국내·외 발파진동허용기준에 대한 고찰

손무락
대구대학교
토목공학과 교수

정연권
한국도로공사
기술심사처 부장

유준석
한국도로공사
기술심사처 차장

황영철
상지대학교
토목공학과 교수

문두형
용진엔지니어링
지반터널부 이사

1. 서론

국내지반의 대부분은 암반지층이 지표층에 노출되어있거나 지표면 아래 얕은 깊이에 분포하고 있어 다양한 구조물이나 시설물의 건설을 위해서는 발파 굴착을 필연적으로 수반하게 된다. 하지만 발파 굴착은 소음이나 진동 등으로 인해 주변 환경이나 시설물에 피해를 유발시킬 수 있어 이에 대한 엄격한 허용기준들을 필요로 한다. 발파진동으로 인한 구조물 및 시설물의 피해는, 진동이 지반을 통하여 전파된다는 점에서 지반특성에 따라 영향을 받으며, 또한 구조물 및 시설물의 사용재료, 노후화 정도, 구조형식 등 다양한 요인에 의하여 그 피해정도가 크게 달라지는 특성을 나타낸다. 따라서 구조물 및 시설물의 안전을 위한 발파진동 허용기준은 지반 및 시설물의 조건과 더불어 해당 시설물의 사용용도 및 중요성 등을 고려하여 제시되어야 한다. 국내·외에서 제시되고 있는 발파진동 허용기준은 공통적으로 앞에서 언급한 내용을 기본으로 하고 있으나, 각국의 사회적, 문화적 및 환경적 요인에 의해서 그 접근방법 및 기준이 조금씩 상이한 특징을 나타내고 있다.

본 논고에서는 국내·외에서 제시되고 있는 구조물과 시설물 등에 대한 발파진동 허용기준들을 조사하고 검토한 후 현재 국내에서 적용하고 있는 발파진동 허용기준들의 문제점과 개선방안에 대해서 살펴보고자 한다. 이와 같은 조사 및 검토는 향후 다양한 도로구조물(도로포장, 교량, 터널, 암거, 절.성토 사면, 방음벽 등)에 대한 발파진동 허용기준을 합리적이고 체계적으로 설정하기 위한 기초자료로서 또한 활용되어질 것이다.

2. 발파진동에 대한 국내·외 관련기준 조사 및 검토

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 측점위치, 기준에 대한 접근방법 등이 서로 달라 이에 대한 체계적인 조사 및 정리가 필요한 것으로 나타났다. 따라서 각국에서 현재 사용되고 있는 기준들을 조사하여 아래에 정리하였다.

2.1 국외 기준

2.1.1 미국의 기준

미국의 경우 발파진동에 대한 연구가 주로 미광무국(USBM)을 중심으로 이루어졌는데, 1980년에 Siskind 등에 의한 미광무국의 보고서는 진동속도에 대한 진동수의 영향을 고려하여 진동수 40㎐이상의 진동수를 갖는 발파진동에 대하여는 5㎝/sec를 허용치로 적용할 수 있으나, 40㎐이하의 저주파를 갖는 발파진동에 대하여는 1.2㎝/sec로 낮추어야 할 것을 권고하고 있다. 구조물에 전달되는 진동은 주파수와 구조물 형식에 영향을 받으며, 특히 연약지반에 낮은 주파수의 진동이 작용할 경우 그 영향이 큰 것으로 지적하였다. 한편, USBM에서 제안된 기준은 주로 단층 목조주택를 대상으로 한 결과로서 외벽의 회벽 모르터 등에서 발생하는 결함을 기준으로 평가하였다. 미광무국(USBM)과 내무부 노천광업청(OSM : Office of Surface Mining)에서 제안한 구조물에 대한 발파진동의 안전수준은 그림 1과 같다. 미내무부 노천광업청은 노천채광작업에 대한 안전기준으로 미광무국과 유사한 기준을 제안하고 있으나, 주파수 경계를 30㎐로 낮추어 정한 것이 주된 차이이다.

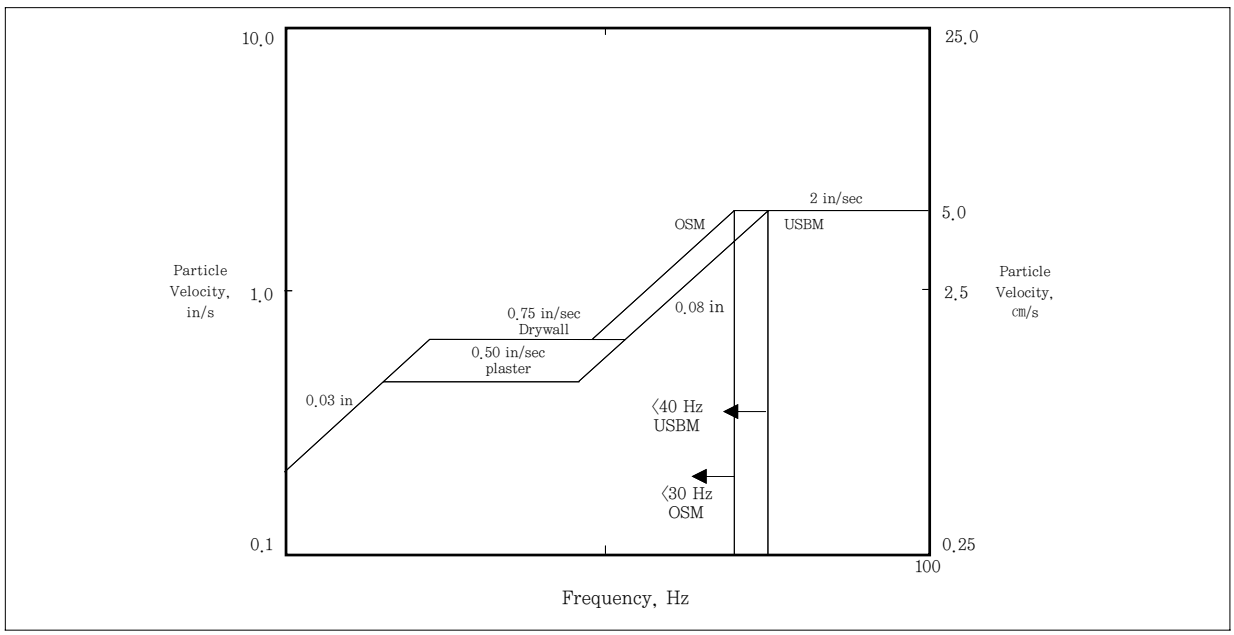

그림 1. 미국 광무국(USBM)과 노천광업청(OSM)의 발파진동 기준

2.1.2 일본의 기준

일본의 경우에는 지진이 자주 발생하는 지역인 관계로 발파나 건설장비 진동에 의한 구조물 피해는 거의 다루어지지 않고, 주로 인체감응을 대상으로 한 진동 기준이 제시되었다. 그럼에도 불구하고 1976년 공시된 진동규제법에서 지반진동이 0.2cm/sec이하에서는 피해가 발생하지 않으며 지반진동치가 0.2~0.5cm/sec에서는 진동을 감지할 수 있으나 구조물의 피해는 발생하지 않는다고 하였다. 지반진동치가 0.5~1.0cm/sec에서는 구조물의 약한 부분에 한해서 미세한 피해가 발생할 수도 있지만 보수가 곤란할 정도의 큰 손상은 발생하지 않는다고 하였다. 일본은 각 현마다 그 기준치가 다르나, 일반적으로 인구가 밀집된 지역에서는 발파 진동값이 0.2cm/sec를 넘지 못하도록 규제하고 있으며, 특히 야간에는 그 규제치를 더욱 엄격하게 적용하고 있다. 전반적으로, 일본의 기준은 구조물에 대한 피해보다는 인체피해를 대상으로 한 규제이므로 매우 엄격한 경향을 보이고 있다. 표 1과 표 2는 일본 두 지역에서의 진동속도 허용치에 대한 예를 보여주고 있으나, 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

2.1.3 독일의 기준

독일에서는 구조물에 대한 진동기준에 대해서 1938년

표 1. Osaka지역의 진동허용 기준

지역 구분	주간 (cm/sec)		야간 (cm/sec)	
공 업	7~22시	0.15	22~7시	0.07
상업, 준공업	7~22시	0.15	22~7시	0.05
주 거	8~20시	0.15	20~8시	0.03
공장적지	7~22시	0.15	22~7시	0.05
기타	8~20시	0.15	20~8시	0.03

표 2. Shinnaisenken 지역의 진동허용 기준

지역 구분	주간 (8~18시) (cm/sec)	야간 (6~8시, 18~23시) (cm/sec)	심야 (23~6시) (cm/sec)
주거전용	0.03	0	0
주 거	0.03	0.03	0
상업, 준공업	0.09	0.06	0
공 업	0.12	0.09	0.03
공업전용	0.12	0.12	0.09
기 타	0.06	0.03	0

표 3. DIN 4150 (1970)

등 급	I	II	III	IV
건축물 형태	문화재 등 (역사적으로 매우 오래된 건축물)	주택, 아파트, 상가 (작은 균열을 지닌 건축물)	주택, 아파트, 상가 (균열이 없는 양호한 건축물)	산업시설용 공장 (철근콘크리트로 보강된 건축물)
진동속도 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

* 충격진동에 관한 규정이며, 연속진동인 경우는 1/3으로 한다.

표 4. 서독의 Vornorm DIN 4150 Teil 3 (1975)

등	I	II	III
건축물 형태	주거용 건축물 : 공동주택, 연립주택	큰 강성을 갖고 있는 건축물	등급 I, II와는 다른 취약한 건축물
건축물 기초에서의 허용진동속도(cm/sec)	≤ 0.8	≤ 3.0	≤ 4.0

* 대략 1~80㎐ 부근에서의 허용진동 속도이며 때로는 315㎐까지 가능하다.

표 5. 개정 DIN 4150 (1986) – part3(short-term structural vibration)

건축물 등 급	건축물 형식	주파수별 허용진동속도 V_R(cm/sec)			
		구조물 전체			
		기초			최상층 바닥면
		구조물의 반응주파수대			전 주파수 영역
		10㎐ 이하	10~50㎐	50~100㎐	
I	상업 또는 산업용 건물 및 이와 유사한 형식의 건축물	2.0	2.0 ~ 4.0	4.0 ~ 5.0	4.0
II	주거용 건축물(연립주택, 단독주택, 아파트) 및 부속 건축물과 활용면에서 이와 유사한 건축물	0.5	0.5 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	1.5
III	진동에 예민한 구조물, 취약한 건축물, 특별한 보존가치가 있는 건축물(문화재 등)	0.3	0.3 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0	0.8

* 100㎐ 이상의 진동에서는 100㎐에 준한 값을 기준값으로 한다.
*1 : 발생빈도에 있어 피로피해(fatigue), 또는 발생시간 간격(interval) 측면에서 공진현상(resonance)을 일으킬 우려가 없는 진동을 말한다.
*2 : 직교 3축 방향(수평:x.y, 수직:z)의 성분을 동시에 측정한 성과 중에서 성분 구별 없이 가장 큰 것을 기준치로 한다. 수평성분의 어느 하나(x 또는 y)는 건물 외곽선과 평행한 방향을 택한다.
*3 : 측정점은 지하층 최외측 벽체를 기준으로 하고, 벽체 하단의 기초나 벽체 내부 또는 벽체의 우묵한 곳을 택한다. 지하실이 없는 경우는 건축물 외곽 벽체의 지면에 가까운 하단부를 기준으로 하되, 지표면에서 50cm 이상 떨어지지 않은 지점을 선정하여야 한다.

표 6. 개정 DIN 4150 (1986) – part3(steady-state vibration)

종별	진 동 속 도	
	구조물 전체	바닥슬래브
	수평 성분*1	처짐방향 성분
1종	0.5cm/s (0.2 in/sec)*2	1.0cm/sec (0.39 in/sec)
2종	0.5cm/s (0.2 in/sec)*2	
3종	데이터 없음*3	

*1 : 최상층에서의 연속 수평진동.
*2 : 기준치는 안전치 개념의 값으로 이를 초과한다고 해서 반드시 피해가 발생함을 의미하는 것은 아님
*3 : 통계조사자료가 없음을 의미함.

부터 체계적으로 연구를 시작하여 DIN 4150(Structural Vibration in Buildings)을 제정하였다. DIN 4150은 지반특성에 대한 고려는 미흡하나, part 3에서 진동피해와 관련하여 구조물을 각 형식별로 구분하고 기초 레벨과 최상층 레벨에서 측정된 속도값에 대하여 공진이나 피로 효과를 배제한 조건에서의 기준을 제시하였다. 표 3 및 표 4는 1970년 제정된 DIN 4150이며, 1986년 개정본에서는 진동의 종류 및 주파수 영역대 등의 개념을 도입하여 보다 세분화된 최대진동속도를 표 5 및 표 6과 같이 제시하고 있다.

2.1.4 스위스의 기준

스위스의 도로교통위원회 산하의 기초 및 기초지층 전문위원회에서는 발파진동, 기계진동, 건설 및 교통진동 등이 구조물에 미치는 영향을 평가하여 표 7과같이 Norm 640 312a규정 (1992)을 제시하였다. 이 규정은 건물의 민감도를 4등급으로 설정하였고, 다시 고층구조물과 지하구조물로 구분하였다. 분류에서 중요한 기준이 되는 점은 각 부재의 민감도로서 구조 양식 및 기타 요소, 예를 들어 구조재료, 건물 상태, 외벽처리, 회칠 등으로부터 결정되어 졌다. 뿐만 아니라 진동의 빈도수에 따라 3가지로 분류하여 기준(진동속도벡터의 합)을 제시하였으며, 기준치 이하에 있으면 피해가 발생될 가능성이 없고 기준치의 30%를 초과하는 몇 번의 진동으로도 피해가 유발될 확률은 낮은 것으로 평가하였으며, 기준치의 2배의 값이 작용한다면 피해의 가능성이 있는 것으로 평가하였다.

2.1.5 중국의 기준

중국은 국가표준 발파안정규정(GB6722-2003)에서 구조물의 종류와 주파수에 따른 허용진동기준을 표 8과 같이 제시하였다. 특이할 점은 지하구조물에 대해서는 주파수를 고려하지 않았다는 점이다.

표 7. Norm 640 312a 기준 (진동속도 단위: cm/sec)

종별	구조물의 종류	빈도	주파수 범위(Hz)		
	지상층 건물 / 지하 건축물		<30Hz	30~60Hz	>60Hz
1	지상층 건물 해당 없음 / 철근 콘크리트 혹은 철재교량, 철근콘크리트, 콘크리트, 축벽으로 된 지지벽, 견고한 암석 혹은 잘 다져진 연약암내에 개착된 갱도, 터널, 지하공동, 수갱	가끔씩 자주 계속적	3등급의 3배까지 허용		
2	철근콘크리트의 상용 및 생산업체 건축물(대개의 경우 외벽 모르터칠 없음) massive하게 지어진 사일로, 탑, 높은 굴뚝 / 연약암반내 지하 공동, 터널, 수갱, 관로 ,지하 주차시설 지표가까이 설치된 각종 관로, 건식 축벽	가끔씩 자주 계속적	3등급의 2배까지 허용		
3	콘크리트, 철근콘크리트, 벽돌로 조적된 주거건물 조적 혹은 인공적 건축자재에 모르터칠로 된 사무실, 학교, 병원, 교회 건축물저장소, 주철배관, 민감한 케이블 지하동굴, 터널의 중간천정 및 차도용 포장	가끔씩 자주 계속적	1.5 0.6 0.3	2.0 0.8 0.4	3.0 1.2 0.6
4	회벽 주택, 볼트식 구조물, 3등급 건물이 개축 혹은 새로이 단장된 건축물 / 오래된 납 케이블, 주철배관	가끔씩 자주 계속적	3등급의 값과 1/2수준의 사이의 값		

* : 8Hz 이하의 주파수에서는 최저 기준치를 적용
* : 150Hz 이상의 주파수에서는 더 큰 값의 기준치를 적용할 수 있다.

2.1.6 스웨덴의 기준

스웨덴은 1989년에 승인되고, 1991년 한차례의 개정을 거친 발파진동 기준을 제시하였다. 이때 구조물에 영향을 주는 발파진동의 수준을 결정하기 위한 것으로 세 성분의 진동속도 값을 계측하여야 하며, 구조물의 기초지반에서 측정하도록 규정하고 있다. 진동기준값 v는 다음과 같이 규정되었다. 스웨덴 기준은, 구조물의 크기 및 형식, 지반조건, 발파가 진행되는 공사종류, 발파지점과 측정부위까지의 거리 등 매우 다양한 사항을 변수로 하고 있다는 것을 알 수 있다.

$$v = v_0 \times F_k \times F_d \times F_t \quad (1)$$

여기서, $F_k = F_b \times F_m$로 하며, 표 9 및 그림 2에 의해 결정된다.

표 8. 중국 국가표준 발파안전규정

보호대상 구조물의 종류	안전 허용진동수준, cm/s		
	< 10Hz	10Hz~50Hz	50Hz~100Hz
토굴, 흙집, 자갈집	0.5~1.0	0.7~1.2	1.1~1.5
일반 벽돌조, 내진 설계되지 않은 대형 블록 건축물	2.0~2.5	2.3~2.8	2.7~3.0
철근 콘크리트 구조물	3.0~4.0	3.5~4.5	4.2~5.0
고 건축물 및 고적	0.1~0.3	0.2~0.4	0.3~0.5
수로터널	7~15		
도로터널	10~20		
광산갱도	15~30		
수력발전소와 발전소중앙제어실설비	0.5		

표 9. 스웨덴 기준의 기준값 및 계수

분 류	등급	내 용	기준값/계수
진동속도 V_o	1	점토, 자갈층	1.8(cm/s)
	2	화석, 슬레이트, 연약한 석회석	3.5(cm/s)
	3	강한 석회석, 사암, 편마암, 화강암, 현무암	7.0(cm/s)
건축물 계수 F_b	1	중량급 건축물	1.70
	2	산업, 상업건물	1.20
	3	표준 주거 건물	1.00
	4	교회, 박물관 등 예민한 건물	0.65
	5	피해를 받기 쉬운 상태의 역사적 건축물	0.50
건축재 계수 F_n	1	보강 철근 콘크리트	1.20
	2	콘크리트, 벽돌	1.00
	3	경량골재 콘크리트	0.75
	4	인조 석재 벽돌	0.65
공사기간 계수 F_t	1	터널 지하공동, 도록 굴착 등 건설	1.0
	2	채석, 광산 작업	0.75~1.0

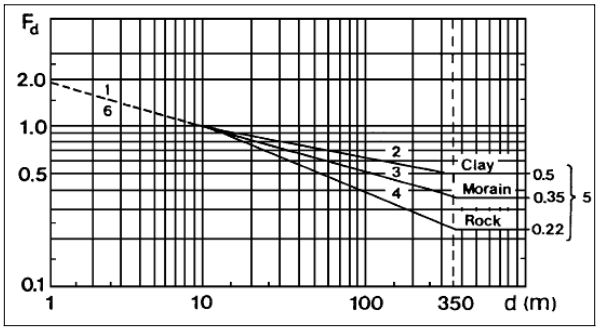

그림 2. 거리계수, F_d

4.1.7 영국의 기준

영국은 BS7385 Part 2에 발파 등의 지반진동으로 인해 구조물에 영향을 줄 수 있는 진동기준을 제시하였다. 표 10은 영국 표준인 BS7385 Part 2를 적용한 기준을 보여주고 있다. 표에서 제시한 기준은 저층구조물에 연속진동이 아닌 일시진동이 발생할 때 구조물에 미관손상(cosmetic damage)이 발생하는 진동속도값을 나타내고 있으며, 제시한 기준값의 2배의 진동속도가 발생할 때 미미한 손상(minor damage)이 발생하며, 제시한 기준값의 4배의 진동속도가 발생할 때 주요한 손상(major damage)이 발생할 수 있다고 하였다. 이와 더불어, 연속적인 진동에 노출된 구조물은 저주파수에서 공진이 발생할 수 있어 관련 기준값을 표에서 제시한 기준값의 절반으로 감소할 필요가 있다고 하였다. 표 11은 손상정도에 대한 분류를 보여주고 있다.

2.1.8 프랑스의 기준

프랑스의 발파 허용 기준은 구조물의 형태 및 주파수에 따라 진동속도의 허용기준을 다르게 적용하고 있으며 표 12에 정리하여 나타내었다.

표 10. 구조물의 미관손상(cosmetic damage)에 대한 transient 진동 가이드 값 (BS7385, Part 2, 1993)

Type of building	Peak component particle velocity in frequency range of predominant pulse	
	4㎐ to 15㎐	15㎐ and above
Reinforced or framed structures. Industrial and heavy commercial buildings	50mm/s at 4㎐ and above	
Unreinforced of light framed structures. Residential or light commercial type buildings	15mm/s at 4㎐ increasing to 20mm/s at 15㎐	20mm/s at 15㎐ increasing to 50mms at 40㎐ and above

NOTE 1. Values referred to are at the base of the building
NOTE 2. Frequencies below 4㎐, a maximum displacement of 0.6mm(zero to peak)

표 11. 구조물의 손상분류

– Cosmetic
The formation of hairline cracks[2)] on drywall surfaces, or the growth of existing cracks in plaster or drywall surfaces; in addition, the formation of hairline cracks in mortar joints of brick/concrete block construction.
– Minor
The formation of large cracks of loosening and falling of plaster of drywall surfaces, of cracks through bricks/concrete blocks.
– Major
Damage to structural elements of the building, cracks in support columns, loosening of joints, splaying of masonry cracks, etc.

NOTE2 The description of damage has its equivalent in the intensity scales used by seismologists.

표 12. 프랑스의 발파 허용 기준

구조물의 형태	진동속도(cm/sec)		
	4.8Hz	8-30Hz	30-100Hz
주거용	0.8	1.2	1.5
예민한 건물	0.6	0.9	1.2
매우 예민한 건물	0.4	0.6	0.9

2.1.9 러시아의 기준

러시아는 견고한 구조물에 대하여 주파수 범위에 무관하게 1.18 in/s ~ 1.98 in/s 의 값이 지구물리 연구기관에 의해 설정되었는데, 이는 2차 세계대전 중 지상, 지하 및 공기중에서의 발파영향을 토대로 설정된 값이다. 이를 바탕으로 다층 주거구조물, 상업용 구조물 및 산업용 구조물에 대하여 구조물에서의 진동속도값을 2in/s 설정하는 것도 타당한 것으로 판단된다. 표 13은 구소련의 발파 진동 허용기준을 보여주고 있으며, 구조물의 종류와 발파작업기간을 기준으로 하고 있음을 알 수 있다.

2.1.10 기타 국외기준

앞에서 언급한 각 국가별 기준이외에도 다양한 기준들이 개별학자들에 의해서 제시되었으며 그 일부를 소개하고자 한다. Siskind 등(1980)은 발파진동에 대한 시설물의 허용기준을 확률론적으로 접근하여 제시하였다. 피해기준에 대한 정도를 3가지로 분류하였으며, 확률을 고려한 각 기준값을 표 14와 같이 제시하였다. 한편, Siskind 등(1980,1981)은 미세 가시균열의 발생에 대한 입자속도 하한 수준에서 균열 발생의 가능성이 5% 이하인 경우를 12mm/sec(0.5in/sec)인 것으로 발표하였는데, 이것은 머리카락 굵기의 균열이 확장되는 한계균열이 발생할 하한으로 볼 수 있다. 또한, 높은 진동수대역(≥40Hz)의 피해자료를 확률적으로 분석한 결과 입자속도가 7.5cm/sec (3in/sec)에 달할 때까지 작은 균열이 발생할 확률은 5%가 되지 않는다는 것을 보여주었다.

이외에도 표 15 및 표 16은 Langefors (1978) 및 Esteves (1978)에 의한 실험결과와 측정사례를 정리한 결과들을 보여주고 있다.

표 13. 소련의 발파 진동 허용 기준

구조물의 종류	진동속도(cm/sec)	
	발파작업기간이 길 때(반복작업)	발파작업기간이 짧을 때(단순작업)
병원건물	0.8	3
유치원과 큰 주거용 빌딩	1.5	3
산업 공장 빌딩, 공공빌딩, 작은 주거용 빌딩	3	3
사무실, 공장건물(수도터널, 고강도 콘크리트관, 철도, 고가도로)	6	12
철골 고강도 콘크리트 구조물 또는 10년 이상 된 광산갱도	12	24
3년 이내의 광산운반 수평갱도	24	48

표 14. Siskind 등에 의한 확률을 고려한 기준

Damage Type	PPV(in/sec)			
	5% Probability	10% Probability	50% Probability	90% Probability
Threshold damage: loosening of paint, small plaster cracks at joints between construction elements	0.5	0.7	2.5	9.0
Minor damage: loosening and falling of plaster, cracks in masonry around opening near partitions, hairline to 3-mm(0-1/8 - in) cracks, fall of loose mortar	1.8	2.2	5.0	16.0
Major damage: cracks of several mm in walls, rupture of opening vaults, structural weakening, fall of masonry, load support ability affected	2.5	3.0	6.0	17.0

표 15. 지반에 따른 진동속도와 피해정도(Langefors, 1978)

진동범위	지하수 수준이하의 점토, 모래, 자갈	희석, 슬레이트, 연약한 석회석	강한 석회석, 석영질 사암, 편마암, 화강암, 현무암	피해정도
종파의 전파속도 (m/s)	300~1500	2000~3000	4500~6000	
발파에 의한 진동속도 (cm/s)	0.4~1.8	3.5이하	7.0이하	피해없음
	0.6~3.0	5.5	11.0	무시할 수 있는 피해 (피해한계)
	0.8~4.0	8.8	16.0	균열생성
	1.2~6.0	11.5이상	23.0이상	상당한 피해발생

표 16. 지반에 따른 허용진동 수준 (Esteves, 1978)

건물의 종류	허용진동치(Vector Sum Peak Particle Velocity, cm/s)		
	결집력이 없는 토양 및 자갈의 혼합	어느정도 결집력이 있는 토양, 균일하고 높은 등급의 모래	결집력이 있는 토양, 암석
	P<1000m/s	P=1000~2000m/s	P>2000m/s
유적, 병원, 고층빌딩	0.25	0.5	1.0
통상적인 건물	0.5	1.0	2.0
철근콘크리트, 내진건물	1.5	3.0	6.0

2.2 국내 진동기준

국내에서도 발파진동에 허용기준들이 다양한 기관에 의해서 제시되었다. 대부분의 적용기준은 외국기준들을 참고하여 제시되었으며, 그 일부를 아래에 조사하여 나타내었다.

2.2.1 서울 및 부산 지하철공사 기준

서울 및 부산 지하철공사에서 제시한 기준은 표 17로서, 독일의 DIN 4150(1971년) 규정에 의한 허용진동 값을 기초로 하여 제시되었으며, 약간 높은 안전율을 보이고 있다.

2.2.2 대한터널협회 기준

대한터널협회에서 제시한 기준은 표 18로서, 구조물의 형식 등에 따라서 발파진동의 허용기준 값을 제시하고 있다.

2.2.3 노동부 기준

노동부에서 제시한 발파구간 인접 구조물에 대한 피해 및 손상을 예방하기 위한 기준은 표 19와 같다.

2.2.4 중앙환경분쟁조정위원회

중앙환경분쟁조정위원회에서는 진동에 의한 구조물 피해의 인과관계 판단을 위한 가이드라인으로서 표 20을 활용하고 있다.

2.2.5 한국자원연구소

한국자원연구소에서 수행한 진동기준은 표 21과 같으며, 구조물의 종류 및 주파수범위를 고려하고 있는 특징이 있다.

2.2.6 한국구조안전기술원

(주)한국구조안전기술원에서는 "진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구" (2002)에서 다양한 국가의 기준을 참고로 하고 국내환경에 대해서 조절한 기준(안)을 표 22 및 표 23과 같이 제시하였다. 이 기준(안)은 국내에서 여러 나라의 기준들을 종합적으로 분석하여 제시한 것으로서 주목할 가치가 있다.

표 17. 서울과 부산 지하철 기준(충격진동의 경우)

등급	I	II	III	IV
건물형식	문화재 (역사적으로 매우 오래된 건물)	주택, 아파트, 상가 등 (작은 균열을 지닌 건물)	주택, 아파트, 상가 등(균열이 없는 양호한 건문)	산업시설용공장 (철근콘크리트로 보강된 건물)
최대속도 허용치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0 ~ 4.0

표 18. 구조물 손상기준 발파진동 허용치(대한터널협회, 1999)

구분	진동 예민 구조물	조적식(벽돌, 석재등) 벽체와 목재로 된 천장을 가진 구조물	지하기초와 콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 조적식 건물	철근 콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 조적식 건축물	철근 콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 대형 건축물
	문화재 등	재래가옥, 저층 일반가옥	저층양옥, 연립주택 등	중, 저층 아파트, 중소상가 및 공장	내진구조물, 고층아파트, 대형건물 등
허용 진동속도 (cm/sec)	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

표 19. 노동부 기준 (고시 94-26호)

건물분류	문화재	주택 아파트	상가 (금이 없는 상태)	철골 콘크리트 빌딩 및 상가
건물기초에서의 허용 진동치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

* 기존 구조물에 금이 있거나 노후 구조물 등에 대하여는 상기표의 기준을 실정에 따라 허용범위를 하향 조정하여야 한다.
** 이 기준을 초과 할 때에는 발파를 중지하고 그 원인을 규명하여 적정한 패턴(발파기준)에 의하여 작업을 재개한다.

표 20. 구조물 피해 인과관계 판단 가이드라인

진동구분 \ 건물구분		문화재3」	주택 · 상가			비 고
			1등급4」	2등급5」	3등급6」	
1. 충격진동1」 시의 인과관계 판단기준						
가. 진동강도(cm/sec)		0.2이상	0.3이상	0.5이상	1.0이상	
나. 충격진동시의 영향범위		70cm이내	53cm이내	37m이내	23m이내	폭약 1kg 사용시
2. 연속진동2」 시의 인과관계 판단기준						
가. 진동강도(cm/sec)		0.07이상	0.1이상	0.17이상	0.33이상	독일 : 0.17 일본 : 0.16
나. 진동원으로 부터의 거리	진동햄머 (대형)	50m이내	45m이내	40m이내	31m이내	Lo = 89dB (0.79cm/sec)
	굴 착 기 (0.7m)	31m이내	26m이내	22m이내	15m이내	Lo = 91dB (1.00cm/sec)
	브레이커 (유압식)	13m이내	10m이내	7m이내	4m이내	Lo = 82.5dB (0.38cm/sec)

* 연속진동 허용치는 충격진동 허용치의 1/3 적용
1」 충격지동 : 화약을 써서 발파작업을 하는 경우의 진동
2」 연속진동 : 항타기, 항발기, 파쇄기, 브레이커, 착압기, 백호, 도저, 굴착기 등을 사용하여 작업을 하는 경우의 진동
3」 문 화 재 : 역사적으로 매우 오래된 건물
4」 1 등 급 : 건축 후 15년 이상의 노후건물
5」 2 등 급 : 건축 후 5년 이상이며, 작은 균열을 지닌 건물
6」 3 등 급 : 건축 후 5년 미만이며, 균열이 없는 새 건물(철근콘크리트 건물 포함)
7」 (공식) $V = 100(\frac{D}{\sqrt{W}})^{-1.48}$ [V : 진동치(kine), W : 폭약량(kg), D : 폭원으로부터의 거리]
8」 (공식) $Y = L_o - 10\log_R - AR$ [Lo : 1m에서의 진동레벨, A : 감쇄지, R : 지점까지의 거리]
9」 (공식) $Y = 20\log V + 91\,(8H_z \le F)$ [V : 진동속도(cm/sec), Y : 진동레벨(dB(V))]

표 21. 한국자원연구소 제시기준

단위 : 진동속도, ㎝/s

건전도 등급1)	주파수대역 \ 대상 건축물	〈 10 Hz	10~40 Hz	40~100 Hz	〉100 Hz
I	철근콘크리트조 건물	1.5	1.5~4.5	4.5~5.0	5.0
II	콘크리트, 벽돌조 건물	1.0	1.0~2.5	2.5~3.0	3.0
III	조적조 시멘트 블록조 건물	0.5	0.5~1.5	1.5~2.0	2.0
IV	III의 건물을 개축한 건물. 역사적 보호건물	0.25	0.25~0.75	0.75~1.0	1.0

주1. 건전도는 건축물의 종류와 상태의 양호함을 의미하며 전문가의 평가를 요함
주2. 건축물의 기초 또는 폭원 방향 지반의 진동속도

표 22. 진동피해 인과관계 검토 기준(안) (그룹 II의 경우)

건축물 분 류	건 축 물 형 식	주파수별 허용 진동속도(cm/sec)		
		10㎐ 이하	10㎐~50㎐	50㎐~100㎐
A	철근콘크리트, 철골조의 고층 건축물, 아파트 및 이와 유사한 형식의 건축물 (동적 하중에 대하여 설계된 건축물)	2.0	2.0~4.0	4.0~5.0
B	철근콘크리트, 철골조로서 상기 A항에 해당되지 않는 건축물(동적 하중에 대하여 설계되지 않은 건물)	1.5	1.5~2.0	2.0~3.0
C	조적조 형식의 주거용 건축물 및 부속 건축물(저층 건축물) 또는 이와 유사한 형식의 건축물, 단층의 주거용 목조 건축물	0.5	0.5~1.5	1.5~2.0
D	진동에 예민한 건축물, 취약건축물, 특별한 보존가치가 있는 건축물(문화재 등)	0.3	0.3~0.8	0.8~1.0

1) 100㎐이상의 진동에서는 100㎐에 준한 값을 기준값으로 함.
2) 측정점은 최저층의 외측 벽체 또는 바닥슬래브를 기준으로 하고, 측정값은 직교하는 3축 방향의 성분들 중 최대값을 기준으로 함.

표 23. 진동원, 진동경로 및 건축물의 상태에 따른 구분

구 분	그룹 I	그룹 II
건 축 물 상 태	피해부위를 지니고 있는 오래된 건축물, 보수 · 보강되거나 증축된 건축물	무손상 건축물 구조적 변경사항 없음
재료와 건축물의 구조	조적조, 콘크리트조, 석조로서 잘 구축되지 않은 건축물, 기초의 부실, 타이보의 부족, 바닥 처짐, 큰 개구부 또는 불규칙 개구부를 갖는 벽체	잘 지어진 조적조 또는 철근 콘크리트 건축물, 타이보를 지닌 벽체와 일체로 연결된 강한 바닥슬래브
지반과 기초의 종류	낮은 강성의 지반(느슨한 모래, 매립층), 불연속기초	강성이 큰 토양(단단한 토양) 시공이 양호한 기초
진동의 작용시간	장시간 또는 영구적인 진동	단시간의 진동
가 중 치	0.7	1.0

표 24. 국내 각종 시방서 및 편람 기준비교 (단위: cm/s)

구분	진동예민 구조물	조적식(벽돌, 석재등) 벽체와 목재로 된 천정을 가진 구조물	지하기초와 콘크리트슬래브를 갖는 조적식 건물	철근 콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중소형 건축물	철근 콘크리트, 철근골조 및 슬래브를 갖는 대형 건축물
	문화재 등	재래가옥, 저층 일반가옥 등	저층양옥, 연립주택	중 · 저층 아파트, 중소 상가 및 공장	내진구조물, 고층 아파트, 대형 건물 등
도로설계편람 (2010)	0.2~0.3	1.0	2.0	3.0	5.0
도로설계요령 (2008)	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0
터널표준시방서 (2009)	0.2~0.3	1.0	2.0	3.0	5.0
터널설계기준 (2007)	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0
고속철도 설계기준 (2005)	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0
철도설계기준 노반 (2004)	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0
철도설계편람 (2004)	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

2.2.7 국내 각종 시방서 및 기관의 진동기준 비교

국내 도로 및 철도, 터널관련 설계기준 및 시방서에 제시된 기준들을 정리하면 표 24와 같다. 각각의 기준은 거의 유사한 것을 알 수 있으며 독일의 DIN 4150(1971년) 규정에 의한 허용진동 값을 기초로 하여 제시되었음을 알 수 있다.

3. 국내·외 발파진동 기준에 대한 검토의견 및 결론

이상에서 살펴본 바와 같이, 발파진동으로 인한 구조물 피해와 관련하여 다양한 국가 및 기관의 기준들을 검토한 결과, 각국의 사회·환경적 상황에 부합하는 기준이 축적된 자료를 토대로 제시되고 있음을 알 수 있었다. 하지만, 국내기준은 아직까지 외국의 기준을 그대로 준용하는 경우가 일반적으로 나타났으나, 외국의 기준들을 통합하여 국내실정에 맞게 조절하는 시도도 건축분야에서 추구하고 있는 것으로 나타났다.

발파진동관련 국내·외 기준을 적용함에 있어서 사용자는 관련기준의 개발배경 등을 이해하는 것이 매우 중요한 것으로 나타났다. 왜냐하면, 각 국의 기준들은 구조형식, 재료특성, 지반조건, 측정 위치점, 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. 따라서, 발파진동관련 피해 기준은 구조재료에 대한 구분과 진동피해 수준에 대한 고려가 명확히 구분된 후 제시될 필요가 있는 것으로 나타났다. 국내에서 많이 사용되고 있는 DIN이나 USBM 등과 같은 기준들이 실제적으로 이러한 사실을 고려하고 있음에도 불구하고 국내에서는 구분없이 적용되고 있다는 점이 개선점으로서 지적될 수 있다. 측정위치 또한 진동기준에 대한 중요한 요소로서 작용한다. 구조물의 기초에서 측정한 진동속도는 기초아래 지반에서 측정한 값과는 진동특성에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있기 때문이다. 진동값의 측정위치에 대한 사항은 여러 나라 기준들이 서로 상이한 이유 중의 하나일 수 있지만 종종 간과되는 경향이 있다. 또한 일부 기준은 진동속도의 단일성분의 최대값을 사용하고 있는 반면 다른 기준은 진동속도의 3방향 성분의 벡터합을 이용하여 기준을 제시하고 있다.

결론적으로, 발파로 인한 진동의 영향을 평가하고 허용기준들을 적용하거나 또는 새로운 기준들을 제시하고자 할 때는 구조물 및 시설물들을 구조형식, 재료조건, 노후화 정도, 중요도 등에 따라 분류함과 더불어 지반조건, 측정 위치점, 진동특성 등도 동시에 고려하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부. 2002. 발파소음.진동 허용기준검토(안)
2. 건설교통부. 2006. 도로공사 노천발파 설계/시공 요령
3. (주)한국구조안전기술원. 2002. 진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구
4. 신석호. 1998. 암반굴착시 진동경감을 위한 발파방법에 관한 연구, 한양대학교 석사논문
5. 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.
6. British Standard. 1993. Evaluation and measurement for vibration in buildings. BS7385 Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration.
7. 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.
8. Dowding, C. H. 1996. *Construction vibrations*. Prentice–Hall. Englewood Cliffs, NJ.
9. German Standards. 1993. Part 3—Structural vibrations in building, effects on structures. *DIN4150*, Berlin.
10. Swiss Association of Standardization. 1992. *Effect of vibration on construction*. Seefeldstrasse9, CH8008, Zurich.
11. Jones & Stokes. 2004. *Transportation– and Construction–Induced Vibration Guidance Manual*. June. (J&S 02–039.) Sacramento, CA. Prepared for California Department of Transportation, Noise, Vibration, and Hazardous Waste Management Office, Sacramento, CA.