

構造物 發破의 폭굉압력에 따른 폭발음의 고찰

Study on Sound Pressure Level by Detonation Pressure in
Structural Demolition by Explosives

*金 萬 中
Kim, Man Jung

1. 머리말

근년에 이르러 구조물 발파해체에 대한 기술이 국내 자립기술로 확고히 서게 되기까지는 오랜 연구와 시행착오를 거치면서 이루어 온 결실이라고 할 수 있다.

붕괴의 기술적인 측면도 중요하지만 향후 도심지 내 발파시 주변 소음 및 진동, 비석 그리고 분진 등의 환경적 영향이 더욱 중요한 고려사항이라고 하겠다.

그 중에서도 폭발로 인한 음의 영향은 폭발에 의해서 발생한 대기진동파로서 음파와 충격파로 나눈다. 음파는 공기 중을 전파하는 탄성파로 매체 입자는 파의 진행방향과 동일방향으로 전후운동을 하고 전파하는 것은 음에너지일 뿐이고 기체분자 자체는 아니다. 이처럼 기상의 흐름현상이 없고 전파속도는 밀도, 온도 그리고 비열비에 따라 결정되며 음의 세기에는 관계가 없다. 충격파는 진파속도가 충격파의 세기에 관계하며 음파의 속도보다 빠르고 압력진폭이 크다. 구조물 발파시 가장 중요하게 여겨야 할 것은 진동이라고 생각하는

사람들이 많은데 폭발에 의해 발생한 공기충격파에 의해 깨지기 쉬운 취약한 주변의 구조물 등은 간과하기 쉽다. 구조물 발파시 공해발생은 건물자체중량이 일정 높이에서 연속적으로 붕괴되는 낙하충격에 의한 진동, 폭발음, 분진, 비석으로 크게 구분할 수 있다. 낙하충격에 의한 진동은 붕괴시 버력물에 의해 충격이 상당히 흡수되어 예상보다 크지 않지만 폭약의 폭발로 인한 대기충격파는 방호가 잘못되면 취약구조물에 더 큰 피해를 줄 수가 있다. 이것은 폭굉압의 영향이며 사용 폭약량과 폭굉압력에 따라 예측이 가능하다.

2. 충격파에 의한 임계거리

폭약이 폭발하면 발생에너지는 공기에 전달되어 주위의 매체를 강하게 압축한다.

이러한 파동을 충격파라 하는데 폭약을 지표, 암반, 콘크리트 속에서 폭발시키면 대기 충격파가 형성되어 방사상으로 확대되고 어느 정도 떨어진 곳까지 전파되어 감쇠하며 음파로 된다. 충격파에서 음파로 전이되는 거리를 임계거리라고 하는데

화약류관리기사, 한국건물발파기술사사무소 소장

다이너마이트를 지표상에서 폭발시킨 경우에 폭약량 1000kg을 폭발시킨 경우의 임계거리는 약 85m, 100kg은 약 40m, 10kg은 약 18m, 그리고 1kg의 경우는 약 8m 정도이다.

이것은 차폐시설이 없는 상태에서의 폭발조건이므로 대부분 구조물 발파시에는 비산방지막 또는 방호시설을 한 차폐된 상태에서 발파되고 건물크기와 형태에 따라 다르겠지만 대부분 아무리 폭약량이 많아도 300kg 이내이므로 상기의 임계거리는 크게 줄어든다고 할 수 있다. 그러나 사용하는 폭약량이 적을 지라도 충격파에 의한 임계거리 및 비석거리, 분진 등에 대비하여 몇 배의 안전율을 감안한 대피 및 경계구역이 이루어져야 할 것이다.

장전되는 층의 차폐시설은 보안상 필수적이라 할 수 있으며 깨지기 쉬운 창문 등과 같은 시설물이나 주택 및 건물 등의 밀집된 지역일수록 폭굉압력이 낮은 것을 사용하는 것 이외에도 보강된 차폐시설을 하는 것이 주변환경을 고려한 안전한 발파라고 할 수 있다.

3. 폭굉압력

앞서 언급한 바와 같이 충격파의 세기는 폭약의 폭굉압력에 영향을 받게 되며 이 폭굉압력은 폭약의 비중(ρ)과 폭발속도(D)에 따라서 크게 변화한다. 폭굉압력은 식(1)로부터 구할 수 있다.

$$P_d = 0.000424D^2\rho\{1 - (0.543\rho) + (0.193\rho^2)\} \quad (1)$$

여기서,

P_d : 폭굉압 (g/cm^2),

D : 폭속 (cm/sec), ρ : 폭약비중 (g/cm^3)

예로서 다이너마이트(Himite 5500)의 폭속

5600m/sec, 비중 $1.5g/cm^3$ 의 폭굉압력(P_d)은

$$\begin{aligned} P_d &= 0.000424 \times 560000^2 \times 1.5 \times \\ &\quad \{1 - (0.543 \times 1.5) + (0.193 \times 1.5^2)\} \\ &= 123608889.6 \text{ g/cm}^2 = 123608.89 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{Kbar로 환산하면 } &123608.89 \text{ kg/cm}^2 \times 9.8 \times \\ &10^{-4} \text{ Kbar} = 121.14 \text{ Kbar} \end{aligned}$$

(1 bar = 1.0197 kg/cm², 1 Kbar = 1019.7 kg/cm²)

(1 kg/cm² = 0.9807 bar = 0.0009807 kbar $\approx 9.8 \times 10^{-4}$ Kbar)

근사적으로 C-J 점에서의 폭굉압력 계산에 식(2)를 사용하기도 한다.

$$P_d \approx \frac{1}{4} \times \rho \times D^2 \times 10^{-5} \quad (2)$$

P_d : 폭굉압력 (Kbar), ρ : 폭약비중(kg/m^3),

D : 폭속 (m/sec)

동종의 폭약으로서 비교하면 폭속이 5600m/sec, 폭약비중이 $1.5g/cm^3$ 일 경우의 폭굉압은

$$\begin{aligned} P_d &= \frac{1}{4} \times \rho \times D^2 \times 10^{-5} \\ &= \frac{1}{4} \times 1.5 \times (5600)^2 \times 10^{-5} \\ &= 117.6 \text{ Kbar} = 119916.72 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

폭굉압은 식(1)로부터 약 121 Kbar이고 식(2)로부터 117 Kbar이므로 어느 정도 일치한다고 볼 수 있다. 이상과 같이 폭약의 폭발속도와 비중을 알면 폭굉압력은 구할 수 있으므로 현재 상용하고 있는 각종 폭약에 대한 폭굉압력을 계산하면 <표 1>과 같은데 구조물 발파에 주로 사용되는 화약류로서는 파쇄 및 절단용으로 다이너마이트(Himite 5500), 에멀전폭약(Newmrite II 5500, Emulite 100), 정밀폭약 I, II 그리고 FLSC 등

을 주로 사용하며 기폭용으로 주로 도폭선 및 전
기뇌관, 비전기식뇌관 등이 사용된다.

구조물 발파시 사용하는 화약류로서는 다이너마
이트, 에멀전폭약과 같은 높은 폭속의 성능 즉, 높
은 폭굉압력을 갖는 것 이외에도 구조체의 부재별
로 용도에 맞게 폭굉압력이 낮은 제어발파용 정밀
폭약같은 제품을 사용하기도 한다. 폭굉압력이 높
으면 일반적으로 단위부피당 폭약량이 갖는 파괴
에너지가 크지만 한편으로는 폭발음의 공해가 크
기 마련이다. 발파공해 측면과 기폭기술의 측면으
로 보아 화약류의 선택에 있어서 반드시 높은 폭
발압력이 요구되는 것은 아니다. 그 이유는 구조
물 발파는 건물자중을 최대한 이용하므로 주요

지지구조의 파쇄가 핵심이므로 완전파쇄가 아닌
폭굉압력이 낮은 폭약으로도 국부 파쇄 또는 균열
만 일으켜 놓아도 붕괴를 유도할 수 있기 때문이
다

4. 폭굉압력에 따른 음레벨 추정

<그림 1>과 같은 자유면을 갖는 콘크리트 속에
폭약을 공극이 없이 장전하고 폭발시켰을 경우 천
공입구 상단의 자유면과 R 지점에서의 공기 중
의 폭발음 에너지와 음레벨을 추정할 수 있다. 공
기 중을 투과 후 탄성파의 경계면에서의 최대압력
 P_a 는 식(3)과 같다.

<표 1> 화약류의 폭굉압력

구분	비중 g/cm ³	폭속 m/sec	폭굉압력 (P_d)			
			식(1)에 의한 계산값		식(2)에 의한 계산값	
			kg/cm ²	Kbar	kg/cm ²	Kbar
Himite 5500	1.5	5600	123608.89	121.14	119916.72	117.60
Himite 6000	1.6	6700	190418.87	186.61	183097.33	179.56
Himite SM 5500	1.5	5600	123608.89	121.14	119916.72	117.60
Himite SM 6000	1.6	6700	190418.87	186.61	183097.33	179.56
Hi-booster	1.5	7500	221715.56	217.28	215095.52	210.94
Cast Hi-booster	1.6	7400	232286.42	227.64	223355.09	219.04
Newmite 4000	1.1	4500	60089.38	58.89	56787.10	55.69
Newmite II 5500	1.2	5500	96398.16	94.47	92537.78	90.75
Emulite 100	1.2	5000	79667.90	78.07	76477.50	75.00
함수폭약 100	1.1	4800	68368.36	67.00	64608.19	68.36
함수폭약 300	1.1	3500	36350.36	35.62	34353.69	33.69
함수폭약 700	1.1	4800	68368.36	67.00	64608.19	68.36
초안폭약	1.1	3500	36350.36	35.62	34353.69	33.69
정밀폭약 I	1.0	4400	55356.16	54.25	49353.48	48.40
정밀폭약 II	1.0	3900	41918.76	41.08	38779.19	38.03
ANFO	0.9	2800	19973.78	19.57	17987.51	17.64
도폭선	1.7	7000	224160.37	219.68	212352.53	208.25

(주 1) 비중 및 폭속은 제품 카탈로그 기준

(주 2) 도폭선의 폭속은 비중 1.7일때의 PETN의 폭속기준

$$P_a = P_d \left(\frac{a}{B} \right)^{1.5} \left(\frac{2 \rho_o C_o}{\rho_o C_o + \rho_1 C_1} \right) \quad (3)$$

P_a : 공기 중을 통과 후 탄성파의 경계면에서의 최대압력 (g/cm²)

P_d : 폭약의 폭굉압력 (g/cm²)

a : 천공의 반경 (cm)

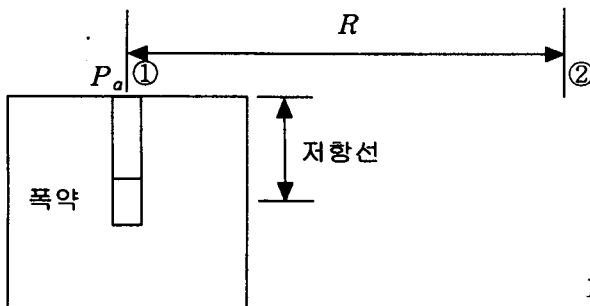
B : 저항선 (cm)

ρ_o : 공기의 밀도 (g/cm³)

C_o : 공기중의 탄성파 속도 (cm/sec)

ρ_1 : 콘크리트 밀도 (g/cm³)

C_1 : 콘크리트의 탄성파 속도 (cm/sec)



<그림 1> 폭발압력 측정 및 음레벨 측정을 위한 모식도

콘크리트의 압축강도와 탄성파속도와의 관계는 식(4)를 적용하여 추정하면,

$$C = 4.1 + 1.7 \times 10^{-3} \sigma_c \quad (4)$$

식(4)로부터 콘크리트의 압축강도 $\sigma_c = 210$ kg/cm² 일 때

$$C = 4.1 + 1.7 \times 10^{-3} \times 210 = 4.457 \text{ km/sec} \\ = 4457 \text{ m/sec 이다.}$$

공기 중에 노출된 기폭용으로 이용되는 도폭선의 경우 공기 중을 통과 후 탄성파의 경계면에서의 최대압력 P_a 는 매질이 공기이므로 공기의 밀도 ρ_o , 공기중의 충격파 전파속도를 C_o 로 하면, 폭약과 공기와의 경계면에 있어서 발생하는 최대압력 P_a 는 식(5)와 같다.

$$P_a = \frac{2 \rho_o C_o}{\rho_o C_o + \rho_1 D_1} \times P_d \quad (5)$$

여기서,

P_a : 공기 중을 통과 후 탄성파의 경계면에서의 최대압력 (g/cm²)

ρ_o : 공기의 밀도 (g/cm³)

C_o : 공기중의 충격파 전파속도 (cm/sec)

ρ_1 : 도폭선의 폭약비중 (g/cm³)

D_1 : 도폭선의 폭속 (cm/sec)

P_d : 도폭선의 폭굉압력 (g/cm²)

도폭선의 예를 들면 공기의 밀도가 1.2×10^{-3} g/cm³, 음파속도가 3.4×10^4 cm/sec, 폭약비중이 1.7 g/cm³, 폭속이 7.0×10^5 cm/sec 일 때의 폭약과 공기와의 경계면에 있어서의 최대압력은

$$P_a = \frac{2 \times 1.2 \times 10^{-3} \times 3.4 \times 10^4}{1.2 \times 10^{-3} \times 3.4 \times 10^4 + 1.7 \times 7.0 \times 10^5} \times 224160370 \\ = 15370.47 \text{ g/cm}^2$$

식 (3)을 적용하여 구조물 발파에 주로 사용되는 폭약에 있어서 공기 중을 통과 후 탄성파의 경계면(<그림 1>의 ①지점, 단 도폭선 제외)에서의 공경과 저항선별 최대압력은 <표 2>와 같다.

<표 2> 공기 중을 투과 후 탄성파의 경계면에서의 최대압력

구분	공기 중을 투과 후 탄성파의 경계면에서의 최대압력 (P_a) g/cm ²			
	공경 34mm		공경 38mm	
	저항선		저항선	
	30cm	45cm	30cm	45cm
Himite 5500	122.10	66.45	144.27	78.53
Newmite 4000	59.36	32.31	70.14	38.18
Newmite II 5500	95.23	51.83	112.51	61.25
Emulite 100	78.70	42.83	92.98	50.62
정밀폭약 I	54.68	29.76	64.61	35.17
정밀폭약 II	41.41	22.54	48.93	26.63
도폭선	15370.47			

탄성파의 경계면에서 폭발 최대압력은 화약류 자체가 갖는 폭발압력에 비하여 공기 중을 투과 후 탄성파의 경계면에 도달하게 되면 최대압력은 공기의 완충효과로 인하여 급격히 감소하게 되며 동일 공경에서 저항선이 클수록 감소하며, 공경이 다를 경우 공경이 적을수록 폭약량이 줄어들게 되므로 감소한다.

이제 폭발지점의 바로 상단의 자유표면지점(<그림 1>의 ①지점) 및 100m 지점 (<그림 1>의 ②지점)에서의 음레벨을 구해보면 폭약의 폭발지점으로부터 벗어난 자유표면 지점의 최대압력 P_a 에 대해 폭발음원으로부터 1초간에 방출되는 음의 에너지에 대한 파워레벨을 L_a 라고 하면 식(6)과 같다.

$$L_a = 10 \log \frac{J_a}{10^{-16}} \quad (dB) \quad (6)$$

이 지점에서의 측정된 음 에너지 J_a 는 식 (7)과 같다.

$$J_a = \frac{\left(\frac{P_a}{\sqrt{2}}\right)^2}{\rho_o C_o} \quad (\text{erg/cm}^2 / \text{sec})$$

$$= \frac{\left(\frac{P_a}{\sqrt{2}}\right)^2}{\rho_o C_o} \times 10^{-7} \quad (\text{watt-s/cm}^2) \quad (7)$$

100m 지점에서의 음에너지 J_{100} 는 식(8)과 같다.

$$J_{100} = \frac{J_a}{2\pi \times 100^2} \quad (\text{watt-s/cm}^2) \quad (8)$$

100 m 떨어진 지점에서의 음레벨 L_{100} 은 식 (9)와 같다.

$$L_{100} = 10 \log \frac{J_{100}}{10^{-16}} \quad (dB) \quad (9)$$

식 (6)~(9)를 이용하여 각종 화약류별로 <그림 1>의 ①지점 L_a , ②지점 L_{100} 의 공경 34mm와 공경 38mm에 대하여 저항선에 따른 산출된 추정 폭발음은 <표 3>과 같다.

<표 3> 발파공경에 따른 파워레벨 (단위 : dB)

구분	공경 34mm				공경 38mm			
	저항선							
	30cm		45cm		30cm		45cm	
	0m	100m	0m	100m	0m	100m	0m	100m
Himite 5500	172	124	167	119	173	125	168	120
Newmite 4000	166	118	160	112	167	119	162	114
Newmite II 5500	170	122	165	117	171	123	166	118
Emulite 100	168	120	163	115	170	122	164	116
정밀폭약 I	165	117	160	112	166	118	161	113
정밀폭약 II	163	115	157	109	164	116	159	111
도폭선	166(노출된 상태)							

<표 3>은 밀폐되지 않은 개방된 상태에서의 추정값이므로 방호조치를 취한 상태에서는 산출된 값보다 약 30 dB 정도는 감해주어야 하며 이는 81~126 dB 정도가 된다. 장약공경이 작은 쪽이 폭발음이 낮을 뿐만 아니라 저항선을 길게 취하는 것이 폭발음이 감소된다. 벽식 구조 발파의 경우는 벽체의 짧은 저항선으로 말미암아 폭발소음이 약간 커지게 되는데 이것은 저폭속, 저비중 폭약의 사용으로 저감되며 또한 파쇄도 효과적이다. 도폭선의 경우는 노출된 상태에서 기폭 되므로 매우 높은 값을 가지나 이것은 쇼크튜브로 대체하여 폭발음의 방지가 가능하다. 일상생활에서 115 dB 이상이 연속되면 많은 고통을 받게 되며 또한 창문 일부의 유리가 깨지는 정도가 169 dB 이다. 이 정도 이상이 되기 위해선 폭원과 탄성파의 경계에서 발생하는 정도이다. 일반적으로 180 dB 이하는 음파로 보고 그 이상은 충격파로 여기고 있다. 따라서 구조물 발파시 발생하는 폭풍압에 의한 피해는 없다고 봐야 할 것이다.

구조물 발파는 지정된 시간에 충분한 예고를 한 상태에서 순간적으로 발파되므로 고통은 없다고 하겠다. 다만 오해하기 쉬운 것은 주변 창문이 깨지는 것은 비석에 의한 것이 주원인이 되는데 이를 폭풍압에 의한 원인으로 생각하기 때문이다. 또한 건물 발파시 몇 ton 이상의 양을 사용하여 발파하는 것으로 알고 있지만 건물의 발파는 지지구조의 완전한 파쇄보다는 붕괴되기 쉽게 소량을 사용하여 어느 정도의 파쇄만 일어나도록 유도하는데 있기 때문이라는 것을 간과하기 때문이다.

5. 맺음 말

화약류의 폭풍압력은 동적인 파괴적 작용과 관계되며 파괴력과 폭발음에 영향을 준다. 폭풍압이 높을수록 폭발음도 커지게 되며 그에 따라 폭발음을 방지하는 기법 또한 중요하다. 구조물 발파의

기술은 크게 화약류의 기폭기술과 구조체의 정확한 이해, 그리고 발파로 인한 환경적 영향 예측 및 대응 등으로 말할 수 있다. 화약류의 폭풍압력을 통한 예측은 그 한 예로 보면 좋을 것이고 보다 다양한 분석기법을 통하여 면밀하고 신중한 방호대책이 뒤따라야 할 것으로 본다.

화약류를 사용함으로써 인해 발생 가능한 모든 예측을 추정해 보는 것은 주변환경을 최대한 고려한 위해방지 기술이며 붕괴기술보다 더 중요하다고 할 수 있다.

구조물 발파가 국내에서 시작된 지도 어언 10여년이 흘렀다. 그 동안 필자가 10여 년간 쌓아온 시공경험을 바탕으로 국내의 기술발전과 구조물 발파기술의 새로운 틀이 다시금 다져져야 한다고 다짐해본다.