

최소저항선이 발파진동의 크기에 미치는 영향에 관한 실험연구

An Experimental Study on the Effect of Burden on the Blast-vibration

신 일재, 이 정인¹⁾, 백 증현²⁾

Il-Jae Shin, Chung-In Lee, Jong-Hyun Beak

¹⁾서울대학교, ²⁾백일건설(주)

초 록

주변 보안물건에 직접적인 피해를 유발시킬 수 있는 발파진동은 암반의 파쇄를 위해 화약의 폭발력을 이용하는 발파작업에서 발생하는 대표적인 발파공해로 이러한 발파진동을 저감시키기 위한 많은 연구들이 수행된 바 있다. 본 연구에서는 2자유면 발파시 최소저항선과 대구경 무장약공을 자유면으로 활용하는 터널 심발발파시 무장약공과 첫 번째 심발발파공의 중심사이 거리가 발파진동에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 균질한 모르타르 시험체에 대한 소규모 단일공 시험발파를 수행하였다.

11g의 화약을 장약한 2자유면 단일공 시험발파시 발파진동의 크기는 최소저항선을 표준장약의 경우인 150mm에서 2/3 수준인 100mm로 줄인 경우 삼승근 환산거리 10~40 m/kg^{1/3}인 범위에서 약 13~38% 작아지는 것으로 나타났다. 또한 직경이 180mm인 무장약공을 자유면으로 활용하는 첫 번째 심발 시험발파공에 22g의 화약을 장약하여 수행한 단일공 시험발파시 무장약공 중심으로부터 발파공 중심까지의 공간격이 짧아질수록 발파진동이 더 작아지는 것으로 나타났다.

핵심어 : 최소저항선, 발파진동, 2자유면 발파, 심발발파

1. 서 론

화약의 폭발력을 이용하여 암반을 파쇄하는 발파작업은 필연적으로 발파진동, 발파소음, 비석 등과 같은 발파공해를 동반하게 된다. 이러한 발파공해 중에서 발파지점으로부터 인접한 주변 보안물건들에 직접적인 피해를 발생시킬 수 있는 발파진동에 대해서는 현재까지 발파진동의 주파수특성, 전파특성, 저감방안 등과 관련된 많은 연구가 이루어져 왔다.

특히 발파진동의 저감을 위한 방안으로는 동

시에 기록되는 화약량인 지발당 장약량을 줄임으로써 발파지점에서 발생하는 발파진동을 저감시키는 방법과 라인드릴링(Line-Drilling)이나 프리스플릿팅(Pre-splitting)을 이용하여 발파진동을 진동 전파경로상에서 차단하는 방법이 가장 널리 적용되고 있다. 그러나 발파작업의 시공성과 경제성을 고려할 때 지발당 장약량을 줄임으로써 발파진동을 제어하는 데는 한계가 있고, 진동 전파경로상에서 발파진동을 차단하는 방법은 정량적인 진동저감 효과를 제시할 수 있을 만큼의 충분한 연구결과가 제시되어

있지 못한 실정이다.

발파지점에서 발생하는 발파진동의 크기에는 지발당 장약량 이외에도 암반 상태, 사용화약, 천공패턴, 발파공 직경과 화약 직경과의 비, 전색상태 등 많은 변수들이 영향을 미치게 되지만, 이러한 모든 변수들의 영향을 정량적으로 평가하는 것은 매우 어렵다.

따라서 우선 본 연구에서는 발파공으로부터 자유면까지의 최단거리인 최소저항선이 발파진동의 크기에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 실험 연구를 수행함으로써 최소저항선의 조절로 발파진동을 저감시킬 수 있는 방안의 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 시험발파

2.1. 모르타르 시험체의 제작

이 연구의 시험발파는 2곳의 현장에서 수행되었는데, 시험발파를 위해 총 5개의 모르타르 시험체를 제작하였다. 시멘트와 물, 모래의 혼합체인 모르타르 시험체를 시험발파에 사용하 이유는 모르타르가 암반에 비해 매우 균질하기 때문에 시험발파를 통한 자유면 방향으로의 파괴형태와 발파진동의 계측시 재료의 불균질성에 따른 오차를 줄이기 위해서였다.

1차 시험발파는 경기도 양주군 회천읍의 아파트 부지조성 공사현장에 타설한 4개의 모르타르 시험체에 대해 수행하였는데, 이 시험체들 중에서 두 개의 시험체는 윗면이 직사각형인 시험체(시험체명 R-1, R-2)이고, 나머지 두 개는 윗면이 원형인 시험체(시험체명 C-1, C-2)로 두께는 모두 약 600mm이다.

2차 시험발파는 경기도 광명시의 도로 터널 공사 현장에 타설한 윗면이 원형(정확히는 32면체)인 모르타르 시험체(시험체명 C-3)에 대해 수행하였는데, 두께는 1차 시험발파시 제작한

시험체와 동일한 약 600mm 이다.

각 모르타르 시험체는 타설현장의 표도층을 약 600mm 정도 파낸 후 각각의 형태에 맞는 거푸집을 제작하였고, 레미콘 트럭을 이용하여 타설하였다.

모르타르 시험체에 대한 무장약공의 천공시 회수한 직경 약 170mm의 원주형 공시체에 대해 실험실에서 일축압축시험을 수행한 결과 28일 압축강도값은 약 350kgf/cm² 정도로 나타났고, 시험발파는 일반적인 콘크리트의 타설 후 양생기간인 28일이 경과한 이후에 수행하였다.

표 1은 각 모르타르 시험체의 명칭과 크기, 터널 심발발파시 자유면으로 활용하기 위해 천공되는 발파공보다 큰 직경의 무장약공을 모사하기 위해 천공한 무장약공의 직경 및 개수, 그리고 시험발파를 통해 측정하고자 하였던 내용을 각 모르타르 시험체별로 구분하여 정리한 표이다.

그림 1과 그림 2는 각각 경기도 양주 아파트 공사에서 수행한 1차 시험발파시 타설한 모르타르 시험체인 R-2 시험체와 C-2 시험체의 평면도인데, 표 1에 나와있는 것과 같이 R-1 시험체는 R-2 시험체에 대한 평면도인 그림 1과 동일한 형태와 크기를 가지나 무장약공과 무장약공 주변의 관이 제외된 모르타르 블록이고, C-1 시험체는 C-2 시험체에 대한 평면도인 그림 2와 동일한 형태이나 역시 무장약공과 무장약공 주변의 관이 제외된 모르타르 블록이다.

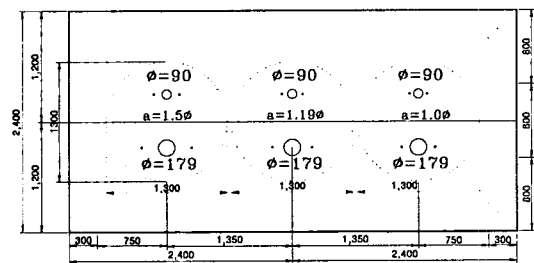


그림 1. R-2 모르타르 시험체의 평면도

표 1. 모르타르 시험체의 모델명 및 시험내용

시험체명	시험체의 윗면	무장약공	시험내용
R-1		-	- 2자유면 발파의 표준장약량 산정 및 파괴양상 확인
R-2	2.4m x 4.8m 의 직사각형	- 180mm 직경의 무장약공 3공 - 90mm 직경의 무장약공 3공	- 무장약공 주변공의 발파시 파괴양상 확인
C-1		-	- 최소저항선에 따른 2자유면 발파의 발파진동 비교
C-2	약 5.4m 직경의 원형	- 180mm 직경의 무장약공 5공 - 90mm 직경의 무장약공 4공	- 무장약공 주변공의 발파시 파괴양상 확인 및 발파진동 계측
C-3	약 12m 직경의 원형	- 180mm 직경의 무장약공 32공	- 최소저항선에 따른 2자유면 발파의 발파진동 비교 - 무장약공 주변 첫 번째 심발공의 저항선에 따른 발파진동 비교
* 각 모르타르 시험체의 두께는 600mm * 무장약공은 모르타르 시험체를 관통하도록 천공함. (천공깊이 600mm)			

그림 3은 경기도 광명시 도로공사 현장에서 수행한 2차시험발파시 타설한 모르타르 시험체인 C-3 모르타르 시험체의 평면도이다.

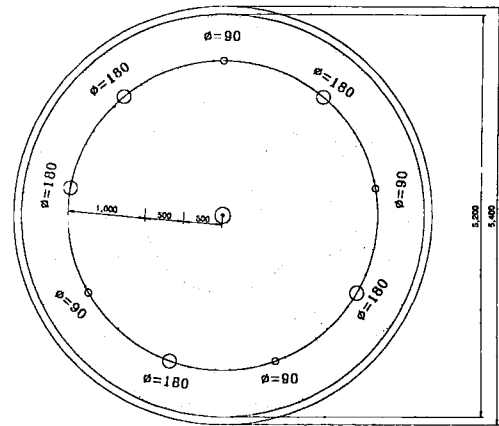


그림 2. C-2 모르타르 시험체의 평면도

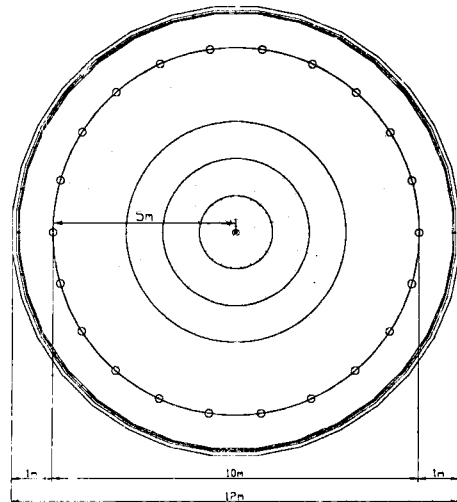


그림 3. C-3 모르타르 시험체의 평면도

2.2 시험발파공 천공 및 장약

시험발파공은 직경이 17mm인 비트를 장착한 드릴로 모르타르 시험체 표면에서 수직으로 250mm 깊이까지 천공하였고, 길이 150~200mm, 내경 및 외경 15.5mm, 16.5mm인 아크릴관에 조절용 폭약인 Finex-1과 도폭선, 그리고 뇌관을 삽입한 후 시험발파공에 장약하였다.

그림 4는 공당 장약량이 각각 11g, 16.5g, 22g인 각 시험발파공에 장약할 시험발파용 화

약으로 아크릴 관에 Finex-1, 도폭선, 뇌관을 넣은 모습이다.

이와같이 아크릴 관을 사용한 이유는 우선 실제 현장의 발파작업시 사용되는 화약의 약경이 발파공의 공경보다 작기 때문에 이를 모사하기 위해서였고, 또한 무장약공 주변의 발파공에 대해서는 필요한 만큼의 충분한 장약길이를 확보하기 위해서였다.

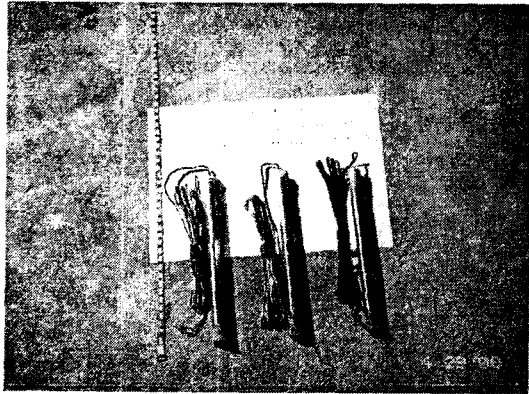


그림 4. 아크릴 관을 이용해 제작한 시험발파용 화약 모습



그림 5. 17mm 직경의 비트를 사용한 시험발파공의 천공

그림 5는 선 대구경 수평 보링공을 이용한 터널발파공법에서 무장약공을 자유면으로 활용하는 첫 번째 심발발파공을 모사하기 위한 18mm 직경의 시험발파공을 C-2 모르타르 시

험체에 천공하는 모습이다.

각 시험발파공에 그림 4에 나타난 시험 화약을 장약하고, 급결제를 혼합한 시멘트로 발파공에 대한 전색을 하였으며, 급결제를 섞은 시멘트가 굳은 후 발파공에 대한 시험발파를 수행하였다.

2.3 시험발파에 의한 파괴 형태

일반적인 벤치발파와 같은 형태의 2자유면 시험발파는 R-1, C-1, C-2, C-3 모르타르 시험체에서 공당 장약량과 최소저항선을 변화시키면서 단일공 발파로 수행하였는데, 각 시험발파시 벤치면 방향으로의 파괴 형태를 조사한 결과, 최소저항선이 150mm일 때 11g의 사용화약을 장약한 경우가 표준장약에 해당하는 것으로 나타났다. 그림 6은 최소저항선이 150mm, 장약량이 11g인 시험발파공의 2자유면 발파에 의한 파괴형태를 보여주는 그림이다.



그림 6. 2자유면 발파시 표준장약에 의한 파괴양상

발파공보다 큰 직경의 무장약공을 자유면으로 활용하는 터널발파시의 심발발파공에 대한 시험발파는 R-2, C-2, C-3 모르타르 시험체에서 수행하였는데, 직경이 18mm인 발파공과 직

경이 180mm인 무장약공의 중심사이 거리(이하 공간격)가 무장약공 직경(ϕ)과 같은 180mm (1.0 ϕ)일 때의 표준장약량은 22g으로 나타났다.

그림 7과 그림 8은 공간격이 각각 0.8 ϕ , 1.0 ϕ 일 때의 시험발파시 무장약공 방향으로의 썬기형 파괴 형태를 보여주는 그림이다.

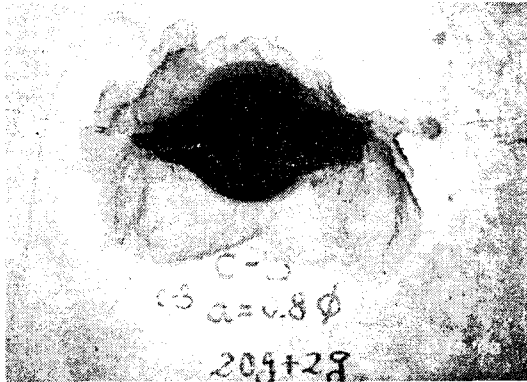


그림 7. 공간격이 0.8 ϕ ($\phi=180$ mm) 인 경우의 파괴 형태

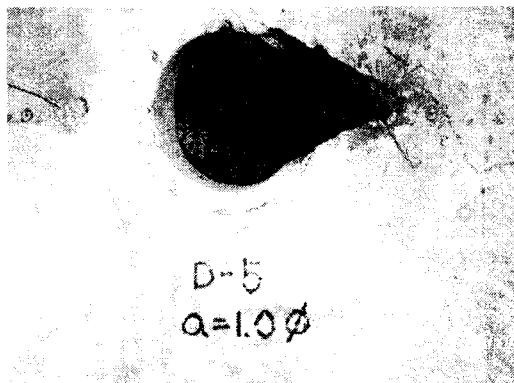


그림 8. 공간격이 1.0 ϕ ($\phi=180$ mm) 인 경우의 파괴 형태

2.4 발파진동 측정

시험발파시 발파진동을 측정하기 위해 사용한 진동 측정 장비는 GeoSonic사 SSU 2000DK 1대, MicroSeismograph 4대, Blastmate 477 및 077 각 1대로 총 7대의 장비를 사용하였다.

발파진동의 측정은 C-1, C-2, C-3 모르타르 시험체에 대한 시험발파시 이루어졌는데, 그림 9는 크기가 가장 큰 C-3 모르타르 시험체에 발파진동 측정장비들을 설치한 모습이다.

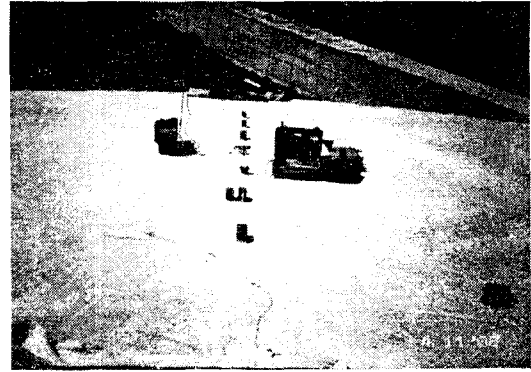


그림 9. C-3 모르타르 시험체에 설치한 발파진동 측정기

시험발파시 발생하는 발파소음을 저감시키기 위해 그림 9의 위쪽에 보이는 것과 같이 고무판과 부직포로 제작한 덮개로 발파공을 덮은 후에 시험발파를 수행하였다.

발파진동 측정기들은 모르타르 시험체의 표면을 연마기로 갈아낸 후, 수평을 맞추어 양면 테이프로 고정시켰는데, 각 진동 측정 장비로부터 발파공까지의 거리는 C-1 및 C-2 모르타르 시험체의 경우 약 1m~4m의 범위이고, C-3 모르타르 시험체의 경우는 약 1m~9m의 범위이다.

발파진동의 해석에서는 진행방향, 수직방향, 접선방향 진동속도를 모두 포함하는 진동속도 벡터합을 기준으로 각 시험 조건별 발파진동전파식을 도출하여 비교하였다.

3. 발파진동 측정 결과 분석

3.1 2자유면 발파의 최소저항선에 따른 발파진동

동일한 양의 화약이 장약된 2자유면 시험발파공의 발파시 최소저항선이 발파진동에 미치는 영향을 평가하기 위한 시험발파는 C-1 모르타르 시험체와 C-3 모르타르 시험체에서 수행되었는데, 윗면의 직경이 5.4m인 C-1 모르타르 시험체에서는 발파진동 전파식을 도출할 수 있을 만큼의 충분한 진동측정 자료를 얻지 못하였다.

따라서 윗면의 직경이 12m에 달해 비교적 많은 시험이 가능하였던 C-3 모르타르 시험체에 대한 시험발파를 통해 측정된 진동속도 벡터합 자료를 활용하여 최소저항선에 따른 발파진동 전파식을 도출하였고, 이 발파진동 전파식을 상호 비교하였다.

표 2는 동일한 11g의 화약을 장약한 2자유면 단일공 시험발파 결과 구해진 최소저항선별 발파진동 전파식을 정리한 것으로 결정계수 (coefficient of determination)와 회귀분석에 사용된 진동속도 벡터합 측정자료 수가 나타나 있다.

표 2. 2자유면 시험 발파시 최소저항선에 따른 발파진동 전파식

최소 저항선	발파진동 전파식	결정 계수(R)	측정 자료수
75mm	$V = 192.3 (SD)^{-1.12}$	0.89	53
100mm	$V = 247.4 (SD)^{-1.13}$	0.90	57
150mm	$V = 160.1 (SD)^{-1.48}$	0.84	66
200mm	$V = 182.7 (SD)^{-1.50}$	0.86	63

측정자료 수는 각각 53개, 57개, 66개, 63개이고, 발파진동 전파식의 도출시 측정자료의 상관성을 나타내는 결정계수는 모두 0.84 이상으로 나타났다.

그림 10은 2자유면 단공 시험발파시 최소저항선별로 구해진 발파진동 전파식을 비교한 그림으로 동일한 삼승근 환산거리에서 최소저항선이 짧을수록 진동속도가 작아지는 것을 보여 주고 있다.

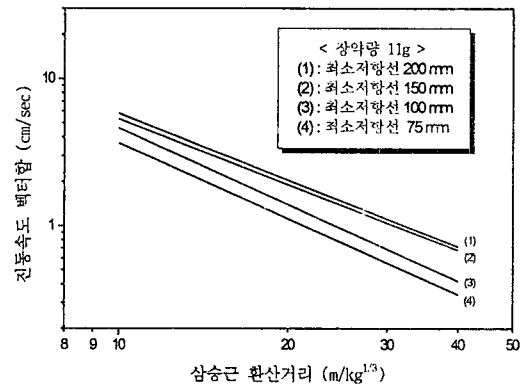


그림 10. 2자유면 발파시 최소저항선에 따른 발파진동 전파식의 비교

장약량 11g을 최소저항선이 150mm인 2자유면 발파의 표준장약량으로 설정하고 이 경우의 발파진동값을 기준값으로 한 경우 동일한 화약량을 사용하더라도 최소저항선을 기준값의 2/3 수준인 100mm로 줄이게 되면 발파진동은 삼승근 환산거리가 10~40m/kg^{1/3}인 범위에서 약 13~38% 정도 작아지는 것으로 나타났으며, 최소저항선을 기준값의 1/2 수준인 75mm로 줄이게 되면 발파진동은 삼승근 환산거리가 10~40m/kg^{1/3}인 범위에서 약 31~50%까지 작아지는 것으로 나타났다.

반면 최소저항선이 200mm로 커서 약장약의 형태를 가지는 발파작업에서는 표준장약의 경우보다 발파진동이 더 커지는 것으로 나타났다.

2자유면 발파작업에서 최소저항선을 줄일 경우 발파공에 사용되는 화약량도 줄여서 사용하는 것이 바람직하지만, 최소저항선에 따른 정확한 표준장약량을 준수하기 위해서는 해당 중

량이 정해져 있는 화약의 경우 필요한 양만큼을 잘라서 사용해야만 하는 어려움이 있다.

예를 들어 천공장이 1m이고 최소저항선이 0.7m인 주변공의 경우 표준 장약량이 250g이고, 동일한 천공장에 최소저항선을 0.6m로 줄이면 표준 장약량이 200g이 된다고 할 때, 최소저항선을 0.7m로 하는 경우에는 개당 중량이 125g인 화약 2개를 장약하면 되지만, 최소저항선을 0.6m로 하는 경우에는 개당 중량이 125g인 화약 1개와 0.76개의 화약을 장약하여야 한다.

이 경우 0.76개의 화약을 장약하기 위해서는 포장된 화약을 잘라서 사용해야 되는데, 실제 현장에서 이러한 방법으로 정확한 장약량을 준수하기는 매우 어렵다.

따라서 이러한 결과는 천공수를 늘려서 기존 설계보다 최소저항선을 줄이는 경우 공당 장약량은 동일하게 하더라도 발파진동을 저감시킬 수 있다는 것을 의미하므로, 실제 벤치발파나 터널의 주변공 발파와 같은 2자유면 발파의 발파진동 저감을 위한 하나의 효과적인 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 첫 번째 심발공 발파시 공간격에 따른 발파진동

직경이 180mm인 무장약공을 자유면으로 활용하는 첫 번째 심발 시험발파공에 22g의 화약을 장약한 후 발파할 때, 무장약공 중심과 발파공 중심간의 거리인 공간격이 발파진동에 미치는 영향을 평가하기 위한 시험발파는 C-3 모르타르 시험체에서 수행하였다.

표 3은 22g의 화약을 장약한 첫 번째 심발공에 대한 단공 시험발파시 공간격이 각각 0.71 ϕ , 0.8 ϕ , 0.9 ϕ , 1.0 ϕ , 1.1 ϕ 인 경우에 대해 삼승근 환산거리에 따른 진동속도 벡터합 측정자료를 회귀분석한 결과로 측정자료의 삼승근 환산거리 범위는 약 7~30m/kg^{1/3}이다.

표 3. 첫 번째 심발공 시험발파시 공간격에 따른 발파진동전파식($\phi=180\text{mm}$)

공간격	발파진동전파식	결정계수 (R)	측정자료수
0.71 ϕ	$V = 184.3 (SD)^{-1.85}$	0.94	26
0.8 ϕ	$V = 64.4 (SD)^{-1.52}$	0.84	23
0.9 ϕ	$V = 240.2 (SD)^{-1.85}$	0.91	26
1.0 ϕ	$V = 116.8 (SD)^{-1.50}$	0.92	22
1.1 ϕ	$V = 155.4 (SD)^{-1.58}$	0.93	22

공간격에 따른 각 발파진동 전파식의 결정에 사용된 측정자료 수는 각각 22개 이상이고, 발파진동 전파식의 도출시 측정자료의 상관성을 나타내는 결정계수는 각각 0.94, 0.84, 0.91, 0.92, 0.93으로 나타났다.

그림 11은 첫 번째 심발공에 대한 단공 시험발파시 공간격별로 구해진 발파진동 전파식을 비교한 그림으로 동일한 삼승근 환산거리에서 공간격이 가까울수록 진동속도가 작아지는 것을 보여주고 있다.

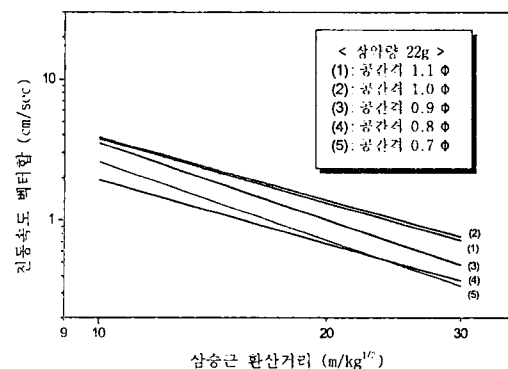


그림 11. 첫 번째 심발공 발파시 공간격에 따른 발파진동전파식 비교

첫 번째 심발공의 발파시 직경이 180mm인 무장약공 방향으로의 완전한 썬기형 파쇄가 이루어진 공간격은 0.71 ϕ ~1.0 ϕ 까지이고, 공간격이 1.1 ϕ 인 경우는 무장약공 방향으로 완전한 파쇄가 이루어지지 못하였으므로, 여기서는 공간격이 1.0 ϕ 인 경우를 기준으로 하여 발파진동의 크기를 비교한다.

동일한 화약량을 사용하더라도 공간격이 0.71 ϕ 인 경우 발파진동은 삼승근 환산거리가 10~40m/kg^{1/3}인 범위에서 기준값보다 약 31~60% 정도 작아지는 것으로 나타났으며, 공간격이 0.8 ϕ 인 경우는 약 50~52% 정도, 공간격이 0.9 ϕ 인 경우는 약 8~44% 정도 기준값에 비해 발파진동이 저감되는 것으로 나타났다.

공간격을 2자유면 발파시의 최소저항선 개념으로 본다면, 공간격을 1 ϕ 에서 0.71 ϕ 로 줄이는 것은 최소저항선을 30% 줄이는 것으로 생각할 수 있는데, 공간격을 1 ϕ 에서 0.71 ϕ 로 줄인 첫 번째 심발공의 경우가 최소 저항선을 30% 정도 줄인 2자유면 발파공의 경우보다 더 큰 진동 감소효과를 나타내고 있다.

이와 같이 첫 번째 심발공의 공간격을 줄일 때가 2자유면 발파시 최소저항선을 동일한 비율로 줄이는 것보다 더 큰 진동감소 효과를 보이는 것은 첫 번째 심발 발파공의 경우 공간격을 줄이게 되면, 무장약공 방향으로의 파괴각도도 비례적으로 커지게 되므로 파괴에 따른 저항도 그만큼 줄어들게 되어 진동으로 전달되는 에너지가 감소하기 때문으로 판단된다.

4. 결론

1) 균질한 매질에 대한 시험을 위해 타설한 총 5개의 모르타르 시험체의 경우, 천공경 18mm, 천공장 250mm, 최소저항선 150mm인 시험 발파공에 대한 적정 장약량은 약 11g(Finex-1 10g + 도폭선 1g)으로 나타났고, 직경이 180

mm인 무장약공을 자유면으로 활용하는 직경 18mm인 첫 번째 심발 시험발파공의 경우 무장약공 중심으로부터 발파공 중심까지의 거리인 공간격이 1 ϕ (180mm)일 때 적정 장약량은 약 22g(Finex-1 20g + 도폭선 2g)으로 나타났다.

2) 11g의 화약을 장약한 2자유면 단일공 시험 발파시 발파진동의 크기는 최소저항선이 짧아질수록 더 작아지는 것으로 나타났다. 최소저항선이 150mm인 경우의 2자유면 발파시 발생하는 발파진동을 기준값으로 설정한 경우, 최소저항선을 기준값의 2/3 수준인 100mm로 줄이게 되면 발파진동은 실제 진동측정이 이루어진 삼승근 환산거리 10~40m/kg^{1/3}인 범위에서 약 13~38% 작아지는 것으로 나타났으며, 최소저항선을 기준값의 1/2 수준인 75mm로 줄이게 되면 같은 삼승근 환산거리 범위에서 약 31~50% 까지 발파진동이 저감되는 것으로 나타났다.

3) 직경이 180mm인 무장약공을 자유면으로 활용하는 첫 번째 심발 시험발파공에 22g의 화약을 장약하여 수행한 단일공 시험발파시 무장약공 중심으로부터 발파공 중심까지의 공간격이 짧아질수록 발파진동이 더 작아지는 것으로 나타났다.

공간격이 1 ϕ (180mm)인 경우의 발파진동값을 기준값으로 설정하고 삼승근 환산거리가 실제 진동측정이 이루어진 10~40m/kg^{1/3}인 범위에서 공간격별로 발파진동을 비교한 결과, 공간격이 0.9 ϕ 일 때는 기준값보다 약 8~44%, 공간격이 0.8 ϕ 일 때는 기준값보다 약 50~52%, 공간격이 0.71 ϕ 일 때는 기준값보다 약 31~60% 더 작게 나타났다.

4) 이상의 연구 결과들은 벤치발파나 터널에서의 주변공 발파와 같은 2자유면 발파, 그리고

발파공보다 큰 직경의 무장약항을 심발발파시 자유면으로 활용하는 터널 심발발파시 최소저항선의 조절에 의해 발파진동을 저감시키는 방안의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 그러나 최소저항선의 조절에 의한 발파진동 저감 방안을 다른 진동저감공법과 함께 현장에 적용하기 위해서는 앞으로 보다 많은 정량적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- 1) 서울대학교 에너지·자원 신기술 연구소, 1998, 선 대구경 수평 보링공법(PLIIBM)에 관한 연구, pp.3~32
- 2) 서울대학교 공학연구소, 1999, 선 대구경 수평보링공을 이용한 터널발파공법에 관한 연구, pp.8~48
- 3) 이정인, 1993, 발파진동, 발파풍압 및 비석의 조절을 통한 안전발파, 대한토목학회지 41권 제 1호, pp.49-57
- 4) 서울대학교 에너지·자원 신기술 연구소, 1994, LG 강남타워 신축공사 현장의 발파진동 영향 평가 및 안전발파설계, pp.22~31
- 5) 양형식 역, 1992, 발파진동학, 구미서관, pp.24~40
- 6) 황현주, 1995, 건설공사에서 안전발파를 위한 설계 및 시공방안, 대한토목학회지, 43권 제 7호, pp.49-57
- 7) Siskind, D.E., et al, 1981, Structure Response & Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting, RI8507
- 8) Stig. O. Olofsson, 1987, Applied Explosive Technology for Construction and Mining, Applex publisher, pp.32~67
- 9) Michael F. Rosental, Gregory L. Morlock, 1987, Blasting Guidance Manual, OSMIRE, pp.45~53