

~~~~~



發破振動의 크기에 미치는  
디커플링 效果의 研究(要約)

Decoupling effects on the level of blasting vibration

金 汪 洙\*  
Kim, Wang Su

~~~~~

Abstracts

The pressure-time profile of the explosion gases can be controlled for the use of cartridge explosives with two techniques known as Decoupling and Spacing the charges.

Decoupling consists in leaving an empty 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 are 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 a given site  $K=1564.5(D.I.)^{-1.3233}$  in terms of D.I.(decoupling index).

목 차

1. 서 론 .....	21	3.2 지질 및 암반의 역학적 특성 .....	25
2. 발파이론 및 특성 .....	21	4. 시험방법 .....	26
2.1 암반파쇄이론 .....	21	4.1 Decoupling 계수의 설정 .....	26
2.2 발파진동 .....	22	4.2 실험방법 .....	27
2.3 Decoupling 효과 .....	23	5. 실험결과 및 해석 .....	29
3. 시험구역의 지형, 지질 및 암반의 특성 ....	25	5.1 D.I.값의 변화에 따른 진동의 크기 ....	29
3.1 지 형 .....	25	5.2 발파후 암반의 파쇄상황 .....	32
		6. 결 론 .....	32

\* 工學碩士論文

building of a strong East Asian economy.

## Conclusion

Korea is determined to double current levels of our economy in the next decade. We believe scientific progress and technological innovation will aid in the achievement of this goal. It will also require scientific management of the globalization process, with government and industry support and money. Korea would like to increase her R & D budgets to above 5.0% of the GNP within the next ten years.

Korea welcomes foreign technology investments in our Techno Parks. Likewise, many Korean industries have zopened joint ventures overseas. The government has established a program to

provide financial incentives to ensure the success of these joint technological ventures, evidence of the close interactive relationship between government and industry<sup>1)</sup>

Finally, certainly China and Korea have gained economic strength in recent years. If our economic ties with China are reinforced through strengthened S & T collaboration, we could see greater social benefits in all sectors. This has been true in our cooperation with our allies including Canada and the United States, and we enjoy and share our prospertity with them. For these reasons, we are very keen to establish S & T ties for economic development, particularly with many countries in the Pacific Rim.

---

1) KOFST plans to initiate S & T exchanges with north Korea in the near future. The success of this exchange program rests on our willingness to cooperate fully with our north Korean counterparts so that we may mutually benefit from the venture. Here again, government and industry interests overlap.

## I. 서 론

최근 우리나라에서도 지하철, 전력구, 통신구 등 각종 터널 공사와 대규모 아파트 단지 조성 및 대형 빌딩의 지하터파기 등 기초굴착공사가 도심지에서 널리 실시 되고 있다. 이 경우 시공의 능률성과 경제성을 도모하기 위하여 발파작업을 실시할 때 일반적으로 발파진동, 소음 및 발파풍, 비산등이 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 시공이 이루어지고 있으나 아직껏 완벽한 단계에는 도달하지 못한 상황이다. 일반적으로 발파진동을 감소시키는 방법으로는 첫째 발파진동의 크기를 감소시키는 방안과, 둘째 발생된 진동이 전파하는 경로를 차단하는 방법을 들 수 있다. 첫째방안의 목적으로 지발당 장약량을 줄이는 방법, 지발발파시 지연시간의 조절로 진동의 상호간섭 및 분산을 이용하는 방법, 저비중 저폭속의 폭약을 사용하는 방법, 프리스플리팅, 쿠션블라스팅과 같은 제어발파기법(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 선형이완발파(先行弛緩發破)를 예로 들 수 있다. 그리고, 지연시차(遲延時差)를 이용하는 방법으로는 MS(Milli-second)뇌관, 다단발파기(多段發破機)의 활용등이 있으며, 저비중 저폭속 폭약으로 국내에는 함수폭약의 일종인 Kovex, Newmite 폭약과 일명 정밀(精密)폭약이라 일컫는 Finex 폭약등이 개발, 사용되고 있다.

한편 제어발파(또는 정밀발파)에는 라인드링

링, 스무스블라스팅, 프리스플리팅, 쿠션블라스팅법 등이 인용되고 있다. 그리고 방진구를 설치하는 방안은 진동이 전파하는 경로에 인공적으로 트렌치(trench)를 굴착하는 방법으로 이 경우 수m에서 수십m 깊이로 만들어야 하기 때문에 경제성 면에서 적용에 한계가 있다.

지금까지 국내에서는 위에 예시한 여러가지 원리를 활용한 공법에 대하여 비교적 많은 연구가 수행되었고<sup>(1, 2, 5)</sup>, 현장에서도 적용되고 있으나 쾌적한 환경을 추구하는 국민의 욕구가 강화되어 자연히 이들에 대한 법적 규제 역시 나날히 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 되는데 현재 시판되고 있는 화약은 봉상(棒狀)이기 때문에 장약시 제한을 받게된다.

스무스블라스팅이나 쿠션블라스팅과 같은 제어발파공법은 디커플링계수를 응용한 방법이기도 하지만 이에 관한 현장실험에서 정량적 평가가 거의 이루어지지 못한 아쉬움을 갖고 있다. 즉 본 연구에서는 화약의 위력을 극도로 억제시켜 천공경/약경의 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. 발파이론 및 특성

### 2.1 암반파쇄이론

화약의 폭발로 인한 화약에너지는 충격에너지와 고온, 고압의 가스 팽창에너지로 나누어진다. 일반적으로 폭굉속도가 큰 화약일수록 충격에너지 성분이 더 커지는 경향이 있다.

발파이론에 의한 암반파쇄상황을 보면 장약공 주변의 암반은 반경방향으로 강력한 압축을 받고, 변형율파가 전면을 통과함에 따라서 접선방향으로 인장 변형이 발생한다. 만일 변형율이 암반의 동적 인장파괴 변형율을 초과하게 되면 균열이 발생하고, 장약공부근에서는 매우 많은 수의 반경방향 균열이 발생하는데, 이러한 균열은 접선방향의 인장응력이 암반의 강도 이하로 떨어지게 되면 멈추게 된다. 또한 발파공 주위로는 즉시 어느정도의 거리까지 암반의 압축강도 이상의 압력이 발생하고, 이러한 변형을 메카니즘에 의해서 주된 파쇄가 발생하며 필요 이상의 균열대가 형성하게 된다. 일반적으로 변형율에 의한 암반의 손상정도는 다음의 요건 즉, 변형율파의 크기, 암반의 동적 인장강도, 암반의 압축강도에 따라 다른 것으로 알려지고 있다<sup>(5, 6)</sup>.

또한 기존의 균열은 균열면을 따라 발생하는 진동에 의해 미끄러짐이 야기되고 마찰특성이 감소된다. 따라서, 이러한 손상의 정도는 변형율파의 크기, 새로 발생한 균열이나 기존균열의 빈도, 균열면의 상태 등에 따라 달라질 수 있다.

한편 반경방향의 균열이 형성될 때나 혹은 그 이후 발생하는 고온, 고압가스는 기존 혹은 생성된 균열 사이로 팽창하기 시작한다. 이러한 균열들은 발파 가스압의 영향하에서 길어지고 넓어진다. 따라서 가스에 의한 손상의 정도는 화약에 의해서 생성된 가스의 절대부피, 가스의 이동경로 즉, 균열의 밀도, 그리고 발파가스 생성시의 전색상태 등에 따른다.<sup>(12)</sup>

## 2.2 발파진동

발파를 통한 굴착에서는 화약의 폭발시 발생하는 충격압과 가스압을 이용하여 굴착단면의 암석을 제거하게 된다. 즉 폭약이 장약공내에서 폭발하면 수만에서 수십만 기압에 달하는 강력한 충격압(또는 폭굉압)과 연소된 화약에 의한 가스압, 그리고 3000℃ 이상의 고온이 발생한다. 이때 Fig.2.1과 같이 충격압과 고온에 의해 발파공

에서 수mm~수십mm 이내 인접한 암반은 녹아 내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생, 전파되어 균열대를 형성하게 된다. 이렇게 폭원으로 부터 3차원으로 전파되어온 충격압에 의한 충격파는 거리가 멀어짐에 따라 현저히 감소되어 발파에 의한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반중에 전파되어 가는 것으로 알려지고 있다<sup>(2, 9, 11)</sup>. 이러한 탄성파는 암반중에 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키게 되는데 이를 발파진동(blast vibration)이라 한다.

발파진동은 진폭과 주기를 갖는 진동이며, 발파진동의 크기는 진동을 전달하는 매질 내에서 발생하는 변위(particle displacement, 또는 진동입자변위), 진동속도(particle velocity, 또는 진동변위속도, 진동입자속도), 진동가속도(particle acceleration, 진동변위가속도, 진동입자가속도)등으로 표시할 수 있다. Table 2.1은 진동의 표시단위를 나타내고 있다.

진동의 형태를 일정 주기의 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 가정할 경우 진동변위, 속도 및 가속도 사이에는 다음 (2.1), (2.2)식과 같은 관계가 성립한다.

$$u = U \sin(\omega t + \theta_1) \quad (2.1)$$

$$v = du/dt = U\omega \cos(\omega t + \theta_2)$$

$$a = dv/dt = d^2u/dt^2 = U\omega^2 \sin(\omega t + \theta_3)$$

$$\omega = 2\pi(1/T) = 2\pi f \quad (2.2)$$

여기서  $f$ 는 진동주파수,  $T$ 는 진동주기,  $\omega$ 는 진동수와 관련된 각속도,  $\theta$ 는 위상차를 의미한다. 지반진동의 피해여부와 관련된 상황에서는 대부분 최대치가 중요하므로,  $u_{\max} = U$ ,  $v_{\max} = A$ 라 하면 진동변위, 속도, 가속도의 각 최대치 사이에는 식(2.3)과 같은 관계가 성립한다.

$$U = V/2\pi f; v = A/2\pi f \quad (2.3)$$

발파진동의 측정은, 그 방향에 따라 Fig.2.2와 같이 수직성분(vertical), 진행성분(long-

itudinal), 그리고 이 두 파의 방향과 직각을 이루는 접선성분(transverse)의 세성분에 대해 실시된다. 일반적으로 진행성분에는 탄성파의 P파(종파, Primary wave)가, 접선성분에는 S파(횡파, Secondary wave)와 L파(혼합파, Love wave)가, 수직성분에는 표면파인 R파(Rayleigh wave)가 우세한 것으로 알려져 있다. 이 세가지 성분의 상대적 크기는 암반, 지형 및 발파에 의하여 생성된 탄성파들의 상호간섭에 따라 변하나 일반적으로 가장 큰 값을 나타내는 것이 수직 성분이며, 때로는 진행성분이 수직 성분과 같거나 큰 경우가 있고, 접선성분은 대부분 세성분 중에서 가장 작은 값을 나타내는 것으로 알려져 있다<sup>(1, 3, 9)</sup>.

한편 발파진동의 특성은 지진진동과 비교하여 설명할 수 있다. 발파진동은 지진진동에 비하여 지속시간이 짧고 주파수범위도 수십에서 수백 Hz인 고주파인 관계로 감쇠가 쉽게 일어나며, 파형이 비교적 단순하다. 또한 지진에 의한 진동 피해의 경우 그 정도를 보통 가속도로 표시하고 있으나, 또한 지진에 의한 진동 피해의 경우 그 정도를 보통 가속도로 표시하고 있으나, 발파진동에 의한 구조물 피해정도는 진동속도에 비례하기 때문에, 세계 각국에서 대부분 발파진동의 규제기준을 진동속도의 최대치로 정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 지반진동의 크기를 진동속도의 크기로 표시하기로 한다.

$$V=K(R/W^b)^n \quad (2.4)$$

V: 지반진동의 속도(partical velocity cm/sec)

R: 발파원으로부터의 거리(m)

W: 지발당 장약량(charge per delay, kg)

K, n: 지질암반조건, 발파조건 등에 따른 상수

b: 1/2

지반의 진동속도는 지발당 장약량과 발파원으로부터의 거리를 주요 변수로 하여 식(2.4)로 나타내고 식(2.4)에서 거리와 지발당 장약량의 비, 즉  $R^b$ 를 환산거리(scaled distance, SD)라고

한다.

## 2.3 Decoupling 효과

폭약의 폭력을 조정하는 방법으로는 장약시 압입시켜 장약밀도를 높히는 경우가 있고 이와 반대로 장약밀도를 적게하는 경우가 있다. 후자의 경우 공경(孔徑)과 약경(藥徑)사이에서 Fig. 2.3과 같이 공간을 유지하면, 폭약의 폭력은 공간에 존재한 공기로 인해 완충(cushion)작용을 일으켜 폭력이 저하된 상태에서 암석에 전달된다.

일반적으로 폭약이 폭발 할 때 폭약밀도  $\rho_e$ , 폭속  $v_e$ 로 할 때 폭굉압력  $P_D$ 는 식(2.5)로 주어진다<sup>(10)</sup>.

$$P_D=0.000424 v_e^2 \rho_e(1-0.543 \rho_e +0.193 \rho_e^2) \quad (2.5)$$

이 폭굉압력  $P_D$ 는 폭약과 접하고 있는 매질에 전달되지만 decoupling 이용에 의한 발파의 경우는 매질이 공기이다. 지금, 공기의 밀도  $\rho_a$ , 공기 충격파(P파)의 전파속도  $C_a$ 로 하면, 폭약과 공기와의 경계면에 있어서 발생하는 최고압력  $P_a$ 는 식(2.6)로 주어진다.

$$P_a = \{ 2\rho_a C_a / (\rho_a C_a + \rho_e v_e) \} \times P_D \quad (2.6)$$

식(2.5)와 식(2.6)를 쓰고 실제 경우의 계산 예를 제시해 보면 폭약으로 2호 Kiri dynamite ( $\rho_e = 1.4g/cm^3$ ,  $v_e = 650000cm/sec$ )를 사용한다고 하면  $P_D = 1.55 \times 10^5 (kgf/cm^2)$ 이 된다. 지금 공기를 매질로 생각한 경우  $\rho_a = 0.0012$ ,  $C_a = 340m/sec$ 로 하여  $P_a = 13.90 (kgf/cm^2)$ 로 된다. 즉,  $P_a$ 는 약 1/1100로 되고 대폭 압력감소를 나타낸다. 이것은 완충체로서의 공기의 충이 얼마나 벽면 손상 방호에 효과적인가를 나타내는 수치이다.

한편, 폭약이 장약공내에서 폭발했을 때, 장약 공내에서 작용하는 가스압력  $P_S$ 은 Abel-Nobel의 상태방정식으로 부터 다음식으로 주어진다.

$$P_S = (f \cdot L) / (V - \alpha \cdot L) \quad (2.7)$$

여기서,  $P_S$ : 장약공벽에 작용하는 폭발가스압력 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$f$ : 화약력 ( $l \cdot \text{kgf/cm}^2/\text{kg}$ )

$L$ : 폭약중량(kg)

$V$ : 장약실 체적( $l$ )

$\alpha$ : 폭약의 코볼륨

이며 폭약의 코볼륨(covolume)  $\alpha$ 는

$$\alpha = 1.5 / (1.26 + 1.33 \rho_e) \quad (2.8)$$

로 주어진다.

식(2.7)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 변화시키므로써 장약공벽에 작용하는 가스압력을 쉽게 제어할 수 있다.

한편 decoupling index에 관한 국내의 몇가지 사례를 들면 다음과 같다. 하근동 등에 의한 시멘트 모르타르 블록과 아크릴판을 시료로하여 뇌관으로 기폭시키면서 관찰한 결과 장약공 주위에 형성되는 파쇄대(damage zone)영역의 평균반경은 decoupling index가 증가함에 따라 대체적으로 지수함수적으로 감소하는 경향을 보이며 또한 장약공내에 최초로 나타난 변위 펄스의 진폭과 주기 역시 동일한 현상을 보임을 알았다<sup>(12)</sup>.

Ito 등<sup>(10)</sup>은 알루미늄 블록을 이용하여 DDNP로 기폭시키고 알루미늄내에 투사된 응력파에 의한 변위 및 변위 속도를 FM용량 변위계를 이용하여 측정한 결과는 Fig. 2.4와 같이 지수 함수적으로 감소함을 입증하였다.

이상 2가지 연구 결과는 단순한 재료를 모델

로 사용하여 실시한 것으로 식(2.7)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.

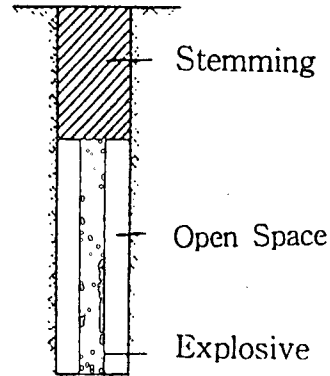


Fig. 2.3 Charging Method Using Decoupling Effect.

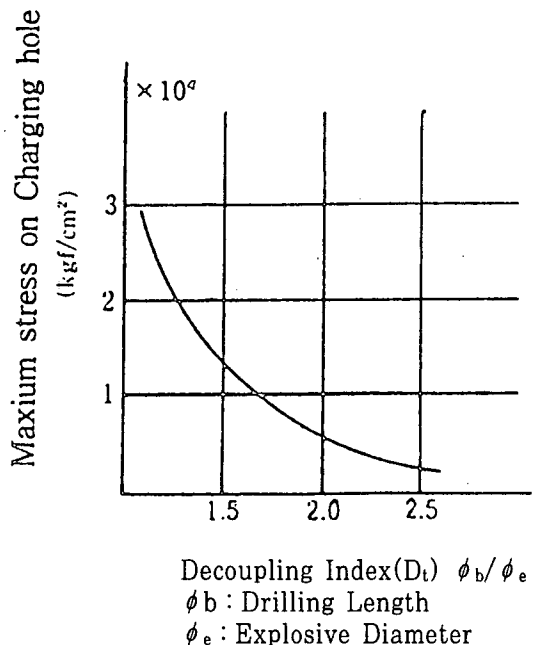


Fig. 2.4 The Relationship of Maximum Stress on the Wall of Hole Inside & Decoupling Index

### 3. 시험구역의 지형, 지질 및 암반의 특성

#### 3.1 지형

본 연구지역은 행정구역상 서울특별시 중구 신당4동 40-127 번지 일대에 속하며 서울 한복판에 위치한 독립된 산구인 남산(표고 252m) 자락에 위치한다(Fig. 3.1). 본 역(域)의 앞쪽은 북한산(표고 759.5m)에서 남쪽으로 해발 300~400m 내외의 크고 작은 능선으로 이어져 경복궁 방향의 인왕산(표고 340m), 서대문 방향의 안산(표고 259.5m)으로 연결되고 있으며, 본 역의 뒤쪽은 수락산(표고 637.3m)에서 남쪽으로 불암산(표고 465m), 용마산(표고 348m)으로 이어져 위키힐방향의 해발 200~300m의 능선으로 연결되는 남북방향의 산계를 보이고 있다.

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

#### 3.2 지질 및 암반의 역학적 특성

본 연구지역의 분포지질은 중생대 류라기의 대보화강암이 주 분포되어 있으며 남산을 중심으로 용산구 방향은 선캠브리아가 경기 변성복광체의 호상흑운모 편마암이 분포되어 있다.

본 지역의 분포지질인 대보화강암의 주성분 광물은 석영, 장석, 운모, 감섬석으로 조립질하여 비교적 신선하나 장석의 함유량에 따라 부분

적으로 비교적 깊은(10m내외) 풍화대가 발달되어 있고 풍화대층에는 직경 1.0m 내외의 점석(点石)이 협재하기도 한다.

본 연구지역의 터파기 면상에 나타난 절리(joint)는 수직절리 및 불규칙 절리가 발달되어 있으며 이들 절리면에는 간혹 지하수 유동흔적이 인지(認知)되며, 엷은 점토막이 협재되어 있으나 터파기 면상의 전반적인 암질은 신선하며 대파를 보이고 있다. 본 지역의 분포암석에 발달된 대표적인 절리의 주향 경사는 N65~70E, 85~90NW이다. Fig. 3.1은 본 연구지역의 위치를 보여주고 있으며 Fig. 3.2는 Rose-Diagram으로 본 지역의 주된 주향과 경사를 나타낸 것이며 Fig. 3.3은 주향과 경사를 등각투영법으로 도시한 것이다.

한편 공사현장에서 괴상의 암석을 채취한 후 실험실에서 일축압축시험, 간접인장시험, 삼축압축시험을 실시하여 암석의 역학적 특성을 알아 보았는데 그 결과는 Table 3.1과 같다. 일축압축강도는 이미 균열이 존재하였던 No.1과 No.2의 시료를 제외하고 1014~1105kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 나타내었는데 이 지역의 암석이 평균 5~7m 심도 이하에서는 보통암 이상으로 판단되었다. 겉보기 밀도는 2.54~2.57gr/cm<sup>3</sup>, 공극률 0.375~0.627%로 측정되었으며, 간접인장시험(Brazilion test)을 통하여 얻은 인장강도는 일축압축강도의 4.6~5.7%에 해당하는 30~59 kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 보였다.

탄성계수는  $(1.0-6.547) \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>, 포아송비는 0.155~0.481의 값을 보이며 탄성과 속도는 P파가 1455~2186cm/sec, S파가 849~1270cm/sec로 구해졌다. 삼축압축시험을 통해 구해진 점착력은 102kgf/cm<sup>2</sup>, 내부 마찰각은 59° 이었다. 따라서 이들 결과를 종합해보면 굴착대상 암반은 등급분류상 보통암에 속하는 것으로 판단된다.

Table 3.1 Characteristic of the Rock Specimen from the Test Blasting Site.

No	1	2	3	4	5	6	ave
Apparent Density (gr/cm <sup>3</sup> )	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 compressive strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	659	575	1057	1105	1102	1014	918.67
Young's Modulus (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	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 <sup>2</sup> )	max 2037 (50)	max 2356 (100)	max 1356 (50)	max 1542 (100)	-	-	1822.8
Tensile Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	38	30	47	59	55	48	46.17
Internal Friction Angle(°)	59						
Coheison (kgf/cm <sup>2</sup> )	102						

\* ( ) Confining Stress(kgf/cm<sup>2</sup>)

## 4. 실험방법

### 4.1 Decoupling 계수의 설정

실내 실험의 결과 Fig. 2.4에서 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 현

지 발파를 통하여 확인하기로 한다.

진동제어발파는 주로 시가지에서 이루어지는 점을 감안하여 사용되는 폭약을 다소 천공장비의 성능을 고려하여 45mm와 75mm로 국한하였다. 때때로 현장에 따라서 소형 착암기를 사용하는 경우 38mm 공경도 있지만 디커플링 효과를 이용한 발파를 비교하기 위해서는 동일조건을 유지하여야 함을 본 연구에서는 제외하기로 한다.

사용폭약은 충분한 디커플링 효과를 얻기위해 다짐작용이 이루어지지않도록 전색 필름(film)



을 이용하였으며, 장약시에는 이를 충분히 고려하여 실시하였다. Fig 4.1과 Fig 4.2는 시험발파시 장약방법과 천공된 모습을 보여준다.

Table 4.1은 본 연구의 수행을 위하여 설정한 D.I. 값이며, 앞에 설명한 바와 같이 현장의 시공성을 고려하였다.

Table 4.1 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 4.1와 같이 설정된 D.I.값을 기준하여 발파패턴을 설계하였는데 이것은 2단계로 나누어 발파를 실시하였다. 첫째는 진동의 영향은 고려하지 않고 단순히 암반에 균열을 형성시키는데 필요한 장약량과 적정 공간력을 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. 4.3과 같이 천공장 2.7m, 천공경 45mm, 75mm, 천공간격 0.5m, 공당 장약량은 0.75kg, 약정은 2종류로 각각 25mm 및 32mm를 기준하여 장약한 다음, 1회에 1공씩 기폭시켜 각 D.I.별로 3회씩 총 12회를 실시하였다.

두 번째 단계에서는 첫단계의 발파 결과를 종합, 분석하여 천공간격을 조정하였다. 즉 Fig. 4.4와 같이 천공장과 공당 장약량은 각각 2.7m 및 0.75kg로 고정하였고, 천공 간격은 천공경과 약정에 따라 Table 4.2 같이 변화시켰다.

Table 4.2 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 4대의 진동계측기로 발파진동을 계측하였다.

실험발파에 사용된 폭약의 종류는 뉴마이트(Newmite)로 이들의 특성은 Table 4.3과 같다.

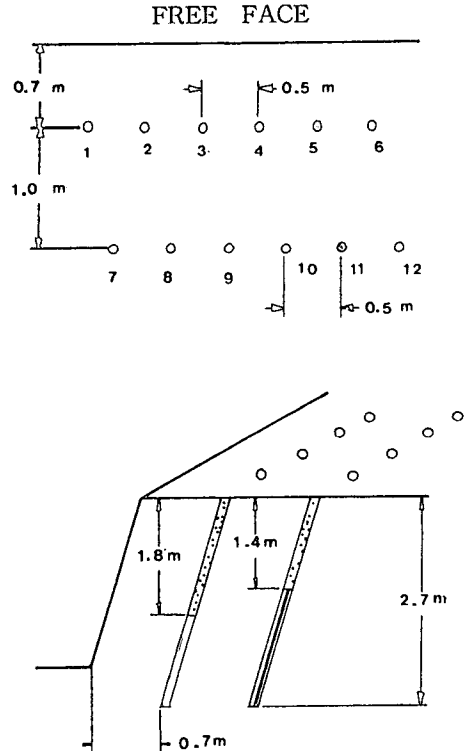


Fig 4.3 The Pre-Test Blasting Design According to Variance of Each Decoupling Index

\* No means detonation order

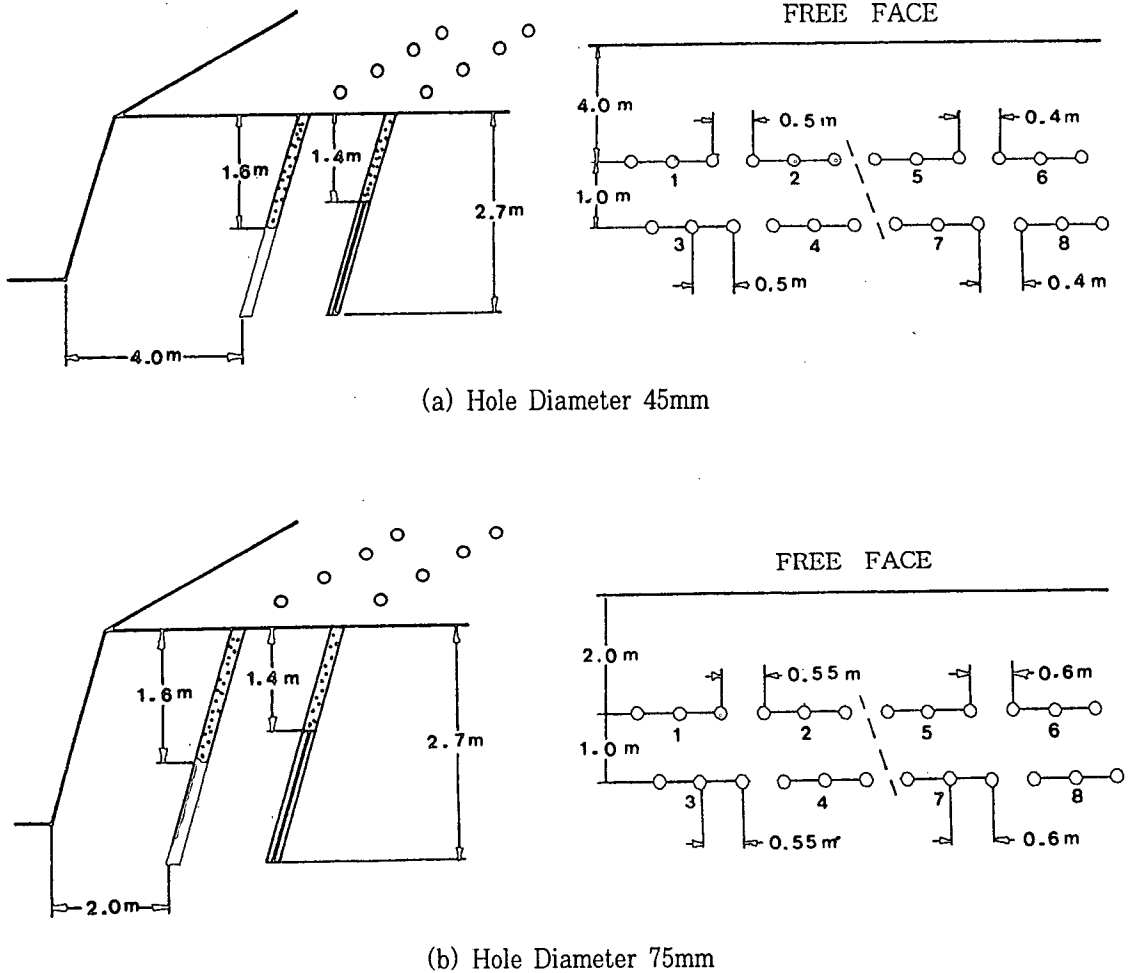


Fig 4.4 The Test Blasting Design According to Variance of Each Decoupling Index  
 \* No means detonation order

Table 4.3 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(℃)	-20
Gas Volume(ℓ/kg)	870
Water Resistance	very good

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

이 장비는 수직방향, 진행방향 및 접선방향의 세 방향 진동을 감지하는 세 방향과 Vector값을 감지하는 트랜스듀서 및 공기중으로 전달되는 폭풍압을 감지하는 사운드 센서 그리고 측정을 제어하고 기록하는 모니터로 구성되어 있다. 프린터를 통하여 각 이벤트마다 진동시간에 따른

진동변화와 주파수의 범위, 지발시차 그리고 미광무국의 안정규정에 대한 자료를 프린트 할 수 있다.

측정방법은 각 진동계의 특성상 약간의 오차가 있을 수 있으므로 동일 조건에서 비교실험을 통해 보정한 수치를 사용하였고, 트랜스 듀서의 설치방법에 따라 측정결과는 약간의 영향을 미치게 된다. 그러므로 측정하고자 하는 지점의 지반에 밀착시켜 최대한 수평을 유지시켜 사용하였다.

Fig. 4.5는 본 계측기의 외형을 보여주고, Fig 4.6 시험발파시 계측기의 설치현황 및 측정 위치를 보여준 그림이다.

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

## 5. 실험결과 및 해석

D.I값을 각각 1.4, 1.80, 2.34, 3.00 등 4단계로 구분하고 폭원과 측정간의 거리를 15.0m에서 54m까지 여러가지로 변환시킨 조건에서 측정된 진동치의 크기는 Table 5.1과 같다.

한편 위 조거에서 지표상 암반의 파쇄 상황을 보여주는 그림중 대표적인 것을 예시하면 Fig. 5.2 및 Fig. 5.3와 같으며 나머지는 참고로 부록에 제시하였다.

### 5.1 D.I.값의 변화에 따른 진동의 크기

Table 5.1의 결과를 각 D.I.별로 회귀분석하여 최대진동속도와 환산거리(Scaled Distance)로 나타내면 각각 Fig. 5.4, Fig. 5.5, Fig. 5.6, Fig. 5.7과 같다. 일반적으로 폭원과 계측

점간의 거리가 짧을수록 회귀분석시 상관계수(r)가 낮은 경향을 보인다. 그러나 본 연구의 분석결과 그 값이 0.788에서 0.891사이에 있음을 볼 때 암반의 특성을 고려하면 비교적 좋은 결과를 보여준다고 하겠다.

이 때 구해진 진동추정식에서 각각의 진동상수 K, n값을 요약하면 Table. 5.2와 같다. 단, 여기서 진동상수는 자승근 환산식(Square root scaled distance)을 기준한 것이다.

Table 5.2 The 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

한편 이들의 상대적인 진동치의 크기를 비교해 보기로 한다. Table 5.2에서 각 D.I.별 진동 추정식을 살펴보면 n값이 약 1.81로서 거의 같게 나타나므로 K값으로 그 상대적인 진동치의 크기를 비교해 볼 수 있는데 이를 표시하면 Table 5.3과 같으며 이를 도시하면 Fig. 5.1과 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 K값은 식(2.9)와 같이 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다.

$$K = 1564.5 X^{-1.3233} \quad (2.9)$$

Table 5.1 Results of 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	

Ito 등에 의한 연구 결과 즉 Fig. 2.4와 정량적으로 비교할 수는 없지만 그 경향은 유사함을 확인할 수 있다.

Table. 5.3 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

Table 5.3의 값을 비교해보면 진동치의 크기는 D.I.값이 커질수록 약 12~60% 작게 나타남을 확인할 수 있다.

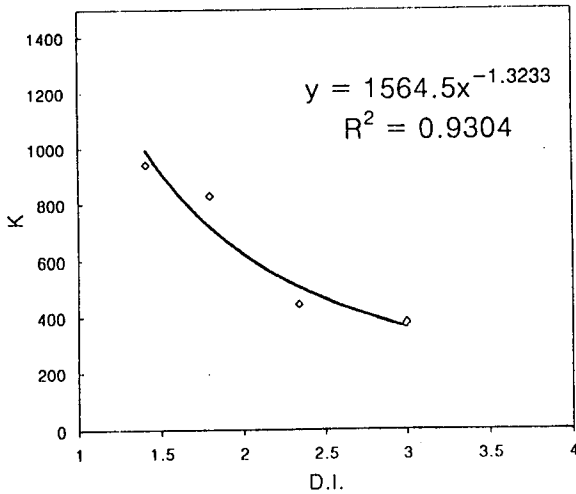


Fig. 5.1 Variation of K Constant with Decoupling Index

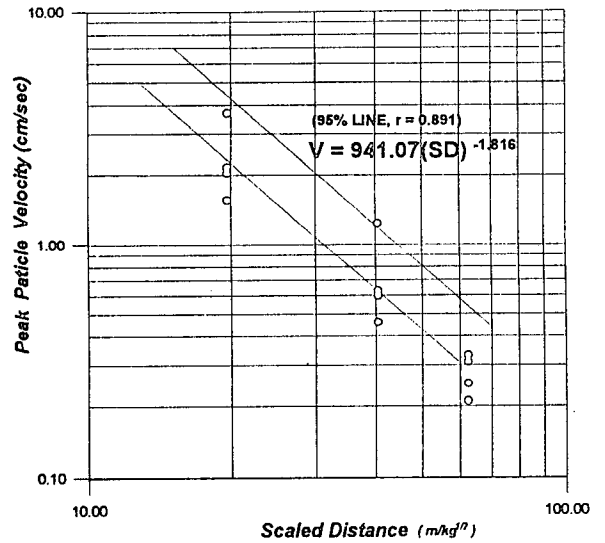


Fig. 5.4 Peak Particle Velocity vs SD from Test Blast(D.I.=1.4)

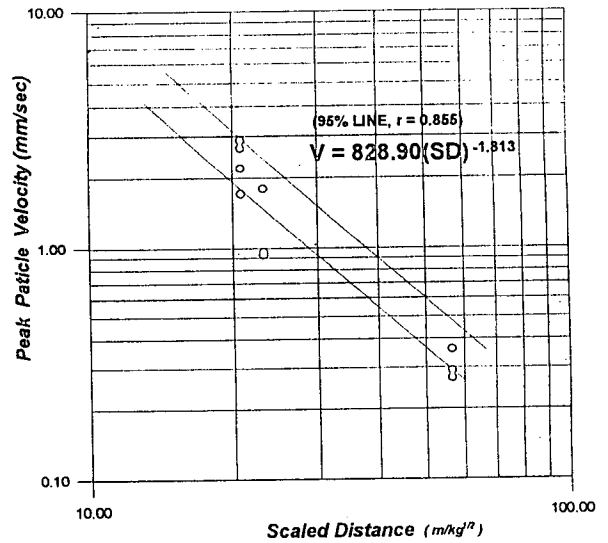


Fig. 5.5 Peak Particle Velocity vs SD from Test Blast(D.I.=1.8)

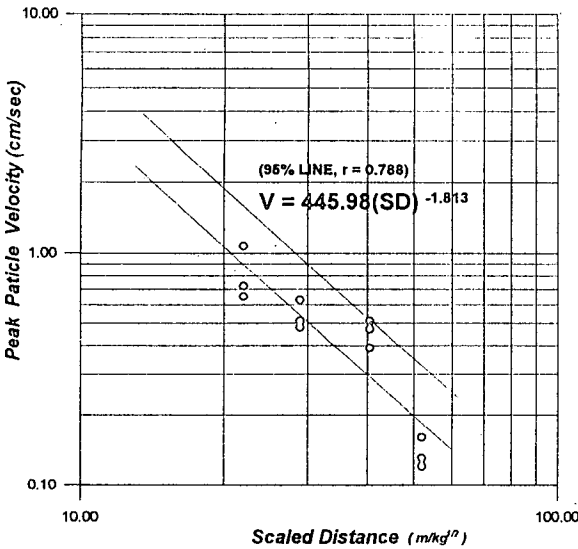


Fig. 5.6 Peak Particle Velocity vs SD from Test Blast(D.I.=2.34)

## 5.2 발파후 암반의 파쇄상황

본 연구는 도심지에서 실시하였기 때문에 파쇄암의 비산이 없도록 제어하였다. 즉 일반발파는 파쇄암의 비산이 수반되는데 반하여 여기서는 선행이완발파(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 어렵다. 다만 지표에서 균열형성 상태와 브레이커로 암반을 제거하면서 관찰한 균열상태를 기준하여 평가하기로 한다. Fig. 5.2 및 Fig. 5.3과 같이 최소저항선이 0.7m일 때 천공경이 각각 75mm, 45mm일 때는 암반에 균열형성은 물론 상당한 파쇄가 이루어졌다. 그러나, 부록에 제시한 그림은 최소저항선을 1.0m 이상 크게 설정하였기 때문에 단순히 선행균열만이 살펴보면 D.I.값이 클수록 진동치가 감소됨에도 불구하고 균열의 형태는 거의 같게 나타났다. 공구부분의 발파상황을 확인한 후 마지막으로 브레이커를 이용하

여 선행균열된 파쇄암을 제거한 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 모형 실험에 비하여 상당한 차이를 보이기 마련이다.

그러나 본 실험 결과 얻어진 진동의 감소 경향은 대체로 시멘트 모르타르를 대상으로 한 모형 실험과 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 이완발파를 실시하였다. 이 때 각각의 경우 진동의 크기를 진동치의 크기를 분석한 결과 D.I. 값 1.41에 비하여 0.880, 0.474 및 0.405로서 대체로 지수함수적으로 감소하는 경향을 보인다.

2. 암반의 파쇄상황은 최소저항선이 0.7m이고, 천공경이 각각 75mm, 45mm일 때는 암반에 균열형성은 물론 상당한 파쇄가 이루어져 2차적인 파쇄작업이 필요없음을 확인할 수 있었다. 최소저항선이 1.0m이상인 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.