

## 공내 매질이 구조물의 발파이격거리에 미치는 영향에 관한 연구

강희섭<sup>1</sup>, 정중규<sup>2</sup>, 방명석<sup>3\*</sup>

### A Study on the Effect of the Stemming Hole medium to the Blasting Separation Distance of Structure

Hee-Seop Kang<sup>1</sup>, Jung-Gyu Jeong<sup>2</sup>, Myung-Seok Bang<sup>3</sup>

**Abstract:** Because of urbanization, Industrialization and expansion of transportation network, blasting works are recently increasing in construction field. The blasting work influences environmental effects to residents and the safety of facilities around the working place, so the development of blasting technology is needed to reduce the damage to residents. The blasting mechanism in the hole was studied and tested in the blasting sites by the difference of diameter between explosives and drilling hole, which is named by the decoupling effect. This effect was tested by changing the medium between explosives and hole wall in three working sites(railway, highway and industrial complex). The vibration velocity of blasting was recorded and vibration equations were produced by regression analyses. Finally, the structure separation distance was derived using these equations. The testing results show that the specific gravity of medium is larger, the separation distance is smaller and the duration time of blasting is shorter in case of large specific gravity of medium, so the vibration effect stops more fastly in the water compared with the air.

**Keywords:** Test blasting, Stemming hole medium, Separation distance, Vibration velocity, Predicted vibration velocity equation

## 1. 서 론

최근 우리나라에서는 급속한 도시화, 산업화 및 교통망 확충에 따라 도로공사, 철도공사, 대규모 산업단지공사 등 화약을 사용한 발파작업이 도심지에서도 많이 수행되고 있어 이로 인한 진동, 소음, 비산, 분진 등이 중요한 문제가 되고 있다. 이에 따라, 진동이나 소음 피해에 의한 보상은 물론 각종 민원 등으로 공사기간이 증가되는 경우도 빈번하게 발생하고 있다. 특히 발파진동의 경우는 인근 구조물에 치명적인 피해를 줄 수 있을 뿐만 아니라 발파작업 시 민원발생의 주요 원인이 되고 있다. 환경부 산하 중앙환경분쟁조정위원회의 2014년 환경분쟁조정사례집(제23집)에 따르면, 1998년 이전부터 2014년 현재까지 환경분쟁 신청사건 3,281건 중 85%(2,802건)가 소음·진동의 원인에 의한 것으로 전체 피해원인 중에서 가장 비중이 높았으며, 피해내용은 건축물 피해와 정신적 피해의

복합적인 경우가 전체의 25%(905건)이었다. 직접적 피해의 원인은 폭원에 가까운 부분의 응력 파동에 의한 균열의 발생이며 폭원에서 어느 정도 거리가 떨어진 지점에서는 지반 진동에 의한 피해를 들 수 있다. 따라서 발파작업 전에 지반진동으로 인해 예측되는 인접구조물의 영향은 반드시 검토를 해야만 한다. 따라서 주변 구조물의 안전성확보를 위한 발파현장과 인접구조물과의 이격거리는 매우 민감한 사안으로, 같은 양의 폭약을 사용하더라도 주변 구조물과의 이격거리를 줄이는 방법은 발파현장에서 공사비 절감, 환경피해 방지 등의 중요한 관심사가 되고 있다. 지반진동의 영향문제에서 주요 변수로는 가속도, 변위 및 입자속도를 들 수 있는데 지진문제의 경우 일반적으로 가속도를 사용하는 반면, 지중발파의 경우에는 입자속도를 주로 사용한다.

본 연구에서는 이러한 발파이격거리를 줄일 수 있는 대책으로 최근 관심을 갖고 연구되고 있는 발파공내 매질문제에 대하여 연구를 수행하였다. 일반적으로 적용하는 화약과 공벽사이에 공기 매질인 경우와 최근에 적용되고 있는 물로 매질을 사용하는 방법에 대하여 그 효과를 검증하는 연구를 수행하였다. 이 두 매질의 효과 차이를 규명하기 위하여 산업단지, 고속도로, 철도 등 세 곳의 현장을 연구대상으로 선정하여, 국토해양부의 표준발파공법과 공내에 워터튜브를 삽입하여 물로 공극을 밀실하게 충전하는 방법에 대하여 현장시험발파

<sup>1</sup>정회원, 한국교통대학교 교통대학원 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 한국교통대학교 교통대학원 박사과정

<sup>3</sup>정회원, 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과 교수, 교신저자

\*Corresponding author: msbang@ut.ac.kr

Korea National University Graduate School of Transportation, Uiwang, 16106, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

및 계측을 실시하였다. 발파방법의 성능과 주변 영향을 비교·분석하고자 진동속도, 허용이격거리 및 발파영향권 등의 결과를 바탕으로 발파방법이 인접구조물과의 이격거리에 어떠한 영향을 미치는가에 중점을 두어 연구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 발파방법 종류별 특성

#### 2.1.1 표준발파공법

국토교통부 도로공사 노천발파 설계·시공 지침(2006.12)에 따르면 발파진동에 의해 발파공법을 제시하여 발파영향권 내에 발파소음에 민감한 인체나 가축 또는 이와 관련된 시설이 포함된 경우에는 별도의 발파공법을 적용할 수 있도록 하였다. 지발당 장약량 등을 기준으로 하여 6가지 타입으로 표준화하고, 보안물건의 허용진동기준과 이격거리에 따라 『거리~지발당장약량 조건표』에 의거 설계자가 쉽게 적정 발파공법을 선정할 수 있도록 하였다. 발파공사 시행 전에는 반드시 시험발파를 실시하여 발파 진동을 측정하고 후 시험발파 결과를 분석하여 현장 발파진동 추정식을 산출하고 이에 따라 지발당 장약량을 산출하여 폭약의 종류, 뇌관의 종류 및 배열방법, 이격거리별 발파패턴을 확정하는 등 시공성과 경제성 및 인근 보안물건의 안전성 등을 종합적으로 검토하여 적정발파공법을 적용하여 발파공법을 선택한 후 발파공사를 시행한다.

일반적으로 발파는 Fig. 1과 같이 암반을 발파규모에 맞게 천공한 후 천공부에 폭약을 장약하고 폭약의 폭발에너지 감소를 막기 위해 장약상부에 골재 등으로 전색한 후 발파를 실시한다. 발파 시 폭약의 삽입을 용이하게 하기 위해 천공경을 폭약경보다 약간 크게 천공하게 된다. 이때 Fig. 2와 같이 천공경과 폭약경의 차이로 인한 공간(void)에 의해 폭약의 폭발력

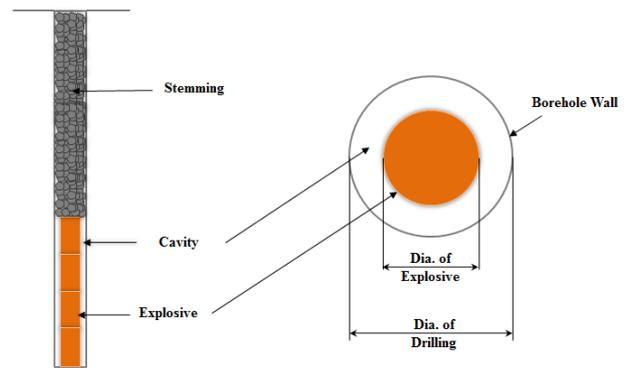


Fig. 2 General charging with decoupling effect

이 대상 암반에 전달되는 과정에서 발파 효율이 급격히 감소하게 되는데 이를 디커플링 효과라 한다(Drake, 1974).

#### 2.1.2 물을 매질로 하는 발파공법

일반적인 전색재로 사용하는 자갈은 입자간 맞물림(Interlocking)이 우수하여 폭발력 감소를 줄일 수 있으나, 입자가 커서 천공경과 폭약경사이의 공간을 밀실하게 채우기 어렵다. 모래의 경우에는, 일부 공간에 모래를 채울 수 있으나 입자간 맞물림이 작아 폭발력이 상부로 소실되는 공발현상이 발생할 수 있다. 또한 고분자계열이나 고화제계열은 공간을 밀실하게 채울 수 있으나 재료의 단가가 높고 주입이 어려우며 양생에 따라 공사기간이 늘어나는 문제점을 가지고 있다. 이에 반해 비압축성 재료인 물은 폭약경과 천공경 사이의 공간을 채우기 쉽고 경제적이며, 취급이 용이하고 친환경 재료라는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 공내에 워터튜브를 삽입하여 물로 공극을 밀실하게 충전하는 발파공법을 사용하여 일반발파공법과의 결과를 비교분석하였다.

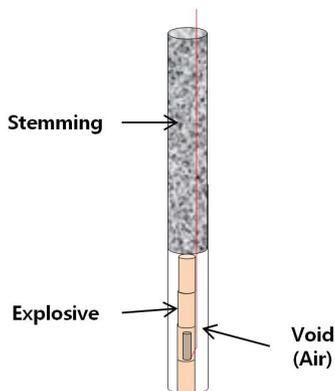


Fig. 1 General blasting method

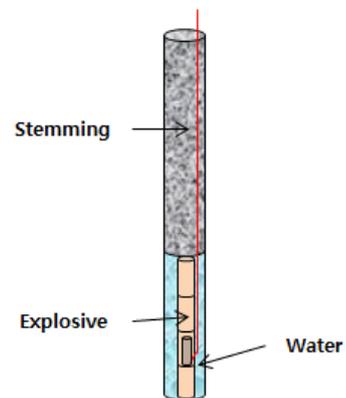


Fig. 3 Water Blasting Method

## 2.2 발파진동

### 2.2.1 특성

발파를 통한 굴착에서는 화약의 폭발 시 발생하는 충격압과 가스압을 이용하여 굴착단면의 암석을 제거하게 된다. 즉 폭약이 장약공 내에서 폭발하게 되면 수만에서 수십만 기압에 달하는 강력한 충격압(또는 폭굉압)과 연소된 화약에 의한 가스압, 그리고 3000°C 이상의 고온이 발생한다. 이때에는 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수 mm~수십 mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 충격압과 가스파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생 전파되어 균열대를 형성하게 된다. 이렇게 폭원으로부터 3차원적으로 전파되어온 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감소되어 발파에 대한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반 중으로 전파되어간다. 이러한 탄성파는 외부의 암반에 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키게 되는데 이를 발파진동(Blast Vibration)이라고 한다. 발파진동은 진폭과 주기를 갖는 진동이며 발파진동의 크기는 진동을 전달하는 매질, 즉 암반의 변위, 진동속도, 진동 가속도로 표시할 수 있다(Kang, 1997).

발파로 인한 지반진동의 측정은 Fig. 4와 같이 방향에 따라 폭원으로부터 측정점을 향하는 평면상 파의 진행방향 성분(Longitudinal Component), 진행방향에 직교하는 수직방향 성분(Vertical Component), 이들 두 방향과 직각을 이루는 접선방향 성분(Transverse Component)으로 이루어지며, 이들 3성분의 상대적 크기는 대상 암반이나 지형 및 발파에 의해 생성된 탄성파 즉, P파(압축 파·종파·Primary Waves), S파(전단파·횡파·Secondary Waves) 및 표면파인 Rayleigh Waves 등의 상호간섭에 따라 변하고 진동 주파수는 각각 다르게 나타난다. 따라서 3성분 중 각각 단일성분(T, V, L)에 대한 크기와 우월 성분의 최대치가 원하는 계측위치에서 측정될 수 있어야 한다. 발

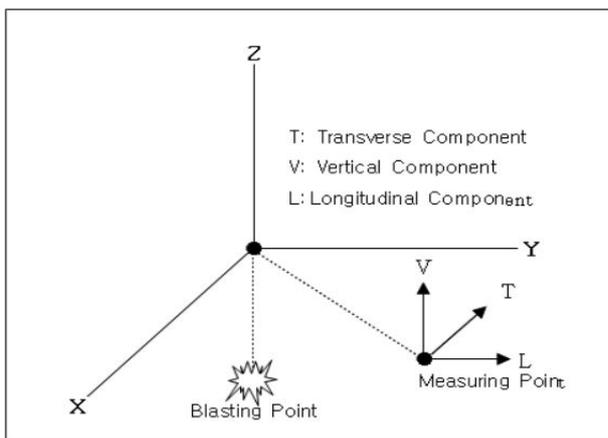


Fig. 4 3 Components of ground vibration

파 진동의 측정 시 이 세 가지 성분의 상대적 크기는 암반, 지형 및 발파에 의하여 생성된 탄성파들의 상호간섭에 따라 변하나 일반적으로 가장 큰 값을 나타내는 것이 수직성분이며, 때로는 진행성분이 수직성분과 같거나 큰 경우가 있고, 접선 성분은 대부분 세 성분 중에서 가장 작은 값을 나타내는 경향을 보인다. 그러나 각 성분에 대한 측정 예를 보면 접선 성분이 가장 크게 나타나는 경우도 있다.

한편 엄격한 의미에서 지반 진동과 구조물의 반응의 최대치는 세 성분 중 최대값이 발생하는 시점에서 세 성분의 벡터합인 최대 실벡터합(Maximum Vector Sum)으로 나타난다. 최대 실벡터합은 각 성분의 최대값의 벡터합인 최대 의사 벡터합(Pseudo Maximum Vector Sum)과는 구분해야 한다. 최대 의사 벡터합은 최대 실벡터 합보다 약 40% 가량 더 크며, 최대 실벡터합 역시 단일 성분의 최대치보다 약 5~10% 더 큰 값을 가진다. 일반적으로 발파진동에 의한 균열 발생을 경험적인 방법으로 관측, 기록할 때에는 단일 성분의 최대치를 사용해 왔으므로 의사 벡터합의 최대치를 사용하게 되면 안전율이 대단히 커지게 된다.

최근에 이르러 발파 진동의 허용치에 주진동수의 영향치를 고려하는 경우가 많아지고 있다. 발파진동의 주진동수는 0.5~200 Hz의 범위에서 다양하나 발파 형태에 따라 진동수의 범위가 더욱 제한되는 경향이 있다.

노천탄광에서는 다소 대규모의 발파가 이루어지는데 일정한 거리의 구조물에서 측정하면 건설 발파의 주진동수보다 더 낮은 진동수가 발생한다. 건설발파에서는 발파규모가 더 작으나 일반적으로 노천 채광발파에 비해 구조물과의 거리가 가깝기 때문에 진동수가 아주 높아지는 경향이 있다. 그러나 주진동수가 높다고 해서 반드시 건물에 대한 피해가 더 커지는 것은 아니다. 일반적인 건물의 고유진동수는 5~20 Hz이므로 오히려 저진동수의 발파진동에 의해 건물이 공명을 일으키게 된다. 따라서 지반을 통과하는 파에너지의 대부분이 구조물의 진동을 확대시키는 에너지로 흡수되기 때문에 저진동수의 발파진동이 더욱 위험한 것이다.

한편 발파진동의 특성은 지진진동과 비교하여 설명할 수 있다. 발파진동은 지진진동에 비하여 지속 시간이 짧고, 주파수 범위도 수십에서 수백 Hz인 고주파인 관계로 감쇠가 쉽게 일어나며, 파형이 비교적 단순하다. 또한 지진에 의한 진동피해의 경우 그 정도를 보통 가속도로 표시하고 있으나, 발파진동에 의한 구조물의 피해정도는 진동속도에 비례하기 때문에, 세계 각국에서는 대부분 발파진동의 규제 기준을 진동속도의 최대치로 정하고 있다.

### 2.2.2 진동 추정식

진동의 크기는 화약류의 종류에 따른 화약의 특성, 장약량,

기폭방법, 전색의 상태나 폭약의 장전밀도, 자유면의 수, 폭원과 측정점간의 거리, 지질조건 등에 따라 다르고, 지발뇌관의 사용으로 일정한 시간간격으로 기폭 하는 지발당장약량과 폭원으로부터의 거리등이 전파특성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인이 된다.

한편 진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 노력이 많은 연구자들에 의해 계속되어져 왔다. 많은 연구자들(Ambraseys and Hendron, 1968; Devine, 1962)은 발파현상에 관련된 변수의 차원해석을 근거로 하여 많은 발파진동의 측정경험을 토대로 지상구조물의 피해척도가 되는 지반의 진동속도를 지발당최대장약량과 폭원으로부터의 거리를 매개변수로 하여 경험적관계식 식 (1)로 나타낼 수 있음을 제시하였다(Shin and Oh, 1997).

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

여기서,  $V$ 는 지반진동속도(cm/sec),  $K$ 는 발파진동상수,  $W$ 는 지발당 장약량 (kg),  $D$ 는 발파지점과 측정지점과의 거리 (m),  $n$ 는 감쇠지수,  $b$ 는 환산지수(1/2 또는 1/3)이며  $K, n$ 은 지질상태, 발파조건 등에 따르는 상수이다. 위의 식에서  $D/W^b$ 를 환산거리(Scaled Distance ; SD)라 하며,  $b$ 가 1/2이면 자승근환산거리이고 1/3이면 삼승근 환산거리라고 하며 일반적으로

로 근접된 거리에서는 삼승근이 원거리에서는 자승근이 더욱 효율적이라고 한다. 그러나 실질적인 진동회귀분석을 실시하면 전체적으로  $b$ 값은 자승근 환산법이 더욱 효과적이다. 그리고 발파진동상수  $K$ 는 토양의 성질이나 거리에 따라 변화되며, 일반적으로 점토나 빙퇴석의  $K$ 값은 균질한 경암 보다는 낮게 되고 감쇠지수인  $n$ 은 발파진동 상수와 반대의 성질을 보인다.

이러한 발파진동 추정식을 구하기 위한 과정은 Fig. 5의 회귀분석 순서도에서 보여주고 있으며 내용은 다음과 같다. 발파현장에 적합한 진동추정식을 구하기 위해서는 장약량, 감쇠지수, 발파진동상수를 알아야 한다. 이러한 값을 구하기 위해 발파현장에서 임의로 장약량, 진동측정거리를 달리하면서 발파를 시행하여 측정된 진동자료를 가지고 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)에 의해 일반식을 유도하고 자승근(Root Scaling)과 삼승근(Cube Root Scaling)에 대한 회귀선(Regression Line)을 구하여 이에 적합도가 높은 쪽을 택해서 비교 검토한다.

위의 식으로 표현된 발파진동의 전파특성을 구하기 위하여 양변에 log를 취하여 선형식으로 나타내면 식 (2)와 같이 되고,

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

제곱근환산 및 세제곱근환산의 경우는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\log V = A + B \left( \log D - \frac{1}{2} \log W \right) \quad (3)$$

$$\log V = A + B \left( \log D - \frac{1}{3} \log W \right) \quad (4)$$

장약량  $W$ 에 대한 발파 진동 값  $V$ 를 여러 번 측정하여 측정된 값들은 중 회귀분석 방법으로 이 식들은 log-log 좌표에서 직선으로 표시되며  $y$ 축을  $\log V$  값으로 하고  $x$ 축을  $\log(D/W^{1/2})$  식 (3) 또는  $\log(D/W^{1/3})$  식 (4) 값으로 하였을 때,  $A$ 는  $y$ 축의 절편을 나타내고  $B$ 는 기울기를 나타낸다. 따라서 log-log 그래프용지에 진동전파의 경향이 쉽게 표시 될 수 있다(Kim et al., 2003).

이 식은 현장에서 폭원으로부터 특정지점까지의 거리( $D$ ) 및 최대지발당장약량( $W$ )을 사용하여 구할 수 있다.

### 2.2.3 국내 지반진동 허용기준치

국내의 발파작업 시 발생하는 지반진동은 현행법규와 관련하여 구체적인 별도의 허용기준이 설정되어 있지 않고 공사

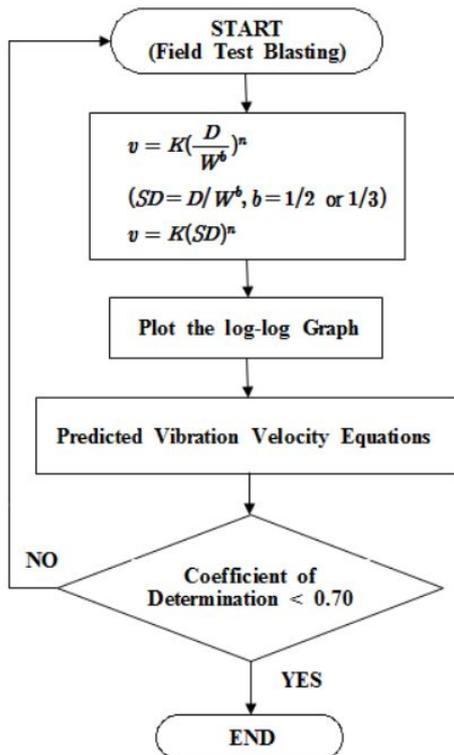


Fig. 5 Regression Analysis Flow Chart

발주처의 시방서에 발파진동허용기준으로 정해지는 것이 대부분이다. 통상적으로 적용하고 있는 국내건설공사의 경우 Table 1(Son et al., 2013)과 같이 이는 독일의 국가표준서를 기초로 하고 있으며, 국토교통부(Ministry of LI&T, 2006)의 기준에 따르면 가축(소, 닭, 돼지 등)은 0.1 cm/sec, 유적, 문화재, 컴퓨터 시설물은 0.2 cm/sec, 주택, 아파트 경우에는 0.3~0.5 cm/sec, 상가는 1.0 cm/sec, 철근콘크리트 건물 및 공장은 1.0~5.0 cm/sec

로 허용기준치를 정하고 있다. 고용노동부(Ministry of E&L, 2012)에서는 발파구간 인접 구조물에 대한 피해 및 손상을 예방하기 위해 건물기초에서의 허용 진동치를 문화재는 0.2 cm/sec, 주택과 아파트는 0.5 cm/sec, 상가는 1.0 cm/sec, 철근 콘크리트 빌딩 및 상가는 1.0~4.0 cm/sec의 진동값을 준용하도록 하고 있다.

국내 표준발파공법 진동규제기준별 적용 이격거리는 Table 2 (Ministry of LI&T, 2006)와 같으며, Type I은 미진동 굴착공법, Type II은 정밀 진동제어발파, Type III은 소규모 진동제어 발파, Type IV은 중규모 진동제어발파, Type V은 일반발파, Type VI은 대규모 발파를 나타낸다.

**Table 1** Domestic Allowable Standards of Ground Vibration

Classification	Regulation Criteria According to Vibration Velocity [cm/sec]	
	Kind of Building	Allowable Standards
Seoul Metro	Cultural Assets	0.2
	Building with Fault or Crack	0.5
	No Faulty Building with Crack	1.0
	Industrial Concrete Building w/o a Plastered Wall	1.0~4.0
LH	Domestic Animals	0.09
	Cultural Assets, Vibration Sensitive Facility	0.2
	House, Apartment	0.5
	Shopping Mall	1.0
Ministry of LI & T	Reinforced Concrete Structure	1.0~4.0
	Domestic Animals	0.1
	Remains, Cultural Assets, Computer Facility	0.2
	House, Apartment	0.3~0.5
Ministry of E & L	Shopping Mall	1.0
	Reinforced Concrete Building & Factory	1.0~5.0
	Cultural Assets	0.2
	House, Apartment	0.5
Ministry of E & L	Shopping Mall(No Crack)	1.0
	Reinforced Concrete Building & Shopping Mall	1.0~4.0

### 3. 발파시험 및 분석

#### 3.1 현장시험계획

본 연구 대상지역에서 사용된 발파타입과 채원은 Table 3와 같다. 발파공과 폭약경 사이의 디커플링 효과가 발생하는 공간에 기존의 발파방법대로 공기로 채워진 경우와 비압축성 매질인 물을 채운 워터튜브를 삽입한 두 가지 경우에 대해 시험발파를 실시하였다. 산업단지에서는 국토부 발파기준 중 Type-III(진동제어 소규모발파공법)를 사용하여 물을 매질로 하는 발파공법과 공기를 매질로 하는 발파공법을 각 10회씩 총 20회 시험발파를 실시하였으며, 천공장은 2.7 m, 천공경은 76 mm, 저항선은 공기의 경우 1.3 m, 물의 경우 1.5 m이며 천공간격은 공기의 경우 1.4 m, 물의 경우 1.5 m이고 지발당 최대장약량은 1.5 kg이다. 고속도로에서는 Type-V(일반발파공법)를 사용하여 물을 매질로 하는 발파공법과 공기를 매질로 하는 발파공법을 각 5회씩 총 10회 시험발파를 실시하였으며, 천공장은 5.7 m, 천공경은 76 mm, 저항선은 공기의 경우 2.0 m, 물의 경우 2.1 m이며 천공간격은 공기의 경우 2.0 m, 물의 경우 2.15 m이고 지발당 최대장약량은 7.0 kg이다. Fig. 6과

**Table 2** Separation Distance regarding to the Vibration Regulation Standards in General Blasting Method

Type	v=0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	5.0
I	to 40m	to 25m	to 20m	to 15m	to 5m	to 3m
II	40~80	25~50	20~40	15~30	5~20	3~7
III	80~140	50~90	40~70	30~50	20~30	7~10
IV	140~260	90~170	70~130	50~90	30~60	10~25
V	260~450	170~290	130~220	90~160	60~110	25~40
VI	> 450m	>290m	>220m	>160m	>110m	>40m

**Table 3** Blasting Specifications in this Study

Site (Type)	Medium	Hole Length (m)	Hole Diameter (mm)	Burden (m)	Hole Spacing (m)	Charge per Delay (kg)
Industrial Complex (Type III)	Air	2.7	76	1.3	1.4	1.5
	Water	2.7	76	1.5	1.5	1.5
Highway (Type V)	Air	5.7	76	2.0	2.0	7.0
	Water	5.7	76	2.1	2.15	7.0
Railway (Type IV)	Air	3.2	76	1.3	1.4	6.0
	Water	3.2	76	1.5	1.6	6.0

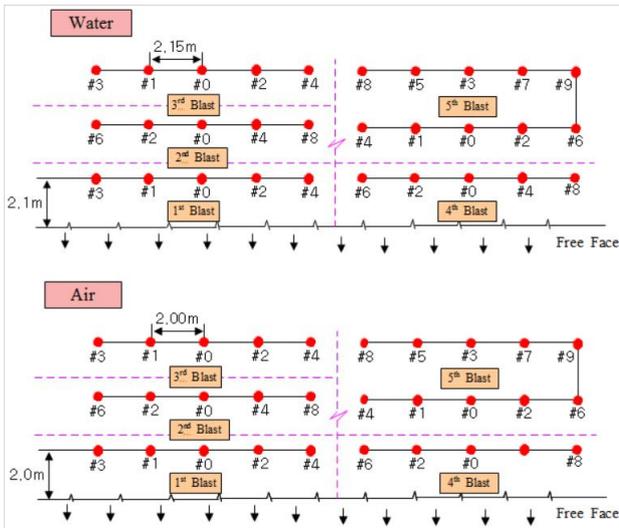


Fig. 6 Detonation Plane View(Highway)

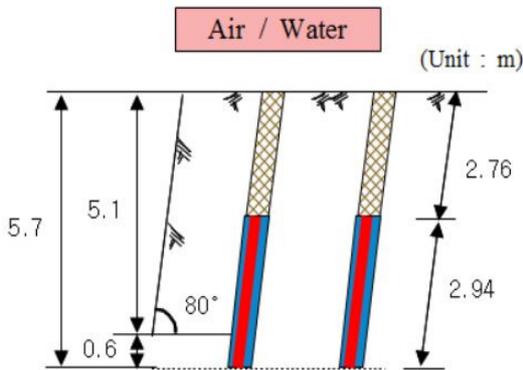


Fig. 7 Detonation Cross Section View(Highway)

Fig. 7은 각각 고속도로 경우의 발파 평면도와 발파 단면을 보여주고 있다. 철도에서는 Type-IV(진동제어 중규모발파공법)를 사용하여 물을 매질로 하는 발파공법과 공기를 매질로 하는 발파공법을 각 5회씩 총 10회 시험발파를 실시하였으며, 천공장은 3.2 m, 천공경은 76 mm, 저항선은 공기의 경우 1.3 m, 물의 경우 1.5 m이며 천공간격은 공기의 경우 1.4 m, 물의 경우 1.6 m이고 지발당 최대장약량은 6.0 kg이다. 시험발파의 벤치형태는 2 자유면으로 실시되었으며, 각각의 패턴으로 선형관계의 회귀분석을 실시하여 당 현장의 지반진동 추정식을 산출하였다. 또한 이격거리별 허용지발당 장약량을 기준으로 발파영향권을 분석하였다. 물을 매질로 하는 발파공법의 경우(Fig. 7의 윗그림), 천공장, 천공경, 지발당 장약량은 공기를 매질로 하는 발파공법과 동일하나, 저항선의 길이(2.1 m), 공간격(2.15 m)은 증가시켰다. 이는 물을 매질로 하는 발파공법이 천공경과 장약공 사이의 공간을 밀실하게 충전함으로써 발파효율이 증가되어 과다하게 발파가 발생하지 않도록 고려한 조치이다.

### 3.2 현장계측 시스템

발파진동 계측기는 CANADA INSTANTEL INC.에서 제작한 BLASTMATE-III로써 Photo 1과 같으며 이 계측기는 변위, 진동속도, 진동가속도, 주파수, 폭풍압을 모두 측정할 수 있는 제품으로, 계측치가 디지털 및 아날로그 형태로 나타낼 수 있으며 진행방향, 횡방향, 수직방향 및 이들 속도성분에 대한 벡터합의 측정이 가능하고, 또한 진동 DATA의 컴퓨터 분석(주파수분석, 뇌관 시차분석, 진동추정식 설정 등)이 가능



Photo 1 Measurement Device

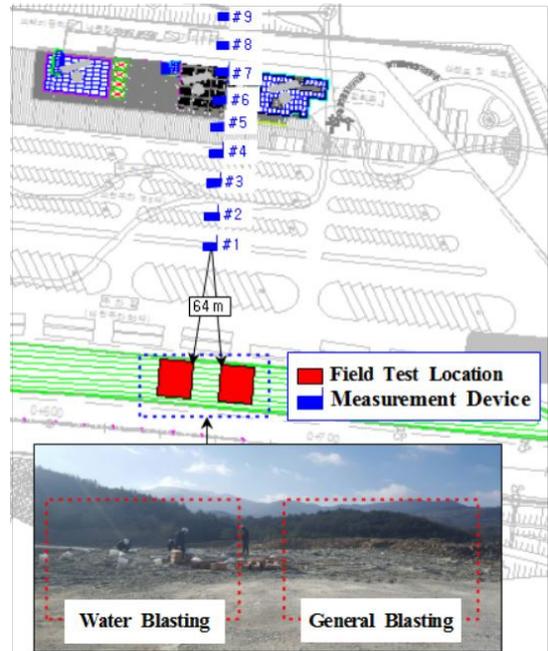


Fig. 8 Full View of Field Test Blasting(Highway)

**Table 4** Blasting Vibration Velocity Measurement Data(Unit : cm/sec)

No	1 <sup>st</sup>		2 <sup>nd</sup>		3 <sup>rd</sup>		4 <sup>th</sup>		5 <sup>th</sup>	
	Air	Water								
1	1.350	1.000	0.927	0.508	0.902	0.559	0.610	0.356	0.457	0.292
2	0.576	0.386	0.437	0.435	0.340	0.783	0.446	0.478	0.199	0.597
3	0.575	0.332	0.400	0.324	0.425	0.289	0.337	0.224	0.387	0.189
4	0.513	0.359	0.322	0.205	0.340	0.264	0.289	0.200	0.225	0.230
5	0.183	0.168	0.157	0.184	0.171	0.152	0.162	0.168	0.178	0.181
6	0.186	0.171	0.176	0.175	0.148	0.170	-	0.130	0.178	0.117
7	0.149	0.168	0.168	0.168	0.154	0.117	0.152	0.144	0.190	0.102
8	0.167	0.176	0.119	0.190	0.184	0.173	0.164	0.157	0.141	0.117
9	0.141	0.127	0.184	0.096	0.170	0.149	0.187	0.160	0.164	0.156

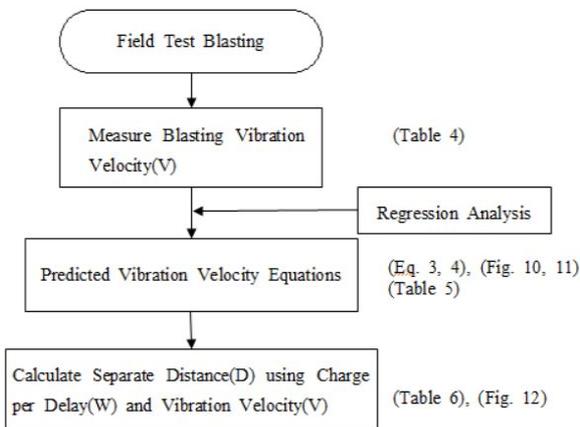
Note) Every Distance between Measuring Points is 15m

한 기기이다. 계측기 설치위치는 Fig. 8과 같이 배치하였으며, 발파진동 추정식, 진동속도 추정식 도출을 위한 입지상수 획득을 위하여 사용된 측정기기는 거리와 지발당 장약량을 달리하면서 3개 현장에 대해 사이트별 8~9대를 Measuring Point에 고정시켜 진동속도(cm/sec)를 동시 측정하였다. Fig. 8은 고속도로 현장에서 계측센서 전체설치현황을 보여주고 있다. 계측센서가 시험 발파위치에서 처음 계측센서까지 64 m를 이격하였고 계측센서간의 간격은 15 m를 유지하였음을 알 수 있다.

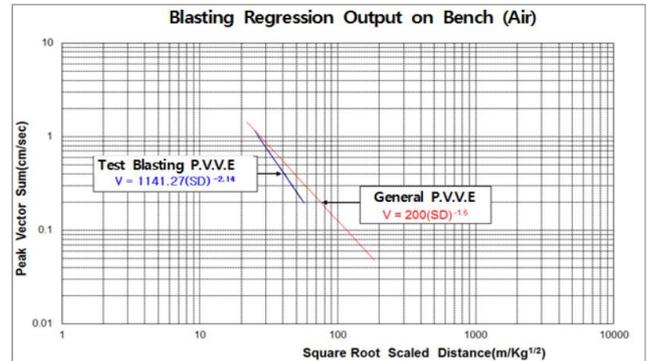
### 3.3 시험결과 및 분석

시험 결과의 분석흐름은 Fig. 9와 같다. 시험발파를 실시한 후 진동측정계측기를 사용하여 발파진동속도를 측정하고, 다중회귀분석을 통해 지반진동속도추정식을 산출한다. 다음으로 지발당장약량과 진동속도를 사용하여 이격거리를 산출하는 순서로 진행하게 된다. 현장별 시험발파를 통해 계측데이

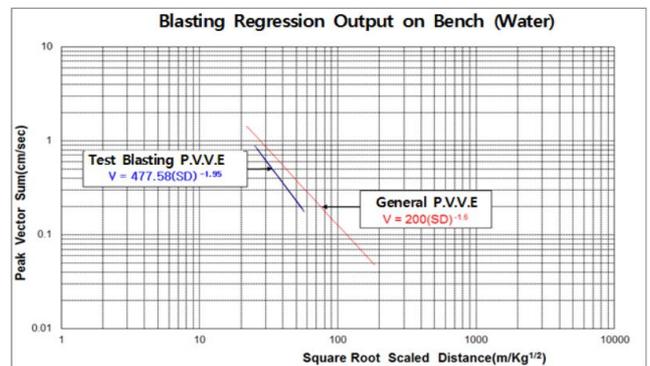
터(Table 4)를 획득할 수 있다. 전체 계측데이터(Table 4)가 45개이나, 측정되지 않은 1개를 제외하고 44개의 계측데이터 중 33개에서 진동속도가 감소함을 확인하였다. 이 데이터를 사용하여 다중회귀분석을 실시하면 Fig. 10, Fig. 11과 같은 발파진동추정식을 구할 수 있다. Fig. 10(공기 매질인 경우), Fig. 11(물 매질인 경우)은 고속도로 현장의 발파진동추정식 그래프



**Fig. 9** Analysis procedure



**Fig. 10** Predicted vibration velocity graph(Highway, Air)



**Fig. 11** Predicted vibration velocity graph(Highway, Water)

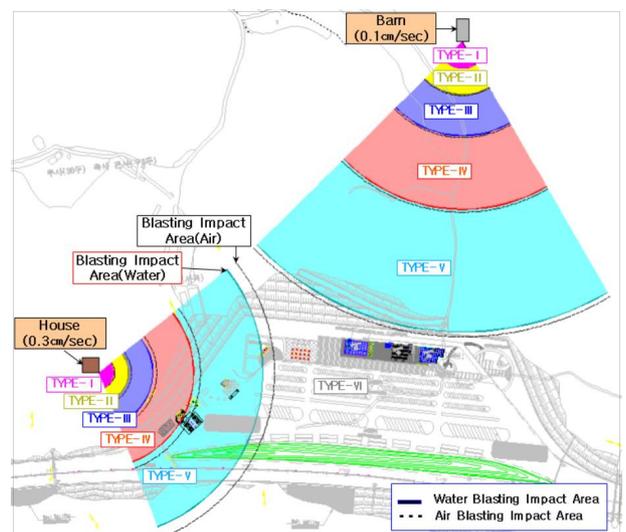
**Table 5** Predicted vibration velocity equations by regression analysis

Site	Predicted Vibration Velocity Equations	
Industrial Complex	Air	$V_{95\%} = 208.36(D/\sqrt{W})^{-1.62}$
	Water	$V_{95\%} = 108.67(D/\sqrt{W})^{-1.48}$
Highway	Air	$V_{95\%} = 1142.27(D/\sqrt{W})^{-2.142}$
	Water	$V_{95\%} = 477.58(D/\sqrt{W})^{-1.95}$
Railway	Air	$V_{95\%} = 66.27(D/\sqrt{W})^{-1.40}$
	Water	$V_{95\%} = 59.73(D/\sqrt{W})^{-1.39}$

**Table 6** Distance according to the allowable standards in 3 sites

Site, Type	Allowable Standards	Vibration Velocity (cm/sec)				
		≤ 0.1	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0	
Industrial Complex	Type I	Air	≤ 39	≤ 20	≤ 14	≤ 9
		Water	≤ 39	≤ 18	≤ 13	≤ 8
	Type II	Air	~ 80	~ 40	~ 29	~ 19
		Water	~ 78	~ 37	~ 26	~ 16
	Type III	Air	~ 143	~ 72	~ 52	~ 34
		Water	~ 140	~ 66	~ 47	~ 29
	Type IV	Air	~ 253	~ 128	~ 93	~ 60
		Water	~ 249	~ 118	~ 84	~ 52
	Type V	Air	~ 438	~ 222	~ 161	~ 105
		Water	~ 431	~ 206	~ 145	~ 91
	Type VI	Air	≥ 438	≥ 222	≥ 161	≥ 105
		Water	≥ 431	≥ 206	≥ 145	≥ 91
Highway	Type I	Air	≤ 27	≤ 16	≤ 12	≤ 10
		Water	≤ 27	≤ 15	≤ 11	≤ 8
	Type II	Air	~ 55	~ 33	~ 26	~ 18
		Water	~ 54	~ 30	~ 23	~ 16
	Type III	Air	~ 98	~ 59	~ 46	~ 33
		Water	~ 96	~ 55	~ 42	~ 29
	Type IV	Air	~ 174	~ 104	~ 82	~ 59
		Water	~ 171	~ 97	~ 75	~ 52
	Type V	Air	~ 301	~ 180	~ 142	~ 106
		Water	~ 296	~ 168	~ 130	~ 91
	Type VI	Air	≥ 301	≥ 180	≥ 142	≥ 106
		Water	≥ 296	≥ 168	≥ 130	≥ 91
Railway	Type I	Air	≤ 36	≤ 16	≤ 11	≤ 7
		Water	≤ 36	≤ 16	≤ 11	≤ 6
	Type II	Air	~ 73	~ 33	~ 23	~ 14
		Water	~ 71	~ 32	~ 22	~ 13
	Type III	Air	~ 131	~ 59	~ 42	~ 25
		Water	~ 127	~ 57	~ 39	~ 24
	Type IV	Air	~ 232	~ 105	~ 74	~ 44
		Water	~ 224	~ 101	~ 70	~ 42
	Type V	Air	~ 402	~ 183	~ 129	~ 77
		Water	~ 389	~ 176	~ 122	~ 73
	Type VI	Air	≥ 402	≥ 183	≥ 129	≥ 77
		Water	≥ 389	≥ 176	≥ 122	≥ 73

를 나타내고 있다. 그래프 결과에서 볼 수 있듯이 고속도로현장의 경우 물을 매질로 하는 발파의 경우에서 발파진동추정식의 그래프가 더 낮은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 현장별 산출식은 Table 5와 같다. 산업단지현장의 경우 공기 매질인 경우 발파진동추정식은  $V_{95\%} = 208.36(D/\sqrt{W})^{-1.62}$ 이며, 물 매질인 경우  $V_{95\%} = 108.67(D/\sqrt{W})^{-1.48}$ 이다. 고속도로 현장의 경우 공기 매질인 경우 발파진동추정식은  $V_{95\%} = 1142.27(D/\sqrt{W})^{-2.142}$ 이며, 물매질인 경우  $V_{95\%} = 477.58(D/\sqrt{W})^{-1.95}$ 이다. 철도 현장의 경우 공기 매질인 경우 발파진동추정식은  $V_{95\%} = 66.27(D/\sqrt{W})^{-1.40}$ 이며, 물매질인 경우  $V_{95\%} = 59.73(D/\sqrt{W})^{-1.39}$ 이다. 일반적인 발파에서 매질이 공기인 경우와 매질을 물로 사용하는 방법의 결과를 비교했을 때 물을 매질로 하는 발파공법이 공기를 매질로 하는 발파공법에 비해 진동 규모가 각각 산업단지의 경우 14%, 고속도로의 경우 16.5%, 철도의 경우 8%의 감소효과가 발생함을 알 수 있었다. Table 6과 같이 공기가 매질인 발파공법과 비교하여 물을 매질로 하는 발파공법의 이격거리 데이터를 분석한 결과 산업단지 조성공사의 경우, 진동속도 0.3 cm/sec이하와 0.5 cm/sec이하에서 Type-V, Type-VI의 발파타입에서 최대 16 m의 발파이격거리를 감소시킬 수 있었다. 고속도로 건설공사의 경우, 진동속도 1.0 cm/sec이하에서 Type-V, Type-VI의 발파타입에서 최대 15 m의 발파이격거리를 감소시킬 수 있었다. 철도 건설공사의 경우, 진동속도 0.3 cm/sec이하와 0.5 cm/sec이하에서 Type-V, Type-VI의 발파타입에서 최대 7 m의 발파영향권 이격거리를 각각 감소시킨다. Fig. 12(고속도로)는 Table 6의 진동속도 허용기준치 0.1 cm/s 이하(축사)와 0.3 cm/s 이하(가옥)의 경우 공기를 매질로 사용하는 발파공법과 물을 매질로 사



**Fig. 12** Comparison of blasting influence area according to the allowable standards(Highway)

용하는 발파공법의 이격거리 변화량을 도식적으로 표현한 것이다. 물을 매질로 사용하는 발파공법이 공기를 매질로 사용하는 발파공법에 비해 Type-I에서 Type-VI까지 발파공법별로 최대 12 m까지 이격거리가 감소함을 쉽게 확인할 수 있다. 이는 물을 매질로 하는 발파공법을 적용한 경우 발파영향권 이격거리가 감소하여 기존 공기를 매질로 하는 발파공법에 비해 구조물에 근접한 발파시공이 가능함을 보여준다. 따라서 근접시공 시 인접시설에 대한 안전성이 증대되고 발파진동의 영향이 줄어들음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

산업단지, 고속도로, 철도 건설공사 등 3곳의 현장시험발파 현장에서 일반발파와 물을 매질로 하는 발파공법을 실시하고 각각의 진동속도를 측정하고 발파진동식 추정식을 산출한 후 발파영향권 및 이격거리를 산정하여 비교분석 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공기를 매질로 하는 발파공법과 비교하여 물을 매질로 하는 발파공법에서는 진동속도의 경우, 산업단지는 14%, 고속도로는 16.5%, 철도는 8% 각각 감소함을 보였다.
- 2) 발파영향권 이격거리의 경우, 공기를 매질로 하는 발파보다 물을 매질로 하는 발파공법이 산업단지 조성공사의 경우 최대 16 m, 고속도로 건설공사의 경우 최대 15 m, 철도 건설공사의 경우 최대 7 m의 발파영향권 이격거리를 각각 감소시킬 수 있었다.
- 3) 상기 결과를 바탕으로 발파공사 시 천공경과 폭약경 사이의 매질을 개선함으로써 진동속도 및 발파영향권 이격거리를 감소시켜 환경개선 및 안전성 확보가 가능함을 알 수 있다.

#### References

Drake, J. L. (1974), Decoupling of Ground Shock from Explosions in Rock Cavities, *Miscellaneous Paper*, U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station., 74(1), 7-9.

Ambraseys, N. R., Hendron, A. J. (1968), Dynamic Behaviour of Rock Masses, *Rock Mechanics*. In K.G. Stagg & O.C. Zeinkiewicz (eds), *Engineering Practice*. John Wiley & Sons Inc., London, 203-227.

Devine, J. F. (1962), Vibration Levels from Multiple Holes per Delay Quarry Blasts, *Earthquake Notes*, Vol. XXXIII, Sep. 32-39.

Shin, J. W., Oh, S. W. (1997), The Influence of Ground Stability with Blasting Vibration, *Journal of Korean Society of Safety*, KOSOS., 12(3), 103-104.

Kang, C. W. (1997), The Effect of Bottom-Hole Stemming Materials on Vibration Level at Urban Area Blasting, *Journal of Korean Society for Rock Mech. (Tunnel & Underground)*, KSRM., 7, 51-52.

Kim, Y. K., Lee, C. S., Kang, D. W. (2003), A Study on the Ground Vibration and Sound Level from Air Tubes Blasting using ANFO, *Journal of Korean Society of Explosives and Blasting Engineering*, KSEE., 21(1), 52-53.

Office of National Environmental Conflict Resolution Commission(2014), *A Casebook of Environmental Conflict Resolutions*. (in Korean)

Son, M. R., Jung, Y. K., Yoo, J. S., Hwang, Y. C., Moon, D. H. (2013), A Study on the Criteria of Blasting Vibration for Domestic and Foreign, *Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, KTA., 15(5), 29-42.

Ministry of Land, Infrastructures and Transport in Korea(2006), *Design and construction guidelines for road construction open-air blast*. (in Korean)

Ministry of Employment and Labor in Korea(2012), *Work guideline for blasting work standard safety*. (in Korean)

DIN 4150-part 3(1970, 1986), *Structural Vibration in Buildings: Effect on Structure*.

Received : 09/30/2016

Revised : 11/26/2016

Accepted : 12/02/2016

---

**요 지** : 최근에 도시화와 산업화 및 교통망의 지속적인 확보로 인하여 발파공사를 시행하는 공사장이 증가하고 있다. 발파공사는 주변 주민들의 주거환경과 인접시설물들의 안전에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 대책이 필요하다. 본 연구에서는 발파피해를 줄이기 위한 방법 중에서 발파공내의 발파메커니즘을 규명하고 개선하였다. 일반적인 공법에서 발생하는 천공경과 폭약경 사이의 차이로 인한 공간에서 디커플링 효과를 규명하고, 이 공간의 매질을 변화시킴으로서 발파 시 진동발생의 규모를 규명하였다. 발파시험은 도로, 철도, 산업단지에서 실시하고, 발파진동을 측정하였다. 측정된 진동속도를 회귀분석하여 발파진동추정식을 산정하고 이를 이용하여 이격거리를 산정하였다. 공내 매질이 공기보다는 물처럼 비중이 큰 경우에 충격력은 크나 폭발 지연시간이 짧아 진동전달거리가 작아 이격거리를 크게 확보할 수 있다.

**핵심용어** : 발파시험, 공내 매질, 이격거리, 진동속도, 발파진동추정식

---