

# 서울 중심부 편마암 분포지역 저심도 구간의 암반 초기응력 분포특성 연구

## Study on characteristics of initial rock stress state at shallow depth of the gneiss region in the central part of seoul

배성호\*<sup>1</sup>, 전석원\*<sup>2</sup>, 최용근\*<sup>3</sup>, 김재민\*<sup>4</sup>

Bae, Seong-ho · Jeon, Seok-won · Choi, Yong-Kun · Kim, Jae-min

### Abstract

Since early in the 90's, as the need for construction of underground rock structures has been largely increased, the in-situ rock stress measurement has been widely carried out to provide the quantitative information on the initial stress state of test site at the design stage of underground rock structures. Among the diverse method developed for measuring rock stress, hydraulic fracturing method is most popularly used because it is applicable at pre-construction stage and has no limit in testing depth. In this paper a study on initial rock stress state at shallow depth of the plain gneiss region in the central part of Seoul was performed on the basis of the in-situ hydraulic fracturing stress measurement results from the 11 test boreholes. And overall characteristics of the initial stress field of the study area are discussed.

**Keywords:** Initial rock stress, hydraulic fracturing test, maximum horizontal stress

### 요 지

90년대 이후 지하 암반 구조물의 수요가 증가함에 따라 시공 전 설계 단계에서 요구되는 암반내 초기응력에 대한 정량적 정보를 얻기 위해 현장 초기 응력 측정이 광범위하게 수행되고 있다. 제안된 여러 측정법들 중 현장 적용성 면에서 큰 장점을 가진 수압파쇄법이 국내에서는 대표적으로 적용되고 있다. 본 논문에서는 평탄한 지형조건으로 이루어진 서울 중심부 편마암 지역내 저심도 구간의 11개 시추공을 대상으로 수압파쇄법에 의해 구해진 초기응력 측정자료와 수평응력의 크기, 방향성과 심도별 변화 그리고 측압계수 분포 등 과업구간 암반 내 초기응력장의 제반 분포 특성에 대해 논의하고자 한다.

**주요어:** 암반 초기응력, 수압파쇄시험, 최대 수평응력

\*1 정회원, (주)지오제니 컨설턴트 이사  
 \*2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수  
 \*3 (주)지오제니 컨설턴트 이사  
 \*4 (주)지오제니 컨설턴트 차장

## 1. 서론

한반도는 지질학적으로 선캄브리아이언에서 신생대에 걸친 다양한 지질시대가 분포하고 있으며 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 지질연대가 오래된 경향을 나타낸다. 현재의 지형상태는 백악기말 또는 신생대 제 3기말에 걸친 대규모 조산운동에 따른 것으로 알려져 있으며 추가령 열곡을 경계로 남, 북지역이 상이한 차이를 나타낸다. 추가령 열곡을 경계로 남쪽에 위치한 한국은 지질학적으로 경기육괴, 옥천전단대, 영남육괴, 경상분지, 연일분지 등 5개의 지구조대 (tectonic province)로 구분되며 이중 분포면적에서 경기육괴가 가장 큰 영역을 차지하고 있다. (그림 1 참조)

지리적으로 경기육괴의 서쪽에 위치한 서울지역의 기반암은 편마암과 화강암으로 대표되며 본 연구지역은 서울 중심부의 한강 남쪽지역으로 광역 지질특성으로는 선캄브리아기 경기변성암복합체의 호상편마암 (PCkbgm)을 기반암으로 하여 제 4기 충적층이 피복되어 분포하고 있다. 산계의 발달은 매우 미미한 완만한 지형조건을 가지며 현재는 대부분이 도심지지역을 형성하고 있다. 기반암인 호상편마암은 주로 석영-장석으로 구성된 우백질대와 흑운모로 구성된 우흑질대가 상호 교호하며 나타나는 호상구조가 특징적이다.

연구는 서울 지하철 9호선 건설공사와 관련된 사전 정밀 지반조사 단계에서 서울 영등포구 노량진에서 강남구 논현동에 이르는 한강 남쪽의 편마암 분포 구간에서 실

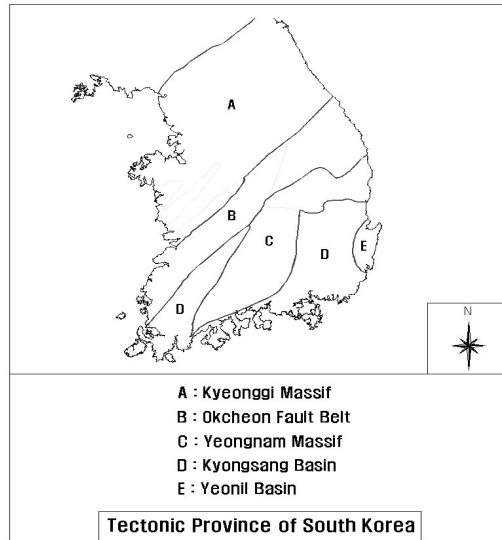


그림 1. 한국의 지구조대 분포

시된 현장 초기응력 실측데이터와 해석 결과를 바탕으로 수행하였다. 그림 2는 본 연구가 수행된 지역을 포함한 서울주변의 음영기복도와 연구지역을 나타낸다.

## 2. 전체 국토 영역의 초기응력 분포 특성

국내의 경우 1990년대 초반 이전에는 지하자원 개발 분야와 주요 국가 기간시설 중 일부 대형 사업 분야에서

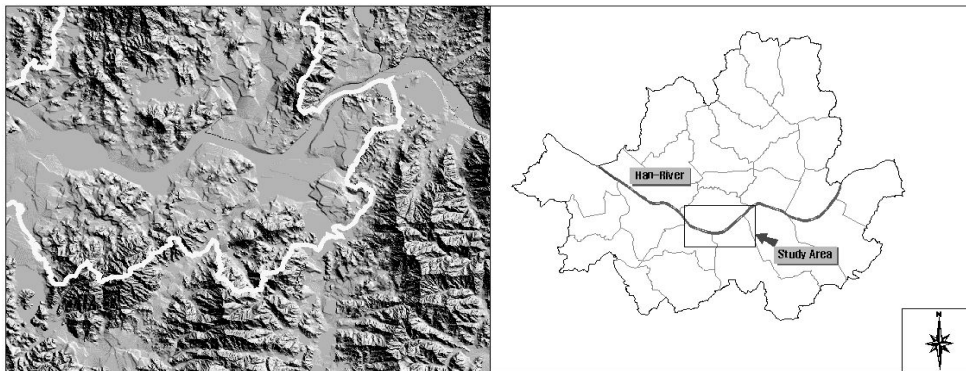


그림 2. 서울지역의 음영기복도 및 연구지역

표 1. 국내 심도에 따른 암반내 초기응력 제안식

제안자	초기응력상태 추정식	측정법 및 조사 심도 (m)
임한욱, 이정인 (1995)	$S_{hav} = 1.858 + 0.018 \cdot z$ ( $r = 0.869$ )	응력개방법 (0~850m)
최성웅 (1997)	$6/z + 0.5 < K_{avg} < 240/z + 0.1$	수압파쇄법
배성호, 전석원, 최용근 (2002)	$18/z + 0.31 < K_{avg} < 175/z + 1.05$ $S_H = 1.350 + 0.036 \cdot z$ ( $r = 0.856$ ) $S_h = 1.252 + 0.025 \cdot z$ ( $r = 0.849$ )	수압파쇄법 (20~310m)

주:  $K_{avg}$  : 평균축압계수,  $S_{hav}$  : 평균수평응력 (MPa),  $S_H(S_h)$  : 최대(최소) 수평응력 (MPa),  $z$  : 심도 (m)

주로 응력개방법에 의해 초기응력 측정이 이루어졌고, 일부는 외국 기술진에 의해 수압파쇄법으로 측정이 수행되었으나 1990년대 이후 터널 및 지하 공간 개발에 따른 대형 토목공사 분야에서 국내 기술 및 인력에 의해 수압파쇄법을 이용하여 초기응력 측정이 수행되고 있다. 지금까지 국내에서는 임한욱, 이정인 (1991, 1995) 등이 응력개방법에 의한 실측값을 바탕으로 추정식을 제안하였고, 최성웅 등 (1997)과 배성호 등 (2001, 2002)은 국내 여러 지역에서 수압파쇄법을 이용한 측정값들을 분석하여 초기응력의 분포 특성에 나타내는 추정식들을 제안한 바 있다 (표 1 참조).

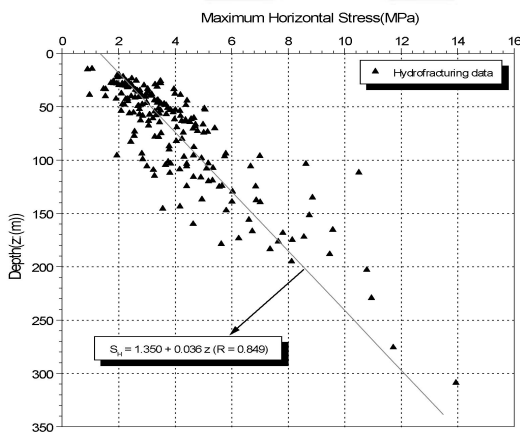
그림 3은 국내 국토 전체 영역에서 수행된 초기응력 실측자료로부터 도출된 초기응력 분포 특성에 대한 분석 결과 (배성호 등, 2002)를 나타낸다. 그림 3 (A), (B)는 최대, 최소 수평응력의 분포와 심도에 따른 회귀분석 결과를 나타내며, 그림 3 (C), (D)는 심도별 축압계수 분포

영역을 나타낸다. 그리고 그림 3 (E)는 전국의 개별 조사 지점에서 얻어진 최대수평응력 방향성 분포의 히스토그램을 보여주는데 지역에 따라 비교적 큰 편차를 보이지만 평균적으로 진북기준 약 82°의 방향성을 나타낸다.

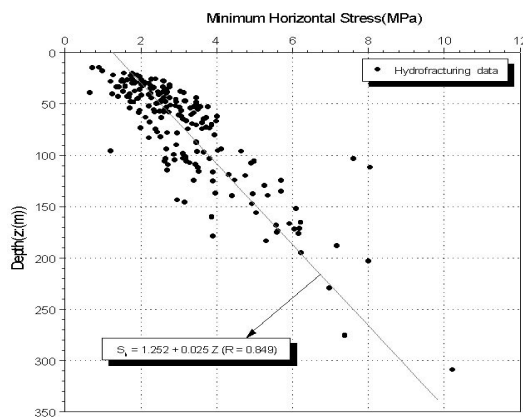
### 3. 현장시험 및 자료해석

#### 3.1 현장시험

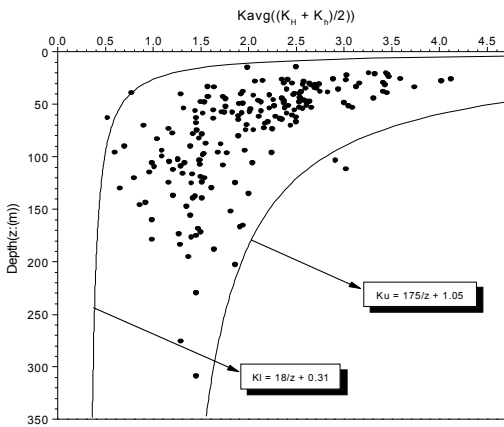
현장초기응력 측정은 편마암 분포지역내 심도 60m 이하의 총 11개 개별 시추공을 대상으로 하였다. 연구지역내에는 7개의 세부 조사지점 (Site-A~G)이 포함되며 개별 조사지점에서는 1~3개 시추공을 대상으로 수압파쇄 시험이 수행되었다. 시추에서 회수된 시료와 공내 촬영 자료를 근거로 총 53개의 개별 시험구간 (시험구간 :



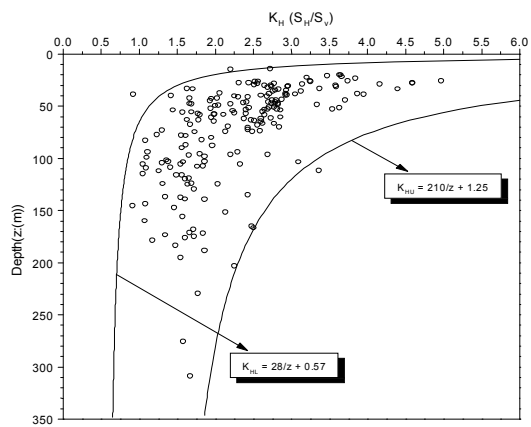
(A) 최대 수평응력 :  $S_H = 1.350 + 0.036z$  ( $r = 0.856$ )



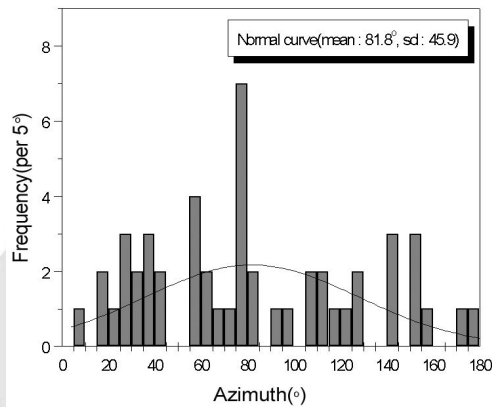
(B) 최소 수평응력 :  $S_h = 1.252 + 0.025z$  ( $r = 0.849$ )



(C) 평균 측압계수 :  $18/z + 0.31 < K_{avg} < 175/z + 1.05$



(D) 최대 측압계수 :  $28/z + 0.57 < K_H < 210/z + 1.25$



(E)  $S_H$ 의 방위각에 따른 빈도 히스토그램 (Mean :  $82^\circ$ , s.d :  $45.9^\circ$ )

그림 3. 국내 암반내 초기응력 분포 특성 (배성호, 전석원, 최용근, 2002)

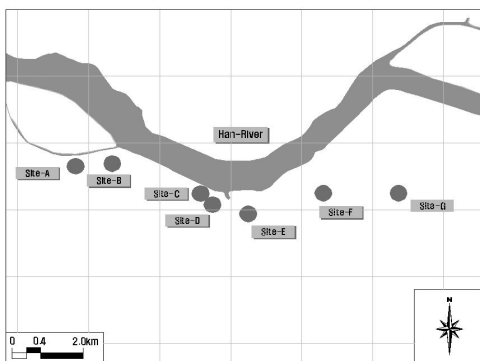


그림 4. 과업구간내 세부 조사지점 위치도 (Site-A~G)

0.6m)을 선정하였다. 실측자료에 대한 처리/해석은 탄성모델을 바탕으로 수행되었고 매개변수의 결정에 비선형회귀분석 기법을 주로 적용하였으며 유도된 인장균열의 형상 및 방향성 측정을 위해 시추공 영상촬영법과 초음파 주사검층법에 의한 조사를 별도로 수행하였다. 그림 4는 과업구간내 세부 조사지점 위치도를 나타낸다.

현재 현지 암반의 초기응력 측정을 위해 여러 방식의 수압과쇄 시스템이 개발되어 사용되고 있으며 본 연구에서는 해발고도는 높지 않으나 변화가 심한 국내의 산악 지형 조건에 적합하도록 설계/제작된 엔진 구동방식의 유압-와이어 라인 시스템 (engine driven hydraulic

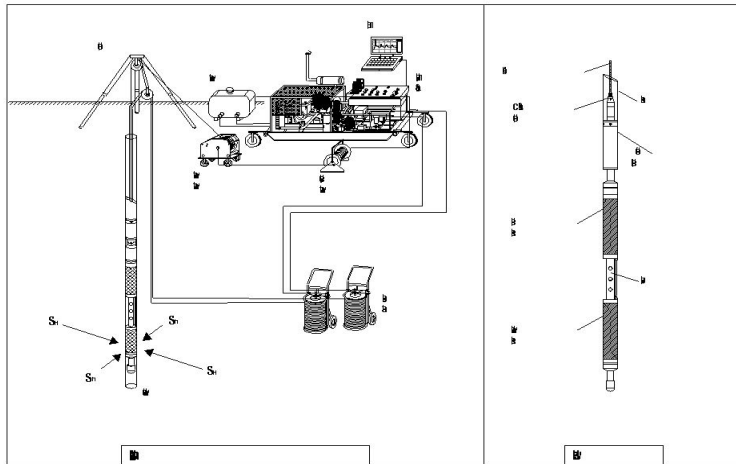


그림 5. 수압파쇄시스템 모식도 (엔진구동 와이어라인 방식)



그림 6. 수압파쇄시스템 전경 및 현장시험 광경

powered wireline hydrofrac system)을 이용하여 현장조사를 수행하였다. 수압파쇄 시스템은 크게 자료를 획득하고 시스템을 조절하는 조절부, 시험구간 가압을 위한 펌프부, 유체의 이동경로부, 시험과정에서 얻어지는 물리량을 측정하고 전송시키는 측정부, 시험구간을 밀폐시키는 패커부 그리고 펌프에 동력을 공급하는 동력부 등으로 구성되는데 그림 5는 전체 시스템의 개념도를 나타낸다. 본 현장 측정시스템에는 엔진의 rpm에 의해 조절되는 6-피스톤 수압펌프가 장착되어 정밀한 유량유지와 P-Q 법 적용을 위한 단계적 유량조절 (stepwise flowrate control)이 가능하다. 그림 6은 시스템의 가장 핵심 부분으로 동력원, 가압용 펌프 및 제어부를 구성 HySkid type 40의 전경과 본 연구지역내에서 수행된

현장시험 광경의 일부를 각각 나타낸다.

### 3.2 자료해석

수압파쇄법에 의한 현장 시험에서는 2가지 종류의 자료가 얻어진다. 하나는 초기응력의 크기에 관련된 압력 값 자료이며 다른 하나는 유도된 인장 균열의 특성, 즉 초기응력의 작용방향에 관련된 것이다. 압력값은 시간 대 압력 (변화) 관계로 기록되며 여기에는 균열 발생압력 ( $P_0$ ), 균열 폐쇄압력 ( $P_s$ ), 균열 개구압력 ( $P_r$ ) 등이 포함된다. 인공균열의 특성에 대한 정보는 임프레션 패커나 초음파 텔리뷰어, BIPS 등과 같은 균열 추적장치 (fracture tracing device)로 측정되는 균열의 방향 및

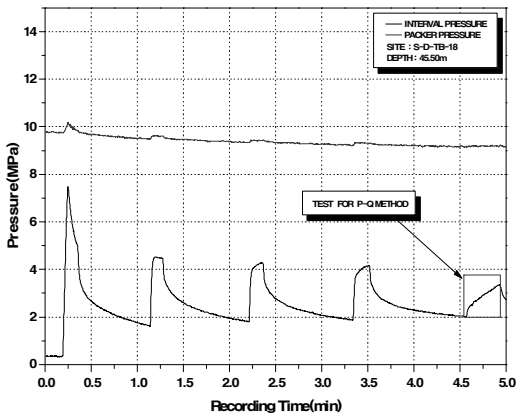
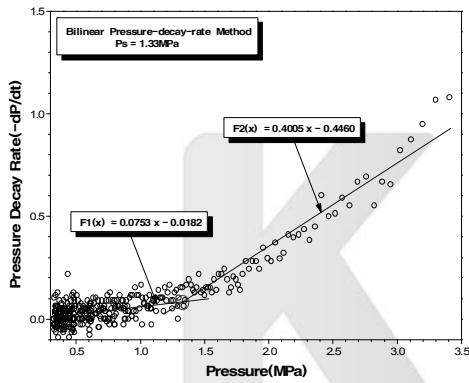


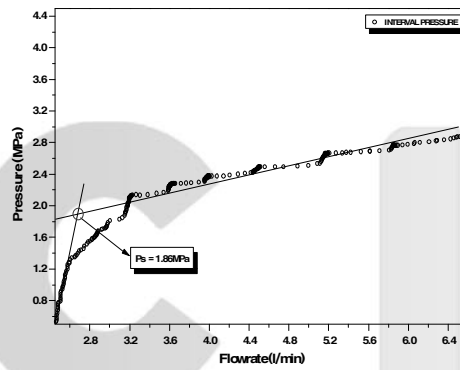
그림 7. 대표적 압력 대 시간이력곡선

형태에 의해 구해진다.

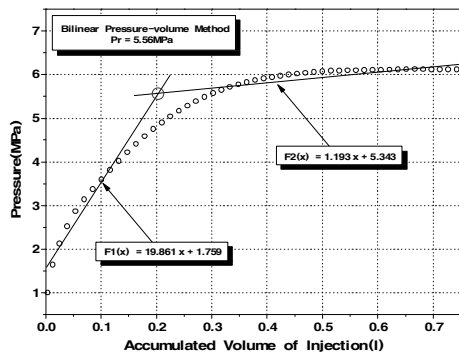
수압파쇄의 매커니즘이나 결과 해석에는 시험 시추공의 방향이나 주변 암반의 특성에 따라 여러 역학적 모델들이 제안되어 적용되고 있으며 탄성 모델 (elastic model), 공극탄성 모델 (poroelastic model), 파괴역학 모델 (fracture mechanics model), 균열가압 모델 (fracture pressurization model) 등이 대표적이다. 본 연구에서는 자료처리 및 해석에 있어 공학적 적용성이 큰 탄성 모델을 바탕으로 하였으며 초기 응력값 산정에 요구되는 주요 매개변수의 결정을 위해 비선형 회귀 분석 기법을 주로 적용하였다. 균열 방향성 측정을 위해 시추공 영상촬영법과 초음파 주사검층법을 별도로 적용하였다. 그림 7은 현장에서 획득된 대표적 압력-시간 이력곡선을 나타낸다.



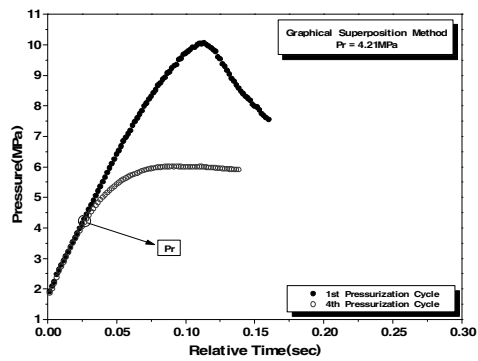
(A) Ps : EXP method



(B) Ps : P-Q method



(C) Pr : P-V method



(D) Pr : GSP method

그림 8. 주요 매개변수의 결정사례

자료처리 과정에서는 압력-시간 측정자료중 안정화된 가압 사이클 구간을 선택적으로 또는 전체적으로 선택하여 반복적인 방법으로 최적 압력 변수값들을 결정하였다. 균열 폐쇄압력의 경우 지수압력 감쇠법 (exponential pressure decay (EXP) method)과 이중선형 압력감쇠 속도법 (bilinear pressure decay rate(dpdt) method)을 적용하였으며 부분적으로 P-Q 법 (pressure-flowrate (P-Q) method)법을 적용하였다. 다음으로 최대 수평응력과 인장강도의 산정에 적용되는 균열 개구압력은 압력-부피 이중선형법 (P-V bilinear method)과 도해적 중첩법 (graphical superposition method)을 이용하여 결정하였다. 그림 8은 균열폐쇄압력변수와 균열개구압력변수의 결정 사례 중 일부를 나타낸다.

수압파쇄시험이 정상적으로 수행된 경우 외부에서 가

해지는 시험구간내 유체압이 증가함에 따라 공벽에 유도되는 최소점선응력 성분 (압축 : +)이 인장의 영역에서 현지 암반의 인장강도를 초과하는 순간 균열은 최대 수평응력이 작용하는 방향으로 공벽에 수직하게 형성된다. (그림 9 참조) 따라서 공벽에 형성된 균열에 대한 자료는 실시된 시험의 적정성과 최대 수평응력의 작용방향을 판단하는데 중요한 정보를 제공하게 된다.

그림 10은 본 조사지역내에서 수압파쇄시험 후 유도된 수압파쇄 균열의 형상과 방향성을 확인하기 위해 적용된 시추공 영상촬영법과 초음파 주사검층법으로 획득된 공벽 이미지와 균열 추적 (fracturing tracing) 결과를 나타내는데 균열이 양쪽 공벽에 거의 수직하게 형성되어 있음을 보여준다.

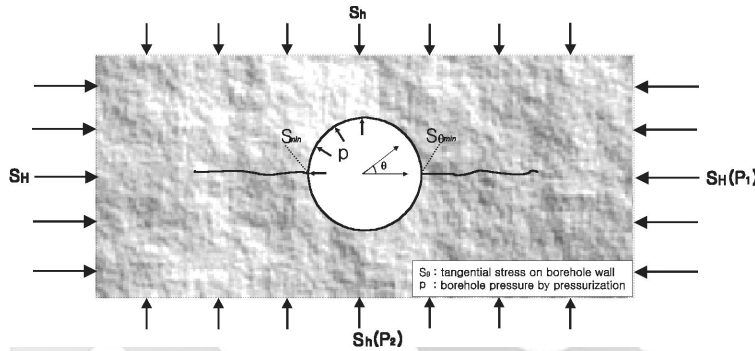


그림 9. 주응력의 작용방향에 따른 수압파쇄 균열발생 형태

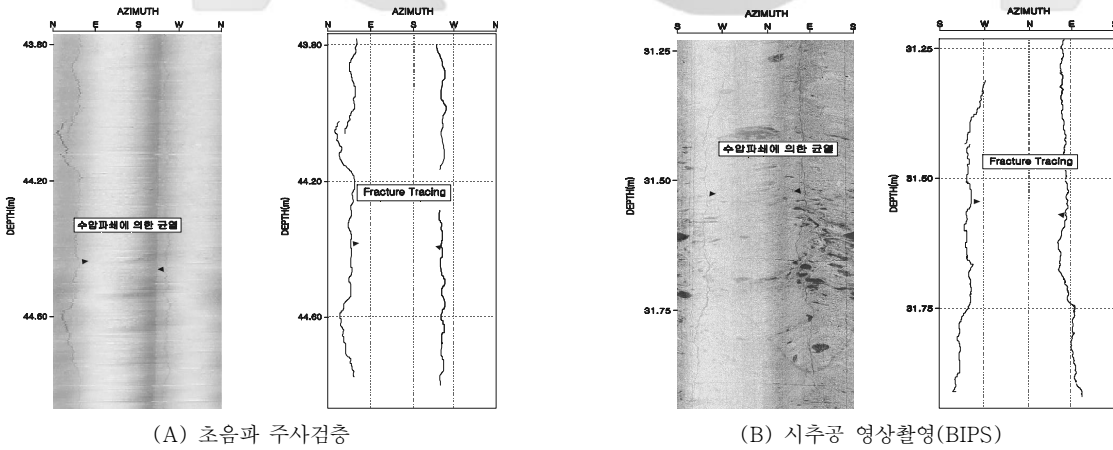


그림 10. 수압파쇄 균열의 형상 및 방향성 조사 결과

#### 4. 과업구간의 초기응력 분포 특성

##### 4.1 수평응력 분포 및 방향성

총 11개 시추공내 심도 14~58m 범위의 53개 구간에

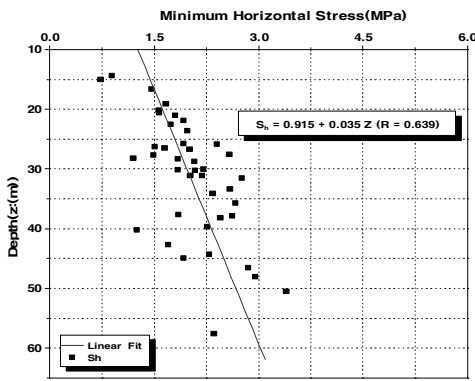
서 시험을 실시하여 정상적인 값이 획득된 41개 자료만 해석에 활용하였다. 표 2는 탄성모델을 적용해 구한 시험 결과를 나타낸다.

전체적으로 최대 수평응력 ( $S_H$ )은 0.90~4.15MPa 범위에, 최소 수평응력은 0.74~3.40MPa 범위에 분포하

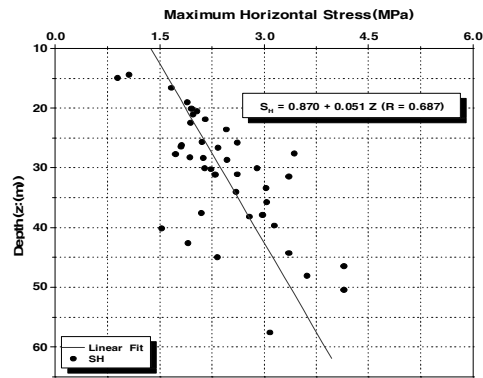
표 2. 수압파쇄시험에 의한 초기응력 산정결과

depth (m)	$S_v$ (MPa)	$S_H$ (MPa)	$K_v$	$K_H$	$K_a$	$S_{Hdir}$ (°)	T (MPa)	site
26.50	1.65	1.81	2.29	2.52	2.41		3.02	A(TB-12)
28.35	1.84	2.13	2.39	2.77	2.58	41	3.52	A(TB-12)
30.25	2.09	2.24	2.55	2.73	2.64		5.53	A(BB-13)
39.70	2.26	3.15	2.11	2.94	2.53	25	1.78	A(BB-13)
14.40	0.89	1.06	2.28	2.72	2.50		3.23	E(BH-12)
15.00	0.73	0.90	1.78	2.22	1.99	57	1.10	E(BH-18)
20.13	1.56	1.96	2.89	3.63	3.26	44	4.63	B(BB-4)
21.05	1.80	1.98	3.16	3.47	3.32	98	3.56	D(BH-1)
21.90	1.92	2.16	3.25	3.66	3.46		6.72	C(BB-36)
22.50	1.74	1.95	2.85	3.20	3.03		4.14	B(BB-4)
23.60	1.98	2.46	3.09	3.84	3.47	74	4.95	D(BH-2)
25.80	2.40	2.62	3.43	3.74	3.59		6.93	C(BB-36)
26.25	1.51	1.82	2.13	2.56	2.35		1.74	E(BH-12)
26.70	2.01	2.34	2.79	3.25	3.02	98	9.80	D(BH-2)
27.60	2.58	3.44	3.44	4.59	4.02	70	5.76	D(BH-1)
27.70	1.49	1.73	1.99	2.31	2.15		2.22	E(BH-18)
28.25	1.20	1.94	1.58	2.55	2.07	58	1.02	C(BH-32)
30.05	2.21	2.90	2.73	3.58	3.16		3.51	E(BH-12)
30.13	1.84	2.15	2.27	2.65	2.46		3.79	E(BH-18)
31.13	2.02	2.30	2.40	2.74	2.57	73	3.33	C(BH-32)
31.50	2.76	3.36	3.27	3.59	3.43	64	6.59	D(BH-1)
33.40	2.59	3.03	2.88	3.37	3.13	69	8.86	D(BH-1)
34.05	2.34	2.60	2.54	2.83	2.69		6.30	B(BB-4)
35.76	2.67	3.04	2.75	3.13	2.94	53	6.61	E(BH-18)
37.60	1.85	2.10	1.81	2.06	1.94		3.13	C(BH-32)
37.90	2.62	2.98	2.57	2.92	2.75		5.42	D(BH-1)
38.20	2.45	2.79	2.38	2.71	2.55	51	4.04	D(BH-2)
40.18	1.25	1.53	1.16	1.42	1.29		2.51	C(BB-36)
42.68	1.70	1.91	1.48	1.66	1.57		2.48	C(BB-36)
44.30	2.29	3.36	1.90	2.80	2.35	53	6.52	D(BH-2)
44.98	1.92	2.33	1.59	1.93	1.76	54	2.38	C(BH-32)
48.10	2.95	3.62	2.27	2.78	2.53	56	7.30	D(BH-2)
57.60	2.36	3.09	1.51	1.98	1.75		3.97	F(BB-36)
16.62	1.46	1.67	3.24	3.71	3.48		5.32	G(TB-18)
19.08	1.67	1.90	3.21	3.65	3.43	36	4.78	G(TB-18)
20.56	1.57	2.04	2.80	3.64	3.22		1.59	G(TB-18)
46.52	2.85	4.15	2.26	3.29	2.78		3.07	G(TB-18)
50.50	3.40	4.15	2.50	3.05	2.78	44	4.54	G(TB-18)
25.70	1.92	2.11	2.78	3.06	2.92		2.11	F(DB-3)
28.70	2.08	2.47	2.70	3.21	2.96		2.47	F(DB-3)
31.10	2.19	2.62	2.61	3.12	2.87	56	2.62	F(DB-3)





(A) 최소 수평응력



(B) 최대 수평응력

그림 11. 최대, 최소 수평응력의 심도별 분포 (심도 14~58m)

는 것으로 조사되었다. 그림 11은 최대, 최소 수평응력의 심도별 분포 범위를 나타내며 식 (1), (2)는 구해진 응력값에 선형 회귀분석을 적용해 구한 식들을 나타낸다.

$$S_h = 0.915 + 0.035z \quad (1)$$

$$S_H = 0.870 + 0.051z \quad (2)$$

최대 수평응력의 방향성에 대한 정보를 얻기 위해 시험 후 공내 조사장비에 의해 유도된 균열의 형상 및 방향성에 대한 조사가 별도로 이루어졌다. 분석 결과 과업구간 내 7개 개별 조사지점 (Site-A~G)에서 최대 수평응력이 작용하는 평균 방위각은 진북 기준 33°~69°의 범위에 분포하는 것으로 분석되었다. 그림 12는 그 결과를 나타내는데 개별 지점들에서의 평균 방향성은 큰 편차를 나타내지 않고 유사한 경향성을 가짐을 알 수 있다. 그림 13은 과업지역내 최대 수평응력 방위각 분포 히스토그램과 전 구간의 평균 작용방향을 나타낸다. 50°~60° 범위에서 가장 큰 빈도를 보이며 평균 방향은 진북기준 약 59° (N59E, 표준 편차)의 값을 가지는데 국내 전체 영역에서의 평균값 (82° (N82E), 그림 3 참조)과는 다소 상이한 방향성 (편차 23°)를 가지는 것으로 나타났다.

#### 4.2 축압계수 분포 특성

수직응력에 대한 수평응력의 비인 축압계수 (K, ratio of horizontal stress to vertical stress)는 암반 구

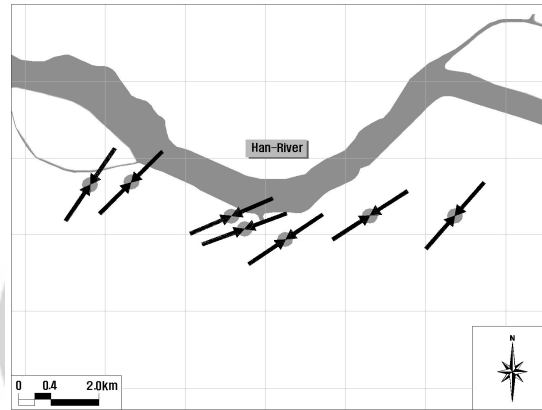
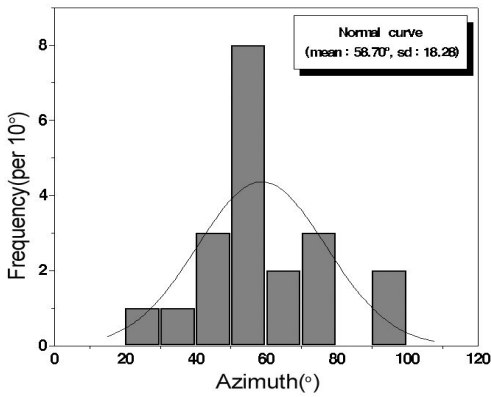
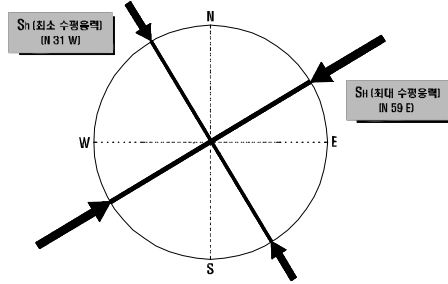


그림 12. 과업지역내 개별조사 지점 (Site-A~G)에서의 최대 수평응력 작용방향 (진북기준 : 33~69°)

조물의 설계 과정 중 최적 지보재 선정 및 안정성 해석단계에서 주요 변수로 작용한다. 본 과업구간에서 평균 축압계수 ( $K_a$ )는 1.29~4.02, 최대 축압계수 ( $K_H$ )는 1.42~4.59 범위에 분포하며, 축압계수 비 ( $K_H/K_a$ )는 1.10~1.60 범위의 값을 가지는 것으로 분석되었다. 그림 14는 심도별 축압계수의 분포 특성을 나타내는데 국토 전체 영역의 수압과쇄시험 결과로부터 배성호 등 (2002)이 제안한 축압계수 분포의 상, 하한 경계 영역내에 대부분의 값들이 분포하는 것으로 나타났다. 그림 15는 평균 축압계수의 심도에 따라 변화양상을 나타내는데 전반적

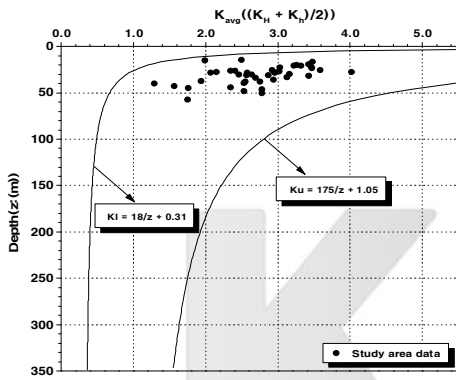


(A) 방위각 분포 히스토그램

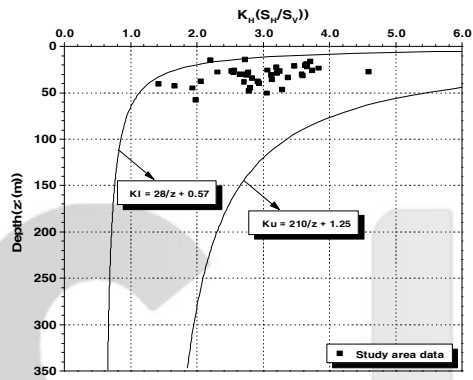


(B) 평균 방향

그림 13. 과업지역내 최대 수평응력 방위각 분포 및 평균 작용방향 (평균 방위각 : 진북기준 58.70°)



(A) 평균 축압계수



(B) 최대 축압계수

그림 14. 과업지역내 축압계수 분포 특성

으로 심도 35m를 기준으로, 분포 양상이 급격히 변화되는 것은 아니지만, 다소 상이한 양상을 나타낸다. 상부 구간 (A-zone)의 경우 평균 축압계수가 1.90~4.10의 범위에 분포하는데 비해 하부 구간 (B-zone)에서는 1.20~3.00으로 절대 크기 면이나 변화의 편차가 감소되는, 즉 초기응력장이 다소 안정화되는 경향을 나타낸다.

### 4.3 현지 암반 인장강도

일반적으로 암석의 인장강도는 압열 인장시험 (Brazilian tensile test), 굴곡시험 등의 실내 시험으로부터 산정된다. 실내 시험들은 대부분 무결암의 매우

작은 부피를 가지는 시험편을 이용하여 이루어지기 때문에 이 값들로부터 현지 암반의 인장강도를 추정하기에는 다소 무리가 따른다. 현실적으로 현지 암반의 인장강도를 구하기는 매우 어려우나 현장 수압파쇄시험 결과로부터 구해지는 값들은 실내 시험에 비해 수백~수천 배 부피의 암반을 대상으로 하여 얻어진 결과이므로 현지 암반 물성산정시 주요 요인인 크기 효과가 반영된 값으로 볼 수 있다. 따라서 충분한 자료축적과 실내 압축, 인장강도 시험값들과 비교/분석 (상호 상관성 도출)이 이루어질 경우 암반 구조물 안정성 해석시 주요 입력 변수인 현지암반의 강도값 산정에 직, 간접적으로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그림 16은 매개변수 산정

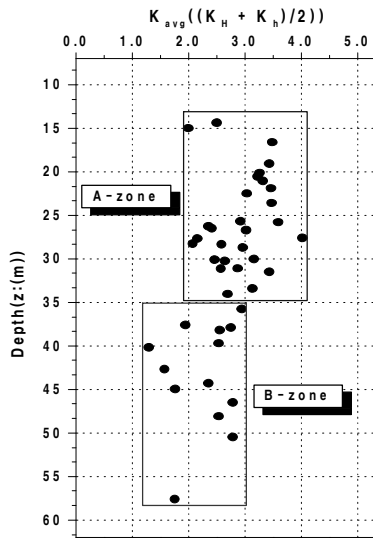


그림 15. 과업지역내 측압계수 심도별 변화 양상

결과로부터 계산된 현지 암반 인장강도의 분포 특성 및 히스토그램을 나타낸다. 과업구간내 보통암~경암의 인장강도값은 1.08MPa~9.80MPa의 넓은 범위에 분포하며 평균적으로 4.70MPa (47.91Kg/cm<sup>2</sup>)의 값을 가지는 것으로 조사되었다.

본 과업구간의 경우 대부분 유사한 편마암류로 구성되어 있기 때문에 본 분석에서 구해진 강도값들이 본 과업구간을 포함한 인근 편마암 지역의 현지 암반 물성값 산정시 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

서울 지하철 9호선 건설공사와 관련된 사전 정밀 지반 조사 단계에서, 서울 영등포구 노량진에서 강남구 논현동에 이르는 한강 남쪽의 편마암 분포 지역의 저심도 구간에서 실시된 현장 초기응력 실측데이터 (11개 시추공, 심도 14~58m, 53개 조사구간)와 해석 결과에 대한 분석으로부터 얻어진 내용들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 심도 14~58m 구간에서 획득된 자료에 탄성 모델을 적용하여 최대, 최소 수평응력의 크기를 산정하였다. 최대 수평응력 (S<sub>H</sub>)은 0.90~4.15MPa 범위

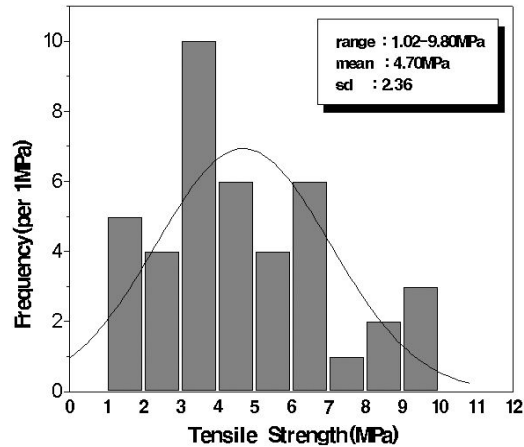


그림 16. 과업지역내 현지 암반 인장강도 분포 특성 (보통암~경암구간)

에, 최소 수평응력은 0.74~3.40MPa 범위에 분포하는 것으로 조사되었다. 심도별 응력자료에 선형 회귀분석을 적용해 구한 다음의 관계식들이 도출되었다.

$$S_h = 0.915 + 0.035z \quad (r = 0.639) \quad (1)$$

$$S_H = 0.870 + 0.051z \quad (r = 0.687) \quad (2)$$

- 2) 과업구간내 7개 개별 조사지점 (Site-A~G)에서 최대 수평응력이 작용하는 평균 방위각은 진북 기준 33°~69°의 범위에 분포하며 개별 지점들에서의 평균 방향성이 큰 편차를 보이지 않고 유사한 경향성을 가지는 것으로 조사되었다. 전체적으로 50°~60°의 방위각 범위에서 가장 큰 빈도를 보이며 평균 방향은 진북기준 약 59° (N59E, 표준 편차)의 값을 나타내는데 국내 전체 영역에서의 평균 값 (82° (N82E)과는 다소 상이한 방향성 (편차 23°)을 가지는 것으로 분석되었다.
- 3) 평균 측압계수 (K<sub>a</sub>)는 1.29~4.02, 최대 측압계수 (K<sub>H</sub>)는 1.42~4.59 범위에 분포하며, 측압계수 비 (K<sub>v</sub>/K<sub>h</sub>)는 1.10~1.60 범위의 값을 가지는 것으로 분석되었다. 심도별 측압계수의 분포 특성은 국토 전체 영역의 수압파쇄시험 결과로부터 배성호 등 (2002)이 제안한 측압계수 분포의 상, 하한 경계 영역내에 대부분의 값들이 분포하는 것으로 나타났다.

전체적으로 심도 35m를 기준으로, 분포 양상이 급격히 변화되는 것은 아니지만 다소 상이한 양상을 나타낸다. 상부구간 (A-zone)의 경우 평균 측압계수가 1.90~4.10의 범위에 분포하는데 비해 하부구간 (B-zone)에서는 1.20~3.00으로 절대 크기 면이나 변화의 편차가 감소되는, 즉 초기응력장이 다소 안정화되는 경향을 나타낸다.

- 4) 시험이 수행된 과업구간내 보통암~경암구간의 인장강도값은 1.08MPa~9.80MPa의 넓은 범위에 분포하며 평균적으로 4.70MPa (47.91Kg/cm<sup>2</sup>)의 값을 가지는 것으로 조사되었다. 본 과업구간의 경우 대부분 유사한 편마암류로 구성되어 있기 때문에 본 분석에서 구해진 강도값들이 본 과업구간을 포함한 인근 편마암 지역의 현지 암반 물성값 산정시 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 대부분 편마암류가 분포하는 지역의 저심도 구간을 대상으로 수행된 연구 결과 조사 위치에 따라 초기응력의 절대 크기면에서는 다소 큰 편차를 보이거나 최대 수평응력의 방향에서는 거의 동일한 경향성을 나타내는 것으로 분석되었다. 본 연구의 범위가 저심도 구간으로 제한되어 대심도 구간을 포함한 조사지역의 전반적인 응력장을 추정하기에는 다소 무리가 따르나 분석 결과와 초기응력장의 일반적인 분포 특성 등을 종합적으로 고려해 볼 때 본 과업구간을 포함한 인접지역내에는 동일한 응력장이 형성되어 있을 가능성이 큰 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서 도출된 초기응력장에 대한 자료는 향후 서울 한강 이남의 편마암 지역을 대상으로 하는 지

하 암반 구조물의 설계, 시공시 직, 간접적인 정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 배성호, 전석원, 최용근, 김학수 (2002), “수압파쇄시험에 의한 산악지역에서의 현지 암반 초기응력 측정 및 분포특성 연구”, 한국터널공학회 학술논문집, Vol.4, No.1 pp.57-70.
2. 원종관 외 (1991), “지질학원론”, 우성문화사, pp.595-603.
3. Amadei, B., Stepansson, O. (1997). Rock stress and its measurement: pp.2-30, pp.41-49, Chapman & Hall.
4. Bae, S. H. Choi, Y. K., Jeon, S. W., Lee, C. I. (2001), Characteristics of initial rock stress of mountainous region in Korea, ISRM Eurock 2001/Epsoo/Finland, pp. 29-34.
5. Hudson, J. A., Harrison, J. P. (1997), Engineering rock mechanics - an introduction to the principles; pp.94-96, Pergamon.
6. Jager, J. C., Cook, N. G. W. (1969), Fundamentals of rock mechanics: pp181-186, Methuen & Co Ltd.
7. Lee, M. Y., Haimson, B. C. (1980), Statistical evaluation of hydraulicfracturing stress measurement parameters, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Vol. 26, No. 6: pp.447-456, Pergamon Press.
8. Lee, M. Y. (1991). Advances in instrument, data analysis, and calculation in hydraulic fracturing, Doctorial Thesis: pp. 55-79, University of Wisconsin-Madison.



**배성호**

(주)지오제니 컨설턴트 이사  
shbae007@geogeny.com



**전석원**

서울대학교 지구환경시스템공학부  
조교수  
sjeon@rockeng.snu.ac.kr



**최용근**

(주)지오제니 컨설턴트 이사  
ykchoi@geogeny.com



**김재민**

(주)지오제니 컨설턴트 차장  
kjm504@geogeny.com

K C I