

## 부(-)아칭효과 발현시 파형강판 암거에 작용하는 연직하중에 대한 수치해석적 연구

이승현<sup>1\*</sup>, 김병일<sup>2</sup>

### A Numerical Study on Vertical Load Acting on Corrugated Metal Culvert under Negative Arching Condition

Seung-Hyun Lee<sup>1\*</sup> and Byoung-II Kim<sup>2</sup>

**요 약** 지간 3m인 4종류의 파형강판 암거에 대하여 토피고를 1m에서 6m까지 1m씩 증가시켜 가며 부(-)아칭효과 발현 시 파형강판 암거에 작용하는 연직하중을 수치해석을 통해 구해보았다. 수치해석결과를 통해 볼 때 돌출형으로 파형강판 암거를 설치하더라도 부(-)아칭효과에 의해 암거 상단면에 작용하는 연직하중의 크기는 대체로 상재하중과 거의 유사함을 알 수 있었다. 또한, 말뚝기초로 지지되는 파형강판 암거에 있어서 부(-)아칭효과 발현 시 수치해석을 통해 구한 연직하중값은 지간의 2배 정도 이하의 토피고에 있어서는 말뚝기초가 없는 경우와 거의 비슷한 값을 보였으며 그 이상의 토피고에 대해서는 지지구조물의 영향을 받아 말뚝기초가 없는 경우보다 약간 크게 나타났고 이러한 경향은 파형강판의 휨강성이 클수록 뚜렷하였다.

**Abstract** Vertical loads acting on corrugated metal culverts under negative arching condition were investigated through numerical analyses. Four kinds of corrugated metal culverts with span of 3m were considered in numerical analyses. Also, depths of cover were varied from 1m to 6m with increment of 1m. According to numerical analyses, magnitudes of vertical loads acting on culverts under the condition of negative arching were similar as overburden load on culvert. Furthermore, magnitudes of vertical loads acting on culverts supported by pile foundation were similar as those without pile foundation when depths of cover were less than about 2m. For larger depths of cover which are greater than about two times of span of culvert, magnitudes of vertical loads were slightly larger than those without pile foundation and its tendency becomes more clear as flexural rigidity of corrugated metal increases.

**Key words** : Corrugated metal culvert, Depth of cover, Negative arching, Numerical analysis, Pile foundation

### 1. 서 론

최근 들어 국내에서도 토목용 재료로 파형강판 암거의 사용이 빈번해지고 있으며 주로 도로, 철도 등의 횡단구조물이나 용수로로서 적용되고 있다. 파형강판은 얇은 강판 단면을 물결모양으로 제작하여 단면의 휨강성을 증가시킨 것으로 개개의 부재형태로 현장에 공급되어 조립되므로 시공성이 좋고 경제성 또한 뛰어나다고 할 수 있다. 2001년도부터는 국내에서 기존에

생산되어 오던 표준형강판보다 파형의 골을 깊게 하여 휨강성을 보다 증가시킨 대골형 강판을 생산하여 10m가 넘는 장지간 암거 구조물에 적용하고 있으며 터널 구조물로의 활용도 시도되고 있다.

이러한 파형강판의 수요에 부응하여 국내외에서도 이와 관련된 많은 연구가 진행되어 왔으나 주로 파형강판의 구조성능에 대한 연구가 대부분[1][2][3] [4][5]이다. 기존의 연구내용으로는 터널 적용을 위한 실용화연구, 파형강판 보강시스템의 개발, 지중강판 구조물의 시공방법 정립 그리고 파형강판에 대한 재료성능 시험 등이 있다. 지반과의 상호작용을 고려한 연구[6]에 있어서도 파형강판 암거와 주변지반 사이의 아칭효과 특히 부(-)아칭효과에 대한 연구가 없는 실정으로

<sup>1</sup>선문대학교 토목공학과

<sup>2</sup>명지대학교 토목환경공학과

\*교신저자: 이승현(shlee02@sunmoon.ac.kr)

국의 관련 시방서[7][8][9]에서도 그 내용을 찾을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 파형강관 암거의 설계에 있어 중요한 요소인 토피고에 의한 연직토압을 산정함에 있어 부(-)아칭효과가 발생하는 경우에 대한 연직토압을 수치해석을 통하여 평가하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 강성암거에 작용하는 연직토압

일반적으로 암거는 설치되는 상태에 따라 구형암거(溝型暗渠, negative projecting culvert)와 돌출형암거(突出型暗渠, positive projecting culvert)로 분류된다[7]. 그림 1에 나타난 바와 같이 구형암거는 교란되지 않은 원지반을 좁게 굴착한 다음 암거를 설치하고 뒤채움을 한 암거이며, 돌출형 암거는 그림 2에 나타난 바와 같이 암거의 정부(頂部)가 원지반에서 성토체내로 돌출하도록 설치한 다음 뒤채움을 한 암거이다.

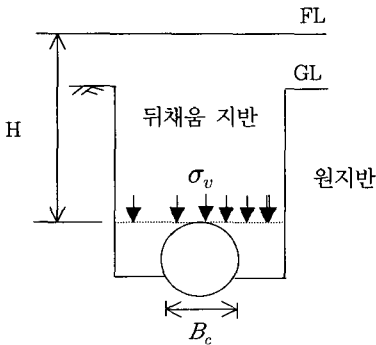


그림 1. 구형 암거

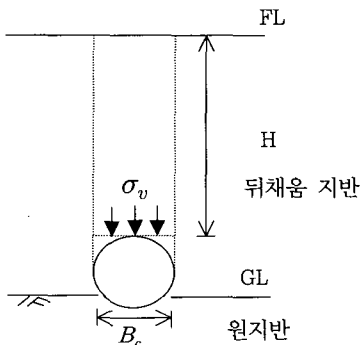


그림 2. 돌출형 암거

구형암거의 경우 원지반을 굴착하고 암거를 매설한 다음 뒤채움을 하므로 원지반 연직 굴착면에 대해서

하향의 마찰력이 작용하고 따라서 정(+)아칭효과에 의해 암거 상단에 작용하는 연직토압은 토피고 두께에 해당하는 상재하중보다 감소하게 된다. 돌출형 암거의 경우에는 암거 위의 흙과 그 양측의 흙 사이의 상대침하에 따라 암거에 작용하는 연직토압이 증가하거나 감소하게 된다. 즉, 암거 양측에서의 침하량이 암거의 침하량보다 큰 경우에는 암거 상단에 작용하는 연직토압은 상재하중보다 증가하게 되는 부(-)아칭효과가 발생하고 그 반대의 경우에는 연직토압이 감소하게 된다.

Marston[10]은 그림 2에 나타난 돌출형 강성암거에 대해서 부(-)아칭효과 발생시 암거 상단면에 작용하는 연직토압( $\sigma_v$ )을 결정하는 식을 다음과 같이 제안한 바 있다.

$$\sigma_v = \frac{B_c \gamma}{2k_r \tan \phi} [\exp(k_r \tan \phi \frac{2H}{B_c}) - 1] \quad (1)$$

$B_c$  : 암거의 지간(암거의 폭)

$\gamma$  : 뒤채움 흙의 단위중량

$\phi$  : 뒤채움 흙의 전단저항각

$$k_r = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

$H$  : 토피고

암거상단면에 작용하는 연직하중( $W$ )은 식 (1)에 의해 구한 연직토압에 암거의 지간을 곱하여 구할 수 있다.

### 2.2 연성암거에 작용하는 연직토압

파형강관 암거와 같은 연성암거의 경우 연직토압은 암거의 설치조건과 강성에 영향을 받게 된다. 연성암거의 경우 주변 흙과의 상호작용효과로 인해 강성암거에 비해 거동양상은 좀 더 복잡해지는데 뒤채움 흙에 의해 암거자체의 변형이 수반되므로 돌출형으로 설치되더라도 암거 상단에 작용하는 연직토압은 강성암거에 비해 작을 것으로 예상되며, 암거 주변 흙과의 상호작용효과를 고려하여 연직토압을 결정하는 방법으로서 수치해석을 적용함이 현실적으로 타당한 것으로 생각된다.

## 3. 수치해석

수치해석은 지반해석 상용 프로그램인 ZSOIL Ver5.81[11]을 사용하였는데 ZSOIL은 유한요소해석 프로그램으로서 국내외의 사용실적이 다수 있다.

### 3.1 해석대상

해석에 고려한 파형강판은 표 1에 나타난 바와 같이 표준형 2종류 및 대골형 2종류를 선택했고 파형강판 암거의 지간은 3m로 가정하였다. 파형강판 암거를 구성하는 파형은 그림 3과 같으며 지간은 그림에 나타나 있는 이중실선과 파형강판 암거의 중심에 대해 대칭인 이중실선과의 거리를 의미한다.

표 1. 파형강판의 종류 및 역학적 특성

종류	두께 (mm)	단면적 (mm <sup>2</sup> /mm)	단면2차모멘트 (mm <sup>4</sup> /mm)
표준형	2.7	3.35	974
	7.0	8.71	2629
대골형	3.42	3.42	11710.74
	7.01	7.01	24164.64



그림 3. 파형강판 암거의 파형

대골형의 경우 보통 지간이 10m를 초과하는 경우 적용되지만 해석시 파형강판의 휨강성에 따른 연직토압의 크기를 비교할 목적으로 적용하였다. 해석대상 지반은 원지반 및 뒤채움지반으로 구성되며, 모두 모래지반으로 가정하였다. 말뚝기초가 없는 경우의 해석 내용을 개략적으로 설명하면 4종류의 파형강판 암거가 각각 설치된 대상지반에 대하여 토피고를 1m에서부터 6m까지 1m씩 증가시켜가면서 각각의 토피고에 대하여 부(-)아칭조건을 수치적으로 모사하여 파형강판 상단면에 작용하는 연직하중을 계산하였다. 또한 파형강판 암거가 말뚝기초로 지지되는 경우에도 말뚝기초가 없는 경우와 동일하게 해석을 수행하였다.

### 3.2 해석모델

말뚝기초로 지지되는 파형강판 암거에 대한 유한요소망은 그림 4와 같으며, 평면변형을 조건으로 모사하였고 개별요소는 8절점 사각형 요소를 사용하였다.

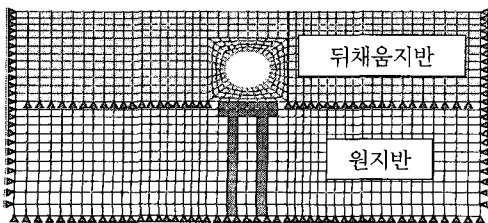


그림 4. 유한요소망

그림 4에서 해석지반의 경계는 파형강판의 중심으로부터 좌우 수평방향으로 각각 지간의 4.8배, 아래로는 지간의 3.8배로 하였다. 해석대상지반의 좌우측면은 수평방향으로 변위를 구속하였으며, 하단면은 수평방향 및 연직방향 변위를 구속하였다. 해석에 있어서는 시공절차를 감안하여 원지반에 뒤채움지반을 성토하는 것으로 고려하였고, 성토 후 부(-)아칭조건은 그림 4의 내부에 지점으로 표시된 바와 같이 원지반 상단면상의 절점에 연직하향으로의 변위를 부여하여 모사하였다. 연직하향으로의 변위 부여시 파형강판에 가장 가까운 절점의 위치는 말뚝기초가 없는 경우에 파형강판 중심으로부터 수평방향으로 1.875m 떨어지게 되며, 말뚝기초가 있는 경우에는 2.5m 떨어지게 된다. 원지반 및 뒤채움지반은 Mohr-Coulomb의 항복모형을 적용한 탄소성 모델로 모사하였으며, 말뚝에 대해서는 선형탄성모형을 적용하였고 파형강판은 보요소로 모델링하였는데 각각의 재료 물성치는 표 2에 나타나 있다. 뒤채움지반은 다짐을 수행한 지반으로 보아 원지반보다 단위중량을 증대시켰으며 그에 따른 역학적 물성값도 적절히 가정하였다.

표 2. 재료 물성치

종류	단위 중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (kPa)	포아송 비	전단 저항각 (°)	점착력 (kPa)
원지반	18	50,000	0.3	30	0
뒤채움지반	20	100,000	0.3	40	0
말뚝	25	1,000,000	0.15	-	-
파형강판	75	200,000,000	0.33	-	-

### 3.3 해석결과

개념적으로 아칭효과에 의한 하중의 증감은 지반의 상대적인 변위에 의해 발생하게 되며, 이론적으로는 식 (1)에 나타난 바와 같이 극한강도개념을 적용하여 계산하게 된다. 수치해석을 통해 부(-)아칭효과 발현에 따른 토압산정은 뒤채움지반내 파형강판 암거 상단의 소성영역의 변화양상을 고려하여 하였는데 해석결과와 한 예를 나타내면 그림 5 및 그림 6과 같다.

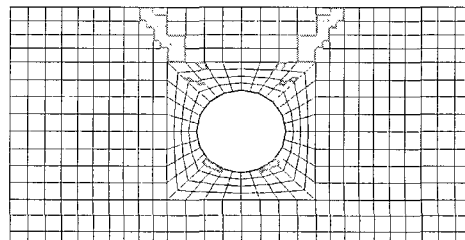


그림 5. 소성영역(뒤채움 완료 후)

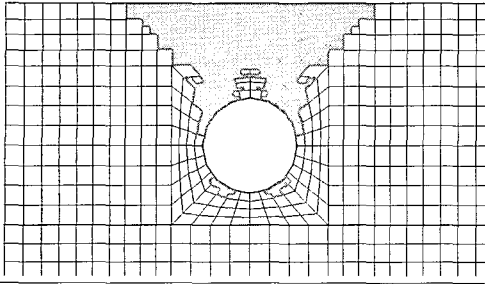


그림 6. 소성영역(부(-)아칭효과 발현)

그림 5와 그림 6에는 말뚝이 없는 경우 토피고가 3m일 때 파형강판 암거 주변의 소성영역의 분포가 나타나 있다. 그림 5는 뒤채움이 완료된 후 소성영역의 분포양상이 나타나 있는데 Rankine 파괴면과 유사한 소성영역을 볼 수 있으며, 이는 파형강판의 연직하향으로의 변형에 따른 결과로 판단된다. 부(-)아칭효과 모사를 위해 경계조건으로 적용하였던 연직하향의 변위가 발생하면 그림 6과 같이 암거 상단의 소성영역이 확대되는데 그림 2에서의 점선으로 나타낸 연직면을 따라 소성영역이 완전히 발달했을 때를 부(-)아칭효과가 발현된 경우로 보고 이 때 파형강판 암거의 상단면에 작용하는 연직하중을 구하였다.

해석시에는 먼저 말뚝기초가 없는 경우에 대하여 파형강판의 단면2차 모멘트를 상당히 증가시켜 강성암거와 유사하게 한 상태에서 해석을 수행하고 그 결과를 통해 구한 연직하중 값을 식 (1)에 의한 계산값과 비교하여 보았다. 이때 대상이 되는 파형강판은 두께 2.7mm의 표준형 파형강판과 두께 3.42mm의 대골형 파형강판으로 하였으며, 두 파형강판에 대하여 단면2차 모멘트값을  $10m^4/m$ 로 하였는데 이 값은 2.7mm 두께의 표준형 파형강판의 약  $10^7$ 배, 3.42mm 두께의 대골형 파형강판의 약  $8.5 \times 10^5$ 배에 해당한다. 해석결과는 그림7과 같다.

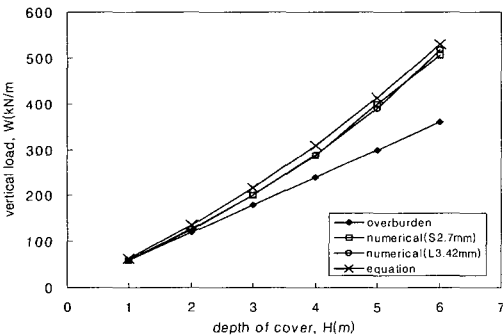


그림 7. 강성암거에 대한 연직하중의 비교

그림 7의 범례에서 S2.7mm는 두께 2.7mm의 표준형 파형강판을 의미하고 L3.42mm는 두께 3.42mm의 대골형 파형강판을 의미한다. 그림을 통해 알 수 있듯이 부(-)아칭효과 발현시 암거 상단면에 작용하는 연직하중은 상재하중보다 크음을 알 수 있고 두 가지 파형강판 암거에 대하여 수치해석을 통해 구한 연직하중의 크기는 이론식에 의한 값과 상당히 유사함을 알 수 있다.

말뚝기초가 없는 경우와 있는 경우 부(-)아칭효과에 의해 암거의 상단면에 작용하는 연직하중을 수치해석을 통해 구하고 그 값들을 강성암거에 대한 이론식에 의한 값 및 상재하중과 비교하여 보았다. 비교결과는 그림 8과 그림 9에 나타나 있다. 그림 9에서 강성암거(rigid culvert)에 대한 연직하중은 그림 8에서와 같이 말뚝기초가 없는 경우에 대한 값이다.

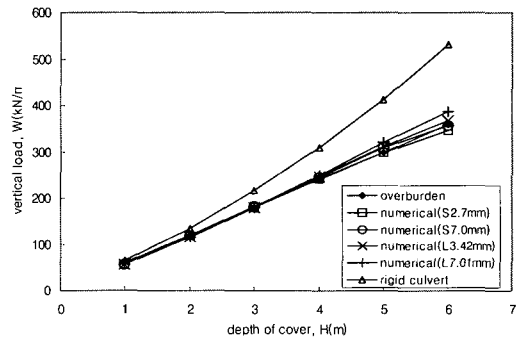


그림 8. 연직하중의 비교(말뚝기초가 없는 경우)

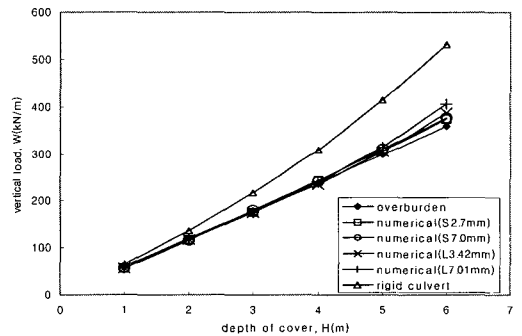


그림 9. 연직하중의 비교(말뚝기초가 있는 경우)

그림 8에서 S2.7mm 표준 파형강판의 경우 해석을 통해 구한 연직하중값이 상재하중보다 작는데 이는 부아칭효과에 따라 강판의 연직방향 변형량도 충분히 크게 발생하여 나타난 결과로 판단된다.

그림 8과 그림 9를 통해 알 수 있듯이 말뚝기초의 유무에 관계없이 수치해석을 통해 구한 연직하중값은 상재하중의 크기와 유사함을 알 수 있고 강성암거에 작용하는 연직하중보다 작음을 알 수 있다. 다만, 토피고 5m와 6m에서는 암거의 단면2차 모멘트가 큰 대골형 파형강판 암거에 작용하는 연직하중이 표준형 파형강판 암거에 작용하는 연직하중보다 비슷하거나 큼을 알 수 있으며, 이로부터 토피고가 증가함에 따라 파형강판의 변형에 관계되는 단면2차 모멘트의 영향이 중요해짐을 알 수 있다. 말뚝기초로 지지되는 파형강판암거에 대한 수치해석값도 말뚝기초가 없는 경우의 값과 유사하다는 사실로부터 파형강판 암거에 작용하는 연직하중의 크기는 지지구조물의 강성 영향보다는 암거 자체의 강성에 주로 영향을 받는 것으로 보이나 토피고가 증가함에 따라 지지구조물의 강성이 점차 연직하중에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 3. 결론

현재 국내에서 생산되고 있는 표준형 파형강판 2종류, 대골형 파형강판 2종류에 대하여 부(-)아칭효과 발현 시 파형강판 암거에 작용하는 연직하중을 토피고를 1m에서 6m까지 1m씩 증가시켜 수치해석을 통해 구해보았다. 수치해석을 통해 유도된 결론은 다음과 같다.

- 1) 4종류의 파형강판 암거의 강성을 증대시켜 강성암거로 모사한 다음 수행한 수치해석결과를 통해 구한 암거 상단면의 연직하중값은 이론식에 의한 연직하중값과 상당히 유사하였다. 이로부터 본 연구에서 고려한 수치해석에서 소성영역의 확산양상을 통해 파형강판 암거의 상단면에 작용하는 연직하중을 예측하는 접근방식의 신뢰성을 어느정도 확신할 수 있었다.
- 2) 수치해석결과를 통해 볼 때 돌출형으로 파형강판 암거를 설치하더라도 부(-)아칭효과에 의해 암거 상단면에 작용하는 연직하중의 크기는 대체로 상재하중과 거의 유사함을 알 수 있었으며, 지간의 2배 정도 이상의 토피고에 대해서는 본 수치해석 결과에 따르면 상재하중보다 약 8%정도 큰 연직하중이 예상되므로 설계에 있어 주의할 필요가 있다.
- 3) 말뚝기초로 지지되는 파형강판 암거에 있어서 부(-)아칭효과 발현 시 수치해석을 통해 구한 연직하중값은 지간의 2배 정도 이하의 토피고에 있어서는 말뚝기초가 없는 경우와 거의 비슷한 값을 보였으며, 그 이상의 토피고에 대해서는 지지구조물의 영향을 받아 말뚝기초가 없는 경우보다 약간 크게 나타났고 이러한 경향은 파형강판의 휨강성이 클수록 뚜렷하였다.
- 4) 본 연구를 통해 유도된 결론은 한정된 수치해석결과를 통해 유도된 것으로 향후 다양한 매개변수연구와 현장 실측시험을 통해 좀 더 명확한 연직하중결정이 가능하리라 판단된다.

### 참고문헌

- [1] 포항산업과학연구원(1998), 파형강판 지중 암거의 설계와 시공
- [2] 한국전산구조공학회(2002), 파형강판의 파형방향 인장시험
- [3] 서울대학교, 한국도로공사(2003), 지중강판 구조물 토피지만 해석에 대한 연구
- [4] 포항산업과학연구원(2004), 대골형 파형강판 BO X CULVERT 성능실험 및 해석
- [5] 한양대학교(2005), 파형강판의 개착식 터널 적용을 위한 실용화 연구
- [6] Hafez, H. H., and Abdel-Sayed, G. (1983), Soil Failure in Shallow Covers above Flexible Conduit, Canadian Journal of Civil Engineering, 10(4), pp.654-661.
- [7] 日本 地盤工學會(1997), 콜게-토메탈칼바ト、マニュアル
- [8] A National Standard of Canada(2000), Canadian Highway Bridge Design Code
- [9] AASHTO(2001), LRFD Bridge Design Specifications, 2001 Interim Revisions, SI Units, Sect.10(Foundations), Sect.12(Buried Structures and Tunnel Liners)
- [10] P.S. Bulson(1985), Buried Structures, pp.58, Chapman and Hall
- [11] ZSOIL User Manual(2001), Zace Services Ltd.

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

김 병 일(Byoung-II Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학