

도로구조물의 발파진동 허용기준에 관한 연구

Study on the Allowable Limit of Blasting-induced Vibration for Road Structures and Facilities

손 무 락¹ Son, Moorak
권 오 철³ Kwon, Ohcheol
황 영 철⁵ Hwang, Youngcheol

홍 두 표² Hong, Doopyo
정 연 권⁴ Jung, Yeunkwun
박 두 희⁶ Park, Duhee

Abstract

This paper is to provide the allowable limit blasting-induced vibration for road structures and facilities. For this purpose, first of all, this study examined various allowable limits of different structures from domestic and foreign countries, investigated related problems of the limits used in the country, and suggested the measures to minimize the related problems. Furthermore, this study proposed the blasting-induced vibration limit of road structures and facilities that could be used in the country from comparing and analyzing the various limits from foreign countries. To verify the proposed limit for a practical use in the field, field cases that had both a vibration magnitude and a damage level were collected and they were compared with the proposed limit. In addition, the proposed limit was also compared with the results of analytical and numerical analyses. The comparison and analysis indicated that the proposed limit of different road structures and facilities is valid for the practical use in the field. From this study, the proposed limit is expected to be used as the limit to estimate the damage levels of road structures and facilities due to blasting-induced vibrations in the field..

요지

본 논문은 도로구조물 및 시설물들에 대한 발파진동 허용기준들을 도출하고 그 결과를 제시하고자 한 것이다. 본 연구를 위해서 우선 현재 국내·외에서 사용되는 다양한 구조물들에 대한 발파진동 허용기준들에 대해서 조사하였으며, 이를 통해 국내에서 적용되는 발파진동 허용기준들에 관련되는 문제점을 분석하고 이를 해소하기 위한 방안을 제시하였다. 더 나아가 본 연구에서는 국내·외에서 사용되는 다양한 발파진동 허용기준들을 상호 비교 및 분석한 후 교량 및 터널 등의 도로구조물 및 시설물들에 대한 발파진동 허용기준으로서 국내에서 사용할 수 있는 기준들을 구조물별로 제시하였다. 제시된 기준들의 실무적용을 위한 타당성 검증을 위해서 현장에서 계측되고 관측된 발파진동

1 정회원, 대구대학교 토목공학과 교수, 공학박사/기술사 (Member, Prof., Department of Civil Engrg., Daegu Univ., Tel: +82-53-850-6527, Fax: +82-53-850-6529, mson@daegu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 한국도로공사 도로사업처장 (Managing Director of Road Project Division, Korea Expressway Corporation)

3 비회원, 한국도로공사 도로처장, 기술사 (Managing Director of Expressway Maintenance Division, Korea Expressway Corporation)

4 비회원, 한국도로공사 창원지사장, 기술사 (Chief of Changwon Maintenance Office, Chief of Changwon Maintenance Office)

5 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수, 공학박사/기술사 (Member, Prof., Dept. of Civil Engineering, Sangji Univ.)

6 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유발 구조물 피해사례들을 수집한 후 제시된 기준들과 상호 비교분석하였다. 뿐만 아니라 제시된 기준들은 이론적 접근방법 및 수치해석적 방법을 통한 결과들과도 상호 비교분석하였다. 비교분석결과 제시된 도로구조물 및 시설물별 발파진동 허용기준들은 실무적용을 함에 있어서 타당성이 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 통해서 본 연구에서 제시된 기준들은 향후 국내·외 도로구조물 및 시설물들의 발파진동에 따른 피해유무를 판단하기 위한 기준으로서 실무에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : Road structures and facilities, Blasting-induced vibration, Allowable limit, Field measurement, Analytical analysis, Numerical analysis

1. 서 론

다양한 도로와 인접하여 철도 또는 도로시설물 계획 시 기존에는 도로 상부로 교량구조물을 설치하는 경우가 많았으나, 최근 들어서는 주변경관훼손 최소화, 안전상의 이유 및 토지보상비 최소화 등의 이유로 도로 하부로 터널이 계획되는 경우가 점점 증가되고 있다. 일반적으로 터널굴착은 발파굴착과 기계굴착으로 구분할 수 있는데 많은 터널이 여러 가지 이유로 인해 발파굴착을 통해 이루어지고 있다. 발파굴착은 화약폭발로 인해 진동을 유발시키며 지반매질을 통해 전파된 진동은 주변구조물 및 시설물 등에 피해를 유발시켜 공기 및 공사비 증가 등의 다양한 문제점을 초래할 수 있다. 발파진동과 관련해서 많은 연구가 국내·외적으로 다양한 관점에서 수행되어졌으며. 이와 관련한 국내·외 기준들에 대한 조사 및 분석은 최근 Son et al.(2013)에 의해서 상세히 이루어졌다. 또한, Ryu et al.(1994), Doo and Ryu(2004), Seo et al.(2013), Kim et al.(2013)이 국내 발파진동 허용기준의 문제점 등과 관련해서 연구내용을 발표하였으며, Park et al.(2004), Jeon et al.(2007), Moon and Shin(2007) 등은 발파진동과 관련한 수치해석 연구 결과들을 발표하였다. 기존의 연구결과들을 종합해 보면 발파진동에 따른 허용 진동기준치는 주택 또는 공장 구조물 등에 대해서는 국내·외를 불문하고 잘 정립되어 있으나, 도로 하부의 터널 발파굴착 등으로 인한 상부의 도로구조물 및 시설물들에 대한 허용진동 관련 기준들은 찾아보기 어려운 실정이다. 이로 인해 도로하부 터널 굴착 등으로 인해 발생하는 발파진동으로부터 상부 도로구조물을 안전하고 체계적으로 유지관리함에 있어서 큰 어려움이 존재하며 이에 대한 대책이 절실히 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구는 도로 구조물 및 시설물들에 대한

안전하고 합리적인 발파진동 허용기준을 수립하여 안전한 도로주행과 시설물의 장기적인 유지관리 및 운영을 확보하고자 함에 그 목적이 있다. 이를 위해서 우선 국내·외 다양한 발파진동 기준들을 수집 및 분석한 후 관련 문제점을 파악하였다. 그런 다음 다양한 국내·외 기준비교 및 검토를 통해 도로구조물 및 시설물에 적용될 수 있는 발파 진동 허용기준과 진동 측정방법 등을 제시하였으며, 국내·외에서 수집된 구조물의 피해유무 자료 분석, 도로 구조물에 대한 수치해석 및 이론적 검토 등을 통해 제시된 도로구조물 및 시설물별 발파 진동 허용기준을 검증하였다.

2. 국내·외 발파진동 허용기준 조사 및 문제점 분석

일반적으로 발파진동에 의한 구조물 및 시설물의 피해는 입자의 진동속도에 비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서 발파진동의 허용기준은 입자의 진동속도의 최대값(Peak Particle Velocity, PPV)을 대상으로 하면서 여러 기준들이 제시되고 있지만, 최대 진동값의 정의나 측정위치, 기준 접근방법 등이 서로 같지 않아 이에 대한 체계적인 조사 및 정리가 필요할 것으로 나타났다. Son et al.(2013)은 국외 34개 국가 및 기관, 국내 15개 기관 및 시방서에서 현재 사용되고 있는 기준들을 조사 및 비교검토 하였다. 진동으로 인한 구조물 피해와 관련한 각 국의 기준들을 비교검토한 결과, 각국의 기준은 사회·환경적 상황에 부합하는 축적된 자료를 토대로 제시되고 있음을 알 수 있었다. 하지만, 국내기준은 아직 까지 외국의 기준(독일 DIN 4150, 1971)을 그대로 준용하는 경우가 일반적으로 나타났다.

진동관련 국내·외 기준을 적용함에 있어서 사용자는 관련기준의 개발배경 등을 이해하는 것이 매우 중요한

것으로 나타났다. 왜냐하면, 각 국의 기준들은 구조형식, 재료특성, 진동주파수, 지반조건, 측정위치점, 진동속도 성분 등에 따라 서로 다른 기준값들을 제시하고 있기 때문이다. 예를 들면, 미국의 경우에는 채광터널 등의 발파작업을 통해 얻어진 수년간의 자료를 바탕으로 진동피해의 기준이 제시되었으며, 그러한 상황에 따라 대부분 목조주택에 발생될 수 있는 마감재의 손상을 기준으로 하고 있다. 일본의 경우에는 지진이 자주 발생하는 지역인 관계로 발파나 건설장비 진동에 건축물 피해는 거의 다루어지지 않고, 주로 인체감응을 대상으로 한 진동 기준이 제시되어 있으며, 스위스에서는 도로교통위원회에서 교통량에 따른 진동관련 데이터를 중심으로 기준을 제정하였다. 미국 탄광협회에서 수행한 수년간의 연구결과를 토대로 진동효과 문제를 다루고 있는 Siskind et al.(1980)은 더 높은 진동속도 값을 허용하고 있는데, 이는 아마도 상기 연구에서 취급한 구조형식이 타 연구에서의 대상들과 상이하다는 점에서 온 차이로 판단된다. Siskind 등의 연구는 주로 목조 구조물을 대상으로 하고 있는데, 일반적으로 목조 구조물은 동적인 하중에 대하여 벽돌이나 블럭으로 구성된 조적조건축물들과는 다르게 거동할 것이기 때문이다. 그러므로, 진동피해 기준은 건설재료에 대한 구분과 진동피해 수준에 대한 고려가 명확히 구분된 후 제시되어야 할 필요가 있을 것으로 나타났다. 국내에서 많이 인용되고 있는 DIN(독일기준)이나 USBM(미국기준)등과 같은 기준들은 실제적으로 이러한 사실을 고려하고 있음에도 불구하고 국내에서는 이러한 사항들에 대한 고려가 미흡한 실정이다. 측정위치 또한 진동기준에 대한 중요한 요소로서 작용한다. 구조물의 기초에서 측정한 진동속도는 기초아래 지반에서 측정한 값과는 진동특성에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있다. 말뚝향타 등에 의한 지반진동은 기초와 지반의 상호작용에 의해서 크게 영향을 받을 수 있는 반면, 노천발파와 같은 대량발파에서는 그 영향이 작은 것으로 나타날 수 있다. 측정위치에 대한 문제는 여러 나라 기준들의 허용 값들이 서로 상이한 수준을 나타내는 이유 중의 하나로서 작용할 수 있으나, 종종 간과되는 경향이 있다. 따라서, 이러한 점을 고려하여 기준을 이해하고 또한 제시되어야 할 것으로 나타났다. 더불어 미국이나 독일 등의 기준은 진동속도의 단일성분의 최대값을 사용하고 있으나, 스위스 기준은 진동속도의 3방향 성분의 벡터합을 이용하여 기준을 제시하고 있으므로 진동의 영향을 평가하는데 있어서는 기

준 값을 적용하는데 이에 대해 명확히 파악하고 이해할 필요가 있다.

결론적으로 국내·외에서 제시된 다양한 발파진동 기준은 교량 등의 도로구조물을 포함하는 경우도 있지만 대부분의 기준이 건축구조물을 대상으로 하면서 구조형식, 재료조건, 노후화 정도, 중요도 등에 따라 분류하여 기준을 제시하고 있었다. 따라서 본 연구를 통해 발파진동에 대한 기준이 특정화되어 제시되지 않은 도로구조물은 기존의 여러 기준들을 고려하면서 구조물의 종류나, 노후화 정도, 민감도, 측정위치, 진동특성 등을 종합적이고 체계적으로 반영하여 도로구조물 자체에 대한 발파진동 관련 허용기준을 제시해야 할 필요가 있는 것으로 나타났다.

3. 도로구조물 발파진동 허용기준 제시

도로구조물에 대한 발파진동 관련 허용기준을 합리적으로 제시하기 위한 첫 단계로서 먼저 다양한 발파진동 허용기준들 중에서 자료로서 활용할 수 있는 기준들을 선별하였다. 다양한 기준들 중에서 발파진동으로 인한 구조물의 피해정도를 현실적으로 고려하기 위해 발파진동수(frequency)를 인자로서 사용하는 기준들을 이용하는 것이 적절한 것으로 나타났다. 더 나아가 고려될 사항은 구조물의 노후화에 따른 사항과 발파진동의 지속성과 관련된 사항들로 나타났다.

도로구조물에 대한 발파진동 관련 허용기준을 구조물별로 제시하기 위해서 도로구조물의 종류를 교량, 터널, 포장(콘크리트, 아스팔트), 암거, 매설관, 옹벽(방음벽기초 포함), 중앙분리대, 민감구조물 등으로 구분하였다. Table 1은 본 연구를 위해 선별된 기준들 중에서 도로구조물과 직접 관련된 기준과 유사구조물에 대한 기준을 토대로 설정한 것이며, Fig. 1은 설정된 관련기준들을 도로구조물 및 나라별로 상호 비교한 것을 보여주고 있다. 그림에서 스위스의 기준은 속도벡터의 합으로서 표시된 것이며, 터키 및 인도의 기준은 관련국의 구조물이 다른 나라에 비해 상대적으로 약하다는 것을 전제로 한 것이기 때문에 다른 나라들에 비해 허용진동기준 값들이 상대적으로 작게 나타난 것을 알 수 있다. 미광무성(USBM) 및 노천광업청(OSM)의 기준은 주로 1층 및 2층의 목조형 주거주택을 대상으로 한 것으로서 외벽의 회벽 모르터 등에서 발생하는 결함을 기준으로 하였기 때문에 도로구조물에 대한 기준으로는 적절하

Table 1. Comparison of allowable limit of blasting-induced vibration (mm/sec)

Country		USA	Germany			England		France			Switzerland			Australia	
Structure			1–10 Hz	10–50 Hz	50–100 Hz	4–15 Hz	>15 Hz	4–8 Hz	8–30 Hz	30–100 Hz	<30 Hz	30–60 Hz	>60 Hz	4–15 Hz	>15 Hz
Bridge			20 ¹⁾	20–40 ¹⁾	40–50 ¹⁾	50 ²⁾						45 ⁹⁾	60 ⁹⁾	90 ⁹⁾	100 ¹⁰⁾
Tunnel			20 ¹⁾	20–40 ¹⁾	40–50 ¹⁾	50 ²⁾						45 ⁴⁾	60 ⁴⁾	90 ⁴⁾	100 ¹⁰⁾
												30 ⁵⁾	40 ⁵⁾	60 ⁵⁾	
												15 ⁶⁾	20 ⁶⁾	30 ⁶⁾	
												15 ⁷⁾	20 ⁷⁾	30 ⁷⁾	
Pavement	Concrete					15–>20 ³⁾	20–>50 ³⁾ at 40 Hz								
	Asphalt														
Culvert			20 ¹⁾	20–40 ¹⁾	40–50 ¹⁾	50 ²⁾						30 ⁵⁾	40 ⁵⁾	60 ⁵⁾	100 ¹⁰⁾
Buried pipe	Steel			100								30 ⁸⁾	40 ⁸⁾	60 ⁸⁾	
	Concrete			80								30 ⁸⁾	40 ⁸⁾	60 ⁸⁾	
	Plastic			50								30 ⁸⁾	40 ⁸⁾	60 ⁸⁾	
Retaining wall (Noise barrier foundation)			20 ¹⁾	20–40 ¹⁾	40–50 ¹⁾	50 ²⁾						45 ⁹⁾	60 ⁹⁾	90 ⁹⁾	100 ¹⁰⁾
Median structure						15–>20 ³⁾	20–>50 ³⁾ at 40 Hz					45 ⁹⁾	60 ⁹⁾	90 ⁹⁾	100 ¹⁰⁾
Sensitive structure			3	3–8	8–10			4–6	6–9	9–12	7.5	10	15		
Measurement location	Foundation		Foundation			Foundation		Foundation			Foundation			Foundation	
Measurement component	PPV		PPV			PPV		PPV			Vector sum			PPV	

Country		Turkey			India			China			Russia	Dowding (1996)	AASHTO (1990)
Structure		<10 Hz	10–40 Hz	40–100 Hz	<8 Hz	8–25 Hz	>25 Hz	<10 Hz	10–50 Hz	50–100 Hz			
Bridge		11 ¹¹⁾	11->14 ¹¹⁾	14 ¹¹⁾	10 ¹³⁾	20 ¹³⁾	25 ¹³⁾	30–40 ¹⁴⁾	35–45 ¹⁴⁾	42–50 ¹⁴⁾	120 ¹⁶⁾	50	25–40 ¹⁹⁾
Tunnel		11 ¹¹⁾	11->14 ¹¹⁾	14 ¹¹⁾	10 ¹³⁾	20 ¹³⁾	25 ¹³⁾	100 – 200 ¹⁵⁾			120 ¹⁶⁾	50 ¹⁸⁾	25–40 ¹⁹⁾
Pavement	Concrete	8 ¹²⁾	8->12 ¹²⁾	12 ¹²⁾									
	Asphalt												
Culvert		11 ¹¹⁾	11->14 ¹¹⁾	14 ¹¹⁾	10 ¹³⁾	20 ¹³⁾	25 ¹³⁾	30–40 ¹⁴⁾	35–45 ¹⁴⁾	42–50 ¹⁴⁾	120 ¹⁶⁾	50 ¹⁸⁾	25–40 ¹⁹⁾
Buried pipe	Steel												
	Concrete												
	Plastic												
Retaining wall (Noise barrier foundation)		11 ¹¹⁾	11->14 ¹¹⁾	14 ¹¹⁾	10 ¹³⁾	20 ¹³⁾	25 ¹³⁾	30–40 ¹⁴⁾	35–45 ¹⁴⁾	42–50 ¹⁴⁾	120 ¹⁶⁾	50 ¹⁸⁾	25–40 ¹⁹⁾
Median structure		11 ¹¹⁾	11->14 ¹¹⁾	14 ¹¹⁾	10 ¹³⁾	20 ¹³⁾	25 ¹³⁾	30–40 ¹⁴⁾	35–45 ¹⁴⁾	42–50 ¹⁴⁾	120 ¹⁶⁾	50 ¹⁸⁾	25–40 ¹⁹⁾
Sensitive structure		3	3–8	8	2	5	10	1–3	2–4	3–5	30 ¹⁷⁾	12	2.5
Measurement location		Foundation			Foundation			Foundation			Foundation	Foundation	Foundation
Measurement component		PPV			PPV			PPV			PPV	PPV	PPV

- 1) Using the limit of industrial building (DIN 4150, 1999).
- 2) Using the limit of reinforced structure (BS 7385–2, 1993).
- 3) Using the limit of unreinforced structure (BS 7385–2, 1993).
- 4) Using the limit of tunnel in hard rock (Norm 640 312a, 1992).
- 5) Using the limit of tunnel and pipe in soft rock (Norm 640 312a, 1992).
- 6) Using the limit of tunnel intermediate ceiling (Norm 640 312a, 1992).
- 7) Using the limit of pavement (Norm 640 312a, 1992).
- 8) Using the limit of pipe buried in shallow depth (Norm 640 312a, 1992).
- 9) Using the limit of reinforced concrete or concrete bearing wall (Norm 640 312a, 1992).
- 10) Using the limit of unoccupied structure of reinforced concrete (AS 2187.2, 2006).
- 11) Using the limit of industrial building (Karadogan et al., 2013).
- 12) Using the limit of concrete building (Karadogan et al., 2013).
- 13) Using the limit of industrial reinforced structures not belonging to the owner (DGMS Standard).
- 14) Using the limit of reinforced structure (GB6722, 2003).
- 15) Using the limit of road tunnel (GB6722, 2003).
- 16) Using the limit of waterway tunnel, high strength concrete conduit, and elevated road.
- 17) Using the limit of hospital structure.
- 18) Using the limit of industrial building (Dowding, 1996).
- 19) Using the limit of engineered structure (AASHTO, 1990).

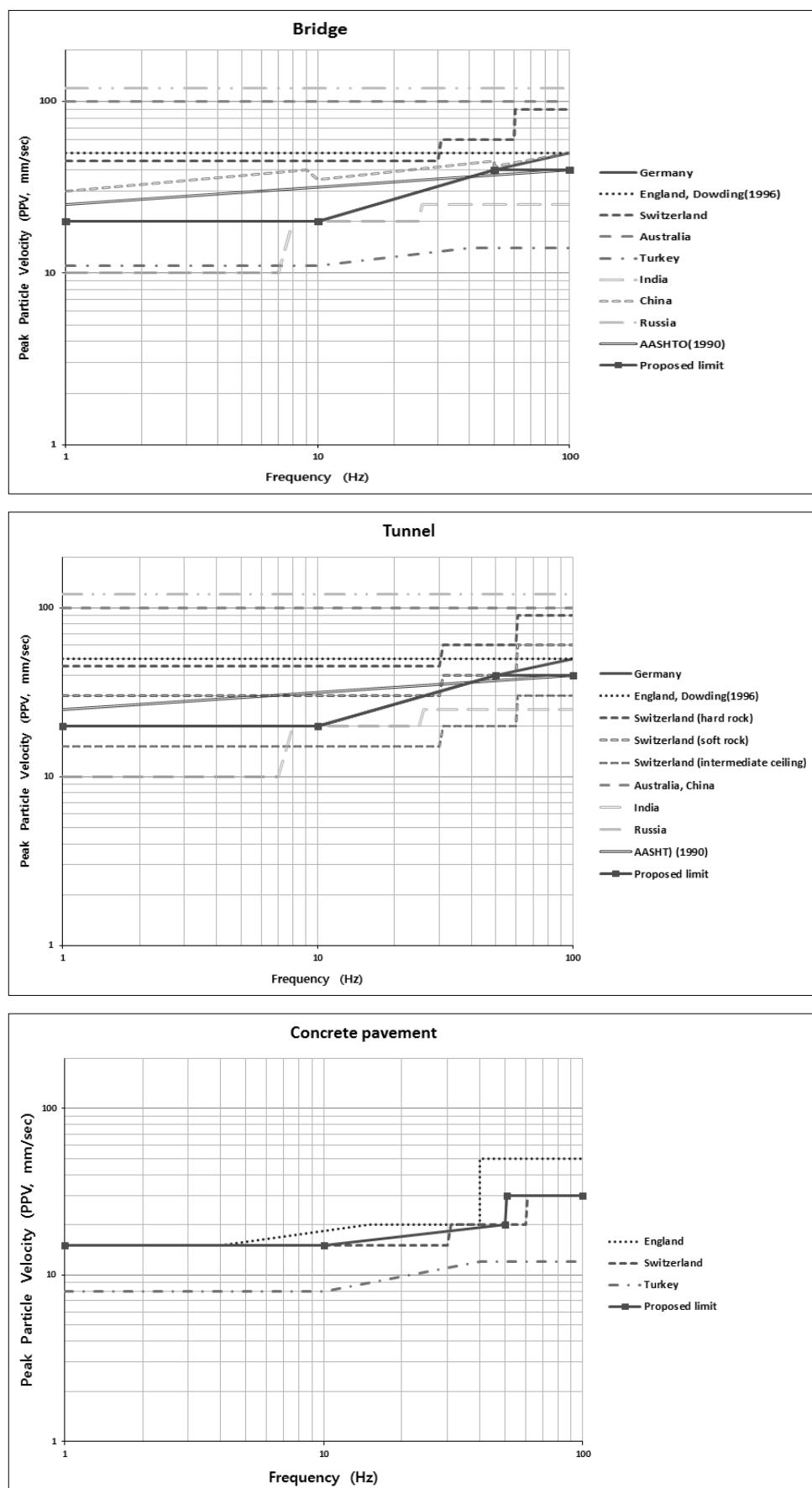


Fig. 1. Comparison of allowable limit of blasting-induced vibration and proposed limit

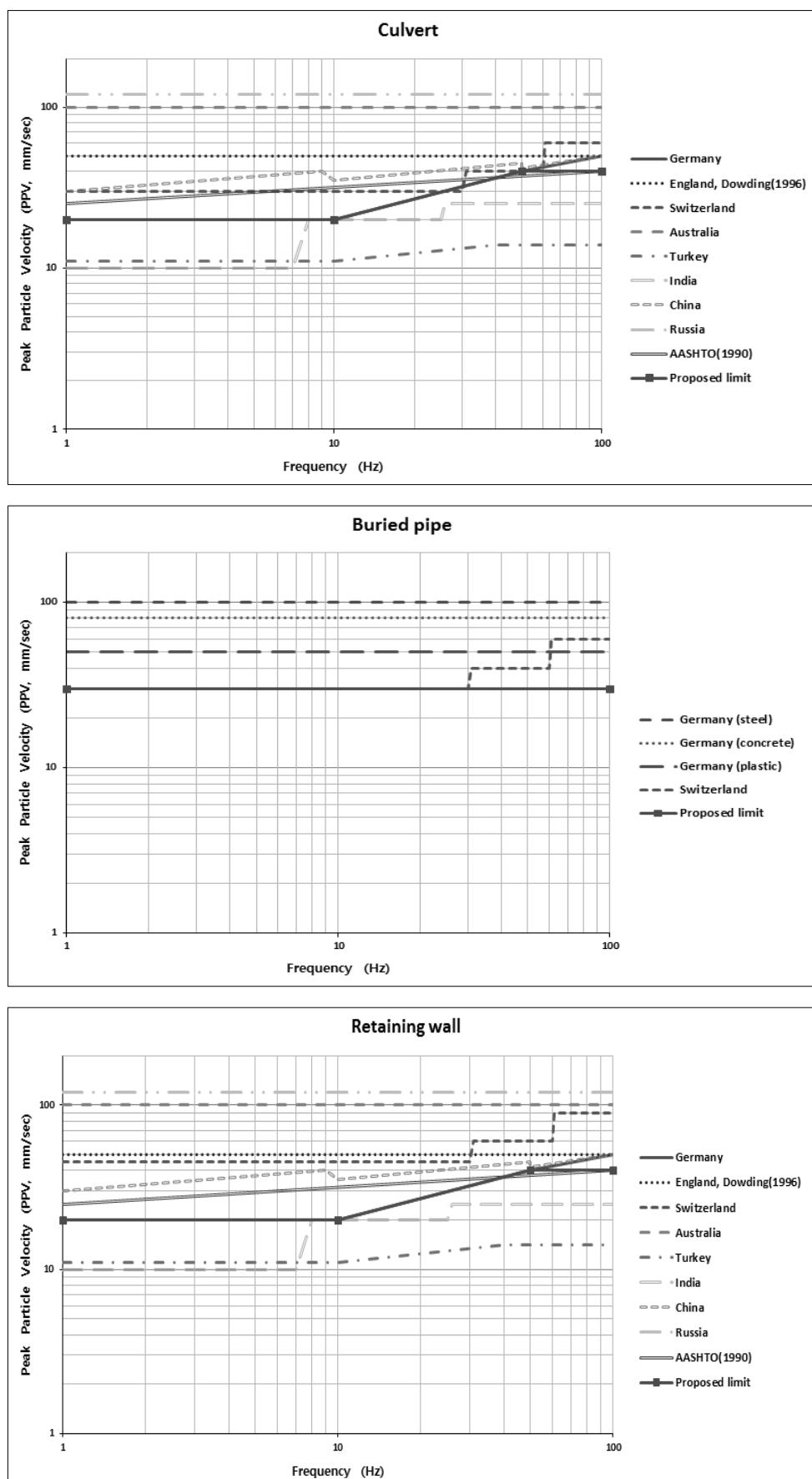


Fig. 1. Comparison of allowable limit of blasting-induced vibration and proposed limit (Continued)

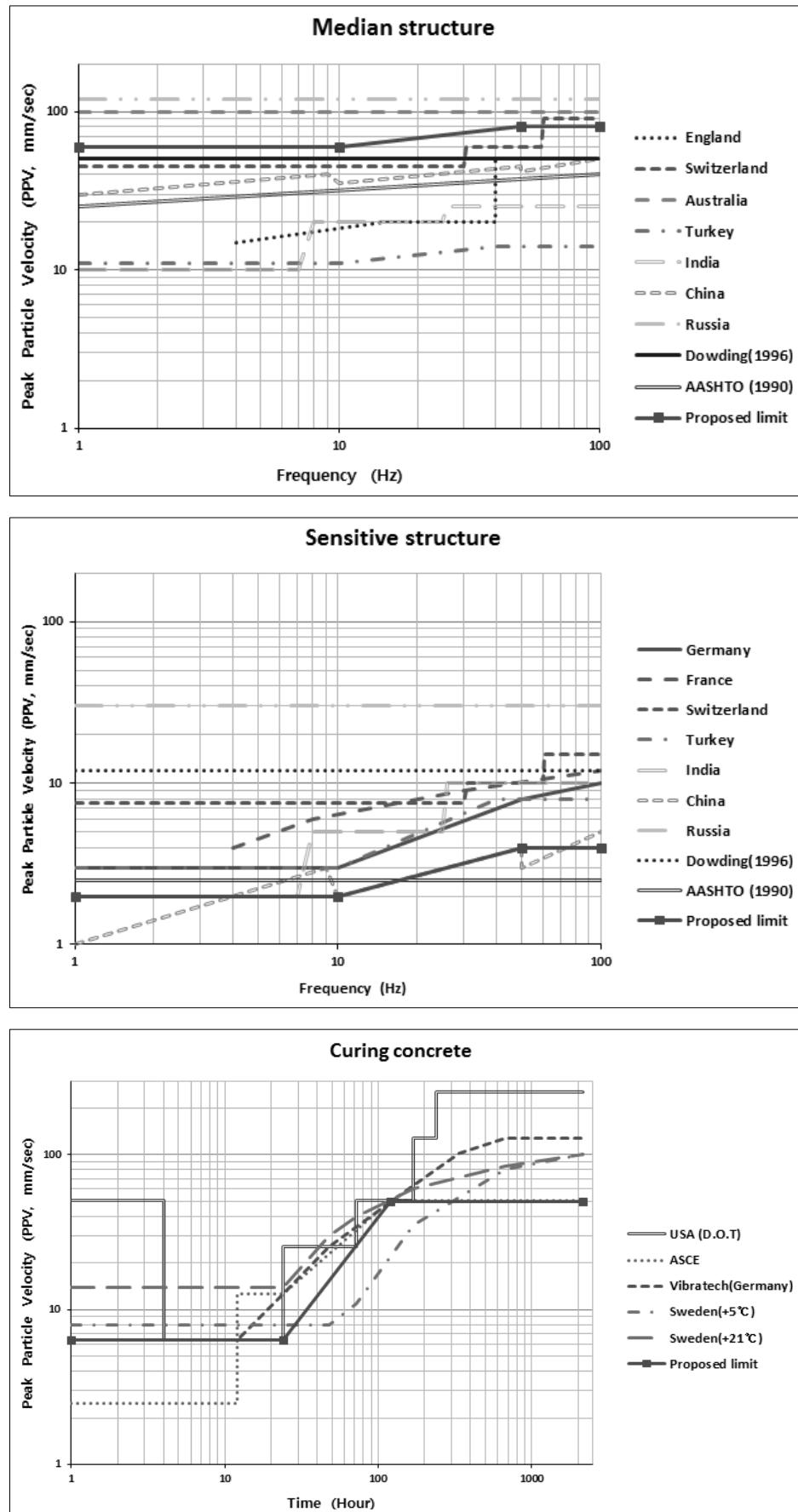


Fig. 1. Comparison of allowable limit of blasting-induced vibration and proposed limit (Continued)

지 않은 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 다양한 국가의 기준들을 비교 및 분석함으로써 얻어진 관련 내용들을 종합하여 다양한 도로구조물에 대한 발파진동 허용기준들을 또한 Fig. 1에 제안기준으로 표시하여 나타내었다. 제안기준의 설정은 우선 나라별로 제시된 다양한 구조물에 대한 기준들 중에서 본 연구의 대상인 도로구조물과 직접 관련된 기준과 유사구조물에 대한 기준을 나라별로 비교한 다음 보다 안전하고 합리적인 기준이 될 수 있도록 고려하였다. 교량, 터널, 암거 및 옹벽(방음벽기초 포함)에 대한 제안기준들은 독일의 기준을 일반적으로 따르면서 높은 주파수에서 약간 안전측이 되도록 조정하였다. 포장구조물은 콘크리트포장 및 아스팔트포장으로 구분하였으며 콘크리트포장은 스위스의 기준을 따르면서 주파수 범위대를 고려하여 약간 조정하였으며 아스팔트포장은 콘크리트포장 강성의 1/5로 가정하여 기준을 설정하였다. 매설관은 스위스의 각종 매설관에 해당하는 기준을 따르면서 높은 주파수에서 약간 안전측이 되도록 조정하였다. 중앙분리대는 구조물의 중요도가 상대적으로 높지 않아 각 나라의 콘크리트에 해당하는 기준들 중에서 상대적으로 높은 값의 기준들을 고려하면서 피해사례들에 대한 진동값을 고려하여 산정하였다. 민감구조물은 낮은 주파수 범위에서는 기존에 국내에서 사용하고 있는 기준을 따르도록 하였으며 주파수가 커짐에 따

Table 2. Proposed allowable limit of blasting-induced vibration (cm/sec)

Road structures	Transient vibration		
	1~10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz
Bridge	2.0	2.0 → 4.0	4.0
Tunnel	2.0	2.0 → 4.0	4.0
Pavement	Concrete	1.5	1.5 → 2.0
	Asphalt*	7.5	7.5 → 10.0
Culvert	2.0	2.0 → 4.0	4.0
Buried pipe	3.0		
Retaining wall (Noise barrier foundation)	2.0	2.0 → 4.0	4.0
Median structure	6.0	6.0 → 8.0	8.0
Sensitive structure	0.2	0.2 → 0.4	0.4
Measurement location	Foundation		
Meaurement Component	PPV (Using peak component particle velocity. One of horizontal components is measured parallel to a structure)		

* The asphalt pavement assumed to be 1/5 of the concrete pavement stiffness

라 국외 기준들을 참조하면서 약간 안전측이 되도록 조정하였다. 양생중인 콘크리트는 여러 기준들을 검토한 후 타설 후 12시간 이내에서는 독일 및 미국 교통국의 기준을 반영하였으며 이후에 대해서는 여러 기준들과 비교하여 약간 안전측이 될 수 있도록 고려하였다.

Table 2는 Fig. 1의 제안기준에 대한 신설 내지 상태가 양호한 도로구조물별 충격진동에 대한 발파진동 허용기준 값을 나타낸 것이다. 노후화되었거나 상태가 양호하지 않은 도로구조물은 신설 내지 상태가 양호한 도로구조물의 1/2정도의 기준을 따르는 것으로 하며(Chae, 1978; Dowding, 1996), 연속진동에 대하여는 충격진동의 1/3을 따르는 것으로 한다(DIN 4150, 1970).

Fig. 1은 또한 양생중인 도로구조물에 대한 각 기관의 허용진동치를 비교한 것을 보여주고 있다. 이에 대한 비교분석으로부터 양생중인 도로구조물에 대한 허용진동 기준을 Fig. 1에 제안기준으로 표시하여 나타내었으며, Table 3은 제안기준에 대한 발파진동 허용기준 값을 나타낸 것이다.

상기 제시된 기준들은 다음 절에서 설명한 다양한 현장계측자료 및 관련 정보들을 토대로 일차적으로 확인 및 검증되었으나 향후 더 많은 현장계측자료 및 관련 정보들을 토대로 추가검증 및 필요에 따라 조정이 수반될 수도 있을 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 도로구조물 자체만에 대한 발파진동 관련 허용기준을 제시한다는 점에서 그 의의가 상당할 것으로 판단되며 향후 관련 기관이나 설계회사의 발파진동 관련 규정 수립시 지침자료로서도 활용될 것으로 기대된다. 이를 통해 다양한 도로구조물들이 발파진동으로부터 보다 안전하게 보호될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 제시기준들의 검증 및 확인

앞에서 제시한 도로구조물에 대한 발파진동 허용기준의 확인 및 검증을 위하여 우선 국내·외 발파진동에 따른 구조물 피해유무에 대한 자료들을 조사하였다. 이

Table 3. Proposed allowable limit of blasting-induced vibration of curing concrete (cm/sec)

Concrete curing period	Allowable limit
0 ~ 24 hours	0.635
24 hours ~ 5 days	0.635 → 5.08
After 5 days	5.08

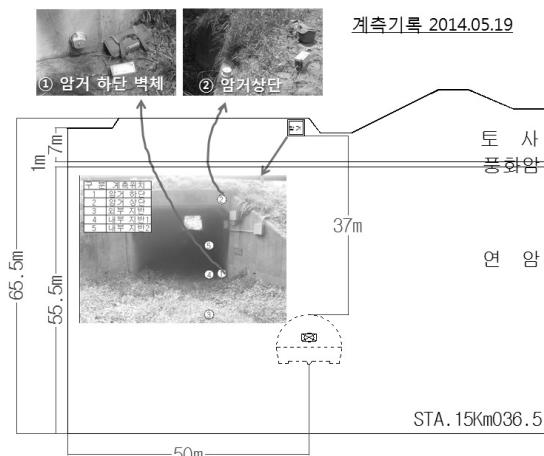
와 더불어 수치해석 및 이론적 접근방법을 이용한 검토도 수행하였다.

먼저 국내 현장에서 계측된 현장사례 및 환경분쟁조정위원회의 발파진동 영향 조정사례(2010-2013)로부터 97개의 자료가 분석되었으며 국외 47개 발파진동 영향 사례(Jones and Stokes, 2004) 중 콘크리트 및 조적식 구조물에 해당되는 사례들을 활용하였다.

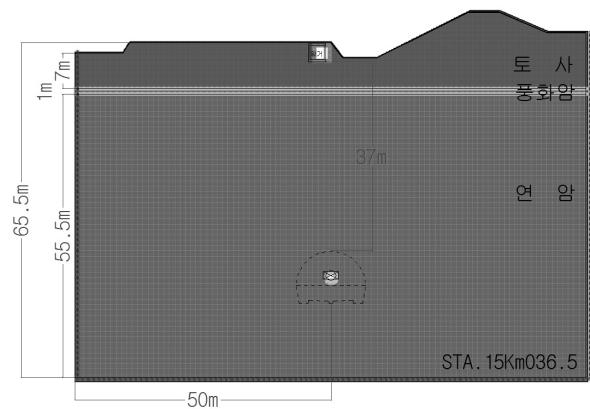
발파진동에 따른 구조물의 피해유무를 파악하기 위하여 현장계측 자료와 유한차분 해석 프로그램 FLAC2D (Itasca, 2008)을 이용하여 수치해석적 검토를 수행하였다(Korea Expressway Corporation, 2013). 먼저 현장계측 자료를 토대로 수치해석적 접근방법의 타당성을 검증한 후(Fig. 2 및 Fig. 3) 암거 및 포장구조물에 대해 발파하중을 증가시켜 가면서 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 콘크리트 구조설계기준(2007)에 의거하여 암거 구조물 벽체 및 슬래브에 작용하는 응력과 콘크리트의 허용응력을 비교하여 안전성을 평가하였다. 해석결과 암거구조물에 대해서 보수적인 값(허용응력의 1/4 적용)을 적용한다면 구조물의 허용 진동속도는 약 4cm/sec로 나타났으며 합리적으로(허용응력의 1/2 적용)는 8cm/sec까지 적용할 수 있음을 알았다. 포장구조물의 해석과 관련해서 도로포장 구조설계요령(2011)에서는 설계등급의 포장구조물의 영구변위는 10mm 이하가 되도록 제시하였다. 해석결과 포장면의 최대진동 속도가 10cm/sec일 때 변위는 약 0.42mm로 나타나 허용변위 기준의 4% 정도에 불과한 것으로 나타났다.

구조물에 대한 발파진동 유발에 의한 직접적인 발생 응력은 이론적으로 다음과 같이 산정할 수 있다.

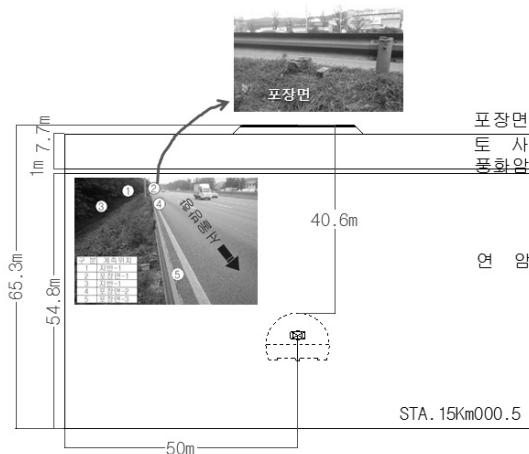


(a) Measurement location

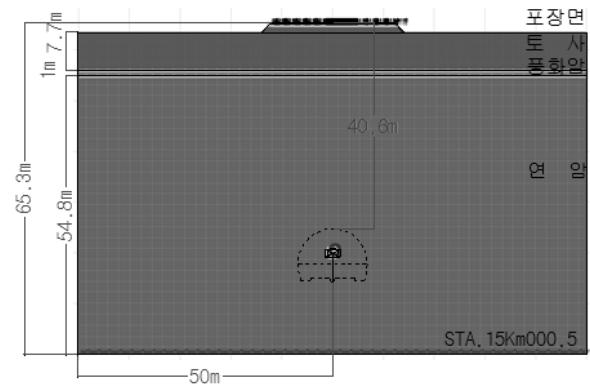


(b) Modeling

Fig. 2. Measurement location and modeling of culvert



(a) Measurement location



(b) Modeling

Fig. 3. Measurement location and modeling of pavement

구조물 피해 : 최대진동속도 cm/s (kine)에 관계됨	\bullet 발생 인장응력 $\rightarrow \sigma_{ts} = \frac{V_{max} E_s}{C_s}$ \bullet 발생 전단응력 $\rightarrow \tau_{max} = \frac{V_{max} G_s}{C_s}$
--	---

여기서, σ_{ts} =발생인장응력, τ_{max} =발생전단응력, V_{max} =발파진동속도, E_s =지반의 탄성계수, G_s =지반의 전단탄성계수, C_s =지반의 탄성파 전파속도)

만약, 콘크리트구조물 아래 양호한 암반지반의 $C_s = 300,000\text{cm/sec}$, $E_s = 2.0\times 10^5 \text{kg/cm}^2$, $v = 0.2$ 이고 콘크리트의 허용인장 및 전단응력이 3kg/cm^2 이라면 구조물에 인

장균열을 유발하지 않는 최대진동속도 $V_{max} = 4.5\text{cm/sec}$ 이며, 전단균열을 유발하지 않는 최대진동속도 $V_{max} = 5.4\text{cm/sec}$ 로 계산된다.

국내·외에서 조사된 발파진동에 따른 구조물 피해유무에 관한 자료들과 수치해석 및 이론적 접근방법을 이용한 내용들을 토대로 앞에서 제시한 도로구조물에 대한 발파진동 허용기준에 대해 확인 및 검증을 수행하였다. Fig. 4는 도로구조물별로 제시된 허용기준과 확인 및 검증을 위한 관련 사항들을 함께 나타낸 것이다. 교량 및 터널과 같은 대부분의 도로구조물에 대한 발파진동 허용기준의 검토를 위해 조사된 국내·외 자료들 중 철근콘크리트 및 콘크리트구조물에 관련된 경우들을 고

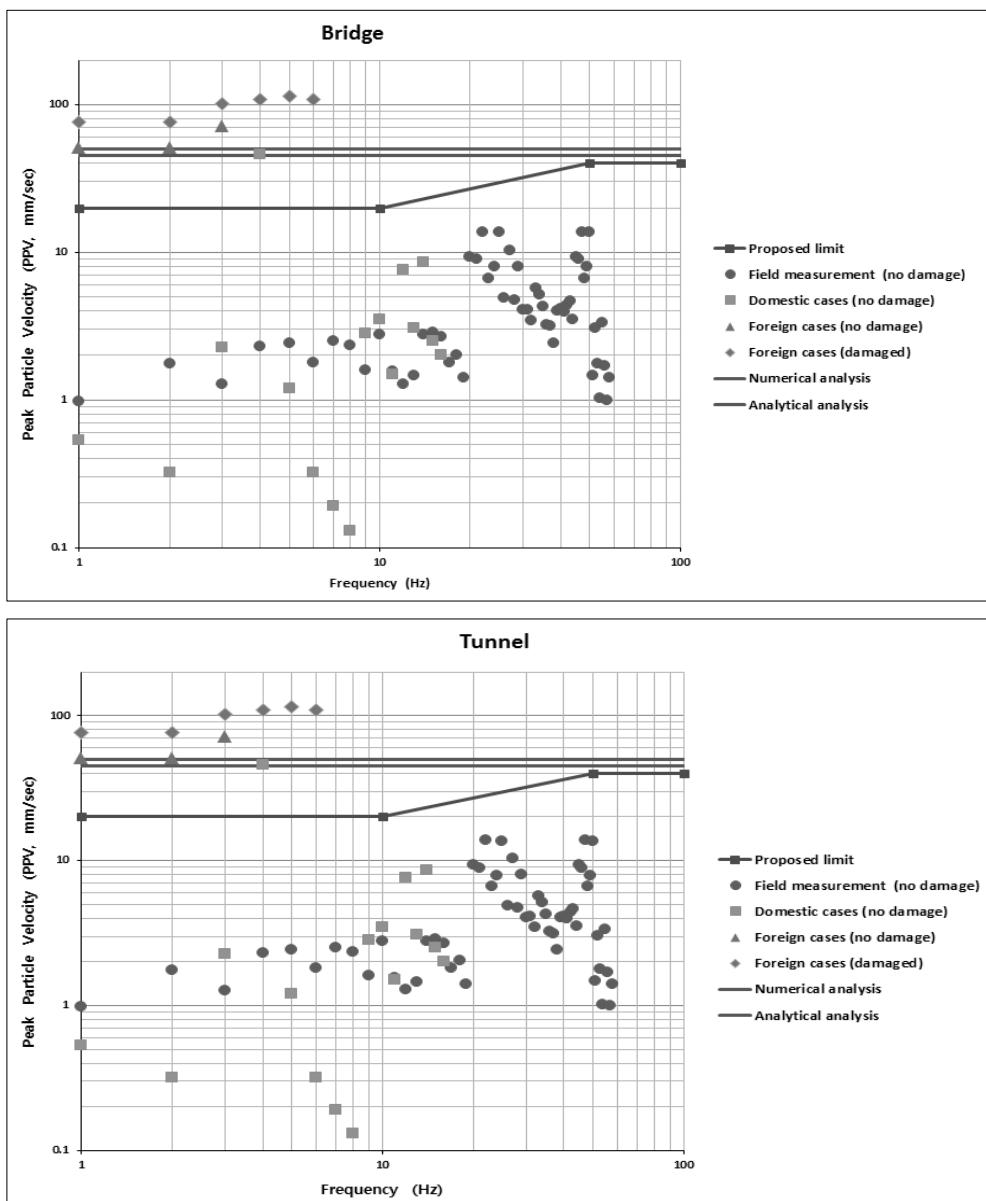


Fig. 4. Proposed limit and its verification

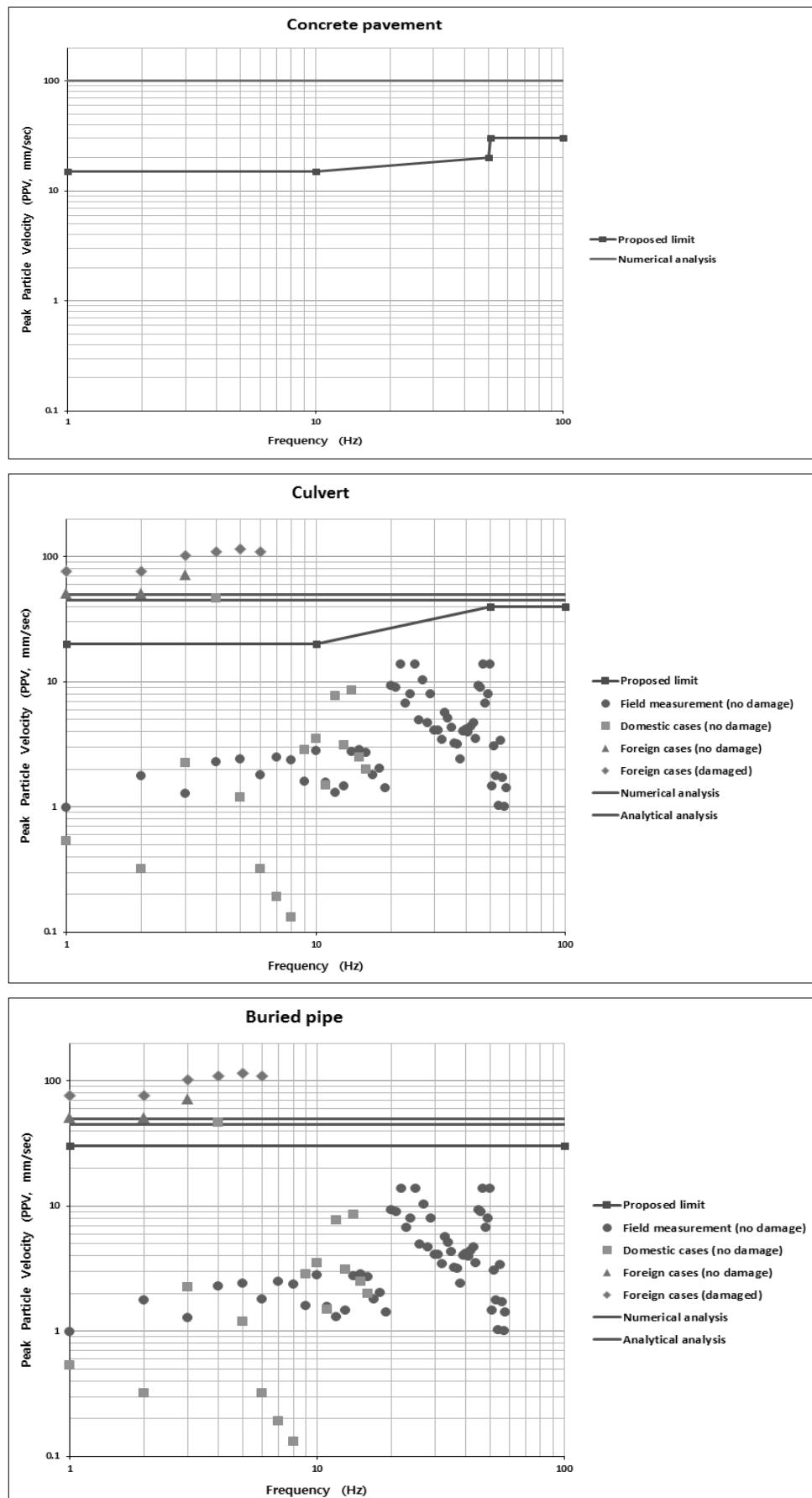


Fig. 4. Proposed limit and its verification (Continued)

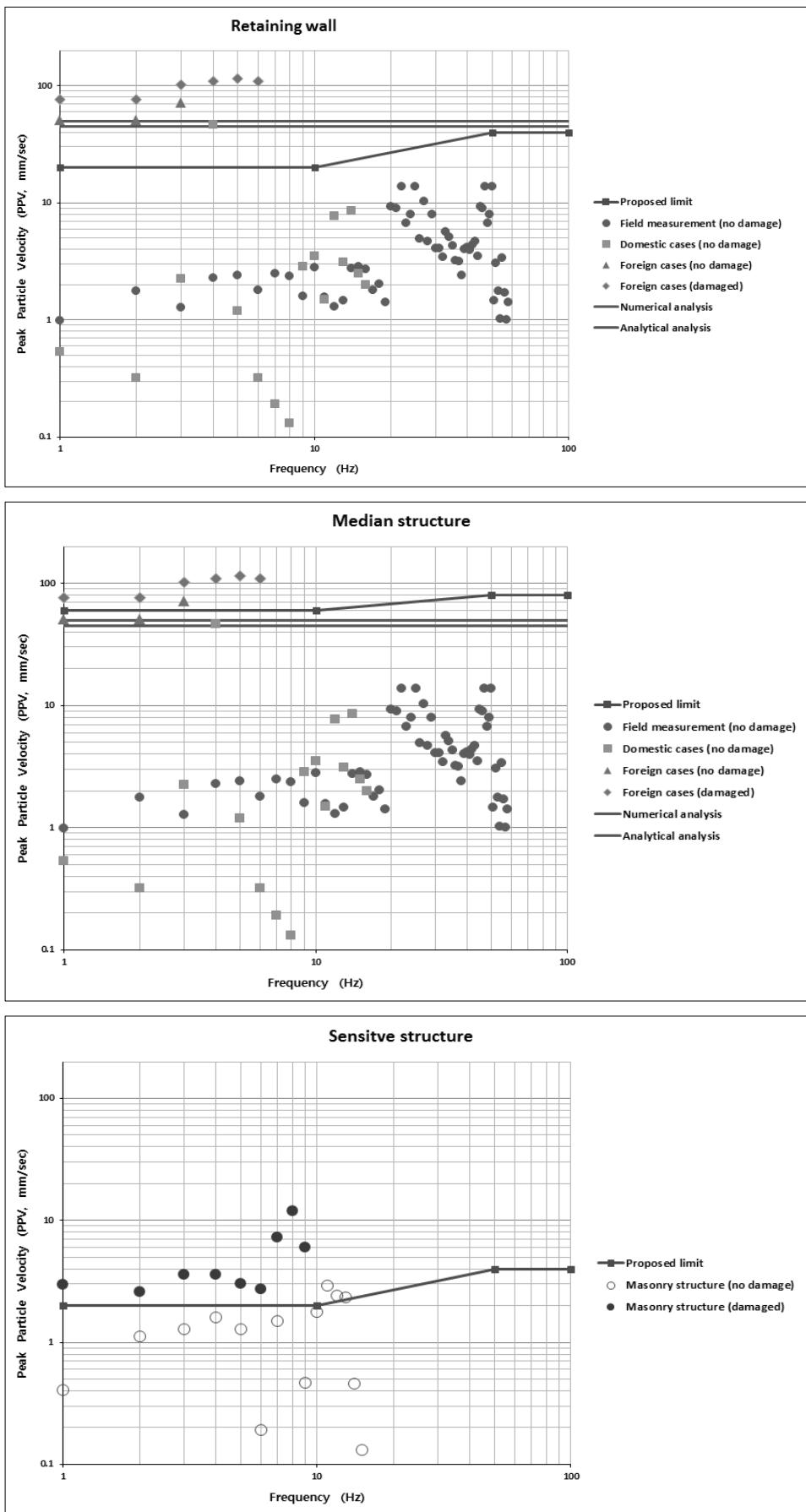


Fig. 4. Proposed limit and its verification (Continued)

려하였으며 민감구조물에 대하여는 조사된 자료들 중 조적식 블록구조물과 목조구조물에 관련된 경우들을 고려하였다. 도로구조물 중 중앙분리대는 구조물의 특성상 허용기준을 완화시켜 적용하였으며, 포장구조물에 대해 적용된 수치해석적 검토는 포장구조물의 허용침하인 10mm(도로포장 구조설계요령, 2011)에 대한 발파진동 값을 고려하였다. 국내·외에서 조사된 자료들은 진동의 크기와 구조물 피해유무만 나타나 있어 구조물의 고유진동특성을 파악할 수 없었으며, 수치해석이나 이론적 검토도 구조물의 고유진동특성을 포함하지 않았다. 따라서, 그래프의 가로축은 허용진동기준에 대해 선 구조물의 고유진동수를 나타내고 있으나 확인 및 검증자료들에 대해선 단순히 자료들의 일련번호임을 밝혀두고자 한다.

비교결과들을 토대로 판단할 때 그림에서 보는 바와 같이 제시된 발파진동 허용기준은 발파진동에 따른 도로구조물의 안전유무의 판단을 위해서 실무에서 적용하여 사용하기에 무리가 없을 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 본 연구를 통해 제안된 기준들은 향후 보다 많은 현장계측자료 및 관련 정보들을 토대로 추가검증 및 필요에 따라 조정이 수반될 수도 있을 것으로 판단되나, 현시점에서 도로구조물 자체만에 대한 발파진동 관련 허용기준을 제시한다는 점에서 그 의의가 상당할 것으로 예측되며 향후 관련 기관이나 설계회사의 도로구조물에 대한 발파진동 관련 규정 수립시 지침자료로서 활용될 것으로 기대된다. 이를 통해 다양한 도로구조물들이 발파진동으로부터 안전하게 보호될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 도로 구조물 및 시설물들에 대한 안전하고 합리적인 발파진동 허용기준을 제시하기 위한 것으로서 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 국내·외 다양한 발파진동 기준들을 수집 및 분석하고, 발파진동 허용기준 개발배경의 파악과 더불어 관련기준들에 대한 문제점을 파악한 결과, 각국의 기준은 사회·환경적 상황에 부합하는 자료를 토대로 제시되고 있음을 알 수 있었다. 또한, 각 국의 기준들은 구조형식, 재료특성, 진동주파수, 지반조건, 측정위치점, 진동속도 성분 등에 따라 서로 다른 기

준값들을 제시하고 있으나, 국내기준은 아직까지 외국의 기준을 그대로 준용하면서도 구조물의 노후화 정도나 진동주파수, 민감도, 측정위치, 진동속도 성분 등을 종합적이고 체계적으로 반영하지 못하고 있는 것으로 나타났다.

- (2) 국내·외에서 제시된 다양한 발파진동 기준들은 교량 등의 도로구조물을 포함하는 경우도 있지만 대부분의 기준들이 건축구조물을 대상으로 하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 발파진동에 대한 기준이 특정화되어있지 않은 도로구조물은 기존의 여러 기준들을 종합적으로 검토하여 도로구조물별 발파진동 관련 허용기준을 제시해야 할 필요가 있는 것으로 나타났다.
- (3) 도로구조물에 대한 발파진동 유발 구조물의 피해정도를 현실적으로 고려하기 위해 다양한 국내·외 기준들 중 주파수(frequency)를 인자로서 사용하는 기준들을 조사 및 선별하고 상호비교 하였다. 도로구조물의 종류는 교량, 터널, 포장(콘크리트, 아스팔트), 암거, 매설관, 옹벽(방음벽기초 포함), 중앙분리대, 민감구조물 및 양생중인 콘크리트로 구분하였으며 본 연구를 위해 선별된 기준들 중에서 도로구조물과 직접 관련된 기준과 유사구조물에 대한 기준들을 비교 및 분석함으로써 안전하고 합리적인 기준들이 될 수 있도록 도로구조물별 발파진동 허용기준을 제시하였다.
- (4) 국내·외에서 조사된 발파진동에 따른 구조물 피해유무에 관한 자료들과 수치해석 및 이론적 접근방법을 이용한 내용들을 토대로 도로구조물별 제시된 발파진동 허용기준에 대한 확인 및 검증을 수행하였다. 검증결과 제시된 발파진동 허용기준은 발파진동에 따른 도로구조물의 안전유무의 판단을 위해서 실무에서 적용하여 사용하기에 무리가 없는 것으로 나타났다.
- (5) 본 연구를 통해 제안된 기준들은 향후 보다 많은 현장계측자료 및 관련 정보들을 토대로 추가검증 및 필요에 따라 조정이 수반될 수도 있을 것으로 판단되나, 현시점에서 도로구조물 자체만에 대한 발파진동 관련 허용기준을 제시한다는 점에서 그 의의가 상당할 것으로 예측되며 향후 관련 기관이나 설계회사의 도로구조물에 대한 발파진동 관련 규정 수립시 지침자료로서 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌 (References)

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (1990), Standard Recommended practice for evaluation of transportation-related earthborne vibrations, Washington, D.C.
2. Australian Standard (2006), Explosives-Storage and use, Part 2: Use of explosives, As 2187.2-2006.
3. British Standard (1993), Evaluation and measurement for vibration in buildings. BS7385 Part 1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings.
4. British Standard (1993), Evaluation and measurement for vibration in buildings. BS7385 Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration.
5. Doo, J. and Ryu, C. (2004), A Review on the Problems of Korean Blast Damage Criterion, J. of Korean Society for Explosives and Blasting Engineering, Vol.22, No.3, pp.85-95.
6. Dowding, C. H. (1996), Construction vibrations, Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ.
7. German Standards (1999), Structural vibrations, Part 2: Effects of vibration on structures. DIN4150-3, Berlin.
8. Itasca Consulting Group, Inc. (2008), "FLAC2D Manual: Dynamic Analysis", Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.
9. Jeon, S., Jang, Y., and Jung, D. (2007), Estimation of the Blasting Distance Satisfying Allowable Peak Particle Velocity - Analytical & Numerical Analysis Approach, J. of Korean Society of Disaster Prevention, Vol.7, No.1, pp.39-46.
10. Kim, N., Lee, J., and Cho, K. (2013), A Review of Standards for Allowable Limit of Blast Vibration According to the Safety Facilities and Improvement of Problems, J. of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering, Vol.31, No.2, pp.50-58.
11. Korea Expressway Corporation (2013), Report of the investigation of blasting influence zone due to KTX tunnel construction under Kyungbu expressway, pp.103-116.
12. Karadogan, A., Kahriman, A., and Ozer, U. (2013), A new damage criteria norm for blast-induced ground vibrations in Turkey.
13. Moon, H. and Shin, J. (2007), Effect of blast-induced vibration on a tunnel, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol.10, No.3, pp.207-219.
14. Park, I., Kim, S., Nam, K., and Kwak, C. (2004), Coupled analysis for the influence of blasting-induced vibration on adjacent dam, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol.6, No.1, pp.41-50.
15. Ryu, C., Sunwoo, C., Chung, S., Lee, J., Joo, K., and Lee, D. (1994), Applicability of Safe Blast Vibration Limits to the Blasting Work near Safety Related Structures, J. of Korean Society of Rock Mechanics, Vol.4, No.3, pp.287-297.
16. Seo, S., Kim, Y., Hwang, Y., Park, M. (2013), Investigation of allowable blasting vibration limit of underground structures and facilities, Tunnelling Technology, Vol.15, No.6, pp.12-18.
17. Siskind, D. E., M. S. Stagg, J. W. Kopp, and C. H. Dowding (1980), Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. (Report of Investigations 8507.) Washington, DC: U.S. Bureau of Mines.
18. SN 640 312, Swiss Association of Standardization (1992), Effect of vibration on construction. Seefeldstrasse9, CH8008, Zurich.
19. Son, M., Jung, Y., Yu, J., Hwang, Y., and Moon, D. (2013), Investigation and analysis of the allowable limits of blasting-induced vibration, Nature, Tunnel and Underground Space, Vol.15, No.5, pp.29-42.

Received : October 14th, 2014

Revised : December 2nd, 2014

Accepted : December 4th, 2014