터널과 지하공간, 한국암반역학회
Vol. 4, 1994, pp. 287~297

안전관련 구조물 근접시공시 발파진동 허용기준의 적용성에 관하여

류창하[1] · 선우춘[1] · 정소걸[1] · 이종림[2] · 주광호[2] · 이대수[3]

Applicability of Safe Blast Vibration Limits to the Blasting Work near Safety Related Structures

Chang-Ha Ryu, Choon Sunwoo, So-Keul Chung, Jong-Rim Lee, Kwang-Ho Joo and Dae-Soo Lee

ABSTRACT

Safety-related structures of power plants have to be protected against the effects of possible hazards and natural phenomena. Earthquakes are considered a major dynamic design loading as a requirement of plant design, but the effects of blast-induced vibrations are not. Due to the difficulties of obtaining construction site for new plants, following ones are inevitably being built in the site adjacent to existing power plants. Therefore considerable thought has been recently given to the dynamic loading generated by blasting works near the plants. In this paper, discussed is applicability of existing vibration standards and industrial codes to the blasting works near safety related structures. Also evaluated are the parameters for the safe vibration limits such as measure of vibration level, frequency consideration, structure response, propagation equation, etc.

1. 서 론

발파진동에 의한 영향은 공해진동면에서 다수의 민원을 초래할 뿐만 아니라 구조물이나 정밀 기기류에 대해 진동영향은 심각한 결과를 야기할 수 있으므로 이에 대한 영향평가나 대책이 절실히 요망된다. 국내의 경우 아직 발파진동으로 인한 허용기준이 제정되어 있지 않고 대부분 외국의 진동허용기준을 준용하여 이론적 실험적 검증없이 단순 사용함으로써 지나치게 보수적이라는 지적도 많은 반면 진동피해여부로 민원도 많이 발생하고 있으나 해결을 위한 근거가 모호하고 발파영향평가를 위한 측정자료도 미비한 실정이다.

본 연구는 원자력발전소(이하 원전) 부지에서의 발파진동의 문제를 주요 연구대상으로 하고 있다. 국내의 경우 원전 후속기 건설을 위한 부지확보가 점차 어려워짐에 따라 불가피하게 이미 확보되어 있는 원자력 발전소에 인접한 부지에서 후속기 건설이 이루어지고 있는 실정이며 따라서 기존 가동중인 원전 부지에서의 근접시공과 관련하여 발전소 구조물이나 기기류에 대한 발파진동 영향평가와 안전성 확보를 위한 대책이 중요한 관건이 되고 있다.

원전의 방사능 안전관련 시설물 등 대부분의 시설물은 발생가능한 모든 사고 및 자연재해시에도 그 본래의 기능을 유지할 수 있도록 설계된다. 자연재해의 하나로서 지진은 원전설계시 가장 중요한 설계

* 1994년 12월 14일 접수
1) 정회원, 한국자원연구소 자원개발연구부
2) 한전기술연구원 내진기술연구팀
3) 한전기술연구원 사업관리기술연구팀

하중이 되고 있으며 부지에서 발생가능한 최대의 지진을 설계지진으로 결정하여 내진설계가 이루어지고 있다. 원전의 가동중에 설계지진 즉 운전기준지진(OBE, Operating Basis Earthquake)을 초과하는 지진이 발생할 경우에는 일단 원전의 운전이 정지되고 발생된 지진의 영향평가를 통해서 원전의 재가동여부를 판단하게 된다. 원전 구조물에 대한 설계기준을 보면 동적하중의 경우 지진하중외에 발파 또는 건설공사와 관련된 동적하중은 고려하고 있지 않으며 실제 사전에 발파하중에 대하여 원전을 설계한다는 것은 어려운 일이다. 그러나 국내와 같이 부지확보가 심각한 상황에서 향후에도 기존 부지내에 후속기를 건설하는 특수한 조건은 계속될 전망이며 따라서 근접시공에 따른 영향가능성은 항상 내재되어 있다.

기존 구조물의 확충이나 신규 구조물 건설을 위한 굴착작업에서 발파진동에 대한 인접 구조물 또는 시설물의 안전성 확보를 위해서는 합리적인 허용기준의 설정과 설정된 허용기준을 만족시키는 발파설계가 필요하며 이를 위해서는 주요 대상 부지에서 체계적인 현장계측 및 분석을 통하여 발파작업 형태에 따라 진동수준을 예측할 수 있는 모델을 개발하여야 할 필요가 있다. 더욱이 최근의 근접시공의 불가피성은 이러한 발파영향 평가기술의 고도화를 요구하고 있다. 특히 주파수 특성등의 영향이 고려된 안전확보를 위한 허용 발파기준의 확립과, 주요 구조물의 구조적 손상 및 오작동 등의 분야가 발전소 인허가와 관련하여 연구개발을 시급히 필요로 하고 있다.

2. 국내 진동관련법규 및 기준에 대한 고찰

2.1 국내관련법규

진동관련으로 발파작업시 발생하는 지반진동(발파진동)과 발파풍에 관한 사항은 소음·진동규제법 제27조의 '폭약의 사용으로 인한 소음·진동의 규제'에 보면 시·도지사에 위임하여 규제를 위한 필요한 조치를 취할 수 있도록 되어 있다. 그러나 각 시·도별로 구체적인 기준안은 아직 설정되이 있지 않으며 대부분 공사 발주처에서 마련한 발파작업 시방서에 의해 작업기준이 정해지게 된다. 지하철공사의 경우 1980년 초 연구기관에 의뢰하여 작성된 발파지침서를 기초로 하고 있으며 이에 제안된 발파진동 허용기준에 준하여 발파작업 기준을 설정하고 있다.[1]

최근 환경처는 소음규제기준을 보완하여 작성한

Table 1. Noise and Vibration Limit Suggested by Ministry of Environment (Source: Ministry of Environment 1994. 7)

대상지역		주거 녹지 준도시 지역중 취락지구 및 운동 휴양지구 학교 병원 공공도서관 경계 로부터 50 m 이내 자연환경 보전지역		상업 공업 농림 준농림 준도시 지역중 취락지구 및 운동 휴양지구 외의 지역 미고시지역	
구 분		소음	진동	소음	진동
교통소음	주 간	68	65	73	63
진동한도	야 간	68	58	70	65
건설소음	조 석	65 이하		70 이하	
규제기준	주 간	70 이하		75 이하	
	야 간	55 이하		55 이하	
건설 생활					
진 동	주 간	65 이하		70 이하	
규제 기준	야 간	60 이하		65 이하	

단위: 소음 dB, 진동 dB(V), Vertical

Table 1과 같은 소음·진동규제 기준안을 상정하고 있다. 철도진동과 관련하여 관련기관과 협의가 진행되고 있으며 발파에 의한 진동도 잠정적으로 이 기준에 준하여 적용할 예정으로 알려지고 있으나 발파진동을 교통진동이나 일반 건설진동에 대한 기준에 준하기에는 많은 문제점들이 내포되어 있다.

환경처에서 상정중인 진동·소음 규제기준안은 차량, 철도진동, 공장진동, 일반건설진동의 규제에 적용가능하나 구조물 영향평가를 위한 발파진동에 적용하는 경우 예상되는 문제점 중 몇가지를 기술하면 다음과 같다.

첫째는 진동수준을 나타내는 단위의 문제이다. 데시벨 단위는 인체감각적인 면에서 사용되는 단위로써 즉 진동의 수준과 인체가 느끼는 감각이 정비례하지 않음을 고려하여 log 척도로 환산한 단위이며 음압의 수준은 주파수에 관계없이 동일한 기준 음압을 사용하나 상기와 같은 공해진동의 경우 기준이 되는 가속도 수준을 주파수 대역별로 달리하고 있다. 이에 따른 혼돈 뿐 아니라 구조물이나 시설물의 손상을 나타내거나 판단하는 물리적 척도로 사용하기에는 어려운 점이 있다. 또한 현재 국내 및 국외에 보급되고 있는 발파진동 전용 계측기기들은 대부분 진동속도(가속도, 변위 변환가능)와 주진동주파수를 출력하도록 되어 있다.

둘째는 발파진동특성의 문제를 들 수 있다. 발파진동의 지속시간(공해진동에서 진동노출시간에 해당)은 순발발파의 경우 300 ms 정도의 짧은 시간이나 상기 기준안의 경우 일반인의 하루 근무시간을 고려하여 8시간 또는 그 이상의 노출시간을 대상으로 작성된 것으로 보인다. 국제표준기구(ISO, International Standard Organization)의 기준을 보면 노출시간이 짧아질수록 허용기준은 높은 수준으로 하여 설정하는 것이 합리적인 것으로 나타나고 있으며 따라서 발파진동에 대한 인체감각에 대한 영향도 노출시간을 고려하여야 할 필요가 있다.

또한 상정중인 진동·소음 규제기준안의 진동은 수직(연직, vertical) 성분만을 고려하는 것으로 기술되어 있으나 진동의 영향은 수직, 수평성분 모두를 고려하여야 할 필요가 있다. 발파진동계측자료들을 보면 수직성분이 항상 우세한 성분이 아닌 것으로 나타나며 구조물을 구성하고 있는 부재에 따라 수평성분들이 더 큰 영향을 미칠 수도 있다.[2-5]

2.2 국내 지하철, 발전소 건설 등의 발파작업시 적용하였던 설계기준예

지하철 공사 발파작업에 통상 적용하고 있는 기준은 독일의 국가표준서 DIN 4150(1971년도)을 기초로 하였으며 진동주파수에 관계없이 대상 구조물 형태를 4종류로 분류하여 0.2 cm/sec에서부터 4.0 cm/sec까지의 기준을 적용하고 있다. 실제 현장시공시에는 민원의 소지를 줄이기 위하여 문화재급의 수준인 0.2 cm/sec 또는 0.3 cm/sec의 낮은 수준으로 제한하고 있는 경우가 종종 있어 너무 보수적이라는 견해가 대두되고 있다.

발전소 건설시 발파진동에 대한 영향은 1960년대 말 청평발전소 3호 발전기 설치공사시 암반굴착공사의 발파작업으로부터 발생하는 발파진동으로 인하여 기존 발전기 시설에 미치는 영향문제가 대두된 바 있었다.[6] 청평발전소 3호기 설치공사시 기존 1, 2호기 시설물에 대한 허용진동수준은 0.05 g를 적용하였다. 발전기의 정상운전시 진동 평균은 0.04 g이었고 발전소 제작소에서 제시한 허용수준은 0.05 g이었다.

원전 구조물에 대한 설계기준을 보면 동적하중의 경우 발파 또는 건설작업과 관련된 동적하중은 고려하고 있지 않으며 설계에 사용되는 지진하중은 안전정지지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake)과 운전기준지진(OBE)으로서 안전관련 구조물 및 기기는 SSE와 OBE에 대하여 설계하고 비안전 관련 구조물 및 기기는 운전기준지진에 대하여 견딜 수 있도록 설계한다.

영광원자력 1, 2호기의 경우 터빈건물은 비안전 관련 시설로 구분되지만 안전관련 시설에 인접하여 있으므로 SSE시 붕괴에 의하여 안전관련 시설에 영향을 주지 않도록 설계되어 있다. 영광원자력 1, 2호기에서 사용된 설계기준 SSE는 최대 수평지반 가속도 0.2 g, 수직지반 가속도 0.13 g이며 운전기준지진 OBE는 최대 수평 지반 가속도 0.1 g, 수직지반 가속도 0.067 g이다. 발전소 구조물 및 기기는 운전기준지진(OBE) 0.1 g에 견딜 수 있도록 설계하였다. 영광원자력 발전소 부지에서의 발파작업시 발파진동에 의한 허용기준은 발파진동이 지진보다 고주파수인 점을 고려하여 변위가 적을 것이므로 1, 2호기의 고주파수를 갖는 기기에 영향을 미치지 않을 것으로 판단하였으며 실제 발파제한치는 OBE에 안전계수 1.5를 적용하여 0.07 g 값으로 설정한 바 있다. 기타 구조

물에 대해서는 1 in/sec가 적용되었다.

고리 2호기 굴착시 고리 1호기 대상시설물에 대해 적용하였던 허용 지반진동 수준은 내진등급 1급에 대해서는 2 in/sec, 내진등급 II급에 대해서는 1 in/sec이었다. 고리 3, 4호기 굴착시 고리 2호기 대상시설물에 대해 적용하였던 허용 지반진동 수준은 0.07 g이었다.

울진 원자력 3, 4호기 주설비공사 굴착작업시 적용된 발파진동 허용기준은 UCN 1, 2호기 Power block에 대해서는 0.07 g의 최대진동가속도를, 기타 구조물에 대해서는 2.54 cm/sec의 최대진동속도를 적용하였다.

보령화력발전소 3, 4호기 건설시 1, 2호기 터빈건물 T/G 기초구조물에 대하여 2.5 cm/sec의 허용수준을 적용하였고 2호기 터빈발전기 운전중 운전정지를 방지하기 위하여 0.4 cm/sec를 적용하였다.[7]

노천채광과 같은 산업현장의 경우 미광무국에서 제안한 2.0 in/sec를 기초로 하여 작업조건에 따른 안전률을 고려하여 발파기준을 설정하고 있는 경우가 대부분이다.[8,9]

3. 허용기준의 변수들에 대한 고찰

인접한 구조물에 손상을 주지 않는 발파작업기준의 설정을 위하여는 첫째 대상 구조물에 손상을 주지 않는 지반진동의 수준을 평가하는 것과 둘째 발파조건 및 지역조건에 따라 발파에 의한 지반진동의 세기를 예측하는 작업이 수반되어야 한다. 구조물에 손상을 주지 않는 발파진동의 허용기준에 대해 국가적으로 표준을 갖고 있는 경우를 살펴보면 독일의 DIN Standard, 호주의 Australian Standard, 중국의 중화인민공화국 국가표준 등이 있으며 미국은 주별로 별도로 정하는 기준을 갖고 있다. 국가표준을 갖고 있지 않은 나라들은 대부분 관련 협회나 연구기관에서 제안하고 있는 기준안에 준용하고 있는 것이 보통이다. 허용기준을 표현하는 주요 변수들에 대하여 고찰하면 다음과 같다.

3.1 구조물 영향평가를 위한 진동수준의 척도

구조물에 대한 영향평가에 있어서 진동의 수준을 데시벨로 표시하는 문제점은 상술한 바와 같으며 물리적인 척도로는 진동하는 매질의 변위(particle displacement), 속도(particle velocity) 및 가속도(particle acceleration)를 사용할 수 있다. 진동이 전달되는 어느 한 지점을 생각하면 대상 점은 시간 경과와 함께 진동량이 변화하고 있으며 변위는 기준위치로부터의 이동거리를 나타내고, 진동속도는 진동변위의 시간에 대한 변화율이며 진동가속도는 시간에 대한 진동속도의 변화율을 나타낸다.

구조물에 대한 영향평가를 위한 척도로서 각각의 단위가 갖는 물리적인 의미를 살펴보면, 입자진동가속도의 크기는 $F=ma$로부터 질량 m에 의해 가해지는 힘과 비례하는 의미를 가지며 입자진동속도의 표현은 mv로서 속도 v로 움직이는 질량 m이 되는 물체의 운동량 또는 다음 식과 같이 질량 m이 갖는 물체의 운동에너지에 대한 양과 관련을 갖는다.

$$\text{Kinetic Energy} = \frac{1}{2} mv^2 \tag{1}$$

Crandell(1949)이 구조물의 피해에 대한 허용수준으로 사용한 진동 가속도와 주파수로 표현되는 에너지율(E.R., Energy Ratio)이라는 척도는 다음과 같다.[10]

$$\text{E.R.} = \left(\frac{\text{acceleration, ft/sec}^2}{\text{frequency, cycle/sec}} \right)^2 \tag{2}$$

에너지율의 물리적 의미를 살펴보면 운동에너지 표현에서 진동을 정현파로 가정하여 최대입자속도 및 최대입자가속도치와의 관계 $a=2\pi fv$를 대입하면 다음과 같이 운동에너지에 비례하는 척도임을 알 수 있다.

$$\text{Kinetic Energy} = \frac{1}{2} mv^2 \tag{3}$$

$$= \frac{W}{2g} \frac{a^2}{4\pi f^2} \sim \frac{a^2}{f^2}$$

이와같은 결과는 가속도와 주파수를 함께 사용하지 않고서도 입자속도만으로 동일한 척도로 사용될 수 있음을 내포하고 있으며 미광무국의 광범위한 자료수집 및 처리결과로 뒷받침되고 있다.[11]

구조물에 대한 영향평가의 척도로서 속도단위의 합리성은 입자의 진동속도와 응력과의 관계를 유도하여 보면 명확해진다. 힘의 역적(Impulse)은 운동량의 변화와 같다는 뉴톤의 제 2법칙을 미분형태로 기

술하면 (4) 식과 같다.

$$F\,dt = v\,dm \tag{4}$$

P파의 속도를 c_p, P파에 수반되는 응력의 세기를 σ_x, 입자속도를 v_x, 매질의 밀도를 ρ라 하면, (4) 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_x\,(area)\,dt = v_x\,dm \tag{5}$$

그리고

$$dm = \rho\,dx(area) \tag{6}$$

$$v_x = c_p\,dt \tag{7}$$

가 성립하므로 (5), (6), (7) 식으로부터 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$\sigma_x = \rho\,c_p\,v_x \tag{8}$$

전단파에 대한 응력, σ_{xy}도 전단파의 속도 c_s와 전단방향의 입자속도 v_y로 유사하게 유도할 수 있으며 일반식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma = \rho\,c\,v \tag{9}$$

(9) 식은 입자의 속도는 응력의 수준과 정비례함을 나타내고 있으며 따라서 구조물에 대한 영향평가로서 입자속도는 합리적인 척도가 됨을 알 수 있다.

미국의 경우 일찍부터 발파진동문제에 관하여 미광무국(U.S. Bureau of Mines)을 중심으로 광범위하고 체계적인 연구를 수행하여 오고 있으며 수차례에 걸쳐 연구결과들을 종합발표한 바 있다. 그 결과들은 미국의 각 주에서 정하고 있는 허용기준의 기초가 되고 있다. 미광무국의 1940년대 발파진동에 관한 1차 연구결과를 보면 중력가속도인 g의 단위를 사용하여 허용기준을 제안하였으나[12] 1971년도의 2차 연구발표에서는 가속도보다 속도가 적합한 것으로 제안한 바 있다.[11]

그러나 내진설계시 원전의 안전관련 주요 구조물은 지반가속도를 설계지진으로 사용하고 있으며 원전지진계측설비, 기록평가 등의 규제지침이 가속도를 기초로 하고 있으므로[13] 내진설계된 구조물의 영향평가에 있어서 속도에 의한 척도를 일률적으로 적용하는 데는 문제점이 있다.

3.2 발파진동 예측식과 주파수특성의 문제

발파진동의 수준을 예측하는 데 널리 사용되고 있는 방법으로 최대입자속도, V를 구하는 실험적 예측식은 다음과 같다.

$$V = k\left(\frac{D}{W^b}\right)^n \tag{10a}$$

여기서 n, b = 감쇠지수 및 scaling 지수

k = 자유면 상태, 화약의 성질, 암질 등에 따르는 상수

D = 폭원으로부터의 거리

W = 지발당 최대장약량

최대입자가속도, A를 예측하는 식도 유사한 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = k\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^n ; A\,W^{1/3} = k\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^n \tag{10b}$$

(10a) 및 (10b)와 같은 예측식은 시험발파시 단순히 장약량, 거리, 최대진동속도를 계측하여 회귀분석을 통하여 유도할 수 있는 매우 실용적인 식이다. 반면에 거리와 장약량 이외의 매질로서의 암반의 특성이나 발파원과 같은 변수들의 영향이 모두 n과 k라는 상수에 반영됨으로써 지역적 변화와 발파원의 조건변화에 따른 기본 예측식의 변화를 추정하는 데 어려움이 있다. 시험발파시 가능한 한 본발파와 같은 조건을 반영하는 것이 필요하지만 시공전 조사단계에서 지역적 조건이나 발파조건을 모두 반영한다는 것은 불가능한 일이며 따라서 조건변화에 대한 예측치의 변화를 사전에 어느 정도 예측하는 것이 필요하고 본발파시의 계측을 통하여 보정하는 단계가 필요하다.

Fig. 1은 시공전 발파설계지침을 구하기 위해 울진원전 4호기 건설부지에서 시험발파시 계측하였던 진동측정자료를 처리한 결과와 시공시 암반굴착이 진행되고 있는 건설작업시의 발파진동 계측결과를 동시에 나타낸 그림이다. 시험발파시 반영되지 않았던 발파조건 및 지역적 변화에 의한 진동치 수준은 신뢰구간을 고려한 예측치 수준을 넘어설 수 있음을 보여 주고 있다.

예측치 변화의 오차를 가능한 한 줄이기 위하여는 주요변수들을 독립변수들로 추출해 내는 방법을 고려할 수 있다. 지반조사시 통상 계측하는 암반의 탄

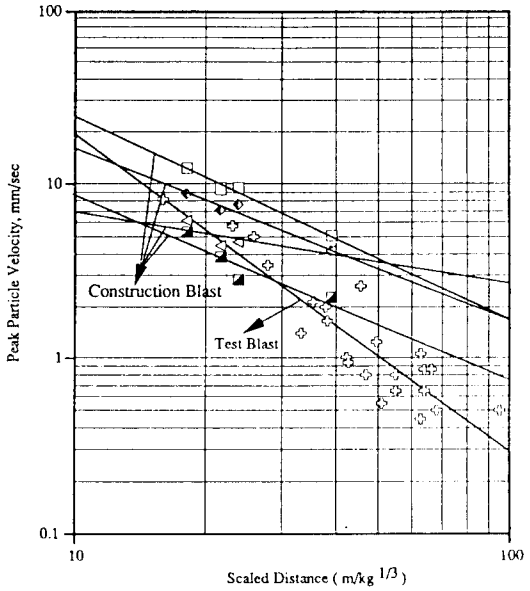

Fig. 1. Comparison of Blast Vibration from Test Blast and Construction Blast.

성파속도 c와 밀도 ρ를 독립변수로 추출한다면 차원해석에 기초하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{V}{c}=k\left[\frac{D(\rho c^2)^{1/3}}{W^{1/3}}\right]^n \qquad (11)$$

이러한 식의 사용은 밀도와 탄성파속도라는 변수가 추가됨으로써 계측 및 자료처리가 그 만큼 번거로워지지만 조건변화에 따른 예측치의 추정에 있어서는 오차를 줄일 수 있는 방법의 하나가 될 수 있다.

(10) 및 (11) 식과 같은 plug-in 형태의 예측식이 갖고있는 다른 하나의 단점은 진동파형이나 주파수 특성에 관한 정보를 알 수 없다는 점이다. 손상의 척도를 최대진동속도만으로 표현하는 것이 합리적이라면 실험적 예측식만으로도 구조물 영향평가를 위한 충분한 자료가 될 수 있을 것이다.

국내 지하철 공사 발파작업기준과 이 기준이 기초로 한 독일의 국가표준서 DIN 4150 1971년도판은 최대진동속도만을 변수로 사용하고 있다. 최대진동속도만으로 표현하고 있는 국외의 예로 중국의 중화인민공화국 국가표준의 폭파안전규정(GB 6722-86)을 보면 가장 낮은 수준으로 토담집에 대한 기준 1.0 cm/sec로부터 경암에 굴착한 광산갱도에 대한 기준 30 cm/sec까지 6개 구조물 형태로 구분되어 있고, 소련도 6종류의 구조물로 구분하여 병원건물에 대한 기준 3 cm/sec에서 3년 수명을 갖는 광산갱도에 대한 기준 48 cm/sec까지 최대진동속도로 허용수준을 표시하고 있다. Table 2는 1983년도 개정된 호주의 국가표준인 AS 2187-1983 Part 2의 내용을 보여준다.

구조물은 외부로부터 전달되는 진동의 주파수가 구조물이 갖는 고유진동수와 일치할 때 가장 크게 반응하는 공진현상을 보인다. 따라서 구조물에 대한 영향평가에 있어서 단순히 지반에서 측정되는 최대진동속도만으로 표현하는 방법은 충분하지 못하며 구조물이나 건물 구성부재의 공진에 영향을 미치는 주파수대역도 함께 고려하여야 할 필요가 있다.

주파수대역을 고려한 허용기준은 1980년 미광무국

Table 2. Australian Standard AS 2187 Vibration Limits for Building Damage (Part 2 "Use of Explosives", 1983)

Type of Building or Structure	Particle Velocity (Vp) mm/s
1. Historical building and monument, and buildings of special value or significance	2
2. Houses and low-rise residential buildings; commercial buildings not included in Item 3 below	10
3. Commercial and industry buildings or stuctures of reinforced concrete or steel construction	25

Table 3. Guideline values of vibration velocity, V_i, for evaluating the effects of short-term vibration (Source: German Standard DIN 4150 Part 3, 1986)

Type of Structure	Vibration Velocity, V_i, in mm/sec			
	Foundation			Plane of floor of uppermost full story
	At a frequency of			Frequency mixture
	<10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz*	
1. Buildings used for commercial purposes industrial buildings and buildings of similar design	20	20 to 40	40 to 50	40
2. Dwellings and buildings of similar design and/or use	5	5 to 15	15 to 20	15
3. Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, do not correspond to those listed in item 1 and 2 and are of great intrinsic value	3	3 to 8	8 to 10	8

*For frequencies above 100 Hz, at least the values specified in this column shall be applied.

3차 연구발표에서 나타났다. 2차 발표시 경미한 손상에 대한 수준으로 주파수대역의 구분없이 2 in/sec를 제안한 바 있었으나 통계적인 해석기법을 적용하여 자료들을 재분석한 결과 낮은 진동주파수를 갖는 발파진동에 대하여 손상받을 확률이 높은 점을 고려하여 허용기준을 1.2 cm/sec로 낮추었으며 주파수 경계를 40 Hz로 제안하였다.[14] 미국의 노천채광청은 유사한 허용기준에 주파수 경계를 30 Hz로 제안하고 있다. 독일의 국가표준의 경우 1971년도 DIN 4150 Part 3는 이전 논문들에서 많이 이용된 바와 같이 대상 구조물 형태를 4종류로 분류하여 0.2 cm/sec에서부터 4.0 cm/sec까지의 기준을 적용하고 있었으나 1986년도에 주파수 특성을 고려하여 개정하였다. Table 3은 1986년도 개정된 기준을 보여준다.[15] 미광무국과 같이 근거자료에 대한 내용의 구체적인 언급은 없으나 형태상으로는 구조물 형태, 최대진동속도, 진동주파수 및 건물에서의 진동치를 변수로 하여 가장 세부적으로 표현한 기준이다. 경계 주파수는 10 Hz, 50 Hz 및 100 Hz로 하고 있다.

주파수의 고려에 있어서 미광무국과 개정된 DIN 4150의 경우 모두 건물 인접지반에서 측정한 최대진동속도를 기준으로 하고 있으며 DIN 4150의 건물에서의 최대진동속도는 주파수에 관계없이 건물 최상부층 바닥에서 측정한 진동의 수준으로 8 mm/sec에서 40 mm/sec까지의 값으로 하고 있다. 건물에 대한 진동계측에 있어서 일반적으로 상부층이 하부층보다 진동이 클 것을 예상할 때 측정지점의 고려는 합리적인 것으로 보이나 공진과 관련된 주파수의 고려나 진동수준의 근거가 명확하지 못하다. 특히 구조물의 형태 및 부재별로 반응이 상이함을 고려할 때 안전 관련 구조물에 일률적으로 적용하는 데는 충분치 못한 점이 있다.

Fig. 2는 노천발파시 계측한 슬라브 2층 건물의 1층 바닥, 2층 바닥, 2층 옥상 및 지반에서 계측된 파형이다. 사용된 폭약은 ANFO이고 지발당 장약량은 124.4 kg으로 총 20단의 단차로 발파하였다. 폭원에서부터 건물까지의 거리는 1800 m이었다. 진동속도의 벡터합은 상부층일수록 커지고 있으나 성분별로 감소되는 것도 나타나고 있다.

3.3 지반진동과 구조물진동

일반적으로 발파진동 계측기기로부터 출력되는 주진동주파수(principal frequency)는 최대진폭에 수반되는 주파수를 의미하고 있다. 주진동주파수는 파형

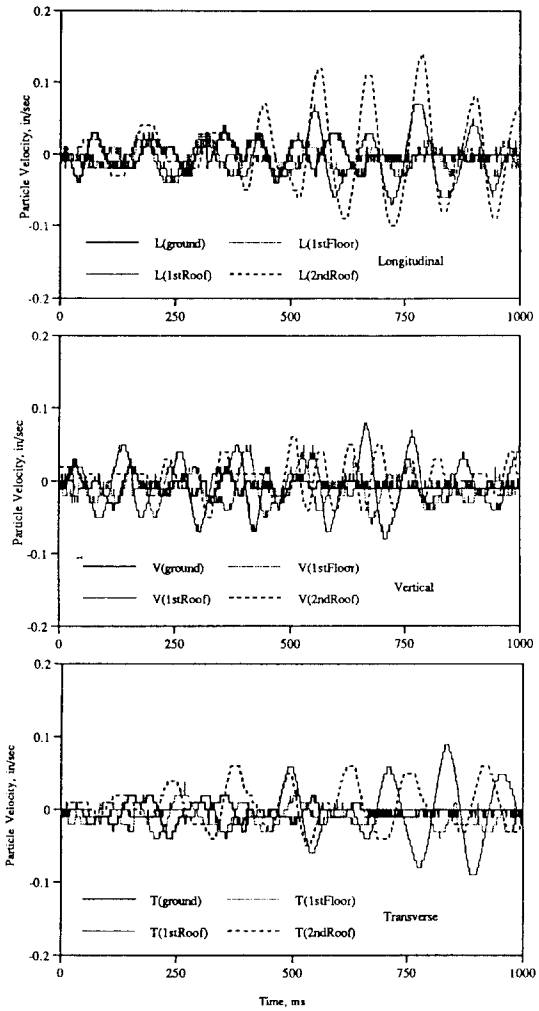

Fig. 2. Waveforms measured on foundation and floors.

기록으로부터 쉽게 계산할 수 있으나 이 수치가 진동파의 우세주파수 대역에 항상 포함되는 것은 아니라는 사실도 유념하여야 할 필요가 있다. 우세주파수대역은 파형의 시간이력자료로부터 Fourier 변환을 통하여 구할 수 있다. 최대입자속도, 진동파형의 시간이력곡선, Fourier 스펙트럼들은 발파진동파에 대한 정보를 주지만 이것이 구조물에 미치는 영향에 대한 직접적인 정보는 주지 못한다.

건물의 진동에 대한 영향문제는 건물 전체보다 부분적인 진동이 문제가 되는 경우가 많으며 구조물에 따라 동일한 진동을 받아도 구조물에의 입력크기는 현저하게 달라질 수 있다. 원전구조물의 내진설계는 설계지진 응답스펙트럼을 입력으로 하는 응답스펙트럼 해석을 통하여 내진성 확보를 위한 해석을 수행한다.

발파진동파의 Fourier 스펙트럼이 파자체의 주파수특성을 나타내는 반면 구조물의 응답스펙트럼은 구조물의 응답특성을 나타낸다. 진동을 받고 있는 1질점계가 받는 최대상대변위, 최대상대속도 및 최대절대속도 S_d, S_v, S_a는 각각 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$S_d = \frac{1}{\omega}\left|\int_0^t \ddot{y}(\tau)e^{h\omega(t-\tau)}\sin\omega(t-\tau)\,d\tau\right|_{max} \quad (12a)$$

$$S_v = \left|\int_0^t \ddot{y}(\tau)e^{h\omega(t-\tau)}\left[\cos\omega(t-\tau) - \frac{h}{\sqrt{1-h^2}}\sin\omega(t-\tau)\,d\tau\right]\right|_{max} \quad (12b)$$

$$S_a = \omega\left|\int_0^t \ddot{y}(\tau)e^{h\omega(t-\tau)}\left[1-\frac{h}{1-h^2}\sin\omega(t-\tau) + \frac{2h}{\sqrt{1-h^2}}\cos\omega(t-\tau)\,d\tau\right]\right|_{max} \quad (12c)$$

지반 가속도 이력 $\ddot{y}(t)$가 주어지면 감쇠상수 h, 비감쇠 고유주기 T의 함수인 $S_d(h, T)$, $S_v(h, T)$ 및 $S_a(h, T)$가 된다. 이들의 함수를 감쇠상수 h를 파라미터로 하고 비감쇠 고유주기에 대하여 그려진 그림을 각각 변위응답 스펙트럼, 속도응답 스펙트럼 및 가속도응답 스펙트럼이라 한다.

Fig. 3은 1질점계에 의해 대표되는 구조물의 발파진동에 대한 응답스펙트럼을 계산한 것으로서 속도, 가속도 및 변위에 대한 최대응답을 동시에 볼 수 있도록 도시한 3중 응답 스펙트럼을 나타낸다. Postscript 언어로 그래픽을 표현할 수 있는 프로그램을 작성하여 도시한 결과이다. 발파진동은 울진 원전 후속기건설부지의 gutter 구조물 옆에서 계측한 지반진동의 접선성분에 대한 것이며 최대진동속도치는 0.29 cm/sec이었다. 감쇠특성을 나타내는 감쇠상수 h는 0 및 0.02를 사용하였다. 입력 최대진폭은 0.01 cm이었다. 지반진동의 Fourier 스펙트럼은 10~20 Hz 사이에서 최대 주파수를 보였으며 응답 스펙트

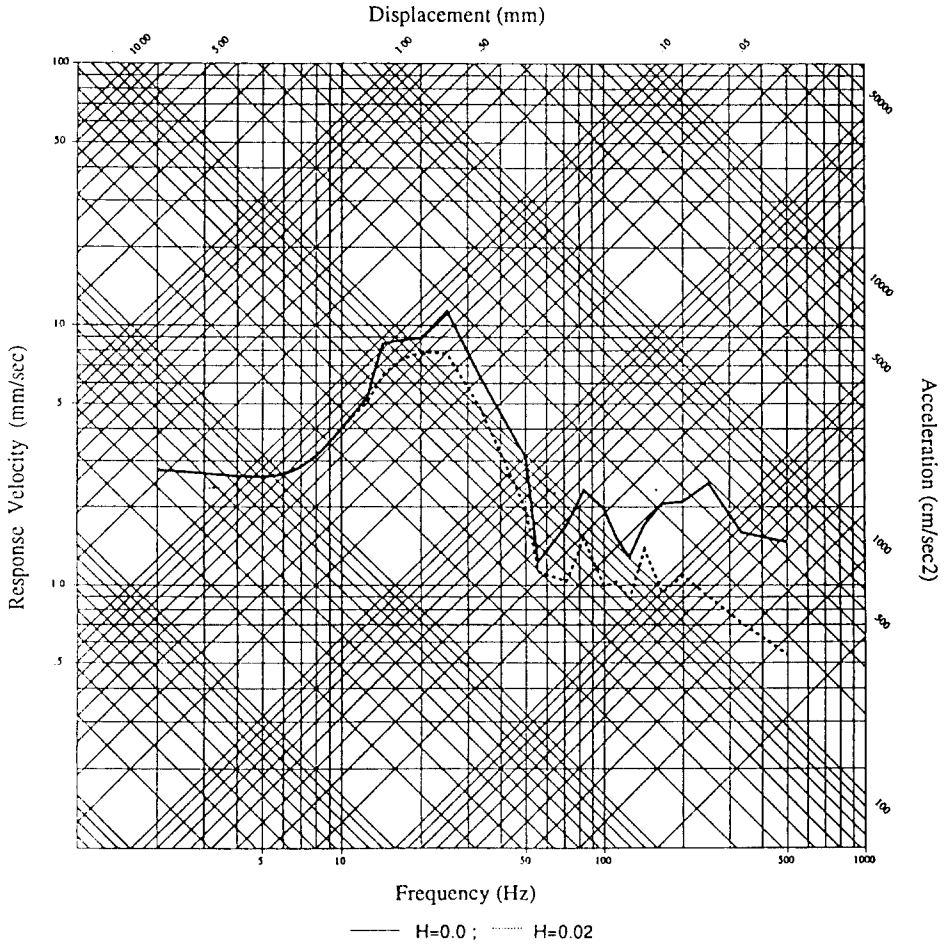

Fig. 3. Response Spectrum of Blast-induced Ground Vibration.

럼은 20~30 Hz에서 최대응답을 나타내고 있다.

부재의 특성이 건물전체에 비해 상대적으로 강성이 크다면 1질점계의 가정에 의한 계산은 어느 정도 타당할 것이나 그렇지 않다면 다질점계에 대한 계산이 바람직하다. Fig. 3과 같은 발파진동 응답스펙트럼은 설계지진기준 초과여부를 판단할 수 있는 자료가 될 수 있다. 또한 발생가능한 최대발파진동을 내진해석을 위한 설계입력운동으로 작성하는 방안도 고려할 수 있을 것이다.

3.4 기타

호주의 국가표준을 비롯하여 대부분의 기준에 있어서 손상의 정의는 명확히 정의되지 않고 있으나 일반적인 기준의 수치는 미광무국의 경미한 손상으로 분류되는 표면적 손상이 발생하지 않는 한계수준으로 회벽, 페인트에 실금, 이미 존재해 있는 보이지 않던 균열이 약간 벌어지는 정도를 의미하는 것으로 볼 수 있다. 호주 국가표준 AS 2121-1979의 "The SAA Earthquake Code"에서는 건물설계시 고려하는 지진에 대한 내진기준을 지반진동 50 mm/sec의 수준으로써 손상을 건물에 대한 물리적인 안전 확보측면에서 정의하여 AS2187의 발파진동에 대한 수준보다 더 높은 수치를 적용하고 있다. 구조적 손상이나 건물의 가치면에서 손상외에도 시설물의 오작동에 대한 영향도 손상의 개념에 포함하여 정의할 필요도 있다.

4. 결 언

최근 부지확보의 어려움으로 후속기 건설이 기존 부지에서 이루어지고 있는 국내 실정에 있어서 안전확보를 최우선적으로 하고 있는 원전과 같은 안전관련 구조물에 대하여 근접시공에 따른 발파하중에 대한 영향평가의 필요성이 높아지고 있다. 본 논문에서는 안전확보를 위한 발파작업기준의 설정에 있어서 허용기준 설정을 위한 관련 변수들과 국내·외 관련기준의 적용성에 대한 문제점들을 분석하였다. 국내의 경우 기존 관계법령의 미비점으로 발파진동과 같은 일시적인 충격진동을 고려하는 일반기준이 시급히 제정되어야 할 필요가 있다. 구조물 영향평가를 위한 척도로서 진동속도를 이용하여 일반기준을 제정하는 것이 합리적이며 단순한 최대진동속도에 의한 기준 이외에 주파수 특성의 고려와 계측기기 필요조건, 센서의 설치, 측정방법 등을 명기하여 진동계측의 표준화를 하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 진동속도의 수준과 주파수기준의 설정은 미광무국과 같은 광범위한 계측자료처리결과의 이용 및 응답특성해석을 통하여 보완하여 갈 필요가 있다. 일반기준은 실용적인 면에서 기본이 될 수 있도록 하는 것이 바람직하나 안전관련 구조물의 평가를 위한 필요충분한 조건을 만족시키기는 어려울 것이며 별도의 조건이 부가되어야 할 것이다. 기존 안전관련 구조물의 내진설계조건, 주요 시설물의 필요조건에 따라 별도로 가속도의 척도를 이용한 검토와 구조물의 응답특성 개념에서 발파하중에 대한 영향평가가 수반되어야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1) 김웅수, 이경운 외, 1983, 발파진동식 확립과 제어발파 지침결정을 위한 연구보고서, 강원대학교, 서울시 지하철공사 용역보고서, 168 pp.
2) 류창하, 1979, 석회석 노천채굴장에서 순발 및 MS 지발발파에 의한 지반진동에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교, 47 pp.
3) 양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 터널과 지하공간, Vol. 2, pp. 199-211.
4) 김대상, 이정인, 이희근, 1991, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용진동치 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 28, pp. 444-455.
5) 주재성, 권숙문, 1993, 근접발파에 대한 시멘트블럭조 건물의 진동응답 특성, 한국자원공학회지, Vol. 30, pp. 259-264.
6) 우형주, 염영하 외, 1967, 폭파작업이 시설물에 미치는 영향, 대한광산학회지, Vol. 4, pp. 81-93.
7) 박보기, 백명룡, 1992, 가동중인 보령화력발전소 1, 2호기 인접지역 대규모 굴착발파 작업시 진동제한에 대한 고찰, 전력기술 9호, pp. 41-49.
8) 류창하, 이정인, 1979, 발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 대한광산학회지, Vol. 16, pp. 42-44.
9) 류창하, 선우춘 외, 1992, 동해석회석광산 적정발파 설계연구, 한국자원연구소, 쌍용자원개발 용역보고서, 168 pp.
10) Crandell, F.J., 1949, Ground Vibration Due to Blasting and Its Effect Upon Structures, J. Boston Soc. of Civil Engineers, pp. 222-245.
11) Nicholls, H.R., Johnson, C.F., and Duvall, W.I., 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, USBM. Bulletin 656,105 pp.
12) Thoenen, J.R. & Windes, S.L, 1942, Seismic Effects of Quarry Blasting, USBM Bulletin 442, 83 pp.
13) 이종림, 장승필 외, 1993, 고리1호기 지진감시설비 설계 및 운용방안 연구, 한전기술연구원, 410 pp.
14) Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W. & Dowding, C.H., 1980, Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting, USBM RI 8507, 74 pp.
15) DIN 4150 Teil 3, 1986, Erchütterungen im Bauwesen-Einwirkungen auf bauliche Anlagen.