

폭발압접에 대한 갱도의 안정성 분석

양형식^{1)*}, 장명환²⁾, 장형두¹⁾

Stability Analysis of Mine Drift for Explosive Welding

Hyung-sik Yang, Myoung-hwan Jang and Hyong-doo Jang

Abstract Explosive welding was planned in a closed drift of a mine for its reuse. In this study, we analyzed the stabilization of roof and pillar which were expected to be affected by overpressure experienced during the continual explosive welding. Three equations, normal equation, CONWEP and DDESB, were used for the estimation of overpressure. The investigation shows that the continual use of the explosive welding in a drift may result in considerable damage on the drift.

Key words Explosive welding, Over pressure, CONWEP, DDESB

초 록 광산의 채광장 활용을 위해 갱도 내에서 폭발압접이 계획되었다. 폭발압접의 입사압력에 의해 영향을 받을 것으로 예상되는 갱도의 천단부와 주변 광주의 안정성 분석 실시하였다. 폭풍압의 예측은 일반식, CONWEP 및 DDESB의 식을 이용하였다. 분석결과 폭발압접이 지속적으로 이뤄진다면 광산 채굴적에 상당한 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심어 폭발압접, 폭풍압, CONWEP, DDESB

1. 서 론

효율적인 국토이용과 광산의 경영수지 개선, 채광장 활용의 일환으로 폭발압접(explosive welding or bonding)이 충무화학의 갱도 내에서 계획되었다. 폭발압접이 계획된 지점으로부터 최 근거리 광주까지 20m, 바닥부터 천정까지 높이는 대략 9m이며, 향후 폭발압력 가스배출을 위한 15m×7m정도의 갱도 굴착이 계획되었다. 폭발압접에 사용되는 ANFO는 단계적으로 1톤까지 사용 계획 되었다. 폭발압접으로 발생하는 폭풍압은 불이기발파시 발생하는 폭풍압과 같이 지표면에서 공중에 반구형으로 급속하게 전달될 것으로 예상되며, 이로 인한 인근 광주 및 천정부의

안정성에 미치는 정도를 고려해야 한다.

본 연구는 폭발압접으로 발생하는 폭풍압을 대형 폭발실험을 통한 일반적인 폭풍압 계산식, 폭원부터 거리에 따라 감소하는 폭풍압을 예측하는 미육군공병단의 CONWEP(Conventional Weapons Effects Program)의 폭풍압 계산식 및 체적에 따른 폭풍압을 예측하는 DDESB(Department of Defence Explosives Safety Board)의 폭풍압 계산식을 적용하여 예측하고 광산 암석의 역학적 특성과 비교해 안전율을 산정하였다.

2. 광산의 지질 개요

본광산의 지질은 캠브리아기~오도비스기의 조선누층군 대석회암층군에 속하는 풍춘층, 화절층, 동점규암층, 두무동층 및 막동층이 분포하며 후기에 암맥들이 관입하고 있다. 풍춘층은 본 최고기 암층으로 비교적 폭넓게 분포한다.

본 암층은 치밀, 미립질의 백색 내지 유백색, 회색

¹⁾ 전남대학교 에너지자원공학과

²⁾ 한국광물자원공사

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2010년 5월 31일

심사 완료일 : 2010년 6월 16일

게재 승인일 : 2010년 6월 21일

내지 담회색의 석회암과 회~암회색의 백운암으로 구성되나, 크게 하부 회색 내지 암회색 석회암대, 중부 담회색 내지 회색 백운암대와 상부의 유백색 내지 백색의 석회암대로 구분된다. 하부 석회암대는 미립 내지 세립의 괴상 또는 판상 석회암으로 구성된다. 상부의 유백색 내지 백색 석회암대는 화절층과 경계를 이루며 연속적인 분포를 보이나 일부 단층으로 단절되기도 한다. 화절층은 하부의 풍춘층과 정합 관계를 이루면서 지표면에서 가장 넓은 분포면적으로 나타나며, 구성암석은 석회질 세일, 석회암, 슬레이트로서 이들이 호층을 이루나 하부는 슬레이트가, 상부는 석회암의 분포가 우세하다.

3. 폭발압접

3.1 폭발압접의 개요

화약은 폭발 시 수 μs 내에 초고압 초고온 상태를 형성할 수 있으며, 그 폭발파는 수 km/s의 빠른 속도로 폭약 내를 전파하게 된다. 이러한 화약의 폭발에너지를 이용하여 기계적으로 접합할 수 없는 이종금속을 접합할 수 있는데, 이 방법을 발파압접 또는 폭발압접이라고 한다. 폭발압접 공법으로 접합이 불가능하던 이종금속들을 접합시킬 수 있을 뿐만 아니라 반복하중을 받아 피로현상이 흔한 소재, 대형판재, 용융점의 차이가 큰 금속간의 접합(알루미늄과 탄탈륨 등)도 가능하다. 폭발압접 방법은 접합하고자 하는 금속판의 크기에 따라 그림 1과 같이 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 소형판재의 접합에는 합재(또는 부재; flyer plate)를 모재(base plate)에 경사지게 배치한 경사법을 사용하고, 대형판재의 경우에는 합재를 모재에 일정 거리만큼 평행 이격시킨 평행이격법을 사용한다.

3.2 폭발압접의 원리

폭발압접의 원리 또는 기구를 해석하는 데에는 여러 가지 이론이 있다. 먼저, 접촉표면간의 전단력에 의하여 금속을 용융점 이상으로 가열하기 때문이라는 해석과 접합재질이 큰 압력을 받아서 접합하기에 충분한 변형이 일어나기 때문이라는 해석이 있다. 이 두 가지 해석은 초창기의 폭발압접에서 주로 적용된 해석방법이다. 이와 같은 해석에 대한 제시된 근거로는 접촉면에서 발견되고 있는 용융된 흔적과 소성변형에 의한 압접이다. 그러나 폭발압접에서는 용융이나 소성변형이 일어날 수 있는 충분한 시간이 아니라 대단히 짧은 시간에 접합이 끝나기 때문에 위의 두 가지 해석으로는 폭발압접을 정확하게 해석할 수 없고 제트(jet)현상으로 해석하는 것이 현재 가장 유력한 것으로 알려져 있다. 즉, 화약 폭발 시 형성된 불연속 초고압 충격파의 운동에너지가 합재에 전달되어 합재가 모재에 경사지게 부딪힐 때 순간적으로 제트현상이 발생한다. 이러한 제트 현상에 의하여 두 금속의 표면에 있는 산화피막이나 오염된 피막이 제거되어 접합에 필요한 청결한 표면을 만들고, 동시에 화약폭발로 발생하는 높은 압력으로 인해 접합계면에서 두 금속의 원자가 원자간 인력이 작용하는 거리까지 두 금속의 원자가 서로 접근함으로써 두 금속이 접합하게 된다.

4. 폭발압력의 전파

폭발로 인하여 갑작스런 에너지의 방출로 대기 중에 급격하게 가스압력이 증가하게 된다. 이와 같은 압력의 변화를 폭풍파(blast wave)라고 하는데, 이것은 대기압 상태에서 최고 입사압력(incident pressure: 폭

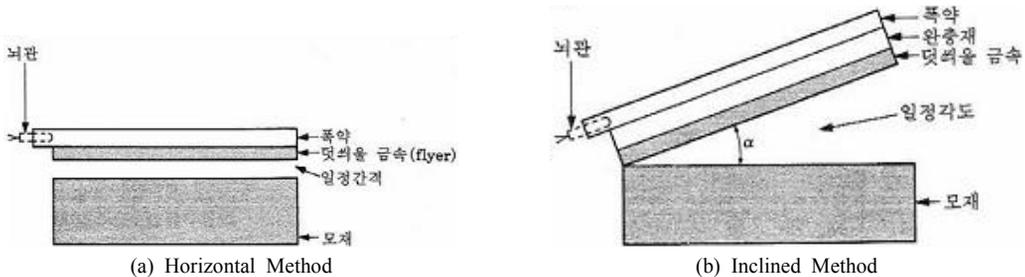


Fig. 1. Schematic Illustration of Blasting Welding.

폭파의 진행방향과 수직한 파면에 작용하는 압력) P_{s0} 까지 거의 순식간에 압력이 상승하는 특징을 가지고 있다. 그림 2는 충격전단파가 어느 한 지점에서 어떤 지점을 지나갈 때, 그 지점에서 시간의 경과에 따라 달라지는 압력의 변화를 보여주고 있다.³⁾ 충격전단이 t_a 시간에 도달하면, 압력은 P_{s0} 로 급상승한 다음 감소하여 t_b 시간 후에 대기압 수준으로 되돌아오는데, 이 단계를 정압단계(duration of positive pulse)라 한다. 압력은 계속하여 대기압 이하로 감소하였다가 (t_b+t_c) 시간에서 대기압으로 복귀하는데 이 구간을 부압단계(duration of negative phase)라고 한다.

특히 부압단계에서는 대기압보다 압력이 낮아지기 때문에 가스입자의 흐름이 반대 방향으로 바뀌는 현상이 나타나기는 하지만 압력의 세기가 그리 크지 않기 때문에 폭풍압 해석 시 정압단계보다 중요시 하지 않아도 된다. 그림 3과 같이 폭약이 지표면에서 또는 지표면 가까이에서 폭발하게 되면 최초의 폭풍파는 곧 지면에 닿아 반사되며, 초기 입사파와 지표면 반사파는 거의 동시에 합쳐져 일종의 단일파로서 반구형으로 주변에 전파된다고 볼 수 있다.

5. 폭발압접의 폭풍압 예측

폭발로 인해 갑작스럽게 방출되는 폭발압력을 예측하는 방법으로는 폭풍압 측정장치를 이용하여 폭풍압을 직접 측정하는 방법이 있으며, 이외에도 간단하게 폭풍압 계산도표를 이용하는 방법과 대형폭발시험을 통해 도출된 일반식을 이용하는 방법, 폭원부터 거리에 따라 감쇄하는 폭풍압을 예측하는 CONWEP에 의한 폭풍압 계산식을 이용하는 방법 및 체적에 따른 폭풍압을 예측하는 DDESB의 폭풍압 계산식을 이용하는 방법 등이 있다. 폭풍압 계산도표를 이용하는 방법

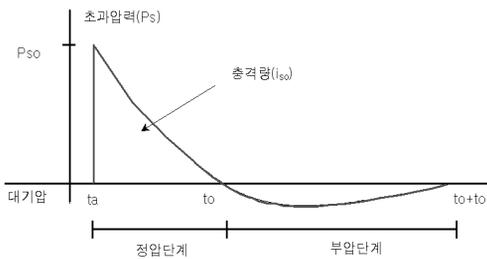


Fig. 2. Free Field Pressure-Time Variation.

은 무한한 공중에서 구형장약이 폭발할 경우에 해당하며, 압력값은 모두 정압상태일 때 적용가능한 도표로서 갱도 바닥에서 실시되는 폭발압접에 적용하기에는 적합하지 않다.

5.1 TNT 당량 계산

본 광산에서는 폭발압접 폭약으로서 ANFO를 고려하고 있다. 그러므로 TNT당량모델²⁾을 이용하여 ANFO 폭발의 연소에너지를 동등한 TNT질량과 수율로 환산하여 거리에 따른 과압의 범위를 폭풍압을 예측하는 일반식, CONWEP식, DDESB식으로 산출하였다.

$$W = \frac{\mu \times M \times E_C}{2000} \tag{1}$$

여기서, W : TNT당량 (lb), μ : 폭발수율(yield of the explosion) 계수 (ANFO 시 0.8 적용), M : ANFO 량 (lb), E_C : 물질의 연소열량 : 980kcal/1kg(TNT) = 1,764Btu/lb이다.

표 1은 식(1)에 의해 ANFO와 TNT간의 당량관계를 계산한 것으로, ANFO 1,000kg은 TNT 706kg에 해당된다.

5.2 CONWEP식에 의한 폭풍압 예측

지표면 폭발시 폭풍압은 폭약의 양으로부터 얻어지는 환산거리를 도입함으로써 계산할 수 있다.⁵⁾ 폭발물 중심에서부터 측정지점까지의 거리(m)를 R, TNT 기준의 폭약량 (kg)을 W라 하면, 환산거리 Z는 다음 식 (2)와 같다.

$$\text{환산거리 } Z = \frac{R}{W^{1/3}} \tag{2}$$

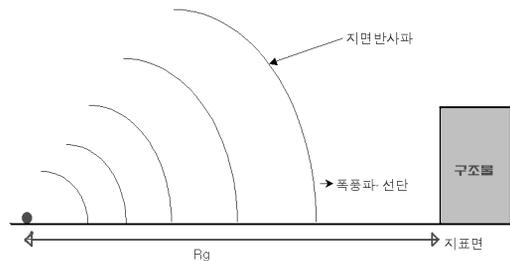


Fig. 3. Surface Burst Blast Environment.

Table 1. TNT Equivalency

ANFO		연소열량 (Btu/lb)	yield of explosion 계수 (ANFO)	TNT 당량	
(kg)	(lb)			(lb)	(kg)
200	441	1764	0.8	311	141
500	1102	1764	0.8	778	353
800	1764	1764	0.8	1,245	565
1000	2205	1764	0.8	1,556	706

Table 2. Scale Distance

거리 (m)	ANFO (kg)	TNT 당량 (kg)	환산거리 (m/kg ^{1/3})	거리 (m)	ANFO (kg)	TNT 당량 (kg)	환산거리 (m/kg ^{1/3})
50	200	141	9.6	9	200	141	1.7
	500	353	7.1		500	353	1.3
	800	565	6.1		800	565	1.1
	1000	706	5.6		1000	706	1.1

Table 3. Peak Overpressure Estimated by CONWEP

거리 (m)	ANFO (kg)	TNT 당량 (kg)	환산거리 (m/kg ^{1/3})	최대입사압력 (Pa)	최대입사압력 (MPa)
50	200	141	9.60	14,591	0.01
	500	353	7.08	22,610	0.02
	800	565	6.05	29,048	0.03
	1,000	706	5.62	32,946	0.03
9	200	141	1.73	404,568	0.40
	500	353	1.27	817,309	0.82
	800	565	1.09	1,159,634	1.16
	1,000	706	1.01	1,364,401	1.36

폭풍압의 최대입사압력(p_o)은 구형 전파에서의 최대입사압력을 구하는 것으로 식(3)과 같으며, p_a 는 101,300Pa를 사용한다.

$$\frac{P_o}{P_a} = \frac{808 [1 + (\frac{Z}{4.5})^2]}{\sqrt{[1 + (\frac{Z}{0.048})^2]} \sqrt{[1 + (\frac{Z}{0.32})^2]} \sqrt{[1 + (\frac{Z}{1.35})^2]}} \quad (3)$$

그러나 지표면 폭발에서의 폭풍압은 구형전파가 아닌 반구형전파이며 지면의 반사효과를 고려하여야 한다. 반구형 전파에 있어 화약 폭발 시 미 육군의 안전거리 산정에 근간이 되며, CONWEP의 계산결과와 일치할 수 있는 대기압은 140,312Pa 정도로 계산된다.

안정성 평가를 위하여 경도 바닥으로부터 천정부까지

의 최단높이 9m, 폭발압접 위치부터 최대 영향 범위 내의 광주 위치를 50m로 가정하고 식(2)에 의하여 산출한 환산거리를 표 2에 보였다.

ANFO 1,000kg 일 때, 폭발압접 위치로부터 50m거리의 광주까지 환산거리는 5.62m/kg^{1/3}이고, 9m 높이의 천정고까지의 환산거리는 1.10m/kg^{1/3}였으며, 이때의 TNT 당량은 705kg으로 계산되었다.

CONWEP의 계산식에 의한 최대입사압력은 식(3)에 의해서 산출하였으며, 반구형 전파에 있어 미육군 안전거리의 근간이 되는 CONWEP의 계산결과와 일치할 수 있는 값인 140,312 Pa를 사용하여 해석하였다. 그 결과 1000kg의 ANFO를 사용했을 경우 50m 이격된 거리의 광주에서의 입사압력은 약 0.03MPa이며, 9m 이격된 천정부에서의 입사압력은 1.36MPa로 산정되었다.

5.3 일반식에 의한 폭풍압 예측

대형 폭발시험을 통한 일반적인 발파풍압 계산식¹⁾은 다음과 같다.

$$P = 16.75 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.575} \quad (4)$$

식에서, P는 폭풍압 측정기로 측정된 폭풍압 (kg/cm²), D는 폭원에서 거리(m), W는 약량(kg)이다.

(4)식은 대형 폭발시험에 의해 얻어진 것이며, 압력치가 약 1MPa에서 0.01MPa 범위 내에 있는 발파풍에 대해서는 매우 적용성이 높으며, 그 감쇠지수가 약 1.6이란 것을 알 수 있다. 결과 계산은 표 4와 같으며, ANFO 1,000kg에 의한 폭발압접 시 최대 입사압력은 50m거리에서 0.11 MPa, 9m거리의 천정고에서 1.65MPa로 산정되었다.

5.4 DDESB의 폭풍압 계산식

폭풍압에 대한 미국 국방부 화학안전위원회(DDESB)의 제안식⁴⁾은 밀폐된 체적 내에서 폭약의 폭발로 인한 폭풍압의 크기를 예측하는 식으로 폭약량과 밀폐된 체적의 함수로 다음의 (5)식과 같다.

$$P_W = 895 \left(\frac{W}{V_T} \right)^{\frac{1.35}{3}} \quad (5)$$

여기서, P_w : 유효과압(effective overpressure) (psi), W : 장약량(charge weight) (lb), V_T : 체적의 총부피(total volume) (ft³) 이다.

안전율이 높은 계산을 위해 폭발 유효거리를 천정고 9m, 폭발압접 폭원으로부터 최단거리에 있는 광주까지 유효반경을 25m로 하였을 때 폭발압접시 채굴적에 대한 폭풍압을 계산하였으며, 향후 가스배출 등을 위한 약 15m×7m 폭으로 개발되는 갱구부의 영향은 무시하였다.

표 5에서 ANFO 500kg일 때 폭발 입사압력은 0.36 MPa, ANFO 1,000kg일 때 폭발 입사압력은 약 0.50 MPa 계산되었다.

6. 폭풍압에 의한 갱도의 영향 평가

6.1 폭풍압에 의한 광주 및 천정부의 피해기준 제안

폭풍압에 의한 피해기준이 가옥 등에 대해서는 제시되었으나, 암반구조물에 대해서는 아직 특별한 피해기준이 정해지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 폭

Table 4. Peak Overpressure Estimated by Normal Equation

거리 (m)	ANFO (kg)	TNT당량 (kg)	환산거리(m/kg ^{1/3})	입사압력 (MPa)
50	200	141	9.60	0.05
	500	353	7.08	0.08
	800	565	6.05	0.10
	1,000	706	5.62	0.11
9	200	141	1.73	0.71
	500	353	1.27	1.14
	800	565	1.09	1.47
	1,000	706	1.01	1.65

Table 5. Peak Overpressure Estimated by DDESB

ANFO (kg)	ANFO (lb)	Total volume(ft ³)	입사압력		
			(psi)	(kg/cm ²)	(MPa)
200	441	623,979	34.19	2.40	0.24
500	1,102	623,979	51.65	3.63	0.36
800	1,764	623,979	63.81	4.49	0.45
1,000	2,205	623,979	70.55	4.96	0.50

풍압이나 밀폐된 공간에서 폭발압접의 영향을 분석하기 위하여 폭발압력을 주변 암반의 물성치와 비교분석함으로써 채굴공동의 안정성 여부를 판단하고자 하였다. 암반의 압축파괴 영역에서 안전을 산정을 위해서는 정역학적으로 Mohr-Coulomb이나 Hoek-Brown의 파괴조건식 등을 적용하거나 동적파괴조건을 적용하는 것이 타당하나 폭풍압에 의한 압축파괴는 자유면 부근에서 발생할 것이어서 단축압축강도를 초과하는 경우 압축파괴가 발생하는 것으로 간주하고 안전율을 산정하였다. 또 광주나 천단부의 파괴는 암반의 인장강도를 초과한 압력으로 인한 국소 연약층에서의 박리파괴, 혹은 피로파괴가 예상된다. 따라서 안전율은 식 (6)과 같이 암반의 압축강도(σ_s)와 암반의 인장강도(σ_t)를 최대 초과압력(P_s)으로 나누어, 안전율 S_f 가 1이상일 때 암반의 강도가 폭발입사 압력보다 크므로 안정한 것으로 평가하였다.

$$S_f = \frac{\sigma_t}{P_s} \quad \text{또는} \quad S_f = \frac{\sigma_s}{P_s} \quad (6)$$

6.2 광산 암석의 역학적 특성 및 폭풍압에 대한 안전율
본 채굴적은 풍촌층에 위치하며, 그 상부에는 두께

1m 정도의 지층들이 채굴적 상부로부터 약 10m 높이 까지 연약대를 형성하며 존재한다. 풍촌층 암석의 파괴강도는 83MPa정도이지만, 암반분류 결과 RMR이 평균 59.7이므로 현지암반의 강도는 2.5MPa, 인장강도는 0.2MPa 정도로 추정된다. 또 채굴적 직상부는 연약대 층으로서 안전율을 고려해 풍촌층 암반강도의 50%까지 약화될 수 있다. 채굴적 풍촌층의 역학적 특성 및 안정성 평가를 위한 입력자료는 각각 표 6 및 표 7과 같다.

표 8은 ANFO 500kg, 1000kg으로 폭발압접 하였을 때 산정방법별 입사압력과 암반의 압축강도 및 인장강도를 비교한 것이다. 표에서 폭발 압접시 50m 거리에 있는 광주 등의 안전율은 1보다 컸으나 9m 높이의 천정고의 안전율은 1보다 작은 것으로 분석되었다. DDESB방법에 의한 구경도 채굴적의 천정고 9m, 반경 25m 범위 내에서 ANFO 1,000kg까지 폭발압접시 폭풍압력을 산정한 결과 암반의 압축파괴 영역에서 안전율은 2~4으로 평가되었으나, 암반의 인장파괴 영역에서 안전율은 1이하로 평가되었다.

그림 4의 (a), (b)는 각각 일반식과 CONWEP에 의한 폭발압접시 거리별 최대 입사압력을 나타낸 것으로, (a)와 같이 인장파괴 영역에서 20m거리 안에 있

Table 6. Mechanical Characteristic of Rock Mass in Chung-Mu Chemistry

구분	K=0.90, $\sigma_h=3.6$ MPa, $\sigma_v=4.0$ MPa, RMR=59.7							
	파괴상수				강도		변형계수	
변수	m	s	c (MPa)	ϕ	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)	ν
실험치	7.9	1.0	14.7	43.7	83	6.5	32	22
보정치	0.44	0.0012	0.81	25.0	2.54	0.20	17.5	0.20
감쇠율(%)	94.4	99.9	94.5	42.8	96.9	96.9	45.3	99.1
적용	0.40	0.0012	0.80	25.0	2.5	0.20	17	0.20

Table 7. Input Data for Stability Analysis

구분	K=0.90, $\sigma_h=3.6$ MPa, $\sigma_v=4.0$ MPa, RMR=59.7							
	파괴상수				강도		변형계수	
변수	m	s	c (MPa)	ϕ	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)	ν
채굴적 및 하반	0.40	0.0012	0.80	25.0	2.5	0.20	17	0.20
채굴적직상부(50%)	0.20	0.0006	0.4	12.5	1.25	0.10	8.5	0.10
채굴적상부암(70%)	0.28	0.0008	0.6	17.5	1.75	0.14	11.9	0.14

Table 8. Estimation of Incidence Overpressure by Explosive Welding

구분		CONWEP		일반식		DDESB		
		500kg	1,000kg	500kg	1,000kg	500kg	1,000kg	
광주등 (50m)	입사압력(MPa)	0.02	0.03	0.08	0.11			
	암반	압축(1.25)	62.5>	41.7>	15.7>	11.4>		
		인장(0.10)	5.0>	3.3>	1.3>	0.9<		
천정 (9m)	입사압력(MPa)	0.82	1.36	1.14	1.65			
	암반	압축(1.25)	1.5>	0.9<	1.3>	0.8<		
		인장(0.10)	0.1<	0.1<	0.1<	0.1<		
반경25m 높이9m	입사압력(MPa)					0.36	0.50	
	암반	압축(1.25)					3.5>	2.5>
		인장(0.10)						0.3<

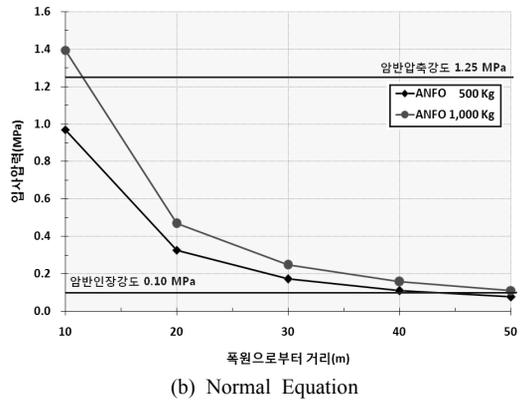
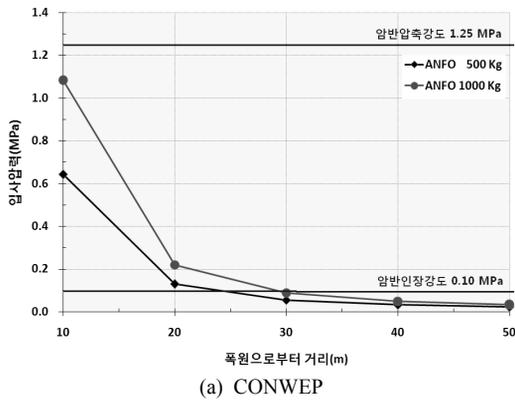


Fig. 4. Peak Overpressure Estimated by Distance with CONWEP and Normal Equation.

는 광주는 500kg이상의 ANFO에 의한 폭발압접시 입사압력의 영향권 내에 있는 것으로 평가되었다.

Fig. 4의 (b)는 일반식에 의한 최대입사 압력과 암반의 강도를 나타낸 것이다. 암반의 인장파괴 영역에서 500kg 이상의 ANFO 사용시 폭원으로부터 40m거리 안에 있는 광주는 폭발압접시 입사압력의 영향권 내에 있는 것으로 분석되었다.

7. 결론

- 1) 폭풍압에 대한 일반식과, CONWEP에 의한 산정 결과가 비슷한 양상을 보였다. 일반식에 의한 폭풍 압은 압력차가 거의 1MPa에서 0.01MPa 범위로 한정되어 있어 CONWEP의 폭풍압 추정식보다 편차가 더 크다.
- 2) CONWEP에 의한 최대입사압력은 암반의 인장파

괴 영역에서 20m거리의 광주는 500kg이상의 ANFO 폭약에 의하여 폭발압접 압력의 영향권 내에 있는 것으로 분석되었다.

- 3) 일반식에 의하여 최대 입사압력을 평가한 결과 암반의 인장파괴 영역에서 폭원으로부터 40m거리 안에 있는 광주는 500kg이상의 ANFO에 의한 폭발압접시 입사압력의 영향권 내에 있는 것으로 분석되었다.
- 4) 채굴적의 천정고 9m, 반경 25m범위 내에서 ANFO 1,000kg에 의한 폭발압접 시 DDESB에 의한 폭풍 압력은 암반의 압축파괴 영역에서 안전율은 2~3으로 평가되었으나, 인장강도 영역에서는 안전율이 1이하로 평가되어 지속적으로 폭발압접이 이루어진다면 천정면의 안정성에 영향을 크게 미칠 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 기경철, 김일중, 2002, 산학인을 위한 발파공학, pp. 232-233.
2. 김운영, 이성태, 이영수, 김선영, 이상걸, 2000, 폭발물 안전양거리 감소방안, 육군사관학교 화랑대연구소, p. 33, pp. 36-38.
3. Crowl W. K., 1969, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Technical Manual TM 5-1300, U. S. Army, Navy, and Air Force, U. S. Government Printing Office, Washington D.C., p. 40, pp. 77-89.
4. Joachim, Charles E. and LundermanChristo V., 1994, Parameter Study of Underground Ammunition Storage Magazines Results of Explosion Tests in Small-scale Models, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg, MS, pp. 4-5.
5. Ming-Wei Hsieh, Jui-Pin Hung, and De-Jen Chen, 2008, Investigation on the Blast Resistance of a Stiffened Door Structure, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 16, No 2, pp. 149-157.



양 형 식

전남대학교 에너지자원공학과 교수

Tel : 062)530-1724

E-mail : hsyang@jnu.ac.kr



장 명 환

한국광물자원공사 지원기획팀 차장

Tel : 02)840-5776

E-mail : mhjang@kores.or.kr



장 형 두

전남대학교 대학원 에너지자원공학과 석사과정

Tel : 02)840-5776

E-mail : mhjang@kores.or.kr