

## 파형 강관 지중구조물의 토피고에 따른 거동특성

### The Behavior of Corrugated Steel Pipes on Underground Structures According to the Depth of Cover

육정훈\* · 김낙영\*\*

Yook, Jeong-Hoon · Kim, Nag-Young

#### Abstract

The analysis of corrugated steel pipes is depending on a second dimension frame analysis or compressed ring model. This is the analysis not to consider the behavior of soil-structure interaction. The behavior of load resistance system is varied according to the depth of cover and the spacing of corrugated steel pipes structure. Therefore, the behavior characteristic of corrugated steel pipes was confirmed through finite element analysis to consider the activity of soil-structure interaction. If soil cover is filled up to the more of optimal depth, behavior of corrugated steel pipes are similar to those of ductile steel pipes according to the earth pressure distribution and effects of traffic loads are decreased. But, If soil cover is filled up to the less of optimal depth, corrugated steel pipes can't behave completely as ductile steel pipes because the passive earth pressure acting on side of corrugated steel pipes is decreased according to the decrement of vertical earth pressure, and the traffic loads influence on the section forces is increased, so that the traffic loads dominated the behavior of corrugated steel pipes.

**Keywords** : Soil-structure interaction, Corrugated steel pipe, Cover, Traffic loads, Section forces

#### 요 지

파형강관의 해석은 2차원 프레임 해석이나 압축링 모델에 의존하고 있다. 이는 흙-구조물 합성구조계의 거동을 고려하지 않은 해석이다. 파형강관 구조물은 토피고와 지간에 따라 하중저항시스템이 변화한다. 따라서, 흙-구조물 합성구조계의 작용을 고려한 유한요소해석을 통해 파형강관의 거동특성을 확인하였다. 적정토피고 이상 성토하면 파형강관은 연성관의 토압분포에 따른 거동과 유사하며, 차량하중의 영향은 적정토피고 이상 성토할수록 감소하였다. 그러나, 적정토피고 이하로 성토할 경우, 연직토압이 감소하고 파형강관 측면의 수동토압도 감소하여 완전한 연성관 거동을 나타내지 못했고, 성토 높이가 적정토피고 이하로 작아질수록 차량하중이 단면력에 미치는 영향이 커져, 파형강관 구조물의 거동을 지배하였다.

**주요어** : 흙-구조물 합성구조계, 파형강관, 토피고, 차량하중, 단면력

\* 비회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 과제연구원

\*\* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

## 1. 서론

하천의 최대유량과 최소유량의 비를 나타내는 유량변동계수(하상계수)는 우리나라 대부분의 하천이 300이상으로 매우 커서 수자원관리가 상당히 어려운 실정이고, 갈수기에는 하천의 물이 말라 용수확보에 어려움을 겪고 있는 반면, 기상학적 특성으로 인한 강수량의 하절기 집중현상에 따른, 단기집중호우로 인한 잦은 침수피해와 국부적인 홍수피해가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 침수피해 및 국부적인 홍수피해의 방지를 위해 홍수재해 방지용 우수유출저감 시스템의 개발이 요구되고 있다. 홍수재해를 방지하기 위한 우수유출저감 시스템을 구축하기 위해 기존의 저류지, 또는 기존 콘크리트 관로에 의한 우수유출저감 시스템의 대체 공법으로, 파형강관 즉, 직경 900~2,400mm의 파형강관을 지표 아래에 병렬로 연결 설치하여 초기 집중되는 대용량의 우수를 일시 저장하여 침수피해와 국부적인 홍수피해를 저감시킬 수 있는 시스템으로 사용한다.

파형강관 구조에 관한 국내외의 설계기준은 시공되는 토피고에 따라 파형강관 단면의 두께 및 기하학적 한계만을 규정하고 있으며, 국내의 경우 파형강관의 구조해석시, 흙-구조물 합성 구조계의 거동을 고려하지 않은 2차원 프레임 해석이나 판스팬 구조에 적용되는 압축링 모델에 의존하고 있다. 그러나 Abdel-Sayed(1993)에 따르면 흙-구조물 합성 구조계의 작용이 거동을 지배하며, 휨에 대한 연성구조이므로 이러한 단순화된 이론은 그 신뢰도가 낮고 적용상 제한이 따른다. 따라서 본 연구에서는 파형강관의 직경과 차량하중, 토피두께에 따른 파형강관의 거동을 파악하고, 시공 가능한 토피두께의 범위를 산정하며, 최적토피두께를 산정하여 경제성과 안정성을 확보할 수 있도록 하기 위하여 흙-구조물 합성 구조계의 작용을 고려한 유한요소 해석을 통해 분석해 보고자 하였다.

## 2. 유한요소해석 모델링

흙-구조물 상호작용을 고려한 유한요소 모델은 뒷채움 흙의 모델링 방법에 따라 부분 구조법(sub-structure method)과 직접법(direct method)으로 구분된다.

부분 구조법은 그림 1(a)에 나타나듯이 흙의 특성을 구조물에 종속된 탄성스프링으로 모델링하여 모델링이 용이하고, 해석이 간단하지만 복잡한 구조물의 형상이나 흙의

비선형 거동을 고려하지 못한다. 그에 비해 직접법은 그림 1(b)와 같이 구조물과 근역(near field)의 흙을 연속체로 합성하고 원역(far field)의 흙을 무한요소 또는 경계요소로 모델링한다. 직접법에 의한 해석모델은 원역의 모델링 기법 및 분석이 어려우나 정확한 해석결과를 얻을 수 있고, 뒷채움 흙의 비선형 거동을 고려할 수 있다.

파형강관 구조물은 작용하중에 의해 구조물의 변형이 비교적 크게 발생하여 흙-구조물 상호작용이 구조물의 거동을 지배하므로 뒷채움 흙의 비선형 거동과 응력의존적인 응력-변형을 관계(stress-dependent stress-strain relationship)가 고려되어야 하고, 실제 시공과정이 반영되어야 한다. 따라서, 흙-구조물 상호작용은 보다 정확히 반영할 수 있는 직접법으로 모델링하는



(b) 직접법에 의한 모델링

그림 1. 흙-구조물 합성 구조계의 유한요소 모델링

### 2.1 해석단면 (Geometry)

파형강관의 단일관 시공시 거동특성을 파악하기 위한 단일관의 해석단면은 그림 2와 같으며, 본 해석에서 응력의 흐름이 원활하게 이루어지고, 경계의 구속조건에 영향을 받지 않도록 하기 위하여 구조물의 좌우측 해석영역은 구조물 직경의 3배, 하부해석영역은 2.5배 이상을 적용하였다. 직경이 D인 파형강관의 설치를 위해 원지반 위에 일정한 두께의 베딩을 시공하고, 0.6m~8.0m까지 단계적으로 성토조건을 변화시키며 토피고에 의한 사하중을 고려하

였으며, 각 단계별로 변화시킨 토피고에 DB-24의 활하중을 적용하여 해석을 수행하였다.

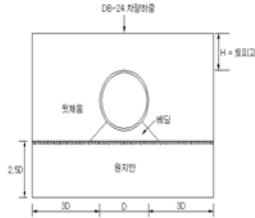


그림 2. 파형강관의 해석단면

## 2.2 해석프로그램

본 연구에서는 파형강관 지중저류 구조물의 거동분석을 위해 2차원 연속체로 이루어진 구조물이나 지반의 외적인 경계조건이 주어지면 시공단계를 고려하여 그에 해당하는 내부변수를 계산하는 유한요소법(FEM)에 의한 지반구조 해석 프로그램인 Pentagon2D를 사용하였다.

파형강관 지중저류 구조물의 유한요소 해석을 위한 Mesh는 그림 3과 같다.

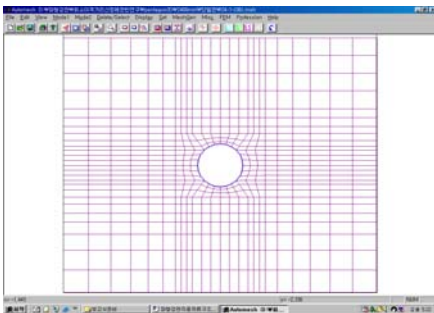


그림 3. 파형강관 지중저류 구조물의 유한요소 해석을 위한 Mesh

## 2.3 파형강관 구조 요소

일반적으로 우수유출 저감시스템으로 사용되는 파형강관은 원형 3S형이다. 파형강관의 직경은 적용방식과 저수 용량으로 크게 대형과 소형(국부형)으로 구분할 수 있으며 대형일 경우에는 여러개의 병렬관으로 시공되므로 유지보수를 위해서는 사람이 구조물 내부에서 자유롭게 움직일 수 있어야 한다. 따라서, 국내에서 일반적으로 생산하는

size중 최대인 2,400mm를 채택하였고, 유지보수를 원활히 하기 위해서 요구되는 최소 관경이라고 사료되어 1,800mm를 채택하였다. 소형(국부형)으로 적용할 경우에는 강관직경 1,200mm로 정하였다. 파형강관은 KS D 3506에 의한 열연용융아연 도금강관(SGHC)으로 만들고, 항복점은 21,006 t/m<sup>2</sup> 이상이다. 이에 대한 단면모양은 그림 4에 나타내었고, 단면의 치수는 표 1에 나타내었다.

한국도로공사의 도로설계요령에서는 표 2와 같이 토피두께에 따라 사용 가능한 파형강관의 두께를 결정할 수 있는 도표를 제시하고 있다. 따라서, 직경 2,400mm관과 1,800mm관은 두께 3.2mm를 사용하였고, 직경 1,200mm관은 두께 2.0mm를 사용하였으며 이에 대한 단면의 특성을 표 3에 나타내었다. 이러한 각각의 파형강관 구조 요소는 각 절점에 3개의 자유도를 갖는 2절점 보 요소인 연속체로 모사하였다.

표 1. 파형강관 구조의 단면치수 (원형 3S형)

| 기호         | 치 수       |           |               |
|------------|-----------|-----------|---------------|
|            | 파의 피치 (P) | 파의 깊이 (H) | 파의 굽힘 반지름 (r) |
| SCP<br>3RS | 76.2mm    | 25.4mm    | 17.5mm        |



그림 4. 파형강관 구조 단면모양

표 2. 토피고 따른 파형강관(원형 3S형)의 두께 (한국도로공사)

| 관지름 (mm) | 최소 토피 (m) | 토피고   |       |       |       |       |       |
|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          |           | ~1.5m | ~3.0m | ~4.5m | ~6.0m | ~7.5m | ~9.0m |
| 900      | 0.6       | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 2.0   |
| 1,000    | 0.6       | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 1.6   | 2.0   | 2.0   |
| 1,200    | 0.6       | 2.0   | 1.6   | 1.6   | 2.0   | 2.0   | 2.7   |
| 1,350    | 0.6       | 2.0   | 2.0   | 2.0   | 2.0   | 2.7   | 3.2   |
| 1,500    | 0.6       | 2.7   | 2.7   | 2.7   | 2.7   | 3.2   | 3.2   |
| 1,650    | 0.6       | 3.2   | 2.7   | 2.7   | 3.2   | 3.2   | 3.2   |
| 1,800    | 0.6       | 3.2   | 3.2   | 3.2   | 3.2   | 3.2   | -     |
| 2,000    | 0.6       | 3.2   | 3.2   | 3.2   | 3.2   | 3.2   | -     |
| 2,200    | 0.6       | 3.2   | 3.2   | 3.2   | 3.2   | -     | -     |
| 2,400    | 1.5       | -     | 3.2   | 3.2   | 3.2   | -     | -     |

표 3. 파형강관(원형 3S형)의 두께에 따른 단면 특성

| 두께<br>t<br>mm | 단면적<br>A<br>cm <sup>2</sup> /m | 접선장<br>TL<br>cm | 접선각<br>△<br>° | 단면2차<br>모멘트<br>I<br>cm <sup>4</sup> /cm | 단면<br>계수<br>S<br>cm <sup>3</sup> /m | 회전<br>반경<br>r<br>cm | 전개폭<br>계수<br>b<br>- |
|---------------|--------------------------------|-----------------|---------------|---|-------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 2.0           | 24.797                         | 2.33            | 44~56         | 0.1882                                  | 13.7222                             | 0.8712              | 1.241               |
| 3.2           | 39.758                         | 2.20            | 45~52         | 0.3082                                  | 21.5338                             | 0.8801              | 1.244               |

## 2.4 뒷채움 흙 요소

뒷채움 흙의 비선형 거동은 응력상태에 따라 달라지는 탄성 계수( $E$ )와 체적변형계수( $B$ )에 의해 좌우된다. Kondner (1963)는 삼축압축실험 결과 흙의 응력-변형을 관계곡선이 포물선과 비슷하다는 것을 발견하고 식(1)과 같은 Hyperbolic Model을 제시하였다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}} \quad (1)$$

식(1)의 Hyperbolic Model은 그림 5처럼 비선형으로 나타나므로 수치해석을 위하여 응력-변형을 곡선은 식(2)를 이용하여 선형화하고 이렇게 선형화된 그래프를 그림 6에 나타내었다.

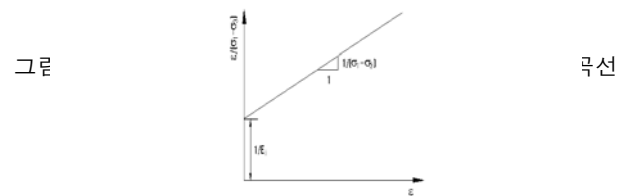
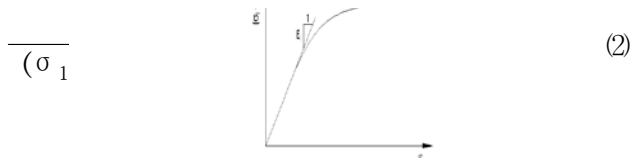


그림 6. 직선화된 Hyperbolic 응력-변형률 곡선

이후 Duncan & Chang(1970)은 초기변형계수( $E_i$ )를 구하는 식과 Mohr-Coulomb의 파괴 기준을 적용하여 비선형적 흙의 거동의 쌍곡선 함수를 식(3)과 같이 선형화하여 해석시 합리적으로 적용하였으며, 식(4)처럼 체적변형계수( $B$ )를 구속응력에 의한 함수로서 표시하였다. 그림 7은 이러한 구속응력에 따른 체적변형계수의 변화를 보여준다.

$$E_i = \left[ 1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

$$B = K_b P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (4)$$

여기서,  $K_b$  : 체적변형계수 정수  
 $m$  : 체적변형계수 지수  
 $P_a$  : 대기압  
 $K$  : 변형계수 정수  
 $n$  : 변형계수 지수  
 $R_f$  : 파괴비

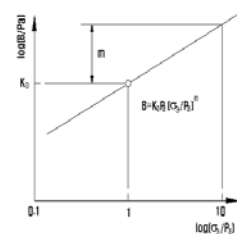


그림 7. 구속응력에 따른 체적변형계수의 변화

본 연구에서는 뒷채움에 사용되는 흙 요소를 Duncan & Chang의 쌍곡선 모델로 모델링하였다. 뒷채움 흙의 선정은 표 4중에 현장에서 쉽게 구할 수 있고, 경제성 및 효율성이 좋은 상대다짐도 90%의 SM 재료로 모델링하였고, 원지반 흙의 경우는 일반적인 토사지반으로 보고, 상대다짐도 100%의 SM 재료로 모델링하였다. 이러한 뒷채움 흙과 원지반 흙은 각 절점에서 2개의 자유도를 갖는 8절점 사각형 혹은 6절점 삼각형 요소로 모델링하였으며, 실제 시공 과정을 고려하여 그림 8과 같이 쿠션 역할을 하는 베딩(bedding, 두께=0.6m)작업후 파형강관을 설치하고 1층의 다짐 완료 후 두께가 20cm 이하가 되도록 성토단계

를 모사하였다.

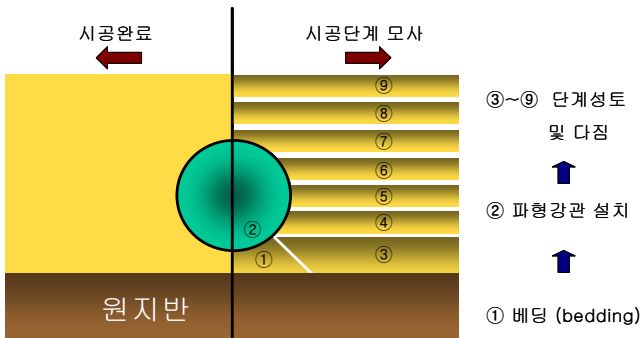


그림 8. 파형강관 시공단계 모사

표 4. Hyperbolic 모델에서 통일분류법에 따른 흙의 Property

| Unified Classification | RC Stand. AASHTO | rm (k/ft <sup>3</sup> ) | $\phi$ (deg) | $\Delta\phi$ (deg) | C (k/ft <sup>2</sup> ) | K   | n    | Rf  | Kb  | m   |
|------------------------|------------------|-------------------------|--------------|--------------------|------------------------|-----|------|-----|-----|-----|
| GW, GP<br>SW, SP       | 105              | 0.150                   | 42           | 9                  | 0                      | 600 | 0.4  | 0.7 | 175 | 0.2 |
|                        | 100              | 0.145                   | 39           | 7                  | 0                      | 450 | 0.4  | 0.7 | 125 | 0.2 |
|                        | 95               | 0.140                   | 36           | 5                  | 0                      | 300 | 0.4  | 0.7 | 75  | 0.2 |
|                        | 90               | 0.135                   | 33           | 3                  | 0                      | 200 | 0.4  | 0.7 | 50  | 0.2 |
| SM                     | 100              | 0.135                   | 36           | 9                  | 0                      | 600 | 0.25 | 0.7 | 450 | 0.0 |
|                        | 95               | 0.130                   | 34           | 6                  | 0                      | 450 | 0.25 | 0.7 | 350 | 0.0 |
|                        | 90               | 0.125                   | 32           | 4                  | 0                      | 300 | 0.25 | 0.7 | 250 | 0.0 |
|                        | 85               | 0.120                   | 30           | 2                  | 0                      | 150 | 0.25 | 0.7 | 150 | 0.0 |
| SM ~ SC                | 100              | 0.135                   | 33           | 0                  | 0.5                    | 400 | 0.6  | 0.7 | 200 | 0.5 |
|                        | 95               | 0.130                   | 33           | 0                  | 0.4                    | 200 | 0.6  | 0.7 | 100 | 0.5 |
|                        | 90               | 0.125                   | 33           | 0                  | 0.3                    | 150 | 0.6  | 0.7 | 75  | 0.5 |
|                        | 85               | 0.120                   | 33           | 0                  | 0.2                    | 100 | 0.6  | 0.7 | 50  | 0.5 |
| CL                     | 100              | 0.135                   | 30           | 0                  | 0.4                    | 150 | 0.45 | 0.7 | 140 | 0.2 |
|                        | 95               | 0.130                   | 30           | 0                  | 0.3                    | 120 | 0.45 | 0.7 | 110 | 0.2 |
|                        | 90               | 0.125                   | 30           | 0                  | 0.2                    | 90  | 0.45 | 0.7 | 80  | 0.2 |
|                        | 85               | 0.120                   | 30           | 0                  | 0.1                    | 60  | 0.45 | 0.7 | 50  | 0.2 |

## 2.5 활하중(DB-24)

집중하중 형태로 재하되는 활하중은 구조물의 종방향으로 불연속적이므로 2차원 해석에 그대로 적용할 수 없다. 또한, 상부토체의 두께가 강관 직경보다 작은 경우에는 그림 9에 보듯이 파형강관의 상부에 작용하는 활하중의 분포 폭이 강관의 직경보다 작게 된다. 현재 사용하고 있는 설계법에서는 강관의 직경 폭에 대하여 동일 하중강도의 등분포하중이 강관의 정점부에 작용하는 것으로 구조적 설계가 이루어지고 있는데, 이는 실제 거동과는 달리 파형강관에

작용하는 원주방향 압축력은 크게 되고, 곡률모멘트는 작게 된다. 따라서, 활하중을 토피고의 상단에 위치시켜 활하중의 분포 폭을 고려할 수 있도록 본 연구에서는 그림 10과 같이 DB-24 하중의 2차선 재하를 고려하여 종방향으로 불연속적인 4개의 후륜하중을 Pentagon3D의 탄소성 해석을 통해 종방향으로 연속적인 선하중으로 치환하였다. 즉, 4개의 후륜하중이 구조물의 정점부에 미치는 가장 불리한 하중강도와 동일한 하중강도를 유발시키는 종방향으로 연속적인 선하중으로 치환한 것이며, 토피고에 따른 결과를 표 5에 나타내었다.

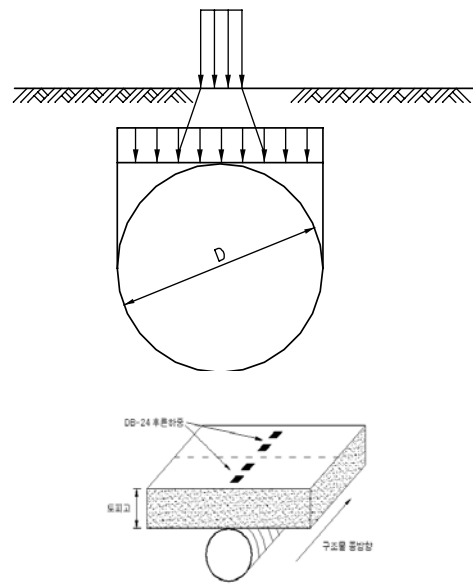


그림 10. DB-24 차량하중 재하모델

표 5. 토피고에 따른 DB-24의 선하중 강도

| 토피고 (m) | 선하중 강도 (ton/m) |
|---------|----------------|
| 0.6     | 5.35           |
| 1.0     | 6.0            |
| 1.5     | 6.4            |
| 2.0     | 6.4            |
| 3.0     | 6.4            |
| 4.0     | 6.4            |
| 5.0     | 6.4            |

### 3. 파형강관 구조물의 거동분석

파형강관 지중저류 구조물의 토피고에 따른 거동을 3가지 직경별로 분석하고, 파형강관에 작용하는 최대응력을 계산하여 각각의 직경에 따라 사용 가능한 최소토피고와 최대토피고의 범위를 분석하고 가장 큰 안정성을 확보할 수 있는 토피고를 산정하였다.

#### 3.1 연직변위와 수평변위

그림 11~16에 나타나듯이 사하중에 의한 연직변위와 수평변위는 토피고가 증가함에 따라 연직변위는 일정하게 감소(연직 직경 감소)하며 수평변위는 일정하게 증가(수평 직경 증가)하였다. 그림 11의 경우 최종 토피고가 1.5m 이하로 작은 경우에는 파형강관의 연직변위가 오히려 증가함을 확인하였다. 이는 시공단계를 모사함에 있어 단계별 성토시 파형강관의 측면에 작용하는 수동토압에 의해 발생하는 연직변위 증가량이 파형강관 상부에 작용하는 연직토압에 의한 연직변위 감소량보다 크기 때문이다. 또한, 토피고가 낮을수록 활하중의 영향은 크게 나타나며, 토피고가 높아질수록 활하중의 영향보다 토피고에 의한 사하중의 영향이 거동을 지배하는 특성을 나타내고 있다.

그림 13과 16처럼 직경 1,200mm관의 연직변위와 수평변위가 거의 비슷한 양으로 증감하는 것을 볼 수 있다. 즉, 사하중과 활하중에 의해서 연직변위가 줄어든 만큼 수평변위는

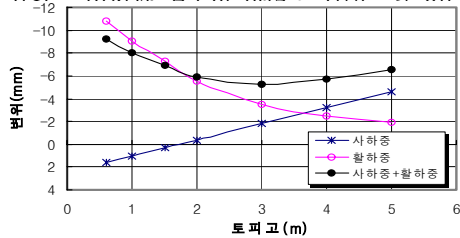


그림 11. 직경 1,800mm관의 토피고에 따른 연직변위

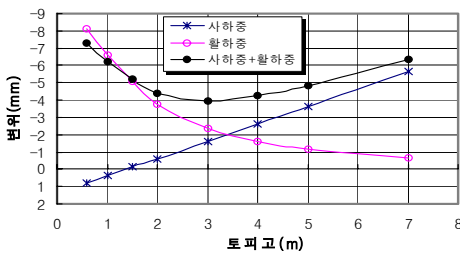


그림 12. 직경 1,800mm관의 토피고에 따른 연직변위

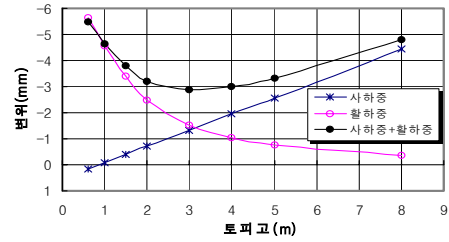


그림 13. 직경 1,200mm관의 토피고에 따른 연직변위

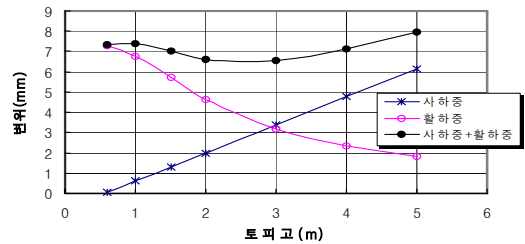


그림 14. 직경 2,400mm관의 토피고에 따른 수평변위

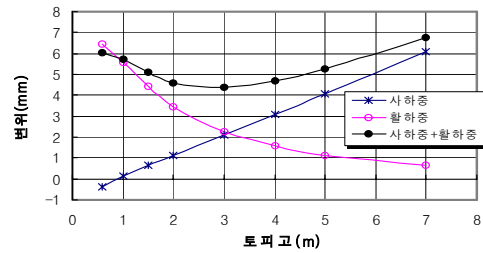


그림 15. 직경 1,800mm관의 토피고에 따른 수평변위

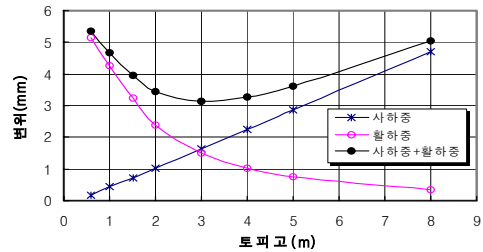


그림 16. 직경 1,200mm관의 토피고에 따른 수평변위

#### 3.2 직경 변화에 따른 단면력 변화

그림 17~19와 같이 파형강관에 발생하는 축력의 지배 인자는 사하중이며, 동일 토피고일 때 파형강관의 직경이 작을수록 발생하는 축력은 작다.

상부토피의 두께가 강관 직경보다 작은 경우에 그림 9에 설명하였듯이 파형강관의 상부에 작용하는 활하중의 분포

폭이 강관의 직경보다 작게 된다. 따라서, 원주방향 압축력은 작게 되고 곡률 모멘트는 크게 되지만, 현재 파형강관 설계에 사용되는 설계법에서는 강관의 직경 폭에 대하여 동일 하중강도의 등분포하중이 작용하는 것으로 되어있어 강관의 원주방향 압축력은 크게 되고, 곡률 모멘트는 작게 되는 것이다. 그림 21에서는 토피고에 비해 직경이 작은 1,200mm관에 발생하는 모멘트가 다른 직경이 큰 관에 작용하는 모멘트보다 커지는 경향이 나타난다.

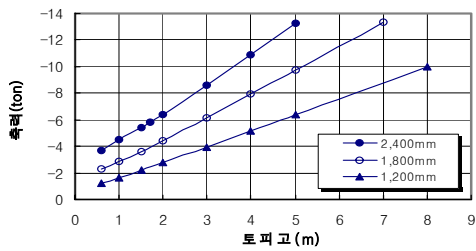


그림 17. 직경별 사하중에 의한 최대축력

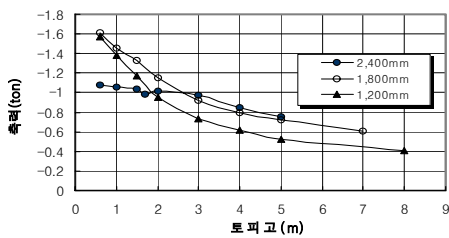


그림 18. 직경별 활하중에 의한 최대축력

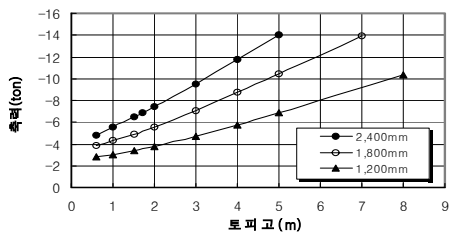


그림 19. 직경별 사하중과 활하중에 의한 최대축력

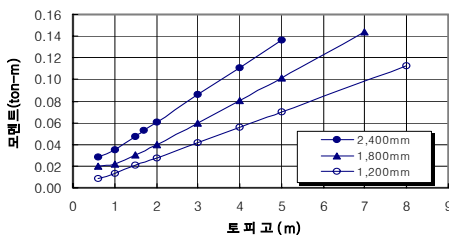


그림 20. 직경별 사하중에 의한 최대모멘트

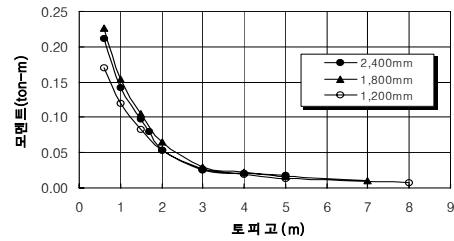


그림 21. 직경별 활하중에 의한 최대모멘트

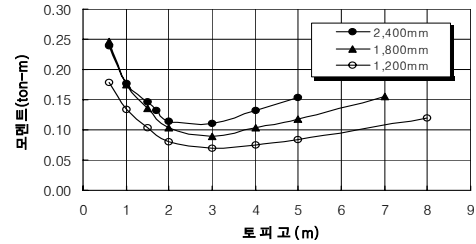


그림 22. 직경별 사하중과 활하중에 의한 최대모멘트

### 3.3 파형강관에 발생하는 최대응력 해석결과

미국철강협회(AISI)에 의하면, 파형강관의 설계법은 허용응력 설계법을 따르게 되어 있다.

AISI에서는 벽체의 좌굴을 포함한 최대응력이 파형강관의 허용응력을 초과하지 않도록 규정하고 있다. 파형강관은 KS D 3506에 의한 열연용융아연 도금강관(SGHC)으로 만들고, 항복점은 21,006 t/m<sup>2</sup> 이상이므로, 파형강관에 발생하는 최대응력은 10,503 t/m<sup>2</sup>을 초과하지 않아야 한다.

그림 23~25는 직경별로 파형강관에 작용하는 축력과 모멘트를 가지고 응력을 수계산하여 토피고별로 최대응력을 나타내었다.

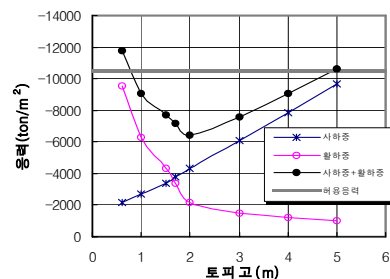


그림 23. 직경 2,400mm관의 토피고에 따른 최대응력

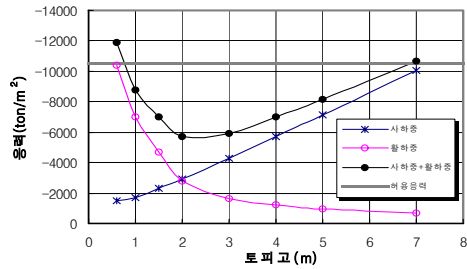


그림 24. 직경 1,800mm관의 토포고에 따른 최대응력

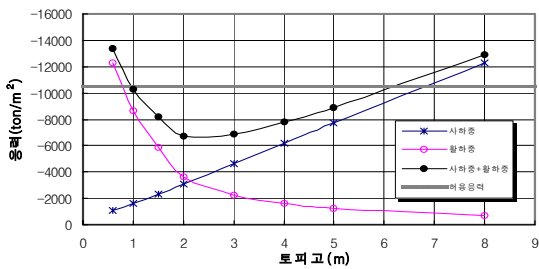


그림 25. 직경 1,200mm관의 토포고에 따른 최대응력

여기서, 2m이하의 낮은 토포고에서는 활하중에 의한 영향이 지배적이며, 2m이상에서는 토포고에 의한 사하중의 영향이 지배적이다. 낮은 토포고일수록 활하중에 의해 작용하는 모멘트는 증가하며, 이 모멘트에 의한 응력의 증가분이 최대응력을 발생시키는 지배적인 요인이다. 반대로, 2m이상의 토포고에서는 지표면에 활하중으로 인해 지반내에 생기는 응력이 감소하여 수렴해가고 순수 사하중에 의한 모멘트가 증가하여 최대응력을 발생시키는 요인으로 작용한다.

여기서 주목할만한 점은 직경이 다른 3가지 파형강관 모두에서 토포고가 2m부근일 때 최소의 응력이 발생한다는 점이다. 이는 사하중에 의한 응력증가분과 활하중에 의한 응력증가분의 합이 토포고 2m부근에서 최소값을 갖는다는 것을 나타낸다. 따라서, 토포고가 2m정도일 때 파형강관은 최대의 안정성을 발휘할 수 있다고 판단된다.

각 직경별로 토포고에 따른 최대응력과 허용응력을 비교하여 허용응력 설계법에 만족하는 최소토포고와 최대토포고를 표 6에 나타내었고, 한국도로공사에서 발간한 도로공사 설계요령집의 표 2와 비교해본 결과, 유한요소 해석결과가 한국도로공사 설계요령집에서 제시한 값보다 다소 보수적인 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서는 해외규정들을 고려하여 상대다짐도 90%일때의 물성치를 이용하였

고, 한국도로공사에서는 파형강관의 뒷채움 재료의 다짐도가 95%이상 되도록 제안하고 있기 때문에 뒷채움 재료의 다짐도 차이에서 발생한 오차라고 판단된다.

표 6. 파형강관의 직경과 두께를 고려한 토포고

| 관직경 (mm) | 관두께 (mm) | 최소토포고 (m) | 최대토포고 (m) |
|----------|----------|-----------|-----------|
| 1,200    | 2.0      | 0.9       | 6.2       |
| 1,800    | 3.2      | 0.8       | 7         |
| 2,400    | 3.2      | 0.8       | 5         |

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 지중에 시공된 파형강관 구조물에 토포고의 변화에 따른 사하중의 영향과 차랑하중에 의한 활하중의 영향을 고려한 파형강관의 거동특성을 파형강관 제원에 따라 분석·정리하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 파형강관에 발생하는 축력에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 토포고에 의한 사하중으로, 사하중의 증가에 따라 압축력이 일정하게 증가하였다. 이에 비해 활하중에 의한 영향은 토포고가 증가함에 따라 감소하였다. 또한 파형강관의 직경이 작아질수록 파형강관에 발생하는 축력은 일정하게 감소하였다.
2. 토포고가 작은 경우일수록 활하중에 의해 파형강관에 발생하는 모멘트는 지수함수적으로 증가하며, 적정토포고 이상에서는 그 영향이 감소하여 수렴해가는 것을 확인하였다. 이것은 지표면에 위치한 활하중에 의해 지중에 시공된 파형강관의 정점부에 작용하는 하중강도의 증가분이 토포고가 증가할수록 감소하기 때문이다. 따라서, 토포고가 2m이하의 작은 경우일수록 지표면에 작용하는 활하중의 영향이 모멘트 발생의 지배적인 변수이고, 2m이상의 토포고에서는 사하중의 영향이 지배적인 변수가 된다.
3. 적정토포고 이상에서는 파형강관의 직경이 작아질수록 모멘트가 일정하게 감소하지만, 상부토포의 두께가 강관직경보다 작은 경우에는 파형강관 상부에 작용하는 활하중의 분포 폭이 강관의 직경보다 작게 되어 받을 수 있는 활하중의 분포 폭이 달라지므로 직경이 작을수



록 감소하는 모멘트의 감소율이 달라진다.

4. 흙-구조물 합성구조계로서 거동하는 파형강관 구조는 적용되는 토피고와 시간에 따라 하중저항시스템이 달라진다. 파형강관의 직경에 비해 일정토피 이하로 시공할 경우, 완전한 흙-구조물 합성구조계로 거동하지 않아 완전한 연성관의 거동을 기대할 수 없지만, 충분한 토피고가 시공되어질 때 파형강관은 연성관의 토압분포에 따른 거동과 유사하게 거동하는 것으로 판단된다.

5. 관직경과 두께가 다른 3가지의 파형강관에 발생하는 최대응력을 비교하여 사하중에 의해 발생하는 응력과 활하중에 의해 발생하는 응력의 합이 허용응력을 초과하지 않는 범위에서 사용 가능한 토피고를 나타내었고, 이때, 파형강관의 직경에 상관없이 발생하는 응력의 합이 최소가 되는 적정토피두께는 2m로 나타났다.

(접수일자 : 2003년 11월 24일)

### 참 고 문 헌

1. Abdel-Sayed, G., Bakht, B., and Leslie G. J.(1993), Soil-Steel Bridge, McGrawHill, New York. pp. 76~83, 125~130.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO)(1996), Standard Specifications for Highway Bridges, Washington D. C..
3. Canadian Standard Association(2001), Canadian Highway Bridge Design Code(CHBDC), Ministry of Transportation of Canada.
4. Duncan, J. M.(1979), Behaviour and Design of Long-Span Metal Culvert Structures, ASCE Journal of Geotechnical Division, 105(GT3), pp. 399~417.
5. Duncan, J.M. and Chang, C. Y.(1970), Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, ASCE Journal of Geotechnical Division, 96(SM5), pp. 629~1653.