

발파진동이 지반의 안정에 미치는 영향

The Influence of Ground Stability with Blasting Vibration

신 진 환* · 오 세 욱**

Jin-Whoan Shin · Se-Wook Oh

(1997년 6월 30일 접수, 1997년 12월 12일 채택)

ABSTRACT

Ground vibrations are an integral part of the process of rock blasting. The sudden acceleration of the rock by the detonation gas pressure acting on the drillhole walls induces dynamic stresses in the surrounding rock mass. This sets up a wave motion in the ground much like the motion in a bowl of jelly when disturbed by the action of a spoon. The wave motion spreads concentrically from the blasting site, particularly along the ground surface, and is therefore attenuated, since its fixed energy is spread over a greater and greater mass of material as it moves away from its origin.

Some theoretical aspects of the generation and propagation of vibrations produced in rock blasting are analyzed; although it must be indicated that this is just a mere approximation to the problem, as the actual phenomena are much more complex owing to the interaction of different types of waves and their modifying mechanics.

1. 서론

1.1 연구의 목적

지반굴착기술은 국토의 효율적이용과 그 가치때문에 크게 발전하였다. 예를들어 천공기술면

에서는 공압착암기로부터 고성능 유압착암기로 발전하였고, 폭약의 장약면에서도 수동식에서 자동식으로 발전하여 왔다. 이러한 굴착기술의 발전은 천공시간의 단축은 물론 안전하고 효율 면에서 크게 발전을 이루게 되었다.

* 충주산업대학교 안전공학과

** 충북대학교 토목공학과

그러나 최근에는 발파를 실시할 때 필연적으로 발생하는 진동이 문제가 되고 있다. 발파작업에서 발생하는 중요한 문제로서는 지반진동, 발파, 소음, 분진등을 대표적으로 들 수 있다. 직접적 피해의 원인은 폭원에 가까운 부분의 응력과, 전파 파동에 의한 균열의 발생이며 폭원에서 어느정도 거리와 떨어진 지점에서는 지반진동에 의한 피해를 들 수 있다. 따라서 발파작업전에 지반 진동으로 인해 예측되는 인접구조물의 영향은 반드시 검토를 해보아야 한다.

지반진동의 영향문제에서 사용될 수 있는 변수로서는 가속도, 변위 및 입자속도를 들 수 있는데 지진문제의 경우 일반적으로 가속도를 사용하는 반면, 지중폭발의 경우 입자속도를 주로 사용한다.

본 연구에서는 모형발파실험을 통하여 측정된 입자속도의 최대치와 허용최대입자속도와와의 비교에 의하여 지반의 안정성을 평가하고 지반진동에 따른 지반변위를 고찰하고자 한다.

1.2 연구내용 및 방법

모형 폭파실험에 의한 모든 동역학적 변위는 변형계, 가속도계 및 압력계의 3종류를 사용하였다. 스트레인 게이지는 shock wave에 의해 콘크리트에 발생하는 변위를 측정하며 가속도계는 shock wave의 전파를 우선적으로 감지할 뿐만 아니라 충격에 대해 감지범위가 크면서도 예민하기 때문에 보통 폭발원 가까운 곳에 설치를 하였다.

연구에 사용된 모형은 콘크리트를 사용한 모형과 암석을 지중에서 발파하기 위한 모형을 제작하였다. 콘크리트 모형은 3회를 나누어 3일에 걸쳐 타설을 하였고 해당위치에 얇은 동판을 삽입한 다음 센서를 설치하였다. 콘크리트 모형 폭파시험으로부터 계속한 결과로부터 최대입자속도와 최대변형률을 계산·비교하였다.

지중변위를 고찰하기 위한 발파시험은 지중에 암석을 설치한 후 표토의 두께를 10 cm, 25 cm, 45 cm로 조절하여 발파로 인한 지반변위를 측정하여 상부지반의 두께규정과 비교하였다.

2. 발파진동 이론

2.1 지반진동 추정식

일반적으로 인근 구조물에의 피해영향은 발파진동의 탁월주파수(Predominant frequency)를 읽을 수 있다. 그러므로 인근 구조물에의 피해영향은 발파진동의 탁월주파수와 구조물 자체의 고유주파수(Natural frequency)가 일치할 때 발생하는 공진현상에 의해 증폭되는 것이다. 진동속도 V(cm/sec)는 다음과 같이 표현된다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, n = 감쇠지수
- b = 환산지수
- k = 자유면 상태, 화약의 성질, 암질 등에 따르는 상수
- D = 폭원으로 부터의 거리, m
- W = 지발당 최대장약량, kg

식(1)은 변수중 b는 차원해석에서는 1/3, 미광무국 중심으로 처리된 계측결과에서는 1/2로 취한다. 하며 D/W^b를 취하고 SD(Scaked Distance, 환산거리)라 놓으며 식은 V=K(SD)ⁿ이 되며 진동값에 대한 선형회귀분석(Linear regression analysis)을 실시하기 위해 측정값을 log-log 그래프에 나타내면 직선관계가 성립되어 K값 및 n값이 결정되며 최종적으로 진동추정식을 얻게 된다.

발파의 진동속도는 폭원에서의 지발당 최대장약량과 거리의 함수로 표시되며 이식은 비선형이나 양변을 log를 취하면 선형이 된다.

$$\log V = A + B \log D + C \log W \dots\dots\dots (2)$$

- A = log k
- B = n
- C = -bn

식(2)는 log-log 좌표에서 직선으로 표시하면 A는 절편 B는 기울기를 의미한다.

2.2 진동주파수 분석

문헌에 의하면 일반구조물의 경우 발파진동의 주파수가 40Hz 보다 작은 low-frequency에서 피해 가능성(damage Potential)이 크다. 일반적으로 근접공사나 발파굴착등은 고주파수가 검출되므로 피해가능성이 작은 것으로 알려져

있다. 주파수가 40~90 Hz 범위의 발생빈도가 대부분 나타났을 경우는 피해가능성을 배제할 수 없는 상태가 된다.

2.3 구조물의 발파 진동기준

발파진동은 폭발원으로부터 수직, 진행, 접선의 3방향으로 측정할 수 있는 발파진동 측정기를 이용한다. 발파진동은 진폭과 주기를 주요로 갖고 있으며 그 크기는 발파진도를 전달하는 매질의 변위(u), 진동변위속도(v), 진동변위가속도(a)로 표시할 수 있다.

$$u = \int v dt \dots\dots\dots (3)$$

$$v = \int a dt$$

$$a = v$$

$$v = u$$

진동의 형태를 일정주기의 단순진동으로 가정할 경우 진동변위, 속도 및 가속도 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$u = U \sin(\omega t + \theta_1) \dots\dots\dots (4)$$

$$v = \frac{du}{dt} = U\omega \cos(\omega t + \theta_2)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = U\omega^2 \sin(\omega t + \theta_3)$$

$$\omega = 2\pi\left(\frac{1}{T}\right) = 2\pi f$$

여기서 f는 진동주파수, T는 진동주기, ω 는 진동수와 관련된 각속도, θ 는 위상차를 의미한다. 지반진동의 피해여부와 관련된 상황에서는 대부분 최대절대치만이 중요하므로, $u_{max}=U$, $v_{max}=V$, $a_{max}=A$ 라 하면 진동변위, 속도, 가속도의 각 최대치 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$U = \frac{V}{2\pi f} : V = \frac{A}{2\pi f} : f = \frac{1}{t} \dots\dots\dots (5)$$

발파진동은 지진진동에 비하여 지속시간이 짧고, 주파수 범위도 수십에서 수백 Hz인 구주파인 관계로 감쇠가 쉽게 일어나며, 파형이 비교적 단순하다.

2.4 발파진동속도와 장약량, 거리와의 관계

발파진동의 전파특성을 결정짓는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입

지조건은 발파부지와 인근구조물의 기하학적 형태 및 대상암반의 지질적 특징 및 역학적 성질 등을 말하고, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파 유형, 폭발원과 측정간의 거리 등이다.

이와같은 요인들은 발파진동의 예측을 위하여 먼저 조사되어야 하지만 이들중에서 암반중의 불연속면의 발달상황, 암반의 강도등과 같은 탄성파의 전파와 관계가 깊은 지반의 지질특성, 지발뇌관을 사용하여 충분한 시간으로 분할점화되는 지발당 최대장약량과 폭원으로부터의 거리 등이 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이 된다. 이때 지질특성에서 고려되어야 할 사항은 발파에 의한 탄성파를 전달하는 암반의 특성 및 표토층의 두께 등이 중요한 요소가 된다.

발파진동의 전파특성을 결정하는 조건은 크게 입지조건과 발파조건이며 입지조건은 발파부지와 인접구조물의 형태 및 대상암반의 특성 및 역학적 성질을 뜻하며 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 장약량, 전색상태, 자유면의 수, 발파 유형, 폭발원과 측정간의 거리등이다. Hendron, Devine, Oriad(1965) 등 많은 학자들이 발파현상에 대한 변수를 차원해석을 근거로 많은 발파진동의 계측분석결과를 토대로 구조물의 피해의 척도가 되는 지반의 진동변위속도를 지발당 최대장약량과 폭원으로 부터의 거리를 매개변수로 하는 경험식을 식(1)과 같이 제시했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 거리에 따른 입자속도와 변형률

Table 1은 모형실험에 의해 각 거리별로 최대입자속도를 계측한 값을 나타낸 것이다. 실험은 모형 콘크리트의 충격파에 의한 입자속도를 얻기 위해 콘크리트가 파손을 입지 않도록 폭약 밀도를 조절하여 한 번 발파후 공동내부를 청소하고 폭약의 양을 늘려 재 충전한 후 실험을 하였다.

Table 2는 폭약밀도와 거리를 조정하여 변형률을 계측한 값을 나타낸 것으로 거리에 따라 변형을 측정된 결과 폭약밀도가 클수록 변형률

은 증가하며, 거리가 증가함에 따라 변형률은 점차 감소하는 것으로 나타났다.

Table 1 거리와 폭약밀도에 따른 입자속도

거리 (cm)	최대입자속도 (cm/sec)				폭약밀도 (10^{-3}g/cm^3)
	Test1	Test2	Test3	Mean	
50.3	6.10	8.84	3.96	6.28	1.6
	17.07	18.90	21.65	19.21	4.8
92.4	33.64	60.98	51.83	48.78	16
	1.22	2.13	0.85	1.40	1.6
	5.49	7.62	6.71	6.62	4.8
151.2	21.34	18.29	16.77	18.81	16
	0.98	1.52	0.91	1.13	1.6
	3.05	4.88	4.57	4.18	4.8
	7.01	6.10	8.54	7.23	16

Table 2 거리와 폭약밀도에 따른 변형률

거리 (cm)	최대변형 (micro-cm/cm)				폭약밀도 (10^{-3}g/cm^3)
	Test1	Test2	Test3	Mean	
34.4	69	78	20	55.67	1.6
	94	109	130	111	4.8
	224	229	271	241.33	16
44.5	38	25	20	27.67	1.6
	86	102	95	94.33	4.8
	261	155	206	207.33	16
64.9	33	20	18	23.67	1.6
	33	61	63	52.33	4.8
	71	54	32	52.33	16

Fig. 1과 Fig 2은 폭약밀도를 1.6, 4.8, 16 $\times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ 로 조절하여 측정한 거리와 폭약밀도에 따른 입자속도 및 변형률의 관계를 나타낸 것이다.

3.2 입자속도 예측치와의 비교

입자속도에 대한 예측식은 Micky의 식을 사용하고 있다.

$$v = K_v W^{2/3} R^{-3/2}$$

여기서, v : 입자속도(cm/sec)

K_v : 지반상수

W : 폭약량

R : 폭발지점으로부터의 거리

입자속도에 대한 Micky의 예측식을 이용하여

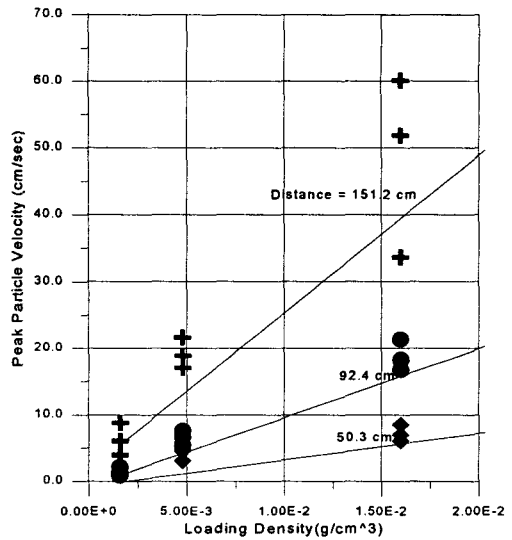


Fig. 1 폭약밀도에 따른 최대입자속도

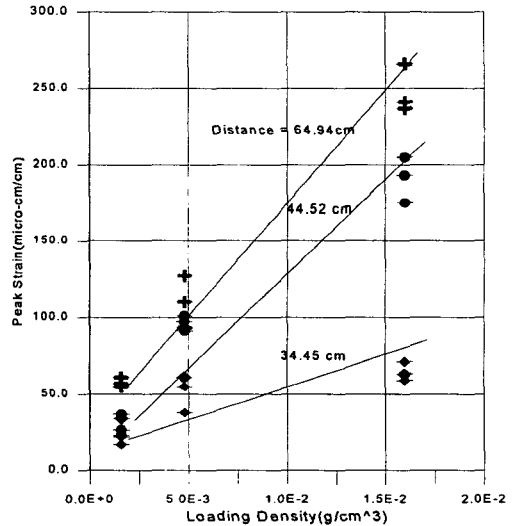


Fig. 2 폭약밀도에 따른 최대 변형률

입자속도를 구하면 Table 3과 같이 나타나며 이는 Fig.3~5에 보이는 것과 같이 예측치와 비교적 일치하는 경향을 보인다.

3.3 압축파 속도를 이용한 변형률의 예측

변형률은 직접측정에 의해 획득할 수도 있으나 입자속도 v 와 콘크리트의 압축파 속도를 적

용하여 간접적으로 계산할 수도 있다.

Table 3 Micky의 예측식을 이용한 거리와 폭약밀도에 따른 최대입자속도

폭약밀도 (10 ⁻³ g/cm ³)	거리 (cm)	최대입자속도 (cm/sec)
1.6	50.31	6.19
	92.38	2.50
	151.23	1.19
4.8	50.31	12.93
	92.38	5.18
	151.23	2.47
6	50.31	28.94
	92.38	11.62
	151.23	5.55

$$\epsilon = \frac{v}{c} \quad v = \epsilon c \dots\dots\dots (7)$$

같이 표현할 수 있다.

Table 4 계산에 의한 최대변형

폭약밀도 (10 ⁻³ g/cm ³)	거리 (cm)	최대변형 (micro-cm/cm)		
		22.4	22.4	10
1.6	484.2	22.4	22.4	10
	91.5	3.0	5.4	2.16
	75.3	2.47	3.86	2.3
4.8	1317.2	43.2	47.9	54.8
	423.8	13.9	19.3	17
	235.4	7.72	12.35	11.58
16	2588.6	84.9	154.4	131.2
	1646.5	54	46.3	42.46
	541.5	17.76	15.4	21.6

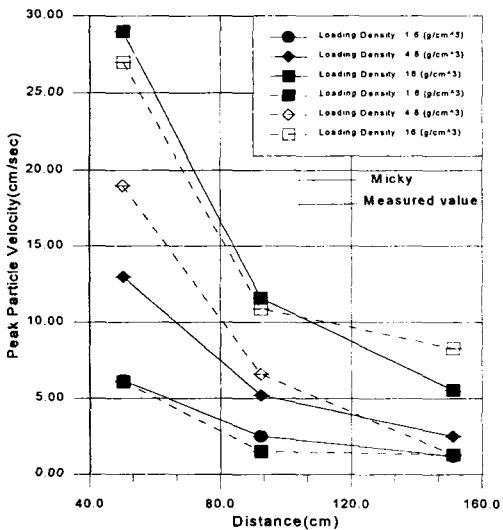


Fig. 3 폭약밀도에 따른 거리별 입자속도

일반적으로 입자속도와 응력의 관계는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$v = \frac{\sigma c}{E} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, v: 입자속도

σ: 압축응력

c: 압축파의 전파속도

E: 탄성계수

식(6)으로부터 $\sigma/E = \epsilon$ 이므로 ϵ 는

실험에 사용된 모형콘크리트의 압축파속도 12,954 ft/sec를 적용하여 입자속도를 구할 수 있으며, Table 3은 식(7)에 의해 계산되어진 변형률을 나타낸 것이다. Figs. 6~Fig. 8은 계측에 의한 변형률과 계산에 의한 변형률을 비교한 것으로 전반적으로 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다.

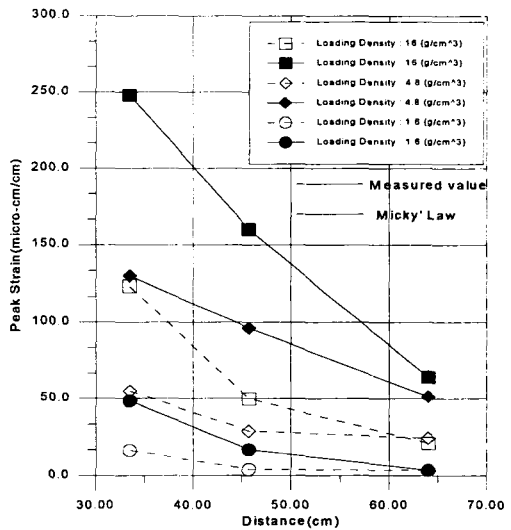


Fig. 4 폭약밀도에 따른 거리별 최대변위

3.4 상부지반의 영향

모형실험에서 하부지반을 20 cm로 조정하고 암석을 설치한 후 상부지반이 10 cm인 상태에서 발파를 실시하였다. 암석시편과 지반측면과의 거리는 30 cm로 설치하였고 가장 먼 지반의 거리는 70 cm로 설치하였다.

파괴된 암석의 간격은 약 8 cm 정도였으며 상부방향으로 10 cm의 변위가 발생하였고 측면으로는 영향이 관측되지 않았다.

상부지반을 25 cm로 한 경우에는 상부지반과 측방향 모두 변위와 진동이 관측되지 않는 것으로 나타났다. 상부지반의 안전규정에 의하면 공동상부의 지반두께가 $3.5 W^{1/3}$ 이상이면 붕괴가 발생하지 않는다고 하였다. 실험결과를 이 식에 모형실험 결과에 적용하여 보면 Table 5와 같다.

Table 5 Safety thick upper ground

상부지반두께 (cm)	10	25	40
장 약 량 (g)	4	4	4
실험 결과	붕괴발생	변위없음	변위없음
예 측 결 과	22cm이상 되어야 안전함		

3.5 입자속도와 상부지반의 두께와의 관계

측정된 입자속도에 의해 계산된 식과 변형량이 거의 근접한 값을 나타내고 있으므로 입자속도로부터 상부지반의 변형량을 예측할 수 있다.

Micky(1964)와 Hansen & Lombard(1965)에 의해 제안된 지반조건 계수 0.0144를 식에 대입하면, 상부지반이 10cm에서 입자속도는 3.35 cm/sec로 예측되며, 상부지반이 25 cm에서 입자속도는 0.88 cm/sec, 상부지반이 40 cm에서는 0.44 cm/sec로 예측된다.

따라서 최대입자속도에 의한 건물의 피해수준과 비교해 보았을 때, 상부지반의 두께가 10 cm에서는 벽체에 틈이 벌어지기 시작하는 정도로 볼 수 있다.

5. 결 론

1) 계측에 의한 변형률과 계산에 의한 변형률을 비교한 결과 전반적으로 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다.

- 2) Micky의 경험식을 이용하여 최대입자속도를 예측할 수 있으며, 이러한 예측치를 근거로 하여 발파로 인한 지반의 안정성을 판단할 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) 거리에 따라 변형을 측정된 결과 폭약밀도가 클수록 변형률은 증가하며, 거리가 증가함에 따라 변형률은 점차 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 거리와 폭약밀도에 따라 입자속도를 측정된 결과 폭약밀도가 클수록 입자속도는 증가하며, 거리가 증가함에 따라 입자속도는 감소하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) 宣勇, "지하공간활용사례" '도시발전과 지하공간'에 관한 국제심포지움 대한토목학회지, 제 39권 제6호, pp. 96~112, 1991.
- 2) 박철환, 김길수, "암반기계 굴착공법의 적용 연구", 터널과 지하공간, 한국암반역학회, Vol. 2, pp. 177~189, 1992.
- 3) 유창하, "암반굴착에 의한 발파진동, 소음 및 비석의 조절", 한국암반역학회, 터널과 지하공간 2권 1호, pp. 102~115, 1992.
- 4) 이정인, "발파진동, 발파풍압 및 비석의 조절을 통한 안전발파", 대한토목학회지, Vol. 41, No. 1, pp. 99~117, 1993.
- 5) 김운영, "다중 격실형 지하저장공동의 구조적 안정성에 관한 연구", pp. 1~64, 1993.
- 6) 雜厚謙, "발파진동의 주변에의 영향과 대책", 원기술, pp. 1~68, 1994.
- 7) Corps of Engineers, U.S. Army Design of Underground Installations in Rock Protective Manual TM 9-1300-206, 1986.
- 8) Odello, R.J. "Origins and implications of underground storage requirements" 19th Explosives Safety Seminar, L.A., CA, pp. 1161~1090, 1980.
- 9) Terzaghi, K., Richart, F.E., Stresses in Rock about Cavities, Geotechnique, Vol. 3, pp. 57~90, 1952.