

## 수압파쇄법을 이용한 ○○ 원유비축시설 내 수벽 터널에서의 초기응력 측정

배성호<sup>1)\*</sup>, 김재민<sup>2)</sup>, 김장순<sup>3)</sup>, 이영호<sup>4)</sup>

### In-situ Rock Stress Measurement at the Water Tunnel Sites in the OO Oil Storage Facility with Hydraulic Fracturing Method

Seongho Bae, Jaemin Kim, Jangsoon Kim, Youngho Lee

**Abstract** The influence of in-situ rock stress on the stability of an underground rock structure increases as the construction depth become deeper and the scale of a rock structure become larger. In general, hydraulic fracturing stress measurement has been performed in the surface boreholes of the target area at the design stage of an underground structure. However, for some areas where the high horizontal stresses were observed or where the overstressed conditions caused by topographical and geological factors are expected, it is desirable to conduct additional in-situ stress measurement in the underground construction site to obtain more detailed stress information for ensuring the stability of a rock structure and the propriety of current design. The study area was a construction site for the additional underground oil storage facility located in the south-east part of OO city, Jeollanam-do. Previous detailed site investigation prior to the design of underground structures revealed that the excessive horizontal stress field with the horizontal stress ratio(K) greater than 3.0 was observed in the construction area. In this study, a total of 13 hydraulic fracturing stress measurements was conducted in two boreholes drilled from the two water tunnel sites in the study area. The investigation zone was from 180 m to 300 m in depth from the surface and all of the fracture tracing works were carried out by acoustic televiewer scanning. For some testing intervals at more than 200 m in depth from surface, the high horizontal stress components with the horizontal stress ratio(K) greater than 2.50 were observed. And the overall investigation results showed a good agreement with the previously performed test.

**Key words** In-situ rock stress, Detailed site investigation, Hydraulic fracturing test, Underground oil storage

**초 록** 암반 내 작용하는 초기응력이 지하 암반 구조물의 안정성에 미치는 영향은 시공 심도가 깊어지고 단면 규모가 커질수록 증가하게 된다. 일반적으로 초기응력 측정은 암반 구조물의 설계단계에서 시공 예상지역 내 지표 수직공을 이용하여 수압파쇄법에 의해 이루어져 왔다. 그러나 조사단계에서 초기응력 측정이 이루어지지 않았거나 지형, 지질 특성상 과지압의 가능성이 있거나 또는 조사 과정에서 높은 수준의 초기응력장 분포가 확인된 지역에서는 시공의 안정성과 기존 설계의 적합성을 확인하기 위해서는 시공 현장의 지하 공간에서 상세 초기응력 측정을 수행하는 것이 바람직하다. 본 논문의 연구지역은 전라남도 OO시 남동부에 위치한 추가 석유 비축기지 건설현장으로 설계 전 상세 지반조사를 통해 축압계수 3.0 이상의 값을 가지는 과잉 수평응력장이 관찰된 지역이다. 본 연구에서는 비축기지 지하 건설 현장 내 굴착된 수벽터널용 공동에서 시추된 2개의 시험공에서 수압파쇄법에 의한 초기응력 측정을 시행하였다. 조사 범위는 지표로부터 약 180 m ~ 300 m 심도구간이며 균열 조사에는 초음파 주사검층법을 적용하였다. 지표로부터 심도 200 m 이상인 일부 조사 구간에서 축압계수 2.50 이상의 값을 가지는 큰 수평응력 성분들이 관찰되었고 전반적인 시험 결과는 설계 전 단계에서 수행된 조사 결과와 매우 유사한 양상을 나타내었다.

**핵심어** 암반 초기응력, 상세 지반조사, 수압파쇄시험, 지하 원유비축

- <sup>1)</sup> (주) 지오제니 컨설턴트 상무이사  
<sup>2)</sup> (주) 지오제니 컨설턴트 지반사업부 부장  
<sup>3)</sup> (주) 지오제니 컨설턴트 지반사업부 과장  
<sup>4)</sup> SK건설 (주) Geotask팀 부장

\* 교신저자 : shbae007@geogeny.biz

접수일 : 2008년 2월 11일

심사 완료일 : 2008년 2월 21일

## 1. 서 론

지하 암반 구조물을 시공 중인 현장의 경우 일반적으로 굴착중인 공동 측벽부에 일정 깊이의 시험공을 확보한 후 응력개방법이나 응력보상법에 의해 초기응력 측정이 수행되어 왔다. 응력 개방법의 경우 굴착에 따라

재배열된 유도응력이 아닌 초기응력 성분을 측정하기 위해서 최소한 공동 규모(폭 또는 높이)의 2배 이상의 깊이를 가지는 시험공이 확보되어야 하지만 굴착중인 공동의 규모가 큰 경우 이러한 조건을 가지는 시험공의 천공과 확보가 현실적으로 용이하지 않다. 또한 측벽부 인접 영역에서 시행되는 응력보상법의 경우에는 공간적으로 굴착중인 구조물 인근에 형성되어 있는 초기응력을 측정하기는 거의 불가능하다고 볼 수 있다. 지표의 시추공을 이용하여 일반적으로 시행되고 있는 수압파쇄 시험의 경우 국내외적으로 시공 중인 현장의 지하 굴착 영역에서 실시된 사례는 많지 않다. 수압파쇄 시험의 경우 공동 바닥부에 천공된 시추공을 이용하여 적용 가능하므로 굴착 영역 인근에 형성되어 있는 초기응력 성분을 측정하거나 심도별 변화 특성을 파악하는데 다른 시험법에 비해 매우 유리하다고 볼 수 있다.

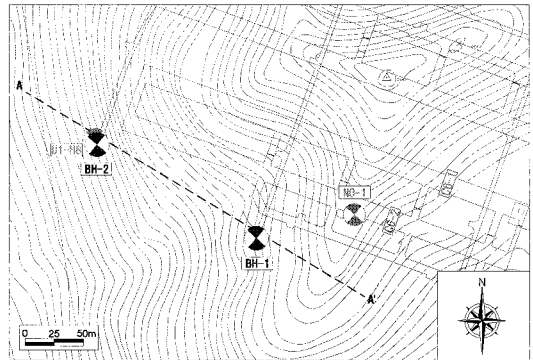
본 논문의 연구 지역은 시공 중 낮은 수준의 취성과 파괴가 발생한 전라남도 OO시 남동부에 위치한 추가 유류비축기지 관련지역이다. 과업 구간은 사전 지반조사 단계에서 과지압 분포가 확인된 지역으로 시공 중 과도한 수평응력 성분으로 인해 굴착 공동 주변에 팽팽(popping), 스펀링(spalling)과 같은 취성파괴가 유발되어 시공 중 장애 요인으로 작용한 사례가 있다. 본 연구에서는 국내 최초로 시공 중인 현장의 지하 공동 내에서 수압파쇄법을 적용하여 시행된 초기응력 측정과 주요 분석 결과에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 현장시험 및 자료해석

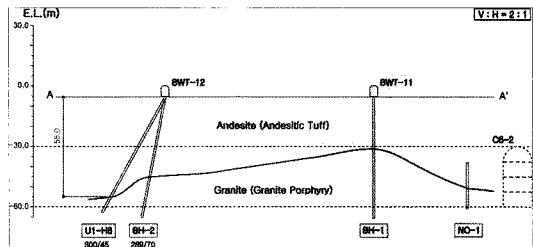
### 2.1 현장시험 개요 및 측정 시스템

본 연구를 위해 시공중인 추가 유류비축기지 내 말굽형 수벽터널(폭 4.5 m, 높이 5.5 m) 갱내부 2개소(시험공 BH-1, BH-2)에서 수압파쇄시험을 수행하였다. 일반적으로 굴착된 압반 구조물 주변에는 굴착에 따라 유도된 2차 응력장이 형성된다. 따라서 본 과업구간과 같이 시공 중인 압반 구조물 내에서 초기응력 측정을 수행해야 하는 조건에서는 조사 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 가능한 한 굴착 영향권에서 벗어나 조사 구간이 선정되어야 한다. 본 과업에서는 이러한 제반 필요 조건과 실제 갱내에서의 작업성을 종합적으로 고려하여 기존 굴착된 인접 구조물로부터 구조물 폭의 2배 이상의 공간거리를 갖는 수벽터널-BWT-11의 막장면에 근접하여 조사 지점인 시추공 BH-1의 위치를 선정하였다. 그리고 수벽터널 BWT-12 막장면 부근에서는 가능한 기존 구조물로부터의 이격거리를 증가시키기 위해 289/70의 방향성을 가지도록 시추공 BH-2의 위치를 선정하였

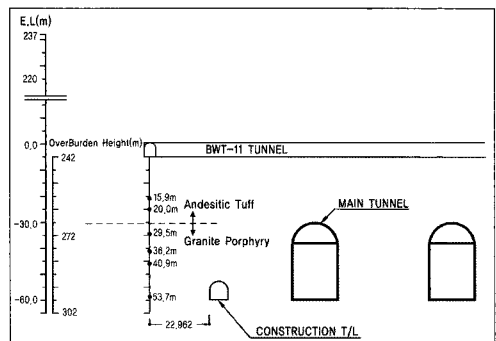
다. Fig. 1은 수압파쇄시험 위치, 조사지점을 포함한 인



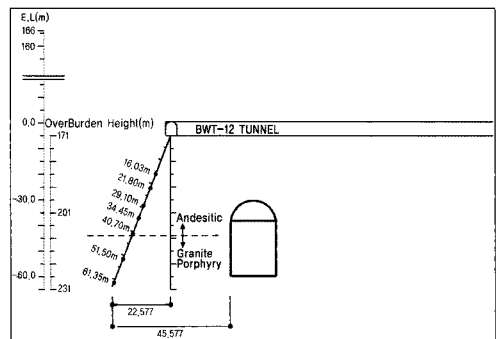
(a) Location of test boreholes



(b) Estimated geological section



(c) Testing levels in BH-1



(d) Testing levels in BH-2

Fig. 1. Location of hydraulic fracturing test sites

근 지역의 암종 추정 분포 및 세부 시험 구간을 나타낸다. 터널-BWT-11과 터널-BWT-12의 바닥부 지반고(overburden height)는 각각 241 m와 171 m 정도이다. 수벽 터널-BWT-11의 막장면에 인접한 수직 시추공 BH-1(시추 심도 60 m)은 경암 이상의 강도를 가지는 안산암질 응회암과 화강반암류로 구성되어 있다. 시추 심도 약 25.5 m를 경계로 안산암질 응회암에서 화강반암으로 변화하는 양상을 나타낸다. 암반상태는 일부구간에 소규모 불연속면이 분포하나 전반적으로 매우 양호한 상태를 나타내었다.

수압파쇄시험에서는 시추에서 회수된 코어상태, 절리 빈도, 파쇄대 분포정도, 암반 구조물 시공 심도 및 굴착 시 영향권 등을 종합적으로 고려하여 시험구간을 선정하였다. 본 시험에서 개별 조사구간의 연장은 0.6 m이며 시험공 BH-1에서는 안산암질 응회암 구간에서 2개 지점, 화강반암 분포구간에서 4개 지점 등 총 6개 지점(시추심도 기준 : 15.90 m, 20.00 m, 29.50 m, 36.20 m, 40.90 m, 53.70 m)을 선정한 후 시험을 수행하였다. 수벽터널-BWT-12의 막장면에 인접한 경사 시추공 BH-2(경사 시추심도 63.2 m)의 암반은 경사 심도 41.7 m까지 안산암류가 분포하나 그 하부로는 화강반암류로 변화하는 양상을 나타낸다. 본 시험공에는 안산암 구간에서 5개 하부 화강반암 구간에서 2개 지점 등 총 7개 지점(경사 시추심도 기준 : 16.03 m, 21.80 m, 29.10 m, 34.45 m, 40.70 m, 51.50 m, 61.35 m)을 선정하여 시험을 수행하였다.

본 연구에서 사용된 모든 현장자료는 앞에서 언급한 여러 요소의 장점을 살리고 국내 지형조건에 적합하도록 설계, 제작된 엔진 구동방식의 유압 와이어라인 시스템(engine driven hydraulic powered wireline hydrofracturing system)에 의해 측정되었다. Fig. 2는 현장시험이 진행된 수벽터널 모습과 갱내 수압파쇄시험 광경의 일부를 나타낸다.

## 2.2 자료 해석

본 조사 지역의 시험공 BH-1 지점의 경우에 시추 심도 15~54 m 구간내 6개소에서 수압파쇄시험이 수행되어 모든 구간에서 정상적인 자료가 획득되었다. 시험공 BH-2 지점에서는 16~62 m 구간의 7 개소에서 시험이 시행되어 6개소에서 정상적인 자료가 획득되었고 비정상적인 압력값이 측정된 심도 16.03 m 지점의 자료는 응력해석에서 제외하였다.

자료처리 과정에서는 압력-시간 측정자료 중 안정화된 가압 사이클 구간을 선택적으로 또는 전체적으로 선택하여 반복적인 방법으로 최적 압력 변수값들을 결정하였다. 균열 폐쇄압력의 경우 지수압력 감쇠법(exponential pressure decay method)과 이중선형 압력감쇠속도법(bilinear pressure decay rate method)을 기본적으로 적용하였다. 다음으로 최대 수평응력과 인장강도의 산정에 적용되는 균열 개구압력은 압력-부피 이중선형법(P-V bilinear method)을 기본적으로 적용하였고 부분적으로 도해적 증첩법을 병행 적용하여 값을 결정하였으며 결과의 정확성과 신뢰성을 향상시키기 위해 적용된 각 가압 사이클들의 해석에서 구해진 값들의 평균을 대표값으로 사용하였다.

Fig. 3은 시험공 BH-2 지점의 수압파쇄시험에서 얻어진 압력-유량 대 시간 곡선들 중의 일부를, 그리고 Fig. 4는 분석결과들 중의 일부를 나타낸다.

균열 형상 및 방향성 측정 자료에서 유도된 인장균열의 주향은 최대 수평응력의 작용 방향을 나타낸다. 조사지점에서의 균열 특성 자료들은 최대 수평응력의 방향성 추정뿐만 아니라 수압파쇄시험의 적정성 여부를 판단하는데 사용될 수 있다. 일반적으로 수직공의 조사 구간 내에 기존 불연속면이 존재하지 않고 수직 성분이 주응력 성분의 하나인 조건에서 수압파쇄에 의해 유도되는 인장균열은 암반에 작용하는 최대 수평응력의 방향으로 공벽에 수직하게 형성되며 균열의 경사각이 70° 이상인 경우 준수직 균열로 간주된다. 해석방법은 조사



Fig. 2. View of testing site and hydraulic fracturing in-situ stress measurement

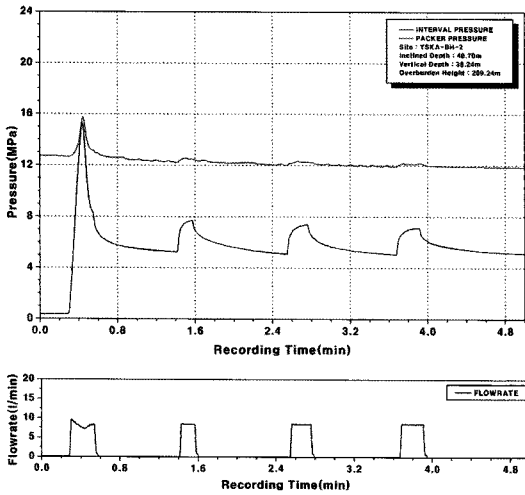
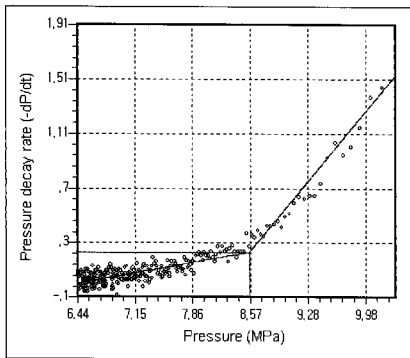
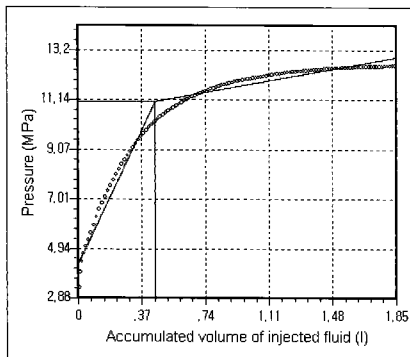


Fig. 3. Example of pressure-flowrate-time curve measured in the study area



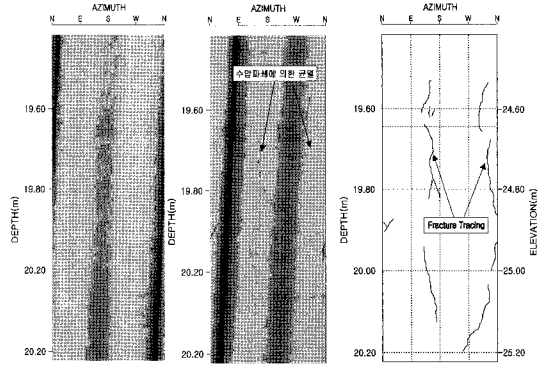
(a) Exponential pressure decay method (BH-1, 53.70 m, cycle 2)



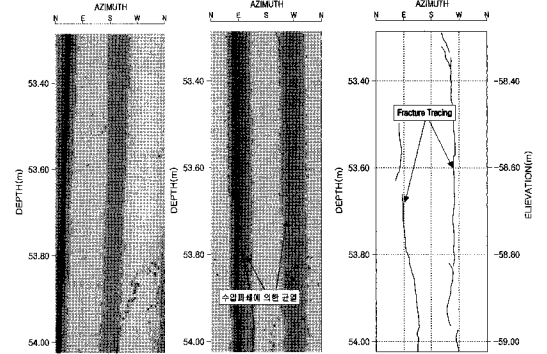
(b) P-V bilinear method (BH-2, 29.10m, cycle 3)

Fig. 4. Example of determinations of pressure parameters

결과의 신뢰성을 향상시키기 위해 수압파쇄시험 전, 후에 각각 초음파 주사검층을 시행하여 그 결과를 비교/검토하는 절차로 수행하였다. 검층속도는 반사 이미지



(a) BH-1 20.00 m



(b) BH-1 53.70 m

Fig. 5. Example of tensile fracture tracing results for determination of the max. hor. stress direction

의 해상도를 높이기 위해 1.50 m/sec 의 속도로 하였으며 반사 이미지에서 음영구간이 존재하여 균열 형상이 뚜렷하지 않은 경우 상향 측정 자료와 하향 측정 자료를 동시에 비교하여 상호 보완적인 방법으로 균열 추적 (fracture tracing)을 시행하였다.

Fig. 5는 시험공 BH-1 지점의 심도 20.00 m와 53.70 m의 방향성 분석 결과를 나타낸다. 왼쪽 영상은 수압파쇄시험이 수행되기 전 측정된 공벽의 초음파 반사 이미지를 나타내며 오른쪽 영상은 수압파쇄시험 후에 측정된 인장균열 형상과 균열 추적에 의한 방향성 분석 결과를 보여준다. 보는 바와 같이 공벽에 대칭적으로 수직 균열이 완벽하게 형성되어 있음을 알 수 있다. 가압을 통해 유도된 이러한 대칭적 수직이나 수직에 가까운 인장 균열의 형성은 수압파쇄시험 자체가 기존 존재하거나 혹은 잠재적으로 내재된 불연속면의 영향을 받지 않고 정상적으로 수행되었음을 의미하며 또한 현저한 주응력 성분이 수평면이나 수평면에 가깝게 존재함을 직접적으로 나타낸다.

현장 시험에서 구해지는 균열 폐쇄압력( $P_s$ ), 균열 개

구압력( $P_r$ ), 균열 발생압력( $P_b$ )에 대한 값들로부터 암반 내 작용하는 최대 수평응력( $S_H$ , maximum horizontal stress), 최소수평응력( $S_h$ , minimum horizontal stress) 그리고 현지 암반의 인장강도값들이 산정되며 수직응력( $S_v$ )은 상부의 자중 즉 측정심도( $h$ )와 암반 단위중량( $\gamma$ )에 의해 구해진다. 본 조사에서는 모든 시험이 180 m 이상의 지반고(Overburden height)를 가지는 터널 갱내에서 수행되었기 때문에 최대 수평응력의 산정에 선형탄성 매질 내 원형공동 주위의 응력상태를 바탕으로 공극수압을 고려한 기준을 적용하였다.

경사공 수압파쇄시험 자료에 대한 응력해석의 경우 Haimson(1996)과 최성웅 외(1999)에 의해 수행된 연구 결과 시추공의 경사가 70°가 이상일 경우 수직공의 해석기법과 결과가 거의 차이가 없음이 밝혀졌다. 따라서 본 과업 중 70° 경사로 시추된 시험공 BH-2에서 수행된 수압파쇄시험 자료에 대해서도 수직공 해석기법을 적용하여 응력 해석을 수행하였다. Table 1은 수압파쇄시험을 통해 산정된 응력 해석 결과들을 나타낸다.

Table 1. Summary of stress calculation and max. hor. stress direction

Depth (m) (O.H.)	$P_b$ (MPa)	$P_s$ (MPa)	$P_r$ (MPa)	$P_0$ (MPa)	$S_v$ (MPa)	$S_h$ (MPa)	$S_H$ (MPa)	K			$S_H$ * Direction
								$K_h$	$K_H$	$K_H/K_h$	
15.90 (257.90)	13.20	3.74	4.99	0.14	6.96	3.74	6.09	0.54	0.88	1.63	87° (N87°E) (진북기준)
20.00 (262.00)	12.00	3.62	5.10	0.18	7.07	3.62	5.58	0.51	0.79	1.55	
29.50 (271.50)	14.22	3.57	4.88	0.27	7.33	3.57	5.56	0.49	0.76	1.55	
36.20 (278.20)	19.56	8.55	9.86	0.34	7.51	8.55	15.45	1.14	2.06	1.81	
40.90 (282.90)	...	10.92	11.65	0.38	7.64	10.92	20.73	1.43	2.71	1.90	
53.70 (295.70)	14.88	7.46	7.61	0.49	7.98	7.46	14.28	0.93	1.79	1.92	

Inclined Depth (m) (O.H.)	$P_b$ (MPa)	$P_s$ (MPa)	$P_r$ (MPa)	$P_0$ (MPa)	$S_v$ (MPa)	$S_h$ (MPa)	$S_H$ (MPa)	K			$S_H$ * Direction
								$K_h$	$K_H$	$K_H/K_h$	
16.03 (186.06)	-	-	-	0.14	5.02	-	-	-	-	-	86° (N86°E) (진북기준)
21.80 (190.81)	12.01	5.19	6.99	0.19	5.17	5.19	8.39	1.00	1.62	1.62	
29.10 (198.35)	14.21	8.83	11.16	0.25	5.36	8.83	15.08	1.65	2.81	1.70	
34.45 (203.37)	16.41	7.49	9.84	0.31	5.49	7.49	12.32	1.36	2.24	1.65	
40.70 (209.24)	15.28	6.67	6.49	0.36	5.65	6.67	13.16	1.18	2.32	1.97	
51.50 (219.39)	18.91	10.12	11.27	0.46	5.92	10.12	18.63	1.71	3.15	1.84	
61.35 (228.65)	11.68	7.57	7.50	0.56	6.17	7.57	14.65	1.23	2.37	1.93	

1)  $P_b$  : break down pressure

3)  $P_r$  : fracture re-opening pressure

5)  $S_h$  : minimum horizontal stress

7) - : abnormal data

9) \* : average SH direction

2)  $P_s$  : shut-in pressure

4)  $P_0$  : pore pressure by downhole pressure-meter

6)  $S_H$  : maximum horizontal stress

8) ... : recording omission

10) O.H : overburden height

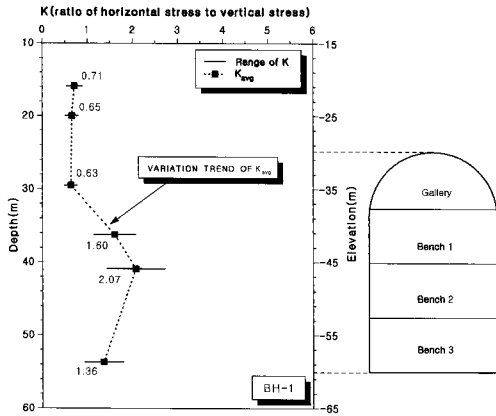
### 3. 조사지역의 초기응력장 분포 특성

#### 3.1 수평응력 분포 양상

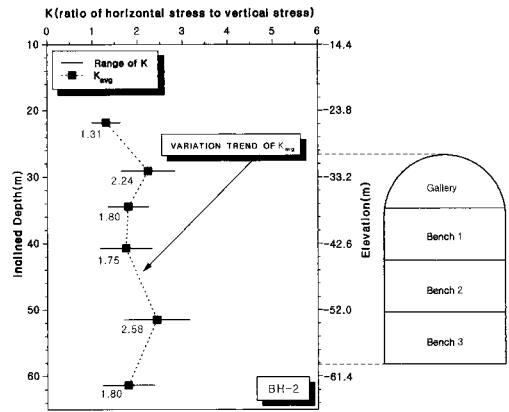
Fig. 6은 현장시험 자료로부터 도출한 심도별 평균 측압계수 크기 및 분포 양상을 나타내며 Fig. 7은 조사지역의 분포 암종별 측압계수 분포범위를 나타내는데 배성호 외(2005)이 국내 수압파쇄법에 의한 실측자료들로부터 도출한 제안식의 범위내 모든 값들이 분포하는 것으로 조사되었다. 그러나 많은 값들이 상한 경계식에 근접하여 위치하는 것으로 나타나 본 과업구간의 수평응력 성분들이 일반적인 분포 범위에 비해 상대적으로 높은 값을 가지는 것으로 분석되었다.

안산암질 응회암과 화강반암류로 구성된 시험공 BH-1

지점은 조사 구간 내에서 전체적으로 0.51~2.71 범위의 측압계수 분포를 나타내었으나 분포 암종에 따라 상이한 초기응력장이 형성되어 있는 것으로 조사되었다. 안산암질 응회암 구간(심도 0~25.5 m(E.L. -5~-30.5 m)에서는 측압계수가 약 0.51~0.88 범위로 비교적 낮은 수준의 초기응력 값을 가지나 심도 약 36 m 하부의 화강반암 분포 구간부터는 수평응력이 크게 증가되어 0.93~2.71 범위의 측압계수를 가지는 것으로 분석되었다. 가장 높은 수평응력이 형성되어 있는 구간은 심도 약 41 m (E.L. -46 m) 지점으로 약 20.73 MPa(211.5 kgf/cm<sup>2</sup>)의 최대 수평응력이 작용하고 있는 것으로 나타났으며 조사 구간의 상부 지반고를 고려해 볼 때 과잉 수평응력장이 형성되어 있는 것으로 판단된다.

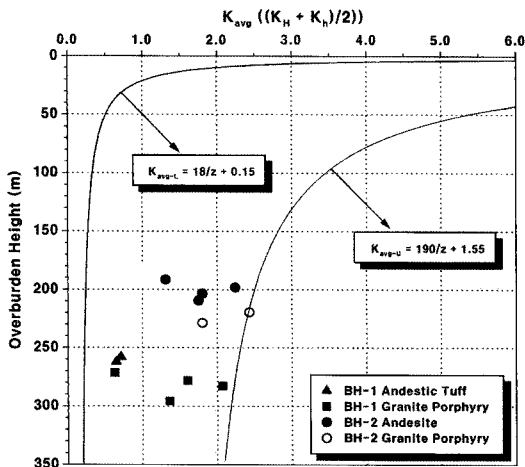


(a) Test borehole BH-1

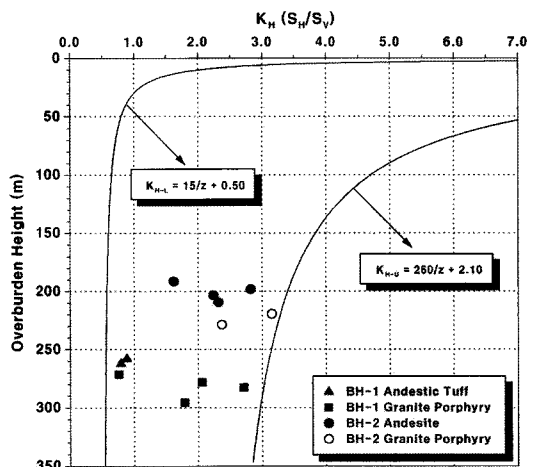


(2) Test borehole BH-2

Fig. 6. Variation pattern of average horizontal stress ratio( $K_{avg}$ )



(a)  $K_{avg}$



(a)  $K_H$

Fig. 7. Distribution of horizontal stress ratio(K) with rock type

최소 수평응력에 대한 최대 수평응력의 상대적 크기인 축압계수비는 안산암질 응회암 구간에서는 1.55~1.63 범위의 값을 가지나 화강반암 구간의 심도 약 36 m 하부 구간부터는 증가되어 1.81~1.92 범위의 값을 가지는 것으로 분석되었다.

수압파쇄균열 방향성 조사 결과 암종 변화에 따라 최대 수평응력 작용 방향도 변화되는 것으로 분석되었다. 안산암질 응회암 분포 구간에서는 최대 수평응력이 진북 기준 약  $140^\circ$ (N40°W) 방향으로 작용하나 하부의 화강반암 구간에서는 응력 방향이 변화되어 진북 기준  $64^\circ\sim 78^\circ$ (N64°E~N78°E) 방향으로 작용하고 있는 것으로 조사되었다. 전체 조사구간에서 평균적으로는 최대 수평응력이 평균 약  $87^\circ$ (N87°E)의 방향성을 가지나 하부 화강반암 구간만 고려할 경우에는 약  $70^\circ$ (N70°E)의 방향성을 나타내었다.

시험공 BH-1 지점과 수평적으로 약 190 m 인근지역에 위치하는 시험공 BH-2 지점은 심도 41.70 m 까지는 안산암류가 분포하나 41.70 m 하부로는 화강반암류로 구성되어 있다. 경사 심도 기준 15.7~61.65 m 구간 내에서 1.00~3.15 범위의 축압계수 분포를 나타내었으며 심도가 깊어짐에 따라 증가되는 경향이 관찰되었다. 결과적으로 주 압반 구조물이 시공되었거나 시공 예정 구간인 E.L. -30~E.L. -60 m 영역에는 1.18~3.15의 축압계수를 가지는 수평응력장이 형성되어 있는 것으로 분석되었다. 조사구간내에서 가장 높은 축압계수를 가지는 구간은 경사 심도 51.50 m(E.L. 53.39 m) 지점으로 1.71~3.15 범위의 축압계수를 가져 18.63 MPa(190.1 kgf/cm<sup>2</sup>)의 최대 수평응력이 작용하는 것으로 나타났다.

최대 수평응력의 작용방향은 안산암 분포 영역에서 진북 기준  $103^\circ$ 를 나타내다가 하부 화강반암 영역에서는 진북기준  $74^\circ\sim 82^\circ$ 로 반시계 방향으로 회전하여 평균적으로는  $86^\circ$ (N86°E)의 방향성을 나타내었다. 본 지점에서는 암반 구조물이 안산암과 화강반암 구간에 걸쳐 위치할 가능성이 크므로 최적 축압계수 산정시  $86^\circ$ (N86°E)의 방향성을 기본적으로 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단되었다.

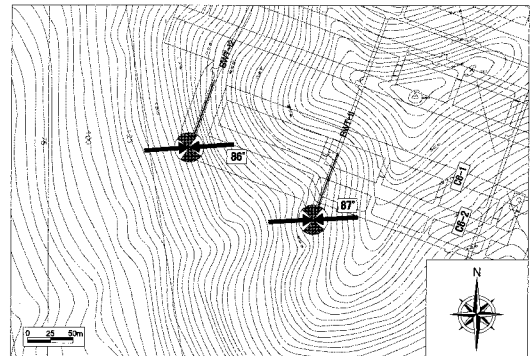
### 3.2 초기응력장 분포 특성

산정된 초기응력의 전반적 분포 양상과 초기응력 방향성 자료를 분석해 볼 때 시험공 BH-1 지점의 상부 안산암질 응회암 구간은 이를 제외한 나머지 시험구간(BH-1 하부의 화강반암 및 시험공 BH-2 전 구간)과 응력 크기나 방향성 면에서 상이한 초기응력장이 형성되어 있는 것으로 나타났다.

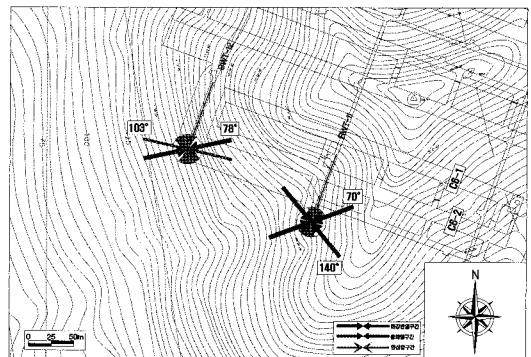
안산암질 응회암 영역에서는 최대 수평응력의 작용

방향이 진북기준 약  $140^\circ$ (N40°W)를 가지며 응력 크기도 1.0 이하의 축압계수를 가진다. 이에 비해 나머지 화강반암과 안산암 분포 영역에는 다소 편차는 있으나 유사한 초기응력장이 형성되어 있는 것으로 나타났다. 최대 수평응력의 작용방향도 시험공 BH-1 하부의 화강반암 분포 구간이 진북 기준 약  $70^\circ$ (N70°E)로 약  $86^\circ$ (N86°E)의 방향을 가지는 시험공 BH-2 지역과 유사한 경향을 나타내었다(Fig. 8). 그리고 축압계수의 크기도 최대 2.71과 3.15의 값을 가져 높은 수준의 과잉 수평응력장이 E.L. -30~60 m 구간에 형성되어 있는 것으로 분석되었다. 본 과업구간의 경우 획득된 초기응력 정보와 암종 분포 그리고 구조물의 위치 등을 고려해 볼 때 초기응력 특성을 시험공 BH-1 지점은 하부 화강반암을 기준으로 그리고 시험공 BH-2 지점은 전체 구간의 평균값을 기준으로 구분하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

과잉 수평응력을 발생시키는 원인으로는 지체응력 외에 상부 지형, 잔류응력, 수평방향 변형(lateral straining)



(a) Average direction of the max. hor. stress at each test borehole



(b) Variation of the max. hor. stress direction with rock type

Fig. 8. Plot of the max. hor. stress directions for the test boreholes

의 억제와 지표 침식 등 여러 요인들이 있다. 많은 경우 이들 개별 요인들이 복합적인 영향을 미치기 때문에 정확한 원인을 규명하는 것은 매우 어려운 작업이며 일반적으로 심도가 얕을수록, 즉 지표에 가까울수록 지체응력 이외 요인들의 영향이 증가하는 것으로 알려져 있다.

본 과업구간의 화강반암/안산암 분포 영역에 형성된 과잉 수평장의 생성 원인을 분석해 보면 정확한 원인 규명은 어려우나, 조사가 수행된 지점의 상부 지반이나 지형조건을 고려해 볼 때, 지형적인 요인보다는 상대적으로 지체응력 요인에 크게 영향을 받은 것으로 판단된다. 현재의 지질/지층 구조를 형성시킨 즉 관입암으로 불규칙하게 분포하는 화강암체를 형성시킨 과거 지체운동(tectonic movement) 당시 유도된 큰 고응력장(paleo-stress field)이 심도가 증가됨에 따라 크게 소실되지 않고 잔류되어 화강암과 인접한 안산암 분포 영역에 높은 수준의 과잉 수평응력장을 형성시켰을 가능성이 큰 것으로 판단된다. 이러한 심부의 화강암체나 인접한 영역에서 나타내는 과잉 수평응력장의 형성 사례는 배성호(2005)에 의하면 본 과업구간 외에도 국내 타 지역에서도 나타난 바가 있다. 이와 같은 과지압 조건에서 발생할 수 있는 암반의 잠재적 불안정 거동으로는 내부 균열 형성에 의한 파열음 발생, 굴착면 주변 암반이 판상으로 분리되는 슬래빙과 굴착면에서 발생한 균열들이 성장, 결합되어 분리 박탈되어 떨어지는 스폐링 현상, 그리고 아주 큰 응력수준에서 축적된 변형을 에너지의 급격한 방출로 유발되는 록버스팅 등의 직접적인 파괴 현상과 기존 불연속면에 의해 형성된 암반 블록의 급격한 돌출이나 미끄러짐 등의 간접적 파괴 현상들이 있다(Kaiser et al., 2000). 따라서 사전조사 단계나 시공 중 조사에서 과도한 초기응력장이 형성되어 있는 것으로 확인된 지역에서는 조사 결과를 근거로 암반 구조물의 역학적 거동과 잠재적 파괴 특성에 대한 상세하고 심도 있는 공학적 분석과 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 기존자료와의 비교 분석

본 조사에 앞서 수년전 추가비축기지 부지에 대해 지표면에서 시추된 경사공(AO-2, AO-8)을 대상으로 수압파쇄시험에 의한 암반내 초기응력 측정이 수행된 바 있다. 시추공 AO-2는 180/70의 방향성을 가졌으며 시추된 경사 심도는 약 292 m이었으며, 시추공 AO-8은 160/70의 방향성을 가지는 165 m 길이의 경사공으로 시추되었다.

수압파쇄시험은 시추공 AO-2 지점에서는 경사 심도 193~287 m(E.L. 93.64~5.31 m) 구간에서, 시추공 AO-8 지점의 경우 경사 심도 75~152 m(E.L. 54.53~

-17.83 m)구간에서 시행되었는데 두 지점 모두 공동 시공 구간(E.L. -30~-60 m)의 상부 영역에 해당한다.

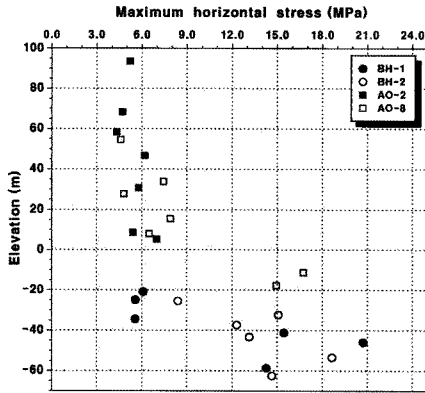
설계 전 단계에서 시행된 수압파쇄시험 관련 논문(최성웅 외, 1999)에 따르면 시추공 AO-2 지점의 경우 구간 전체적으로 0.54~1.06의 비교적 낮은 안정된 축압계수 값을 가지며 최대 수평응력의 평균 작용방향은 진북 기준 67°(N67°E)의 방향성을 가지는 것으로 조사되었다. 축압계수비는 1.03~1.48 범위의 값을 나타내나 대부분 1.3 이하의 값을 가져 평균적으로 1.23의 낮은 값을 가지는 것으로 분석되었다.

시추공 AO-8 지점의 경우 최대 수평응력 평균 작용은 진북 기준 53°(N53°E)로 시추공 AO-2와 유사한 방향성을 나타내나 수평응력의 크기는 전체적으로 시추공 AO-8에 비해 큰 범위의 값을 나타내며 비축 공동의 시공 심도에 근접할수록 수평응력의 크기가 크게 증가되는 양상을 나타내었다. E.L. 54.5~8.0 m 구간에서는 1.24~3.02 범위의 축압계수를 가지다가 그 하부 영역에서는 값이 2.07~4.55로 크게 증가하는 양상을 나타내었다. 시추공 AO-8 지점의 경우 축압계수비는 구간 전체적으로 1.48~1.87의 값으로 시추공 AO-2 지점에 비해 큰 값을 나타내며 축압계수가 크게 변화된 하부 영역(E.L. 8.0 m 이하)에서는 점차 증가되어 1.78~1.87 범위의 값을 가지는 것으로 조사되었다.

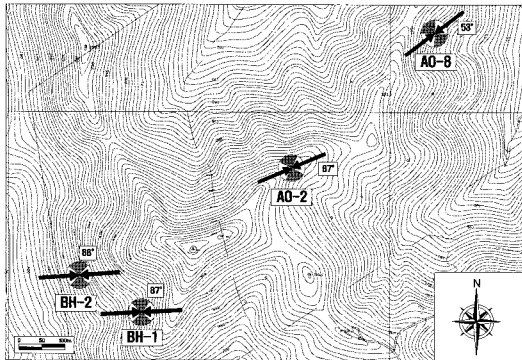
본 연구에서 조사가 수행된 시험공 BH-1과 BH-2 지점은 과거 초기응력이 측정된 AO-2, AO-8 지점과는 수평적으로 약 0.5 km와 1.0 km 이상 이격되어 위치하고 있다. 그리고 조사 영역도 기존 조사는 비축 공동의 상부 영역을 대상으로 한 것에 비해 본 과업에서는 기존 터널(BWT-11, BWT-12)을 이용하여 갱내에서 비축 공동 시공 구간을 포함하는 상대적으로 좁은 영역에서 수행되었다. 따라서 직접적인 비교와 상호 연관된 종합적인 초기응력 분포 특성을 규명하기는 어렵다. 그러나 조사 지역의 지질구조적 특성과 기존 초기응력 조사결과 그리고 본 과업에서 얻어진 심도별 수평응력 성분들의 변화 양상을 바탕으로 추정해 볼 때 본 과업구간의 초기응력 상태는 AO-8 지점의 초기응력 상태와 유사한 특성을 가지는 것으로 판단된다. 그림 9는 본 과업구간과 시추공 AO-2, AO-8 지점의 최대 수평응력 분포 양상을 도시한 것으로 초기응력의 크기는 다소 차이가 있으나 본 과업구간과 AO-8 지점이 유사한 분포 특성을 나타냄을 알 수 있다.

본 과업구간과 시추공 AO-8 지점의 경우 약 1.0 km 이상 이격되어 위치하나 모두 경계부에 인접하고 있다는 점에서 공통점을 가진다. 본 과업구간의 경우 최대 수평응력이 평균적으로 87°(N87°E)의 방향성을 가지





(a) Distribution of the max. hor. stress magnitude



(b) Plot of average direction of the max. hor. stress for 4 test sites

Fig. 9. Characteristics of horizontal stress field in the study area

며 시추공 AO-2, AO-8 지점에서는 각각 67°(N67°E)와 53°(N53°E)의 방향성을 가진다. 두 지역에서 다소 차이는 있으나 대부분 NE~NEE 범위의 방향성을 나타내는 것으로 볼 때 불연속면의 영향 등으로 국부적으로 변화를 나타낼 수는 있으나 본 추가비축지 지역의 경우 NE~EW 방향으로 최대 수평응력장이 작용하고 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

OO 추가 유류비축지 건설공사 중 지하 굴착 공동 내에서 수행된 현장 수압파쇄시험 결과에 대한 분석으로 얻어진 주요 내용들을 요약하면 다음과 같다.

1. 산정된 초기응력의 전반적 분포 양상과 초기응력 방향성 자료를 분석해 볼 때 시험공 BH-1 지점의 상부 안산암질 응회암 구간은 이를 제외한 나머지 시험구간(BH-1 하부의 화강반암 및 시험공 BH-2 전 구간)

과 응력 크기나 방향성 면에서 상이한 초기응력장이 형성되어 있는 것으로 나타났다.

2. 안산암질 응회암 영역에서는 최대 수평응력의 작용 방향이 진북기준 약 140°(N40°W)를 가지며 응력 크기도 1.0 이하의 축압계수를 가진다. 이에 비해 나머지 화강반암과 안산암 분포 영역에는 다소 편차는 있으나 유사한 초기응력장이 형성되어 있는 것으로 나타났다. 최대 수평응력의 작용방향도 시추공 BH-1 하부의 화강반암 분포 구간이 진북 기준 약 70°(N70°E)로 약 86°(N86°E)의 방향을 가지는 시추공 BH-2 지역과 유사한 경향을 나타내었다. 그리고 축압계수의 크기도 최대 2.71과 3.15의 값을 가져 높은 수준의 과잉 수평응력장이 E.L. -30~-60 m 구간에 형성되어 있는 것으로 분석되었다.
3. 본 연구지역의 화강반암/안산암(응회암) 분포 영역에 형성된 과잉 수평응력장의 생성 원인을 정확히 규명하기는 어려우나, 조사가 수행된 지점의 상부 토피고나 지형조건을 고려하여 추정해 볼 때 지형적인 요인보다는 상대적으로 지체응력 요인에 크게 영향을 받은 것으로 판단된다. 현재의 지질/지층 구조를 형성시킨 즉 관입암으로 불규칙하게 분포하는 화강암체를 형성시킨 과거 지체운동 당시 유도된 큰 고응력장 심도가 증가됨에 따라 크게 소실되지 않고 잔류되어 화강암과 인접한 안산암 분포 영역에 높은 수준의 과잉 수평응력장을 형성시켰을 가능성이 큰 것으로 추정된다.
4. 기존 자료와의 비교 검토 결과 본 과업구간의 초기응력 상태는 초기응력의 크기는 다소 차이가 있으나 시추공 AO-8 지점의 초기응력 상태와 유사한 분포 특성을 나타내는 것으로 판단된다. 본 과업구간의 경우 최대 수평응력이 평균적으로 87°(N87°E)의 방향성을 가지며 시추공 AO-2, AO-8 지점에서는 각각 67°(N67°E)와 53°(N53°E)의 방향성을 가진다. 두 지역에서 다소 차이는 있으나 대부분 NE~NEE 범위의 방향성을 나타내는 것으로 볼 때 불연속면의 영향 등으로 국부적으로 변화를 나타낼 수는 있으나 본 추가비축지 지역 내에서는 NE~EW 방향으로 최대 수평응력장이 용하고 있는 것으로 판단된다.
5. 본 연구를 통해 시공 중 지하 굴착 공동에서의 수압파쇄시험 현장 적용성을 입증할 수 있었다. 수압파쇄시험은 시공 중 다른 조사방법에 비해 넓은 심도 영역에 대해 적용할 수 있으므로 굴착 공동 주변의 초기응력 뿐만 아니라 굴착에 따른 2차 응력장도 함께 측정이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 시공 구조물의 심도가 깊거나 지형적, 지질학적으로 과지압 분포

가능성이 높은 지역에서는 시공 전 초기응력 특성에 대한 상세 조사가 이루어지지 않았거나 미진한 경우 시공의 안정성 확보와 기존 설계의 타당성 확인 차원에서 초기응력 측정이 시공 현장에서 반드시 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 배성호, 2005, 수압파쇄법에 의해 측정된 국내 초기응력의 지체구조구별 분포 특성에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
2. 배성호, 전석원, 김학수, 김재민, 2005, 수압파쇄법에 의한 국내 과잉 수평응력 분포 특성에 관한 연구, 한국지반공학회지, Vol.21, No.5, pp.103-110.
3. 최성웅, 신희순, 박찬, 신중호, 배정식, 이형원, 박종인, 전한석 1999, 유류비축기지 설계를 위한 대심도 경사공에서의 수압파쇄 초기응력 해석, 한국지반공학회지, Vol.15, No.4, pp.185-205.
4. Haimson, B.C., 1996, "Can inclined exploratory boreholes be used for in-situ stress measurements? A review of three case histories", Proc. of Eurock 96, pp.403-409.
5. Kaiser, P.K., Diederichs, M.S., Martin, C.D., Steiner, W., 2000, Underground works in hard rock tunnelling and mining, Proceedings of GeoEng2000, Melbourne, Australia, November 19-24, pp.841-926.

### 배 성 호



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사  
Tel: 02-3472-2261  
E-mail: shbae007@geogeny.biz  
현재 (주) 지오제니 컨설턴트 상무이사

### 김 재 민



1993년 안양과학대학교 전자계산학과 공학사  
Tel: 02-3700-9312  
E-mail: LTH@skec.co.kr  
현재 (주) 지오제니 컨설턴트 지반사업부 부장

### 김 장 순



2000년 세명대학교 자원공학과 공학사  
2003년 세명대학교 대학원 환경안전시스템공학과 공학석사  
Tel: 02-3472-2261  
E-mail: kjm\_js@geogeny.biz  
현재 (주) 지오제니 컨설턴트 지반사업부 과장

### 이 영 호



1990년 서울대학교 자연과학대학 지질학과 학사  
1992년 University of Missouri-Rolla, Department of Geological Engineering Master of Science  
Tel: 02-3700-9312  
E-mail: LYH@skec.co.kr  
현재 SK건설 (주) Geotask팀 부장