

TSP탐사를 이용한 지하유류저장공동 및 도로터널의 시공 중 설계변경 사례 고찰

차성수 · 김세훈 · 윤상필 · 배정식 · 이진무 (SK건설 토목기술팀(터널·지하공간팀))

Case histories on design alternatives during excavation of underground LPG storage cavern and traffic tunnel using TSP survey

Sung-Soo Cha, Se-Hoon Kim, Sang-Pil Yun, Jung-Sik Bae, Jin-Moo Lee
(Geospace Development Team, SK Eng. & Constr. Co., Ltd.)

요약 : 대규모 터널 및 지하공간 건설시 지질조건을 정확히 파악하는 것은 사업의 성패를 가늠하는 중요한 요소이다. 사전조사단계의 지구물리탐사는 부지의 조건 및 탐사방법상 제한된 해상도 등으로 심부 터널 및 지하공간 대상부지의 지질을 정밀하게 파악하는데 한계가 있다. 설계단계의 사전조사에서 정확하게 파악하지 못했던 지질조건을 정밀하게 파악하기 위하여 VSP탐사를 터널에 적용한 터널내 탄성파(TSP)탐사를 지하공동 및 터널에서 실시하였다. 평택 LPG지하저장공동을 시공하는 중에 TSP탐사를 실시하여 저장기지 인근의 남양호 하부에 예상되었던 단층파쇄대의 위치 및 방향성을 파악하였고, 터널내 시추조사를 통하여 이를 확인하였으며, TSP탐사와 시추조사 결과를 토대로 지하공동의 규모 및 연장에 대한 기존 설계 내용을 변경하였다. 또한 지형상의 한계로 설계단계에서 정확하게 파악하기 힘들었던 문의재터널의 불량암질 예상구간에서 TSP탐사를 실시하여 터널 전방의 지질구조대 위치와 규모 등을 파악하여 기존 설계를 변경하고 적절한 지보대책을 강구하였다.

주요어 : 터널, 지하공간, 지하LPG저장공동, VSP탐사, TSP탐사

Abstract : The geophysical survey at pre-investigation stage can hardly provide the detailed information on geological structure of site which has difficulty in access and thick overburden. The TSP (VSP applied in tunnel) survey at post-investigation stage can show the detailed geology ahead of tunnel and around cavern. The TSP survey was carried out at the Pyongtaek LPG storage cavern site during the cavern excavation and provided the location and orientation of the fault inferred below Namyangho. In order to confirm the result of TSP survey four boreholes were drilled in access tunnel. The fault was also detected by borehole survey and the location was coincided with the result of TSP survey. Depend on the result of TSP survey and core logging, the design such as cavern layout and length could have been changed. As another case history the TSP survey was performed at the Mumeuje road tunnel which has poor geological information due to thick overburden. The support design was also changed on the base of TSP survey.

Keywords : Tunnel, LPG Storage Cavern, VSP, TSP

1. 서론

터널 및 지하공간을 건설하기 위한 지질조사는 입지타당성 조사단계나 설계단계에 실시하는 사전조사(Pre-investigation)와 터널이나 지하공동 굴착 중에 실시하는 시공 중 조사(Post-investigation)로 나눌 수 있다. 사전조사단계의 지구물리탐사는 시추위치를 선정하거나 시추공사이의 지질에 대한 정보를 얻기위하여 수행되어지며, 시추가 불가능한 지역에서도 입지나 노선결정 및 설계를 위하여 많은 지질정보를 제공하여준다. 최근 지구물리탐사장비의 발전과 터널 및 지하공간 분야에서의 지질정보에 대한 요구의 증대로 다양한 지구물리탐사기법이 적용되고 시도되어왔다. 지구물리탐사는 시공 대상부지의 전체적인 지질파악이나 특징적인 지질구조에 대한 많은 정보를 제공하여주나, 탐사작업이 어려운 지역이나 심부위치에서는 탐사방법에 따른 해상도의 한계등으로 인하여 시공상의 어려움을 줄 수 있는 지질구조에 대한 세밀한 파악이 어려운 실정이다. 이러한 사전조사의 한계를 극복하고 시공에 영향을 주는 지질구조의 정확한 정보를 얻기위해 시공 중의 조사기법 개발은 중요하다.

제한조건 및 제원에 대한 정보가 충분하고 시공전에 수행된 설계와 시방에 따라 시공이 진행되어지는 일반적인 토목공사와는 달리 터널 및 지하공간 분야는 시공 전에 완전한 지질조건 및 암반특성을 파악하여 설계를 하는 것과 시공 전에 수행된 설계에 따라 고정된 형태로 시공하는 것이 매우 어렵다. 특히 지질조건의 파악이 어려운 조건을 지닌 지역에서의 터널 및 지하공간의 건설은 공사 전에 수행된 조사결과와 시공 중에 파악된 지질조건의 유기적인 연관이 매우 중요하다. 대규모 지하공간 건설은 정확한 지질조건의 파악이 프로젝트 성공에 중요한 요소이기 때문에 사전조사와 시공 중의 조사결과를 종합하는 유연한 설계가 특히 중요하며, 프로젝트 각 단계에서 경제적이며 효과적인 탐사기법을 적용하는 것이 중요한 과제이다. 현재 대부분의 지구물리탐사는 계획, 설계단계 중에 지표에서 실시되고 있고, 시공 중에 터널내에서 실시할 수 있는 지구물리 탐사기법은 많이 개발되어있지않아 연구가 계속되고 있다.

시공 중의 지질조사를 위하여 석유개발분야의 탄성파탐사에서 발달된 VSP(Vertical Seismic Profiling)탐사를 지하LPG저장기지 및 도로터널에 적용하여 지질구조대의 파악하였다. 터널내 적용된 VSP탐사기법 중의 하나인 TSP(Tunnel Seismic Prediction)탐사는 터널 굴착 및 지보에 큰 영향을 주는 주요 지질구조대나 용수대의 위치 및 규모를 파악하는데 특히 유용하다. 즉, TSP탐사는 터널 시공시 터널굴착에 따라 조우하게되는 지질구조대뿐 아니라 지하공동주변에서 안정성에 영향을 미치는 지질구조대 또한 파악할 수 있다. 평택에 건설된 지하LPG저장기지는 남양호 하부에 예상되는 단층으로 인하여 복단의 공동배치가 변경될 수 있으므로 그 규모나 정확한 거리와 위치의 파악이 중요하였다. 남양호 하부에 예상되는 단층의 위치 및 규모를 파악하기 위하여 진입터널, 수벽터널 및 지하공동 공사용 터널에서 TSP탐사를 수행하였으며, 그 결과에 따라 기존 설계 내용의 지하공동 배치를 변경하였다. 또한 험준한 산세로 상부 토피가 두터워 사전조사단계에서 충분한 자료를 확보하지 못한 문의재터널에서 굴착 중인 터널 전방의 지질구조대를 파악하기 위하여 TSP탐사를 수행하였으며, 탐사결과 파악된 파쇄대의 정보와 터널 막장에서 지질조사 결과에 따라 지보패턴에 대한 설계변경을 실시하였다.

2. TSP탐사 (VSP탐사를 응용한 터널내 탄성파 탐사)

터널 및 지하공간 건설의 입지타당성 평가나 설계단계의 사전조사에서는 굴절법 탄성파탐사가 주를 이루어 왔다. 최근 탄성파탐사 기기 및 기법의 발전에 힘입어 시추공을 이용한 토모그래피등이 활발히 적용되고 있고 석유탐사에서 많은 발전을 이룬 반사법 또한 엔지니어링 목적으로 이용되기 시작하고있다. 이러한 탐사방법들은 조사대상부지에 대한 포괄적인 정보를 제공해주지만 지표에서 실시되거나 제한된 위치의 시추공에서 시행되므로 탐사가 어려운 위치의 하부에서 굴착하게되는 터널이나 지하공동의 경우 터널의 안정성에 영향을 미치는 지질구조대에 대한 파악에는 한계가 있다. 시공 중에는 터널 막장에서 선진 조사공으로 이러한 정보를 얻는 것도 가능하나 조사공은 비용이 많이 들고 조사 범위가 제한되며 터널작업을 지연시켜서 경제적 손실이 크다. 또한, 선진 조사공은 조사공 위치의 기하적인 한계로 전방의 지질구조의 방향성을 충분히 파악하기 어렵다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 지구물리탐사 방법으로 VSP탐사가 터널내에서 응용되었다(Sattel et al., 1992; Cha et al., 1996; Inazaki et al., 1996).

터널내에서 VSP를 응용하기 위하여 VSP에서 발생하는 고전적인 잡음등의 문제를 극복하기 위하여 수진기의 설치 및 발파에 특별히 유의할 필요가 있다(Hardage, 1992). 초기의 시도는 VSP와 같이 터널축방향을따라 수진기를 배열하고 한 개소에서 발파를 실시하여 자료를 얻었으나 터널 벽면에 설치된 수진기에 터널파에 의한 잡음으로 전방의 지질구조대로부터 발생한 반사파의 해석을 어렵게하였다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 터널 벽면의 수진기를 터널파의 영향이 미치지않을 정도로 인입하여 수진하고 터널 벽면에서 발파를 수행하는 RVSP를 적용하였다. Fig. 1은 석유탐사 분야의 고전적인 VSP탐사 개념도와 이를 터널에 적용한 TSP탐사의 개념도를 보여준다.

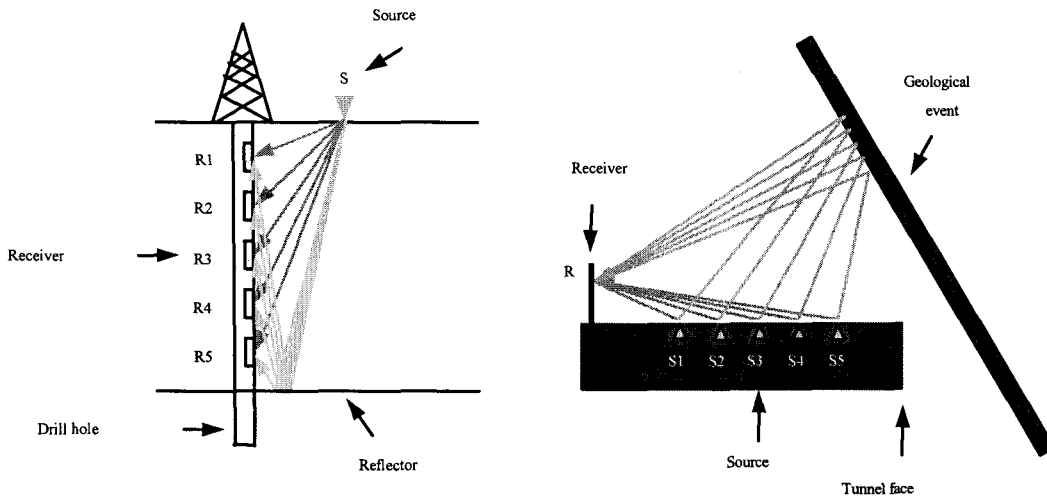


Fig. 1. Schematic diagram of VSP survey in oil prospecting and TSP survey applied in tunnel

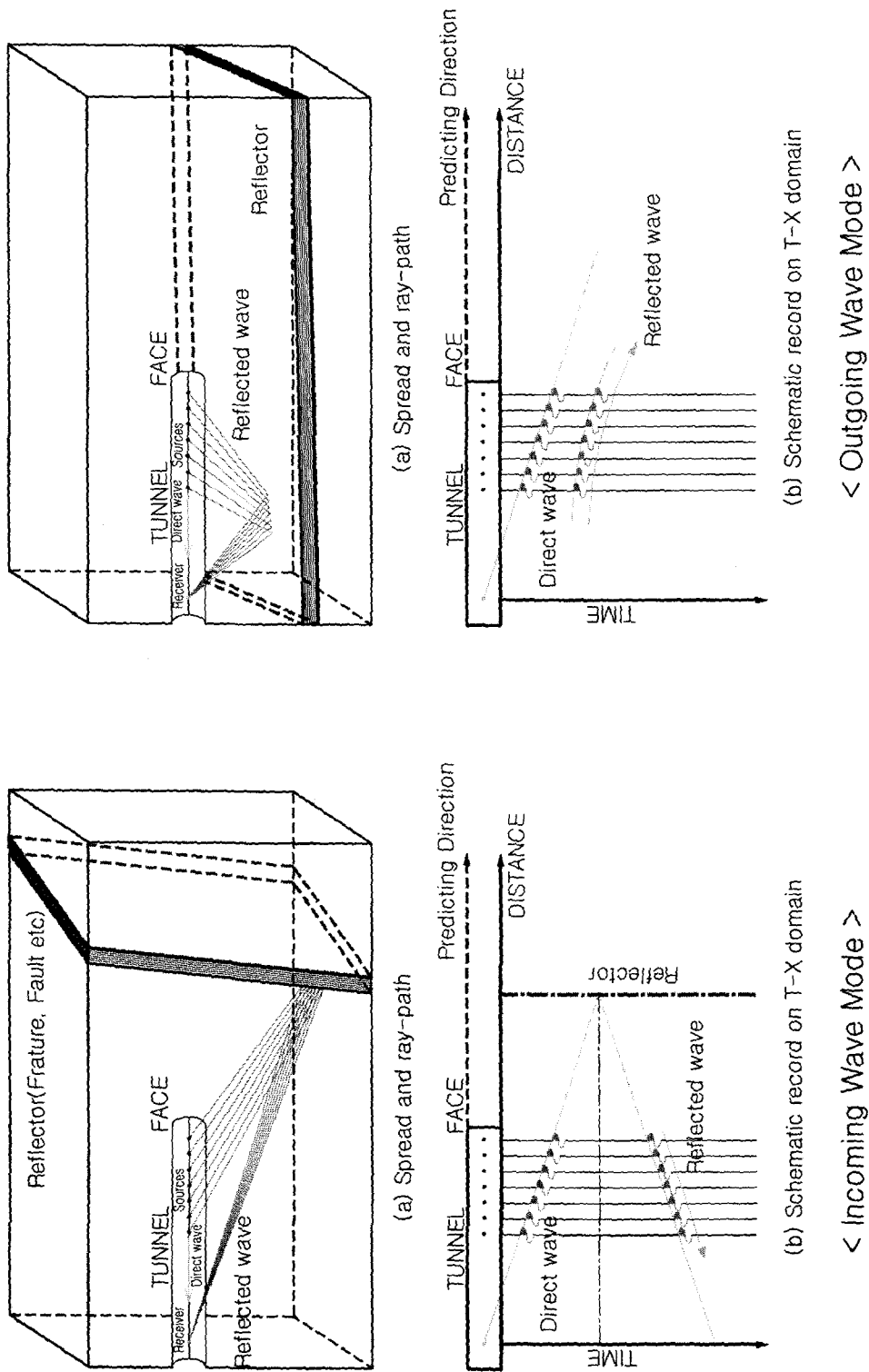


Fig. 2. Schematic diagram of TSP method

TSP탐사는 터널 전방에 있는 지질구조대의 위치 및 방향에 따라 두 가지 형태의 모드를 지닌다. 전방의 지질구조대가 굴착중인 터널과 거의 수직인 경우 일반적인 VSP탐사와 같이 반사파가 상향하는 형태의 탄성파궤적을 나타내며 반사면이 수평형태를 지닐 경우에는 반사법탐사와 같은 형태의 하향으로 구부러지는 탄성파궤적을 나타낸다. 이러한 두 가지 모드의 형태에서 TSP탐사는 터널전방의 단층파쇄대의 경우뿐만아니라 퇴적층에서의 층서 변화를 파악할 수 있다. Fig. 2는 TSP탐사의 두 가지 모드에 대한 개념도를 보여준다(Inazaki et al., 1996).

터널내에서 발파할 때 터널 벽면을 따라 진행하는 터널파는 지질구조대에서 반사해온 반사파의 신호를 교란한다. 터널파에 의한 낮은 S/N비를 높이기 위하여 수신기의 설치에 주의하여야한다. VSP의 개념을 터널에 응용할 때 터널 벽면에 설치한 지표탐사용 수신기의 설치에 터널파에 의해 심한 잡음을 보여주며, 이러한 잡음을 제거하기 위해서는 수신기를 터널파의 영향이 미치지않을 정도의 깊이로 인입하는 것이 필요하다. Inazaki et al.(1996)등이 시도한 터널 벽면에 다수의 수신기를 설치하고 1개소의 발파를 실시하는 탐사방법은 실제탐사적용의 측면에서 수신기의 잡음을 효과적으로 제거하는데 문제가 있으므로 효율적이지않다고 판단된다. 이러한 문제를 해결하는 효과적인 방법은 수신기 1조를 터널파의 영향을 받지않는 충분한 심도에 인입하고 다수의 발파공에서 발파를 실시하는 RVSP방식이 효율적이다(Sattel et al., 1992). 발파에의하여 터널내에서 발생된 터널파의 경우 약 1.5m정도의 깊이에서 거의 감쇠가되므로 수신기를 터널벽면에서 2m정도 안쪽에 인입하고, 수신기에서 터널 벽면에 수직방향인 성분을 제거하여 S/N비를 높인다. 반사파를 효과적으로 감지하기 위해 터널 벽면에 수평인 2축 수신기를 사용하여 수신감도를 높이고 S파를 분석한다.

진원으로는 20~30g정도의 다이내마이트가 효과적이며, 수신기의 보호를 위하여 첫번째 발파는 수신기로부터 20여m 전방으로부터 시작하는 것이 좋다. 발파는 1.5m정도의 공을 천공하여 화약을 장약한 후, 물이 흐르는 호스를 발파공에 넣어 물로 전색하는 것이 좋다. 정확한 자료획득을 위하여 20여개 정도의 발파공을 설치하며, 발파공의 간격은 1~1.5m 정도로 하고, 물로 전색을 할 경우 물이 충분히 고일 수 있도록 약 10° 정도 하향으로 현장여건에 맞게 천공한다. 높은 해상도를 위하여 높은 주파수를 발생시킬 수 있는 화약이 좋으나 일반적으로 시공현장에서 사용하는 화약을 사용하여도 무방하며, 뇌관은 시간지연이 없는 순발 뇌관을 사용한다.

발파공에서 수신기에 이르는 직접파로부터 수신기와 발진공사이의 암반에 대한 탄성파 속도를 구할 수 있다. 뇌관의 지연시간이 없다면 1 개공으로부터도 암반속도를 구할 수 있으나 여러개의 공으로부터 직접파의 기울기를 구하여 암반속도를 구하는 것이 더욱 정확하다. 지질구조대로부터 반사된 탄성파에 의한 지질구조대의 성격은 탄성파의 상의 변화로부터 구한다. 불연속면에서 탄성파의 반사는 임피던스(속도 x 밀도)의 변화와 관계가 있다. 매질은 임피던스의 차에 의하여 반사가 이루어지며 이러한 임피던스의 차이에서 반사계수 및 투과계수를 구한다. 반사계수의 값이 크면 반사되는 에너지가 많은 것이며 작으면 투과되는 에너지가 많은 것을 의미한다. 탄성파가 전파되는 매질이 약한 매질에서 강한 매질로 변할 때, 반사계수는 양의 값을 가지며 탄성파궤적상에서는 상의 변화가 없고, 역의 경우는 반사계수가 음의 값을 가지며 상의 변화가 있는 것을 이용하여 지질구조대의 성격이 단층파쇄대인지 암맥이나 암상의 변화가 있는 지를 파악한다(Fig. 3).

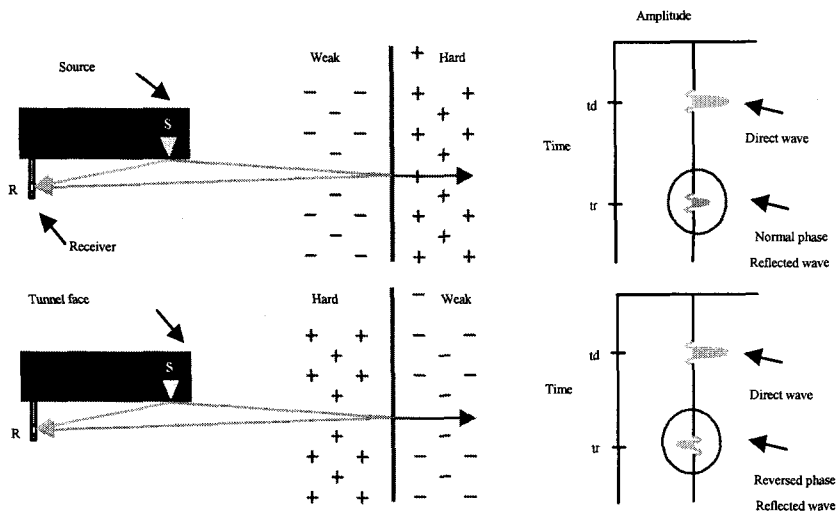


Fig. 3. Schematic diagram of wave propagation and phase change

탐사결과 해석을 위하여 지질구조대의 위치는 영상점법을 사용하여 얻을 수 있다. 영상점법은 지질구조대가 완전판상인 경우 영상점에서 최대에너지를 나타내므로 반사면을 해석하기가 용이하다. 영상점법은 반사면이 판상이라는 가정에서 각 탄성파에 나타난 동일한 반사면에서의 반사신호를 같은 거리로 갖는 점을 찾아 이 점을 영상점으로 하고 수신기와 영상점의 거리를 반으로 하고 수직인 면을 반사면으로 해석하는 방법이다. Fig. 4는 영상점법을 도시하고 있다.

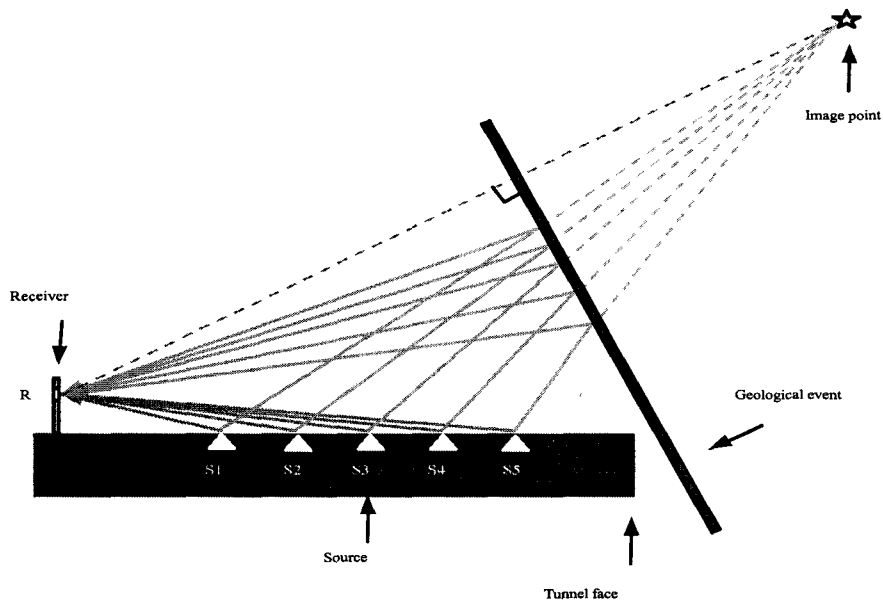


Fig. 4. Schematic diagram of image point method

실제 단층파쇄대와 같은 지질구조대의 경우 불연속면이 완전한 평면이 아니고 굴곡이 있는 것이 대부분이므로 회절중합법이 보다 해석에 적합할 수 있다. 회절중합법은 탄성파가 반사하는 불연속면의 위치를 파악하기 위하여 탄성파가 전파하는 전체지역을 불연속면에 의해 회절가능한 가상점원(회절점)으로 가정하고, 계산의 편리를 위하여 그 가상 점원들의 위치를 일정한 간격의 격자교차점의 위치로 나타낸다. 탄성파 궤적에서 구해진 반사신호의 기록시간과 직접파에서 구해진 암반의 속도로부터 회절점의 거리를 구하고, 두 초점으로부터 거리의 합이 일정하다는 타원의 정의를 이용하여 수신기와 발파공을 두 초점으로하고 같은 거리에 있는 타원상의 격자점을 회절되었을 가능성이 있는 잠재위치로 선정한다. 호이겐스의 원리로부터 반사파가 형성된 불연속면에서 2차 점원이 존재하고 이 점원에서의 강도는 반사계수와 일치한다. 각각의 발파로부터 얻은 불연속면의 가상회절점을 전체 발파에서 얻은 것으로 중첩하면 반사면에 의한 신호는 증폭되어 나타나고 다른 가상 위치의 것은 증폭되지 않는다. 증폭된 위치의 점들의 접선이 지질구조대의 위치 및 방향이 된다. Fig. 5는 잠재적 회절위치를 나타내는 타원의 중첩에 의한 구조대의 위치 및 방향을 결정하는 과정을 보여준다.

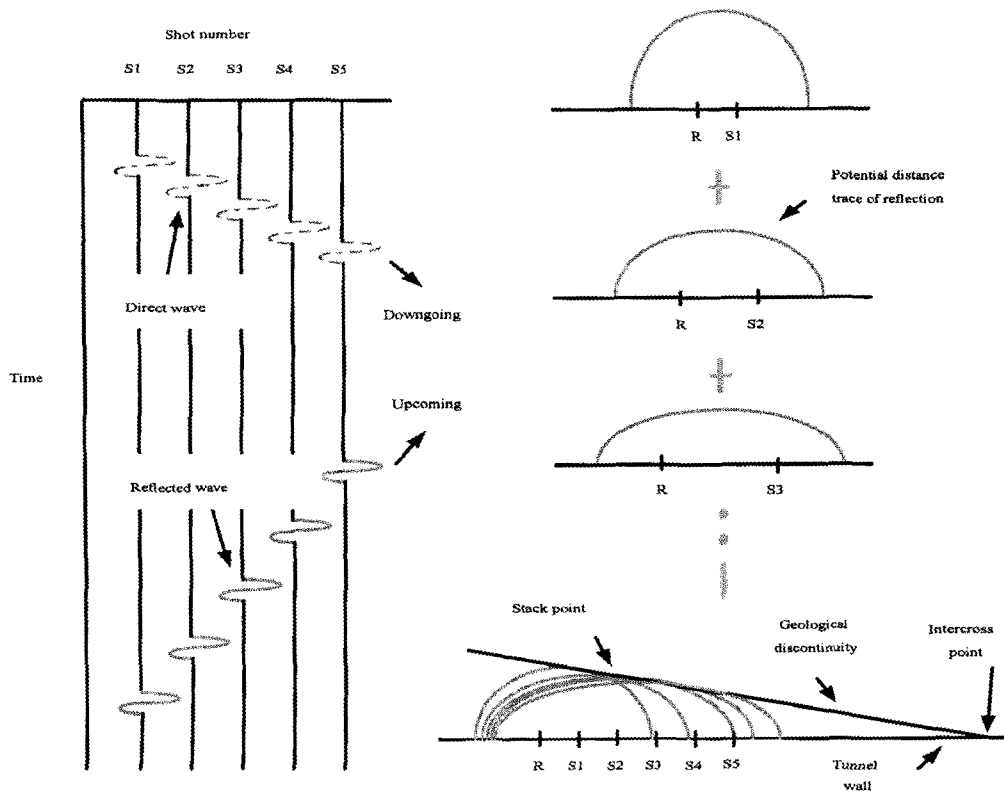


Fig. 5. Schematic diagram of diffraction stack method

3. 평택 지하LPG저장기지 사례

3.1 지질 개요

조사지역은 선캠브리아기의 경기 편마암 복합체의 서남측에 해당한다. 경기 편마암 복합체는 경기일원 및 서해안 당진, 홍성지역에 분포하는 변성암체로서 한국의 최고기 암층중의 하나이다. 이 변성암체는 수 차례에 걸쳐 구조운동과 변성작용을 받았으며, 이때 화성암류가 관입하였다. 조사지역 부근에 분포하는 암석은 기원암의 성분과 구조, 변성정도에 따라 화강암질 편마암, 흑운모 편마암, 석영운모 편암, 흑연 편암 및 석회질 편암등이며 이들의 상호관계는 불규칙적이다. 암맥류는 중성내지 염기성으로써 변성암 내에 파쇄대를 따라 관입되어 있다. 본 지역에 대한 지질도는 Fig. 6에 나타내었다.

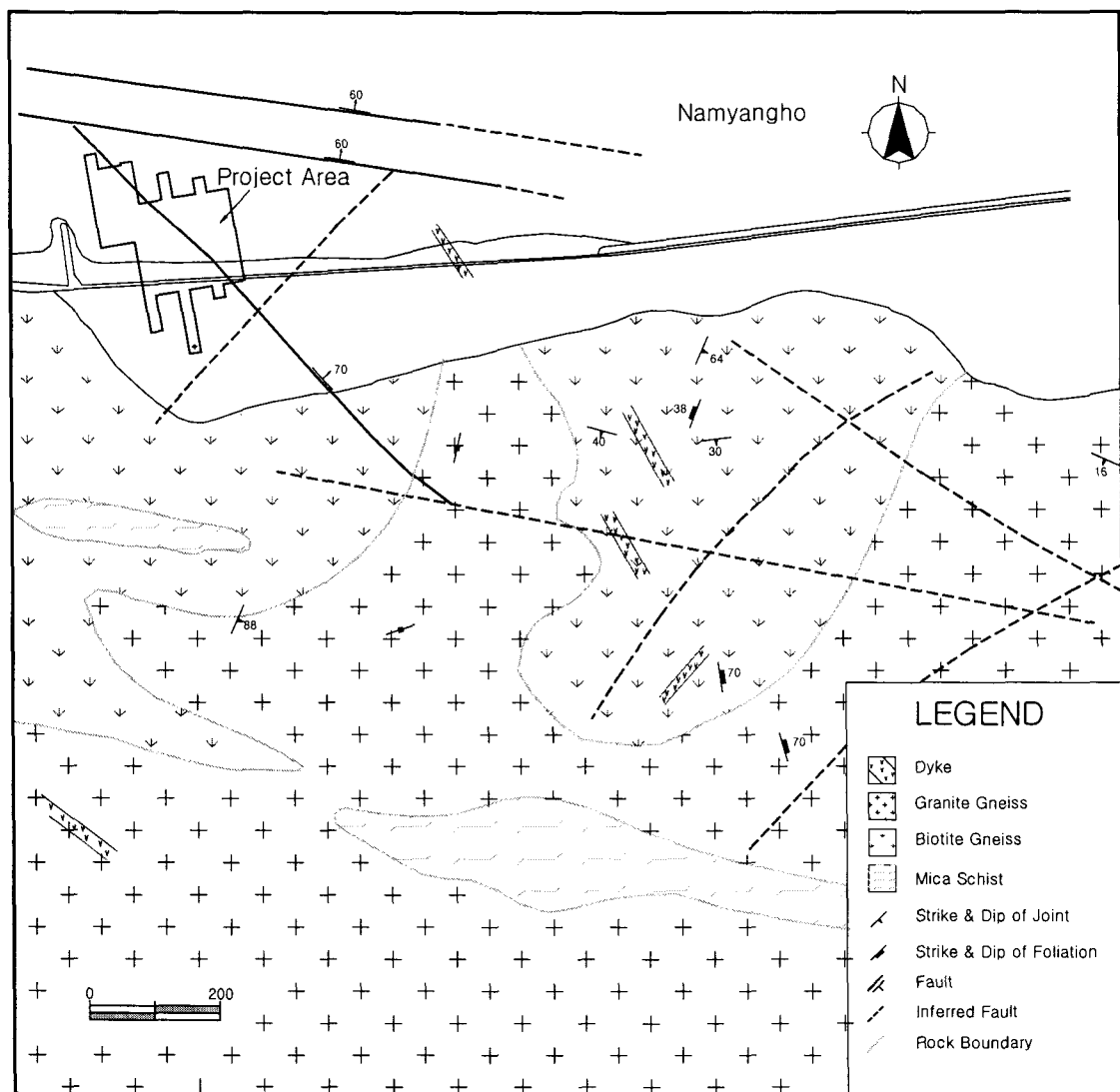


Fig. 6. Geological map of the survey area

진입터널 지역의 지질은 약간 풍화가 진행된 편마암류가 기반을 이루며, 염기성 암맥류가 편리 방향과 평행하게 혹은 가로질러 형성되어 있다. 편마구조는 NW-SE계열에 NE 방향으로 경사를 갖는 것이 주로 우세하게 나타난다. 이는 편암과 편마암의 경계부의 주향인 N60~70W, 경사 10~30NE와 일치한다. 기반암에 발달하고 있는 주절리군은 편마 구조와 평행한 엽리상 절리로 절리면은 비교적 신선하고 방해석이 얇게 피복되어 있다. N70~80E / 70~80SE의 절리군은 연장성이 매우 양호하며 대부분 방해석 맥이 피복 또는 1cm 미만으로 충전되어 있다. N5~25E / 45~75SE의 절리군은 기존 L-1 LPG지하저장공동 굴착시 나타났던 절리로 수상 탄성과 탐사로 인지된 N30~50E 방향성과 유사하다. N70~80E / 70~80SE의 절리군은 방해석과 점토질의 충전물이 존재한다. 이 절리군은 함수절리로 알려진 N60~70° W의 방향성과 거의 동서 방향으로 발달하고 있다는 점이 유사하다.

저장공동 주변의 암반은 편마암으로 대부분 편마구조가 현저한 호상편마암이나 국부적으로 편마구조가 거의 안보이는 화강암질 편마암등이 나타난다. 염기성 혹은 산성 암맥이 두께를 달리하며 나타나는데, 주로 NE계열의 주 절리와 평행한 방향성을 가지고 있다. 저장공동 북서부에서 남동부로 편마암과 경계를 보이는 편암은 하부에 나타나는데 경계면은 부분적으로 심하게 왜곡되어 있다. 또한 편마암과 편암의 경계부에 근접할수록 불규칙한 방향으로 방해석의 세맥이 발달하는 등 각종 맥암이 관입하는 경우가 많고 흑연층 내지 석탄층의 빈도나 두께가 증가하는 양상을 보이고 있다. 흑연층이 나타나는 구간은 주로 편마암중에서도 무색광물이 풍부하고 일부는 변질 작용에 의한 규화 작용 현상도 관찰된다. 이 암층의 절리면은 방해석과 점토 물질이 얇게 피복되어 있거나 산화철로 착색된 부분도 관찰된다.

저장공동 북단에 나타나는 주단층대는 N70~80W/ 60~65NE 방향을 가지고 있으며 여기서 파생된 소단층군이 N45W/ 65NE 와 N5E/ 25SE 방향성을 갖고 비교적 큰 규모의 전단 파쇄대를 형성하고 있다. 또한 이들 소 단층과 연결된 2차 파생 전단절리 혹은 소 단층이 곳곳에 발달하고 있어 전반적으로 복잡한 지질구조의 양상을 보인다. 편마암과 편암의 암경계부는 저장공동의 북동쪽을 향하여 경사져 있고 저장공동 중앙부는 편마암이 용기되어 있어 암경계부는 상당히 왜곡되어 있다. 암경계부는 주로 편암과 편마암 그리고 흑연층이 혼합되어 있든지 교호하는 특징을 보인다. 이러한 암질 조건 및 구조 양상은 전반적으로 부지 북단에 존재하는 단층대의 역할이 크며 변성작용 이전에 이들 암들은 각기 다른 모암으로 존재하고 있었음을 알 수 있다. 또한 변성작용과 단층작용 이후에도 지속적으로 소 단층이 파생되어 발생하였고 이러한 비교적 큰 불연속면을 따라 변질작용이 진행되어 온 것으로 판단된다.

3.2 TSP탐사

기본설계시 실시된 굴절법 탄성과 탐사 및 시추조사 결과 남양호 하부의 저속도대 및 단층의 존재는 확인되었다. 그러나 단층의 위치가 정확히 파악되지않아 저장공동의 북쪽 연장에 대한 안정성의 확보가 중요한 문제로 대두되었다. 남양호 하부의 단층대의 정확한 위치를 파악하기 위하여 탐사 당시 굴착이 진행된 진입터널, 수직수벽터널, 지하공동 공사용 터널에서 탐사를 수행하였다. 이러한 탐사 배치는 남양호 하부의 단층대에 대한 복합적인 정보를 획득하고 방향성에 대한 분석을 용이하게 하기위하여 실시하였다. 진입터널 지역에서 1차로 탐사를 수행하였으며, 수직수벽터널에서 2차로, 공사용 터널에서 3차 탐사가 진행되었다. 1 차탐사 결과에서 단층의 위치는 기본조사시 판단된 것보다 지하공동에 더 가까운 것으로 파악되었다. 단층의 발달상태와 방향성을 판단하기 위하여 지하공동의 서측끝단에 위

치하는 수직수벽터널에서 2 차탐사가 이루어졌다. 탐사결과 진입터널지역에서 파악된 단층과 같은 연장의 단층군이 감지되었고 전체 단층군의 연장분포를 확인할 수 있었다. 1차와 2차 탐사 중간부분의 공사용터널에서 3차탐사가 이루어졌으며, 이로써 공동의 안정성을 위협하는 남양호 하부의 단층군에 대한 전체적인 윤곽을 파악하였다. Fig. 7은 실시된 탐사위치를 기존 설계도면상에 도시하였다.

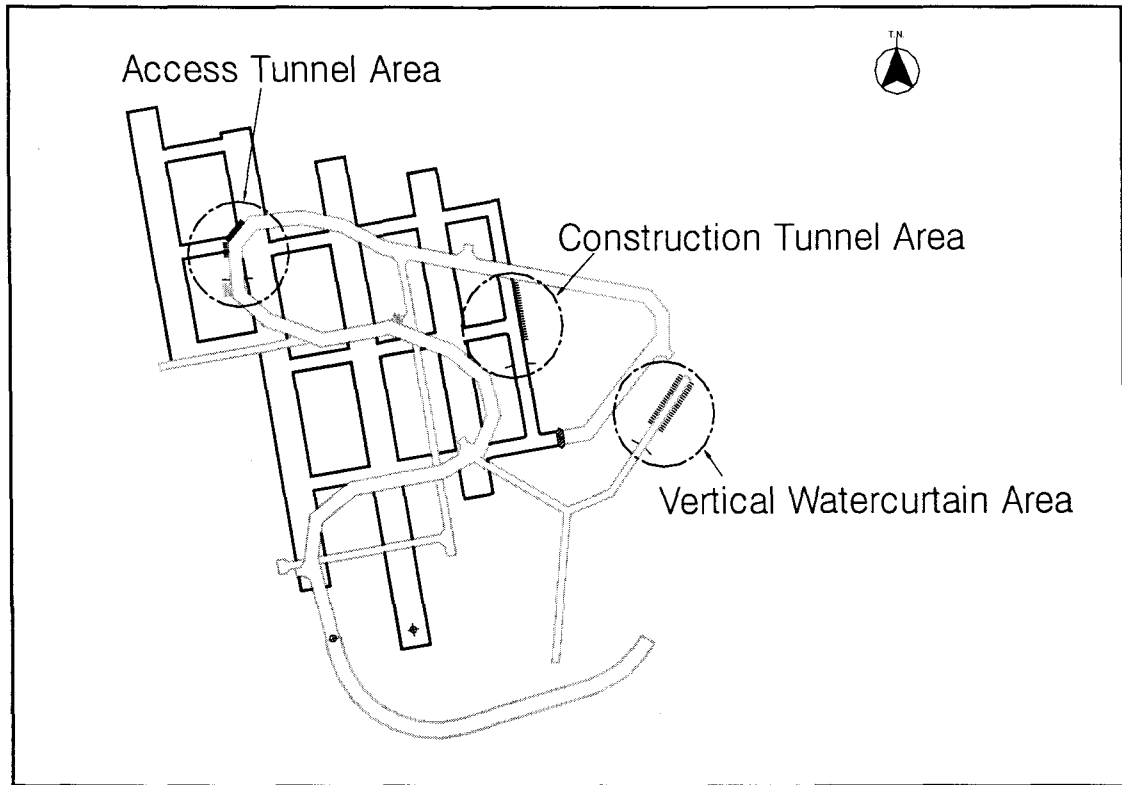


Fig. 7. Location map of TSP survey

3.2.1 탐사현황 및 자료취득

각 지역에서의 탐사는 주요 대상 지질구조대인 남양호 하부의 단층을 파악하기 위한 축선 배치를 계획하였다. 예상단층의 위치를 고려하여 단층대 파악이 유리하다고 판단되는 진입터널, 저장공동 공사용 터널, 수직수벽공터널의 3개 지역에 탐사축선을 선정하여 기하학적으로 효과적인 축선배열을 계획하였다. 각 축선은 TSP탐사의 원리상 예상구조대와 수직에 가까운 것이 해석에 용이하므로 주 대상인 남양호 하부의 단층대와 수직에 가깝도록 계획하였으며, 각 지역의 특성을 고려하여 수진기의 위치 및 발파공의 배열을 선정하였다.

탐사여건상 발파공과 수진기의 직선 배열이 어려운 곳에서는 기준선을 설정하여 자료처리 및 해석의 기준으로 하였으며, 경사가 있는 축선의 경우는 해석시 이를 고려하였다. 각 지역에서의 탐사를 위한 발파공의 배열과 수진기의 배치는 Fig. 8에 도시하였다.

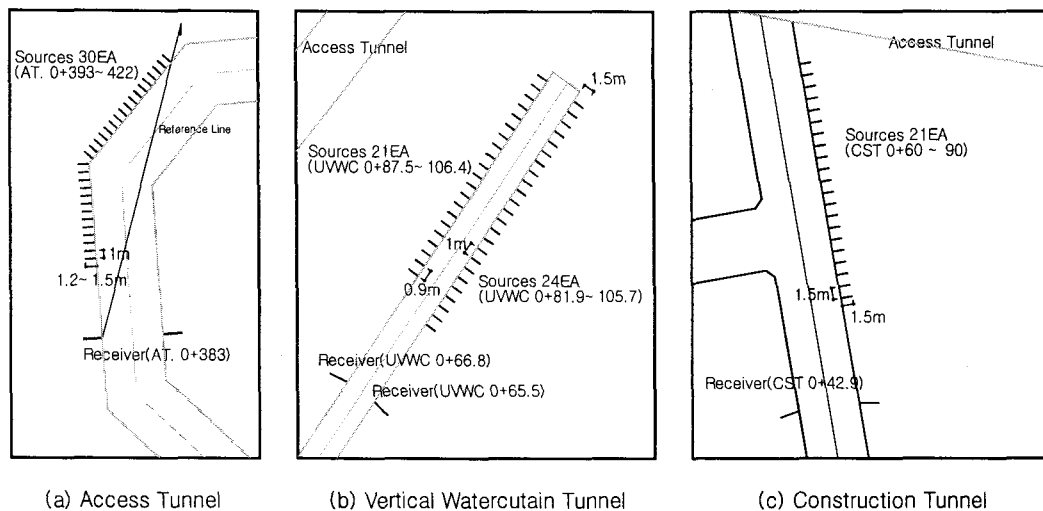


Fig. 8. Schematic diagram of source and receiver array

가) 진입터널지역

진입터널에서의 탐사는 진입터널의 선형 특성상 충분한 직선 구간을 확보하기가 어려웠으며, 주 탐사탐사대상이 되는 전방 단층을 적절하게 파악하기 위한 기하학적인 위치선정을 위하여 변곡점 A13(Sta. 0+382.39)에서 A15(Sta. 0+426.94) 구간을 선택하여 실시하였다(Fig. 8). 본 탐사구간에서 터널은 우측으로 굴곡되어 있으며, 12% 하향 경사져 있다. 탐사 당시 막장은 Sta. 0+490m에 위치하고 있었고, 수신기로부터 직선거리로 약80m 떨어져 있었으며, 수신기는 양측에 각각 1조씩 설치되었다. 발파공의 위치는 수신기에서 약10m 떨어져 좌측 벽체부에 약 1.0m 간격으로 30공을 천공(심도 약 1.2~1.5m)하여 각 공당 1발파씩 총 30발파가 이루어졌다. 화약은 수신기와 가까운 10공은 20g을 사용하였고 나머지 20공은 30g을 사용하였다. 전색은 모래로 하였고 추가로 물을 이용하였으며, 발파는 막장측의 발파공으로부터 차례로 실시하였다.

탐사구간의 터널이 우측으로 굴곡이 있어서 N10E방향의 기준선을 설정하여 발파공 및 수신기의 좌표를 설정하였으며, 발파공의 심도도 기준선으로부터 측정하였다. 발파공의 심도는 수신기를 기준으로하여 측정하였고, 천공은 진입터널 바닥으로부터 1m상부에 실시하였다. 탐사측선은 진입터널과 같이 하향으로 12% 경사를 이루고 있으며, 해석시 이를 고려하였다. 진입터널에서의 탐사는 일반적인 직선선형의 터널에서 실시하는 탐사와는 다르게 발파공의 배열에 굴곡이있고, 수신기 및 발파공들의 고도 또한 달라서 정확한 해석을 위하여 기하학적 관계를 고려해야하므로 수신기의 위치 및 발파공의 위치에 대한 측량이 수행되었다. 수신기는 수신범위를 적절히하기 위하여 터널벽면과 15° 후방으로 각도를 주었고, 각 발파공은 전색용 물이 충분히 차있을 수 있도록 하향 15°의 경사를 주어 천공하였다.

나) 수직수벽터널 복단부 지역

수직수벽터널에서의 탐사기준측선은 E1. -49m에서 수평으로 일렬로 위치하였고, 수직수벽터널의 축 방향으로 설정되었다. 수신기는 터널 벽면 양측에 각각 1조씩 설치하였으며, 좌우측 발파시 같은 위치에서 수신하였다. 전방 단층의 방향성을 파악하기 위하여 좌우측에서 각

각 발파를 실시하였고, 각각에서 수신된 반사파의 신호를 비교분석하였다. 발파는 터널 우측에서 24공, 좌측에서 21공을 실시하였는데, 우측 측선의 경우 수신기에 가까운 5공은 20g의 화약을 사용하였고, 나머지 19공은 30g을 사용하였다. 좌측 측선의 경우 수신기에 가까운 1공은 20g을 사용하였고, 나머지 20공은 30g을 사용하였다. 전색은 모래로 하였고, 추가로 물을 이용하였으며, 발파는 막장측의 발파공으로 부터 차례로 실시하였다. 발파공은 터널 바닥으로부터 1m상부에 천공하였으며 물의 전색을 위하여 15° 하향천공을 하였다. 발파공에 장약을 실시한 후 기하학적 정확성을 기하기위하여 화약의 깊이, 공간의 거리등을 측량하였다.

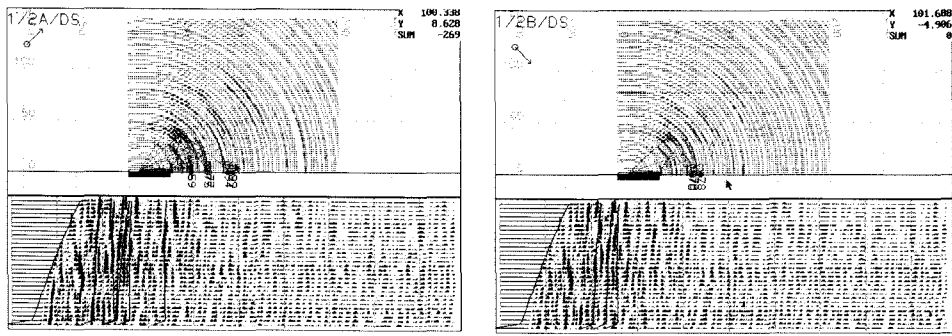
다) 저장공동 공사용 터널 지역

저장공동의 공사용 터널은 경사가 있어서 탐사시 경사에 의한 기하학적 관계를 고려하여 발파공 및 수신기 배열을 실시하였다. 수신기의 표고는 El. -122.5m이었고, 터널 경사는 저장공동 상단 갤러리에서 첫번째 벤치까지 12.2%, 첫번째 벤치에서 두번째 벤치까지는 13.3%였다. 공사용 터널의 우측에 발파공 21공과 좌우측에 수신기를 각 1조씩 설치하였다. 화약량은 수신기에 가까운 5공은 20g, 나머지 16공은 30g을 사용하였고, 전색은 모래로 하였으며, 발파는 막장측의 발파공부터 차례로 실시하였다. 천공은 바닥에서 1m상부에 실시하였으며, 발파공에 장약 후 화약의 위치를 측량하였다.

3.2.2 탐사 결과

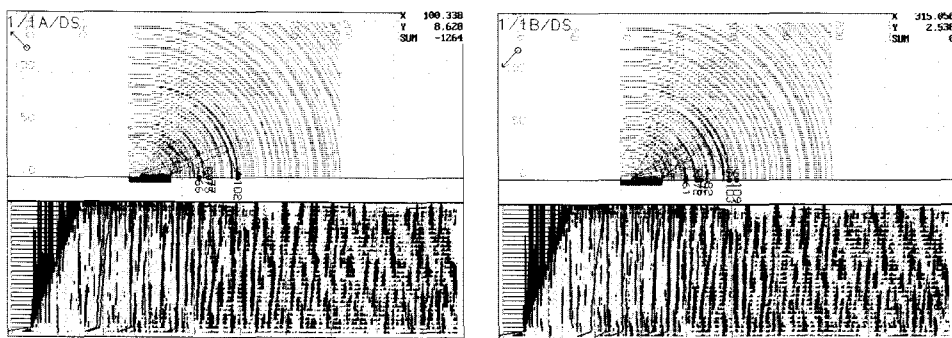
가) 진입터널 지역

탐사자료에 대한 해석은 좌,우측의 상,하부 대하여 실시하였다. 각 단면에 대한 해석을 종합하여 파쇄대의 위치 및 방향을 파악하였다. 각 발파공의 수신기로부터의 거리는 발파공으로부터 기준선상으로 수직투영한 위치에 설정하였으며, 고도 또한 기준선으로부터 거리로 하였다. 기준선의 방향은 N10E이며, 경사는 수신기에서 마지막 발파공까지 연장한 각도로 정하였다. 좌상부의 자료해석결과, 전방의 지질이상대의 위치는 수신기(Sta. 0+383)로부터 66m지점의 A군, 77m지점의 B군, 102m지점의 C군으로 모두 3개군이 나타났다. 좌하부에서 파악된 지질이상대의 위치는 수신기로부터 61m지점의 A군, 76m지점의 B군, 103m지점 C군의 3개군으로 좌상부와 동일한 단층대군이 파악되었다. 우상부의 자료해석결과는 좌측에서 보이지않았던 59m지점, B군의 77m지점, C군의 94m지점 3개군에서 단층대가 파악되었으며, B군인 77m지점의 신호는 불량한 압질과 양호한 압질이 교호하는 복잡한 양상을 나타내었다. 우하부의 자료는 대체로 약한 신호를 나타내며 B군인 78m지점의 단층대가 파악되었다. 각 단면으로부터 파악된 단층군은 3개군으로 분포되어있으며, 60~65° 내외의 경사각을 지니고 주향은 N70~80W로 파악되었다. 또한 이러한 3개군의 단층이외에 탐사지역 좌측의 지역에 1개의 지질이상대가 파악되었다. Fig. 9는 전방 4개 단면에 대한 회절중합도를 보여준다.



(a) Right upper part

(b) Right lower part



(c) Left upper part

(d) Left lower part

Fig. 9. Diffraction stack section of TSP survey at access tunnel area

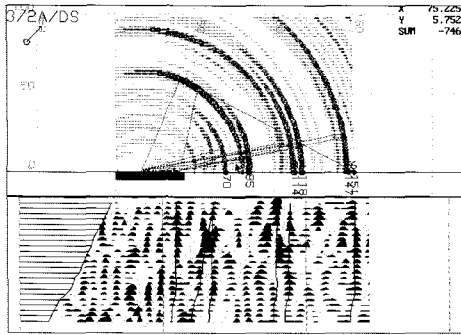
나) 수직수벽터널 지역

수직수벽터널 지역의 탐사는 좌우측에서 발파한 자료로부터 각각의 좌우측 상하부의 총 8개의 단면으로부터 해석을 실시하였다. 탐사축선의 기준선은 N35E였다.

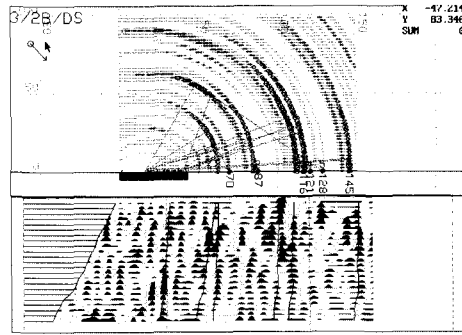
우측발파에 의한 좌상부의 자료해석결과, 파악된 지질이상대의 위치는 수진기로부터 전방에 A군의 68m지점, B군의 119m지점, C군의 150m지점에서 3개군의 단층대가 나타났다. 좌하부에서는 C군인 150m지점에서 단층대가 나타났고, 우상부에서는 70m전방의 A군, 85m지점의 B군, 114m, 118m, 147m의 C군이 파악되었으며, 우하부에서도 70m지점의 A군, 87m지점의 B군, 116m, 120m, 145m지점의 C군의 단층대가 파악되었다. 우측발파에서는 조사지역으로부터 3개군의 단층대가 파악되었다.

좌측발파에 의한 좌상부의 해석결과는 51m부근의 새로운 D군, 92m지점의 B군이 나타났으며, 좌하부에서는 48m지점의 D군, 77m지점의 A군, 97m지점의 B군과 148m 전방의 이상대가 나타난다. 우상부에서는 105m전방에 이상대를 보이며, 우하부에서는 71m지점의 A군의 이상대와 105m지점의 이상대를 보인다.

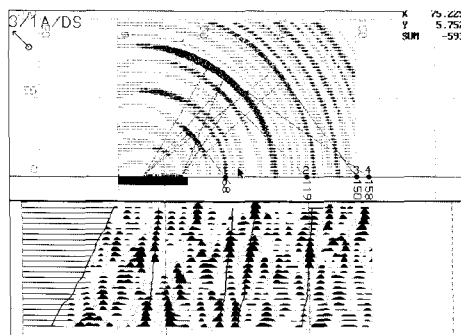
본 조사지역에서는 3개군의 단층대가 파악되었는데, 이들은 60~65° 내외의 경사각과 N70~80W방향의 주향을 보여주었다. 또한 이러한 3개군의 단층이외에 우측지역에서 1개의 지질이상대가 파악되었다. Fig. 10은 우측발파에 의한 전방 4개 단면에 대한 회절중합도를 보여준다.



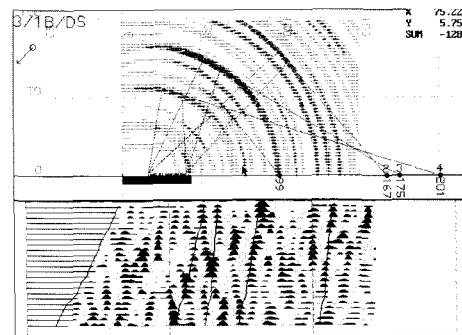
(a) Right upper part



(b) Right lower part



(c) Left upper part



(d) Left lower part

Fig. 10. Diffraction stack section of TSP survey at vertical watercurtain tunnel area (right side blasting)

다) 지하공동 공사용 터널 지역

공사용 터널지역은 1, 2차에서 실시된 탐사에 의해 파악된 단층의 연결성의 확인하기 위하여 실시하였다. 공사용 터널지역에서 확인된 단층대의 위치는 수진기로부터 전방 82~88m에 있는 A군, 95~100m에 있는 B군, 120~132m에 있는 C군이 파악되었으며, 154m 전방의 이상대도 파악되었다. 각 단면으로부터 파악된 단층군은 3개군으로 분포되어있으며, 60~65° 내외의 경사각과 N70~80W방향의 주향을 보여주었다.

라) 종합해석

3차에 걸친 탐사를 통해 남양호 하부에 존재하는 단층대의 위치를 파악할 수 있었다. 단층은 3개군에 걸쳐 나타났으며, 경사각은 60~65° 인 것으로 파악되었다. 탐사결과는 각 지역의 탐사에서 파악된 단층군의 연장을 통하여 얻어진 남양호 하부의 단층분포가 설계된 지하공동과 만나게 되는 것을 보여준다. 각기 다른 고도에서 실시한 탐사의 결과를 저장공동의 천단 고도인 El. -115m로 정리하여 Fig. 11에 도시하였다.

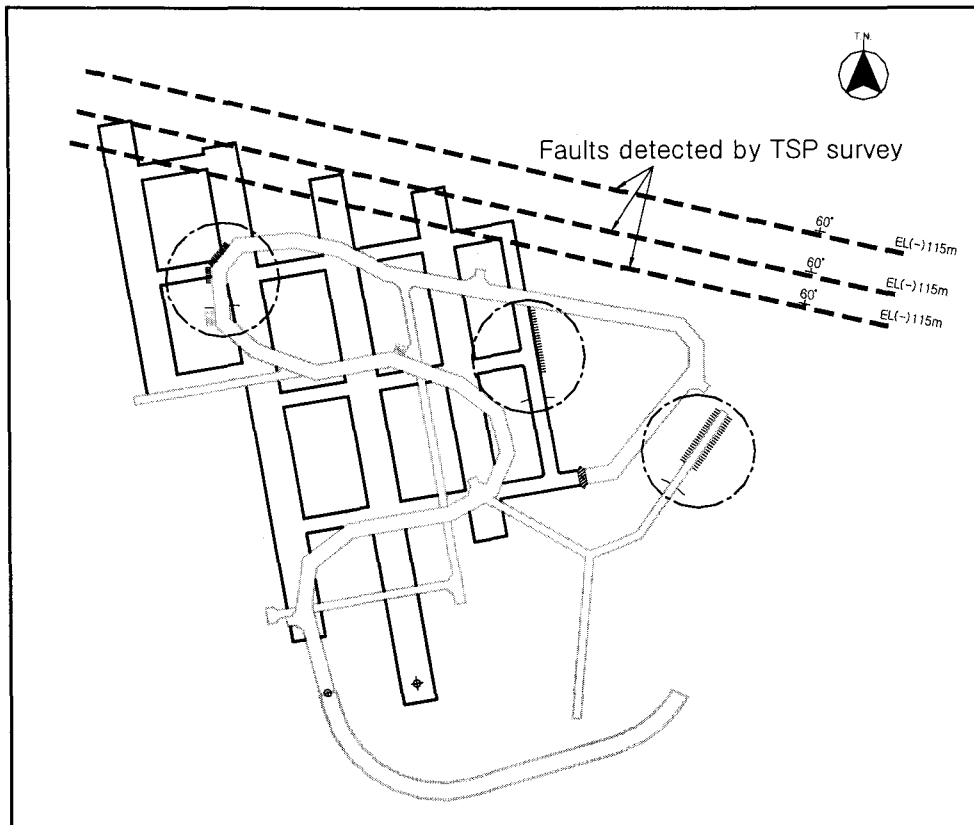


Fig. 11 Location map of fault at El. -115m from the result of TSP survey

3.2.3 터널내 시추조사

기본조사시 예측되었고 TSP탐사에서 파악된 저장공동 복단의 대규모 단층대와 암질상태를 확인하기 위하여 진입터널 굴착 중에 시추조사를 시행하였다. 시추작업은 단층대로 판단되는 불량 암질구간까지 굴진하는 것으로 하였으며, 시추공은 가능한 단층대의 폭을 파악할 수 있도록 단층대를 통과하려고 하였다. 터널내 시추를 위하여 진입터널의 측벽에 시추조사를 할 수 있는 챔버를 만들었으며, TSP에서 파악된 단층의 방향 및 위치를 고려하여 천공 방향을 선정하였다. 시추는 20~25° 각도로 하향 천공하였으며, 공경은 NQ 크기로 실시하였다. 조사공의 현황을 아래 Table 1에 요약, 정리하였다.

Table 1. Summary of borehole data

hole number	orientation	hole depth	elevation of top/bottom	hole size
UB-1	330/25	121.5m	-63.30m/-114.65m	NQ
UB-2	020/25	95.0m	-63.10m/-103.25m	NQ
UB-3	065/25	137.0m	-63.00m/-120.90m	NQ
UB-4	330/20	118.0m	-74.00m/-114.36m	NQ

시추 조사 결과 기본조사시 확인된 단층대가 남쪽에 위치하고 있으며, 단층대의 영향권에 속하는 함수 파쇄대를 확인하였다. 단층대는 UB-1에서는 천공깊이 118.2m, UB-2에서는 69m, UB-3에서는 125m, UB-4에서는 88m에서 감지되었다. 단층대로 판단되는 불량 암질 구간은 다량의 지하수를 포함하고 있었으며, 수질은 염분이 함유되어 있었다. Fig. 12는 조사공의 RQD분포를 보여주며, 확인된 단층의 위치는 Fig. 13에 도시하였다.

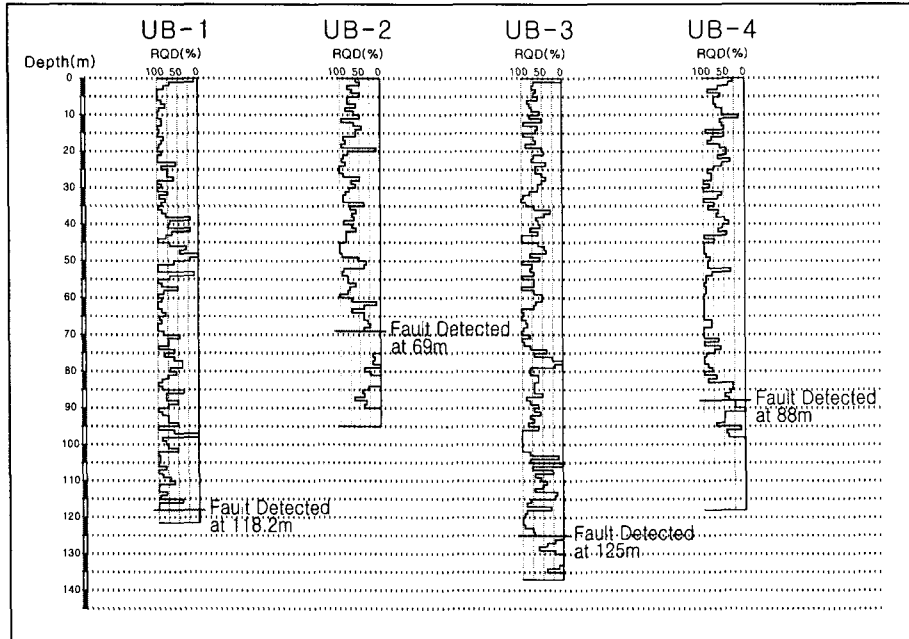


Fig. 12. RQD distribution of borehole

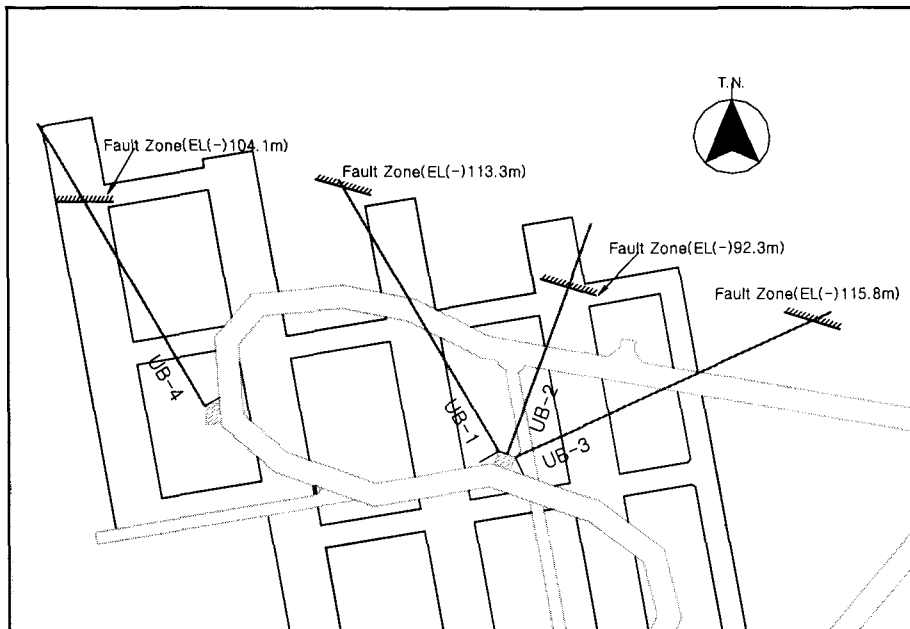


Fig. 13. Location map of borehole and detected fault from borehole

3.2.4 결과종합 및 설계변경

3차에 걸친 TSP 탐사 및 터널내 시추조사 결과, 지하저장공동의 북단에 위치하고 남양호 하부에 존재하는 단층대는 N70-80W/60-65NE의 방향성을 지니며, 여러개의 지질이상대를 포함한 대규모의 파쇄대로 이루어진 것으로 파악되었다. TSP탐사에서 얻어진 단층대의 위치는 시추조사 결과를 통하여 확인되었으며, 시추조사 결과와 종합하여 단층대의 분포 상황을 정확히 파악할 수 있었다.

단층대는 기존설계상의 저장공동 최북단에 걸쳐나타나는 것으로 파악되어 저장공동의 안정성에 영향을 줄 것으로 판단되었다. 단층파쇄대의 영향 거리를 고려하여 저장공동의 안정성을 확보하기위해서 저장공동의 북단과 단층파쇄대의 이격거리를 지하공동폭의 2배정도인 30m 이상되도록 설계를 변경하였다. 또한 진입터널도 단층과 너무 근접하여 시공상 어려움이 예상되어 기존설계보다 남단에 위치하도록 변경하였다.

TSP탐사와 시추조사 결과를 종합한 단층대의 위치 및 이에따른 설계변경안은 Fig. 14에 도시하였다.

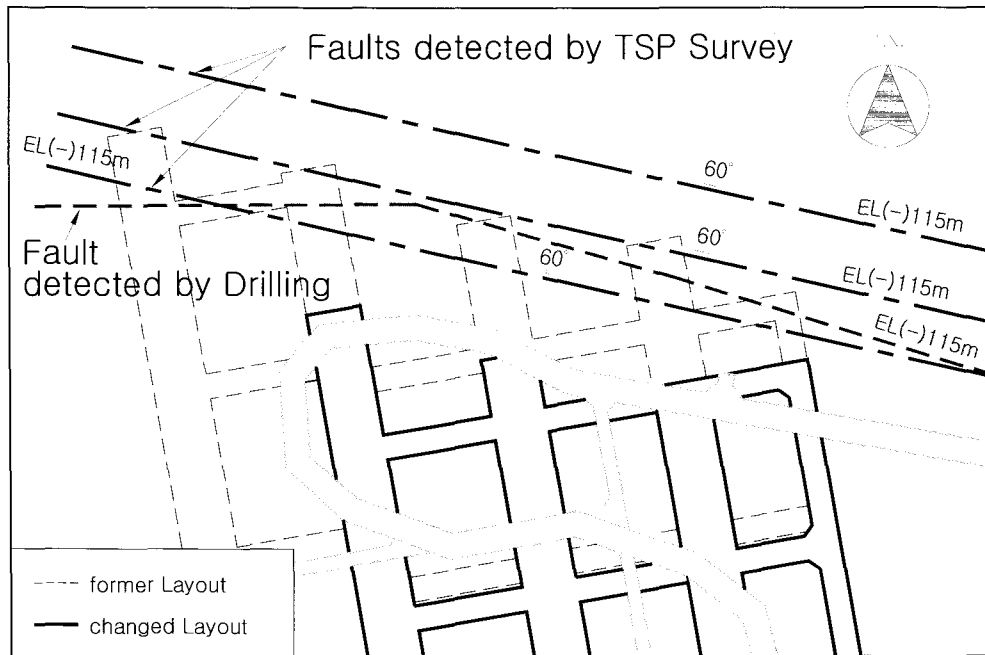


Fig. 14. Location map of fault detected by TSP and borehole survey and design alternatives

4. 문의재터널 사례

4.1 개요

문의재터널은 강원도 삼척군 도계읍에서 노곡면을 잇는 도로터널이다. 최상부인 문의재는 해발 963.0m에 이르며, 이곳에서 터널 계획고까지는 200m이상의 토피를 지니고 있다. 시추조사의 경우도 갱구부에서 주로 이루어졌으며, 중간지역의 시추공도 심도60m정도로 터널

심도의 지질조건을 파악하는 데는 한계가 있었으며, 또한 기본 설계시 굴절법 탄성파탐사가 이루어졌으나 결과는 주로 상부 풍화대의 층서파악에 대한 것이며, 두터운 토피로 터널 굴착심도에 대한 정밀한 정보는 얻지 못하였다.

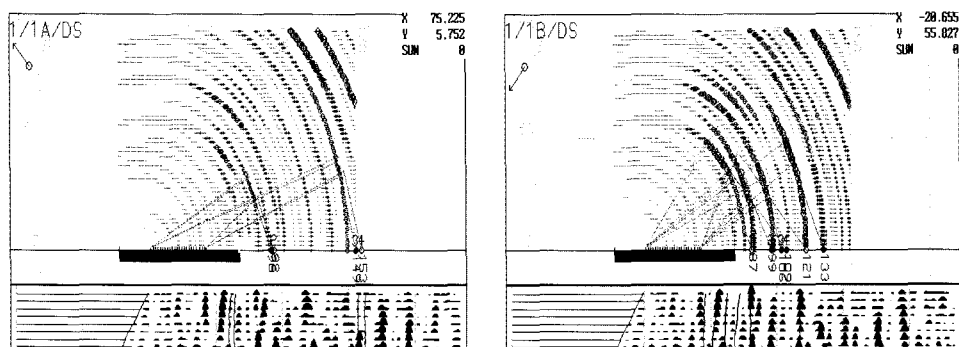
본 터널은 Sta. 67+000지역부터 당초 예상되었던 암반조건과는 차이를 보이기 시작하였으며, 굴착이 진행됨에 따라 절리발달이 심하고 파쇄대가 반복적으로 나타났다. 기존 설계에서 예측하지 못하였던 지질구조대로 인하여 굴착 및 보강방법의 변경이 요구되었고, 터널전방의 암질과 단층파쇄대의 유무를 파악하여 지보에 대한 사전준비 및 설계변경구간 등을 판단하기 위하여 TSP탐사를 실시하였다. 문의재 터널에서 TSP탐사는 6회에 걸쳐 실시되었으며, 그 중 1가지 사례를 소개한다.

4.2 TSP탐사 현황 및 자료취득

발파는 터널 우측에서 24공을 실시하였고, 화약은 수진기에 가까운 5공은 20g을 사용하였으며, 나머지 19공은 30g을 사용하였다. 발파공에 장약 후 발파 위치를 정확히 파악하기 위하여 화약의 위치를 측량하였다. 전색은 물을 이용하였으며, 발파는 막장 측의 발파공으로부터 차례로 실시하였다. 탐사시 발파공 위치는 Sta. 67+05~69+00이었다. 수진기는 발파의 충격으로부터 보호하기 위하여 최초 발파공에서 21m후방 (Sta.70+01)에 위치하였고, 터널 양측 벽에 각각 1조씩 설치하였다. 탐사당시 터널의 막장은 Sta.66+14.2에 형성되어 있었다.

4.3 탐사결과 및 설계변경

탐사자료에 대한 해석은 회절중합법을 이용하였고, 터널 전방의 단층 및 파쇄대의 존재 유무와 위치파악을 중심으로 결과해석을 실시하였다. 탐사 결과 본 지역은 불량한 암질대가 10~20m간격으로 반복하여 나타나며, 암질의 변화가 심하였다. 지질이상대는 주로 좌측에서 탐지되었고, 이는 조사지역 지질구조대의 주향이 대체적으로 터널 축으로부터 우측으로부터 기울어져있는 것이 우세하다는 것을 보여준다. 자료해석결과 불량암질의 지질이상대는 터널 위치 Sta. 65+14, 65+03, 65+02, 64+15, 64+12, 64+00, 63+08, 62+12에서 터널과 조우하게 된다. 탐사자료에 대한 회절중합해석은 지질이상대가 잘 나타난 좌측 상하부의 자료를 Fig. 15에 도시하였다.



(a) Left upper part

(b) Left lower part

Fig. 15. Diffraction stack section of TSP survey at Muneuje tunnel

TSP탐사 자료와 탐사 당시의 터널 막장관찰을 종합하여 지보패턴 구간에 대한 변경을 실시하고 변경된 지보에 대한 준비를 하였다. 탐사지역의 최초 설계는 탐사 당시의 막장으로부터 IV등급으로 진행하다가 Sta. 64+00에서 III등급으로 되어있었다. TSP탐사결과 Sta. 65+06에서부터 Sta. 63+18까지는 파쇄대가 밀집해있는 것으로 판단되어 V등급으로 변경하였으며, Sta. 63+18부터는 IV등급으로 변경하였다. 지보패턴은 터널굴진에 따른 막장관찰 결과를 종합하여 굴착 결정하였다. TSP탐사에 의해 파악된 지질이상대와 변경된 지보패턴의 결과를 Fig. 16에 도시하였다.

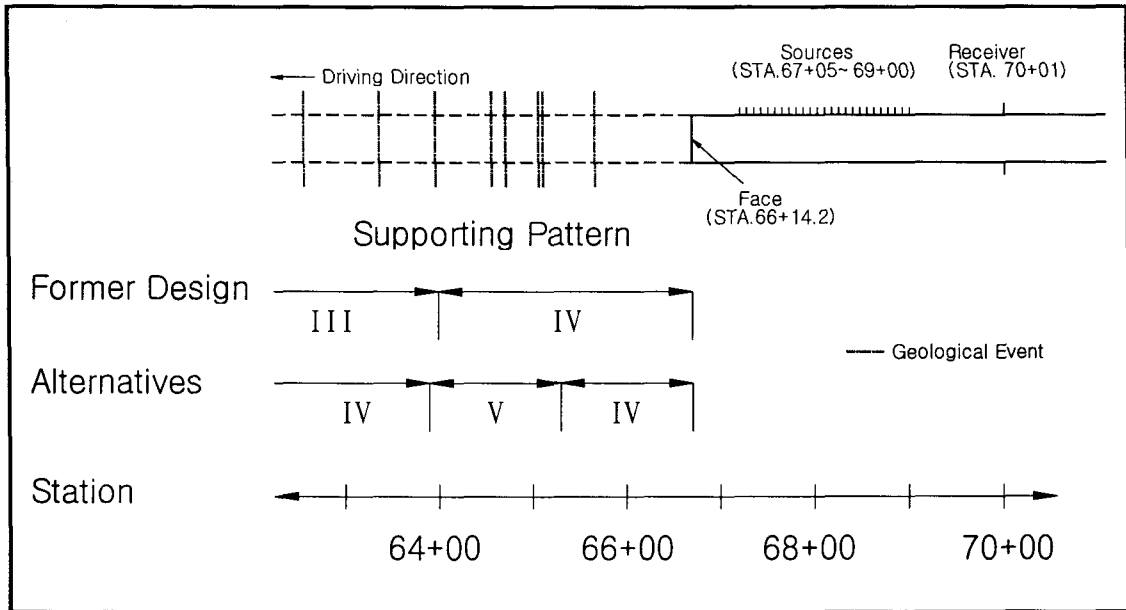


Fig. 16. Result of TSP survey and design alternatives

5. 결론

평택 LPG저장기지와 문의재터널에서 살펴본 바와 같이 설계단계의 사전조사에서 파악하지 못한 지질구조에 대해 시공 중의 TSP탐사는 시공에 필요한 효과적인 정보를 제공한다. TSP탐사는 지하공동의 안정성에 영향을 주는 지질이상대의 위치를 파악하기 위하여 지하저장공동의 복잡한 배치구조를 이용해 수신기와 발파원의 다양한 기하학적 배치를 설계하여 지질이상대의 입체적인 분포를 파악하거나 터널 전방의 지질이상대가 터널 굴착 중에 교차하게 되는 위치를 파악할 수 있다.

남양호하부에 위치하는 평택 LPG저장기지는 남양호의 존재로 인해 시추조사 및 지구물리탐사에 한계를 가지고 있었다. 사전조사단계에서 실시된 굴절법 탄성파탐사는 남양호 하부의 속도분포를 보여주지만 저장공동의 정확한 배치에 필요한 정보를 제공하기에는 부족하였다. 사전조사단계의 시추조사등 제반 조사는 남양호 하부 단층의 존재를 확인하였지만 정확한 방향성 및 위치를 확실하게 파악하지는 못하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 시공 중에 다양한 형태로 탐사를 실시하여 단층의 위치 및 방향성 등을 파악할 수 있었고, 터널내 시추조사의 결과와 종합하여 단층대 분포에 대한 확실한 윤곽을 얻을 수 있었다. 결과를 종합하여보면, 지하저장공동의 복단에 위치하고 남양호 하부에 존재하는 단층대는

N70-80W/60-65NE의 방향성을 지니며, 3개군 정도의 지질이상대를 포함한 대규모의 단층 파쇄대로 이루어진 것으로 파악되었다. TSP탐사와 터널내 시추조사의 결과에 따라 당초 설계안에서 지하공동의 복단 연장을 변경하였다.

문의재터널은 험준한 산세와 두터운 토피로 지표지구물리탐사 및 시추조사에 어려움이 있어 설계단계에서 실시한 조사에서는 터널 전 노선에 걸쳐 정확한 지질조건을 파악하지 못하였다. 설계단계에서 굴절법 탐성과 탐사 및 갱구부와 중간부에서 시추가 이루어졌으나 중간부 시추의 경우 천공 심도가 터널 계획고에 이르지 못하고 터널 전체의 지질이상대를 파악하기에는 불충분하다. 문의재터널에서의 TSP탐사 결과, 설계단계에서 예상하지 못했던 파쇄대군을 파악하여 불량 암질구간에 대한 추가 지보 대책을 수립한 후 굴진을 진행하였다.

상기한 두 가지의 사례에서 살펴본 바와 같이 TSP탐사는 사전 조사에서 인지하지 못한 지질이상대를 파악하는 데 매우 효과적이며, 특히 터널 굴착에 큰 영향을 주는 단층파쇄대의 파악에는 매우 효과적임을 보여준다.

참고문헌

Cha, S. S., Lee, J. M. and Nam, K. C., 1996, Prediction of discontinuity and determination of rock properties for effective tunnel construction using vertical seismic profiles applied in tunnel: Proceeding of the Korea-Japan joint symposium on Rock Engineering, p. 269-273

Hardage, B. A., 1992, Crosswell Seismology and Reversed VSP: Geophysical Press, London

Inazaki, T., Kurahashi, T. and Research Group on HSP, 1996, Imaging and Characterizing fractures ahead of tunnel face using in-tunnel HSP method: Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, p. 597-600

Sattel, G., Frey, P. and Amberg, R., 1992, Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods-pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland: First Break, vol. 10, p. 19-25