

# 도심지 무인통신구 건설을 위한 도심형 디샌더의 진동특성과 최적화에 관한 연구

김정근, 백송훈  
KT차세대통신망연구소 네트워크인프라연구팀

**A study on vibration characteristics and optimum design of a desander developed for constructing nonman-size cable tunnel in downtown**

Jung-Guen KIM, Song-Hoon BAIK  
Network Infrastructure Research Team, KT Telecommunication Network Laboratory

**Abstract** - 도시를 중심으로 지속적으로 발생하고 있는 초고속 네트워크서비스의 안정성을 확보하기 위해 KT는 경제적이고 안정된 구조의 직경 1,000mm 이하의 무인통신구를 건설하고 있다. 도심지에서 무인통신구 공사 허가 및 민원을 유발하는 요인으로 공사시 발생하는 이수 처리장치인 디샌더(Desander)의 소음과 진동이 있다. 소음과 진동은 불쾌감을 유발하고 인근 건물에 영향을 줄 수 있기 때문에 지속적인 관리가 필요하다. 본 연구는 소음과 진동의 주 원인인 디샌더가 발생하는 진동 특성을 모델링하고 설계인자를 이용한 최적화를 통해 진동 전달 량의 최소화에 관한 것으로 이를 통해 디샌더의 설계단계에서부터 민원 유발원인인 진동과 소음을 최소화 하고자 한다.

## 1. 서론

도심지의 무인통신구 구축시 지반안정성을 유지하기 위해 이수가압식 공법이 사용된다. 무인통신구의 직경이 1,000mm 이하로 내려오면서 관련 부대 장비의 용량과 크기의 축소가 가능해 발전구 내부에 설치 할 수 있게 되어 민원 발생원인을 감소 시키고 있다. 그러나 막장으로부터 이송되어온 이수를 흙과 물로 분리하는 디샌더는 여전히 발전구 주변, 지상에 설치되어 소음과 진동을 유발하고 있다. 디샌더의 작동 원리상 왕복운동이 발생하고 이로 인한 진동은 하부탱크와 지면을 따라 전달되어 인근 건물에 피해를 주기도 하여 민원 유발원인이 되고 있다. 디샌더의 주요 민원 발생요인은 소음 및 진동발생으로 나뉘어진다. 공사기간 중 지상에서 고정되어 작동하는 왕복운동을 사용하는 기계장치로 주변상가와

주거지의 환경을 저해하여 민원을 유발하게 된다. 소음은 주로 거주자의 불쾌감에 영향을 주며 진동은 주변 건물에 영향을 주게 된다. 일반적으로 공사현장 소음은 80dB이하로 규정하고 있지만 공사현장의 주변여건에 따라 그 값의 의미가 달라질 수 있다. 다시 말해 소음은 인간의 감성적인 측면이 작용하기 때문에 규제치의 현실성이 떨어지게 되어 발생소음이 규제치 이하임에도 민원을 유발할 수 있는 것이다.

본 연구에서 목표하는 증가량은 절대적인 규제치가 아닌 사람이 주관적으로 소리가 두 배정도 커졌다고 판단하게 되는 증가치인 10dB를 기준으로 하며 진동값의 증가치 역시 10dB로 한다. 이를 실현하기 위해 진동전달 모델을 유도하여 각 설계변수를 최적화 하고 진동전달을 억제하기 위해 공기스프링을 사용한다. 제시한 목표성능을 만족시키기 위해 다음의 상세설계를 수행한다.

- ω 공진현상 회피를 위한 하부탱크 강성보강
- ω 상부 프레임에 의한 진동전달을 최소화하는 진동스프링 배치

하부탱크의 보강 위치 결정은 유한요소 모델의 모드해석을 통해 Anti-nodal 위치를 사용하며 진동모터의 가진 주파수 20Hz를 회피하도록 배치 한다. 상부 프레임을 하부탱크와 연결하는 진동스프링의 최적배치를 위해 상부 프레임의 운동방정식을 유도하고 계산된 FRF(frequency response function; 주파수 응답함수)와 진동전달 모델을 이용하여 전달율을 최소화 하는 배치를 탐색하여 배치한다.

## 2. 디샌더의 진동 특성

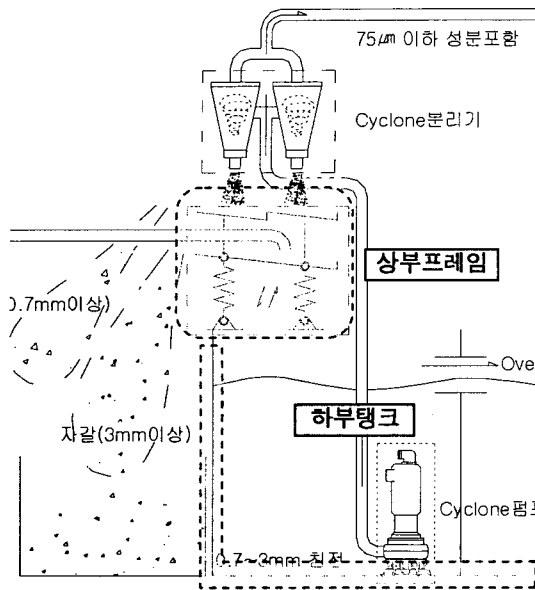


그림 1. 디샌더의 상부프레임과 하부탱크

디샌더는 상하 그리고 앞뒤 방향으로 진동하는 상부프레임과 이로 인한 진동을 지면으로 전달해주는 하부탱크로 구성되어 있다. 두 부분의 진동특성을 규명하여 민원유발원인을 축소시키는 방향으로 설계를 진행한다.

### 2.1 하부탱크 진동 특성 및 설계

#### 2.1.1 하부탱크

하부탱크의 유한요소 해석량의 축소를 위해 셸요소(shell element)를 사용하기 위해 면모델(surface model) 사용한다. 이를 위해 상용솔리드 모델러인 Solid Works를 이용하여 그림처럼 면으로 구성된 하부탱크를 모델링 한 후 상용유한요소 프로그램인 ANSYS의 전처리기(pre-processor)를 사용하여 그림 2와 같이 셸요소로 구성된 유한요소모델을 만든다.

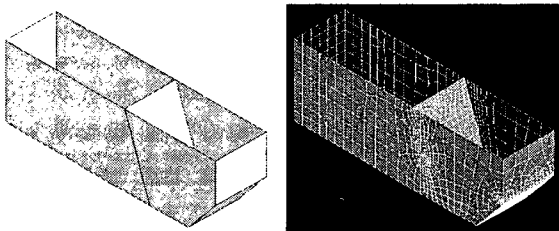


그림 2. 보강되지 않은 하부탱크 모델

해석을 위해 바닥면의 거동을 구속하는 경계조건을 적용하였고 20Hz까지 Subspace 고유치 수치해석법으로 그림 3과 같이 고유진동수와 거동형(mode shape)을 구하였다.

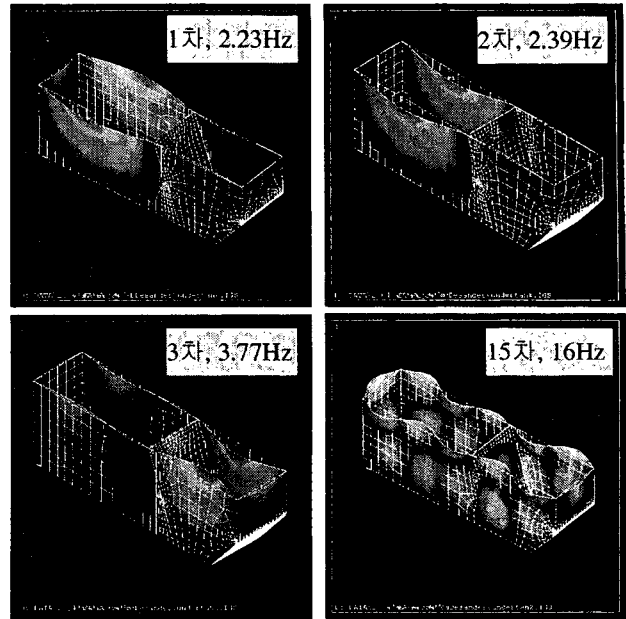


그림 3. 보강되지 않은 하부탱크 고유치 해석 결과  
보강재가 없는 하부탱크는 전체적으로 고유진동수가 낮았으며 가진 주파수 20Hz 부근에서도 여러 고유진동수의 영향을 받게 될 것으로 예상할 수 있다. 15차 모드의 변위가 커진 Anti-nodal 위치를 “ㄷ” 형강으로 보강한 다음 그림 4의 유한요소모델을 사용하여 고유치 해석을 수행하였으며 변화된 고유 진동수와 해당 거동형을 그림 5에 나타내었다.

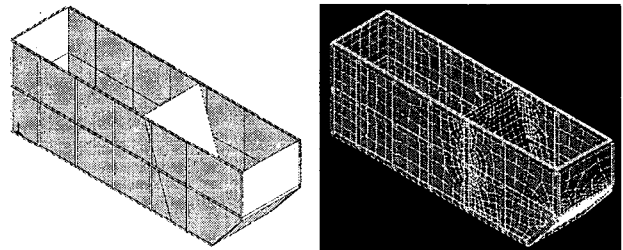


그림 4. 보강된 하부탱크 모델

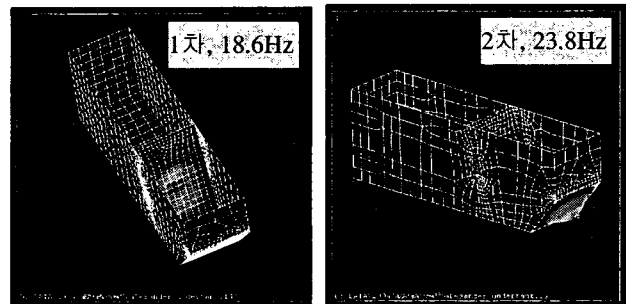


그림 5. 보강된 하부탱크의 고유치 해석 결과  
보강된 하부탱크의 1차, 2차 고유진동수는 보강 전보다 16Hz이상 상승했으며 가진 주파수 20Hz 부근의 거동형은 하부탱크의 거동에 영향을 덜 미치는 침전조의 경사면에 나타나기 때문에 진동 모터의 가진 주파수 부근에서 안정적인 거동을 할 것으로 예상된다.

2.2 상부프레임 진동 해석

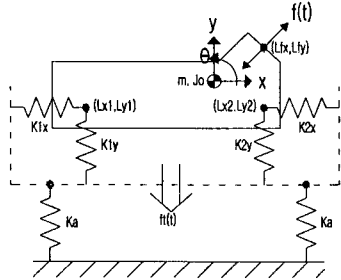


그림 6. 진동프레임 일반 좌표계

공기스프링으로 지지되어있는 상부 진동프레임의 모식도와 좌표계는 그림 6으로 표현할 수 있으며 3자유도 시스템으로 표현할 수 있다.

2.2.1 운동방정식 유도

진동 프레임 같은 다자유도계 운동방정식을 유도에 라그랑쥐 방정식을 사용하기로 한다. 라그랑쥐 방정식은 운동에너지, 포텐셜에너지를 통해 <식 3.1>의 스칼라 법칙을 따른다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \quad \text{식 1}$$

- $q_i$  일반 좌표계
- $T$  운동 에너지
- $U$  포텐셜 에너지
- $Q_i$  일반 좌표계로 변환된 일반힘

진동 프레임의 운동에너지는 일반 좌표계를 질량중심점과 일치 시켰기 때문에 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} J_0 \dot{\theta}^2 \quad \text{식 2}$$

또한 회전량  $\theta$ 가 작다고 가정하면 진동스프링에 의한 퍼텐셜 에너지는 식 2와 같이 표현할 수 있다.

$$V = \frac{1}{2} K_{1y}(y+L_{1y}\theta)^2 + \frac{1}{2} K_{1x}(x-L_{1x}\theta)^2 + \frac{1}{2} K_{2y}(y+L_{2y}\theta)^2 + \frac{1}{2} K_{2x}(x-L_{2x}\theta)^2 \quad \text{식 3}$$

운동에너지와 퍼텐셜 에너지를 일반 좌표계  $x, y, \theta$ 에 대하여 라그랑지 방정식에 대입하여 행렬형태로 정리하면,

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x & 0 & -K_x L_{1x} - K_x L_{2x} \\ 0 & K_y + K_y & K_y L_{1y} + K_y L_{2y} \\ -K_x L_{1x} - K_x L_{2x} & K_y L_{1y} + K_y L_{2y} & K_x L_{1x}^2 + K_x L_{2x}^2 + K_y L_{1y}^2 + K_y L_{2y}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{Bmatrix} = \mathbf{f} \quad \text{식 4}$$

로 질량행렬과 강성행렬로 표현할 수 있다.

강성행렬의  $x, y, \theta$ 항이 상호 연성되어 있음을 확인할 수 있으며 이는 서로 독립된 거동을 하지 않고 조합된 거동함을 의미한다.

2.2.2 고유치 해석

유도된 운동방정식에 가진력이 없는 자유거동상태는 다음의 고유치 문제가 되며 고유치 해석을 통해 유용한 정보를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} &= \mathbf{0} \\ -\omega^2 \mathbf{M}\mathbf{q} + \mathbf{K}\mathbf{q} &= \mathbf{0} \quad \text{식 5} \\ \mathbf{K}^{-1} \mathbf{M}\mathbf{q} &= \frac{1}{\omega^2} \mathbf{q} \\ \mathbf{A}\mathbf{q} &= \lambda \mathbf{q} \end{aligned}$$

이를 통해 얻은 상부 진동 프레임의 고유진동수와 거동형은 표 1과 같다.

표 1. 상부 진동 프레임의 고유치해석 결과

모드	고유 진동수	거동형 {x, y, $\theta$ }
1	0.82Hz	횡방향 모드
2	2.46Hz	횡방향 피칭모드
3	5.21Hz	회전방향 피칭모드

2차, 3차 모드는 종방향과 회전방향이 상호 연성된 거동을 보인다. 진동프레임의 고유진동수는 진동 모터의 가진 주파수인 20Hz 아래에 있으므로 주 작동구간에서 공진에 의한 영향은 피할 수 있으나 가진 주파수까지 상승하는 초기 구동 시간과 구동을 종료하는 시간에 짧은 시간이지만 공진형상을 보일 것으로 예상된다.

3. 진동전달 해석 (최적화)

3.1 주파수 분석

주파수 응답함수를 통해 전체적인 시스템 거동 특성을 분석할 수 있다. 주파수 응답함수는 푸리에 변환처럼 시간영역의 거동을 주파수 영역으로 변환하는 작업과 동일하다. 시간의 거동을 나타내는 유도된 운동방정식을 다음과 같이 가진 주파수의 항으로 변환하게 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) &= \mathbf{f}(t) \\ -\omega^2 \mathbf{M}\mathbf{q}_0 + \mathbf{K}\mathbf{q}_0 &= \mathbf{f}_0 \quad \text{식 6} \\ (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{q}_0 &= \mathbf{f}_0 \end{aligned}$$

이것을 거동과 가진력의 관계로 변환하면,

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_0 &= (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})^{-1} \mathbf{f}_0 \\ &= \mathbf{H}(\omega) \mathbf{f}_0 \quad \text{식 7} \end{aligned}$$

로 표현할 수 있으며  $\mathbf{H}(\omega)$ 를 주파수 응답 함수라고 하며 각 좌표계에 영향을 미치는 관계의 함수가

행렬로 표현된 것이다.

그림 7은 종방향 거동을 나타내는 주파수 응답함수를 표현한 것으로 세 개의 공진 주파수에서 거동이 증가함을 확인 할 수 있다.

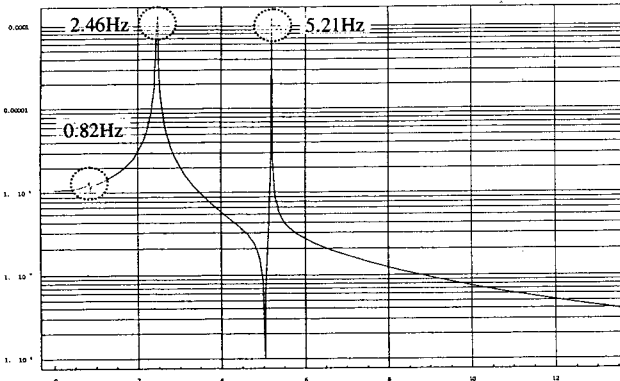


그림 7.  $H_{yy}$  (종방향 힘 성분에 의한 종방향 거동)

### 3.2 진동전달 해석 및 최적화

식 7로 유도된 주파수 응답함수를 통하여 하부 프레임에 전달되는 진동 전달력을 구할 수 있게 된다. 진동스프링의 지지 면에 작용하는 반작용  $f_7$ 는

$$\begin{aligned} f_7(\omega) &= Kq_0 \\ &= K \cdot H(\omega)f_0 \\ &= S \cdot f_0 \end{aligned} \quad \text{식 8}$$

로 표현 할 수 있으며 행렬  $S$ 는 가진력에 대해 하부 프레임에 전달되는 진동 전달력의 비율이 된다. 이를 최대한 작게 할 수 있는 설계 변수를 찾음으로써 전달력을 최소화 할 수 있다.

진동 스프링의 설치 위치를 설계변수로 하고 진동 전달 률 행렬  $S$ 의 종 방향성분을 최소화 하는 최적화 문제를 정의하고 비선형 최소자승 법을 사용하여 이를 만족 시키는 국부적인 해를 탐색하여 표 2와 같이 스프링 위치 값을 탐색하였다.

표 2. 최적 탐색된 스프링 위치

설계변수	시작 값	탐색 값(국부 최적값)
스프링 위치	$L_{1x} = -1.5899m$	$L_{1x} = -1.0899m$
	$L_{2x} = 0.34m$	$L_{2x} = 0.14m$

그림 8과 그림 9는 진동 전달 율 행렬  $S_{yy}$ 를 표현 한 것으로 3차 고유진동수가 커졌으나 작동구간에 근접하지는 않으면서 전반적으로 진동 전달 율 값이 감소하였음을 보여주고 있다.

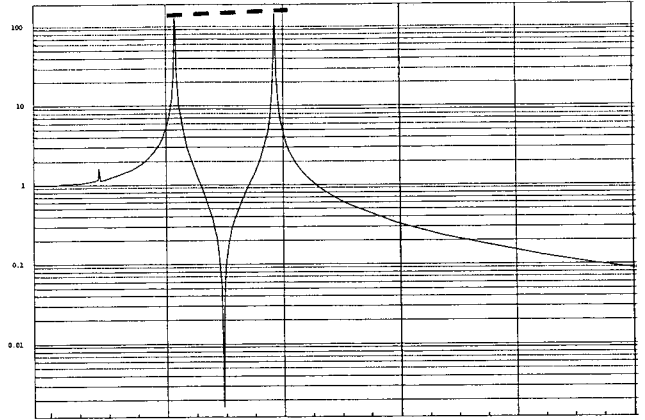


그림 8.  $S_{yy}$  Before Optimization

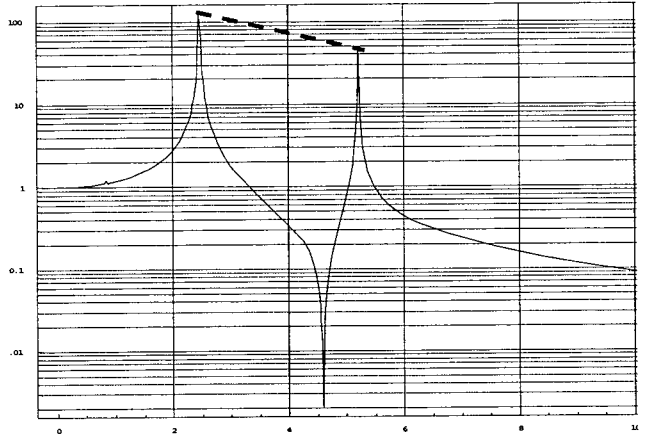


그림 9.  $S_{yy}$  After Optimization

### 4. 소음/진동 평가 (실험)

불규칙 진동과 소음의 평가에 널리 사용되는 RMS값을 10회 측정하여 평균한 값이다. 적용된 기술의 비교평가를 위해 세 가지 경우에 대하여 각각 소음과 진동을 측정하였다. 작동전의 측정값과 공기스프링을 장착하기 전과 후의 측정값을 비교하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 소음 및 진동 측정값

측정값		진동 (RMS, dB)	소음 (RMS, dB)
작동전		68	60
작동시	w/o Air-Spring	84.3 (증가량 16.3)	64.3 (증가량 4.3)
	Air-Spring	71.1 (증가량 3.1)	63.5 (증가량 3.5)

공기 스프링의 적용시 진동과 소음의 증가량이 목표치인 10dB이하로 진동과 소음의 감소에 효과적임을 나타내고 있으며 공기스프링의 적용이 소음보다는 진동의 절연에 보다 효과적임을 확인 할 수 있었다. 이는 공기스프링이 에너지 소산 효과를 포함하고 있기 때문으로 추정된다. 소음과 진동평가 결과 앞서 설정한 목표치를 만족함을 확인 할 수 있었다.

## 5. 결론

도심지 무인통신구 건설시 지상에 필수적으로 설치되며 소음과 진동을 유발하여 민원을 유발해 왔던 디샌더의 진동 저감을 위해 하부탱크의 유한요소 모델의 고유치 해석을 통해 적정한 보강 위치를 선정하여 작동 주파수 부근의 지지면 진동 전달량을 최소화 할 수 있었다. 그리고 설계변수에 따른 상부프레임의 거동을 수식화하고 최적설계를 통해 진동 전달률을 최소화 하는 설계변수를 결정하여 설계단계에서부터 진동을 저감할 수 있었으며 공기 스프링의 적용으로 작동이전 대비 진동 및 소음 증가량 10dB 이하를 달성 할 수 있었다.

도심지 사용환경에 최적화된 도심형 디샌더의 적용으로 소음과 진동으로 인한 민원을 최소화 하며 도심지에서 보다 쾌적하게 무인통신구 건설을 시행 할 수 있을 것이며 공사의 인허가시에 정숙성을 보장하는 방안으로 제안 할 수 있을 것으로 기대된다.

### [참고 문헌]

- [1] 김정근, “무인통신구 굴진성능 향상을 위한 후방지원 기술 개발”, 연구업무 보고서, 2004
- [2] Stein, “Microtunneling”, 1989
- [3] Ahmed A. Shabana, “Dynamics of multibody systems”, 1998
- [4] Willam T. Thosom, “Theory of vibration with applications 5/e”, 2001
- [5] L. Meirovitch, “Computational methods in structural dynamics”, 1980
- [6] Daryl L. Logan, “A first course in the finite element method, 2/e”, 1993