

발파진동의 크기에 미치는 디커플링효과의 연구

Decoupling Effect on the Level of Blasting Vibration

김 왕 수* 임 한 옥**
Kim, Wang-Soo Lim, Han-Uk

Abstract

The pressure-time profile of the explosion gases can controlled for the use of cartridge explosive with two techniques known as Decoupling and spacing of the charges. Decoupling consists of a space between the explosive column and wall of the blast hole. Four different decoupling index 1.4, 1.8, 2.34, 3.0 are selected in this field study. The level of ground vibrations with each decoupling index was measured and the empirical particle velocity equation from these data was obtained. The condition of new cracks at blast hole are also examined.

As the decoupling index is increased, the level of the blast vibration is decreased. But the cracks in rock masses are efficiently formed to remove the broken rock. The vibration constant associated with test sites is given as $K=1564.5(D.I.)^{-1.3233}$ in terms of D.I.(decoupling index).

키워드 : 디커플링 효과, 지반진동, 입자속도실험식.

Key words : *decoupling effect, ground vibration, empirical particle velocity equation.*

1. 서론

최근 우리 나라에서도 지하철, 전력구, 통신구 등 각종 터널 공사와 대규모 아파트 단지 조성 및 대형 빌딩의 지하 터파기 등 기초굴착공사가 도심지에서 널리 시행되고 있다. 이 경우 시공의 능률성과 경제성을 도모하기 위하여 발파작업을 실시할 때 일반적으로 발파진동, 소음 및 발파풍, 암편의 비산 등이 수반되어 때때로 환경문제가 야기되기도 한다. 특히 발파진동의 경우 인근 구조물, 정밀기기, 인체에도 영향을 미치기 때문에 민원발생의 주요 요인이 되며 때로는 다툼의 대상이 되기도 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 많은 연구와 시

공이 이루어지고 있으나 아직껏 완벽한 단계에는 도달하지 못한 상황이다. 일반적으로 발파진동을 감소시키는 방법으로는 첫째 발파진동의 크기를 감소시키는 방안과, 둘째 발생된 진동의 전파 경로를 차단하는 방법을 들 수 있다. 첫째 방안의 목적으로 지발당 장약량을 줄이는 방법, 지발발파시 지연시간의 조절로 진동의 상호간섭 및 분산을 이용하는 방법, 저비중 저폭속의 폭약을 사용하는 방법, 프리스플리팅, 쿠션블라스팅과 같은 제어발파 기법(controlled blasting) 등을 들 수 있고 후자의 방안으로 방진구(防振溝)를 이용하는 방법 등이 있다.

지발당 장약량을 줄이는 방법으로는 종래의 방법과는 달리 암반내에 인공균열을 형성시킨 후 기계로 파쇄된 암편을 제거하는 선행이완발파(先行弛緩發破)를 예로 들 수 있다. 그리고, 지연시차(遲延時差)를 이용하는 방법으로는 MS(Milli-second) 너관, 다단발파기(多段發破機)의 활용 등이 있다.

* 현대건설(주) 차장, 기술사.

** 강원대 지구시스템공학과 교수, 공학박사.

그리고 저비중 저폭속 폭약으로 국내에는 합수 폭약의 일종인 Kovex, Newmite 폭약과 일명 정밀(精密)폭약이라 일컫는 Finex 폭약 등이 개발, 사용되고 있다.

한편 제어발파(또는 정밀발파)에는 라인드러링, 스무스블라스팅, 프리스플리팅, 쿠션블라스팅 등이 이용되고 있다. 그리고 방진구를 설치하는 방안은 진동이 전파하는 경로에 인공적으로 트랜치(trench)를 굴착하는 방법으로 이 경우 수m 길이로 만들어야 하기 때문에 경제성 면에서 적용에 한계가 있다.

지금까지 국내에서는 위에 예시한 여러 가지 원리를 활용한 공법에 대하여 비교적 많은 연구가 수행되었고(1, 2, 5), 현장에서도 적용되고 있으나 쾌적한 환경을 추구하는 국민의 욕구가 강화되어 자연히 이들에 대한 법적 규제 역시 나날이 엄격해지고 있는 현실이다.

따라서 본 연구에서는 장약공내 폭약의 위력을 인공적으로 약화시켜 저비중 저폭속의 폭약기능을 갖도록 하는 디커플링효과(Decoupling effect)에 관하여 연구하였다. 일반적으로 최적의 발파효과를 얻기 위해서는 적정 장약길이를 유지하여야 하는데 현재 시판되고 있는 화약은 봉상(棒狀)이기 때문에 장약시 제한을 받게 된다. 스무스블라스팅이나 쿠션블라스팅과 같은 제어발파공법은 디커플링계수를 응용한 방법이기도 하지만 이에 관한 현장 실험에서는 정량적 평가가 거의 이루어지지 못한 아쉬움을 갖고 있다. 즉 본 연구에서는 화약의 위력을 극도로 억제시켜 천공경/장약경의 비, 즉 디커플링계수를 달리할 경우 발생하는 지반진동의 크기를 계측, 비교하여 그 영향을 정량적으로 평가하는데 연구의 목적이 있다. 아울러 이 원리를 이용한 새로운 발파공법이 개발될 수 있는 계기가 되었으면 하는 바램이다.

2. Decoupling 효과

폭약의 폭력을 조정하는 방법으로는 장약시 압입시켜 장약밀도를 높이는 경우가 있고 이와 반대로 장약밀도를 적게 하는 경우가 있다. 후자의 경우 공경(孔徑)과 약경(藥徑)사이의 Fig. 1과 같이 공간을 유지하면, 폭약의 폭력은 공간에 존재한 공기로 인해 완충(cushion)작용을 일으켜 폭력이 저하된 상태에서 암석에 전달된다.

일반적으로 폭약이 폭발 할 때 폭약밀도 ρ_e , 폭속 v_e 일 때 폭굉압력 P_D 는 식 (1)로 주어진다.

$$P_D = 0.000424 v_e^2 \rho_e \times (1 - 0.543 \rho_e + 0.193 \rho_e^2) \quad (1)$$

이 폭굉압력 P_D 는 폭약과 접하고 있는 매질에 전달되지만 디커플링 이용에 의한 발파의 경우는 매질이 공기이다. 지금, 공기의 밀도 ρ_a , 공기 충격파(P파)의 전파속도 C_a 로 하면, 폭약과 공기의 경계면에 있어서 발생하는 최고압력 P_a 는 식 (2)로 주어진다.

$$P_a = [2\rho_a C_a / (\rho_a C_a + \rho_e v_e)] \times P_D \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 쓰고 실제 경우의 계산 예를 제시해 보면 폭약으로 2호 Kiri dynamite ($\rho_e = 1.4\text{g/cm}^3$, $v_e = 650000\text{ cm/sec}$)를 사용한다고 하면 $P_D = 1.55 \times 10^5\text{ (kg/cm}^2\text{)}$ 이 된다. 지금 공기를 매질로 생각한 경우 $\rho_a = 0.0012$, $C_a = 340\text{ m/sec}$ 로 하여 $P_a = 13.90\text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ 이 된다. 즉, P_a 는 약 1/1100이 되어 대폭 압력감소를 나타낸다. 이것은 완충재로서의 공기의 층이 얼마나 벽면 손상 방호에 효과적인가를 나타내는 수치이다.

한편, 폭약이 장약공내에서 폭발할 때, 장약공내에 작용하는 가스압력 P_s 은 Abel-Noble 상태방정식으로부터 다음식으로 주어진다.

$$P_s = (f \cdot L) / (V - a \cdot L) \quad (3)$$

여기서, P_s : 장약공에 작용하는 폭발가스압력 (kgf/cm²)

f : 화약력 (l · kgf/cm²/kg)

L : 폭약중량 (kg)

V : 장약실 체적 (l)

a : 폭약의 코볼륨

이때 폭약의 코볼륨(covolume) a 는

$$a = 1.5 / (1.26 + 1.33\rho_e) \quad (4)$$

로 주어진다.

식(3)에서 P_s 은 당연히 장약실과 폭약 체적의 비율이 클수록 작게되며, 이에 따라 장약 공벽에 가해지는 힘도 약하게 된다. 즉, 장약실 체적과 폭약 체적의 비율을 변화시킴으로써 장약공벽에 작용하는 가스압력을 쉽게 제어할 수 있다.

한편 디커플링 지수에 관한 국내외 몇 가지 사례를 들면 다음과 같다. 하근동 등에 의한 시멘트 모르타르 블록과 아크릴 판을 시료로 하여 너관으로 기폭 시키면서 관찰한 결과 장약공 주위에 형성되는 파쇄대영역의 평균반경은 디커플링 지수가 증가함에 따라 대체적으로 지수 함수적으로 감소

하는 경향을 보이며 또한 장약공내에 최초로 나타난 변위 필스의 진폭과 주기 역시 동일한 현상을 보임을 알았다(12).

Ito 등(10)은 알루미늄 블록을 이용하여 DDNP로 기폭시키고 알루미늄내에 투사된 응력파에 의한 변위 및 변위 속도를 FM용량 변위계를 이용하여 측정한 결과는 Fig. 2와 같이 지수 함수적으로 감소함을 입증하였다.

이상 2가지 연구 결과는 단순한 재료를 모델로 사용하여 실시한 것으로 식(3)에 의한 계산 결과와 비교적 잘 일치한다.

그러나 이들 연구는 실험실 연구결과로서, 지질, 균열의 발달 상태와 정도 등 여러 가지 자연적 조건이 상이한 현장 실험과는 차이를 보일 것으로 예상된다

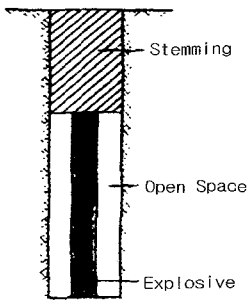


Fig. 1 Charging Method Using Decoupling Effect

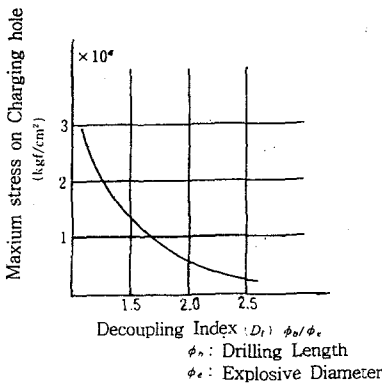


Fig. 2 The Relationship of Maximum Stress on the Wall of Hole Inside & Decoupling Index

3. 시험구역의 지형, 지질 및 암반의 특성

3.1 지형

본 연구지역은 행정구역상 서울특별시 중구 신

당4동 40-127 번지 일대에 속하며 서울 한 복판에 위치한 독립된 산구인 남산(표고 252 m) 자락에 위치한다. 본 역(域)의 앞쪽은 북한산(표고 759.5 m)에서 남쪽으로 해발 300~400 m 내외의 크고 작은 능선으로 이어져 경복궁 방향의 인왕산(표고 340 m), 서대문 방향의 안산(표고 259.5 m)으로 연결되고 있으며, 본 역의 뒤쪽은 수락산(표고 637.3 m)에서 남쪽으로 불암산(표고 465 m), 용마산(표고 348 m)으로 이어져 위커희방향의 해발 200~300 m의 능선으로 연결되는 남북방향의 산계를 보이고 있다.

본 역의 수계는 이들 산계에서 발원하는 수지상(樹枝狀)의 소하천들이 서울 도심지 중앙을 흐르는 청계천, 정릉천, 중랑천을 형성하여 청계천과 정릉천은 동대문구 용두동에서 두 개천이 합류하여 성동구 성수동에서 중랑천에 합류되어 서울을 동서로 가로질러 흐르는 한강에 유입되고 있다. 본 역의 임상(林狀)은 주택단지로서 언급할 수 없으나 본 역 주변(남산)의 임상(林狀)은 비교적 양호한 편이다.

3.2 지질 및 암반의 역학적 특성

본 연구지역의 지질은 중생대 류라기의 대보화강암이 주로 분포되어 있으며 남산을 중심으로 용산구 방향은 선캄브리아기 경기 변성복합체의 호상흑운모 편마암이 분포되어 있다.

본 지역의 분포지질인 대보화강암의 주성분 광물은 석영, 장석, 운모, 각섬석으로 조립질이며 비교적 신선하나 장석의 함유량에 따라 부분적으로 비교적 깊은(10 m 내외) 풍화대가 발달되어 있다.

풍화대층에는 직경 1.0 m 내외의 점석(点石)이 협재하기도 하다.

본 연구지역의 터파기 면상에 나타난 절리(joint)는 수직절리 및 불규칙절리가 발달되어 있으며 이들 절리면에는 간혹 지하수 유동흔적이 인지(認知)되며, 얇은 점토막이 협재되어 있으나 터파기 면상의 전반적인 암질은 신선하며 대피를 보이고 있다. 본 지역 암반에 발달된 대표적인 절리의 주향과 경사는 N65~70E, 85~90NW이다.

한편 공사장에서 피상의 암석을 채취한 후 실험실에서 일축압축시험, 간접인장시험, 삼축압축시험을 실시하여 암석의 역학적 특성을 알아보았는데 그 결과는 Table 1과 같다. 일축압축강도는 이미 균열이 존재하였던 NO. 1과 NO. 2 시추공의 시료를 제외하면 1014~1105 kgf/cm²의 값을 나타내었는데 이 지역의 암석이 평균 5~7 m 심도 이하에서는 보통암 이상으로 판단되었다. 겉보기 밀도는 2.54~2.57 gr/cm³, 공극률 0.375~0.627 %로 측정되었으며, 간접인장시험을 통하여 얻은 인장강도는 일축압축강도의 4.7~5.7 %에 해당하는 30~59 kgf/cm²의 값을 보였다.

Table. 1 Characteristic of the Rock Specimen from the Test Blasting Site.

NO	1	2	3	4	5	6	ave
Apparent Density (gr/cm ³)	2.543	2.551	2.559	2.573	2.560	2.541	2.555
Porosity (%)	0.627	0.614	0.429	0.375	0.389	0.427	0.477
Uniaxial compression strength (kgf/cm ²)	659	575	1057	1105	1102	1014	918.67
Young's Modulus (×105kgf/cm ²)	2.252	1.000	4.425	4.348	6.547	5.556	4.021
Possion's ratio	0.337	0.155	0.235	0.304	0.226	0.481	0.290
P-Wave Velocity (m/sec)	1485	1455	2186	1885	1864	2036	1818.5
S-Wave Velocity (m/sec)	868	849	1270	1101	1083	1183	1059
Triaxial Compressive Strength (kgf/cm ²)	max 2037 (50)	max 2356 (100)	max 1356 (50)	max 1542 (100)	-	-	1822.8
Tensile Strength (kgf/cm ²)	38	30	47	59	55	48	46.17
Internal Friction Angle (°)	59						
Cohesion (kgf/cm ²)	102						

* () Confining Stress (kgf/cm²)

탄성계수는 (1.0~6.547)×105 kgf/cm², 포아송비는 0.155~0.481의 값을 보이며 탄성파 속도는 P파가 1455~2186 cm/sec, S파가 849~1270 cm/sec로 구해졌다. 삼축압축실험을 통해 구해진 점착력은 102 kgf/cm², 내부마찰각은 59° 이었다. 따라서 이들 결과를 종합해보면 굴착대상 암반은 등급분류상 보통암에 속하는 것으로 판단된다.

4. 실험방법

4.1 Decoupling 계수의 설정

실내 실험의 결과 Fig. 2에서 보는바와 같이 디커플링 계수가 커질수록 폭속 및 공벽에 작용하는 응력의 감소가 일어남을 알 수 있다. 폭속과 응력의 감소는 이론적으로 진동의 감소를 의미한다. 따라서 본 연구에서는 진동제어를 위하여 적절한 디커플링 계수를 설정하고, 그 값에 따라 진동의 크기가 어떻게 변화하는가를 현지 발파를 통하여 확인하기로 하였다.

진동제어발파는 주로 시가지에서 이루어지는 점을 감안하여 폭약을 다소 제한적으로 선택 사용하였고, 천공경은 실제 현장에서 주로 사용하고 있는 천공장비의 성능을 고려하여 45 mm 와 75 mm로 국한하였다. 때때로 현장에 따라서 소형 착암기를 사용하는 경우 38 mm 공경도 있지만 디커플링

효과를 이용한 발파를 비교하기 위해서는 동일조건을 유지하여야 함으로 본 연구에서는 제외하기로 한다.

사용폭약은 충분한 디커플링 효과를 얻기 위해 다짐작용이 이루어지지 않도록 전색 필름(film)을 이용하였으며, 장약시에는 이를 충분히 고려하여 실시하였다.

Table. 2는 본 연구의 수행을 위하여 설정한 D.I. 값이며, 앞에서 설명한 바와 같이 현장의 시공성을 고려하였다.

Table. 2 Decoupling Index for Test Blasting

Hole Diameter (mm)	Explosive Diameter (mm)	Decoupling Index	Drilling Length (m)
45	25	1.80	2.7
	32	1.41	2.7
75	25	3.00	2.7
	32	2.34	2.7

4.2 실험방법

장약공내의 디커플링계수가 발파진동의 크기에 미치는 영향을 검토하기 위해 Table 2와 같이 설정된 D.I. 값을 기준하여 발파패턴을 설계하였는데

이것은 2 단계로 나누어 발파를 실시하였다. 첫째는 진동의 영향을 고려하지 않고 단순히 암반에 균열을 형성시키는데 필요한 장약량과 적정 공간격을 설정하기 위함이며, 둘째는 이 발파의 결과에 따라 적절한 공간격을 설정한 다음 진동의 크기 및 암반파쇄정도에 미치는 영향을 검토할 목적으로 발파를 실시하였다.

첫 단계의 발파 패턴은 Fig. 3과 같이 천공장 2.7 m, 천공경 45 mm, 천공간격 0.5 m, 공당 장약량은 0.75 kg, 약경은 2 종류로 각각 25 mm 및 32 mm를 기준하여 장약한 다음, 1회에 1 공씩 기폭시켜 각 D.I.별로 3회씩 총 12회를 실시하였다.

두 번째 단계에서는 첫 단계의 발파 결과를 종합, 분석하여 천공간격을 조정하였다. 즉 Fig. 4와 같이 천공장과 공당 장약량은 각각 2.7 m 및 0.75 kg로 고정하였고, 천공 간격은 천공경과 약경에 따라 Table 3과 같이 변화 시켰다.

Table. 3 Blasting Patterns

Drilling Length (m)	Charge in Delay (kg)	D.I.	Dia. of Drill hole (mm)	Dia. of Explosives	Spacing (m)
2.7	0.75	1.80	45	25	0.4
2.7	0.75	1.41	45	32	0.5
2.7	0.75	3.0	75	25	0.55
2.7	0.75	2.34	75	32	0.60

이 경우 각 D.I.별로 지발뇌관을 사용하여 1회에 3공씩 4회 발파를 실시하였는데 이때 매 발파시마다 4 대의 진동계측기로 발파진동을 계측하였다.

시험발파에 사용된 폭약의 종류는 뉴마이트(Newmite)로 이들의 특성은 Table. 4와 같다.

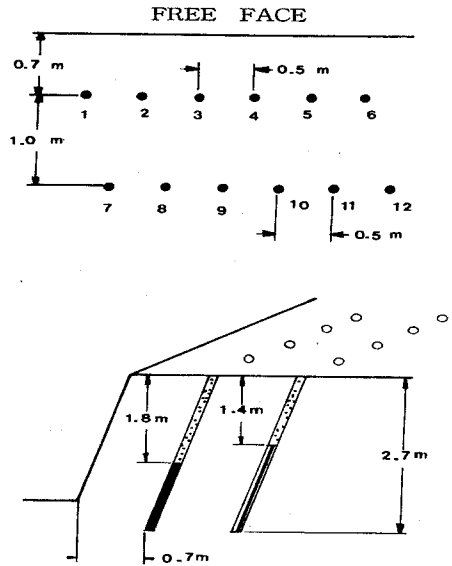
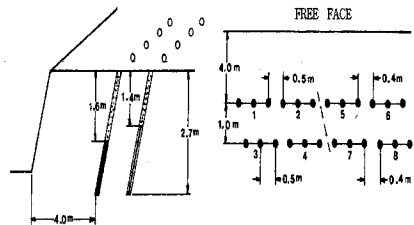
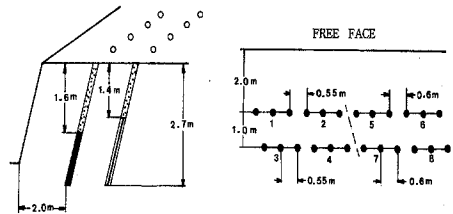


Fig. 3 The Pre-Test Blasting Design According to Variance of Each Decoupling Index
* No means detonation order



(a) Hole Diameter 45mm



(b) Hole Diameter 75mm

Fig. 4 The Test Blasting Design According to Variance of Each Decoupling Index
* No means detonation order

Table. 4 Properties of Newmite Explosive

Properties	Contains
Detonation Velocity Test (m/sec)	5,500
Diameter (mm)	25, 32
Bulk Density	1.3
Detonation Energy (kcal/kg)	1,160
Drop Test (cm)	50
Cold Resistance (°C)	-20
Gas Volume (l/kg)	870
Water Resistance	very good

본 시험에 사용한 발파진동측정기는 Instantal사 DS-477, DS-677 기종으로 주파수의 범위가 5~200 Hz 사이의 진동을 계측하고, 동시에 폭굉압을 측정할 수 있는 계측장비이다.

이 장비는 수직방향, 진행방향 및 접선방향 등 세 방향 벡터 값을 감지하는 트랜스듀서 및 공기 증으로 전달되는 폭굉압을 감지하는 사운드 센서 그리고 측정을 제어하고 기록하는 모니터로 구성 되어있다. 프린터를 통하여 각 이벤트마다 진동시간에 다른 진동변화와 주파수의 범위, 지발시차 그리고 미량무극의 안정규정에 대한 자료를 프린트 할 수 있다.

측정방법은 각 진동계의 특성상 약간의 오차가 있을 수 있으므로 동일 조건에서 비교실험을 통해 보정한 수치를 사용하였다.

Fig. 5는 시험발파시 계측기의 설치 현황 및 측정 위치를 보여준 그림이다.

반면에 좁은 공간에서 천공, 암반파쇄, 적재 및 차량운행 등 다수의 증장비가 가동되는 현장 여건 상 소음 즉 발파풍압(air blast)의 크기를 계측, 비교하기는 어려워 이에 관한 검토는 제외하였다.

5. 실험결과 및 해석

D.I. 값을 각각 1.4, 1.80, 2.34, 3.00 등 4단계로 구분하고 폭원파 측정점간의 거리를 15.0 m 에서 54 m 까지 여러 가지로 변환시킨 조건에서 계측된 진동치의 크기는 Table. 5와 같다.

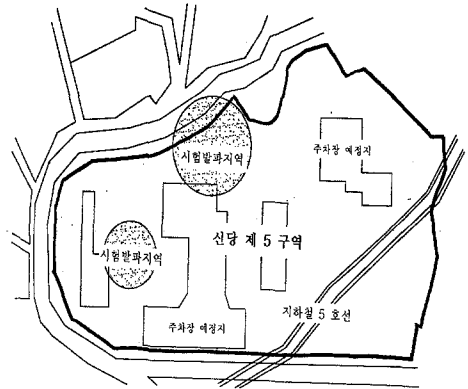


Fig. 5 The Site of Blasting & Vibration Monitor Installed in Test Blasting

5.1 D.I. 값의 변화에 따른 진동의 크기

Table. 5의 결과를 각 D.I. 별로 회귀분석하여 최대진동속도와 환산거리 (Scaled Distance)로 나타낸 예를 들면 Fig. 6과 같다. 일반적으로 폭원과 계측점간의 거리가 짧을수록 회귀분석시 상관계수 (r)가 낮은 경향을 보인다. 그러나 본 연구의 분석 결과 그 값이 0.788에서 0.891 사이에 있음을 볼 때 암반의 특성을 고려하면 비교적 좋은 결과를 보여준다고 하겠다.

이때 구해진 진동추정식에서 각각의 진동상수 K, n 값을 요약하면 Table. 6과 같다. 단, 여기서 진동상수는 자승근 환산식 (Square root scaled distance)을 기준한 것이다.

한편 이들의 상대적인 진동치의 크기를 비교해 보기로 한다. Table. 6에서 각 D.I. 별 진동 추정식을 살펴보면 n 값이 약 1.81로서 거의 같게 나타나므로 K 값으로 그 상대적인 진동치의 크기를 비교해 볼 수 있는데 이를 표시하면 Table. 7과 같으며 이를 도시하면 Fig. 7과 같다. Ito 등은 D.I. 값의 차이에 따른 발파공내에 작용하는 응력의 크기를 지수함수로 표시하고 있어 본 연구에서도 이 식을 이용하기로 한다.

즉, 그림에서 D.I. 값의 변화에 따른 진동상수 K 값은 식 5와 같이 함수적으로 감소함을 알 수 있다.

$$K = 1564.5 X^{-1.3233} \tag{5}$$

Ito 등에 의한 연구 결과 즉 Fig. 2와 정량적으로 비교할 수는 없지만 그 경향은 유사함을 확인할 수 있다.

발파진동의 크기에 미치는 디커플링효과의 연구

Table. 5 Results of Measured Vibration According to Decoupling index.

Kind of Test Blasting	D.I.	Weight/delay (kg)	Distance (m)	Peak particle velocity (cm/sec)				Frequ. (Hz)
				Tran.	Vert.	Long.	PVS	
Test Blasting for D, E	3	0.75	15	0.24	0.61	0.48	0.647	22~100
				0.39	1.09	1.27	1.41	64~100
				0.27	0.94	0.81	0.952	57~100
				0.27	1.04	0.57	1.17	18~100
			25	0.21	0.29	0.21	0.327	85
				0.38	0.63	0.46	0.775	64~85
				0.30	0.30	0.33	0.427	64~85
				0.19	0.49	0.41	0.641	64~73
			35	0.18	0.15	0.25	0.297	51~64
				0.41	0.23	0.48	0.633	51~73
				0.32	0.19	0.30	0.457	47~64
			45	0.07	0.07	0.05	0.0968	37~64
	0.15	0.13		0.12	0.187	47~64		
	0.10	0.08		0.06	0.116	37~73		
	0.10	0.11		0.07	0.130	37~73		
	2.34	0.75	19	0.22	1.07	0.58	1.07	85~100
				0.14	0.72	0.48	0.786	37~100
				0.20	0.65	0.42	0.678	73~100
			25	0.20	0.63	0.51	0.776	64~85
				0.41	0.48	0.46	0.665	85
				0.23	0.51	0.39	0.613	73
			35	0.33	0.32	0.39	0.557	51~73
				0.41	0.23	0.47	0.584	47~73
				0.33	0.25	0.51	0.567	47~73
45			0.09	0.12	0.09	0.130	43~73	
			0.13	0.13	0.08	0.151	57~73	
			0.10	0.16	0.07	0.165	37~64	

Table. 5 Results of Measured Vibration According to Decoupling index.(continued)

Kind of Test Blasting	D.I.	Weight/delay (kg)	Distance (m)	Peak particle velocity (cm/sec)				Frequ. (Hz)
				Tran.	Vert.	Long.	PVS	
Test Blasting for D, E	1.8	0.75	18	0.80	2.67	1.13	2.90	57~73
				0.74	2.20	1.09	2.29	64~73
				0.76	2.87	1.54	3.03	64
				0.83	1.71	1.19	1.78	73~85
			20	0.91	1.80	1.75	1.93	73~100
				0.27	0.96	0.22	1.01	57~100
				0.29	0.93	0.19	0.937	73~100
				0.42	0.95	0.42	1.02	73~100
			49	0.17	0.27	0.23	0.341	64~100
				0.18	0.29	0.15	0.303	51~64
				0.18	0.36	0.14	0.411	32~73
				1.46	3.70	1.66	3.94	51~64
	1.4	0.75	17	0.44	2.04	0.95	2.19	47~73
				0.38	1.56	0.73	1.70	73~85
				0.41	2.16	1.03	2.28	73~100
				0.34	1.24	0.56	1.28	64~100
			35	0.24	0.63	0.28	0.647	73~100
				0.25	0.60	0.25	0.629	73~100
				0.18	0.46	0.16	0.474	100
				0.15	0.31	0.17	0.356	57~100
			54	0.13	0.25	0.14	0.273	37~64
				0.09	0.21	0.15	0.221	43~57
				0.14	0.33	0.10	0.337	24~85

Table. 6 Comparison with Result of Regression Analysis According to Each D.I.

D.I.	K	n	R-Coefficient
1.41	941.07	-1.816	0.891
1.80	828.90	-1.813	0.855
2.34	445.98	-1.813	0.788
3.00	380.98	-1.819	0.813

Table. 7 Comparison of K's Value According to Each D.I.

D.I.	K's value	Ratio (at each D.I./D.I. 1.41)
1.41	941.07	1.000
1.80	828.90	0.880
2.34	445.98	0.474
3.00	380.98	0.405

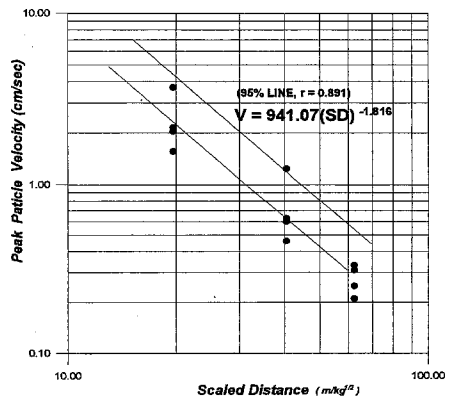


Fig. 6 Peak Particle Velocity vs SD from Test Blast (D.I. = 1.4)

Table. 7의 값을 비교해보면 진동치의 크기는 D.I. 값이 커질수록 약 12~60 % 작게 나타남을 확인할 수 있다.

5.2 발파후 암반의 파쇄상황

본 연구는 도심지에서 실시하였기 때문에 파쇄암의 비산이 없도록 제어하였다. 즉 일반발파는 파쇄암의 비산이 수반되는데 여기서는 선행 이완발파(先行弛緩發破)를 목적으로 한 것이다. 따라서 발파의 목적은 암반내 균열만을 형성시킨 것으로 다음 단계에서 브레이커(breaker)로 제거하게 된다.

따라서 종래 발파와 같이 파쇄암의 크기를 산출하여 정량적으로 평가하기는 어려웠다. 다만 지표에서 균열형성 상태와 브레이커로 암반을 제거하면서 관찰한 균열상태를 기준하여 평가하기로 한다. 최소저항선이 0.7 m 일 때 천공경이 각각 75 mm, 45 mm 일 때는 암반에 균열형성은 물론 상당한 파쇄가 이루어졌다.

이 때 형성된 공구부분의 선행균열을 살펴보면 D.I. 값이 클수록 진동치가 감소됨에도 불구하고 균열의 형태는 거의 같게 나타났다.

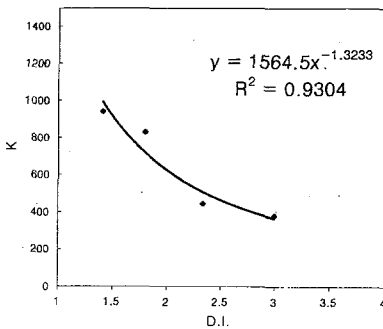


Fig. 7 Variation of k Constant with Decoupling index

공구부분의 발파상황을 확인한 후 마지막으로 브레이커를 이용하여 선행균열된 파쇄암을 제거한 후 공구부분의 파쇄 상황을 확인해 보았으나 브레이커 작업시 파쇄된 암편들이 겹쳐 정확히 확인할 수 없었다. 그러나 파쇄상황을 언급해 본다면 브레이커를 이용한 작업에 차이가 없는 것으로 판단되었다.

현지 암반에는 균열의 발달 상태와 그 정도, 조암광물의 차이 등 지질적 여건이 실험실내 모형실험에 비하여 상당한 차이를 보이기 마련이다.

그러나 본 실험 결과 얻어진 진동의 감소 경향은 대체로 시멘트 모르타르를 대상으로한 모형 실험

결과 유사한 경향이 보인 것을 확인하였다.

6. 결론

선행 이완 발파에서 D.I. 값의 차이가 발파진동의 크기 및 파쇄암의 제거를 위한 균열형성에 미치는 영향을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 현장 실험에서 D.I. 값을 1.41, 1.80, 2.34 및 3.00으로 설정하고 각각의 경우 수 차례 선행 이완 발파를 실시하였다. 이때 각각의 경우 진동의 크기를 측정하고 그 결과를 회귀분석하여 얻은 진동 추정식으로부터 상대적인 진동치의 크기를 분석한 결과 D.I. 값 1.41에 비하여 각각 0.880, 0.474, 0.405로서 대체로 지수함수적으로 감소하는 경향을 보인다.

2. 암반의 파쇄상황은 최소저항선이 0.7 m이고, 천공경이 각각 75 mm, 45 mm 일 때는 암반에 균열형성은 물론 상당한 파쇄가 이루어져 2차적인 파쇄작업이 필요 없음을 확인할 수 있었다. 최소저항선이 1.0 m 이상인 경우에는 단순히 선행균열만이 형성되었다. 이때 형성된 공구부분의 선행균열을 살펴보면 D.I. 값이 클수록 진동치가 감소됨에도 불구하고 균열의 형태는 거의 같게 나타났으며, 브레이커로 암편을 제거하는데 어려움이 없었다.

참고문헌

- 김재극, "산업화학파 발파공학", 서울대 출판부, PP316. 369~374, 1990.
- 김웅수, "발파 핸드북", 구미서관, PP76~80, 1990.
- 동아건설산업(주)기술연구소, "건설공사의 발파 실무 : 기술지도서 25권", PP115~117, 1997.
- 류창하, "발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성예측", "1995년 춘계총회 및 64회 연구 발표회", 한국자원공학회, PP326~328, 1995.
- 백장현 편역, "기술자를 위한 화약취급해설", (주)한화, PP53~55, 1986.
- 서동렬 편저, "발파실무", 원기술, PP73, 157~160, 318, 1994.
- 임한옥, 김계동, "발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구", 한국자원공학회지, 제29권, PP146~157, 1992.
- 임한옥, 이희근, "터널, 지하공간 굴착공학", PP89~93, 1995.
- 임한옥 외, "발파설계기법에 관한 연구", 한국토지개발공사, PP65~67, 1993.
- 윤지선, "최신발파기술", 구미서관, PP24~26,

- 31~32, 76~79, 101~103, 1992.
11. (주)대우 기술연구소, "건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구", PP224~231, 1988.
 12. 하근동, 김재극, "모형 실험에서의 decoupling 효과에 관한 연구", *대한광산학회지* 제 23권, 제3호, PP172~181, 1986.
 13. Stig O Olofsson, "*Applied Explosives Technology for Construction and Mining*", PP201~212, 1988.