

# 양산단층계의 지구조 운동에 따른 불연속면 분포 및 지하수 거동특성 소개



**이진무**  
(주)SK건설  
부장



**이성기**  
(주)태조엔지니어링  
부사장



**기정석**  
(주)지오스캔  
대표이사



**신동윤**  
(주)지오스캔  
이사

## 1. 서론

최근 철도 및 도로의 선형이 개선되면서 장대 산악터널의 건설이 증대됨에 따라 열극 암반에서의 터널 굴착에 따른 지하수 거동 분석의 중요한 부분을 차지하게 되었다.

암반에서의 지하수 거동은 대부분 불연속면(단층, 절리 등)을 통해 이루어지며 불연속면의 분포특성은 구조적 성인과 밀접하게 관련된다.

암반에서의 지하수 거동 해석에서 불연속면 체계의 불규칙한 규모종속과 이방성 특성으로 인하여 지금까지의 해석 방법으로는 만족할 만한 결과를 얻을 수 없었다. 따라서 불연속 암반의 지하매질을 연속매체로 가정하는 모형보다는 암반상태를 표현할 수 있는 3차원 불연속체모형(discrete fracture model)이 요구되며, 현지 암반 불연속면체계의 복잡성을 완전하게 모의하는 것은 불가능하기 때문에 현장자료의 통계학적 처리에 의한 추계론적인 모형이 사용되고 있다.

본 고에서는 경상남도 양산시 정족산 일대에 계획 중인 경부고속철도 터널구간을 대상으로 불연속면의 성인에

따른 특성(방향성, 군 분류, 크기, 밀도, 틈 등)을 통계적으로 분석하고 불연속체 암반을 추계론적으로 재현하여 이에 따른 수리전도도의 이방성 및 크기를 제시하고 터널굴착에 따른 지하수 유입량을 분석하였다.

## 2. 지형 및 지질

### 2.1 위치 및 지형

본 조사지역은 행정구역상 경상남도 울산시 울주군 및 양산시 웅산읍 일대로, 계획터널은 N30E의 남북방향으로 계획중이다. 정족산과 천성산을 잇는 능선을 중심으로 동측에는 양산단층이 서측에는 동래단층이 발달하며, 능선을 중심으로 동측은 급사면, 서측은 완사면 및 깊은 계곡을 형성한다(그림 1).

산계는 대부분 북북동 및 서북서 방향으로 힘준한 산악 지형을 이루고 있으며, 수계는 북동 및 북서 방향으로 발달하며, 수지상 1차 수계망은 단층으로 예상되는 격자상

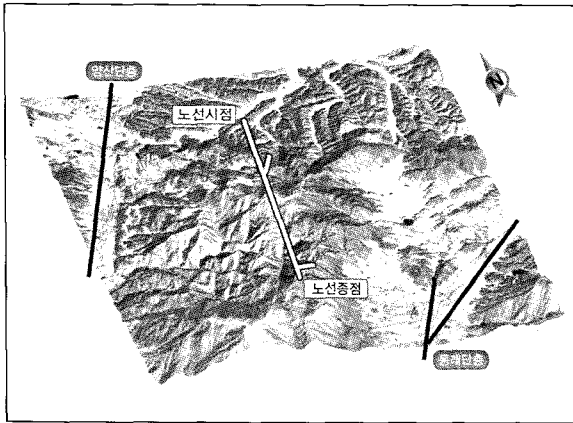


그림 1. 조사지역 지형

2차 수계망에 접속하고 대부분의 지표수는 능선 서측 북북동, 동서, 북서 방향 계곡에 의해 양산천으로 유입된다.

## 2.2 지질

본 지역은 언양도폭(1972) 하단 및 양산도폭(1964) 상단에 해당하며, 중생대 백악기 하양층군(세일, 사암 및 혼펠스)을 기반으로, 이를 관입한 흑운모화강암/화강반암, 이를 관입/분출한 화산암 복합체(안산암, 각력 응회암, 유문암 등으로 지질도상 화산암복합체, 원효산각력암, 유문암 등으로 지질도상 화산암복합체, 원효산각력암

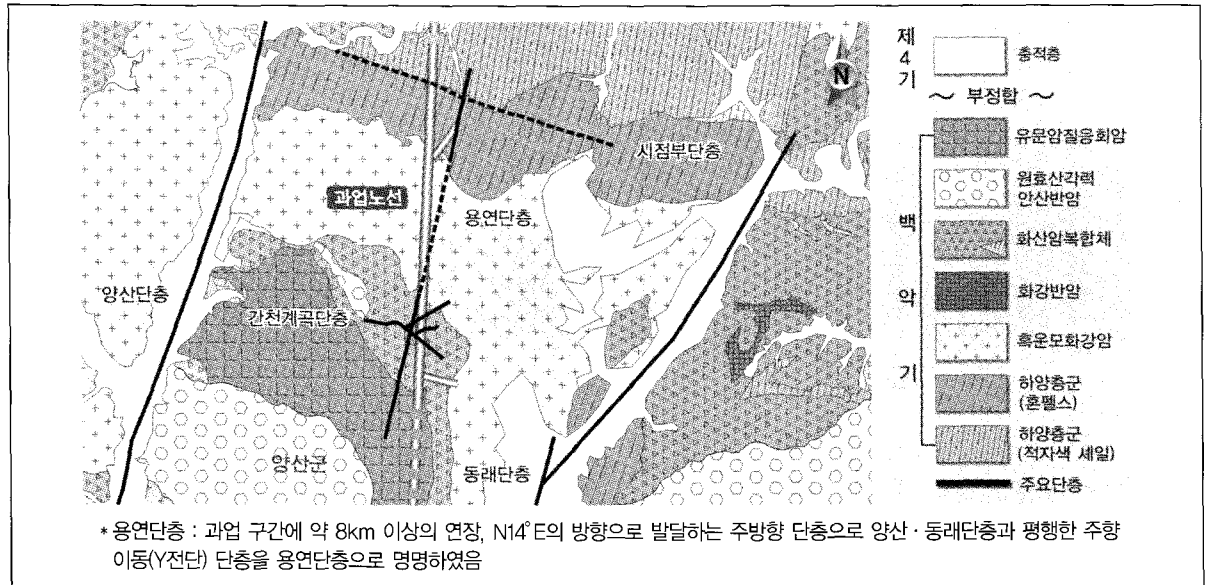


그림 2. 지질도

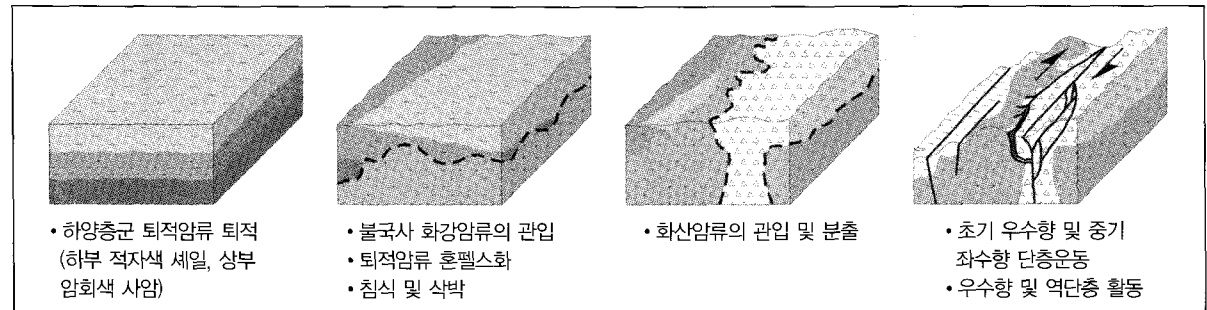


그림 3. 지구조 변천사

산반암, 유문암질 응회암을 포함함) 및 제3기 암맥류로 구성되어있으며 지질각론은 다음과 같다(그림 2, 3).

**하양층군** : 터널 시점부에 구릉성 산지형태로 분포하며, 자색 셰일층에 사암과 실트스톤이 협재한다. 사암은 석영, 장석, 화산기원의 암편으로 구성되며, 일부 열수변질에 의한 녹니석을 함유한다. 층리면의 주향/경사는 N10°W/15°SW이며, 화강암 접촉부 및 불규칙하게 관입된 화강암 Patch에 의한 접촉변성작용으로 혼펠스화가 관찰된다

**흑운모 화강암** : 정족산 일대에서 높은 지형을 이루어 분포하며, 화산암 복합체와의 접촉경계부에서 반상구조가 발달한다. 정족산 인근 저경사 풍화지역에 무제치들의 다수의 습지가 분포한다.

**화산암 복합체** : 안산암, 안산반암, 각력안산암, 석영안산암, 회유응회암, 유문암질응회암, 안산암질응회암 등 다양한 암종이 분포하며, 국부적으로 하양층군 퇴적암류(혼펠스)를 포획하고 있다.

**암맥류** : 용연단층과 동일방향으로 염기성 암맥이 발달하며, 반화강암질 산성암맥이 다수 관찰된다.

### 2.3 지질구조

본 조사지역은 한반도 남동부 경상분지내 북북동-남남

서 방향성을 갖는 6~7조의 단층군(양산, 동래, 자인, 밀양, 모량, 일광단층 등)을 이루는 양산단층계 내에 위치한다.

양산단층은 광역 지구조 운동으로 우수향 주향이동, 좌수향 주향이동, 우수향 주향이동 및 다중변형 등 수차례 변화를 받았으며(장천중, 장태우, 1998), 양산단층에 의해 절단된 퇴적암의 평면적 지질분포의 차이를 원상복귀 후 추정하면 약 25~35km 에 이른다.

## 3. 선구조 및 불연속면 분석

### 3.1 개요

본 지역은 대규모 주향이동단층인 양산단층과 동래단층의 사이에 위치하며, 이들 주단층의 이동과 관련된 2차적인 구조선이 발달하고 있다.

Riedel (1929)의 연구에 의하면 주 단층이 주향이동을 할 경우 이와 관련되어 발달하는 2차적인 단층은 주 단층의 방향을 기준으로 주방향 전단(Y Shear), 2차 전단계열인 동향전단(R, Riedel Shear) 및 반향전단(R', Conjugate Riedel Shear), 인장절리(T, Tension) 등으로 분류된다 (그림 4).

따라서 과거 양산단층계의 주응력 방향에 따른 전단감각에 근거한 광역선구조 분석 및 지표 노두 및 시추공

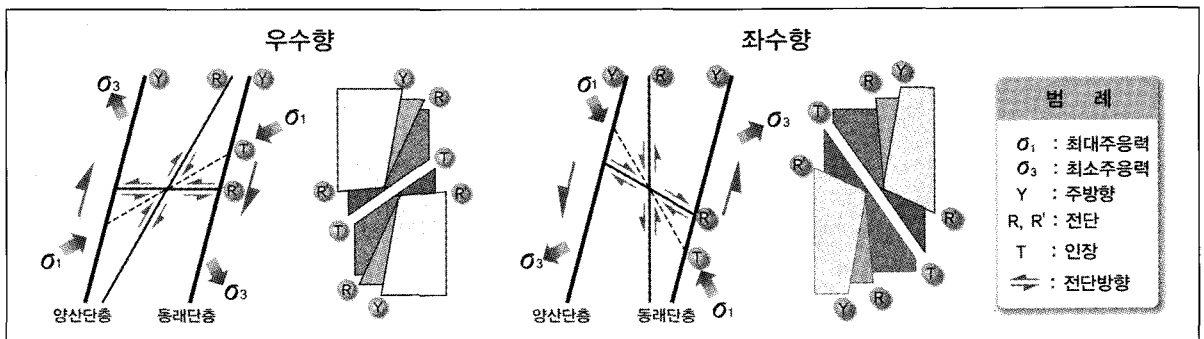


그림 4. 단순화된 주향이동 전단 개념과 배열

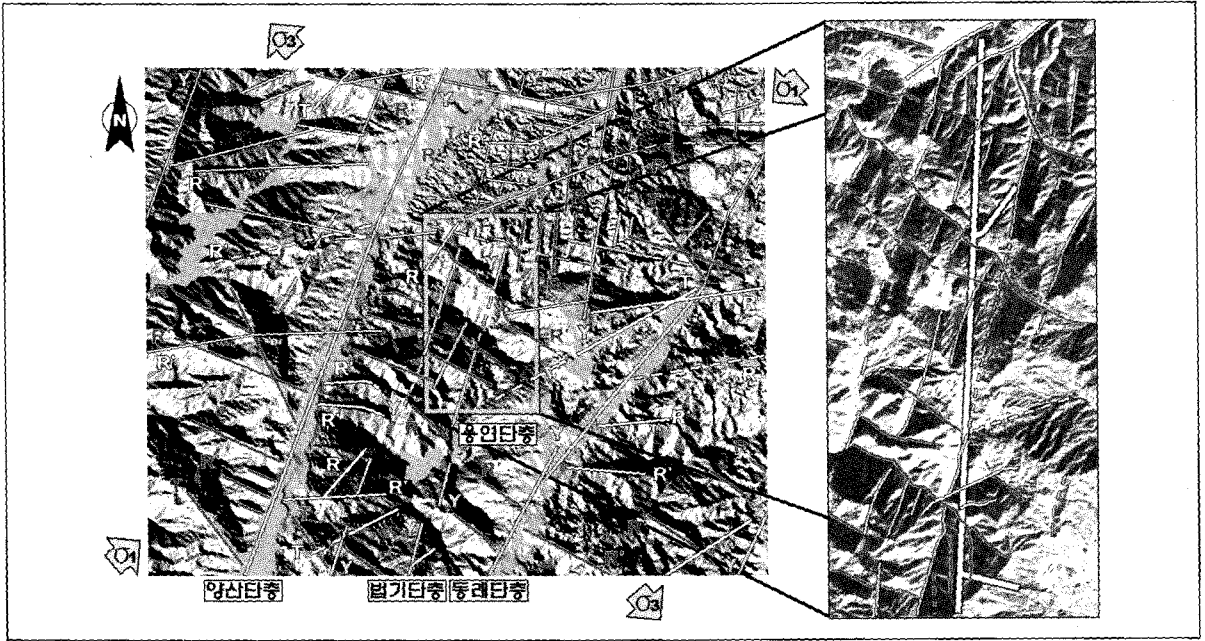


그림 5. 주향이동 전단감각을 고려한 연구지역의 선구조

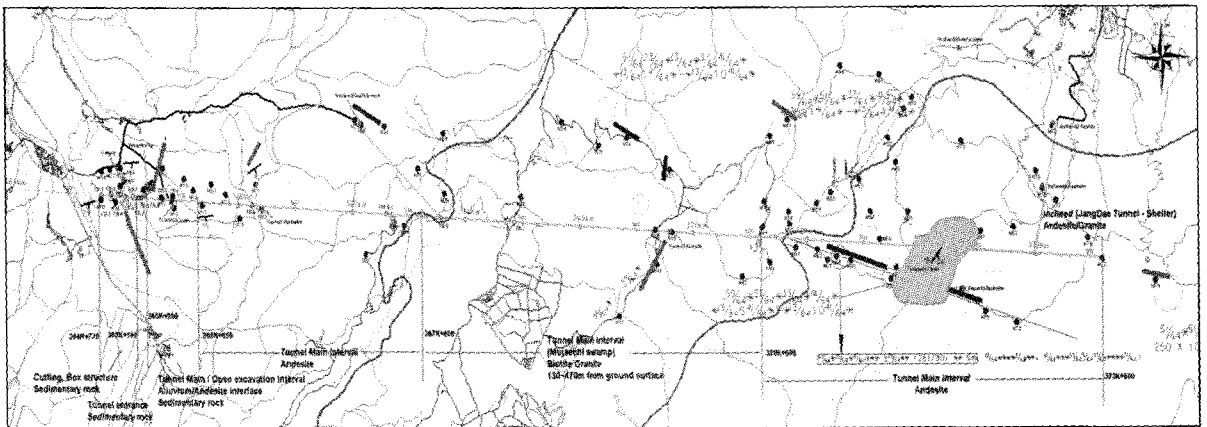


그림 6. 암반불연속면 채취 위치

(BIPS, Televiewer) 자료로부터 추출된 3차원 절리분포 분석을 통해 단층·절리의 성인, 공학적 특성을 파악하고, 이들로부터 균열암반의 투수이방성 및 수리특성을 도출하였다.

### 3.2 선구조 분석

선구조 분석은 공간해상도 1m×1m의 Ikonos 위성영상을 활용하여 실시되었으며 양산단층, 동래단층과 연계한 주응력 방향에 따른 주향이동 전단 개념에 근거하여

실시하였다.

선구조 분석 결과, 선구조의 빈도 및 연장성은 양산·동래단층과 평행한 주방향 Y전단(N10°-20° E)과 좌수향 이동에 따른 반향전단(R) 및 인장(T)이 우세하게 나타난다(그림 5).

### 3.3 불연속면 분포특성

#### 3.3.1 불연속면 분포

불연속면의 3차원적 분포 상태를 파악하기 위하여 총 11개소의 scanline 조사, 83개소의 무작위 노두조사, 21개소의 시추조사, 11개 시추공에서의 BIPS 및 Televiewer 조사가 실시되었다(그림 6).

조사자료는 Terzaghi correlation에 의해 방향에 따른


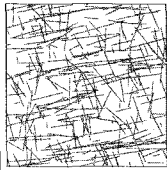
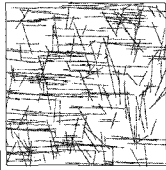

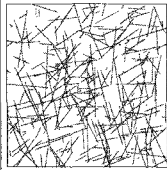
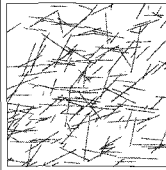

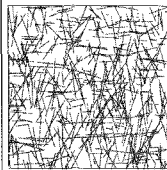

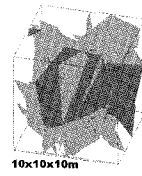
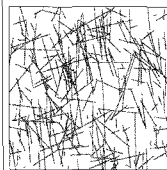

가중치를 고려하였고, 절리군별 특성은 Anderson Darling 검증에 의한 통계기법을 활용하여 적정함수분포 및 대표값을 결정하였다.

주절리군의 분포경향을 토대로 본 연구지역을 퇴적암 영역, 혼펠스영역, 화강암영역, 화산암복합체영역으로 구분하였으며, 그 분포특성은 표 1과 같다. 퇴적암 및 혼펠스영역의 경우 주절리 J1은 층리면, 좌수향의 반향전단이 J2, 주방향 Y J3로 분류되며, 화강암 영역은 주방향(Y)이 J1, 박피상절리(exfoliation)가 J2, 우수향 및 좌수향 인장(T)이 J3, J4로 분류되며, 화산암복합체의 경우 좌수향의 반향전단이 경사를 달리하며, J1 및 J2, 주방향(Y)이 J3로 분류된다. 암반 불연속면 분포를 개괄하면 양산단층계와 동일한 방향의 주방향이 전체 영역에 공히 나타나며, 좌수향의 반향전단이 우세하게 나타난다. 퇴적암(혼펠스 포

표 1. 영역별 절리분포 및 특성

구분	평사투영도	구분	J1	J2	J3	
퇴적암		방향성(Dip dir./Dip)	280/10	032/82	101/78	
		Fisher K	53	16	21	
		연장성 (m)	11.9	6.6	6.5	
		간격 (m)	0.21	0.19	0.34	
		특성	층리	전단(R')	주방향(Y)	
혼펠스		방향성(Dip dir./Dip)	296/08	225/57	103/81	
		Fisher K	11	14	31	
		연장성 (m)	7.9	8.4	9.5	
		간격 (m)	0.21	0.41	0.40	
		특성	층리	전단(R')	주방향(Y)	
화강암		방향성(Dip dir./Dip)	111/76	106/02	337/84	235/73
		Fisher K	12	21	14	11
		연장성 (m)	9.3	7.7	9.1	9.1
		간격 (m)	0.34	0.40	0.42	0.61
		특성	주방향(Y)	수평절리	인장 (T)	인장(T)
화산암복합체		방향성(Dip dir./Dip)	015/73	200/55	097/82	
		Fisher K	10	10	20	
		연장성 (m)	9.8	8.4	11.2	
		간격 (m)	0.22	0.23	0.25	
		특성	전단(R')	전단(R')	주방향(Y)	

표 2. 영역별 불연속면 모형 구축 결과

구분	Areal Fracture Model	N-S Direction Trace Map	E-W Direction Trace Map
퇴적암	 10x10x10m		
혼펠스	 10x10x10m		
화강암	 10x10x10m		
화산암 복합체	 10x10x10m		

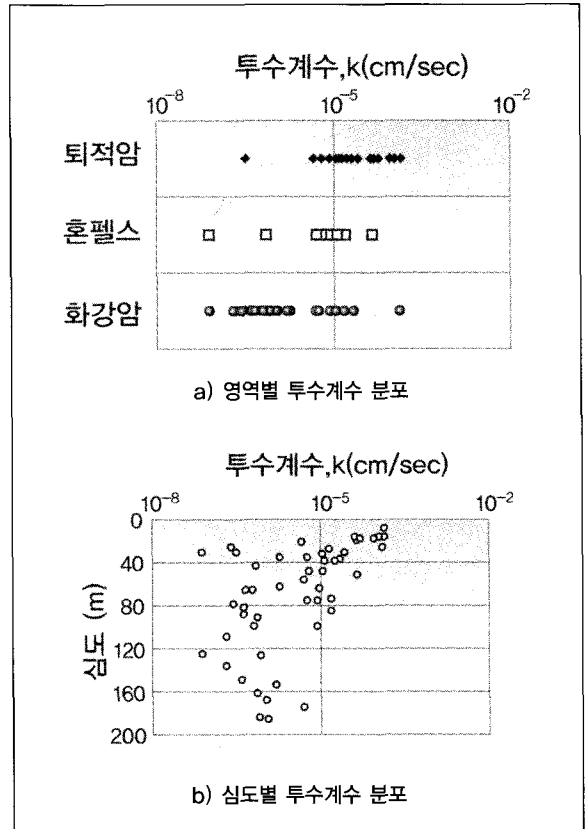
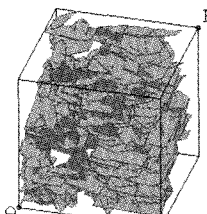
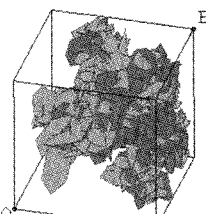
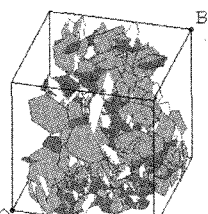
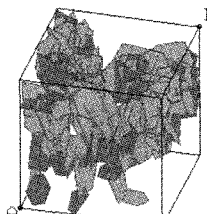


그림 7. 수리시험 결과

표 3. 지하수 유동경로 모사 결과

퇴적암영역	혼펠스영역	화강암영역	화산암 복합체 영역
 A B	 A B	 A B	 A B

함)에서는 층리방향이 가장우세하며, 화강암지역에서는 박피상절리(수평절리)와 좌수향 및 우수향의 인장이 우세

하게 나타난다. 전반적으로 암반불연속면의 방향특성은 광역 선구조의 방향특성과 유사하게 나타난다.

### 3.3.2 3차원 불연속면 모형 구축

통계적으로 처리된 불연속면 분포 양상을 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 3차원으로 재현하였으며, 재현을 위한 프로그램은 미국의 Golder Associates Inc에서 개발한 FracMan을 이용하였다. 불연속면의 연장성은 축선법에 의한 균열 추적길이자료를 활용하였으며, 모사영역은 각 균열 영역에 대해 100 m × 100 m × 100 m로 설정하였다.

표 2는 암종별 불연속면 모형구축 결과이며, 이들 결과는 불연속면을 고려한 암반역학모델 및 수리모델링의 기초자료로 사용되었다.

## 4. 열극암반의 지하수 거동 분석

### 4.1 개요

암반 불연속면을 통한 지하수 거동을 분석하기 위하여 미국의 Golder Associates Inc에서 개발한 MAFTIC을 이용하였다. 본 프로그램은 동사의 불연속면 모사 프로그램인 FracMan에서 모사된 3차원 균열 모형에서 3차원 균열망 메쉬를 작성하여 수리모델링을 수행하는 3차원 FEM 프로그램이다.

### 4.2 수리시험

불연속 암반의 지하수 거동특성을 고려한 수리특성 규명을 위하여 총 69회의 Packer Test 와 11회의 정압투수 시험이 실시되었으며, 시험결과는 그림 7과 같다.

암반에서의 투수계수는  $10^{-7} \sim 10^{-9}$  m/sec영역에 속하며, 퇴적암, 혼펠스 영역보다 화강암 영역의 투수계수가 다소 낮음을 알 수 있다.

### 4.3 유동로 분석

구축된 3차원 불연속면 모형을 통해 지하수 거동을 분석하기 위해서는 연결성이 있는 투수성 균열로 유동경로를 구성하여야 한다. 각 영역별 터널-모사공간의 외부 경계 간 유동로를 구성하는 균열을 파악하여 유동경로를 구성한 결과는 표 3과 같다.

### 4.4 수리이방성 분석

각 영역별 열극암반에 의한 수리이방성을 파악하기 위하여 유동경로 모형에 동-서(남-북, 상-하) 방향으로 단위 수리경사를, 흐름 방향에 평행한 경계에는 불투수(no flow) 경계 조건을 설정하여 동-서(남-북, 상-하) 방향을 통하여 유출되는 유량을 산출하였다. 이러한 방법은 각 방향에 대한 수리전도도를 직접적으로 나타내는 것은 아니나 각 구조영역에 적용된 수리 계수에 대한 상대적인 이방성의 정도를 파악하는 데 유용하게 이용될 수 있다. 이들 이방성 정도에 수리시험에서 취득한 투수계수 값을 고려하여 방향별 수리전도도 값을 유추하였다. 화산암복합체 영역의 경우 수리시험자료가 없기 때문에 화강암 및 혼펠스 영역의 중간값으로 가정하였다.

각 영역의 방향별 수리전도도는 표 4와 같으며, 모든 구조영역에서 남-북방향의 수리전도특성이 우세하게 나타난다. 이는 본 대상지역에서의 불연속면 빈도 및 규모가 우세한 결과를 반영하고 있으며, 광역적인 구조선의 발달 방향과도 일치한다.

### 4.5 암반균열을 통한 지하수 유입량 산정

#### 4.5.1 임의의 기간에 대한 터널내 지하수 유입량

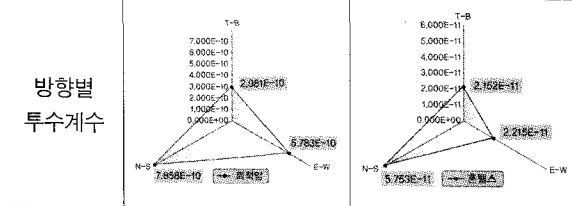
굴착터널내 지하수 유입량을 계산하기 위하여 그림 8과 같이 모사영역 내에 터널을 발생시킨다. 터널내부의 수두는 위치수두(고정수두)를, 영역의 각 경계부에 초기

수두로 위치수두 + 압력수두를 입력시켜 부정류 상태로 모사하였다.

모사공간과 터널공간과의 초기수두차는 퇴적암 210m,

표 4. 방향별 수리전도도

흐름방향	퇴적암	혼펠스
상·하	$6.4 \times 10^{-6} \text{m/sec}$	$3.2 \times 10^{-6} \text{m/sec}$
동·서	$1.2 \times 10^{-7} \text{m/sec}$	$3.3 \times 10^{-8} \text{m/sec}$
남·북	$1.7 \times 10^{-7} \text{m/sec}$	$8.8 \times 10^{-8} \text{m/sec}$



흐름방향	화강암	화산암 복합체
상·하	$1.1 \times 10^{-8} \text{m/sec}$	$7.6 \times 10^{-9} \text{m/sec}$
동·서	$1.1 \times 10^{-8} \text{m/sec}$	$9.8 \times 10^{-9} \text{m/sec}$
남·북	$5.7 \times 10^{-8} \text{m/sec}$	$4.5 \times 10^{-7} \text{m/sec}$

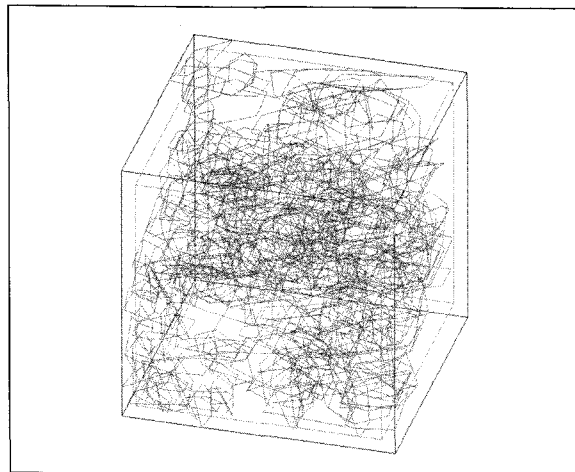
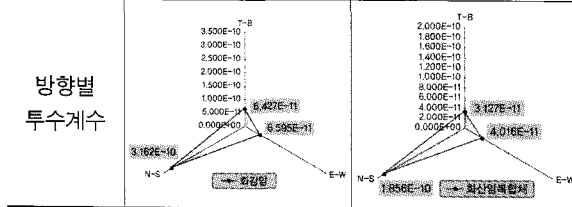


그림 8. 터널의 모사

혼펠스 470m, 화강암 470m, 화산암복합체 450m로 각각 설정하였다. 터널 벽면을 통한 부정류 상태에서의 지하수 유입량은 그림 9 및 표 5와 같다. 그림 10은 1일, 1주일, 1개월, 6개월, 1년 경과후의 터널부변의 수두변화를 표현한 것으로 시간의 경과할수록 수두차가 완화되어 안정상태로 유도됨을 알 수 있다.

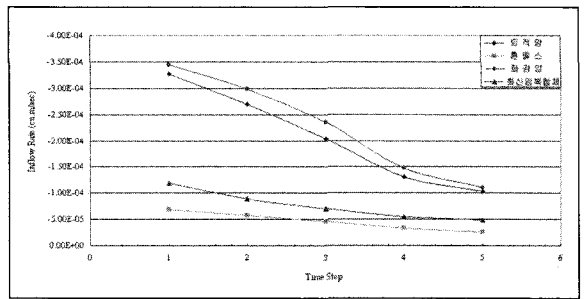


그림 9. 시간에 따른 터널내 유입률(m³/sec)

표 5. 시간에 따른 지하수 유입량(m³/sec)

구분	굴착후시간	터널유입량
퇴적암 구간	1일	$3.27 \times 10^{-4}$
	1주	$2.70 \times 10^{-4}$
	1개월	$2.03 \times 10^{-4}$
	6개월	$1.30 \times 10^{-4}$
	1년	$1.03 \times 10^{-4}$
혼펠스 구간	1일	$6.85 \times 10^{-5}$
	1주	$5.77 \times 10^{-5}$
	1개월	$4.60 \times 10^{-5}$
	6개월	$3.23 \times 10^{-5}$
	1년	$2.63 \times 10^{-5}$
화강암 구간	1일	$3.43 \times 10^{-4}$
	1주	$2.97 \times 10^{-4}$
	1개월	$2.35 \times 10^{-4}$
	6개월	$1.47 \times 10^{-4}$
	1년	$1.11 \times 10^{-4}$
화산암 복합체 구간	1일	$1.19 \times 10^{-4}$
	1주	$8.83 \times 10^{-5}$
	1개월	$7.02 \times 10^{-5}$
	6개월	$5.38 \times 10^{-5}$
	1년	$4.81 \times 10^{-5}$



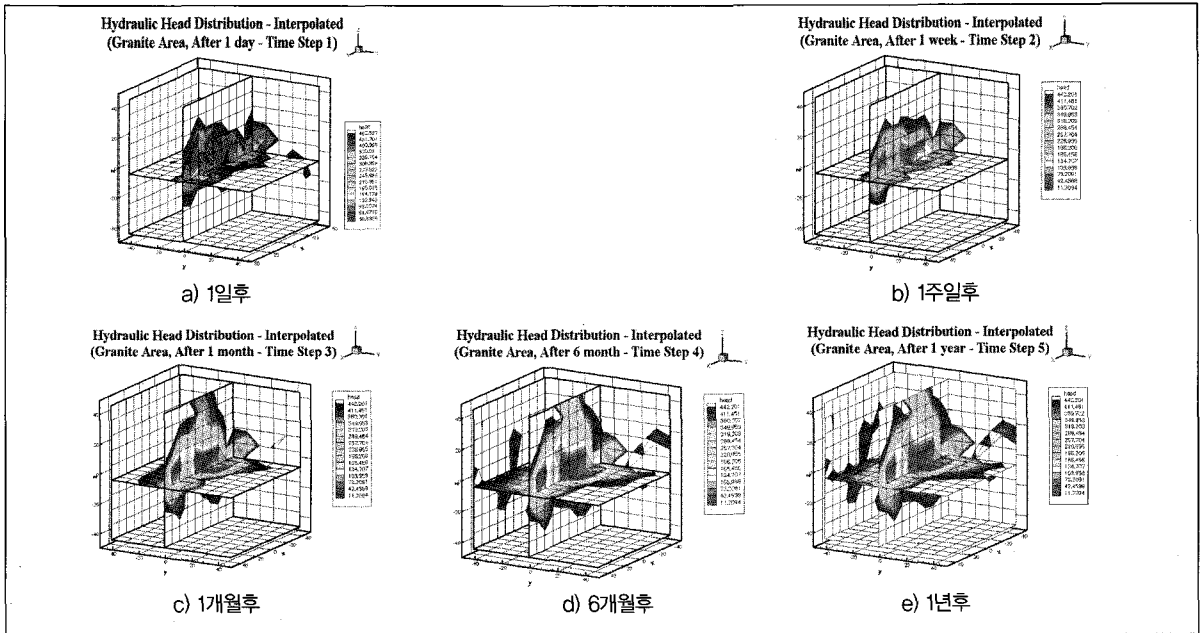


그림 10. 터널굴착후 지하수 유입에 의한 시간에 따른 수두변화(화강암지역).

### 5.1.2 터널 굴진에 따른 지하수 유입

부정류 상태 모사결과에서 나타낸 바와 같이 터널로의 지하수 유입은 시간에 따라 감소하게 된다. 그림 11은 각 영역별로 시간의 경과에 따른 지하수 유입량을 35개월 동안 나타낸 것으로 지하수 유입량이 큰 화강암과 퇴적암 영역에서는 급격히 유입량이 감소되고 혼펠스와 화산암 복합체 영역은 완만하게 유입량이 감소한다. 대체적으로 12개월이 경과하면 안정상태에 도달하여 감소율이 적어진다.

터널 굴진(터널계획공정, 그림 12)에 따른 터널 내로의 지하수 유입량을 시간에 따른 지하수 유입감소를 고려하여 계산하면 그림 13과 같으며, 여기서 유입량은 각 굴진 구간(터널 시점-예상관통부1, 사갱1-예상관통부1, 사갱1-예상관통부2, 사갱2-예상관통부2, 사갱2-터널종점)에 대해 굴진개시로부터 굴진종료까지의 시간에 대한 지하수 유입을 나타낸다. 그림 13의 각 data point는 각각 1개월 경과 후, 총 굴진 길이에서 유입되는 지하수량을 나타

내며, 혼펠스 지역에서의 아래로 볼록한 부분은 혼펠스 지역에서의 유입량의 증가에 비해 퇴적암지역에서의 시간에 따른 유입량 감소가 큰 결과가 반영된 것이다.

실제로는 상기한 5개 굴진구간이 동시에 굴착되는 것이 아니고 일정한 시간을 두고 각 굴진구간별로 굴착이 진행된다. 따라서 터널시점-예상관통부1의 굴진구간의 경우, 공사개시일로부터 약 18.5개월 후에는 굴진이 완료되며, 최종 굴착완료 시점인 33.7개월까지는 지하수의 유입이 계속 진행된다. 이를 고려한 시간에 따른 굴착구간별 지하수 유입량 변화는 그림 14와 같으며, 이를 누적한 터널굴착에 따른 터널내 지하수 총 유입량은 그림 15와 같다.

그림 15에서 기울기의 변화를 나타내는 구간은 암상 경계부로서 암상변화에 따른 균열양상 및 수리특성의 변화로 인한 유입량의 변화를 나타내며 최대 지하수 유입은 터널 굴착 종료시점에서 3.7520 m<sup>3</sup>/min.으로서 일당 540 m<sup>3</sup>의 유입량에 해당한다.

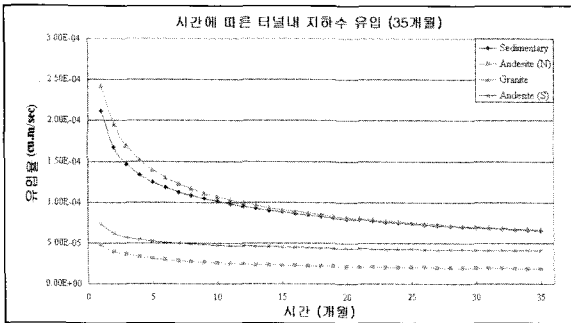


그림 11. 터널 굴진 시간에 따른 지하수 유입량

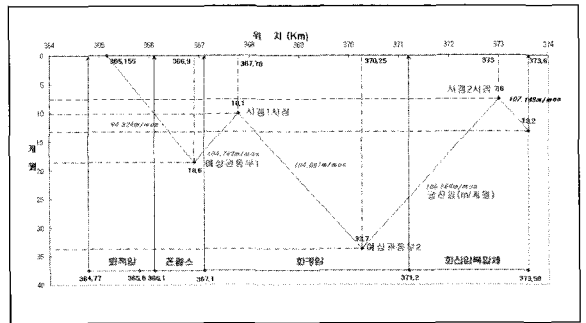


그림 12. 터널 굴진 시간 및 굴진 구간

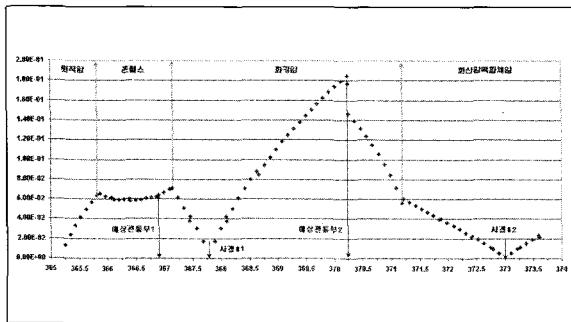


그림 13. 본선터널 분당유입량(m³/min)

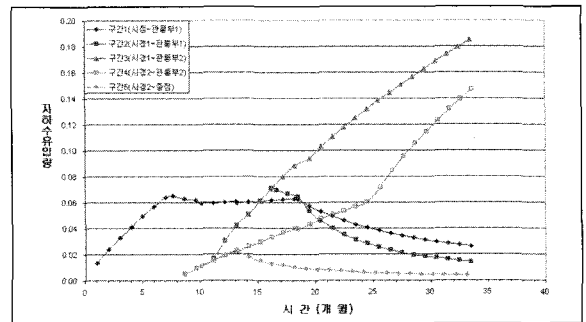


그림 14. 시간에 따른 구간별 지하수 유입량(m³/min)

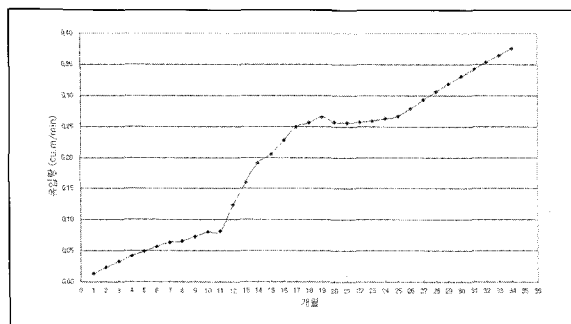


그림 15. 시간에 따른 터널내 지하수 총유입량(m³/min)

## 6. 결론

본 고에서는 경상남도 양산시 정족산 일대에 계획 중인 경부고속철도 터널구간을 대상으로 불연속면의 성인에 따른 특성(방향성, 군 분류, 크기, 밀도, 틈 등)을 통계적으

로 분석하고 불연속면 압반을 추계론적으로 재현하여 이에 따른 수리전도도의 이방성 및 크기를 제시하고 터널굴착에 따른 지하수 유입량을 분석하였다. 각 세부항목별 결과는 다음과 같다.

- 1) 선광역선구조를 분석에 따르면 본 지역은 양산단층대의 주향이동에 따른 2차 구조선이 발달해 있으며, 빈도 및 연장성은 양산·동래단층과 평행한 주방향 Y전단(N10°-20°E)과 좌수향 이동에 따른 반향전단(R) 및 인장(T)이 우세하게 나타난다
- 2) 본 연구지역은 암중에 발달하는 주절리군의 분포경향을 토대로 퇴적암영역, 혼펠스영역, 화강암영역, 화산암복합체영역으로 구분되며, 전반적으로 암반 불연속면의 방향특성이 광역 선구조의 방향특성과 유사하다.
- 3) 각 영역에 대해 균열특성을 고려한 3차원 균열모형

이 수립되었으며, 이를 기초로 대상지역의 암반균열을 통한 수리모사가 이루어졌다.

- 4) 각 영역별 이방성 분석결과, 공히 남북방향의 수리전도도가 크게 나타난다.
- 5) 터널 굴착에 의한 지하수 유입량은 터널 굴착 종료시점에서 540 m<sup>3</sup>/day 로 일반적인 연속체 모델에 비하여 적게 나타난다.

암반 열극망을 통한 지하수 거동분석 결과, 본 조사지역의 경우, 터널굴착에 의한 지하수의 초기 유입량이 시간이 경과함에 감소하여 약 12개월이 지나면 안정상태에 도달하며, 터널굴착에 따른 수두의 교란 영역은 터널주변 100m 이내에 있는 것으로 분석되었다. 터널굴착에 의해 지하수계가 교란되고 다시 안정을 찾는데 걸리는 시간 및

유입량의 감소 속도는 암반 불연속면의 분포특성 및 수리전도도에 의존한다.

### 참고문헌

1. 이민성, 강필중(1964), "한국지질도 1:50000 양산도폭 및 동설명서", 국립지질조사소
2. 이윤중, 이인기(1972), "한국지질도 1:50000 언양도폭 및 동설명서", 국립지질조사소
3. 장천중, 장태우(1998), "고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사.", 지질공학, 8권 1호, pp 35-39
4. Riedel, W.(1929) "Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen." Zbl. Miner. Geol. Palaeont., B 352

## 알림

한국터널공학회 논문집(터널기술 논문집)이 2003년 9월 9일자로 한국학술진흥재단의 등재후보 학술지로 선정되었습니다.

앞으로는 터널기술 논문집에 등재되는 논문은 학술논문으로 공인됨을 의미합니다.

향후 2년간 터널기술 논문집에 등재되는 논문의 평가를 통해 학술지로 확정될 수 있도록 전 회원의 각별한 관심과 참여를 부탁드립니다.