

개착식 터널에서 파형강판 라이닝의 해석 기법 평가 Evaluation of Analysis Code of Corrugated Steel Plate Lining in Cut-and-Cover Tunnel

김정호¹⁾, Jung-Ho Kim, 김낙영²⁾, Nak-Young Kim, 이용준³⁾, Yong-Jun Lee, 이승호⁴⁾, Seung-Ho Lee, 황영철⁴⁾, Young-Chul Hwang, 조철신⁵⁾, Chul-Shin Cho, 정형식⁶⁾, Hyung-Sik Chung

¹⁾ SK건설 토목기술팀 과장, Manager, Civil Engineering Team, SK Engineering & Construction

²⁾ 한국도로공사 도로교통기술원 지반연구그룹 책임연구원, Chief Researcher, Geotechnical Engrg. Division, Highway & Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation

³⁾ 포스코건설 기술연구소 차장, Deputy General Manager, POSCO Engineering & Construction

⁴⁾ 상지대학교 건설시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Sangji Univ.

⁵⁾ 평산에스아이 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, RND Team, Pyungsan SI

⁶⁾ 한양대학교 토목공학과 대우교수, Emeritus Professor, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.

개요(SYNOPSIS) : Most tunnel lining material which has been used in the domestic is a concrete. But many problems as the construction period, the cost, and the crack occurrence for the design, construction, and management were happened in the concrete lining.

For this reason, many research institutes like the Korea Highway Corporation recognize the necessity of an alternate material development and grow on the interest for that.

So in this study, the behaviour characteristics for the application of the Corrugated Steel Plate Lining in cut-and-cover tunnel are evaluated as several conditions for the backfill height, the cutting slope, and the relative density of backfill soil are changed.

In addition, through using that conditions, CHBDC(2000, Canadian Highway Bridge Design Code) is evaluated if it could be applied to the design by comparing with the numerical analysis results.

As the behaviour characteristics of the Corrugated Steel Plate Lining by CHBDC and the static numerical analysis are analyzed, both the methods show the same linear increases of the compressive stress according to the increase of the backfill height.

The CHBDC of the dead load condition has very similar tendency by comparing with the result of the static numerical analysis.

주요어(Key words) : corrugated steel plate, cut-and-cover tunnel, CHBDC, finite element analysis

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

산악지형이 많은 국내의 지형적 여건상 고속도로 및 고속철도의 확충 과정에서 유리한 선형의 확보와 친환경적인 요구에 따라 터널 건설이 증가하는 추세이지만, 국내 터널 라이닝의 설계는 일률적인 관행들을 답습해 오고 있으며, 새로운 라이닝 대체 재료의 개발을 소홀히 하고 있는 실정이다.

국내에서 사용되고 있는 기존의 터널 라이닝으로서 주를 이루고 있는 콘크리트 라이닝은 설계, 시공,

유지관리 측면에서 공사기간, 공사비, 균열발생 등 많은 문제점들이 발생하고 있으며, 최근 한국도로공사 등의 연구기관에서는 기존의 라이닝 대체 재료 개발의 필요성을 인식하고 파형강판의 개착식터널 적용성에 관한 관심이 증가되고 있다.

파형강판 지중구조물의 해석방법으로는 CHBDC(2000, Canadian Highway Bridge Design Code), AASHTO 도로교표준시방서의 허용응력설계법과 강도설계법(1996) 및 LRFD설계법(1998), AISI의 간편법(1994), 일본지반공학회 매뉴얼(1997) 등의 방법이 있으나, 본 논문에서는 국내외에서 장스팬 파형강판 지중구조물에서 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 CHBDC(2000)의 해석방법을 이용하였으며 동일 조건의 유한요소해석을 수행하여 해석법에 대한 평가를 수행하였다.

1.2 연구내용 및 방법

개착식 터널에서 파형강판 라이닝의 해석기법을 평가하기 위하여 본 논문에서는 고속도로 2차로 산악 터널의 개착구간에 적용되는 단면을 기준으로 하였다. 이를 위하여 개착터널의 토피고와 개착사면의 경사 등의 조건을 다음과 같이 선정하였다.

일반적인 산악 도로터널의 개착구간의 토피고는 터널직경(D)의 1.0배(1.0D) 정도이며 이러한 조건들을 모사하기 위하여 파형강판 구조물의 최소 토피고(본 논문에서는 편의상 0.0D라고 칭하였음)까지 되메움 토사를 시공하였을 경우, 터널 직경의 0.5배(0.5D) 되는 위치까지 되메움 토사를 시공하였을 경우, 터널 직경의 1.0배(1.0D)까지 되메움 토사를 시공하였을 경우에 대한 거동 특성을 분석하였다. 개착사면의 경사는 1:0.0, 1:0.6, 1:1.6인 경우에 대하여 해석기법 평가를 수행하였다.

위와 같은 조건들을 이용하여 CHBDC에서 적용하는 안정성 검토 방법과 유한요소해석(해석프로그램 CANDE89)에 의한 해석결과를 비교, 검토 하였으며, 이를 토대로 국내에서 파형강판을 개착식 터널 라이닝으로 적용하였을 경우 기존에 준용해오던 CHBDC에 의한 해석기법을 평가하고자 하였다.

2. 해석 단면의 선정

2.1 파형강판의 규격 및 성질

파형강판은 일정규격의 파형(Corrugation)을 성형하고 원주방향에 볼트구멍을 펀치한 후 강재의 부식 방지를 위해 강판의 양면에 KS 기준에 맞게 용융아연도금을 하여 생산한다. 파형강판은 대골형 파형강판과 표준형 파형강판으로 구분되며(표 1), 형상은 그림 1에서 보는 바와 같이 피치(Pitch)와 골(Depth) 및 굽힘 반지름(Radius)으로 구성된 두께 2.7~7.0mm의 강판이다.

본 논문에서는 두께 7.01mm의 대골형 파형강판을 사용하였다.

개착식 터널에서 적용될 파형강판 라이닝의 단면은 EC(Encased Concrete) Rib 보강 단면으로서 EC 합성보강 파형강판은 그림 2에 나타난 바와 같이 본 구조체의 파형강판과 정반대로 파형강판을 보강한 뒤, 구조물의 축강성을 증대시키기 위해서 두 파형강판 사이의 공간을 콘크리트로 채운다. 여기서 본 구조체 파형강판의 2피치를 둘러싸도록 보강 파형강판을 설치하며, 이렇게 보강되는 파형강판의 중심 간격은 762mm, 1143mm, 1524mm의 3가지 종류로 구분된다. 이러한 EC 합성보강재를 설치함으로써 파형강판 구조물의 지간을 약 20m 내외로 확장할 수 있으며, 시공되는 토피고 범위에 대한 제약을 극복할 수 있다. 또한, 연성의 파형강판 구조물에 콘크리트를 타입 함으로서 뒷채움 시공 시 구조물의 변위를 억제할 수 있고, 강재소모량을 줄일 수 있기 때문에 경제적인 잇점도 갖고 있다.

본 연구에서 그림 2의 파형강판 라이닝을 적용하기 위한 터널 단면은 그림 3에서 보는 바와 같이 직경이 12m인 반원형 아치형으로서 고속도로 2차로 도로터널을 기준으로 하였다.

표 1. 표준형 및 대골형 파형강판의 파형규격 (2002, 한국도로공사)

종류	두께 (t)	골의 피치 (p)	골의 깊이 (d)	굽힘 반지름 (r)
표준형	2.7	150mm	50mm	28mm
대골형	~7.0 mm	380mm	140mm	76mm

* 강판의 두께는 도금 전을 기준으로 함
 * 피치와 깊이의 허용오차는 $\pm 3\text{mm}$ (지중강판구조물 설계 및 시공지침, 한국도로공사)

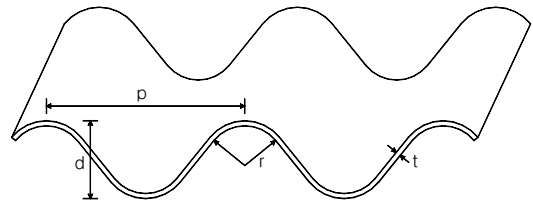


그림 1. 파형강판의 구성

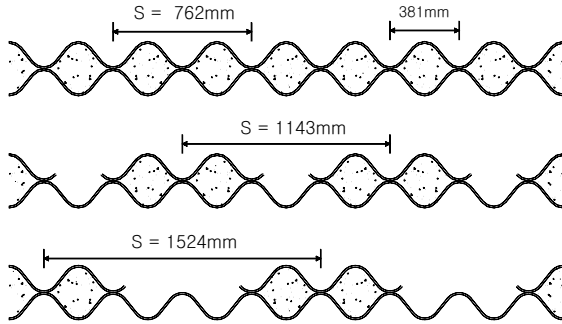


그림 2. EC-Rib 보강 단면

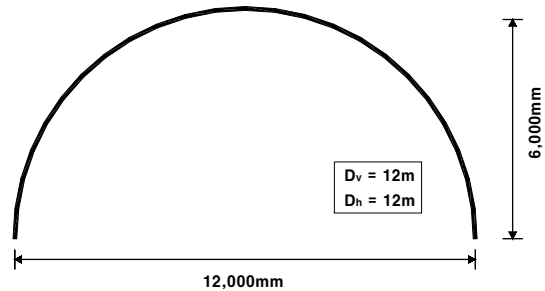


그림 3. 개착식 터널 라이닝 단면 규격

2.2 등가단면의 계산

EC Rib 보강 파형강판 단면은 합성 단면이므로 구조물 해석시 등가단면으로 환산하여 입력치로 선정하여야 한다. 합성보강구조물의 등가단면의 계산방법으로는 캐나다에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 누가단면(Cumulative section), 전유효단면(Fully effective section), 세정단면(Washed section)이 있다. 그림 4에 도시된 바와 같이 누가단면의 경우 도심 축을 본 구조체에 파형강판과 보강되는 파형강판의 이음부를 연장한 직선으로 가정하며 전유효단면의 경우 계산을 통해 결정한다. 또한 세정단면의 경우 보강역의 도심 축은 누가단면의 경우와 동일하게 사용하고, 비보강역의 도심 축을 본 구조체 파형강판의 도심 축을 적용한다. 이러한 3가지 단면에서 결정된 도심 축으로부터 각 단면성질은 식 1 과 같이 구할 수 있다. 즉, 보강역의 단면성질과 비보강역의 단면성질의 산술적인 합을 보강재의 간격 (s)으로 나누어서 계산한다. 이는 보강재 간격(s)내에서 보강역과 비보강역의 단면성질의 합을 등분포시키는 것을 의미한다. 이때, 압축력에 저항하는 EC 합성보강재의 등가단면은 강제부분과 콘크리트부분을 모두 고려하며 휨모멘트에 저항하는 EC 합성보강재의 등가단면은 강제부분을 고려한다.

본 논문에서는 강제 부분과 콘크리트 부분을 모두 엄밀히 고려하여 도심축을 결정하는 전유효 단면법에 의해 계산된 단면계수를 사용하였으며 계산된 등가단면의 성질은 표 2와 같다.

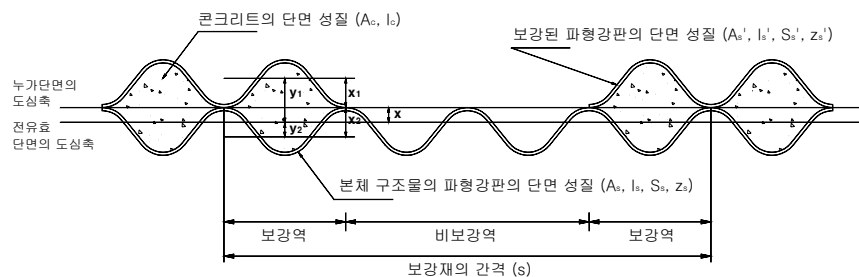


그림 4. 2피치로 보강된 EC합성보강재의 종단면 (s = 1524mm 의 예)

$$\text{등가단면의 성질} = \frac{\text{보강역의 단면성질} + \text{비보강역의 단면성질}}{\text{보강재의간격}(s)} \quad (1)$$

표 2. 등가단면에 의해 계산된 단면 성질

보강 여부	보강간격	등가 단면적 mm^2/mm	등가단면2차모멘트 mm^4/mm	등가회전반경 mm/mm	등가소성단면계수 mm^3/mm	
무보강	-	Steel	9.81	24,164.6	49.64	308.24
		Conc.	-	-	-	-
EC Rib 보강	1524	Steel	14.71	100,325.8	82.58	915.41
		Conc.	68.43	295,000.0	65.66	3,685.20
	1143	Steel	16.35	117,169.1	84.66	1,098.50
		Conc.	91.23	391,000.0	65.47	4,913.60
	762	Steel	19.62	144,447.6	85.81	1,373.12
		Conc.	136.85	587,000.0	65.49	7,370.40

2.3 구조물 형상 및 제반 특성

2.3.1 구조물의 단면 특성 및 입력 제원

CHBDC에 의한 파형강판에 작용하는 압축력을 계산하기 위해 본 연구에서 적용한 파형강판 단면은 직경 12m의 반원 아치형이며, 본 단면에서 구조물의 형상 값은 그림 5를 참조하여 구하면 다음의 표 3과 같이 D_h 와 D_v 는 12.0m이며 곡률반경(R)과 정점부에서의 곡률반경(R_c)은 6.0m이다. 또한 파형강판 구조물의 단면 물성치로는 탄성계수(E)는 $2.1 \times 10^7 \text{kgf/cm}^2$, 항복강도(f_y)는 285MPa ($2,906 \text{kgf/cm}^2$), 메인강판과 보강강판의 두께(t) 7.01mm를 적용하였으며, 국내 지방에서는 지중에 설치되는 파형강판에 대한 강도 감소계수에 대한 규정이 없으므로 표 4의 CHBDC를 이용하였다.

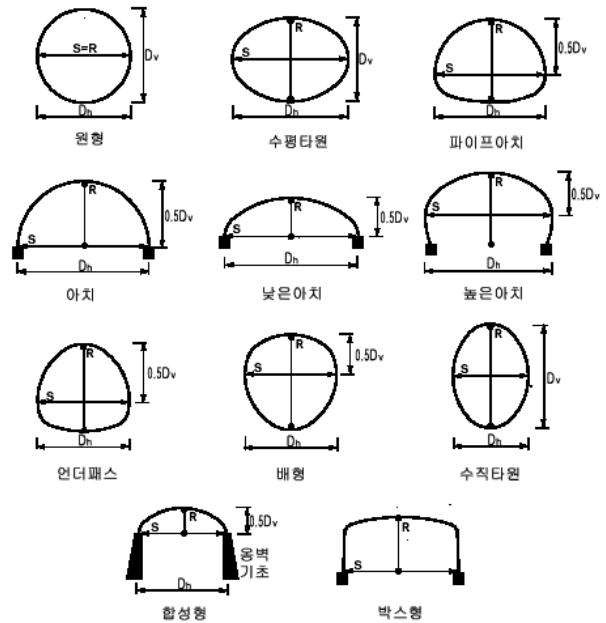


그림 5. 구조물의 지간(D_h)과 높이(D_v)의 정의

표 3. 파형강판 형상 및 제원

구분	형상 및 제원
D_h 와 D_v	12.0m
R, R_c	6.0m
탄성계수 (E)	$2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$
항복강도 (f_y)	285MPa ($2,906 \text{kg/cm}^2$)
두께 (t)	7.01mm

표 4. 강도감소계수(CHBDC, 2000)

구분	강도감소계수
Compressive Strength (ϕ_t)	0.80
Plastic Hinge (ϕ_h)	0.70
Connection (ϕ_j)	0.67

2.3.2 뒷채움 흙 제원

뒷채움 흙의 가장 대표적인 예는 흙 재료의 선정기준과 다짐규정에 따라 표 5에 나타난 Duncan(1970)의 쌍곡선 모델(Hyperbolic model)이다. 이는 80여 종류의 뒷채움 흙에 대해 3축 압축 시험을 수행하여 도출한 비선형적인 응력-변형률 관계로부터 탄성계수(E_t) 및 벌크계수(B)를 식 2~3과 같이 쌍곡선 함수의 형태로 근사화한 것이다. 이러한 쌍곡선 모델의 탄성계수와 벌크계수는 뒷채움 흙의 응력상태(σ_1, σ_3)에 따라 그 값이 달라지는 특성을 갖고 있으므로, 뒷채움 시공과정에 따른 지반의 강성변화와 지반-구조물 상호작용을 적절히 고려할 수 있는 모델이라고 할 수 있고 쌍곡선 함수는 5개의 선형 매개변수(K, n, R_f, K_b, m)로 구성되어있다.

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

$$B = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (3)$$

여기서, K_b 는 체적변형계수 정수, m 은 체적변형계수 지수, P_a 는 대기압, K 는 변형계수 정수, n 은 변형계수 지수이고 R_f 는 파괴비이다.

본 연구에서는 국내·외의 뒷채움 흙 선정 기준과 다짐규정에 의거하여 표 5에 나타난 것과 같은 선형 매개변수를 갖는 Duncan의 쌍곡선모델의 분류에 따른 모델 중에서 “지중강관구조물 설계 및 시공지침 (한국도로공사 2001)”에서 제시된 다짐도 95%의 GW, GP, SW, SP에 해당하는 재료로 모델링 하였다.

표 5. Hyperbolic 모델에서 통일분류법에 따른 흙의 특성치(Duncan et al., 1980)

Unified Classification	RC Stand. AASHTO	γ_m (k/ft ³)	ϕ (°)	$\Delta\phi$ (°)	C (k/ft ²)	K	n	R_f	K_b	m
GW, GP 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

2.3.3 구조물에 작용하는 하중

구조물에 작용하는 하중을 산정하기 위한 기본 입력치는 표 6과 같으며, 본 연구에서는 하중을 재하시키기 위하여 토피고를 0.0D(=1.5m), 0.5D(=6.0m) 및 1.0D(=12.0m)까지 변화시키면서 구조물에 하중을 작용시켰다. 이와 같이 토피고를 선정한 이유는 일반적인 고속도로터널의 경우 터널 직경(D)의 1.0배까지 개착을 한 후 본선터널을 시공하기 때문에 개착부 터널의 토피고는 0.0D~1.0D의 범위를 갖기 때문이다. 또한, 뒷채움 흙의 상대다짐도는 90%~95%이며, 이에 해당하는 뒷채움 흙의 활선탄성계수는 12.0MPa의 조건에 대해서 계산하였다. 본 조건에 해당하는 뒷채움 흙의 단위중량은 표 5에서의 Duncan 모델에 의하여 2.24tonf/m³(21.97kN/m³)을 적용시켰다. 0.0D 조건에서 토피고를 0.0m가 아닌 1.5m를 적용시킨 이유는 본 해석에 적용한 파형강관 라이닝(반원아치형, 직경 12m)의 최소토피고가 1.5m이기 때문이다.

표 6. 구조물에 작용하는 하중 계산을 위한 산정 값

구분	형상 및 재원
토피고	0.0D (=1.5m), 0.5D (=6.0m), 1.0D (=12.0m)
뒷채움 흙의 상대다짐도	90%~95%
뒷채움 흙의 할선탄성계수	12.0 MPa
뒷채움 흙의 단위중량	21.97 kN/m ³

3. 유한요소해석 모델링

3.1 해석프로그램

모델링에 사용한 해석프로그램인 CANDE는 미국교통연구위원회(Transportation Research Board)에서 지중 구조물 해석을 위해 개발한 프로그램으로서 시공단계에 따라 구조물의 응력과 변위를 해석하여 연성 구조물의 취약 부분인 시공 중 변위에 의한 안전성을 평가할 수 있으며, 주변 지반의 토피고가 증가하면 응력의 변화에 따라 지반의 강성(E_s)을 변화 시키는 Duncan의 Hyperbolic 모델을 사용하므로 시공 단계에 따른 지반-구조물의 상호작용을 구현할 수 있다.

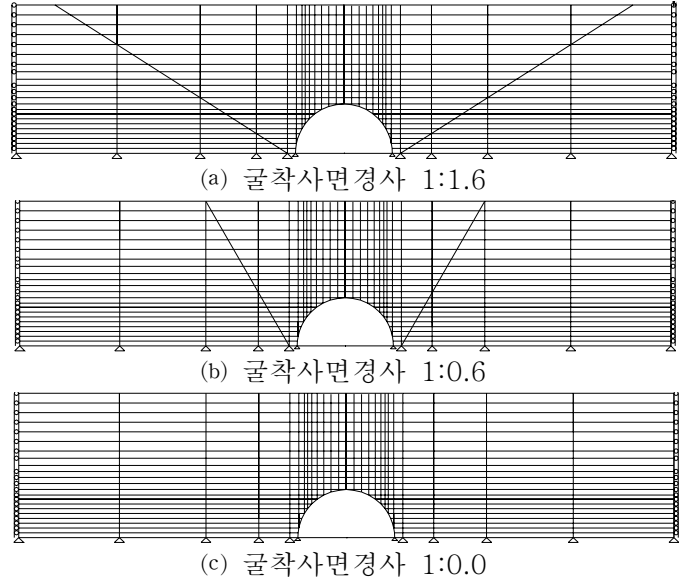


그림 6. 유한요소해석(CANDE 89) 망

3.2 수치해석 모델링

파형강판 라이닝의 정적 안정성 및 거동특성을 분석하고자 다음의 그림 6과 같은 흙-구조물 합성 구조계의 유한요소 망을 이용하였으며, 현장 조건의 시공과정을 모사하기 위하여 표 7과 같이 총 24단계의 성토단계로 모델링 하였다.

표 7. 성토단계 모델링

시공단계	뒷채움 높이	비고
1	터널 거치	
12	터널 천단부까지 뒷채움	
14	최소토피고까지 뒷채움	0.0D
19	0.5D까지 뒷채움	0.5D
24	1.0D까지 뒷채움	1.0D

4. CHBDC(2000)와 수치해석(CANDE 89)의 해석결과 비교

4.1 압축응력

CHBDC에 의해 계산된 압축응력과 수치해석(CANDE 89)에 의해 계산된 압축응력을 비교한 결과 CHBDC에 의해 계산된 결과가 수치해석 결과에 비해 다소 보수적인 값을 나타냈다(그림 7 참조).

토피고가 증가함에 따라 CHBDC와 수치해석 결과의 차이는 점점 증가하는 추세를 나타냈으나 굴착경사가 완만해짐에 따라서 두 가지 방법에 의해 구한 압축응력은 거의 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 CHBDC 규정이 굴착경사를 고려하지 못함에 기인한 것으로 판단되며, 굴착경사를 갖는 일반적인 개착식 터널에서 CHBDC에 의해 파형강판 라이닝을 설계한다면 보수적인 설계가 될 것으로 판단된다. 따라서 경제적인 설계를 위해서는 원지반의 굴착경사를 고려한 수치해석을 수행하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

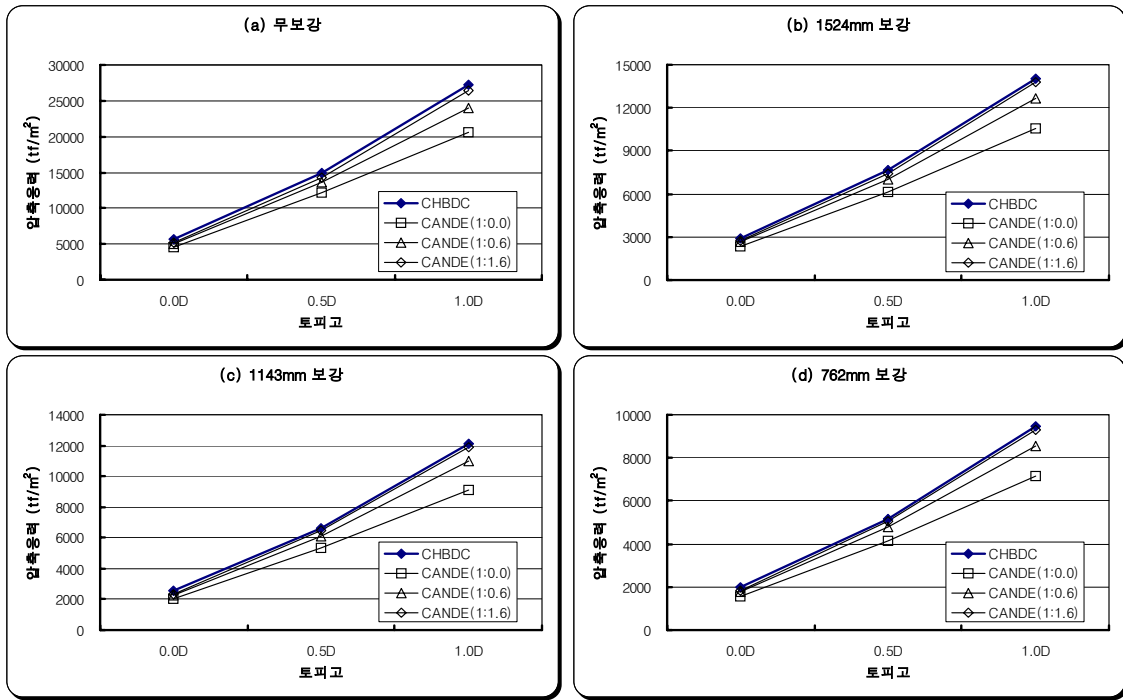


그림 7 토피고에 따른 CHBDC와 수치해석(CANDE89)의 압축응력 해석결과 비교

4.2 이음부 압력

CHBDC에 의해 계산된 압축응력과 수치해석(CANDE 89)에 의해 계산된 이음부에 작용하는 압력을 비교한 결과 다음의 그림 8과 같다.

과형강관의 이음부에 작용하는 압력은 압축응력에 단면적을 곱하여 구한 값이므로 본 이음부의 거동 특성은 압축응력의 거동 특성과 동일한 경향을 나타내었다.

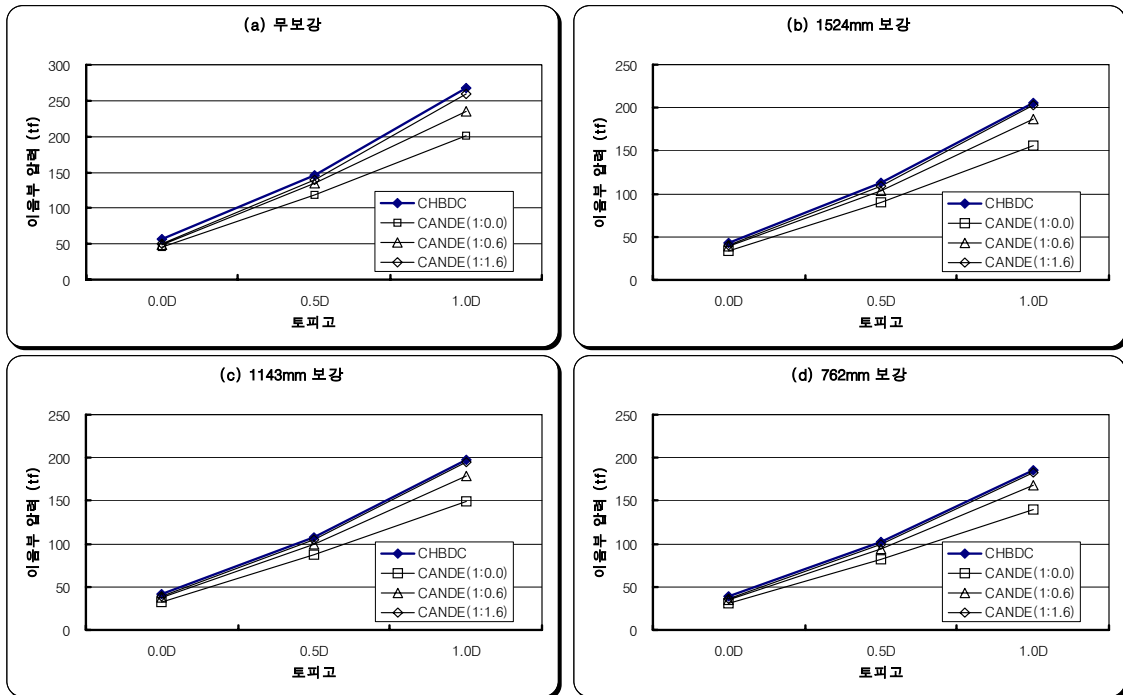


그림 8. 토피고에 따른 CHBDC와 수치해석(CANDE89)의 이음부압력 해석결과 비교

6. 결론

국내외적으로 장스팬 파형강판의 설계에 가장 많이 사용하고 있는 CHBDC(2000)의 방법과 유한요소 해석을 수행하여 파형강판 라이닝의 해석법으로서 CHBDC(2000)의 적용성을 평가한 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) CHBDC(2000)와 유한요소해석에 의한 파형강판 라이닝의 거동 특성을 분석한 결과, 두 가지 방법 모두 토피고 증가에 따라 압축응력과 이음부압력은 선형적으로 증가하는 동일한 경향을 나타냈다.
- (2) CHBDC(2000)와 유한요소해석 결과를 비교한 결과 매우 유사한 경향을 나타냈으며 원지반 굴착경사가 완만해질수록 두 가지 방법으로 구한 결과는 거의 일치하는 결과를 보였다. 이는 CHBDC(2000)가 굴착경사를 고려하지 못하기 때문인 것으로 판단되며, 원지반 굴착경사를 고려한 수치해석적인 방법보다는 CHBDC(2000)의 방법이 다소 보수적인 값을 나타냈으므로 경제적인 설계를 요할 때에는 수치해석적인 방법에 대한 안정성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- (3) 본 논문의 연구범위는 뒷채움에 의한 사하중의 영향만을 고려하여 CHBDC(2000)를 평가하였으므로 향후 설계에 이용할 경우 내진설계에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 김정호(2004), “개착식 터널에서 파형강판 라이닝의 거동 특성에 관한 연구”, 한양대학교 박사학위논문
2. 서울대학교(2001), “지중강판 구조물 실용화 연구보고서”, pp.1~143.
3. 이종구(2003), “지중강판 구조물 설계기준의 적용성 평가”, 서울대학교 박사학위논문
4. 조성민, M.Wilson(2000), “대단면 파형강판을 이용한 아치형 지중강판교의 해석과 설계”, 대한토목학회 2000년 학술발표회 논문집(II)
5. 포항산업과학연구원, 평산에스아이(주)(1998), “장스팬 파형강판 구조물 설계 및 시공”
6. 한국건설기술연구원(2000), “파형강판의 설계기준 및 시공지침에 관한 연구”, pp.67~124
7. 한국건설기술연구원(2001), “장스팬 파형강판 구조물의 효율적 설계·시공을 위한 표준화 및 시공방안 연구”, pp.1~91.
8. 한국도로공사(2001), “지중강판구조물 설계 및 시공 지침(안)”
9. 社團法人 地盤工學會(1997), “コルヴァートメタルバートマニュアル”, 第3回 改訂版
10. AASHTO (1996), "Standard Specification of Highway Bridges", 16th Ed., Div.I-Sect.12 (Corrugated Metal Structure Interaction Systems), Div.II-Sect.26(Metal Culverts)
11. Abdel-Sayed, G., Bakht, B., and Jaeger, L.G(1993), "Soil-Steel Bridge : Design and Construction"
12. AISI(1994), "Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products"
13. Canadian Standard Association(2000), “Canadian Highway Bridge Design Code(CHBDC)”, Ministry of Transportation of Canada.
14. Duncan, J. M.(1979), " Behavior and Design of Long-Span Metal Culverts, Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 105, No. 3, pp.399~417