

## 수치해석을 이용한 이중보온관 발파진동 관리기준에 관한 연구

최봉혁\* · 조진우\*\* · 김진만\*\*\* · 유한규\*\*\*\*

Choi, Bong-Hyuck\*, Cho, Jin-Woo\*\*, Kim, Jin-Man\*\*\*, Yoo, Han-Kyu\*\*\*\*

### A Study on Blasting Vibration Control Criteria for Pre-insulated Pipe through the Numerical Analysis

#### ABSTRACT

In this paper, numerical analysis with varying distance and burial depth was performed to recommend the blasting vibration control standard for pre-insulated pipes. The blasting load model applied in the numerical analysis was verified to the comparison with the results of the field tests. It was determined from the results of the numerical analysis that the effective stress either exceeds or approaches the allowable stress of the inner steel pipe for vibration velocity greater than 4.0cm/sec while stability is obtained for vibration velocity below 4.0cm/sec. Therefore, it was determined that the blasting vibration control criteria for pre-insulated pipes must not exceed 4.0cm/sec.

**Key words :** Pre-insulated pipe, Blast, Vibration, Control criteria

#### 초 록

본 논문에서는 이중보온관의 발파진동 관리기준 제시를 위하여 이격거리와 매설심도를 변수로하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 적용 발파 하중 모델은 현장시험 결과와의 비교를 통하여 검증하였다. 수치해석 결과, 이중보온관은 진동속도 4.0cm/sec 이상에서 발생 유효응력이 내관의 허용응력을 초과하거나 근접하는 것으로 나타났으며, 4.0cm/sec 이하에서 안정성이 확보되는 것으로 평가되었다. 따라서, 이중보온관의 진동관리기준은 4.0cm/sec를 초과하지 않도록 관리하여야 할 것으로 판단된다.

**검색어 :** 이중보온관, 발파, 진동, 관리기준

## 1. 서론

라이프라인 구조물은 상·하수도관, 가스관, 송유관, 전기·통신구 등 인간 생활에 필요한 각종 서비스와 자원을 제공해 주는 생존 유지시설물로서, 대부분 지중에 매설된 형태로 존재한다. 이러한 라이프라인 구조물이 지반 액상화, 단층운동, 산사태 등으로 인하여 큰 변형 및 파괴가 될 경우 전체 시스템의 기능 상실로 인하여 막대한 경제·사회적인 손실을 가져오게 된다.

특히, 1964년 Niigata 지진과 1994년 Northridge 지진은 라이프라인 구조물 붕괴에 의한 피해의 심각성을 보여주는 좋은 사례라 할 수 있다. 이에 선진국에서는 라이프라인의 안정성에 대한 관심을 갖고 설계·시공·유지관리는 물론 사후 복구절차를 이미 마련하고

\* 정회원 · 한양대학교 대학원 박사과정 (bhchoi@kict.re.kr)

\*\* 교신저자 · 한국건설기술연구원, Geo-인프라연구실 선임연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Construction Technology · jinucho@kict.re.kr)

\*\*\* 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 선임연구원 (jmkim@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수 (hankyu@hanyang.ac.kr)

Received August 24 2012, Revised October 23 2012, Accepted July 10 2013

있으며, 국내의 경우 최근 이에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다.

우리나라 도심지의 경우 지상 건설공사는 이미 포화되어 지하차도, 지하철 등 깊은 굴착에 의한 건설이 주를 이루고 있다. 이러한 깊은 굴착에 의한 공사는 암반층이 나타날 경우 발파를 수행하게 되며, 이때 발생하는 진동은 주변의 라이프라인에 심각한 영향을 미친다. 그 외에도 건설공사 시 발생하는 장비 주행에 의한 진동, 말뚝 시공 시 발생하는 말뚝 향타 진동 등 다양한 진동원에 의한 라이프라인의 손상이 발생할 수 있다.

매설관 관련 진동관리기준은 국내의 경우 한국가스공사에서 진동속도만을 기준으로 Table 1과 같이 제시하고 있는 실정이며, 국외의 경우 류창하(2005) 및 서울산업대학교(2008)에 따르면 주파수대역을 고려하여 제시된 스위스의 Norm 640 312a가 있다. Table 2는 스위스의 Norm 640 312a 중 매설관과 관련된 지하건축물 부분만을 정리한 것으로, 민감도등급, 건축물종류, 지반조건, 발생빈도 등을 고려하여 최대 진동속도 벡터를 주파수대역에 따라 제시하고 있다.

한편, 지중매설 이중보온관은 지역난방을 위한 라이프라인으로 내부에 110℃ 내외의 뜨거운 물이 10kg/cm<sup>2</sup> 내외의 압력으로 흐르기 때문에 온도 및 압력에 의한 영향을 추가로 받고 있으며, 내관(Steel pipe), 외관(HDPE), 보온재(PUR) 등으로 구성된 복합관으로 콘크리트관이나 가스관 등 기존 강성관과 다른 역학적 특성을 갖는 구조물로서 외부 진동에 대한 연구 및 관리기준의 정립이 요구되는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 수치해석을 통하여 진동원에 따른 이중보온관의 거동 특성을 평가하고, 운영 안정성 확보 및 사고 방지를 위한 이중보온관의 합리적인 진동관리기준을 제시하고자 한다.

## 2. 수치해석을 이용한 이중보온관 진동영향 평가

### 2.1 수치해석 개요

수치해석을 이용한 이중보온관 진동영향 평가는 지반과 이중보온관을 동시에 모형화하여 전체계 동해석(Full Dynamic Analysis)

**Table 1.** Limitation standards and countermeasures on vibration in Korea Gas Corporation

Classification		Safe range	Countermeasures range	Prohibition range
Maximum vibration velocity (kine)	Exposed Gas pipe	Less than 0.4	0.4 - 2.0	more than 2.0
	Buried Gas pipe	Less than 1.0	1.0 - 4.0	more than 4.0
Countermeasures		- Countermeasure of vibration	- Countermeasure of vibration - Precision controlled blasting	- Prohibition of blasting - Non-Vibration method

**Table 2.** Underground construction section of Swiss Norm 640 312a (Ryu Chang-Ha (2005) and Seoul National Univ of Technology (2008) requote)

Sensitivity ranges	Underground construction	Frequency range	Maximum value of the velocity vector (VR) mm/s Determining frequency (Hz)		
			< 30*	30-60	> 60**
( I ) a little sensitive	- Bridges in steel or reinforced concrete - Steel, concrete or compact brickwork supporting structures - Lugs, tunnels, caverns, shafts in solid rock or well-reinforced soil	Occasionally Frequently Permanently	Reference values: Up to 3 times the values corresponding to sensitivity class (3)		
( II ) somewhat sensitive	- Underground caverns, tunnels, shafts, piping - Subterranean parking areas - Underground piping (gas, water, sewage system, cable) - Dry stone walls	Occasionally Frequently Permanently	Reference values: Up to twice the values corresponding to sensitivity class (3)		
( III ) averagely sensitive	- Reservoirs - Cast-iron piping - Caverns, intermediate ceilings and carriageway ceilings in tunnels - Sensitive cables	Occasionally Frequently Permanently	15 6 3	20 8 4	30 12 6
( IV ) particularly sensitive	- Old lead cables - Old cast-iron piping	Occasionally Frequently Permanently	Reference values: Between the reference values of class (3) and the half of those values		

\* For less than 8Hz, Frequency apply minimum standard value.

\*\* For more than 150Hz, Frequency is able to apply in is greater than standard value.

을 실시하였으며, 지반의 각 경계에는 점탄성 경계를 적용하여 반사파에 의한 영향을 최소화하도록 하였다.

이때, 발파하중은 발파진동 평가관련 수치해석에서 널리 사용되고 있는 미국 National highway Institute(1991)에서 제안한 식 (1) 및 (2)를 이용하여 수치모델화 하였다. 수치모델화된 발파하중은 현장시험에서 사용된 폭약의 특성을 고려하여 폭약 비중( $SG_c$ ) 1.07과 폭속( $V_c$ ) 18,700ft/s를 식 (1)에 적용하여 산출한 장약 1kg당 폭발 압력( $P_{det}$ , 84.268kbar= 859,299tonf/m<sup>2</sup>)을 이용하였다.

또한, 장약 1kg당 공벽면에 가해지는 압력( $P_B$ , 391,124tonf/m<sup>2</sup>)은 화약의 직경( $d_c$ ) 50mm와 장약공의 직경( $d_h$ ) 65mm를 식 (2)에 적용하여 산출하였다. 이때, 기준 발파 장약량은 이격거리 15m인 이중보온관의 상단에 진동 속도 2cm/sec를 발생시키는 4kg으로, 실제 발파해석에 사용된 폭발압력은 장약량 1kg당 압력의 4배인 1,564,496 tonf/m<sup>2</sup>를 공벽면에 적용하였다.

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

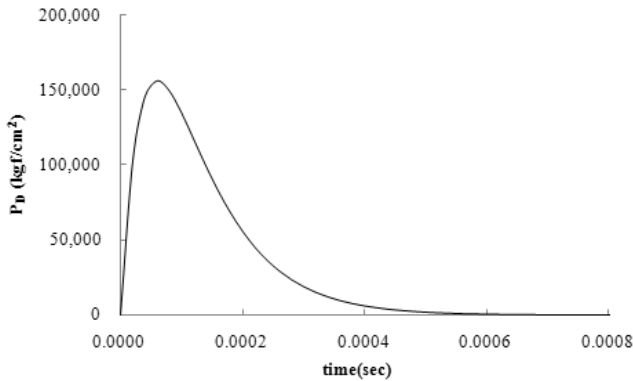


Fig. 1. The blasting load application model (Charge weight 4kg)

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

한편, 시간변화에 따른 동압력은 하중상수(B, 16,338) 및 발파효율(0.83)을 적용하여 전상수 등(2007)의 연구결과에 따라, Starfield and Pugliese(1968)가 제안한 wave-shape 함수를 이용하여 제시된 식 (3)을 사용하여 산출하였으며, 장약량 4kg 발파 시 공벽면에 가해지는 시간당 하중 모형은 Fig. 1과 같다.

$$P_D(t) = 4P_B \left( \exp\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2}Bt) \right) \quad (3)$$

해석단면은 Fig. 2에서 보듯이 깊이 20m, 관과 평행한 길이 120m, 발파원과 관 사이 거리 5~30m 크기의 지반 모형을 사용하여 해석하였으며, 발파 하중은 지름 65mm인 공벽면에 방사형으로 가해주었으며 8m 깊이의 절반인 공벽저면에서부터 4m 깊이까지 적용하였다. 이때, 지반의 경계면은 점탄성 경계를 사용하였으며, 해석에 이용된 이중보온관 및 지반 물성치는 Table 3과 같다.

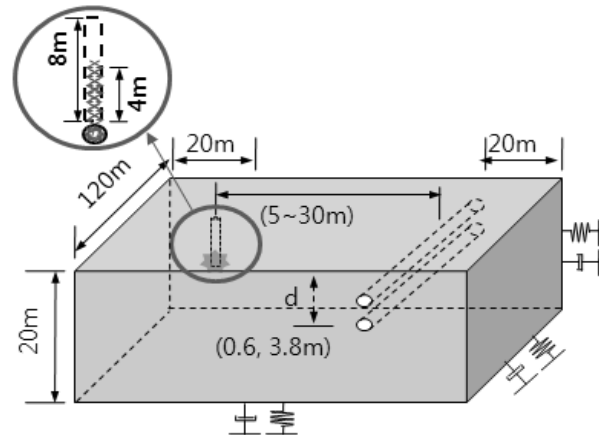


Fig. 2. The blasting load application numerical analysis model

Table 3. Numerical analysis using Pre-insulated Pipe and Soil properties

Classification	Properties	Elastic Modulus (E, tonf/m <sup>2</sup> )	Unit Weight <sup>1)</sup> (γ, tonf/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio (ν)	Internal friction angle <sup>1)</sup> (Φ, °)	Cohesion <sup>1)</sup> (c, tonf/m <sup>2</sup> )
Casing(HDPE) <sup>2)</sup>		8.16 × 10 <sup>4</sup>	0.94	0.4	-	-
Service pipe(Steel) <sup>2)</sup>		2.14 × 10 <sup>7</sup>	7.86	0.3	-	-
Insulation (PUR)		5.10 × 10 <sup>4</sup>	0.03	0.3	-	-
Backfill material		3.50 × 10 <sup>3</sup>	1.75	0.40	30.75	2.3
Ground or Foundation		1.0 × 10 <sup>3</sup>	1.55	0.28	27.5	4.7

<sup>1)</sup> Backfill and Ground properties(γ, Φ, c) were obtained from lab-test.

<sup>2)</sup> Thickness of casing and service pipe are applied respectively 17.6mm and 9.5mm.

2.2 수치해석 결과

2.2.1 수치해석 모델검증

수치해석 모델검증은 김진만 등(2012)에 의해 발표된 경기도 양주에 위치한 골재 채취용 석산에서 수행된 현장시험 결과 중 이중보온관에서 계측된 진동속도가 상대적으로 크게 발생한 B-1 및 B-2에서 수행된 발파시험 결과를 이용하여 평가를 수행하였다. 이때, B-1 및 B-2 발파시험은 각각 장약량 340, 40kg, 이중보온관 중심부로부터 이격거리는 99.8, 45.9m에서 수행되었으며, 수치해석 단면의 경우 현장 지형을 모델링하였으며, 물성치는 Table 3의 값을 사용하였다(Fig. 3 참조).

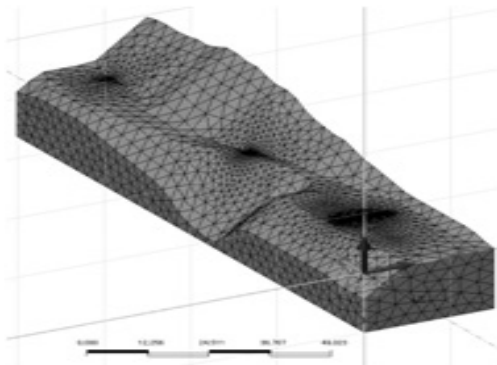
수치해석모델은 Table 4에서 보듯이 발파원과 가장 인접한 이중보온관 좌측 외부에서 수치해석에 의한 진동속도 최대 실 벡터합과 계측결과의 오차가 0.41~1.70% 정도로 작게 발생하고, 이후 오차가 증가하여 이중보온관 우측 외부의 경우 11.59~23.97% 정도가 되는 것으로 평가되어 이중보온관 좌측 외부만을 고려할 경우 현장 결과와 매우 일치하는 결과를 보이며, 복잡한 현장 조건을 고려할 경우 전체적으로 제안된 수치해석 모델은 합리적인 것으로 판단된다.

이때, B-1과 B-2는 발파 위치가 각각 압반과 원지반(매립토)에서 발파를 수행하였기 때문에 동일한 발파 효율을 적용하지 않고, 수치해석 시 다양한 발파효율에 따른 영향을 평가하여 현장시험 결과와 가장 유사한 진동특성을 보이는 발파 효율(B-1 27.8%, B-2 82.8%(약 83%))을 적용하였다. 따라서, 이후 본 연구에서 수행 예정인 수치해석을 통한 이중보온관 동적거동 평가는 현장시험 결과 분석을 통해 얻어진 원지반(매립토)에서의 발파효율, 83%를 기준으로 평가를 수행하여야 할 것으로 판단된다.

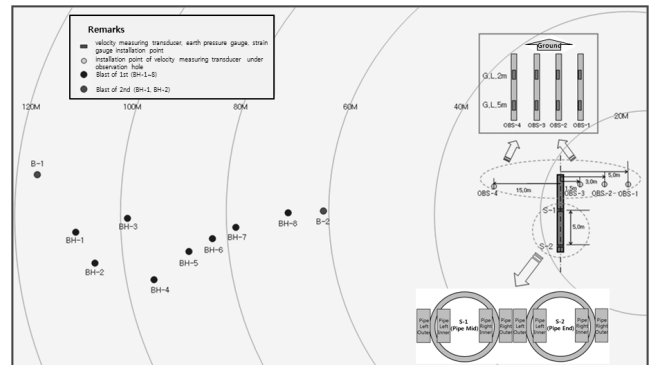
2.2.2 매설심도 별 지중매설 이중보온관 발파진동 특성

매설심도 별 발파진동 특성은 동일한 발파진동에 대한 매설심도의 영향평가를 위하여, 진동원으로부터 이격거리 15m 위치의 이중보온관 최소매설심도인 0.6m와 3.8m의 이중보온관에 발생하는 발파진동특성을 비교·분석하였다.

발파에 의한 매설심도 별 지중매설 이중보온관 진동특성은 Table 5에서 보듯이 이격거리 15m에서 매설심도 0.6m의 진동속도가 내·외관 모두 매설심도 3.8m에 비해 큰 것으로 나타났으며, 매설심도 변화에 따른 진동속도 감소비는 매설심도 3.8m에서 매설



(a) Numerical analysis section



(b) Field blast test diagram(Kim Jin-Man, 2012)

Fig. 3. Numerical analysis model and Field view

Table 4. The comparison Numerical analysis results and Field test results for the blasting vibration

Sensor position		B-1 Maximum vibration velocity real vector sum (cm/sec)			B-2 Maximum vibration velocity real vector sum (cm/sec)		
		Field test results	Numerical analysis results	Error (%)	Field test results	Numerical analysis results	Error (%)
S-1 (Mid)	Left outside	2.913	2.901	0.41	2.03	2.019	0.54
	Left inside	2.827	2.879	1.87	2.015	1.996	0.95
	Right inside	2.852	2.881	1.03	1.821	1.996	9.63
	Right outside	2.500	2.898	15.95	1.772	2.016	13.76
S-2 (End)	Left outside	2.851	2.829	0.76	2.05	2.015	1.70
	Left inside	2.898	2.816	2.81	1.919	1.959	2.09
	Right inside	2.601	2.816	8.28	1.896	1.956	3.17
	Right outside	2.536	2.830	11.59	1.631	2.022	23.97

**Table 5.** The location upper section vibration velocity due to blast by burial depth

Assessment location Burial depth	Casing (HDPE)	Service pipe (Steel)
0.6m		
3.8m		
Ratio of reduction <sup>1)</sup>	25.70%	25.84%

<sup>1)</sup> Ratio of reduction = (V<sub>0.6m</sub> - V<sub>3.8m</sub>) ÷ V<sub>0.6m</sub>

심도 0.6m에 비해 외관 25.70%, 내관 25.84% 정도 감소하는 것으로 평가되었다.

이때, 성분별 진동속도벡터 크기는 파의 진행방향 속도인 V<sub>x</sub>가 가장 컸으며, 다음으로 수직 속도 성분인 V<sub>z</sub>, 수평방향 성분 중 진행방향과 수직방향인 V<sub>y</sub> 순으로 평가되었다.

### 2.2.3 발파진동에 따른 이중보온관 안정성평가

이중보온관은 내관/보온재/외관의 삼층구조로 내압 및 외압이 작용할 경우 각 재료의 역학적 특성에 따라 각각의 접촉면에서

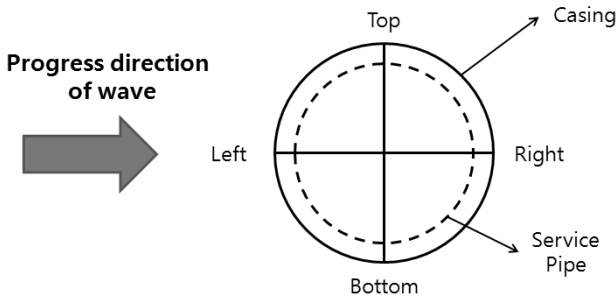
발생하는 경계면 압력이 상이하게 발생한다. 본 논문에서는 발파진동에 대한 이중보온관의 안정성평가를 위한 역학적 거동특성 평가를 진동속도(V, cm/sec)와 유효응력(von-Mises stress, kgf/cm<sup>2</sup>)을 이용하여 검토하였다.

이중보온관의 내·외관에 대한 역학적 거동특성 평가는 Fig. 4에서 보듯이 발파하중이 이중보온관의 좌측부에 위치하며, 평가위치의 경우 이중보온관 중앙부의 내관과 외관에서 각각 상·하·좌·우, 각 4지점에서 평가하였다.

이때, 이중보온관의 유효응력은 균일한 재료의 파괴에 관여하는 응력들을 하나의 파괴 모델로 검토할 수 있도록 고안된 합성 응력으로 다음 식 (4)를 이용하여 산출할 수 있다.

$$\sigma_e = \sqrt{1/2\{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{12})^2 + (\sigma_{12} - \sigma_{11})^2\}} \quad (4)$$

- 여기서,  $\sigma_{11}$  : hoop stress(원주방향 응력)
- $\sigma_{22}$  : axial stress(축방향 응력)
- $\sigma_{12}$  : shear stress(전단 응력)



**Fig. 4.** Pre-insulated inner & outer pipe behavior assessment location by the blasting load

(1) 매설심도 별 지중매설 이중보온관 내·외관의 진동속도 특성 평가위치에 따른 진동속도 특성은 Table 6에서 보듯이 매설심도

**Table 6.** Vibration velocity characteristics due to blast load by location(cm/sec)

Classification	Assessment location Distance	Top		Bottom		Left		Right	
		Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner
Burial depth 0.6m	5m	9.57	9.49	10.08	10.28	9.82	9.88	9.94	9.79
	10m	4.14	4.09	3.81	3.86	4.13	4.10	3.82	3.84
	15m	1.79	1.78	1.65	1.66	1.76	1.76	1.68	1.65
	20m	0.94	0.93	0.89	0.90	0.93	0.93	0.90	0.90
	25m	0.54	0.54	0.53	0.53	0.54	0.54	0.53	0.53
	30m	0.34	0.34	0.33	0.33	0.34	0.34	0.33	0.33
Burial depth 3.8m	5m	27.78	27.29	28.30	29.03	29.87	30.07	26.31	26.46
	10m	4.11	4.08	4.13	4.15	4.24	4.25	3.98	3.98
	15m	1.33	1.32	1.28	1.29	1.33	1.33	1.27	1.27
	20m	0.68	0.67	0.64	0.64	0.67	0.67	0.65	0.65
	25m	0.43	0.43	0.41	0.41	0.42	0.42	0.41	0.41
	30m	0.28	0.28	0.27	0.27	0.28	0.28	0.27	0.27

0.6m의 경우 내·외관 모두 전체적으로 지표면과 인접하여 있기 때문에 지표면 부근을 따라 전달되는 탄성파의 영향에 의해 상부 및 좌측에서 크고 하부 및 우측의 경우 상대적으로 작은 것으로 나타났으나, 이격거리 5m의 경우 하부 및 좌측에서 더 큰 것으로 나타났다.

이와 같은 경향이 나타나는 이유는 이격거리 5m의 경우 발파원으로 부터의 짧은 이격거리 특성에 의해 직접적인 발파의 영향을 받아 하부에서의 진동속도가 크게 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 매설심도 3.8m의 진동속도는 내·외관 전체적으로 좌측에서 가장 크고 그 외의 지점의 경우 거의 유사한 것으로 평가되었으나, 이격거리 5m의 경우 발파의 직접적인 영향을 받기 때문에 하부의 진동속도가 상대적으로 크게 발생하였다.

한편, 매설심도에 따른 진동속도는 내·외관 모두 이격거리 5m 및 10m의 경우 매설심도 0.6m에 비해 매설심도 3.8m의 값이 크며, 이격거리 15m 이상의 경우 매설심도 0.6m가 다소 큰 것으로 평가되었다. 이와 같은 매설심도에 따른 진동속도의 차이는 이격거리 5m 및 10m의 경우 매설심도 3.8m에서 발파의 영향을 보다 직접적으로 받기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 발파진동에 대한 이중보온관 단일관 내관 및 외관의 정동적 거동 특성

이중보온관의 안전성 평가는 전술한 바와같이 발파하중을 고려한 동적 수치해석 결과와 일반적 운영 조건을 반영한 정해석 결과의 원주방향응력, 축방향응력, 전단응력의 선형 중첩을 통하여 산정된 유효응력(von Mises Stress)을 이용하여 수행하였다.

이중보온관의 정해석은 매설 심도에 따른 자중, 내부 유체의 온도(설계온도 120 °) 및 압력(설계압력 16kgf/cm<sup>2</sup>)을 고려하여 수행하였다. 이때, 이중보온관에 발생하는 열응력에 의한 영향평가는 강관의 열팽창계수 1.2×10<sup>-5</sup>/°C, 보온재(PUR)의 경우 1.5×10<sup>-4</sup>/°C, 그리고 외관(HDPE)의 경우 1.1×10<sup>-4</sup>/°C의 값을 사용하였으며, 작용 열응력은 한국지역난방공사(2006)의 열배관 설치기준에 따라 예열 온도 65°C를 고려하여 설계 온도인 120°C까지 55°C의 변화량을 가하였다.

정적하중을 고려한 지중매설 이중보온관 발생 유효응력은 Table 7에서 보듯이 외관에서는 일반적으로 5.72~7.22kgf/cm<sup>2</sup> 정도의 작은 응력이 발생하였으며, 내관에서는 온도 하중과 내압의 영향으로 사용상태에서 1,585.29~1,628.47kgf/cm<sup>2</sup> 내외의 응력을 보이는 것으로 평가되었다.

이때, 정하중에 의한 최대 유효응력은 매설 심도 3.8m에서 약 1,628.47kgf/cm<sup>2</sup>이 발생하며 이는 안전율 1.2를 고려한 SPW 400 강의 허용응력 1,682kgf/cm<sup>2</sup>의 96.8%에 해당하는 값으로 평가되어 정하중 상태 이중보온관의 안정성은 확보되어 있는 것으로 판단된다.

동해석과 정해석 결과를 함께 고려하여 산정된 총 유효응력은 이격 거리 및 매설 심도에 따라 발파하중에 의하여 발생하는 내외관의 유효응력을 보여주는 Table 8에서 보듯이 전체적으로 하부에서 크게 발생하고, 이격거리가 증가함에 따라 감소하는 것으로 평가되었다.

이때, 총 유효응력은 이격거리 5m에서 안전율 1.2를 고려한 SPW 400 강의 허용응력 1,682kgf/cm<sup>2</sup>을 초과하는 유효응력이 발생하고, 이격거리 10m(4.0cm/sec 이상, Table 6 참조)의 경우 허용응력에 거의 근접하는 유효응력이 발생하는 것으로 평가되었다.

**Table 7.** Buried pre-insulated pipe generated von-mises stress by the static load

Classification		Location		Top		Bottom		Left		Right	
		Outer pipe	Inner pipe	Outer pipe	Inner pipe	Outer pipe	Inner pipe	Outer pipe	Inner pipe		
Bank load (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.6 m	0.17	3.28	0.29	3.80	0.13	15.17	0.13	15.17		
	3.8 m	0.98	20.61	1.07	22.36	0.99	66.63	0.99	66.63		
Temperature (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.6 m	4.95	1402.71	4.95	1402.87	5.02	1403.37	5.04	1403.37		
	3.8 m										
Internal pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.6 m	1.64	578.93	1.64	579.19	1.67	580.07	1.67	580.07		
	3.8 m										
Total <sup>1)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.6 m	6.57	1617.32	6.47	1618.17	6.68	1612.00	6.68	1612.00		
	3.8 m	5.72	1626.98	5.68	1628.47	7.22	1585.29	7.22	1585.29		

<sup>1)</sup>Total stress : von-mises stress obtained by linear superposition of hoop-stress, axial-stress, shear-stress on Pre-insulated pipe caused by static loads

**Table 8.** Buried pre-insulated pipe generated von mises stress that considered the static load & the dynamic load

Burial depth 0.6m		Top		Bottom		Left		Right	
		Casing	Service pipe	Casing	Service pipe	Casing	Service pipe	Casing	Service pipe
Total stress <sup>1)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	D=5m	6.89	<b>1706.15</b>	7.31	<b>1817.53</b>	7.16	1640.44	6.91	1667.26
	D=10m	6.77	1665.50	6.63	1660.11	6.78	1631.88	6.84	1659.73
	D=15m	6.67	1636.03	6.55	1631.86	6.76	1623.83	7.50	1636.36
	D=20m	6.63	1626.62	6.52	1627.07	6.73	1619.17	6.73	1625.51
	D=25m	6.61	1622.92	6.50	1624.42	6.71	1616.84	6.71	1620.13
	D=30m	6.59	1621.05	6.49	1622.49	6.70	1615.50	6.70	1617.16
Burial depth 3.8m		Top		Bottom		Left		Right	
		Casing	Service pipe	Casing	Service pipe	Casing	Service pipe	Casing	Service pipe
Total stress <sup>1)</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	D=5m	7.48	<b>1823.56</b>	7.21	<b>1786.22</b>	7.65	1652.24	8.24	<b>1965.89</b>
	D=10m	6.03	<b>1673.08</b>	5.95	1664.08	7.39	1606.33	7.41	1651.31
	D=15m	5.82	1647.19	5.77	1642.54	7.29	1598.72	7.30	1609.47
	D=20m	5.76	1638.39	5.73	1637.58	7.26	1594.61	7.26	1598.55
	D=25m	5.74	1634.40	5.71	1635.18	7.25	1591.81	7.25	1585.32
	D=30m	5.73	1631.89	5.70	1633.41	7.24	1589.90	7.24	1591.24

<sup>1)</sup>Total stress : von-mises stress obtained by linear superposition of hoop-stress, axial-stress, shear-stress on Pre-insulated pipe obtained from static and dynamic analysis

따라서, 발파진동에 대한 허용기준은 이격거리 10m 이상의 경우 안정성이 확보되는 본 해석결과 및 한국가스공사의 진동관리 기준(Table 1 참조)을 고려하여 4.0cm/s를 관리기준으로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다(Table 6 참조).

### 3. 결론

본 논문에서는 이중보온관의 진동관리기준 제시를 위하여 수행된 지중에 매설된 이중보온관의 발파하중에 대한 동적 거동을 분석하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- (1) 발파에 의한 매설심도 별 지중매설 이중보온관 진동특성은 이격거리 15m에서 매설심도 0.6m의 진동속도가 내외관 모두 매설심도 3.8m에 비해 큰 것으로 나타났으며, 매설심도 변화(3.2m)에 따른 진동속도 감소비는 외관 25.70%, 내관 25.84%로 평가되었다. 이때, 성분별 진동속도벡터는 파의 진행방향 속도인 Vx가 가장 컸으며 다음으로 수직 속도 성분인 Vz가 컸고 수평방향 성분 중 진행방향과 수직방향인 Vy가 가장 작은 것으로 평가되었다.
- (2) 진동속도 특성은 발파원으로 부터의 이격거리가 멀어질수록 감소하는 것으로 평가되었으며, 매설심도에 따른 진동속도는

내외관 모두 이격거리 5m에서 매설심도 0.6m에 비해 매설심도 3.8m가 발파의 영향을 보다 직접적으로 받기 때문에 크게 나타났으며, 이격거리 5m 이상의 경우 매설심도 0.6m에서 진동속도가 다소 큰 것으로 평가되었다.

- (3) 유효응력(von Mises Stress)은 정하중에 의한 최대 유효응력의 경우 매설 심도 3.8m에서 약  $1,628.47 \text{ kgf/cm}^2$  정도로 안전율 1.2를 고려한 SPW 400 강의 허용응력  $1,682 \text{ kgf/cm}^2$ 의 96.8%에 해당하는 것으로 평가되었으며, 동해석 결과를 포함한 평가 결과 이격거리 5m에서 안전율 1.2를 고려한 SPW 400 강의 허용응력  $1,682 \text{ kgf/cm}^2$ 을 초과하는 유효응력이 발생하고, 이격거리 10m 이내(진동속도 4.0cm/sec 이상)의 경우 허용응력에 근접하거나 초과하는 유효응력이 발생하는 것으로 평가되었다.
- (4) 발파진동에 대한 허용기준은 동하중과 정하중을 모두 고려하여 수행된 안정성 평가 결과 및 한국가스공사의 매설가스관 진동관리기준을 고려하여 4.0cm/s를 관리기준으로 하여 현장에서 발파 수행 시 발생하지 않도록 관리하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## References

- National Research Institute of Cultural Heritage (2008). *Cultural heritage monitoring technology development*, Research Report, Seoul National Univ of Technology (in Korean).
- Kim, J. M., Choi, B. H., Cho, J. W. and Cho, W. B. (2012). Pre-insulated pipe behavior characteristics by the blast vibration, *Proceedings of The Korean Geotechnical Society Spring Conference*, Korean Geotechnical Society, p. 539 (in Korean).
- Ryu, C. H. (2005). "Review of national standards for allowable limit of blast vibration on structures, explosives and blasting." *Explosives and Blasting Proceedings*, Korea Society for Explosive and Blasting Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 1-10 (in Korean).
- Jeon, S. S., Kim, D. S. and Jang, Y. W. (2007). "Stability assessment of concrete lining and rock bolts of the adjacent tunnel by blast-induced vibration." *Proceedings of The Korean Geotechnical Society*, Vol. 13, No. 10, pp. 33-45 (in Korean).
- Korea District Heating Corporation (2006). *Heat piping construction work guidelines*, Korea District Heating Corporation, Seoul, p. 249 (in Korean).
- National Highway Institute (1991). *Rock blasting and overbreak control(NHI Course No. 13211)*, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Virginia.
- Starfield, A. M. and Pugliese, J. M. (1968). *Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A Comparison Between a Computer Model and Field Measurements*, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 5, pp. 65-77.