

# 지중 다중 관의 발파 진동 특성 분석을 위한 실험 및 수치해석적 연구

## A Study on Experimental and Numerical Analysis for Behavior of Multi-layerd Pipeline Subjected to Blasting Vibration

김 문 겸\* · 원 중 화\*\* · 노 기 석\*\*\* · 조 석 호\*\*\*\* · 김 경 민\*\*\*\*\*  
Kim, Moon Kyum · Won, Jong Hwa · Noh, Gi Seok · Cho, Seok Ho · Kim, Kyung Min

### 요 약

지중매설관은 경우에 따라 긴 수송거리를 보이기 때문에 부식 및 충격에 의한 파손 등에 대한 모니터링이 어려운 실정이다. 이러한 조건을 극복하기 위하여 복합관 및 다중관을 설치하고 있으나, 이에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다. 본 연구에서는 발파진동원에서 고정된 이격거리, 매설심도에서 배관 상단에 특정 진동속도를 발생시키는 발파 하중을 고려하여, 이격거리에 대한 수치해석을 수행하였으며 장약량에 따른 이격거리와 발파효율을 측정하였다. 실험값과 수치해석 값의 오차는 발파지점에서 가까울수록 크게 나타났으며 발파지점과 마주보는 방향이 반대방향보다 크게 나타났다.

**keywords** : 다중배관, 발파진동, dynamic analysis

## 1. 서론

지중 매설관은 수백~수천km의 수송 거리를 보이기 때문에 부식 및 충격에 의한 파손 등에 대한 모니터링이 어려우며 공사 현장과 인접한 경우 발파, 항타, 건설장비 등에 의해 발생하는 진동하중에 노출되어있다. 이러한 경우 예상치 못한 거동이 야기될 수 있으며, 효율적인 관리와 대처를 위해 이에 대한 연구는 반드시 필요한 실정이다. 본 연구는 제안된 수치해석모델을 실증 실험결과에 적용하여 사용성을 검증하고 발파 진동에 대한 거동을 분석했으며 한국지방난방공사의 보온 이중관의 발파에 대한 거동을 분석, 예측하고자 한다.

## 2. 수치해석을 위한 발파하중 및 구조물의 모형화

### 2.1 발파하중의 모형화

수치해석 기법을 사용하여 타당성 있는 결과를 얻기 위하여 발파 하중식은 아래와 같이 미국 National highway Institute에서 제안한 식을 적용하였다.

$$P_{det} = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times S_{qe} \times V_c^2}{1 + 0.8S_{qe}} \quad (1)$$

\* 정회원 · 연세대학교 토목공학과 교수 applymkk@yonsei.ac.kr

\*\* 학생회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정 examewe@yonsei.ac.kr

\*\*\* 연세대학교 토목공학과 석사과정 n\_giseok@yonsei.ac.kr

\*\*\*\* 학생회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정 chosh93@yonsei.ac.kr

\*\*\*\*\* 한국건설기술연구원 선임연구원 kyungmin@kict.re.kr

$$P_B = P_{det} \times \left(\frac{d_c}{d_h}\right)^3 \quad (2)$$

여기서,  $S_{qe}$ 는 폭약비중,  $V_e$ 는 폭속,  $P_{det}$ 는 장약 1kg당 폭발 압력,  $P_B$ 는 장약 1kg당 공벽면에 가해지는 압력,  $d_c$ 는 화약의 직경,  $d_h$ 는 장약공의 직경이다.

## 2.2 지중매설 배관 거동 예측을 위한 수치 해석 모델

본 연구에서는 보다 정확한 해석을 위하여 전 체계 동해석을 실시하며, 지반의 각 경계에는 점탄성 경계를 적용하여 반사파의 영향을 최소화하도록 했다. 해석은 고유 값 해석과 시간 이력 해석으로 구성된다.

### 2.2.1 유한요소모델 경계조건

고유 값 해석을 수행하기 위해서는 탄성경계를 사용하여 지점조건을 정의하며, 이를 위해 표면 스프링으로 탄성경계를 구성하고, 탄성계수는 지반반력계수에 따라 산정된다. 지반반력계수의 산정 식은 다음과 같다.

$$k_i = k_{i0} \left(\frac{B_i}{30}\right)^{-\frac{3}{4}} \quad (i = v, h) \quad (3)$$

여기서,  $k_i$ 는 지반반력계수( $kgf/cm^2$ ),  $k_{i0}$ 는 평판재하시험으로부터 구한 지반반력계수,  $B_i$ 는 환산 재하폭,  $E_0$ 는 변형계수,  $\alpha$ 는 지반반력계수의 추정에 이용하는 계수(1.0)이다.  $v, h$ 는 연직, 수평방향을 뜻한다.

### 2.2.2 감쇄경계

유한 요소 해석모델의 경계면에서 발생하는 반사파에 대한 영향을 최소화하기 위하여 스프링 대신 점성경계로 구속조건을 정의하고 이를 고려하기 위하여 아래의 식 (4)와 (5)를 이용하였다.

$$C_p = \rho A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \gamma A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\gamma g}} = c_p A \quad (4)$$

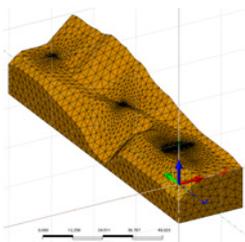
$$C_s = \rho A \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \gamma A \sqrt{\frac{G}{\gamma g}} = c_s A \quad (5)$$

여기서,  $C_p, C_s$ 는 P파, S파에 대한 점성계수,  $\lambda$ 는 체적탄성계수 ( $N/mm^2$ ),  $G$ 는 전단탄성계수 ( $N/mm^2$ ),  $E$ 는 탄성계수 ( $N/mm^2$ ),  $\nu$ 는 포아송비,  $A$ 는 유한요소 모델의 단면적 ( $m^2$ ) 이다.

## 3. 유한요소 해석 모델의 검증

### 3.1 지중 이중관 유한요소 해석 모델의 검증

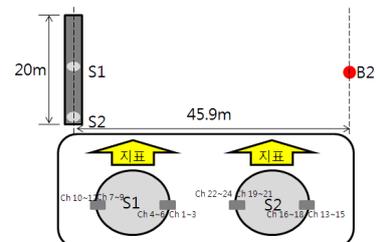
유한요소 모델을 현장 실험의 결과와 비교하여 검토하고자 한다. 실험 현장의 지형을 고려한 유한요소모델은 다음 그림 1과 같이 구성하였고 그림 1.(c)에 발파 위치 및 센서 위치를 나타내었다.



(a) 유한요소모델



(b) 배관 상단에서 발파공 방향 현장  
그림 1 수치해석모델 및 현장 경관



(c) 발파 시험 모식도

### 3.2 발파 하중 모델의 검증

B-2에 위치한 발파공에 대하여 검증작업을 수행하였으며, 장약량 40kg, 배관으로 부터 이격거리는 45.9m이다. 발파효율 82.8%일 때에 실험값은 2.913(ch1~3), 2.827(ch4~6), 2.852(ch7~9), 2.500(ch10~12)였으며 수치해석 값은 2.923cm/s(ch1~3), 2.922cm/s(ch4~6), 2.918cm/s(ch7~9), 2.918cm/s(ch10~12)로 나타났다. 실험값과 수치해석 값의 오차는 0.3%(ch1~3), 3.4%(ch4~6), 2.3%(ch7~9), 16.7%(ch10~12)이다. ch 7~9 및 ch 10~12에서 발생하는 오차는 실험현장의 다짐도에서 기인하는 것으로 판단된다.

표 4.1 지반 및 이중관 물성값

	E (tonf/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (tonf/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$\Phi$ (°)	C (tonf/m <sup>2</sup> )	t (m)
외관 (HDPE)	$8.16 \times 10^4$	0.94	0.4	-	-	0.0176
내관 (Steel)	$2.14 \times 10^7$	7.86	0.3	-	-	0.0095
보온재 (PUR)	$5.10 \times 10^4$	0.03	0.3	-	-	-
뒤채움재	$3.50 \times 10^3$	1.36	0.45	30.75	$0.1 \times 10^{-4}$	-
지반	$1.0 \times 10^3$	1.15	0.35	20.9	2.3	-

## 4. 분석결과

### 4.1 발파하중 모형화

식 (1)에 폭약비중( $S_{qe}$ ) 1.07과 폭속( $v_e$ ) 5700m/sec를 적용하여 장약 1kg당 폭발 압력( $P_{det}$ )을 산출(859,373N/mm<sup>2</sup>)하였다. 화약의 직경( $d_c$ ) 0.05m와 장약공의 직경( $d_h$ ) 0.06m를 식(2)에 적용하여 장약 1kg당 공벽면에 가해지는 압력( $P_B$ )을 산출(391,157N/mm<sup>2</sup>)하였다.

### 4.2 발파하중에 대한 지중 배관 진동 특성

이전에 수행한 현장 실험의 수치해석 결과 검증을 통하여 해당 지반의 발파 효율을 유추하였으며 Parametric study를 수행하여 다양한 변수에 대한 지중 난방관의 거동을 검토하고자 한다. 발파하중 재하점(8m심도) 직 상단으로부터 표준심도, 이격거리 15m에 위치한 배관을 기준으로, 외관 상단에 0.02m/sec를 발생하게 하는 발파하중을 선정하여 모든 경우에 대해서 해석을 수행하도록 한다.

표 4.2 발파하중을 고려한 지중 배관 해석 경우 요약

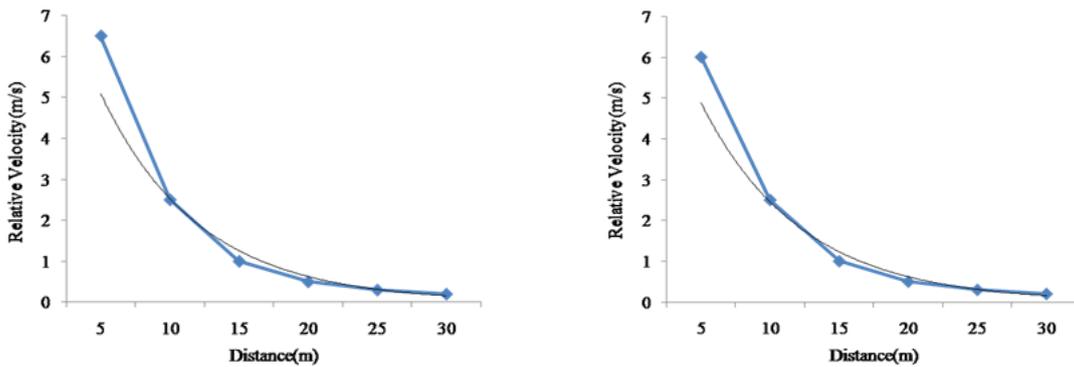
이격거리(m)	5	10	15	20	25	30
배관매설심도 (m)	0.6 (외관 상단기준); 1.8 (굴착바닥면기준)					
발파하중	장약량 4kg, 발파효율 83%					
연결관 및 병렬관	X	X	O	X	X	X

### 4.3 매설심도에 따른 지중 배관의 진동특성

심도 0.6m의 경우(이격거리 15m, 진동속도 0.0204m/s조건) 외관과 내관의 진동속도 차이는 미미하게 나타났다. 진행 방향 속도  $v_x$ 가 가장 크게 나타났고, 다음으로 수직 속도 성분  $v_z$ , 진행 방향의 수직 방향 성분  $v_y$  순서로 나타났다. 진동속도의 최대값은 이격거리가 멀어질수록 작아지는 양상을 보였다.

#### 4.4 매설심도에 따른 지중 배관의 상호작용

발파 이격거리가 커질수록 진동속도의 크기는 점점 작아진다. 매설심도가 0.6m일 경우 진동속도의 범위는  $5.8 \times 10^{-3} m/s$ 에서  $1.429 \times 10^{-1} m/s$ 로 나타났다. 외관과 내관의 진동속도 차이는 이격거리가 가장 가까운 5m지점에서 가장 많은 차이를 보였으며 거리가 멀어질수록 그 차이는 미미하게 나타났다.



(a) 외관 (b) 내관  
그림 2 이격거리에 따른 외관과 내관의 상단부 상대속도 ( $m/s$ )

## 5. 결론

본 연구에서는 발파진동원에서 15m 이격거리, 0.6m의 매설심도에서 배관 상단에 진동속도  $0.02m/sec$ 를 발생시키는 발파 하중을 고려하여, 총 6case의 이격거리(5, 10, 15, 20, 25, 30m)에 대한 수치해석을 수행하였다. 장약량은 40kg, 이격거리는 45.9%이며 발파효율은 82.8%였다. 실험값은 2.03(ch1~3), 2.015(ch4~6), 1.821(ch7~9), 1.772(ch10~12)였으며 수치해석 값은  $2.030cm/s$ (ch1~3),  $2.030cm/s$ (ch4~6),  $2.017cm/s$ (ch7~9),  $2.019cm/s$ (ch10~12)로 나타났다. 실험값과 수치해석 값의 오차는 0.3%(ch1~3), 3.4%(ch4~6), 2.3%(ch7~9), 16.7%(ch10~12)였다. 실험결과 발파지점에서 가까울수록 진동속도가 크게 나타났으며 마주보는 방향이 반대방향보다 진동속도가 크게 나타났다. 진동속도는 발파지점과 가장 가까운 5m 지점에서 가장 크게 나타났으며 거리가 멀어짐에 따라 파의 진행방향 성분인  $x$ 방향 성분이  $z$ 방향 성분보다 커지는 경향을 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 2009년 한국건설기술연구원 연구비 지원 사업으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 양형식 (1995) "발파진동학", 구미서관, pp. 105-113  
 유한규, 김문걸, 김상민, 이종성 (2009) "수치해석기법을 이용한 이중보온관 진동 평가기법 연구", 한양대학교 산학협력단 최종보고서  
 최성웅, 박의섭, 선우춘, 정소걸 (2004) "실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구", 한국암반공학논문집, 제14권, 제2호, pp. 108-120