

터널 굴착 시 주변 구조물에 미치는 영향을 고려한 발파 설계 사례

백승규^{1)*}, 추석연¹⁾, 윤종오¹⁾, 백운일²⁾, 박형섭²⁾

Case Study of Blasting Pattern Design for Tunnelling in Which Considered Blast Induced Vibration Affected Across Buildings

Seung-Kyu Baek, Seok-Yeon Choo, Jong-O Yoon, Un-Il Baek and Hyung-Seop Park

Abstract In generally blasting pattern design is carried out in-situ borehole blasting test and its analysis. We added the 3D numerical analysis for blast induced vibrations. This paper is case study of 3D numerical analysis in which considered blast induced vibration affected across buildings, and then we design the blasting pattern of tunnel excavation.

Key words 3D numerical analysis, Blast vibration analysis

초 록 본 연구에서는 기존의 시추공 시험 발파 결과를 이용한 분석뿐만 아니라, 3차원 수치 해석으로 터널 굴착 시 실제 발파와 동일한 조건을 적용한 발파진동영향 검토를 실시하고 주변 구조물에 미치는 진동 영향을 분석하여 발파패턴 설계를 수행하였다.

핵심어 3차원수치해석, 발파진동영향 분석

1. 서 론

본 연구는 터널형 비상여수로 건설을 위한 발파 설계 시 주변 주요 구조물 및 시설물에 미치는 진동 영향을 고려한 발파 설계 사례이다.

발파진동은 지형과 지질특성 등에 따라 전파특성이 달라지기 때문에 일반적으로 현장 시험발파를 실시하고, 발파진동식과 최대 허용 지발당 장약량을 구하여 발파패턴 설계를 실시한다.

본 연구에서는 일반적인 방법인 시험발파 결과를 이용한 발파진동식으로부터 최대 허용 지발당 장약량을 구하고, 추가로 실제 발파 조건과 동일한 조건으로 3차원 수치해석을 실시하여 역해석 방법으로 진동식과 최대 허용 지발당 장약량을 산정하였다. 그리고 실험과 수치해석 두 결과를 비교 검토하여 주변 구조물과 시설물에 미치는 발파진동 영향을 최소화하며 터널의 안전을 고려한 발파패턴 설계가 이루어질 수 있도록 하고자 하였다.

2. 현황 및 허용 진동 기준 검토

2.1 터널 설계 현황

본 연구는 터널형 비상여수로 건설공사 중 발파 설계를 위한 시험발파 및 수치해석을 이용한 최대 허용 지발당 장약량의 결정과정으로, 연구 대상인 비상여수로 터널의 특징 및 개요를 그림 2.1과 표 2.1에 정리하여 나타내었다.

비상여수로 터널은 3련 병렬 터널로서 댐 상부저수지로부터 하류로 물을 방류하는 특성상 단면의 크기와 형태, 구배가 변화하며, 그 특징에 따라 유입·유출 천이 구간, 경사구간(만곡구간), 일반구간 등으로 구분할 수 있다. 단면의 형태가 변하는 유입·유출 천이구간은 최대 폭 20.2 m, 높이 16.2 m의 굴착단면이고, 경사구간은 구배 1:4.5의 경사도를 가지는 구간이며, 일반 구간은 굴착 폭 16.2 m의 굴착단면이다.

2.2 주변 구조물 현황 및 허용 진동 기준

입하댐 주변의 구조물과 시설물들의 현황을 그림 2.2에 정리하여 나타내었으며, 표 2.2는 각 구조물과 터널 간 이격거리와 발파진동 허용치를 정리한 것이다.

주요 시설물은 댐 부속건물인 발전소, 발전수로터널,

¹⁾ 단우기술단

²⁾ 대림산업

* 교신저자 : bsknamin@hanmail.net

접수일 : 2006년 8월 3일

심사 완료일 : 2006년 10월 9일

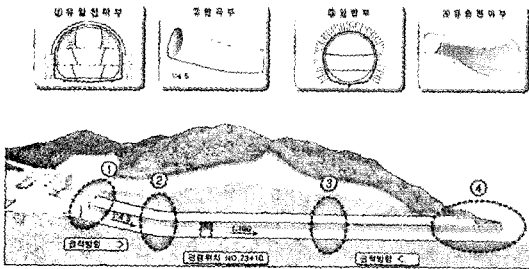


그림 2.1. 임하댐 터널형 비상여수로 개요

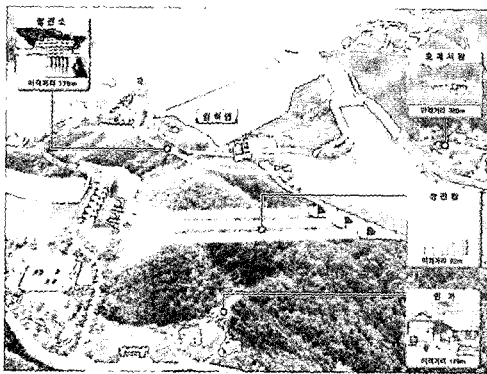


그림 2.2. 임하댐 주변 시설물 및 구조물 분포 현황

기존여수로 등이 있으며, 구조물로는 호계서원, 주변 민가와, 망천교 등이 있다. 발파진동 허용치는 이들 주요 구조물들의 안전을 위하여 터널표준시방서의 콘크리트 구조물의 발파 진동 허용 기준 중 가장 낮은값인 1.0 cm/sec로 적용하였다.

3. 시험 발파 및 진동 영향 검토

3.1 시험발파 개요

암반 및 지질특성과 지형적 특성 등을 반영한 발파설

표 2.1. 터널별 제원

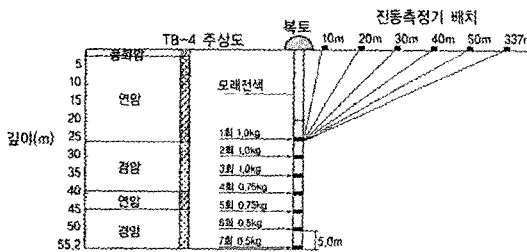
구분	유입천이부 (m)	일반부 (m)	유출천이부 (m)	총계 (m)	비고
1터널	29	313	38	380	유출부 위치에 따라 일반구간 터널별 길이 차이 발생
2터널	29	354	38	421	
3터널	29	395	38	462	

표 2.2. 주요 보안물건 현황 및 허용진동 기준

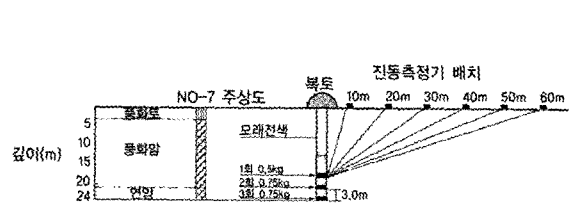
보안물건	허용 진동치 (cm/sec)	이격거리 (m)	비고
발전소·변전소	1.0	170	터널표준시방서의 콘크리트 구조물 발파진동 허용기준 적용 1.0 cm/sec
송전탑	1.0	92	
가배수터널	1.0	93	
발전수로터널	1.0	190	
기존여수로	1.0	473	
임하댐 본체	1.0	218	
망천교	1.0	395	
호계서원	0.2	380	
민가	0.3	179	

계 기초자료를 얻기 위해 두 개의 시추공을 이용하여 시험발파를 실시하고, 계측의 분석을 통해서 현지암반 특성에 적합한 발파진동식을 산출하고자 하였다.

그림 3.1은 시추공의 주상도와 시험발파 패턴, 발파진동 측정기 배치 상태를 나타낸 것으로, 2개의 발파공에서 회귀분석에 필요한 진동치 30점 이상을 확보하기 위해 TB-4 시험발파공에서는 7단계로(장약간 이격거리 5.0 m), NO-7 시추공에서는 3단계로(장약간 이격거리 3.0 m) 분산장약한 후, LP 뇌관을 사용하여 시험하였다. 총 6대의 발파진동 계측기를 발파공으로부터 10 m 간



(a) TB-4 발파공 주상도 및 시험발파 개요



(b) NO-7 발파공 주상도 및 시험발파 개요

그림 3.1. 시추공 시험발파 개요 및 계측기 배치도

표 3.1. 발파진동 계측 자료

성분	TB-4의 발파진동 이력곡선	평면이격 거리	NO-7의 발파진동 이력곡선	평면이격 거리
Tran		10 m (3903)		10 m (3904)
Vert				
Long				
Tran	UNDER TRIGGERED (V=0.013 cm/sec 이하)	337 m (2378)		60 m (2506)
Vert				
Long				
회차	↑ ① ↑ ② ↑ ③ ↑ ④ ↑ ⑤ ↑ ⑥ ↑ ⑦	회차	↑ ① ↑ ② ↑ ③	

격으로 배치하여 계측하였으며, 표 3.1은 총 53개의 계측 자료 중 일부를 정리하여 나타낸 것이다.

3.2 발파 진동식

시험발파 결과로부터 얻어진 자료들로부터 회귀분석을 실시하여 세방향 성분 벡터합의 발파진동식을 산정하였으며, 식 3.1은 95% 신뢰도의 발파진동식을 나타낸 것이다.

$$V_{95\%} = 234.2 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.867} \quad (3.1)$$

3.3 허용 진동 기준에 따른 최대 허용 지발당 장약량 산정

발파 진동식 (3.1)로부터 본 대상지역의 주요 시설물

별 최대 허용 지발당 장약량을 계산하여 표 3.2에 정리하였다. 주변 주요 구조물 또는 시설물의 경우 최대 허용 지발당 장약량은 송전탑을 기준으로 약 24 kg일 경우인 것을 알 수 있다.

3.4 진동 영향 검토

최대 허용 지발당 장약량 24 kg을 이용하여 진동 영향권 분석을 실시하였으며, 그림 3.2는 진동 영향 범위를 영향원으로 나타낸 것이다. 공사구간 주변의 주요 시설물과 구조물들 모두 허용 진동영향 범위 1 cm/sec의 외곽부에 위치하여 안전한 것을 알 수 있다.

4. 수치 해석적 진동 영향 검토

수치해석적 방법으로 발파 진동식을 추정하고, 주변

표 3.2. 주요 구조물별 최대 허용 지발당 장약량

보안물건	허용 진동치 (cm/sec)	이격거리 (m)	최대 허용 지발당 장약량(kg)
발전소 · 변전소	1.0	170	178
송전탑	1.0	92	24
가배수터널	1.0	93	25
수로터널	1.0	190	104
기준여수로	1.0	473	645
임하댐 본체	1.0	218	162
망천교	1.0	395	450
호계서원	0.2	380	59
민가	0.3	179	25

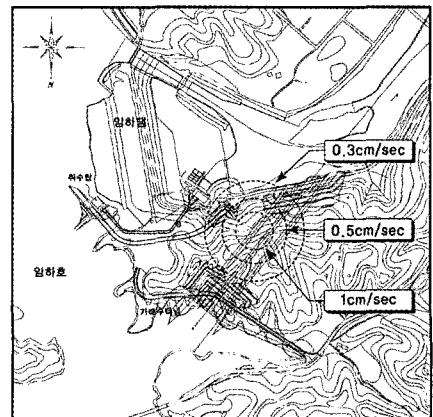


그림 3.2. 터널 굴착 시 발파 진동 영향 범위

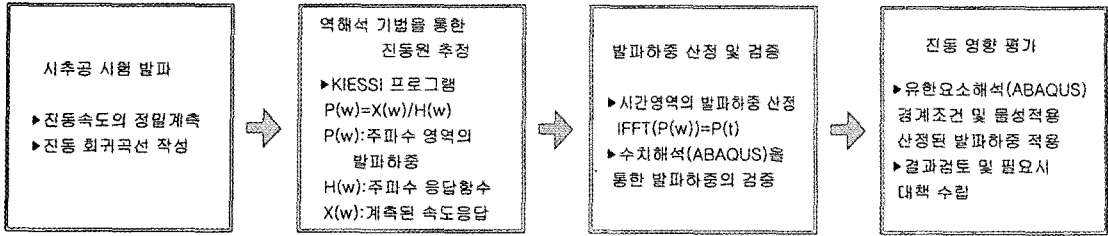


그림 4.1. 수치해석 흐름도

구조물과 시설물에 미치는 진동영향 분석을 실시하였으며, 그림 4.1은 해석과정을 나타낸 것이다. 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 해석 결과를 분석하고 허용기준과 비교를 통하여 진동 영향을 검토 하였다.

측지점의 지반 물성치는 표 4.1에 정리하였다. 그림 4.3은 시험 발파 시 얻은 지반진동속도에 대한 계측 데이터 중 하나이며, 이 계측 데이터와 역해석 기법을 통한 계측지점의 주파수응답함수를 이용하여 해석에 적용할 발파하중을 산정하였다.

4.1 발파 하중 산정을 위한 발파 진동 계측 자료의 역변환

식 (4.1)은 발파하중과 이로 인한 임의 지점의 응답 전달함수이다.

$$X(\omega) = H(\omega) \cdot P(\omega) \tag{4.1}$$

본 과업에서는 발파원과 계측지점의 전달함수를 구하기 위하여 유체-구조물-지반 상호작용해석 프로그램인 KIESSI-A3D를 사용하였다. KIESSI-A3D 프로그램은 원통형 축대칭체(구조물, 유체, 지반)에 3차원 하중이 작용될 때 동적상호작용해석을 유한요소, 유체요소, 동적무한요소, 점성경계요소를 사용하는 수치해석 프로그램이다.

여기서, $H(\omega)$ 와 $X(\omega)$ 는 각각 임의 계측지점의 전달함수와 계측된 값이고, $P(\omega)$ 는 발파하중을 나타낸다. 발파하중을 구하기 위해 KIESSI 프로그램을 사용하여 단위하중 작용시 계측지점에서 세방향 전달함수 $H(\omega)$ 를 구하였으며, 계측응답 $X(\omega)$ 는 시험발파를 통하여 계측된 속도 응답이 사용되었다.

본 시험발파와 동일한 조건으로 모사하기 위하여 시추공발파(TB-4)의 조건을 그림 4.2에 나타내었으며, 계

측은 발파원으로부터 수평거리 45 m인 지점에서

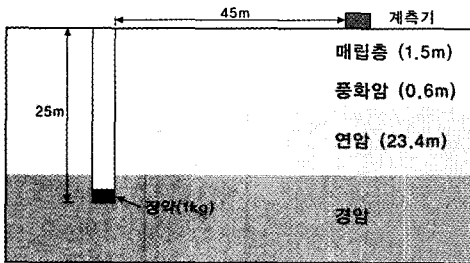


그림 4.2. 수치해석 범위 모식도

표 4.1. 계측구간의 지반 물성치

구 분	매립층	풍화암	연암	경암
전단파속도 (m/sec)	320	650	1700	2200
동탄성계수 (N/m ²)	5.8×108	2.7×109	1.9×1010	3.1×1010
동프와송비	0.38	0.35	0.3	0.27
밀도 (kg/m ³)	1900	2100	2300	2500

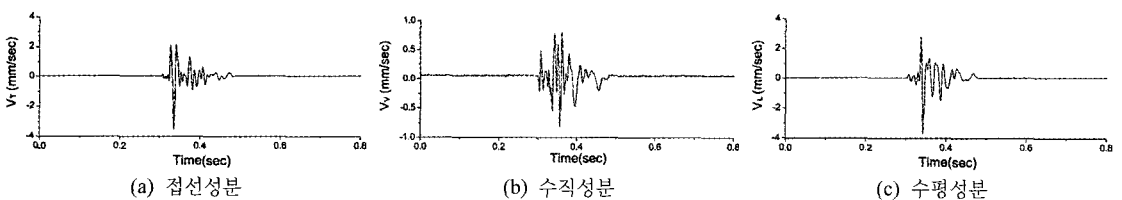


그림 4.3. 발파진동 계측 자료

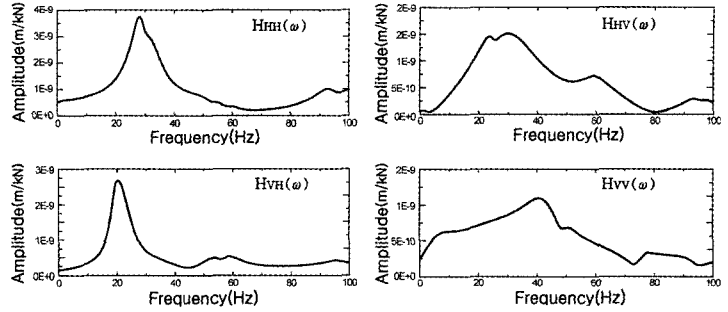
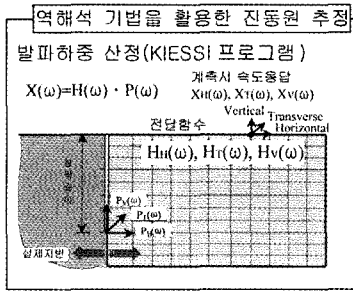


그림 4.4. 전달함수 산정방법 및 산정된 전달함수

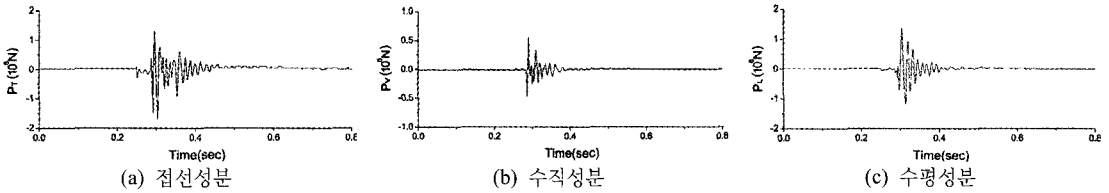


그림 4.5. 발파압력 시간이력 결과

접선방향, 수직방향, 수평방향에 대해 수행되었다. 또한 그림 4.4와 같이 KIessi 전산프로그램을 사용하여 시험발파 시 측측이 이루어진 지점에서 세 방향 전달함수를 구하였다.

발파하중은 시험발파를 통해 측측된 응답과 KIessi 프로그램에서 구한 전달함수를 식 (4.1)에 대입하여 세 방향 성분에 대해 정리한 후, 역 푸리에 변환하여 시간이력에 따른 발파 하중을 구할 수 있으며, 그림 4.5는 해석 결과 얻어진 발파압력의 시간이력 결과를 나타낸 것이다.

하였다.

그림 4.6은 해석에 사용된 요소망과 해석 결과를 나타낸 것이다. 발파하중이 모델 경계영역에서 반사되는 것을 막기 위해 무한 요소를 사용하였으며, 8절점 유한요소 및 무한요소로 모델링 하였다.

수치해석 응답과 시험발파에서 구한 응답을 비교 하였으며, 표 4.2에서 보듯이 거의 같은 크기와 형태를 갖는 것을 알 수 있었으며, 셋방향의 전달함수가 적절한 것으로 판단하였다.

4.2 발파하중의 검증

앞 절에서 구한 발파하중의 검증을 위해 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석을 실시

4.3 해석모델의 발파진동식 추정 및 허용 지발당 장악량 산정

그림 4.6 모델의 임의의 지표상의 절점들에서 진동속

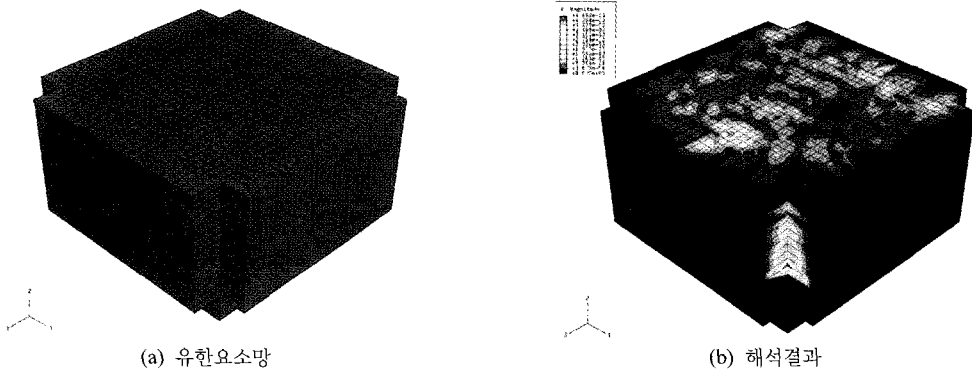


그림 4.6. 발파하중의 검증을 위한 수치해석

표 4.2. 시험발파 계측치와 수치해석 결과 비교

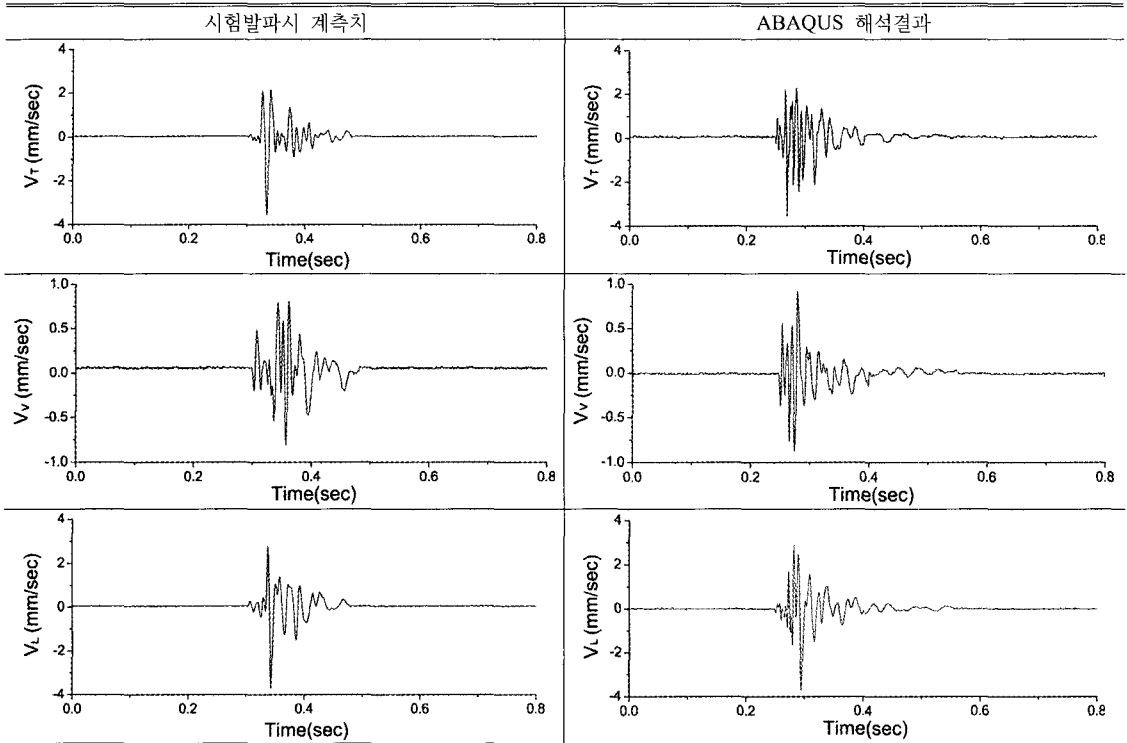


표 4.3. 주요 구조물별 최대 허용 지발당 장약량

보안물건	허용 진동치 (cm/sec)	평균 이격거리 (m)	최대 허용 지발당 장약량 (kg)
발전소 · 변전소	1.0	170	160
송전탑	1.0	92	22
가배수터널	1.0	93	23
수로터널	1.0	190	96
기존여수로	1.0	473	590
입하댐 본체	1.0	218	148
망천교	1.0	395	410
호계서원	0.2	380	24
민 가	0.3	179	13

도를 측정한 후 회귀분석을 실시하여 벡터합의 발파 진동식 (4.2)를 구하였다.

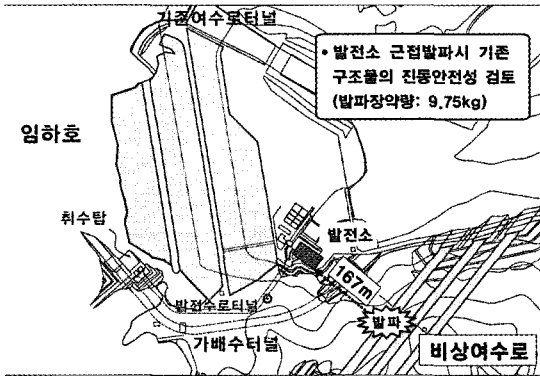
$$V = 46.281 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.294} \quad (4.2)$$

식 (4.2)로 본 대상지역의 주요 시설물별 최대 허용 장약량을 계산하여 표 4.3에 정리하였다. 주변 주요 구

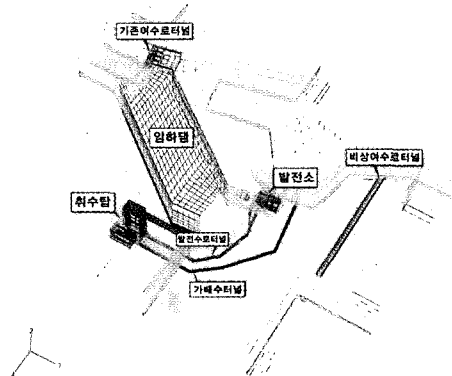
조물 또는 시설물을 고려할 경우 최대 허용 지발당 장약량은 민가를 기준으로 약 13 kg인 것을 알 수 있다.

4.4 진동 영향 검토

3차원 유한요소해석을 사용하여 터널 굴착시 주변 구조에 미치는 영향을 검토하였다. 해석은 3개 주요 구조물인 발전소, 입하댐, 망천교의 최단 근접 발파로 해석에 사용된 지반물성치는 표 4.1의 값을 사용하였다.



(a) 해석 개요도



(b) 해석모델 요소망

그림 4.7. 발전소 근접발파 시 해석개요도 및 해석모델 요소망

표 4.4. 발파진동 영향 해석 결과

진동속도 분포도	최대진동속도 (발전소)	최대진동속도 (가배수 및 발전수터널)	최대진동속도 (임하댐 및 기존여수로)
	0.252<0.5 cm/sec	0.327<1.0 cm/sec	0.136<1.0 cm/sec
검토위치	①번위치 진동속도	②번위치 진동속도	③번위치 진동속도

4.4.1 발전소 근접 발파

해석구간은 그림 4.7과 같이 비상여수로 터널 발파시 발전소와 최단거리의 발파를 가정하였다. 해석시 하중은 역해석 기법을 통해 산정된 발파하중을 시간이력하중으로 적용하였으며, 이때 발파하중의 크기는 장약량 13 kg의 75% 수준인 9.75 kg으로 적용하였다. 수치해석은 범용 유한요소프로그램인 ABAQUS를 사용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 경계조건으로는 지반의 반무한성을 고려하여 무한요소를 적용하였다. 해석결과를 통해 기존구조물인 발전소, 임하댐, 가배수 및 발전수터널 등의 진동안전성을 검토하였다. 그림 4.7 (a)은 해석개요도이고, 그림 4.7 (b)은 요소망이다.



그림 4.8. 임하댐 근접 발파 시 해석개요도

표 4.4는 해석 결과를 나타낸 것으로 발전소 최단 근접거리 발파공사를 기준으로 기존구조물의 진동영향 검토결과 가배수터널(0.327 cm/sec), 발전소(0.252 cm/sec), 임하댐(0.136 cm/sec) 모두 허용기준치를 만족하고 있어 안전함을 확인하였다.

4.4.2 임하댐 근접 발파 시 진동영향 검토

해석구간은 그림 4.8과 같이 비상여수로 터널 발파시 임하댐과 가장 가까운 위치의 발파를 가정하였다. 표 4.5는 해석 결과를 정리한 것이다.

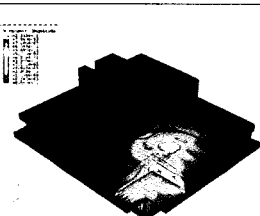
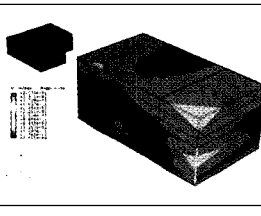
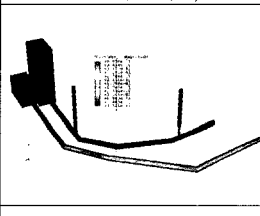
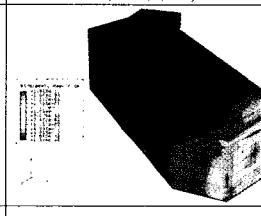
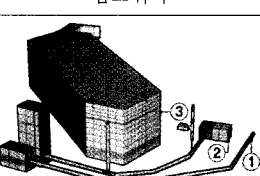
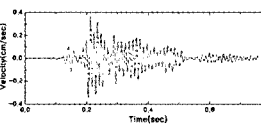
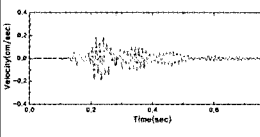
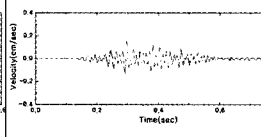
임하댐 최단 근접거리 발파공사를 기준으로 기존구조물의 진동영향 검토결과 가배수터널(0.418 cm/sec), 발전소(0.207 cm/sec), 임하댐(0.182 cm/sec) 모두 허용기준치를 만족하고 있어 안전함을 확인하였다.

4.4.3 망천교 근접발파 시 진동영향 검토

해석구간은 그림 4.9와 같이 비상여수로 터널 발파시 망천교와 가장 가까운 위치의 발파를 가정하여, 해석결과를 통해 기존구조물인 망천교의 진동영향을 검토하였다. 그림 4.10은 요소망이고, 망천교는 해석의 효율성을 위해 교축방향으로 발파위치와 최단거리에 위치한 PIER2까지만 모델링 하였으며, 나머지 부분은 교량 단면에 무한요소를 사용하여 경계조건으로 적용하였다. 표 4.6은 해석 결과를 나타낸 것이다.

망천교 최단 근접거리 발파공사시 망천교의 진동영향 검토결과 교량에서 발생하는 최대진동속도는 0.091 cm/sec으로 허용기준치를 충분히 만족하고 있어 안전함을 확인할 수 있었다.

표 4.5. 발파진동 영향 해석 결과

진동속도 분포도	최대진동속도(발전소)	최대진동속도(가배수 및 발전수로터널)	최대진동속도(임하댐 및 기준여수로)
	 0.207 < 0.5 cm/sec	 0.418 < 1.0 cm/sec	 0.182 < 1.0 cm/sec
검토위치	①번위치 진동속도	②번위치 진동속도	③번위치 진동속도
			

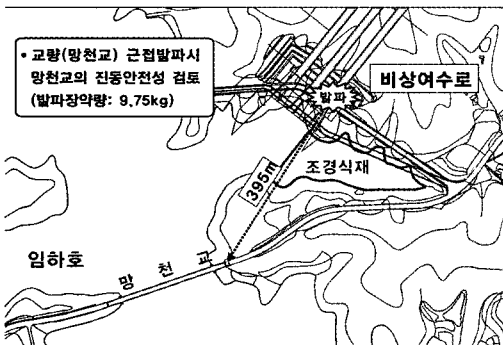


그림 4.9. 망천교 근접 발파시 해석 개요도

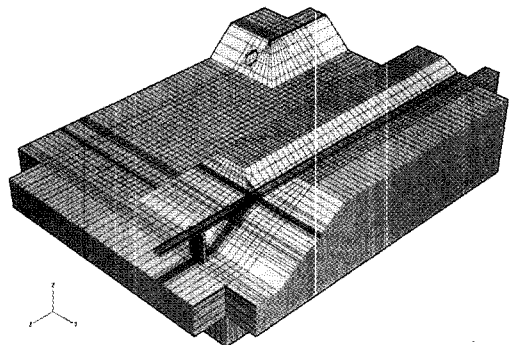
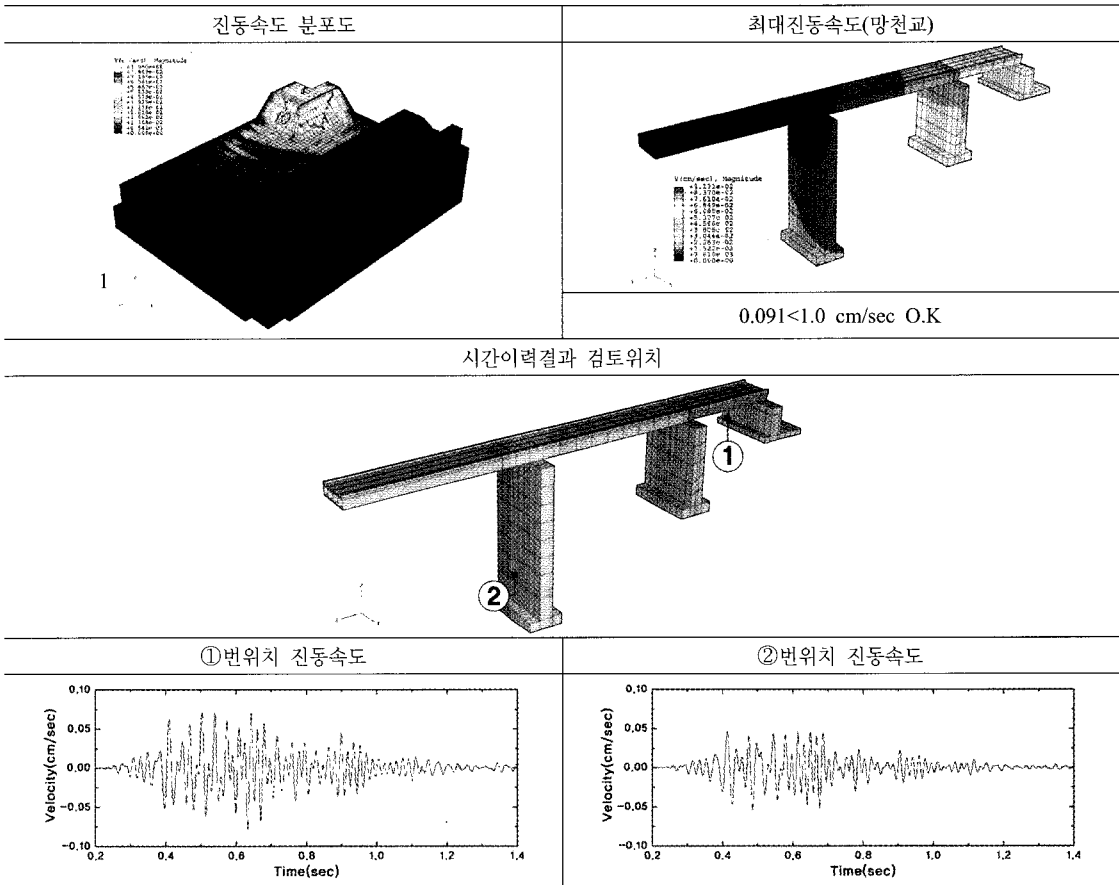


그림 4.10. 망천교 근접 발파시 요소망

표 4.6. 발파진동 영향 해석 결과



5. 결 론

본 연구에서는 시험발파 결과를 이용한 발파진동식으로부터 최대 허용 지발당 장약량을 구하고, 추가로 실제 발파 조건과 동일한 조건으로 3차원 수치해석을 실시하여 진동식과 최대 허용 지발당 장약량을 산정하였다. 그리고 두 결과를 비교 검토하여 주변 구조물과 시설물에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 발파패턴 설계를 실시하였다.

이상의 본 연구 결과들을 요약하여 정리하면 아래와 같다.

- 1) 발파원 모델링을 위하여 유체-구조물-지반 상호작용해석 프로그램인 KIESSI-A3D를 사용하여 해석 기법으로 발파원을 모델링하였으며, 실제 조건과 동일한 조건으로 해석을 실시하여 실측된 발파진동 자료와 비교를 통하여 모델링의 적정성을 검

증하였다.

- 2) 시험발파와 수치해석 결과로부터 얻은 발파진동식은

$$V = 234.2 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.867} \quad : \text{시험발파 발파진동식}$$

$$V = 46.281 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.294} \quad : \text{수치해석 발파진동식}$$

이고, 두 식으로부터 계산된 최대 허용 지발당 장약량은 시험발파의 경우 24 kg이고, 수치해석의 경우 13 kg으로 계산되었다. 본 연구에서는 터널 주변 주요 구조물들의 안전을 위하여 최대 허용 지발당 장약량을 13 kg으로 적용하였다.

- 3) 본 연구에서는 주변 구조물들의 안전과 터널의 안전을 위하여 계산된 최대 허용 지발당 장약량 13 kg의 75% 수준인 9.75 kg을 허용 지발당 장약량으로 발파 설계를 수행하였다. 수치해석결과 9.75

kg의 지발당 장약량을 사용할 경우 주요구조물에 미치는 발파진동 영향은 발전소 : 0.252 cm/sec, 가배수 및 발전수로터널 : 0.418 cm/sec, 임하댐 : 0.182 cm/sec, 망천교 : 0.091 cm/sec으로 모두 허용진동기준치인 1.0 cm/sec를 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 본 과업구간의 발파공사시 설계 장약량에 대해 별도의 방진대책은 필요 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2003, 암 발파공법 설계 및 시험발파 잠정지침
2. 김재극, 1990, 산업화학과 발파공학, 서울대학교 출판부
3. 수자원공사, 2005, 임하댐 비상여수로 T/K 설계
4. 건교부, 2003, 터널표준시방

백 승 규



1991 강원대학교 자원공학과 공학사
 1993 강원대학교 자원공학과 공학석사
 2003 강원대학교 자원공학과 공학박사

Tel: 02-2144-2945
 E-mail: bsknamin@hanmail.net
 현재 (주)단우기술단 지반부 차장

추 석 연



1988 한양대학교, 자원공학과, 공학사
 1991 일본 동경대학교 토목공학과 공학석사
 1995 일본 동경대학교 토목공학과 공학박사

Tel: 02-2144-2920
 E-mail: danwchoo@hanmail.net
 현재 (주)단우기술단 상무이사

윤 종 오



1992 인하대학교 토목공학과 공학사

Tel: 02-2144-2960
 E-mail: brdesign@hanmail.net
 현재 (주)단우기술단 이사

백 운 일



1976 한양대학교 토목공학과 공학사
 1978 한양대학교 토목공학과 공학석사
 1991 네덜란드 델프트대 토목공학과 공학박사

Tel: 02-2011-7114
 E-mail: builhjoo@dic.co.kr
 현재 (주)대림산업 토목사업본부 상무이사

박 형 섭



1984 한양대학교 토목공학과 공학사
 1986 서울대학교 토목공학과 공학석사

Tel: 02-2011-7114
 E-mail: dic21@dic.co.kr
 현재 (주)대림산업 토목사업본부 부장