

근거리 발파진동이 흙막이 구조물에 미치는 영향

황현주¹⁾, 이상필²⁾, 양형식³⁾*

Influence of Near Field Blasting Vibration to Earth Retaining Wall

Hyun-Ju Whang, Sang-Pil Lee and Hyung-Sik Yang

Abstract Allowable level of blasting vibration for earth retaining wall was examined in this study. Blasting vibration was measured at near field blasting to evaluate the influence of the blasting work to earth retaining wall and rear ground. Although small scale blasting with 0.5~2.0 kg explosives per round merely influenced to the structure and ground, but it was suggested to blast at the distance of twice the least burden considering the block movement.

Key words Earth retaining wall, Blasting vibration, Near field blast

초 록 흙막이 구조물에 대한 발파진동 허용기준을 설정하고 10 m 이내 근거리 발파를 실측하여 흙막이 구조물에 전달되는 진동규모를 확인하였다. 또 시험발파 계측데이터로부터 발파작업이 흙막이 구조물과 배면지반에 미치는 영향을 평가하였다. 연구결과 0.5~2.0 kg 범위의 발파작업은 흙막이 구조물과 배면지반에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었으나 발파압력에 의한 암반블록의 이동 영향을 고려하여 최소저항선의 2배 정도를 이격하여 발파할 것을 추천한다.

핵심어 흙막이 구조, 발파진동, 근거리 발파

1. 서 언

지하구조물 발파 굴착공사는 대부분 흙막이 구조물 내부에서 작업하므로 흙막이 이상변위나 붕괴사고 발생 시 발파의 인과관계가 자주 제기된다. 우리나라에는 아직 흙막이 구조물에 대한 발파진동 기준이 없고 이에 대한 연구도 부족하다.

본 연구에서는 기존 연구 결과를 참조하여 흙막이 구조물의 각 부재에 대한 진동 허용기준을 설정하고, 굴착현장에서 10 m 이내의 근거리 발파 진동을 실측하여 흙막이 구조물에 전달되는 개략적인 진동규모를 확인하였다. 또 시험발파와 계측을 통해서 얻어진 진동 및 변위 자료를 분석하여 발파작업이 흙막이 구조물과 배면지반에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 흙막이 구조물에 대한 발파진동 기준 검토

2.1 흙막이 구조물에 미치는 발파진동의 영향

발파 진동이 구조물에 미치는 영향은 구조물의 위치 특성, 재질 및 강도 구조형식 및 기초와 지반상태 등 다양한 요소와 관련되어 있으므로 단순히 기준을 설정할 수는 없다. 발파진동에 관한 여러 연구결과에 의하면 상부구조가 구속되지 않은 지상구조물의 경우, 발파진동이 지나간 후에도 건물자체의 고유진동과 지반운동이 선택적으로 증폭되어 자유 응답하므로 피해가 발생할 수 있다. 그러나 매설구조물과 같이 지반에 구속된 경우에는 지반과 일체 거동을 하므로 피해는 극히 줄어든다. 어스앵커나 쓰일네일 등 지중에 설치된 흙막이 구조물의 경우에는 구속된 구조물 형태로 간주할 수 있다.

철재구조물의 경우에는 주변지반에 비하여 강성과 유연성이 월등히 높아서 진동의 영향을 거의 받지 않는다고 볼 수 있다. 그러나 철재구조물 연결부나 구조적, 재료적 결함이 있는 경우와 설치형태 등에 따라 진동영향 여부를 검토할 필요가 있다. 특히, 근접발파 시에는 발파진동의 영향보다는 고압 분출가스로 인한 암반블록의 이동으로 좌굴 등의 손상이 발생할 수 있으므로 서울특별시 지하철 건설본부(1996)는 흙막이 강재말뚝 인

¹⁾ 협승엔지니어링 대표이사

²⁾ GS건설(주) 부장

³⁾ 전남대학교 교수

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2008년 4월 4일

심사 완료일 : 2008년 4월 22일

접 1.0 m 이내에서의 발파작업을 금지하고 있다.

한편, 일반적인 콘크리트 구조물의 경우에는 구조물 종류에 따라 진동 허용기준을 설정할 수 있으나 양생중인 콘크리트의 경우 진동으로 인하여 재료강도에 영향을 받을 수 있으므로 양생시간에 따른 별도의 허용기준을 적용해야 한다. 콘크리트를 타설한 초기에는 그 상태가 유연하지만 시간이 경과하면서 경화가 시작되며 진동이나 충격은 콘크리트의 강도저하, 균열발생, 부차력 저하 등 품질에 유해한 영향을 미치기 때문이다. 국내의 경우 규정된 허용기준은 없으나 한국지질자원연구원에서는 연구결과를 토대로 미국교통국의 “양생콘크리트에 대한 허용 진동수준 지침”에서 진동에 예민한 시간대를 3~24 시간으로 수정하여 표 1과 같이 제시하였다(류창하 외, 2003).

2.2 흙막이 구조물의 허용 진동기준 설정

1) 콘크리트 벽체 (슬러리월 등)

일반적으로 콘크리트 구조물은 양생기간 10일 이상 경과되었을 때에는 발파 진동속도 안전한계가 25.4 cm/s로 평가된다. Crawford와 Ward(1965)의 발파실험으로부터 구속된 철근콘크리트 벽체(두께 : 178 mm)의 경우에는 진동속도 25.4 cm/s에서 전혀 균열발생이 없었던 결과가 제시된 바 있고, 슬러리월과 같은 콘크리트 연속벽체의 경우 품질관리 측면에서 불리하다 하더라도 두께가 800~1,000 mm이며 거대한 연속체 구조형식과 지반 및 흙막이 지지 시스템에 의해 구속된 구조물이라는 특성을 감안할 때, 진동속도 수준 25.4 cm/s 이하에서는 전혀 피해가 발생되지 않을 것으로 판단된다.

표 1. 양생중인 콘크리트 구조물의 진동 허용수준(류창하 외, 2003)

타설 후 경과시간	허용 진동기준 (cm/s)
0~3 시간	5.08
3~24 시간	0.63
1~3 일	2.54
3~7 일	5.08
7~10 일	12.70
10일 이상	25.40

표 2. 발파진동이 콘크리트구조물의 벽체에 미치는 영향(Crawford와 Ward, 1965)

발파진동속도	변형률	피해 정도
7.5~10.0 cm/s	30 μ	블록 사이의 모르타르 이음새에 균열이 발생하기 시작하였음
25.4 cm/s	100 μ	두께 178 mm의 콘크리트벽체에는 균열이 발생하지 않았음

2) 시멘트 그라우팅 정착부 (어스앵커, 쏘일네일 등)

어스앵커는 보통 직경 125 mm 정도로 천공하여 강선을 삽입한 후 정착부를 시멘트로 그라우팅을 하며, 쏘일네일링은 직경 100 mm 정도로 천공하여 이형철근을 삽입한 후 시멘트로 그라우팅 한다. 발파진동이 지반내의 구속된 상태의 어스앵커 또는 쏘일네일 정착부에 미치는 영향에 대하여 연구한 사례는 거의 없으나 일반적으로 사면 또는 터널공사에서는 시멘트 등으로 충전된 록 볼트, 쏘일네일, 광관다단그라우팅 등에 근접하여 대규모 발파작업이 실시되고 있는 것을 감안할 때 충분히 경화된 그라우트 재에 대한 발파영향은 적은 것으로 추정할 수 있으며, 본 연구에서는 표 2의 시험결과에서 블록사이의 모르타르의 이음새 균열기준인 진동속도 10 cm/s를 허용수준으로 설정하였다.

3) 강재 구조물(엄지말뚝, 버팀보, 락, 센터파일 등)

미국가스협회(AGA) 후원으로 실시한 시험발파 결과(Westine 외, 1978)에 의하면 매설관로의 수평거리 4 m 지점에서 폭약 6.8 kg을 폭발시켰을 때, 진동속도는 114 cm/s 정도로 측정되었으며 가스관로에는 피해가 발생되지 않았으나 길이 방향은 환(hoop) 변형만 발생한 정도였다. 이와 같은 변형은 발파진동보다는 근접발파 시 폭발가스에 의한 압반블록의 이동으로 파악되었다. 전술한 바와 같이 엄지말뚝, 버팀보와 같은 철재구조물의 경우 구조적, 재료적 결함이 없으면 유연성이 커서 발파진동 영향은 고려하지 않으며 고압가스관, 송유관 같은 경우에는 중요성을 고려하여 발파진동 허용수준을 정하고 있다. 본 연구에서는 미국가스협회의 시험발파 사례에 준하여 진동속도 허용수준을 114 cm/s로 설정하였다.

3. 흙막이 구조물 근접발파 결과 검토

흙막이 구조물 내부에서 발파가 진행되면 벽체 또는 지지 시스템과 10 m 이내의 근거리에서 발파가 진행되는 경우가 많다. 그러나 이와 관련하여 진동을 측정하거나 검토한 사례는 거의 없으며 본 연구에서는 일반적으로 가설 구조물이 설치되어 있는 10 m 이내에서 발생하는 진동크기를 확인하고자 실제 현장에서 시행되는 발파패턴으로 발파를 실시하고 근거리에서 발파진

동을 측정하여 흠막이 가시설 및 지반에 전달되는 진동치를 예측하였다. 근접발파가 실시된 현장은 그림 1에서 보듯이 도심지 굴착공사로 주열식벽체(CIP)를 버팀보를 이용하여 지지하는 방식이 적용된 현장이다. 당 현장은 약 32 m 심부까지 굴착하도록 계획되어 있으며 지반조건은 상부 10 m는 토사, 그 이하는 화강암으로 이루어진 암반층으로 발파공법이 적용되었으며 지하철과 근접한 도심지 특성으로 인하여 지발당 0.375~0.75 kg 정도의 장약량으로 정밀진동 내지는 소규모진동제어 발파가 적용되었다.

발파위치는 그림 2와 같으며 발파진동 계측기(Mini-Mate Plus)는 발파영역에서 약 1.8 m 떨어진 위치에 1.5 m 간격으로 4대를 설치하였다. 계측기는 계측기의 위치를 고정시킨 상태에서 이루어졌으며 총 32회에 걸쳐 수행되었고 각 계측기와 발파지점간의 거리는 발파영역의 중심점을 기준으로 3.5~12.9 m 정도였다.

동일 장약량에 따른 거리별 진동속도를 분석한 결과(그림 3 참조), 지발당 장약량 0.5 kg에서는 최대 진동속도가 4.94 m에서 7.09 cm/s, 최단거리 4.65 m에서 1.66 cm/s로 측정되었으며, 지발당 장약량 0.75 kg에서

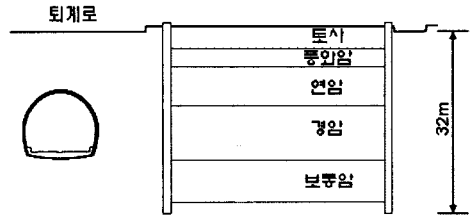
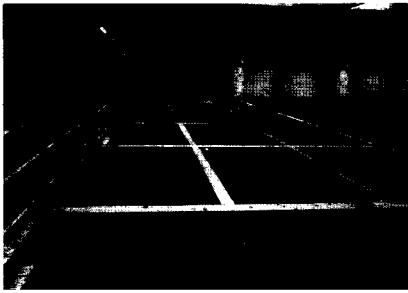
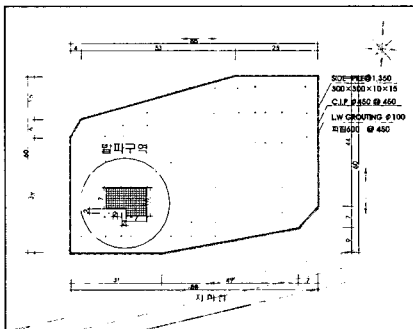
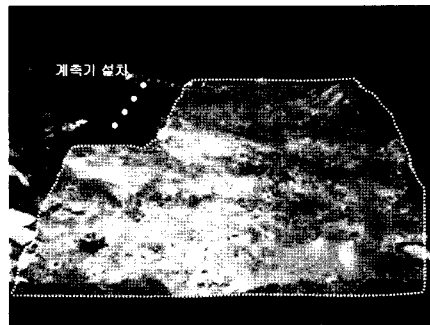


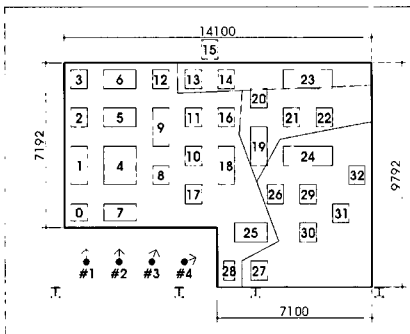
그림 1. 근접발파 현장 개요



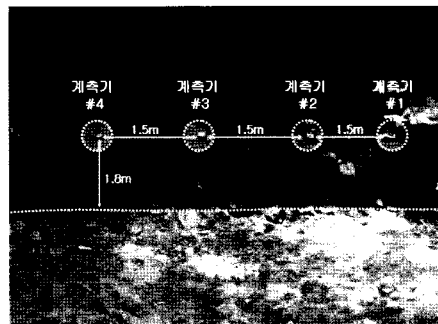
(a) 발파구역



(b) 계측기 설치위치 및 발파영역



(c) 계측기 설치위치 및 발파현황



(d) 계측기 설치현황

그림 2. 근접발파 계측 현황

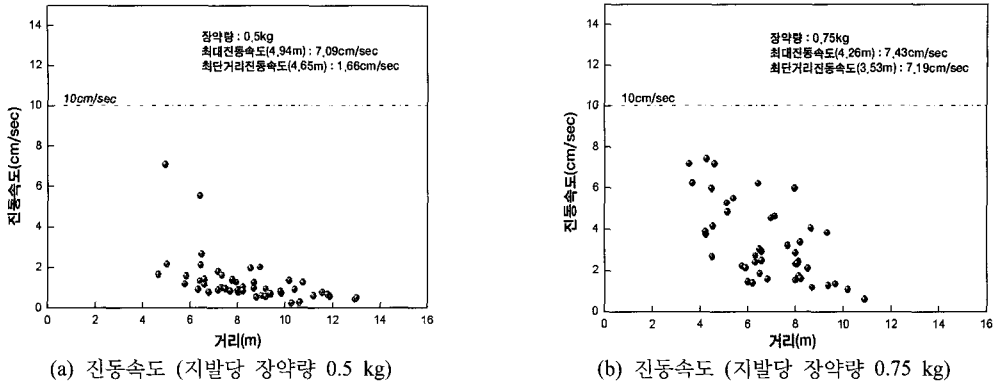


그림 3. 근접발파 진동계측 결과

는 최대 진동속도가 4.26 m에서 7.43 cm/s, 최단거리 3.53 m에서 7.19 cm/s로 측정되었다. 지발당 장약량이 0.5 kg 일 경우 4~6 m 사이의 평균 진동속도는 2.7 cm/s 이고, 지발당 장약량이 0.75 kg 경우는 4.97 cm/s로 측정되었다.

4. 흙막이 구조물 및 배면지반에 대한 발파진동 영향 검토

4.1 시험발파

흙막이 구조물 내부에서의 발파굴착은 지층 구성에 따라 달라지나 통상적으로 10 m 정도 하부에서부터 발파굴착이 시작되는 경우가 많다. 버팀보 또는 어스앵커의 수직방향 설치간격에 따라 발파 굴진장도 연계되기 때문에 일반적인 지보재 설치 간격인 3.0 m 이하로 발파굴착을 단계적으로 진행한다. 따라서 흙막이 내부에서의 발파굴착은 공당 장약량 0.5~2.0 kg의 소규모 내지는 중규모 진동제어 발파의 형태로 수행되며 흙막이 벽체 및 센터파일에서 1.0~3.0 m 정도는 발파에 따른 좌굴 등 손상우려로 기계굴착을 수행하고 있다.

흙막이 가시설을 대상으로 하는 경우에는 최소 1.0 m 에서 10 m 내외가 주요 관심 이격거리가 되므로 본 연구에서는 통상적으로 실시되고 있는 발파패턴으로 시험발파를 실시하고 발파원에서 최대한 근접거리에서 계측 data를 획득하여 흙막이 가시설과 배면지반에 미치는 발파진동의 영향을 파악하였다.

시험발파는 편마암이 기반암인 굴착현장에서 실시되었으며 공당(지발당)장약량을 0.5~1.25 kg으로 하고 동시발파공수를 5공, 10공으로 구분하였다. 계측기는 그림 4와 같이 흙막이 구조물 벽체를 따라 발파원에서 3, 18, 30, 40, 60 m 지점에 각각 설치하였고, 아울러 흙막이 배면지반에서 진동영향을 파악하기 위해서 계측 1개소를 추가로 실시하였다.

4.2 결과분석

진동 계측결과, 표 3에서 보듯이 흙막이 구조물 벽체부(측점①)에서 최대 진동속도는 4.36 cm/s로 측정되었다. 측정거리가 비슷한 벽체부(측점②, 18 m)와 배면부(측점⑥, 15 m)의 진동속도를 비교한 결과, 벽체부의 진동은 0.63~2.84 cm/s, 평균 1.51 cm/s 정도가 측정되

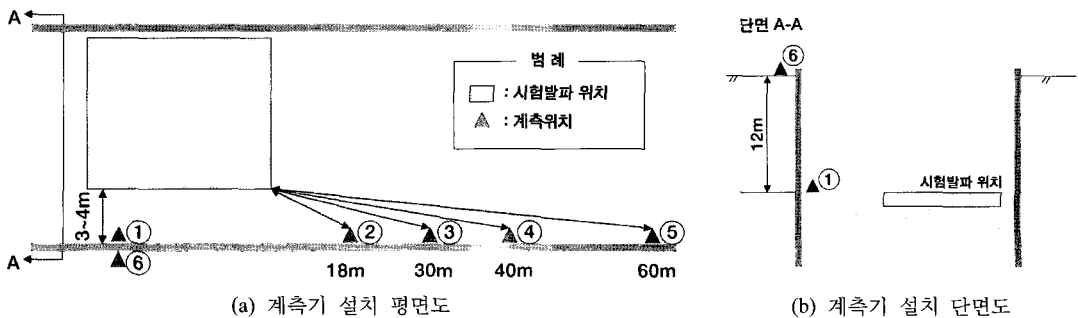


그림 4. 시험발파 계측기 설치 현황

표 3. 근접지점(3m이격)의 진동계측 결과

지발당(공당) 장약량	입자속도 (cm/s)			변위 (mm)		
	접선성분(T)	수직성분(V)	진행성분(L)	접선성분(T)	수직성분(V)	진행성분(L)
0.5 kg	1.57	2.49	1.51	0.10	0.02	0.04
0.5 kg	1.17	3.85	1.30	0.10	0.04	0.09
0.75 kg	2.27	4.36	3.45	0.17	0.07	0.10

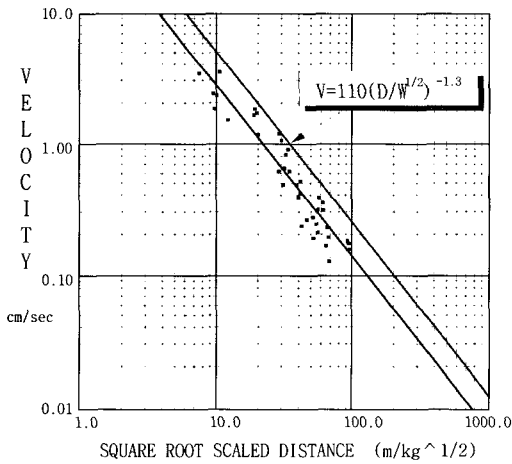
었고, 배면부는 0.14~0.58 cm/s, 평균 0.36 cm/s 정도를 나타내었다. 배면부의 진동치는 벽체부의 1/4 정도에 불과한데 이는 발파진동의 전파가 수평으로 진행함과 동시에 수직으로 진행함으로써 전파경로가 토사층을 통과하면서 저감효과가 나타난 것으로 판단되며, 원암 반과 구조물의 구성물질의 입피턴스 차에 의한 발파진동의 저감효과도 동시에 나타난 것으로 판단되었다.

흙막이 벽체부 시험발파 회귀분석결과 자승근의 적합도가 삼승근에 비해 높게 산출되어 자승근 식을 선정하였으며, 노천발파의 경우 일반적으로 사용하고 있는 건교부 설계진동식과 비교하면, 지발당 장약량(W=1.0kg) 적용 시 환산거리 9.0 m 이상에서 건교부 설계진동식이

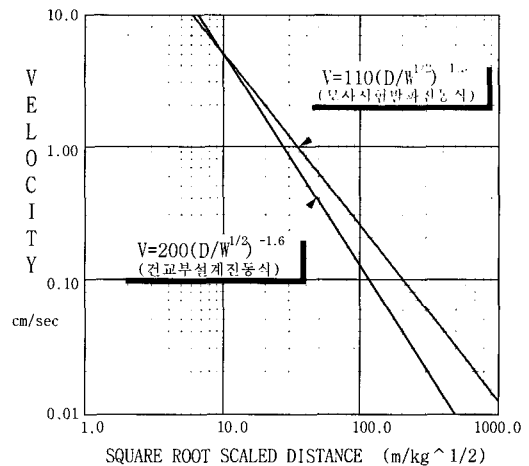
보다 보수적으로 나타나며 9.0 m 이내에서는 시험발파 진동식이 보수적인 것으로 산출되었다(그림 5 참조).

4.3 흙막이 구조물에서의 발파진동 예측 및 영향 검토

대표적인 도심지 흙막이 공법인 슬러리월과 버팀 보 및 어스앵커로 시공된 흙막이 구조물 내에서 발파작업을 실시한 현장에서 상기 시험발파 결과를 근거로 진동속도를 예측하였다. 기반암은 편암암으로서 시험발파 조건과 유사한 상태였다. 각 구조 부재별로 3장에서 설정한 허용진동 수준에 따라 발파원에서의 최소 이격거리를 기준으로 최대 진동속도를 산정하여 표 4와 같이 안정성을 평가하였다. 평가결과, 모든 흙막이 부재에서



(a) 시험발파 회귀분석



(b) 건교부 설계진동식

그림 5. 회귀분석 결과 및 건교부 설계진동식

표 4. 흙막이 구조물에서의 예측 진동수준

대상 구조물	슬러리월		어스앵커 정착부		H-Pile 등 철재구조물	
최소이격거리 (m)	5.0		15.0		3.0	
허용 진동속도 (cm/s)	25.4		10.0		114.0	
지발당 장약량 (kg/delay)	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
최대 진동속도 (cm/s)	8.6	13.5	2.0	3.2	16.8	26.3
안정성	OK	OK	OK	OK	OK	OK

허용 진동기준을 만족하는 것으로 나타나 발파작업으로 인한 흠막이 구조물의 영향은 거의 없는 것으로 평가되었다. 그러나 발파압력에 의한 암반블록의 이동 영향을 고려하여 벽체 및 센터파일에서 최소한 최소저항선의 2배 정도를 이격하여 발파한다면 더욱 안전할 것으로 판단된다.

한편, 시험발파에 의한 진동추정식이란 현장 발파작업상에 생길 수 있는 많은 변수를 감안하여 안전하게 발파작업을 수행할 수 있도록 하기 위해서 안전율을 감안한 통계학적 계산방식이므로 실제 계측치 보다는 다소 높은 예측치로 분석될 수 있다. 또한, 발파 진동추정식은 지수함수로서 근거리 시에는 급격하게 변화하므로 5 m 정도 이내의 근거리에서 적용 시에는 과대평가될 수 있으므로 너무 안전측 설계·시공이 될 수 있다. 따라서 시공 시 해당거리에서의 실측을 통한 발파관리가 필요하다. 현장 작업의 불확실성을 감안하더라도 본 현장의 경우에 있어서는 발파작업으로 인한 흠막이 구조물의 영향은 없는 것으로 분석되었다.

4.4 발파진동이 흠막이 배면지반에 미치는 영향 검토

1) 토사층의 액상화 현상

느슨한 사질토 또는 입상토질의 토사지반의 경우 진동에 의해 지반다짐효과가 발생할 수 있다. 또한 느슨한 사질 지반이 포화되어 있는 경우에는 지반의 액상화 현상이 발생할 수도 있다. 액상화 현상은 반복하중을 받고 지반내의 간극수압이 급격히 상승해서 과잉 간극수압이 발생하여 지반의 전단강도가 제로가 되는 현상이므로, 비배수 상태의 느슨하고 포화된 사질토 지반에서 발생할 수 있는데 진동, 폭파, 지진 등의 순간적인 하중이 작용할 경우 지반의 밀도가 높아지면서 비배수 상태 하에서는 잔류 간극수압이 형성될 수 있다. 잔류 간극수압이 총 붕압을 넘어서게 되면 지반이 전단저항을 잃고 액체와 같이 거동하는 현상으로 나타난다. 액상화 현상은 느슨한 사질 지반이 지하수위 아래 위치하여 포화 상태 하에 있고 일반적인 허용 진동치를 넘는 비교적 큰 충격진동을 받을 경우 예상될 수 있는 특수한 문제이나, 지발당장약량이 2.0 kg 이내의 발파작업에서는 영향이 없을 것으로 판단된다.

2) 토사층의 다짐 현상

지반다짐 현상은 느슨한 모래질 지반에서 발파 시 충격파에 의해 발생할 수 있다. 발파에 의한 다짐의 발생 범위는 장약량과 관련이 있다고 보고되어 있으나 연구결과에 의하면, 어느 특정 지역에서 일정 장약량으로 다짐 효과를 얻었다고 하여도 장약량을 증가시킨다고

다짐 효과가 증대하지 않는 것으로 나타나고 있다. 지반에 발생한 잔류 간극수압이 없어지고 원상태로 회복된 후 다시 발파할 경우 어느 정도의 다짐 효과를 얻을 수 있으나 2차 및 3차 발파에 의한 효과는 50%, 20% 등으로 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다. 지발당 2 kg 정도 이내의 장약량을 사용한 터파기 굴착공사의 경우에는 다짐 효과가 거의 발생하지 않을 것으로 판단된다.

3) 반복작업에 의한 피로효과 및 잔류응력

일반적으로 피로현상은 한계응력 이상으로 하중이 반복될 때 균열 등이 발생하며 궁극적으로 파괴가 되는 현상으로 가해지는 응력 수준이 높을수록 파괴 시까지의 반복하중 수가 줄어든다. 특히, 발파에 의한 충격하중은 지속시간이 ms단위의 극히 짧은 순간이라는 특성을 감안할 때 한계응력수준이하의 응력으로는 피로현상이 발생되지 않는다. 잔류응력은 작용 하중을 제거하였을 때 응력이 소멸되지 않고 재료 속에 어느 정도 잔류하는 현상이다. 점탄소성체 지반의 경우에는 이와 같은 현상이 관찰되는 경우도 있다.

5. 결론

- 1) 재료 및 구조적 결함이 없는 흠막이 구조물에 대한 허용 진동기준은 슬러리월과 같은 콘크리트는 25.4 cm/s, 어스앵커나 쓰일네일 정착부는 10 cm/s, 강재는 114 cm/s 정도가 적절한 것으로 판단되었다.
- 2) 근거리 발파결과 측정거리 4~6 m에서의 평균 진동속도는 지발당 장약량이 0.5, 0.75 kg일 경우 각각 2.7, 4.97 cm/s로 측정되었다.
- 3) 시험발파 결과, 지발당 장약량 0.5~0.75 kg인 경우 3 m의 근접부 최대 진동속도는 4.36 cm/s 정도로 수직성분이 우세하였으며, 최대변위는 0.17 mm로 접선성분이 우세하였다. 배면지반에서는 흠막이벽체 및 토사층을 통과하면서 진동치가 급격히 감소하였다.
- 4) 지발당 장약량 0.5~2.0 kg 범위로 시행되는 흠막이 내부에서의 발파작업은 재료 및 구조적 결함이 없는 흠막이 구조물과 배면지반에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었으나 발파압력에 의한 암반블록의 이동 영향을 고려하여 최소저항선의 2배 정도를 이격하여 발파하면 더욱 안전할 것으로 사료되었다.

참고문헌

1. 류창하, 최병희, 김양균, 유정훈, 2003, 터널발파-구조물 병행시공을 위한 영향평가 연구, 화약발파 21.4, 11-21.
2. 서울특별시지하철건설본부, 1996, 지하철건설공사안전관

리펀람(I), 99.

3. Crawford, R. and H.S. Ward, 1965, Dynamic strains in concrete and masonry walls, Building Research Note 54, National Research Council of Canada, Ottawa.
4. Westine, P.S., E.D. Wsparaza and A.B. Wenzel, 1978, Analysis and testing of pipe response to buried explosive detonation, Report L51378, American Gas Association, Arlington, 169p.

황 현 주



1978년 전북대학교 공과대학 자원공학과
학사

Tel: 02-2675-0290

E-mail: hyupse@paran.com

현재 협승엔지니어링 대표

이 상 필



1988년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사

1990년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사

2006년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 02-2005-9220

E-mail: splee@gsconst.co.kr

현재 GS건설(주) 기술본부 지하공간
팀 팀장

양 형 식



1979 서울대학교 공과대학 자원공학과
학사

1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사

1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724

E-mail: hsyang@jnu.ac.kr

현재 전남대학교 건설지구환경공학부
교수