

화약이 폭발되면 폭굉압력은 충격파 형태로 전파되면서 폭굉가스의 체적이 증가된다. 충격파가 전파되면서 암반, 공기 등 다른 매질의 경계면에 도달되면 충격파의 일부는 충격파 속으로 반사되고 일부는 다른 매질에 투과되어 전파된다. 화약 폭발시 폭원 주변에는 매우 높은 온도와 압력이 발생되므로 암반 같은 고체에서도 충격파가 발생된다(Patsudoko, 1954). Henrych(1979)는 매질의 밀도에 따라 충격파가 매질에 전파되는 원리(mechanism)를 이론적으로 규명하였으나 충격파 전파로 발생하는 발파압력 산정식을 명확히 제안하지 못했다. 이 연구는 화약 폭발로 발생하는 충격파가 암반에 전달되는 메카니즘을 질량보존법칙, 운동량보존법칙을 적용하여 연속체 거동으로 분석하고 암반 충격파이론을 적용하여 암반에 전달되는 발파압력 산정식을 유도하였다.

충격파 이론을 적용하여 유도한 발파압력은 화약의 폭굉과속도, 단열지수, 화약밀도와 암반의 Hugoniot 상수(C, S), 암반밀도의 함수이다. 산업용 화약은 제조과정에서 화약특성의 차이가 발생한다. 즉 동일한 종류의 화약일지라도 화약 특성치는 확정적이지 못하고 불확정성을 갖는다. 더구나 자연 암반은 불균질(nonhomogeneous), 비등방(anisotropy) 특성으로 인하여 시험으로 구한 암반 특성치는 필수 불가결하게 불확정성을 띠게 된다. 이런 변수들의 불확정성으로 인하여 발파압력도 확정적이지 못하고 불확정하게 된다. 따라서 이 연구는 폭굉과속도, 화약밀도에 대한 화약특성 시험과 Hugoniot 상수 C , 암반밀도에 대한 암반특성 시험결과로부터 각 특성치의 확률분포를 정의하고 Rosenblueth방법을 이용하여 발파압력의 확률분포를 산출하였다.

2 충격파이론에 의한 발파압력 산정이론

밀장전조건의 화약이 암반 발파공에서 폭발하는 경우 폭굉화약의 압력파는 충격파 형태로 암반공벽에 충돌된다. 충돌된 충격파의 일부는 반사파로 폭굉화약 내로 반사되고 일부는 투과파로 암반에 전파된다. 폭굉화약과 암반사이에서 발생하는 충격파, 반사파, 투과파의 전파 모식도는 그림 2와 같다. p_D, u_D, ρ_D, C_D 는 폭굉화약의 폭굉과 압력, 입자속도, 밀도, 파전과속도이다. p_x, u_x 는 반사파, 투과파 배후의 발파압력, 입자속도이다. C_{RD}, C_{Tr} 은 반사파 전과속도, 투과파 전과속도이다. p_r, u_r, ρ_r, C_r 는 초기암반의 응력, 입자속도, 밀도, 파전과속도이다. 투과파 배후의 발파압력은 폭굉압력이 암반에 전달된 발파압력이다.

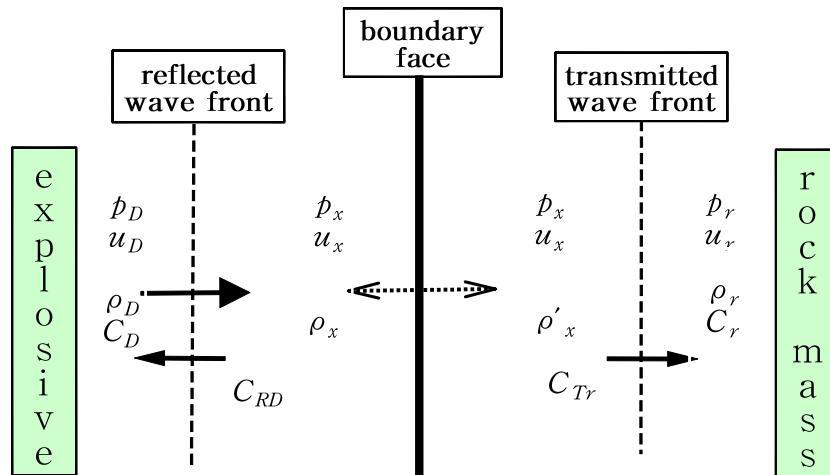


그림 2. 폭굉압력의 충격파, 반사파, 투과파 전파 모식도

2.1 암반에 전달된 투과파

운동량 보존법칙에서 암반에 전달된 발파압력과 입자속도 관계는 식(1)과 같다. Persson 등(1994)은 많은 시험결과로부터 암반에 전달된 투과파 전과속도와 암반 입자속도 관계를 식(4)와 같이 제안하였다. 투과파의 입자속도는 식(1)과 (2)로부터 식(3)과 같이 얻을 수 있다.

$$p_x = \rho_r C_{Tr} u_x \quad (1)$$

$$C_{Tr} = C + S u_x \quad (2)$$

$$u_x = \frac{-C + \sqrt{C^2 + 4S p_x / \rho_r}}{2S} = f(p_x, C, S, \rho_r) \quad (3)$$

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

표 1. 매질별 Hugoniot 상수 C , S 값

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

2.2 폭굉화약 내 반사파

운동량보존법칙에서 폭굉화약 내 압력과 입자속도 관계는 식(4)와 같다. 질량보존법칙에서 경계면의 폭굉과 질량관계는 식(5)와 같다.

식(4)와 (5)로부터 식(6)을 얻을 수 있고 반사파 입자속도는 식(7)과 같이 얻을 수 있다. γ , ρ_w 는 단열지수, 화약밀도이다.

$$p_x - p_D = \rho_D C_{RD} (u_D - u_x) \quad (4)$$

$$\rho_D C_{RD} = \rho_x (C_{RD} - (u_D - u_x)) \quad (5)$$

$$u_D - u_x = \sqrt{(p_x - p_D)(1/\rho_D - 1/\rho_x)} \quad (6)$$

$$u_x = \frac{D}{\gamma + 1} \left[1 - \sqrt{2\gamma} \frac{\pi^* - 1}{\sqrt{(\gamma + 1)\pi^* + (\gamma - 1)}} \right] = f(p_x, D, \rho_w, \gamma), \quad \pi^* = \frac{p_x}{p_D} \quad (7)$$

2.3 발파압력 산정과 매개변수분석

폭굉화약과 암반 경계면에 충격파이론을 적용하고 경계면의 연속성을 고려하면 암반내 투과파의 입자속도인 식(3)과 폭굉화약내 반사파의 입자속도인 식(7)은 동일하므로 이를 이용하여 암반에 전달된 발파압력을 산정할 수 있다. 발파압력은 식(9)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. 일반적으로 화약밀도보다 암반밀도가 더 크기 때문에 발파압력은 폭굉파 압력보다 더 크게 된다.

$$p_x^4 + f_1 p_x^3 + f_2 p_x^2 + f_3 p_x + f_4 = 0 \quad (8)$$

$$p_x = f(\rho_r, C, S, \gamma, \rho_w, D) \quad (9)$$

발파압력에 대한 매개변수 분석을 위하여 암반과 화약의 특성치를 표 2와 같이 기준하였다. 매개변수 분석결과 발파압력에 미치는 영향은 화약특성이 암반특성보다 더 크게 나타났으며 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.

3. 발파압력에 대한 확률분석

3.1 발파압력 확률분석 순서

발파압력은 식(9)와 같이 암반밀도, Hugoniot 상수, 단열지수, 화약밀도, 폭굉파속도의 함수로 결정된다(그림 4 참조). 화약 특성치의 확률분포는 화약특성 시험결과를 사용하고 암반 특성치의 확률분포는 암반특성 시험결과를 사용하여 결정할 수 있다. 암반밀도, Hugoniot 상수, 화약밀도, 폭굉파속도의 확률분포를 식(9)에 적용하고 Rosenblueth방법(Rosenblueth, 1975)을 이용하면 발파압력의 확률분포를 산정할 수 있다.

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

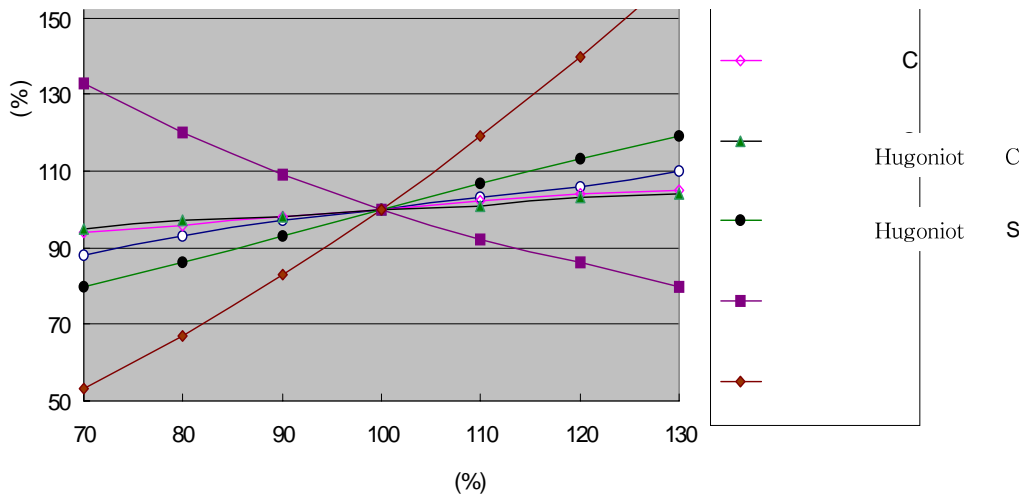


그림 3 발파압력에 대한 매개변수분석 결과

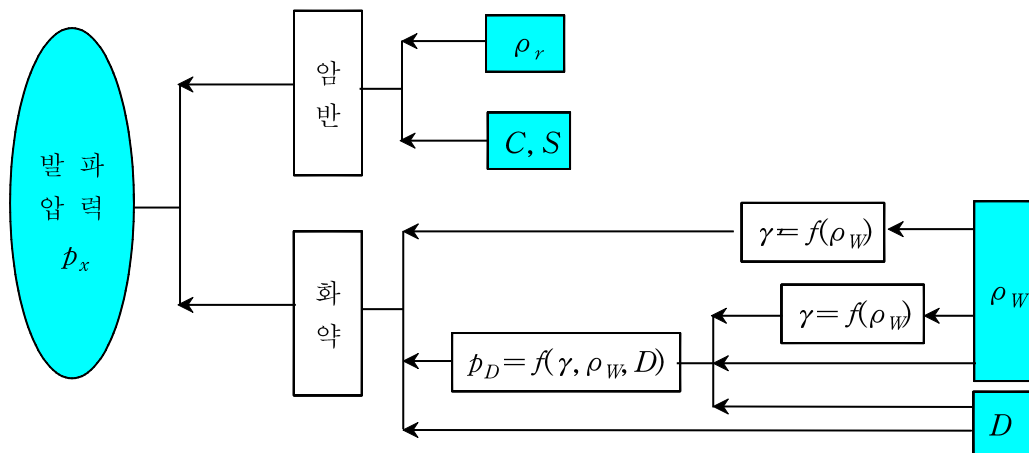


그림 4 발파압력 산출 흐름도

3.2. Rosenblueth방법에 의한 확률모델

Rosenblueth 확률모델은 독립변수의 적률(moments) 함수를 인자로 종속변수의 적률을 결정하는 유용한 방법이다. 만약 식(10)과 같이 F 가 무작위 변수(random variables) X_1, X_2, \dots, X_5 에 관한 함수이고 무작위 변수들의 관계가 독립이라고 가정하면 함수 F 의 평균, 표준편차는 식(11), (12)로부터 산출할 수 있다.

$$F = F(X_1, X_2, \dots, X_5) \tag{10}$$

$$\mu(F) = \frac{1}{32}(F^{+++++} + F^{++++-} + \dots + F^{-----}) \tag{11}$$

$$\sigma^2(F) = \mu(F^2) - \mu^2(F) \tag{12}$$

$$\mu(F^2) = \frac{1}{32}[(F^{+++++})^2 + (F^{++++-})^2 + \dots + (F^{-----})^2] \tag{13}$$

$$F^{\pm\pm\pm} = F(\mu_{x_1 \pm \sigma_{x_1}}, \mu_{x_2 \pm \sigma_{x_2}}, \mu_{x_3 \pm \sigma_{x_3}}, \mu_{x_4 \pm \sigma_{x_4}}, \mu_{x_5 \pm \sigma_{x_5}}) \tag{14}$$

4. 발파압력에 영향을 미치는 화약과 암반 특성

4.1 화약특성 시험

화약의 폭굉파속도는 화약 기폭시 화약폭발이 전파되는 속도이다. 폭굉파속도는 발파압력에 가장 크게 영향을 미친다. 폭굉파속도에 영향을 미치는 요소는 화약종류, 직경, 구속조건(confinement), 온도 등이다(Hopler, 1998). 이 연구에서 폭굉파속도 측정은 Instantel사(1998)의 VMO122 측정기를 사용하여 측정하였고 Dautriche법을 이용한 Timber방식을 적용하였다. 일반 산업용 화약의 폭굉파속도는 2000~8000 m/sec 범위이다.

화약밀도는 화약민감도(sensitivity), 폭굉파속도 등의 화약특성을 결정하는 중요한 요소이다. 일반 산업용 화약밀도는 0.8~1.6 g/cm³ 범위이다. 밀도는 시험전에 화약부피와 무게를 측정하여 산출하였다. 화약특성 시험에 사용한 화약은 에멀전(emulsion), 직경32mmx200mm이고 시험결과의 폭굉파속도, 화약밀도의 확률분포는 그림 5, 6과 같다. 폭굉파속도와 화약밀도의 평균, 변동계수(coefficient of variation)는 4602 m/sec, 0.008이고 1.251 g/cm³, 0.006이다. 폭굉파속도와 화약밀도 특성치의 확률분포는 정규분포와 유사하였다.

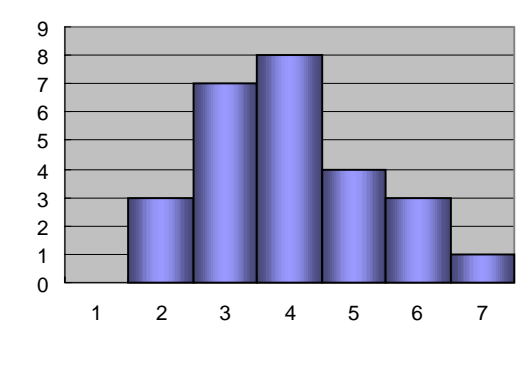


그림 5 폭굉파속도 시험결과 확률분포

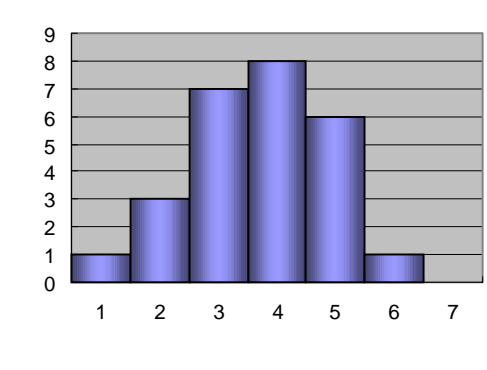


그림 6 화약밀도 시험결과 확률분포

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 3과 같이

제안하였다(Cooper, 1997, Kamlet 등, 1968, Defourneaux, 1973). 각 모델식의 신뢰도를 적정히 반영하기 위하여 모델수정계수 (K_i)를 이용하면 식(15)와 같이 단일지수를 화약밀도의 함수식으로 적용할 수 있다. $E(f_i(\rho_w))$ 는 i 번째 모델식의 평균이고 w_j 는 각 모델의 신뢰도를 나타내는 가중값이다.

$$\gamma = K_i \cdot f_i(\rho_w), \quad K_i = \frac{\sum_{j=1}^3 w_j E(f_j(\rho_w))}{E(f_i(\rho_w))}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (15)$$

표 3 연구자들이 제안한 단일지수 경험식 ($\rho_w : g/cm^3$)

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

4.3 암반특성 시험

Hugoniot 상수 C 는 일반적으로 암반의 탄성과속도와 같으므로 탄성과속도 시험결과를 이용한다. 서울 노원구지역 화강암에 대한 시험결과 암반밀도와 탄성과속도의 확률분포는 그림 7, 8과 같다. 암반밀도와 탄성과속도의 평균, 변동계수는 $2.579 g/cm^3$, 0.026 이고 $3716 m/sec$, 0.191 이다. 암반밀도와 탄성과속도 특성치의 확률분포는 정규분포와 유사하였다.

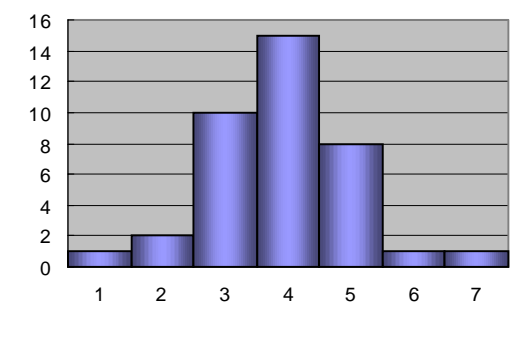


그림 7 암반밀도 확률분포

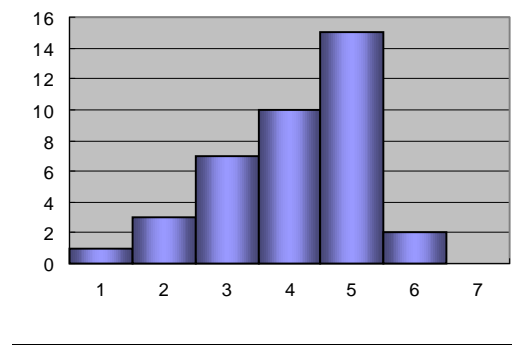


그림 8 탄성과속도 확률분포

5. 발파압력의 확률분포와 발파압력-시간의 관계식

5.1 발파압력의 확률분포산출과 불확정성 분석

발파압력은 식(15)와 같이 암반밀도, Hugoniot 상수, 화약밀도, 폭굉과속도의 함수로 산정된다. Hugoniot 상수 S 는 시험결과가 없으므로 표 1을 참조하여 평균, 변동계수를 1.63, 0.147로 가정한다.

발파압력을 산정하고 Rosenblueth 확률모델을 이용하여 산출한 발파압력의 평균, 변동계수는 $10.418 GPa$, 0.049 이다. 화약과 암반특성치의 확률분포가 정규분포와 유사하므로 발파압력의 확률분포도 정규분포로 추정된다. 발파압력과 폭굉과 압력의 관계비 (d_x/d_D)는 평균 1.416 이고 변동계수 0.047 이다. 암반밀도가 화약밀도보다 더 크기 때문에 발파압력이 폭굉과 압력보다 더 크게 나타났다. 탄성파이론을 적용하여 발파압력과 폭굉과 압력의 관계비 (d_x/d_D)를 산정하면 평균 1.249 이고 충격과 이론을 적용한 경우보다 13%정도 저평가 되었다.

화약과 암반특성치의 불확정성이 발파압력에 미치는 영향을 분석하면 그림 9와 같다. 매개변수 분석에서 화약특성이 암반특성보다 발파압력에 크게 영향을 미치지만 불확정성 분석에서는 암반특성이 화약특성보다 더 크게 영향을 미쳤다. 이는 자연 암반의 불확정성이 사람이 제조한 화약보다 더 크기 때문이다.

5.2 발파압력-시간의 관계식

봉상장약(cylindrical charge)조건인 경우 시간변화에 따른 발파압력-시간의 관계식($p(t)$)은 최대 발파압력, 최대압력 도달시간에 따라 일반적으로 지수함수 형태로 변화한다. 이 연구에서 발파압력-시간의 관계식은 Park 등(2003)이 제안한 식(16)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. 발파압력-시간 관계식의 확률분포는 그림 10과 같다.

$$p(t) = p_x \cdot \left(\frac{t}{t_R}\right)^a \cdot e^{-\frac{t_R-t}{t_R}} \quad (16)$$

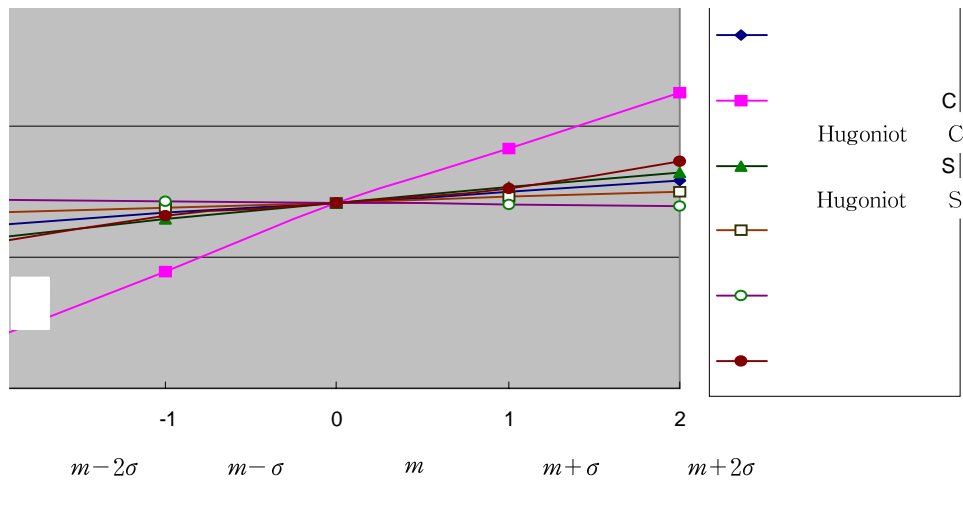


그림 9 발파압력 불확정성 분석결과

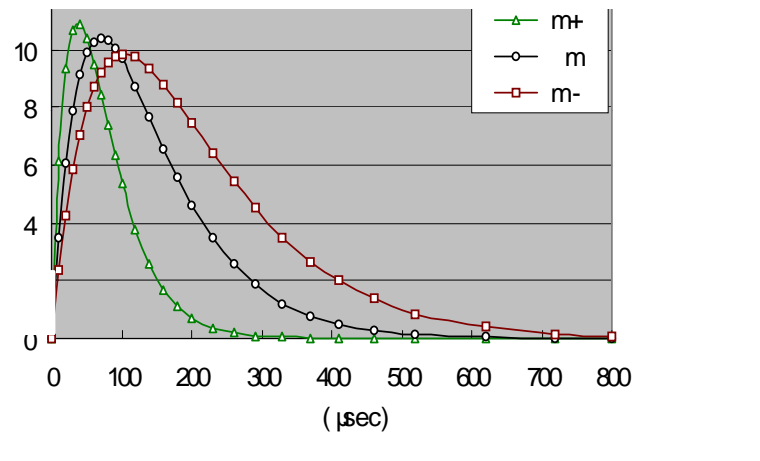


그림 10 발파압력-시간의 관계식

6. 결론

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.

충격파이론을 적용하여 유도한 발파압력 산정식은 폭굉파속도, 단열지수, 화약밀도, Hugoniot 상수, 암반밀도의 함수였다. 발파압력에 대한 매개변수 분석결과 화약특성치가 암반특성치보다 발파압력에 더 큰 영향을 미쳤다. 화약과 암반은 불균질한 특성을 갖게 됨으로 그 특성치는 확정적이지 못하고 불확정한 특성을 갖게 된다. 이런 불확정성을 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 불확정성이 발파압력의 불확정성에 미치는 영향분석 결과 화약 특성치보다 암반 특성치가 더 크게 영향을 미쳤다. 이는 자연 암반의 불확정성이 사람이 제조한 화약보다 더 크기 때문이다. 비록 매개변수분석에서 폭굉파속도가 발파압력에 가장 크게 영향을 미치는 변수이지만 암반특성치의 불확정성이 폭굉파속도의 불확정보다 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. Cooper, P. W.(1997), Explosives Engineering, VCH Publishers, Inc.
2. Defourneaux, M.(1973), Science of Techniques, de L'armement, p. 872
3. Henrych, J.(1979), The Dynamics of Explosion and Its Use, Elsevier Scientific Company.
4. Hopler, R. B.(1998), Blasters' Handbook, 17th Edition, International Society Explosives Engineers.
5. Instantel Inc.(1998), VOD Mate Operator Manual, Ontario, Canada.
6. 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.
7. Park, B.K., Lee, I.M., Kim, S.G. and Lee, S.D.(2003), "Probabilistic Estimation of a Fully Coupled Blasting Pressure II", under preparation.
8. Patsudoko, K.(1954), Science and Technology of Energetic Materials, 15-3, p. 179.
9. Persson, P.A., Holmberg, R. and Lee, J. M.(1994), Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, Inc., Boca Raton.
10. Rosenblueth E.(1975), "Point Estimates for Probability Moments", Proceedings National Academy of Science, USA, pp. 3812-3814.