

## 지중강판 박스구조물을 위한 파형강판 해석 모델

## Analysis Model of Corrugated Steel Plates for Soil-Metal Box Culverts

최 동 호<sup>†</sup> · 이 종 선<sup>1)</sup> · 나 호 성<sup>2)</sup>

Choi, Dongho · Lee, Jongsun · Na, Hosung

**ABSTRACT** : In this paper, a 3-dimensional stiffened plate model for soil-metal box structures is proposed. 3-dimensional stiffened plate model is enable to model corrugated steel plates of soil metal box culverts considering section modulus and section properties of longitudinal and horizontal direction from a corrugated steel plate. Loading conditions which causes maximum displacement and maximum moment according to the step construction stages(a back filling to the top of the plate, a back filling to the maximum depth of cover, and loading of live loads) was applied and the behaviors of the soil metal box culverts was analyzed. Analysis results of 3-dimensional stiffened model were compared with those of 2-dimensional model, 3-dimensional equivalent plate model and 3-dimensional corrugated plate model. As results, the behaviors of 2-dimensional model and 3 dimensional equivalent model are different from 3-dimensional corrugated plate model but the result of 3-dimensional stiffened model has good agreement with that of 3-dimensional corrugated plate model.

**Keywords** : Corrugated plate, Box culvert, 2-dimensional model, 3-dimensional stiffened model

**요 지** : 본 연구에서는 지간 15m 이하의 지중파형강판 박스구조물의 3차원 해석 시 적용 가능한 3차원 보강판 모델을 제안하고 검증하였다. 3차원 보강판 모델은 실제 파형강판의 단면계수와 종방향과 길이방향의 단면특성을 고려하여 지중강판 박스구조물을 모델링함으로써, 3차원 해석 시 모델링을 간편하게 하고 해석시간을 단축할 수 있는 유용한 해석 모델이다. 이 모델을 검증하기 위해 3단계의 시공과정(정점부까지의 뒷채움, 토피고까지의 뒷채움, 활하중재하)에 따른 거동분석으로부터 최대 변위와 최대모멘트를 유발하는 재하상태를 도출하였고, 제안된 단면을 통해 파형강판의 거동을 분석하였다. 분석 결과를 3차원 등가판 모델, 2차원 모델, 실제파형강판 구조물과 동일하게 모델링한 3차원 Corrugated 판 모델과 비교 검증하였다. 해석결과 2차원 모델과 3차원 등가판 모델은 활하중 조건에서 3차원 Corrugated 판 모델과 큰 차이를 나타내었으나, 3차원 보강판 모델은 모든 해석 결과에서 3차원 Corrugated 판 모델과 일치하는 결과를 나타내었다.

**주요어** : 파형강판, 지중강판 박스구조물, 2차원 모델, 3차원 보강판 모델

## 1. 서 론

과거에 시공되었던 파형강판 구조물은 실험적인 결과에 의존하여 설계되었다. 지속적인 파형강판 구조물 연구의 증가로 Duncan 등(1985)은 지간이 2.7m~7.7m인 알루미늄 박스구조물에 대한 설계식을 제안하였다. 이후 Boulanger 등(1989)은 현장계측과 유한요소 해석을 통해 Duncan 등(1985)이 제안한 설계식에 대한 검토를 수행하였고, 최동호 등(2006)은 지간이 12m까지 확장된 설계식을 제안하였다. McCavour 등(1998)은 두개의 구조물에 대하여 구조물의 계측값과 수치해석을 비교하여 Rib 보강과 EC-Rib 보강재를 평가하였다. 지중강판 구조물의 3차원 거동은 파형강판의 형상 모사 문제와 활하중에 의한 영향을 중심으로 여러 연구가 진행되고 있다. 선형탄성에 의한 파형강판의 거동문제

는 1960년대부터 많은 연구자들에 의해 연구되어졌으며, 1960년대 후반에는 파형강판의 절곡에 따른 해석의 불편함을 줄이기 위해서 파형강판을 등가의 판요소로 치환하여 해석하였다. 그러나 이러한 방법은 파형강판의 면내 거동을 무시한 것으로 정확한 거동을 표현하는데 한계성을 지녔다. Davis(1977)는 격벽에 대한 전단거동을 파악하기 위해 파형강판을 등가의 평면 응력 요소를 사용하여 면내 거동에 대한 연구를 수행하였고, Mang 등(1976)은 유한요소법으로 등가의 직교이방성판을 이용한 파형강판의 안정성 문제를 해석하였다. 또한 Zhang 등(2005)은 대골형 강판을 형상 그대로 전체적으로 모사한 경우와 이방성 요소로 모사한 경우에 대하여 동일한 하중을 가한 상태에서 변위값이 일치하도록 하여 이방성 요소에 필요한 입력정수를 산정하여 해석을 수행하였다. Machelski 등(2004)은 이론적인 식을 통하여 이

† 정회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : samga@hanyang.ac.kr)

1) 비회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 박사과정

2) 비회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 박사과정

방성 요소에 필요한 입력정수를 산출하여 해석했으나, 이러한 이방성 요소를 이용한 방법은 x방향과 y방향으로 단면특성이 다른 특징을 탄성계수와 포와송비의 변화만으로 구현하기 어려운 단점이 있다. 또한 EI-Sawy(2003)은 등가판 요소의 두께와 탄성계수를 고려하여 파형강판을 등방성 판요소로 해석하였다. 하지만 앞에 언급한 방법들은 파형강판 구조물의 거동을 정확히 모사하지 못하였다.

본 연구에서는 파형강판 2차원 해석방법이 사하중 상태에서는 3차원 해석방법과 비교적 근사한 거동을 나타내지만 활하중 재하 시 구조물 횡방향 하중 분포를 고려하지 못하여 활하중 모멘트를 과대평가하는 문제점을 확인하고, 3차원 해석이 필요함을 검증하였다. 하지만 지금까지의 3차원 해석은 실제 파형강판을 정밀하게 모델링하는 것이 복잡하여 등가판 요소를 주로 사용하였다. 이는 단면이차모멘트만 반영된 두께를 사용하므로 실제 파형강판의 두께보다 과대한 두께가 적용되어 실제 구조물의 거동을 예측하기에 부적합한 해석 방법이다. 따라서, 본 연구에서는 전술한 한계점을 극복하고자 실제 파형강판의 단면성질을 만족하는 합리적인 해석방법으로 3차원 보강판 모델을 제안하고 실제 파형강판과 동일하게 모델링한 3차원 Corrugated 판 모델과 비교 검증하였다.

## 2. 지중강판 박스 구조물

지중강판 구조물은 지반-구조물 합성구조 시스템으로 그림 1과 같이 2.7~7mm 두께의 파형강판과 뒷채움 흙으로 구성되어 있다. 얇은 두께의 강판을 파형의 모양으로 성형하여 제작한 것으로 일정한 두께를 갖는 일반 강판에 비해



그림 1. 지중강판 박스구조물

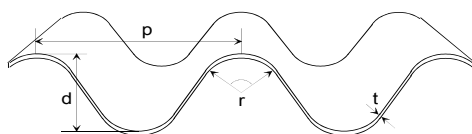


그림 2. 파형강판의 단면

단면적과 단면이차모멘트가 증대된 특성을 가지고 있다. 따라서, 휨모멘트 및 축력에 대해 우수한 저항성능을 확보할 수 있다. 파형강판은 골의 폭(pitch)과 깊이(depth)에 따라 그림 2와 같은 형상으로 성형되며, 표준형(150mm×50mm)과 대골형(381mm×140mm) 강판으로 구분된다. 일반적으로 장지간 파형강판 구조물의 경우 대골형 강판이 적용된다. 대골형 강판의 단면성질을 표 1에 나타내었다.

지중강판 박스구조물은 CHDBC(2000)에서 그림 3과 같은 형상으로 나타낸다. CHDBC(2000)에서의 지중강판 박스 구조물의 기하상세와 한계를 표 2와 같이 나타내고 있다. 지중강판 박스구조물은 정점부, 현치부, 측벽부의 세 개의 구성요소와 보강재로 이루어져 있다.

## 3. 모델링 기법

### 3.1 기존 2차원 해석기법

파형강판 박스형 교량에서 부재에 발생하는 단면력은 주로 휨모멘트이며 이를 산출하기 위하여 2차원 해석을 많이 수행하여 왔다. 파형강판 박스형 교량은 AASHTO(2002)나 CHDBC(2000)를 준용하여 설계하고 있는데 두 설계기준 모두 부재 휨모멘트 산정식은 Duncan 등(1985)이 제시한 산정식을 사용한다. Duncan 등(1985)의 산정식은 지간 8.0m 이하의 다양한 파형강판 박스형 교량에 대한 2차원 해석을 수행하고 그 결과를 통해 제시한 것이며 이는 설계할 때 마다 각각의 해석을 따로 수행해야 하는 번거로움을 돕

표 1. 대골형 강판의 단면성질

강판두께 t(mm)	단면적 A(cm <sup>2</sup> /m)	단면계수 S(cm <sup>3</sup> /m)	소성단면계수 Z(cm <sup>3</sup> /m)	단면 2차 모멘트 I(cm <sup>4</sup> /m)
7.01	98.08	308.24	437.85	2416.46

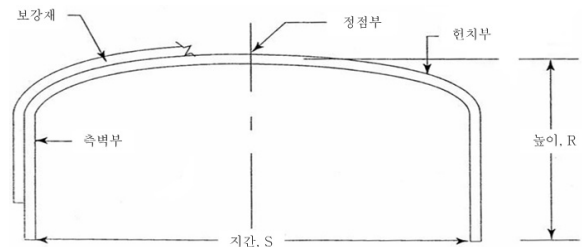


그림 3. CHDBC(2000) 지중강판 박스구조물의 형상

표 2. CHDBC(2000) 지중강판 박스구조물의 기하한계

항 목	최소값	최대값
구조물 높이(R)	0.8 m	3.2 m
구조물 지간(S)	2.7 m	8.0 m
토피고(H)	0.3 m	1.5 m

고자 수식화한 것이다.

### 3.1.1 모델링

파형강판의 가장 큰 특징은 파형으로 절곡하였기 때문에 단면적에 비하여 단면계수가 크다는 점이다. 2차원 해석에서는 파형강판을 그림 5와 같이 보요소로 모사하고 보요소의 입력 정수로서 단면적과 단면계수, 단면이차모멘트 등을 각각 파형강판의 특성에 맞는 값으로 입력한다. 대골형 파형강판의 경우 표 1에 정의된 단면 입력정수들을 사용한다. 구조물의 모델링 형상과 단면형상을 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었다.

2차원 해석은 기본적으로 평면변형을 해석이므로 차량 축하중을 등가의 선하중으로 모사한다. 등가선하중은 그림 6에 나타낸 바와 같이 차량 축하중(P)에 의하여 구조물 크라운부에 발생하는 연직토압이 등가선하중에 의하여 크라운부에 발생하는 연직토압과 동일하도록 산정하며 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$p_{eq} = \frac{3P}{4h} \quad (1)$$

여기서,  $h$ =상부토피고

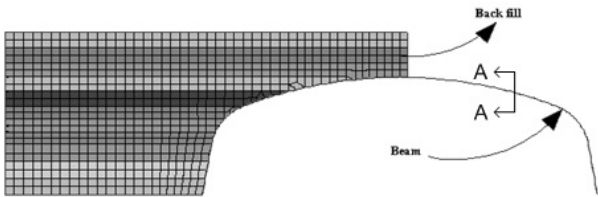


그림 4. 2차원 해석 시 구조물 형상

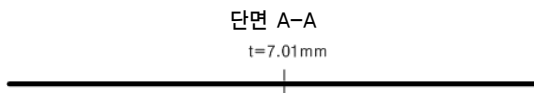


그림 5. 2차원 해석 시 파형강판 단면 형상

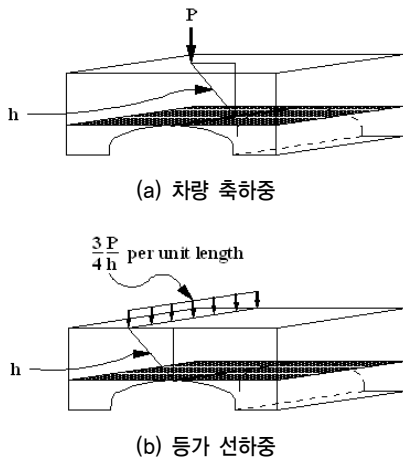


그림 6. 2차원 해석 시 등가 선하중 산정

### 3.1.2 2차원 활하중 해석의 문제점 및 대안

지간 8.0m 이상의 구조물은 2차원 해석을 하여 설계하고 있다. 그러나 해석 결과 단면력이 실제 계측결과와 보다 훨씬 큰 것으로 나타나 지나치게 보수적으로 설계하고 있는 것으로 밝혀졌다. 특히, 2차원 해석에 의한 활하중 모멘트 값은 실제 계측결과와 보다 5~10배 가량 큰 것으로 나타나 이에 대한 개선이 필요한 것으로 나타났다(최우람, 2008).

파형강판 구조물에서는 차량 활하중이 상부 토피지반에 의하여 분산되어 구조물에 작용한다. 이때 활하중의 분산은 그림 7에 나타낸 바와 같이 구조물 종방향 뿐만 아니라 길이방향으로도 발생하게 되는데 2차원 해석은 평면변형을 해석으로 등가 선하중을 적용하기 때문에 구조물 종방향의 분산만 고려할 수 있다. 따라서 2차원 활하중 해석은 차량 하중에 의한 부재 모멘트 및 처짐을 과대평가하고 있으며 이를 근본적으로 개선하기 위해서는 구조물 길이방향의 하중분산을 고려할 수 있는 3차원 해석기법이 필요하다. 3차원 해석에서는 차량 축하중을 점하중으로 모사하므로 자연스럽게 구조물 종방향 길이 및 길이방향으로 차량하중이 분산되는 것을 모사할 수 있다.

### 3.2 3차원 등가판 모델(3D equivalent plate)

3D 등가판 모델의 구조물 형상은 그림 8과 같다. 3차원 등가판 모델은 그림 9와 같이 실제 파형강판 구조물의 형상을 일정한 두께를 갖는 판으로 치환하여 모사하였다. 등가판 요소의 두께는 대골형 파형강판 단면 제원의 단면이차모멘트(I)를 기준으로 식 (2)를 통해 파형강판의 폭(p)을 단위 길이로 하여 등가판 요소의 두께를 산정하였으며, 치환된 등가판의 탄성계수는 식 (3)을 통해 산정하였다. 표 3에 치환된 등가판의 두께와 탄성계수를 나타내었다. 계산 결과, 등가판의 탄성계수는 파형강판의 두께에 큰 차이 없이 약

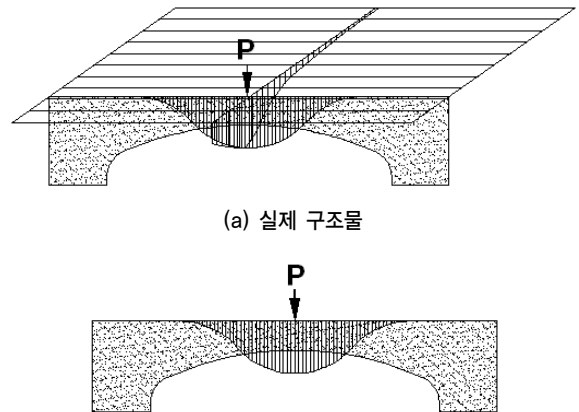


그림 7. 차량하중의 분산

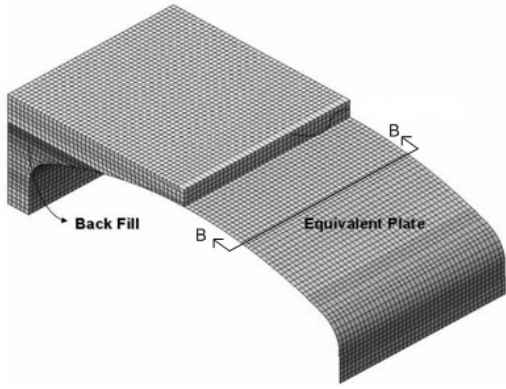


그림 8. 3차원 등가판 모델 구조물 형상

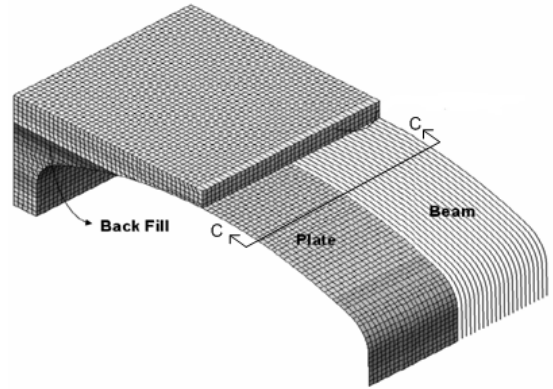


그림 10. 3차원 보강판 해석 시 구조물 형상

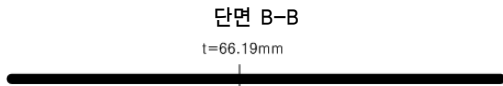


그림 9. 3차원 등가판 모델 파형강판 단면 형상

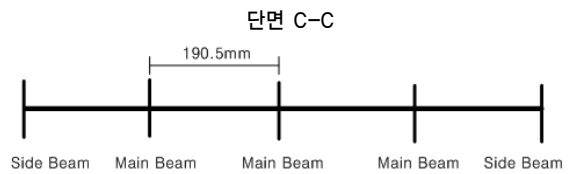


그림 11. 3차원 보강판 해석 시 파형강판 단면 형상

표 3. 대골형 파형강판 등가판 요소의 입력정수

강판 두께 t(mm)	단위 길이당 단면계수			등가 plate 요소의 두께(mm)
	단면적 A(cm <sup>2</sup> /m)	소성 단면계수 Z(cm <sup>3</sup> /m)	단면2차모멘트 I(cm <sup>4</sup> /m)	
7.01	98.08	437.85	2416.46	66.19

2.1×105MPa로 일정한 값이 도출되었다.

$$I = bt^3/12 \rightarrow \bar{t} = \sqrt[3]{12I/(bt)} \quad (2)$$

$$\bar{E} = 12EI/\bar{t}^3 \quad (3)$$

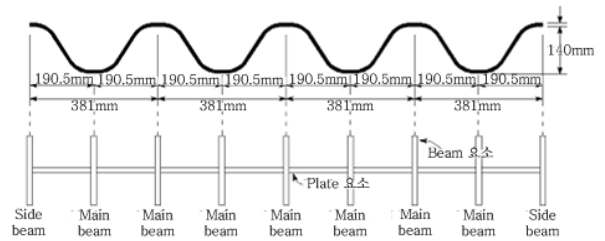


그림 12. 3차원 보강판 모델의 단면도

### 3.3 3차원 보강판 모델(3D stiffened plate)

2차원 해석과 3차원 등가판 해석의 단점을 보완하여 대골형 파형강판용 3차원 보강판 모델을 제안하였다. 3차원 보강판 모델은 그림 11과 같이 파형강판의 원판 두께와 동일한 두께의 판요소에 파형으로 절곡한 부분의 단면계수를 모사하기 위한 보요소를 결합한 것으로서 단면적에 비하여 단면계수가 큰 파형강판의 특징을 고려할 수 있으며 종방향과 길이방향으로 단면특성이 다른 특징도 고려할 수 있다. 또한, 최종적으로 파형강판에 발생한 단면력은 보요소에 작용하는 모멘트와 축력을 사용하면 되므로 해석 후 결과 분석도 용이하다. 3차원 보강판 요소를 이방성 요소와 격자형 보요소와 비교하면 이방성 요소보다 입력정수의 산정이 쉽고 격자형 보요소 보다 모델링해야 할 보요소의 개수가 거의 반으로 줄어들기 때문에 요소망 구성이 쉽다. 그림 10은 3차원 보강판 모델로 모델링한 구조물의 형상이다.

그림 12와 같은 3차원 보강판 모델의 일정간격(190.5mm)에 대한 단면적(A)는 식 (4)~(6)에 의해 그 값을 산출하였

다.

$$A = \frac{98.08}{100} \times 19.05 = 18.684\text{cm}^2 \quad (4)$$

$$A_{Plate} = 19.05 \times 0.701 = 13.35\text{cm}^2 \quad (5)$$

$$A_{beam} = A - A_{Plate} = 18.684 - 13.35 = 5.334\text{cm}^2 \quad (6)$$

3차원 보강판 모델의 일정간격(190.5mm)에 대한 단면2차 모멘트(I)는 식 (7)~(10)에 의해 그 값을 산출하였다.

$$I = 190.05 \times 24164.64 = 4,592,489.832\text{mm}^4 \quad (7)$$

$$I_{Plate} = bh^3/12 = (190.05 \times 7.01^3)/12 = 5,468.49\text{mm}^4 \quad (8)$$

$$I_{beam} = I - I_{Plate} = 4,587,021.342\text{mm}^4 \quad (9)$$

$$I_{beam} = bh^3/12 = A_{beam} \times h^2/12 \quad (10)$$

위와 같은 식으로 Main-beam과 Side-beam의 높이(h)와 폭(b)을 알 수 있다. 이렇게 구한 3차원 보강판 각 요소의 단면적과 단면2차모멘트, 탄성계수와 Main Beam, Side Beam의 높이와 폭은 표 4와 같다.

표 4. 무보강 3차원 보강판 모델의 단면정수

t(mm)	Plate (간격=190.5mm)			Main Beam		Side Beam	
	A(cm <sup>2</sup> )	I(cm <sup>4</sup> )	탄성계수(N/mm <sup>2</sup> )	h(cm)	b(cm)	h(cm)	b(cm)
7.01	13.35	0.547	1.77×10 <sup>8</sup>	32.16	0.166	32.16	0.083

### 3.4 3차원 Corrugated 판 모델

3차원 보강판 모델의 보다 정확한 검증을 위하여 실제 파형강판 구조물과 같은 단면을 가지는 3차원 Corrugated 판 모델을 모델링하였다. 단면계수들은 표 1에 나타난 대골형 파형강판의 특성을 입력하였다. 3차원 Corrugated 판 모델의 단면은 그림 14와 같이 실제 대골형 파형강판의 단면과 같게 모델링하였다. 그림 13은 3차원 Corrugated 판 모델의 구조물 형상이다.

## 4. 수치해석

### 4.1 대상구조물

지중강판 박스 구조물은 지반-구조물 상호작용에 의해 거동이 좌우된다. 따라서 본 연구는 현재 국내에서 사용되고 있는 터널 및 지반 전용 해석 프로그램인 MIDAS/GTS를 사용하여 수치해석을 하였다. 뒷채움 흙은 Choi 등(2004)의 수치해석 모델에서 적용한 비선형 거동과 응력의존적인 응력-변형을 관계를 갖는 Duncan 등(1970)의 쌍곡선 모델

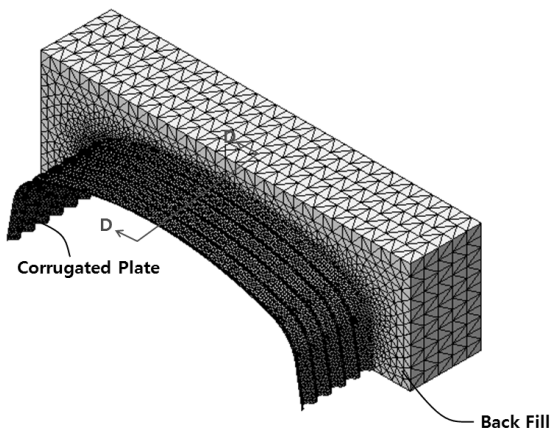


그림 13. 3차원 Corrugated 판 모델 해석시 구조물 형상

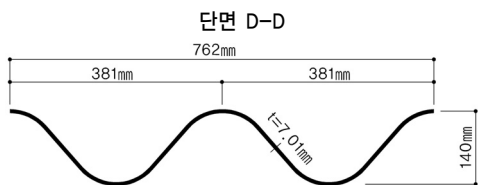


그림 14. 3차원 Corrugated 판 모델 해석시 파형강판 단면 형상

(hyperbolic model)을 사용하였다. 지반의 범위는 구조물의 거동에 영향을 미치지 않도록 충분히 떨어져 있어야 하므로, 측면 경계조건은 CHDBC(2000) 지침을 따라 구조물 지간의 반만큼을 확보하도록 하였다. 강판은 대골형 파형강판을 사용하였으며, 두께 7.01mm의 무보강 단면을 사용하였다. 대골형 파형강판의 단면성질은 표 1의 값을 사용하였다.

본 연구에서 검토된 구조물의 지간은 8m~15m이며, CHDBC(2000)에서 규정한 박스 단면 형상을 사용하였다. 기하형상을 결정함에 있어서 해석의 일관성을 위하여 Rise/Span 비가 0.25~0.3사이의 구조물로 선정하였고 이를 표 5에 나타내었다.

그림 15와 같이 3단계 시공과정(최소 토피고까지 뒷채움, 토피고까지의 뒷채움, 활하중 재하)을 고려하였다.

활하중은 그림 16과 같은 도로교 시방서 상의 DB-24 하중을 사용하였으며 하중 위치를 다르게 하여 수치해석을 해 본 결과 현치부와 정점부에서 가장 큰 모멘트와 변위를 일으키는 그림 17과 같은 위치에 재하하였다.

### 4.2 시공단계해석

지간 8m~15m의 대상구조물을 뒷채움 높이를 지반부터

표 5. 장지간 파형강판 구조물의 기하형상

Span(m)	Rise(m)	Rise/Span
7.945	2.37	0.30
9.310	2.75	0.30
10.515	3.10	0.29
11.700	2.935	0.25
12.315	3.555	0.29
14.111	3.477	0.25
15.055	4.12	0.27

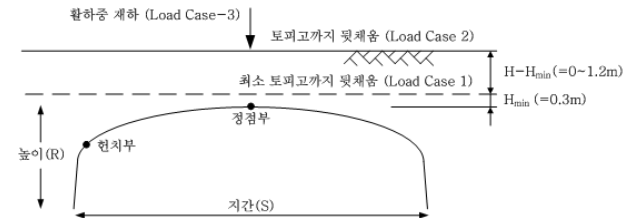
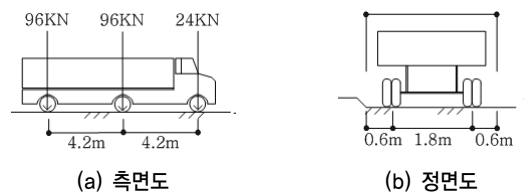


그림 15. 지중강판 박스구조물의 3단계 시공과정



(a) 측면도

(b) 정면도

그림 16. DB-24 하중

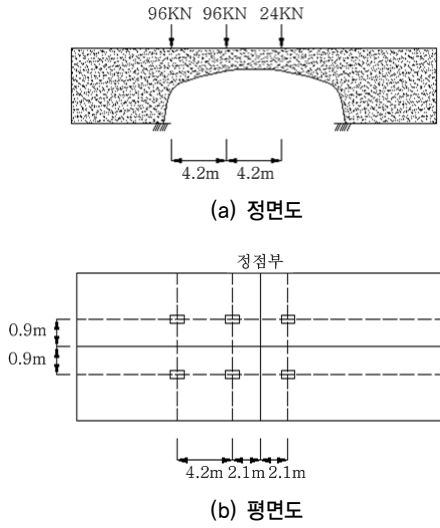
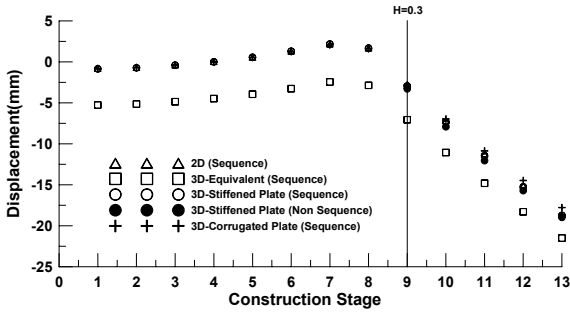
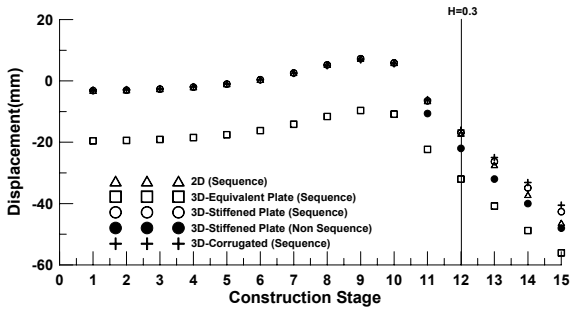


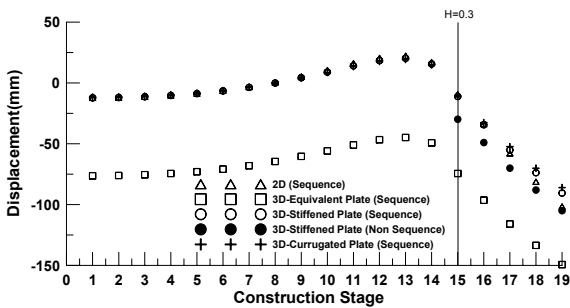
그림 17. 활하중 재하 위치



(a) 시간 7.945m



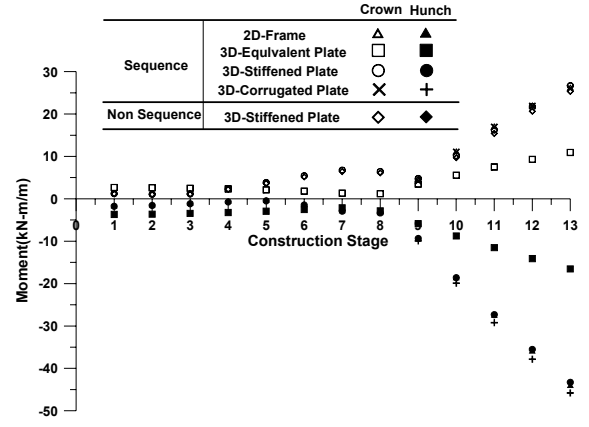
(b) 시간 11.700m



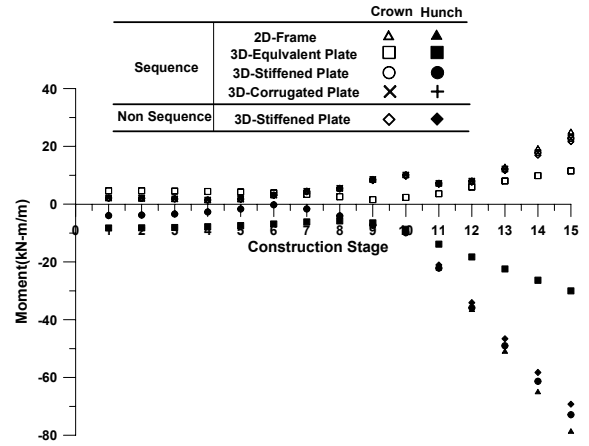
(c) 시간 15.055m

그림 18. 시공단계별 변위 비교

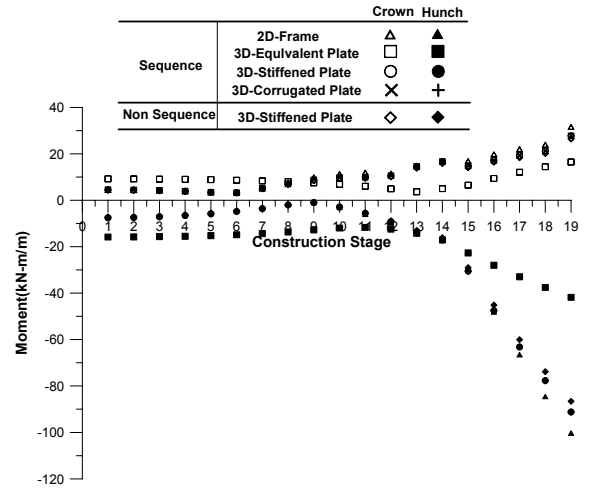
최소토포피고 0.3m까지 각 단계마다 0.3m 증가시킨 후, 토포피고 0.6m, 0.9m, 1.2m, 1.5m로 변화하여 시공단계 해석을 하였다.



(a) 시간 7.945m



(b) 시간 11.700m



(c) 시간 15.055m

그림 19. 시공단계별 모멘트 비교

2차원 해석과 3차원 등가판 해석은 지면으로부터 토포피고 1.5m까지 0.3m씩 성토하는 방법(sequence)으로 시공단계 해석을 하였고, 3차원 보강판 해석은 최소토포피고까지 성토 한 후 토포피고 1.5m까지 0.3m씩 성토하는 방법(non-sequence)과 앞서 언급한 sequence 방법 두 가지로 모델링하였다. 3차원 Corrugated 판 모델은 sequence 방법으로 시공단계 해석을

수행하였다. 3차원 모델의 모델 및 3차는 성토하는 해석 중 양점의 해석결과를 그림 18과 그림 19에 도시하였다.

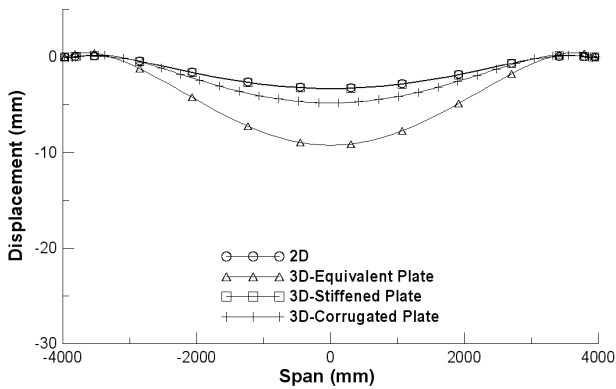
#### 4.2.1 변위 비교

각 지간별로 시공단계에 따른 정점부의 최대 처짐을 그림 18과 같이 비교해 본 결과, 3차원 보강판 모델과 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 3차원 보강판 모델 해석 시, sequence 방법과 non-sequence 방법의 해석결과는 지간 15.055m 모델의 경우에는 약간 차이가 있으나, 지간이 작을 경우에는 거의 비슷한 해석 결과를 나타내었다. 또한, 3차원 등가판 모델을 제외한 모든 모델의 해석결과는 실제 파형강판과 동

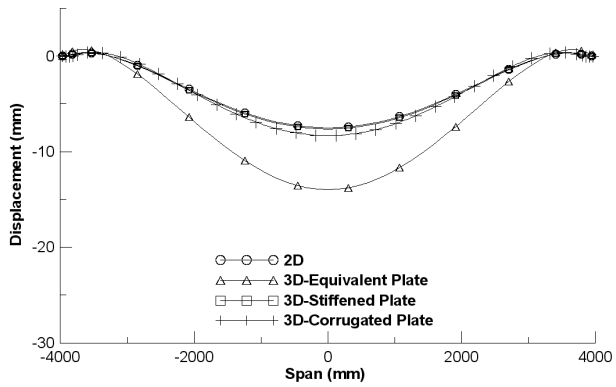
일하게 모델링한 3차원 Corrugated 판 모델과 일치하는 결과를 나타내었다. 따라서, 사하중 상태에서는 2차원 모델과 3차원 보강판 모델의 해석 방법이 타당한 것으로 사료된다.

#### 4.2.2 모멘트 비교

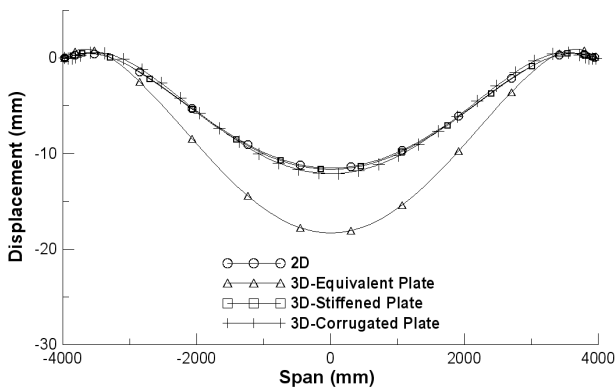
각 지간별로 시공단계에 따른 정점부와 현치부의 모멘트를 그림 19와 같이 비교해본 결과, 3차원 보강판 모델의 sequence방법의 해석 값과 non-sequence방법의 해석 값이 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 3차원 등가판 모델의 결과 값은 다른 모델의 결과 값과 큰 차이를 보였다. 2차원 해석의 결과 값과 3차원 보강판 모델의 결과 값은 3차



(a) 토피고 0.3m

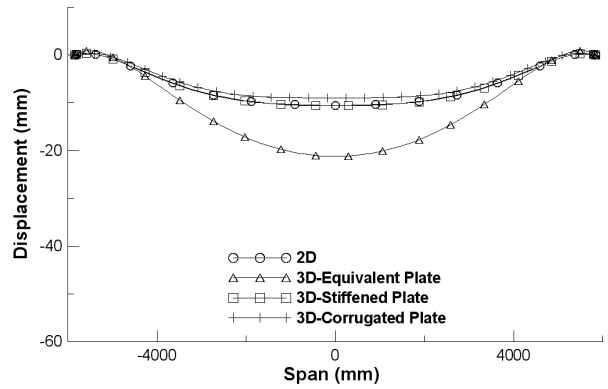


(b) 토피고 0.6m

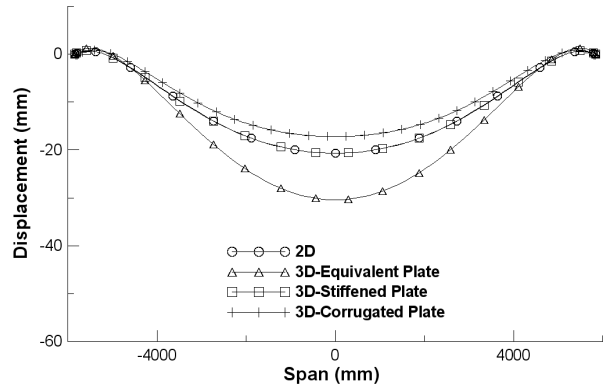


(c) 토피고 0.9m

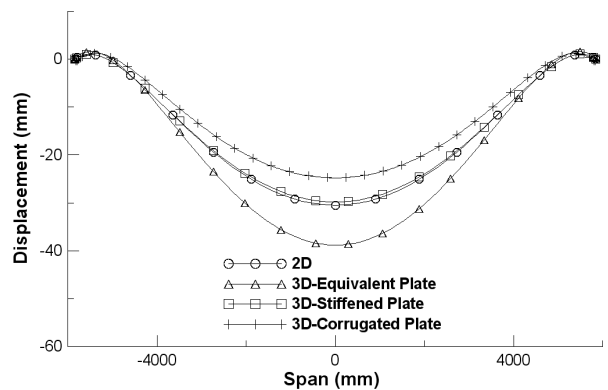
그림 20. 지간 7.945m 사하중 변위



(a) 토피고 0.3m



(b) 토피고 0.6m



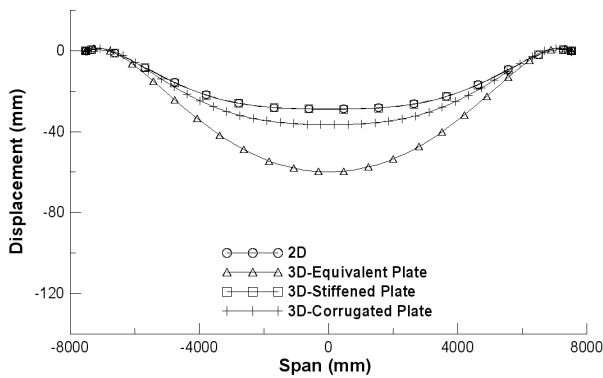
(c) 토피고 0.9m

그림 21. 지간 11.700m 사하중 변위

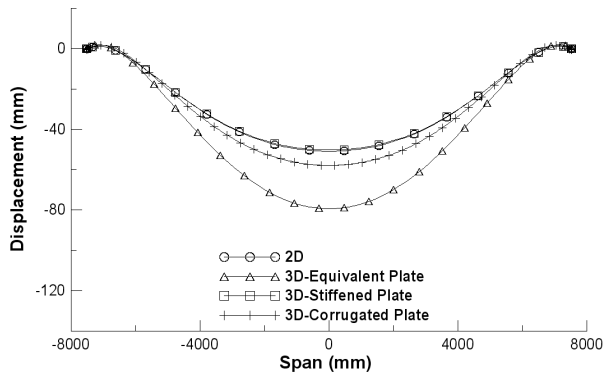
원 Corrugated 판 모델의 결과 값과 거의 일치하였다. 모멘트 비교결과, 사하중 상태에서 2차원 모델과 3차원 보강판 모델이 실제 파형강판과 동일하게 모델링한 3차원 Corrugated 판 모델의 거동과 유사함을 알 수 있다.

### 4.3 사하중 재하시 거동 분석

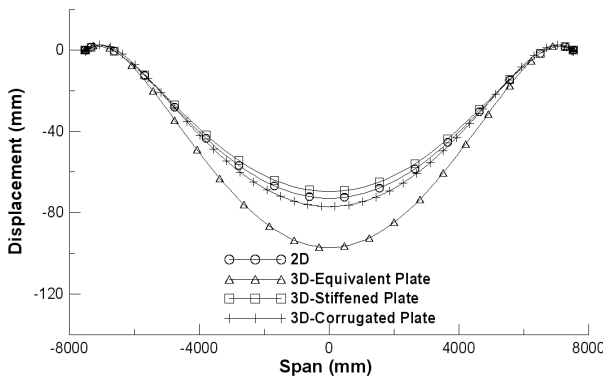
지간 8m~15m의 대상구조물을 사하중(토압)만을 재하하였다. 지간 및 토피고별로 변위와 모멘트의 변화를 검토하였고, 3차원 모델의 변위 및 모멘트 결과는 교축방향 중앙 단면의 결과를 그림 20~그림 25에 도시하였다.



(a) 토피고 0.3m



(b) 토피고 0.6m



(c) 토피고 0.9m

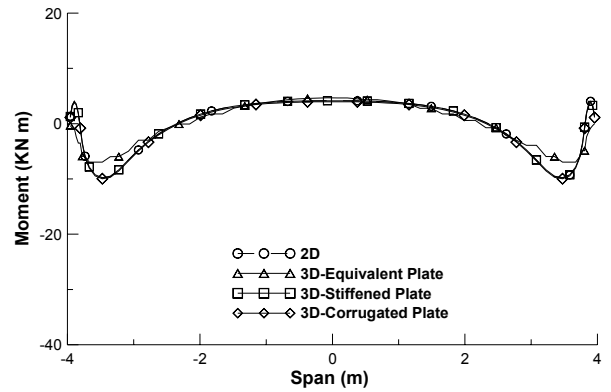
그림 22. 지간 15.055m 사하중 변위

### 4.3.1 변위 비교

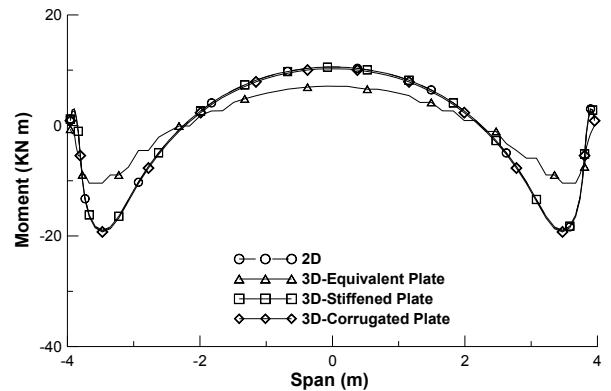
사하중 상태에서 각 지간 및 토피고 별로 그림 20~그림 22와 같이 지간에 따라 변위를 비교 해본 결과, 2차원 해석결과와 3차원 보강판 모델의 해석결과는 3차원 Corrugated 판 모델의 해석결과와 잘 일치하나, 3차원 등가판 모델은 다른 해석방법과 다소 상이한 결과 값을 주는 것을 알 수 있다.

### 4.3.2 모멘트 비교

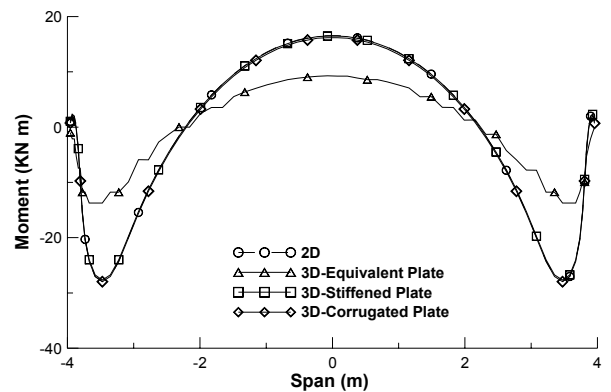
사하중 상태에서 각 지간 및 토피고 별로 모멘트 비교 결



(a) 토피고 0.3m



(b) 토피고 0.6m



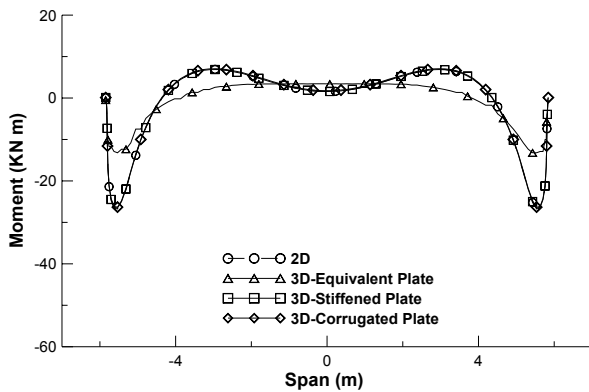
(c) 토피고 0.9m

그림 23. 지간 7.945m 사하중 모멘트

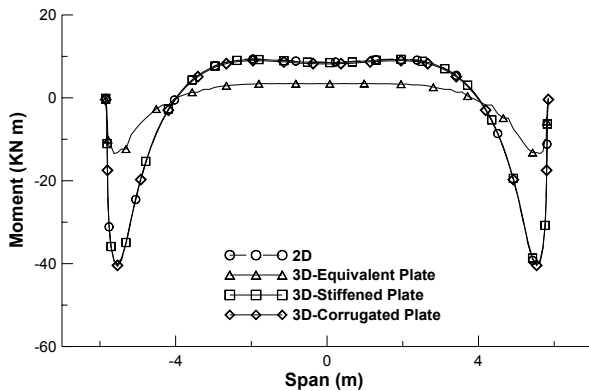


과를 그림 23~그림 25에 나타내었다. 3차원 Corrugated 판 모델의 경우 판요소를 이용하여 파형강판을 모델링하므로 해석결과는 판요소의 응력으로 산정된다. 이를 모멘트로 변환하기 위하여  $M = \sigma I / y$ 의 관계를 이용하였다. 이때,  $y$ 는 중립축으로부터 파형강판 단면중심까지 떨어진 거리이다.

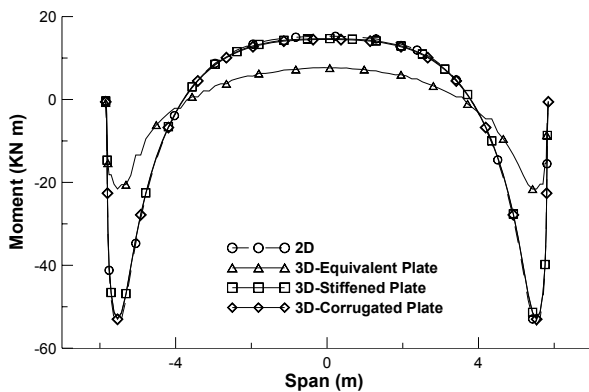
사하중 상태에서 각 지간 및 토피고 별로 그림 23~그림 25와 같이 모멘트를 비교해본 결과, 사하중 상태에서의 2차원 모델과 3차원 보강판 모델의 모멘트 값이 지간의 길이에 관계없이 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 3차원 등가판 모델은 다른 모델과 큰 차이를 보임을 알 수 있다.



(a) 토피고 0.3m



(b) 토피고 0.6m



(c) 토피고 0.9m

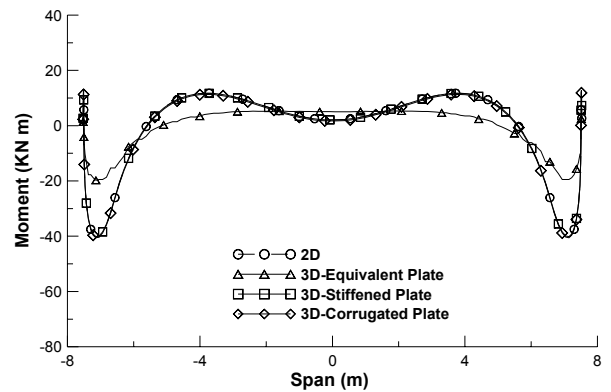
그림 24. 지간 11.700m 사하중 모멘트

#### 4.4 활하중 재하시 거동 분석

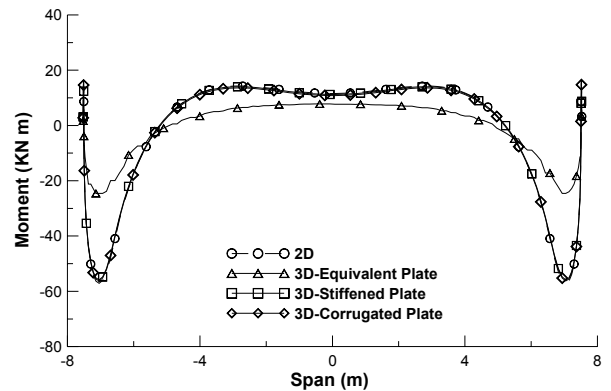
각 지간별로 토피고 0.3m, 0.6m, 0.9m 마다 그림 16의 DB-24 하중을 그림 17과 같은 위치에 재하하였다. 3차원 모델의 변위 및 모멘트 결과는 교축방향 중앙 단면의 결과를 도시하였다.

##### 4.4.1 변위 비교

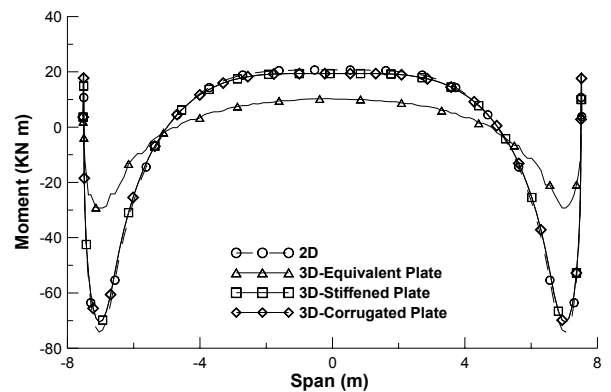
해석결과, 그림 26~그림 28과 같이 3차원 Corrugated 판 모델의 변위와 3차원 보강판 모델의 변위가 거의 유사함을 알 수 있다. 2차원 모델은 구조물 횡방향의 분산을 고려하



(a) 토피고 0.3m

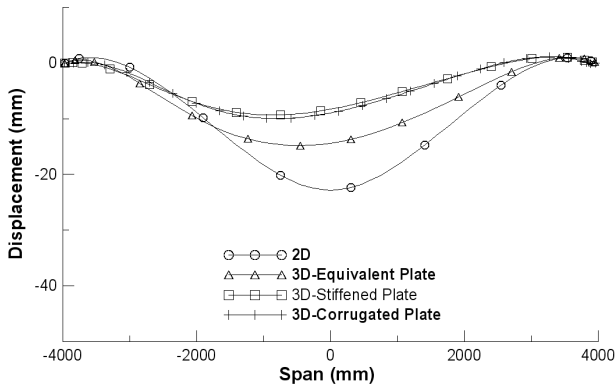


(b) 토피고 0.6m

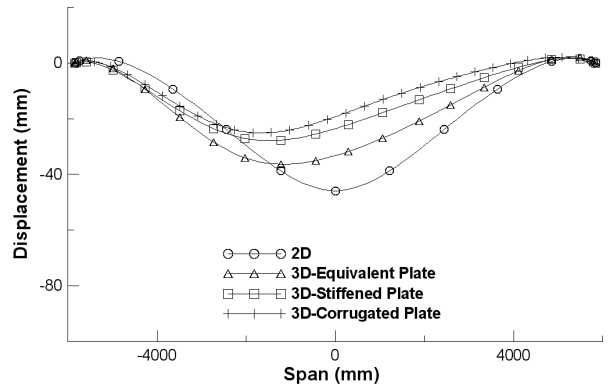


(c) 토피고 0.9m

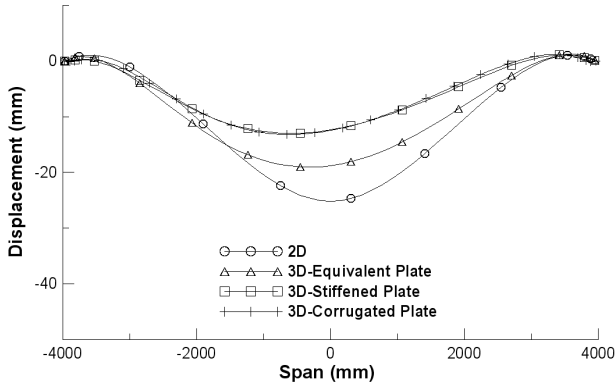
그림 25. 지간 15.055m 사하중 모멘트



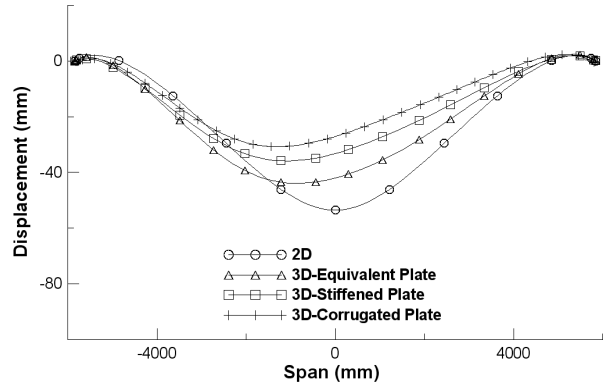
(a) 토피고 0.3m



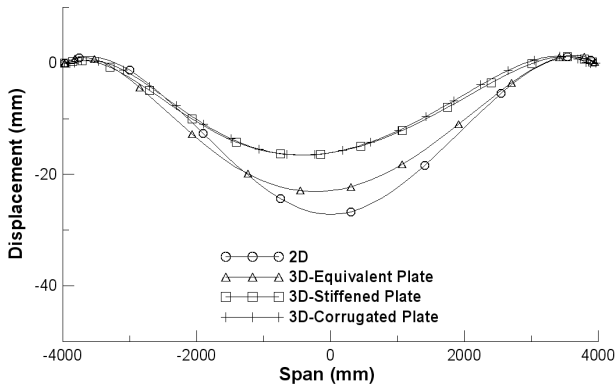
(a) 토피고 0.3m



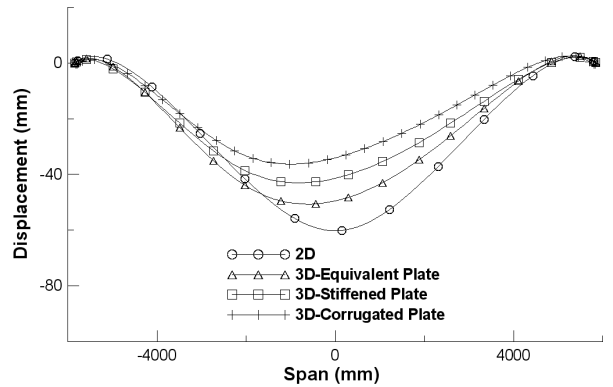
(b) 토피고 0.6m



(b) 토피고 0.6m



(c) 토피고 0.9m



(c) 토피고 0.9m

그림 26. 지간 7.945m 활하중 변위

그림 27. 지간 11.700m 활하중 변위

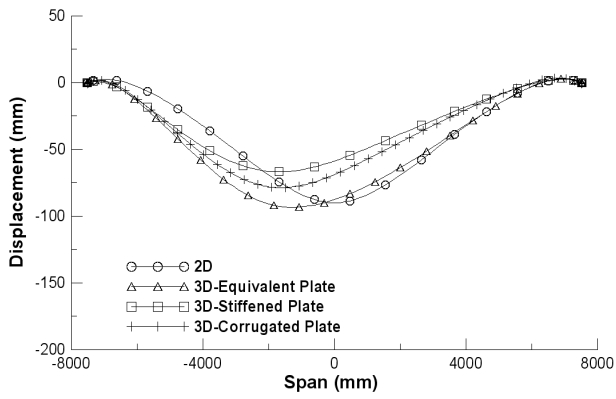
지 못해 매우 큰 변위값을 보임을 알 수 있다.

그림 29는 지간 및 토피고에 따라 최대 처짐을 나타낸 것이다. 3차원 보강판 모델의 변위가 3차원 Corrugated 판 모델의 변위와 가장 유사함을 알 수 있다.

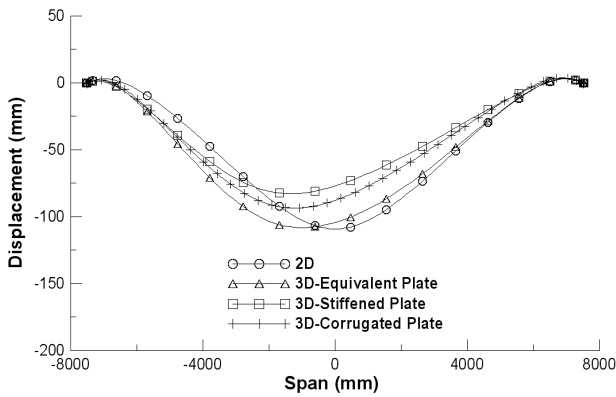
#### 4.4.2 모멘트 비교

활하중 상태에서 각 지간 및 토피고 별로 모멘트 결과를 그림 30~그림 32에 나타내었다. 3차원 Corrugated 판 모델의 결과는 사하중 상태의 모멘트 비교 결과와 마찬가지로 응력으로 산정되므로 사하중 상태 결과와 같은 방법으로 응력을 모멘트로 변환하여 결과를 나타내었다.

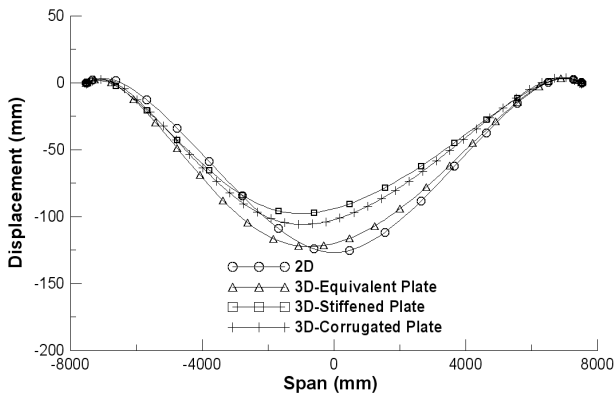
해석결과, 그림 30~그림 32와 같이 3차원 Corrugated 판 모델의 모멘트와 3차원 보강판 모델의 모멘트가 거의 유사함을 알 수 있다. 2차원 모델은 구조물 횡방향의 분산을 고려하지 못해 결과 값이 매우 크게 나오는 것을 알 수 있다. 3차원 등가판 모델 역시 실제 파형강판 구조물의 두께를 고려하지 못해 결과 값이 매우 크게 나오는 것을 알 수 있다. 이것으로 보아 2차원 해석과 3차원 등가판 모델은 활하중 재하 시 지중강판 구조물의 거동이 실제 지중강판 구조물의 거동과 많이 차이가 남을 알 수 있다. 3차원 보강판 모델은 활하중 재하 시 실제 지중강판 구조물의 거동과 유사함을 알 수 있다.



(a) 토틀피고 0.3m



(b) 토틀피고 0.6m



(c) 토틀피고 0.9m

그림 28. 지간 15.055m 활하중 변위

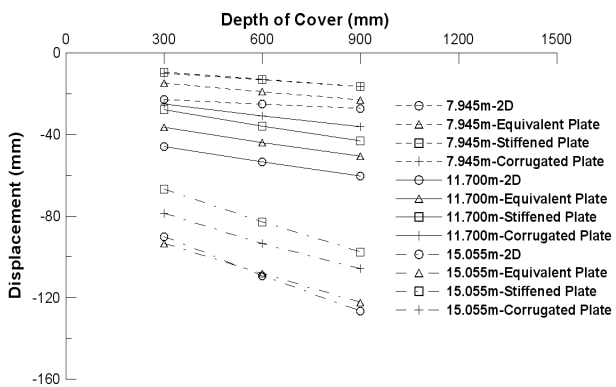
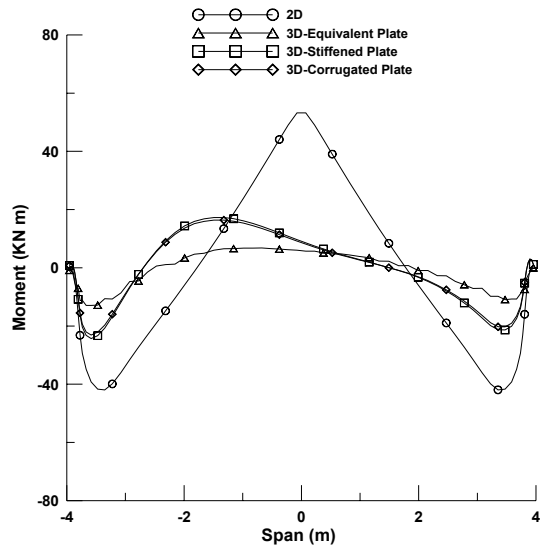
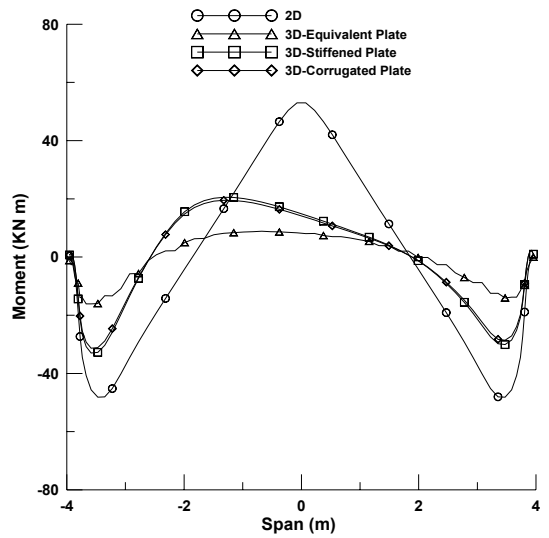


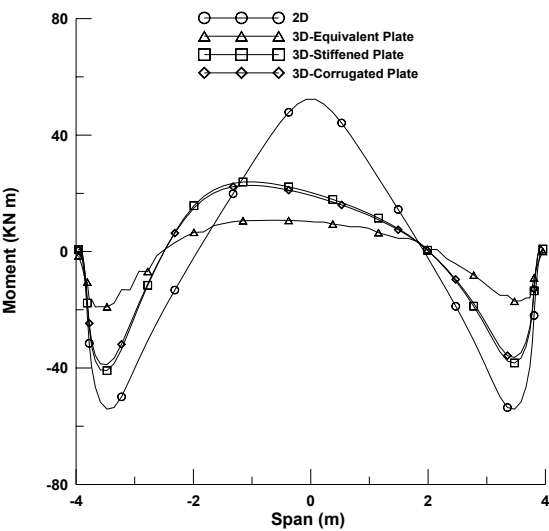
그림 29. 각 지간 및 토틀피고에 따른 변위 비교



(a) 토틀피고 0.3m

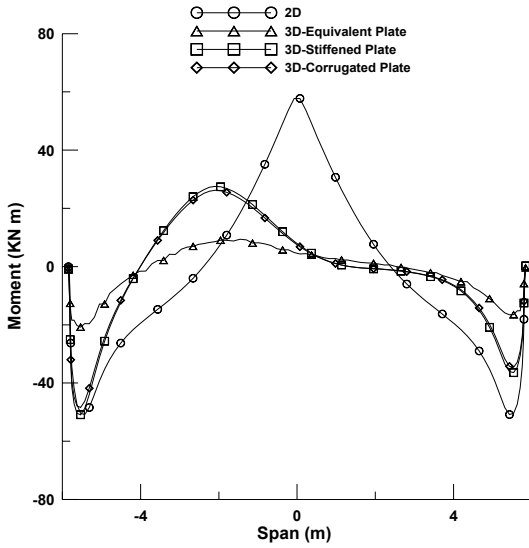


(b) 토틀피고 0.6m

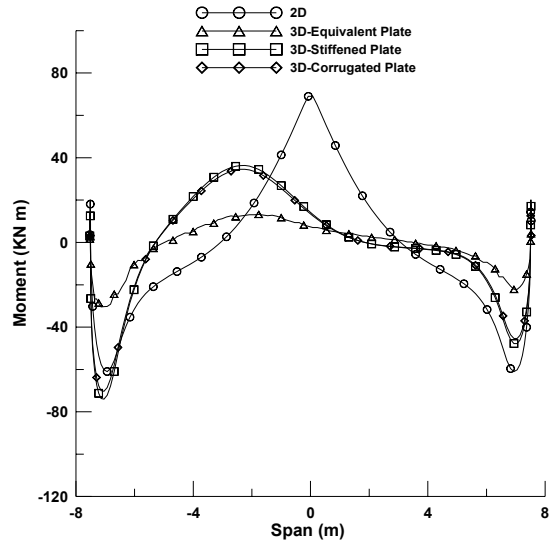


(c) 토틀피고 0.9m

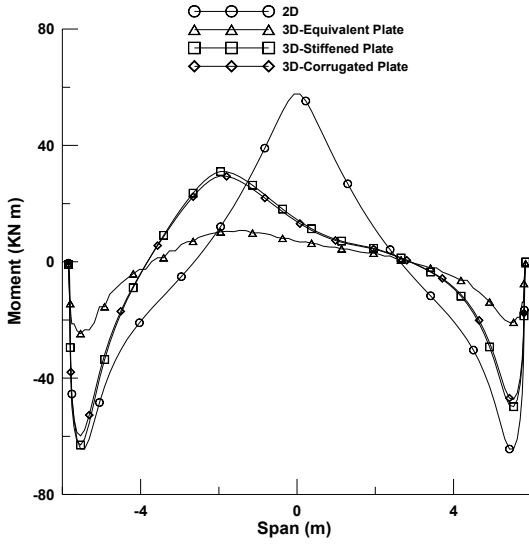
그림 30. 지간 7.945m 활하중 모멘트



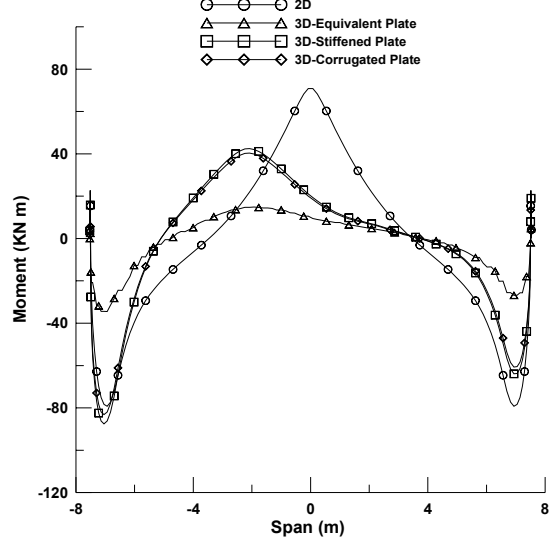
(a) 토피고 0.3m



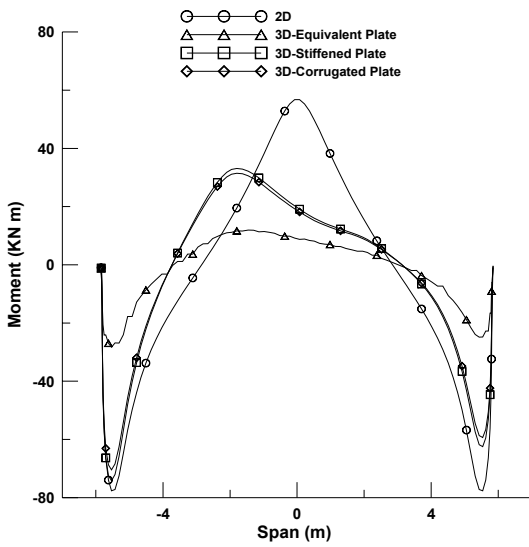
(a) 토피고 0.3m



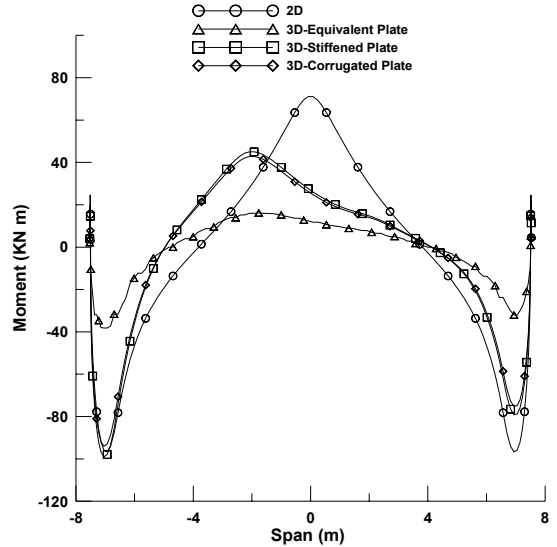
(b) 토피고 0.6m



(b) 토피고 0.6m



(c) 토피고 0.9m



(c) 토피고 0.9m

그림 31. 시간 11,700m 활하중 모멘트

그림 32. 시간 15,055m 활하중 모멘트

## 5. 결 론

본 연구에서는 지중파형강판 박스구조물의 3차원 해석 시 보다 간편하게 모델링하고, 해석시간을 단축할 수 있는 3차원 보강판 모델을 제안하고 타당성을 검증하였다. 타당성 검증을 위해 대골형 파형강판을 사용한 박스 구조물의 구조상세를 대상으로 지간을 8m~15m까지 수치해석을 수행하였다. 또한 토피고에 따른 3단계의 시공단계를 고려하여 거동분석을 수행하였다.

비교 대상 모델로는 실제 파형강판 구조물과 동일하게 모델링한 3차원 Corrugated 판 모델과 실제 파형강판의 단면2차모멘트를 만족시키는 3차원 등가판 모델, 실제 파형강판의 단면적과 단면2차모멘트를 만족시키는 3차원 보강판 모델과 2차원 모델을 사용하였으며, 시공단계, 사하중상태, 활하중 상태에 따라 각 모델의 모멘트 값과 변위를 비교하였다.

시공단계 해석결과, 3차원 등가판 모델을 제외한 모든 모델이 3차원 Corrugated 판 모델과 잘 일치하였으며, 3차원 보강판 모델을 sequence방법과 nonsequence방법의 결과값이 거의 유사함을 알 수 있다. 향후 3차원 보강판 모델의 해석 시 non-sequence방법을 사용함으로써 해석시간의 단축을 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

사하중 상태에서 2차원 모델, 3차원 보강판 모델, 3차원 등가판 모델, 3차원 Corrugated 판 모델의 해석값을 비교해 본 결과, 2차원 해석과 3차원 보강판 모델, 3차원 Corrugated 판 모델은 현치부와 정점부에서 비슷한 변위 결과를 나타내며, 2차원 해석과 3차원 보강판 모델은 현치부와 정점부에서 3차원 Corrugated 판 모델과 유사한 모멘트 결과값을 나타낸다. 반면, 3차원 등가판 모델은 과도한 변위와 과소한 모멘트를 주어 다른 모델의 거동과 상이한 결과를 나타낸다.

활하중 상태에서는 3차원 보강판 모델은 3차원 Corrugated 판 모델과 유사한 변위와 모멘트 값을 나타내나 2차원 해석 모델과 3차원 등가판 모델은 큰 차이를 나타내었다. 따라서 활하중 조건에 대한 변위와 모멘트 값을 산정하기 위해서는 3차원 해석이 필요하고, 이때, 3차원 보강판 모델을 사용하는 것이 효과적인 대안이 될 수 있음을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 지중파형강판 구조물의 정확한 해석을 위해서는 3차원 해석이 필요하다. 실제 구조물과 동일하게 모델링하기 위해서는 3차원 Corrugated 판 모델을 사용하여야 하나, 이는 모델링 및 해석 결과 검토의 복잡성, 해석시간 등을 고려했을 때 이를 대체할 만한 3차원 해석 모델이 필요하다. 따라서 본 연구에서 제안한 3차원 보강판 모델이 실제 파형강판 구조물을 간편하게 모델링하고 해석

결과를 쉽게 검토하는데 있어서 3차원 Corrugated 판 모델을 대체할 수 있는 효과적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계 수준의 연구중심대학육성사업(WCU)으로부터 지원받아 수행되었습니다(R32-2008-000-20042-0).

## 참 고 문 헌

1. 최동호, 이승재, 조용우, 박상일(2006), 장지간 지중강판 박스 구조물의 휨모멘트 계수식 제안, *대한토목학회 논문집*, Vol. 26, No. 1A, pp. 133~142.
2. 최우람(2008), *장지간 파형강판 박스형 구조물의 3차원 구조해석 모델 개발*, 석사학위논문, 한양대학교, pp. 11~50.
3. AASHTO(2002), *Standard Specification for Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., pp. 12-1~12-83.
4. Boulanger, R. W., Seed, R. B., Baird, R. D., and Schluter, J. C.(1989), *Measurements and Analysis of Deformed Flexible Box Culverts*, *Transportation Research Record 1231*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., pp. 25~25.
5. Canadian Standards Association(2000), *Canadian Highway Bridge Design Code*, Ministry of Transportation of Canada, Canada, pp 271~282.
6. Choi, D. H., Kim, G. N. and Peter, B. M.(2004), Evaluation of Moment Equation in the 2000 Canadian Highway Bridge Design code for Soil-metal Arch Structures, *Canadian Journal of Civil Engineering*, National Research Council of Canada, Vol. 31, No. 2, pp. 281~291.
7. Davis, J. M.(1977), Simplified Diaphragm Analysis, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 103, No. 11, pp. 2093~2109.
8. Duncan, J. M. and Chang, C. Y.(1970), Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, No. 5, pp. 1629-1653.
9. Duncan, J. M., Seed, R. B. and Drawsky R. H.(1985), *Design of Corrugated Metal Box Culverts*, *Transportation Research Record 1008*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., pp. 33~41.
10. El-Sawy, K. M.(2003), Three-Dimensional Modeling of Soil-Steel Culverts under the Effect of Truckloads, *Thin-Walled Structures*, Elsevier Science, Vol. 41, No. 8, pp. 747~768.
11. Machelski, C. Z. and Antoniszyn, G.(2004), Influence of Live Loads on the Soil-steel Bridge, *Studia Geotechnica et Mechanica*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Vol. 104, No. 3-4, pp. 90~119.
12. Mang, H. S., Jimmy H. S. and Giryra C. V.(1976), Finite Element Analysis of Doubly Corrugated Shells, *Journal of the Structural*

*Division*, ASCE, Vol. 102, No. 10, pp. 2033~2050.

13. McCavour, T. C., Byrne P. M. and Morrison, T. D.(1998), *Long-Span Reinforced Steel Box Culverts*, *Transportation Research Record 1624*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., pp. 184~195.
14. Zhang, W., Saleh, A., Samali, B. and Ring, G.(2005), Study on the Behavior of Long Span Deep-Corrugated Reinforced Steel

Box Culvert using Nonlinear Finite Element Method, *84th Annual Meeting and Proceedings of the TRB*, Transportation Research Board, Washington, D. C., CD-ROM.

(접수일: 2009. 9. 2 심사일: 2009. 9. 17 심사완료일: 2010. 10. 5)