

## 파쇄대와 지하의 빈 공간에 의한 지자기이상

이문호\*

영남대학교 신소재공학부, 경북 경산시 대동 214-1, 712-749

(2010년 2월 25일 받음, 2010년 4월 20일 최종수정본 받음, 2010년 4월 20일 게재확정)

지하에 존재하는 파쇄대와 빈 공간 및 터널이 지상에서의 지속밀도분포에 미치는 영향과 심도에 따른 자기이상의 변화를 조사하였다. 파쇄대와 빈 공간 및 지하터널이 있는 지표상에서의 지속밀도분포를 플럭스게이트형 마그네토미터를 사용하여 조사하였다. 지하에 존재하는 파쇄대는 지표면으로부터 높이 0.15 m에서의 자력분포에 (+)피크와 (-)피크로 이루어진 피크 쌍(peak pairs) 형태의 자기이상을 나타내는데, 이러한 자기이상은 지상으로부터 1.15 m의 높이에서는 그 강도가 현저하게 감소한다. 지하의 빈 공간에 의하여 지속밀도가 감소하는 자기이상이 발생하며, 지하공간의 심도가 깊을수록 지속밀도의 감소정도가 줄어든다. 이러한 지속밀도 감소 현상을 이용하면 지하에 존재하는 터널과 싱크홀과 같은 빈 공간의 존재와 규모를 탐사할 수 있을 것으로 보인다.

**주제어** : 파쇄대, 지하의 빈 공간, 지자기, 지속밀도분포, 지하심도, 지하터널, 자기탐사

### I. 서 론

지표면으로부터 50 cm 이하의 높이에서는 지하의 지질과 구조에 따라 자기장의 강도가 변하는데, 이러한 자기장의 국지적인 변화로부터 지질이나 지층의 구조 및 지층의 구조적 결함을 찾아내는 것을 자력탐사라고 한다[1]. 자력탐사는 암석의 자화율이나 잔류자기 등에 의거한 지속밀도분포로부터 지하 암석의 자기적 성질, 자성물질의 존재 여부, 지질구조 등을 조사하기 때문에 자성의 차이가 거의 없는 지하에서는 자력탐사가 용이하지 않다. 일반적으로 화성암은 변성암이나 퇴적암에 비해 자성이 강하며, 그 중에서도 염기성 화성암은 큰 자성을 가지는 경우가 많다. 변성암은 화성암보다 자성이 약하지만, 대체로 퇴적암보다는 자성이 강하다[2].

지구의 자력은 벡터 량이기 때문에 그 크기는 총자력으로 나타내며, 수평자력과 수직자력으로 분해되고, 지구 자력의 북각(伏角)과 편각(偏角)으로 나타낼 수 있다. 자력계로 측정된 자기장은 지구의 자전에 의한 변화를 보정하기 위해서 측정 결과는 일변화보정(日變化補正)이 요구되며, 높이와 형상에 따른 변화를 보정하기 위해서 지형보정이 요구된다. 이러한 보정을 거친 후에 지속밀도분포가 작성되며, 이로부터 지질구조나 구조적 결함을 해석할 수 있다[2].

자기탐사법으로 지질이나 그 구조를 해석하기 위해서는 지하구조의 모델로부터 자기이상(magnetic anomaly)을 계산한 결과와 실제로 측정된 지속밀도분포를 비교할 필요가 있다. 항공기에 탑재한 측정 장치로부터 구한 항공자력은 지상에 있는 자성물체에 의한 교란(disturbances)을 배제할 수 있으므로

단시간에 넓은 지역의 지속밀도분포를 얻을 수 있어 탐사 초기단계에서 광역의 기반(基盤)구조와 퇴적물의 발달 상태를 개략적으로 파악하는 수단으로 사용되고 있다[2, 3]. 단층 파쇄대, 균열, 파단면, 작은 크기의 빈 공간 및 지하 터널과 같은 규모가 아주 작은 구조적 결함은 공간 분해능 때문에 항공지속밀도분포로부터 확인되기 어렵다. 이러한 작은 규모의 결함들은 지표면 가까이에서 조사되어야 하며, 공간분해능 때문에 측정점 간의 거리와 간격이 작아야 하므로 측정에 많은 시간이 소요된다. 그래서 좁은 지역에서의 지속밀도분포 조사에는 지구자력의 일변화에 대한 보정과 공간분해능을 고려하여 데이터 취득시간(data acquisition time)이 대단히 짧고 강도가 뛰어난 자력센서가 요구된다[4].

우리나라에서 금(金)을 배태하고 있는 광상은 열수충진맥상 광상(熱水充脈狀鑛床), 접촉교대광상(接觸交代鑛床), 알라스카이트(alaskite) 및 페그마타이트(pegmatite)광상, 사금광상(砂金鑛床) 등으로 분류된다. 이 중에서 열수충진맥상광상이 한반도(韓半島) 금광상(金鑛床)의 70~80 %를 차지하는데, 이 광상은 심열수(深熱水), 중열수(中熱水) 및 천열수(淺熱水) 광상으로 나뉜다. 한반도에서는 심열수와 중열수 광상에서 금이 주로 산출되지만, 한반도 남부에 발달된 신라통(新羅統) 중에는 천열수 금광상(epithermal gold deposits)이 많이 발견된다. 전남 해남군 소재의 은산광산은 중생대 이후의 화산활동으로 형성된 천열수 금광상으로, 퇴적암 속에 금(gold)을 함유하는 석영(quartzite)맥이 관입하여 존재하고 있는데, 금의 함유량은 최대 112 ppm으로 보고되었다[5]. 은산광산은 주 갱도(5 × 5 m)를 통하여 경사 9도의 기울기로 해저 70여 m까지 서로 연결되어 있는데, 폭과 높이가 각각 2 m인 채광용 갱도가 지상 5 m로부터 해저 80여 m에 산재해 있다.

\*Tel: (053) 810-2476, E-mail: mhlee@yu.ac.kr

본 연구에서는 파쇄대가 노출되어 있는 곳에서 파쇄대가 자속밀도분포에 미치는 영향을 관찰하고, 지표면으로부터 지하 터널이 존재하는 곳까지의 깊이 즉 터널의 심도에 따른 자속 밀도변화를 조사하여 심도가 자기기이상에 미치는 영향을 조사하였다. 지하의 빈 공간에 의한 자기기이상을 확인하기 위해서 작은 규모의 지하 빈 공간을 야외의 평지에 조성하여 그 위에서 자속밀도분포를 조사하였으며, 채광중인 전남 해남의 은산광산에서 지하 심도가 서로 다른 지하터널이 있는 지표면에서 자속밀도분포를 조사하였다. 일변화 보정을 위하여 자력이 안정된 곳에 기준 자력계를 설치하여 획득한 기준자력으로 측정 자력 값을 보정하였다[6-10]. 공간분해능과 데이터 취득시간이 대단히 짧은 마그네토미터 자력계를 사용하여 자속밀도분포를 조사하였다. 나타난 자기기이상을 해석하기 위해서 맥스웰 방정식을 사용한 시뮬레이션 프로그램으로 모사실험을 행한 결과와 실제로 측정한 자기기이상을 비교분석하였다 [11].

## II. 실험방법

### 1. 자속밀도분포 측정

지표면에서의 자속밀도분포를 조사하기 위해서 3축 플럭스 게이트(fluxgate)형 마그네토미터(Le USA Inc., model FGM-4DTAM)와 스캐닝 마그네토미터(FTK, model GeoMag-101) 및 24채널 마그네토미터(FTK, model GeoMag-Strata)를 사용하였다[12]. 일변화 보정을 위하여 자력이 안정된 곳에 기준 자력계인 FGM-4DTAM를 설치하였는데, 이로부터 획득한 자속밀도를 기준 자력으로 설정하였다.

모터를 사용하여 센서의 위치를 이동하였는데, Fig. 1에 센서의 장착상태와 모터(motor-driven belt)를 사용하여 센서를

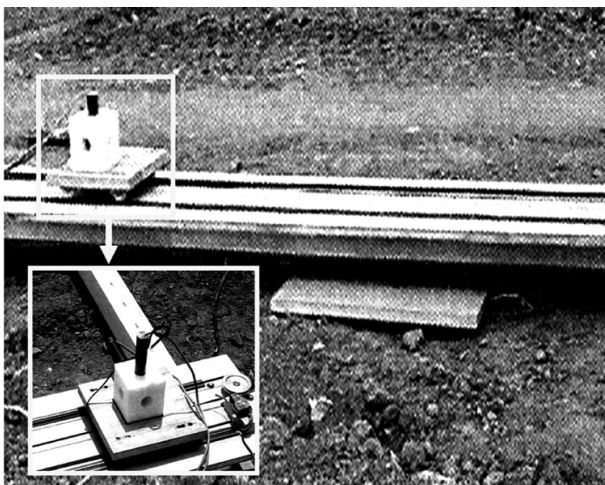


Fig. 1. Alignment and motor-driving system of fluxgate-type sensor.

이동하기 위한 장치가 나타나 있다. 센서는 2 m/min의 속력으로 연속적으로 이동하였으며, 센서로부터 데이터를 취할 때의 공간 분해능은 1 data/mm이었다. 지표면으로부터 센서의 높이에 따른 자속밀도 분포의 변화를 확인하기 위해서 센서의 높이를 0.15 m와 1.15 m로 설정하였다. 이 때 센서의 스캔 스피드를 일정하게 유지하기 위하여 Fig. 1의 장치를 사용하였다.

### 2. 지하 빈 공간에 의한 자속밀도분포변화

#### (가) 지하 빈 공간

지하의 빈 공간에 의해서 발생하는 자기기이상을 관찰하기 위해서 일본 이바라키현 츠클바시 카리마 515-1에 소재한 (주)하자마(間組)의 기술연구소 야외 실험장에 Fig. 2와 같은 폭 0.5 m, 길이 1.0 m, 깊이 1.0 m의 지하의 빈 공간을 조성하였다. 이곳은 원래 저수지가 있던 곳인데, 저수지 내부를 흙으로 채워 성토하여 만든 곳으로, 흙으로 채워진 깊이는 약 10 m 정도이다. 성토지에 상기의 구덩이를 만든 후에, 이곳을 두께 2 mm의 합판으로 덮은 다음, Fig. 1에 있는 1축 플럭스 게이트(fluxgate)형 마그네토미터를 사용하여 자속밀도의 변화를 측정하였다. 이 때 지표면으로부터 센서의 높이는 0.15 m 이었다. 모터를 사용하여 2 m/min의 속력으로 연속적으로 센서의 위치를 이동하였으며, 데이터를 취할 때의 공간 분해능은 1 data/mm 이었다.

#### (나) 터널 위

지하에 있는 터널에 의해서 지상에서의 자속밀도분포에 이상이 발생하는 것을 조사하기 위해서 현재 금을 채굴하고 있는 전남 해남군 황산면에 소재한 순신개발의 은산광산의 터널 위에서 자속밀도분포를 측정하였다. 은산광산에서 토목 측

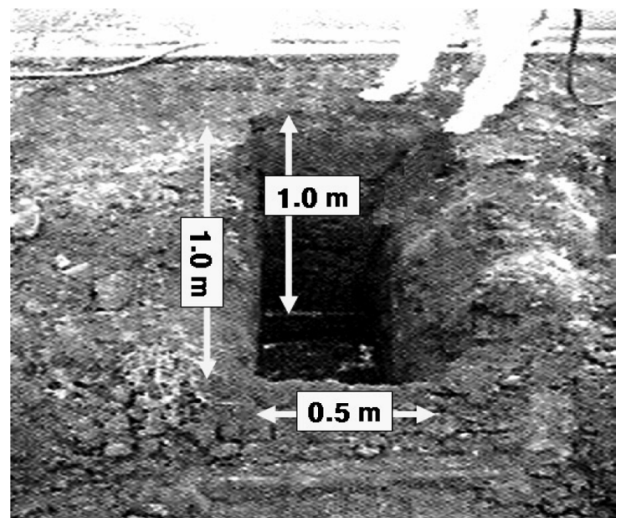


Fig. 2. Underground empty space with W 0.5 m x L 1.0 m x D 1.0 m.

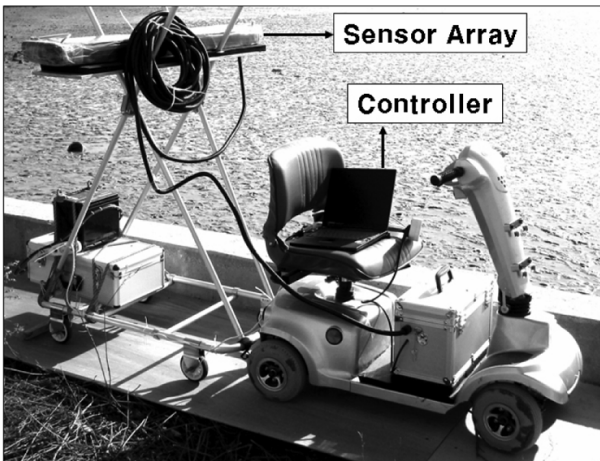


Fig. 3. Motor-driven cart and alignment of 24-linear array-type sensor.

량하여 조사한 결과 터널의 위치는 지하 40~80 m이며, 터널의 폭과 높이는 각각 2 m이다.

자속밀도의 수직성분(Bz)의 분포는 플렉스게이트 센서가 5 cm 간격으로 배열된 24채널 선형 어레이를 사용하여 조사되었는데, 센서의 높이는 0.15 m와 1.15 m로 설정하였다. 이때 센서의 스캔 스피드를 일정하게 유지하기 위하여 Fig. 3과 같은 직류모터로 구동되는 스쿠터 장치를 사용하였는데, 이동 속력은 4 km/h이다.

### III. 결과 및 검토

지표상의 자속밀도분포는 지하의 천부(淺部: 얇은 곳)와 심부(深部: 깊은 곳)에서의 자력과 자기이상에 대한 정보뿐만 아니라, 지표에 존재하는 자력이나 자기이상에 대한 정보도 포함한다. 자력과 자기이상은 그것의 발생 원천(source)으로부터 멀어지면 그 강도가 감소한다. 지표로부터 깊은 곳에 위치한 심부의 자력이나 자기이상이 지표상의 자속밀도분포에 영향을 미치기 위해서는 그것의 규모가 커서 영향을 미치는 범위가 커야 되므로, 심부에서 발생한 큰 규모의 자기이상은 지표에서 검출될 수 있지만, 작은 규모의 자기이상은 지표에서 검출되기 어렵다.

지표면 가까이에 위치한 천부에서 발생한 자력이나 자기이상은 그 규모가 클 때는 심부 자력과 같이 1 m 정도의 높이에서 급격한 변화를 일으키지만, 규모가 작을 경우에는 미치는 영향권이 작기 때문에 1 m 정도의 높이 차이에 의해서도 자력이나 자기이상이 급격하게 감소하거나 소멸하게 될 것이다. 지표에 존재하는 자기이상은 대체로 규모가 작기 때문에 약간의 높이 차이에 의해서도 자기이상의 정도가 급격하게 감소하거나 소멸할 것으로 보인다. 따라서 0.15 m와 1.15 m에

서 조사한 자속밀도분포로부터 심부와 천부 및 지표에서 발생한 자기이상을 구별해낼 수 있을 것으로 보인다.

#### 1. 파쇄대에 의한 자기이상

작은 단층들이 서로 중복되거나 많이 생기면 암석이 잘게 부서진 단층 파쇄대가 형성되는데, 그 폭은 몇 cm에서 수백 m에 이르는 것도 있다. 파쇄대가 있는 곳의 지반은 강도가 약해서 침식과 붕괴가 빠르게 진행되며, 파쇄대 내의 점토가 씻겨 내려가면 지하수의 통로가 되기도 한다. 지하의 깊은 곳에 있는 단층 파쇄대에는 압쇄암(壓碎岩)이, 비교적 얇은 곳에 있는 경우에는 단층점토나 단층각력암이 쉽게 생긴다. 터널과 같은 토목공사를 할 때 단층파쇄대를 따라 물이 나오거나 땅이 붕괴되는 사태가 발생하여 사고의 원인이 되는 경우가 많다.

##### (1) 지표면 가까이에 존재하는 자기이상

Fig. 4는 지표로부터의 측정 높이에 따른 자속밀도의 수직 성분(Bz) 변화를 관찰한 결과이다. 조사 장소는 영남대학교 대운동장 북편인데, 이곳에서 15 m 동쪽에 저수지인 삼천지가 있으며, 삼천지의 둑과 평행한 방향으로 측정하였다. 여기서 총 측정 거리는 16 m이며, Bz,1150과 Bz,150는 센서의 높이가 각각 1.15 m와 0.15 m일 때 측정된 값을 나타낸다. 대체로 지표면 가까이에 위치한 0.15 m에서 측정된 자속밀도가 1.15 m에서 측정된 자속밀도보다 크다. 0.15 m에서 측정된 경우에는 잡음과 같은 성분이 포함되어 있는데, 측정 결과에서 잡음과 같은 성분만을 걸러내어(filtering) 정리하면 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있다. 두 높이에서 측정된 자속밀도의 위치에 따른 변화는 거의 유사하며, 낮은 곳인 0.15 m에서 측정된 것이 1.15 m에서 측정된 것에 비하여 0.6~1.5  $\mu$ T 만큼 크다. Fig. 5에 나타난 자기이상은 측정 높

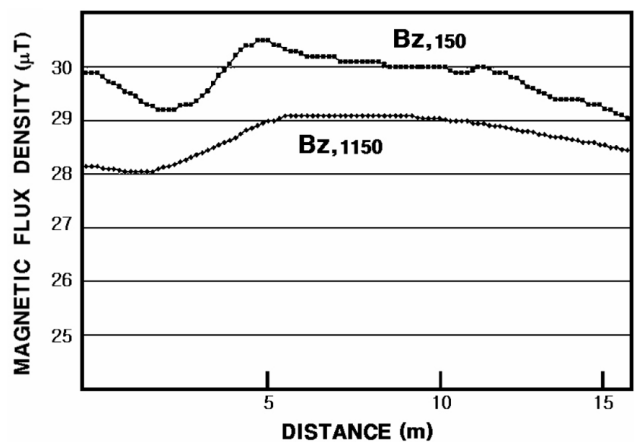


Fig. 4. Variations of as-measured magnetic flux density, measured at the height of 0.15 m and 1.15 m on the ground surface: (a) Bz,150: at 0.15 m and (b) Bz,1150: at 1.15 m.

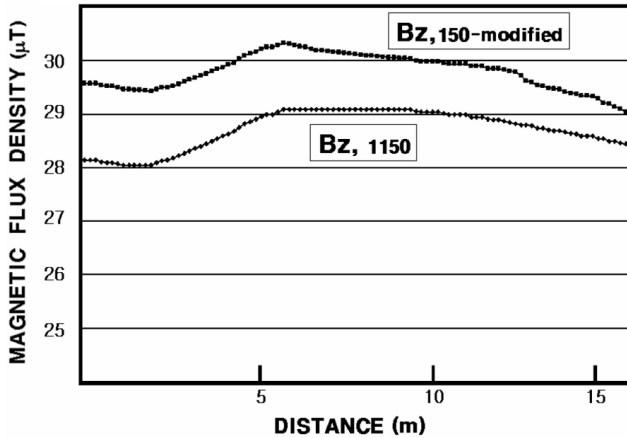


Fig. 5. Variations of magnetic flux density, filtered the noise component from the result of Fig. 4.

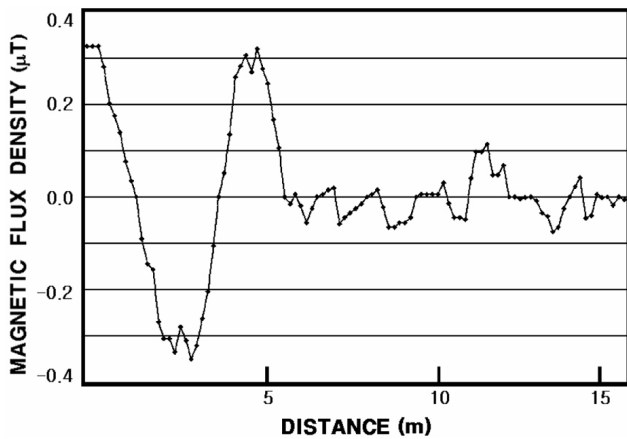


Fig. 6. Variation of noise in Bz, 150 distribution, shown in Fig. 4.

이에 따라 변화 경향은 동일하며, 0.15 m에 비하여 1.15 m에서 강도가 감소하므로 심부나 천부에서 발생한 큰 규모의 자기기상을 나타내는 것으로 보인다.

1.15 m에서 측정된 결과인 Bz,1150에서는 잡음에 해당하는 자기기상이 0.05  $\mu\text{T}$  이하이지만, 0.15 m에서 측정된 결과인 Bz,150에서는 Fig. 6과 같은 자기기상을 얻을 수 있다. Fig. 6이 보여주는 자기기상은 0.15 m에서 관찰되는 것이지만, 1.15 m에서는 거의 사라지므로, 이는 주로 천부와 지표에서 발생한 작은 규모의 자기기상으로 판단된다. 이 그림에 나타난 자기기상의 크기는 최고 0.65  $\mu\text{T}$ 이며, (+)피크(peak)와 (-)피크가 피크쌍(peak pairs)으로 나타나는 것이 특징이다. 강도는 낮지만 비슷한 형태의 피크 쌍이 많이 관찰된다.

(2) 파쇄대에 존재하는 자기기상

Fig. 7은 경북 영천에 위치한 도로 개설지에서 확인한 파쇄대인데, 파쇄대의 폭은 약 3 m이며, 중앙에 위치한 관입한 층과 그 양쪽 경계에는 암이 잘게 부서진 파쇄대가 존재한다.

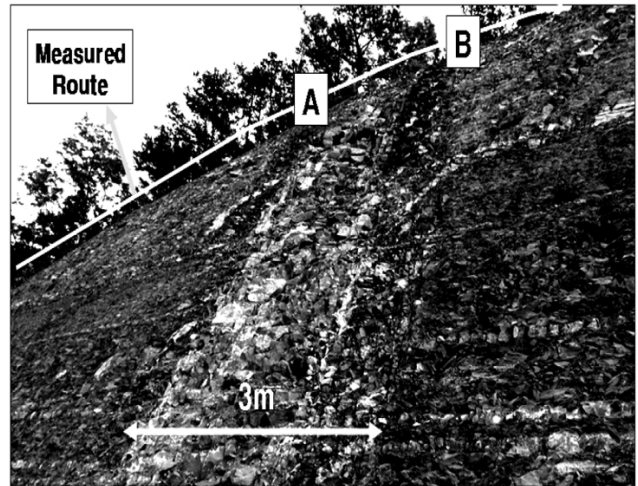


Fig. 7. Fracture zone, located at the roadside in Yeungcheon City.

Fig. 7에 표시된 파쇄대가 위치한 바로 위의 평지에서 지속밀도의 변화를 측정하였는데, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 지면으로부터 1.15 m 높이에서 측정된 자속밀도의 수직성분(Bz,1150)은 위치에 따라 변화 없이 35.3  $\mu\text{T}$ 이었으며, 동시에 측정된 0.15 m에서의 수직성분(Bz,150)의 평균에 비하여 약간 낮은 값을 보인다. Fig. 4에 있는 1.15 m에서 측정된 Bz,1150와 같이 천부에서 발생한 것으로 추측되는 자기기상은 전혀 관찰되지 않는다.

0.15 m에서의 수직성분(Bz,150)은 Bz,1150와는 달리 위치에 따라 많은 변화를 보인다. 0.15 m의 높이에서는 자기기상이 없는 곳에서 약 35.5  $\mu\text{T}$ 의 자속밀도를 보이며, 파쇄대가 있는 곳인 A와 B 사이에서는 최저 32.8  $\mu\text{T}$ 와 최고 37.5  $\mu\text{T}$ 를 보이고, 피크-피크 값(peak-to-peak value)이 4.7  $\mu\text{T}$ 인  $\mp$  피크 쌍( $\mp$  peak pair)이 존재하고 있다. 즉 피크 쌍이 있는 곳에서는 평균값 보다 훨씬 큰 자속밀도가 존재하며, 피크-피크 값이 서로 다른 다수의 피크 쌍이 존재한다.

Bz,150의 결과를 필터링하여 파쇄대에 의한 자기기상만을 나타내면 Fig. 8(b)와 같다. 파쇄대에서 나타나는 피크의 특징은 (+)피크와 (-)피크가 서로 쌍을 이루는 점인데, (+)피크의 최고는 2.0  $\mu\text{T}$ 이며, (-)피크의 최고는 -2.7  $\mu\text{T}$ 로 관찰된다. Fig. 8(b)의 분포는 Fig. 6의 분포와 거의 유사한 경향을 보이는데, Fig. 6에 비하여 Fig. 8(b)의 경우가 피크-피크 값이 훨씬 크다. 피크-피크 값이 큰 이유는 다음과 같이 고려할 수 있다.

첫째, 두 곳의 자기기상의 정도가 거의 같을 경우에는 Fig. 6에 비해 Fig. 8(b)의 자기기상의 원인이 지표면에 훨씬 가까이 존재한다. Fig. 7에서 확인할 수 있는 것처럼 Fig. 8(b)의 자기기상의 원인인 파쇄대가 지표면까지 연결되어 있지만, Fig. 6에서는 확인이 불가능하다. 둘째, 두 곳의 자기기상이

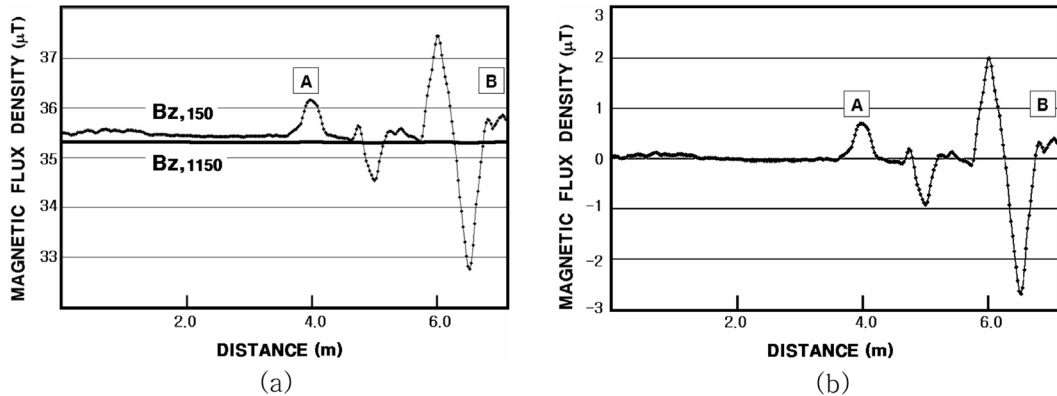


Fig. 8. Distribution of magnetic flux density above the fracture zone of Fig. 7, measured at the height of 0.15 m and 1.15 m on the ground surface: (a) as-measured curve and (b) magnetic anomaly in Bz,150 between point A and B.

다를 경우에는 Fig. 6에 비해 Fig. 8(b)가 훨씬 강한 자기 이상을 일으킨 것에 해당한다. 높이 0.15 m에서 관찰되는 자기 이상이 높이 1.15 m에서는 사라지기 때문에 자기이상의 원인이 지표면이나 지표면 가까이 존재한다는 것은 명확하다. 따라서 Fig. 8(b)의 경우가 Fig. 6의 경우에 비하여 자기 이상이 훨씬 강한 구조적 결함인 것으로 추측된다.

이로부터 지표면까지 발달한 파쇄대에 의한 자기이상은 (+) 피크와 (-) 피크가 서로 쌍을 이루는 형태를 하며, 높이 1.15 m에서는 관찰되지 않는 것으로 판단된다.

2. 지하의 빈 공간에 의한 자기이상

(1) 지하의 빈 공간에 의한 자기이상

일반적으로 지표를 구성하는 화성암은 변성암이나 퇴적암에 비해 자성이 강하며, 그 중에서도 염기성 화성암은 큰 자성을 가지는 경우가 많다. 이들이 풍화하여 이루어진 표토의 자성은 모암의 종류에 따라 차이가 날 수 있으며, 표토의 밀도에 의해서도 차이가 발생할 수 있다. 표토의 상대 투자율은 모암의 종류와 표토의 밀도에 따라 다르지만 대체로 공기의 투자율인 1.0 보다는 크고 2.0 보다 작다[2, 11].

Fig. 2에 나타나 있는 깊이 1 m, 폭 0.5 m인 빈 공간의 바로 위에서 측정된 자속밀도의 수직성분(Bz)의 위치에 따른 변화는 Fig. 9에 나타나 있다. 지표면에서의 자속밀도는 대체로 34.9 μT이었으며, 빈 공간의 중심에서는 약 33.6 μT로 약 1.3 μT의 차이가 발생하였다. 즉, 빈 공간에 의해서 자속밀도는 약 1.3 μT 감소하였다. 자기 분포가 빈 공간의 중심에 대하여 좌우로 대칭을 이루지 않는데, 그 이유는 빈 공간 형태가 기하학적으로 대칭성을 충족하지 않은 점과 표토의 지질이나 형상이 균일하지 않은 것에 기인한 것으로 추측된다. 특이한 점은 빈 공간의 경계에서 급격하게 자속밀도가 변하는 것이 아니라, 빈 공간의 경계를 중심으로 0.3~0.5 m의 폭을 두고 자속밀도가 변한다는 것이다.

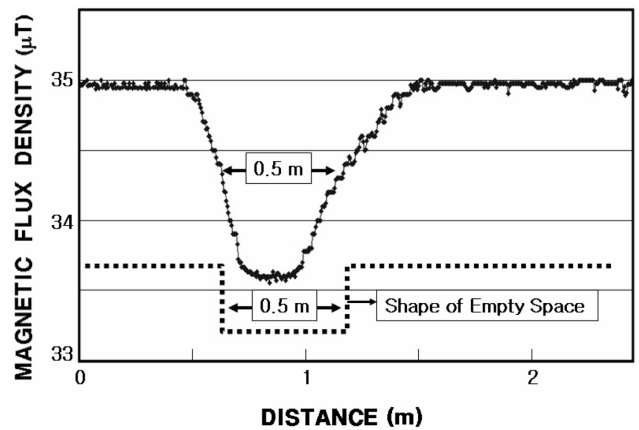


Fig. 9. Flux density distribution for the empty space, shown in Fig. 2.

(2) 지하터널에 의한 자기이상

은산광산의 보고에 의하면 전남 해남군 소재의 은산광산은 중생대 이후의 화산활동으로 형성된 천열수 금광상으로, 퇴적암 속에 금(gold)을 함유하는 석영(quartzite) 맥이 관입하여 존재하는 것으로 알려져 있다[5]. 실제로 금을 채굴하는 갱도 내에는 석영 맥이 관입한 곳에 금맥이 존재하는 것을 확인할 수 있는데, 퇴적암보다 경도가 높은 석영 맥이 관입함에 따라 석영 맥과 그 주위는 Fig. 10에서 확인할 수 있는 바와 같이 대부분 파쇄대로 이루어져 있다. 따라서 은산광산 지하 터널 위에서의 자속밀도 분포에서는 지하의 빈 공간에 의한 자속밀도의 감소와 파쇄대에 의한 피크 쌍이 중첩하여 나타날 수 있다.

Fig. 11은 전남 해남의 은산광산에서 지하 41~85 m에 위치한 지하 터널의 지표에서 측정된 자속밀도의 수직성분 변화를 나타낸 것이다. 0~5도의 지표경사를 가진 해변에서 측정하였는데, 측정센서는 지표면으로부터 0.15 m 높이에 위치하였다. 자속밀도가 가장 큰 곳은 37.3 μT이며, 가장 작은 곳은



Fig. 10. Fracture zone at the inserted quartzite layer of Eunsan gold mine.

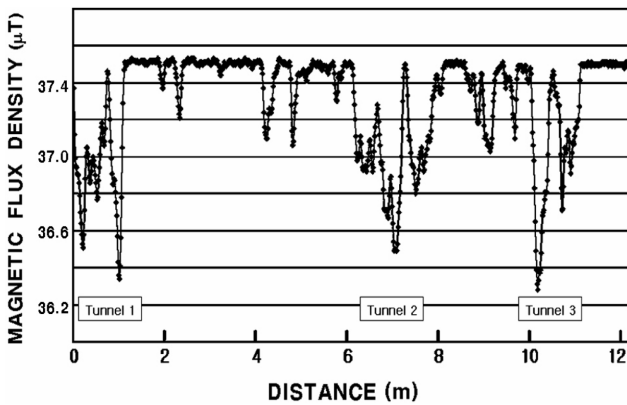


Fig. 11. Distributions of magnetic flux density above the mining tunnels of Eunsan gold mine.

36.1 μT인데, 자기이상이 존재하지 않는 곳에서 가장 큰 값을 보이고, 자기이상이 존재하는 곳에서 가장 작은 값을 보인다.

빈 공간이 지표면 가까이에 존재할 때는 Fig. 9와 같이 빈 공간이 있는 곳에서는 자속밀도가 감소하여 빈 공간의 중앙 부근에서 가장 낮은 자속밀도를 나타낸다. 맥스웰 방정식에 의하면 빈 공간에 의해서 발생한 자기이상의 자속밀도 변이 정도는 이상을 일으키는 빈 공간으로부터 떨어진 거리의 제 제곱에 반비례한다. 깊이 41~85 m에 위치한 폭과 높이가 각각 2 m인 터널에 의해서 자기이상이 실제로 발생하는 가를 확인하기 위해서 Fig. 12에 표시된 터널 1-3이 은산광산에서 토목측량법으로 작성한 광산의 터널임을 확인하였다.

Fig. 12는 은산광산에서 작성한 지하 터널의 분포도이다. 방

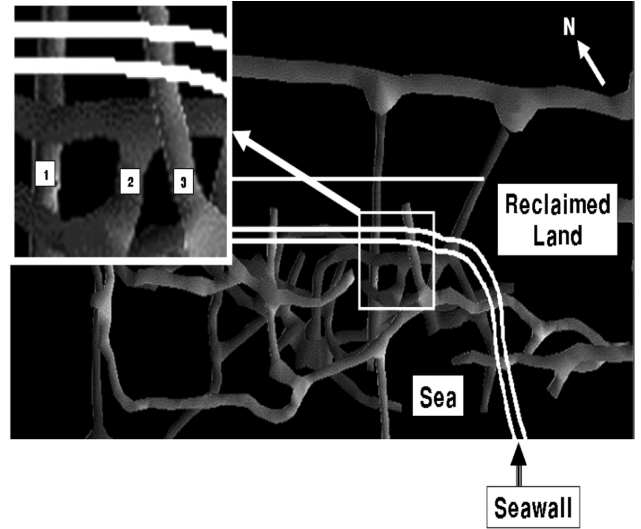


Fig. 12. Distribution of mining tunnels 1-3 at Eunsan gold mine.

파쇄(seawall)가 북서-동남 방향으로 거의 직선 형태로 놓여 있는데, 이것이 남북 방향으로 꺾이기 시작하는 곳의 바닷가(shore)에서 자속밀도 분포를 측정하였다. 이 부분을 확대한 왼쪽의 부분 구조도에서 1-3으로 표시한 곳 위로 측정을 시도하였다. Fig. 12에서 1, 2, 3은 지하의 터널을 의미하는데, 폭과 높이는 각각 2m이며, 위치한 곳은 지하 41~55 m이다. 도면에서 터널 1과 터널 3은 약 10.3 m 떨어져 있으며, 터널 2와 터널 3은 약 3.0 m 정도 떨어져 있다. Fig. 11에서 자속 밀도가 낮은 부분이 터널에 해당한다고 가정할 경우에 터널 1과 터널 3이 떨어진 거리는 약 10.2 m 정도이며, 터널 2와 터널 3은 3.0 m 정도이다. 이로부터 Fig. 11에 나타나 있는 터널 1-3과 Fig. 12에 나타나 있는 터널 1-3은 서로 잘 대응된다고 할 수 있다. 따라서 Fig. 11에 터널 1, 2, 3으로 표시된 곳에서의 자기이상은 실제로 지하 41~55 m에 위치한 터널에 의해서 발생한 것으로 추측된다.

(3) 자기이상의 중첩

전남 해남에 소재한 은산광산의 금 채광용 터널로 확인된 곳에서의 자기이상이 터널의 빈 공간에 의한 자기이상과 파쇄대에 의한 자기이상의 중첩에 의한 것인가를 확인하고자 하였다. Fig. 11에 나타나 있는 1-3 터널 중에서 터널 2의 자속밀도 변화만을 정리하였는데, 그 결과는 Fig. 13과 같다.

Fig. 13(a)는 터널 2에 대한 자속밀도분포인데, 포락선(envelope)을 이용하여 터널의 빈 공간에 의한 자기이상을 추출하면 Fig. 13(b)와 같다. 자속밀도는 중앙에서 가장 낮으며, 가장자리로 갈수록 점차로 증가하는데, 이 결과는 빈 공간에 의한 자기이상 분포를 나타낸 Fig. 9와 거의 같은 형태이다. 빈 공간 중심에서 자속밀도의 감소는 약 0.8 μT인데, 모델 실험에 대한 결과인 Fig. 9의 빈 공간에 의한 자속밀도의 감소

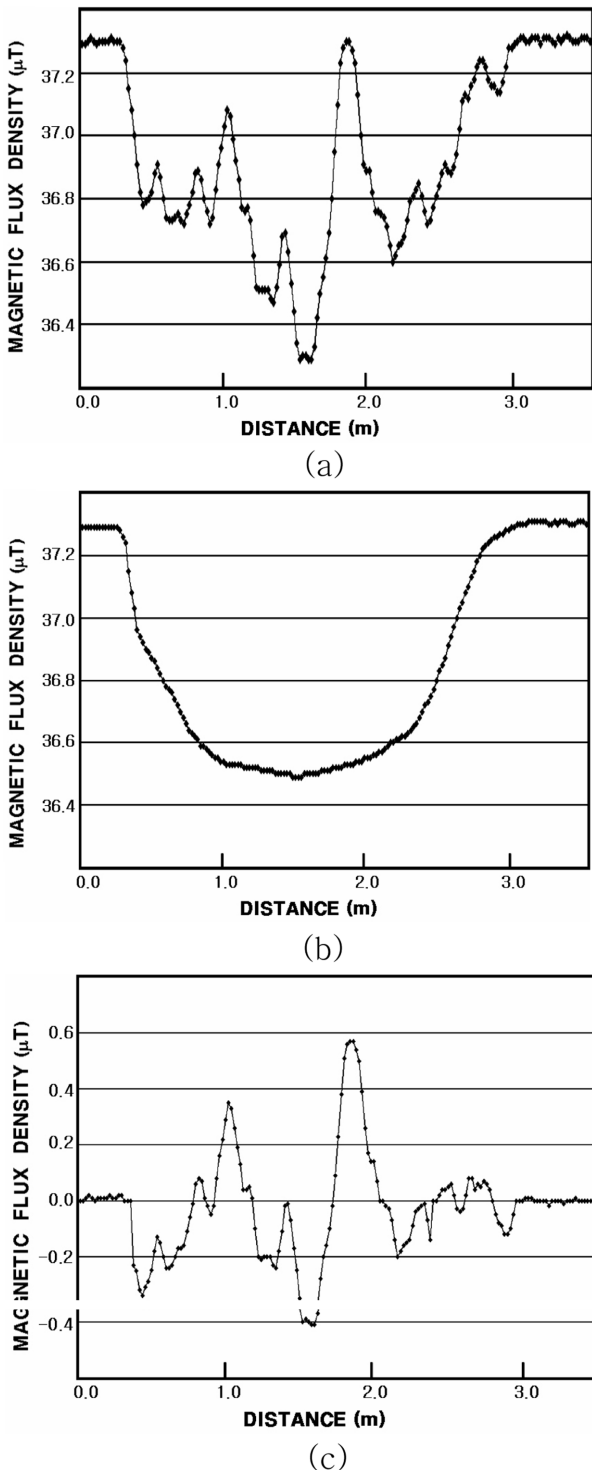


Fig. 13. Distributions of magnetic flux density above the tunnel 2 of Fig. 12: (a) as-measured distribution, (b) envelope distribution, and (c) noise by shallow magnetic anomaly.

인 1.3  $\mu\text{T}$ 보다는 약간 작다. 자속밀도가 감소하는 정도는 빈 공간의 폭과 깊이에 의해 주로 결정되는 공간 규모와 빈 공간으로부터 떨어진 거리, 흙으로 대변되는 매질의 자기적 성

질이나 밀도를 포함한 여러 종류의 물성 등에 의해 결정되므로 이 연구에서의 결과처럼 단순 비교는 용이하지 않을 것으로 판단된다.

터널 위에서의 전체 자속밀도분포 변화인 Fig. 13(a)와 터널의 빈 공간에 의한 자속밀도분포변화에 해당하는 Fig. 13(b) 간의 차이를 구하면 Fig. 13(c)의 결과가 나타나는데, 이는 빈 공간을 제외한 다른 종류의 원인에 의해서 발생한 자기이상을 나타내는 것으로 생각할 수 있다. (+)피크와 (-) 피크가 대칭에 가까운 형태를 이루어 (+)피크의 합과 (-)피크의 합이 서로 상쇄될 것으로 보이는데, 이것은 측정지역에 철 (iron or steel)과 같은 강자성(ferromagnetism)을 나타내는 물체가 존재하지 않음을 의미한다. (+)피크와 (-)피크가 쌍을 이루거나 번갈아 나타나는데, 이는 Fig. 8에 나타나 있는 파쇄대에 대한 결과와 거의 유사하며, 실제로 Fig. 10과 같은 파쇄대가 터널 내부에 발견되었다.

이상의 결과로부터 터널 위에서의 자속밀도분포에 나타난 자기이상은 터널의 빈 공간에 의한 자기이상과 파쇄대에 의한 것으로 추측되는 자기이상들의 중첩에 의한 것으로 판단된다.

(4) 터널의 심도에 따른 자기이상의 변화

공기의 투자율 1.0은 흙이나 암(rocks)의 투자율 1.0~2.0에 비하여 약간 작기 때문에, 빈 공간의 규모가 큰 지하에 위치한 터널에 의한 감자효과(demagnetization effect)는 빈 공간의 규모가 작은 것에 비하여 약간 크다. 지하에 위치한 터널에 의해 발생하는 자기이상은 터널의 규모가 클수록 그 강도가 크게 되고, 터널로부터 멀리 떨어질수록 그 강도는 감소하게 되므로, 이를 이용하면 지하에 존재하는 터널의 확인은 물론 터널이 위치하는 개략적인 깊이도 확인할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 14는 은산광산에 있는 폭과 높이가 각각 2 m인 터널 위에서 조사한 자속밀도의 변화를 조사한 것인데, 터널의 심도가 각각 -45 m, -60 m, -72 m일 때 지표면 위 0.15 m에서 조사한 자속밀도의 수직성분 변화이다. Fig. 14(a)는 -45 m에 위치한 터널에 대한 결과인데, 지표에서의 평균 자속밀도는 대체로 35  $\mu\text{T}$ 이며, 터널 주위에는 0.2  $\mu\text{T}$  정도의 천부의 원인에 의한 자기이상이 분포하고 있다. -60 m와 -72 m에 대한 결과인 Fig. 14(b)와 Fig. 14(c)에서는 평균 자속밀도 35  $\mu\text{T}$ 과 파쇄대에 의한 0.3  $\mu\text{T}$  정도의 자기이상을 확인할 수 있다. 대체로 조사된 터널이 있는 곳의 지표에서의 평균 자속밀도는 35  $\mu\text{T}$ 이며, 파쇄대나 천부의 원인에 의한 자기이상은 0.2~0.3  $\mu\text{T}$ 로 나타났는데, 이들은 터널의 깊이변화와는 아무런 관계가 없는 것으로 보인다.

자속밀도가 터널에 의해서 감소하는 정도와 자속밀도가 감소하여 피크를 나타낼 때의 밴드폭(bandwidth)을 조사하였는

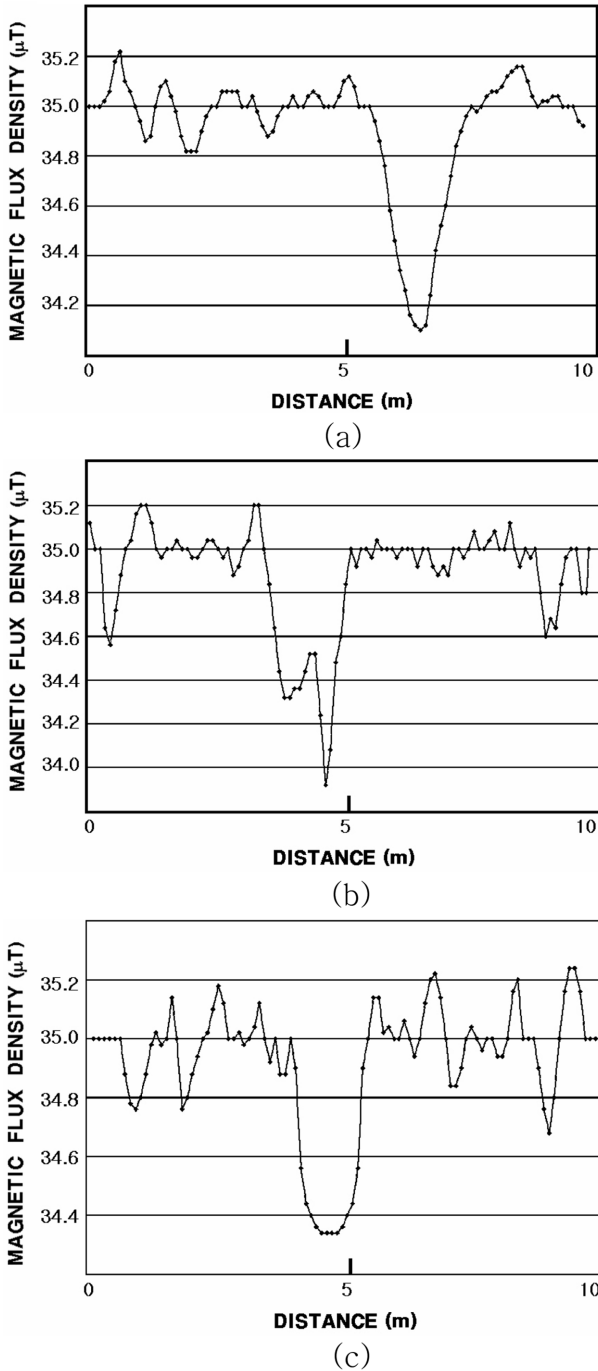


Fig. 14. Distributions of magnetic flux density above the tunnels, located at (a) -45 m, (b) -60 m and (c) -72 m.

데, 그 결과는 Table I과 같다. 터널의 심도가 지하 45~72 m 일 때, 터널의 빈 공간에 의한 자속밀도의 감소는 0.65~0.85  $\mu\text{T}$ 인데, 터널의 심도가 깊을수록 자속밀도의 감소 정도는 줄어들었다. 밴드폭은 1.1~1.3m로 터널의 심도에 따라 큰 변화 없이 거의 같은 것으로 판단된다.

따라서 터널의 빈 공간에 의하여 자기기상이 발생할 때 터

Table I. Variations of Bz decrease and bandwidth depending on the depth of tunnel location.

Tunnel number	Depth (m)	Bz decrease ( $\mu\text{T}$ )	Bandwidth (m)
1	-45	0.85	1.2
2	-60	0.70	1.3
3	-72	0.65	1.1

널의 심도는 자속밀도의 감소정도에만 영향을 미치며, 터널의 심도가 깊을수록 자속밀도의 감소정도가 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이 현상을 이용하면 지하에 존재하는 터널과 같은 빈 공간의 존재와 규모에 대한 확인이 가능하며, 동일 지역에서 지질 구성성분과 구조가 같거나 유사할 때는 상대 심도를 확인할 수 있을 것으로 추측된다.

#### IV. 결 론

지하에 존재하는 파쇄대와 빈 공간 및 터널이 지상에서의 자속밀도분포에 미치는 영향과 심도에 따른 자기기상의 변화를 조사하였다. 지하에 존재하는 파쇄대는 지상의 자속밀도분포에 (+)피크와 (-)피크로 이루어진 피크 쌍(peak pairs) 형태의 자기기상을 나타내는데, 이러한 자기기상은 지상으로부터 1.15 m의 높이에서는 그 강도가 현저하게 감소한다. 터널과 같은 지하의 빈 공간에 의하여 자속밀도가 감소하는 자기기상이 발생하며, 지하공간의 심도가 깊을수록 자속밀도의 감소 정도가 줄어든다. 지상에서의 자속밀도분포는 천부와 심부에 존재하는 자기기상이 서로 중첩되어 나타난다. 이 현상을 이용하면 지하에 존재하는 터널과 같은 빈 공간의 존재와 규모에 대한 확인이 가능하며, 동일지역에서 지질 구성성분과 구조가 같거나 유사할 때는 상대 심도를 확인할 수 있을 것으로 추측된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2008년 교육과학기술부 지정 정책중점연구소 지원 사업에 의해 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] 손호웅, 지반환경물리탐사, 시그마프레스, 서울 (2000) 259.
- [2] G. Backus, R. Parker, and C. Constable, Foundations of Geomagnetism, Cambridge Univ. Press, New York (2005) 211.
- [3] B. D. Cullity and C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, John Wiley and Sons, London (2008) 110.
- [4] P. Ripka, Magnetic sensors and magnetometers, Artech House, Boston (2000) 134.



- [5] 이인우, 한국광물학회지 **15**, 205 (2002).  
[6] D. K. Butler, J. Appl. Geophys. **54**, 111 (2003).  
[7] M. N. Nabighian and R. O. Hansen, Geophys. **66**, 1805 (2001).  
[8] A. B. Reid, J. M. Allsop, H. Granser, A. J. Milleti, and I. W. Somerton, Geophys **55**, 80 (1990).  
[9] A. Selem, T. Hamada, J. K. Asahina, and K. Ushijima, Geophys. **136**, 97 (2005).  
[10] D. K. Butler, Leading Edge **20**, 890 (2001).  
[11] 이문호, 한국자기학회지 **19**, 67 (2009).  
[12] 최근하, 한국자기학회지 **5**, 304 (1995).

## Geomagnetic Anomalies by Underground Fracture Zones and Vacant Spaces

Moon-Ho Lee\*

*School of Materials Engineering, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea*

(Received 25 February 2010, Received in final form 20 April 2010, Accepted 20 April 2010)

The changes of magnetic flux density distribution and the degree of magnetic anomaly on the ground surface by underground fracture zones and empty spaces had been investigated through the variations of the measuring heights. The magnetic flux density distributions were monitored for the ground surfaces of fracture zones, empty spaces and tunnels by fluxgate-type magnetometer. The fracture zones showed the magnetic anomaly with (+) and (-) peak-pairs in the magnetic flux distribution measured at 0.15 m height from the ground surface, and this anomaly disappeared at the height of 1.15 m. The underground empty spaces and tunnels showed the decrease of magnetic flux densities, where the degree of this density decrease diminished with the increase of the underground depth. And, the existence and size of underground empty spaces, such as tunnels and sink holes, could be monitored by the phenomena of this decreasing flux density.

**Keywords** : fracture zone, underground empty space, geomagnetism, geomagnetic flux density distribution, underground depth, tunnel, geomagnetic survey