

彈性波測量에 의한 地下貯藏施設의
地下構造調査에 관한 研究

A Study on the Underground Structure of Underground
Storage Cavern by Seismic Surveying

柳 福 模* 權 現**
Yeu Bock-Mo Kwon Hyon

金 重 賢***
Kim Joong-Hyun

要 旨

국토의 이용을 극대화하기 위한 地下貯藏施設의 基礎調査에 物理探查方法중 彈性波測量을 이용하면 地下岩盤 조건을 규명하고 空洞의 位置를 선정할 수 있다.

本 研究에서는 岩盤의 彈性波速度 및 低速度帶의 分布를 分析하여 岩盤 연약대를 파악하므로써 地下施設物 설치의 타당성 결정에 한 技法을 제시하는데 의의를 두고 있다.

ABSTRACT

The condition of underground basic rock and the location of cavern site can be found by means of seismic surveying is one of the physical exploration methods by which the preliminary investigation of underground storage constructions are made in order to maximize the use of a land.

This study is valuable in the point of showing a method for the decision of the property of a underground facilities establishment, by analyzing the elastic wave velocity and the distribution of a lower velocity zone and by grasping the weak zone of the basic rock.

1. 序 論

최근 국토의 이용을 극대화하기 위하여 地下 備蓄, 地下發電所, 지하핵폐기물 저장소 등 대

규모의 地下施設計劃이 점차 증가하는 추세이다.⁽¹⁾ 국토의 효율적인 이용을 위해서는 地下空間을 이용한 시설물의 安定性 및 효과적인 개발과 地形 및 地盤條件에 관한 測量成果의 평가가 이루어져야 한다.

地下構造에 대한 평가는 地下의 物理的 상태를 지표에서 관측하여 얻은 자료를 해석, 推定하므로써 많은 費用과 時間을 절감할 수 있게

* 延世大學校 工科學 教授

** 延世大學校 大學院 博士課程

*** 延世大學校 產業大學院

되었다. 이러한 방법은 지하구조의 어떠한 물리적 성질을 이용하는가에 따라 電氣探査, 磁力探査, 放射能探査, 重力探査, 地熱探査, 物理檢層 그리고 彈性波測量 등으로 나누어진다.

본 연구는 地下施設物 設置 基礎調查로서 제반 物理探査 방법중 彈性波測量의 屈折法을 이용하였다. 그리고 土木設計의 主要 parameter인 土質 및 岩盤의 物理的 性質과 밀접한 관계를 갖는 彈性波速度를 관측하므로써 전반적인 岩盤의 조건을 규명하여 地下空洞의 位置選定을 위한 岩盤平價를 하는데 目的을 두고 있다.

1851년 R. Mallet가 人工地震을 發生시켜 지진과 속도를 測定한 이후 Wiechert가 天然地震의 走時曲線(Time Distance Curve)을 解析하여 지구 내부구조를 추정하는 방법을 제시하였다. 1905년 미국에서 油田探査에 彈性波測量의 反射法을 적용하기 시작하여 1924년 Texas주에서는 Salt Dome을 발견하였다.⁽²⁾ 최근에는 油田뿐만 아니라 土木基礎調查, 地下水의 測量 등에도 이용되고 있으며 그동안 우리나라에서도 高速道路 建設現場, Dam Site, Tunnel site, 각종 Power plant Site 등의 調査에 기여한 바가 크며 彈性波를 이용한 測量은 모든 土木基礎調查 및 基礎設計資料로 중요한 의의를 지니게 되었다.⁽³⁾

본 연구를 위한 대상지역을 효과적으로 포괄하기 위하여 관측대상 지역을 東西 및 南北 방향으로 150M×250M의 Grid형으로 13개 測線을 설정하였고 岩盤의 彈性波 速度分布, 低速度와 관련된 岩盤構造의 규명 및 평가를 실시하였다. 岩盤의 彈性波 速度分布는 최하부 기반암의 屈折層 斷面을 작성하여 규명하였고 屈折斷面에서의 速度變化 및 速度異常帶를 분석하므로써 암반구조에 영향을 크게 미칠 수 있는 低速度帶의 分布를 해석하였다.

2. 彈性波測量의 理論解析

彈性波測量 방법은 屈折法과 反射法으로 대별되며 屈折法은 測量시 폭발에 의해 전달되는 최초의 波를 대상으로 한다.^{(4),(5)} 계산의 기본이 되는 것은 走時曲線이며 이 走時曲線은 횡측에 폭

발점과 관측점과의 거리를 표시하고, 종측에는 최초로 파동이 도착하는데 소요된 시간을 표시하여 距離와 時間과의 관계를 표시한다.

2.1 水平不連續面의 二層構造Z(깊이)解析

水平의 不連續面이 있는 경우를 二層構造와 多層構造로 나눌 때, 지하의 土木構造物(空洞) 설치를 위하여는 地表調查 후, 表土下部에 화강암류의 基盤岩이 있을 경우에만 적용되므로 二層構造의 깊이를 解析하면 된다.

地表에서 Z 깊이로 水平의 不連續面이 있는 경우에 이 面을 境界로 上部地層에서는 V_1 , 下部地層에서는 V_2 의 彈性波 速度를 갖고 있다고 하면 屈折法이 적용되는 조건은 $V_2 > V_1$ 이다.^{(3),(7)}

直接波의 走時 T_1 은

$$T_1 = \frac{X}{V_1} \quad (2-1)$$

屈折波의 경로를 ABCD라 하면 走時 T_2 는

$$T_2 = AB/V_1 + BC/V_2 + CD/V_1 \\ = \frac{2Z \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 \cdot V_2} + \frac{X}{V_2} \quad (2-2)$$

가 된다. 이때의 走時曲線은 폭발점에서 x_c 의 거리까지는 直接波에 의한 走時를 나타낸 것이며 走時曲線은 하나의 直線을 이룬다.^{(3),(6),(7)} 그 물매는

$$\frac{dT_1}{dx} = \frac{1}{V_1} \quad (2-3)$$

이다.

x 가 x_c 보다 클 때에는 屈折波가 최초로 도착하여 走時曲線은 x_c 에서 屈曲을 이룬다. 식 (2-2)는 x 에 관한 一次式이므로 屈折波의 走時曲線도 하나의 直線이다. 그 물매는

$$\frac{dT_2}{dx} = \frac{1}{V_2} \quad (2-4)$$

이 된다. 그런데 $V_2 > V_1$ 이므로 $\frac{dT_2}{dx} < \frac{dT_1}{dx}$ 이며 走時曲線의 경사는 屈折波가 直接波보다 완만하다.

走時曲線의 曲折이 생기는 거리 x_c 에서 直接波의 走時 T_1 과 屈折波의 走時 T_2 가 동일하므로

$$Z = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (2-5)$$

이다. 여기서 x_c 를 折點距離 또는 臨界距離(cri-

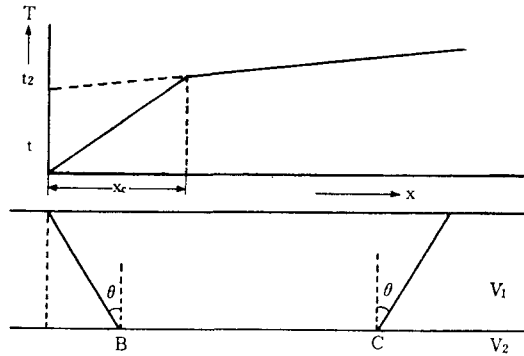


그림 2.1 2층구조의 走時曲線

tical Distance)라 한다.

그림 2.1에서 屈折波의 走時曲線延長이 縱축을 찌르는 점을 t_2 라 하면

$$t_2 = \frac{2Z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 \cdot V_2} \quad (2-6)$$

이고, 여기서 t_2 는 屈折波의 原點走時 또는 교차시 (Intercept Time)로서

$$Z = \frac{t_2 \cdot V_1 \cdot V_2}{2\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad (2-7)$$

이 된다.

2.2 走時曲線의 解析

그림 2.2에서 제 1층의 速度를 V_1 , 제 2층의 速度를 $V_2 (V_1 < V_2)$ 라 하고, 발파점 S에서 생성된 彈性波는 速度 V_1 으로 진행되며 速度 V_2 의 基盤部 上部에서 임계각으로 굴절한다. 기반암의 상부를 따라 진행하는 굴절파는 굴절임계각 i_{12} 로 다시 지표로 되돌아 온다.

상부층을 통과하는 직접파의 走時曲線의 경사는 $\frac{1}{V_1}$ 이며, 하부층을 통과하는 屈折波 走時曲線의 경사는 $\frac{1}{V_2}$ 이다.

V_2 는 屈折波의 外見速度(Apparent velocity)이며 眞速度(True Velocity)는 下部層의 지층경사가 지표면에 평행할 때 외견속도와 같다.

굴절기준면과 가장 가까운 거리인 SP의 행로를 택한 波는 屈折되지 못하며 屈折臨界角으로 전파된 波만 굴절기준면상에서 굴절하므로 지연시간을 가지게 되며 지연시간을 가진 波가 屈折基準面을 따라 진행하다가 지표면으로 다시

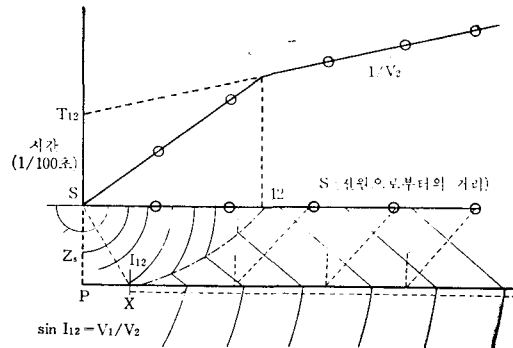


그림 2.2 2층구조 주시곡선의 경로

전파된다. 지연시간은 굴절기준면에 대해 屈折臨界角으로 향한 走時에서 傾斜行路의 影像走時를 뺀 것과 같다.

發破點 S에서의 지연시간 t_c 는

$$t_c = \frac{SX}{V_1} - \frac{PX}{V_2} \quad (2-8)$$

이 된다. (2-8)식에서 屈折基準面까지의 深度 Z 는 $V_0/\cos i_{12}$ 의 곱으로 계산된다.

지연시간은 中間의 영점주시와 같으며 그림 2.2에서 T_{12} 의 반에 해당한다. 또한 그림 2.3에서 지연시간 t_c 는

$$t_c = 1/2 \cdot (t_{s_1} \cdot G + t_{s_2} \cdot G - t_{s_1 s_2}) = \frac{GX}{V_1} - \frac{PX}{V_2} \quad (2-9)$$

이고 이때 深度는 $ZG = tG \cdot V_1 / \cos i_{12}$ 로 표시된다.

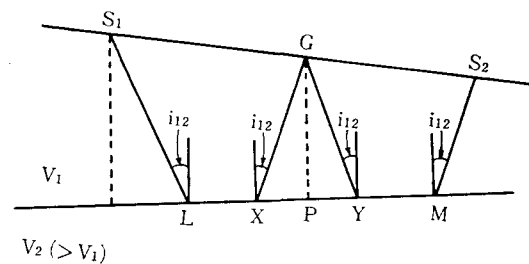


그림 2.3 수정 주시곡선의 작성도해

2.3 速度分析

일반적으로 走時的 변화 또는 分散현상의 원인은 첫째, 굴절기준면 내의 변화와 둘째, 地表

條件 및 屈折基準面까지의 深度變化, 셋째 上部層의 速度 및 速度分布의 相異로 大別할 수 있다.

이러한 원인중 둘째와 셋째함은 굴절기준면 내에서 屈折되는 波가 상부층을 통과할 때 走時에 영향을 미치며 이것이 지연시간내에 포함된다. 그리고 굴절면상의 速度의 相異는 屈折走時에 영향을 미치게 된다. 이러한 영향은 동일한 受振點을 두고 음(-)의 방향의 發破點에서 온 走時에서 양(+)-의 방향 發破點走時를 빼면 된다. 얻어진 수정走時를 走時曲線上에 작도하면 수정된 주시곡선의 경사가 屈折面의 速度와 동일하게 된다. 이를 그림 2.3에서 수식화하면

$$T'S_1G = TS_1G - 1/2 \cdot (TS_1G + TS_2G - TS_1S_2) \\ = \frac{1}{2}(TS_1G - TS_2G + TS_1S_2) \quad (2-10)$$

이다. 이것은 屈折面의 速度를 분석하는데 가장 중요한 것으로, 연속된 수정走時를 주시곡선에 再作圖 함으로써 파쇄대, 연약지역, 풍화대 등을 규명하는 자료가 된다. 이 수정된 走時는 發破點 S에서 굴절면상의 P점까지의 走時와 같다. (3), (7), (8), (9)

상기의 Hawkins 이론과 수정 走時를 이용하여 主屈折基準面까지의 深度計算이 가능하다.

3. 觀測값 解析 및 比較考察

3.1 觀測

본 연구를 위하여 설정된 13개 측선에 대한 관측은 12 channel Recorder를 사용하였으며 受振器間의 간격을 10m로 하여 1個展開의 終端 受振器는 다음 전개의 始作 受振器와 중첩하므로써 展開間에 나타나는 走時誤差를 보정하였다.

본 彈性波 測量은 굴절식 방법으로 주장비는 Sweden제 ABEM TRIO SX-12 Seismic refraction system을 사용하였고, 진원으로는 Dynamite를 사용하였다. 진원으로 사용한 다이내마이트는 주위의 Noise 상태, 육안으로 판단되는 에너지 전달 障害媒體의 유무 등을 고려하여 증감하였으며, 관측기록은 지표부근의 地質狀態를 파악하기 위하여 5개의 震源과 연구목적상 지하

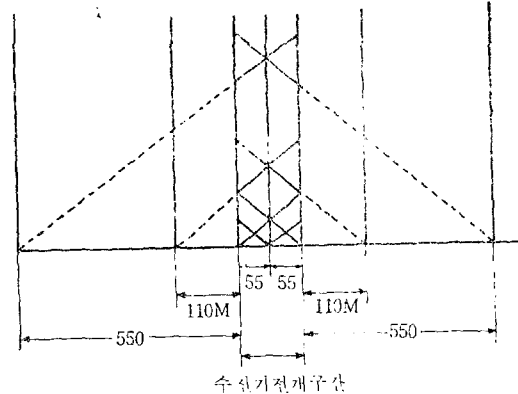


그림 3.1 주시곡선의 조합 및 진원배치도

150m 부근의 상태에 대한 자료를 얻기 위하여 2개의 遠距離震源을 설치하여 기록하였다. 즉, 受振器展開中央에 1개소, 수진기 양단에 1개소씩 2개소, 수진기 양단에서 110m 거리의 지점에 1개소씩 2개소와 550m 거리의 지점에 1개소씩 2개소, 합계 7개소의 震源을 그림 3.1과 같이 설정하였다.

3.2 觀測값 解析

그림 3.1의 방법으로 얻어진 走時曲線으로부터 屈折面의 速度曲線 및 深度分布斷面을 작성, 測線別 速度分布 및 速度層斷面을 解析하였다.

彈性波 測量의 주목적인 지하암반상태를 확인하는 방법은 屈折面에서의 彈性波速度 변화와 이와 관련된 이상부위에서의 深度走時 단면의 변화를 검토함으로써 물리적인 상태를 해석할 수 있었다. 또한 인접된 觀測線과의 對比를 통하여 이들 상태의 平面的인 분포 관계를 규정지을 수 있으므로 본 연구에서는 彈性波速度 異常帶 및 低速度帶에 대한 검토를 하였다.

이들 低速度帶에 대한 分布 現황을 各 測線別로 고찰하면 다음과 같다.

LINE-1

速度層은 제 1 층이 1500m/sec 이내, 제 2 층이 3000m/sec, 그리고 제 3 층이 4500~6000m/sec의 速度를 보이고 있다. 9개 지점에서 彈性波速度 異常帶가 확인되며, 이들의 速度범위는 1800~3100m/sec에 속한다.

이러한 低速度帶中에서 深度走時斷面과 관련되는 주요 이상대는 100~110m, 280~300m, 790~820m 구간으로 이들 구간에서는 低速度帶 分布와 함께 深度走時도 깊어지고 있어 岩盤 變質대를 형성할 가능성이 높다.

LINE-2

최하부 속도층의 속도분포는 평균 4200~5500 m/sec로 나타났다. 10個 지점이 속도 이상대로 확인되며 속도 범위는 1400~3200m/sec이며 深度走時가 아주 깊은 분포를 나타내는 부분과 관련된 速度異常帶는 110~170m, 310~330m, 950~960m 및 990~1050m 구간으로 해석된다.

LINE-3

L-1, L-2와 유사한 경향을 보여 최하부층의 速度分布는 0~110m, 990~1100m 구간을 제외하면 평균 4500m/sec 이상의 높은 속도를 나타내고 있다. 부분적으로 나타나는 5개소의 低速度帶의 分布는 2500~3000m/sec이며 深度走時異常帶와 관련된 低速度帶는 800~820m 구간으로 확인되었다.

LINE-4

地形斷面은 비교적 屈曲이 심하여 경사에 따른 속도 보정이 다소 어려운 지형 조건이다. 速度 分布는 평균 4700~5400m/sec의 높은 속도로 기록되지만 440~960m 구간에서는 3100~3800 m/sec로 기록되었다. 10개 지점에서 부분적으로 低速度帶가 확인되며, 이들 저속도대중 屈折面 深度走時 異常帶와 관련된 부분은 160~180m 구간으로 판단된다.

LINE-5

최하부층까지의 深度는 전체적으로 얕은 분포를 보이고 있으며 속도분포는 L-1, 2, 3, 4와 유사하다. 800~870m 구간을 제외하면 4000~4500m/sec를 나타내고 있으며 부분적으로 5개 지점의 低速度帶가 확인되었고, 深度分布와 관련된 저속도대는 확인되지 않는다.

LINE-6

최하부층까지의 심도는 0~440m 구간에서 비교적 깊은 分布를 보이며 축선의 南端에서는 10m 이내로 낮아졌다. 80~140m 구간을 제외하면 속도분포는 4500~6000m/sec이고 부분적으로 3

개 지점에 저속도대가 분포하며 심도분포와 관련된 저속도대가 390~400m 구간에서 확인되었다.

LINE-7

최하부속도층까지의 深度는 같은 분포를 나타내었고 速度分布는 전구간을 통하여 4500m/sec 이상을 표시하고 있으며, 부분적으로 확인되는 低速度帶는 3개 지점이었고 310~410m 구간에서 집중적으로 나타났다. 深度走時異常帶와 관련된 低速度帶는 확인되지 않았다.

LINE-8

L-7과 유사한 지형 단면이며 최하부 速度層까지의 深度는 축선 북측에서 10~15m로 나타나서 축선 남측에서 다시 얗아졌다.

速度 分布는 축선 북측보다는 南側 부분이 비교적 높으나 대체로 4500~6000m/sec의 범위에 속하는 것으로 나타났다. 低速度帶는 1개소에서만 확인되었으며 深度走時 異常帶와는 상관성이 없었다.

LINE-9

速度層 深度分布는 L-8과는 반대의 경향을 보여 남측에서 깊어졌으며, 대체로 全測線에서의 최하부층까지의 심도는 10m 내외이고 속도분포는 420~450m 구간을 제외하면 平均 4500~6000 m/sec의 높은 速度를 나타내었다. 부분적으로 4개소에서 低速度帶가 나타나며, 이들 저속도대중 주변의 속도와 가장 대조적인 변화를 보이는 異常帶는 520~540m 구간이며 이 부분에서는 深度走時도 깊어지고 있었다.

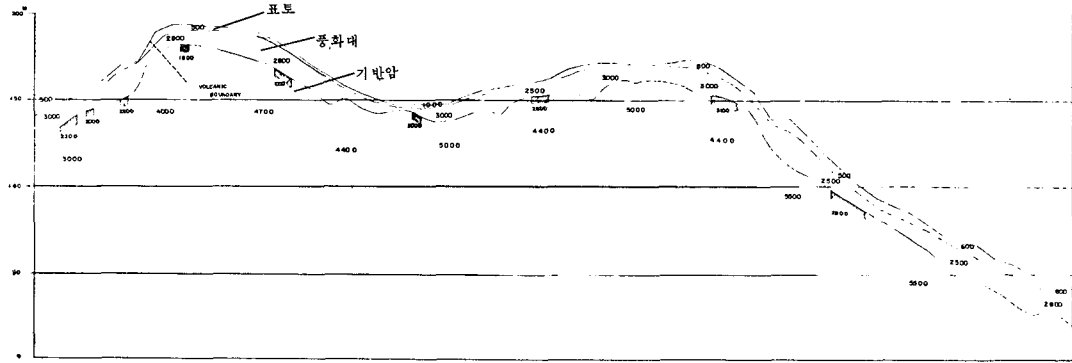
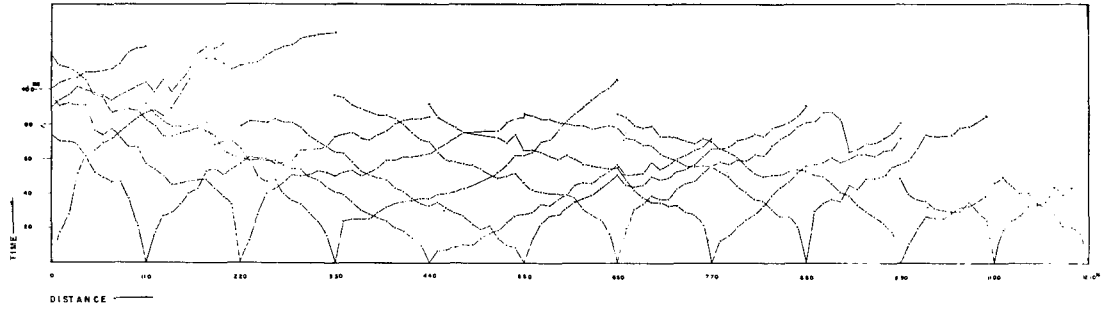
LINE-10

최하부 속도층의 심도는 測線 中央部가 비교적 깊은 分布를 보였으며 속도층 분포는 40~80m 구간을 제외하면 4500~6000m/sec의 높은 속도가 기록되었다. 2개소의 속도이상대가 분포되며 深度走時異常은 나타나지 않았다.

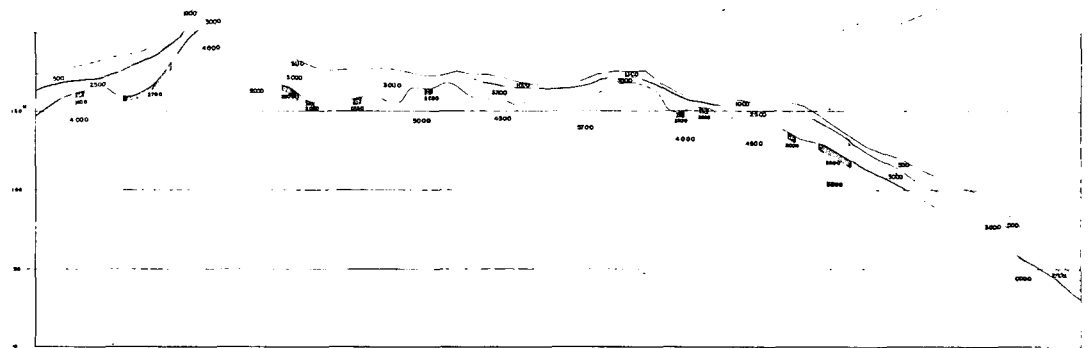
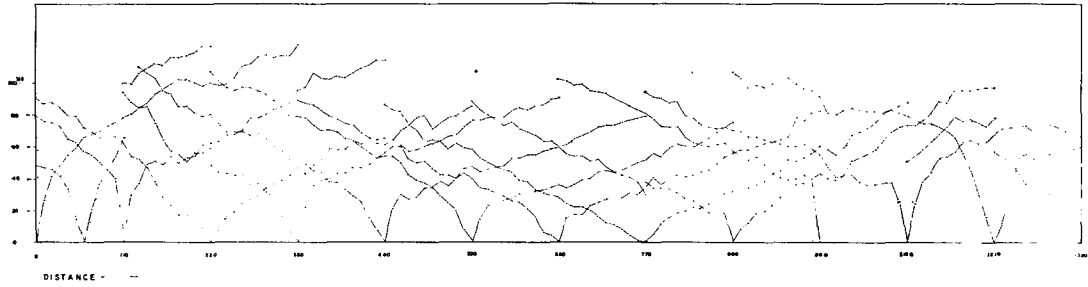
LINE-11

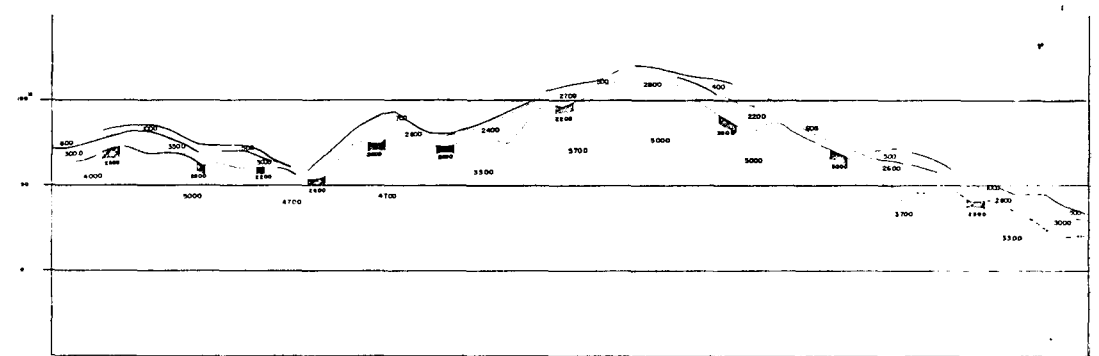
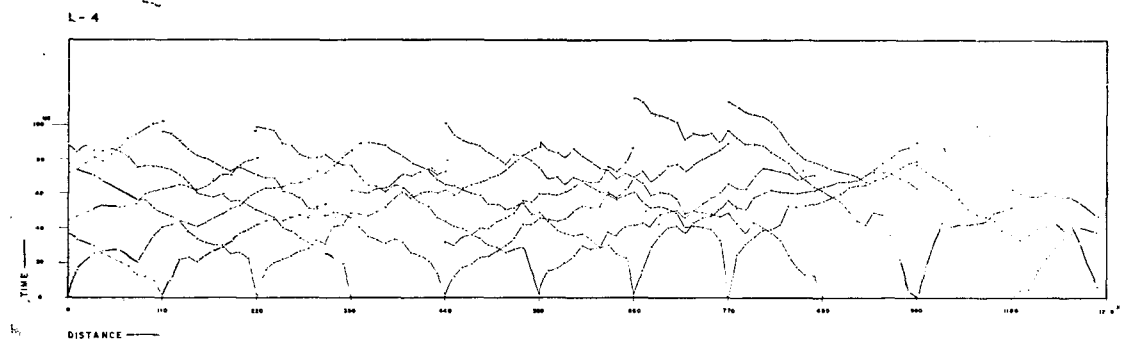
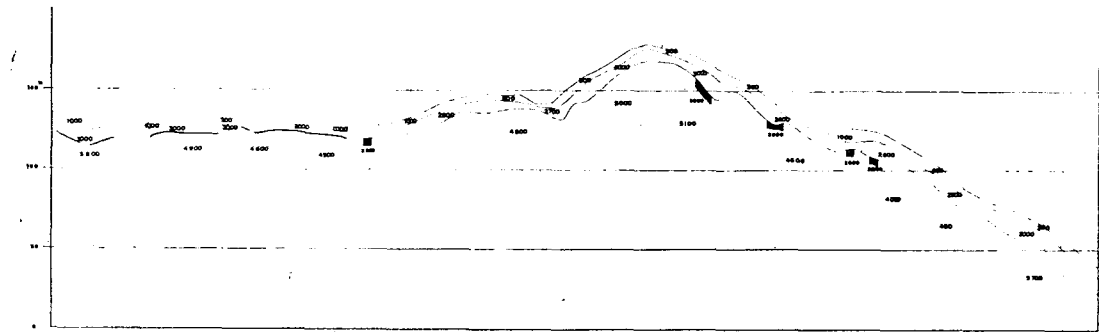
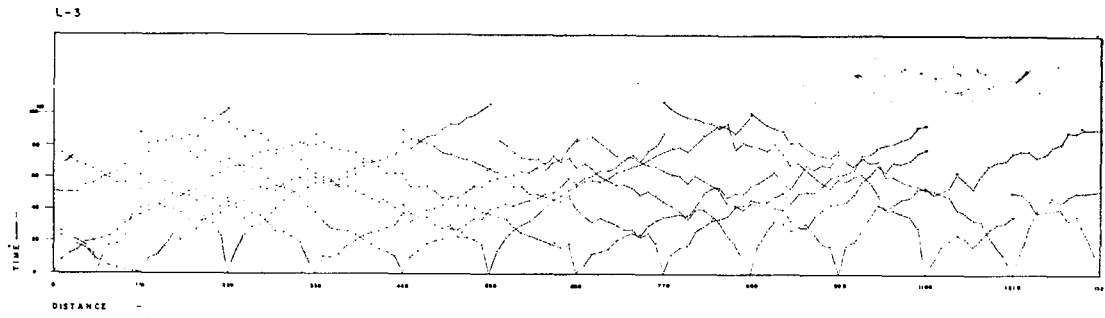
L-3, 4, 5 축선과 교차하며 속도분포는 4500~5000m/sec로 거의 일정함을 보였고, 부분적으로 3개 지점에서 低速度帶가 확인되었으며 深度走時異常帶와 관련된 저속도대는 130~150m 구간에서 확인되었다.

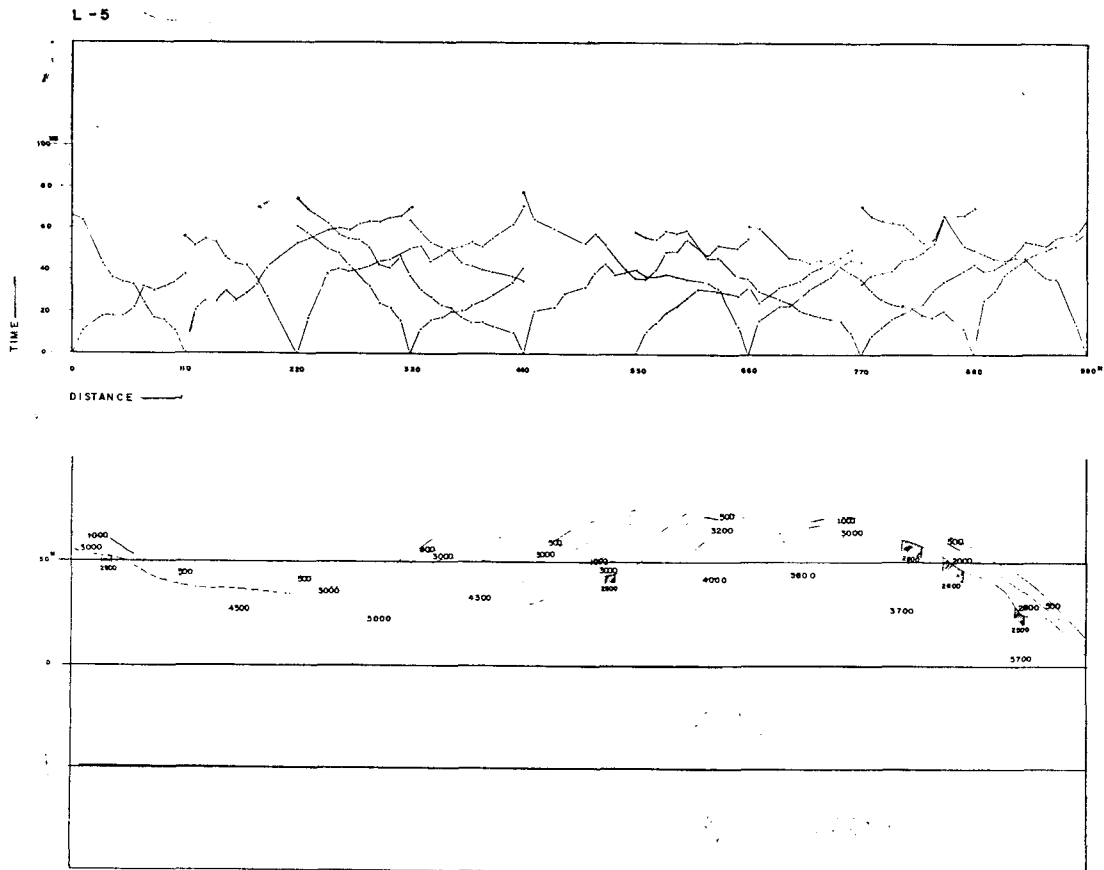
L-1



L-2







LINE-12

L-11과 평행하게 설정되어 있으며 속도층의 분포 및 속도분포에 있어서 L-11 측선보다 비교적 높은 평균 5500m/sec가 기록되었다.

低速度帶는 2개 지점에서 확인되었고 1000m/sec의 低速度帶는 破碎現象을 나타낼 것으로 예상되었으나 深度走時의 이상현상은 나타나지 않았다.

LINE-13

조사지역 北西側에 위치하며 最下部 速度層까지의 深度는 15~20m 정도이고 속도 분포는 대체로 4500~5000m/sec를 나타내고 있었으며 대부분 10m 내외의 소규모 低速度帶는 160~170m 구간에서 확인되었다.

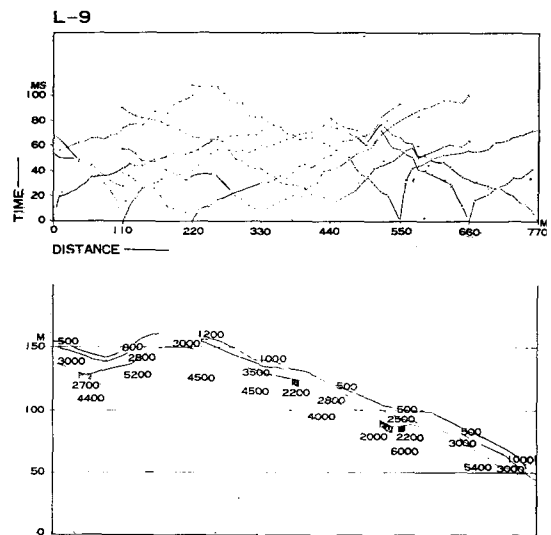
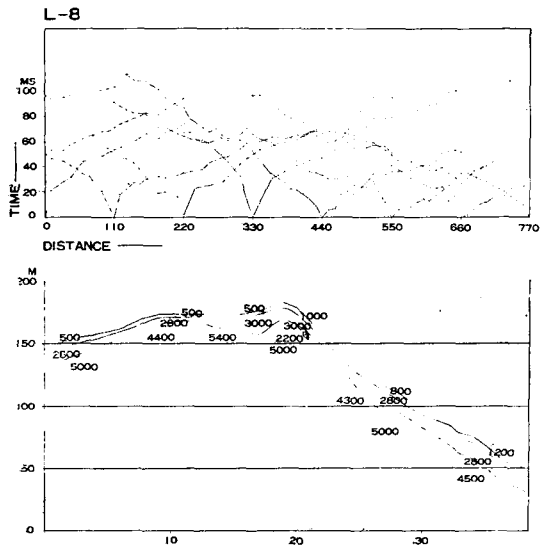
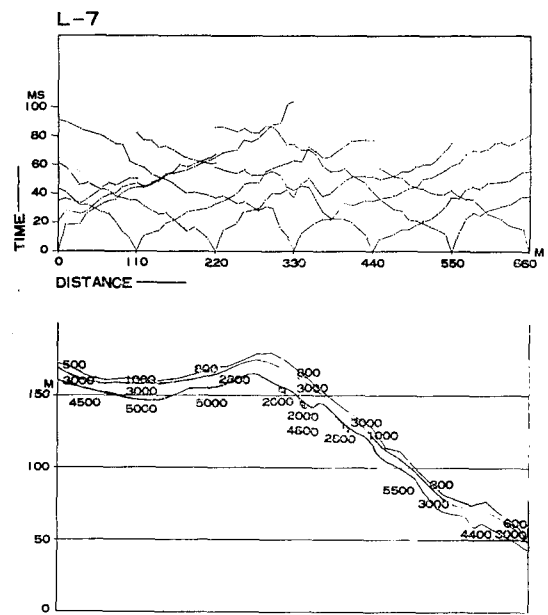
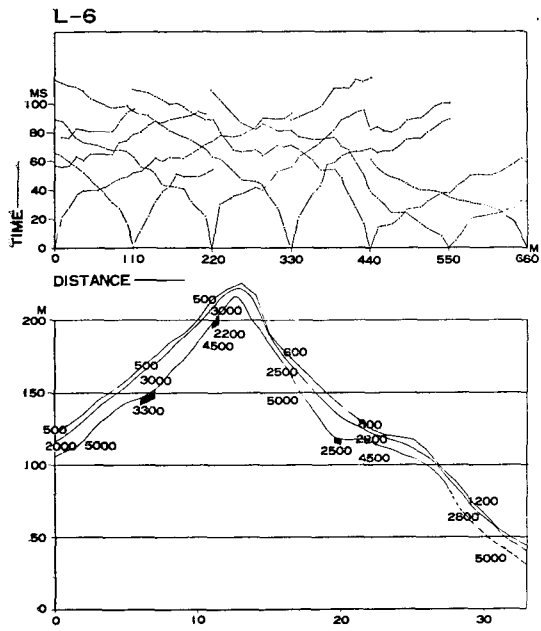
한편 본 조사에 의한 관측값은 岩盤平價에 있어서 절대적인 기준은 아니므로 보다 정확한 해석을 위하여 본 조사전 既 실시된 시추조사 결과와 비교하였다. (10)

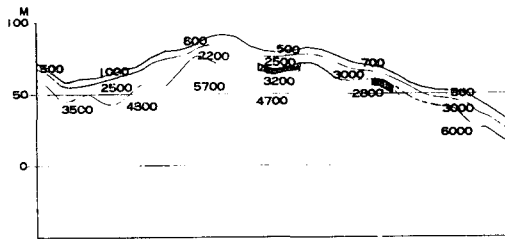
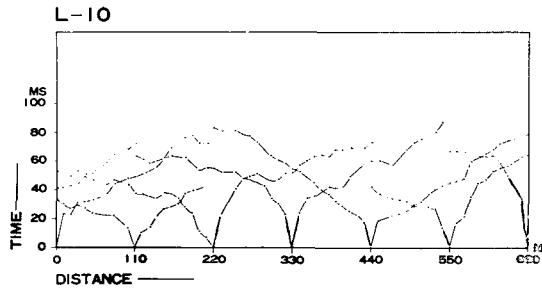
총 8개공 1400m의 시추에 대하여 회수된 core의 상태가 전반적으로 R.O.D 평균 90% 이상으로 매우 양호한 편에 속하며 일부 지역의 지표에 화산암류가 분포하나 조사목적 심도에는 화강암 단일 종류인 것으로 나타나 있다. (2), (10)

한편 8개공의 core에서 소규모의 파쇄대 및 단층이 형성되어 있었으며 調査地域 北西쪽의 4개공에서 시추 순환수의 누출 현상이 발생된 것으로 보아 남동쪽으로 발달된 절리가 존재하고 있음이 나타나 있다.

3.3 觀測速度分布에 따른 比較平價

岩盤의 이용 평가는 彈性波速度 자료를 기초로 하여 岩盤의 彈性的인 성질 및 물리적인 상태를 파악함으로써 전반적인 암반 조건을 규정할 수 있으며, 이는 地下空洞 위치 선정에 있어 主要한 역할을 한다. (2)



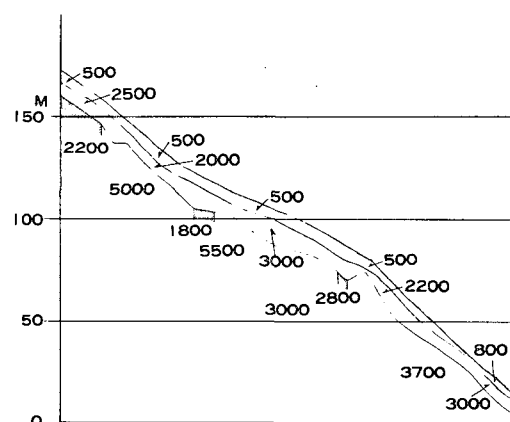
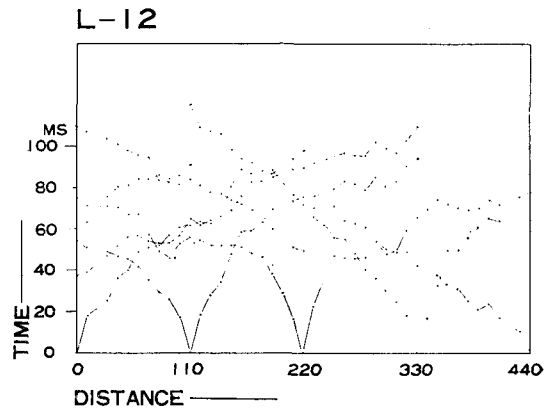
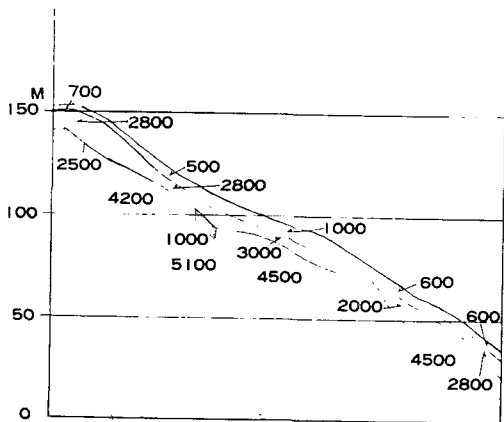
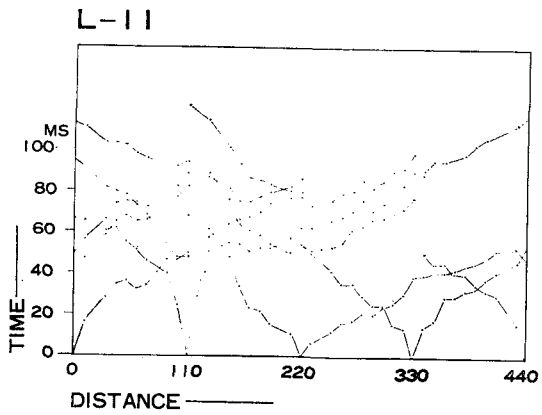


本 調 査 結 果 確 定 되 는 調 査 地 域 內 의 彈 性 波 速 度 는 一 部 不 連 續 帶 를 제 외 하 면 상 당 히 높 은 값 으 로 測 定 되 었 다.

觀 測 된 彈 性 波 速 度 범 위 를 田 中 氏 의 岩 盤 評 價 基 準 에 적 용 하 면, 本 地 域 內 에 분 포 하 는 岩 盤 의 대 부 분 은 試 錐 結 果 와 부 합 되 었 다. ⁽¹⁰⁾

그 러 나 일 부 구 간 에 서 3,100~3,700m/sec의 速 度 岩 盤 이 나 타 나 고 있 으 며, 이 와 같 이 相 對 의 으 로 낮 은 등 급 의 岩 盤 조 건 을 보 이 는 區 域 은 대 체 로 調 査 地 域 의 西 北 部 및 東 南 部 에 편 재 되 어 있 다.

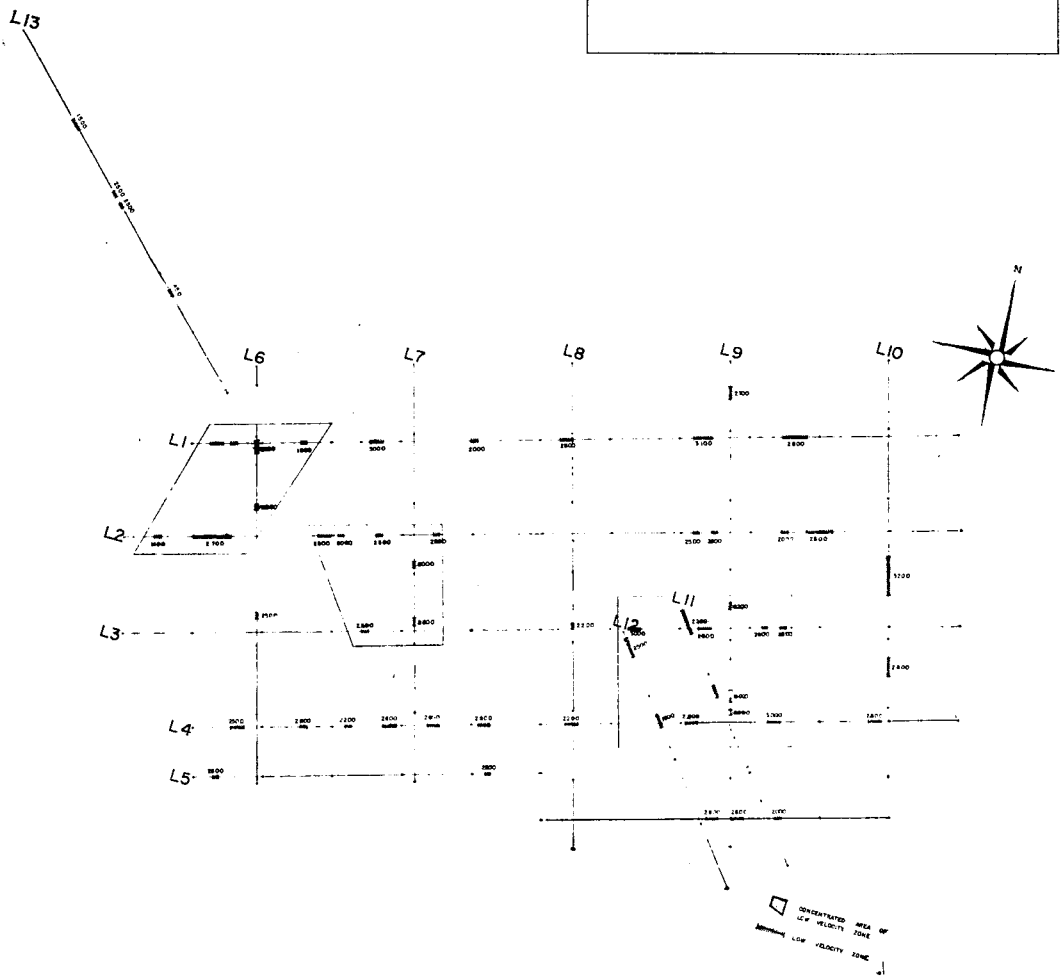
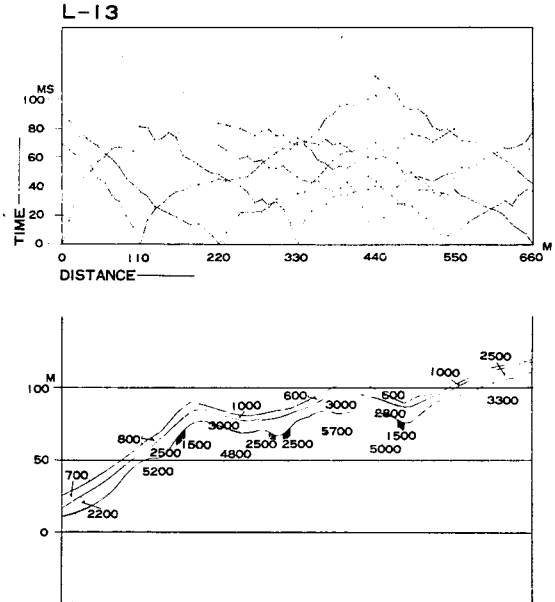
이 러 한 速 度 분 부 의 변 화 는 試 錐 結 果 에 서 나 타 난 試 錐 순 환 수 의 누 출 現 象 과 比 較 할 때 西 北 ~ 東 南 方 向 으 로 과 쇄 대 가 발 달 되 어 있 음 을 알 수 있 으 며 이 는 주 로 風 化 영 향 에 의 한 균 열 발 달 과 岩 石 學 的 인 조 성 및 成 分 변 화 에 기 인 하 는 것 으



로 판단된다.

그러나 이들 낮은 등급의 岩盤帶 역시 力學的으로는 양호한 등급에 속하므로 地下空洞施設 설치에 있어 커다란 문제를 提起할 要因이 되지는 않을 것으로 판단된다.

한편 觀測값 解析에서 低速度帶는 대체로 2,000~3,000m/sec 내의의 速度를 보이고 있으며 이들의 個別的인 岩盤조건은 보강의 정도에 따라 쉽게 改善될 수 있는 狀態임을 表示하고 있으나 이들 低速度帶가 地質구조선과 관련된 不連續線을 形成할 경우 地下水의 流路形成 및 밀집된 低速度帶와 相互作用으로 인한 연약區域을 形成할 可能性을 排除할 수는 없었다.



이러한 가능성이 높은 軟弱區域으로 推定될 수 있는 部分은 本調査 地域의 西北端과 中央部와 東南部에 分布되고 있음을 알 수 있었다.

4. 結 論

本 研究는 地下地盤調査를 위한 地震 方法中 彈性波測量을 實施한 후 既 실시한 試錐調査와의 比較評價를 한 것으로서 彈性波測量을 통하여 지하저장시설을 위한 調査研究結果 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

1. 低速度帶의 分布와 관련된 구조 傾向을 解析하는데 있어, 方向設定에 一次的인 관심 이 주어져야 할 것이다.
2. 最下部層 屈折面上에서의 低速度帶 分布는 대체적으로 밀집 部分의 連結方向이 低速度帶의 分布 方向과 一致하는 것으로 판단되었다.
3. 低速度帶의 分布는 地質구조대와 관련된 암반 연약대로 간주할 수 있으며, 低速度帶는 一定한 연장 方向을 나타내고 있었다.
4. 深度走時異常과 관련된 部分은 특히 破碎

現象에 의한 불연속성이 좁게 분포할 可能性이 높으므로 設計 및 施工에 유의하여야 할 것으로 판단된다.

參考文獻

1. 鄭裕熙, 地下空間利用, 기진研究社, 1983.
2. Hock, E. and Brown, E.T., Underground Excavation in Rock, The institution of mining and Metallurgy, London, 1980, pp.18~44.
3. 장광택 外 2人, 地球物理探査, 東明社, 1983, pp. 56~93.
4. 건설부, 터널의 設計와 施工, 1978, pp.49~62.
5. 건설부, 암석과 암반(기술 지침서), 1982, pp.75~76, 100~104.
6. Robinson, E.A. and Treitel, S., Geophysical Signal Analysis, Prentice-Hall, Inc., London, 1980, pp.1~15, 295~306.
7. Parasnis, D.S., Principle of Applied Geophysics (3rd Ed.), Champman & Hall, London, 1979, pp.189~201.
8. Károly shechy, The Art of Tunneling (2nd English Ed.), Akademiai Kaido, Budapest, 1973, p.66.
9. John, O.B. and Kuesel, T.R., Tunnel Engineering Handbook, Van Nostland Reinhold Company, New York, 1982, pp.14~16.
10. 日本土木學會, 岩盤力學, 1979, pp.65~140.