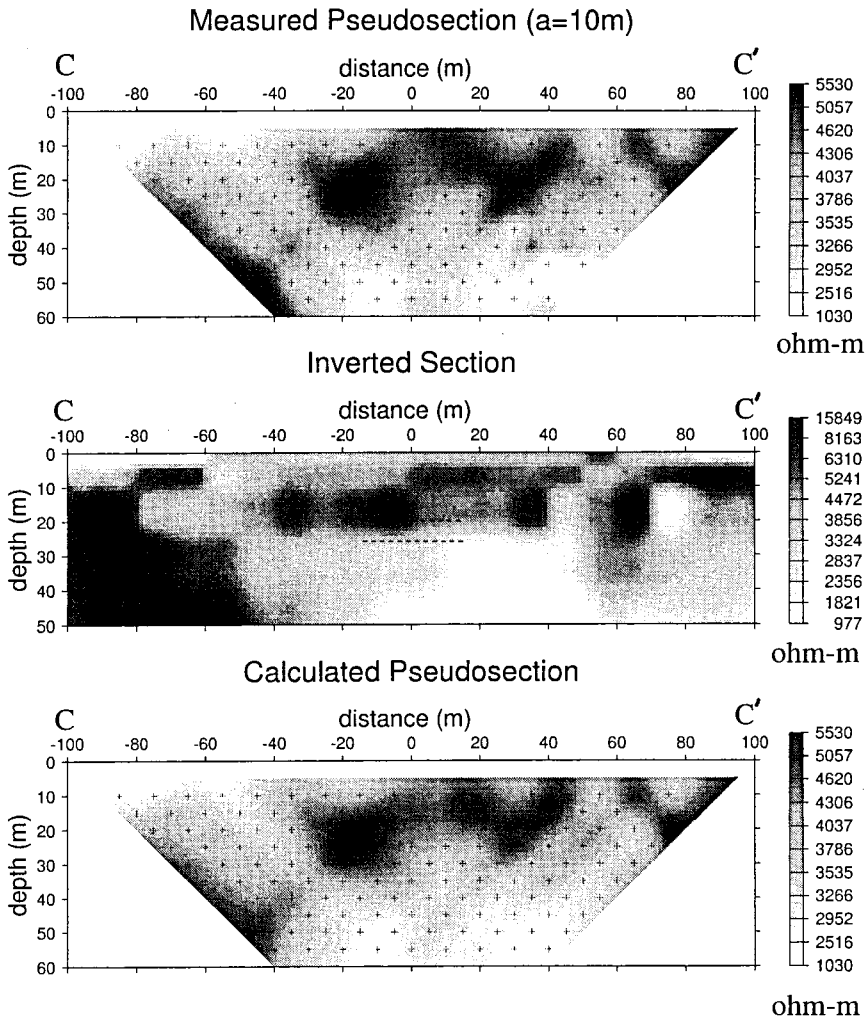


Fig. 8. Dipole-dipole array DC resistivity sections along the C-C' line with dipole length $a = 10m$. Dashed lines on the inverted section indicate the approximated range of location of the Manjang cave.

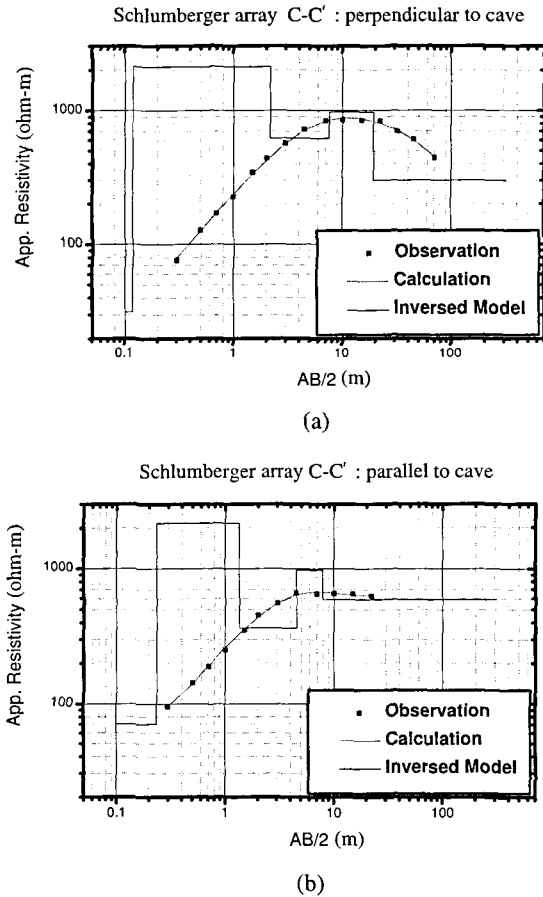


Fig. 9. Schlumberger array DC resistivity data and the interpreted resistivity section at the center point of the C-C' line.

각 축선에서 얻어진 자료해석에 참고하기 위하여, 탐사지역에 존재할 수 있는 여러 형태의 지질구조모델을 설정하고, 그 효과를 비교해 보기 위하여 순산모델링프로그램(이영균, 1997)을 이용하여 GPR 단면도를 작성해 보았다(Fig. 14). 사용된 모델은 만장굴 지역의 지질구조를 고려하여 표층으로부터 50cm 가량의 표토층과 20m 하부에 주동굴에 해당하는 반지름 5m의 공동, 그 주위로 깊이 12~13m 하부에 반지름 3m, 2m의 주동굴에 준하는 공동, 그리고 10cm, 5cm의 연속된 판상의 틈새, 그리고 곳곳에 반지름 10cm에 해당하는 작은 공동들로 구성되어 있다. 전자파의 속도는 0.1m/ns, 전기전도도는 0.5mS/m로 하였다. 순산모델링 결과의 특징을 살펴보면 첫째, 작은 수평틈새가 하나의 수평층처럼 반응이 나타나고 있으며, 둘째, 천부의 아주

작은 공동은 양호한 반사체로 반응을 나타낸다. 즉, 용암 동굴 형성의 특성상 주변에 많은 작은 공동이나 틈새들이 존재할 것이고 이는 GPR탐사에서 큰 반사체로 인식되어 복잡한 단면도를 보일 것을 예상할 수 있다. Fig. 15는 실제 GPR탐사 결과로 전반적으로 많은 반사체들에 의한 복잡한 양상을 보여준다. 탐사지역에서 주동굴의 천정은 지표로부터 약 15m 보다 더 깊은 곳에 존재하며 이는 GPR단면도 상에서는 약 300ns부근에 해당하지만, 주동굴이 존재하는 곳과 그렇지 않은 곳에서 큰 차이를 보이지 않아서 주동굴을 확인하기가 어렵다. 이러한 양상은 주동굴의 위치를 모르는 H-H' 축선에서도 마찬가지이다. 따라서 천부에 다수의 소규모 공동이 존재하는 만장굴지역과 같은 지역에서 주동굴 정도의 깊이와 규모를 갖는 동굴을 찾는 방법으로서 이번 GPR 탐사는 그리 효과적이지 못하였다고 평가할 수 있다.

하지만 GPR탐사는 다른 탐사들보다는 천부의 정보를 더욱 자세하게 제공하므로 천부지질구조 해석에는 많은 도움을 준다(Sun and Young, 1995). Fig. 15에서 보면 약 20ns 부근에서 수평층의 모습이 나타나며 이는 약 1m 정도까지 표토층이 존재하거나 또는 연속된 작은 틈새가 존재할 수 있음을 보여 준다. 또한 약 40ns 부근에서 최초의 쌍곡선들이 나타나기 시작하고 이러한 경향이 약 200ns까지 연장되는데, 이는 약 2~10m 정도의 천부에 강한 반사체인 작은 동굴이 있음을 지시해준다. 이와 같은 천부의 작은 동굴들은 전기비저항 탐사 중 슬림버저 탐사에서 나타나는 천부의 고비저항 값의 원인이 된다고 생각된다.

결론

이 연구를 수행한 만장굴은 내부가 비어있고, 일반에 공개되어 있는 구간의 경우에는 그 위치와 규모가 비교적 자세하게 알려져 있기 때문에 여러 가지 지구물리탐사를 수행하고 그 효율성을 비교 검증하기에 매우 적절한 장소라고 할 수 있다. 그러나 용암동굴 지역의 특성상 주동굴만 존재하는 것이 아니라 천부에 크고 작은 규모의 동굴과 용암류가 여러 차례 흐르면서 생긴 경계 부분의 작은 틈새들이 존재하며, 가스가 유출되는 과정에서 작은 공동이 생길 수 있다. 이러한 공동들은 주동굴을 찾는데 있어서 잡음 요소로 작용한다.

이번 연구에서는 비교적 경제적으로 야외탐사가 가

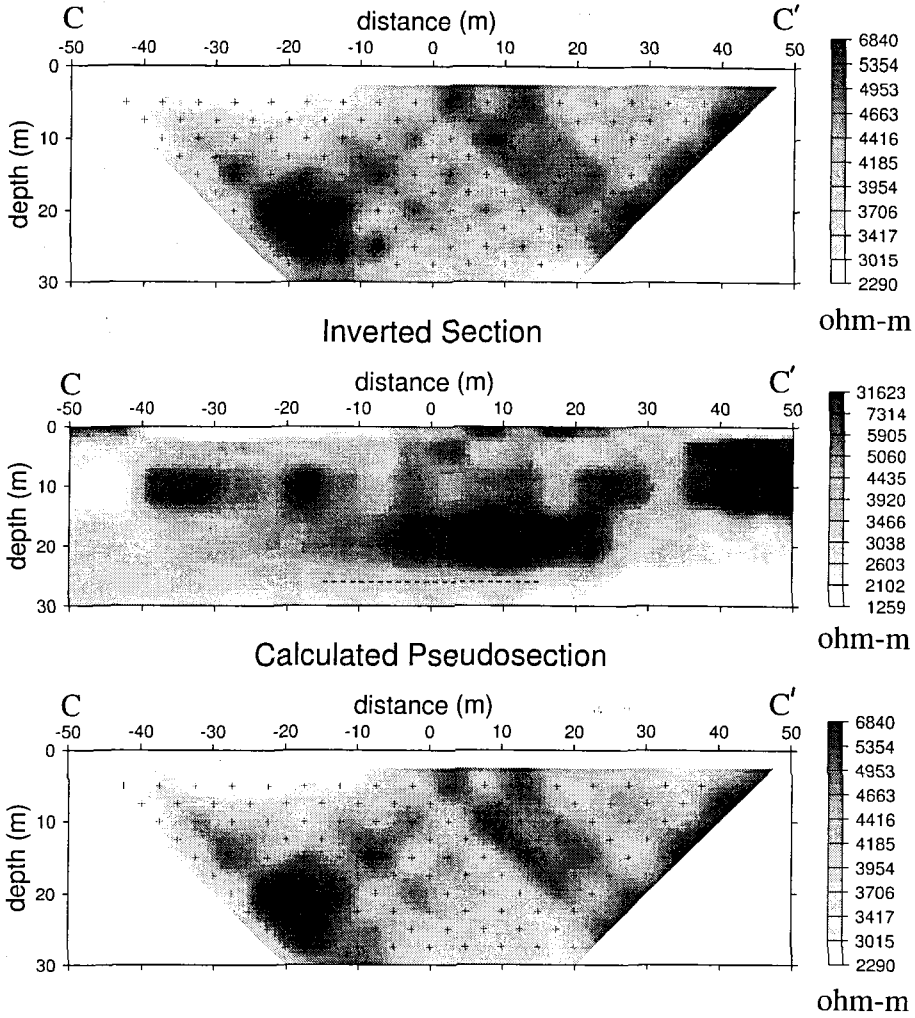


Fig. 10. Dipole-dipole array DC resistivity sections along the C-C' line with dipole length $a = 5\text{m}$. Dashed lines on the inverted section indicate the approximated range of location of the Manjang cave.

능한 중력·자력·전기 비저항·GPR 탐사 등 총 4가지 탐사를 실시하였으며, 이에 대한 결과를 해석하여 비교함으로써 동굴 탐지에 대한 각 탐사방법의 유용성을 분석하였다.

측선을 따라 수행한 중력탐사의 결과들을 살펴보면, 만장굴지역의 경우 주동굴만을 고려하였을 때는 부계 이상도를 해석하기는 곤란하였으나, 주변 천부에 위치하는 작은 공동의 효과를 함께 고려할 때는 의미있는 해석이 가능하였다. 그러나 잡음의 영향이 크고 분해능이 다소 떨어지는 이번의 중력자료만으로는 공동의 정확한 위치와 규모를 결정하기가 쉽지 않았다. 한편, 이번에 함께 수행한 쌍극자-쌍극자 전기비저항탐사 자료

를 참고로 하여 순산모델링을 한 결과는 측정치와 비교적 일치함을 볼 수 있었다. 따라서 중력탐사 자체로서는 심부에 위치하는 동굴을 정확하게 찾기에는 한계가 있지만, 다른 탐사의 보조자료로서 위치와 규모를 검증할 때는 의미가 있는 탐사라고 판단된다.

2차원 격자형의 자력탐사의 결과는 주동굴의 연장에 대한 개략적인 경향성은 확인이 된다. 또한 주동굴이 존재하지 않은 곳에서도 비슷한 효과가 나타남으로써 유사한 규모의 동굴이 존재할 가능성이 있음을 보여준다. 그러나 주변 지형 및 화산암 내의 대자를 변화의 복잡성으로 인하여 정확한 위치와 규모를 판단하기는 어렵다. 한편, 수직자력구배 탐사 결과는 천부 공동의

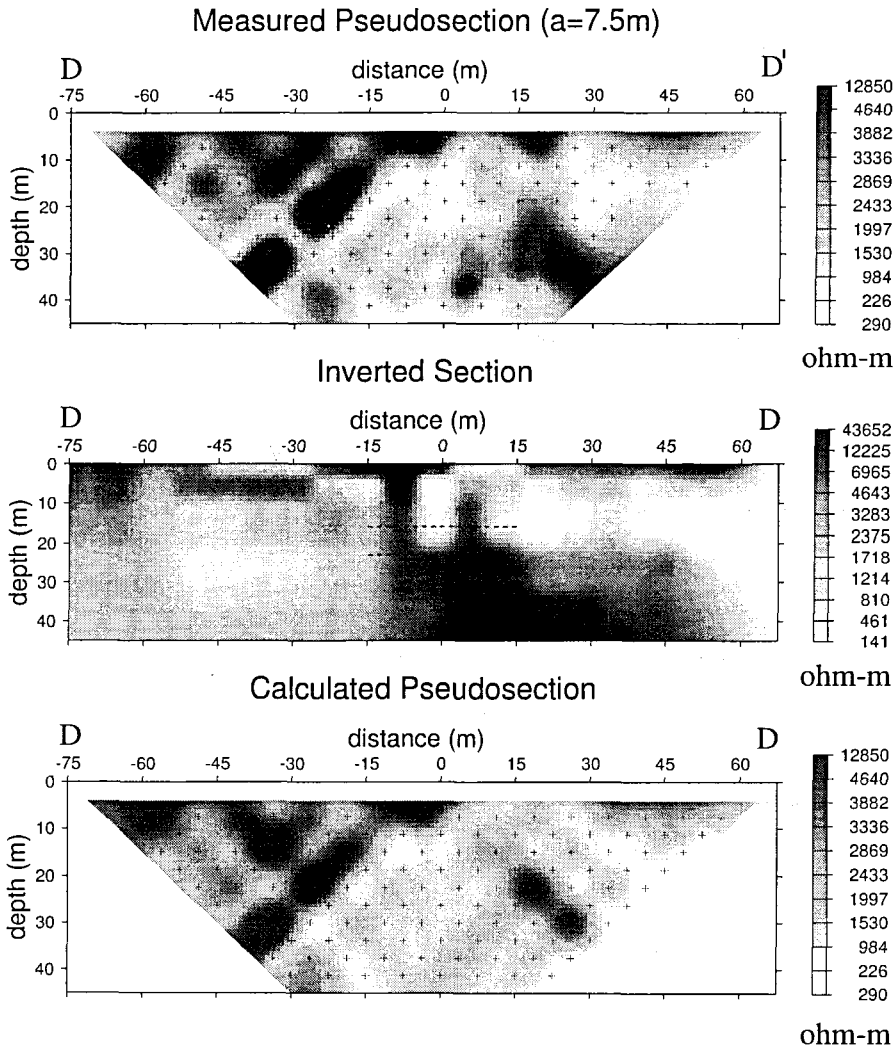


Fig. 11. Dipole-dipole array DC resistivity sections along the D-D' line with dipole length $a=7.5m$. Dashed lines on the inverted section indicate the approximated range of location of the Manjang cave.

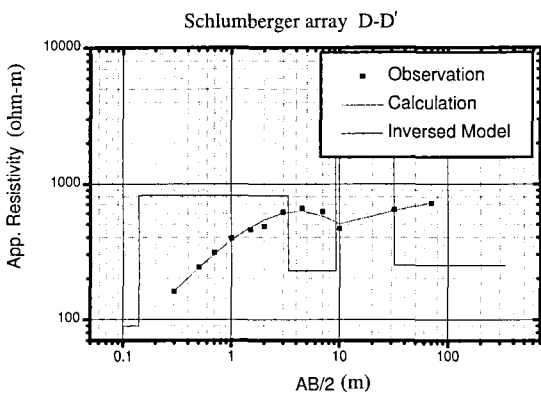


Fig. 12. Schlumberger array DC resistivity data and the interpreted resistivity section at the center point of the D-D' line.

영향이 너무 크게 나타나 주동굴을 찾는 데는 효과적이지 못하였다. 자력탐사는 중력탐사나 전기비저항탐사 등에 비해서 비교적 그 수행이 간편한 만큼 2차원 자력탐사를 통해 먼저 광역적인 탐사를 수행한 후 다른 탐사를 수행할 지점들의 위치를 결정하는 것이 바람직한 방법이라고 생각된다.

이번 야외탐사에서는 쌍극자-쌍극자 배열과 슬럼버져 배열을 이용한 전기비저항 탐사자료가 동굴의 존재를 확인하는 데에 유효한 것으로 나타났다. 특히 쌍극자-쌍극자 배열 방법은 깊이와 수평거리의 2차원적으로 탐사가 가능하므로 주동굴뿐만 아니라 주변에 산재하

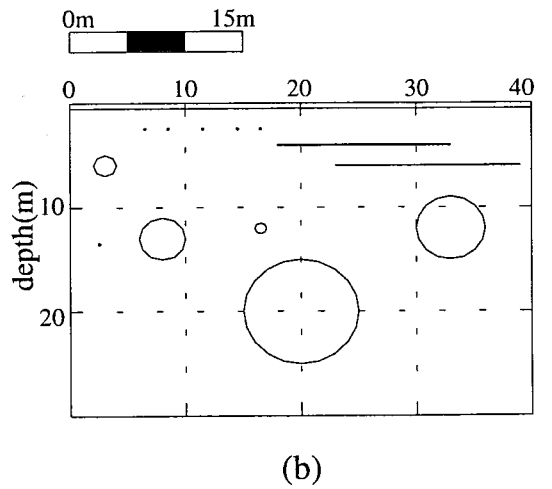
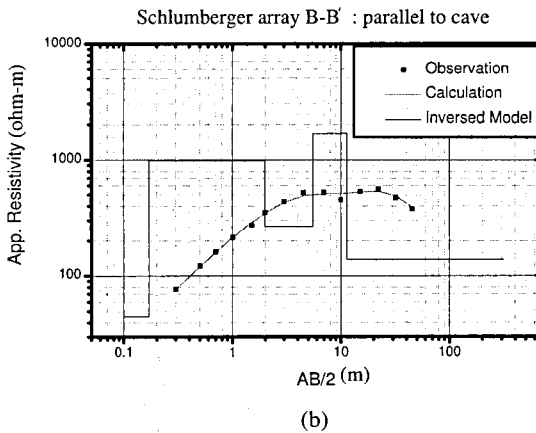
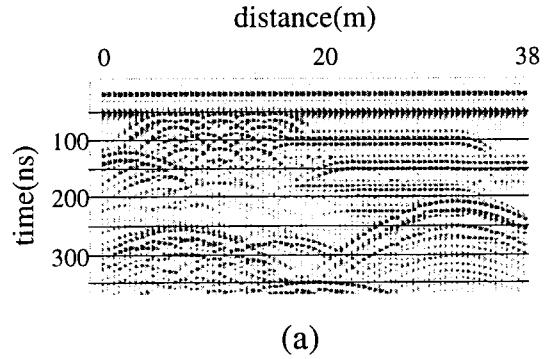
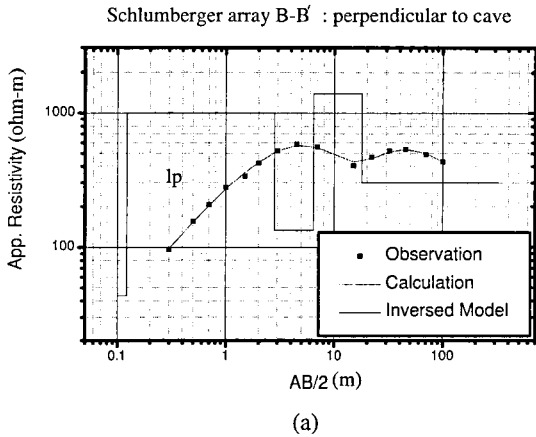


Fig. 13. Schlumberger array DC resistivity data and the interpreted resistivity sections at the center point of the B-B' line.

Fig. 14. Synthetic GPR section (a) produced based on the model (b) involving various possible geologic structures at the Manjang cave area.

는 소규모 천부 공동들도 그 위치와 함께 크기도 가늠할 수 있게 한다. 슬러브배열을 이용한 수직탐사도 동굴이 위치하는 심도에서 고비저항 효과가 비교적 잘 나타나고 있다. 여러 개의 동굴이 존재하는 경우, 쌍극자-쌍극자 배열을 이용하여 고비저항 지점들을 판별하고, 그 위치에서 슬러브배열 탐사를 수행하면 동굴의 연장이나 규모를 확인하는데 유용할 것으로 생각된다.

GPR탐사는 비교적 얇은 부분을 탐사하는 데에 분해능이 높아 효과적이다. 그러나 이번 만장굴탐사에서는 상부 얇은 곳에 존재하는 소규모 공동이나 용암류의 틈새들이 큰 반사체로서 작용을 하기 때문에 하부에 존재하는 주동굴에서 되돌아오는 반사파를 측정하는데는 실패를 하였다. 이번에 사용한 GPR탐사의 주파수 대역은 주동굴을 찾아내기에는 적합하지 못한 것으로 나타

났으나, 전기비저항 탐사자료의 천부구조 해석에는 도움을 주었다.

이상의 결과를 종합해 보면, 미지의 동굴을 탐지하기 위해서는 우선 탐사대상 지역에 대한 예비탐사로서 격자형 자력탐사를 수행하여 이상대의 분포를 먼저 확인한 다음 적절한 축선을 선정하고, 각 축선 상에서 쌍극자-쌍극자 배열을 통해서 2차원 비저항 단면도를 얻고 중력탐사를 동일 축선 상에서 실시하여 이상대의 규모를 검증한 후, 수직 전기비저항탐사를 할 지점을 결정하여 슬러브배열 탐사를 수행하는 것이 바람직하다고 하겠다.

이처럼 지구물리탐사 기법들은 탐사대상체의 특성에 따라, 그 각각으로도 효용성이 크다고 할 수 있으나, 시간과 경제적 여유가 허용되면 다양한 방법으로 복합적

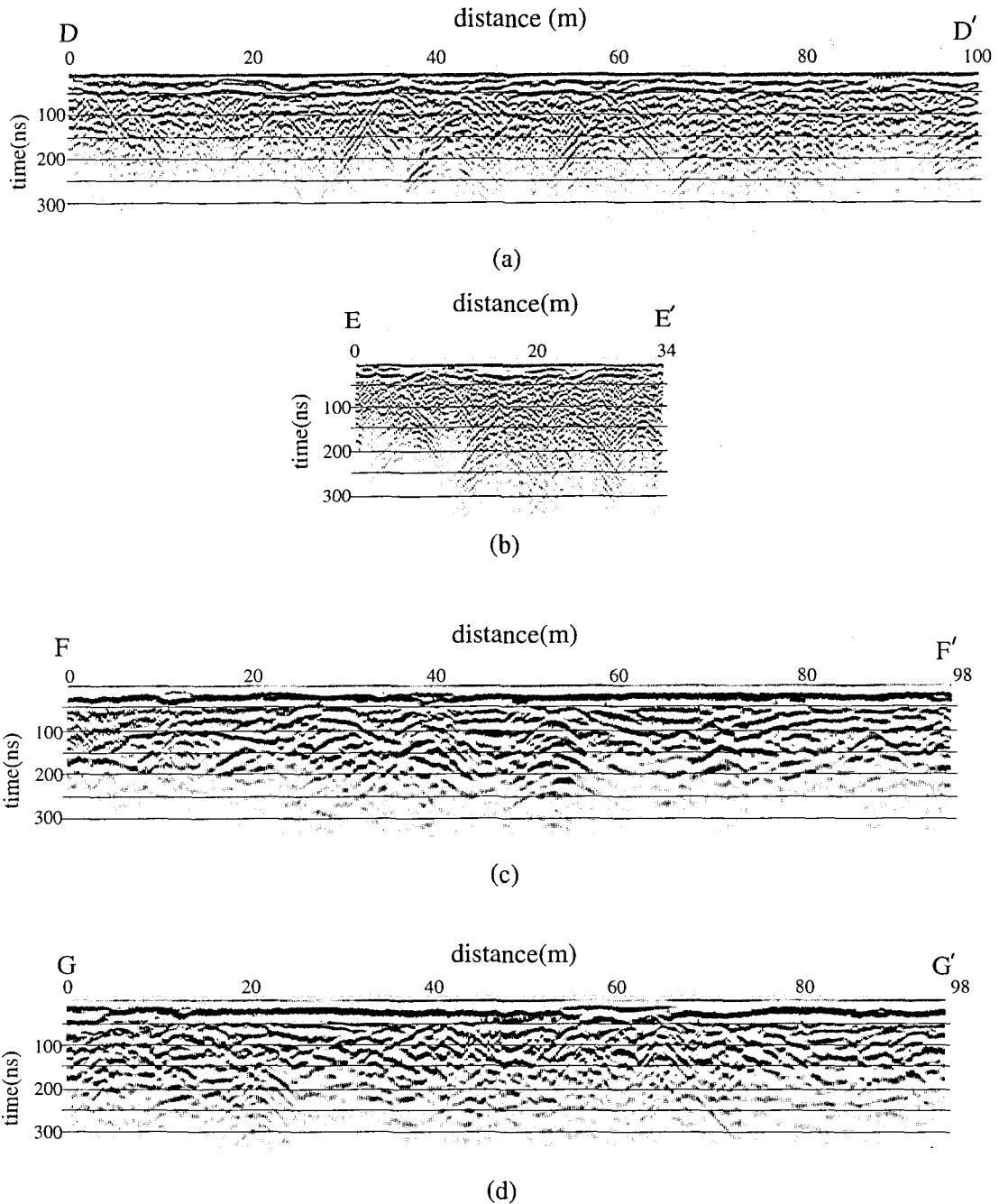


Fig. 15. GPR survey sections obtained along the D-D' (a), E-E' (b), F-F' (c) and G-G' (d) lines.

인 탐사를 수행함으로써 개개 탐사자료의 해석에서 나타날 수 있는 오류를 줄이고, 상호보완적인 해석으로 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

사사

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제(과제번호: 1997-001-D00393) 연구비 지원으로 이루어진 연구의 일부로 관계자 분들께 감사드립니다. 탐사를 위

하여 GPR탐사 기기를 대여해 주신 (주)바투엔지니어링 관계자 분들과 이 논문을 심사하면서 좋은 의견을 많이 주신 익명의 심사위원께도 감사드립니다.

참고문헌

권병두 · 이희순 · 오석훈 · 이춘기, 1998, 제주도 만장굴에 대한 복합 지구물리탐사 기법의 적용. 자원환경지질학회지, 31, 535-545.

권병두 · 이희순., 1997, 화산섬의 지구물리학적 및 환경지질학적 특성 비교연구 : 제주도와 하와이제도. 한국지구과학회, 18, 217-237.

북제주군, 1993, 만장굴 학술조사 보고서. 한국동굴학회.

김정호, 1987, 2차원 전기 탐사 자료의 역산. 서울대학교 박사 학위논문.

이영균, 1997, 주파수 의존성을 고려한 지표 레이더 모형 반응 계산. 서울대학교 석사논문.

한일합동동굴조사단, 1977, 제주도 용암동굴 조사. 한국동굴학회.

Arzi, A.A., 1975, Microgravimetry for engineering application, Geophysical prospecting, 23, 408-425.

Butler, D.K., 1984, Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities, Geophysics, 49, 1084-1096.

Fedi, M., Rapolla, A., and Russo, G., 1999, Upward continuation of scattered potential field data, Geophysics, 64, 443-451.

Sun, J., and Young, R.A., 1995, Recognizing surface scattering in ground-penetrating radar data. Geophysics, 60, 1378-1385.

2000년 3월 20일 원고 접수
2000년 8월 4일 원고 채택