

# 경주지역 3기 역암퇴적층에 관한 생성원인 및 지반물성에 관한 분석

김택곤<sup>\*1</sup>, 이대혁<sup>\*1</sup>, 나용수<sup>\*1</sup>, 김재관<sup>\*1</sup>, 최성순<sup>\*2</sup>, 정의진<sup>\*3</sup>

## 1. 서론

3기층이란 지질학적으로 신생대에 속하는 고결이 덜된 암석층을 말하며, 사람에 비유하면 성장이 덜된 유아기에 해당한다. 고생대나 중생대 암반이 대부분인 국내에서는 이러한 3기층이 경상분지 일부 지역에서 발견되고 있는 실정이며, 그 형태는 포항 지역과 같은 이암이나, 경주지역처럼 흙과 암석이 혼재된 퇴적층으로 많이 존재한다.

본 고에서는 불국사 화강암의 원산지인 경상북도 경주시에 어떻게 이러한 3기층이 존재하는지에 대한 생성원인을 밝히고, 다양한 지반조사를 통해 터널설계를 위한 역암층 지반등급 선정과 물성치 산정 방법에 대해서 설명하고자 한다. 이를 위해 경주지역 3기 역암퇴적층의 생성원인, 분포특성, 공학적 특성, 터널설계를 위한 지반등급 선정, 물성치 산정 등에 대해 분석된 사례를 소개함으로써, 차후 유사한 특성을 가지는 지역에서의 지반평가 및 터널설계에 참고자료로 활용될 수 있기를 기대해 본다.

<sup>\*1</sup> SK건설 김재관(jkkim-b@skec.co.kr)

<sup>\*2</sup> 한라엔지니어링 이사

<sup>\*3</sup> 넥스지오 기술이사

## 2. 지질특성 분석

역암층과 관련된 지질학적 용어는 지반공학자들에게 생소하므로 혼돈을 피하고 이해를 쉽게 하고자 위해 표 1과 같이 용어 정의를 하였다.

### 2.1 지질분포

과업구간은 경상북도 경주시 마동에서 경주시 양북면 장항리를 연결하여 경주국립공원을 우회하는 노선으로 2차선 병렬터널이 존재하며, 그 길이는 단방향 평균 2,355m에 이른다. 경주일원에는 백악기 하양층군에 속하며 흑색~암회색의 셰일과 사암으로 구성된 울산층과 이를 관입한 화강암, 석영~안산암질 화산암류, 송전층과 3, 4기 퇴적층 등의 암종이 분포하며 역암퇴적층은 송전층에 해당한다. 그 중 터널구간에 해당하는 지역의 지질분포는 상세조사결과 불국사 화강암구간과 중점부 1km 구간에 3기 역암층이 퇴적된 구간으로 크게 대별되는 것으로 나타났다(그림 1). 그렇다면, 어떻게 산악지역에 퇴적고가 깊은 역암층이 형성되었을까? 이에 대한 의문을 풀어보기로 한다.



표 1. 본 고에서의 용어정의

| 용어               | 정의  |
|------------------|---|
| 역암               | 역(암석) + 기질(흙)으로 구성됨. 즉, 역(암석덩어리)이 주요 구성물이며, 그 사이를 모래, 진흙, 탄산칼슘 등의 기질(Matrix)이 매우는 퇴적암                         |
| 기질(Matrix)       | 퇴적암을 구성하는 입자들이 큰 것과 작은 것으로 분명하게 구분될 경우 작은 입자로 구성된 부분을 일컫음   |
| 역지지성 역암/기질지지성 역암 | 역의 함량이 80%이상이면 역지지성(Clast Supported)역암, 80%이하이면 기질지지성(Matrix Supported)역암이라 함                                 |
| 원마도(Roundness)   | 퇴적암 구성입자의 마모정도를 구분하는 기준으로 변과 모서리의 예리한 정도에 따라 원형(Rounded), 아원형(Subrounded), 아각형(Subangular), 각형(Angular)으로 구분됨 |

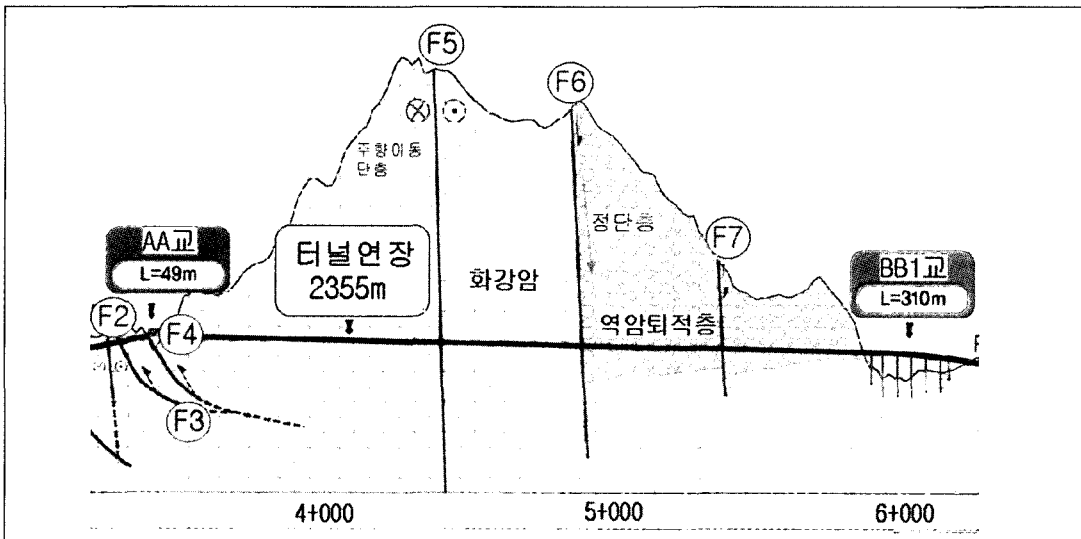


그림 1. 지질분포도

## 2.2 역암퇴적층의 생성과정

본 터널구간의 역암퇴적층은 노두조사 결과 그 두께가 최고 200m 이상에 이르는 것으로 나타났다. 이렇게 두꺼운 퇴적층은 선구조조사, 노두조사, 물리탐사, 시추조사 등을 분석한 결과 다음과 같은 단계를 거쳐 형성된 것으로 파악되었다.

1단계 : 중생대 백악기~신생대 제3기에 울산단

층대를 따라 남북방향으로 대상분포를 보이며 화강암이 관입하였다. 화강암은 기존의 중생대 퇴적암인 울산층의 세일층을 열변성시켜 혼펠스화 하였다.

2단계 : 동서방향의 인장력에 의해 화강암내에서 정단층이 발생하였으며 정단층으로 낮아진 부분에 흙과 돌이 섞여서 퇴적되었다. 퇴적에 의한 상재하중의 증가는 암석화과 정인 속성작용을 유발하여 흙과 돌사이의

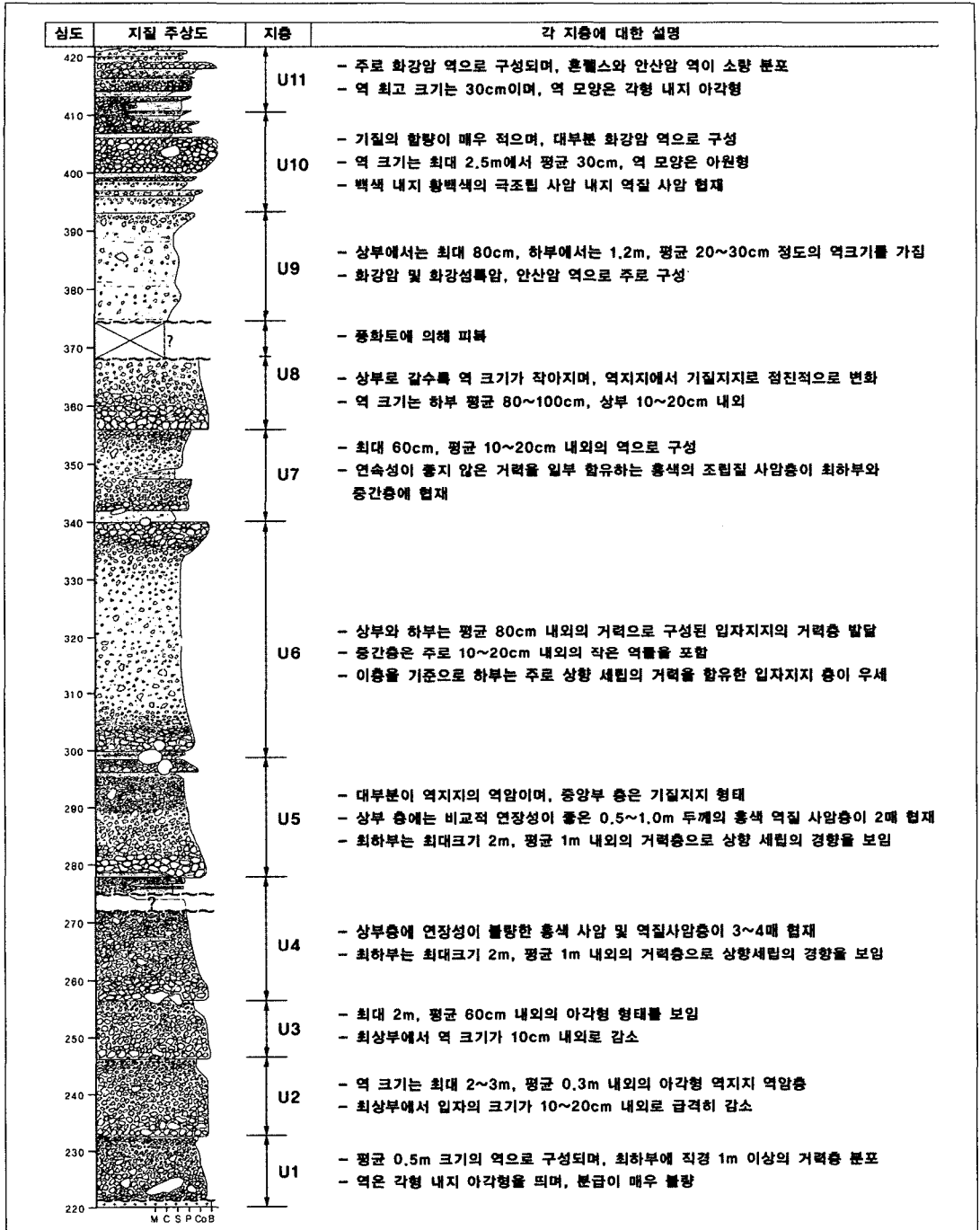


그림 2. 역암퇴적층 분포도



공극을 채우고 있던 물이 빠져나가면서 입자간의 결합력이 증가하여 느슨하던 조직이 고결화되었다. 고결정도는 화강암이 풍화작용을 받아 약해진 연암정도로 일본 문헌상에서 언급하는 퇴적연암정도에 해당한다. 보통 정단층에 의한 상반경사가 60도 내외인 점에 비해, 본 구간은 그 경사가 80도 이상의 급격한 경사를 이룬다. 이는 동해안의 태평양판에 의한 충돌작용으로 화강암 경계지역의 정단층이 고각을 이루게 되었다. 따라서, 역암층의 속성작용은 좀 더 가속화 되었을 것으로 추정된다.

3단계 : 역암퇴적층은 침식에 의해 현재의 지형을 이루면서 지표상에 노출되었다.

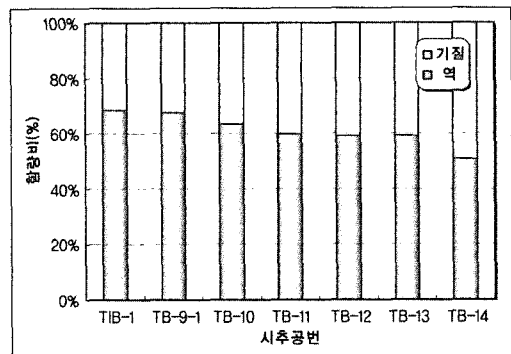
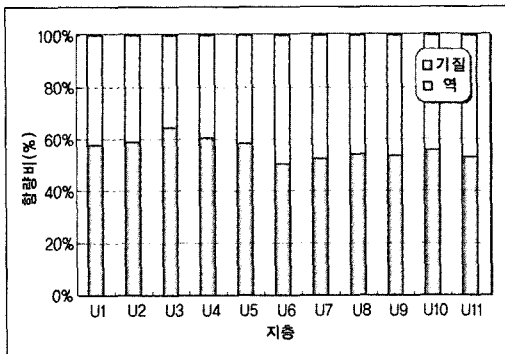
### 3. 주요 지반조사 결과분석

#### 3.1 역암층의 구성

터널구간 인근 도로의 깎기면과 자연절취면에서

관찰한 역암퇴적층 조사결과를 정리하여 지질주상도(그림 2)를 작성하였다. 그림에서 보는 바와 같이 역암퇴적층 내에는 암반 불연속면이 존재하지 않으며, 그 퇴적두께는 최고 225m로서 토피고에 따라 하부는 고결화된 암석의 특징을 보이고 있다. 이를 침식면과 입도차에 따라 분류한 결과, 총 11개의 상세층(Unit)으로 구분이 가능하며, 정단층에 의한 퇴적조건이 최소 1번 이상에 걸쳐 일어났음을 알 수 있다. 특히, U6층을 기준으로 상부는 상향 조립, 하부는 상향 세립의 특성을 나타내 이러한 가능성을 뒷받침해주고 있으며, 거시적으로 보면 U6를 기준으로 크게 2개의 층군으로 분류할 수 있다.

퇴적층내의 역의 형태는 아원형(subrounded) 내지 이각형(subangular)이며, 역(암석)과 기질(흙)의 함량비를 분석한 결과, 노두조사결과와 역함량은 평균 50% ~ 60%에 이르는 기질지성 역암인 것으로 파악되었으며, 이는 시추코아에서 분석된 결과 자료와 유사하다(그림 3). 따라서, 경주지역에 분포하는 역암퇴적층의 역과 기질의 함유 비율은 평균 6 : 4로 암석이 다소 많은 층이며, 터널 통과구간 심도에 해당하는 역암퇴적층은 최하부층인 4개층(U1~U4)에 해당한다.



(a) 노두조사

(b) 시추조사

그림 3. 역과 기질의 함량비

### 3.2 지표물리탐사 결과분석

터널구간에서의 지반상태와 물리적 특성을 파악하기 위하여 전기비저항탐사와 대심도탄성파탐사를 수행하였다. 전기비저항탐사결과 그림 4에 나타난 단면도와 같이 1,700 $\Omega \cdot m$  이상인 고비저항 부분과 140 $\Omega \cdot m$  이하인 저비저항 부분으로 크게 대별할 수 있었는데, 여기서, 흥미로운 점은 저비저항대의 경계면 위치가 노두조사 단계에서 예상했던 결과와 다르게 나타났다는 점이다. 즉, 3기 역암퇴적층의 특성상 암반내 절리가 존재하지 않고 암석과 흙이 혼재하고 있으므로, 3기층 전구간에 걸쳐 저비저항대가 나타날 것으로 예측하였으나, 전구간이 아닌 터널 상부층과 종점부에서 저비저항대가 집중적으로 나타난 것이다. 조사된 구간이 유난히도 강우량이 많았던 2003년 여름인 점을 감안하면, 화강암과

인접한 역암퇴적층 심부에서는 천부에 비해 습윤상태가 많지 않음을 간접적으로 추정할 수 있었다.

이와 더불어 대심도탄성파속도시험을 수행한 결과, 그림 5와 같이 터널 굴착 심도에서의 탄성파속도는 발파암에 해당하는 2,600m/sec 이상, 2,100~2,600m/sec, 2,100m/sec 이하의 3구간으로 구분할 수 있었다. 이는 토포에 의한 상재압 영향을 고려한다 하더라도, 역암층 구간 중 일부는 치밀하게 퇴적되어 있음을 간접적으로 보여주는 것이다. 이와 같은 물리탐사 조사결과를 통합하여 분석하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 탄성파속도가 크게 변화하지 않음에도 불구하고 전기비저항의 차이가 구간에 따라 차이가 큰 것은 '지하수 함수량의 차이'에 기인한 것이며, 화강암과 인접한 심부층을 제외하고는 터널 종점부와 상부층에 지하수 유동대가 형성될 가능

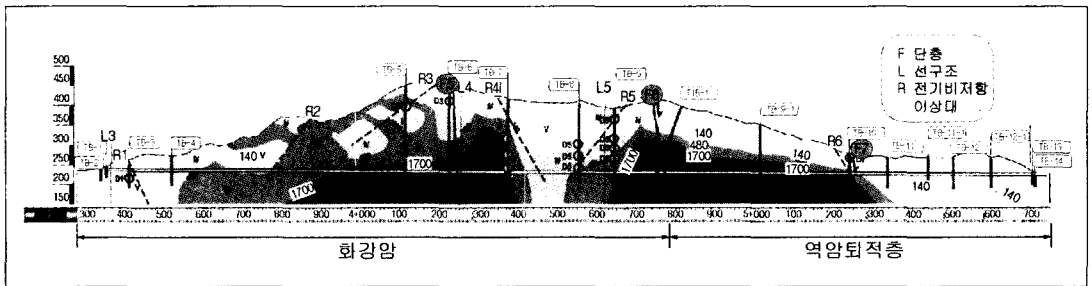


그림 4. 전기비저항탐사 결과

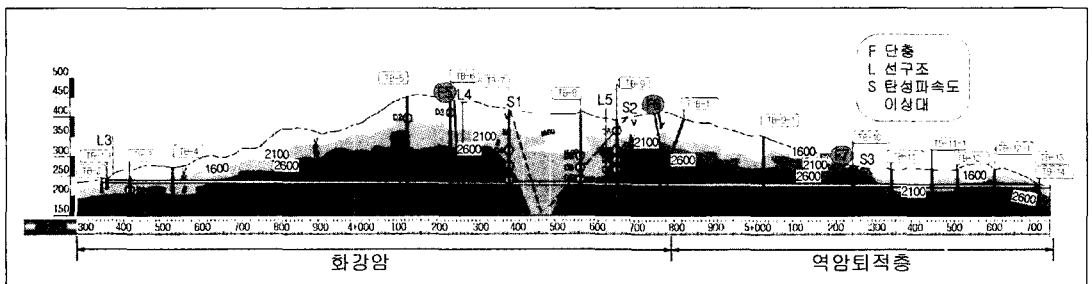


그림 5. 대심도탄성파탐사 결과



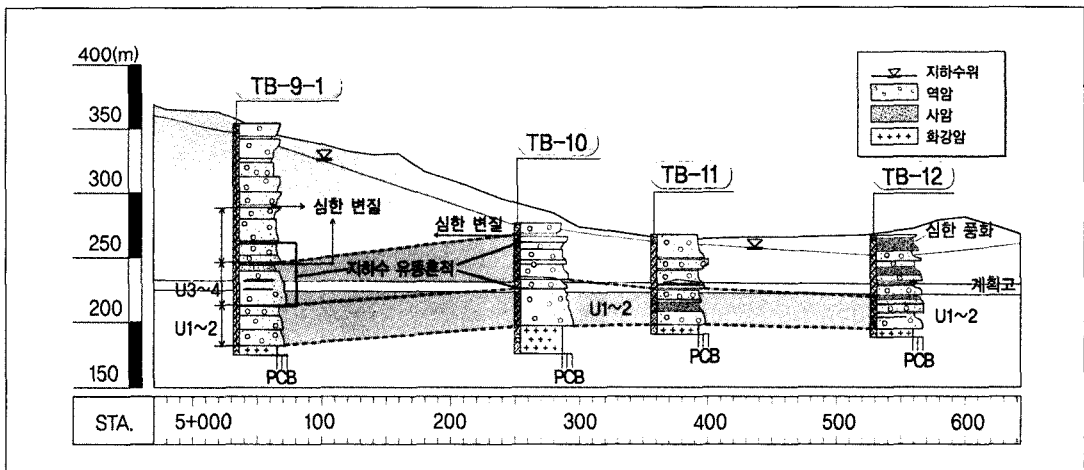
성이 많다.

- 대심도탄성파탐사의 역산과정을 고려하면 등속도선의 급격한 처짐이 나타나는 부분은 고결도가 주변에 비해 상대적으로 낮은 구간이다.

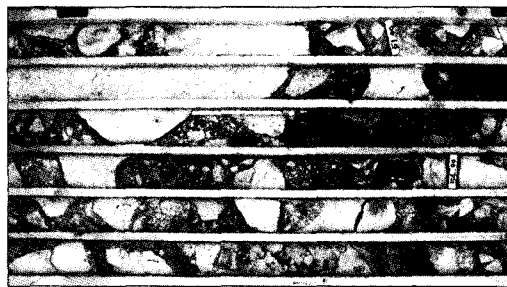
### 3.3 시추코아 정밀분석

물리탐사 결과를 토대로 선정된 위치에 경사시추와 수직시추를 수행하여 그림 6과 같이 화강암과 역암층의 지층경계를 확인 할 수 있었다. 시추코어를 정밀 관찰한 결과 토피가 높고 화강암층에 가까운 시추공에서는 코아색깔이 황갈색으로 지하수의 접

촉흔적이 거의 없는 치밀한 역암퇴적층이 괴상으로 분포하고 있었다(TB-9-1, TB-10). 이 구간은 전기비저항탐사결과에서 보는 바와 같이 화강암 구간과 유사한 고비저항대에 해당하는 구역이다. 물론 일부는 기질의 함유비율이 많아지는 일부구간에서는 균열이 발달한 코아가 채워되었음을 확인할 수 있었지만, 전반적으로 암석코어는 치밀한 상태를 유지하고 있다. 이러한 원인은 화강암 경계구역의 하부 역암퇴적층이 화강암에 의한 열원, 지각운동, 토피고 등에 의해 다소 고결화 되어 있음을 나타낸다. 한편, 터널중점부로 갈수록 코아색깔이 암갈색으로 짙어졌는데, 이는 지하수 유출입으로 인해 기질이 변질



역암 I (TB-9-1)



역암 II (TB-11)

그림 6. 시추코어로 확인한 지층경계와 역암 I, II의 사진

되었기 때문이다(TB-11~TB-14). 이러한 현상은 역에 존재하는 미세 틈새를 통해서도 확인할 수 있었으며, 지하수로 인해 고결정도가 약화된 현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 지하수 접촉흔적에 따라 역암층은 크게 역암I과 역암II로 분류할 수 있다.

공내재하시험과 수압시험 등의 현장시험을 통해 전반적인 역암퇴적층의 변형계수는 14,600~131,000 tf/m<sup>2</sup>(평균 47,000tf/m<sup>2</sup>)로 연암에서 경암까지 다양한 수치를 나타내었다. 또한, 역암층의 투수계수는 1.7×10<sup>-6</sup>~7.1×10<sup>-6</sup>cm/sec(평균 2.6×10<sup>-5</sup>cm/sec)로 예상과 달리 상당히 치밀한 투수계수를 보였다.

## 4. 터널설계를 위한 역암퇴적층 지반등급 선정

### 4.1 지반등급 분류방향

RMR분류나 Q분류로 대표되는 암반분류는 절리

면의 발달정도와 상태에 크게 의존하는 경험적 암반 분류방법이다. 그러나 대상지역 역암퇴적층은 코아 내부에 부분적인 균열만 발달하고 있을 뿐 연장성이 있는 절리면의 발달이 거의 없어 절리간격이나 절리면 상태를 평가할 수 없는 괴상의 약한 암반(Massive Weak Rock)이라고 볼 수 있다. 또한, 거력층의 존재로 시추코아에 의한 RQD가 과대 평가 될 수 있는 문제점이 있다. 본 3기 역암퇴적층에는 기존의 경험적 암반분류를 적용하기가 곤란하므로 유사한 지층에 대한 해외사례를 검토하고 지반조사결과를 면밀히 분석하여 대상지역특성을 잘 반영하는 새로운 방법으로 구간별 지반등급을 설정하였다.

국내에서는 역암층에 관한 암반분류사례가 전무하므로 표 2와 같이 해외 암반분류사례를 검토하여 본 역암층의 지반등급을 선정하기로 하였다. 표에서 보는 바와 같이 공학적 특성을 벗어나지 않는 범위 내에서 각 현장 나뉠대로의 암반분류를 기준으로 설계했음을 알 수 있다. 본 설계에서는 경험적인 암반 분류가 곤란한 역암퇴적층에 대해 공학적 동질성이

표 2. 역암층 해외암반분류 사례

| 사 례               | 지질 및 지반 특성                     | 암반 분류                                | 비 고                              |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 월성원자력<br>공업용 도수터널 | • 터널구간 제3기 전복역암층 일부 분포         | • 역암층에 대한 별도의 암반분류 미 시행              | • 터널구간 중 가장 취약한 구간으로 선정          |
| 철레 OO 터널          | • 각력을 포함하는 절리 발달이 미약한 화산암류     | • 대형삼축시험을 통한 직접 암반분류 수행              |                                  |
| 일본 명석<br>해협 대교    | • 제3기 미고결 사암 및 이암              | • 강도특성 및 지층의 분포특성에 따른 암반분류           |                                  |
| 대만 고속철도           | • 제3기 미고결 사암, 이암 및 역암 분포       | • 유로코드에 의한 막장 맵핑을 통한 암반분류 시행         | • 시공 중 지보패턴의 유연한 적용으로 지반 불안정성 대비 |
| 일본<br>아오모리터널      | • 절리 발달이 미약한 제3기 화산암류 및 역암층 분포 | • 강도특성 및 원지반 강도비 등을 활용한 암반분류         | • 수치해석을 통해 구간별 지보패턴 결정           |
| 일본 OO 터널          | • 제4기 미고결 역암층 및 사암층 분포 지역      | • 강도특성, 탄성파 탐사, 지반 구성 물질 분류를 통해 암반분류 | • 수치해석을 통해 구간별 지보패턴 결정           |

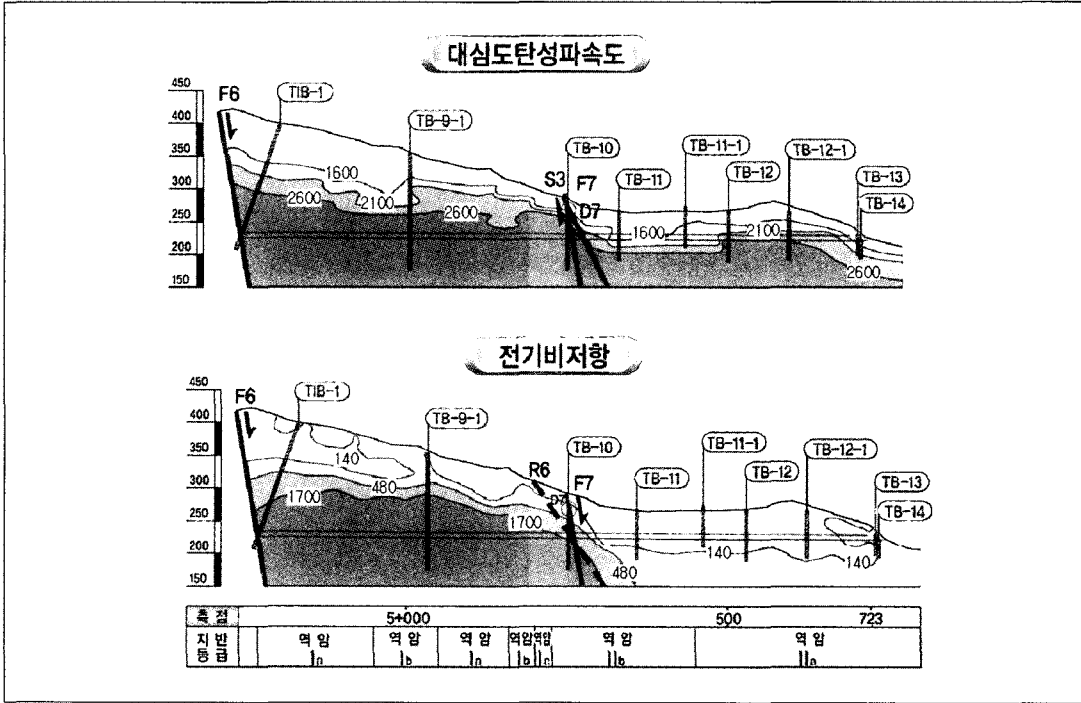


그림 7. 역암층 지반등급도

확보되는 구간을 영역화(Zoning)하고, 영역별로 적합한 설계정수를 산정한 후 전산해석 등을 통해서 영역별 지반등급을 평가하여 터널의 지보패턴을 설계하는 것이 바람직하다고 판단하였다. 이와 더불어 터널굴착공법 및 보조공법의 설계는 일축압축강도, 역의 함유비율 및 크기, 수리전도도 등을 고려하여 설계하는 것이 바람직하다고 판단하였다.

#### 4.2 지반등급설정 기준

터널통과 구간의 역암층은 퇴적순서로 볼 때 하부층에 속하여 고결도가 좋은 퇴적층으로 구성되어 있을 것으로 판단하였다. 다만 시추코어를 관찰한 결과 지하수와의 접촉여부 내지 함유상태가 강도변화와 역기질 결합상태에 영향을 주고 있음을 알 수

있었다. 한편, 절리와 관련된 사항을 제외하면 지반을 평가할 수 있는 큰 요인은 압축강도라고 볼 수 있다. 따라서 지반등급을 설정하는 원칙을 정함에 있어 강도의 변화요인을 기준으로 정하는 것이 타당하다고 판단하였다. 또한 역과 기질의 비율이 6:4를 유지하고 있을 때에는 고결정도가 높으나, 6:4의 비율을 벗어나 기질이 많은 부분이나 역이 과하게 많은 부분은 입자간의 결합력이 떨어져 고결도가 낮음을 관찰할 수 있었다.

지하수의 접촉여부가 강도에 미치는 영향이 더 크다는 점에 착안하여 대분류기준으로 지하수와의 접촉여부를, 소분류기준으로 고결정도를 선정하였다. 그림 7과 표 3에서 보는 바와 같이 지하수 접촉여부에 따라 역암은 크게 I, II로 분류하였으며, 탄성파속도 및 고결정도에 따라 a, b로 분류하였다.



표 3. 역암층 지반등급 분류기준과 사진

| 지층 상태 | 지층구분            | U4~3   |                             | U2~1   |                           | 비고         |
|-------|-----------------|--|-----------------------------|--|---------------------------|------------|
|       |                 | 역함량  |                             | 역함량  |                           |            |
| 강도 특성 | 기질고결도 ( $q_v$ ) | • 일축압축강도 300~500kgf/cm <sup>2</sup><br>(국부적으로 100kgf/cm <sup>2</sup> 이상) |                             | • 일축압축강도 50~100kgf/cm <sup>2</sup> 이하<br>(국부적으로 350kgf/cm <sup>2</sup> 이상) |                           |            |
|       | 탄성파속도(m/sec)    | 2,600 이상   | 2,100~2,600                 |  | 2,100 미만                  | 일본 도로기준 참조 |
| 수리 특성 | 투수계수(cm/sec)    | 1.0×10 <sup>-6</sup> 이하  |                             |  | 1.0×10 <sup>-5</sup> 이상   | 고결로 치밀함    |
| 코아 관찰 | 함수 상태           | • 지하수 흔적 거의 없음<br>• 치밀한 결합   | • 지하수 흔적 거의 없음<br>• 약한부분 협재 | • 지하수 흔적, 습윤 상태<br>• 치밀한 결합  | • 지하수 흔적<br>• 역과 기질 부분 분리 | 시추코어 관찰    |

### 5. 역암퇴적층의 지반정수 산정

절리의 발달이 미약한 역암퇴적층의 경우 점착력은 고결도를 반영하는 일축압축강도에 비례한다고 간주하고 삼축압축시험결과와 일본에서의 적용사례를 반영하여 안전측으로 하향 적용하였다. 내부마찰각( $\phi$ )은 삼축압축시험결과를 상한치로, 채성형시료에 대한 대형삼축시험 및 대형직접전단시험을 하한치로 간주하고, 자갈포함지층의 해외자료 및 국내 자료를 반영하여 안전측으로 하향 적용 하였다. 변형계수( $E$ )는 공내재하시험결과와 일본에서의 적용사례를 반영하여 적용하였으며, 단위중량은 밀도검층결과, 포아송비는 실내시험결과를 반영하여 설계정수를 산정하였다.

### 6. 결론

경주시 마동에서 양북면 장항리에 이르는 터널구간에는 절리발달이 거의 없는 역암퇴적층이 종점부 약 1km 구간에 분포함으로써 새로운 방법의 지반

평가 및 터널설계가 요구되었다. 본 고에서는 역암퇴적층 구간과 관련한 지반평가 및 터널설계의 주요 내용을 소개하여 유사한 지질조건에서의 터널설계시 참고자료로 활용될 수 있도록 하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 역암퇴적층은 신생대 3기에 정단층으로 낮은 부분에 퇴적된 후 암석화 과정이 진행중에서 지표에 노출됨으로써 기질의 최대압축강도가 485kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 타 암종에 비해 약하지만 흩에 가까운 층은 아니다.
- (2) 역과 기질의 비율은 대체로 6:4정도이며 국부적으로는 기질이 우세한 부분 또는 역이 우세한 부분이 있다. 역의 압축강도는 907~2,449 kgf/cm<sup>2</sup>이며, 기질의 강도는 362~485 kgf/cm<sup>2</sup> 이다.
- (3) 역암퇴적층은 연장성이 있는 절리의 발달이 거의 없고 부분적인 균열만 존재하므로 기존의 경험적 암반분류방법인 RMR분류나 Q분류방법의 적용이 곤란한 지층이며, 이는 해외 사례에서도 같은 결론에 도달한 것을 알 수

# 경주지역 3기 역암 퇴적층에 관한 생성원인 및 지반물성에 관한 분석

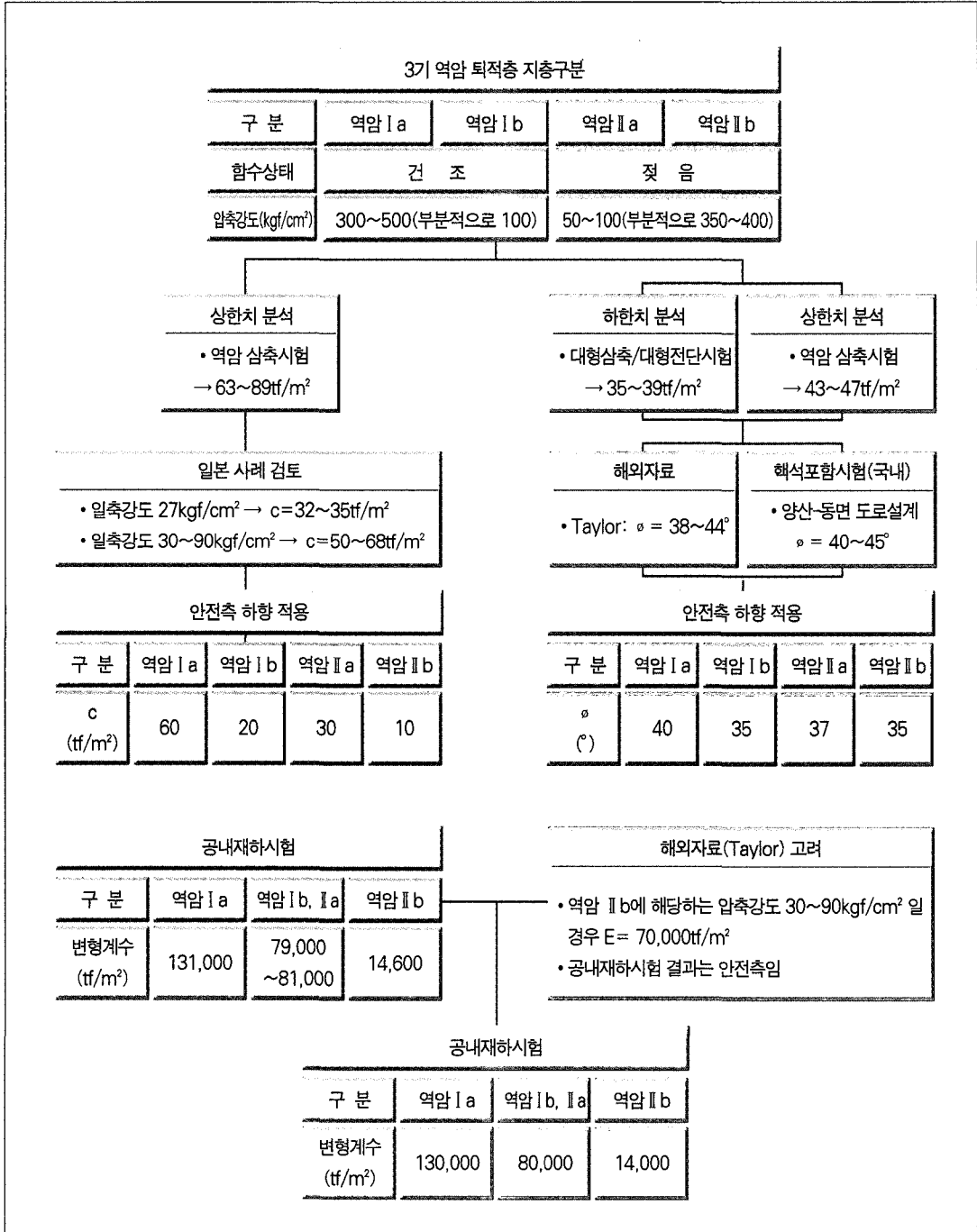


그림 8. 3기 역암 퇴적층 지반정수 산정 흐름도

있었다. 이를 근거로 절리의 발달이 저조한, 약한 암석의 경우 공학적으로 동질성이 있는 부분으로 영역화하고 영역별로 지반특성치를 산정하여 전산해석을 통한 지반평가가 합리적이라고 판단하였다.

- (4) 역암퇴적층의 특성상 지하수 함수상태와 고결도가 공학적 동질성을 판단하는 기준이라고 보고 지하수 함수상태를 대분류기준(I, II)으로, 고결도를 소분류기준(a, b)으로 정하였다. 지하수 함수상태는 시추코아 젖음정도와 지하수접촉흔적 관찰, 전기비저항치를 근거로 동질구간을 구분하였으며, 고결도는 코아상의 균열이나 역과 기질의 분리정도, 탄성파속도를 근거로 동질구간을 구분하였다.
- (5) 역암퇴적층의 구간별 지반정수는 현장시험결과, 실내시험결과, 해외적용사례 등을 반영하여 안전측으로 하향적용 하였다.

(2000), 울산단층일원에 대한 지역지질 특성연구: 제3기 마이오세 와음분지의 지질구조와 대자율비등방성(AMS), 지질학회지, 제36권, 제3호, pp. 195~216

- 4. 손문, 정혜윤, 김인수(2002), 한반도 남동부 연일구 조선 남부 일원의 지질과 지질구조, 지질학회지, 제38권 제2호, pp. 175~197
- 5. 손승완, 장태우, 김영규(2002), 한반도 동남부 제4기 단층 비지의 광물학적 및 지구화학적 연구, 한국광물학회지, 제15권, 제2호, pp. 85~94
- 6. 이봉주, 류충렬, 최위찬(1998), 한국의 제4기단층, 대한지질학회 제53차 학술발표회 초록집, pp49
- 7. 최위찬, 황재하, 윤욱, 김동학(1988), 어일 도폭(1:25,000) 및 설명서, 한국지질자원연구원
- 8. (주)쏘일테크 엔지니어링역(2001), 암반의 분류와 적용, 창우출판, pp.128~130, pp.156~157
- 9. 토목공학연구회(2003), 연암의 평가, 창우출판, pp.288~293, pp.432~438
- 10. Evert Hoek(1998), Rock Engineering, pp.193~194
- 11. Tateiwa(1924), 조양 도폭(1:50,000) 및 설명서, 조선지질조사소
- 12. Teresa Taylor, Richard J. Frahaszy, Eric Pond(1995), Strength of Gap-Graded Gravelly Soils, ASCE Geotechnical Special Publication No.56, pp.20~34

### 참고문헌

- 1. 김기영, 김동훈(2002), 경주시 감산사단층 부근에 서의 탄성파 굴절법 조사, 지구물리학회지, 제5권 1호, pp. 41~50
- 2. 김동학, 황재하, 박기화, 송교영(1998), 부산 지질도폭 및(1:250,000) 설명서, 한국지질자원연구원
- 3. 손문, 김인수, 이동호, 이준동, 김진섭, 백인성