

이완식 제어발파의 진동·음압전달특성에 관한 연구

김식¹⁾, 정영준²⁾, 김남수¹⁾, 조용소¹⁾

Characteristics of Vibration and Sound Pressure Transmission by Controlled Spall Blasting Method

Sik Kim, Young-Jun Jeong, Nam-Soo Kim, Yong-So Cho

초 록. 발파작업에서 발생하는 공해로 인한 재산상의 피해나 정신적인 피해를 최소화하기 위하여 대부분의 현장에서 제어발파를 시행하고 있다. 이완식 제어발파는 발파의 규모가 일반발파와 비교하여 작고, 대상 구조물이 근거리에서 위치하므로 그 전달특성이 다를 수 있다. 근거리에서 계측된 발파진동의 특징은 고주파이고 진동의 지속시간이 짧다. 본 연구는 국내의 8개 지역에서 계측한 자료를 분석하여 이완식 제어발파의 진동전달 특성에 관하여 국내의 현장에서 시공 전에 진동을 추정할 수 있는 진동전파식을 제안하였다. 또한 제어발파시에 사용하는 페타이어를 부착한 철재매트에 의한 폭풍압의 저감 효과와 전달특성을 분석하였다.

핵심어 : 이완식 제어발파, 전달특성, 진동전파식, 폭풍압, 철재매트

1. 서 론

좁은 국토에서 인구의 증가와 건축기술의 발달로 주거지가 밀집되고 또한 분포지역이 확대되어 건설현장에서 주거지와와의 거리는 가까워지고 있다. 따라서 발파작업에서 제어발파의 비중은 커지고 있다.

발파에 의한 폭풍압과 진동은 수많은 변수에 의하여 동일 장약량과 거리에 대하여 다른 수치가 나타나므로 이를 예측하기 위해서는 통계적인 방법을 이용할 수밖에 없다.⁴⁾

통계적인 방법은 시험발파 지역에 국한될 수밖에 없으므로 일반적으로 적용될 수 있는 음압과 진동 전파식을 얻기 위해서는 광범위한 지역에서 계측된 자료가 필요하고 특히 제어발파는 근거리에서 이루어지므로 이격거리의 변화에 따른 전파특성의 변화를 연구하여 시공 전에 예상 진동치와 폭풍압을 좀더 구체적으로 알 수 있게 함으로서

잡은 설계변경이나 무리한 시공으로 인한 민원 발생을 최소화 할 수 있다.

본 연구는 국내의 8개 지역에서 계측한 자료를 분석하여 이완식 제어발파¹⁾의 진동전달 특성에 관하여 국내의 현장에서 시공 전에 진동을 추정할 수 있는 진동전파식을 제안하였다. 또한 제어발파시에 사용하는 페타이어를 부착한 철재매트에 의한 폭풍압의 저감 효과와 전달특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 현장개요 및 계측방법

보편적인 결과를 얻기 위해 전국 8개 지역에서 계측된 287개의 계측자료를 이용하였고 암질 또한 화강암, 사암, 각력암, 편마암 등 화성암과 퇴적암, 변성암지역에 대한 자료가 포함되어 있다. 계측된 자료 중 이격거리에 따른 감쇠특성을 파악하고자 60m 이내에서 계측된 125개의 자료와 60m 이상 230m 이하에서 계측된 162개의 자료로 분리하여 분석을 하였다. 발파규모의 변화에 의한 진동치의 영향을 제거하고자 1회 발파공수는 6공 이내로 6지발 이하로 발파하였고 1개의 현장에서 30개 이상의 자료를 계측하였다.

1) (주)부암테크

2) (주)스웰테크

접수일 : 2003년 8월 10일

계측기기는 Instanтел사의 Blastmate II DS 477, DS 077과 NOMIS 5400을 이용하였다. 현장개요

및 계측방법에 대한 세부사항은 표 1과 같다.

2.2 전체자료의 분석

전국 8개 지역에서 계측된 287개의 자료를 최소 자승법에 의한 회귀분석 결과 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리에 의한 평균식 즉, 50%의 신뢰도를 갖는 전파식은 식 (1), (2)와 같고 95%의 신뢰도를 갖는 전파식은 식(3), (4)와 같고 상관계수는 각각 0.90으로서 비교적 높았다.

$$V_{50\%}(\text{cm/sec}) = 107.3 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.52} \quad (1)$$

$$V_{50\%}(\text{cm/sec}) = 124.9 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.58} \quad (2)$$

$$V_{95\%}(\text{cm/sec}) = 234.3 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.52} \quad (3)$$

$$V_{95\%}(\text{cm/sec}) = 270.5 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.58} \quad (4)$$

$$V_{50\%}(\text{cm/sec}) = 160 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.6} \quad (5)$$

위의 식에서 자승근 환산거리의 경우 미광두국에서 제안한 전파식³⁾⁵⁾ 식 (5)와 비교하면 K는 107.3, 기울기인 n은 -1.52로서 감쇠율 또한 다소 작게 나타났다.

표 2는 지발당장약량이 1kg일 경우 예상되는 진동치로서 제어발파에 의한 진동치가 20~100m 거리에서 평균 약 10% 작게 예측되나 거리가 증가하면서 그 차이는 감소하고 있다. 허용기준치를 0.3cm/sec로 할 경우의 거리별 장약량은 그림 3과 같다.

삼승근과 자승근 환산거리에 대한 지발당 장약량을 분석해보면 67m 이하에서는 삼승근 환산거리에 의한 장약량, 67m 이상에서는 자승근 환산거리에 의한 장약량이 작게 나타난다. 따라서 67m 이하에서는 삼승근 환산거리를 이용한 지발당장약량을 적용하고 자승근 환산거리를 이용한 지발당장약량은 67m 이상에서 적용하는 것이 안전할 것이다.

표 1. 현장개요 및 계측방법

발파지역	지발당장약량(kg)	이격거리(m)	암 종	계측자료수
서울시 성북구	0.25~1.5	20~92	화강암	34
경기도 평택시	0.5~1.0	40~168	편마암	35
대전시 유성구	0.625~1.0	20~120	화강암	33
경상남도 창원군	0.25~0.75	30~143	사암	36
전라북도 군산시	0.5~1.0	50~100	각력암	38
전라남도 영광군	0.625~1.0	40~230	화강편마암	38
경상남도 사천시	0.5~1.0	30~102	사암	36
경상남도 함양군	0.5~0.75	30~100	편마암	37

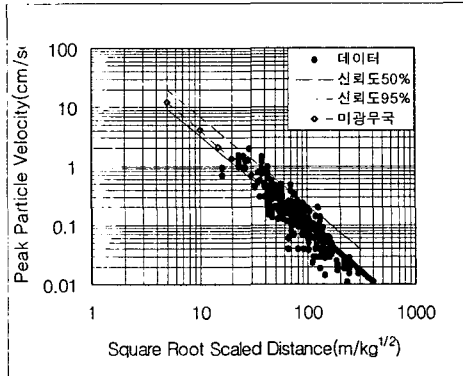


그림 1. 전체자료에 대한 자승근 환산거리와 진동속도 그래프

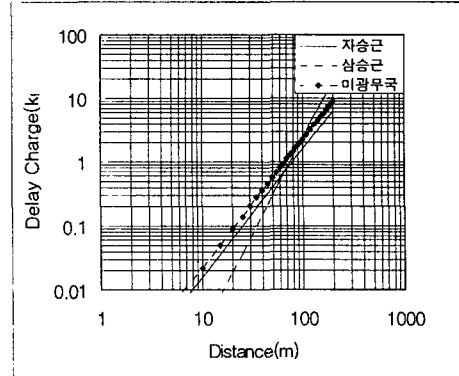


그림 3. 기준치 0.3cm/sec에 대한 거리와 장약량의 관계

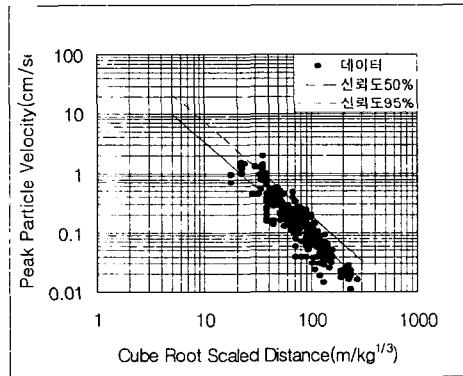


그림 2. 전체자료에 대한 삼승근 환산거리와 진동속도 그래프

2.3 절대거리에 따른 자료분석

발파지역과의 이격거리가 근거리인 경우와 원거리인 경우의 감쇠특성의 변화를 연구하고자 60m를 기준으로 자료를 2가지로 분리하여 각각 분석하였다. 60m 이내의 경우 95%의 신뢰도를 갖는 전파식은 식 (6), (7)과 같고 60m 이상의 경우에는 식 (8), (9)과 같다. 분석결과 근거리의 경우와 원거리의 경우 감쇠율 즉, n값의 차이가 거의 나타나지 않는다. 오히려 삼승근의 경우에는 원거리의 자료에서 n값의 절대치가 약간 증가하여 감쇠가 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

표 2. 미광무국식과 제어발파식의 비교

거리 (m)	예상진동속도(cm/sec)		감소율
	미광무국식	제어발파식	
20	1.326	1.124	15%
30	0.693	0.606	12%
40	0.437	0.391	11%
50	0.362	0.279	9%
60	0.229	0.211	8%
70	0.179	0.167	7%
80	0.144	0.136	6%
90	0.119	0.113	5%
100	0.101	0.097	4%

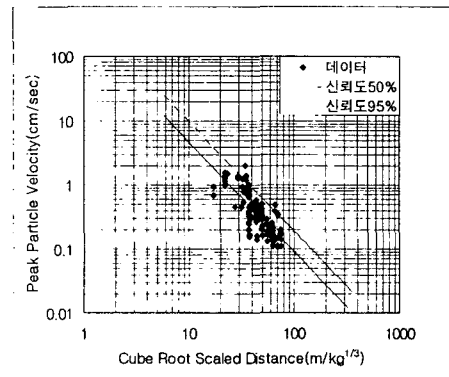


그림 4. 60m 이내의 자료에 대한 삼승근 환산거리와 진동속도 그래프

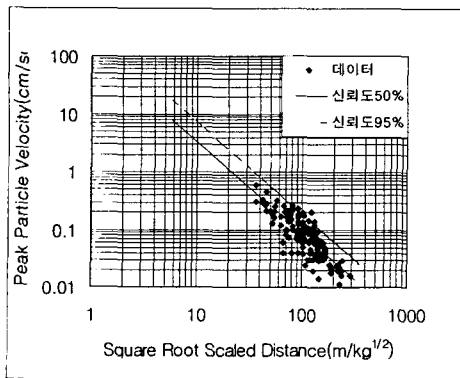


그림 5. 60m 이상의 자료에 대한 자승근 환산거리와 진동속도 그래프

자료의 특성상 환산거리의 분포가 근거리의 경우 16~84, 원거리 자료의 경우 36~290으로 분석 폭이 작다. 그러므로 자료 분포구역의 환산거리 내에서는 예측의 정확도가 높다고 할 수 있으나 K값과 n값이 민감하게 변화 할 수 있으므로 계측데이터 분포구역외의 환산거리에서는 다소 정확도가 떨어질 수 있다. 이러한 점을 감안 할 경우 본 연구에서는 근거리와 원거리의 영향이 나타나지 않은 것은 분석 폭이 작다는 점과 근거리와 원거리의 진동특성에서 주파수의 변화가 감쇠율에 영향을 미칠 만큼 크지 않다는 것일 수 있다.

$$V_{95\%}(\text{cm/sec}) = 329.4 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.58} \quad (6)$$

$$V_{95\%}(\text{cm/sec}) = 521.2 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.72} \quad (7)$$

$$V_{55\%}(\text{cm/sec}) = 273.5 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.58} \quad (8)$$

$$V_{95\%}(\text{cm/sec}) = 1059.2 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.89} \quad (9)$$

2.4 폭풍압의 전파특성

폭풍압의 전파에 관한 많은 연구결과 폭풍압도 발파진동과 같이 환산거리로써 예측이 가능하지만 폭풍압의 경우는 자승근 환산거리가 아닌 삼승근 환산거리로써 표시하는 것이 바람직하다.²⁾ 제어발

파의 특성상 발파시에 보호매트를 사용하고 있는데 지금까지 국내·외에 알려진 일반적인 음압전파식^{2),6)}인 식 (10)과 국제 화약기술자회(ISEE)⁷⁾에서 제안한 식 (11)과의 비교를 위해 전체자료 중 페타어를 부착한 철재매트를 사용하며 계측한 음압자료 123개를 분석하였다. 분석결과 식 (12), (13), 그림 6에서 나타난 바와 같이 신뢰도 50%의 K는 약 1/4 이하로 감소하였고 n은 -1.13으로 유사한 값을 보였다. 이러한 차이는 음압레벨로는 12dB 이하의 감소효과를 나타낸다. 따라서 제어발파시에 철재매트를 사용하는 것은 비산방지 외에 수십 Hz의 지반진동에 의하여 발생하는 저주파 음압보다 폭원부근에서 고주파 발생의 원인이 되는 발파공의 전색불량에 의한 가스 분출음, 암반과피 균열을 통한 가스 분출음, 암반자체변형으로 인한 폭풍압의 감소에 효과적이므로 이러한 철재매트의 사용은 음압레벨 뿐만이 아니라 소음레벨의 감소에 더욱 효과적일 수 있다. 표 3에서 지발당 장약량이 1kg일 경우 일반식 (10)과 제어발파식 (12)에 의하여 예측된 음압레벨을 비교한 결과 20m~100m 구간에서 10~12dB의 감소효과가 있고 표 4에서 ISEE 식 (11)과 제어발파식 (12)와 비교할 경우 예도 약 12dB의 감소효과가 있음을 알 수 있다.

$$P_{50\%}(\text{Pa}) = 3300 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.2} \quad (10)$$

$$P_{50\%}(\text{Pa}) = 2495 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.1} \quad (11)$$

$$P_{50\%}(\text{Pa}) = 674 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.13} \quad (12)$$

$$P_{95\%}(\text{Pa}) = 1233 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.13} \quad (13)$$

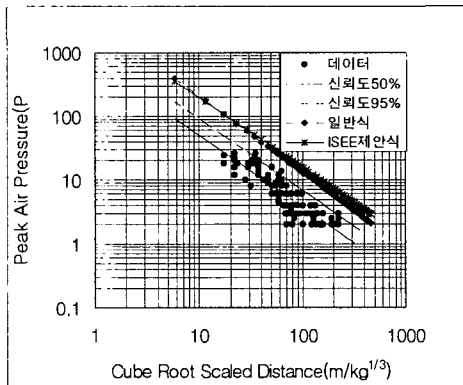


그림 6. 삼승근 환산거리와 음압과의 그래프

표 3. 일반식과 이완식 제어발파식의 음압레벨 비교

거리 (m)	예상음압레벨(dB(L))		감소차 (dB(L))
	일반식	제어발파식	
20	131.6	119.3	12.3
30	127.4	115.6	11.8
40	124.4	113.0	11.4
50	122.1	111.0	11.1
60	120.2	109.3	10.9
70	118.6	107.9	10.7
80	117.2	106.7	10.5
90	115.9	105.6	10.3
100	114.9	104.7	10.2

표 4. ISEE식과 이완식 제어발파식의 음압레벨 비교

거리 (m)	예상음압레벨(dB(L))		감소차 (dB(L))
	ISEE식	제어발파식	
20	131.9	119.3	12.6
30	128.0	115.6	12.4
40	125.3	113.0	12.3
50	123.2	111.0	12.2
60	121.4	109.3	12.1
70	120.0	107.9	12.1
80	118.7	106.7	12.0
90	117.6	105.6	12.0
100	116.5	104.7	11.8

3. 결론

전국 8개 지역에서 화성암, 퇴적암, 변성암 등의 다양한 조건에서 실시된 이완식 발파에서 측정된 소음과 진동 자료를 최소자승법에 의한 회귀분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 전체자료를 분석한 결과 진동예상식의 95% 신뢰도의 K와 n은 자승근의 경우 234.3, -1.52이고 삼승근의 경우는 270.5, -1.56으로 나타났다. 미광무국이 제안한 평균 예상식의 K 160과 n -1.6과 비교할 경우 제어발파의 평균 진동예상식의 K는 107.3, n은 -1.52로서 K와 감쇠율이 작게 나타났다.
- 2) 절대거리에 따른 진동전파특성을 규명하고자 60m 이하와 60m 이상의 거리에서 측정된 자료를 분리하여 분석한 결과 감쇠지수 n이 각각 -1.58로서 감쇠율에는 변화가 없었다. 이러한 결과는 자료의 분석 폭이 작다는 점과 근거리와 원거리의 진동특성에서 주파수의 변화폭이 감쇠율에 영향을 미칠 만큼 크지 않다는 것으로 판단된다.
- 3) 페타이어를 부착한 철재매트를 사용하는 이완식 제어발파에서 발생하는 음압을 예측하고 전파특성을 파악하고자 자료를 분석한 결과 신뢰도 50%의 K와 n이 674, -1.13으로 국내에 알려진 3300, -1.2와 비교하여 K가 20% 이하로 작고 국제 화약기술자회(ISEE)에서 제안한 2495과 비교해서는 27% 이하로 나타났고 보고된 n은 별다른 차이점이 나타나지 않았다. 이러한 효과는 음압레벨에서 10~12dB 이상의 감소효과를 나타내는 것으로 제어발파시에 보호매트를 사용하는 것은 비산방지 외에 폭풍압의 감소에 탁월한 효과가 있음을 알 수 있다.
- 4) 본 연구를 통하여 시공 전에 예상 진동치를 좀 더 구체적으로 예측하여 잦은 설계변경이나 무

리한 시공으로 인한 민원 발생을 최소화 할 수 있도록 다음과 같은 제어발파 진동 예상식과 음압 예상식을 도출하였다.

$$V_{95\%}(\text{cm/sec}) = 234.3 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.52}$$

$$V_{95\%}(\text{cm/sec}) = 270.5 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.58}$$

$$P_{95\%}(\text{Pa}) = 1233 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.13}$$

참 고 문 헌

- 1) 건설신기술 지정등록서, "페타이어를 부착한 철재매트를 이용한 단일자유면에서의 이완식 발파공법", 2001, (주)부암테크, pp.16~19.
- 2) 기경철 외, 1999, "산·학인을 위한 발파공학", 기공사, pp.250~251.
- 3) 김재극, 1999, "산업화약과 발파공학", 서울대학교출판부, pp.369~401.
- 4) 양형식, 1995, "발파진동학", 구미서관, pp.24~40.
- 5) 2003, "암발파설계요령", 건설교통부, pp.1~3.
- 6) Gour C, Sen, 1995, "Blasting Technology", University of New South Wales Press Ltd, pp.115~116.
- 7) Lewis L. Oriard, 2002, "Explosives Engineering, Construction Vibrations and Geotechnology", International Society of Explosives Engineers Cleveland, OH USA, pp.181~220.