

암반에 전달된 밀장전 발파압력의 확률론적 예측 I - 최대 발파압력 예측을 중심으로 -

Probabilistic estimation of fully coupled blasting pressure transmitted to rock mass I - Estimation of peak blasting pressure -

박봉기*¹ 이인모², 김동현³

Park, Bong-Ki · Lee, In-Mo · Kim, Dong-Hyun

Abstract

The propagation mechanism of a detonation pressure with fully coupled charge is clarified and the blasting pressure propagated in rock mass is derived from the application of shock wave theory. The blasting pressure was a function of detonation velocity, isentropic exponent, explosive density, Hugoniot parameters, and rock density. Probabilistic distribution is obtained by using explosion tests on emulsion and rock property tests on granite in Seoul and then the probabilistic distribution of the blasting pressure is derived from the above mentioned properties. The probabilistic distributions of explosive properties and rock properties show a normal distribution so that the blasting pressure propagated in rock can be also regarded as a normal distribution. Parametric analysis was performed to pinpoint the most influential parameter that affects the blasting pressure and it was found that the detonation velocity is the most sensitive parameter. Moreover, uncertainty analysis was performed to figure out the effect of each parameter uncertainty on the uncertainty of blasting pressure. Its result showed that uncertainty of natural rock properties constitutes the main portion of blasting pressure uncertainty rather than that of explosive properties. In other words, since rock property uncertainty is much larger than detonation velocity uncertainty the blasting pressure uncertainty is more influenced by the former than by the latter even though the detonation velocity is found to be the most influencing parameter on the blasting pressure.

Keywords: Blasting pressure, shock wave theory, explosive and rock property

요 지

밀장전한 암반 발파공에서 화약 폭발시 발생하는 고압의 폭굉압력 전파메카니즘을 충격파 이론을 적용하여 규명하고 전달된 발파압력 산정식을 유도하였다. 유도된 발파압력 산정식은 폭굉파속도, 단열지수, 화약밀도, Hugoniot 상수, 암반밀도의 함수였다. 에멀전 화약과 서울 화강암의 특성시험을 시행하여 각 특성치의 확률분포

*1 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 (parkbongki@hotmail.com)

2 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

3 정회원, 삼보기술단 지반공학부 이사

를 정의하고 발파압력 산정식에 적용하여 발파압력의 확률분포를 산출하였다. 화약 특성치와 암반 특성치의 확률분포는 정규분포를 나타냈으며 따라서 발파압력의 확률분포도 정규분포로 추정되었다. 발파압력에 대한 매개변수분석을 시행한 결과 폭굉파속도가 발파압력에 가장 크게 영향을 미쳤다. 또한 이런 특성치의 불확실성이 발파압력의 불확실성에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과 암반특성치의 불확실성이 화약특성치보다 더 크게 영향을 미쳤다. 비록 매개변수분석에서 폭굉파속도가 발파압력에 가장 크게 영향을 미치는 요소이지만 암반특성치의 불확실성이 폭굉파속도의 불확실성보다 더 크기 때문에 발파압력은 후자보다 전자에 의해서 더 크게 영향을 받는다.

주요어: 발파압력, 충격파 이론, 화약과 암반 특성치

1. 서론

화약은 열, 충격, 마찰에 의해서 기폭하는 화학 복합체이며 폭굉순간 매우 빠른 시간에 고체에서 기체로 변화한다. 암반 발파공에서 밀장전 (fully coupled)한 화약이 폭발하면 강한 충격파와 높은 가스압력이 발생하여 주위암반을 파쇄시키고 암반에 응력파를 전파한다. 발파 후 발파공주변 암반상태는 그림 1과 같이 분쇄환 (crushing zone), 파석대 (fracture zone), 파석형성대 (fragment formation zone), 탄성대 (elastic zone)로 구분된다. 분쇄환에서는 발파압력이 동적 암반항복압축강도를 초과하여 암반이 분쇄되고 발파공에 근접한 암반은 높은 압력, 온도로 인하여 부분적으로 액체상태로 변한다 (Henrych, 1979).

초기에 발생한 충격파의 일부는 주변암반에 전달되고 일부는 아직 반응하지 않은 화약으로 전파되어 연쇄적 폭굉반응을 유도한다. 화약폭발과 발파공벽에 압력이 전파되는 메카니즘은 매우 짧은 시간에 발생하는 폭굉현상과 충격파를 동시에 고려해야하는 특성 때문에 충격파 전파메카니즘을 기초로 하는 연구보다 경험적으로 많이 연구되었다. 충격파는 기체, 액체, 고체 상태에서 갑자기 높은 압력이 작용하면 파면의 이동속도가 파전파속도를 추월하여 발생된다. Bergmann (1973)은 실험을 통하여 폭굉에너지, 폭굉압력, 폭굉파속도, 화약밀도, 주변 매질특성의 관계를 이용하여 경험적 방법으로 발파압력 산정공식을 제안하였다. Starfield와 Pugliese (1968), Aimone (1982)는 발파압력의 시간에 따른 변화를 모델링하였고 화약 밀도와 탄성파속도, 매질의 탄성파속도를 이용하여 발파압력 산정식을 제안하였다. 지금까지 수행된 발파압력 산정에 대한 연구는 폭굉압력을 직접 발파

공벽에 작용시키거나 화약과 암반사이의 탄성과 전파메카니즘을 적용하여 수행되었다.

화약이 폭발되면 폭굉압력은 충격파 형태로 전파되면서 폭굉가스의 체적이 증가된다. 폭굉가스의 체적이 증가하면 폭굉압력은 Hugoniot곡선을 따라서 감소된다. 충격파가 전파되면서 암반, 공기 등 다른 매질의 경계면에 도달되면 충격파의 일부는 충격파 속으로 반사되고 일부는 다른 매질에 투과되어 전파된다. 화약이 공기중에서 폭발되면 폭굉압력의 충격파는 음속보다 빠른 속도로 전파되고 상당거리를 전파되면 충격파가 소멸되어 음파속도로 전파된다. 화약 폭발시 폭원 주변에는 매우 높은 온도와 압력이 발생되므로 암반같은 고체에서도 충격파가 발생된다 (Patsudoko, 1954). 화약과 암반의 경계면에서 화약 충격파와 암반 충격파의 연속성을 고려하여 충격파 이론을 적용할 수 있다. Henrych (1979)는 매질의 밀도에 따라 충격파가 매질에 전파되는 원리 (mechanism)을 이론적으로 규명하였으나 충격파 전파로 발생하는 발파압력 산정식을 명확히 제안하지 못했다. 이 연구는 화약 폭발로 발생하는 충격파가 암반에 전달되는 메카니즘을 질량보존법칙, 운동량보존법칙을

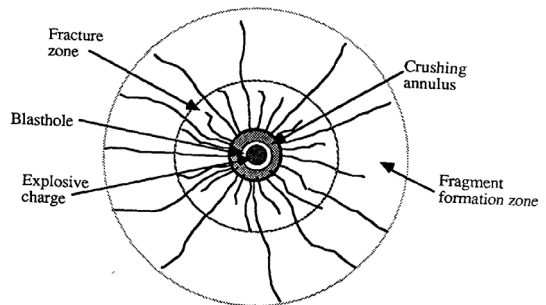


그림 1. 발파후 발파공주변 암반상태

적용하여 연속체 거동으로 분석하고 암반 충격파이론을 적용하여 암반에 전달되는 발파압력 산정식을 유도하였다.

충격파 이론을 적용하여 유도한 발파압력은 화약의 폭굉파속도, 단열지수, 화약밀도와 암반의 Hugoniot 상수 (C, S), 암반밀도의 함수이다. 산업용 화약은 제조과정에서 화약 구성물질의 배합비, 패킹 정도에 따라 화약 특성의 차이가 발생한다. 즉 동일한 종류의 화약일지라도 폭굉파속도, 단열지수, 화약밀도의 특성치는 확정적이지 못하고 불확실성을 갖는다. 더구나 자연 암반은 불균질 (nonhomogeneous), 이방성 (anisotropy) 특성으로 인하여 시험으로 구한 Hugoniot 상수, 암반밀도의 특성치는 필수불가결하게 불확실성을 띠게 된다. 이런 변수들의 불확실성으로 인하여 발파압력도 확정적이지 못하고 불확정하게 된다. 따라서 이 연구는 폭굉파속도, 화약밀도에 대한 화약특성 시험과 Hugoniot 상수 C , 암반밀도에 대한 암반특성 시험을 시행하여 각 특성치의 확률분포를 정의하고 Rosenblueth방법을 이용하여 발파압력의 확률분포를 산출하였다.

이 논문과 연계한 논문 II (the companion paper)에서는 최대압력 도달시간의 개념을 제안하고 이 논문에서 유도된 발파압력 산정식을 이용하여 발파압력-시간의 관계식을 유도하였다. 또한 화약과 암반 특성치의 확률분포를 이용하여 최대압력 도달시간, 발파압력-시간 관계식의 확률분포를 산출하였다.

2. 충격파이론에 의한 발파압력 산정이론

밀장전조건의 화약이 암반 발파공에서 폭굉하는 경우 폭굉화약의 압력파는 충격파 형태로 암반공벽에 충돌된다. 충돌된 충격파의 일부는 반사파로 폭굉화약 내로 반사되고 일부는 투과파로 암반에 전파된다. 폭굉화약과 암반사이에서 발생하는 충격파, 반사파, 투과파의 전파모식도는 그림 2와 같다. p_D, u_D, ρ_D, C_D 는 폭굉화약의 폭굉파 압력, 입자속도, 밀도, 파전파속도이다. p_x, u_x 는 반사파, 투과파 배후의 발파압력, 입자속도이다. C_{RD}, C_{Tr} 은 반사파 전파속도, 투과파 전파속도이다. p_r, u_r, ρ_r, C_r 는 초기암반의 응력, 입자속도, 밀

도, 파전파속도이다. 투과파 배후의 발파압력은 폭굉압력이 암반에 전달된 발파압력이다.

폭굉화약과 암반 경계면의 연속성을 고려하여 투과파, 반사파 배후의 발파압력, 입자속도는 동일하다고 가정한다. 경계면에서 질량보존법칙, 운동량보존법칙이 성립한다고 가정하면 반사파, 투과파에 대한 관계식으로부터 발파공벽인 암반에 전달된 발파압력을 유도할 수 있다.

2.1 폭굉화약의 폭굉매개변수

밀도 ρ_w 가 $1000kg/m^3$ 보다 큰 고체화약이 폭발할 때 발생하는 폭굉파 전선 (the detonation wave front)의 밀도, 폭굉파 압력, 입자속도등 폭굉매개변수는 많은 시험결과로부터 식 (1)과 같이 산출되었다. p_D, ρ_D, γ 는 고체화약의 압력, 밀도, 단열지수이다. 고체화약 압력은 폭굉파 압력보다 매우 작아서 실제 계산과정에서 무시할 수준의 크기이다 (Henrych, 1979).

$$\rho_D = \frac{\gamma+1}{\gamma} \rho_w, \quad p_D - p_w = p_D = \rho_w \frac{D^2}{\gamma+1},$$

$$u_D = \frac{D}{\gamma+1} \tag{1}$$

2.2 암반에 전달된 투과파

운동량 보존법칙에서 암반에 전달된 발파압력과 입자속도 관계는 식 (2)와 같다. 암반 초기입자속도 $u_r = 0$ 이고 암반 초기응력은 발파압력보다 매우 작아서 무시하면 식 (3)과 같다. Persson 등 (1994)은 많은 시험결과로부터 암반에 전달된 투과파 전파속도와 암반 입자속도 관계를 식 (4)와 같이 제안하였다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (5)를 얻을 수 있다. 식 (5)로부터 투과파 배후의 입자속도는 식 (6)과 같이 발파압력, Hugoniot 상수, 암반 밀도의 함수인 것을 알 수 있다.

$$p_x - p_r = \rho_r C_{Tr} (u_x - u_r) \tag{2}$$

$$p_x = \rho_r C_{Tr} u_x \tag{3}$$

$$C_{Tr} = C + S u_x \tag{4}$$

$$S u_x^2 + C u_x - p_x / \rho_r = 0 \tag{5}$$

$$u_x = \frac{-C + \sqrt{C^2 + 4Sp_x/\rho_r}}{2S} = f(p_x, C, S, \rho_r) \quad (6)$$

Persson 등 (1994)은 매질별로 충격파 실험을 시행하여 Hugoniot 상수를 표 1과 같이 제안하였다. Hugoniot 상수 C는 실험조건에 따라 변화하지만 일반적으로 매질의 탄성파속도와 같다.

2.3 폭굉화약 내 반사파

운동량보존법칙에서 폭굉화약 내 압력과 입자속도 관계는 식 (7)과 같고 식 (7)로부터 반사파 전파속도는 식 (8)과 같다. 질량보존법칙에서 경계면의 폭굉파 질량관계는 식 (9)와 같고 식 (9)로부터 반사파 전파속도는 식 (10)과 같다. 식 (8)과 식 (10)으로부터 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$p_x - p_D = \rho_D C_{RD} (u_D - u_x) \quad (7)$$

$$C_{RD} = \frac{(p_x - p_D)}{\rho_D (u_D - u_x)} \quad (8)$$

$$\rho_D C_{RD} = \rho_x (C_{RD} - (u_D - u_x)) \quad (9)$$

$$C_{RD} = \frac{\rho_x}{\rho_x - \rho_D} (u_D - u_x) \quad (10)$$

$$u_D - u_x = \sqrt{(p_x - p_D)(1/\rho_D - 1/\rho_x)} \quad (11)$$

폭굉파와 반사파 배후의 폭굉화약에 대한 Hugoniot

관계식으로부터 Hugoniot 충격단열 (shock adiabat)은 식 (12)와 같다 (Henrych, 1979). γ 는 매질의 등엔트로피 단열지수이다. 화약종류에 따라 단열지수는 일반적으로 $2.38 \leq \gamma \leq 3$ 범위이다.

$$\frac{\rho_D}{\rho_x} = \frac{(\gamma + 1)p_D + (\gamma - 1)p_x}{(\gamma + 1)p_x + (\gamma - 1)p_D} = \frac{(\gamma - 1)\pi^* + (\gamma + 1)}{(\gamma + 1)\pi^* + (\gamma - 1)}, \quad \pi^* = \frac{p_x}{p_D} \quad (12)$$

식 (1), (11), (12)를 서로 상관하여 반사파 및 투과파 배후 폭굉화약의 입자속도를 구하면 식 (13)과 같다. 식 (13)으로부터 경계면의 입자속도는 반사파 배후의 발파압력, 폭굉파속도, 화약밀도, 단열지수의 함수인 것을 알 수 있다.

표 1. 매질별 Hugoniot 상수 C, S값

매질 재료 (material)	$\rho_r (g/cm^3)$	C (Km/sec)	S
Granite, Westerley	2.63	2.10	1.63
Limestone, Solenhofen	2.60	3.50	1.43
Marble	2.70	4.00	1.32
Plexiglas	1.18	2.75	1.30
Water	1.00	1.70	1.70
Iron	7.84	3.80	1.62

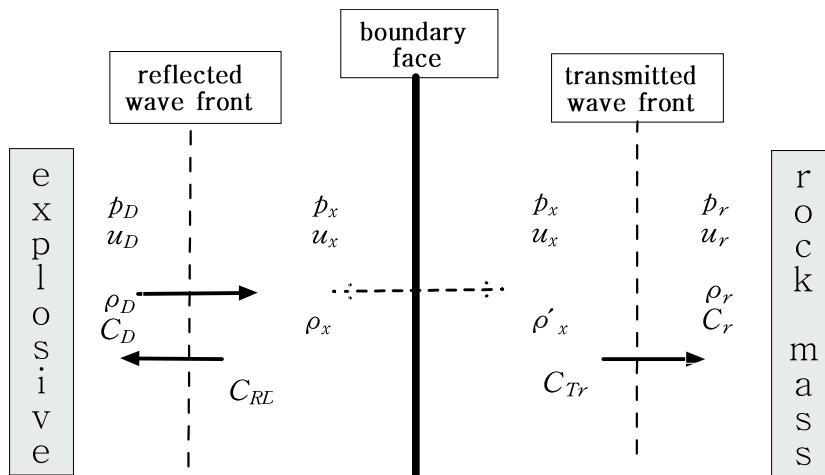


그림 2. 폭굉압력의 충격파, 반사파, 투과파 전파 모식도

$$u_x = \frac{D}{\gamma+1} \left[1 - \sqrt{2\gamma} \frac{\pi^* - 1}{\sqrt{(\gamma+1)\pi^* + (\gamma-1)}} \right] = f(p_x, D, \rho_w, \gamma) \quad (13)$$

2.4 발파압력 산정과 매개변수분석

폭굉화약과 암반 경계면에 충격파이론을 적용하고 경계면의 연속성을 고려하면 암반내 투과파의 입자속도인 식 (6)과 폭굉화약내 반사파의 입자속도인 식 (13)은 동일하므로 이를 이용하여 암반에 전달된 발파압력을 산정할 수 있다. 식 (13)을 식 (6)에 대입하면 식 (14)와 같고 발파압력은 식 (15)와 같이 암반밀도, Hugoniot 상수, 단열지수, 화약밀도, 폭굉파속도의 함수로부터 산정할 수 있다. f_1, f_2, f_3, f_4 는 상수로서 $f_i = f(\rho_r, C, S, \gamma, \rho_w, D)$, $i=1\sim 4$ 이다. 식 (14)는 중간점 접근 수치해석법 (a numerical middle-point approaching technique)을 이용하여 해를 구할 수 있다. 일반적으로

화약밀도보다 암반밀도가 더 크기 때문에 발파압력은 폭굉파 압력보다 더 크게 된다.

$$p_x^4 + f_1 p_x^3 + f_2 p_x^2 + f_3 p_x + f_4 = 0 \quad (14)$$

$$p_x = f(\rho_r, C, S, \gamma, \rho_w, D) \quad (15)$$

발파압력에 대한 매개변수 분석을 위하여 암반과 화약의 특성치를 표 2와 같이 기준하였다. 암반 및 화약 특성치의 변화범위를 일정하게 70~130%로 설정하여 매개변수 분석을 하였다. 매개변수 분석결과 발파압력에 미치는 영향은 화약특성이 암반특성보다 더 크게 나타났으며 상세한 내용은 표 3, 그림 3과 같다. 암반특성이 발파압력에 미치는 영향은 2~11%범위이고 화약특성이 미치는 영향은 19~59%범위이다. 발파압력에 가장 크게 영향을 미치는 순서로 나열하면 폭굉파속도, 단열지수, 화약밀도, 암반밀도, Hugoniot 상수 C , S 의 순서이다.

표 2. 암반과 화약 특성의 변수 기준

암 반			화 약		
암반밀도 $\rho_r (g/cm^3)$	Hugoniot 상수		화약밀도 $\rho_w (g/cm^3)$	단열지수 γ	폭굉파속도 $D (m/sec)$
	$C (m/sec)$	S			
2.60	3700	1.63	1.25	2.61	4600

표 3. 발파압력에 대한 매개변수 분석결과

변수 변화범위 (%)		70	80	90	100	110	120	130	
암 반 특 성	ρ_r 영향	$p_x (GPa)$	9.26	9.70	10.08	10.40	10.72	11.00	11.26
		증감율 (%)	-11	-7	-3	0	3	6	8
	C 영향	$p_x (GPa)$	9.64	9.92	10.18	10.40	10.66	10.88	11.08
		증감율 (%)	-8	-5	-2	0	2	4	6
	S 영향	$p_x (GPa)$	10.14	10.24	10.34	10.40	10.50	10.58	10.66
		증감율 (%)	-3	-2	-1	0	1	2	3
화 약 특 성	ρ_w 영향	$p_x (GPa)$	8.08	8.90	9.68	10.40	11.12	11.80	12.44
		증감율 (%)	-22	-15	-7	0	7	13	19
	γ 영향	$p_x (GPa)$	13.64	12.36	11.32	10.40	9.66	9.00	8.42
		증감율 (%)	31	19	9	0	-7	-14	-19
	D 영향	$p_x (GPa)$	5.56	7.02	8.64	10.40	12.34	14.40	16.62
		증감율 (%)	-47	-33	-17	0	18	38	59

3. 발파압력에 대한 확률분석

3.1 발파압력 확률분석 순서

발파압력은 식 (15)와 같이 암반밀도, Hugoniot 상수, 단열지수, 화약밀도, 폭굉파속도의 함수로 결정된다 (그림 4 참조). 그림 4에서 화약밀도, 폭굉파속도의 특성치에 대한 확률분포는 화약특성 시험결과를 사용하여 결정할 수 있다. 단열지수 특성치는 단열지수와 화약밀도 관계의 경험식을 이용하여 화약밀도의 함수로 결정할 수 있다. 암반밀도, Hugoniot 상수의 특성치에 대한 확률분포는 암반특성 시험결과를 사용하여 결정할 수 있다. 암반밀도, Hugoniot 상수, 화약밀도, 폭굉파속도

의 확률분포를 식 (15)에 적용하고 Rosenblueth방법 (Rosenblueth, 1975, 1981)을 이용하면 발파압력의 확률분포를 산정할 수 있다.

3.2 Rosenblueth방법에 의한 확률모델

Rosenblueth 확률모델은 독립변수의 적률 (moments) 함수를 인자로 종속변수의 적률을 결정하는 유용한 방법이다. 만약 식 (16)과 같이 F 가 무작위 변수 (random variables)에 관련한 함수라면 정의에 의하여 무작위 변수 평균값에 대한 함수값은 식 (17)과 같고 i 번째 변수의 표준편차 값에 대한 함수값은 식 (18), (19)와 같다. 따라서 i 번째 변수의 함수값 평균, 표준편차는 식 (20),

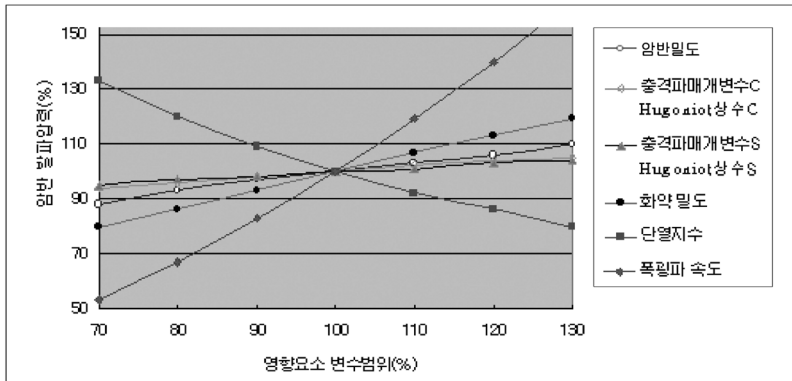


그림 3. 발파압력에 대한 매개변수분석 결과

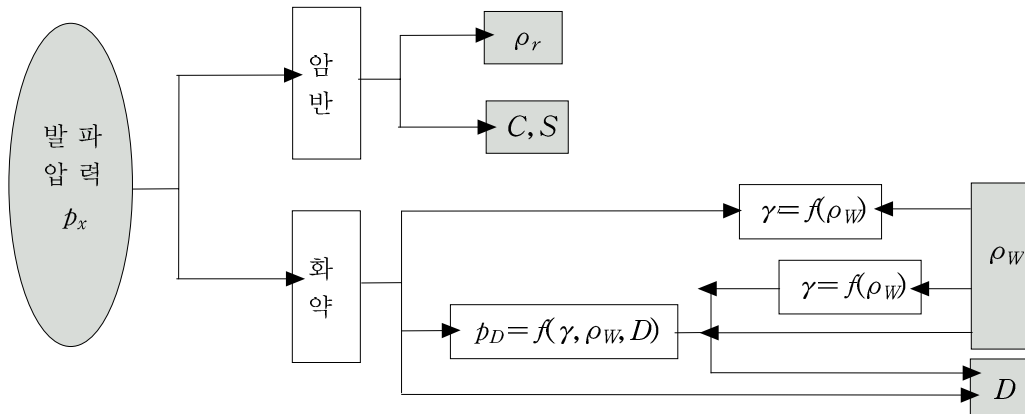


그림 4. 발파압력 산출 흐름도

(21)과 같고 전체 변수의 함수값 평균, 표준편차는 식 (22), (23)과 같다. $\mu(\cdot)$, $\sigma(\cdot)$, $\Pi(\cdot)$ 는 변수 (\cdot) 의 평균, 표준편차와 전체의 곱이다.

$$F = F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (16)$$

$$X_1, X_2, \dots, X_n \quad \bar{F} = F(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) \quad (17)$$

$$F_{i+} = F(\mu_{x_1}, \dots, \mu_{x_{i-1}}, \mu_{x_i} + \delta_{x_i}, \mu_{x_{i+1}}, \dots, \mu_{x_n}) \quad (18)$$

$$F_{i-} = F(\mu_{x_1}, \dots, \mu_{x_{i-1}}, \mu_{x_i} - \delta_{x_i}, \mu_{x_{i+1}}, \dots, \mu_{x_n}) \quad (19)$$

$$\mu(F_i) = \frac{F_{i+} + F_{i-}}{2} \quad (20)$$

$$\sigma(F_i) = \frac{F_{i+} - F_{i-}}{2} \quad (21)$$

$$\mu(F) = \frac{1}{F^{n-1}} \Pi \mu(F_i) \quad (22)$$

$$\sigma^2(F) = \Pi(1 + \delta^2(F_i)) - 1 \quad (23)$$

만약 독립변수가 5개인 함수 $F = F(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ 인 경우, 함수의 평균, 표준편차는 식 (24)~(27)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\mu(F) = \frac{1}{32} (F^{+++++} + F^{++++-} + \dots + F^{-----}) \quad (24)$$

$$\sigma^2(F) = \mu(F^2) - \mu^2(F) \quad (25)$$

$$\mu(F^2) = \frac{1}{32} [(F^{+++++})^2 + (F^{++++-})^2 + \dots + (F^{-----})^2] \quad (26)$$

$$F^{\pm\pm\pm} = F(\mu_{x_1} \pm \sigma_{x_1}, \mu_{x_2} \pm \sigma_{x_2}, \mu_{x_3} \pm \sigma_{x_3}, \mu_{x_4} \pm \sigma_{x_4}, \mu_{x_5} \pm \sigma_{x_5}) \quad (27)$$

4. 발파압력에 영향을 미치는 화약과 암반 특성

4.1 화약특성 시험

화약의 폭굉파속도는 화약 기폭시 화약폭발이 전파되는 속도이다. 화약폭발시 입자활동이 매우 빠르고 활발

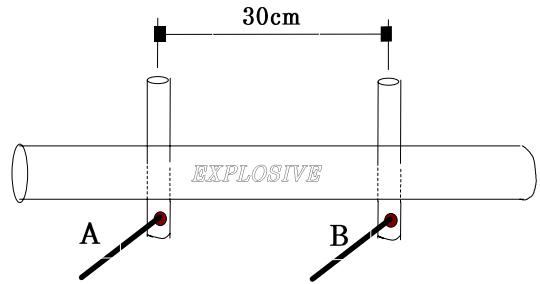


그림 5. Timber 방식의 폭굉파 속도 측정원리

해서 폭굉파속도는 화약의 음파속도보다 빠르고 최대압력이 파전면 (the wave front)에서 형성되는 충격파형태를 나타낸다. 폭굉파속도는 발파압력에 가장 크게 영향을 미친다. 폭굉파속도에 영향을 미치는 요소는 화약 종류, 직경, 구속조건 (confinement), 온도 등이다 (Hopler, 1998).

폭굉파속도를 실험실에서 측정하는 방법은 Dautriche법, Mettegang법 등이 있다 (Kim, 1986). 이 연구에서 폭굉파속도 측정은 Instantel사 (1998)의 VMO122 측정기를 사용하여 측정하였고 Dautriche법을 이용한 Timber방식을 적용하였다. Timber방식의 측정원리는 그림 5와 같이 A와 B사이 거리 \bar{D}_{AB} 가 30cm인 A, B지점에 계측기를 매설하고 화약 기폭시 A, B지점의 폭굉반응 시간 t_A , t_B 를 측정함으로써 식 (28)과 같이 폭굉파속도를 구할 수 있다. 일반 산업용 화약의 폭굉파속도는 2000~8000m/sec 범위이다.

$$D = \frac{\bar{D}_{AB}}{t_B - t_A} \quad (28)$$

화약밀도는 화약민감도 (sensitivity), 폭굉파속도 등의 화약특성을 결정하는 중요한 요소이다. 일반 산업용 화약밀도는 0.8~1.6g/cm³ 범위이다. 밀도는 시험전에 화약부피와 무게를 측정하여 산출하였다.

화약특성 시험에 사용한 화약은 에멀전 (emulsion), 직경 32mm×200mm이고 시험결과의 폭굉파속도, 화약밀도의 확률분포는 표 4와 그림 6, 7과 같다. 폭굉파속도 시험결과 범위는 4543~4675m/sec이고 평균, 변동계수 (coefficient of variation)는 4602m/sec, 0.008

이다. 화약밀도 시험결과 범위는 1.235~1.263g/cm³이고 평균, 변동계수는 1.251g/cm³, 0.006이다. 폭굉파속도와 화약밀도 특성치의 확률분포는 정규분포와 유사하였다.

4.2 단열지수 (Adiabatic Exponent)

단열지수는 등엔트로피 지수 (isentropic exponent) 이고 등압비열 c_p 과 등체적비열 c_v 의 비이다 ($\gamma = c_p/c_v$). 단열지수는 많은 연구자들이 시험을 통해 화약밀도로부터 산출하는 모델식을 표 5와 같이 제안하였다 (Cooper, 1997, Kamlet 등, 1968, Defourneaux, 1973). 즉 단열지수는 화약밀도의 함수 ($\gamma = f_i(\rho_w)$)로서 화약밀도의 확률분포에 종속되는 변수이다. 단열지수는 각 모델식의 신뢰도를 적정히 반영하기 위하여 모델수정계수

(K_i)를 이용하고 식 (29)와 같이 화약밀도의 함수식으로 적용한다. $E(f_i(\rho_w))$ 는 i 번째 모델식의 평균이고 w_j 는 각 모델의 신뢰도를 나타내는 가중값이다.

$$\gamma = K_i \cdot f_i(\rho_w), \quad K_i = \frac{\sum_{j=1}^3 w_j E(f_j(\rho_w))}{E(f_i(\rho_w))}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (29)$$

4.3 암반특성 시험

Hugoniot 상수 C 는 일반적으로 암반의 탄성파속도와 같으므로 탄성파속도 시험결과를 이용한다. 서울 노원구 지역 화강암에 대한 시험결과 암반밀도와 탄성파속도의 확률분포는 표 6과 그림 8, 9와 같다. 암반밀도 범위는 2.41~2.84g/cm³이고 평균, 변동계수는 2.579g/cm³, 0.026이다. 탄성파속도 범위는 1900~4850m/sec이고

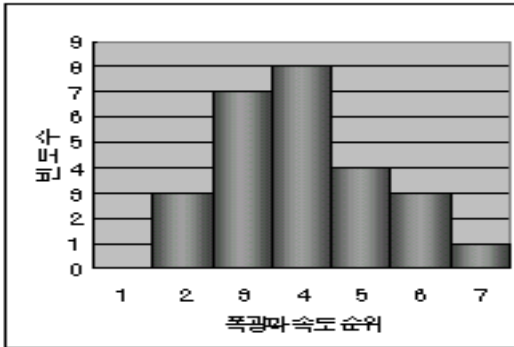


그림 6. 폭굉파속도 시험결과 확률분포

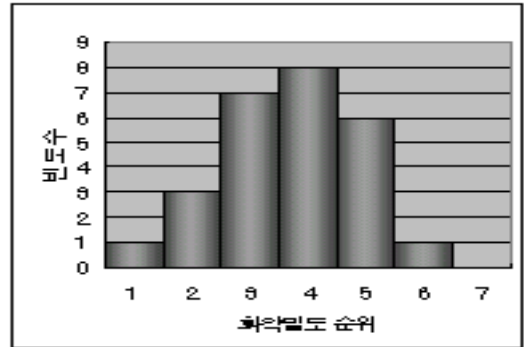


그림 7. 화약밀도 시험결과 확률분포

표 4. 화약특성 시험결과와 폭굉파속도, 화약밀도 확률분포

순 위	폭 굉 파 속 도				화 약 밀 도			
	분 포 범 위			빈 도	분 포 범 위			빈 도
	하 한	상 한	평 균		하 한	상 한	평 균	
1	-	4532	-	0	-	1,237	-	1
2	4532	4560	4546	3	1,237	1,243	1,240	3
3	4560	4588	4574	7	1,243	1,248	1,245	7
4	4588	4616	4602	8	1,248	1,254	1,251	8
5	4616	4644	4630	4	1,254	1,259	1,257	6
6	4644	4672	4658	3	1,259	1,265	1,262	1
7	4672	-	-	1	1,265	-	-	0

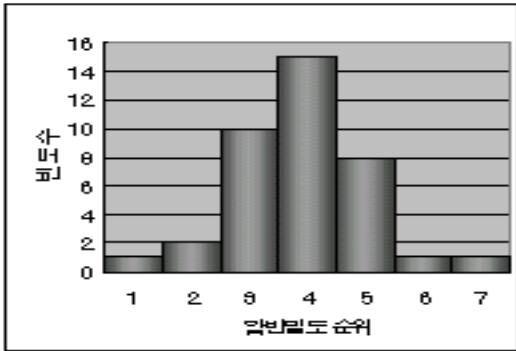


그림 8. 암반밀도 확률분포

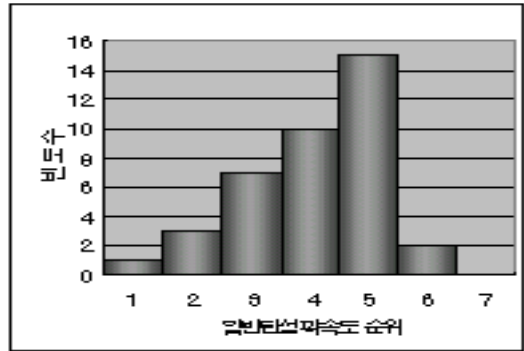


그림 9. 탄성파속도 확률분포

표 5. 연구자들이 제안한 단열지수 경험식 ($\rho_w : g/cm^3$)

제안자	Cooper	Defourneaux	Kamlet and Jacobs
경험식	$\gamma = 1 / (1.4035\rho_w^{-0.04} - 1)$	$\gamma = 1.9 + 0.6\rho_w$	$\gamma = 0.655/\rho_w + 0.702 + 1.107\rho_w$

표 6. 암반밀도, 탄성파속도 시험결과의 확률분포

순 위	암 반 밀 도				암 반 탄 성 파 속 도			
	분 포 범 위			빈 도	분 포 범 위			빈 도
	하 한	상 한	평 균		하 한	상 한	평 균	
1	-	2,447	-	1	-	2300	-	1
2	2,447	2,500	2,474	2	2300	2866	2583	3
3	2,500	2,553	2,527	10	2866	3432	3149	7
4	2,553	2,606	2,580	15	3432	3998	3715	10
5	2,606	2,659	2,633	8	3998	4564	4218	15
6	2,659	2,712	2,686	1	4564	5130	4847	2
7	2,712	-	-	1	5130	-	-	0

평균, 변동계수는 $3716m/sec$, 0.191 이다. 암반밀도와 탄성파속도 특성치의 확률분포는 정규분포와 유사하였다.

5. 발파압력의 확률분포와 발파압력-시간의 관계식

5.1 발파압력의 확률분포산출과 불확실성 분석

발파압력은 식 (15)와 같이 암반밀도, Hugoniot 상

수, 화약밀도, 폭굉파속도의 함수로 산정되며 이런 변수들의 확률분포는 표 7과 같다. Hugoniot 상수 S는 시험결과가 없으므로 표 1을 참조하여 평균, 변동계수를 1.63 , 0.147 로 가정한다.

표 7을 식 (15)에 적용하여 발파압력을 산정하고 Rosenbluth 확률모델을 이용하여 산출한 발파압력의 평균, 변동계수는 $10.418GPa$, 0.049 이다. 화약과 암반 특성치의 확률분포가 정규분포와 유사하므로 발파압력의 확률분포도 정규분포로 추정된다.

표 7을 식 (1), (15)에 적용하여 산정한 발파압력과 폭굉파 압력의 관계비 (p_x/p_D)는 평균 1.416 이고 변동계

수 0.047이다. 암반밀도가 화약밀도보다 더 크기에 발파압력이 폭굉파 압력보다 더 크게 나타났다. 표 7을 탄성파이론의 압력과 전파식에 적용하여 발파압력과 폭굉파 압력의 관계비 (p_x/p_D)를 산정하면 평균 1.249이고 충격파 이론을 적용한 경우보다 13%정도 저평가 되었다.

화약과 암반특성치의 불확실성이 발파압력에 미치는

영향을 분석하면 표 8, 그림 10과 같다. 2.4절의 매개변수 분석에서 발파압력에 가장 크게 영향을 미치는 순서는 폭굉파속도, 단열지수, 화약밀도, 암반밀도, Hugoniot 상수 C, S 이었다. 하지만 불확실성 분석결과 Hugoniot 상수 C, S , 폭굉파속도, Hugoniot 상수 S , 암반밀도, 화약밀도, 단열지수의 순서로 발파압력에 크게 영향을 미쳤다. 즉, 매개변수 분석에서 화약특성이 암반특성보다 발

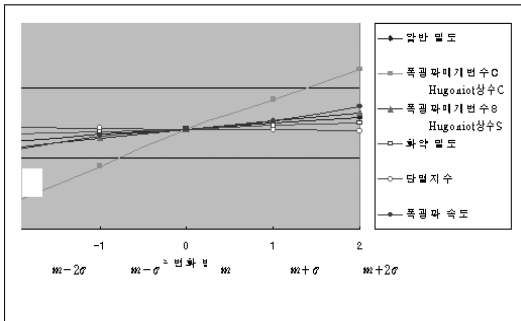


그림 10. 발파압력 불확실성 분석결과

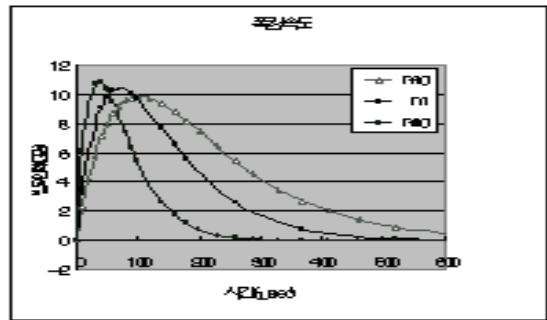


그림 11. 발파압력-시간의 관계식

표 7. 화약과 암반특성치의 확률분포

구 분	암반밀도 (g/cm^3)	Hugoniot 상수		화약밀도 (g/cm^3)	폭굉파속도 (m/sec)
		$C(m/sec)$	S		
평 균	2,579	3716	1,63	1,251	4602
변동계수	0,026	0,191	0,147	0,006	0,008

표 8. 발파압력의 불확실성 분석결과 (m : 평균, σ : 표준편차)

불확실성 범위		$m + \sigma$		m		$m - \sigma$	
		$p_x(GPa)$	증감율(%)	$p_x(GPa)$	증감율(%)	$p_x(GPa)$	증감율(%)
암반 특성	ρ_r 영향	10,500	1	10,418	0	10,336	-1
	C 영향	10,834	4	10,418	0	9,894	-5
	S 영향	10,540	1	10,418	0	10,290	-1
화약 특성	ρ_w 영향	10,460	0	10,418	0	10,378	0
	D 영향	10,522	1	10,418	0	10,314	-1

표 9. 최대 발파압력 확률분포와 최대압력 도달시간 (m : 평균, σ : 표준편차)

구 분	$m + \sigma$	m	$m - \sigma$
최대 발파압력 (GPa)	10,91	10,40	9,90
최대압력도달시간 (μsec)	103	70	37

파압력에 크게 영향을 미치지만 불확실성 분석에서는 암반특성이 화약특성보다 더 크게 영향을 미쳤다. 이는 자연 암반의 불확실성이 사람이 제조한 화약보다 더 크기 때문이다. 폭굉파속도의 변동계수는 작지만 매개변수 분석에서 발파압력에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 불확실성에 미치는 영향이 크게 나타났다.

5.2 발파압력-시간의 관계식

봉상장약 (cylindrical charge) 조건인 경우 시간변화에 따른 발파압력-시간의 관계식 ($\mu(t)$)은 최대 발파압력, 최대압력 도달시간에 따라 일반적으로 지수함수 형태로 변화한다. 이 연구에서 발파압력-시간의 관계식은 연계한 논문II (the companion paper)에서 Park 등 (2003)이 제안한 식 (30)을 적용한다. t, t_R, a 는 발파압력 작용시간, 최대압력 도달시간, 폭굉파속도 매개변수이다. p_x 는 $t=t_R$ 일 때 압력으로 최대 발파압력이다. 최대압력 도달시간은 Park 등 (2003)의 연구결과를 이용하여 산정한다.

$$\mu(t) = p_x \cdot \left(\frac{t}{t_R}\right)^a \cdot e^{-\frac{t_R-t}{t_R}} \quad (30)$$

최대 발파압력 확률분포와 최대압력 도달시간은 표 9와 같고 식 (30)을 이용하여 발파압력-시간의 관계식을 산출하면 그림 11과 같다.

6. 결론

암반 발파공에서 화약이 폭발되면 매우 빠른 속도로 연쇄적인 폭굉반응이 일어나고 고압의 폭굉압력이 발생하여 충격파가 주변암반에 전달된다. 화약에서 암반으로 전달되는 폭굉압력 전파메카니즘을 충격파이론을 적용하여 규명하고 전달된 발파압력 산정식을 유도하였다. 일반적으로 압력파가 다른 매질에 전파되고 다른 매질의 밀도가 크면 전달된 압력은 커진다. 따라서 암반밀도가 화약밀도보다 더 크므로 발파압력은 폭굉압력보다 더 크게 나타났다. 이 연구결과 에멀전화약과 화강암반인 경우 발파압력은 폭굉압력보다 평균 1.4배정도 더 크게 나

타났다.

충격파이론을 적용하여 유도한 발파압력 산정식은 폭굉파속도, 단열지수, 화약밀도, Hugoniot 상수, 암반밀도의 함수였다. 발파압력에 대한 매개변수 분석결과 폭굉파속도, 단열지수, 화약밀도, 암반밀도, Hugoniot 상수 C, S 순서로 발파압력에 크게 영향을 미쳤다. 즉 화약 특성치가 암반특성치보다 발파압력에 더 큰 영향을 미쳤다. 화약과 암반은 불균질한 특성을 갖게 됨으로 그 특성치는 확정적이지 못하고 불확정한 특성을 갖게 된다. 이런 불확실성을 화약과 암반 특성시험 결과로부터 확률분포로 정의하였다. 화약과 암반 특성치의 확률분포를 발파압력 산정식에 적용하고 Rosenblueth 확률모델을 이용하여 발파압력의 확률분포를 산출하였다. 화약 특성치와 암반 특성치의 확률분포는 정규분포를 나타냈다. 따라서 발파압력의 확률분포는 정규분포로 추정된다.

화약과 암반 특성치의 불확실성이 발파압력의 불확실성에 미치는 영향분석 결과 Hugoniot 상수 C , 폭굉파속도, Hugoniot 상수 S , 암반밀도, 화약밀도 순서로 크게 영향을 미쳤다. 이는 자연 암반의 불확실성이 사람이 제조한 화약보다 더 크기 때문이다. 비록 매개변수분석에서 폭굉파속도가 발파압력에 가장 크게 영향을 미치는 변수이지만 암반특성치의 불확실성이 폭굉파속도의 불확실성보다 더 크기 때문에 발파압력은 후자보다 전자에 의해서 더 크게 영향을 받는다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Aimone, C. T. (1982), "Three-Dimensional Wave Propagation Model of Full-Scale-Rock Fragmentation", Ph. D. Dissertation, Northwestern University.
2. Bergmann, O. R., Riggle, J. W., and Wu, F. C.

- (1973), "Model Rock Blasting Effect of Explosives Properties and Other Variables on Blasting Results", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 10, pp. 585-612.
3. Cooper, P. W. (1997), "Explosives Engineering", VCH Publishers, Inc.
 4. Defourneaux, M. (1973), "Science of Techniques de L'armement", p. 872.
 5. Henrych, J. (1979), "The Dynamics of Explosion and Its Use", Elsevier Scientific Company.
 6. Hopler, R. B. (1998), "Blasters' Handbook", 17th Edition, International Society Explosives Engineers.
 7. InstanTel Inc. (1998), "VOD Mate Operator Manual", Ontario, Canada.
 8. Kamlet, M. J. and Jacobs, S. J. (1968), "Chemistry of Detonations. I. A Simple Method for Calculating Detonation Pressures of C-H-N-O Explosives". Journal of Chemical Physics 48, 23.
 9. Kim, J. K. (1986), "Industrial Explosive and Blasting Engineering", Seoul University Press, Seoul, pp. 100-102.
 10. Park, B. K., Lee, I. M., Kim, S. G. and Lee, S. D. (2003), "Probabilistic Estimation of a Fully Coupled Blasting Pressure Transmitted to Rock Mass II", Tunnelling Technology, submitted.
 11. Patsudoko, K. (1954), 15-3, "Science and Technology of Energetic Materials", p. 179.
 12. Persson, P. A., Holmberg, R. and Lee, J. M. (1994), "Rock Blasting and Explosives Engineering", CRC Press, Inc., Boca Raton.
 13. Rosenblueth E. (1975), "Point Estimates for Probability Moments", Proceedings National Academy of Science, USA, pp. 3812-3814.
 14. Rosenblueth E. (1981), "Two-Point Estimates in Probability", Applied Mathematical Modelling, pp. 329-335.
 15. Starfield, A. M. and Pugliese, J. M. (1968), "Compressional Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charges, A Comparison between a Computer Model and Field Measurement", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 5, pp. 65-77.



박봉기

고려대학교 토목환경공학과 박사과정
parkbongki@hotmail.com



이인모

고려대학교 토목환경공학과 교수
inmolee@korea.ac.kr



김동현

삼보기술단 지반공학부 이사
k7419@chollian.net