

## 양만장의 발파 진동소음 현장측정과 수치해석을 통한 영향검토 및 합리적인 발파설계 연구

이 송<sup>1)</sup>, 김성구<sup>2)</sup>, 이용호<sup>2)\*</sup>

### Study of Blast Ground Vibration & Noise Measurements In-situ and Effect Analysis for Numerical Analysis, Rational Blasting Design at an Eel Farm

Song Lee, Sung-ku Kim and Yong-ho Rhee

**Abstract** The vibration or/and noise generated by blast operations might cause not only structural damage to properties but mentally also to humans and animals. For that reason, maximum permitted vibration and noise levels are set by sensitivities of structures and they are used for the management of blast vibration. It is known that the fish lived in water are more sensitive to vibration than land animals, and thus the adverse impact of the blasting on fish farms should be very concerned. This study investigated the vibration and noise levels at a large eel farm located some 840 meters of the blasting site through the large real-scale experiments of blastings, prior to conducting the actual blasting. As a result, it was found that the noise met the requirement to be within maximum permitted level, while the ground vibration exceeded the permitted vibration. Accordingly, the impact of the excess vibration was investigated by an existing empirical method and verified by a new three dimensional numerical analysis. In this study, such an inspection process was briefly described, and a method was suggested for the examination of possible adverse effects from blasting on vibration-sensitive structures like the eel farm. The study also introduced a design method that controls the blast effects - ground vibration and noise.

**KeyWords** an eel farm, ground vibration and noise, pisces, eel

**초 록** 발파작업시 발생하는 진동·소음은 주변에 존재하는 보안물건에 손상을 입힐 수 있다. 또한, 사람 및 가축에게 정신적으로 피해를 줄 수 있다. 그래서 피해가 예상되는 보안물건의 특성을 고려하여 허용 진동·소음 기준을 설정하여 관리하고 있다. 특히, 어패류는 수중에서 생활하기 때문에 지표면에서 사육되는 동물보다 더욱 진동에 대하여 민감하게 작용하는 것으로 알려져 있다. 본 논문의 현장에서는 발파지점으로부터 약 840m정도 떨어진 지점에 대규모 장어 양식장(이하 양만장)이 존재하고 있다. 그래서, 현장 발파작업시 진동·소음으로 인한 피해가 우려된다. 본 논문에서는 발파 작업을 수행하기 전 설계단계에서 실규모 시험발파를 수행하여 양만장의 발파진동·소음을 측정하였다. 그 결과 발파소음은 설정한 허용기준 이내로 나타났다. 그러나 발파진동이 허용기준을 초과하였다. 따라서, 발파진동에 대해서는 기존의 경험적 방법을 통해 영향검토를 수행하였다. 그리고 새로운 3차원 수치해석방법을 통해 검증하였다. 이 검토과정을 간략히 서술하였다. 그리고 양만장과 같이 발파진동·소음에 민감한 보안물건 주변 발파설계시의 발파진동 영향검토 방법을 제안하였다. 또한 발파진동·소음제어 설계방법을 소개하고자 한다.

**핵심어** 양만장, 진동 및 소음, 어패류, 장어

## 1. 서 론

발파작업시 발생하는 진동·소음으로 피해가 예상되는 보안물건의 특성을 고려하여 허용 진동·소음기준

을 설정하여 관리하고 있다. 그 중 어패류는 수중에서 생활하기 때문에 지표면에서 사육되는 동물보다 더욱 진동에 대하여 민감하게 작용하는 것으로 알려져 있다. 국내에서는 군산대학교와 전남대학교에서 연구된 결과가 있는데 발파로 인한 상당한 피해를 보고하고 있다. 이와 더불어 최근 국내적으로는 발파진동·소음을 기존의 경험식 및 추정식을 이용한 경험적 검토방법에 추가적으로 컴퓨터 프로그램을 이용한 수치해석적 접근을 시도하고 있다. 따라서 본 논문에서도 발파

<sup>1)</sup> 서울시립대학교

<sup>2)</sup> GS건설(주)

\* 교신저자 : yhlee7@gsconst.co.kr

접수일 : 2006년 3월 7일

심사 완료일 : 2006년 4월 17일

표 1. Example for damage and compensation of ground vibration and noise for pisces

프로젝트명	어 종	피해적용 및 보상사례 내용	발생시기	관련기관
공단조성사업	양 어	발파진동 0.138cm/sec에서 피해인정	1993	환경분쟁조정위원회
매립공사	가물치	굴삭기 소음 60dBA에서 피해인정	1993	환경분쟁조정위원회
원평천개수공사	메기	진동소음으로 인한 스트레스로 100m 위치의 메기가 92% 폐사인정으로 어업보상	1996	익산지방국토관리청
서해고속도로공사	뱀장어	현장에서 40m 이격된 양어장의 뱀장어 대량 폐사인정	1995	전주지방법원 군산지원
복지타운건설공사	향 어	발파진동 및 소음으로 400m 이격된 향어 대량 폐사인정	1998	청주지방법원 제천지원

작업을 수행하기 전 설계단계에서 실 규모 기준의 시험 발파를 수행하여 양만장의 발파진동·소음을 측정하였다. 그리고 발파진동에 대해서는 기존의 경험적 방법을 통해 영향검토를 수행하고 이를 새로운 3차원 수치해석 방법을 통해 검증하였다. 여기서는, 이 검토과정을 서술하고 양만장과 같이 발파진동·소음에 민감한 보안물건 주변 발파설계시의 발파진동 영향검토 방법을 제안하였다. 또한 발파진동·소음제어 설계방법을 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 양만장의 발파진동·소음 영향 및 허용기준

### 2.1 어류의 진동·소음의 영향

수중에 서식하는 어류에 진동·소음이 전달되면 예민하게 반응을 일으키게 되는데, 외부적으로는 유영속도가 증가하고 급격한 방향전환을 하는 등 스트레스 반응행동을 표출하게 된다. 또한 어류는 면역체계에 영향을 받아서 산란율이 떨어지고 성장이 둔화되어 심하면 폐사에 이르게 된다. 수중생활을 하는 어류는 서식지의 구조적인 특징으로 인하여 주로 공기로 전달되는 소음보다는 지표면을 통하여 전달되는 진동에 더욱 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 특히, 수중에서 진동으로 인한 물의 급격한 이동현상은 어패류에 충격압으로 작용하여 2차적인 피해를 줄 수 있는데, 예민한 어류는 1기압 이하에서도 폐사할 수 있다. 이와 같이 어류는 진동·소음에 매우 예민한 동물임에도 불구하고 국내 외적으로 진행된 연구 실적이 그리 많지 않다. George와 Barton(1990)은 어류의 정상적인 조건과 진동·소음에 의해 받는 스트레스 조건과의 관계를 연구한 결과, 스트레스를 받는 어류는 정상적인 어류에 비해 사망지수가 5.8배 이상 높은 것으로 보고하고 있다. 또한, Anderson(1990)은 어류에 스트레스가 가해지면 생체의 내분비계 및 전해질의 불균형이 초래되어 어체의 면역성이 떨어짐으로서 각종 병원성 인자에 감염되어 대량 폐사가 발생할 수 있다고 보고하고 있다. 그 외에

Szokolczia(1997) 등의 연구결과를 보면 마찬가지로 어류가 진동·소음으로 인하여 스트레스를 받게 되면 뇌의 교감, 부신 신경절과 뇌하수체 및 부신 신경절의 신호전달 기전에 비정상적으로 작용할 뿐만 아니라 용존 산소를 섭취, 전달하는 비정상적인 자극이나 에너지를 발생시키는 기전들이 비정상적으로 활성화되어 어류의 면역기능이 현저하게 저하되어 외부의 병원균에 쉽게 감염될 수 있다고 보고하고 있다.<sup>(2)</sup>

이와 같이 어류는 진동·소음에 노출되면 생리적인 변화가 적정한 수준 이상으로 나타날 뿐만 아니라 어류의 면역체계에 이상을 초래하여 외부의 병원균에 쉽게 감염되어 결국 폐사하게 된다.

### 2.2 양만장의 진동·소음 허용기준 설정

장어를 비롯한 어류는 어느 정도 크기 이상의 진동·소음에 노출되면 스트레스를 받을 뿐만 아니라 죽음에 이르게 되므로 진동·소음크기의 한계치를 정하여 관리해야 한다. 국내의 중앙환경분쟁조정위원회의 조정사례와 각종 연구사례를 보면 개략적으로 어류의 피해한계기준을 추측할 수 있다.<sup>(3)</sup> 표 1은 국내의 피해적용 및 보상사례를 나타낸 것이다.

위 표 1에서 보는 바와 같이 국내에서는 어류에 대한 피해기준이 명확하게 설정되지 않은 상태에서 어류의 폐사상태를 보고 피해 및 보상정도를 결정하고 있다. 다행히 【소음·진동 규제법 시행규칙】 제29조의 규정에 의하여 자연환경보전지구의 진동·소음의 기준치를 보면 주간경의 경우 진동은 65dBV, 소음이 70dBA를 초과할 수 없는 것으로 규정하고 있다. 또한, 본 논문에서는 김희강 등(1988)에 의하면 사람이 진동을 느끼는 기준이 50~60dBV 사이인 것으로 보고하고 있기 때문에 장어, 메기와 같이 진동·소음에 예민한 어류의 진동 허용치를 60dBV로 설정하였다.

또한, 연구결과에 의하면 어류의 생리학적 측면에서 볼 때 진동·소음의 수준이 평소보다 20~25dB 이상 상승하게 되면 스트레스를 받는 것으로 알려져 있다.

표 2. Ground vibration and noise permissible criterion establishment of eel farm

구 분		허용치 설정	설정근거
진 동	진동레벨	60dBV 이하	소음진동규제법(주간)상 65dBV와 김희강 등(1988)의 제안값 50~60dBV에서 60dBV로 설정
	진동속도	0.028cm/sec 이하	환산값( $dBV=20\log V+91$ )
소 음		70dBA 이하	소음진동규제법(주간)
평상시 진동·소음값의 상승치 기준		암진동·암소음치 + 20~25dB 이하	군산대학교 수산과학연구소

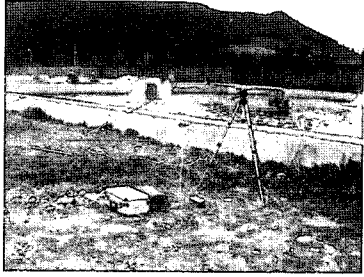
구 분	단 위	측정값	측정모습
암 진 동	dBV	20.2	
암 소 음	dBA	62.3	
측정위치	-	양만장 수조 앞	
측정시간	분	5.0	

그림 1. Normal times rock vibration and rock noise measured results at eel farm

표 3. Ground vibration and noise permissible criterion establishment of this site circumference eel farm

구 분		허용치 설정	설정근거
진 동	진동레벨	40dBV 이하	<ul style="list-style-type: none"> <li>양만장 암진동보다 20~25dBV 증가 할 경우 장애에 피해 예상</li> <li>양만장내 암진동 측정결과 : 20.2dBV</li> </ul>
	진동속도	0.0028cm/sec 이하	환산값( $dBV=20\log V+91$ )(7)
소 음		60dBA 이하	<ul style="list-style-type: none"> <li>양만장의 암소음치 및 마스킹효과를 감안하여 설정</li> <li>소음 허용치는 50dBA이나 평상시 암소음값이 62.3dBA 이므로 안전율을 감안하여 60dBA 로 결정</li> </ul>

따라서 양만장의 발파진동·소음의 허용기준은 이와 같은 결과를 토대로 표 2와 같이 설정할 수 있다.

본 현장의 발파작업은 양만장과 안전거리에서 수행되고 지반진동으로 양만장에 영향을 미치게 될 뿐만 아니라 수중에서 직접 발파작업이 이루어지지 않으므로 수중 충격압에 대한 영향은 극히 미미할 것으로 판단되어 고려하지 않았다.<sup>(1)</sup>

그러나 본 현장 주변에 존재하는 양만장에서 평상시의 암진동과 암소음을 측정된 결과 그림 1과 같이 허용치보다 훨씬 작은 진동값으로 측정되었으며, 암소음은 모타 작동소리, 물소리 등으로 인하여 허용치를 초과하는 것으로 나타났다.

따라서 본 현장 주변에 위치해 있는 양만장의 발파진동·소음의 허용치는 표 2의 소음·진동규제법상의 허

용기준과 그림 1과 같이 양만장에서 측정된 평상시의 진동·소음을 참고하여 표 3과 같이 설정한 후 발파진동·소음에 대한 영향검토를 수행하였다.

### 3. 현장개요 및 시험발파 수행결과 분석

#### 3.1 현장개요

본 논문에서 기술하고 있는 OO 현장은 지방도로 확포장공사 현장으로서 전남 장흥군에 위치하고 있다. 공사가 진행되는 노선 주변에는 발파진동·소음의 영향을 받을 것으로 예상되는 많은 보안물건이 존재하고 있다. 그 중 OO수산 양만장은 절토부 발파 지점으로부터 약 840m 이상 떨어진 지점에 위치해 있지만 진동·소음에 매우 예민한 장애가 양식되고 있기 때문에 발파작업

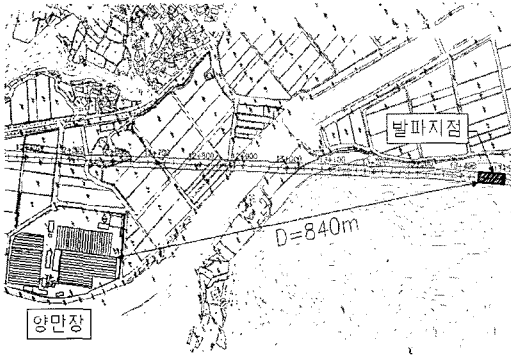


그림 2. Road route & eel farm location

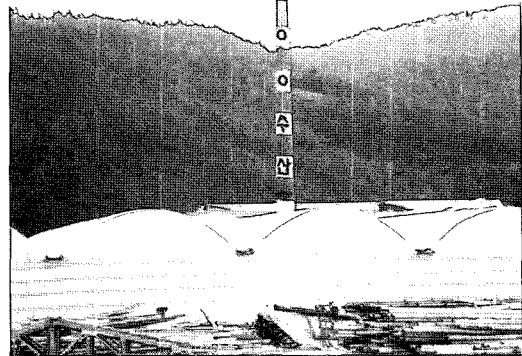


그림 3. Eel farm image

표 4. Specification and image of test vibration the use of logger

구 분	진동레벨 측정기	진동속도 측정기	발파소음 측정기
모델명	VM-1220E	MINIMATE PLUS	SC - 15c
제 원	<ul style="list-style-type: none"> <li>주파수범위 : 1~90Hz</li> <li>측정범위 : 30~120dB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>측정범위 : 0.013~25.4cm/sec</li> <li>저장능력:300ea</li> <li>A-weight:50~100dB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>주파수보정 : A 또는 C</li> <li>측정값 : Leq, Lf, Ls, Lmax</li> </ul>
측정기 사진			

시 많은 민원이 예상될 뿐만 아니라 피해보상이 요구되는 보안물건이다.

양만장내에서 양식되고 있는 장어가 약 150만 마리 정도이며 부속 구조물로 관리동, 사육장, 폐수처리장 등이 존재한다.

본 현장의 지질은 선캠브리아기의 변성암류, 쥐라기의 화강암류 및 백악기의 화산암 등이 부정합으로 넓게 피복되어 있으며, 기반암은 호상 흑운모편마암 및 흑운모화강암으로 분포되어 있다. 이와 같은 기반암은 불연속면에 점토질 및 철성분이 협재되어 있다. 그림 2와 3은 현장 도로노선과 양만장의 위치 및 사진을 나타낸다.

### 3.2 발파진동 및 소음 측정장비 특성

본 현장 시험발파시 사용된 진동 및 소음 측정 장비는 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 것으로서 국내의 소음·진동규제법 조건에 맞는 환경 진동 측정기(진동레벨)를 사용하였다. 이 진동레벨측정기는 일본 IMV

社의 제품으로서 다양한 진동에 대하여 인체를 대상으로 하는 진동평가에 적합한 환경 진동 측정기(Vibration Level Meter)이다. 또한 발파 진동속도 측정기는 캐나다의 INSTANTEL 社 제품인 MINIMATE PLUS를 사용하였다. 이 장비는 국내 발파 기술자 및 현장에서 가장 많이 사용하고 있는 장비로서 최근에 개발된 측정치의 정밀도가 상당히 높은 장비이다. 발파소음기는 스페인 CESVA 社의 제품으로서 다양한 환경소음을 측정하는 소음 측정계(Sound Level Meter)로 조작성이 쉽고 다양한 기능을 가지고 있는 직분형 소음 계측기이다. 표 4는 금번 시험발파에 사용된 측정기의 제원 및 사진이다.

### 3.3 시험발파 수행 및 데이터 수집

발파작업이 이루어지는 절토부에서 양만장까지의 거리는 약 840m 이상 떨어져 있지만 양만장에서 서식하고 있는 장어는 미세한 발파 진동·소음에도 영향을 받을

표 5. Test vibration contests and site image


구 분	내 용	현장사진
이격거리	840m(발파원↔양만장)	
시추공 깊이	26m	
시추공 수	1공(1회 발파)	
사용 화약량	5.0kg	
화약종류	Newmite(φ50mm)	
측정내용	진동레벨, 진동속도, 발파소음	

표 6. Ground vibration and noise measured results at eel farm

구 분	단 위	측 정 값	비 고
진동레벨	dBV	48.5dBV	
진동속도	cm/sec	미감지	
발파소음	dBA	62.3dBA	암소음과 동일수준

것으로 예상되어 본 발파작업을 수행하기 전에 시험발파를 수행하고 그 결과를 분석하여 발파 진동·소음에 대한 영향을 검토하였으며 적합한 발파공법 및 패턴을 제안하고자 한다.

시험발파 방법은 발파 굴착이 이루어지는 절토부 지점에 존재하는 시추공을 활용하였는데, 장약량은 실제 일반 발파 규모에 해당하는 화약량을 사용하였다. 표 5는 금번 시행된 시험발파 현황을 나타낸 것이다.

양만장 근접 지반에서 진동레벨, 진동속도 및 발파소음을 측정하였는데, 진동은 진동레벨(dBV)측정기 및 진동속도(cm/sec)측정기를 이용하여 측정하고, 발파소음은 보통 소음계를 이용하여 측정하므로써 『소음·진동 공정시험방법』을 준수하고 『소음·진동 규제법』의 허용기준에 대한 적합성을 정확히 파악하였다. 양만장에서 발파진동·소음을 측정된 결과 표 6과 같이 나타났다.

양만장에서 발파 진동레벨을 측정된 결과, 48.5dBV로 감지되어 암진동 값보다 약 2배정도인 28.3dBV를 초과하는 것으로 확인 되었을 뿐만 아니라 양만장의 진동레벨 허용치를 초과한 것으로 나타났다. 반면에 발파 진동속도는 감지되지 않았다. 이는 금번 시험발파시 사용된 발파진동측정기(Minimate Plus)의 최소 Trigger Level 값이 0.013cm/sec이기 때문에 장비가 작동되지

않은 것으로 보인다. 그리고 발파소음은 62.3dBA로 감지되었는데, 이와 같은 수치는 암소음과 동일한 수치로서 양만장의 소음원(모터소리, 물 흐름소리, 장어움직임소리)과 마스킹(Masking)효과가 반응하면서 감지된 소음으로 판단하였다.

따라서 본 현장 발파지점에서 지반당 장약량 5.0kg을 사용하여 발파할 경우 양만장에 서식하고 있는 장어에 발파 소음의 영향은 없을 것으로 예상되나 발파 진동은 영향을 줄 것으로 판단하였다.

#### 4. 양만장 보호를 위한 발파진동 영향 검토

##### 4.1 개 요

시추공 시험발파를 수행하고 분석한 결과, 절토부의 발파공법 및 패턴에 따라 양만장에 발파진동의 영향이 미칠 것으로 예상되었다. 따라서, 절토부 구역별로 적용 가능한 발파공법 및 패턴의 결정이 필요하므로 본 현장 절토부 인접지역에서 산출된 발파 진동 추정식을 활용하여 발파 패턴별 발파 진동 영향권을 설정하고 경험적인 방법과 수치해석 방법으로 영향 검토를 수행하였다. 표 7은 본 현장 절토부 인접지역에서 산출된 발파 진동 추정식이다.

본 현장의 발파공법 및 패턴은 건설교통부의 【암발

표 7. Calculated ground vibration assumed equation at cutting the ground of this site

구분	진동추정식	설정근거
자 승 근	$V = 153.22 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.55}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 95% 회귀선 적용</li> <li>• BlastzR3 발파프로그램 활용</li> </ul>
삼 승 근	$V = 811.67 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-2.06}$	

표 8. Blasting vibration effect range classified by blasting method

발파공법분류	굴진장 (m)	천공장 (m)	지발당 장약량 (kg)	적용가능 범위(m)
암파쇄굴착공법	1.3	1.5	0.18	484 ~ 644
정밀진동제어발파	2.0	2.0	0.32	644 ~ 1,140
진동제어소규모발파	2.4	2.7	1.0	1,140 ~ 1,612
진동제어중규모발파	2.6	3.2	2.0	1,612 ~ 2,549
일반발파	4.8	5.7	5.0	2,549 ~ 5,098

표 9. Blasting vibration effect examination and applicable blasting method

발파공법별 적용가능 범위	적용가능 발파공법
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 암파쇄굴착공법</li> <li>• 정밀진동제어발파공법</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 진동영향 검토결과</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양만장에서 경험적 방법으로 검토한 결과 진동제어 소규모발파(장약량 1.0kg)일 경우 0.00449cm/sec의 최대진동속도를 나타낼 것으로 예측됨. 따라서 진동제어 소규모발파보다 발파진동이 적은 발파공법 필요.</li> </ul>

파 설계요령]에 준하여 결정하고, 표 7의 발파 진동 추정식을 활용하여 발파공법별 적용 가능한 적용범위를 표 8과 같이 설정하였다.(4)

여기서, 발파공법별 적용가능 범위는 진동레벨 40 dBV를 0.0028cm/sec의 진동속도값으로 환산하여 추정하였다. 진동레벨(dBV)을 진동속도(cm/sec)로 환산한 이론적인 식은 아래와 같다.

$$dBV = 20 \log V + 91$$

여기서, dBV : 수직방향 보정 진동레벨값  
 V : 진동속도(cm/sec)

위의 이론적 환산식은 진동속도(Peak값)와 수직방향 진동레벨 간에 8Hz 이상일 경우에 상관성이 높은 것으

로 확인되고 있는데, 일반적으로 사람이 8Hz 이상에서 수평진동보다 수직진동의 진동값을 더 크게 느끼는 것으로 파악되고 있기 때문이다. 일반적으로 국내 발파현장에서 적용하고 있는 발파 진동 추정식 단위는 진동속도(cm/sec)를 적용하기 때문에 본 논문에서는 진동레벨 허용값을 진동속도로 환산하여 발파 진동 영향 검토를 수행하였다.

#### 4.2 경험적 발파진동 영향 검토

본 현장 절토부에서 표 8의 발파공법으로 작업을 수행할 경우에 대해 양만장에서의 발파진동 영향 검토를 수행하였다. 양만장에서의 발파 진동속도의 허용치를 0.0028cm/sec 이하로 설정하고 발파 진동레벨 허용치를 40dBV라 할 경우, 절토부 발파작업을 위해 적용 가능한 공법은 표 9와 같이 나타났다.

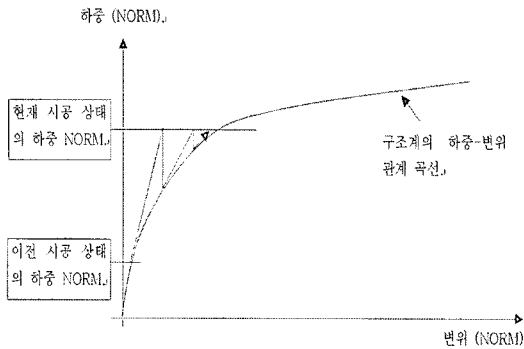


그림 4. Newton-Raphson Iterative Method

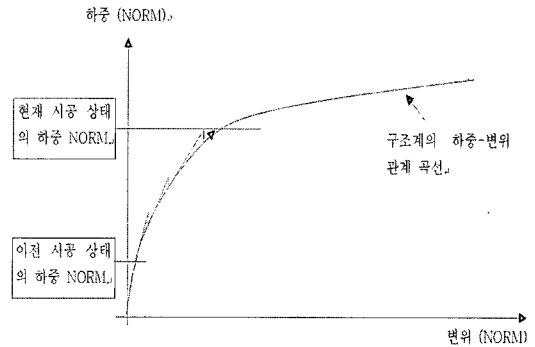


그림 5. PENTAGON-3D Iterative Method

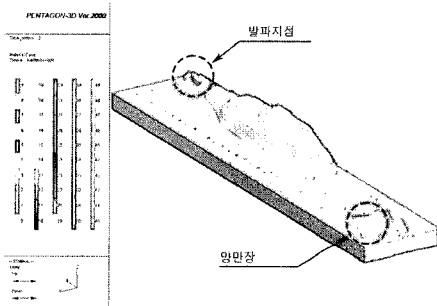


그림 6. Numerical analysis Model

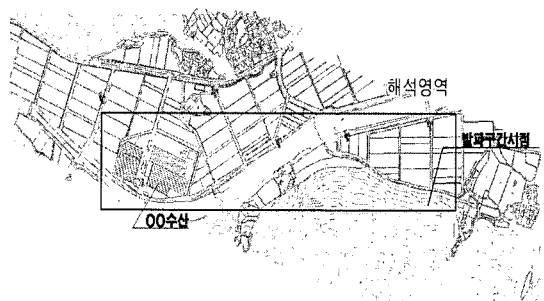


그림 7. Analysis range establishment

4.3 수치해석에 의한 발파진동 영향 검토

일반적인 발파진동 영향권 분석은 현장 시험발파를 통해 확인된 진동 추정식을 이용하여 영향권을 설정하는 경험적인 검토로서 비교적 넓은 지역이나 단순한 지역에서 많이 이용되고 있는 실정으로 다양한 지층으로 구성된 곳이나 발파진원과 인접한 곳에서의 진동을 예측할 경우에는 경험적 접근은 문제의 소지가 있어 왔다. 따라서 본 현장에서 시행될 발파공사가 반경 800~1,000m 내에 위치한 양만장에 영향을 줄 것인지에 대한 3차원 수치해석(PENTAGON-3D)을 통해 예상 진동치를 추정하고 다양한 발파공법에 대한 simulation을 통해 안전성을 검토하였다.

사용된 PENTAGON-3D 프로그램은 다른 3차원 FEM 프로그램에 비해 3차원 모델링이 용이하고 시공 단계별 해석을 실제와 가깝게 재현할 수 있다는 장점으로 인해 기술자들 사이에 많이 사용되고 있다. 또한 Non-linear Material의 경우에 Path-Dependent 특성이 있기 때문에 이러한 구조계의 Non-linear 해석의 경우에는 하중을 조금씩 가하여야 정확한 해석이 이루어지며, 갑작스런 큰 하중을 사용하여 해석하면 부정확한 해석이 이루어진다. 즉, 비선형 재료 모델 해석시 변위

에 따른 비선형적인 응력 변화가 발생하기 때문에 원래의 하중-변위 곡선을 정확히 따라가면서 해석하지 않고 벗어나서 해석할 경우에는 정해에서 벗어나는 결과를 초래한다. PENTAGON-3D에서는 전체 불평형 하중을 잘게 나누어서 점진적으로 해석함으로써 이를 해결하고 있다(그림 5 참조).

그림 4는 일반적인 Nonlinear 해석에 있어서의 Newton-Raphson Method에서 이루어지는 방법을 보여주며, 그림 5는 PENTAGON-3D에서 사용하는 접근 방법을 보여준다.

그림 6은 발파 진동 수치해석을 위한 해석모델이며 그림 7은 해석대상 영역을 나타낸 것이다.

지반과 같은 무한한 매질을 모델링할 때에는 정해석에서는 충분히 멀게 경계를 잡으면 되지만, 동해석에서는 일반적인 경계를 잡을 경우 파가 반사되는 효과가 생기기 때문에 큰 오차가 유발될 수 있다. 이를 처리하는 방법에는 근사적인 방법인 인공경계(artificial boundary), 전달경계/초유한요소(transmitting boundary, hyper-element), 무한요소(infinite element), 경계요소(boundary element) 등의 방법이 있으며 본 해석에서는 Lysmer와 Wass가 제안한 점성경계(viscous boundary 또는

표 10. Applied ground parameter and numerical analysis modeling

지반 동적 물성		매립층	연암반층	지층 모델링
탄성파 속도 (m/s)	$V_p$	960	3,155	
	$V_s$	470	1,980	
동전단계수, ( $G_d$ , $tf/m^2$ )		164,000	5,790,000	
동탄성계수, ( $E_d$ , $tf/m^2$ )		454,000	11,970,000	
동체적탄성계수 ( $K_d$ , $tf/m^2$ )		630,556	8,866,667	
동포아송비 ( $\nu_d$ )		0.38	0.27	

CASE	1	2	3
수치해석 결과			
지발당 장약량	W = 0.18 kg	W = 0.32 kg	W = 1.0 kg

그림 8. Variation of blasting load for time history classified by charge of delay time

quiet boundary)를 적용하였다. 본 현장의 발파 진동 수치 해석을 위해 적용된 지반동적 물성치와 지층 모델링을 보면 표 10과 같다. 지반 물성치는 현장 시추조사와 탄성파 탐사, 실내시험 등을 수행한 결과에서 구하였다.

발파하중의 산정을 위해 일반적인 발파공에 대한 탄성해석에서 발파압력을 공벽에 수직한 방향으로 가해 지도록 하고 이때, 작용하중을 미국 National Highway Institute에서 제시한 공식을 적용하였다. 아래의 식은 하중 1kg당 폭발하중을 기준으로 하였다.

$$P_{det} = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times SG_e \times V_c^2}{1 + 0.8SG_e}$$

$$P_B = P_D \times \left(\frac{d_c}{d_h}\right)^3$$

여기서,  $P_{det}$  = 폭발압력(detonation pressure, kbar)

$SG_e$  = 폭발밀도(explosive density, g/cm<sup>3</sup>)

$P_B$  = 공벽면에 가해지는 압력

(decoupled detonation pressure, kbar)

$V_c$  = 폭속 (detonation velocity, ft/sec)

$d_c$  = 화약의 직경 (charge diameter, mm)

$d_h$  = 장약공의 직경

(borehole diameter, mm)

위의 식은 발파시 발생하는 공기 동압력의 크기를 정의하는 식이며 실제 공벽에 작용하는 동압력은 시간에 따라 변하는 형태를 취하였다. 따라서, Statfield(1968)가 제시한 시간이력에 대한 동압력을 적용하였다.

$$P_D(t) = 4P_B \left( \exp\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2}Bt) \right)$$

여기서, B=16338인 하중상수이며  $P_D(t)$ 는 단위장약량당 동압력, t는 시간(sec)이다. 장약량을 0.18kg, 0.32kg, 1.0kg의 3가지 Case로 하여 발파하중을 산정하였다. 지발당 장약량별 발파하중에 대한 변위양상(5.0sec 기준)의 수치해석 결과를 보면 그림 8과 같다.

위의 수치해석 결과를 통해 확인된 양만장에서의 지



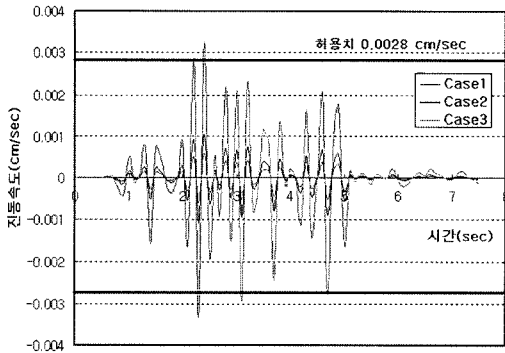


그림 9. Variation of blasting vibration velocity in time history classified by charge of delay time

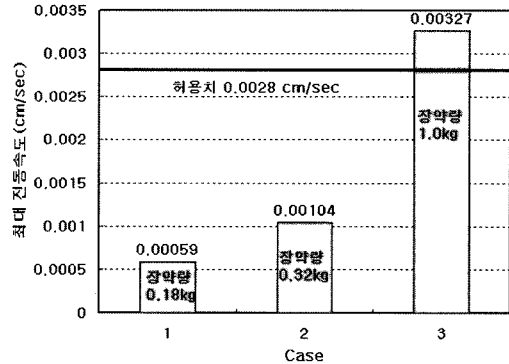


그림 10. Variation of maximum vibration velocity classified by charge of delay time

표 11. Safety blasting technique and blasting pollution decrease scheme and expected effect

구분	발파진동	발파소음
적용기술 · 저감방안	<ul style="list-style-type: none"> <li>발파공 분산장약<sup>(5)</sup> → N.D.C(New Deck Charge) 발파공법 적용</li> <li>최소저항선 최소화로 지반전달충격파 에너지 감소<sup>(6)</sup> → Wide Space 발파공법 적용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>자유면에 브라스팅매트 설치</li> <li>양만장 방향쪽 가설방호벽 설치</li> <li>발파당 기록 뇌관수 10공 이내로 제한</li> <li>천공장비에 천공소음 차단장치 설치</li> </ul>
그림		
기대효과	<ul style="list-style-type: none"> <li>N.D.C 및 Wide Space 발파공법 적용시 발파진동 약 30% 저감 기대<sup>(8)</sup></li> <li>브라스팅 매트 설치시 발파소음 약 15dBA 저감 기대</li> <li>천공소리 차단장치 설치시 천공소음 약 10dBA 저감 기대</li> </ul>	

발당 장약량별 이력곡선상의 발파진동 변화추이는 그림 9이며 최대진동속도를 보면 그림 10과 같다.

그림 9, 10에서 보면, 경험적 방법과 마찬가지로 지발당 장약량이 0.18kg, 0.32kg인 암파쇄굴착공법, 정밀진동제어발파공법의 경우 최대 진동속도가 각각 0.00059 cm/sec, 0.00104 cm/sec으로 허용치(0.0028cm/sec) 이내로 나타났다. 그러나 지발당 장약량이 1.0kg인 진동제어소규모발파공법을 적용할 경우는 최대 진동속도가 0.00327cm/sec으로 허용치를 초과하는 것으로 예상되었다. 따라서 진동제어소규모 발파공법보다 최대 진동속도가 작게 발생하는 암파쇄굴착공법 이나 정밀진동제어발파공법의 적용이 필요하게 되었다.

#### 4.4 발파 진동·소음 저감 공법

현장 발파작업시 양만장에 미치는 발파진동·소음을 최소화 하기 위해서 앞의 표 8과 같은 건설교통부 지침상의 발파공법 이외에 추가적인 안전 발파기술 및 발파공해 저감방안이 필요한 것으로 판단하였다. 표 11은 앞의 검토결과를 토대로 본 현장에 적용한 발파공법 및 기대효과를 나타낸 것이다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 OO 현장에서 수행되는 절토부 발파지점으로부터 약 840m 떨어져 위치해 있는 양만장의 발파진동 및 소음에 대한 영향을 검토하기 위해서 지발당 장약량 5.0kg을 사용하여 실규모 시험발파를 수행하였

다. 이를 토대로 발파진동 추정식을 산출하여 경험적 방법으로 검토한 결과 지발당 장약량 1.0kg일 때 최대 진동속도가 0.00449cm/sec로 허용기준치 0.0028cm/sec를 초과하는 것으로 나타나 허용기준치이내의 적합한 발파공법 및 패턴을 결정하였다. 또한 지반조사 결과를 이용하여 수치해석 방법을 통해 이를 검증하고자 하였다. 수치해석 결과 지발당 장약량이 0.18kg, 0.32kg인 암파쇄굴착공법, 정밀진동제어발파공법의 경우 최대 진동속도가 각각 0.00059cm/sec, 0.00104cm/sec으로 허용치(0.0028cm/sec) 이내로 나타났으나 지발당 장약량이 1.0kg인 진동제어소규모발파공법을 적용할 경우는 최대 진동속도가 0.00327cm/sec으로 허용치를 초과하는 것으로 예상되었다. 따라서 경험적 방법 및 수치해석 결과를 종합적으로 고려해 볼 때 진동제어소규모 발파공법보다 최대 진동속도가 작게 발생하는 암파쇄굴착공법이나 정밀진동제어발파공법의 적용이 필요하게 되었다.

경험적 방법과 수치해석 방법을 비교한 결과는 지발당 장약량 1.0kg일 경우 최대진동속도가 각각 0.00449cm/sec, 0.00327cm/sec로 약 27%의 차이가 발생하였다. 이 차이는 지층구성이 다양한 지반에서 경험적 방법과 수치해석 방법의 차이를 나타낸 것으로 판단되며

추후 더 많은 연구를 통해 그 차이를 줄여 나가야 될 것으로 생각된다. 결론적으로 양만장과 같은 발파진동·소음에 민감한 보안물건 주변 발파시 발파 피해를 최소화하고 민원발생을 예방하기 위해 본 논문과 같은 방법을 이용할 것을 제안한다. 그리고 향후에는 수중 충격압에 의한 어패류의 피해가 큰 것으로 보고 되고 있어 이에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 전남대학교 공업기술연구소, 1996, 여천항 LG부두 전용 부두 수중발파 영향평가 및 발파설계, p. 19-22.
2. 군산대학교 수산과학연구소, 1999, 유진양만장 어업피해 조사보고서, p. 21-47.
3. 환경부, 1996, 진동으로 인한 피해와 인과관계 검토기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구, p. 266-268.
4. 건설교통부, 2003, 암발파 설계기준 및 시공지침.
5. 이태노, 김동현, 서영화, 2003, The development of methods for minimizing overbreak in tunnel blasting, ISEE 33th Annual Conference.
6. Per-Anders Persson, 1993, Rock blasting & Explosives engineering, p. 252-253.
7. 윤지선, 1998, 최신발파기술, 구미서관, p. 165.
8. 노상림 등, 2005, N.D.C 및 Wide Space 혼합공법을 통한 발파효율 개선사례, 한국암반공학회.

## 이 송



1973년 서울시립대학교 농업토목학과 학사  
1978년 고려대학교 대학원 토목공학과 석사  
1985년 고려대학교 대학원 토목공학과 박사

Tel: 02-2210-2515  
E-mail: scugeo@uos.ac.kr  
현재 서울시립대학교 교수

## 김 성 구



1983년 연세대학교 이과대학 지질학과 학사  
2001년 부경대학교 대학원 지구환경과 학과 석사

Tel: 02-728-2396  
E-mail: kimsk@gsconst.co.kr  
현재 GS건설(주) 토목사업본부 의정부 경전철 시공사업단장  
서울시립대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## 이 용 호



1995년 경기대학교 공과대학 토목환경공학과 학사  
1997년 동국대학교 대학원 토목공학과 석사

Tel: 02-728-3078  
E-mail: yhleec7@gsconst.co.kr  
현재 GS건설(주) 토목사업본부 토목기술 설계팀 과장