# 바이브로 해머 및 RCD 공법 적용시 기존터널에 미치는 진동영향해석

## A study on the effect of ground vibration induced by vibrohammer and RCD on adjacent subway tunnel

허 영*[1], 남기천*[2], 김태형*[3], 방진호*[4], 곽창원*[5]
Huh, Young · Nam, Kee-Chun · Kim, Tae-Hyung · Bang, Jin-Ho · Kwak, Chang-Won

Abstract

This paper presents the effect of ground vibration induced by vibrohammer and RCD on adjancent subway tunnel performance using FDM program. Firstly, the stability criteria for structures near vibration source were proposed according to existing data, then peak particle velocity around tunnel was estimated based on detailed information of vibrohammer and existing formula for dynamic loads through numerical analysis. The peak particle velocity induced by RCD bit rotation was also estimated using surveyed data and formula. Consequently, displacement and stress responses were obtained at crown, shoulder and spring line and compared with the criteria to check stability of tunnel.

**Keywords:** Vibrohammer, RCD, peak particle velocity, finite-difference analysis

요 지

본 논문에서는 교량 기초를 위한 널말뚝 압입과 RCD 말뚝 시공시에 발생하는 진동에 대한 기존 지하철 구조물의 안정성을 유한차분법에 의한 동적수치해석을 이용하여 고찰하였다. 먼저 진동에 의한 구조물의 안정성 평가기준을 국내외 사례를 토대로 제안하고 바이브로 해머의 제원과 하중제안식을 바탕으로 수치해석을 수행하여 널말뚝 압입시 발생하는 최대입자속도를 산정하였다. 아울러 RCD 말뚝 시공시 비트진동에 의한 토체의 진동속도를 실측치와 경험식을 이용하여 산정하고 그 결과를 허용진동기준과 비교하였다. 진동하중 하에서 시간에 따라 터널 천단, 어깨부 및 측벽부에서의 응답과 구조물 부재의 축응력, 전단응력 및 최대 휨압축응력이력을 제안된 기준과 비교하여 터널의 안정성을 검토하였다.

**주요어:** 바이브로 해머, RCD, 최대입자속도, 유한차분 해석

*1 수원대학교 토목공학과 교수
*2 (주)청석엔지니어링 지반공학부 전무
*3 (주)청석엔지니어링 지반공학부 부장
*4 (주)청석엔지니어링 지반공학부 과장
*5 (주)청석엔지니어링 지반공학부 주임

## 1.서론

도심지 등의 근접시공에서 가시설 설치를 위한 파일항타는 지반진동을 유발하여 기존 구조물에 직·간접적으로 영향을 미친다. 따라서 근래에는 소음 및 진동이 심한 드롭해머나 디젤해머보다 소음이 적고 작업능률이 좋은 바이브로 해머가 널리 쓰이고 있다. 바이브로 해머는 폭발 및 타격의 큰 표면진동과 소음은 없으나 말뚝 인접지반에 높은 주파수의 진동이 발생한다. 또한 RCD (Reverse Circulation Drill) 공법은 대심도의 말뚝공사에 유리하고 연암 및 경암층까지 저소음으로 신속한 시공이 가능하나, 드릴로드 선단에 롤러 비트를 장착하여 비트의 회전으로 암반을 파쇄하여 굴진하므로 역시 진동이 발생하여 진동영향을 받는 근접 구조물에 대한 영향검토가 요구된다. 본 연구에서는 부산 ○○지역 교량기초 시공시 널말뚝 관입에 사용되는 바이브로 해머와 RCD 말뚝 시공시 비트회전에 의해 발생하는 진동에 의해 교각으로부터 최소 약 5.7m의 수평 이격거리를 갖는 기존 지하철구조물 및 주위 지반이 받는 진동영향을 검토하고 안정성을 평가하였다. 안정성 평가는 일반적으로 진동안정성 평가의 척도로 이용되는 최대입자속도(Peak Particle Velocity)를 기준으로 하며, 구체적인 수행방안은 다음과 같다.

- 바이브로 해머에 의한 널말뚝 압입시 발생하는 지반진동의 크기를 기존 제안식과 바이브로 해머의 제원으로부터 결정
- 진동해석영역을 모델링하고 하중 및 경계조건을 설정하여 동적수치해석을 수행하여 최대진동속도를 얻음
- 수치해석 결과를 바탕으로 경험식을 이용하여 RCD 말뚝 시공시 비트진동에 대한 진동속도를 문헌과 경험식을 이용하여 산정하고 그 결과를 진동허용기준과 비교하여 안정성 검토

## 2.진동속도 규제기준설정

구조물의 진동규제 기준은 구조물 자체의 손상뿐만 아니라 구조물에 설치되는 주요기기 및 물품, 구조물내의 사람에 대한 폐해 방지 측면까지도 모두 포함되는 형태가 가장 바람직할 것이다. 그러나 이와 같이 포괄적인 구조물 진동규제 기준을 다룬다는 것은 쉬운 일이 아니며 본질적으로 구조물의 손상·기기 및 물품파손·사람피해의 측면은 각각 고유한 영향요인 및 평가기준이 고려되어야 하는 것이므로 이들을 상호 분리한 별도의 진동규제 기준을 정하는 것이 바람직하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 "구조물의 손상"측면을 위주로 외국에서 적용되고 있는 주요 규제기준들을 참고하여 기준을 결정하고자 한다.

### 2.1 스위스의 진동속도 규제기준

스위스는 진동속도를 국가기준으로 제정·적용하고 있다. 다음 표 1에 현행 (1978년 개정) 스위스 기준을

표 1. 스위스의 진동규제 기준 (1978)

| 종별 | 구조물 종류 | 발파진동 | | 교통/기계진동 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 주파수 범위 (Hz) | 입자속도 (mm/s) | 주파수 범위 (Hz) | 입자속도 (mm/s) |
| 1종 | 강구조 및 철근 콘크리트 구조물/지하의 터널 및 지하공동 (Chamber) 중 콘크리트 라이닝 처리한 것 또는 라이닝이 없는 것 | 10~60 | 30 | 10~30 | 12 |
| | | 60~90 | 30~40 | 30~60 | 12~18 |
| 2종 | 기초벽이 있고 콘크리트 슬래브 또는 석조재 벽체로 축조된 건물 | 10~60 | 18 | 10~30 | 8 |
| | | 60~90 | 18~25 | 30~60 | 8~12 |
| 3종 | 석조재 벽체와 함께 목재 천장을 가진 건물 | 10~60 | 12 | 10~30 | 5 |
| | | 60~90 | 12~25 | 30~60 | 5~8 |
| 4종 | 역사적 가치가 있는 구조물 및 기타 진동예민 구조물 | 10~60 | 8 | 10~30 | 3 |
| | | 60~90 | 8~12 | 30~60 | 3~5 |

나타내었다. 허용진동치를 발파진동과 교통/기계진동으로 명확히 구분하고 이들에 의한 탁월 주파수 대역별로 허용진동 속도치를 규정하고 있는 것이 특징이다.

## 2.2 독일의 진동속도 규제기준

독일은 DIN 4150 (Structural Vibration in Buildings)을 통하여 진동속도를 규제하고 있다. DIN 4150은 3개의 별도 규정으로 구성되어 있는데 구조물의 손상에 관한 것은 그 중 Part 3 (Effect on Structures)이다. 현재 국내에서 허용 발파진동기준의 하나로서 이용되고 있는 서울/부산 지하철 허용진동기준은 1970년 DIN 4150-Part3을 원용한 것이다. DIN 4150 (1986)에서는 기본적으로 일시진동과 정상진동을 구분하고, 구조물 전체에 대한 것과 구조물 부재에 대한 것을 구분한 것이 특징이다. 그리고 진동 속도치외에 응력을 기준으로 한 평가 및 피로효과에 대한 내용, 진동침하에 대한 고려의 필요성을 언급하는 등 세심하고 짜임새 있는 규제기준을 제시하고 있어 진동규제 기준에 대한 하나의 표준적인 모델을 제공하고 있다. 이 중 정상진동에 대한 세부 내용을 다음 표 2에 나타내었다. 모두 3차례에 걸쳐 공식 개정되었으나 지반특성에 대한 고려가 전무하고, 과거에 비해 허용진동치를 다소 상향시켰다고는 하나 여전히 비현실적으로 낮다는 평가를 받고 있다.

## 2.3 스웨덴의 진동속도 규제기준

스웨덴은 스위스나 독일처럼 국가 전체 기준은 없으나, 주요 도시에서 견고한 암반위에 축조된 주요 구조물에 대하여 시행되고 있는 대표적인 진동 규제기준은 다음 표 3과 같다.

## 2.4 본 연구적용 기준설정

앞 절에서 살펴본 바와 같이 각 나라별로 진동 규제기준이 상이하고, 국내에는 말뚝 시공시 유발되는 진동에 대한 특별한 규정이 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서 분석하고자 하는 구조물과 가장 유사한 지하의 터널 및 지하공동 (Chamber)에 관한 규정이 명시되어 있는 스위스 규제기준이 타당하다고 판단된다. 이는 진동수 10~30Hz의 범위에서 허용 입자속도를 1.2 kine (12mm/s)으로 정하고 있으며 독일기준값 (1 kine)과 유사하며 스웨덴 기준값 (7~10 kine)에 비해서 안전측으로 판단된다.

표 2. 독일의 진동속도 규제기준 (정상진동, DIN 4150-Part 3, 1986)

| 입자속도 | | | |
|---|---|---|---|
| 종별 | 구조물 종류 | 수평성분 | 처짐방향성분 |
| 1종 | 상업/산업용 건물 기타 유사형태건축물 | 5 mm/s | 10 mm/s |
| 2종 | 주거용 건물 기타 유사형태건축물 | 5 mm/s | |
| 3종 | 진동예민구조물, 문화재 등 | 해당없음 | |

표 3. 스웨덴의 진동 규제기준( 1990)

| 구조물 종류 | | 변위 (mm) | 입자속도 (mm/s) | 가속도 ($mm/s^2$) |
|---|---|---|---|---|
| 구조물 자체 손상 | 철근 콘크리트 방호구조물 | - | 200 | - |
| | 고층 아파트군 및 현대식 철근콘크리트 또는 철골 구조물 | 0.4 | 100 | - |
| | 견고한 암반내 지하공동의 천단 | - | 70~100 | - |
| | 서구식 연립주택 : 벽돌 또는 석조식 벽체 | - | 70 | - |
| | 중소형 콘크리트 건물 | - | 35 | - |
| 구조물 내 기기 | 컴퓨터 센터 : 컴퓨터 지지구조물 | 0.1 | - | 2.5 |
| | 차단기 제어실 | - | - | 0.5~2 |

## 3. 해석조건

### 3.1 해석지반조건

그림 1과 같이 지하철 구조물이 교각기초에 인접하여 통과하므로 바이브로 해머를 사용한 널말뚝의 관입 및 RCD 비트회전에 따른 진동 영향을 받을 수 있으므로 안정성 검토가 필요하다. 따라서 진동원과 지하철 쉴드터널과의 거리가 가장 가깝고 상부토피가 얇은 ABUT2 단면 (그림 2)을 해석 단면으로 선정하였다.

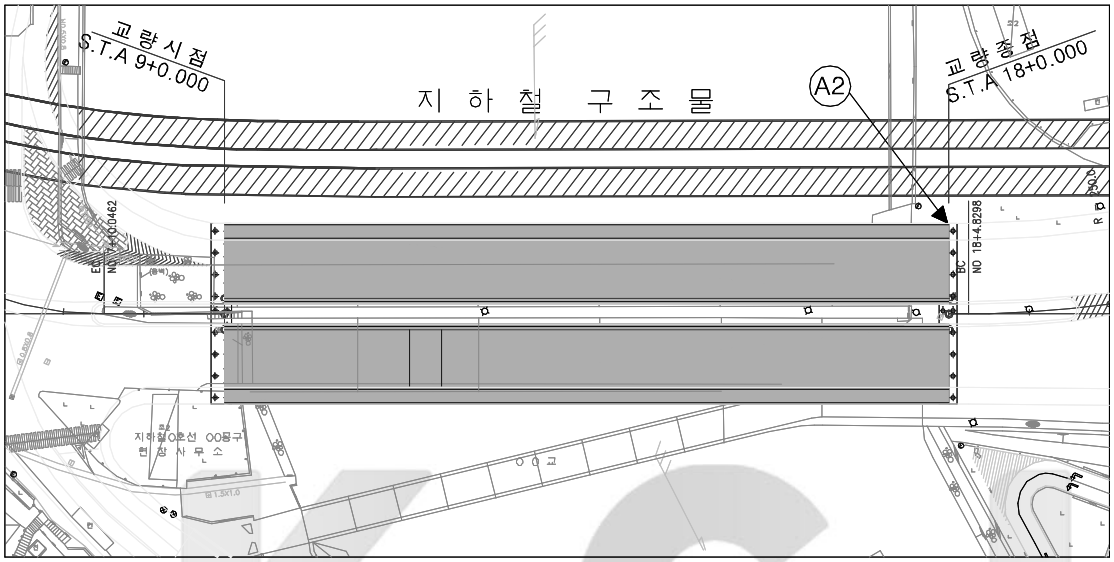


그림 1. 대상 지역의 평면도

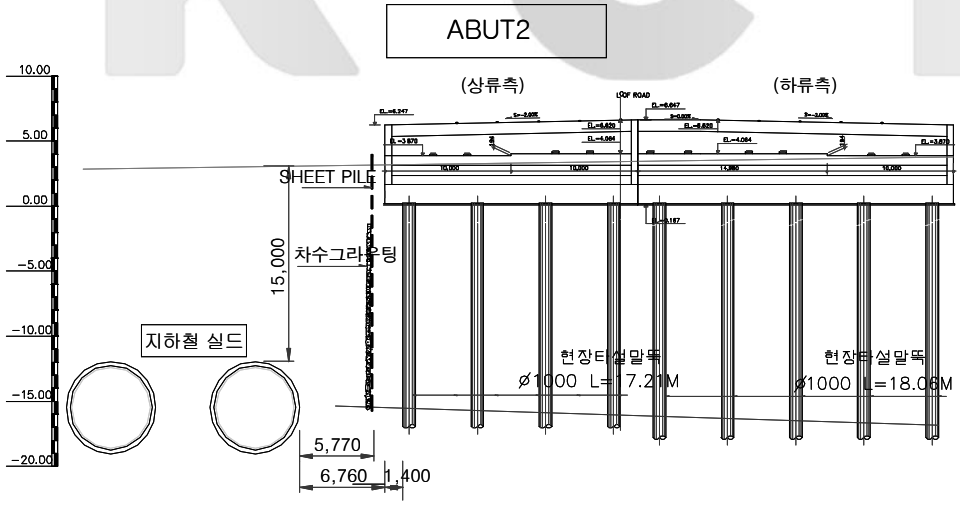


그림 2. 해석 대상 단면도 (A2)

표 4. 지반 물성치

| | 변형계수 (tf/m²) | 포아송비 (v) | 점착력 (tf/m²) | 내부마찰각 (Φ) | 단위중량 (tf/m³) |
|---|---|---|---|---|---|
| 모래 | 1,050 | 0.30 | 0.0 | 30 | 1.80 |
| 점토 | 560 | 0.30 | 1.1 | 0 | 1.80 |
| 점토자갈 | 3,500 | 0.35 | 0.0 | 35 | 1.90 |
| 연암 | 160,000 | 0.26 | 10.0 | 37 | 2.30 |

대상지역의 지반조사 결과에 의하면 지층은 층서에 따라서 상부에 모래층이 분포하고 차례로 점토, 자갈 및 기반암이 분포한다. 널말뚝 관입심도는 기반암 상부인 18m이다. 해석 지반정수는 시추보링한 조사결과 및 실내시험결과를 바탕으로 표 4와 같이 산정하였다.

### 3.2 수치해석조건

수치해석은 범용유한차분해석 프로그램인 FLAC-2D (with Dynamic Option)를 이용하였으며, 해석 영역은 경계조건의 직접적인 영향을 피하고 반사파 영향을 최소화하기 위하여 수평방향으로는 최대 13D, 하부로는 10D까지 충분히 설정하였다. 경계조건은 진동파의 반향(Reflection)을 막기 위해 자유장 경계 (Free Field Boundary) 및 기반암에서의 흡수경계 (Quiet Boundary)를 적용하였다. 실제로 말뚝 두부에 진동하중이 가해지는 것을 모사하기 위하여 시간에 따른 진동하중을 정현파로 재하하였다.

바이브로 해머에 의해 발생하는 하중은 펄스파인 일반하중과 다르며 연속적인 정현파 형태이다 (C.L.Ramshaw). 바이브로 해머로 말뚝두부에 진동하중을 주어 관입시키는 시공과정을 최대한 적절하게 모사하기 위하여 파일요소를 지중에 모델링한 후, 진동하중을 파일 두부에 정현파로 작용시켰다.

본 해석에 적용된 정현파 하중을 함수로 표현하면 다음 식 (1)과 같다.

$$P = P_o \sin wt = m\ e\ \omega^2 \sin \omega t \quad (1)$$

여기서, $P$는 진동하중, $P_o$는 진폭, $m$은 진동체의 질량, 그리고 $e$는 편심거리를 나타낸다. 식의 입력변수로 사용되는 바이브로 해머의 제원은 다음 표 5와 같다.

표 5. 바이브로 해머의 제원

| 항 목 | 비 고 | 항 목 | 비 고 |
|---|---|---|---|
| 모델명 | VM2-1200E | 진폭 (mm) | 4.9 |
| 출력전력 (kW) | 30 | 가속도 (g) | 8.5 |
| 진동력 (tonf) | 16.4 | 진동체 질량 (kg) | 1,935 |
| 진동수 (Hz) | 21 | 편심거리 (cm) | 0.5 |

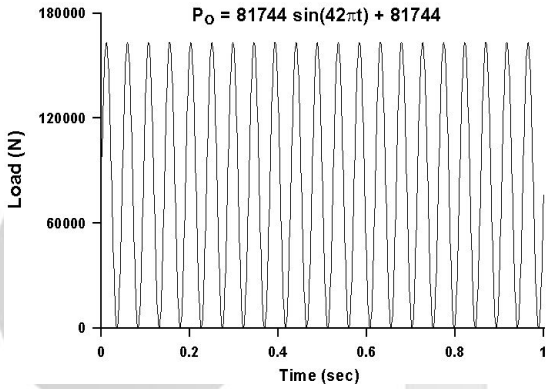


그림 3. 해석에 사용된 진동하중 (f=21Hz)

위의 자료를 토대로 식 (1)을 이용하여 진동하중값을 계산하면 다음 식 (2)와 같고 이를 그림 3에 나타내었다. 이 때, 진폭은 최대 진동력이 된다.

$$P = 81744 \sin (42\pi \cdot t) + 81744 \quad (2)$$

## 4.해석결과

### 4.1 진동속도검토

앞절에서 결정한 입력값과 조건을 바탕으로 바이브로

해머에 의한 널말뚝 관입을 모사하였으며 터널 천단부와 우측 어깨부 및 우측벽에서의 최대입자속도 (PPV)를 나타내면 다음 표 6과 같다.

널말뚝 관입점과 직선 거리가 가장 가까운 우측 어깨부에서 진동하중 재하 후 0.3초 시점에서 최대 진동속도 0.56 kine이 발생하였으며 이는 기준치인 1.2 kine의 47%에 불과하여 진동 영향은 미미한 것으로 판단된다.

동하중은 최대 5초간 재하하였으며 다음 그림 4~6과 같이 하중 재하 후 약 2초까지 최대 진동속도값이 크게 나타나지만 감쇠효과로 인해 2초 이후부터 최대 진동속도분포가 수렴하는 경향을 보인다. 터널 천단 및 우측벽에서 수평방향보다 수직방향의 진동속도가 탁월하게 나타났고, 진동원과 거리가 가장 가까운 우측어깨부에서는 수직, 수평방향 속도가 거의 일치하였다. 또, 진동원과의 수직거리가 가장 먼 우측벽에서 수평방향의 진동속도가 가장 낮게 나타났다.

각 지점에서의 진동속도를 시간영역에서 도시하면 그림 4~6과 같다.

표 6. 최대진동속도 발생결과

| 위치 | 천단 | | | 우측어깨 | | | 우측벽 | | | 기준 | 검토결과 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 방향 | X축 | Y축 | 합 벡터 | X축 | Y축 | 합 벡터 | X축 | Y축 | 합 벡터 | 합 벡터 | |
| 진동 속도 (kine) | 0.33 | 0.45 | 0.56 | 0.36 | 0.37 | 0.51 | 0.18 | 0.30 | 0.35 | 1.2 | 전 지점에서 O.K |

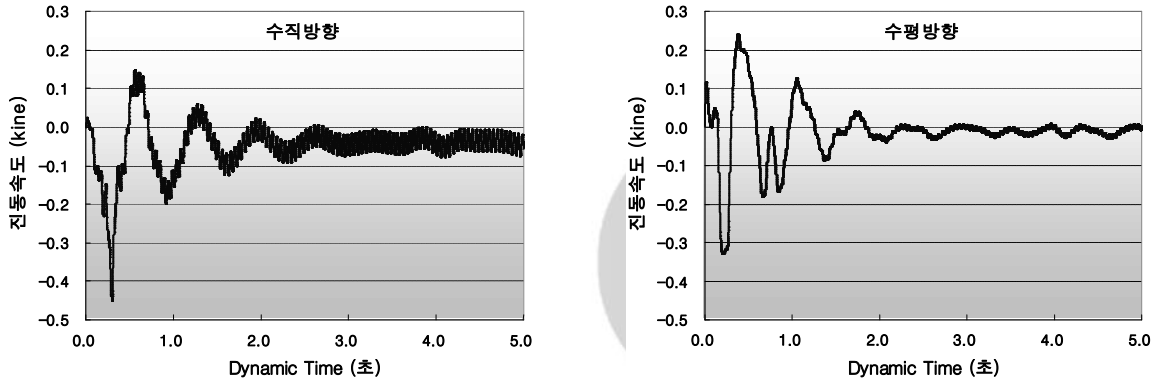


그림 4. 터널 천단부의 속도분포이력

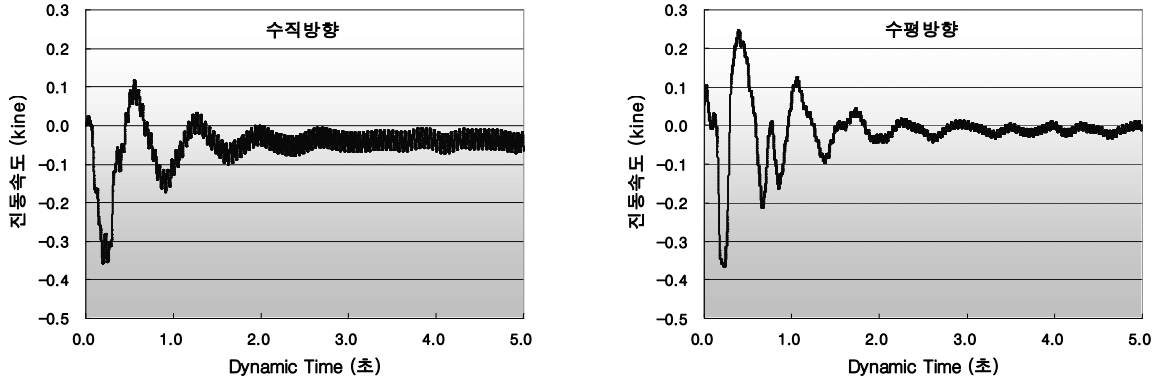


그림 5. 터널 우측어깨부의 속도분포이력

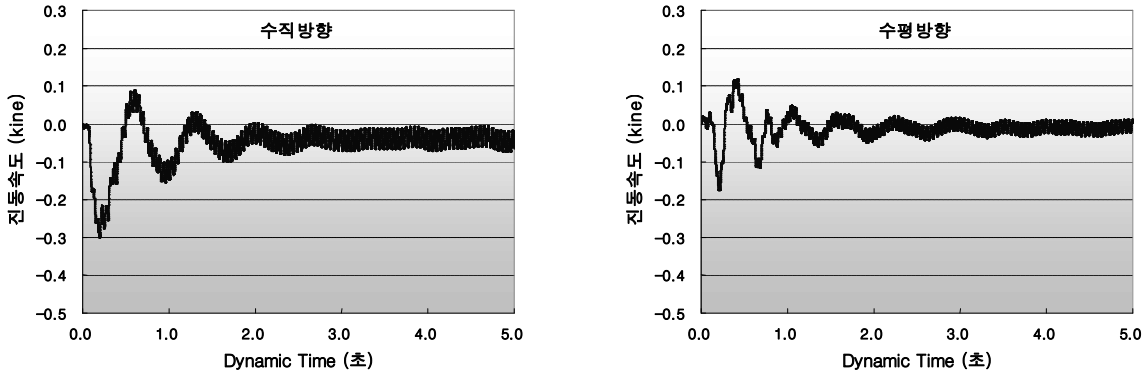


그림 6. 터널 우측벽의 속도분포이력

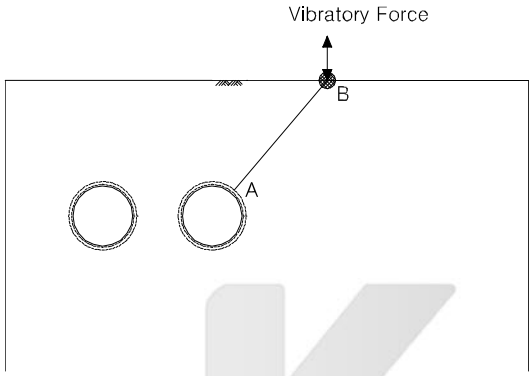


그림 7. 격자점 분포

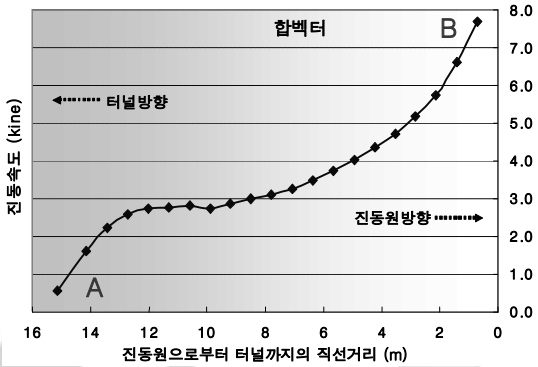


그림 8. 거리별 최대 진동속도분포

거리에 따른 최대진동속도의 분포를 분석하기 위하여 다음 그림 7의 선 AB와 같이 진동원으로부터 터널 외곽까지의 직선 거리에 위치한 모든 격자점들에서 최대 진동속도의 합벡터를 찾은 후 이를 거리에 따라 도시하면 다음 그림 8와 같다.

그림 8에서 보듯이 진동원으로부터 거리에 반비례하여 최대 진동속도가 감소하는 경향을 보인다. 진동원으로부터 3.5m 지점에서 12m 지점까지는 진동원과 가까워질수록 수직방향 진동속도의 증가량은 커지나 수평방향 진동속도는 오히려 감소하는데 이는 진동원을 중심으로 반경 12m 지점까지 수직진동력의 영향이 수평진동력의 영향보다 탁월함을 나타낸다. 이를 전체 속도벡터 분포도로 확인하면 다음 그림 9 및 10과 같다.

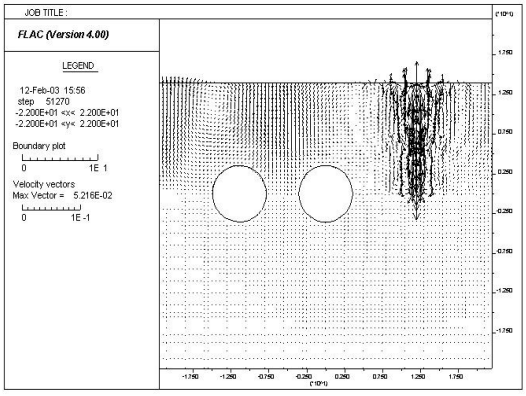


그림 9. 속도벡터 분포도 (진동재하 1초 후)

### 4.2 구조물 부재력검토

최대축응력은 우측벽에서 약 23 kgf/cm$^2$으로 허용치의 약 13%정도로 미미하게 나타났다. 최대 전단응력은 우측어깨부에서 2.43 kgf/cm$^2$로 허용치의 약 46%정도로 나타났으며 최대 휨압축응력은 우측벽에서 81 kgf/cm$^2$으로 허용치의 45%정도로 나타났다. 상세결과는 다음 표 7에 나타내었다.

쉴드 주요 지점에서의 부재력변화를 시간영역에서 도시하면 다음 그림 11~16과 같다.

해석결과, 터널 주변지반의 최대입자속도는 0.35~0.56 kine으로 나타나 허용치인 1.2 kine의 47% 이하의 미미한 값을 나타내었으므로 바이브로 해머로 널말뚝 압입시 지하철 구조물에 미치는 영향이 작다고 판단된다. 또한, 지하철 구조물 부재력 검토결과 축응력 및 최대휨압축응력은 측벽에서 가장 큰 값이 발생하였으며 전단응력은 우측어깨부에서 최대값을 나타내었다. 진동하중 재하 후 대략 1초 이내에서 최대 응력값을 나타내었다. 약 3초 이후 응력이 수렴하는 경향을 보이며 응력이력곡선의 진폭이 거의 일정하게 유지되는 경향을 보인다.

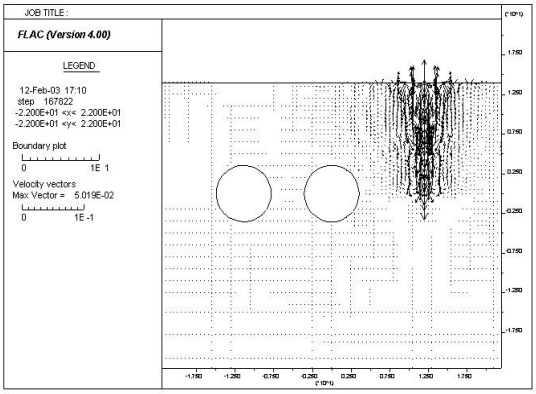


그림 10. 속도벡터 분포도 (진동재하 5초 후)

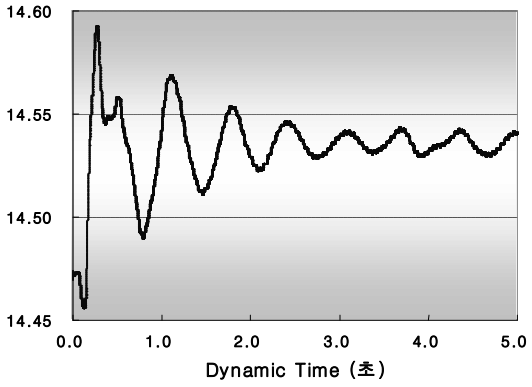


그림 11. 천단부에서의 축응력이력

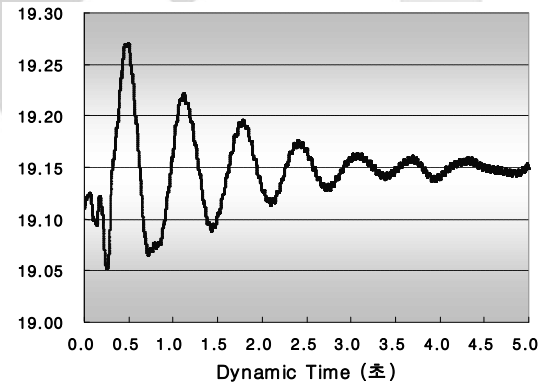


그림 12. 우측 어깨부에서의 축응력이력

표 7. 쉴드 주요지점에서의 축응력 최대값

| 부재력 (kgf/cm$^2$) | 천단 | 우측어깨부 | 우측벽 | 허용치 | 검토결과 |
|---|---|---|---|---|---|
| 최대축응력 | 14.6 | 19.3 | 23.0 | 180 | O.K |
| 최대전단응력 | 0.38 | 2.43 | 1.75 | 5.3 | |
| 최대휨압축응력 | 80.3 | 49.1 | 81.0 | 180 | |

## 5.RCD말뚝 시공에 대한 안정성 검토

시공중 발생 가능한 지반진동의 크기는 하부지층의 구조 및 진동원의 형태에 따라 다양하다. 시공시 RCD 비트가 기반암을 굴착할 때 발생하는 진동 크기를 예측하기

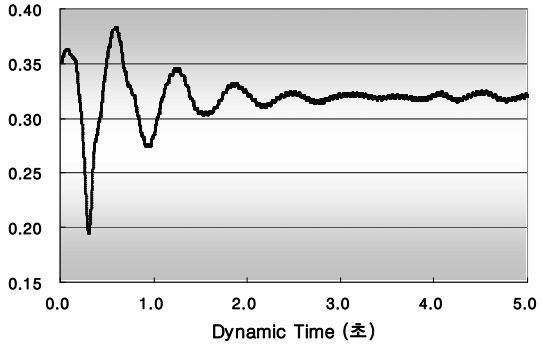


그림 13. 천단부에서의 전단응력이력

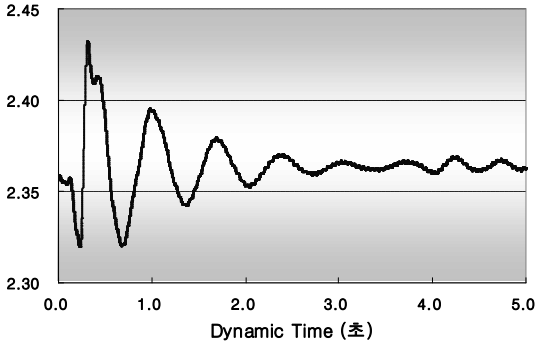


그림 14. 우측 어깨부에서의 전단응력이력

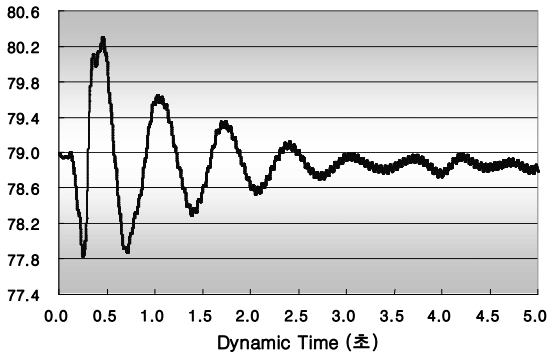


그림 15. 천단부에서의 축응력이력

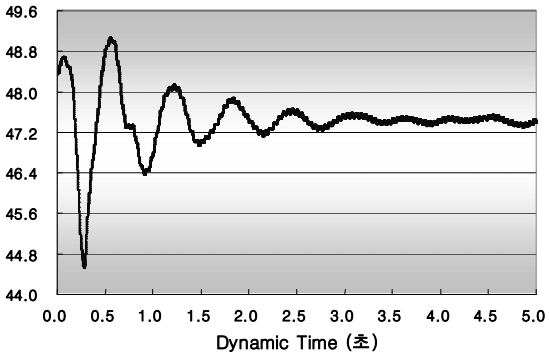


그림 16. 우측 어깨부에서의 축응력이력

위하여 가장 신뢰성 있는 방법은 시험시공을 통한 지표면 및 지중 진동계측을 수행하는 것이다. 그러나 현실적인 어려움이 있으므로, 대상 지점과 유사한 지층구조를 가지는 지점의 진동계측자료를 바탕으로 기존 문헌에서 제안된 지반진동 예측식을 이용하여 지반 진동크기를 산정하였다.

진동의 거리에 따른 감쇠는 기하감쇠와 재료감쇠의 두 가지 형태로 발생한다. 기하감쇠는 탄성체 내에서 진동원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 탄성파 에너지가 분산됨에 따라 발생하는 감쇠를 말한다. 반면 지반은 완전탄성체가 아니므로 진동 에너지는 주로 흙입자간의 마찰로 인하여 감소하게 되는데 이를 재료감쇠라 한다. Bornitz (1931)는 진동의 기하감쇠와 재료감쇠를 동시에 포함하는 진동감쇠식을 다음 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$A = A_1 \left( \frac{r_1}{r} \right)^n \exp\left[ -\alpha (r - r_1) \right] \quad (3)$$

여기서,

$A$ = 진동원으로부터 거리 $r$ 에서의 진동입자속도

$A_1$ = 진동원으로부터 거리 $r_1$ 에서의 진동입자

$n$ = 기하감쇠상수, $\alpha$ = 재료감쇠계수

기하감쇠상수 및 재료감쇠계수는 진동원의 위치, 하중형태, 발생파의 종류 및 진동주파수 등의 영향을 받는다. 다음 표 8에서는 진동원에 따른 기하감쇠계수를 나타내었고, 표 9에서는 지반 종류에 따른 재료감쇠계수를 나타내었다.

본 연구에서는 바이브로해머 진동크기 예측을 위하여 식 (3)을 사용하였다. 여기서, 기하감쇠계수 $n$ 는 Clough와 Chameau (1980)가 제안한 0.5를 사용하였고, 재료감쇠계수 $\alpha$ 는 Barkan (1962)이 포화된 실트질 사질토지

표 8. 진동원의 위치와 형태에 따른 기하감쇠계수

| 진동원의 위치 | 하중형태 | 발생파 | 기하감쇠계수 $n$ |
|---|---|---|---|
| 반무한 탄성체 표면 | 점진동원 | 체적파 | 2.0 |
| | | 표면파 | 0.5 |
| | 무한 선진동원 | 체적파 | 1 |
| | | 표면파 | 0 |
| 반무한 탄성체 내부 | 점진동원 | 체적파 | 1.0 |
| | 무한 선진동원 | | 0.5 |

표 9. 지반 종류 따른 재료감쇠계수

| 분류 | 감쇠계수 α (1/M) | | 재료의 특성 |
|---|---|---|---|
| | 5Hz | 50Hz | |
| Ⅰ | 0.01~0.03 | 0.1~0.3 | 연약한 지반 |
| Ⅱ | 0.003~0.01 | 0.03~0.1 | 보통의 지반 |
| Ⅲ | 0.0003~0.003 | 0.003~0.03 | 단단한 지반 |
| Ⅳ | < 0.0003 | < 0.0003 | 보통암, 경암 |

표 10. 이격거리에 따른 RCD 비트에 의한 진동측정치 (한양대학교, 2000)

| 이격거리 (m) | 평균진동속도 (kine) | 지층특성 |
|---|---|---|
| 7.98 | 0.52 | • 습윤한 세립 모래질 지반<br>• 실트질 모래 포함 |
| 9.07 | 0.48 | |
| 12.21 | 0.40 | |

표 11. 진동측정치(표 7)를 바탕으로 계산된 쉴드 위치별 진동속도

| 위치 | 천단 | 우측어깨 | 우측벽 | 허용기준 | 검토결과 |
|---|---|---|---|---|---|
| 진동속도 (kine) | 0.52 | 0.69 | 0.66 | 1.2 | 전 지점에서 O.K |

반에 대해 제안한 값인 0.012를 적용하였다. 따라서 바이브로해머 진동 산정식은 다음 식 (4)와 같다.

$$A = A_1\left(\frac{r_1}{r}\right)^{0.5}\exp\left[-0.012\,(r-r_1)\right] \qquad (4)$$

식 (4)를 이용하기 위해서는 먼저 한 지점의 진동속도와 발진원으로부터의 거리를 알아야 한다. 본 연구에서는 표 10에 나타낸 RCD비트에 의한 굴삭진동실측치 (진동측정보고서, 한양대학교, 2000) 기록을 적용하였고, 쉴드터널과 수평이격거리가 가장 근접한 ABUT2 단면(그림 2 참조)에 대하여 진동속도를 계산하였다. 계산 결과 값은 다음 표 11에 나타내었고, 터널로부터의 직선이격거리를 기준으로 도시하면 다음 그림 17과 같다.

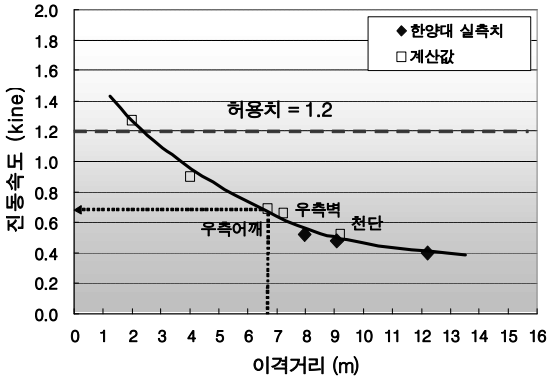


그림 17. 이격거리에 따른 진동속도분포

계산결과, 진동속도 최대값은 터널 우측어깨부에서 0.69 kine으로 나타났으며 이는 허용치인 1.2 kine의 57%에 불과하여 터널 구조물은 RCD 비트진동에 대해 안정할 것으로 판단된다.

## 6.결론

본 논문에서는 교량 기초를 위한 널말뚝 시공시 발생하는 바이브로 해머에 의한 진동과 RCD 비트진동이 기존의 지하철 쉴드구조물에 미치는 영향을 검토하기 위하여 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC-2D Ver 4.0을 이용하여 정밀동해석을 수행하고 그 결과를 고찰하였다. 수치해석 수행결과 널말뚝 시공시 발생하는 최대입자진동속도는 0.56 kine 으로서 허용치인 1.2 kine의 47% 이하의 미미한 값을 나타내었다. 진동원으로부터 가까워질수록 수직방향 진동속도의 증가량은 커지나 수평방향 진동속도는 오히려 감소하는데 이를 통해 수직진동력의 영향이 수평진동력의 영향보다 탁월함을 파악하였다. 구조물 부재력 또한 허용기준의 최대 13-46% 이하로 안정한 결과를 나타내었다. 또한 RCD 비트진동의 영향을 평가하기 위하여 진동의 재료감쇠와 기하감쇠 효과를 모두 고려한 Bornitz (1931)의 제안식을 이용하여 실측치를 근거로 진동속도를 계산하였다. 그 결과 최대입자진동속도는 터널 우측벽에서 0.69 kine으로서 허용치의 57% 정도의 작은 값을 나타내었다.

## 참고문헌


1. Dowding, C. H., Construction Vibrations (1996), Prentice Hall, pp. 225-246.
2. Clough G. W. and Chameau, Jean-Lou (1980), "Measured Effects of Vibratory Sheetpile Driving", Journal of the geotechnical engineering division, pp.1081-1099.
3. Richart, F. E., Woods, R. D. and Hall, J. R. (1970), "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice Hall, pp.322-329.
4. 우제윤 (1989) "표면파 기법을 이용한 자연지반 및 포장구조의 동적 물성 추정에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제8권, 제4호, pp.49-57.
5. 박양수 (1999) "수치해석을 이용한 대형 진동햄머다짐의 특성분석 연구", 연세대학교 석사학위논문, pp.37-51.
6. 건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구 (1988), 대우엔지니어링 기술연구소, pp.25-111.
7. 허영, 이승수, 김희철, 신한철, 이인세 (1996) "지하철진동 예측식의 사용성 판단을 위한 실측값과 예측값의 비교", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 80-85.
8. 바이브로햄머를 사용한 RCD 말뚝의 효율적 시공방안-진동측정보고서 (2000), 한양대학교, (주)은진건설엔지니어링.

**허 영**
수원대학교 토목공학과 교수
huhyoung@suwon.ac.kr

**김태형**
(주)청석엔지니어링 지반공학부 부장
thkim@cse.co.kr

**곽창원**
(주)청석엔지니어링 지반공학부 주임
cwkwak@korea.com

**남기천**
(주)청석엔지니어링 지반공학부
전무
kcnam@cse.co.kr

**방진호**
(주)청석엔지니어링 지반공학부
과장
jhbang@cse.co.kr

KCI