

## 지하수의 영향을 고려한 지하공동구조체의 동적응답 Dynamic Response of Underground Openings Considering the Effect of Water Saturation

김 선 훈\*      김 광 진\*\*  
Kim, Sun-Hoon      Kim, Kwang-Jin

---

### ABSTRACT

Three-dimensional dynamic analysis of underground openings subjected to explosive loadings considering the effects of water saturation is carried out in this study. The problem considered in this study is an unlined circular tunnel subjected to a finite cylindrical charge placed at the center of the proposed tunnel. The surrounding rock mass is assumed to be the limestone with 13.5% of porosity. Two calculations are compared using an identical explosive charge; the first in dry rock of 13.5% porosity, the second in the identical rock, but in a fully saturated condition. It is shown that underground openings in saturated porous medium could be significantly more vulnerable to the potential damages associated with high motions and shear failure than those in dry medium.

---

### 1. 서 론

국내의 경우 지하공동구조체의 건설은 1950년대 이전까지는 주로 열차나 차량을 위한 터널이 주로 건설되었으나, 1970년대초 서울에 지하철 건설이 시작되면서 지하철 터널의 건설이 본격화되었으며, 현재는 전국 주요 6대 도시에 지하철 건설이 활발하게 진행되고 있다. 또한 통신구, 전력구, 공동구, 수로터널 등의 건설도 더욱 증가할 것으로 예상되고 있다. 이 밖에도 에너지 저장을 위한 유류 및 가스 비축시설, 양수지하발전소 등이 건설되었으며, 방사성폐기물의 지하처분장, 농수산물 지하저장비축시설 등을 위해 지하공간의 활용이 더욱 증대될 것으로 예상되고 있다. 이와 같이 지하공간의 활용이 활발해 짐에 따라 지하공간구조체의 수치해석 검토는 필수적인 과정이 되었으며, 특히 다양한 외적요인에 대한 안정성 검토의 필요성이 증가하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 발파로 지하암반체를 굴착하여 공동을 건설하는 경우 지하수의 영향이 공동주변 암반체의 거동변화에 미치는 영향을 수치적으로 검토해 보았다. 이를 위해 폭발하중에 대한 지하공동구조체의 3차원 유한요소해석을 효과적으로 수행하는 방법을 제안하였다. 이 방법에 근거한 해석기능은 이단계매체(Two-Phase Media)개념에 근거하여 개발한 다공성매체의 3차원 동적유한요소해석프로그램<sup>1)</sup>에 추가시켰다.

---

\* 정회원 · 영동대학교 건설공학부 토목공학과 조교수

\*\* Principal Engineer, COMTEC RESEARCH, USA

## 2. 이단계매체 동적해석프로그램

본 연구에서 사용한 포화된 다공성매체(Saturated Porous Media)의 3차원 동적거동해석에 대해 소개하고자 한다. 전산코드는 이단계매체개념을 이용한 다공성매체의 2차원 해석프로그램<sup>2)-4)</sup>을 3차원으로 확장시킨 것이다.

이단계매체개념의 유한요소 수식화를 위해서는 유효응력원리, 고체입자의 구성관계, 공극수의 흐름방정식, 혼합체(Bulk Mixture)의 운동방정식, 공극수의 운동방정식 등이 사용되었다.

이단계매체의 기본 방정식을 연립하면, 구하고자 하는 포화된 암반의 구성방정식을 도출할 수 있다. 그리고 다공성매체의 구성관계식으로는 일반화된 Hoek-Brown Model<sup>5)</sup>을 3차원으로 확장시켜 사용하였다. 이를 위해 일반화된 Hoek-Brown Model의 응력-변형도 관계, Failure Surface, Flow Consistency방정식, 탄소성 구성법칙 등이 고려되었다.

도출된 포화암반의 구성방정식은 유한요소법을 사용하여 3차원요소의 절점에서의 힘-변위 관계로 나타내지며, 기존 2차원 수치해석용 프로그램인 MPDAP<sup>2)-4)</sup>을 수정 및 확장하여 3차원 동적거동해석 프로그램(MPDAP-3D)을 개발한 바 있다<sup>1)</sup>.

## 3. 발파충격해석방법

발파로 인한 폭발충격하중에 대한 지하공동구조체의 유한요소해석시 발파공의 체적은 지반 전체에 비해 매우 미소한 부분에 해당된다. 따라서 이러한 미소부분을 고려하여 유한요소망을 생성시키면 정밀한 해석을 위해서는 엄청난 숫자의 요소를 필요로 하게 된다. 또한 해석의 목적이 발파로 인한 충격해석이므로 발파공 주변영역의 모형화에 세심한 주의가 필요하다.

이러한 문제들을 종합적으로 검토한 결과, 발파공과 전체 구조체의 요소망을 동시에 해석할 경우 계산시간과 비용면에서 현실적인 어려움이 발생하는 바 효율적인 해석수행을 위해 본 연구에서는 다음과 같이 1차원 근원해석(1-D Source Analysis)과 3차원 터널해석의 2단계로 나누어 수행하였다.

### 3.1 1차원 근원해석과 폭약원의 모형화

1차원 근원해석에서는 폭약원(Explosive Charge)과 인접주변 자유장(Surrounding Free Field)을 포함하는 영역에 대하여 정밀해석을 수행함으로써 3차원 터널해석의 입력하중을 계산하는데 그 목적이 있다. 1차원 근원해석과정은 폭약원을 중심으로 축대칭의 문제이므로 축대칭유한요소(Axisymmetric Finite Element)를 사용하여 해석을 수행하는 것이 가능하다.

폭약원의 모형화에는 폭발의 단열팽창을 예측하기 위하여 압력-체적-에너지관계를 나타내는 JWL식과 화학반응의 과정을 모사하기 위한 Burn Fraction(BF)이 사용되었다<sup>6)</sup>. 따라서 요소내에서 발생하는 실제 압력은 JWL식에서 얻어지는 압력값과 Burn Fraction값의 곱으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P = BF \bar{P} \quad (1)$$

여기서  $BF$ 는 Burn Fraction값으로서 폭발시간, 현재시간, 폭발속도 등의 값에 의해 결정된다. 또한  $\bar{P}$ 는 JWL식에서 얻어지는 압력값으로서 상대체적값, 내부에너지밀도, 재료특성상수 등에 좌우된다.

폭약이 폭발하게 되면 폭약원 주변 암반체 영역중 인접한 영역에는 소성영역이 발생하게 된다. 따라서 1차원 근원해석을 위해서는 먼저 폭약원에서 부터 일정한 거리만큼 떨어진 영역까지를 축대칭 유한요소로 모형화

하고, 식 (1)에서 얻어진 폭발하중값을 입력하중으로 해석을 수행하여 대상영역의 동적거동 및 응력분포를 개략적으로 파악한다. 이 결과를 토대로 하여 유한요소망을 재구성한 후, 해석대상지역의 엄밀해석을 수행하여 3차원 터널해석을 위한 입력하중을 계산한다.

### 3.2 3차원 터널해석

3차원 터널해석은 1차원 근원해석을 통하여 얻어진 압력이력값을 입력하중으로 하여 지하공동구조물과 주변 암반체 전체를 대상으로 하여 3차원 동적해석을 수행하는 과정이다. 1차원 근원해석을 통하여 인접 자유장에서 폭약원으로 부터 소성영역을 벗어나 탄성영역이 발생하는 지점의 경계지점에서 발생하는 압력이력(Pressure Time History)을 입력하중으로 하여 3차원 터널해석을 수행한다<sup>7)</sup>.

## 4. 지하공동구조체의 3차원 발파충격해석

본 연구에서는 지하수의 영향을 고려하여 지하공동구조체의 굴착시 발파충격에 대한 3차원 동적해석을 수행하여 인접한 지하공동과 주변 암반체에 미치는 영향을 검토하고자 3차원 발파충격해석을 수행하였다.

### 4.1 해석문제의 개요

본 해석에서는 기존에 존재하고 있는 2개의 공동체 중앙에 새로운 공동을 굴착하기 위하여 발파를 하였을 때, 발파충격으로 인한 기존공동 주변암반체의 동적거동변화를 검토하였다(그림 1 참조). 해석의 간편성을 위해 중력의 영향은 무시하여 전체 구조물의 1/8 만을 모형화하였다. 주변암반은 13.5%의 공극율을 갖는 석회암(Limestone)으로 가정하였으며, 이 석회암의 재료특성은 Applied Research Associate에 의한 실험결과를 사용하였다. 지하수의 영향을 검토하기 위하여 2가지 경우에 대해 구조해석을 수행하였다. 즉, 주변암반이 완전히 건조한 암반으로 가정한 경우와 공극이 완전히 지하수로 포화된 경우에 대해 동일한 구조해석을 수행하였다.

암반체의 고체입자 재료특성은 표 1에 나타난 바와 같다. 또한 폭약원 모형화에 필요한 JWLS식의 계수값과 Burn Factor값의 계산에는 대표적인 ANFO의 특성값을 사용하였다(표 2 참조).

### 4.2 1차원 근원해석모형화 및 결과

1차원 근원해석을 위해 폭약원의 원점으로 부터 5m까지 200개의 균등길이(0.025m)를 갖는 축대칭유한요소로 모형화하였다. 본 해석은 3차원 터널해석을 위한 입력하중의 계산을 위해 1μsec의 시간간격으로 수행하였으며, Newmark의  $\nu$ -damping( $\nu=0.7$ )을 사용하였다.

그림 2는 1차원 근원해석결과로서 장약공으로부터 0.56m 떨어진 지점에서의 원주방향 응력이력을 나타낸 것이다. 그림에서 해석결과를 보면 건조한 암반의 경우와 포화된 암반의 경우 모두 충격파에 의한 응력값의 변화양상은 최고응력점에 도달한 이후 급격하게 감소하여 정역학적인 응력값에 도달함을 알 수 있다. 즉, 이 지점에서는 폭약이 발파된 후 건조한 암반의 경우는 145MPa의 최고응력값에 도달하였다가 그 이후에 급격히 감소하여 37MPa의 일정한 응력값을 나타내었고, 포화된 암반의 경우는 225MPa의 최고응력값에 도달하였다가 그 이후에 급격히 감소하여 42MPa의 일정한 응력값을 나타내었다.

### 4.3 3차원 터널해석모형화 및 결과

그림 3은 3차원 터널해석을 위한 해석대상문제의 영역과 경계조건을 나타낸 것이다. 대칭면에 해당되는 절

점의 경계조건은 물리조건을 사용하였고, 해석모델의 외부면은 충격파가 해석영역외곽으로 전파되는 것을 고려하기 위하여 전달경계조건(Lysmer, 1971)을 사용하였다. 그림 4는 X-Y평면상의 유한요소망을 나타낸 그림으로서 요소수는 261개이며, Z-축으로는 6개의 동일크기요소로 모형화함으로서 사용된 8절점 고체유한요소의 총숫자는 1566개이다.

1차원 근원해석을 통해서 얻어진 그림 2의 응력이력을 폭약원으로 부터 0.56m 떨어진 원형면을 따라서 Z 방향으로 1.54m 길이 만큼 작용시켜 3차원 터널해석을 수행하였다. 해석은 40μsec의 시간간격으로 수행하였으며, Newmark의  $\nu$ -damping( $\nu=0.7$ )을 사용하였다. 해석결과는 그림 5에 나타난 공동주변 암반체의 주요지점에서 응력이력, 속도이력, 변위이력 등으로서 그림 6에서 그림 9까지 나타내었다.

그림에서 볼 수 있듯이 포화된 암반과 건조한 암반에서 비슷한 형태의 결과를 보여주고 있으나, 모든 경우 최대값은 포화된 암반에서 더 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 표3은 본 연구의 3차원 터널해석을 수행하여 얻어진 수치결과 가운데 공동주변 암반체 주요지점에서 발생한 최대속도값과 최대변위값을 요약한 것이다.

그림 10은 터널변형형상의 최대값을 나타낸 것으로서 두 경우 모두  $c_1$ 에서 발생하였으며, 건조한 암반에서는 3.64msec에서 0.19mm, 포화된 암반에서는 0.23mm의 크기로 발생하였다.

그림 11과 12는 각각  $C_2$ 와  $D_2$ 에서 두 암반상태에 대한 응력경로의 직접 비교를 나타낸 그림이다.  $C_2$ 에서는 포화된 암반에서의 유효응력경로와 건조한 암반에서의 응력경로의 차이가 크지 않음을 보여주었다. 그러나  $D_2$ 에서는 포화된 암반에서의 유효응력경로가 건조한 암반에서의 응력경로에 비하여 급격하게 파괴면에 가까워지는 결과를 보여줌을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 기대효과

본 연구에서는 발파로 지하암반체를 굴착하여 공동을 건설하는 경우 지하수의 영향을 고려한 공동주변 암반체의 거동변화를 수치적으로 검토하였다. 이를 위해 폭발하중에 대한 지하공동구조체의 3차원 유한요소해석을 효과적으로 수행하는 방법으로 1차원 근원해석과 3차원 터널해석의 2단계로 나누어 수행하는 방법을 제시하였다. 1차원 근원해석에서는 장약공과 그 주변의 자유장을 포함하는 해석으로서 3차원 터널해석을 위한 입력하중의 계산을 위해 수행한다. 이 방법에 근거한 해석기능은 이단계매체개념에 근거하여 개발한 암반체의 3차원 동적유한요소해석프로그램인 MPDAP-3D에 추가시켰다. 그리고 이 프로그램을 사용하여 기존에 존재하고 있는 2개의 터널구조물의 중앙에 새로운 공동을 굴착하기 위하여 발파를 하였을 때, 발파충격으로 인한 기존공동 주변암반체의 동적거동변화를 검토하였다.

본 연구에서는 13.5%의 공극율을 갖는 암반체에 대해 지하수가 완전 포화된 경우와 건조한 암반인 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과 포화된 암반에서 속도, 변위, 응력이 모두 크게 발생함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 김선훈, 김진웅, 김광진, "포화된 지반체의 3차원 동적해석프로그램 개발", 대한토목학회 논문집, 1998, 제 18권 제I-1호, pp.153-160.
2. Blouin, S.E., et al., "Dynamic Response of Multiphase Porous Media", Report to U.S. Air Force Office of Scientific Research, Washington D.C., 1990.

3. Kim, K.J., and Blouin, S.E., "Response of Saturated Porous Nonlinear Materials to Dynamic Loadings", Report to U.S. Air Force Office of Scientific Research, Washington D.C., 1984.
4. Kim, K.J., et al., "Experimental and Theoretical Response of Multiphase Porous Media to Dynamic Loads", Report to U.S. Air Force Office of Scientific Research, Washington D.C., 1988.
5. Hoek, E., and Brown, E.T., Underground Excavation in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1982.
6. Lee, E.L., Hornig, H.C., and Kury, J.K., "Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products", UCRL-50422, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, 1968.
7. 김선훈, 김진웅, 김광진, "폭발하중에 대한 지하공동구조체의 3차원 동적 유한요소해석", 한국전산구조공학 회 논문집, 1997, 제10권 2호, pp.171-178.

표 1. 고체입자의 재료특성값

Specific gravity ( $G_s$ )	Initial wave velocity ( $C_0$ )	Initial Poisson's ratio ( $\nu$ )	Constant relating loading wave velocity to particle velocity ( $S$ )	Threshold pressure beyond which material tends to behave like a fluid
2.7	7078 m/sec	0.2	1.5	5 Kb

표 2. 대표적인 ANFO의 특성값

내부에너지밀도 ( $E$ )	폭발속도 ( $C_d$ )	초기밀도 ( $\rho_0$ )	JWL식의 재료특성상수				
			A	B	$R_1$	$R_2$	$w$
7.08 GPa	3048 m/sec	830 Kg/m <sup>3</sup>	20 GPa	0.2 GPa	3.7	0.9	0.2

표 3. 공동주변 암반체 주요 지점에서의 최대수평속도값과 최대변위값

위 치	최대수평속도값(cm/sec)		최대변위		
	건조한 암반	포화된 암반	방 향	변위값(mm)	
				건조한 암반	포화된 암반
b <sub>1</sub>	77.0	96.0	수 평	0.22	0.27
c <sub>1</sub>	58.0	70.0	수 평	0.19	0.23
d <sub>1</sub>	-16.0	-23.0	수 평	0.058	0.076
			수 직	0.028	0.039
e <sub>1</sub>	2.6	5.2	수 평	0.016	0.02

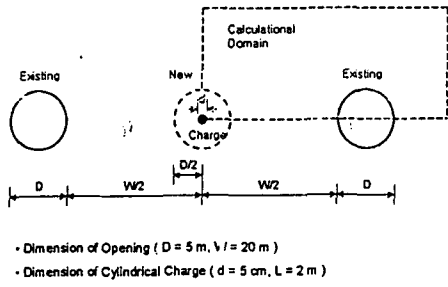


그림 1. 지하공동구조체와 폭약원의 기하학적 형상

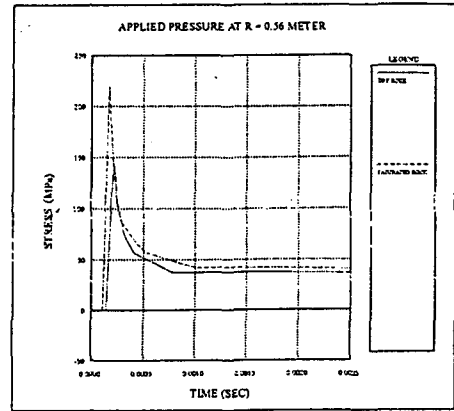


그림 2. 1차원 근원해석결과( $r=0.56\text{m}$ 에서 원주응력시간이력)

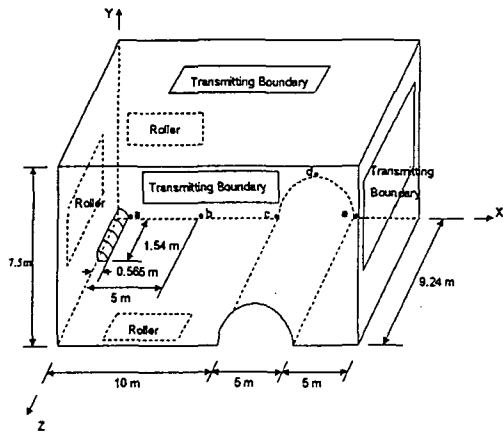


그림 3. 3차원 터널해석을 위한 해석영역과 경계조건

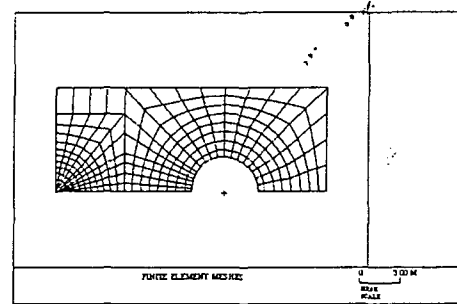


그림 4. X-Y평면상에서 유한요소망

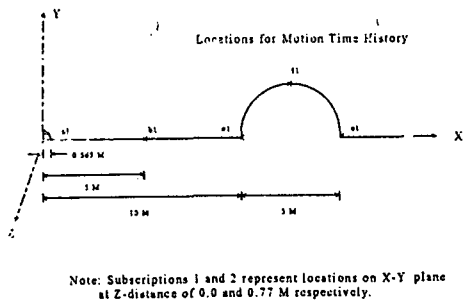
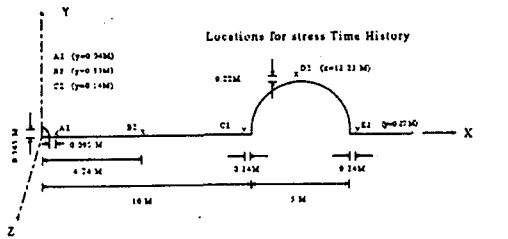


그림 5. 공동 주변의 주요위치

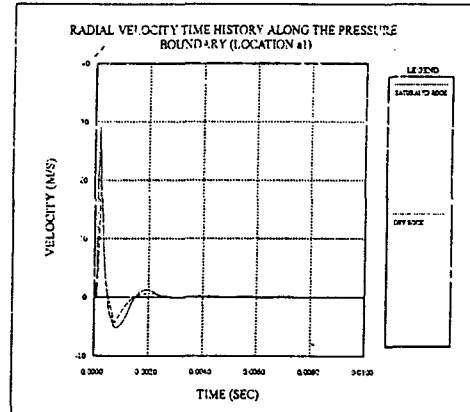


그림 6. Radial velocity time histories along the pressure boundary (Location a<sub>1</sub>)

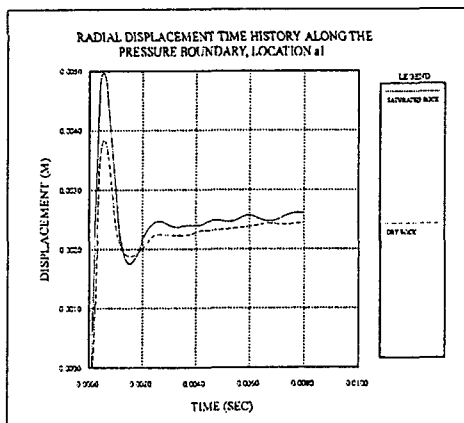


그림 7. Radial displacement time histories along the pressure boundary (Location a<sub>1</sub>)

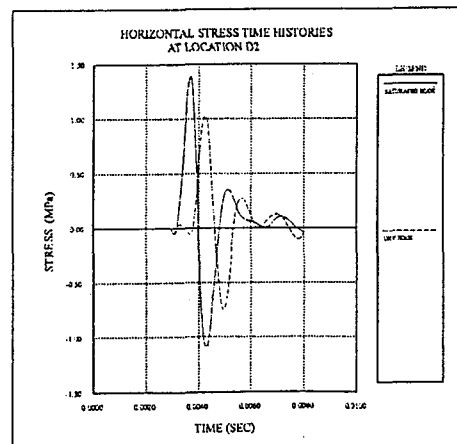


그림 8. Horizontal stress time histories (Location D<sub>2</sub>)

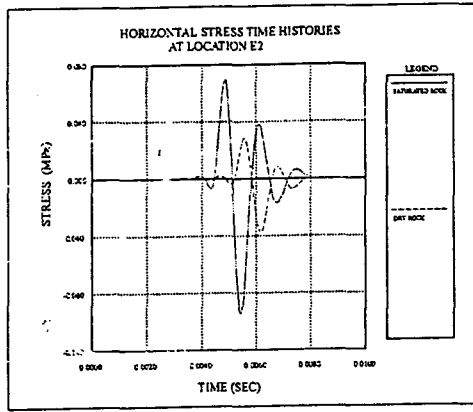


그림 9. Horizontal stress time histories (Location E<sub>2</sub>)

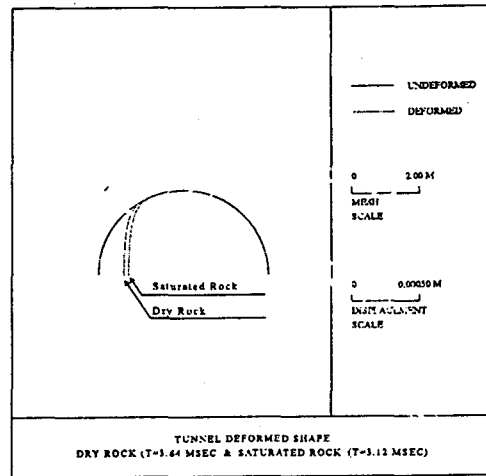


그림 10. Maximum tunnel deformed shape

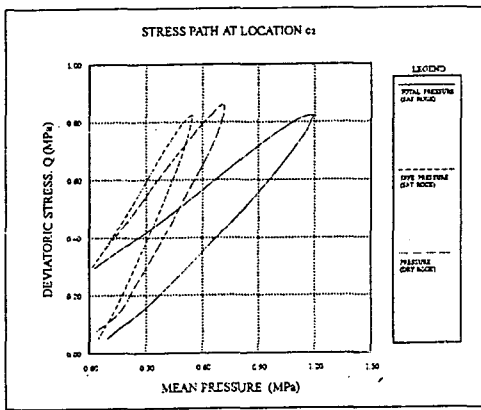


그림 11. Comparison of stress paths (Location C<sub>2</sub>)

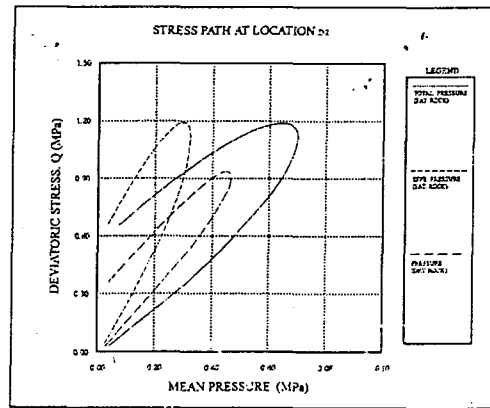


그림 12. Comparison of stress paths (Location D<sub>2</sub>)