

## 터널설계를 위한 모량단층의 지질공학적 연구

# An Engineering Geological Study of Moryang Fault for Tunnel Design

---

방 기 문 (Ki Moon Bang)  
우 상 우 (Sang Woo Woo)

(주)대우엔지니어링 지반공학부 부장  
(주)대우엔지니어링 지반공학부 대리

---

### 요약 / ABSTRACT

본 연구는 터널설계와 관련하여 모량단층의 지질공학적 기본특성을 규명하고 터널설계시 기초자료 제공을 목적으로 수행되었다. 울산광역시 울주군 상북면 덕현리 덕현천 일대에 발달하는 모량단층의 특성을 규명하기 위하여 인공위성 영상을 이용한 선구조 분석, 지표지질조사, 전기비저항 탐사 및 3차원 해석, 시추조사, 광물분석 및 K-Ar절대연령측정 등을 수행하였다. 연구지역내에서 모량단층의 주향은 N20~30°E, 경사는 70~90°NW이고 단층폭은 약 20~60m, 최대 80m, 깊이는 50m이상인 것으로 규명되었다. 단층점토의 K-Ar 절대연령은  $5,700 \pm 1.129$ 만년,  $1,900 \pm 0.380$ 만년으로 측정되었으며, 수압파쇄시험 결과 최대수평응력의 방향은 N25°E, N30°E로 모량단층의 주향과 일치하였다.

**주요어** : 모량단층, 전기비저항, 3차원 해석, K-Ar 절대연령측정, 수압파쇄시험

This study was for characterizing the engineering geological properties of Moryang Fault, and providing the basic data for tunnel design. Land-sat image analysis, geologic surveys, resistivity prospecting and 3-dimensional analysis for results of resistivity prospecting, core boring, mineralogical identification and chemical analysis for the bedrock, and K-Ar age dating for fault clay were carried out for the study of Moryang Fault which is located at Duckhyunri Sangbukmyun Uljinkun Ulsan metropolis. As a result of the study, it was shown that strike/dip was N20-30°E/70-90°NW, width of fault ranged from 20 to 60m(maximum 80m), and depth was more than 50m. K-Ar age dating results of fault clay were  $5,700 \pm 1.129$ Ma and  $1,900 \pm 0.380$ Ma. Hydraulic fracturing test results showed the principal stress direction similar to the strike of Moryang Fault.

**Key Words** : moryang fault, 3-Dresistivity survey, K-Ar age dating, hydraulic fracturing test.

## 서 언

양산단층은 한반도 남동부 경상분지내 부산에서 양산, 경주, 영해 등을 북북동-남남서 방향으로 통과하는 총 연장 200km의 한반도 대표적인 단층의 하나로 그 주변에 같은 주향의 모량단층, 동래단층, 일광단층을 포함하는 양산단층계를 형성한다. 최근에 이 일대에 위치하는 원자력 발전소들의 지진위험도와 관련하여 양산단층계에 대한 지질학적, 지진학적 연구가 활발하게 수행되었다. 많은 연구 결과들에서 양산단층계는 활성단층(이기화, 김영하 등, 1984)일 가능성이 높은 것으로 보고되었다.

따라서 이 지역에 건설되는 도로, 터널, 교량 등 주요 구조물의 설계 및 시공시에는 단층운동에 의한 지진 영향을 고려하여야 하며, 특히 지반조사시 단층의 방향, 규모, 영향범위 등에 대한 정확한 규명이 필요하다.

본 연구는 국도확장 및 선형개량을 위하여 건설되어지는 장대터널설계와 관련하여 터널계획선과 만나는 단층대의 지질공학적 기본특성을 규명하고 터널설계시 기초자료로 활용토록 하였다.

연구지역의 위치는 울산광역시 울주군 상북면 덕현리 살티마을 주변 덕현천 일대로 가지산(1,240m)과 능동산(983m) 사이의 24번 국도와 69번 지방도가 인접하는 지역이다(Fig. 1).

조사는 기존 문헌 자료 수집 및 분석, 인공위성 영상 판독 등을 통하여 단층의 개략적인 분포특성을 파악하고, 물리탐사와 시추조사등의 세부조사 계획을 수립하였다. 세부조사는 지표지질조사, 전기비저항탐사, 시추조사 등을 수행하였으며 채취된 시료에 대하여 광물분석, 실내암석시험, 절대연령측정 등을 수행하였다(Fig. 2).

## 지 질 개 요

연구지역은 백악기 유천층군의 화산암류와 불국사 관입암류 등으로 구성되어 있다.

유천층군은 하부의 안산암질암과 상부의 유문암질암으로 크게 나눌수 있는데 본역에는 안산암질암만이 능동산 정상 동쪽 69번 지방도 절취 사면 및 계곡에서 관찰된다. 안산암질암은 주로 암록색, 녹회색의 안산암, 석영안산암, 안산암질 각력암 등

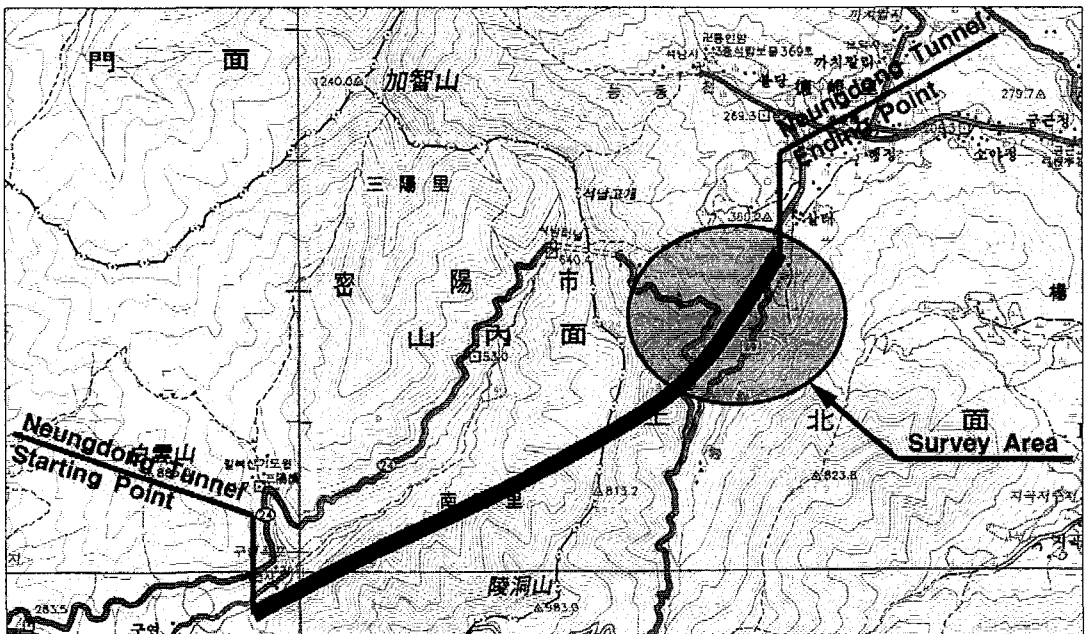


Fig. 1. Location map of the study area.

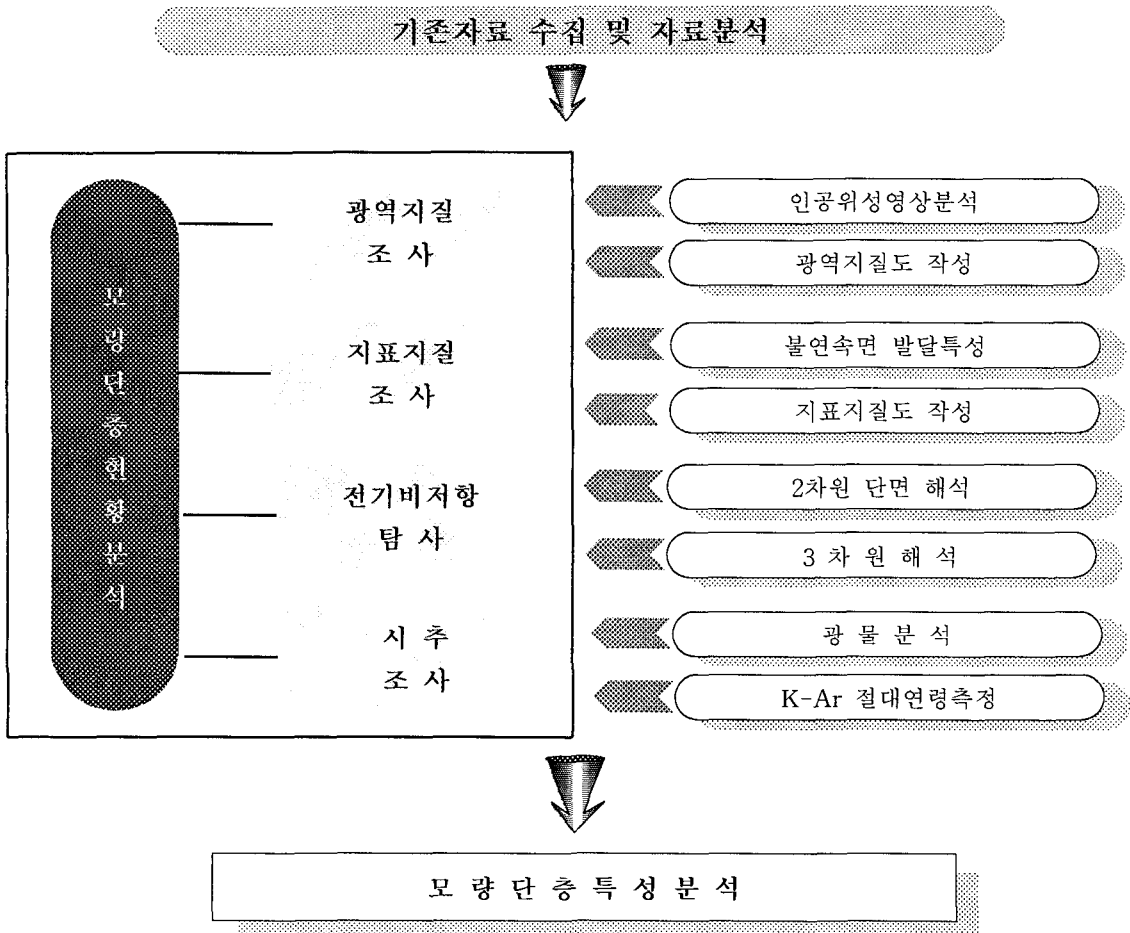


Fig. 2. Flow diagram of the surveys.

로 구성되어 있다.

화강암질암류는 주로 흑운모화강암, 각섬석 흑운모 화강암으로 나타나며 특히 안산암질암류의 접촉부에 이를수록 세립 내지 중립의 반상화강암, 미문상 화강암, 화강반암 및 화강섬록암을 보여준다 (Fig. 3).

모량단층은 양산단층 서측에 북북동-남남서 방향으로 발달하며 김해시에서 울주군 소호리까지 대략 48km의 연장이 확인되는 것으로 알려져 있고 (자원연구소, 1998), 양산단층에 비하여 단층대의 폭이 좁으며 길이가 짧다.

석남사를 중심으로 그 이남과 이북에서 단층의 표출형태를 달리하고 있으나 석남사 이남지역에서는 이천 휴양림 계곡 등 단층의 발달이 현저하고,

사면노두의 파쇄대에는 10~20cm의 두께를 갖는 단층비지가 관찰되기도 한다.

석남사 이북지역에서는 단층의 표출이 현저하지 않고, 단층발달이 다소 약해 실제 야외에서 뚜렷한 단층의 증거를 관찰할 수 없고, 북쪽에서의 연장성이 다소 희미해지는 양상을 보인다(최한우, 강태우, 1999).

본 연구지역은 석남사 남쪽에 인접한 울주군 상북면 덕현리 지역으로 단층계곡의 표출이 비교적 현저하고 풍화대가 폭넓게 분포하고 있다. 부분적으로 모량단층의 주향 및 경사와 일치하는 방향으로 염기성 암맥이 발달하여 있으나 단층비지, 단층암 등 단층의 뚜렷한 증거가 야외에서 관찰되지는 않았다.

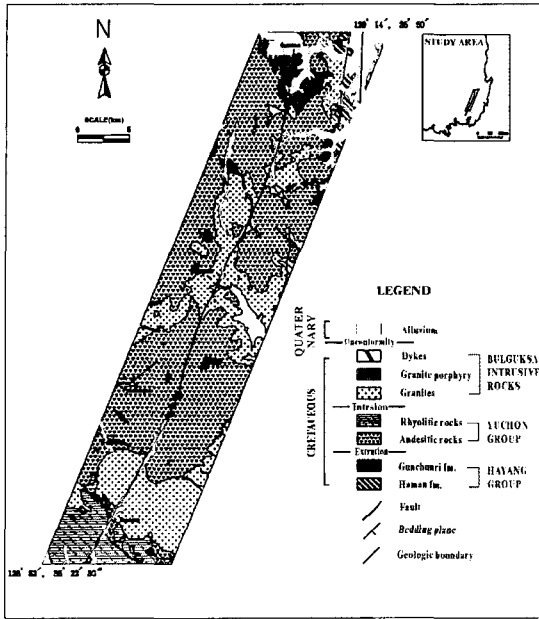


Fig. 3. Geologic map near the Moryang Fault (after H. Choi & T. Jang, 1999).

### 인공위성영상 분석

단층대의 개략적인 위치 및 규모를 파악하고 연구지역 전반의 선구조를 분석하기 위하여 인공위성 영상 분석을 수행하였으며 그 결과를 토대로 정밀 지표지질조사와 물리탐사 위치를 선정하였다.

인공위성영상 분석결과 NNE 방향의 밀양,모량,

양산단층선이 뚜렷하게 확인되었으며 이들 양산단층계 주변의 주요 선구조는 N20-30°E, N50-60°E, N40-50°W의 3조가 관찰되었다. 선구조의 연장성에 따른 빈도분석을 실시한 결과 모량단층 방향의 선구조의 빈도가 매우 높게 나타났다(Fig. 4).

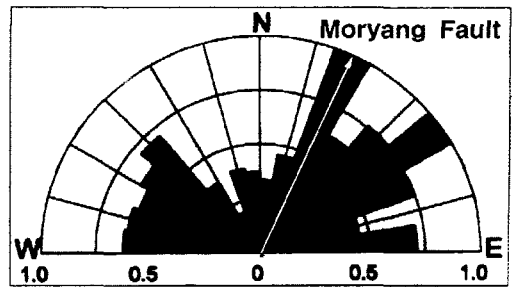


Fig. 4. Rose diagram of the fault plane at the zone of Moryang Fault.

### 지표지질조사

모량단층대 주변의 단층암(Fault Rock), 단층비지(Fault Gouge) 그리고 단층조선(Slickenside) 등 단층의 증거를 확인하고, 단층과 주변 암 불연속면과의 관계 분석을 통한 단층 영향범위를 파악하기 위하여 연구지역 일대에 지표지질조사를 수행하였으며, 일부 구간에 대해서 Scanline 조사 기법을 적용하였다.

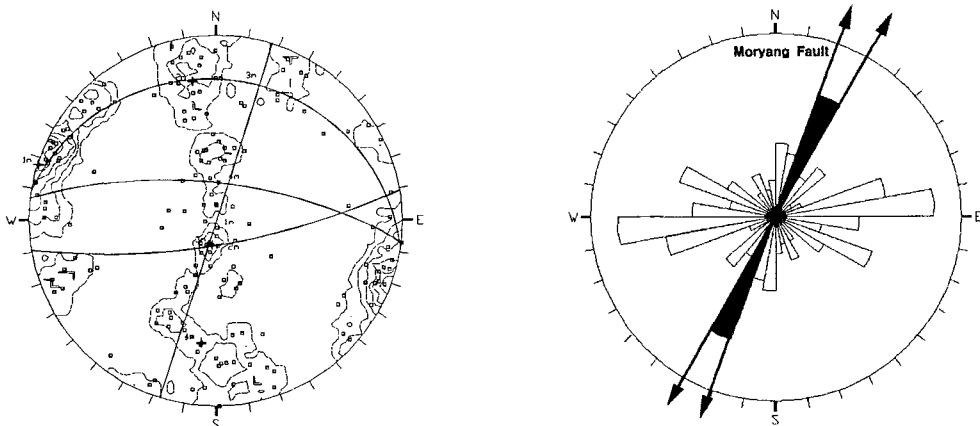


Fig. 5. Joint plane distribution and rose diagram at the zone of Moryang Fault

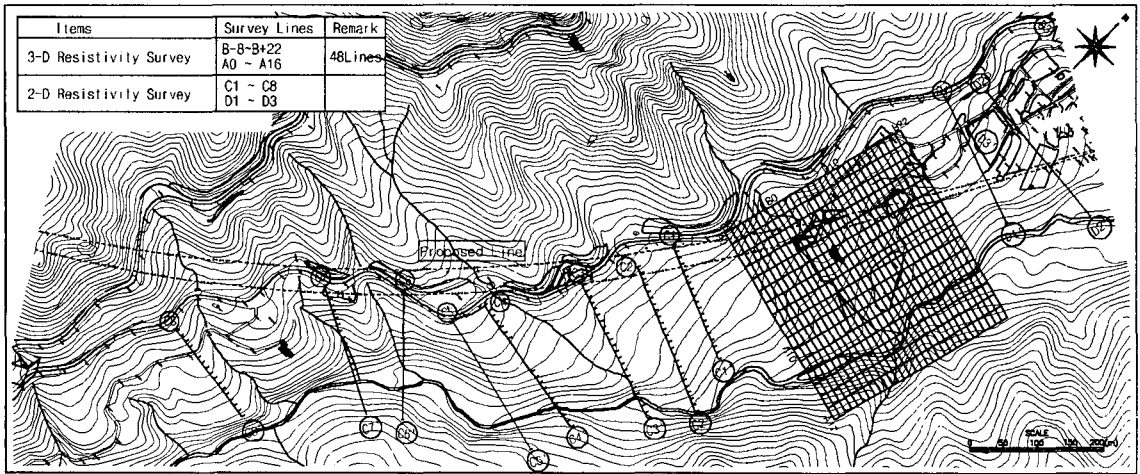


Fig. 6. Layout of resistivity surveys.

덕현천 계곡 동남측은 화강암의 신선한 노두가 발달되어 있으나, 덕현천~살티마을 인근지역은 대부분 붕적층으로 피복되어 있고 풍화가 심하여 신선한 노두의 관찰이 곤란하였다. 연구지역내 지표에 노출된 노두에서 뚜렷한 단층의 증거를 확인할 수 없어 절리군에 대한 조사를 수행하였으며 조사 결과 주절리의 방향은 Fig. 5와 같이 N80~90°E, N20~30°E, N60~70°W으로 나타났다. 이 중 N20~30°E방향의 절리군은 기존 자료 및 인공위성영상을 이용한 선구조 분석에서 확인된 모량단층 선구조의 방향과 일치하였다. 풍화대는 모량단층의 주향방향과 일치하는 덕현천 계곡을 따라 폭 넓게 분포하므로 모량단층의 영향을 받아 형성된 것으로 판단되었다.

### 전기비저항탐사

인공위성 영상을 이용한 선구조 분석과 지표지질조사 결과를 토대로 모량단층의 위치 및 방향을 분석하고, 단층대의 폭과 심도, 연장 등을 확인하기 위하여 전기비저항 탐사를 수행하였다(Fig. 6).

일차적으로 모량단층의 개략적인 분포 현황을 파악하기 위하여 B0, C1~C8, D1~D3의 12개 측선에 대하여 2차원 전기비저항탐사를 수행한 후, 설계터널노선과 간섭이 예상되고 복잡한 지층단면을 보이는 지역에 대하여 가로 18(A Line), 세로 30(B Line)개의 격자망을 설정하여 3차원 전기비저항탐

사를 수행하였다.

+++차원 전기비저항탐사의 해석은 전기비저항 탐사결과를 지형자료와 함께 3차원 격자망에 포함시켜 역산하는 ACB(Active Constraints Balancing) 법(한국자원연구소, 1999)으로 수행하였다. 해석결과는 각 표고에 대한 전기비저항 등고선으로 전기비저항값 500Ωm가 처음으로 나타나는 표고를 3차원으로 표현하였다.

연구지역 동편에서는 고비저항대와 저비저항대의 경계부가 뚜렷하게 나타났으나 24번국도가 위치하는 서편은 대체로 저비저항대가 넓게 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 지표지질조사, 시추조사 결과와 비교하였을 때 저비저항대는 붕적층 또는 풍화대층이었으며 단층의 중앙부로 추정되는 지역은 깊은 심도에서도 저비저항대가 발달하였다.

3차원 전기비저항 해석결과 신선한 암석에서는 5,000Ωm이상의 비저항값을 보이고 단층예상대에서 전기비저항값은 100~500Ωm의 저비저항값을 나타내었다. 이를 기준으로 예상한 단층대 주방향은 N20~30°E이고, 경사각은 70~90°NW로 추정되었다. 또한 단층영향대는 폭20~80m, 깊이 50m이상으로 심도가 깊고 폭이 넓게 분포하였다(Fig. 8).

전기비저항탐사 2D 및 3D 해석결과를 종합하여 단층영향대를 표시하면 Fig. 9와 같다. 모량단층은 N20~30°E의 주향으로 연구지역 북동쪽에서 가장 넓게 분포하며, 남서쪽으로 갈수록 단층폭 및 영향심도가 작아지는 것으로 조사되었다.

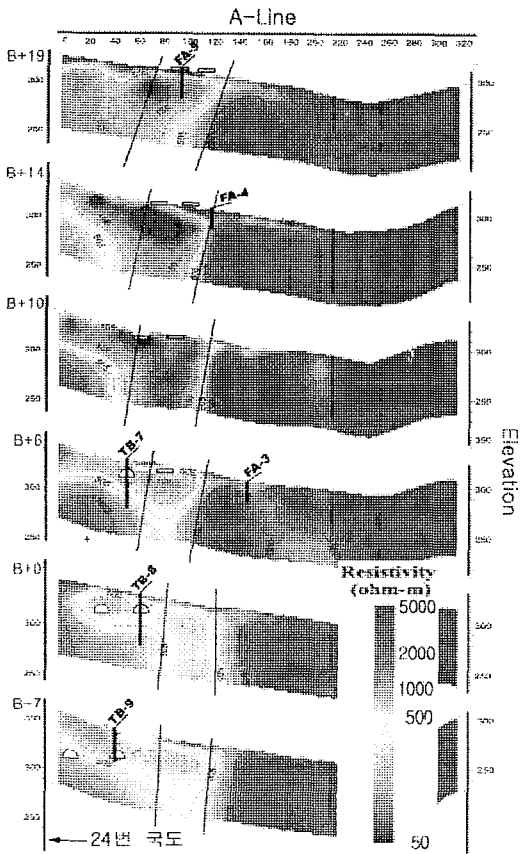


Fig. 7. Results of the 2-D resistivity survey.

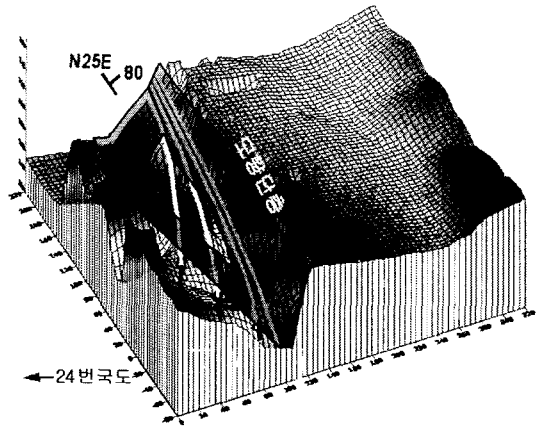


Fig. 8. Results of 3-D resistivity survey.

### 시추조사

지표지질조사 및 전기비저항탐사 결과 예측된 모랑단층의 단층암(Fault Rock), 단층비지(Fault Gouge) 그리고 단층경계선을 확인하기 위하여 모랑단층대 내부, 외곽, 경계부에 총 9공의 시추조사를 수행하였다. 시추조사 위치는 Fig. 9와 같다. 시추조사시 표준관입시험을 통하여 토사층의 교란시료를 채취하였으며 Triple Core Barrel을 사용하여 암석코어를 채취한 후 1m 간격으로 검층(Logging)을 수행하여 단층지역의 지층분류, 암종

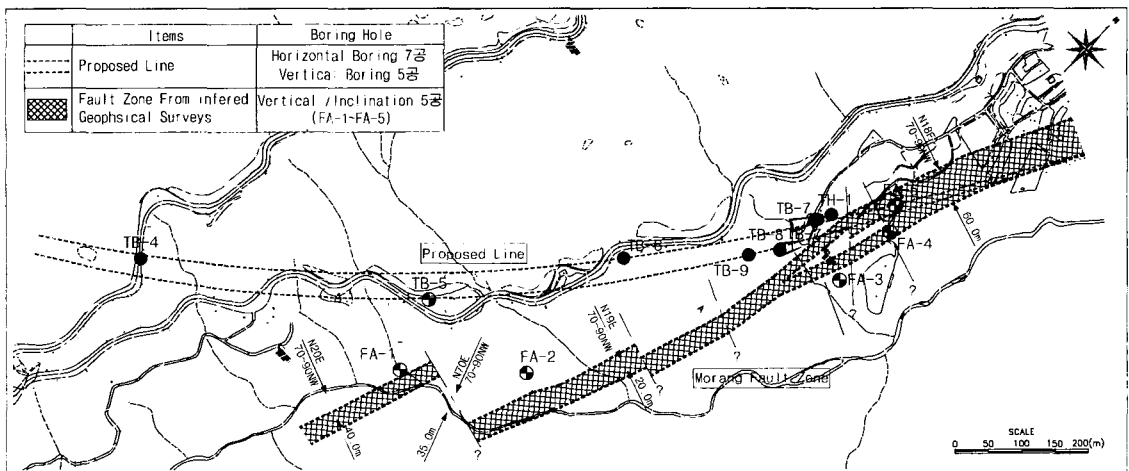


Fig. 9. Location of boring holes and inferred Moryang Fault Zone based on geophysical surveys.

분류, 절리면 특성 분석 등을 수행하였다.

시추조사결과 모량단층의 분포는 전기비저항탐사 결과와 일치하는 것으로 나타났다. FA-1에서는 단층방향과 평행한 지질구조대를 관입한 염기성 암맥과 화강암의 경계부가 나타났으며 FA-2에서는 단층암 또는 단층비지가 나타나지 않아 모량단층대에서 조금 벗어난 것으로 판단되었다. FA-3에서는 단층의 영향을 전혀 받지 않은 화강암이 분포하였으며, FA-4 및 FA-5는 단층의 영향을 크게 받아 심도에 따라 연경이 반복되는 특징을 보이고 4~5매의 단층점토가 확인되었다. TB-7-1의 심도 28m, TB-8의 심도 39.6m~53.0m 구간에서는 단층각력(Fault Breccia)이 나타나고 여러 곳에서 단층점토가 확인되었다. 시추 코아상에서 관찰된 단층각력의 크기는 최대 12cm로 각력의 성분은 모암인 화강암이 주를 이루며, 염기성 암맥의 각력도 관찰되었다.

### 광물 분석

단층지대에 분포하는 단층각력암과 주위의 안산암, 화강암 시료 그리고 단층점토를 채취하여 현미경 관찰, X-Ray 회절분석 그리고 EPMA 분석을 수행하여 단층의 증거를 규명하고자 하였다.

화강암은 자형의 장석과 타형의 석영이 주를 이루고 있으며, 대부분 1mm이하의 입자로 분포하지만, 5mm이상의 거정질로 분포하는 경우도 관찰되었다. 안산암의 경우 미립의 석영과 사장석이 주를 이루고 있으며, 일부 백운모와 흑운모가 관찰되었다.

단층각력암에 대한 편광현미경분석 결과 사장석 반정이 압력에 의하여 깨져 있으며, 흑운모는 변질을 심하게 받아 견운모(Sericite)화되어 있었다. 단

층각력암의 각력과 인근지역의 신선한 화강암에 대한 EPMA 분석 결과 단층각력암의 흑운모와 정장석의 화학조성이 화강암과 유사하므로 단층각력암 내 각력의 모암은 화강암인 것으로 판단되었기.

단층점토에 대한 X-Ray 회절 분석 결과 주구성 광물이 스멕타이트(Smectite)로 장석 또는 운모류가 풍화 또는 친열수 변질작용(Epithermal Alteration)을 받아 생성된 광물로서 단층점토는 단층에 의해 생성된 후 단층대를 따라 공급된 지하수 및 열수에 의해 2차적으로 변질을 받은 것으로 판단되었다. 스멕타이트는 물을 포함하였을 경우 부피가 팽창을 하므로 터널안정에 영향을 미칠 수 있으며, 라이닝의 균열 등에 의하여 터널 배수시설내로 유입될 경우 배수능력 저하를 유발하므로 유의하여야 한다.

광물분석 결과를 종합하면 연구지역의 단층각력암은 단층활동에 의하여 압력을 받아 암석 및 광물이 깨지거나 변형되어 있으며, 단층대를 중심으로 지하수 및 열수에 의하여 풍화 또는 변질된 흔적이 뚜렷하여 단층의 영향을 크게 받은 것으로 판단되었다.

### 절대연령측정 (K-Ar법)

모량단층의 생성시기를 규명하여 단층의 활성여부 및 지질학적인 생성환경을 분석하기 위하여 K-Ar 절대연령측정을 수행하였다. TB-8, FA-5 시추조사시 채취한 시료 중 단층점토를 선별하여 Bulk 상태로 연령을 측정하였으며 측정결과는 Table 1과 같다.

절대연령은 FA-5시료에서  $5,700 \pm 1.129$ 만년, TB-8시료에서  $1,900 \pm 0.380$ 만년으로 측정되어 FA-5의

Table 1. Test results of K-Ar ages.

Sample	K (wt %)	wt (g)	<sup>39</sup> Ar (10 <sup>-10</sup> ccSTP/g)	<sup>39</sup> Ar Radiogenic (10 <sup>-8</sup> ccSTP/g)	Uncertainty	Age (Ma)	Uncertainty	Air (%)
FA-5	1.499	0.02138	21.384	339.004	0.093	57.339	1.129	15.71
TB-8	3.568	0.02329	13.237	266.262	0.078	19.123	0.380	12.81
<i>Standard Sample Analysis</i>								
Bern4M-8	-	0.00975	108.020	593.964	0.273	17.543	0.349	34.96

경우 신생대 고제3기(Pleistocene), TB-8의 경우 신제3기(Neogene)에 해당되었다. 인근지역의 주산 안산암의 전암시료에 대한 K-Ar 절대연령 자료(한국 화산암 동위원소연대지도, 1995, 한국자원연구소)가 6,500만년(백악기 말)이고 인근지역의 언양화강암내 흑운모 시료에 대한 K-Ar 절대연령 자료(이준동 외, 1993)가 6,100만년~6,930만년(백악기 말)인데 이를 비교하였을 경우 FA-5에서 채취된 점토시료는 백악기말에 언양화강암이 형성된 직후 단층운동에 의하여 형성된 것인 반면 TB-8에서 채취된 점토시료는 5,700만년전의 단층운동 이후 이 시기에 발생한 단층운동에 의해 생성된 것이거나 이미 생성된 점토가 이 시기에 열수 또는 지하수에 의하여 변질되어 절대연령이 짧게 측정되었을 것으로 판단된다.

### 수압파쇄시험

모량단층지역에서의 암반의 초기지압 또는 최대수평응력의 방향과 크기를 산정할 수 있는 수압파쇄시험을 수행하였다. TB-4, TB-5 시추공에서 수행된 수압파쇄시험시 발생한 파쇄균열에 대하여 균열압인패커와 균열방향측정기를 이용하여 생성된 균열의 방향을 측정하였다(Fig. 10).

TB-4번의 최대수평주응력방향은 N30°E, TB-5번의 최대수평주응력방향은 N25°E로 지표지질조사와 물리탐사 결과 모량단층의 주향인 N20~30°E의

방향과 거의 일치하는 것으로 나타났다.

### 결 론

모량단층은 양산단층계의 주요 단층의 하나로 김해시에서 울주군 소호리까지 대략 48km의 연장이 확인된다. 본 연구지역에서는 석남사 남측 울산광역시 울주군 상북면 덕현리 덕현천 일대 1.5km구간에 대하여 단층의 특성을 규명하고 인접지역에 시설예정인 각종 주요구조물(도로, 터널) 설계 및 시공시 기초자료로 활용토록 하였다.

모량단층의 특성 규명을 위하여 인공위성 영상을 이용한 선구조 분석, 지표지질조사, 전기비저항탐사 및 3차원 해석, 시추조사, 광물분석 그리고 K-Ar절대연령측정 등을 수행하였다.

지표지질조사 결과와 전기비저항탐사 및 시추조사 결과를 종합하여 단층대의 방향과 경사, 폭, 분포심도 등을 분석한 결과 모량단층의 주향은 N20~30°E, 경사는 70~90NW이고 단층폭은 약 20~60m, 최대 80m, 깊이는 50m이상인 것으로 확인되었다.

K-Ar법에 의한 절대연령 측정결과 TB-8시료에서  $1,900 \pm 0.380$ 만년, FA-5시료에서  $5,700 \pm 1.129$ 만년으로 나타나 위치별로 차이를 보였다.

수압파쇄시험을 수행하여 최대수평응력의 방향을 측정한 결과 N25°E, N30°E로 모량단층의 주향과 일치하는 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

- 선우춘, 1989, 프락탈 방법에 의한 Fracture Network의 분포해석, 지질학회지, 25, 468-473.
- 장기홍, 1977, 경상분지 상부중상계의 층서퇴적 및 지구조, 지질학회지, 13, 76-90.
- 최유구, 1974, 삼각해법에 의한 단층절단선 투영법, 지질학회지, 10, 185-187.
- 이기화, 나성호, 1983, 양산단층의 미진활동에 관한 연구, 지질학회지, 19, 127-135.
- 이기화외, 1984, 양산단층지역의 지구물리학적 연구, 지질학회지, 20, 222-240.
- 이기화, 1985, 양산단층의 활성문제에 관하여, 지질학회지, 21, 38-44.

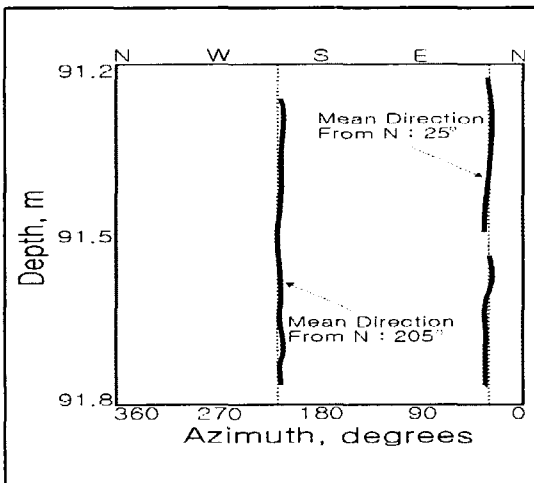


Fig. 10. Results of hydraulic fracturing test.



- 이기화의, 1985, 양산단층지역의 지구물리학적 연구 (II), 지질학회지, 21, 79-89.
- 김영화, 이기화, 1988, 경주남쪽을 중심으로한 양산 단층의 구조에 관한 지전기학적 연구, 지질학회지, 24, 47-61.
- 김영화의, 1990, 경주북쪽에 있어서의 양산단층의 구조에 관한 지전기학적 연구, 지질학회지, 26, 393-403.
- 이기화, 진영근, 1991, 양산단층의 구역화 : 경상분지내 주요단층대의 지구물리학적 연구, 지질학회지, 27, 434-449.
- 이기화, 임창렬, 1992, 울산단층의 지전기탐사 : 경상분지내 주요단층의 지구물리학적 연구, 지질학회지, 28, 32-39.
- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동, 지질학회지, 28, 84-109.
- 이기화의, 1992, 동래단층, 언양단층, 일광단층에서의 전기탐사 : 경상분지내의 주요 단층에 관한 지구물리학적 연구, 지질학회지, 28, 218-226.
- 이준동의, 1993, 언양지역을 중심으로한 양산단층에 관한연구- 특히 파쇄작용과 자기비등방성 고찰을 중심으로-, 지질학회지, 29, 128-144.
- 채병곤, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련단열 발달상태, 지질학회지, 30, 379-394.
- 김영화의, 1996, 양산단층 지역의 황강암체 내에 분포하는 열린 미세균열과 경상분지의 고응력장, 지질학회지, 32, 367-378.
- 한국자원연구소, 1998., 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종보고서.
- 김기영의, 1998, 양산단층지역에서의 수직균열에 의한 탄성과 이방성 측정, 지질학회지, 34, 73-80.
- 이봉주의, 1999, 경주시 양남면 일대의 제 4기단층, 지질학회지, 35, 1, 1-14.
- 최한우, 장태우, 1999., 모량단층 주변 절리의 분포 특성과 프랙탈 해석, 지질공학, 9., 119-134.

---

방기문, 이상우  
 (주)대우엔지니어링 지반공학부  
 경기도 분당구 수내동 9-3  
 분당우체국 20호(우 : 463-020)  
 TEL : (031)738-0365  
 FAX : (031)738-0310  
 E-mail : bkm21@netian.com