

전기비저항 영상법에 의한 거제도의 지반조사

박삼규* · 김희준**

Applicability of Resistivity Image Profiling to Geologic Survey in the Keoje-do Area

Sam Gyu Park* and Hee Joon Kim**

ABSTRACT : Resistivity Image Profiling has been applied to a geological survey in the Keoje-do area. Survey lines are located near the KD-02 and KD-06 wells in the area, where we have already sampled all rock cores and carried out several kinds of geophysical logs. In each site a resistivity cross-section is obtained by inverting pole-pole apparent resistivities. Comparing the reconstructed resistivity section with the rock cores and logging data obtained in the well provides a detailed picture of subsurface geology. The geology of KD-02 site is composed of conglomerate, sandstone and shale with fractures. The reconstructed resistivity image is useful for assessing the grade of weathering of these rocks. The KD-06 site is mainly underlain by granitic rocks, and its fresh basement can be delineated by resistivities over 1000 $\Omega \cdot m$.

서 언

토목공사를 위한 사전 지질조사로서는 일반적으로 지표지질 탐사, 탄성파탐사 굴절법, 시추조사 등이 채용되지만, 복잡한 지질구조나 지하수의 파악에는 충분치 않은 경우가 많다. 특히 탄성파탐사는 주로 지반의 평균적인 탄성파속도를 구하는 것으로서, 고속도층의 아래에 저속도층이 분포할 경우에는 저속도층에 대한 해석이 대단히 어려워지는 결점도 가지고 있다. 최근에 소개된 전기비저항 영상법(Shima, 1992)은 종래의 수직전기탐사와 수평전기탐사를 동시에 실시할 수 있기 때문에 대량의 데이터를 신속하게 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 수치해석에 의해 2차원의 전기비저항구조를 재구성하는 기법이 도입되어 있어서, 토목지질조사 분야에서 그 적용범위를 급속히 확대하고 있다(Ichikawa and Inazaki, 1994). 전기비저항은 지반의 공극률, 물의 포화도, 공극수의 전기비저항, 점토함유량 등에 민감하기 때문에 탄성파탐사로서는 파악하지 못한 복잡한 지질구조나 지하수의 파악에 특히 유용하다(Matsui, 1993).

국내에서도 2차원 전기비저항구조를 역산(inversion)으로 구하는 기법은 많이 사용되고 있다(e.g., 김정호, 1987; Kim and Kim, 1988). 이때 탐사는 대부분 쌍극자(dipole-dipole)배열로 실시되며, 지하수조사를 목적으로 하는 경우가 많다. 이들 방법과

전기비저항 영상법 사이에는 근본적인 차이는 없지만, 영상법은 2극(pole-pole) 배열을 사용하며 측정 각 단계에서 자동화가 대폭 실현되어 신속·정확해진 점이 특징이라 할 수 있다. 뿐만 아니라 영상법은 데이터해석에서 역산기술을 적극적으로 활용하므로써 전기비저항구조의 영상화 가시화(visualize)에 역점을 두고 있다고 할 수 있다.

필자들은 이미 거제도 기초 지질조사의 일환으로 6곳에서 시추 및 물리검층을 실시한 바 있다(박·김, 1994). 이들 중 중생대 백악기의 퇴적암과 화강암이 분포하는 2곳의 자세한 지질구조를 파악하기 위하여 전기비저항 영상법을 실시하였다. 본 논문에서는 전기탐사로부터 얻어진 전기비저항 단면도에 기존의 코어 및 물리검층 데이터, 지질탐사에 의한 정보를 첨가하여 상세한 지질구조를 해석하고, 아울러 전기비저항으로 지반등급을 구분한 예에 대하여 보고한다.

지질개요

거제도 일대의 지질은 크게 나누어, 경상누층군의 퇴적암층과 안산암류, 이들을 관입한 중생내지 산성의 불국사 심성암류와 각종 맥암류, 그리고 산록과 계곡의 저지를 따라 발달한 제 4기의 퇴적암층의 3종류로 나눌 수 있다(박·김, 1994). 탐사대상지는 Fig. 1에 표시한 바와 같이 거제도를 남북방향으로 가로지르는 6곳의 시추공중에서 KD-02와 KD-06의 두곳이다. KD-02와 KD-06 주위의 지질은 Fig. 2와 같다.

KD-02공은 신현읍 수월리에 위치하며, 주위는 경상누층군의

*오사카대학 토목공학과 (Dept. of Civil Engineering, Osaka Univ., Osaka 565, Japan)

**부산수산대학교 응용지질학과 (Dept. of Applied Geology, National Fisheries Univ. of Pusan, Pusan 608-737, Korea)

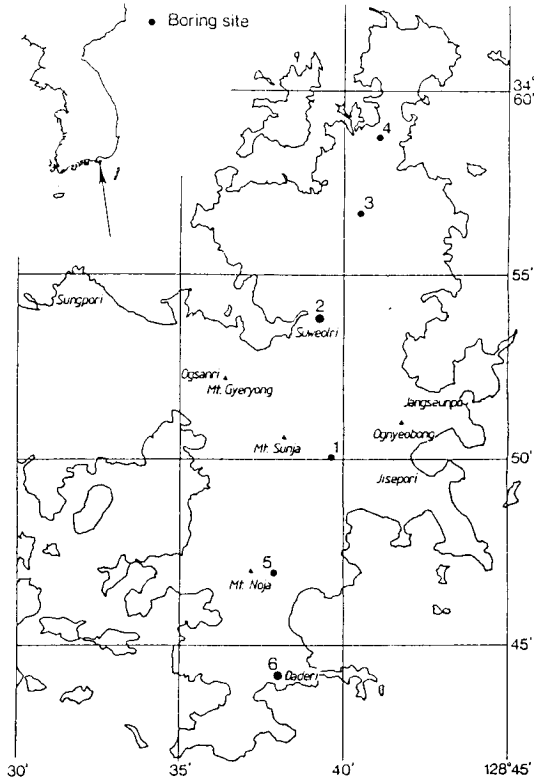


Fig. 1. Map of the Keoje-do showing the position of boreholes. See Fig. 2 for detailed geological maps of the study area.

수월리층에 해당되는 지역으로 지질은 전반적으로 적색 또는 녹회색의 응회질사암과 셰일 및 이에 협재되어 있는 화산쇄설성 기원의 역암등으로 구성되어 있다. KD-06공은 남부면 다대리에 위치하며, 주위는 거제도 해안을 따라 넓게 분포된 백악기의 저 반상의 화강암과 그위에 퇴적되어 있는 제4기의 충적층으로 구성되어 있다. 화강암은 주위의 퇴적암 및 안산암을 관입해 있으며 중·조립질의 흑운모화강암, 각섬석 화강암 및 화강섬록암등이 주 구성암종이고 미문상 또는 반상화강암, 우백질 또는 애플라이트질 화강암등을 수반한다.

전기비저항 영상법

전기비저항 영상법은 종래의 수직탐사와 수평탐사를 동시에 실시하는 것으로 탐사축선 아래의 해석대상 단면내의 전기비저항분포를 구한다. 이 탐사법의 특징은 지하구조의 복잡한 변화, 즉 암질 및 지하의 특징적인 구조의 형상이나 그 연속성을 2차원 단면으로 포착할 수 있다는 점이다.

본 연구에 사용된 전기탐사기기는 McOHM-21 (OYO사 제품)이며, 측정방법은 Fig. 3에 표시한 바와 같다. 즉 축선을 따라

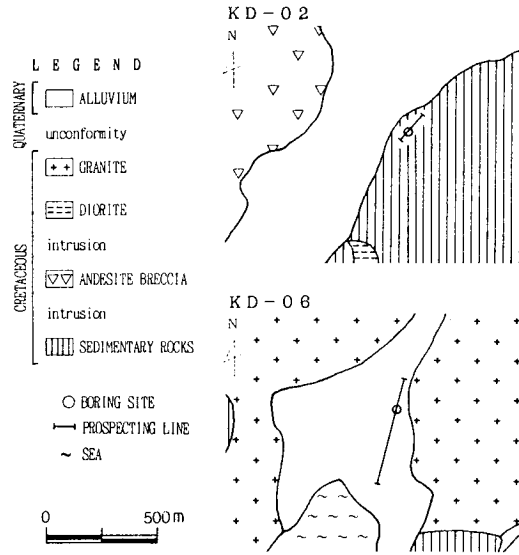


Fig. 2. Geological maps around the boreholes of KD-02 and KD-06.

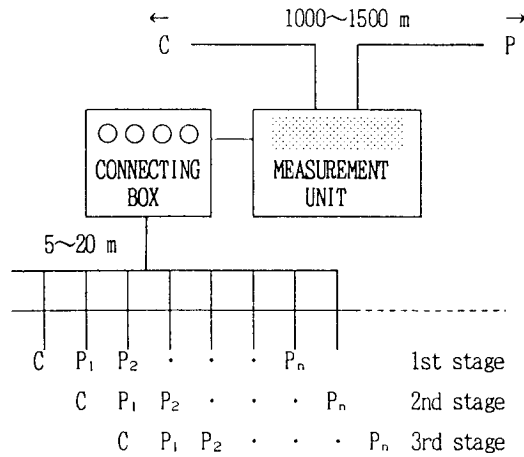


Fig. 3. Field observation system of Resistivity Image Profiling.

다수의 전극을 일정간격으로 설치하고 이들의 전극을 접속케이블을 이용하여 측정본부의 코넥터박스 (connector box)에 접속한다. 측정에서는 2개의 전극이 선택되는 2극법 전극배열을 사용한다. 또 이들과는 따로 축선으로 부터 멀리 떨어진 지점 (최대전위 측정간격의 10~20배)에 두개의 원전극을 설치한다. 전위의 측정은 전류전극 (C)을 고정하고 일정간격마다의 전위변화를 전위전극 (P_1, P_2, \dots, P_n)으로 측정한다. 다음으로 코넥터박스상의 전류전극을 이동하여 앞에서 행한 측정방법을 반복한다.

본 탐사에서는 축선이 시추공상을 통과하도록 하였다 (Fig. 2

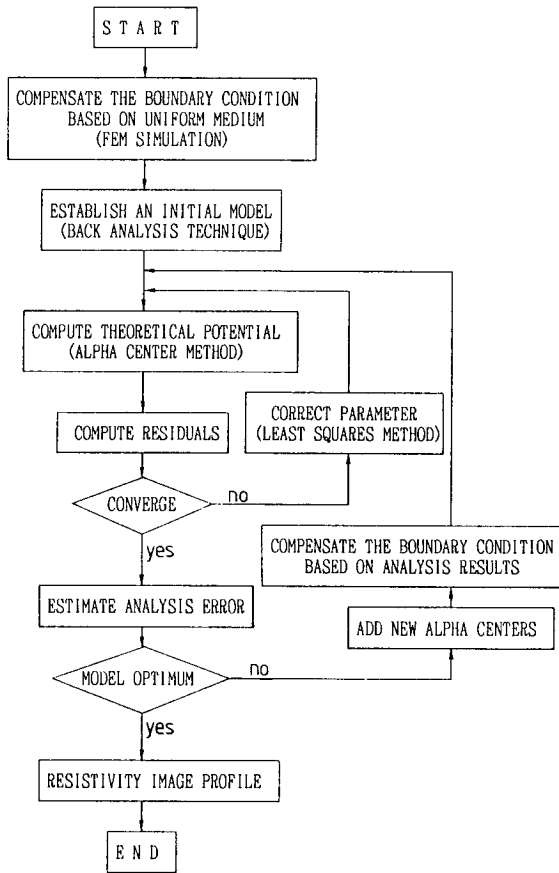


Fig. 4. Flow chart of the analysis of Resistivity Image Profiling.

참조). KD-02 탐사의 경우 측선을 거의 평탄한 절토면위에 전개하였으며, 전극간격은 4 m, C와 PN의 최대 전극간격은 64 m로

하였다. 또 KD-06의 경우는 측선을 충적층의 계단식 논위에 전개하였으며, 전극간격은 5 m, 최대 전극간격은 150 m로 하였다.

야외에서 측정된 결과의 해석에는 알파센터(α -center)법 (Sakayama *et al.*, 1986)에 의한 자동해석법을 이용하였다. 자동해석법은 Fig. 4에 표시한 바와 같이 먼저 지형의 영향을 보정한 겉보기비저항 가상단면도 (pseudosection)로부터 지하구조의 초기모델을 작성한다. 이 모델구조로부터 출발하여 이론적으로 계산되는 겉보기비저항이 측정치에 가장 근접되게 지하의 전기비저항분포를 최소자승법으로 결정한다.

탐사결과

야외에서 전기탐사로부터 얻은 겉보기 비저항을 역산으로 해석한 전기비저항 분포도에 기존의 코아 및 물리검층자료, 지질 탐사등에 의한 정보를 첨가하여 지질구조를 해석하고, 전기비저항에 따라 지반등급을 나누었다.

KD-02 지역

본 탐사지역은 앞에서 서술한 바와 같이 역암, 사암 및 셰일의 호층으로 구성되어 있으며 측선은 산지개간을 위해 절토한 평탄한 면 위에 전개되어 있다. 이곳은 시추당시부터 용수량이 많았고 현재도 시추공에 자분정이 형성되어 있으며, 또 측선에서 NE방향으로 약 15 m 떨어진 곳에 3차수의 하천이 형성되어 있는 점을 고려할 때 지표부근을 제외하고는 거의 지하수로 포화된 상태일 것으로 생각된다.

Fig. 5는 KD-02 지역의 전기비저항 단면도를 나타낸 것으로 전기비저항이 대체로 100~2000 $\Omega \cdot m$ 의 범위에 있다. 거리점 0~60 m의 지표부근은 200 $\Omega \cdot m$ 이하의 낮은 전기비저항이 분

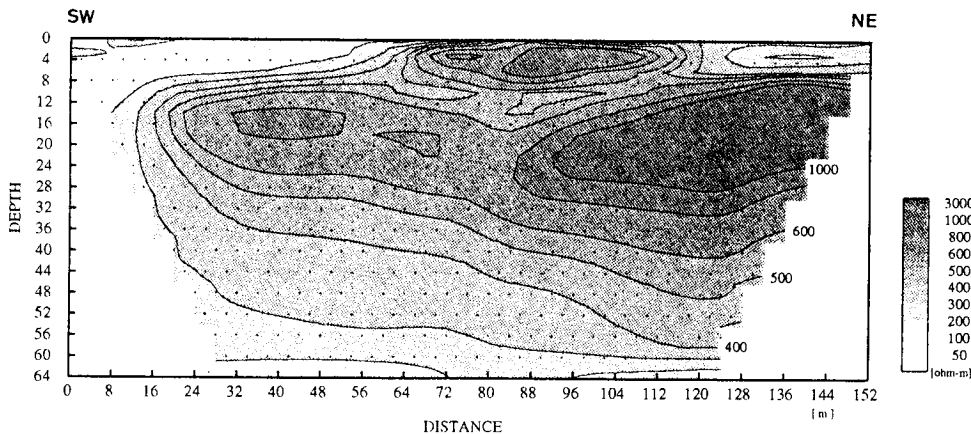


Fig. 5. Resistivity cross section along the KD-02 line reconstructed by inversion analysis.

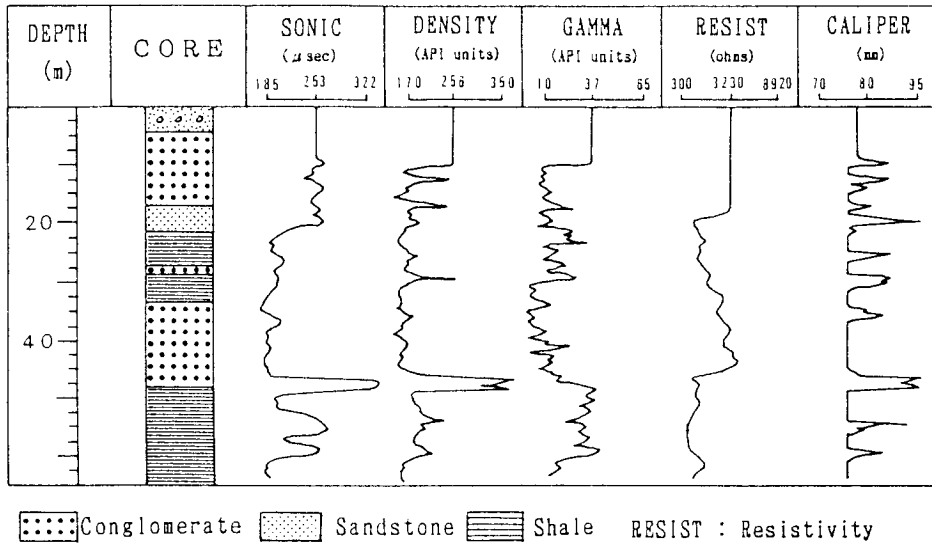


Fig. 6. Core and well logging data in the KD-02 borehole.

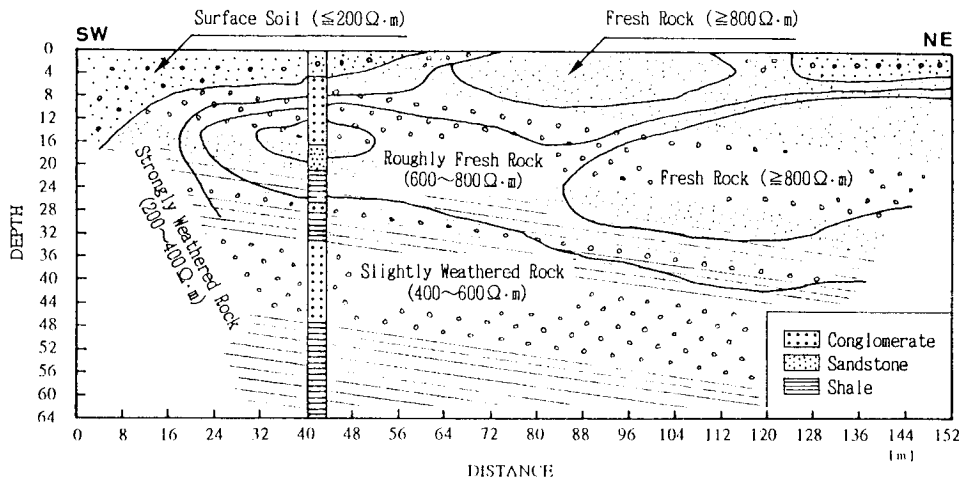


Fig. 7. Interpreted cross-section along the KD-02 line derived from resistivity measurements and drilling data.

포하고, 거리점 70~112 m의 지표부근과 깊이 10~32 m 사이에 거의 $800 \Omega \cdot m$ 이상의 높은 전기비저항이 분포한다. 깊이 32 m 이하의 전기비저항 분포는 상부에서 하부로 갈수록 점차적으로 전기비저항치가 낮아지고 있다. 그리고 전체적인 전기비저항 등치선이 우측의 고전기비저항 분포대를 제외하고는 NE 방향으로 기울어져 있는데 이는 지질답사에 의해 확인된 지층의 경사각 (8° NE)과 거의 일치한다.

한편 본 지역의 지표에서 65 m까지의 코아관찰 및 물리검층 결과는 Fig. 6과 같다. 코아 관찰에 의하면 지표에서 깊이 9.3 m까지는 표토층이고, 깊이 9.3~65 m까지는 역암, 사암 및 셰일의

호층으로 구성되어 있다. 공경검층은 시추공의 내경을 측정하는 것으로, 파쇄대 및 절리가 발달한 부분은 시추중에 암석의 일부가 떨어져 나와 시추공의 내경이 넓어지기 때문에 이러한 부분은 공경검층자료에서 쉽게 인지할 수 있다. 공경검층자료에 의하면 깊이 9.3~65 m까지 파쇄대가 발달되어 있으며, 특히 셰일층은 파쇄정도가 더욱 심하다. 이러한 파쇄의 영향으로 속도 및 밀도 검층 자료도 대체로 속도가 느리고 밀도가 낮게 표시되었으며 전기비저항 검층자료는 43 m 이하의 셰일층 구간에서 전기비저항이 낮다.

이상의 결과를 종합한 지질해석도를 Fig. 7에 나타낸다. 측선

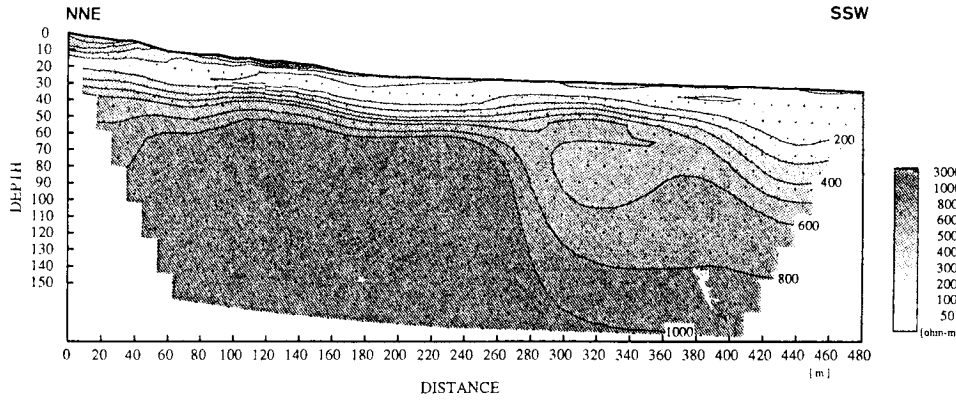


Fig. 8. Resistivity cross section along the KD-06 line reconstructed by inversion analysis.

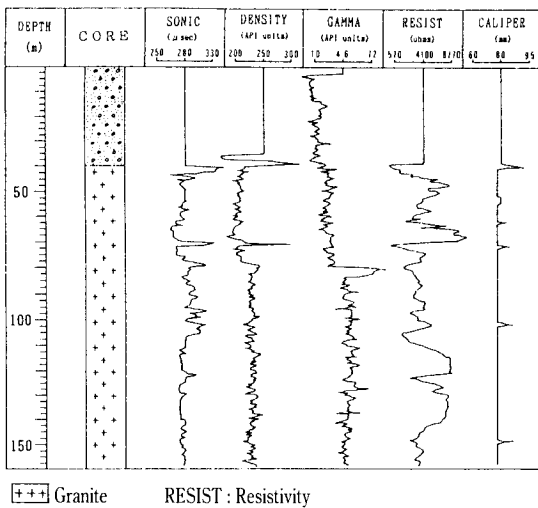


Fig. 9. Core and well logging data in the KD-06 borehole.

북동측에 신선한 암석이 분포하며 대체로 남서측으로 갈수록 풍화의 정도가 심하다. 표토층은 전기비저항이 200 Ω·m 이하로 수 cm의 각력을 포함한 로움(loam)으로 구성된다. 풍화암석은 풍화의 정도에 따라 강풍화암석과 약풍화암석으로 구분하였다. 강풍화암석은 전기비저항이 200~400 Ω·m의 범위로 표토층과 인접되어 있어 현저하게 풍화작용을 받아 변질이 많이 진행된 부분이다. 약풍화암석은 전기비저항이 400~600 Ω·m의 범위로 비록 변질정도는 낮지만, 균열이 발달되어 있는 상태이다. 비교적 신선한 암석은 전기비저항이 600~800 Ω·m의 범위로 거의 변질되지는 않았으나 균열이 층리면을 따라 발달되어 있을 것으로 생각된다. 지표근처와 중앙우측에 분포하는 신선한 암석은 전기비저항이 800 Ω·m 이상으로 지표근처에 분포하는 암석은 절토에 의해 들어난 노두로 층리면에 수직으로 약간의 절리가 관찰될 뿐 전체적으로는 신선하다.

KD-06 지역

본 지역은 거제도 해안을 따라 넓게 분포된 저반상의 화강암 지대로 측선은 계단식 논 위에 전개되어 있다. 시추 당시 지하수의 유출은 거의 없었으며, 탐사지역 주위의 지형과 수계를 고려할 때 지하수가 발달되어 있지 않을 것으로 생각된다. 측선 주위에 있는 여러곳의 마사토 노두에 대한 전기비저항을 측정할 결과 전기비저항이 400~600 Ω·m의 범위이었다.

탐사결과는 Fig. 8에 표시한 바와 같이 전기비저항이 100~2500 Ω·m의 범위에 분포하고 있다. 대체로 거리점 270m를 경계로 북측의 고전기비저항대와 남측의 저전기비저항대로 나눌 수 있다. 북측은 지표면 근처 깊이 15m 까지에 분포하는 300~800 Ω·m의 전기비저항대를 제외하면, 상부의 전기비저항이 100 Ω·m에서 하부의 전기비저항이 2500 Ω·m까지 급격히 높아진다. 남측은 전기비저항이 1000 Ω·m 이하의 저전기비저항대를 형성하며 심부로 가면서 서서히 깊이 높아지며 등치선의 간격도 넓다.

한편 본 지역 지표에서 160m까지의 코아관찰 및 물리검층 결과는 Fig. 9와 같다. 코아관찰에 의하면, 지표에서 깊이 39.5m까지는 표토층 및 풍화층, 39.5~80m 사이는 화강반암, 그 이하는 대체로 신선한 화강암으로 구성되어 있다. 또 깊이 85~110m의 구간에서는 RQD가 70이하이며 균열이 부분적으로 발달되어 있다. 공경검층 자료에 의하면, 깊이 39.5~72m 사이와 그 하부의 두곳에 파쇄가 형성되어 있을 뿐 그 외는 신선한 암석으로 보인다. 속도 및 밀도검층 자료에 의하면 일부 파쇄가 나타나는 곳에서 속도가 느리고 밀도가 낮게 표시되어 있으나 전체적으로는 큰 변화가 보이지 않는다. 그러나 전기비저항 검층자료는 큰 폭으로 변화하고 있으며, 깊이 85~110m 구간에서는 낮은 전기비저항이 나타난다. 이곳은 앞에서 말한 RQD가 70이하의 구간과 일치한다. 자연 γ선 강도에 의하면, 표토층,

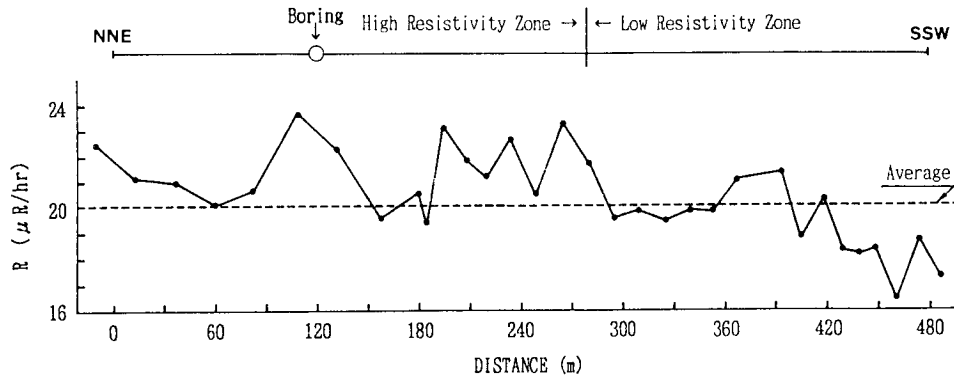


Fig. 10. γ -ray intensity along the KD-06 line.

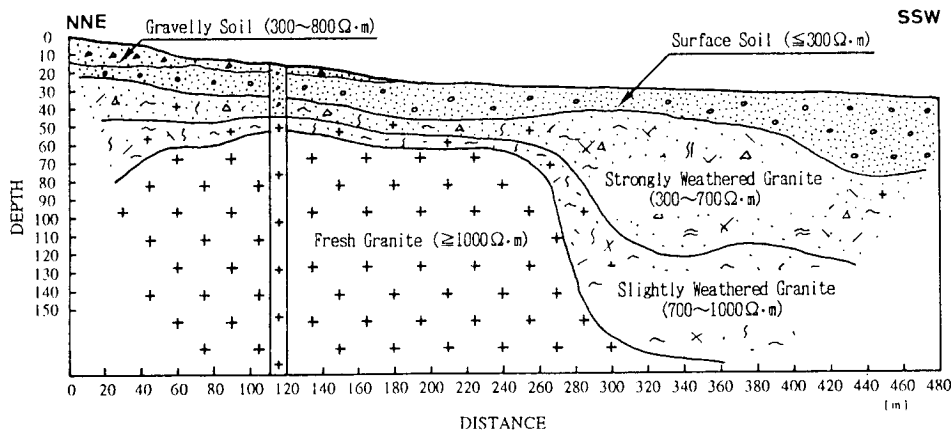


Fig. 11. Interpreted cross-section along the KD-06 line derived from resistivity measurements and drilling data.

깊이 39.5~80 m 및 깊이 80 m 이하의 3구간으로 나눌 수 있다. 깊이 80 m를 경계로 상·하부의 자연 γ 선강도 차이는 앞에서 말한 바와 같이 화강반암과 화강암의 암석차이에 의한 것으로 생각된다.

전기비저항 탐사결과에 의하면, 거리점 270 m를 경계로 북측과 남측의 전기비저항 분포가 크게 다르다 (Fig. 8). 이러한 차이가 단층구조에 기인한 것인지의 여부를 파악하기 위하여 전기탐사 측선을 따라 자연방사능 탐사를 추가 실시하였다. 측정방법은 전계수법 (SSM 측정)을 사용하였으며, 측정결과를 Fig. 10에 나타내었다. 자연방사능 탐사결과도 전기비저항의 분포와 같이 거리점 270 m를 경계로 남측의 γ 선강도가 북측에 비하여 상대적으로 낮게 나타났지만, 측선전체의 γ 선강도 분포로 볼 때 단층파쇄대의 존재를 예상하게 할만한 증거는 없다. 조사지역 주위의 수계와 지형 및 지질분포를 고려하면, 단층구조를 상정할 수 없다. 따라서 표토층과 기반암 사이에 존재하는 풍화층이 측선의 남측에서 두꺼워지는데 기인하는 현상으로 생각된다.

이상의 결과를 종합한 지질해석도를 Fig. 11에 나타내었다. 깊이 0~15 m 사이에 역질토가 분포하고, 상부로부터 표토층,

강풍화화강암, 약풍화화강암 그리고 기반암인 신선한 화강암으로 구분된다. 역질토는 표토층의 상부에 분포하며 전기비저항이 300~800 $\Omega \cdot m$ 의 범위로 전석을 포함하는 충적층이다. 전석은 대부분 각력으로서 크기는 수~수십 cm로 다양하다. 표토층은 전기비저항이 300 $\Omega \cdot m$ 이하로 수 cm의 각력을 포함하는 로옴으로 구성된다. 또 표토층의 두께는 25~48 m의 범위를 보이며 SSW 방향으로 갈수록 두꺼워진다. 강풍화화강암은 표토층과 인접해 있어 현저하게 풍화작용을 받아 마사토로 변질된 부분으로서 전기비저항이 300~700 $\Omega \cdot m$ 의 범위이다. 그 근거는 측선 주위의 마사토 노두의 전기비저항이 400~600 $\Omega \cdot m$ 라는 사실에 있다. 약풍화화강암은 전기비저항이 700~1000 $\Omega \cdot m$ 의 범위로 변질도는 낮지만 균열은 발달되어 있는 것으로 생각된다. 전기비저항이 1000 $\Omega \cdot m$ 이상의 부분은 신선한 화강암인 기반암으로 생각된다.

결론

본 연구는 이미 거제도 지질조사의 일환으로 시추 및 물리검

층을 실시한 바 있는 중생대 백악기의 퇴적암과 화강암이 분포하는 두곳을 대상으로 전기비저항 영상법에 의한 지반조사의 적용성을 검토한 것이다. 탐사대상 지역은 뚜렷한 단층과 같은 지질구조가 없고, 지층은 지표면의 표토층과 심부의 기반암, 그리고 그 사이의 풍화층으로 구성된다. 표토층과 풍화층의 경계는 시추공에서 그 깊이를 알 수 있기 때문에 그 부분의 전기비저항 분포대를 연장해서 단면전체의 표토층과 풍화층의 경계를 파악할 수 있었다. 풍화층은 코아관찰등에 의하여 풍화의 정도에 따라 강 및 약풍화층으로 나누고 탐사지역 주위에 분포하는 풍화층 노두의 전기비저항을 측정하여 풍화등급 결정의 자료로 활용하였다.

KD-02 지역은 역암, 사암 및 셰일의 호층으로 구성되며 과쇄대 및 지하수가 발달해 있어 전체적으로 전기비저항이 낮게 나타난다. 탐사결과 전기비저항 분포와 지질구조가 거의 일치하고 있으며, 지반구분은 표토층을 비롯하여 강풍화암석, 약풍화암석, 비교적 신선한 암석 및 신선한 암석의 5등급으로 나눌 수 있다. 그러나 깊이 40 m 이하에 분포하는 역암층의 전기비저항치는 그다지 신뢰성이 없는 것으로 생각된다. 그 이유는 역암층의 상하부에 셰일층이 분포하고 있어 탐사결과에 영향을 미쳤을 것으로 생각되며, 또 전기비저항영상법(2극법)의 원리상 해석범위의 하부(탐사심도의 2/3 이하)는 해석정도가 떨어지기 때문이다.

KD-06 지역은 거제도 해안을 따라 넓게 분포된 저반상의 화강암으로 지질구조는 상부의 표토층과 하부의 신선한 화강암 사이에 풍화화강암이 존재한다. 탐사측선의 NNE 방향으로 SSW 방향으로 갈수록 표토층 및 풍화화강암이 두껍게 형성되어 있다. 지반구분은 역질토를 비롯하여 표토층, 강풍화화강암, 약풍화화강암 및 신선한 화강암의 5등급으로 나눌 수 있다.

사 사

본 연구에 사용된 물리검층 자료는 국제 Highway 연구회로부터 제공 받았으며, 전기비저항탐사 및 지질조사에 대해서는 일본 토목학회 관서지부의 공동연구그룹인 터널지반조사 연구위원회(위원장: 松井 保교수)의 지원을 받았다. 또 연구비의 일부는 전략광물자원 연구센터의 지원을 받았다.

참고문헌

- 김정호 (1987) 2차원 전기비저항 탐사자료의 역산. 박사학위논문, 서울대학교, 154p.
- 박삼규·김희준 (1994) 거제도지역 지질조사에 대한 물리검층의 적용성. 자원환경지질, 27권, p. 289-294.
- Ichikawa, K., and Inazaki, T. (1994) Geophysical survey as a geotechnical subsurface delineation tool. Japan. Soc. Soil Mech. Found. Eng., v. 42, p. 7-12
- Japan Society of Engineering Geology (1992) Rock mass classification in Japan. p. 8-12.
- Kim, H.J., and Kim, Y. (1988) Two-dimensional for dipole-dipole resistivity data. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 21, p. 107-113.
- Matsui, T. (1993) High-density electrical prospecting technique and availability for tunnel investigation. Underground Space Utilization Symposium, Japan Soc. Civil Eng., p. 37-48.
- Sakayama, T., and Shima, H. (1986) High resolution two dimensional resistivity inversion technique using alpha centers. 56th Ann. Int. Mtg., SEG, Expanded Abstracts, p. 47-49.
- Shima, H. (1992) A practical 2D automatic resistivity analysis for pole-pole array data-analysis algorithm and application of "Resistivity image profiling". Butsuri-Tansa, v. 45, p. 204-223. (in Japanese)

1994년 11월 7일 원고접수