

수압파쇄 현장시험을 통한 국내 지반의 초기응력 분포양상 해석

Analysis of In-Situ Stress Regime from Hydraulic Fracturing Field Measurements in Korea

최 성 웅
Choi, Sung-Oong

Abstract

Since the hydraulic fracturing field testing method was introduced first to Korean geotechnical engineers in 1994, there have been lots of progresses in a hardware system as well as an interpretation tool. The hydrofracturing system of first generation was the pipe-line type, and it has been developed to a wire-line system at their second generation. The current up-to-date system is more compact and is able to be operated by all in-one system. With a progress in a hardware system, the software for analyzing in-situ stress regime has also been progressed. The shut-in pressure, which is the most ambiguous parameter to be obtained from hydrofracturing pressure curves, can now be acquired automatically from the various methods. While the hardware and software for hydrofracturing tests are being developed during the last decade, the author could accumulate the field test results which can cover the almost whole area of South Korea. Currently these field data are used widely in a feasibility study or a preliminary design step for tunnel construction in Korea. Regarding the difficulties in a site selection and a test performance for the in-situ stress measurement at an off-shore area, the in-situ stress regime obtained from the field experiences in the land area can be used indirectly for the design of a sub-sea tunnel. From the hydrofracturing stress measurements, the trend of magnitude and direction of in-situ stress field was shown identically with the geological information in Korea.

키워드 : 수압파쇄, 초기응력, 해저터널

Keywords : hydraulic fracturing, In-Situ stress regime, sub-sea tunnel

1. 서론

222,000km²에 달하는 한반도에서 대한민국은 전체의 약45%인 99,900km²를 차지하고 있다. 이러한 협소한 면적에도 불구하고 대한민국 전체 인구가 4천7백만 명에 달하고 있다는 점, 이 중 2천만명 이상이 수도권에 밀집하여 거주하고 있다는 점, 그리

고 한반도 전체의 2/3가 산악지대여서 가용 면적에 대한 요구가 매우 크다는 점 등의 이유로 인해 건설 활동은 지속적으로 이루어지고 있다. 그러나 지질학적으로 매우 복잡한 특성을 지닌 한반도에서의 교량, 터널, 암반사면 등 지반 구조물의 구축 작업은 결코 간단치 않다. 즉, 한반도 지각은 선캄브리아기부터 제4기까지 다양하게 분포하고 있으며, 선캄브리아 변성암대와 중생대 화성암이 전체 노두의 50% 이상을 차지하고 있다.

이러한 다양한 지각 구조에 대하여 약 10여년간

* 강원대학교 지구·환경공학부 교수, 공학박사

수행되어 왔던 대부분의 수압파쇄 초기응력 측정 시험으로부터 산악지형에서 요구되는 교통용 암반 터널의 설계를 위한 현지암반응력 정보를 제공할 수 있었으며, 지하유류비축기지 설계 및 도심지 대형지하상가 설계를 위한 현지암반응력의 정보도 제공할 수 있었다. 따라서 본 고에서는 과거 10여 년 간 수행되었던 수압파쇄 초기응력 측정결과를 대한민국 전체 영역에 대해 요약하고, 지질학적 및 지진학적으로 선행되었던 연구결과들과의 비교를 통해 그 측정결과의 신뢰성을 제고하고자 한다.

2. 한국의 지질

구조지질학적인 면에서 볼 때, 한반도는 유라시아 판의 동쪽 경계 근처에 위치하며, 아무리안 판으로 불리는 독립적인 소규모 판의 범주에 속하는 것으로 알려지고 있다. 아무리안 판의 범위는 판의 운동 속도나 지진 및 지각운동 등을 근거로 추정되고 있는데, 최근의 연구결과에 의하면, 북서쪽으로 바이칼 호수를 경계로 하고 있고, 북동쪽으로 오희츠크 판과, 북쪽으로 스타노보이 산맥까지를 그 범위로 하고 있는 것으로 알려지고 있다[3]. 또한, 동쪽으로는 아무리안 판의 동쪽 경계에서 북서쪽으로 이동하는 태평양 판 및 필리핀 판이 일본 해구를 따라 침강하고 있는 것으로 알려지고 있다. 아무리안 판의 전체적인 지각운동은 서쪽에서의 인도-유라시아 판과의 충돌 및 일본 해구를 따른 침강에 의해 영향을 받는 것으로 연구되고 있는데, 이러한 모든 것들은 지진학적으로 볼 때 활동성인 것으로 알려지고 있다. 그러나 인도-유라시아 판과의 충돌 부분 및 태평양 판과 필리핀 판의 침강 부분으로부터 상대적으로 상당한 거리에 위치하고 있기 때문에 한반도 내에서의 대규모 지진발생은 거의 없었으나, 지질공학적인 관점에서 볼 때 현지암반 초기응력은 분명히 이들 판의 움직임에 의해 영향을 받았을 것이며, 특히 그 방향은 지각의 움직임과 절대적인 상관 관계가 있을 것으로 판단되고 있다(Fig. 1).

이러한 판구조론과 함께 한반도의 지각 분포에 대한 해석으로부터도 지각 내에 존재하는 현지암반 초기응력의 일정한 경향을 살펴볼 수 있는 바, 선캄브리아기부터 제4기까지 다양한 층서가 분포하고 있는 한반도의 지각에서 전체 노두의 50% 이상을 선캄브리아 변성암 및 중생대 화성암이 차지하고 있다(Fig. 2). 특히, 중생대 화성암의 대부분은 유라기 및 백악기 화성암으로서, 그 기반암은 낭림육괴, 경기육괴 및 영남육괴 등 세 개의 큰 영역으로 나뉘어 질 수 있다. 그러나 Fig. 2 에서 보는 바와 같이, 한반도의 지각을 크게 세 부분으로 나누는 이들 육괴들은 두 개의 대규모 전단영역에 의해 구분되고 있음을 알 수 있는데, 이들이 곧

highly deformed shear zone으로 알려지고 있는 임진강 벨트 및 옥천 벨트이다. 따라서 한반도를 포함하고 있는 아무리안 판 주변의 지각의 움직임과 함께, 한반도를 크게 세 부분으로 나누는 두 개의 대규모 전단영역대의 분포 양상을 살펴보면, 한반도의 지각 운동은 전체적으로 NE 또는 NEE 방향이 우세하다는 것을 구조지질학적으로도 예상할 수 있을 것이다.

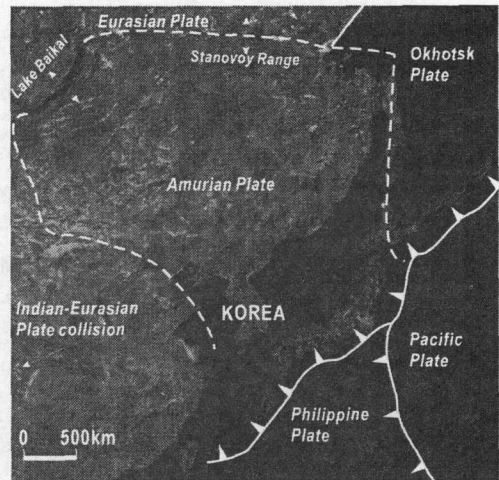
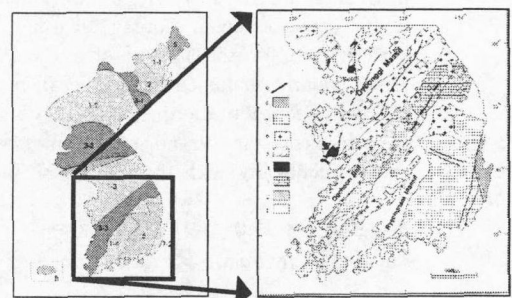


Fig.1 Map of tectonic plates around the Korean peninsula. (modified from the Google satellite Image)



- | | |
|---------------------------|-----------------------|
| 1-1 Kwanmo massif | 1 Precambrian gneiss |
| 1-2 Nangnim massif | 2 Okchon belt |
| 1-3 Gyeonggi massif | 3 Paleozoic sediments |
| 1-4 Ryeongnam massif | 4 Daedong bed |
| 2 Macholyung massif | 5 Foliated granite |
| 3-1 Hyesan-Iwon massif | 6 Daebo granite |
| 3-2 Pyongnam basin | 7 Mesozoic sediments |
| 3-3 Okchon belt | 8 Tertiary sediments |
| 4 Imjingang belt | 9 Faults |
| 5 Dumangang belt | |
| 6 Kyungsang basin | |
| 7-1 Giju-Myungcheon basin | |
| 7-2 Yeonil basin | |
| 8 Chejuvolcanos | |

Fig. 2 Outline of geological distribution of the Korean peninsula and the details for the South Korea[1]

3. 수압파쇄 시험법의 발전

1994년 국내 기술진에 의해 처음으로 보유하게 된 수압파쇄 시험장비는, 고압용 파이프를 연결시켜 시추공 내에 투입함으로써 수압파쇄용 패커가 원하는 심도에 다다를 수 있도록 하는 형태였으나, 파이프 연결에 따른 시험 시간의 지연 및 연결부 위에서의 압력 손실 등의 문제점이 지적되면서 고압용 호스를 이용한 와이어라인 타입으로 보완된 바 있으며, 현장이동성을 확보하기 위해 다시 공기압축기를 추가하는 형태로까지 발전되었다.

또한 수압파쇄시험의 자료해석기법에 있어서도 많은 발전이 있어 왔는데, 수압파쇄시험에 의한 압력-시간 곡선으로부터 얻어지는 초기파쇄압력, 균열개구압력 및 균열폐쇄압력 중에서 초기파쇄압력을 제외하고는 쉽게 얻어지지 않는 균열개구압력과 균열폐쇄압력의 정확한 산정을 위해 통계적 기법을 적용하는 등 결과값의 객관성을 높이기 위한 많은 노력이 있어 왔으며, 특히 이러한 방법들은 수치해석을 통해서도 검증이 이루어진 바 있다[2].

4. 초기응력 측정결과

국내에서 지난 10여년 간 실시되었던 수압파쇄 초기응력 측정결과로부터, 각 지역별 초기응력 분포양상을 Table 1과 같이 정리할 수 있다. 여기서 보는 바와 같이, 연직성분의 주응력에 대한 수평성분의 주응력의 비로 주어지는 K값은 지역에 따라서 다른 값을 나타내고 있으며, 그 방향 역시 일정하지 않음을 알 수 있다. 하지만 전체적으로 볼 때, 심도에 따른 현지암반 초기응력 분포양상은 Fig. 3(b)에서와 같이 일정한 범위 내에 속하고 있음을 알 수 있으며, 이를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다. 즉, 지금까지의 국내 각 지역에 대한 수압파쇄 초기응력 측정으로부터 심도에 따른 K값의 분포양상은 식(1)과 같이 요약될 수 있다.

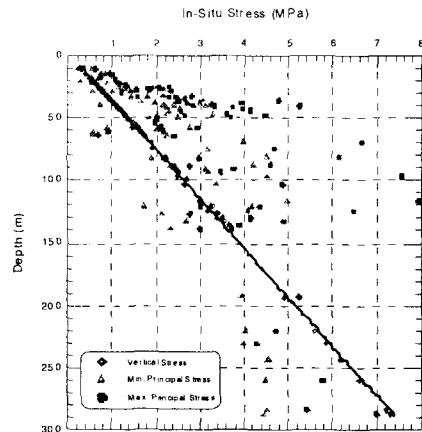
$$\left(\frac{6}{Z} + 0.5\right) < K \left(= \frac{\sigma_{h,ave}}{\sigma_v} \right) < \left(\frac{240}{Z} + 0.1\right) \quad (1)$$

여기서, $\sigma_{h,ave}$ 는 최대수평주응력 및 최소수평주응력의 평균값이며, σ_v 는 연직성분의 주응력을 의미하고, Z 는 심도(단위: m)이다. 다시 말해, 식 (1)의 좌측 항은 연직성분의 주응력에 대한 최소수평주응력의 비를 심도로서 표현한 값으로 해석할 수 있으며, 식(1)의 우측 항은 연직성분의 주응력에 대한 최대수평주응력의 비를 심도로서 표현한 값으로 해석할 수 있을 것이다. 이 값은 기존의 세계적인 연구결과와 유사한 범위에 속하고 있다[5].

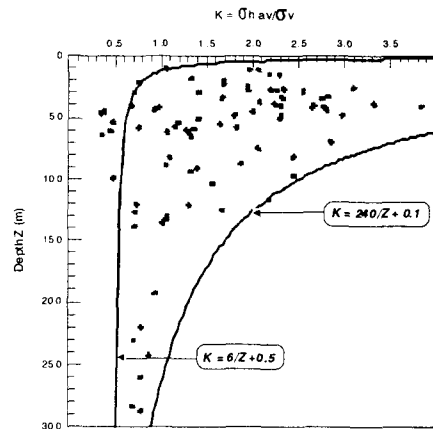
한편, Table 1에서 정리하고 있는 최대수평주응력의 방향을 살펴보면, 이들은 한반도 내에서 발생

하였던 지진의 역사와 매우 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

즉, Fig. 4는 1936년부터 1996년까지 약 60년 동안 한반도 및 한반도 주위에서 발생하였던 22번의 주요 지진발생현황으로부터 최대수평주응력의 방향을 산정한 것인데[4], 이는 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 지난 10여년 간 수압파쇄시험에 의해 측정된 최대수평주응력의 방향과 매우 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 결국, 현지암반 내에 존재하는 초기응력의 양상은 지각의 거동 양상과 밀접한 연관성이 있음을 보여주는 것이다. 그 대표적인 예로서, 최 등(2006)에 의해 발표된 바와 같이 양산단층대에서 실시되었던 수압파쇄 초기응력 측정 결과, 최대수평주응력의 방향은, 이미 여러 지질학자들에 의해 주향이동단층인 것으로 밝혀진 바 있는 양산단층대의 거동 방향과 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) In-Situ principal stress distribution with depth



(b) K-value distribution with depth

Fig. 3 In-Situ principal stress and K-value distribution in Korea

Table 1. Results from the hydraulic fracturing stress measurements during the last 10 years in Korea.

Location	Depth(m)	σ_V (MPa)	σ_h (MPa)	σ_H (MPa)	σ_t (MPa)	K	Dir. of σ_H
Seoul(I)	29.0	0.78	1.00	1.20	4.80	1.28~1.54	45°±10°
	33.0	0.88	1.78	2.28	2.83	2.02~2.59	
	38.5	1.04	1.96	2.70	3.09	1.88~2.59	
Seoul(II)	26.0	0.70	1.13	1.26	0.47	1.61~1.79	30°±12°
	31.6	0.85	1.51	1.54	1.27	1.76~1.80	
	40.5	1.10	1.45	1.71	0.73	1.33~1.56	
	43.0	1.16	2.69	2.83	6.44	2.31~2.44	
	46.5	1.26	3.71	4.07	5.55	2.95~3.23	
Seoul(III)	48.5	1.31	1.78	1.86	3.22	1.35~1.42	38°±7°
	49.0	1.32	2.50	3.44	2.26	1.89~2.60	
	68.9	1.86	3.42	4.13	2.12	1.84~2.22	
	79.5	2.15	3.08	4.27	0.83	1.43~1.99	
Gyeonggi(I)	83.2	2.25	3.05	4.43	2.98	1.36~1.97	100°±10°
	34.5	0.93	2.48	2.64	4.31	2.67~2.84	
	36.0	0.97	3.03	4.77	5.86	3.12~4.85	
	40.5	1.09	3.10	5.25	3.75	2.84~4.82	
Gyeonggi(II)	48.0	1.30	3.27	4.47	6.83	2.52~3.44	95°±5°
	121.0	3.27	4.16	4.35	3.33	1.27~1.33	
	130.0	3.51	3.37	4.14	3.95	0.96~1.18	
Gangwon	136.0	3.67	3.64	3.86	3.90	0.99~1.05	65°±10°
	120.5	3.23	1.71	3.01	3.64	0.53~0.93	
	126.5	3.39	2.11	2.77	2.68	0.62~0.82	
	132.5	3.55	2.68	4.89	2.78	0.76~1.36	
Chunnam(I)	138.5	3.71	2.33	2.99	4.08	0.62~0.82	62°±10°
	193.0	4.90	1.02	5.21	3.76	0.82~1.06	
	220.0	5.58	4.20	4.72	3.94	0.75~0.85	
	230.5	5.85	4.14	4.33	3.12	0.71~0.74	
Chunnam(II)	287.0	7.28	4.75	6.98	6.60	0.65~0.96	52°±8°
	75.0	1.99	3.02	4.60	2.85	1.59~2.42	
	97.0	2.46	4.30	7.44	4.22	1.75~3.02	
	116.5	2.96	4.71	7.89	5.27	1.59~2.67	
Gvungnam	145.0	3.68	9.41	16.74	10.05	2.56~4.55	5°±10°
	83.0	2.24	4.05	6.00	8.37	1.81~2.68	
	114.0	3.08	3.85	5.74	5.07	1.25~1.86	
	127.0	3.42	4.47	7.79	8.52	1.30~2.27	
	132.0	3.56	4.68	7.56	6.73	1.31~2.12	
Gvungbuk(I)	154.0	4.15	5.95	9.96	4.90	1.43~2.39	76°±6°
	11.0	0.30	0.61	0.63	1.08	2.03~2.10	
	15.0	0.40	0.84	0.99	0.87	2.10~2.48	
Gvungbuk(II)	18.0	0.43	0.85	2.78	0.76	2.85~3.52	30°±12°
	58.0	1.55	0.89	1.47	2.56	0.55~0.95	
	61.0	1.63	0.57	0.91	3.38	0.35~0.56	
Chunbuk(I)	64.0	1.71	0.56	0.68	1.55	0.33~0.40	63°±3°
	11.0	0.30	0.54	0.60	0.93	1.80~2.00	
	14.5	0.39	0.74	0.96	1.12	1.89~2.46	
Chunbuk(II)	45.3	1.22	1.59	1.66	7.61	1.30~1.36	82°±5°
	48.5	1.31	1.73	1.82	7.92	1.32~1.39	
	51.5	1.39	1.47	1.82	6.44	1.06~1.31	
	53.5	1.44	1.37	1.45	8.71	0.95~1.00	
	55.5	1.49	2.42	2.54	6.19	1.62~1.69	
	57.3	1.54	3.12	3.27	7.61	2.02~2.12	
Choongnam	25.5	0.68	1.92	2.29	3.18	2.82~3.37	85°±5°
	27.0	0.72	1.25	2.12	1.18	1.74~2.94	
	28.5	0.76	1.55	2.32	1.50	2.04~3.05	
	45.0	1.21	2.28	2.56	3.49	1.88~2.12	
	48.0	1.29	2.01	2.65	4.52	1.56~2.05	
Choongbuk	22.5	0.60	0.88	1.14	1.22	1.46~1.90	95°±5°
	28.0	0.75	1.39	1.53	1.03	1.86~3.01	
	33.5	0.90	1.42	1.57	1.19	1.84~2.55	

* σ_V is a vertical principal stress, and σ_h , σ_H are the minimum and the maximum horizontal principal stresses, respectively.

* σ_t is an In-Situ tensile strength calculated by the difference between the breakdown pressure and the reopening pressure.

* K is a ratio of the horizontal principal stress to the vertical principal stress,

* Dir. of σ_H ; Direction of maximum horizontal principal stress, clockwise from the true north.

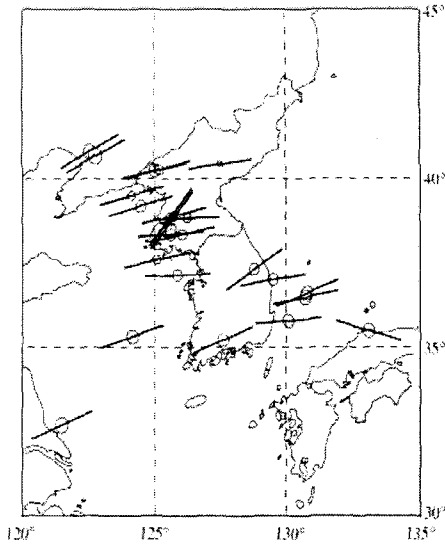


Fig. 4 Maximum horizontal stress direction based on the 22 major events in and around the Korean peninsula between 1936 and 1996[4]

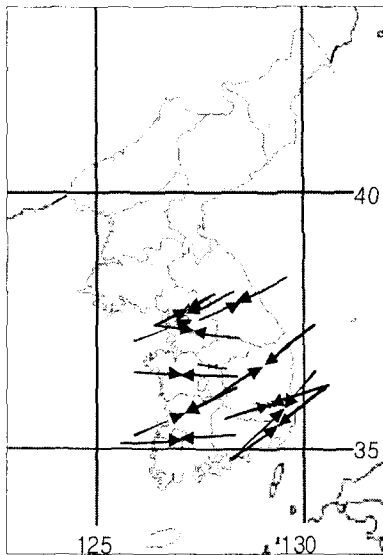


Fig. 5 Maximum horizontal stress direction obtained from the last 10 years hydraulic fracturing tests in Korea

5. 결론

수압파쇄시험에 의한 현지암반 초기응력 측정법이 국내에 소개된 이후, 장비 및 해석기법에 있어

서 많은 발전이 있어 왔으며, 이를 통해 국내 각 지역에 대한 초기응력 측정값을 축적해 왔으며 그 분포 양상을 본 고에서 정리하였다. 지역에 따라 암종의 차이 및 국부적인 지형적 영향 등에 의하여, 연직방향의 응력성분에 대한 수평방향의 응력 성분의 비로 나타낼 수 있는 K값의 분포 양상도 일률적이진 않았지만, 측정된 결과값으로부터 심도에 따른 K값의 분포 양상을 구해보면 일정한 범위에 속하고 있음을 알 수 있었으며, 여기서 제안된 '심도에 따른 K값의 분포 범위'는 외국의 연구사례에서 제시된 결과값과 크게 다르지 않음을 알 수 있었다.

또한 관구조론에 의한 한반도의 지각 거동 양상 해석 및 최근 60여년 간 한반도 주변에서 발생하였던 팔목할 만한 지진에 대한 해석의 결과를 수압파쇄시험으로부터 구해진 최대수평응력의 방향과 비교해 볼 때, 매우 유사한 양상을 띠고 있음을 발견할 수 있었으며, 결국 이는 국내 암반 내에 존재하는 현지암반 초기응력의 작용 방향이 한반도 지각의 거동 역사와 매우 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것이라 하겠다.

최근 국내 암반 터널 설계에서 현지암반 초기응력이 중요한 변수로 작용하고 있다. 이러한 추세에 따라, 국부적인 지질학적 이방성이나 지형적인 특성에 의해 현장에서의 직접적인 측정이 반드시 수행되어야 하는 경우도 많겠지만, 본 고에서 제시한 바와 같이 국내 암반의 초기응력 분포에 대한 대표적인 양상을 기본설계단계 등에서 쉽게 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

또한 수압파쇄시험에 의해 측정된 초기응력의 분포 양상이 지각의 거동 양상과 밀접한 관계에 있다는 사실로 볼 때, 현장에서 채취되는 암석코어를 이용한 고응력(ancient stress) 해석의 신뢰도 향상을 통해 해당 지역의 초기응력 분포양상을 간접적으로 파악할 수 있을 것이라 판단된다.

인구 대비 협소한 유용 면적을 가진 우리나라에서는, 여러 가지 건설공사가 활발히 이루어지고 있으며, 연안 지역 간의 연결 및 동북아시아 허브의 중심국으로 발돋움하기 위해 해저터널에 대한 연구도 심도 있게 진행되고 있다. 특히 해저 또는 하저 터널의 안전한 설계를 위해 해당지역에서의 초기응력 측정에 관한 연구가 진행 중에 있으며, 현장시험의 한계성을 극복할 수 있는 보완된 초기응력 측정법이 연구되고 있으나[6], 본 고에서 제시하는 국내 암반의 초기응력 분포양상에 대한 대표적인 특징을 함께 고려하는 연구가 수행된다면 상호 보완적인 연구결과를 도출할 수 있을 것이라 사료된다. 단, 육상에서 측정된 초기응력 분포 양상을 해저 지반으로 확대 해석하기 위해서는 지질학적 검토가 심도 있게 선행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Choi, S.O., Shin, H.S. and Lee, B.J. Geological and geotechnical investigation on in situ stress regime around the Yangsan Fault zone in Korea, *Int. J. Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.21, No.3-4, pp.243, 2006.
- [2] Choi, S.O. and Shin, J.J. Numerical modeling of hydraulic fracture propagation from wellbore, *RFP Workshop in Stanford University*, P-A-1, 2001.
- [3] Haimson, B., Lee, M.Y. and Song, I. Shallow hydraulic fracturing measurements in Korea support tectonic and seismic indicators of regional stress. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.40, Issues7-8, pp.1243-1256, 2003.
- [4] Jun, M.S., Jeon, J.S. and Che, I.Y. Earthquake mechanism of Korean Peninsula. *Earthquake Engineering Society of Korea(EESK)* 3(1999), pp.58 - 63.
- [5] Stephansson, O. Hydraulic fracturing and its measurements, 1999.
- [6] Shin, H.S. et al. Development of techniques for designing the sub sea tunnel. *Interim Report for the Korean Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning*, 2006.