

최소저항선과 자유면의 크기가 발파진동에

미치는 영향 고찰

두준기, 양형식
청석엔지니어링, 전남대학교

1. 서 론

발파진동은 암반을 파괴하기 위하여 천공한 구멍 속에 장전한 폭약의 폭발로 발생하는 폭굉파가 지반을 통하여 확산되는 과정에서 발생하는 것으로서, 인체와 동물의 생활환경을 저해하고, 주변의 건조물과 지반 등에 균열을 발생시켜 공해를 야기한다. 폭약이 발파공 내에서 폭발되어 발생하는 진동은 폭약의 종류와 폭약량에 의해서 진동의 크기가 다르게 발생되고, 동종, 동량의 폭약인 경우에도 발파공을 구속하는 저항력(이하 구속력으로 표기)에 따라 진동의 크기가 다르게 발생되며, 전파되는 거리에 의해서도 다르게 나타난다. 발파공의 위치별로 발파공의 구속력에 영향을 미치는 요소는 어떤 것이 있으며, 특히 최소저항선과 자유면의 크기가 발파진동에 어떤 영향을 미치는가를 고찰하여 발파진동을 제어하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 발파진동을 결정하는 요소

발파진동을 결정하는 요소로는 폭약의 종류, 폭약량, 발파공의 구속력, 전파거리 및 방향 등을 들 수 있으며 발파공의 구속력은 암반의 강도, 천공각도, 최소저항선, 자유면의 수, 자유면의 크기, 자유공간의 크기, 투사각, 전색상태, millisecond blasting effect, 장전비중과 디커프링 효과 등에 의해 결정된다. 이러한 요소들에 의해서 결정되는 발파진동을 제어하기 위해서는 발파공의 위치별로 어떤 요소가 발파진동에 직접적인 영향을 미치는가를 파악하고 영향을 미치는 요소에 대한 진동발생 특성을 분석하여 대책을 수립해야 한다.

3. 발파진동에 영향을 미치는 진동발생 특성

발파진동에 영향을 미치는 요소별 진동발생 특성은 암반이 강하면 진동이 크게 발생되고 암반이 약하면 적게 발생되며, 최소저항선이 길면 진동이 크게 발생되고 짧아지면 진동이 적게 발생된다. 자유면의 수가 많으면 발파진동이 적고, 적으면 크게 발생된다. 일반적으로 자유면의 크기가 크면 발파진동이 적게 발생되고, 자유면 크기가 적으면 진동이 크게 발생되는데, 자유면의 크기가 최소저항선거리의 약 4배 이상에서는 진동의 크기에 영향을 미치지 못한다. 투사각은 크면 클수록(평행일 때 최대) 진동이 적어지며, 자유면이 형성하는 공간의 크기는 발파에 의해 파쇄된 암편의 배출과 연관이 있고 자유공간이 협소하거나 적어서 파쇄된 암편의 배출이 불가능한 경우에는 폭력의 팽창을 억제하여 발파진동이 크게 발생된다. Millisecond Blasting 효과는 전 발파공의 폭력이 완전히 소멸되기 전에 후

발파공이 폭발되면 암석의 파괴를 조장하는 효과를 가지게 되어 진동이 적게 발생된다. 발파공에 장전하는 폭약의 장전비중이 크면 발파진동이 크게 발생되고 적으면 작게 발생된다.

터널발파에서 발파진동에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 최소저항선과 자유면의 크기, 자유면의 수이다.

4. 자유면의 크기와 최소저항선 거리가 발파진동에 미치는 영향

(1) V-cut 발파에서의 자유면의 크기가 발파에 미치는 영향.

일반적으로 발파진동은 장약량에 의해 발파진동의 크기가 결정되는 것으로 알려져 있다. 그런데 장약량은 자유면의 크기와 최소저항선 거리에 의해 결정된다. 장약량은 자유면의 크기가 동일한 경우에는 최소저항선 거리에 의해 정해지고, 최소저항선 거리가 동일한 경우에는 자유면의 크기에 의해 결정되는 것을 알 수 있다.

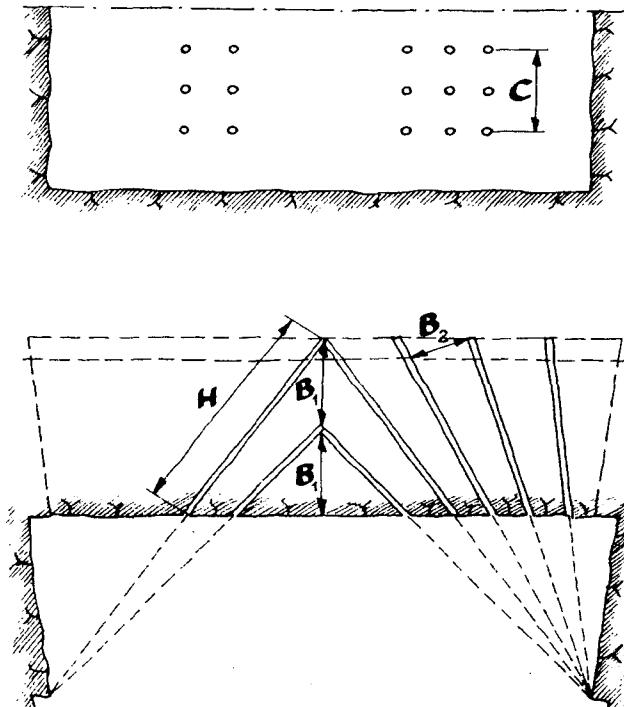


그림 1. 보조심발공을 배치한 V-cut 발파

발파진동을 결정하는 장약량이 발파공의 구속력을 결정하는 변수에 의해 결정되는 것은 동일한 장약량인 경우라 할지라도 발파공의 구속력에 따라 발파진동이 다르게 발생됨을 의미한다. 자유면의 크기가 발파진동에 미치는 영향은 V-cut 발파에서 가장 잘 나타난다. V-cut 발파에서 심발공의 발파진동을 감소시키기 위하여 그림 1.과 같이 보조심발공을 배열하여 최소저항선 거리를 1/2로 줄여 발파를 하였을 때, 최소저항선 거리가 1/2로 감소하였음에도 최소저항선 거리의 감소효과가 발생되지 않고 원래의 최소저항선 거리에 의해 산출되는 장약량과 거의 유사한 장약량을 장전해야 발파가 가능하고 발생하는 진동의 크기도 거의 유사한 값으로 나타난다. 이와 같은 현상은 발파공에 대한 자유면은 파쇄

된 암편이 배출되기에 충분한 면적과 공간을 유지해야 구속력이 적게 발생되는데 보조심발공에 의해 형성된 새로운 자유면이 썩기 형상으로 형성되어져 최소저항선거리를 결정하는 정점부의 면적이 거의 없거나 선형을 이루어 자유면으로 이용되기에 적합한 공간 면적을 갖추지 못한 상태에서 최소저항선 거리로부터 장약량을 산출하면 자유면 크기 효과에 따른 구속력이 크게 발생되어 약장약발파 현상에 의한 공발현상이나 잔류공의 길이가 길어지는 발파가 이루어져 발파 효율이 낮고 진동이 크게 발생되기 때문이다. 약장약상태의 발파현상을 해결하기 위하여 장약량을 증대하면 발파효과는 증대시킬 수 있으나 발파진동은 더욱 크게 발생된다.

V-cut 발파에서 보조심발공을 배열하였음에도 심발공의 장약량이 많아지거나 발파효율이 낮고 진동이 크게 발생하는 이유는 최소저항선 거리가 짧아졌다 할지라도 최소저항선 거리를 결정하는 자유면의 공간 면적이 적으면 발파공 주변의 암반이 파괴되어 팽창될 때 저항력으로 작용하여 발파효율을 낮게 하고 과진동의 발생원인이 되기 때문이다. 이와 같은 현상을 발파공에 대한 효율과 진동에 영향을 미치는 요소의 하나인 자유면의 크기 효과 때문이다.



그림 2. 자유면의 크기효과를 이용한 V-cut 심발발파

V-cut 발파의 심발공에서 발파진동이 크게 발생하는 원인은 보조심발공을 발파하여 형성된 자유면이 선형을 이루거나 좁은 공간의 자유면을 형성하여 심발공의 완전한 자유면으로 이용되지 못하기 때문이다.

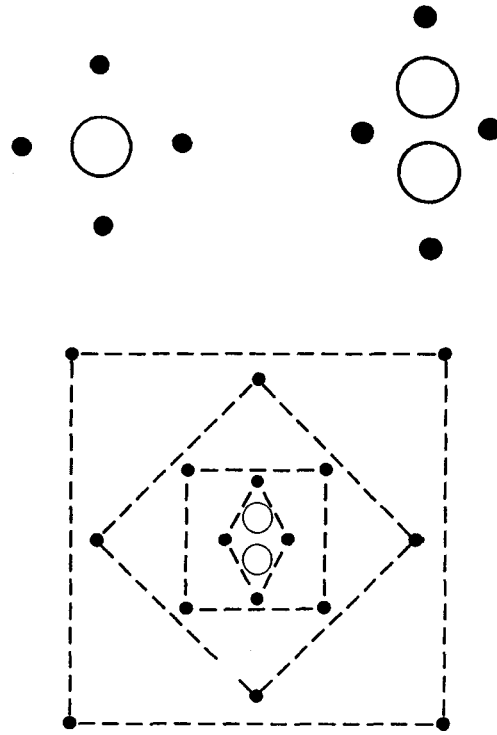
그림 2의 ②에서 보조 심발공에 의해 형성된 썩기형의 자유면은 최소저항선 거리가 1/2로 적어졌음에도 a부분에 의해 심발공의 발파시 팽창을 억제하여 심발공의 장약량이 증대와 과진동의 발생 원인으로 작용하여 보조심발공이 없을 때와 거의 비슷한 발파가 이루어진다.

V-cut 발파에서 자유면의 크기가 발파진동에 미치는 영향에 대한 현상을 고찰하였으나 향후 지속적인 현장 시험과 연구를 통하여 자유면 크기가 발파진동에 미치는 영향을 정량적으로 밝혀야 할 것이다.

(2) Cylinder-cut 발파에서 자유면의 크기가 발파에 미치는 영향.

Cylinder-cut와 확대공에서 자유면 크기가 발파진동에 미치는 영향은 V-cut와 유사한 양상으로 나타난다. 자유면의 크기가 Cylinder-cut와 확대공 발파에서 발파공의 구속력에 영향을 미치는 것은 최소저항선 거리와 개구부의 크기에 따른 장약집중도에서 잘 나타난다.(Oloffson, 1990) Cylinder-cut와 확대공 발파는 발파효과와 작업능률을 극대화하기 위하여 기술이 개발되었다.

Cylinder-cut와 확대공 발파는 발파효율을 극대화하기 위하여 개발된 방법으로서 진동을 제어하기 위한 발파 방법이 될 수 없다. 이 발파방법은 발파효율을 높이기 위하여 최소저항선 거리를 자유면 크기와 동일하게 하거나 자유면 크기의 1.5배로 발파패턴을 설계하였다. Cylinder-cut는 무장약공을 자유면으로 이용하여 발파하기 때문에 자유면이 아주 작고 무장약공과 장약공간의 거리가 최소저항선 거리이다.



① 무장약공 1개 심발발파 ② 무장약공 2개의 심발발파 ③심발공과 심발확대공

그림 3. Cylinder-cut와 심발확대공의 천공 배열도

최소저항선거리를 자유면의 크기의 1.5배 이하로 발파패턴을 설계하면 약장약 형태의 발파라 할 수 있다. 약장약 형태의 발파는 발파공에 대한 구속저항력이 커져서 폭약의 폭발력에 의한 암반의 파괴력이 약하여 많은 량의 폭약이 필요하고 폭약량에 비하여 발파진동이 크게 발생된다.

그림 4는 발파공의 수를 최소화하여 효과적인 자유면을 확보하기 위한 발파에서 산출한 장약집중도를 나타내는 그림이다. 여기에서 발파공의 장약량을 결정하는 장약집중도가 최소저항선 거리와 자유면의 크기에 의해 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 동일 최소저항선 거리에서 자유면의 크기가 장약집중도에 미치는 영향은 자유면의 크기가 적을수록 장약집중도에 큰 변화를 보이고 자유면의 크기가 최소저항선 거리의 3~4배 이상인 경우에는 자유면의 크기가 장약집중도에 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

자유면의 크기와 최소저항선 거리에 따른 장약집중도는 표 1과 같다. 최소 저항선 거리와 자유면의 크기에 따른 비장약량을 최소저항선 거리의 배수로 산출하면 표 2와 같다. 동일 최소저항선 거리에서의 비 장약량은 자유면의 크기에 비례한다.

발파공의 적정 장약량 산출은 최소저항선거리에 따른 하우저 공식과 누두지수 함수에 의해 계산할 수 있다. 그러나 하우저 공식은 자유면의 크기 효과를 고려하지 않은 상태에서 최소저항선 거리를 기준하여 발파공의 장약량을 산출하는 방법이다.

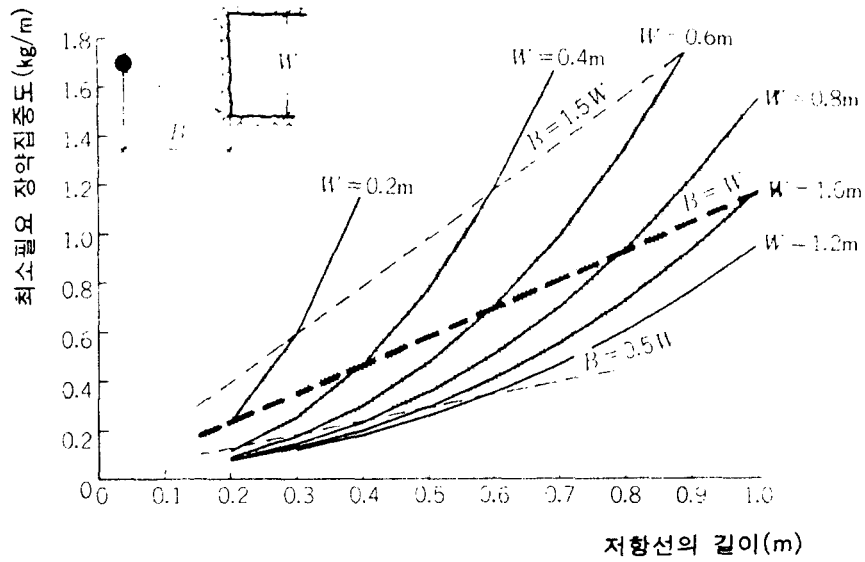


그림 4. 최소저항선 거리와 자유면의 크기에 따른 장약집중도

표 1. 자유면의 크기와 최소저항선 거리에 따른 장약집중도

구분	최소저항선 거리(m)									비고	
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
자유면의 크기 (m)	0.2	0.230	0.580	1.150							·장약집중도 (kg/m)
	0.4	0.115	0.250	0.460	0.750	1.160	1.690				
	0.6	0.090	0.175	0.295	0.470	0.690	0.970	1.330	1.770		
	0.8	0.085	0.140	0.230	0.350	0.500	0.685	0.920	1.210	1.530	
	1.0	0.080	0.130	0.190	0.290	0.400	0.540	0.720	0.920	1.160	
	1.2	0.080	0.130	0.170	0.260	0.345	0.460	0.590	0.750	0.940	

표 2. 최소저항선 거리에 따른 자유면의 크기별 비장약량

구분	자유면의 크기			비고	
	B = 0.5W	B = W	B = 1.5W		
최소저항선 거리	0.2m	0.115	0.23	0.40	·B: 최소저항선 거리(m) ·W: 자유면의 크기(m) ·비장약량 단위(kg/m)
	0.3m	0.200	0.36	0.60	
	0.4m	0.230	0.46	0.78	
	0.5m	0.290	0.59	0.97	
	0.6m	0.345	0.69	1.17	
	0.7m	0.410	0.82	1.35	
	0.8m	0.460	0.92	1.53	
0.9m	0.520	1.04	1.74		

터널발파와 같이 자유면의 크기가 제한되고 양끝이 구속되어 있는 상태의 발파공에 대한 장약량 산출은 하우저 공식과 누두지수 함수를 이용하여 장약량을 산출하면 장약량이 부족하여 발파를 실패하게 된다. 크기가 제한되고 양끝이 구속되어 있는 상태의 자유면을 대상으로 발파하는 발파공의 장약량은 최소저항선 거리와 자유면크기를 고려한 장약량이 산출되어야 정상적인 발파가 가능하다.

Cylinder-cut 와 심발 확대공 발파에서도 자유면의 크기가 발파공의 효율과 진동발생에 직접적인 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있으며 자유면의 크기와 최소저항선 거리에 의해 산출되는 장약량이 표 1에서 자유면의 크기가 0.4m이고 최소저항선 거리가 0.5m 일 때의 장약집중도와 자유면의 크기가 1.2m이고 최소저항선 거리가 0.9m 일 때의 장약집중도가 0.75kg/m 로 같은 값으로 산출되었다. 자유면의 크기가 3배로 커지면 최소저항선 거리가 거의 2배로 증가해도 동일한 장약량으로 발파가 가능한 것은 자유면의 크기가 발파공의 구속력에 미치는 영향으로 인한 장약량의 변화가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

(3) 자유면의 크기와 최소저항선거리에 따른 발파진동

발파진동은 장약량에 의해 결정되어지나 동일한 장약량인 경우에도 발파공의 구속저항력에 따라 진동의 크기가 달라진다. 자유면의 크기와 최소저항선 거리에 의해 산출한 비장약량은 각각의 발파공에 대한 구속 조건이 상이하여 동일한 발파진동식으로 진동값을 환산하는 것은 실제의 진동값과 다르게 나타날 수 있으나 유사한 형태의 구속조건임을 고려하여 발파공의 구속조건을 동일한 것으로 가정하고 각 발파공의 비장약량을 기준하여 발파진동식[$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n$, 서울화강암, $V = \text{cm/sec}$, $K = 108.23$, 일축압축강도:1300, 보정계수:60, $n = -1.7$]을 적용하여 산출한 진동값은 표 3과 같다.

표 3. 자유면의 크기와 최소저항선거리에 따른 발파진동값

구분	최소저항선 거리(m)									비고	
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
자유면의 크기(m)	0.2	0.145	0.245	0.361							· 진동값 (cm/sec)
	0.4	0.097	0.152	0.214	0.283	0.362	0.449				
	0.6	0.085	0.124	0.167	0.217	0.270	0.327	0.392	0.461		
	0.8	0.082	0.109	0.145	0.184	0.225	0.269	0.318	0.371	0.424	
	1.0	0.079	0.107	0.130	0.165	0.198	0.235	0.276	0.318	0.362	
	1.2	0.079	0.104	0.122	0.155	0.182	0.214	0.247	0.283	0.322	

자유면의 크기가 발파진동에 미치는 영향은 최소저항선 거리와 자유면의 크기가 커질수록 장약량의 변화가 둔화되고 자유면의 크기가 적을수록 장약량의 변화가 크다.

5. 결 론

터널발파에서 자유면의 크기가 발파공에 어떤 영향을 미치는가를 고찰하였다. 터널발파에서의 자유면은 제한된 크기와 자유면의 양 끝이 구속된 상태에서 발파가 이루어진다. 자유면의 크기는 심발 발파방법인 V-cut와 Cylinder-cut, 확대공 발파에서 발파효과 및 진동의 크기에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다.

터널 발파공의 자유면의 크기가 3배로 커지면 최소저항선 거리를 거의 2배로 증가시켜도 동일한 장약량으로 발파가 가능하다. 자유면의 크기가 발파진동에 미치는 영향은 최소저항선 거리와 자유면의 크기가 커질수록 장약량의 변화가 둔화되고 자유면의 크기가 적을수록 장약량의 변화가 크다.

터널 발파에서 최소저항선 거리와 자유면의 크기는 발파효과와 진동의 크기를 결정하는 가장 중요한 요소이므로 최소저항선거리와 자유면의 크기를 적절하게 고려하여 장약량을 산출해야 발파진동에 의한 공해를 최소화하고 능률적이며 경제적인 발파작업이 가능하게 된다. 터널 발파에서 가장 효과적으로 발파진동을 제어하기 위해서는 자유면의 크기를 최소저항선 거리의 약 3배 이상 유지하도록 발파패턴을 설계해야 한다. 자유면의 크기와 최소저항선 거리를 고려하여 발파진동을 제어하는 기술은 터널 발파 현장에서 발파진동으로 인하여 발파패턴을 변경해야 하는 경우에 진동제어를 위한 발파패턴 설계에 이용 될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 자유면의 크기가 발파진동에 미치는 영향에 대한 많은 현장 시험이 요구된다. 발파진동을 제어하며 능률적인 작업이 가능한 발파공의 장약량이 정량적으로 산출될 때 발파진동제어 및 능률제고가 가능한 경제적인 발파작업이 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Olofsson, S. O., 1990, Applied Explosive Technology for Construction and Mining.
2. 터널 및 수직구 발파공사의 다단장약에 의한 진동제어 발파방법(발명특허 제0294819호)
3. 김재극, 1999, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부
4. Kubica, G., 1998, The Modern Technique of Rock Blasting for Tunnels, Doosan Construction & Engineering Co. Ltd.
5. Dowding, C. H., 1996, Construction Vibrations