

터널 굴착 시 주변 구조물에 미치는 영향을 고려한 발파 설계 사례

추석연, 윤종오, 백승규 ((주)단우기술단)
백운일, 박형섭 ((주)대림산업)

1. 서 론

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

발파 진동은 현장의 지형과 지반 형태 등 여러 조건에 따라 전파 특성이 달라진다. 따라서 일반적으로 보다 신뢰성 있는 평가를 위해서 현장의 시추공을 이용한 시험 발파를 실시하고, 발생된 진동치와 지반의 특성에 따른 진동 감쇠 상태 등을 고려한 진동 추정식을 산정한다. 그리고 이 추정식과 주변 구조물들의 허용 진동치를 고려하여, 적절한 최대 지발당 장약량을 산정한 후 발파 패턴 설계를 실시한다.

본 연구에서는 일반적인 방법인 시험발파 결과를 이용한 추정식으로부터 지발당 최대 장약량을 구하고, 추가로 실제 발파 조건과 동일한 조건으로 수치해석을 실시하여 역해석 방법으로 진동식과 최대 지발당 장약량을 산정하였다. 그리고 두 결과를 비교 검토하여 주변 구조물과 시설물에 미치는 발파진동 영향을 최소화하며 터널의 안정성을 고려한 발파패턴 설계가 이루어 질 수 있도록 하고자 하였다.

2. 현황 및 허용 진동 기준 검토

2.1 터널 설계 현황

본 연구 대상 과업은 임하댐 비상여수로의 터널설계로서, 터널의 특징 및 개요를 그림 2.1과 표 2.1에 정리하여 나타내었다.

본 터널은 3련 병렬 터널로서 단면의 크기와 형태, 구배가 변화하며, 그 특징에 따라 천이구간, 경사구간, 일반구간 등으로 구분할 수 있다. 단면의 형태가 변하는 천이구간은 최대

폭 20.2m, 높이 16.2m의 단면이고, 경사구간은 구배가 1:4.5의 경사도를 가지는 구간이며, 일반 구간은 굴착 폭 16.2m의 마제형 터널이다.

표 2.1 터널별 길이

구 분	유입천이부 (m)	일반부 (m)	유출천이부 (m)	총계 (m)	비 고
1터널	29	313	38	380	유출부 위치에 따라
2터널	29	354	38	421	일반구간 터널별 길 이 차이 발생
3터널	29	395	38	462	

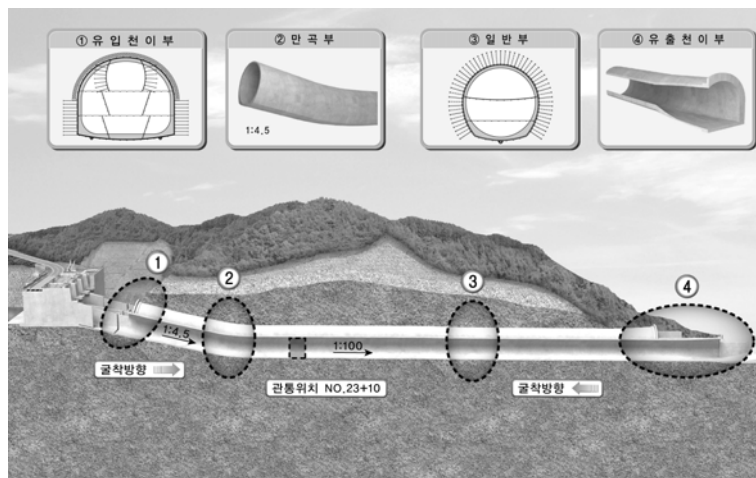


그림 2.1 임하댐 비상여수로 터널 개요

2.2 주변 구조물 현황 및 허용 진동 기준

임하댐 주변의 구조물과 시설물들의 현황을 그림 2.1에 정리하여 나타내었으며, 표 2.1은 각 구조물과 터널 간 이격거리와 발파진동 허용치를 정리한 것이다.

주요 시설물은 댐 부속건물인 발전소, 발전수로터널, 기존여수로 등이 있으며, 구조물로는 호계서원, 주변 민가와, 망천교 등이 있다.

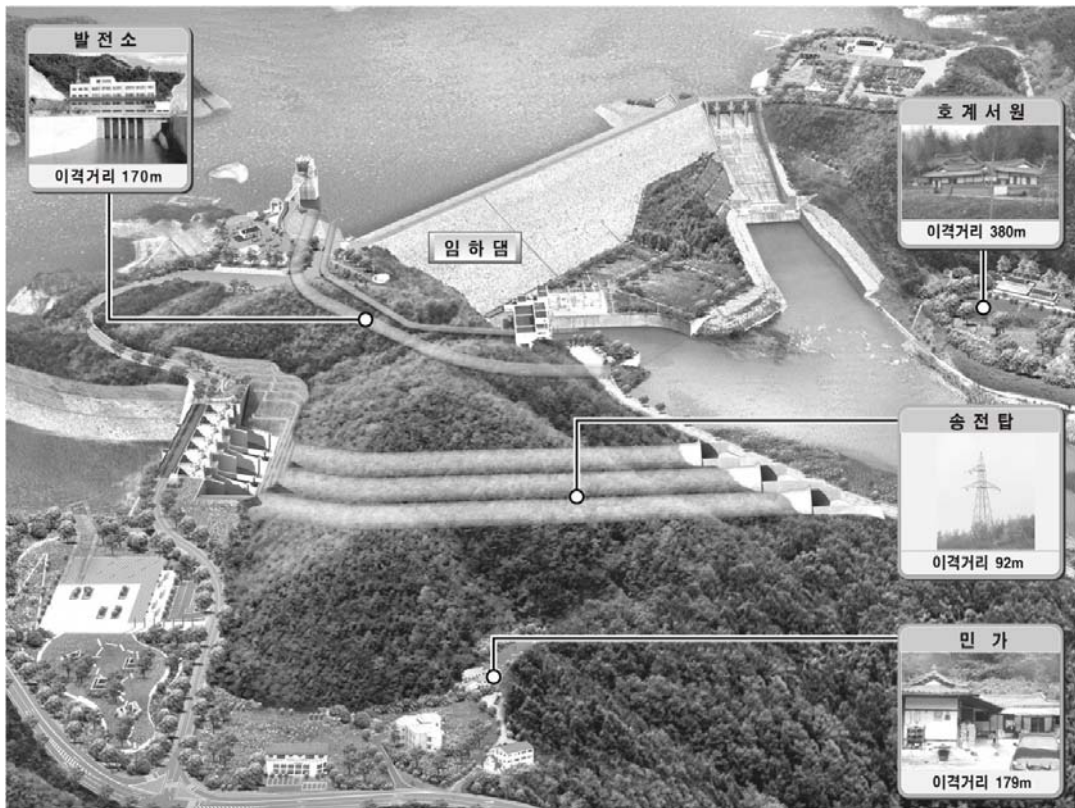


그림 2.1 임하댐 주변 시설물 및 구조물 분포 현황

표 2.1 주요 보안물건 현황 및 허용진동 기준

보안물건	허용 진동치 (cm/sec)	이격거리(m)	비 고
발전소·변전소	1.0	248	터널표준시방서의 콘크리트 구조물 발파 진동 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	237	
망천교	1.0	395	
호계서원	0.2	340	
민가	0.3	179	

3. 시험 발파 및 진동 영향 검토

3.1 시험발파 개요

암반 및 지질특성과 지형적 특성 등을 반영한 발파설계 기초자료를 얻기 위해서 두 개의 시추공을 이용하여 시험발파를 실시하고, 시험발파에 의한 계측분석을 통해서 현장의 암반 특성에 적합한 발파진동 추정식을 산출하고자 하였다.

그림 3.1은 시추공의 주상도와 시험발파 패턴을 나타낸 것이다.

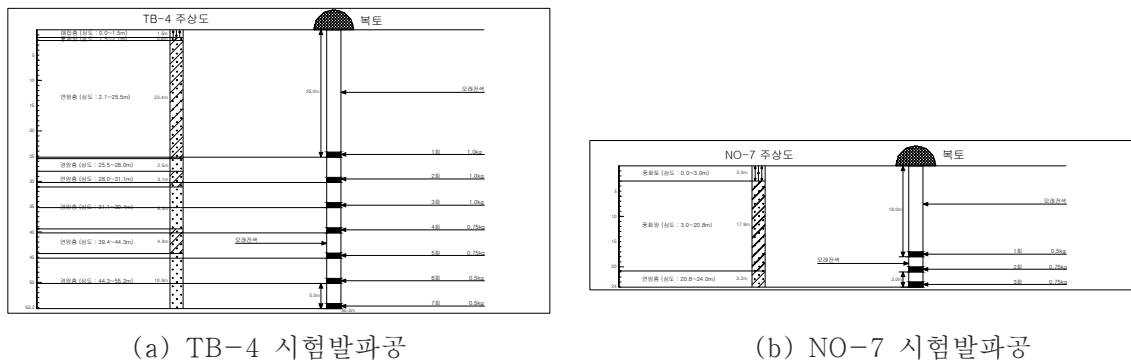


그림 3.1 시험발파공 주상도 및 발파패턴

2개의 발파공에서 회귀분석에 필요한 진동치 30점 이상을 확보하기 위해서 TB-4 시험발파공에서는 7단계로(장약간 이격거리 5.0 m), NO-7시추공에서는 3단계로(장약간 이격거리 3.0 m) 분산장약한 후, LP뇌관을 사용하여 충분한 시차 간격으로 발파를 실시하였다.

총 6대의 발파진동 계측기를 사용하여 계측하였으며, 표 3.2는 총 53개의 계측 자료 중 일부를 정리하여 나타낸 것이다.

표 3.2 발파진동 계측 자료

성분	TB-4의 발파진동 이력곡선	거리	NO-7의 발파진동 이력곡선	거리		
Tran		10m (3903)		10m (3904)		
Vert						
Long						
Tran	<p style="text-align: center;">UNDER TRIGGERED (V=0.013cm/sec 이하)</p>	337m (2378)		60m (2506)		
Vert						
Long						
회차	↑① ↑② ↑③ ↑④ ↑⑤ ↑⑥ ↑⑦	회차	↑① ↑② ↑③			

3.2 발파 진동 추정식

시험발파 결과로부터 얻어진 자료들로부터 회기분석을 실시하여 발파진동 추정식을 산정하였으며, 식 3.1은 발파진동 추정식을 나타낸 것이다.

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

3.3 허용 진동 기준에 따른 최대 지발당 장약량 산정

발파 진동 추정식(식 3.1)으로부터 본 대상지역의 주요 시설물별 최대 허용장약량을 계산하여 표 3.3에 나타내었다. 주변 주요 구조물 또는 시설물을 고려할 경우 최대 허용 지발당 장약량은 송전탑을 기준으로 약 24kg일 경우인 것을 알 수 있다.

표 3.3 주요 구조물별 최대 허용장약량

보안물건	허용 진동치(cm/sec)	이격거리 (m)	최대 허용지발당장약량(kg)
발전소·변전소	1.0	248	178
송전탑	1.0	92	24
가배수터널	1.0	93	25
수로터널	1.0	190	104
기존여수로	1.0	473	645
임하댐 본체	1.0	237	162
망천교	1.0	395	450
호계서원	0.2	340	59
주택(김희덕씨)	0.3	179	25

3.4 진동 영향 검토

최대 허용 지발당 장약량 24kg을 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 위치하고 있는 것을 알 수 있다.

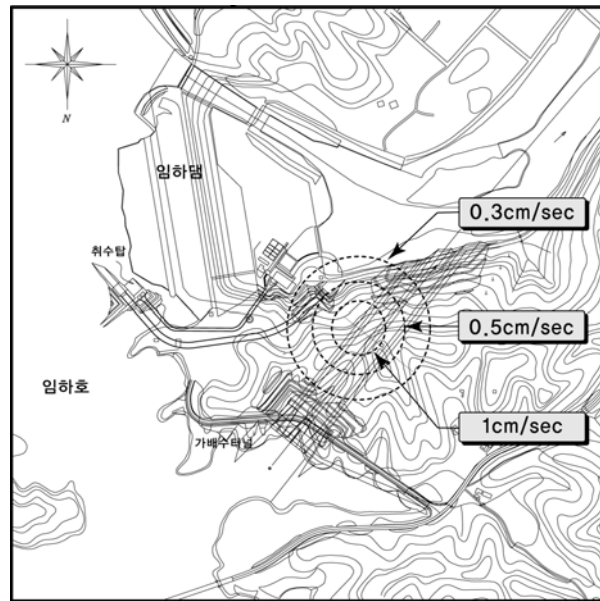


그림 3.2 터널 굴착 시 발파 진동 영향 범위

4. 수치 해석적 진동 영향 검토

수치해석적 방법으로 발파 진동식을 추정하고, 주변 구조물과 시설물에 미치는 진동영향 분석을 실시하였으며, 그림 4.1은 해석과정을 나타낸 것이다. 범용 유한 요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 해석 결과를 분석하고 허용기준과 비교를 통하여 진동 영향을 검토 하였다.

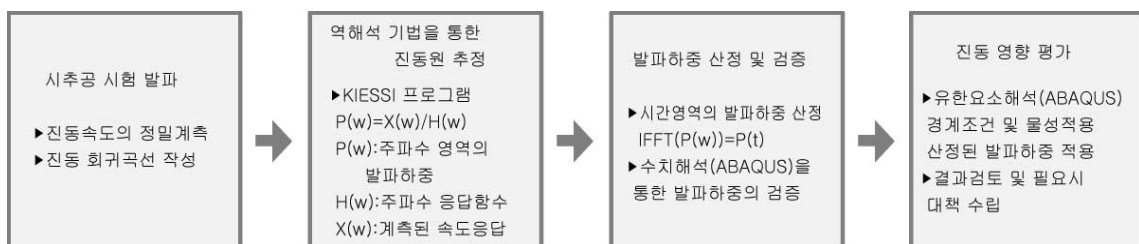


그림 4.1 수치해석 흐름도

4.1 발파 하중 산정을 위한 발파 진동 계측 자료의 역변환

본 과업에서는 발파원에 의한 계측지점의 전달함수를 구하기 위하여 유체-구조물-지반 상호작용해석 프로그램인 KIESSI-A3D를 사용하였다. KIESSI-A3D 프로그램은 원통형 축대 청체(구조물, 유체, 지반)에 3차원 하중이 작용될 때 동적상호작용해석을 유한요소, 유체요소, 동적무한요소, 점성경계요소를 사용하여 주파수영역에서 수행하는 수치해석 프로그램이다.

본 시험발파의 계측결과는 터널구간(TB-4)에서 실시되었으며, 계측지점의 단면은 그림

4.2와 같고, 계측지점의 지반 물성치는 표 4.1에 나타내었다. 그림 4.3는 시험 발파 시 얻은 지반진동속도에 대한 계측 데이터 중 하나이며, 이 계측 데이터와 역해석 기법을 통한 계측 지점의 주파수응답함수를 이용하여 해석에 적용할 발파하중을 산정하였다.

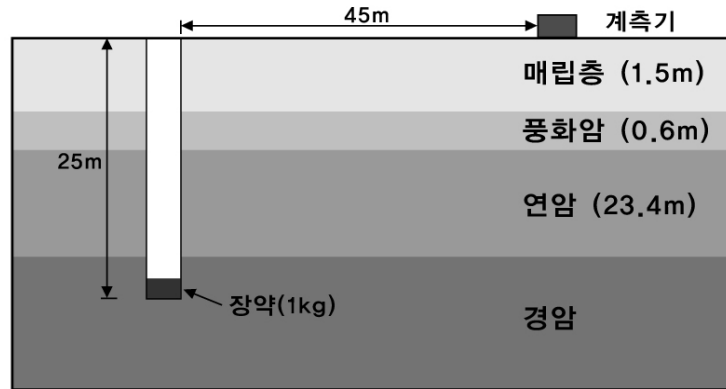


그림 4.2 수치해석 범위 모식도

표 4.1 계측구간의 지반 물성치

구 분	매립층	풍화암	연암	경암
전단파속도 (m/sec)	320	650	1700	2200
동탄성계수 (N/m^2)	5.8×10^8	2.7×10^9	1.9×10^{10}	3.1×10^{10}
동프와송비	0.38	0.35	0.3	0.27
밀도 (kg/m^3)	1900	2100	2300	2500

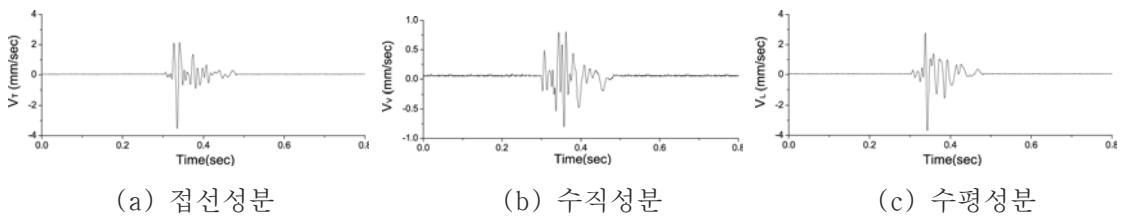


그림 4.3 발파진동 계측 자료

발파하중과 이로 인한 임의 지점의 응답은 전달함수를 사용하여 식 4.1과 같이 나타낼 수 있다.

$$X(\omega) = H(\omega) \cdot P(\omega) \quad (4.1)$$

여기서, $H(\omega)$ 와 $X(\omega)$ 는 각각 임의 계측지점에서의 주파수영역에서의 전달함수와 발파로 인한 계측된 응답을 의미하며, $P(\omega)$ 는 주파수 영역에서의 발파하중을 나타낸다. 발파하중을 구하기 위해 KIESSI 프로그램을 사용하여 단위하중의 작용시 계측지점에서 세방향 전

달함수 $H(\omega)$ 를 구하였으며, 계측응답 $X(\omega)$ 는 시험발파를 통하여 계측된 속도 응답이 사용되었다.

계측은 발파원으로부터 수평거리 45m인 지점에서 접선방향, 수직방향, 수평방향에 대해 수행되었다. 또한 그림 4.4와 같이 KIESSI 전산프로그램을 사용하여 시험발파 시 계측이 이루어진 지점에서 세 방향 전달함수를 구하였다.

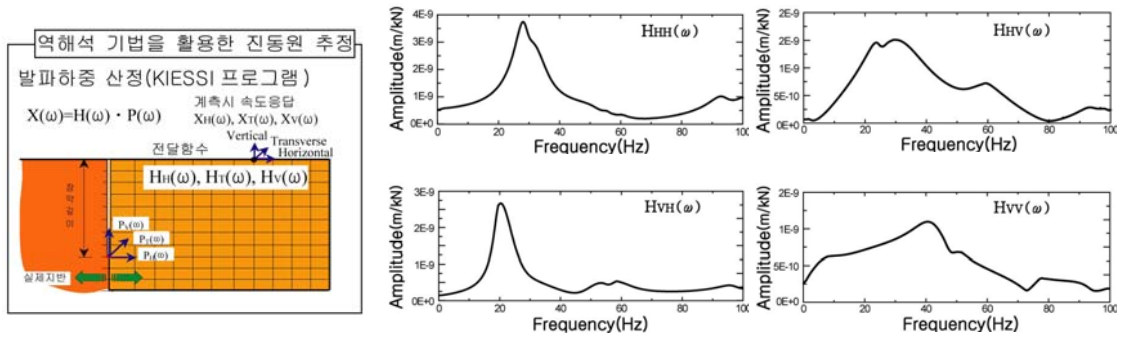


그림 4.4 전달함수 산정방법 및 산정된 전달함수

발파하중은 시험발파를 통해 계측된 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 4.4는 해석 결과 얻어진 발파압력의 시간이력 결과를 나타낸 것이다.

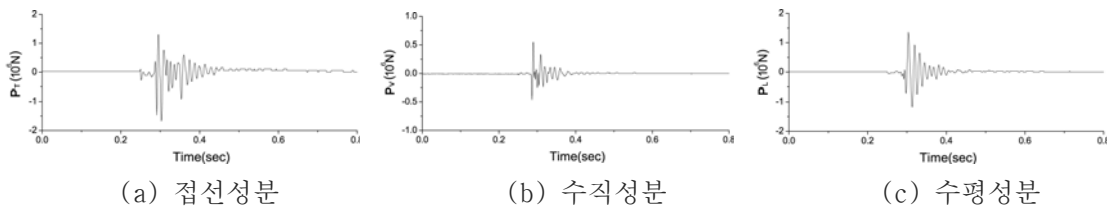


그림 4.4 발파압력 시간이력 결과

4.2 발파하중의 검증

앞 절에서 구한 발파하중의 검증을 위하여 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석을 실시하였다.

그림 4.5는 발파 하중의 검증을 위하여 실시한 수치해석의 요소망과 해석 결과를 나타낸 것이다. 발파하중이 모델의 경계영역에서 반사되는 것을 막기 위해 무한 요소를 사용하였으며, 8절점 유한요소 및 무한요소로 모델링 하였다.

수치해석 응답과 시험발파에 의해 구한 응답은 표 4.2에서 보듯이 거의 같은 형태를 갖는 것을 볼 수 있다. 따라서 역해석을 통해 산정한 발파하중의 적용성을 검증하였다.

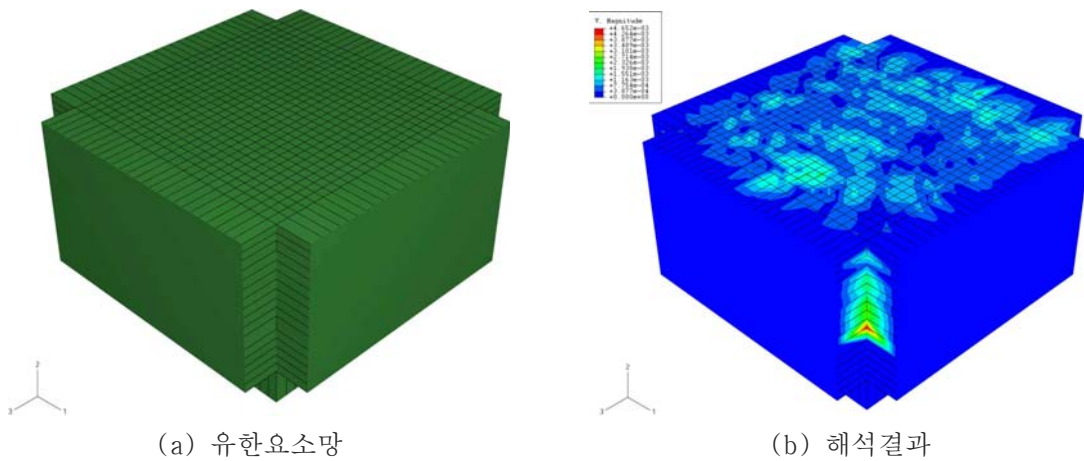


그림 4.5 발파하중의 검증을 위한 수치해석

표 4.2 시험발파 계측치와 수치해석 결과 비교

시험발파시 계측치	ABAQUS 해석결과

4.3 해석모델의 발파진동식 추정 및 허용 지발당 장약량 산정

그림 4.5의 모델의 임의의 절점들에서 진동속도를 측정한 후 회귀분석을 실시하여 발파진동식을 추정하였으며, 식 (4.2)에 나타내었다.

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

발파 진동 추정식(식 4.2)으로부터 본 대상지역의 주요 시설물별 최대 허용장약량을 계산하여 표 4.3에 나타내었다. 주변 주요 구조물 또는 시설물을 고려할 경우 최대 허용 지발당 장약량은 송전탑을 기준으로 약 13kg일 경우인 것을 알 수 있다.

표 4.3 주요 구조물별 최대 허용장약량

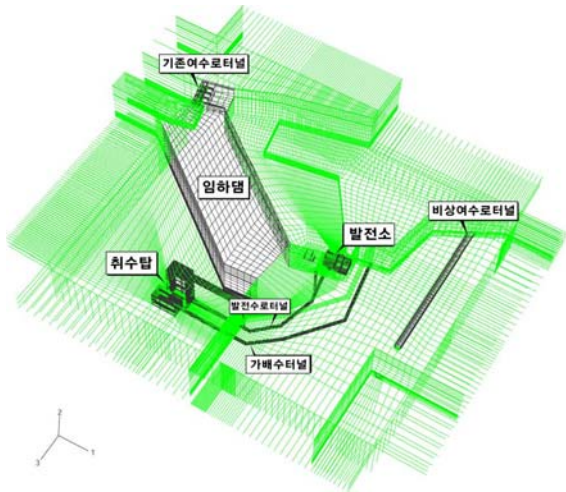
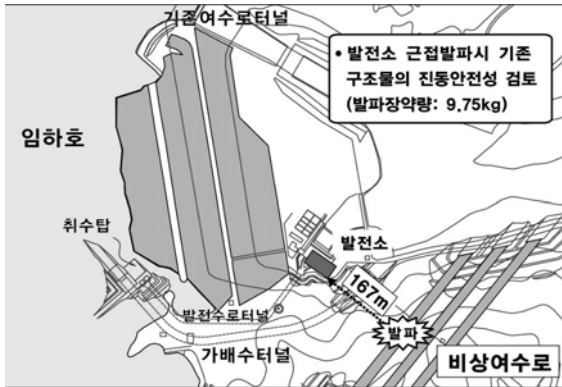
보안물건	허용 진동치 (cm/sec)	평면 이격거리(m)	최대 허용장약량(kg)
발전소·변전소	1.0	248	160
송전탑	1.0	92	22
가배수터널	1.0	93	23
수로터널	1.0	190	96
기존여수로	1.0	473	590
임하댐 본체	1.0	237	148
망천교	1.0	395	410
호계서원	0.2	340	24
주택(김희덕씨)	0.3	179	13

4.4 진동 영향 검토

3차원 유한요소해석을 사용하여 터널 굴착시 주변 구조에 미치는 영향을 검토하였다. 해석에 적용한 발파하중은 역해석 기법을 통하여 산정된 발파하중을 사용하였으며, 발파위치에 따라 3개구간으로 나누어 수행하였다. 각 발파위치는 발전소, 임하댐, 망천교 최단 근접 위치에서의 발파시를 기준으로 하였다. 해석에 사용된 지반물성치는 표 4.1의 값을 사용하였다.

4.4.1 발전소 근접 발파

해석구간은 그림 4.6에서 보듯이 비상여수로 터널 발파시 발전소와 가장 가까운 위치에서의 발파를 가정하였다. 해석시 하중은 역해석 기법을 통해 산정된 발파하중을 시간이력하중으로 적용하였으며, 이때 발파하중의 크기는 장약량 9.75kg에 대한 하중으로 적용하였다. 수치해석은 범용 유한요소프로그램인 ABAQUS를 사용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 경계조건으로는 지반의 반무한성을 고려하여 무한요소를 적용하였다. 해석결과를 통해 기존구조물인 발전소, 임하댐, 가배수 및 발전수로 터널등의 진동안전성을 검토하였다. 그림 4.6에 해석개요도를 나타내었으며, 해석모델은 그림 4.6에 나타낸 것과 같다.



(a) 해석 개요도

(b) 해석모델 요소망

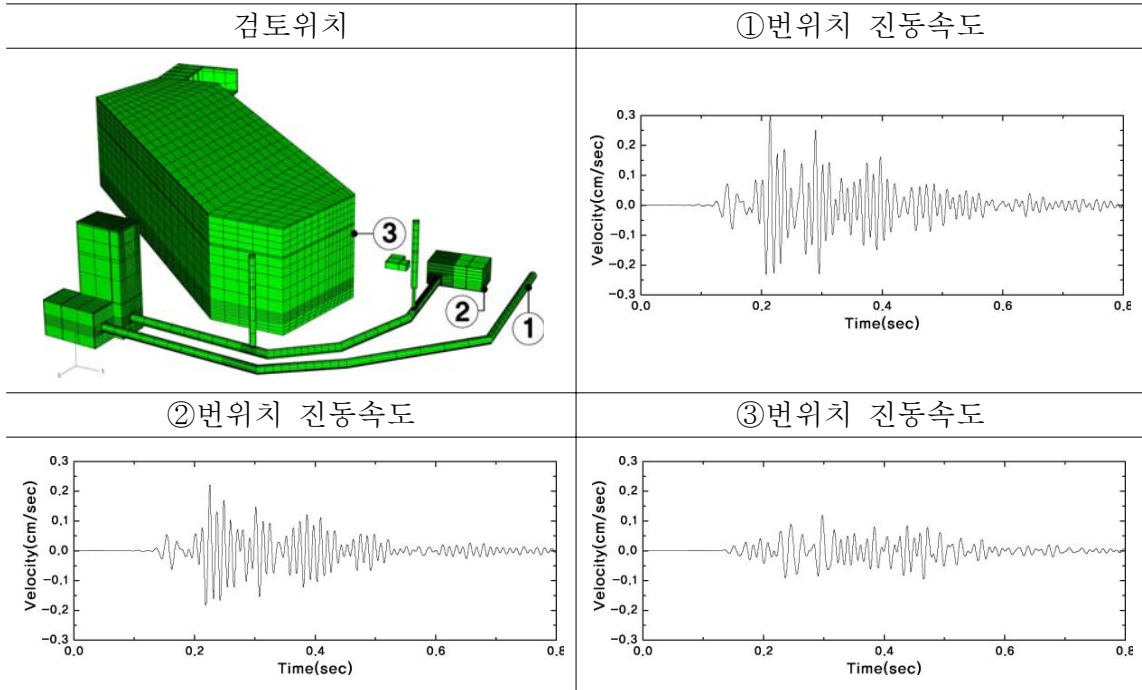
그림 4.6 발전소 근접발파 시 해석개요도 및 해석모델 요소망

표 4.4는 해석 결과를 나타낸 것이다.

표 4.4 발파진동 영향 해석 결과

진동속도 분포도	최대진동속도(발전소)
	0.252 < 0.5kine O.K
최대진동속도(가배수 및 발전수로터널)	최대진동속도(입하댐 및 기존여수로)
0.327 < 1.0kine O.K	0.136 < 1.0kine O.K

시간이력결과



발전소 최단 근접거리에서의 발파공사시를 기준으로 기존구조물의 진동영향 검토결과 가배수터널(0.327 kine), 발전소(0.252kine), 임하댐(0.136kine) 모두 허용기준치를 만족하고 있어 안전함을 확인하였다.

4.4.2 임하댐 근접 발파 시 진동영향 검토

해석구간은 그림 4.7에서 보듯이 비상여수로 터널 발파 시 임하댐과 가장 가까운 위치에서의 발파시를 가정하였다. 표 4.5는 해석 결과를 나타낸 것이다.

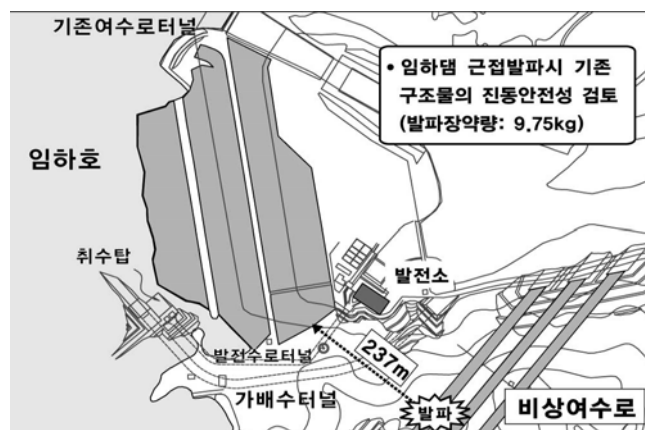
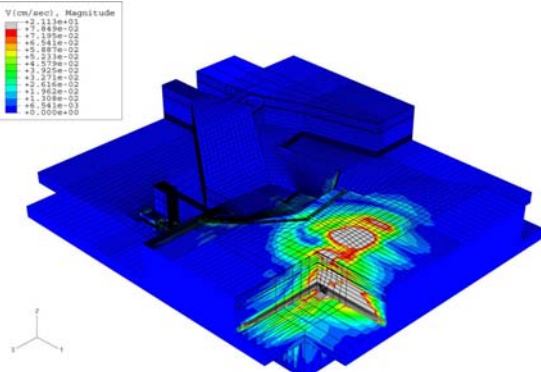
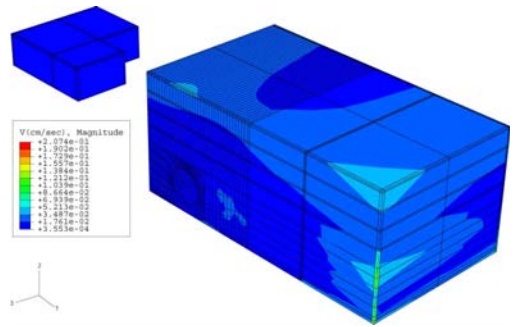
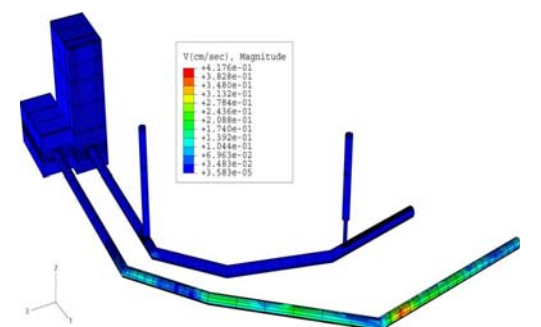
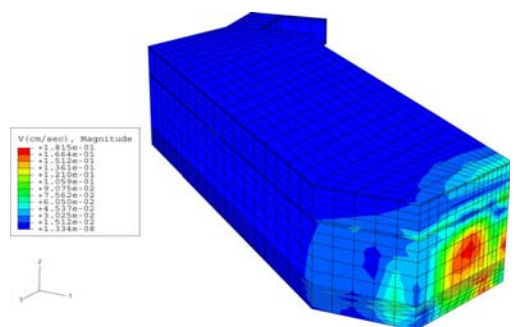
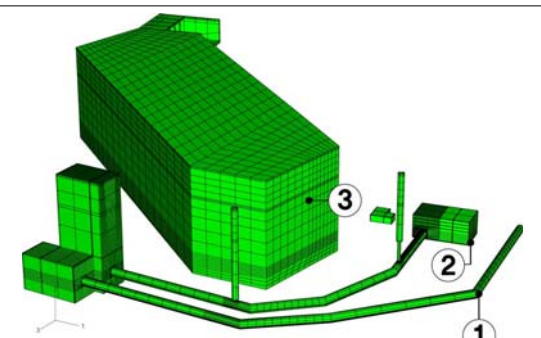
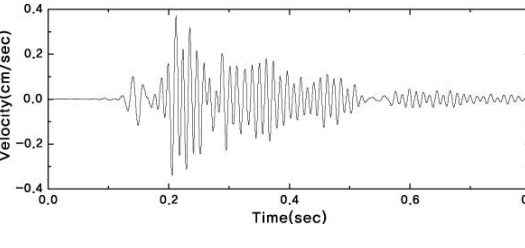
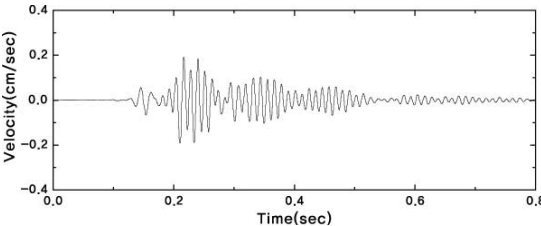
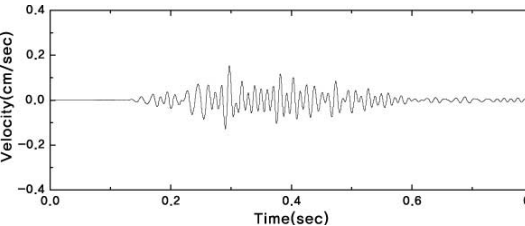


그림 4.7 임하댐 근접 발파 시 해석개요도

표 4.5 발파진동 영향 해석 결과

<p style="text-align: center;">진동속도 분포도</p> 	<p style="text-align: center;">최대진동속도(발전소)</p>  <p style="text-align: center;">0.207 < 0.5kine O.K</p>
<p style="text-align: center;">최대진동속도(가배수 및 발전수로터널)</p>  <p style="text-align: center;">0.418 < 1.0kine O.K</p>	<p style="text-align: center;">최대진동속도(임하댐 및 기존여수로)</p>  <p style="text-align: center;">0.182 < 1.0kine O.K</p>

시간이력결과

<p style="text-align: center;">검토위치</p> 	<p style="text-align: center;">①번 위치 진동속도</p> 
<p style="text-align: center;">②번 위치 진동속도</p> 	<p style="text-align: center;">③번 위치 진동속도</p> 

임하댐 최단 근접거리에서의 발파공사시를 기준으로 기존구조물의 진동영향 검토결과 가 배수터널(0.418 kine), 발전소(0.207kine), 임하댐(0.182kine) 모두 허용기준치를 만족하고 있어 안전함을 확인하였다.

4.4.3 망천교 근접발파 시 진동영향 검토

해석구간은 그림 4.8에서 보듯이 비상여수로 터널 발파시 망천교와 가장 가까운 위치에서의 발파시를 가정하였다. 해석결과를 통해 기존구조물인 망천교의 진동영향을 검토하였다. 그림 4.8에 해석개요도를 나타내었다. 해석모델은 그림 4.9에 나타난 것과 같으며, 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.



그림 4.8 망천교 근접 발파시 해석 개요도

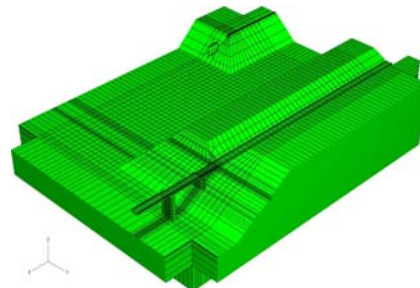


그림 4.9 망천교 근접 발파시 요소망

표 4.6 발파진동 영향 해석 결과

진동속도 분포도		최대진동속도(망천교)	
1		0.091 < 1.0kine O.K	
시간이력결과 검토위치			
①번위치 진동속도		②번위치 진동속도	

망천교 최단 근접거리에서의 발파공사시를 기준으로 망천교의 진동영향 검토결과 교량에서 발생하는 최대진동속도는 0.091kine으로 허용기준치를 충분히 만족하고 있어 안전함을 확인할 수 있었다.

5. 고 찰

터널 굴착을 위한 발파를 할 경우 주변 구조물에 미치는 진동영향을 고려한 발파설계를 위하여 시험발파를 실시한 후 발파진동 추정식과 최대 허용 지발당 장약량을 구하였다. 또한 수치해석적 기법으로 발파원을 모델링 한 후 발파 진동 추정식과 최대 허용 지발당 장약량을 산정 하였다. 두 방법의 목적은 발파시 주변 구조물에 미치는 진동 영향을 최소화 하며, 안전한 발파가 이루어질 수 있는 발파 설계를 수행하기 위함이다.

발파원 모델링을 위하여 역해석 기법으로 발파원을 모델링하였으며, 발파원에 의한 계측 지점의 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 사용하여 주파수영역에서 수행하는 수치해석 프로그램이다. 역해석 기법을 통한 계측지점의 주파수응답함수를 이용하여 해석에 적용할 발파하중을 산정하였다. 또한 실제 조건과 동일한 조건으로 수치 해석을 실시하여 실측된 자료와 비교를 통하여 모델링의 적정성을 검증하였다.

시험발파로부터 추정된 발파진동식(5.1)과 수치해석 결과 추정된 발파 진동식(5.2) 중 터널의 안정과 주변 구조물의 안전과, 환경, 시공성, 민원 여부 고려 보수적 설계기준을 적용하여 지발당 장약량이 적게 계산되는 수치해석에서 추정된 발파진동식을 이용하여 최대 허용지발당 장약량을 산정하였다. 최대 허용 지발당 장약량은 시험발파 추정식의 경우 24 kg 이고, 수치해석의 경우 13 kg으로 산정 되었다.

$$V = 234.2 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.867} \quad : \text{시험발파 발파진동 추정식} \quad (5.1)$$

$$V = 46.281 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.294} \quad : \text{수치해석 발파진동 추정식} \quad (5.2)$$

3차원 수치해석을 실시하여 발파진동 영향권을 분석하였다. 터널 굴착은 지하에서 이루어지며 일반적인 구조물들은 지상에 건설 되므로 지하구조물과 지상구조물과의 이격상황등을 정확히 판단하기 위해서는 3차원 해석을 수행하는것이 타당할 것으로 판단된다. 또한 진동 영향 검토를 수행할 경우 최단 거리에서의 발파원 모델링을 통하여 좀 더 정밀한 진동 영향 검토가 가능할 것으로 판단된다. 수치해석결과 9.75 kg의 지발당 장약량을 사용할 경우 임하담 본체, 가배수터널, 발전수로터널, 망천교 등의 주요구조물에 미치는 발파진동 영향은 진동허용기준치 이하인 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 과업구간의 발파공사시 설

계 장약량에 대해 별도의 방진대책은 필요 없을 것으로 판단된다.

임하댐 비상여수로 공사현장에서 시행될 발파공사로 인한 주변주요구조물(발전소, 임하댐, 가배수 및 발전수로터널, 기존여수로터널, 망천교)의 진동영향을 3차원 유한요소해석을 통해 검토하였다. 해석에 사용된 발파하중은 지반조사 및 시험발파의 계측 결과로부터 지반-구조물 상호작용 프로그램을 활용한 역해석 기법에 근거하여 산정하였으며, 수치해석을 통한 검증을 거쳐 하중으로 적용하였다. 수치해석은 범용 유한요소프로그램인 ABAQUS를 사용하여 외연적 시간적분법을 이용한 수치해석을 수행하였으며, 지반의 경계조건으로는 지반의 반무한성을 고려하여 무한요소를 적용하였다. 해석은 비상여수로 터널 발파시 발파위치에 따라 3개 구간으로 나누어 수행하였으며, 각 발파위치는 발전소, 임하댐, 망천교 최단 근접위치에서의 발파시를 기준으로 하였다.

해석결과 각 구조물에 발생하는 최대진동속도는 발전소: 0.252kine, 가배수 및 발전수로터널: 0.418kine, 임하댐: 0.182kine, 망천교: 0.091kine으로 모두 허용진동기준치를 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 본 과업구간의 발파공사시 설계 장약량에 대해 별도의 방진대책은 필요 없을 것으로 판단된다.

6. 결 론

발파 진동은 현장의 지형과 지반 형태 등 여러 조건에 따라 전파 특성이 달라진다. 따라서 보다 신뢰성 있는 평가를 위해서 현장의 시추공을 이용한 시험 발파를 실시하여, 발생된 진동치와 지반의 특성에 따른 진동 감쇠 상태 등을 고려한 진동 추정식을 산정한다.

본 연구에서는 시험발파 결과를 이용한 추정식으로부터 지발당 최대 장약량을 구하고, 추가로 실제 발파 조건과 동일한 조건으로 수치해석을 실시하여 진동식과 최대 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 검증하였다.
2. 시험발파로부터 추정된 발파진동식과 수치해석 결과 추정된 발파 진동식 중 터널의 안정과 주변 구조물의 안전과, 환경, 시공성, 민원 여부 고려 보수적 설계기준을 적용하여 지발당 장약량이 적게 계산되는 수치해석에서 추정된 발파진동식을 이용하여 최대 허용지발당 장약량을 산정하였다. 최대 허용 지발당 장약량은 시험발파 추정식의 경우 24 kg이고, 수치해석의 경우 13 kg으로 산정 되었다.

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

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

시험발파로부터 추정된 발파진동식과 수치해석 결과 추정된 발파 진동식 중 터널의 안정과 주변 구조물의 안전과, 환경, 시공성, 민원 여부 고려 보수적 설계기준을 적용하여 지발당 장약량이 적게 계산되는 수치해석에서 추정된 발파진동식을 이용하여 최대 허용지발당 장약량을 산정하였다. 최대 허용 지발당 장약량은 시험발파 추정식의 경우 24 kg이고, 수치해석의 경우 13 kg으로 산정 되었다.

- 3차원 수치해석을 실시하여 발파진동 영향권을 분석하였다. 터널 굴착은 지하에서 이루어지며 일반적인 구조물들은 지상에 건설 되므로 지하구조물과 지상구조물과의 이격상황등을 정확히 판단하기 위해서는 3차원 해석을 수행하는것이 타당할 것으로 판단된다. 또한 진동 영향 검토를 수행할 경우 최단 거리에서의 발파원 모델링을 통하여 좀 더 정밀한 진동 영향 검토가 가능할 것으로 판단된다. 수치해석결과 9.75 kg의 지발당 장약량을 사용할 경우 임하댐 본체, 가배수터널, 발전수로터널, 망천교 등의 주요 구조물에 미치는 발파진동 영향은 각각 발전소: 0.252 cm/sec, 가배수 및 발전수로터널: 0.418 cm./sec, 임하댐: 0.182 cm/sec, 망천교: 0.091 cm/sec으로 모두 허용진동기준치를 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 본 과업구간의 발파공사시 설계 장약량에 대해 별도의 방진대책은 필요 없을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 주변 구조물들의 안정과 터널의 안전을 위하여 계산된 최대 지발당 장약량 13kg보다 적은 9.75 kg을 허용지발당 장약량으로 발파 설계를 수행하였다.

■ 참고문헌 ■

1. 건설교통부, 2003, 암 발파공법 설계 및 시험발파 잠정지침.
2. 김재극, 1990, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부