



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2011년 2월

석사학위 논문

진동레벨과 진동속도의
상관성에 관한 연구

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

송 하 림

진동레벨과 진동속도의 상관성에 관한 연구

Study regarding a correlation
of vibration level and vibration velocity

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

송 하 림

진동레벨과 진동속도의 상관성에 관한 연구

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함


2010년 10월


조선대학교 대학원


에너지자원공학과

송 하 립

송하림의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고 진 석 

위 원 조선대학교 교수 박 천 영 

위 원 조선대학교 교수 강 추 원 

2010년 11월

조선대학교 대학원

< 목 차 >

List of Tables	i
List of Figures	iii
Abstract	v
1. 서론	1
2. 이론적 배경	3
2.1 진동 이론	3
2.1.1 진동의 기본용어	3
2.1.2 진동량의 표현	8
2.2 진동의 영향	9
2.2.1 발파진동의 전파	9
2.2.2 진동이 건물에 미치는 영향	11
2.2.3 진동이 인체에 미치는 영향	12
2.2.4 발파의 진동에 의한 암석파쇄이론	13
2.3 파동의 전파 이동	15
2.3.1 종파와 횡파의 전파	17
2.3.2 Rayleigh파의 전파	22
2.3.3 진동속도의 예측	26
2.3.4 진동레벨의 예측	27
3. 현장실험	29
3.1 연구지역의 지형	29
3.2 실험방법	32
3.2.1 측정기기	33
3.2.2 측정방법	35
3.3 실험결과	36

3.3.1 진동속도와 진동레벨 측정결과	36
4. 진동레벨과 진동속도의 상관성 고찰	47
4.1 실측진동레벨과 환산식에 의한 예측진동레벨의 비교	47
4.1.1 진동레벨 환산식	47
4.1.2 구간별 예측진동레벨	49
4.2 진동레벨과 진동속도의 상관성 검토	69
4.2.1 예측진동레벨의 분석결과	72
5. 결론	73

참 고 문 헌

<List of Tables>

Table 2.1 Unit of Vibration	8
Table 2.2 A permission vibration velocity basis by a building kind	11
Table 2.3 Influence of vibration regarding man	12
Table 2.4 The shock wave value of total energy	15
Table 3.1 Blasting conditions	32
Table 3.2 Vibration velocity measuring instrument specification	33
Table 3.3 Vibration level measuring instrument specification	34
Table 3.4 The measurement results local the first	36
Table 3.5 The measurement results local the second	37
Table 3.6 The measurement results local the third	39
Table 3.7 The measurement results local the fourth	40
Table 3.8 The measurement results local the fifth	41
Table 3.9 The measurement results local the sixth	42
Table 3.10 The measurement results local the seventh	43
Table 3.11 The measurement results local the eighth	45
Table 4.1 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the first	49
Table 4.2 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the second	51
Table 4.3 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the third	54
Table 4.4 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the fourth	56
Table 4.5 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the fifth	58
Table 4.6 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the sixth	61
Table 4.7 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level	

local the seventh	63
Table 4.8 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level	
local the eighth	66
Table 4.9 Comparison of conversion results of total data and measurement	
vibration level	69

<List of Figures>

Figure 2.1	Vibration waveform	3
Figure 2.2	Regularity vibration and irregularity vibration	4
Figure 2.3	Harmonic oscillation	7
Figure 2.4	The size of sine wave vibration	7
Figure 2.5	Measuring direction of ground vibration	9
Figure 2.6	Body wave and Rayleigh wave	16
Figure 2.7	Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period	16
Figure 2.8	Stress on a small element of an infinite elastic medium	17
Figure 2.9	Coordinate convention for elastic half-space	22
Figure 3.1	Study area in SongChoo country club blasting work	30
Figure 3.2	Field panorama. (a), (b) view of the field	31
Figure 3.3	Equipment for a measurement and measurement picture	35
Figure 4.1	Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 1 area	50
Figure 4.2	Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 1 area	50
Figure 4.3	Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 2 area	53
Figure 4.4	Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 2 area	53
Figure 4.5	Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 3 area	55
Figure 4.6	Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 3 area	55
Figure 4.7	Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 4 area	57
Figure 4.8	Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS	

and measurement vibration level in 4 area	57
Figure 4.9 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 5 area	60
Figure 4.10 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 5 area	60
Figure 4.11 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 6 area	62
Figure 4.12 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 6 area	62
Figure 4.13 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 7 area	65
Figure 4.14 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 7 area	65
Figure 4.15 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 8 area	68
Figure 4.16 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 8 area	68
Figure 4.17 The conversion results that used PPV of total data	71
Figure 4.18 The conversion results that used PVS of total data	71
Figure 4.19 Comparison of measurement vibration level and conversion vibration level	72

Abstract

- Study regarding a correlation
of vibration level and vibration velocity -

By Song, Ha Lim

Adv. Prof. : Prof. Kang, Choo Won, Ph.D

Dept. of Energy and Resource Engineering

Graduate School of Chosun University

As our society has been rapidly industrialized and the public has had higher level of awareness, civil complaints against noise, vibration and dust caused by blasting in construction fields of highways, railroads, subway, harbors and redevelopment have increased. Such constructional processes will cause environmental pollution(noise, vibration and dust) due to tunnel excavation and destruction of rock mass, which caused variety of civil complaints. To find solutions to the complaints, environmental pollutants such as noise, vibration and dust have been managed and measured during construction. Measuring vibration caused by blasting is categorized into two: vibration velocity (cm/sec) to assess physical effect on structures and vibration level(dB(V)) to assess the effect on senses of human bodies. Most of the measurements in construction fields use vibration velocity measuring instruments based on vibration velocity, but there are few measurements on vibration level. Therefore, there have been a number of studies on correlation formula of vibration velocity and level, but accurate results have not been obtained. When vertical vibration level is calculated from the maximum velocity amplitude, Ejima, a representative

conversion formula, is mainly used for successive vertical vibrations whose frequency is above 8Hz, but it tends to overestimate shockwave. Venmarche is also used for conversion of vibration level and applied for conversion from shock vibration into vibration level rather than successive vibrations.

This study measured a vibration level at each distance of construction fields where blasts occur using Lion measuring instrument and used BlastmateIII to measure vibration velocity at the same distance. It analysed data on vibration velocity measured based on existing correlation formulas and compared them to real measurements to analyse interrelationship. A total 130 blasts occurred with the weight of a total of 5,180kg and the number of blast holes per blast was 5, 10 and 20. The weight of 4kg was used for each hole. Vibrations caused by blast was measured at the distance with the same velocity and level. Measurements were carried 15~102m away from the blast source. and 273 data on vibration velocity and level were obtained from eight measurements. The data measured were analysed with several conversion formulas and discovered that interrelationship between vibration levels and velocity calculated with a use of Venmarche was 99.68%, which was more exact in comparison with vibration levels measured. However, as it needs various variables such as kinds of detonators used for each blast, the number of delay detonators per blast, kinds of blast and geological conditions, it is expected that evaluation of the vibration at construction fields will be difficult. Therefore, it is suggested that further studies considering geological characteristics of the fields are needed for faster and more exact blast management.

1. 서론

급격한 산업사회의 발전과 함께 주민들의 의식 수준의 향상에 따라 여러 현장의 발파로 인한 소음, 진동, 분진 등과 같은 환경 공해에 대한 민원이 더욱 민감해지고 있는 실정이며 고속도로, 철도 및 지하철, 항만, 택지조성 및 재개발 등이 확충되고 있다. 이들 공사작업 수행과정에서의 터널굴착 암반의 파쇄 등 발파로 인한 환경공해(소음, 진동, 분진 등)의 발생은 필연적이다. 택지부족으로 인한 인접시공의 증가와 주민들의 환경피해에 대한 의식 수준의 향상으로 발파공사 작업으로 인한 환경공해문제가 계속 증가할 것으로 보이며 이러한 이유로 환경 분쟁 또한 증가할 것이다. 우리나라의 기준을 보면 환경부에서 제정한 소음, 진동 규제법에서는 진동에 의한 정신적 피해를 진동레벨 단위로 규정하고 있으나 국토부에서는 진동에 대한 피해를 진동속도를 기준으로 관리되고 있는 상황이고 진동레벨을 평가하는 척도는 인체 감응도를 평가 하는 것이지만 인근 구조물 등에 미치는 물리적 영향 또한 진동속도로서 평가 관리 되는 상황이다. 이러한 공사작업의 수행으로 발생하는 민원을 줄이기 위하여 공사의 시공 중에 소음, 진동, 분진의 환경공해에 대한 관리 및 계측을 실시하고 있다. 이러한 환경공해를 줄이기 위한 방법 중 계측에서의 발파에 의한 진동은 크게 2가지로 분류한다. 첫 번째로 건축구조물에 미치는 물리적 영향을 평가하는 진동속도(cm/sec)와 인체 감응에 의한 영향을 평가하는 진동레벨(dB(V))로 구분하게 된다. 현재 공사현장에서 측정되는 대부분이 진동속도를 기준으로 진동속도 측정기기를 사용하고 있으며 이와 반대로 인체에 대한 영향을 평가하는 진동레벨에 대한 측정은 거의 이루어 지지 않고 있는 실정이다. 이에 따라 진동속도를 진동레벨로 환산하기 위한 연구가 진행되고 있다.

기존의 대표적인 환산식인 Ejima 환산식은 최대속도 진폭으로부터 수직진동레벨을 산정하는 경우 수직진동에 대해서는 주파수가 8Hz이상인 연속 정현파일 경우에 주로 사용되고 충격진동파형에서는 과대평가되는 경향이 있다. Venmarche 환산식 또한 진동레벨 환산에 이용되며 이 식은 일반적으로 진동원이 연속진동이 아닌 충격진동에서 진동레벨로의 환산에 적절하게 적용되고 있으나 실질적으로 현장에서의 적용성이 어렵다. 그 밖에도 여러 상관식이 있으나 아직 명확한 결론에 도달하지 못하였다. 이러한 식에 사용되는 진동속도는 현행 소음·진동 규제법에서 인체

에 미치는 영향만을 고려하여 수직성분을 측정하도록 하고 있으나 발파진동이 건축구조물에 미치는 영향은 수직성분보다는 수평성분이 더 큰 피해를 발생시키는 경우도 있다. 이러한 이유로 가장 높은 값의 성분을 나타내는 PPV값으로 할 것인지 PVS 성분들의 실 벡터 합으로 할 것인지에 대한 구분이 필요하다.

최근의 연구에는 발파현장에서 발파진동 계측기로 측정한 진동 계측치(PPV, PVS, Vv)를 이용하여 진동레벨을 산출하는데 있어서 언제 어디서나 지발당 장약량 및 폭원과의 이격거리에 관계없이 유효하게 적용할 수 있는 새로운 진동레벨 추정식(김일중, 2009)을 제시하였고, 지면 및 구조물 높이에 따라 지동레벨과 지동속도를 측정하고 이들의 상관성 및 실측 진동레벨과 변환식에 의한 진동레벨과의 차이를 고찰(이연수, 2005)한 연구도 진행되었다.

본 연구에서는 8곳의 지역을 나누어 총 130회의 발파가 진행되었으며 15~102m 거리 내에서 진동속도 측정기인 BlastmateⅢ와 진동레벨측정기인 VM-53을 이용하여 같은 거리에서의 진동레벨과 진동속도를 동시 측정하였다. 측정된 진동속도는 Venmarche식과 Eejima식, 중앙환경분쟁조정위원회 방식을 이용하여 예측진동레벨 값을 산출하였다. 환산할 때의 진동속도는 최대 진동속도를 나타내는 성분인 PPV 값과 3성분의 실 벡터합인 PVS로 나누어서 분석하였고, 환산된 예측진동레벨은 VM-53으로 측정된 실제측정 진동레벨과 비교하여 예측식의 진동레벨의 상관성에 대하여 고찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 진동 이론

진동이란 구조물이나 지반 등이 동적인 외력의 영향을 받아 운동적 평행위치로부터 시간의 경과와 함께 반복 위치가 변화하는 운동현상을 말한다. 구조물의 대부분은 탄성체이기 때문에 어떤 작용에 의하여 크고 작은 진동을 받는 것은 말할 필요도 없다. 이러한 진동에 의하여 구조물은 부분적인 파손을 일으킨다든가, 유해한 소음을 발생하든가 하여, 흔들림에 의한 불쾌감을 초래하게 된다.

2.1.1 진동의 기본용어

진동에서 가장 단순한 것은 시간의 경과와 함께 동일한 형상이 반복되는 것이다. 그러나 일반적으로 진동이 반복되는 간격은 항상 일정시간 간격은 아니고 동일형상이라도 모두 같은 상태가 반복되는 것은 아니다. 이 일정한 시간 간격에 동일한 형상이 반복되는 진동을 정상진동이라 하고 그렇지 않은 것을 비정상진동이라 한다. 일정한 회전수로 회전하는 기계에 의한 진동은 정상진동이며 지진에 의한 진동은 비정상진동이다.

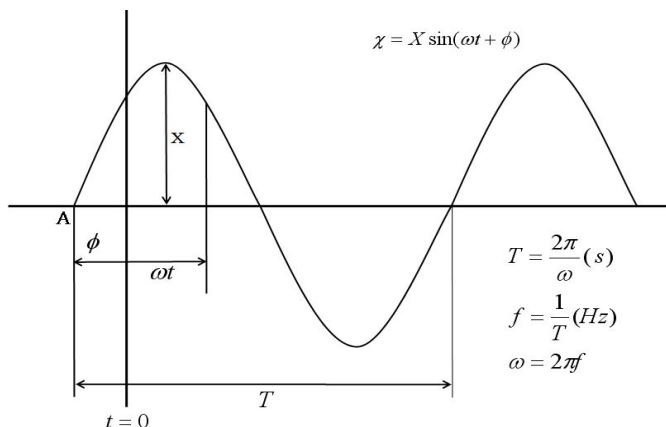


Figure 2.1 Vibration waveform

공해진동이라고 불리는 진동에는 정상진동의 것도 있지만 비정상진동인 것이 많다. Figure 2.2는 이러한 파의 형태를 나타낸 것이다. 진동현상을 나타내는 물리량을 진동량이라 하며 변위와 속도, 가속도가 사용된다.

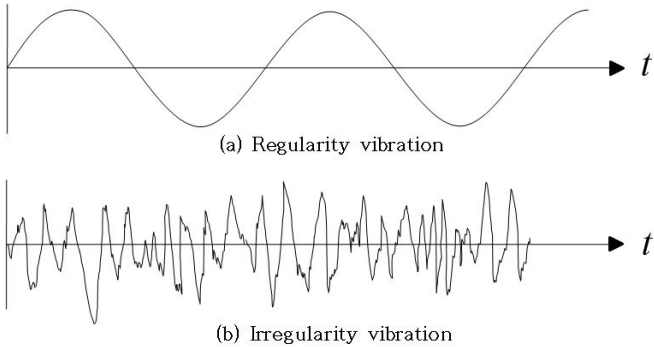


Figure 2.2 Regularity vibration and irregularity vibration

진동하고 있는 점 A의 위치가 시간적으로 $\pm X$ 의 사이에서 반복운동을 되풀이하는 경우를 고려해 보자. 어떤 시간 t 에 있어서 점 A의 위치 X 가 시간적으로 정현 변화한다고 가정하면 x 의 관계를 다음 식(2.1)으로 표현된다.

$$x = X \sin(\omega t + \phi) \tag{2.1}$$

여기서 x 는 변위, X 는 평형위치로부터의 최대변위를 나타내며 변위진폭이라 부른다. 또한 ω (rad/sec)는 각속도이고, ϕ (rad)는 위상각이라 부른다. 식(2.1)로 나타낸 진동은 정현진동 또는 조화진동이라 부르며 일정한 시간적 변동을 반복하는 정상적인 진동 중에서 가장 중요하고 기본적인 진동이다.

진동의 운동은 주기적으로 반복되는데 그 운동의 반복에 의한 시간을 주기라 부른다. 또한 1주기가 완결하는 운동을 Cycle이라 하고 1초간에 반복되는 Cycle수를 진동수 또는 주파수라 한다. 주기는 초(sec) 등의 시간으로 나타내고 진동수는 Cycle(c/sec) 또는 Hz로 나타낸다. 진동수(f)와 주기(T)사이에는 식(2.2)의 관계가 있다.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

전술한 정현진동의 경우 어느 시간 t_1 으로 부터 $2\pi/\omega$ 만 경과하면 변위 x 는 식(2.3)으로 되며 시간 t_1 의 변위는 완전히 동일한 위치에 되돌아오기 때문에 주기(T)는 식(2.4)로 되고 또 진동수(f)는 식(2.5)로 된다.

$$\begin{aligned} x &= X \sin\left[\omega\left(t_1 + \frac{2\pi}{\omega}\right)\right] & (2.3) \\ &= X \sin(\omega t_1 + 2\pi + \phi) \\ &= \sin(\omega t_1 + \phi) \end{aligned}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.4)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.5)$$

따라서 ω 는 2π 시간 사이에 x 가 몇 회 동일한 상태로 되돌아오는가를 나타내는 횟수를 나타내며 단진동수 또는 각진동수라 부른다. 시간적으로 변화하는 진동현상을 표현하는 데는 변위 외에 속도와 가속도가 있다. 속도는 변위의 시간에 대한 변화의 비율이고, 가속도는 속도의 시간적 변화의 비율이다. 따라서 속도 v 는 변위 x 를 시간 t 로 미분해서 얻어진다. 정현진동의 경우는 식(2.1)에 의해 식(2.6)과 같이 된다.

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega X \cos(\omega t + \phi) = \omega X \sin\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.6)$$

ωX 는 이때의 최대치로 속도진폭이라 부른다. 또 가속도 a 는 속도 v 를 시간 t 로 미분하여 얻어지는데 식(2.6)에 의해 식(2.7)과 같이 되며 $\omega^2 X$ 는 가속도진폭이라 부른다.

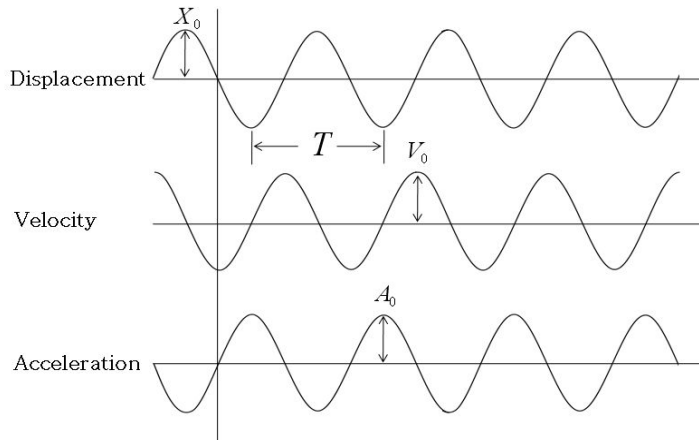
$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{dv}{dt} = -\omega^2 X \sin(\omega t + \phi) \\ &= \omega^2 X \sin(\omega t + \phi + \pi) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Figure 2.3은 Figure 2.3에서 정현진동의 경우 변위, 속도 및 가속도의 파형을 나타낸다. 위상각 ϕ 는 0의 경우이다. 알 수 있듯이 속도의 파형은 변위의 파형에 비해 90° 진행해 있다. 이것을 위상이 90° 나아갔다고 한다. 식(2.1)과 식(2.6)에 명확히 나타나 있다. 마찬가지로 가속도의 위상은 속도의 위상보다 90° 더 진행하고 있고 가속도의 위상은 변위의 위상보다 180° 진행하고 있음을 알 수 있다.

이들 변위, 속도, 가속도, 상호간의 진폭 및 위상에 관한 관계는 정현진동에 대해서만 성립하므로 비조화진동에서는 성립하지 않는다.

그런데 변위진폭, 속도진폭 및 가속도진폭의 값은 어느 순간에서 최대치(peak)가 되는데 진동에서는 이들을 진폭 자신으로 나타내어 실효치로 표현하는 경우가 많다. 실효치란 순간에 있어서 진동치를 자승하여 주기에 대하여 평균한 평방근이다. 상기의 정현진동의 경우 실효치 P_e 는 식(2.8)과 같다.

$$\begin{aligned} P_e &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [X \sin(\omega t + \phi)]^2 dt} \\ &= \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} [X \sin(\omega t + \phi)]^2 dt} \\ &= \frac{X}{\sqrt{2}} \doteq 0.707X \end{aligned} \quad (2.8)$$



X_0 : Displacement amplitude(cm) T : Period
 V_0 : Velocity amplitude(cm/s) f : Frequency = $1/T$
 A_0 : Acceleration amplitude(cm/s^2)

Figure 2.3 Harmonic oscillation

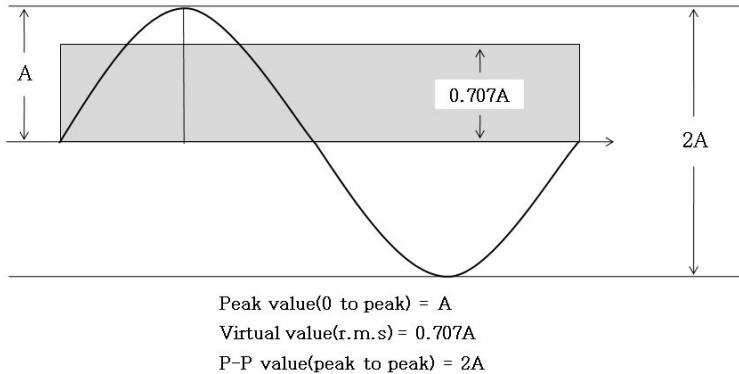


Figure 2.4 The size of sine wave vibration

주기적이 아닌 경우는 식(2.8)의 T 대신 적당한 시간의 길이를 취한다. 실효치의 물리적 의미는 예를 들면, 실효치 100V의 교류전압은 직류전압 100V의 효과와 같게 되는 최대치를 갖는 전압이라는 것과 마찬가지로 변동하는 진동량을 일정하게 연속된 효과로서 나타낸 값(Figure 2.4의 어두운 부분)이다.

진동의 크기를 나타낼 경우 Peak치(0 to Peak)나 실효치 외에 P-P치(Peak to Peak)가 있으며 Figure 2.4에 정현진동의 경우 그들 관계를 나타낸 것이다. 이들은

변위, 속도, 가속도의 어느 것에 대해서도 같은 관계가 된다.

2.1.2 진동량의 표현

진동의 강도 또는 크기는 지금까지 서술한 바와 같이 변위, 속도, 가속도로 나타내고 그 단위로 변위는 cm, 속도는 cm/sec, 가속도는 cm/sec²(gal) 등이 사용되고 있으나 취급하는 진동의 크기에 따라 편의상 Table 2.1에 나타내는 각종 단위들도 사용된다.

Table 2.1 Unit of vibration

Classification	Basic unit	The others
Displacement	cm	$\mu=10^{-3}\text{mm}=10^{-4}\text{cm}$ $\text{mm}=10^{-1}\text{cm}$ $\text{m}=10^2\text{cm}$
Velocity	cm/sec	$\text{mm/sec}=10^{-1}\text{cm/sec}$ $\text{Kine}=1\text{cm/sec}$ $\text{m/sec}=10^2\text{cm/sec}$
Acceleration	cm/sec ² (gal)	$\text{gal}=1\text{cm/sec}^2$ $\text{g}=980\text{cm/sec}^2 \doteq 1,000\text{gal}$ $\text{m/sec}^2=10^2\text{cm/sec}^2$

정현진동의 경우 식(2.1), (2.6), (2.7)에서 알 수 있는 바와 같이 변위, 속도, 가속도 각각의 진폭과 진동수와의 사이에는 식(2.9), (2.10)과 같은 관계가 있다.

$$\text{속도 진폭} \quad V = \omega X = 2\pi f X \quad (2.9)$$

$$\text{가속도 진폭} \quad A = \omega V = (2\pi f)^2 X \quad (2.10)$$

따라서 변위, 속도, 가속도의 각 진폭을 상호 환산할 수 있다.

2.2 진동의 영향

2.2.1 발파진동의 전파

암반 중으로 전달되는 탄성파는 입체파(물체파:body wave)인 종파(압축파, 1차 파, P파)와 횡파(전단파, 2차파, S파) 그리고 표면파(surface wave)로 나뉜다. 이러한 탄성파가 암반 중을 전파하면서 지반진동을 일으키게 되는데 한 점에서 지면의 운동은 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다. 이와 같은 지반진동은 변위(displacement), 속도(particle velocity), 가속도(acceleration)의 3종류로 표시되고 있다.

지반진동의 측정은 그 방향에 따라 Figure 3.5와 같이 수직성분(vertical), 진행성분(longitudinal 혹은 radial) 그리고 이 두 파의 방향과 직각을 이루는 접선성분(transverse)의 세 방향으로 이루어진다.

진동의 측정 시 주로 종파는 진행성분, 횡파는 접선성분, 표면파는 수직성분으로 측정된다.

이 세 가지 요소의 상대적 크기는 암반, 지형 및 충격원 등에 의하여 생성된 탄성파들의 상호 간섭에 따라 변한다.

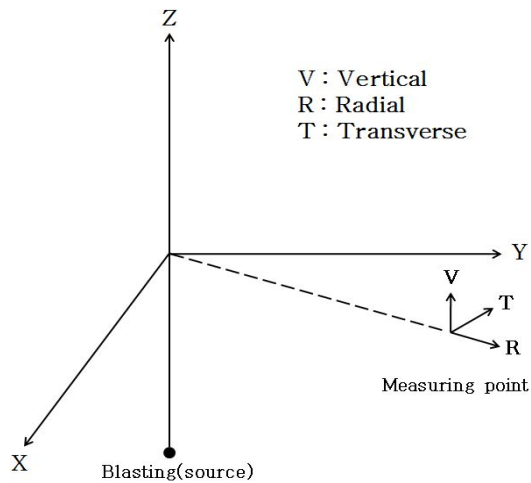


Figure 2.5 Measuring direction of ground vibration

한편 발파에 의한 지반진동을 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 보면 변위(D), 변위속도(V), 가속도(A)의 표시법 사이에는 식(2.11)과 식(2.12)와 같은 관계가 성립한다.

$$V = 2\pi f D \quad (2.11)$$

$$A = 2\pi f V \quad (2.12)$$

여기서, D = 변위(최대진폭)

V = 최대속도(peak particle velocity : 변위속도)

A = 가속도

f = 최대 진폭에서의 진동주파수

2.2.2 진동이 건물에 미치는 영향

건물에 대한 진동평가에 있어 가진원의 특성, 지반전달특성 및 건물의 응답특성에 따라 피해정도가 다르며 이러한 요인들은 서로 연관되어 많은 변수를 초래하기 때문에 정확한 평가가 어려워진다. 현재 건물진동 피해에 대한 국제표준화기구(ISO)의 규격이 존재하지 않고 일반적으로 독일규격(DIN-4150, 1986 진동에 대한 구조물의 영향)이 널리 통용되고 있다. 이 기준은 건물의 기둥이나 보 등의 변형률에 기인하는 진동속도에 의해 건물 구조별 해당 건물의 기초와 최상층의 주파수대역별 허용진동속도(mm/s)를 정의하여 정상진동과 충격에 대해 평가한다.

Table 2.2는 DIN 4150에 대한 내용으로서 구조물을 사용목적별(상업용, 산업용, 주거용)로 구분하고 가진원에서 발생하는 진동형태에 따라 해당 건물의 기초와 최상층 평면에 영향을 줄 수 있는 진동속도에 대한 지침이다. 단층 콘크리트 구조의 민가, 단층 시멘트 블록조 민가 및 2층 보강 콘크리트 구조물에 대한 가옥의 응답 주파수를 고찰(양형식, 1994)한 결과, 약 10~20Hz에서 최대 진동수가 발생하고 있으므로 주거용 건물 같은 경우 Table 2.2에서와 같이 약 0.5~1.5cm/sec 이하로 제어발파 하는 것이 바람직하다. 단, 본 지침값은 공진 주파수대역이나 피로에 의한 손실이 예상되는 주파수 대역에서는 유효하지 않다.

Table 2.2 A permission vibration velocity basis by a building kind

Line	Building kind	Permission vibration velocity (cm/s)			
		Building basis			Highest floor
		~10Hz	10~50Hz	50~100Hz	Mixture-Freq.
1	Commerce or an industrial building	2	2 ~ 4	4 ~ 5	4
2	Dwelling building	0.5	0.5 ~ 1.5	1.5~2	1.5
3	Building that is sensitive to vibration	0.3	0.3 ~ 0.8	0.8~1	0.8

2.2.3 진동이 인체에 미치는 영향

진동의 경우 인체 감각기관이 전신에 분포하기 때문에 전신 어디에나 진동이 전달되더라도 진동감각을 일으키고 또한 직접 인체 장기 조직에 물리적 영향을 줄 수 있다. Table 2.3은 진동 발생원에 대한 지면 진동측정을 통해 주민의 피해감(생리적영향, 수면영향, 주민의 반응)을 평가한 것으로, 이 기준에 따르면 통상 1~90 Hz의 진동수 범위 내에서 진동레벨이 60dB정도면 인간이 감지를 느끼기 시작하며, 65~69dB정도에서 수면장애를 일으키고, 80dB이상에서 물리적인 피해를 일으킨다. 또한 90dB이상이면 혈압상승 등 인체생리기능에 영향을 미치기 시작한다.

Table 2.3 Influence of vibration regarding man

구분	생리적 영향	수면영향	주민반응
90dB	인체에 생리적 영향 약간 미칩		
	직장에서 8시간 작업시 능률감퇴		잘 느낀다는 율 -50%
80dB		수면심도2의 경우 전부 느낌	물적피해 있음
70dB	경진		잘 느낀다는 율 -40%
60dB		수면심도2의 때 느끼는 경우가 많음	잘 느낀다는 율 -30%
		수면심도1의 경우 과반수가 느낌	
50dB	미진	수면심도1의 경우 전부 느낌	
			약간 느낀다는 율 -50%
	진동을 느끼기 시작 무감	수면영향이 거의 없음	주택내부진동의 감각한계

2.2.4 발파의 진동에 의한 암석파쇄이론

발파에 의한 암반 파쇄 현상의 이론적 규명은 발파 기구의 복잡성에 기인하여 아직까지 완전히 규명되지 못했다. 그러나 다음과 같은 이론들이 일반적으로 받아들여지고 있으며 이러한 기존의 이론들에 새로운 해석들이 추가, 수정되고 있다.

(1) Crater

가장 전통적인 이론으로 장약량, 최소저항선등의 인자들 간의 관계를 crater 발파에서의 경험에 의해 규명한 경험 이론이다. 최소저항선을 이용하여 장약량을 결정하고 전색 길이(stemming length), 발파공간의 거리(spacing) 등을 계산하여 표준 발파의 장약량을 산출한다. Crater 발파는 발파공과 수직한 방향으로 한 개의 자유면을 지니고, 파쇄 결과 원추형의 Crater를 형성한다(Chiappetta et al., 1983; Pit Slope Manual, 1977).

(2) 기체 팽창

발파에 의해 발파공에 작용하는 압력은 기체 팽창에 의한 가스압의 절반 정도의 크기이며, 충격파의 형태로 주변 암반에 전달된다. 충격파에 의한 분쇄대는 발파공 반경의 약 2배 거리까지 형성되고, 그 이후 방향성이 나타나는 몇 개의 방사상 균열이 형성된다. 충격파가 자유면에 도달하면 균열들에 가스압이 작용하여 균열이 성장하며, 이러한 균열의 성장이 자유면에 이르면 암석은 그때까지 남아 있는 가스압에 의한 변위가 발생한다.

화약의 폭발에 의해 발생한 에너지는 폭굉압과 가스압의 두 가지 형태로 암반에 역학적인 일을 수행한다. 폭굉압은 발파공에 인접한 좁은 지역에 국부적이고 한정적으로 작용하며 짧은 시간 동안 작용하기 때문에 주된 파쇄는 가스압에 의해 이루어진다. 압축응력을 받은 후, 인장응력에 의해서 공의 주위에서 부터 균열이 형성되며, 균열 침단에 변형에너지(strain energy)가 가해지는 동안 계속해서 균열은 성장하게 된다. 이 때, 자유면에서의 변형에너지 반사에 의한 파쇄는 고려하지 않

는다. 그리고 가스압에 의해 압열 파쇄(flexural rupture)가 일어나고 이것에 의해 저항선(burden)의 휨변형(bending)이 나타난다(Persson, et al., 1970; Ash, 1973; Johansson, et al., 1970).

(3) 반사파

반사 응력파에 의한 암석 파쇄의 용이성은 인장강도와 압축강도를 사용하여 나타내는데, 그 비를 파쇄용이 계수(blastability coefficient)라 한다. 암석은 인장력에 약하므로 파쇄용이 계수가 클수록 파쇄가 쉽게 된다. 파쇄용이 계수는 10에서 100 사이의 값을 지닌다. 반사파 이론은 암반이 인장 파쇄에 약하기에 주된 에너지를 자유면에서 반사된 인장파로 보고 암반의 응력 상태와 파괴조건식을 비교하여 설명하는 이론이다. 발파공에 인접한 지역에서는 압축응력파에 의한 파쇄가, 바깥 지역은 인장응력파에 의한 파쇄가 주로 이루어진다. 이 이론에 의하면, 폭굉파가 자유면이나 물리적인 성질이 다른 매질 경계에 도달하면 암반에 강한 충격을 주고 그 결과 새로운 응력파가 발생하여 내부로 전달되어 암석이 판의 형태로 파쇄(spalling, scabbing or slabbing)되고 또다시 새로운 자유면이 형성되는 과정이 반복하여 일어난다고 파쇄 기구를 정의한다(Obert, et al., 1949, 1950; Hino, 1956; Duvall, et al., 1957).

(4) 충격파와 가스압

Kutter and Fairhurst(1971)는 충격파와 가스압 중 하나를 파쇄기구의 주된 에너지원으로 설명하는 기존의 이론에 대해 파쇄는 두 가지 에너지원의 복합적인 작용으로 이루어진다고 실험에 의해 밝혔다. 이 이론에 의하면 짧은 시간에 막대한 크기로 생성된 폭굉파는 주변 매질로 전달되나, 그 지속 시간이 비교적 긴 가스압이 준정적거동 상태를 유지하며 이미 형성된 균열을 확장, 전진시킨다는 것이다.

이외에도 Torque theory(Atlas Powder Company, 1987), Nuclei theory(Barker, et al., 1978; Winzer, et al., 1983; Fourney, et al., 1979; Adams, et al., 1983; McHugh, 1983)등의 파쇄기구 설명 이론이 있으나 일반적으로 충격파가 균열을 형성하고 가스압이 균열을 확장, 전진시킨다는 것이 일반적으로 받아들여지고 있다.

Table 2.2는 전체 에너지 중에서 충격파가 차지하는 비를 나타내며, 약 15% 내외이다. 또한 가스압이 20~40%이며 그 이외의 에너지는 비역학적인 일로 손실된 에너지이다.

Table 2.4 The shock wave value of total energy

Researcher	Percentage of shock wave
Langefors	5-15%
Fogelson	9%
Kutter & Fairhurst	10-18%(granite)
	2-4%(sandstone)
Konya & Walter	15%

2.3 파동의 전파 이론

짧은 지속시간을 갖는 충격파가 탄성 공간의 표면 어느 지점에서 발생하면 입체파는 Figure 2.5와 같이 반원형의 파면을 그리면서 전파된다. 충격지점으로부터 일정한 거리에 떨어진 지점에서는 전달된 파동에 의해 수직 변위가 지표에서 발생한다. 이때 종파가 가장 빠른 전달속도를 가지므로 가장 먼저 도달하고, 다음이 횡파, Rayleigh파의 순서로 도달하게 되며, 이것을 그림으로 표현하면 Figure 2.6과 같다.

지반운동에 관한 문제는 지반을 전파하는 파동문제에 귀착되며 자연의 지반은 정적인 큰 힘에 대해서 소성체로써의 성질을 나타내지만 변화하는 속도가 빠른 동적인 미소변위에 대해서는 탄성체의 성질을 나타낸다. 그러므로 지반을 반무한 탄성체로 간주할 경우 종파, 횡파, Rayleigh파 등의 파가 존재하고 각각의 성질은 다음과 같다.

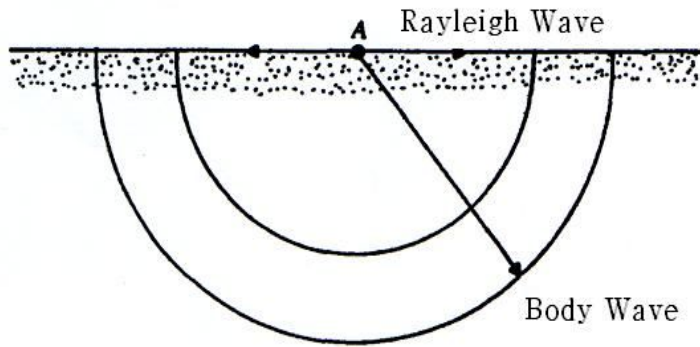


Figure 2.6 Body wave and Rayleigh wave

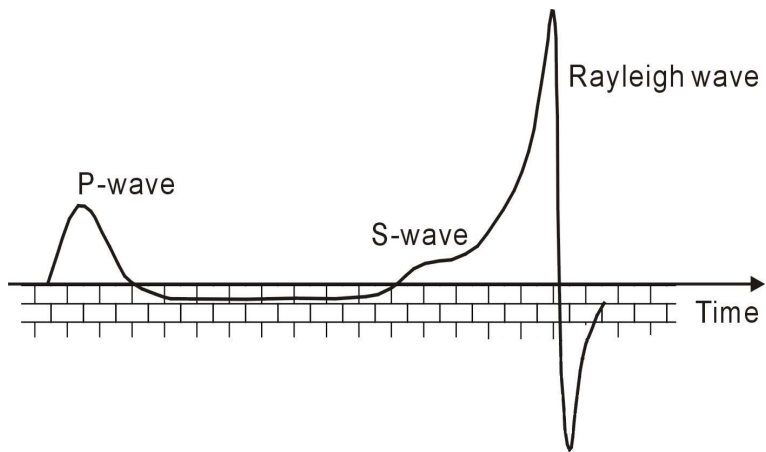


Figure 2.7 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period

2.3.1 종파와 횡파의 전파

Figure 2.7은 지중 미소부분에 관한 응력과 관성력과의 평형상태를 보여주며, 이들 관계로부터 각 방향에 대하여 다음과 같이 식(2.11), (2.12), (2.13)을 각각 얻을 수 있다.

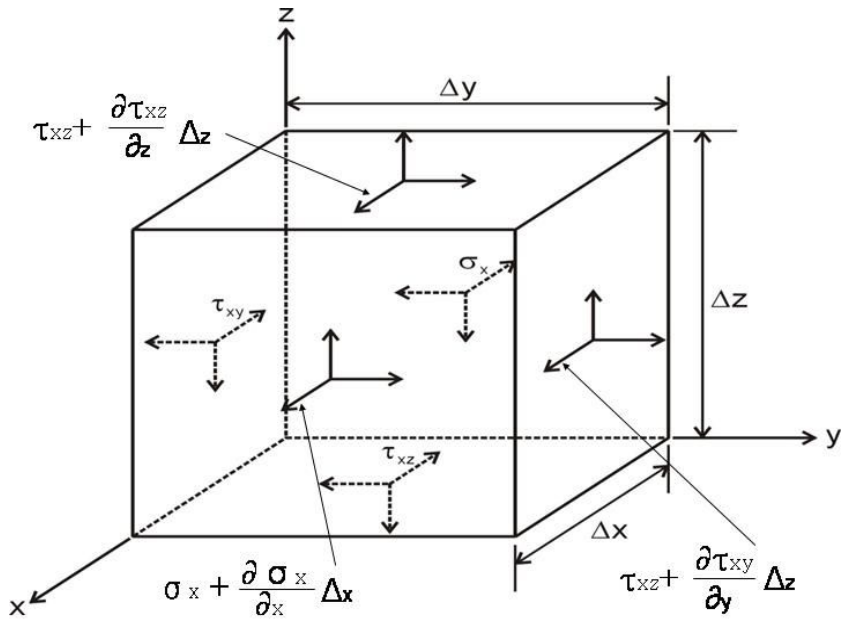


Figure 2.8 Stress on a small element of an infinite elastic medium

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zy}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

여기서 u , v , w 는 각각 x , y , z 방향의 변위 이고, σ_x , σ_y , σ_z 및 τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} , τ_{zy} 는 각각 x , y , z 방향의 축응력 및 전단응력이고 ρ 는 매체의 밀도 이다.

다음 식(2.16), (2.17), (2.18), (2.19), (2.20), (2.21)은 x , y , z 각 방향에 대한 수직 응력 및 전단응력을 탄성론(James and William, 1991)에 근거한 응력-변형을 관계를 나타낸다.

$$\sigma_x = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.16)$$

$$\sigma_y = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.17)$$

$$\sigma_z = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.18)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.19)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.20)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.21)$$

μ 는 전단 계수, λ 는 Lamé상수로서 식(2.22)과 (2.23)로 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.22)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.23)$$

여기서,

ν = Poisson's ratio

μ = Shear modulus(G)

E = Young's modulus

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.24)$$

탄성론의 관계식을 대입하여 정리하면 식(2.25), (2.26), (2.27), (2.28)을 얻을 수 있으며 이들은 등방성 무한탄성체의 운동방정식을 나타낸다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2.25)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (2.26)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (2.27)$$

여기서,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.28)$$

식(2.25), (2.26), (2.27)을 각각 x, y, z 에 대해 미분하고 이들 세 개의 식을 합하면 식(2.29)과 식(2.30)과 같다.

$$\rho \frac{\partial^2 \nabla}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Delta \quad (2.29)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.30)$$

식(2.30)을 다른 방법으로 표현하면 식(2.31)과 같다.

$$V_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{E}{\rho}} \quad (2.31)$$

식(2.31)에 의해 식(2.29)은 식(2.32)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = V_p^2 \left(\frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta}{\partial z^2} \right) \quad (2.32)$$

식(2.32)은 파동 방정식의 형태가 된다. 즉 체적 변화가 속도 V_p 로 전파하는 것을 의미 한다. 이것이 종파의 전파이다.

식 (2.25), (2.26), (2.27)에서 Δ 을 소거하면

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.33)$$

로 되고, 탄성론에 의해 x, y, z 축 주위의 회전각을 각각 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 에 대하여 정리 하면

$$\theta_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.34)$$

$$\theta_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.35)$$

$$\theta_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.36)$$

의 관계가 있고 식(2.33)에 의해 식(2.37), (2.38), (2.39)을 각각 얻을 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \theta_x \quad (2.37)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{E}{\rho}}$$

$$\rho \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \theta_y \quad (2.38)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \theta_x \quad (2.39)$$

여기서,

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.40)$$

식(2.38)에 의해서 식(2.41), (2.42), (2.43)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} = V_s^2 \left(\frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial z^2} \right) \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_y}{\partial t^2} = V_s^2 \left(\frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial z^2} \right) \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_z}{\partial t^2} = V_s^2 \left(\frac{\partial^2 \theta_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_z}{\partial z^2} \right) \quad (2.43)$$

식(2.41), (2.42), (2.43)은 파동방정식의 형태이며 즉, x, y, z축 주위의 회전 θ_x , θ_y , θ_z 가 속도 V_s 로 전파하는 것을 의미하며 횡파의 전파이다.

2.3.2 Rayleigh파의 전파

자유지표면을 가지고 있는 무한체에서 지표면 부근에만 존재하는 파동이 Rayleigh파이다. Figure 2.8에서 x, y 축을 포함한 면을 자유지표면으로서 그 원점을 $z=0$ 이라 한다. 이 경우의 운동방정식은 식(2.23), (2.24), (2.25)를 각각 적용한다.

평면파가 x 방향으로 전파할 경우 각 점의 변위는 y 축 방향에 무관하게 된다. x 및 z 방향의 변위 u 및 w 는 2개의 포텐셜(potential)함수 Φ 및 ϕ 에 의해 식(2.44)와 식(2.45)으로 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.44)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.45)$$

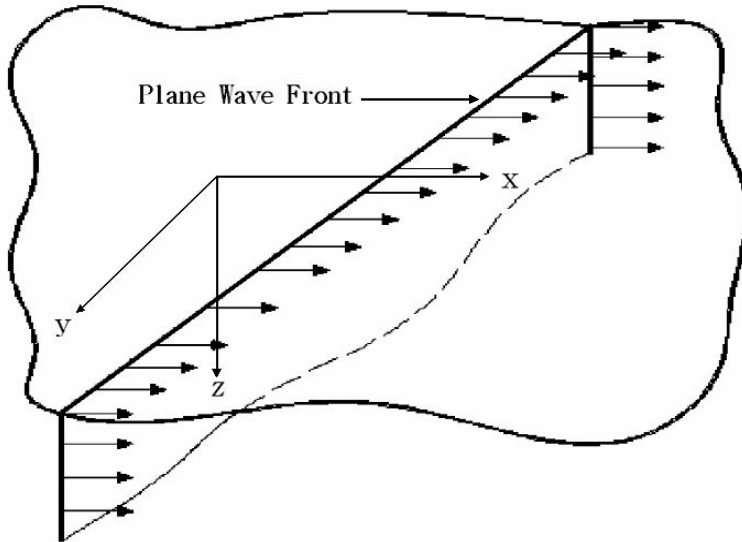


Figure 2.9 Coordinate convention for elastic half-space

체적변화 Δ 는 식(2.46)과 같고 y 축에 관한 회전각 θ_y 는 식(2.47)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = \nabla^2 \Phi\end{aligned}\quad (2.46)$$

$$\begin{aligned}\theta_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right\} \\ &= \frac{1}{2} \nabla^2 \phi\end{aligned}\quad (2.47)$$

식(2.44)와 식(2.45)의 u, w 는 식(2.25), (2.26), (2.27)에 의해 식(2.48)과 식(2.49)이 된다.

$$\begin{aligned}&\rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) \\ &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \Phi) + \mu \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \phi)\end{aligned}\quad (2.48)$$

$$\begin{aligned}&\rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right) - \rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) \\ &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Phi) - \mu \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \phi)\end{aligned}\quad (2.49)$$

또한 식(2.48)과 식(2.49)은 포텐셜(potential) 함수 Φ 및 ϕ 가 다음 관계에 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \Phi = V_p^2 \nabla^2 \Phi \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \phi = V_s^2 \nabla^2 \phi \quad (2.51)$$

식(2.52)과 식(2.53)은 식(2.50)과 식(2.51)의 해로서 x방향에 전파되는 조화파형 연속파동을 가정하여 나타낸 것이다.

$$\Phi = F(z)\exp[i(\omega t - Nx)] \quad (2.52)$$

$$\phi = G(z)\exp[i(\omega t - Nx)] \quad (2.53)$$

여기서, F(z) 및 G(z)는 깊이 방향의 진폭분포를 나타내고 N은 파장을 L로써 정리하면 식(2.54)와 식(2.55)같이 다시 쓸 수 있다.

$$N = \frac{2\pi}{L} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} & 16 \left(1 - \frac{\omega^2}{V_p^2 N^2}\right) \left(1 - \frac{w^2}{V_s^2 N^2}\right) \\ & = \left\{2 - \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}\right) \left(\frac{w^2}{V_p^2 N^2}\right)\right\}^2 \left(2 - \frac{w^2}{V_s^2 N^2}\right)^2 \end{aligned} \quad (2.55)$$

식(2.55)에 의해 만들어진 파의 파장을 L_R , 파동속도를 V_R 이라 하면 식 (2.54)의 정의에 의해서 식(2.56)로 표현할 수 있다.

$$N = \frac{2\pi}{L_R} = \frac{2\pi f}{V_R} = \frac{w}{V_R} \quad (2.56)$$

여기서,

$$\frac{V_R}{V_s} = K \quad (2.57)$$

$$\frac{\lambda + 2\mu}{\mu} = \frac{1}{\alpha^2} = \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu} \quad (2.58)$$

로 놓으면,

$$\frac{w^2}{V_s^2 N^2} = K^2 \quad (2.59)$$

$$\frac{w^2}{V_P^2 N^2} = \alpha^2 K^2 \quad (2.60)$$

$$K^6 - 8K^4 + (24 - 16\alpha^2)K^2 + 16(\alpha^2 - 1) = 0 \quad (2.61)$$

가 되며 식(2.53)에 의해 정리하면 식(2.59)가 얻어지고, 이 식은 K^2 에 관한 3차 방정식으로서 실근을 가진다. K 는 식(2.55)에 의해 정의되며 Rayleigh파의 전파속도 V_R 과 횡파의 전파속도 V_S 와의 비로 나타낸다.

R파에 의한 입자운동은 회귀성타원의 경로를 따르고, 전단방향의 변위가 없으므로 종파와 유사한 성질을 갖는다. P파, S파, R파의 운동모양은 폭발위치가 깊지 않거나 암반이 대단히 균질한 경우가 아니면 입체파는 보통 방출에너지의 절반 이하로 작게 나타나고 나머지는 암석의 표면이나 내부의 자유면을 따라 이동하는 표면파가 된다. 그러므로 지표 부근에서 실시한 발파작업에 의한 진동에는 입체파보다 표면파에 더 많은 에너지가 작용한다. 반면 진동을 측정하는 지점이 발파 지점에서 가까우면 이러한 모든 파는 구분되지 않고 합성되어 함께 복합파 형태로 나타난다. 특히 지하철 건설을 위한 터널굴착과 같은 도심지에서의 발파는 발파진동 문제를 야기하는 지점이 수십 미터 이내이며 여러 가지 파들이 도달하는 시간이 동시에 이루어지기 때문에 기록상으로 분별하기 어려운 단점이 있다.

2.3.3 진동속도의 예측

발파진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 여러 학자들에 의해서 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 발파진동의 측정 경험을 토대로 발파진동식을 제안하고 있으며 현재 국내외로 가장 많이 적용하고 있는 경험식은 다음과 같다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (2.62)$$

여기서,

- V : 진동속도(cm/sec)
- D : 폭원으로부터 측정 지점까지의 거리(m)
- W : 지발당 최대 장약량(kg)
- K : 자유면의 상태, 폭약의 종류, 암질 등에 따른 상수
- n : 감쇠지수
- b : 장약지수

식(2.13)에서 거리와 지발당 장약량의 관계로부터 D/W^b 를 환산거리(scaled distance, SD)라고 하며, b의 값이 1/2이면 자승근 환산거리(square root scaled distance), 1/3이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라고 한다.

지금까지 연구된 바에 의하면 발파진동은 주로 지발당장약량(kg)과 거리(m)에 의해 결정되고, 기타의 요인들은 지반의 성질이나 발파조건에 의해 결정된다. 따라서 발파설계를 위해서는 대상 지역에서의 시험발파를 통한 K, n 값을 정의하는 것이 매우 중요하며 K, n 값이 결정되고, 허용진동속도가 주어지면 발파진동식에서 폭원으로부터의 거리와 지발당 장약량과의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다. 한편 입지상수의 결정법은 식(2.14)을 이용하여 log-log scale로 좌표 상에 도시하였을 때 기울기(n)와 절편(logK)으로부터 결정한다.

$$\log V = \log K + n \log \left[\frac{D}{W^b} \right] \quad (2.63)$$

2.3.4 진동레벨의 예측

(1) 가속도레벨

진동의 크기를 나타내는 cm, mm/sec, cm/sec²라는 단위는 직선 척도에서 숫자로서는 쉽게 알 수 있지만 실제로는 알기 어려운 것도 있다. 또 인간의 감각에 관계되는 양은 그 양이 2배로 되어도 사람의 감각의 정도는 2배로 되지 않고 Weber·Fefiner의 법칙에 의하여 등차급수적으로 대응한다. 즉 대수척도에 대응한다. 이와 같은 사고로부터 음향 쪽에서는 일찍부터 대수척도인 dB(decibel)이 사용되어 왔다. 공해진동에서도 최초에는 속도의 Peak치로 규제하는 방법이 널리 사용되었으나 최근 dB이 우리 나라에서 공식으로 사용되게 되었다.

가속도 레벨은 진동가속도를 dB 단위로 나타낸 것으로서 다음 식으로 정의된다.

$$\text{가속도레벨} \quad L = 20\log_{10} \frac{A}{A_0} (dB) \quad (2.64)$$

여기서, A : 측정치의 가속도 실효치(m/sec²)
 A_0 : 기준치(10^{-5} m/sec²)

그 외에 속도, 변위에 대해서도 [식 3-11]과 같은 모양의 표시법으로서 속도에 대해서는 $20\log_{10}(v/v_0)$ ($v_0 = 10^{-6}$ kin), 변위에 대해서는 $20\log_{10}(d/d_0)$ ($d_0 = 10^{-11}$ m)로 나타낸다. 그런데 가속도 레벨은 대수 표시이기 때문에 가속도가 원래 가속도의 2배로 되어도 가속도 레벨은 2배로 되지 않고 가속도 레벨은 $20\log_{10}2 \doteq 6$ dB만 증가하게 된다.

(2) 진동레벨(보정가속도 레벨)

식(2.16)로 정의된 가속도 레벨은 인체감각 등에는 관계없이 물리량의 표시인데 진동이 인체 또는 건물 등에 미치는 영향은 진폭과 진동수에 의존하며 또 연직운동과 수평진동에서는 감지방법이 다르다. 그래서 ISO(국제표준화기구)의 인체의 진동에 대한 진동폭로기준에 의하여 전기의 가속도 레벨에 주파수에 의한 인간의 진동감각의 보정을 가한 것을 진동레벨(보정가속도 레벨)이라 한다.

연직방향에 대하여 진동레벨을 식으로 정의하면 식(2.16)에 있어서 A_0 를 다음과 같이 주파수마다 보정한 것으로 된다.

$$\begin{aligned} 1 \leq f \leq 4 & \quad A_0 = 2 \times 10^{-5} f^{-\frac{1}{2}} \text{ (m/sec}^2\text{)} \\ 4 \leq f \leq 8 & \quad A_0 = 10^{-5} \text{ (m/sec}^2\text{)} \\ 8 \leq f \leq 90 & \quad A_0 = 0.125 \times 10^{-5} f \text{ (m/sec}^2\text{)} \end{aligned} \quad (2.65)$$

여기서 예로서 인체감각의 하한치인 한계치를 진동레벨로서 계산하여 보면 다음과 같다. 즉 한계치는 연직진동의 4~8Hz 및 수평진동의 1~2Hz에 대하여 1gal (10^{-2}m/sec^2) 정도로서 아래와 같다.

$$20 \log_{10} \left(\frac{10^{-2}}{10^{-5}} \right) = 60 \text{ dB}$$

3. 현장실험

3.1 연구지역의 지형

조사지역은 선캠브리아기 변성암(변성퇴적암류 혹은 변성화성암류), 주라기퇴적암과 화강암류, 제 4 기 충적층으로 구성된다. 선캠브리아기 암석은 퇴적기원의 변성암인 흑운모편마암이 기반암을 형성하며, 미그마타이트질 편마암 이들을 관입한 화성기원의 잔류반상질(blasto-porphyritic) 화강편마암, 흑운모 화강편마암, 우백질 화강편마암, 엽리상 거정질화강암으로 구성된다. 변성퇴적암류는 흑운모 편마암, 석영 운모편암, 운모편암 등으로 구성되며, 석회암, 대리암, 석회규산 엽암을 포함하는 석회질 편암과 유백색 규암과 석영편암이 흑운모편마암 혹은 편암과 호층을 형성하거나 협재된다. 대부분의 흑운모편마암은 변성분화작용에 의하여 우백대와 우흑대로 구성된 호상구조가 잘 발달하며, 역적으로 다양한 양산의 암상으로 구성된다. 미그마타이트질 편마암은 이들 변성 퇴적암류가 미그마타이트화 작용을 받아 형성된 것으로 선캠브리아기 암석의 광역엽리의 주향방향과 유사한 북북동 남남서 방향으로 신장된 타원체형태로 분포한다. 야외조사에서 흑운모 편마암과 미그마타이트질 편마암은 변성작용 동안에 부분용융 된 화강암질 용체가 모암을 관입한 미그마타이트화 작용의 정도 여부에 따라서 구분하였다. 이들을 관입한 잔류반상질 화강편마암은 비교적 넓게 산출된다. 잔류반상질 화강편마암에는 다양한 크기의 정장석반정이 존재하며, 암체의 가장자리를 따라서 강한 전단작용이 집중되어 안구상 정장석반정을 갖는 안구상 편마암이 분포한다. 반면에 암체의 중심부에는 엽리의 발달 강도가 약하여 정장석반정이 자형혹은 반자형의 형태로 존재한다. 우백질 화강편마암은 흑운모편마암 마그마타이트질 편마암과 잔류반상질 화강편마암을 관입하고 있다. 엽리상 조립질 화강암은 석영과 장석의 함량이 우세하여 우백색을 띠며, 소량의 흑운모가 관찰된다. 엽리의 발달 강도는 다른 양체에 비하여 약하며, 야외 노두의 산출상태는 매우 불량하다. 주라기 화강암류는 각섬석, 흑운모, 화강암과 흑운모 화강암이 산출된다. 흑운모 화강암은 북한산을 구성하는 서울화강암의 북쪽 연장부에 속하며 험준한 산악지형을 형성한다. 이에 반하여 조사지역의 북동부 가장자리인 양주군 백석읍 일대의 평야지대에 넓게 분포하는 흑운모 화강암은

저지대를 형성한다. 이들은 동일한 화강암체임에도 불구하고 풍화 양상의 명확한 대비를 보여준다.

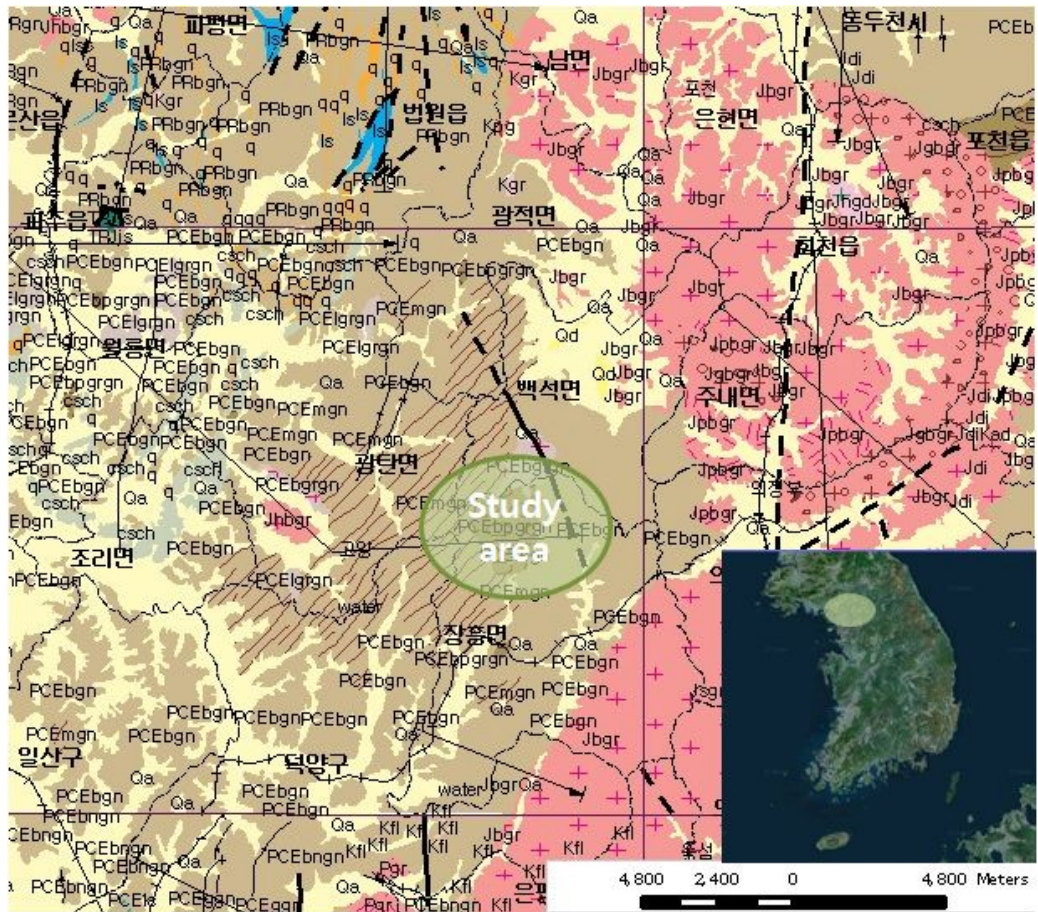


Figure 3.1 Study area in Songchoo country club blasting work



(a)



(b)

Figure 3.2 Field panorama. (a), (b) view of the field

3.2 실험방법

현장 내에서 구역별로 발파가 진행되었으며 발파 진동 발생원으로부터 거리별 진동레벨과 진동속도를 측정하였다. 다음 표는 총 8곳의 지역에서 발파가 진행되었으며 그에 대한 제원이다. 공당 장약량은 4Kg으로 동일하며 각 지역의 현장 상황으로 인해 공수 및 장약량, 발파횟수를 달리하여 실험이 진행되었다. 측정된 데이터 중에서 현장 내 다른 작업이나 장비의 진동간섭으로 인해 데이터의 결과에 영향을 미치거나 다른 값에 비해 다소 차이가 크게 나타난 데이터는 전체 자료에서 제외시켰다.

Table 3.1 Blasting conditions

Blast area	Blast hole	Charge (kg)	Blast number	Hole number	Charge per delay (kg/delay)
1 area	35	140	7	5	4
2 area	240	960	24	10	4
3 area	150	600	15	10	4
4 area	140	560	7	20	4
5 area	100	400	20	5	4
6 area	40	160	8	5	4
7 area	190	760	19	10	4
8 area	300	1200	30	10	4

3.2.1 측정기기

(1) 진동속도 계측기

발파진동 계측에 사용된 계측기는 Canada Instantel사 제품인 모델명 Blastmate-III로서 발파에 의한 3개 방향성분(Longitudinal, Transverse, Vertical)의 진동(Vibration)과 가속도(Acceleration) 및 주파수(Frequency)의 측정, 이력시간(Time) 기록, 그리고 최대 실 벡터 합(True vector sum)을 자동 산출하는 기기이다.

Table 3.2 Vibration velocity measuring instrument specification

Vibration	Min ~ Max Measuring range	0.127 ~ 254mm/sec
	Trigger Levels	0.13 ~ 254mm/sec steps of 0.01mm/sec
	Acceleration	0.01 ~ 30g's calculated
	Displacement	0.00254 ~ 38.1mm calculated
dB(L)	Measuring range	100 ~ 148 dB(L)
	Trigger Levels	100 ~ 148 in steps of 1 dB(L)
dB(A)	Measuring range	50 ~ 110dB
	Trigger Levels	50 ~ 110dB in steps of 0.1dB
Frequency	Samples	1,024 samples/second, all channel, all record types
	frequency response	Seismic and Linear Air 2 ~ 300Hz
Wave form record	Record Modes	Manual, Single Shot, Continuous, Auto
	Fixed Record Time	1 ~ 10 sec, selectable 1 sec
	Auto Record Time	1 ~ 100, 300, 500 sec

(2) 진동레벨 계측기

사람에게 미치는 피해정도를 계측하는 리온 진동 레벨계는 소음·진동공정시험 방법의 사용기준에 부합되는 진동공해 측정 장비 VM-52, VM-53(Rion, Japan)를 사용하였다. 측정 할 수 있는 종류는 Lv, Lva, Lx, Leq, Lmax, Lmin, Lmax를 계측 할 수 있으며 주파수 범위는 1~80Hz를 측정 할 수 있다. 또한 수직으로는 25~120dB 수평으로는 30~120dB 범위에서의 계측이 가능하며, 기기에 대한 제원은 Table 2.1과 같다.

Table 3.3 Vibration level measuring instrument specification

Measuring type	Lv, Lva, Lx, Leq, Lmax, Lmin & Max-HOLA
Frequency range	1 ~ 80Hz
Measuring range	Lv vertical 25 ~ 120dB, Horizontal and Lva 30 ~ 120dB
Continuous measurement range	70 dB
Measuring Temperature	-10 ~ +50℃
Measuring Humidity	90% RH
Size	측정기 본체 200×56×175mm, 센서 φ67×40.7mm
Weight	측정기 본체 1kg, 센서 335g
International authentication	JIS C 1510-1955
Characteristics	2종류의 LCD 화면, 환경진동의 comparator기능추가 1축/3축 측정 선택, Timer에 의한 저동계산 기능
Use	건설현장에서 발생하는 진동이 주변 구조물 그리고 사람에게 미치는 영향을 평가하고 발생하는 민원에 대처하기 위함.
Configuration	측정기 본체(1대), 측정 센서(1set), 설명서, 운반용케이스

3.2.2 측정방법

진동속도와 진동레벨을 측정하기 위하여 진동계측기인 BlastmateIII 3대와 진동레벨측정기인 리온 VM-53 3대를 사용하여 계측하였다. 계측기 설치시 발파가 진행되는 자유면에 반대방향으로 일직선상에 계측기를 설치하였으며 거리는 7m, 15m, 30m로 설정하였으나 현장여건과 지반상황을 고려하고 발파회당 발파위치가 변동함에 따라 계측거리는 30m이상으로 대부분 설치되었다.



Figure 3.3 Equipment for a measurement and measurement picture

3.3 실험결과

3.3.1 진동속도와 진동레벨 측정결과

계측기의 설치 장소는 일직선상에 측정점 A, B, C 구역으로 정하여 2, 3곳에서 진동레벨과 진동속도를 계측하였으며, 1회씩 발파가 끝날 때마다 다시 거리를 측정하였다. 측정된 거리는 1번째 구역에서 38~52m, 2번째 구역은 43~72m, 3번째 구역은 30~79m, 4번째 구역에서는 40~83m, 5번째 구역은 35~81m, 6번째 구역은 41~98m, 7번째 구역은 35~102m, 마지막으로 8번째 구역에서는 15~95m의 거리 내에서 계측을 실시하였다. 측정별로 거리를 계산하여 구분하였으며 BlastmateIII를 이용한 진동속도는 V, T, L 3가지 방향의 데이터를 이용하여 Max값을 이용한 PPV값을 산출하였다. 전 지역에 대해 진동레벨인 dB(V)와 진동속도인 PPV, PVS 값은 아래 Table 4.1~4.8과 같다.

Table 3.4 The measurement results local the first

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
1	A-1	42	0.749	0.775	0.533	0.775	72.2A	0.951	76.2
2	A-2	38	0.629	0.773	0.597	0.773	70.4A	0.849	77.2
3	A-3	38	1.130	1.300	1.040	1.300	73.4A	1.630	80.5
4	A-5	34	1.450	1.570	1.350	1.570	79.8A	1.850	80.8
5	A-6	30	1.460	1.240	0.991	1.460	77.2A	1.650	78.4
6	B-1	52	0.686	0.527	0.298	0.692	70.0A	0.692	72.0
7	B-2	52	0.491	0.397	0.202	0.529	71.8A	0.529	71.8
8	B-3	48	0.500	0.497	0.227	0.625	70.8A	0.625	74.2
9	B-5	44	0.838	1.170	0.572	1.310	77.4A	1.310	79.9
10	B-6	40	0.635	0.902	0.424	1.040	72.8A	1.040	75.5

Table 3.5 The measurement results local the second

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
1	A-1	62	0.235	0.281	0.232	0.281	65.2A	0.313	71.7
2	A-2	60	0.191	0.203	0.227	0.227	64.6A	0.260	69.9
3	A-3	60	0.319	0.537	0.640	0.640	68.8A	0.651	76.5
4	A-4	59	0.400	0.632	0.748	0.748	72.4A	0.759	76.7
5	A-5	59	0.235	0.568	0.483	0.568	65.4A	0.643	74.4
6	A-6	57	0.344	0.521	0.430	0.521	71.8A	0.549	75.8
7	A-7	57	0.254	0.316	0.359	0.359	69.4A	0.435	73.4
8	A-8	55	0.446	0.527	0.603	0.603	67.6A	0.784	75.8
9	A-9	55	0.541	0.605	0.551	0.605	72.2A	0.651	77.7
10	A-10	53	0.529	0.587	0.678	0.678	69.0A	0.921	75.0
11	A-11	53	0.271	0.252	0.414	0.414	66.6A	0.433	74.3
12	A-12	51	0.229	0.292	0.386	0.386	64.4A	0.489	70.4
13	A-13	51	0.603	0.725	0.776	0.776	73.4A	0.949	78.5
14	A-14	49	0.667	0.702	0.826	0.826	70.6A	1.140	74.9
15	A-15	49	0.400	0.198	0.386	0.400	68.6A	0.433	72.6
16	A-16	47	0.184	0.248	0.622	0.622	69.8A	0.632	72.6
17	A-17	48	0.264	0.325	0.364	0.364	69.2A	0.419	70.2
18	A-18	46	0.497	0.352	0.348	0.497	65.6A	0.567	71.2
19	A-19	46	0.338	0.371	0.530	0.530	67.4A	0.614	75.6
20	A-20	44	0.421	0.491	0.521	0.521	70.6A	0.745	74.4
21	A-21	44	0.457	0.392	0.787	0.787	73.0A	0.808	74.1
22	A-22	42	0.686	0.765	1.030	1.030	71.2A	1.270	78.2
23	A-23	42	0.776	0.621	0.778	0.778	70.6A	0.968	75.8
24	A-24	40	0.902	0.800	0.889	0.902	73.0A	1.290	77.3

Table 3.5 continued

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
25	B-1	72	0.241	0.295	0.310	0.310	66.0A	0.333	68.8
26	B-2	70	0.159	0.368	0.222	0.368	66.2A	0.375	69.3
27	B-3	70	0.297	0.579	0.498	0.579	66.4A	0.699	76.8
28	B-4	69	0.322	0.445	0.513	0.513	68.0A	0.581	73.8
29	B-5	69	0.256	0.329	0.691	0.691	65.6A	0.802	72.2
30	B-6	67	0.273	0.403	0.424	0.424	66.4A	0.470	73.4
31	B-7	67	0.357	0.227	0.362	0.362	65.8A	0.514	68.1
32	B-8	65	0.394	0.465	0.654	0.654	65.4A	0.673	74.1
33	B-9	65	0.314	0.664	0.638	0.664	71.4A	0.681	76.3
34	B-10	63	0.332	0.348	0.481	0.481	67.6A	0.498	72.0
35	B-13	61	0.457	0.584	0.902	0.902	70.4A	1.000	76.9
36	B-14	59	0.608	0.727	0.686	0.727	66.0A	0.768	77.3
37	B-15	59	0.295	0.400	0.373	0.400	65.0A	0.511	74.9
38	B-16	57	0.244	0.362	0.468	0.468	66.0A	0.494	70.7
39	B-17	58	0.200	0.248	0.411	0.411	65.0A	0.419	70.0
40	B-18	56	0.506	0.405	0.484	0.506	64.8A	0.529	74.5
41	B-19	56	0.233	0.681	0.632	0.681	64.8A	0.697	76.0
42	B-20	54	0.403	0.513	0.418	0.513	64.6A	0.573	76.5
43	B-21	54	0.416	0.581	0.600	0.600	66.2A	0.627	76.3
44	B-22	52	0.584	0.764	0.756	0.764	66.8A	0.987	79.4
45	B-23	52	0.606	0.548	0.468	0.606	68.6A	0.687	77.5
46	B-24	50	0.630	0.748	0.460	0.748	70.4A	0.783	79.4

Table 3.6 The measurement results local the third

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
1	A-1	49	0.097	0.160	0.170	0.170	64.0A	0.200	66.9
2	A-2	48	0.181	0.249	0.340	0.340	68.2A	0.378	75.2
3	A-3	46	0.179	0.241	0.341	0.341	70.2A	0.344	73.4
4	A-4	45	0.213	0.278	0.394	0.394	68.6A	0.413	75.0
5	A-5	43	0.284	0.343	0.549	0.549	69.2A	0.595	75.4
6	A-6	42	0.191	0.256	0.381	0.381	70.8A	0.406	72.5
7	A-7	40	0.292	0.287	0.570	0.570	72.0A	0.579	74.4
8	A-8	39	0.238	0.305	0.567	0.567	68.2A	0.573	73.1
9	A-9	37	0.373	0.786	0.778	0.786	72.2A	0.879	76.0
10	A-10	36	0.368	0.470	0.800	0.800	77.0A	0.884	73.8
11	A-11	34	0.622	0.737	0.794	0.794	77.0A	0.943	77.4
12	A-12	33	0.572	0.800	1.330	1.330	77.8A	1.570	82.2
13	A-13	31	0.711	0.765	1.140	1.140	76.6A	1.240	78.7
14	A-14	30	0.978	0.965	1.160	1.160	76.8A	1.440	80.2
15	B-1	79	0.100	0.033	0.095	0.224	54.2A	0.240	70.3
16	B-3	76	0.541	0.203	0.329	0.168	55.4A	0.210	70.0
17	B-4	75	0.467	0.298	0.441	0.257	58.4A	0.300	68.0
18	B-5	73	0.257	0.310	0.387	0.254	58.8A	0.310	68.8
19	B-6	72	0.492	0.414	0.346	0.187	61.0A	0.200	67.0
20	B-7	70	0.398	0.386	0.365	0.243	63.0A	0.340	68.9
21	B-8	69	0.419	0.306	0.270	0.222	58.8A	0.250	66.8
22	B-9	67	0.418	0.430	0.252	0.516	64.0A	0.530	71.6
23	B-10	66	0.276	0.249	0.251	0.316	59.8A	0.320	71.1
24	B-11	64	0.533	0.498	0.540	0.478	65.8A	0.540	72.2
25	B-12	63	0.471	0.391	0.424	0.546	62.4A	0.610	75.7
26	B-13	61	0.668	0.529	0.518	0.329	70.2A	0.410	74.1
27	B-14	60	0.562	0.579	0.575	0.519	69.4A	0.550	76.4

Table 3.7 The measurement results local the fourth

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
1	A-1	40	0.772	0.010	0.738	0.772	71.2A	0.779	75.7
2	A-2	44	0.776	0.708	0.429	0.776	69.4A	0.813	77.2
3	A-3	47	0.545	0.784	0.591	0.784	71.6A	0.935	77.7
4	A-4	52	0.618	0.764	0.637	0.764	71.6A	0.854	76.3
5	A-5	56	0.659	0.781	0.595	0.781	70.2A	0.960	76.3
6	A-6	60	0.794	0.765	0.691	0.794	72.2A	1.150	79.2
7	A-7	65	0.940	1.270	1.180	1.270	73.0A	1.680	82.6
8	B-1	58	0.686	0.864	1.170	1.170	68.0A	1.350	80.5
9	B-2	62	0.494	0.773	0.789	0.789	66.4A	0.887	75.4
10	B-3	65	0.559	0.902	1.000	1.000	66.6A	1.180	78.1
11	B-4	70	0.508	0.762	0.953	0.953	69.2A	1.140	77.1
12	B-5	74	0.443	0.776	0.586	0.776	68.8A	0.867	74.4
13	B-6	78	0.660	0.791	0.724	0.791	66.2A	0.848	75.0
14	B-7	83	0.576	0.789	0.991	0.991	68.6A	1.120	77.4

Table 3.8 The measurement results local the fifth

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
1	A-1	61	0.230	0.495	0.300	0.495	63.8A	0.513	67.2
2	A-2	59	0.425	0.635	0.503	0.635	65.6A	0.668	72.9
3	A-3	57	0.267	0.273	0.421	0.421	66.2A	0.451	70.1
4	A-4	55	0.413	0.606	0.714	0.714	69.4A	0.783	73.3
5	A-5	53	0.529	0.587	0.556	0.587	65.0A	0.751	71.1
6	A-6	52	0.745	0.773	0.475	0.773	66.2A	0.816	75.4
7	A-7	50	0.678	0.572	0.340	0.678	66.6A	0.719	72.6
8	A-8	48	0.525	0.411	0.349	0.525	66.6A	0.532	71.5
9	A-9	46	0.965	0.953	0.308	0.965	67.8A	1.070	75.4
10	A-10	44	0.406	0.725	0.516	0.725	67.8A	0.810	73.8
11	A-11	42	0.630	0.729	0.497	0.729	66.4A	0.759	74.9
12	A-12	41	0.927	1.160	0.545	1.160	71.2A	1.210	78.8
13	A-13	37	0.594	0.714	0.576	0.714	68.8A	0.921	79.8
14	A-14	35	0.686	1.190	0.575	1.190	71.0A	1.190	80.4
15	A-16	52	0.419	0.484	0.389	0.484	63.4A	0.505	68.9
16	A-17	46	0.470	0.775	0.646	0.775	66.8A	0.813	74.2
17	A-18	41	0.541	0.775	0.648	0.775	68.0A	1.010	76.2
18	A-19	35	0.527	0.775	0.521	0.775	68.4A	0.930	77.8
19	B-1	81	0.159	0.005	0.249	0.249	70.0A	0.254	67.2
20	B-2	79	0.356	0.268	0.473	0.473	72.2A	0.483	72.9
21	B-3	77	0.222	0.130	0.294	0.294	74.4A	0.305	70.1
22	B-4	75	0.291	0.216	0.411	0.411	77.8A	0.438	73.3
23	B-5	73	0.262	0.184	0.445	0.445	69.0A	0.456	71.1
24	B-6	71	0.337	0.225	0.584	0.584	73.8A	0.586	75.4
25	B-7	70	0.260	0.202	0.354	0.354	73.8A	0.403	72.6
26	B-8	68	0.189	0.216	0.210	0.216	74.0A	0.267	71.5
27	B-9	66	0.508	0.251	0.530	0.530	75.4A	0.705	75.4
28	B-10	64	0.325	0.249	0.518	0.518	77.4A	0.556	73.8
29	B-11	62	0.306	0.283	0.452	0.452	75.2A	0.489	74.9
30	B-12	60	0.681	0.421	0.722	0.722	77.4A	0.826	78.8
31	B-13	57	0.368	0.543	0.503	0.543	82.0A	0.703	79.8
32	B-14	55	1.120	0.432	0.991	1.120	78.2A	1.490	80.4
33	B-16	71	0.186	0.135	0.419	0.419	73.8A	0.422	68.9
34	B-17	66	0.313	0.300	0.559	0.559	73.6A	0.627	74.2
35	B-18	60	0.424	0.292	0.621	0.621	79.2A	0.749	76.2
36	B-19	55	0.783	0.503	0.733	0.783	79.0A	0.865	77.8

Table 3.9 The measurement results local the sixth

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
1	측점A-1	58	0.579	0.606	0.683	0.683	65.6A	0.811	79.8
2	측점A-2	55	0.511	0.664	0.649	0.664	65.0A	1.020	78.6
3	측점A-3	52	0.606	0.694	0.713	0.713	63.8A	1.010	79.4
4	측점A-4	49	0.610	1.120	0.660	1.120	68.6A	1.340	80.4
5	측점A-5	46	0.762	0.927	0.927	0.927	69.6A	1.190	83.1
6	측점A-6	43	0.708	0.786	0.719	0.786	71.2A	1.070	81.0
7	측점A-7	41	0.851	1.040	0.545	1.040	78.6A	1.370	83.7
8	측점B-1	76	0.341	0.765	0.416	0.765	74.0A	0.781	78.9
9	측점B-2	73	0.302	0.764	0.314	0.764	70.8A	0.791	80.1
10	측점B-3	70	0.281	0.784	0.318	0.784	70.8A	0.805	79.1
11	측점B-4	67	0.456	0.787	0.476	0.787	75.2A	0.827	80.7
12	측점B-5	64	0.432	1.080	0.610	1.080	78.2A	1.100	83.3
13	측점B-6	61	0.349	0.770	0.410	0.770	74.4A	0.889	77.2
14	측점B-7	59	0.495	1.500	0.572	1.500	82.6A	1.520	85.9
15	측점C-1	98	0.284	0.619	0.395	0.619	71.2A	0.640	74.0
16	측점C-3	92	0.337	0.548	0.395	0.548	72.4A	0.568	71.8
17	측점C-4	89	0.292	0.643	0.621	0.643	77.4A	0.652	73.8
18	측점C-5	86	0.341	0.775	0.527	0.775	78.0A	0.794	75.5
19	측점C-6	83	0.254	0.759	0.498	0.759	73.0A	0.789	74.0
20	측점C-7	81	0.425	1.000	0.679	1.000	79.2A	1.050	80.0

Table 3.10 The measurement results local the seventh

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
1	A-1	35	0.664	0.438	0.459	0.664	65.6A	0.672	74.4
2	A-2	39	0.330	0.248	0.403	0.403	66.0A	0.456	66.7
3	A-3	37	0.673	0.227	0.232	0.673	62.4A	0.703	75.1
4	A-5	64	0.452	0.584	0.445	0.584	67.0A	0.603	69.9
5	A-6	63	0.383	0.433	0.456	0.456	64.0A	0.700	69.5
6	A-7	58	0.522	0.424	0.540	0.540	68.8A	0.692	74.6
7	A-8	55	0.467	0.730	0.759	0.759	68.4A	0.802	77.1
8	A-9	63	0.457	0.570	0.465	0.570	71.8A	0.641	74.6
9	A-10	60	0.445	0.633	0.792	0.792	73.4A	0.856	75.2
10	A-11	56	0.495	0.725	0.773	0.773	71.0A	0.929	76.7
11	A-12	57	0.495	0.533	0.559	0.559	65.0A	0.745	75.5
12	A-13	62	0.514	0.484	0.452	0.514	68.0A	0.606	71.5
13	A-14	62	0.826	0.551	0.570	0.826	68.4A	0.833	74.4
14	A-15	42	1.240	0.826	0.902	1.240	71.6A	1.300	77.4
15	A-16	37	0.826	1.310	1.180	1.310	75.6A	1.560	79.0
16	A-17	40	0.927	0.387	0.394	0.927	64.2A	0.992	72.5
17	A-18	44	0.754	0.760	0.535	0.760	67.4A	0.846	73.8
18	A-19	51	0.664	0.649	0.430	0.664	63.8A	0.760	72.0
19	B-1	50	0.297	0.437	0.371	0.437	67.0A	0.437	70.7
20	B-2	54	0.203	0.305	0.316	0.316	70.6A	0.402	65.7
21	B-4	82	0.298	0.559	0.364	0.559	68.2A	0.600	65.5
22	B-5	79	0.259	0.421	0.456	0.456	70.0A	0.475	75.6
23	B-6	78	0.252	0.503	0.421	0.503	66.6A	0.587	69.1
24	B-7	73	0.337	0.552	0.525	0.552	71.6A	0.772	70.1
25	B-8	70	0.319	0.670	0.649	0.670	77.0A	0.749	77.4
26	B-9	78	0.352	0.727	0.498	0.727	72.8A	0.775	69.9
27	B-10	75	0.311	0.724	0.778	0.778	73.8A	0.873	72.4
28	B-11	71	0.533	1.090	0.953	1.090	74.8A	1.140	74.3
29	B-12	71	0.210	0.419	0.424	0.424	67.0A	0.597	68.6
30	B-13	77	0.429	0.352	0.379	0.429	69.8A	0.438	72.0
31	B-14	77	0.418	0.514	0.495	0.514	73.2A	0.584	70.2
32	B-15	57	0.597	0.876	0.787	0.876	74.0A	0.994	76.7
33	B-16	52	1.100	1.300	1.380	1.380	77.8A	1.870	79.5
34	B-17	55	0.351	0.402	0.437	0.437	65.0A	0.510	67.1
35	B-18	59	0.619	0.486	0.418	0.619	71.6A	0.684	70.5
36	B-19	66	0.492	0.425	0.449	0.492	69.2A	0.618	72.2

Table 3.10 continued

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
37	C-3	72	0.087	0.060	0.221	0.268	57.0A	0.233	67.6
38	C-4	102	0.162	0.219	0.268	0.268	58.2A	0.283	68.7
39	C-5	99	0.143	0.203	0.256	0.256	59.8A	0.265	69.0
40	C-6	98	0.224	0.179	0.240	0.373	58.6A	0.291	68.2
41	C-7	93	0.221	0.244	0.373	0.394	63.2A	0.402	68.8
42	C-8	90	0.324	0.324	0.394	0.394	64.2A	0.508	73.9
43	C-9	98	0.230	0.224	0.240	0.418	64.6A	0.286	70.1
44	C-10	95	0.259	0.337	0.418	0.600	65.4A	0.508	73.8
45	C-11	91	0.386	0.600	0.443	0.600	69.6A	0.737	74.5
46	C-12	91	0.094	0.168	0.373	0.373	60.0A	0.381	67.4
47	C-13	97	0.162	0.173	0.291	0.398	60.4A	0.319	70.2
48	C-14	97	0.206	0.256	0.398	0.562	61.0A	0.416	71.1
49	C-15	77	0.244	0.360	0.562	0.927	63.4A	0.594	75.1
50	C-16	72	0.400	0.700	0.927	0.927	70.4A	0.986	78.1
51	C-17	75	0.183	0.171	0.335	0.406	57.2A	0.368	69.3
52	C-18	79	0.229	0.197	0.406	0.406	60.8A	0.449	69.4
53	C-19	86	0.203	0.195	0.316	0.316	58.2A	0.394	70.1

Table 3.11 The measurement results local the eighth

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
1	A-1	15	0.965	0.991	0.889	0.991	79.6A	1.380	80.8
2	A-2	18	1.300	1.260	1.360	1.360	71.0A	1.710	80.6
3	A-3	66	0.479	0.725	0.341	0.725	64.0A	0.760	77.6
4	A-4	64	0.397	0.770	0.546	0.770	63.6A	0.779	77.2
5	A-5	62	0.610	1.300	0.483	1.300	64.0A	1.370	81.1
6	A-6	60	0.471	0.813	0.343	0.813	64.4A	0.854	78.8
7	A-7	59	0.552	0.965	0.421	0.965	63.8A	0.997	78.3
8	A-8	57	0.268	0.565	0.627	0.627	64.0A	0.735	73.9
9	A-9	55	0.686	1.450	0.699	1.450	66.8A	1.510	82.0
10	A-10	53	0.495	1.170	0.597	1.170	64.0A	1.220	79.7
11	A-11	52	0.889	1.140	1.000	1.140	65.0A	1.280	80.3
12	A-12	50	1.090	1.500	0.546	1.500	63.8A	1.610	81.2
13	A-13	48	0.751	1.460	0.610	1.460	66.6A	1.570	81.5
14	A-14	46	1.280	1.360	0.749	1.360	65.2A	1.710	82.2
15	A-15	45	0.679	1.700	0.991	1.700	70.0A	1.780	83.6
16	A-16	43	0.735	0.776	0.643	0.776	63.4A	0.910	76.4
17	A-17	41	0.940	0.978	0.737	0.978	64.4A	1.030	79.1
18	A-20	32	0.927	0.978	0.724	0.978	67.2A	1.070	78.4
19	A-21	29	0.356	0.991	0.838	0.991	67.4A	1.020	80.0
20	A-22	61	0.219	0.311	0.318	0.318	71.8A	0.427	72.6
21	A-23	52	0.451	0.721	0.511	0.721	64.0A	0.835	76.2
22	A-24	47	0.483	1.490	1.120	1.490	70.6A	1.810	83.4
23	A-25	55	0.338	0.778	0.576	0.778	74.8A	0.975	77.6
24	A-31	44	0.711	1.090	1.210	1.210	71.6A	1.520	81.6

Table 3.11 continued

Classification			BLASTMATEIII						LION
NO.	Location	d (m)	Tran (cm/s)	Vert (cm/s)	Long (cm/s)	PPV (cm/s)	Mic (dB)	PVS (cm/s)	측정레벨, dB(V)
25	B-1	35	0.445	0.791	0.476	0.791	89.8A	0.792	73.0
26	B-2	38	0.384	0.765	0.522	0.765	78.6A	0.792	73.2
27	B-3	95	0.254	0.549	0.405	0.549	66.0A	0.549	75.1
28	B-4	94	0.471	0.610	0.394	0.610	68.2A	0.772	77.8
29	B-5	92	0.411	0.525	0.394	0.525	64.0A	0.598	74.1
30	B-6	90	0.392	0.465	0.248	0.465	64.0A	0.479	72.8
31	B-7	88	0.508	0.851	0.368	0.851	70.2A	0.900	77.9
32	B-8	87	0.178	0.765	0.235	0.765	65.0A	0.775	76.9
33	B-9	85	0.521	1.000	0.597	1.000	67.2A	1.010	81.7
34	B-10	83	0.432	0.640	0.400	0.640	66.2A	0.756	77.1
35	B-11	81	0.44	1.120	0.470	1.120	69.2A	1.170	80.5
36	B-12	79	0.622	0.864	0.318	0.864	66.4A	0.989	79.5
37	B-13	78	0.478	1.070	0.381	1.070	69.0A	1.140	82.1
38	B-14	76	0.525	1.490	0.610	1.490	73.8A	1.610	83.3
39	B-16	72	0.329	0.991	0.454	0.991	69.8A	1.050	81.3
40	B-17	70	0.622	1.040	0.597	1.040	74.0A	1.100	82.1
41	B-20	57	0.419	1.380	0.419	1.380	72.0A	1.460	81.4
42	B-21	53	0.648	1.240	0.889	1.240	73.8A	1.470	83.9
43	B-22	86	0.329	0.506	0.648	0.648	76.4A	0.748	76.3
44	B-23	77	0.394	1.180	0.648	1.180	75.0A	1.250	81.0
45	B-24	71	0.572	1.520	0.889	1.520	76.4A	1.750	83.0
46	B-25	80	0.365	0.765	0.767	0.767	79.2A	0.873	80.2
47	B-26	77	0.572	0.940	1.080	1.080	74.2A	1.150	81.6
48	B-27	66	0.699	1.540	0.762	1.540	73.6A	1.590	83.2
49	B-28	57	0.546	1.420	1.020	1.420	78.8A	1.460	85.6
50	B-29	68	0.559	1.350	1.230	1.350	81.0A	1.390	82.8
51	B-30	59	0.635	1.270	0.953	1.270	82.4A	1.390	84.1
52	B-31	69	0.546	1.510	0.864	1.510	83.0A	1.520	82.9

4. 진동레벨과 진동속도의 상관성 고찰

4.1 실측진동레벨과 환산식에 의한 예측진동레벨의 비교

본 실험에 있어서 진동속도는 V방향, T방향, L방향 중 가장 높은 값으로 나타내어지는 PPV값과 세성분의 실 벡터 합으로서 가장 높은 값인 PVS로 나누어 측정하였으며 BlastmateⅢ 진동측정기로 측정한 PPV값은 0.168~1.7 cm/sec이고 PVS값은 0.2~1.87 cm/sec로 계측되었다. 리온 진동레벨기를 이용하여 측정한 진동레벨은 65.5~85.9 dB(V)로 거리 15~102m 내에서 측정되었다.

측정된 데이터는 Ejima 환산식, Venmarche 환산식, 중앙환경분쟁조정 위원회의 환산식으로 PPV와 PVS 값으로 구분하여 진동레벨로 환산하였고 예측된 값은 Table 5.1~Table 5.8로 나타내었다. 또한 Fig 5.1~5.16 에서 각각의 환산진동레벨과 측정 진동레벨을 비교 분석하였다.

4.1.1 진동레벨 환산식

(1) 중앙환경분쟁조정위원회 방식

다음과 같은 중앙환경분쟁조정위원회의 진동레벨 환산식은 최대 발파진동속도 (실 벡터 합 : True sum of particle velocity)를 이용하고 있다.

$$VL = 13.54 \cdot \text{Log} V_{peak} + 72.33 \quad (4.1)$$

여기서, VL 은 진동레벨, dB(V)

V_{peak} 는 발파진동속도 최대값, cm/sec(kine) 이다.

(2) Ejima 식

Ejima 변환식은 최대속도 진폭으로부터 수직진동레벨을 산정하는 경우 수직진동에 대해서는 주파수가 8Hz 이상이고, 연속 정현파형일 경우에 한하여 변화된 수직진동레벨과 실측한 수직진동레벨과의 상관성이 성립한다는 이론적인 변환식으로 발파진동과 같이 지속시간이 짧은 충격진동파형에 대해서는 수직진동레벨이 과대평가되는 경향이 있다.

$$VL = 20 \cdot \text{Log} V_{peak} + 71 \quad (4.2)$$

여기서, VL 은 진동레벨, dB(V)

V_{peak} 는 발파진동속도 최대 값, cm/sec 이다.

(3) Venmarcke 식

발파 진동속도를 진동레벨로 전환 시에는 일반적으로 진동원이 연속진동이 아닌 충격진동이므로 Vanmarcke식을 사용한다. 다음과 같은 Vanmarcke 식은 충격진동을 진동레벨로 환산하는데 적정하게 적용할 수 있으나 발파공사의 종류, 뇌관의 종류와 1회 사용 지발단수, 진동이 전파되는 발파지역 지질조건 등이 다양하므로 발파작업에 따른 환경분쟁 진동평가에 어려움이 있을 수 있다.

$$VL = 20 \cdot \log(V_{peak}) + 10 \cdot \log(1 - e^{-Td/0.63}) + 85 \quad (4.3)$$

여기서, Td 는 진동파형의 연속시간(sec)이다.

4.1.2 구간별 예측진동레벨

(1) 1 area의 예측진동레벨

Table 4.1 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the first

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
1	A-1	42.3	76.2	74.5	76.2	88.8	90.6	70.8	72.0
2	A-2	38.3	77.2	74.4	75.2	88.8	89.6	70.8	71.4
3	A-3	38.3	80.5	78.9	80.9	93.3	95.2	73.9	75.2
4	A-5	34.4	80.8	80.6	82.0	94.9	96.3	75.0	75.9
5	A-6	30.0	78.4	80.0	81.0	94.3	95.3	74.6	75.3
6	B-1	52.2	72.0	76.1	76.1	87.8	87.8	70.2	70.2
7	B-2	52.2	71.8	73.8	73.8	85.5	85.5	68.6	68.6
8	B-3	48.3	74.2	75.3	75.3	86.9	86.9	69.6	69.6
9	B-5	44.3	79.9	81.7	81.7	93.3	93.3	73.9	73.9
10	B-6	40.0	75.5	79.7	79.7	91.3	91.3	72.6	72.6



Figure 4.1 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 1 area

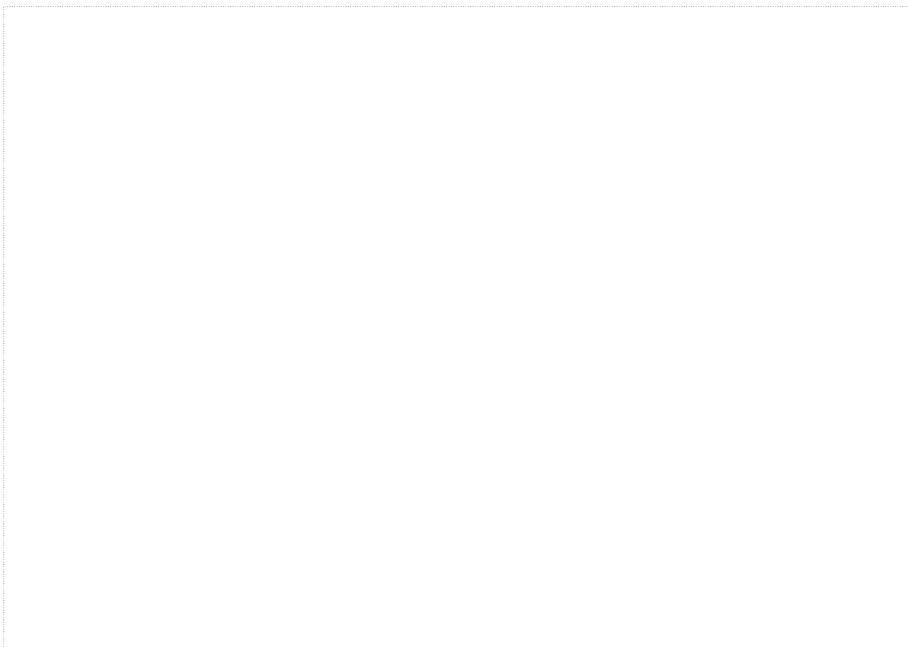


Figure 4.2 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 1 area

(2) 2 area의 예측진동레벨

Table 4.2 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the second

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
1	A-1	62	71.7	68.3	69.3	80.0	80.9	64.9	65.5
2	A-2	60	69.9	66.5	67.6	78.1	79.3	63.6	64.4
3	A-3	60	76.5	75.5	75.6	87.1	87.3	69.7	69.8
4	A-4	59	76.7	76.8	77.0	88.5	88.6	70.6	70.7
5	A-5	59	74.4	74.4	75.5	86.1	87.2	69.0	69.7
6	A-6	57	75.8	73.7	74.1	85.3	85.8	68.5	68.8
7	A-7	57	73.4	70.4	72.1	82.1	83.8	66.3	67.4
8	A-8	55	75.8	75.0	77.2	86.6	88.9	69.4	70.9
9	A-9	55	77.7	75.0	75.6	86.6	87.3	69.4	69.8
10	A-10	53	75.0	76.0	78.6	87.6	90.3	70.0	71.8
11	A-11	53	74.3	71.7	72.1	83.3	83.7	67.1	67.4
12	A-12	51	70.4	71.1	73.1	82.7	84.8	66.7	68.1
13	A-13	51	78.5	77.1	78.9	88.8	90.5	70.8	72.0
14	A-14	49	74.9	77.7	80.5	89.3	92.1	71.2	73.1
15	A-15	49	72.6	71.4	72.1	83.0	83.7	66.9	67.4
16	A-16	47	72.6	75.2	75.4	86.9	87.0	69.5	69.6
17	A-17	48	70.2	70.6	71.8	82.2	83.4	66.4	67.2
18	A-18	46	71.2	73.3	74.4	84.9	86.1	68.2	69.0
19	A-19	46	75.6	73.8	75.1	85.5	86.8	68.6	69.5
20	A-20	44	74.4	73.7	76.8	85.3	88.4	68.5	70.6
21	A-21	44	74.1	77.3	77.5	88.9	89.1	70.9	71.1
22	A-22	42	78.2	79.6	81.4	91.3	93.1	72.5	73.7
23	A-23	42	75.8	77.2	79.1	88.8	90.7	70.9	72.1
24	A-24	40	77.3	78.4	81.6	90.1	93.2	71.7	73.8

Table 4.2 continued

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
25	B-1	72	68.8	69.2	69.8	80.8	81.4	65.4	65.9
26	B-2	70	69.3	70.7	70.8	82.3	82.5	66.5	66.6
27	B-3	70	76.8	74.6	76.2	86.3	87.9	69.1	70.2
28	B-4	69	73.8	73.5	74.6	85.2	86.3	68.4	69.1
29	B-5	69	72.2	76.1	77.4	87.8	89.1	70.2	71.0
30	B-6	67	73.4	71.9	72.8	83.5	84.4	67.3	67.9
31	B-7	67	68.1	70.5	73.6	82.2	85.2	66.4	68.4
32	B-8	65	74.1	75.7	75.9	87.3	87.6	69.8	70.0
33	B-9	65	76.3	75.8	76.0	87.4	87.7	69.9	70.1
34	B-10	63	72.0	73.0	73.3	84.6	84.9	68.0	68.2
35	B-13	61	76.9	78.4	79.3	90.1	91.0	71.7	72.3
36	B-14	59	77.3	76.6	77.1	88.2	88.7	70.5	70.8
37	B-15	59	74.9	71.4	73.5	83.0	85.2	66.9	68.4
38	B-16	57	70.7	72.8	73.2	84.4	84.9	67.9	68.2
39	B-17	58	70.0	71.6	71.8	83.3	83.4	67.1	67.2
40	B-18	56	74.5	73.4	73.8	85.1	85.5	68.3	68.6
41	B-19	56	76.0	76.0	76.2	87.7	87.9	70.1	70.2
42	B-20	54	76.5	73.5	74.5	85.2	86.2	68.4	69.1
43	B-21	54	76.3	74.9	75.3	86.6	86.9	69.3	69.6
44	B-22	52	79.4	77.0	79.2	88.7	90.9	70.7	72.3
45	B-23	52	77.5	75.0	76.1	86.6	87.7	69.4	70.1
46	B-24	50	79.4	76.8	77.2	88.5	88.9	70.6	70.9



Figure 4.3 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 2 area

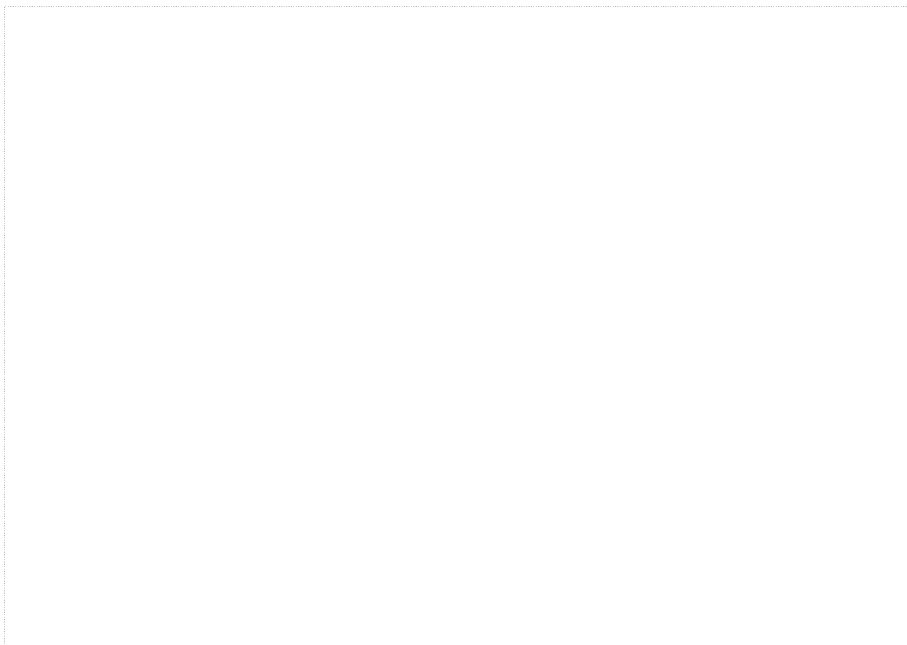


Figure 4.4 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 2 area

(3) 3 area의 예측진동레벨

Table 4.3 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the third

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
1	A-1	49.5	66.9	64.0	65.4	75.6	77.0	61.9	62.9
2	A-2	48.0	75.2	70.0	70.9	81.6	82.5	66.0	66.6
3	A-3	46.0	73.4	70.0	70.1	81.7	81.7	66.0	66.1
4	A-4	45.0	75.0	71.3	71.7	82.9	83.3	66.9	67.1
5	A-5	43.0	75.4	74.1	74.8	85.8	86.5	68.8	69.3
6	A-6	42.0	72.5	71.0	71.5	82.6	83.2	66.7	67.0
7	A-7	40.0	74.4	74.5	74.6	86.1	86.3	69.0	69.1
8	A-8	39.0	73.1	74.4	74.5	86.1	86.2	69.0	69.1
9	A-9	37.5	76.0	77.3	78.2	88.9	89.9	70.9	71.6
10	A-10	36.0	73.8	77.4	78.3	89.1	89.9	71.0	71.6
11	A-11	34.5	77.4	77.3	78.8	89.0	90.5	71.0	72.0
12	A-12	33.0	82.2	81.8	83.3	93.5	94.9	74.0	75.0
13	A-13	31.5	78.7	80.5	81.2	92.1	92.9	73.1	73.6
14	A-14	30.5	80.2	80.6	82.5	92.3	94.2	73.2	74.5
15	B-2	63.0	70.3	66.4	66.9	78.0	78.6	63.5	63.9
16	B-3	61.0	70.0	63.9	65.8	75.5	77.4	61.8	63.2
17	B-4	60.0	68.0	67.5	68.9	79.2	80.5	64.3	65.3
18	B-5	58.0	68.8	67.4	69.2	79.1	80.8	64.3	65.4
19	B-6	57.0	67.0	64.8	65.4	76.4	77.0	62.5	62.9
20	B-7	55.5	68.9	67.1	70.0	78.7	81.6	64.0	66.0
21	B-8	54.0	66.8	66.3	67.3	77.9	79.0	63.5	64.2
22	B-9	52.5	71.6	73.6	73.8	85.3	85.5	68.4	68.6
23	B-10	51.0	71.1	69.3	69.4	81.0	81.1	65.6	65.6
24	B-11	49.5	72.2	72.9	74.0	84.6	85.6	68.0	68.7
25	B-12	48.0	75.7	74.1	75.1	85.7	86.7	68.8	69.4
26	B-13	46.5	74.1	69.7	71.6	81.3	83.3	65.8	67.1
27	B-14	45.5	76.4	73.6	74.2	85.3	85.8	68.5	68.8



Figure 4.5 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 3 area

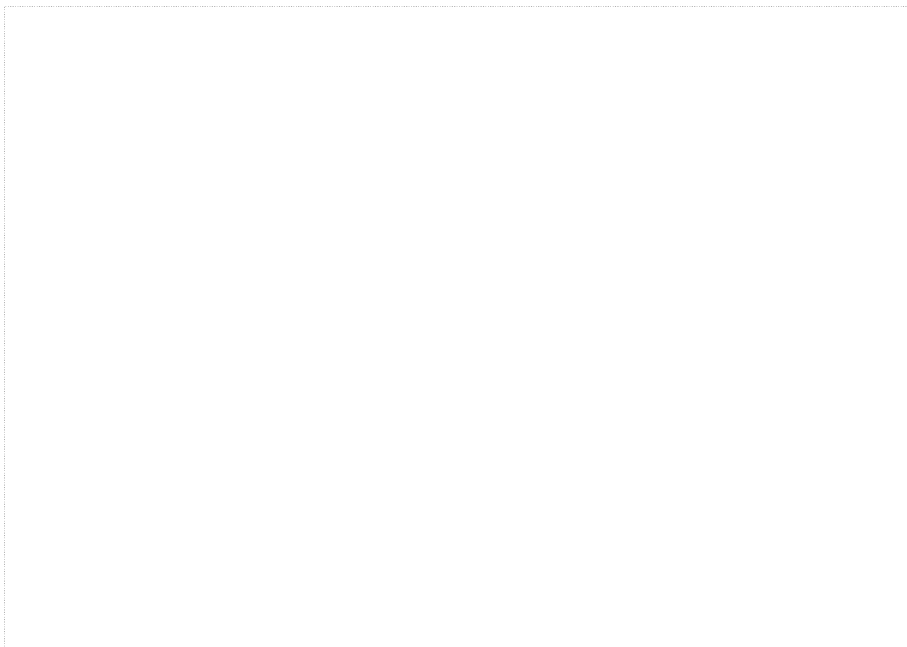


Figure 4.6 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 3 area

(4) 4 area의 예측진동레벨

Table 4.4 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the fourth

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
1	A-1	40	75.7	79.5	79.6	88.8	88.8	70.8	70.9
2	A-2	44	77.2	79.5	79.9	88.8	89.2	70.8	71.1
3	A-3	47	77.7	79.6	81.1	88.9	90.4	70.9	71.9
4	A-4	52	76.3	79.4	80.4	88.7	89.6	70.7	71.4
5	A-5	56	76.3	79.6	81.4	88.9	90.6	70.9	72.1
6	A-6	60	79.2	79.7	82.9	89.0	92.2	71.0	73.2
7	A-7	65	82.6	83.8	86.2	93.1	95.5	73.7	75.4
8	B-1	58	80.5	83.1	84.3	92.4	93.6	73.3	74.1
9	B-2	62	75.4	79.7	80.7	88.9	90.0	70.9	71.6
10	B-3	65	78.1	81.7	83.2	91.0	92.4	72.3	73.3
11	B-4	70	77.1	81.3	82.9	90.6	92.1	72.0	73.1
12	B-5	74	74.4	79.5	80.5	88.8	89.8	70.8	71.5
13	B-6	78	75.0	79.7	80.3	89.0	89.6	71.0	71.4
14	B-7	83	77.4	81.6	82.7	90.9	92.0	72.3	73.0



Figure 4.7 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 4 area

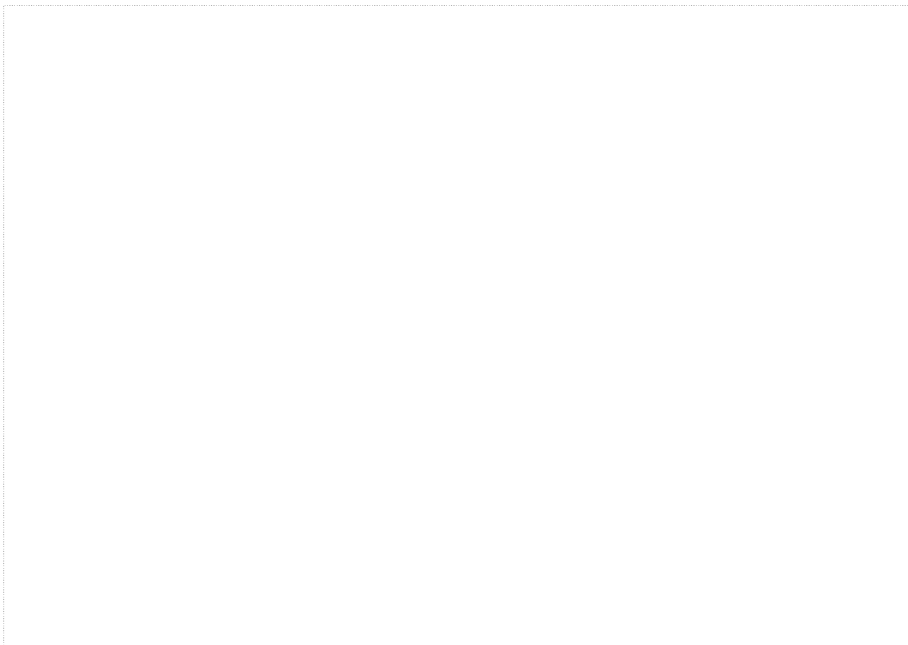


Figure 4.8 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 4 area

(5) 5 area의 예측진동레벨

Table 4.5 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the fifth

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
1	A-1	61.3	67.2	70.6	70.9	84.9	85.2	68.2	68.4
2	A-2	59.3	72.9	72.7	73.2	87.1	87.5	69.7	70.0
3	A-3	57.5	70.1	69.2	69.8	83.5	84.1	67.2	67.6
4	A-4	55.7	73.3	73.7	74.5	88.1	88.9	70.3	70.9
5	A-5	53.8	71.1	72.0	74.2	86.4	88.5	69.2	70.6
6	A-6	52.0	75.4	74.4	74.9	88.8	89.2	70.8	71.1
7	A-7	50.1	72.6	73.3	73.8	87.6	88.1	70.0	70.4
8	A-8	48.3	71.5	71.1	71.2	85.4	85.5	68.5	68.6
9	A-9	46.5	75.4	76.4	77.3	90.7	91.6	72.1	72.7
10	A-10	44.6	73.8	73.9	74.8	88.2	89.2	70.4	71.1
11	A-11	42.8	74.9	73.9	74.3	88.3	88.6	70.5	70.7
12	A-12	41.0	78.8	78.0	78.3	92.3	92.7	73.2	73.5
13	A-13	37.3	79.8	73.7	76.0	88.1	90.3	70.3	71.8
14	A-14	35.5	80.4	78.2	78.2	92.5	92.5	73.4	73.4
15	A-16	52.0	68.9	70.4	70.7	84.7	85.1	68.1	68.3
16	A-17	46.5	74.2	74.5	74.9	88.8	89.2	70.8	71.1
17	A-18	41.0	76.2	74.5	76.8	88.8	91.1	70.8	72.4
18	A-19	35.5	77.8	74.5	76.0	88.8	90.4	70.8	71.9

Table 4.5 continued

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
19	B-1	81.2	67.2	64.6	64.8	78.9	79.1	64.2	64.3
20	B-2	79.3	72.9	70.2	70.3	84.5	84.7	67.9	68.1
21	B-3	77.4	70.1	66.0	66.4	80.4	80.7	65.1	65.3
22	B-4	75.6	73.3	68.9	69.5	83.3	83.8	67.1	67.5
23	B-5	73.7	71.1	69.6	69.8	84.0	84.2	67.6	67.7
24	B-6	71.9	75.4	72.0	72.0	86.3	86.4	69.2	69.2
25	B-7	70.0	72.6	67.6	68.8	82.0	83.1	66.2	67.0
26	B-8	68.2	71.5	63.4	65.2	77.7	79.5	63.3	64.6
27	B-9	66.4	75.4	71.2	73.6	85.5	88.0	68.6	70.3
28	B-10	64.5	73.8	71.0	71.6	85.3	85.9	68.5	68.9
29	B-11	62.7	74.9	69.8	70.5	84.1	84.8	67.7	68.1
30	B-12	60.8	78.8	73.8	75.0	88.2	89.3	70.4	71.2
31	B-13	57.1	79.8	71.4	73.6	85.7	87.9	68.7	70.3
32	B-14	55.3	80.4	77.7	80.1	92.0	94.5	73.0	74.7
33	B-16	71.9	68.9	69.1	69.2	83.4	83.5	67.2	67.3
34	B-17	66.4	74.2	71.6	72.6	85.9	86.9	68.9	69.6
35	B-18	60.8	76.2	72.5	74.2	86.9	88.5	69.5	70.6
36	B-19	55.3	77.8	74.5	75.4	88.9	89.7	70.9	71.5



Figure 4.9 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 5 area

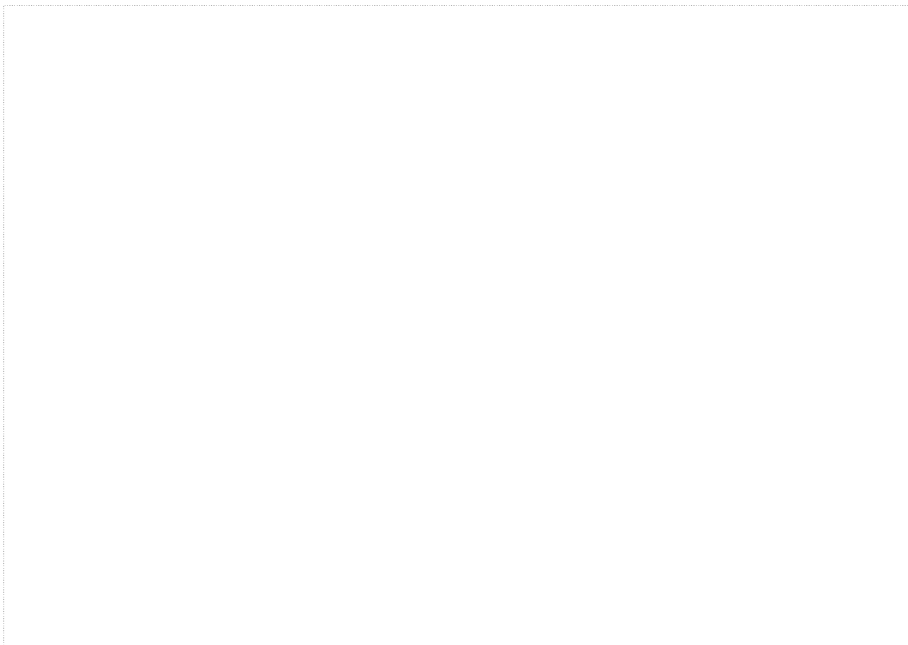


Figure 4.10 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 5 area

(6) 6 area의 예측진동레벨

Table 4.6 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the sixth

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
1	A-1	58.7	79.8	73.4	74.8	87.7	89.2	70.1	71.1
2	A-2	55.8	78.6	73.1	76.8	87.4	91.2	69.9	72.4
3	A-3	52.9	79.4	73.7	76.8	88.1	91.1	70.3	72.4
4	A-4	49.7	80.4	77.7	79.2	92.0	93.5	73.0	74.1
5	A-5	46.8	83.1	76.0	78.2	90.3	92.5	71.9	73.4
6	A-6	43.9	81.0	74.6	77.3	88.9	91.6	70.9	72.7
7	A-7	41.4	83.7	77.0	79.4	91.3	93.7	72.6	74.2
8	B-1	76.6	78.9	74.3	74.5	88.7	88.9	70.8	70.9
9	B-2	73.7	80.1	74.3	74.6	88.7	89.0	70.7	71.0
10	B-3	70.8	79.1	74.6	74.8	88.9	89.1	70.9	71.1
11	B-4	67.7	80.7	74.6	75.0	88.9	89.4	70.9	71.2
12	B-5	64.8	83.3	77.3	77.5	91.7	91.8	72.8	72.9
13	B-6	61.9	77.2	74.4	75.6	88.7	90.0	70.8	71.6
14	B-7	59.3	85.9	80.2	80.3	94.5	94.6	74.7	74.8
15	C-1	98.6	74.0	72.5	72.8	86.8	87.1	69.5	69.7
16	C-3	92.8	71.8	71.4	71.8	85.8	86.1	68.8	69.0
17	C-4	89.7	73.8	72.8	73.0	87.2	87.3	69.7	69.8
18	C-5	86.8	75.5	74.5	74.7	88.8	89.0	70.8	71.0
19	C-6	83.9	74.0	74.3	74.6	88.6	88.9	70.7	70.9
20	C-7	81.2	80.0	76.7	77.1	91.0	91.4	72.3	72.6



Figure 4.11 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 6 area

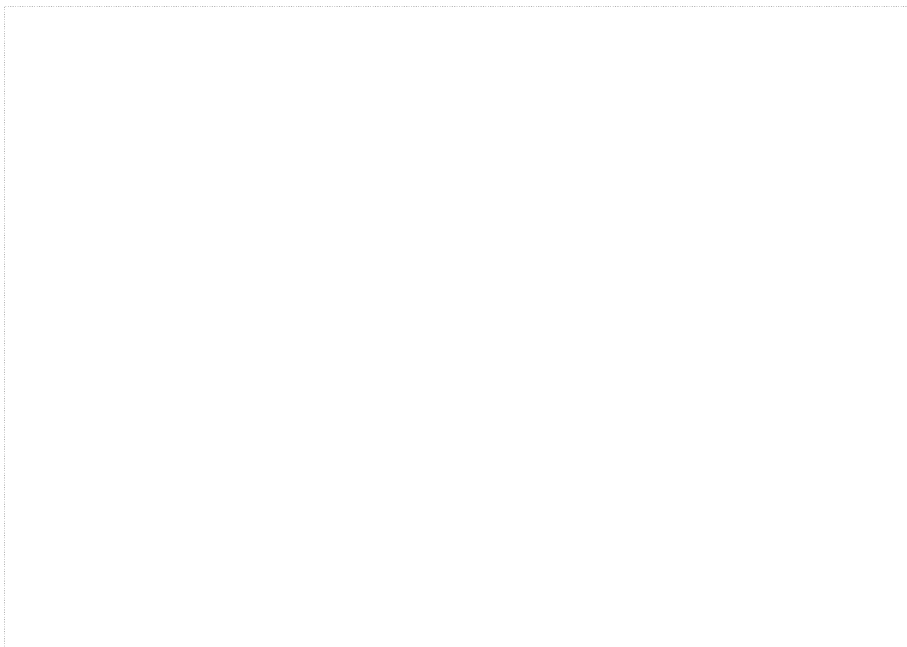


Figure 4.12 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 6 area

(7) 7 area의 예측진동레벨

Table 4.7 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the seventh

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
1	A-1	35.6	74.4	75.8	75.9	87.4	87.5	69.9	70.0
2	A-2	39.1	66.7	71.5	72.5	83.1	84.2	67.0	67.7
3	A-3	37.4	75.1	75.9	76.3	87.6	87.9	70.0	70.3
4	A-5	64.1	69.9	74.7	75.0	86.3	86.6	69.2	69.4
5	A-6	63.8	69.5	72.5	76.2	84.2	87.9	67.7	70.2
6	A-7	58.8	74.6	74.0	76.1	85.6	87.8	68.7	70.2
7	A-8	55.2	77.1	77.0	77.4	88.6	89.1	70.7	71.0
8	A-9	63.8	74.6	74.5	75.5	86.1	87.1	69.0	69.7
9	A-10	60.2	75.2	77.3	78.0	89.0	89.6	71.0	71.4
10	A-11	56.6	76.7	77.1	78.7	88.8	90.4	70.8	71.9
11	A-12	57.0	75.5	74.3	76.8	85.9	88.4	68.9	70.6
12	A-13	62.3	71.5	73.6	75.0	85.2	86.6	68.4	69.4
13	A-14	62.0	74.4	77.7	77.8	89.3	89.4	71.2	71.3
14	A-15	42.7	77.4	81.2	81.6	92.9	93.3	73.6	73.9
15	A-16	37.4	79.0	81.7	83.2	93.3	94.9	73.9	74.9
16	A-17	40.9	72.5	78.7	79.3	90.3	90.9	71.9	72.3
17	A-18	44.5	73.8	77.0	77.9	88.6	89.5	70.7	71.3
18	A-19	51.2	72.0	75.8	77.0	87.4	88.6	69.9	70.7

Table 4.7 Continued

Classification			실제 측정 레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
19	B-1	50.4	70.7	72.2	72.2	83.8	83.8	67.5	67.5
20	B-2	54.0	65.7	69.3	71.4	81.0	83.1	65.6	67.0
21	B-4	82.4	65.5	74.3	74.9	85.9	86.6	68.9	69.3
22	B-5	79.1	75.6	72.5	72.9	84.2	84.5	67.7	68.0
23	B-6	78.8	69.1	73.4	74.7	85.0	86.4	68.3	69.2
24	B-7	73.7	70.1	74.2	77.1	85.8	88.8	68.8	70.8
25	B-8	70.1	77.4	75.9	76.8	87.5	88.5	70.0	70.6
26	B-9	78.8	69.9	76.6	77.1	88.2	88.8	70.5	70.8
27	B-10	75.2	72.4	77.2	78.2	88.8	89.8	70.9	71.5
28	B-11	71.6	74.3	80.1	80.5	91.7	92.1	72.8	73.1
29	B-12	71.9	68.6	71.9	74.9	83.5	86.5	67.3	69.3
30	B-13	77.3	72.0	72.0	72.2	83.6	83.8	67.4	67.5
31	B-14	77.0	70.2	73.6	74.7	85.2	86.3	68.4	69.2
32	B-15	57.6	76.7	78.2	79.3	89.9	90.9	71.6	72.3
33	B-16	52.2	79.5	82.1	84.8	93.8	96.4	74.2	76.0
34	B-17	55.8	67.1	72.2	73.5	83.8	85.2	67.5	68.4
35	B-18	59.4	70.5	75.2	76.0	86.8	87.7	69.5	70.1
36	B-19	66.2	72.2	73.2	75.2	84.8	86.8	68.2	69.5
37	C-3	72.1	67.6	67.9	66.7	79.6	78.3	64.6	63.8
38	C-4	102	68.7	67.9	68.4	79.6	80.0	64.6	64.9
39	C-5	99.0	69.0	67.5	67.8	79.2	79.5	64.3	64.5
40	C-6	98.8	68.2	70.8	68.6	82.4	80.3	66.5	65.1
41	C-7	93.6	68.8	71.3	71.4	82.9	83.1	66.9	67.0
42	C-8	90.0	73.9	71.3	73.5	82.9	85.1	66.9	68.3
43	C-9	98.8	70.1	71.8	68.5	83.4	80.1	67.2	65.0
44	C-10	95.2	73.8	74.9	73.5	86.6	85.1	69.3	68.3
45	C-11	91.6	74.5	74.9	76.7	86.6	88.3	69.3	70.5
46	C-12	91.8	67.4	70.8	71.0	82.4	82.6	66.5	66.7
47	C-13	97.2	70.2	71.3	69.4	83.0	81.1	66.9	65.6
48	C-14	97.0	71.1	74.3	71.7	86.0	83.4	68.9	67.2
49	C-15	77.5	75.1	78.7	74.8	90.3	86.5	71.9	69.3
50	C-16	72.1	78.1	78.7	79.2	90.3	90.9	71.9	72.2
51	C-17	75.7	69.3	71.5	70.7	83.2	82.3	67.0	66.5
52	C-18	79.3	69.4	71.5	72.4	83.2	84.0	67.0	67.6
53	C-19	86.2	70.1	69.3	71.3	81.0	82.9	65.6	66.9



Figure 4.13 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 7 area

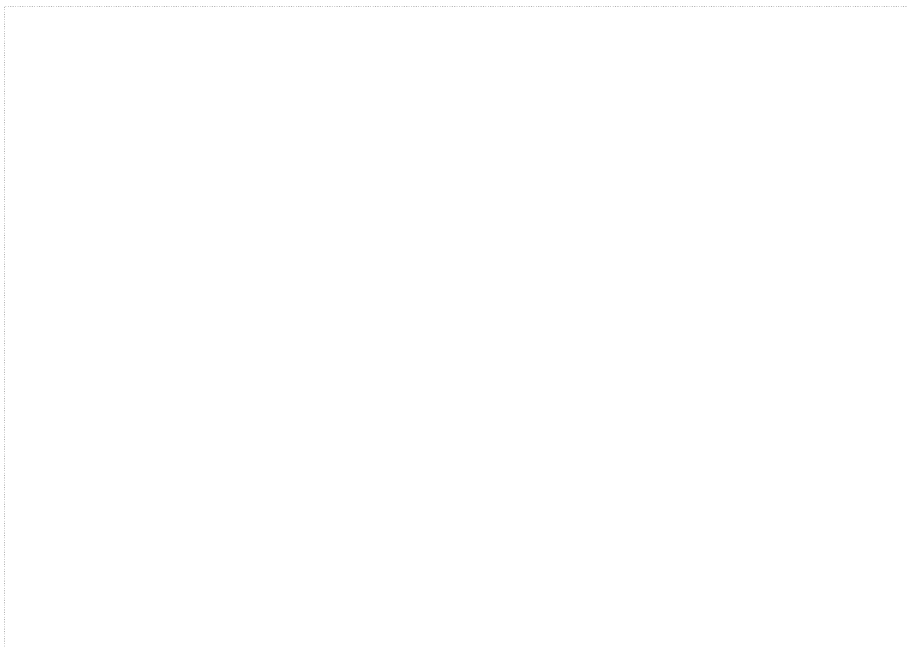


Figure 4.14 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 7 area

(8) 8 area의 예측진동레벨

Table 4.8 Comparative of a measurement level and a conversion vibration level local the eighth

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
1	A-1	15.0	80.8	79.3	82.1	90.9	93.8	72.3	74.2
2	A-2	18.0	80.6	82.0	84.0	93.7	95.7	74.1	75.5
3	A-3	66.0	77.6	76.6	77.0	88.2	88.6	70.4	70.7
4	A-4	64.4	77.2	77.1	77.2	88.7	88.8	70.8	70.9
5	A-5	62.7	81.1	81.6	82.1	93.3	93.7	73.9	74.2
6	A-6	60.9	78.8	77.5	78.0	89.2	89.6	71.1	71.4
7	A-7	59.1	78.3	79.0	79.3	90.7	91.0	72.1	72.3
8	A-8	57.4	73.9	75.3	76.7	86.9	88.3	69.6	70.5
9	A-9	55.6	82.0	82.6	82.9	94.2	94.6	74.5	74.8
10	A-10	53.8	79.7	80.7	81.1	92.4	92.7	73.3	73.5
11	A-11	52.1	80.3	80.5	81.5	92.1	93.1	73.1	73.8
12	A-12	50.3	81.2	82.9	83.5	94.5	95.1	74.7	75.1
13	A-13	48.6	81.5	82.6	83.3	94.3	94.9	74.6	75.0
14	A-14	46.8	82.2	82.0	84.0	93.7	95.7	74.1	75.5
15	A-15	45.1	83.6	84.0	84.4	95.6	96.0	75.5	75.7
16	A-16	43.4	76.4	77.1	78.5	88.8	90.2	70.8	71.8
17	A-17	41.6	79.1	79.2	79.6	90.8	91.3	72.2	72.5
18	A-20	32.7	78.4	79.2	79.9	90.8	91.6	72.2	72.7
19	A-21	29.2	80.0	79.3	79.5	90.9	91.2	72.3	72.4
20	A-22	61.0	72.6	69.4	72.0	81.0	83.6	65.6	67.3
21	A-23	52.3	76.2	76.5	77.8	88.2	89.4	70.4	71.3
22	A-24	47.0	83.4	82.8	84.5	94.5	96.2	74.7	75.8
23	A-25	55.9	77.6	77.2	79.1	88.8	90.8	70.9	72.2
24	A-31	44.8	81.6	81.0	83.0	92.7	94.6	73.5	74.8

Table 4.8 continued

Classification			실제 측정레벨 dB(V)	Vibration level by conversion formulas, dB(V)					
NO.	Location	d (m)		Venmarche		Ejima		분쟁조정위원회	
				PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우	PPV경우	PVS경우
25	B-1	35.0	73.0	77.3	77.3	89.0	89.0	71.0	71.0
26	B-2	38.0	73.2	77.0	77.3	88.7	89.0	70.8	71.0
27	B-3	95.7	75.1	74.1	74.1	85.8	85.8	68.8	68.8
28	B-4	94.1	77.8	75.1	77.1	86.7	88.8	69.4	70.8
29	B-5	92.3	74.1	73.7	74.9	85.4	86.5	68.5	69.3
30	B-6	90.5	72.8	72.7	73.0	84.3	84.6	67.8	68.0
31	B-7	88.8	77.9	77.9	78.4	89.6	90.1	71.4	71.7
32	B-8	87.0	76.9	77.0	77.1	88.7	88.8	70.8	70.8
33	B-9	85.2	81.7	79.3	79.4	91.0	91.1	72.3	72.4
34	B-10	83.4	77.1	75.5	76.9	87.1	88.6	69.7	70.7
35	B-11	81.6	80.5	80.3	80.7	92.0	92.4	73.0	73.3
36	B-12	79.8	79.5	78.1	79.2	89.7	90.9	71.5	72.3
37	B-13	78.1	82.1	79.9	80.5	91.6	92.1	72.7	73.1
38	B-14	76.3	83.3	82.8	83.5	94.5	95.1	74.7	75.1
39	B-16	72.7	81.3	79.3	79.8	90.9	91.4	72.3	72.6
40	B-17	70.9	82.1	79.7	80.2	91.3	91.8	72.6	72.9
41	B-20	57.5	81.4	82.1	82.6	93.8	94.3	74.2	74.6
42	B-21	53.9	83.9	81.2	82.7	92.9	94.3	73.6	74.6
43	B-22	86.0	76.3	75.6	76.8	87.2	88.5	69.8	70.6
44	B-23	77.2	81.0	80.8	81.3	92.4	92.9	73.3	73.6
45	B-24	71.8	83.0	83.0	84.2	94.6	95.9	74.8	75.6
46	B-25	80.8	80.2	77.0	78.2	88.7	89.8	70.8	71.5
47	B-26	77.2	81.6	80.0	80.6	91.7	92.2	72.8	73.2
48	B-27	66.5	83.2	83.1	83.4	94.8	95.0	74.9	75.1
49	B-28	57.5	85.6	82.4	82.6	94.0	94.3	74.4	74.6
50	B-29	68.2	82.8	82.0	82.2	93.6	93.9	74.1	74.3
51	B-30	59.3	84.1	81.4	82.2	93.1	93.9	73.7	74.3
52	B-31	69.8	82.9	82.9	83.0	94.6	94.6	74.8	74.8



Figure 4.15 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PPV and measurement vibration level in 8 area

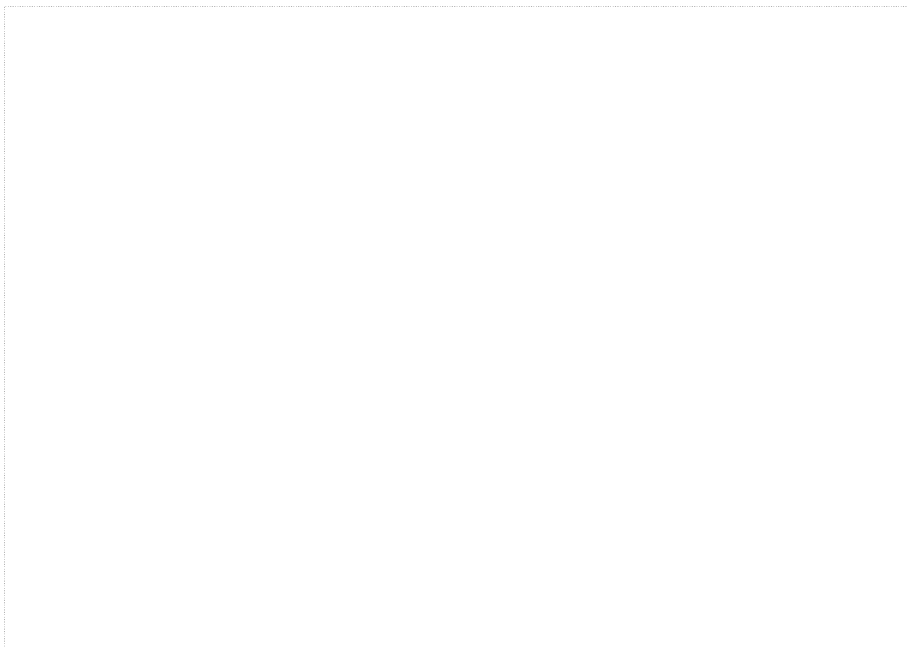


Figure 4.16 Compare of vibration level by a lot of conversion formulas of a PVS and measurement vibration level in 8 area

4.2 진동레벨과 진동속도의 상관성 검토

진동속도는 Ejima 변환식, Venmarche 변환식, 중앙환경분쟁조정 위원회의 변환식에 의해 분석한 결과 Table 5.9와 같은 결과를 얻었다. Ejima 변환식은 최대속도 진폭으로부터 수직진동레벨을 산정하는 경우 수직진동에 대해서는 주파수가 8Hz 이상이고 연속 정현파형 일 경우에 한하여 변환된 수직진동레벨과 실측한 수직진동레벨과의 상관성이 성립한다는 이론적인 변환식으로 발파진동과 같이 지속시간이 짧은 충격진동파형에 대해서는 과대평가되는 경향이 있다는 사실과 일치함을 보였다. 중앙환경분쟁조정 위원회 방식은 최대 발파 진동속도(실 벡터합)를 이용하고 있으며 PPV값과 비교하여 많이 차이를 보이지 않았지만 실측진동레벨과 좀 더 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. Venmarche 변환식은 Ejima 변환식과 중앙환경분쟁조정 위원회 방식과는 달리 충격진동을 진동레벨로 환산하는데 적절한 결과를 얻을 수 있었으나 발파공사의 종류, 뇌관의 종류와 1회 사용 지발단수, 진동이 전파되는 발파지역 지질조건 등이 다양하므로 발파작업에 따른 진동평가에 어려움이 따를 수 있을 것으로 예상된다.

Table 4.9 Comparison of conversion results of total data and measurement vibration level

Conversion method		Blast area, dB(V)								Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Vibration level		76.65	74.37	73.15	77.35	74.13	79.02	72.13	79.59	75.41
Venmarche	ppv	77.50	74.09	71.88	80.55	71.94	74.87	74.32	79.17	75.17
	pvs	78.19	75.22	72.87	81.86	72.84	75.94	74.95	80.00	76.08
Ejima	ppv	90.49	85.73	83.53	89.84	86.28	89.20	85.95	90.82	87.33
	pvs	91.18	86.87	84.51	91.13	87.17	90.27	86.59	91.66	88.23
중앙환경 분쟁조정 위원회	ppv	72.00	68.77	67.28	71.53	69.12	71.11	68.92	72.22	69.84
	pvs	72.47	69.53	67.95	72.43	69.74	71.84	69.35	72.78	70.46

진동레벨과 환산식에 의한 PPV, PVS 예측진동레벨은 Figure 4.17~4.18 로 분석되었다. 중앙환경분쟁조정 위원회 방식으로 분석한 결과 전체 자료에 대해 61.8~75.5의 범위로 평균값은 69.84dB(V)이고 PVS의 환산일 경우 62.9~76dB(V)이고 평균값은 70.46dB(V)이다. 중앙환경분쟁조정 위원회 방식은 실측진동레벨에 비하여 4.95~5.57dB(V)가 낮게 분석되었다. 이와 반대로 Ejima 환산식은 11.92~12.82dB(V)로 높게 나타났는데 이는 발파진동과 같은 짧은 충격진동 파형에서 과대 평가된다는 기존의 연구 결과와 일치함을 보였고, PPV 환산의 값은 75.5~95.6dB(V)으로 평균값은 87.33dB(V)이며 PVS에서의 환산은 77~96.4dB(V)로 평균 88.23dB(V) 분석되었다. 마지막으로 Venmarche 환산식은 다른 환산식과 달리 진동파형 연속시간이라는 뇌관 시차가 환산식에 포함되므로 좀 더 정확한 분석이 가능하며 PPV에서의 환산은 63.4~84dB(V)로 평균 75.17dB(V)이고 PVS에서의 환산은 64.8~86.2dB(V)로 평균 76.08dB(V)이다. 이는 실측진동레벨과 0.24~0.67 dB(V)의 차이로 거의 일치하는 것으로 분석되었다.



Figure 4.17 The conversion results that used PPV of total data

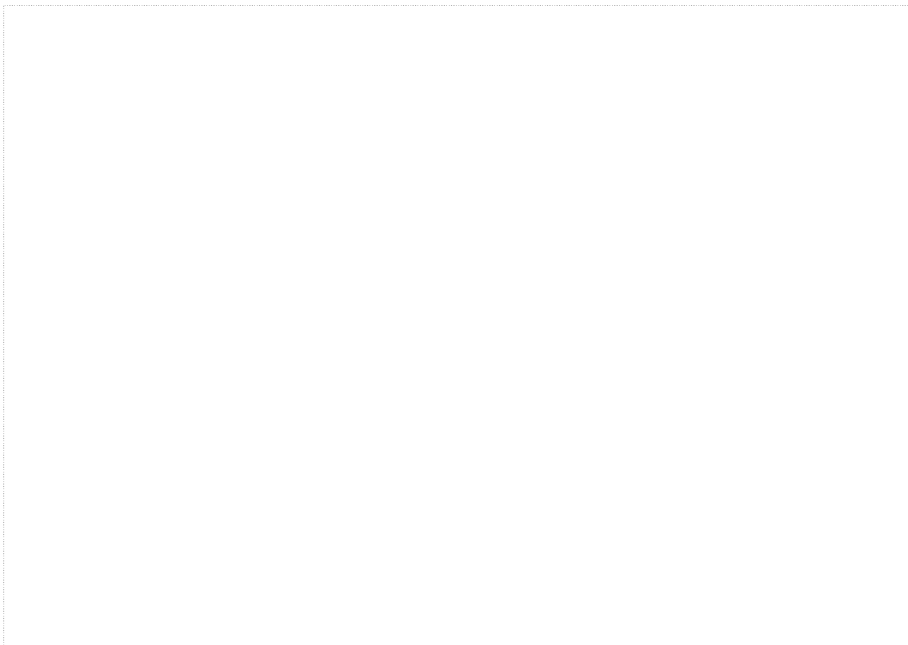


Figure 4.18 The conversion results that used PVS of total data

4.2.1 예측진동레벨의 분석결과

Figure 4.19은 발파진동속도를 이용한 PPV와 PVS의 예측진동레벨의 평균적 데이터를 나타낸 표이다. 분석결과 Venmarche 식은 측정진동레벨과 비교하여 PPV의 경우 99.68%, PVS의 경우 99.06%일치하였고, Ejima식은 PPV의 경우 88.08%이고 PVS는 87.18%로 나타났다. 마지막으로 중앙환경분쟁조정 위원회 방법으로는 PPV의 경우 92.61%, PVS의 경우 93.44%로 분석되었다. 따라서 발파에서의 실측진동레벨과 예측진동레벨의 비교는 Venmarche 식에서 가장 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

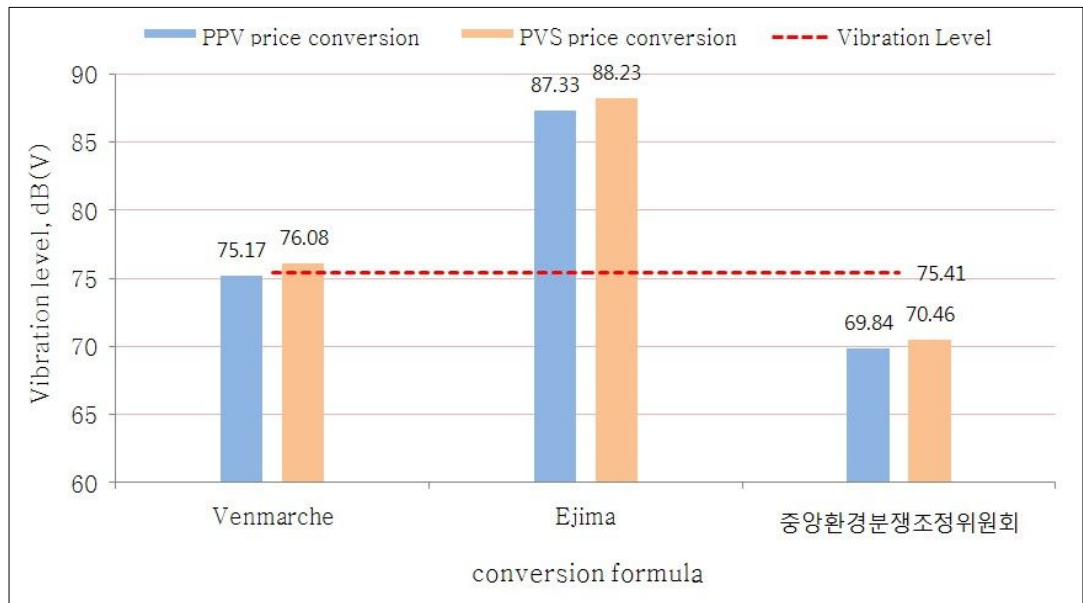


Figure 4.19 Comparison of measurement vibration level and conversion vibration level

5. 결론

발파진동을 평가하고자 할 때 건축구조물에 미치는 영향은 진동속도, 인체에 미치는 영향은 진동레벨로 표현된다. 일반적으로 발파공사현장에서는 진동속도를 평가 기준으로 측정하고 있으며 진동레벨 환산식에 의한 예측이 필요한 상황이다. 본 연구에서는 진동레벨과 진동속도의 상관성을 규명하기 위하여 발파에서의 진동을 거리별로 진동레벨측정기와 진동속도측정기를 사용하여 측정하였고 나아가 기존의 여러 진동레벨 추정식을 비교, 검토하여 현장업무에 있어서 신뢰성 있는 진동평가가 이루어지도록 하는데 목적이 있다. 분석한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 발파는 총 4,780kg의 장약량으로 총 130회의 발파가 진행되었으며 회당 발파공수는 5, 10, 20공으로 공당 4kg의 약량이 사용되었다. 측정결과 전체 데이터의 PPV값은 0.168~1.7 cm/sec, PVS는 0.2~1.87cm/sec의 범위에서 계측되었고 진동레벨은 65.5~85.9dB(V)로 측정되었다.
2. 발파로 인한 진동은 진동속도와 진동레벨로 같은 거리에서 동시 측정하였다. 계측은 발생원으로부터 15~102m 구간에서 측정하였고 8차례 구간을 나누어 진동속도, 진동레벨 데이터를 각각 273개 획득하였다. 측정된 데이터는 거리, 발파공수, 뇌관시차 등에 따라 진동속도가 비례하나 어떠한 경우 지반 내 특정한 지층 상태나 지반의 특성에 따라서 기존 데이터 보다 크거나 작게 나타났다.
3. Vanmarche 환산식에 의한 예측진동레벨은 PPV의 경우 63.4~84dB(V)로 평균 75.17dB(V)이고 PVS의 환산은 64.8~86.2dB(V)로 평균 76.08dB(V)로 분석되었으며 실측진동레벨의 오차가 0.24~0.67dB(V)로 거의 일치하는 것으로 나타났다.

4. Ejima 환산식에 의한 예측진동레벨은 PPV의 경우 75.5~95.6dB(V), PVS의 경우 77~96.4dB(V)의 범위로 나타났고 평균값은 각각 87.33dB(V), 88.23dB(V)으로 실측데이터 75.41dB(V)과 오차가 11.92~12.82dB(V) 높은 것으로 분석되었다. 이는 Ejima 식이 연속적인 정현 파형일 경우에 상관성이 성립하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 측정된 PPV와 PVS를 이용하여 환산식에 의해 분석된 예측 진동레벨은 Venmarche 환산식은 0.91dB(V), Ejima 환산식은 0.9dB(V), 중앙환경분쟁조정위원회 방식에서는 0.62dB(V)로 PVS값이 더 높게 분석되었다. 발파진동이 인체에 미치는 영향은 V, T, L 성분 중에서 단일성분으로 PPV 값이나 V성분으로 주로 사용하고 있으나 건축물의 경우 수직, 진행, 접선 모든 성분에 영향을 받기 때문에 가장 이상적인 발파진동 평가 방법에는 V, T, L 성분의 벡터 합인 PVS의 진동속도를 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

6. 이상의 결과를 종합해보면 풍화가 어느 정도 진행된 흑운모화강암지역에서의 발파로 인한 진동레벨과 진동속도의 상관성은 Venmarche 환산식이 실제측정진동레벨과 비교하여 99.68%로 매우 정확한 값을 보였으나 매 발파에 대한 뇌관의 종류와 1회 사용 지발단수, 발파공사의 종류, 지질조건 등 다양한 변수를 적용해야 하므로 공사현장에서의 진동평가에 어려움이 예상되고 나아가 지반의 상황이나 현장의 특성을 고려하여 보다 신속하고 정확한 업무수행이 되기 위한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 강추원, 화약과 산업응용, 구미서관, 2004.
2. 강추원, 발파공학 A to Z, 구미서관, 2005.
3. 강추원, 제2판 발파공학 A to Z, 구미서관, 2009.
4. 임한욱 외, “암발파 설계기법에 관한 연구”, 한국토지개발공사, 1993.
5. 정일록 외, “최신 소음·진동”, 신광문화사, 2009.
6. 김남수, 양형식, “발파소음의 예측기법과 환경규제기준으로의 변환연구”, 화약발파, 제 18권, 제2호, 한국화약기술협회, pp.14~22, 2000.
7. 김일중 외, “진동레벨 추정식에 관한 연구”, 대한화약발파공학회 2009년도 추계 학술발표회 논문집 2009, 2009.
8. 이연수, 장서일, “도심지 발파공사장의 발파진동 특성”, 한국소음진동공학회논문집, 제14권, 제7호, PP. 632~638, 2004.
9. 이연수 외, “근접장 발파진동에서 진동속도와 진동레벨의 비교”, 한국소음진동공학회논문집 제 15권 제 8호, pp. 918~923, 2005.
10. 양형식 외, “진동특성에 따른 수직보정 진동레벨의 변환 특성 연구”, 화약·발파공학회 제21권 제1호, 2003.
11. 김남수, 양형식, “발파소음의 예측기법과 환경규제기준으로의 변환연구”, 화약발파, 제18권, 제2호, 한국화약기술협회, PP. 14~22, 2000.

12. 양형식, “지표 발파의 진동 특성에 관한 연구”, 한국암반역학회지, 1992.
13. 김하근 외, “발파진동의 영향 및 예측”, 주택도시(주택도시연구원) 제68호 164~171, 2001.
14. 우재윤, “우리나라 지반진동 허용기준의 제정 및 적용에 관한 제안”, 한국지반공학회, pp. 117~141, 1995.
15. DIN 4150-Part 3, “Structural Vibration in Buildings : Effects on Structures”, 1986.
16. Langefers, Ulf et al., “Ground vibrations in blasting”, Water Power, 1958, pp. 335~338.
17. Langefors, U. Kihlstrom, B., “The modern technique of rock blasting”, 3rd Ed., Wiley & Sons, pp. 258~293, 1978.
18. Northwood, et al., “Blasting vibrations and their effects on structures”, US Bureau of Mines Bulletin 656, 1980.
19. Polish standard, “Evaluation of the harmfulness of building vibration due to ground motion”, PN/B-02170.
20. Siskind, D.E. et al, “Low-frequency vibrations produced by surface mine blasting over abandoned underground mines”, USBM RI 9028, 1987.
21. Siskind, D.E. et al, “Structure response and damage produced by airblast vibration from surface mine blasting”, USBM RI 8485, 1980.

22. Swedish standard, "Vibration and shock guidance levels for blasting-induced vibration in building", 1991.
23. Schweizer Norm SN 640 312a, "The effects of blasting vibrations on buildings", 1993.
24. Wiss, J.F., "A study of damages to a residential structure from blast vibrations", Special publication, ASCE, pp.27~33, 1974.

감사의 글

어느덧 2년이라는 대학원 석사과정을 되돌아보는 날이 오게 되다니 정말 2년이라는 시간이 빨리 지나간 것 같고 그동안에 수많은 추억과 고마우신 분들이 떠오릅니다.

먼저 학부 때부터 지금까지 관심과 사랑으로 돌봐주시고 많은 가르침과 깨우침을 주신 지교교수님이신 강추원 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 그리고 부족한 저의 논문을 심사해주시고 조언해 주신 고진석 교수님, 박천영 교수님, 학부 때부터 지금까지 관심과 애정을 갖고 많은 가르침을 주신 박영석 교수님, 한오형 교수님, 강성승 교수님, 그리고 지금은 은퇴하셔서 아쉬운 마음이 끝이 없는 이창신 교수님, 양해승 교수님, 서동우 교수님께도 깊은 감사의 말씀 전해드리고 싶습니다.

저희 암석역학실험실에 항상 따뜻한 관심과 애정으로 많은 가르침을 주신 원우회 선배님들이신 원연호 선배님, 김영희 선배님, 이효 선배님, 한남철 선배님, 노영배 선배님, 조영동 선배님, 박정봉 선배님, 문창일 선배님, 최태홍 선배님, 김재용 선배님, 위장복 선배님, 박기동 선배님, 강석곤 선배님, 황남순 선배님, 이섭 선배님, 김연수 선배님, 이창원 선배님, 이창훈 선배님, 이수연 선배님, 박윤석 선배님, 김수로 선배님, 순오형, 영석이형, 강일이형, 윤택이형, 승현이형, 훈재형, 규용이형, 지우형, 태철이형, 청신누나를 비롯한 원우회 선배님들께 깊은 감사드립니다.

2년이라는 실험실 생활을 함께했던 가족과 같은 선배·후배 동기들에게도 감사의 말씀전하고 싶습니다. 지금은 실험실에서 함께 생활하지 않고 있지만 부족한 저에게 가르침을 주셨던 김종인 선배님과 박현식 선배님, 그리고 항상 저를 친동생처럼 아껴주시고 철들게 해준 호민이형, 본받고 싶은 복현이형, 공부하고 싶게 만들어주는 동조형, 나를 항상 주먹으로 다스렸지만 누구 보다 친했던 1년 선배이신 일 잘하는 흥표형, 나만 찾는 상곤이형, 카리스마 두성이형, 웃음이 헤폰 도형이형에게 진심으로 감사하고 형이지만 후배로 들어와 고생하는 석범이형, 항상 미안하고 힘든 일 다 도맡아 하는 내 친구 정일이, 실험실 활력소 착한 지수, 학부생으로 함께 생활했었던 잡일에 달인 형주, 항상 피곤한 선홍이, 그리고 학번은 다르지만 2년간 함께 고생한 동기인 형으로서 동생들 보다 더 고생하시고 동기들 잘 이끌어준 금

정적인 장원이형, 울기도 많이 울고 화도 많이 내는 파이터 승은이에게도 감사의 말씀 전합니다.

같은 실험실은 아니지만 항상 밝고 따뜻하게 대해주던 현호형, 정제형, 우경이형, 대모형, 그리고 논문실험 때 고생해주신 재훈이형, 우필이형, 동민형, 원일이, 명환이와 많은 선·후배님들께 감사의 말씀을 전합니다.

언제나 나를 지켜봐주고 진심으로 응원해주던 친구들 울이, 종섭이, 박설이, 재호 그리고 03학번 동기들인 지석이, 승한이, 훈탁이, 찬우, 광원이, 근태, 선홍이, 동원이 동광이 그리고 이름을 말하지 못한 친구들에게 미안하고 지금까지 함께 해줘서 고맙단 말을 전합니다.

마지막으로 아무조건 없이 가족이란 이름 아래 부족한 저를 사랑해주시고 모든 것을 아끼지 않으셨던 아버지, 어머니, 항상 형을 잘 따르고 말도 잘 듣는 착한 동생 하운이에게 항상 고맙고 언제나 나를 믿어주고 사랑해주는 가족이 있기에 지금의 제가 있는 것 같습니다. 아버지, 어머니, 동생 항상 건강했으면 좋겠고 사랑하고 감사드립니다.

저작물 이용 허락서

학 과	에너지자원공학과	학 번	20097077	과 정	석 사
성 명	한글: 송 하 립 한문 : 宋 河 林 영문 : Song Ha Lim				
주 소	전라남도 완도군 금당면 울포리 44-12번지				
연락처	E-MAIL : ever0620@naver.com				
논문제목	한글 : 진동레벨과 진동속도의 상관성에 관한 연구 영어 : Study regarding a correlation of vibration level and vibration velocity				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함.
다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2011년 2월

저작자: 송 하 립 (인)

조선대학교 총장 귀하