

터널발파로 인한 굴착선주변 암반거동의 확률론적 연구

Probabilistic Analysis of Blasting Loads and Blast-Induced Rock Mass Responses in Tunnel Excavation

이인모¹ Lee, In-Mo
박봉기² Park, Bong-Ki
박채우³ Park, Chae-Woo

Abstract

The generated blasting pressure wave initiated under decoupled-charge condition is a function of peak blasting pressure, rise time, and wave-shape function. The peak blasting pressure and the rise time are also the function of explosive and rock properties. The probabilistic distributions of explosive and rock properties are derived from the results of their property tests. Since the probabilistic distributions of explosive and rock properties displayed a normal distribution, the peak blasting pressure and the rise time can also be regarded as a normal distribution. Parameter analysis and uncertainty analysis were performed to identify the most influential parameter that affects the peak blasting pressure and the rise time. Even though the explosive properties were found to be the most influential parameters on the peak blasting pressure and the rise time from the parameter analyses, the result of uncertainty analysis showed that rock properties constituted major uncertainties in estimating the peak blasting pressure and the rise time rather than explosive properties. Damage and overbreak of the remaining rock around the excavation line induced by blasting were evaluated by dynamic numerical analysis. A user-subroutine to estimate the rock damage was coded based on the continuum damage mechanics. This subroutine was linked to a commercial program called 'ABAQUS/Explicit'. The results of dynamic numerical analysis showed that the rock damages generated by the initiation of stopping hole were larger than those from the initiation of contour hole. Several methods to minimize those damages were proposed such as relocation of stopping hole, detailed subdivision of rock classification, and so on. It was found that fracture probability criteria and fractured zones could be distinctively identified by applying fuzzy-random probability.

요지

디커플링장전조건의 화약 폭발시 발생하는 발파압력은 최대압력, 최대압력 도달시간, 압력파형의 함수로 나타난다. 발파 최대압력과 최대압력 도달시간은 화약과 암반 특성의 함수이다. 화약과 암반특성시험 결과로부터 그 특성치의 확률분포를 산출하였다. 화약과 암반 특성치의 확률분포가 정규분포로 나타났으므로 발파 최대압력과 최대압력 도달시간의 확률분포도 정규분포로 추정되었다. 발파 최대압력과 최대압력 도달시간에 가장 크게 영향을 미치는 변수를 파악하기 위하여 매개변수분석과 불확정성분석을 실행하였다. 최대압력과 최대압력 도달시간은 매개변수분석결과 화약특성에 가장 크게 영향을 받았지만 불확정성분석결과 화약보다 암반특성에 크게 영향을 받았다. 발파로 인하여 굴착선주변 암반에 발생하는 손상을 수치해석으로 분석하였다. 암반손상을 산정하기 위하여 연속체손상역학에 기초하여

1 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학부 교수 (Member, Ph.D. Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학부, 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ., parkbongki@hotmail.com)

3 정회원, 동일기술공사, 지반사업부, 사원 (Member, Junior Engineer, Dong il Engng. Consultants Co. Ltd.)

사용자 부 프로그램을 작성하였다. 이 부 프로그램을 ABAQUS 주 프로그램과 연결하여 해석하였다. 동적 해석결과는 확대공 발파에 의한 손상이 외곽공보다 크게 나타났다. 확대공 배치, 암반분류 세분화 등 여굴방지 방안이 제안 되었다. 손상계수의 파쇄기준이 불명확하므로 fuzzy-random 확률이론을 적용하여 파쇄기준과 파쇄영역을 명확하게 나타내었다.

Keyword : Blasting pressure, Damage, Decoupled charge, Sensitivity analysis, Uncertainty analysis

1. 서 론

터널 발파굴착에서 암반의 여굴과 손상을 최소화하는 방안에 대한 연구는 매우 중요하다. 터널발파에서 외곽공과 인접한 확대공은 여굴과 암반손상에 가장 크게 영향을 미친다. 따라서 외곽공과 확대공의 발파압력을 정확히 산정하고 발파 응력파의 전파특성을 명확히 분석함으로서 암반의 여굴과 손상을 평가할 수 있다. 최근 발파공 주변의 암반손상에 대한 연구가 많이 시행되고 있으나 터널발파에서 여굴 및 암반손상에 대한 연구는 부족한 실정이다. Pusch(1993)는 터널발파로 인하여 발생하는 교란영역(disturbance area)이 굴착선부터 1.0m 정도라고 주장하였다. Rustan(1996)은 외곽공의 기폭시차가 발파진동, 균열 발생빈도, 균열 길이, 여굴에 미치는 영향을 연구하였으며 smooth blasting 기법이 여굴감소에 우수한 효과를 나타낸다고 주장하였다. Barkley (2001) 등은 도폭선을 이용한 암반손상 최소화 방안을 제안하였다. 하지만 이런 연구들은 파쇄과정에 대한 체계적이고 이론적인 접근보다는 시험과 경험을 통하여 시행되었다.

암반의 파쇄(fragmentation), 손상은 발파공 내 가스압력을 정확히 산출하는 것으로부터 출발한다. 가스압력의 중요성에도 불구하고 적합한 측정방법이 없어서 직접 측정하는 연구는 거의 수행되지 못했다. 대신에 다양한 경험공식이나 컴퓨터에 내장된 code를 이용하여 가스압력이 산출되었다. 최근 Nie(1999)는 LHM 방법을 이용하여 가스압력측정을 시도하였다. Liu와 Katsabanis (1997)는 발파공 2개에서 발생하는 응력파 중첩현상, 발파공 주위의 암반손상 및 파쇄도를 분석하기 위하여 3차원 동적해석을 하였다. 발파로 인한 암반손상을 과거에는 진동속도를 이용하여 평가하였으나 최근 연속체 손상역학의 손상계수를 이용하여 평가되고 있다(Liu, 등, 1997). 여러 연구자들이 여굴 경계를 나타내는 한계 손상계수 값들을 제시하였으나 값의 범위가 비교적 커

서 여굴경계가 명확하게 제시되지 못하였다. 이런 한계 손상기준을 명확하게 제시하기 위하여 Wu 등(1999)은 fuzzy-random 확률개념을 적용하였다.

이 연구는 디커플링장전 조건에서 발생하는 가스압력 산정식을 이론적으로 유도하였고 가스압력에 가장 크게 영향을 미치는 요소를 찾기 위하여 매개변수 분석을 시행하였다. 디커플링지수 별로 변화하는 단열지수의 특징을 분석하여 디커플링 지수별로 가스압력을 산출하는 산정식을 제안하였다. 가스압력의 파형을 여러 형태별로 분석하여 디커플링장전 조건에 적합한 가스압력 파형을 제안하였다. 가스압력이 발파공벽을 투과하여 암반에 전달된 발파압력식을 탄성파 이론을 적용하여 유도하였다. 디커플링발파에서 사용되는 KINEX-1 화약특성시험 결과로부터 폭굉파속도, 화약밀도의 확률분포를 산출하고 서울지역 흑운모 화강암특성시험 결과로부터 탄성파속도, 암반밀도의 확률분포를 산출하였다. 화약과 암반특성치의 확률분포를 적용하여 발파압력의 불확정성 분석을 시행하였다. 터널 굴착면 주변의 암반손상을 평가하기 위하여 연속체 손상역학을 적용하였으며 한계 손상계수의 기준설정에 대한 모호성을 합리적으로 고려하기 위하여 fuzzy-random 확률을 적용하였다. 이런 손상평가 모델을 부 프로그램으로 작성하고 ABAQUS와 연결하여 동적해석이 가능하도록 하였다. 가스압력의 확률분포를 적용하여 여굴의 불확정성을 분석하였다. 또한 수치해석결과를 분석하여 여굴 방지방안을 제안하였다. 발파공벽에 작용하는 가스압력을 이 연구에서 폭발가스압력으로 정의하였다.

2. 디커플링장전 조건의 폭발가스압력

2.1 최대 압력

디커플링장전 조건에서 화약이 폭발하는 경우 가스 압력은 발파공 체적만큼 팽창되어 발파공벽에 전달된

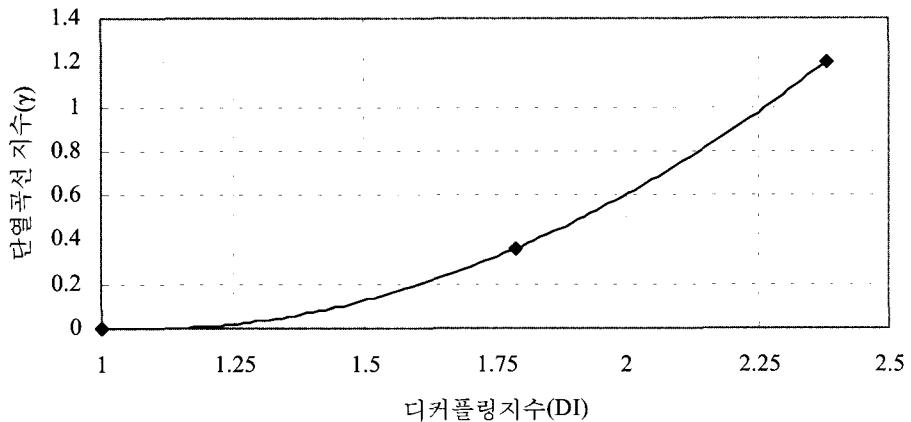


그림 1. 디커플링지수에 따른 단열곡선지수의 변화($\gamma \leq 2.38$)

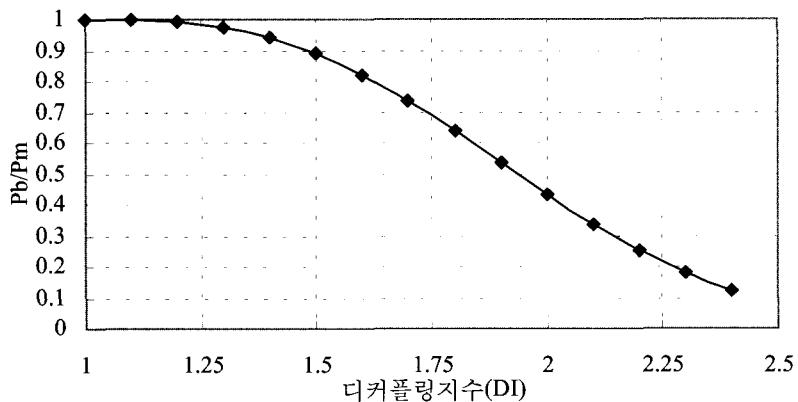


그림 2. 디커플링지수와 p_b/p_m 의 관계

다. 가스압력의 팽창과정을 의사정적(quasi-static)으로 가정하면 이상기체 상태방정식을 적용할 수 있다. 가스 압력의 팽창과정을 이상기체 단열팽창이라고 가정하면 엔트로피 변화가 없고 식 (1)과 같이 단열지수(adiabatic exponent) γ 가 일정하다고 가정된다. 식 (1)에서, p , V 는 기체의 압력, 체적이다. 따라서 화약 폭발 초기의 가스 압력과 빌파공벽에 작용하는 폭발가스압력의 관계에 식 (2), (3)과 같이 이상기체 상태방정식이 적용된다. 식 (2)에서, p_b , V_b , p_m , V_e 는 각각 폭발가스 최대압력, 빌파공 체적, 화약 폭발 초기 가스압력, 화약체적을 나타낸다. 또한 식 (3)에서, L_e , r_b , L_e , r_e 는 각각 빌파공의 길이와 반경, 장전화약의 길이와 반경이다. 화약 폭발 초기 가스압력은 많은 시험결과로부터 근사적으로 식 (4)와 같이 제안된다(Henrych, 1979). 식 (4)에서 p_D , γ_{CJ} , ρ_0 , D 는 각각 화약의 폭발압력, Chapman-Jouguet면의 단열지수, 밀도, 폭발파 속도이다.

$$\gamma = - \left(\frac{\partial \ln p}{\partial \ln V} \right)_S = \text{constant}, \quad pV^\gamma = \text{constant} \quad (1)$$

$$p_b V_b^\gamma = p_m V_e^\gamma \quad (2)$$

$$p_b = p_m \left(\sqrt{\frac{L_e}{L_b}} \cdot \frac{r_e}{r_b} \right)^{2\gamma} \quad (3)$$

$$p_m = \frac{1}{2} p_D = \frac{1}{\gamma_{CJ} + 1} \rho_0 D^2 \quad (4)$$

많은 시험결과에 의하면 체적팽창 정도가 크지 않는 경우, 단열지수는 일정하지 않고 체적비에 따라 변화한다고 알려져 있다. 일반적으로 체적팽창이 매우 큰 경우, 단열지수는 1.2~1.3에 수렴한다(Nie, 1999). Nie (1999)는 디커플링지수, DI가 2.38이상인 경우 단열지수를 1.2로 제안하였다. 디커플링지수는 빌파공직경과 화약직경의 비이다. 하지만 디커플링지수가 작은 경우 ($DI \leq 2.38$) 체적변화에 따른 단열지수는 변화한다. Nie (1999)의 실험결과를 분석하여 디커플링지수와 단열지수의 관계식을 구하면 식 (5)와 그림 1과 같다. 식 (5)를

식 (3)에 대입하여 p_b/p_m 과 디커플링지수의 관계를 구하면 그림 2와 같다. 디커플링지수가 1.5보다 작으면 폭광압력의 90% 이상이 발파공벽에 전달된다. 이는 화약과 발파공벽 사이가 너무 좁아서 충격파 압력과 가스압력이 복합적으로 작용하는 것으로 생각된다.

$$\gamma = 0.7015(DI)^2 - 1.5014(DI) + 0.7999 \quad (5)$$

발파공벽에 작용하는 폭발가스압력은 경계면인 발파공벽을 투과하여 암반에 전파된다. 이 전파과정에 탄성파 이론을 적용하면 폭발가스압력으로부터 암반에 전파된 발파압력을 식 (6)과 같이 산출할 수 있다. 식 (6)에서, $p_x, \rho_r, c_r, \rho_{gas}$ 는 각각 발파압력, 암반밀도, 암반 탄성파속도, 폭발가스 밀도이다. 식 (3), (5), (6)으로부터 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$p_x = \frac{2\rho_r c_r}{\rho_r c_r + \rho_{gas} D} \cdot p_b \quad (6)$$

$$p_x = \frac{\rho_r c_r}{\rho_r c_r + \rho_e D} \cdot \frac{1}{\gamma_{CJ} + 1} \rho_0 D^2 \cdot \left(\sqrt{\frac{L_a}{L_b}} \frac{r_e}{r_b} \right)^{2\gamma} \quad (7.a)$$

$$\gamma = \begin{cases} 0.7015(DI)^2 - 1.5014(DI) + 0.7999 & (DI \leq 2.4) \\ 1.2 & (DI > 2.4) \end{cases} \quad (7.b)$$

2.2 최대압력 도달시간

발파공벽에 작용하는 폭발가스압력은 일정시간이 경과해야 최대압력에 도달한다. 폭발가스압력이 발파공벽에 전달되는 과정은 그림 3과 같다. 화약이 폭발하면 먼저 발생하는 폭광파가 공기총을 통과하여 발파공벽에 전달된다. 폭광파는 임피던스(impedance)가 작은 공기총을 투과하면서 크기가 크게 감소하여 폭광파 후에 발생하는 가스압력보다 작아진다. 가스압력은 폭발후 일정시간이 경과하면 최대압력에 도달하고 이 시간이 최대압력 도달시간이다. 따라서 최대압력은 폭발가스압력 전면(wave front of explosion gas pressure)보다 약간 안쪽에서 발생하고 최대압력의 등압선을 그림 3과 같이 가정할 수 있다. 그림 3의 A점에서 최대압력에 도달하고 최대압력이 도달하는 시간은 팽창가스의 입자속도를 구하여 산출할 수 있다. 화약의 폭광속도는 폭발가스 압력의 팽창속도보다 매우 빠르므로 화약이 거의 동시에 기폭된다고 가정할 수 있다. 폭발가스 압력 팽창과정은 1차원 흐름으로 가정할 수 있고 압력과 입자속도 관계는 식 (8)과 같다. 식 (8)에서 $\rho_{gas}, c_{gas}, u_{gas}$ 는 각각 폭발가스의 밀도, 전파속도, 입자속도이다. 압력과 전파속

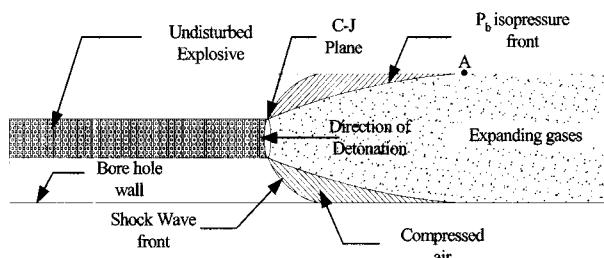


그림 3. 디커플링 발파시의 발파공내 모식도

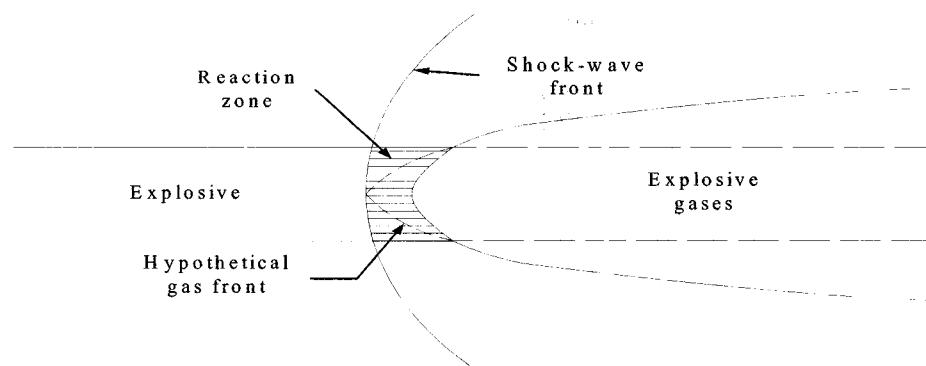


그림 4. 발파시 화학반응구간 근처의 모식도

도는 폭평파가 지나간 직 후로 폭평파의 전파속도와 같다고 가정하면 식 (9)와 같다(Jiang and Rogers, 1990).

$$p_b = \rho_{gas} c_{gas} u_{gas} \quad (8)$$

$$c_{gas} = \frac{\gamma_{CJ}}{\gamma_{CJ} + 1} D \quad (9)$$

그림 4와 같이 발파공벽에 전달되는 압력파는 폭평파와 가스압력파가 동시에 도달되지 않고 도달시차가 있다. 폭평파와 가스압력의 시차구간이 화학반응구간(reaction zone)이다. 폭평파가 발생됨과 동시에 화약 중심에서 가스압력이 발생되어 팽창한다고 가정하면 디커플링장전 조건의 최대압력 도달시간 t_R 은 식 (10)과 같이 구할 수 있다. d 는 발파공 중심에서 발파공벽까지의 거리이다.

$$t_R = \frac{d}{u_{gas}} - \frac{d}{D} \quad (10)$$

2.3 폭발가스 압력파형

폭발가스압력파는 최대압력, 최대압력 도달시간, 파형(wave-shape)에 의하여 결정된다. 파형은 시간변화에 따른 변형률 변화율을 변화시켜서 암반의 동적 거동에 크게 영향을 미친다. 따라서 다양한 파형을 입력하여 수치해석을 시행하고 그림 5와 같이 현장에서 측정한 파형과 비교하여 적합한 파형을 분석하였다. 수치해석에 사용된 프로그램은 ABAQUS/Explicit이며 분석에 사용

된 파형은 표 1과 같다. Farsangi(1999)는 지수함수의 파형 함수(wave-shape function)로 식 (11)을 제안하였다. 식 (11)에서 α 는 계수로서 낮은 폭평파 속도의 화약은 1.1, 높은 폭평파 속도의 화약은 1.0을 적용한다.

$$f(t) = \left(\frac{t}{t_R} \right)^\alpha \cdot e^{-\frac{t_R-t}{t_R}} \quad (11)$$

수치해석을 시행한 결과, 지수함수 파형을 입력하였을 때 실측된 응력파의 압축부분과 유사하게 나타났고 선형지속함수 파형을 입력하였을 때 실측된 인장부분과 유사하게 나타났다. 따라서 지수함수 파형으로 증가된 폭발가스압력이 최대압력에 도달한 후 일정시간 지속되면 실제 암반거동과 유사한 결과를 얻을 수 있다고

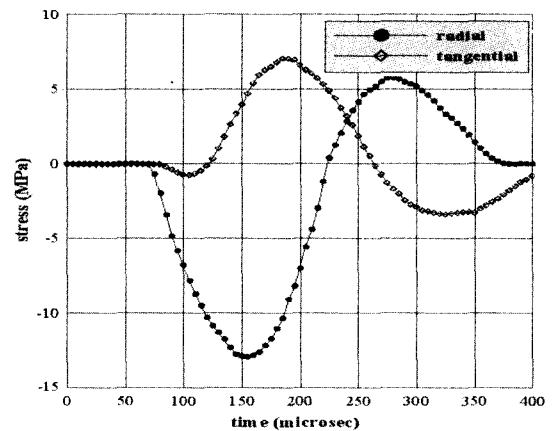
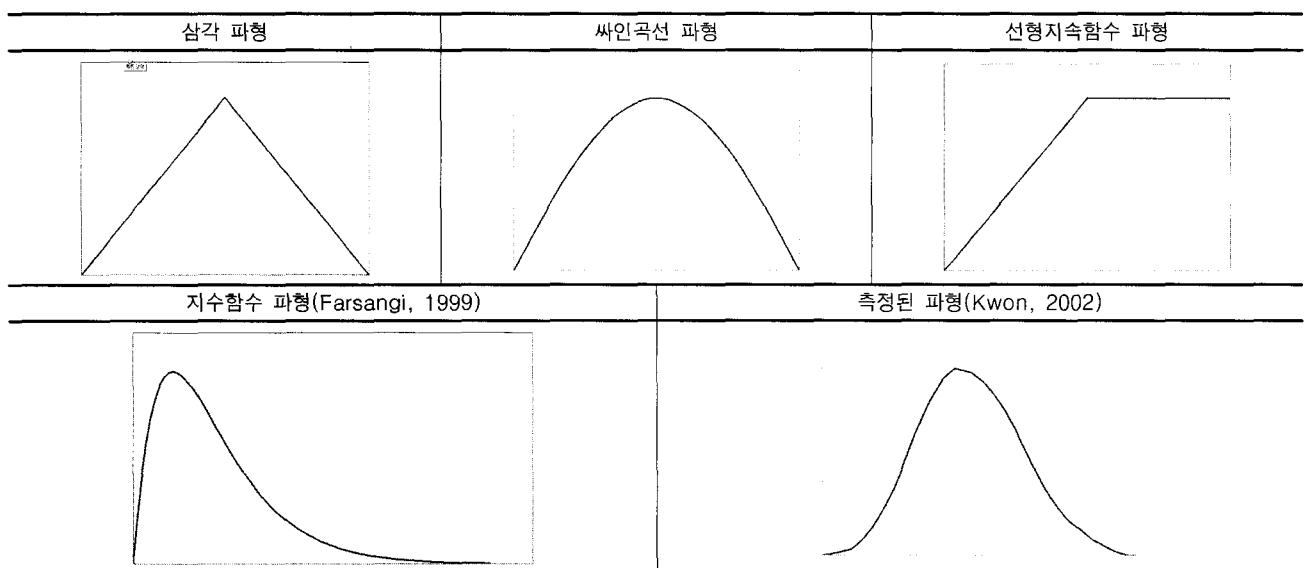


그림 5. 현장발파시험에서 측정된 응력파형

표 1. 다양한 파형의 종류



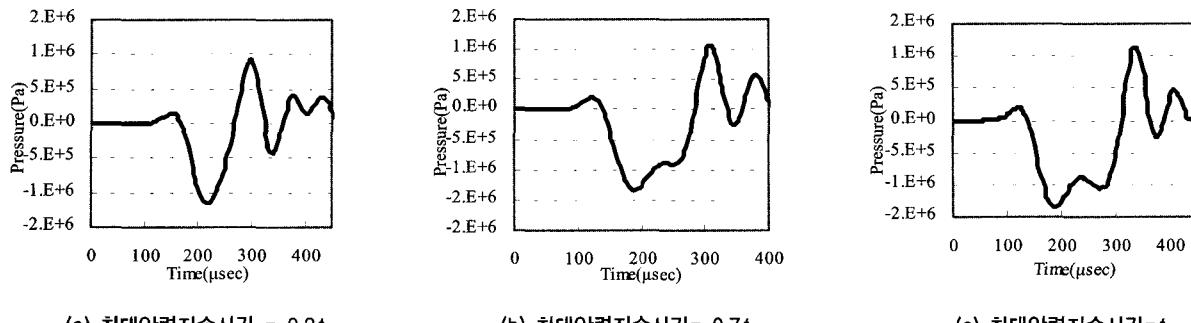


그림 6. 최대압력 지속시간에 따른 반경방향응력

표 2. 화약과 암반 특성치

구 분	암반 밀도(g/cm ³)	탄성파 속도(m/s)	단열지수의 모델수정계수(K)	화약 밀도(g/cm ³)	폭광파속도(m/s)
기준값	2.6	4000	0.987	1.13	4000

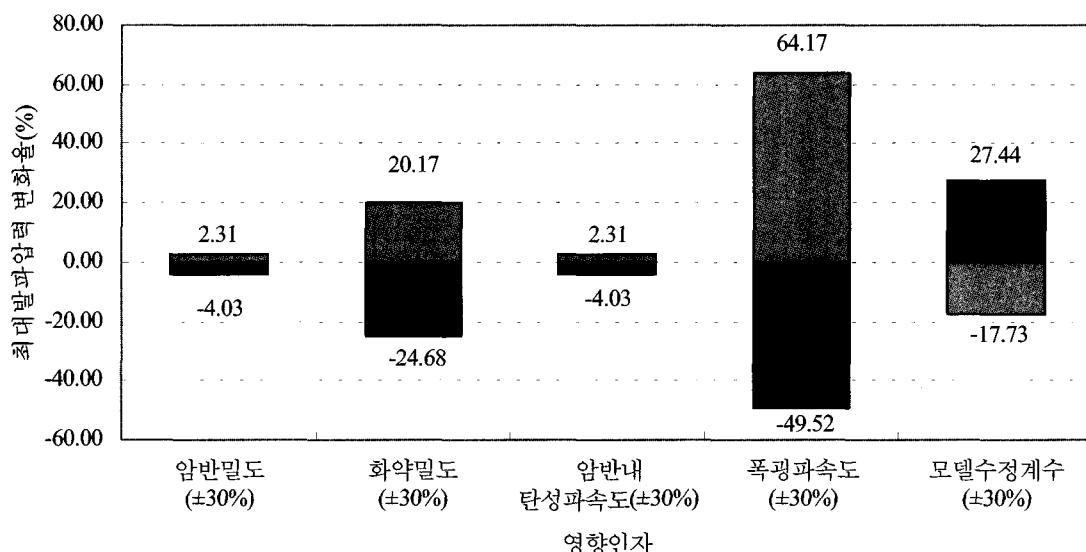


그림 7. 최대압력의 매개변수 분석결과

판단된다. 최대압력의 지속시간을 변화시키면서 수치해석을 시행한 결과 최대압력 도달시간의 30%정도 지속이 될 때 그림 6과 같이 실제 암반거동과 유사한 결과를 얻는 것으로 판단되었다. 따라서 디커플링장전 조건에서 시간에 따른 폭발가스압력파를 식 (12)와 같이 제안하였다.

$$p(t) = \begin{cases} p_{\max} \left(\frac{t}{t_R} \right)^{\alpha} \cdot e^{-\frac{t-t_R}{t_R}} & (t \leq t_R) \\ p_{\max} & (t_R < t < 1.3t_R) \end{cases} \quad (12)$$

3. 폭발가스 압력에 대한 확률 분석

3.1 매개변수 분석

3.1.1 최대압력의 매개변수분석

디커플링장전 조건에서 암반에 전달된 발파압력은 식 (7)과 같이 화약의 밀도, 폭광파 속도, 단열지수와 암반의 밀도, 탄성파 속도의 함수이다. 단열지수 추정식의 불확정성은 Park 등(2003)의 연구결과를 이용하여 단열지수의 모델수정계수의 함수로 나타내었다. 매개변수 분석에 적용된 화약과 암반 특성치는 표 2와 같다. 각 변수의 변화범위를 30%로 하였다.

매개변수 분석결과는 그림 7과 같다. 화약 특성치가

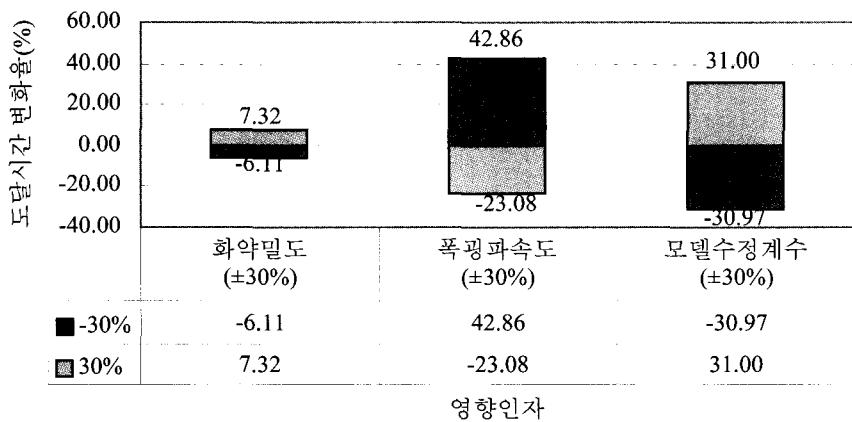


그림 8. 최대압력 도달시간의 매개변수 분석결과

표 3. KINEX-1화약의 폭광파 속도와 밀도 측정 실험결과

폭광파 속도(30회)	밀도(30회)
1.118, 1.121, 1.121, 1.123, 1.123, 1.124, 1.124 1.125, 1.125, 1.126, 1.127, 1.127, 1.127, 1.128, 1.128 1.128, 1.129, 1.129, 1.129, 1.130, 1.130, 1.131, 1.131 1.131, 1.132, 1.133, 1.133, 1.127, 1.135	4088, 4100, 4110, 4113, 4122, 4136, 4136, 4142, 4146 4148, 4152, 4154, 4156, 4157, 4157, 4158, 4159, 4159 4164, 4166, 4174, 4174, 4177, 4180, 4181, 4181, 4187 4187, 4196, 4197

암반 특성치보다 최대압력에 더 크게 영향을 미쳤다. 폭광파 속도, 화약밀도, 단열지수의 모델수정계수, 암반밀도, 탄성파 속도 순으로 최대압력에 가장 크게 영향을 미쳤다.

3.1.2 최대압력 도달시간의 매개변수분석

최대압력 도달시간은 식 (10)과 같이 폭광파 속도, 화약밀도, 단열지수, 발파공 직경의 함수이다. 발파공 직경은 일정하므로 매개변수 분석에서 제외한다. 매개변수 분석에 적용된 화약 특성치는 표 3과 같다. 각 변수의 변화범위를 30%로 하였다. 매개변수 분석결과는 그림 8과 같다. 폭광파 속도가 최대압력 도달시간에 가장 크게 영향을 미쳤다. 폭광파 속도가 증가하면 최대압력 도달시간은 짧아지고 최대압력은 커진다.

3.2 화약과 암반 특성치의 확률분포

3.2.1 화약 특성치의 확률분포

화약은 KINEX-1화약을 적용하였고 화약 특성치는 화약밀도, 폭광파 속도시험을 시행하여 확률분포를 산출하였다. 폭광파 속도측정은 VMO122 측정기(Instantel Inc, 1998)를 사용하였고 Dautriche법을 이용한 Timber 방식으로 시험하였다. 이 방법은 그림 9와 같이 두 지점

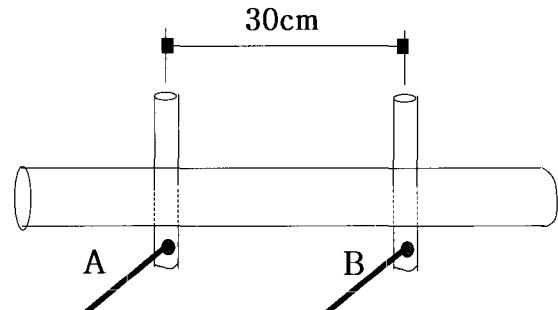
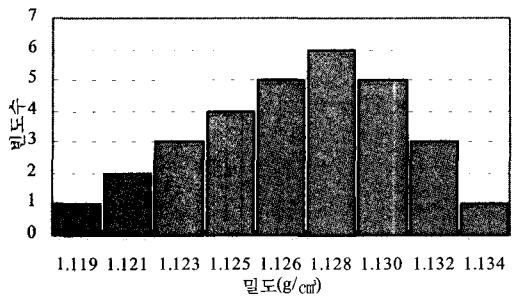


그림 9. 폭광파 속도 측정원리

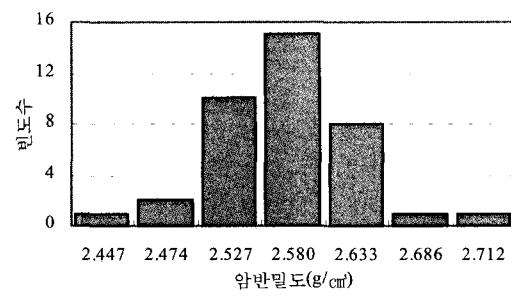
의 폭광 반응시간의 차이를 측정하고 폭광파 속도를 산출하는 방식이다. 화약밀도는 화약의 부피와 무게를 측정하여 산출하였다. 화약밀도와 폭광파 속도의 시험결과는 표 3과 같고 확률분포는 그림 10과 같이 정규분포와 유사하게 나타났다. 화약밀도의 평균, 변동계수(coefficient of variation)는 $1.127g/cm^3$, 0.003이고 폭광파 속도의 평균, 변동계수(coefficient of variation)는 $4155m/sec$, 0.007이었다. 산업용 화약 특성치의 변동계수는 변동성이 매우 낮게 나타났다.

3.2.2 암반 특성치의 확률분포

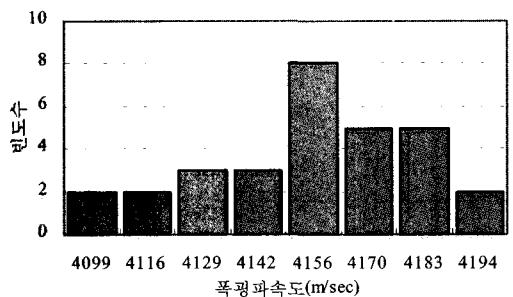
서울지역의 흑운모 화강암에 대한 암석시험 결과(Kim, 1993)로부터 암반밀도, 탄성파속도의 확률분포는



(a) 화약밀도의 분포

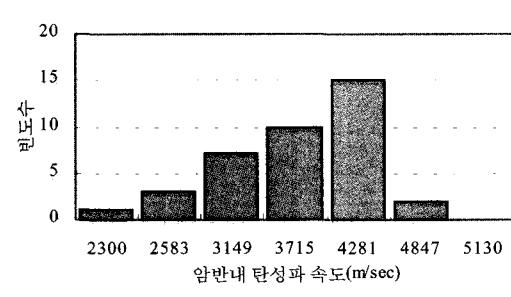


(a) 암반밀도의 분포



(b) 폭광파속도의 분포

그림 10. 화약 특성치의 확률분포



(b) 탄성파속도의 분포

그림 11. 암반 특성치의 확률분포

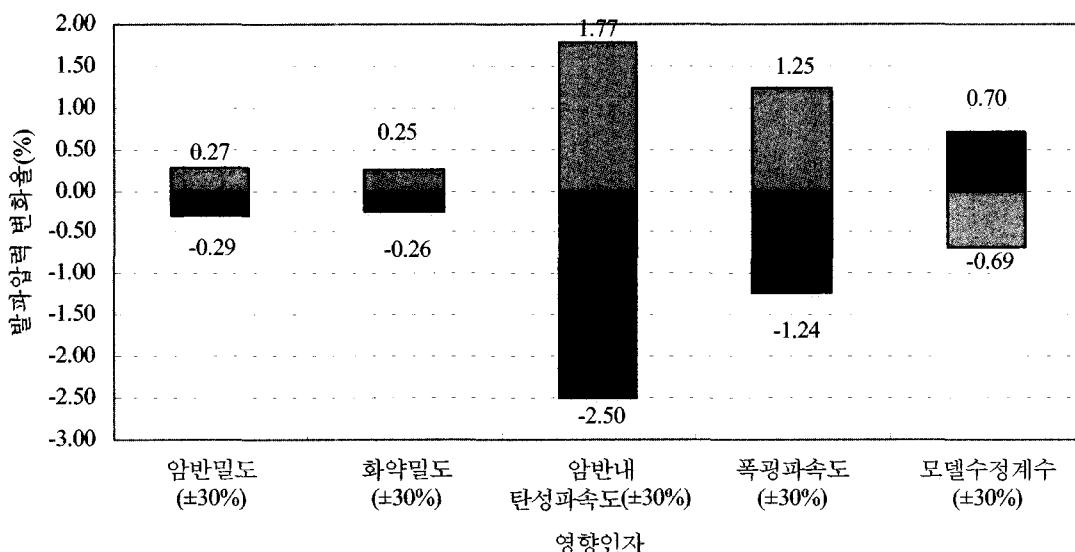


그림 12. 최대압력의 불확정성 분석결과

그림 11과 같다. 암반 밀도는 $2.579 g/cm^3$, 0.026이고 탄성파속도의 평균, 변동계수는 $3716 m/sec$, 0.191 이었다. 암반 특성치의 변동성이 화약 특성치보다 매우 크게 나타났다. 이는 암반이 자연에서 생성된 특징을 반영하고 있다. 암반 특성치의 확률분포는 정규분포와 유사하게 나타났다.

3.3 폭발가스 압력의 확률 분포

화약과 암반 특성치의 확률분포를 식 (7)에 대입하고 Rosenblueth's point estimate method(Rosenblueth, 1981)를 이용하여 폭발가스 압력의 확률분포를 표 4와 같이 산출하였다. 발파 최대압력과 최대압력 도달시간의 불확정성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 불확정성 분

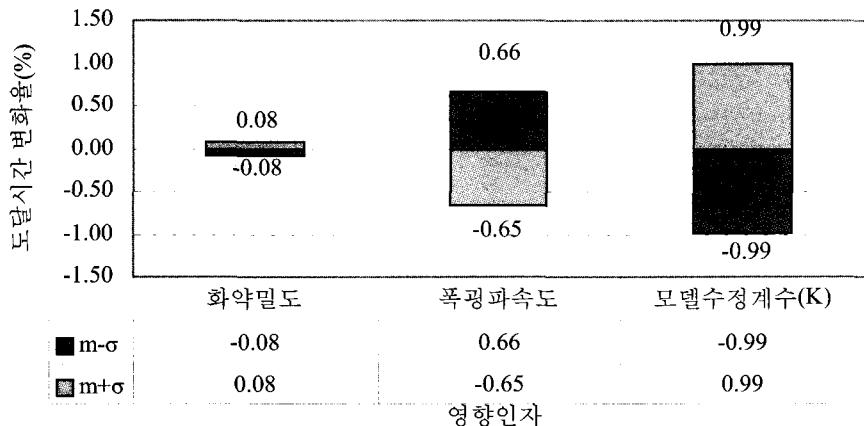


그림 13. 최대압력 도달시간의 불화정성 분석결과

표 4. 폭발가스압력의 확률분포(KINEX-1, DI=2.6, 화강암)

구 분	$m-\sigma$	m	$m+\sigma$
최대 압력(Mpa)	484.40	494.06	503.76
최대압력 도달시간(μsec)	167.42	165.44	163.46

석을 시행하였다. 불화정성 분석결과는 그림 12, 13과 같다. 탄성파 속도의 불화정성이 최대압력의 불화정성에 가장 크게 영향을 미쳤다. 이는 자연암반의 변동성이 인공화약의 변동성보다 더 크기 때문이다. 최대압력 도달시간의 불화정성은 단열지수의 모델수정계수가 가장 크게 영향을 미쳤다. 따라서 단열지수 추정식은 특정식을 사용하기보다 사용된 화약이나 장전조건에 따라서 알맞은 가중치를 주어 주관적 견해(subjective opinion) 개념으로 산출하는 것이 합리적이며 최대압력 도달시간의 불화정성을 감소시키기 위해서는 추가적인 연구를 수행하여 단열지수 추정식의 불화정성을 감소시키는 것이 요구된다.

4. 발파로 인한 암반손상의 확률론적 접근

4.1 초기손상을 고려한 연속체 손상역학

자연 암반은 흠집(flaws), 절리, 약면 등 불연속면이 network 형태로 존재한다. 이런 불연속면(discontinuity)을 초기손상으로 정의한다. 초기손상이 없는 암반은 불연속면이 없는 신선암(intact rock)으로 정의한다. 암반의 초기손상은 암반강성을 식 (13)과 같이 감소시킨다. 식 (13)에서, D_0 는 초기 손상계수이고, E_0 , G_0 는 손상 없는 암반의 탄성계수, 전단계수이다.

$$E_d = E_0(1 - D_0), \quad G_d = G_0(1 - D_0) \quad (13)$$

초기손상이 있는 암반에 발파압력 같은 동적 하중이 작용하면 초기손상으로부터 균열이 시작되거나 발전하게 된다. 발파압력에 의한 암반손상은 연속체 손상역학(continuum damage mechanics)을 적용하여 분석할 수 있다(Wu 등, 2003). 암반은 등방성 재료로 가정한다. 발파압력에 의해 단위체적당 발생하는 균열밀도 C_d 는 식 (14)와 같이 등가인장변형률 ε 과 손상누적시간 t , 한계 인장변형률 ε_{cr} 의 함수로 나타난다. 식 (15)에서 $\langle \cdot \rangle$ 표기는 변형률이 인장인 경우 유효하고 압축이면 0(zero)이다. 이 식에서 α 와 β 는 재료상수이다

$$C_d = \alpha(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_{cr})^\beta t \quad (14)$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\langle \varepsilon_i \rangle)^2} \quad (15)$$

동적하중에 의하여 암반이 손상된 정도는 식 (16)과 같이 손상계수(damage variable)를 이용하여 파괴확률로 나타낼 수 있다(Liu 등, 1997). 발파압력이 작용하여 발생하는 인장변형률이 한계인장변형률을 초과하면 암반손상이 발생하고 초과하지 않으면 초기손상만이 존재한다. 초기손상과 동적하중에 의한 손상을 고려하면 암반 강성계수는 식 (17)과 같이 감소한다.

$$D_e = 1 - e^{-C_d V_0} \quad (16)$$

$$E_d = E_0(1 - D_0)(1 - D_o), G_d = G_0(1 - D_0)(1 - D_o) \quad (17)$$

4.2 Fuzzy-random 확률이론

연속체 손상역학에서 암반이 파쇄되는 기준은 식 (18)과 같이 손상계수가 한계손상계수 D_c 를 초과하면 발생한다. 한계손상계수 값은 여러 가지 인자들에 의해 결정되며 학자들마다 주관적으로 적용하고 있다. 따라서 한계손상계수 값을 일률적으로 정의하는 것은 매우 어렵다. 많은 학자들이 제안한 한계손상계수 값의 범위는 0.2~0.693로 크게 편차를 나타낸다. 그러므로 파쇄의 경계인 한계손상계수 값에 확률적으로 변이영역 (transition zone)을 정의하는 것이 논리적이다. 한계손상계수 값은 fuzzy random 확률이론을 적용하여 산출할 수 있으며 fuzzy 영역의 상한선과 하한선은 식 (19), (20)과 같이 정의된다(Valliappan & Pham , 1993). 이들 식에서 D_L' , P , D_U' 는 한계손상계수의 최소값, 평균값, 최대값이다. $D \geq D_U'$ 인 경우는 파쇄확률이 100%이고 $\mu(D)=1$ 로 나타낸다. $\mu(D)$ 는 membership function이며 파쇄확률의 정도를 나타낸다. $D \leq D_L'$ 인 경우는 파쇄확률이 0%이고 $\mu(D)=0$ 로 나타낸다. $D_L' < D < D_U'$ 인 경우는 fuzzy 영역이고 $0 < \mu(D) < 1$ 이다. fuzzy 영역 내 파쇄확률은 membership function에 따라서 분포한다. 이를 이용하여 fuzzy 파쇄확률은 식 (21)과 같이 정의된다 (Zhao and Wang, 1995). 이 식에서 $f_D(D)$ 는 손상계수의 확률밀도함수이다.

$$D \geq D_c \quad (18)$$

$$D_L' = \begin{cases} P - 2(P - D_L') & P > 2(P - D_L') \\ 0 & P \leq 2(P - D_L') \end{cases} \quad (19)$$

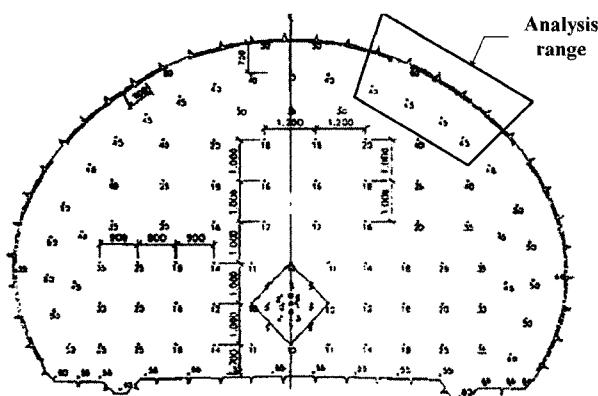


그림 14. 해석영역과 유한요소 메쉬망

$$D_U' = \begin{cases} P + 2(P - D_L') & P + 2(P - D_L') < 1 \\ 1 & P + 2(P - D_L') \geq 1 \end{cases} \quad (20)$$

$$P_f = P(D \geq D_c) = \int \mu(D) f_D(D) dD \quad (21)$$

초기 암반손상의 확률분포는 베타분포(Beta distribution)를 따르는 것으로 알려져 있다(Wu 등, 1999). 따라서 손상계수의 확률분포를 베타분포로 가정한다. 베타분포는 식 (22)와 같이 정의된다. 식 (22)에서, $B(a,b)$ 는 베타함수이다. 베타함수의 평균과 분산은 식 (24)와 같다.

$$\mathcal{f}(D_0) = \frac{1}{B(a, b)} D_0^{a-1} (1 - D_0)^{b-1} \quad (22)$$

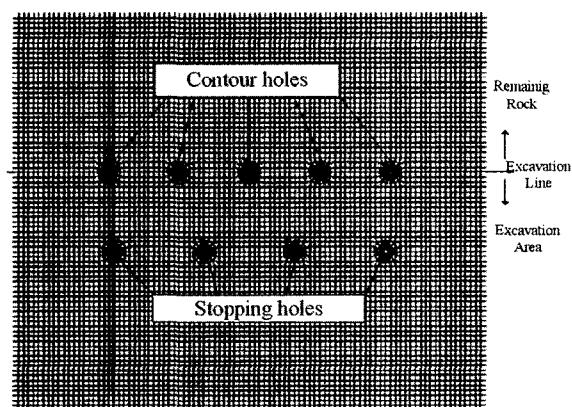
$$B(a, b) = \int_0^1 x^{a-1} (1 - x)^{b-1} dx \quad (23)$$

$$\mu(D_0) = \frac{a}{a+b}, \quad \delta^2(D_0) = \frac{ab}{(a+b)^2(a+b+1)} \quad (24)$$

5. 터널 발파굴착의 암반손상 분석

5.1 해석 모델링

터널 발파굴착에서 굴착선 주변 암반손상이 주 관심 대상이다. 굴착선 주변 암반손상은 외곽공(contour hole)과 인접한 확대공(stopping hole)의 발파압력에 의해 발생한다. 따라서 해석영역을 그림 14와 같이 선정하였다. 해석모델은 동적해석의 오차를 최소화 시키기 위하여 최대 메쉬크기는 5cm 이하로, 시간간격은 9 μsec이하로 작성하여 Valliappan과 Ang(1988)의 제안조건을 만족시켰다. 해석프로그램은 ABAQUS/Explicit를 이용하고 암반손상과 fuzzy-random 확률모델은 사용자 부프로그램 (user subroutine)을 별도로 작성하였다. 해석모델의 외



곽경계조건은 무한요소를 사용하여 경계부에서 발생하는 반사파를 없게 하였다. 확대공은 밀장전조건의 발파 압력을 적용하고 외곽공은 디커플링장전 조건을 적용하였다. 확대공과 외곽공 사이의 발파시차는 3ms를 적용하여 두 공의 응력파 중첩은 발생하지 않았다.

5.2 입력자료

5.2.1 초기 암반손상과 한계인장변형률

초기 암반손상은 탄성파속도 시험결과를 이용하여 식 (25), (26)을 이용하여 산출하였다. 이들 식에서 \bar{E}

E_0 는 각각 손상된 암과 손상이 없는 암의 탄성계수이며, v_p , v_s , ρ 는 각각 암의 P파속도, S파속도, 밀도이다.

$$D_0 = 1 - \frac{\bar{E}}{E_0} \quad (25)$$

$$E = \rho v_s \cdot \frac{4v_s^2 - 3v_p^2}{v_s^2 - v_p^2} \quad (26)$$

서울지역 흑운모 화강암 시험결과로부터 초기 암반 손상의 평균, 변동계수는 0.398, 0.401이었다. 초기 암반 손상의 확률분포를 베타분포로 가정하면 상수 a , b 는 3.34, 5.06이다. 베타분포 가정은 Kolmogorov-Smirnov

표 5. 밀장전 발파압력의 확률분포

구 분	$m + \sigma$	m	$m - \sigma$
최대 압력(Gpa)	1.636	1.560	1.484
최대압력도달시간(μsec)	37	70	103

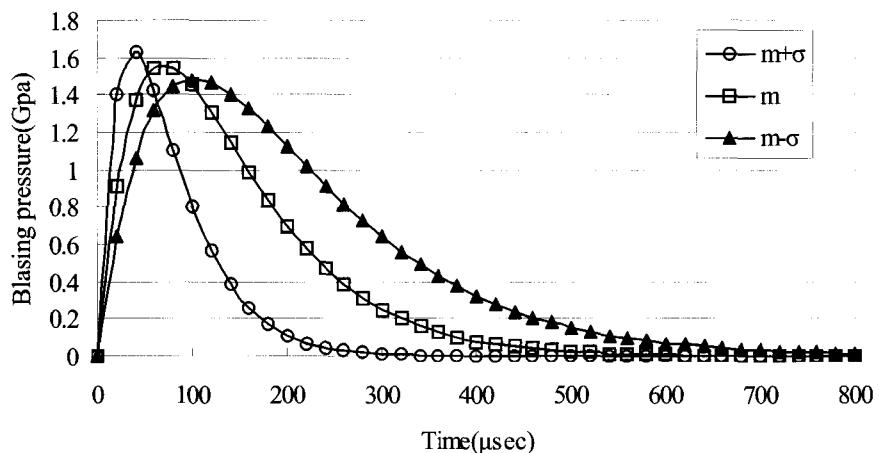


그림 15. 밀장전 발파하중의 확률분포

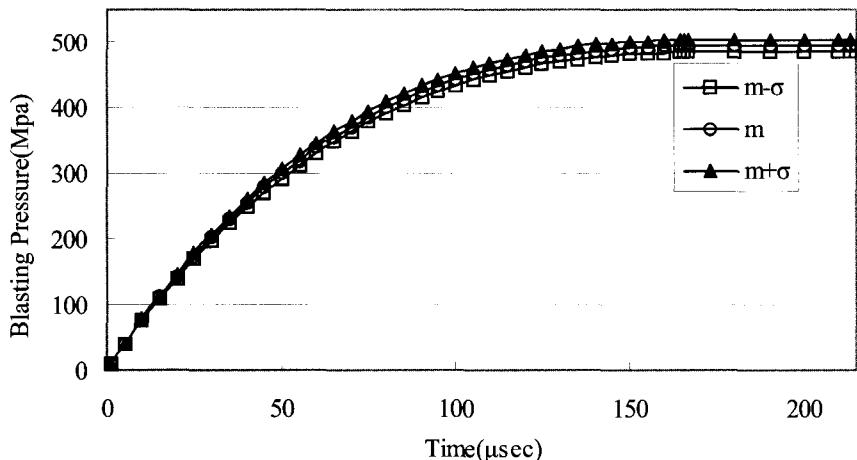


그림 16. 디커플링 발파하중의 확률분포

goodness-of-fit test를 시행하여 적합성을 검증하였다. 한계인장변형률은 일축인장시험을 시행하여 식 (27)과 같이 산출한다. σ_{st} 는 일축인장강도이다. 흑운모 화강암의 암석시험결과로부터 일축인장강도의 평균, 변동계수는 각각 9.025 MPa , 0.256 이고 탄성계수의 평균, 변동계수는 32.263 GPa , 0.392 이었다. 한계인장변형률의 확률분포는 Rosenblueth's point estimate method을 이용하여 산출하였다. 그 평균과 변동계수는 0.331×10^{-3} , 0.479 이었다. 재료상수 α , β 는 7.0×10^{10} , 2.0 를 적용하였다(Ma 등, 1998).

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_{st}}{E} \quad (27)$$

5.2.2 외곽공과 확대공의 발파압력

확대공은 밀장전조건에서 32mm emulsion화약을 사용하였고 발파압력은 Park 등(2003)의 연구결과를 인용

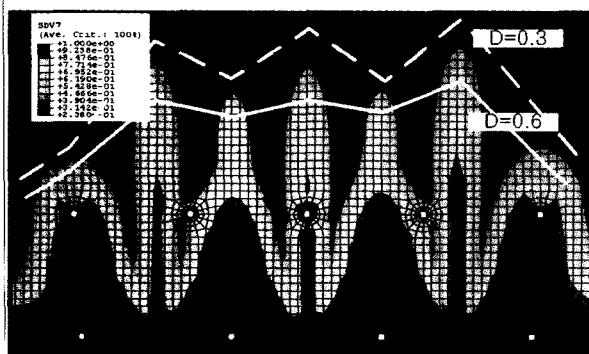
하여 표 5, 그림 15와 같이 적용하였다. 디커플링 장전 시 벌파압력은 표 4를 적용하였고 그림 16과 같다.

5.3 수치해석 결과

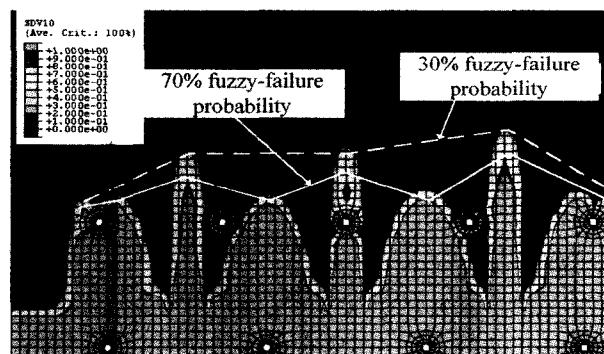
Fuzzy-random파쇄학률을 사용하면 그림 17과 같이 손상계수 등치선과 비교하여 파쇄영역의 경계인 굴착선이 뚜렷하게 나타나는 효과를 얻을 수 있었다. Fuzzy-random파쇄학률 70~100%구간은 등치선 간격이 좁고 집중되어서 fuzzy-random파쇄학률 70% 등치선을 굴착면으로 추정할 수 있었다. 손상계수 값이 0.5이 하인 영역은 fuzzy-random파쇄학률 20%이하로 파쇄학률이 거의 없는 영역으로 판단된다. 확대공 발파의 암반손상은 굴착선을 초과하여 크게 발생하였으나 외곽공 발파의 암반손상은 미미하였다. 외곽공 유무에 따른 굴착선 변화는 그림 18과 같이 1cm 이내로 거의 변화가 없었다. 따라서 발파굴착의 여굴은 외곽공에 인접한 확

표 6. 확대공 발파압력의 불확정성에 따른 여굴깊이 변화

주변공 하중	$m - \sigma$	m	$m + \sigma$
최대여굴깊이	25 cm	40 cm	55 cm

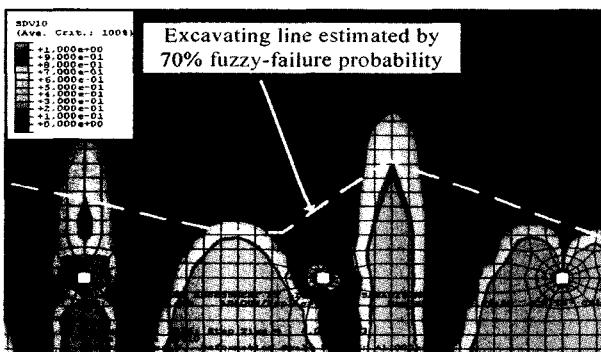


(a) 손상계수 등치선



(b) fuzzy-random파쇄학률 등치선

그림 17. fuzzy-random파쇄학률과 손상계수의 등치선



(a) 확대공만 발파한 경우

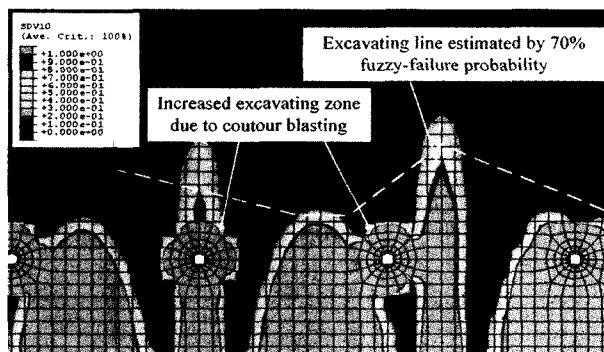


그림 18. 최외곽공 발파가 암반손상에 미치는 영향분석

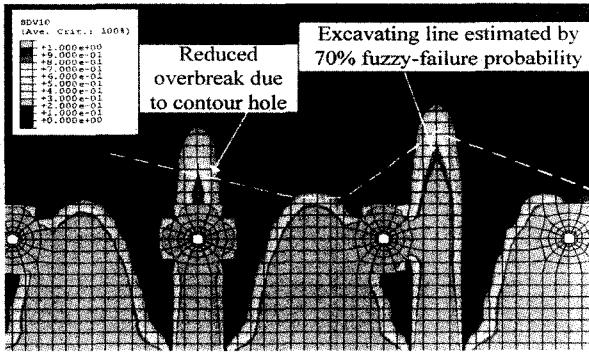


그림 19. 외곽공 위치의 영향

대공 발파로 인하여 발생되는 것으로 판단되었다. 실제 발파에서 여러 발파공이 동시에 기폭되고 수치해석결과 발파공 중심에서 응력파 중첩이 발생하였다. 확대공 사이의 중심에 외곽공이 위치되면 외곽공이 불연속면 역할을 하여 응력파 중첩효과가 그림 19와 같이 감소되는 것으로 해석되었다. 이런 감소로 인하여 굴착 깊이는 최대 15cm까지 감소되었다. 따라서 확대공의 응력파 중첩이 예상되는 위치에 외곽공을 배치하므로써 여굴감소 효과를 얻을 수 있다고 판단되었다.

발파압력의 불확정성이 여굴깊이에 미치는 영향을 평가하였다. 외곽공 발파압력의 불확정성이 작고 발파압력 크기도 작아서 암반손상에 미치는 영향이 거의 없었다. 확대공 발파압력의 불확정성은 굴착깊이에 직접적인 영향을 미쳤다. 불확정성으로 인하여 발생하는 최대 여굴깊이는 표 6과 같다. 최대 여굴깊이의 불확정성은 35cm로 크게 나타났다. 발파압력의 불확정성이 암반특성치의 불확정성으로 인하여 발생하므로 여굴을 감소시키기 위해선 암반특성치 선정을 적합하게 해야 한다.

6. 결 론

디커플링장전 조건에서 시간변화에 따른 폭발가스압력파를 화약과 암반 특성의 함수로 유도하였다. 또한 최대압력과 최대압력 도달시간에 대한 매개변수 분석과 불확정성 분석을 시행하였다. 산정된 폭발가스압력을 적용하여 터널 발파굴착의 암반손상을 수치해석으로 평가하였다. 연속체 손상역학을 이용한 암반손상 모델을 사용자 부프로그램으로 작성하여 ABAQUS/Explicit 주 프로그램과 연결하였다. 외곽공과 인접한 확대공이 여굴에 미치는 영향을 평가하고 여굴방지 방안을 제안하였다. 손상계수의 파쇄기준이 불명확하므로 fuzzy-random파쇄확률을 적용하여 파쇄기준을 명확하게 나타냈다. 이 연구 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 디커플링장전 조건의 폭발가스 최대압력은 화약의 밀도, 단열지수, 폭광파 속도와 암반의 밀도, 탄성파 속도의 함수로 유도되었다. 최대압력 도달시간은 화약의 밀도, 폭광파 속도, 디커플링지수, 발파공 직경의 함수로 유도되었다. 매개변수 분석결과, 폭광파 속도는 최대압력, 최대압력 도달시간에 가장 크게 영향을 미쳤다.
- (2) 폭발가스압력파의 파형에 대한 분석결과, 지수함수와 선형지속함수를 조합한 파형이 실제조건과 유사하였다. 가스압력으로 인한 최대압력 지속시간은 최대압력 도달시간의 30%정도가 적합한 것으로 추정되었다.
- (3) 공장에서 제조된 화약 특성상 불확정성이 크지 않았다. 화약보다 자연 암반특성의 불확정성이 커서 발파압력의 불확정성을 좌우하였다. 하지만 발파현장에서 장약조건에 따른 폭광파 속도, 밀도, 디커플링지수 변화가 상당하므로 장약조건의 불확정성이 미치는 영향이 클 것으로 추정된다. 따라서 향후 장약조건의 불확정성에 대한 연구가 필요하다.
- (4) Fuzzy-random파쇄확률의 등치선을 이용하여 파쇄경계를 결정하는 것이 손상계수의 등치선을 이용하는 것보다 매우 뚜렷하고 용이하였다. 따라서 파쇄경계는 fuzzy-random파쇄확률을 적용하는 것이 유용하다.
- (5) 설계단계에서 발파압력의 불확정성에 따른 여굴깊이의 불확정성을 감소시키기 위해선 암반 특성치를 적합하게 선정하여야 한다.
- (6) 확대공의 응력파가 중첩되는 위치에 외곽공을 배치함으로 여굴 깊이가 감소되었다. 따라서 외곽공의 위치를 적절하게 배치하므로써 여굴 깊이를 상당부분 감소시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 목적기초연구사업(과제번호:R01-2001-00475)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Barkley, T., Lee, R., and Rodgers, J. (2001), "A new detonating cord for reducing unwanted damage in controlled blasting", *Proceedings of Twenty-seventh Annual Conference on Explosive and Blasting Technique*, Orlando, Florida, pp.167-174.
2. Farsangi, M.A.E., Durucan, S., and Kunimatsu, S. (1999), "The effects of velocity of detonation of explosives on ground vibration in time and frequency domains", *Proceedings of The Sixth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Johannesburg, pp.203-206.
3. Henrych, J. (1979), The dynamics of explosion and its use, Elsevier Scientific Company.
4. Instantel Inc. (1998), VOD mate operator manual, Ontario, Canada.
5. Jiang, L. and Rogers, R. J. (1990), "Effects of spatial discretization of dispersion and spurious oscillations in elastic wave propagation", *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, 29, pp.1205-1218.
6. Kim, J.B.(1993), "Mechanical property of rock", *Korea Geotechnical Engineering*, Vol.9, No.4, pp.119-132.
7. Kwon, J.W. (2001), Experimental approach on estimation of damage zone due to blast loading, MS. Thesis, Korea University.
8. Liu, L. and Katsabanis, P.D. (1997), "Development of a continuum damage model for blasting analysis", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol.34, No.2, pp.217-231.
9. Ma, G., Hao, H., and Zhou, Y.X. (1998), "Modeling of wave propagation induced by underground explosion", *Journal of Computers and Geotechnics*, 22(3/4), pp.283-303
10. Nie, S (1999), "Measurement of borehole pressure history in blast holes in rock blocks", *Sixth International symposium for rock fragmentation by blasting*, pp.91-98.
11. Park, B.K., Lee, I.M., and Kim, D.H. (2003), "Probabilistic estimation of fully coupled blasting pressure transmitted to rock mass I", *Tunnelling Technology*, Vol.5, No.4, pp.337-348.
12. Park, B.K., Lee, I.M., and Kim, D.H. (2003), "Probabilistic estimation of fully coupled blasting pressure transmitted to rock mass II", *Tunnelling Technology*, submitted.
13. Pusch, R. and Stanfors, R. (1993), "Disturbance of rock around blasted tunnels", *Proceedings of The Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Vienna, pp. 153-160.
14. Rosenblueth, E. (1981), "Two-point estimates in probability", *Appl Mathematical Modelling*, pp.329-335.
15. Rustan, P.A. (1996), "Micro-sequential contour blasting-theoretical and empirical approaches", *Proceedings of The Fifth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Montreal, Quebec, pp.157-166.
16. Valliappan, S. and Ang, K. K. (1988), "Finite element analysis of vibration induced by propagating waves generated by tunnel blasting", *Rock Mech. Rock Eng.*, pp.53-78.
17. Vallappan, S. and Pham, T.D. (1993), "Fuzzy finite element analysis of a foundation on an elastic soil medium", *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, Vol.17, pp.771-789
18. Wu, C., Hao, H., and Zhai, Y. (1999), "Fuzzy-random probabilistic analysis of rock mass responses to explosive loads", *Computers and Geotechnics* 25, pp.205-22
19. Wu, C. , Hao, H., and Zhai, Y. (2003), "Distinctive and fuzzy probability analysis of an anisotropic rock mass to explosion load", *Int. J. Numer. Meth. Engng* 56, pp.767-785.
20. Zhao, G., Li, Y., and Wang, H. (1995), "Application of fuzzy-random probability theory to structural reliability", *Application of Statistics and Probability*. Rotterdam, Balkema, pp.753-755

(접수일자 2004. 3. 17, 심사완료일 2004. 5. 17)