한국지반공학회논문집 제26권 6호 2010년 6월 pp. 39 ~ 44

# 수치해석을 통한 강합성 빔보강 지하 구조물의 거동분석

# Structural Analysis of CBS (Composite Basement Wall System)-RIB Underground Structures Using Numerical Modeling

유 한 규[1] Yoo, Han-Kyu
김 연 성[2] Kim, Yeon-Sung

## Abstract

In case of the design method, which is used in the inside and outside of the country, on corrugated multi plate structures, section modulus would be determined by assuming 2-dementioanl equivalent section of those structures. However, it is impossible to consider 3-dimentional effects when 2-dimentional design method is applied since structures are reinforced with a pattern of the 1200, 1600 mm reinforcements except the 800 mm reinforcement. Thus, in this study, technical specification standard is analyzed for the existing corrugated multi plate design methods, and section strengths, moments, and so on of equivalent and practical sections are compared and estimated using 3-dimentional FEM (finite element method) for semicircles and architectural features widely used. Based on the results of that analysis, analytical basis for 3-dimentional design of the CBS-RIB is suggested.

## 요 지

강합성 구조물의 설계절차는 파형강판구조물에 대한 현행 국내외 시방기준을 따르고 있는데, 시방기준이 2차원 해석 및 설계를 바탕으로 규정되어 있기 때문에 비등가 단면인 강합성 빔보강 공법에는 현행 시방기준을 적용할 수 없다. 그러므로 등가단면의 구조물로 환산하여 2차원 해석 및 설계를 수행하게 된다. 그러나 강합성 빔보강 공법은 종방향을 따라 일정한 간격을 두고 빔과 타입콘크리트를 이용하여 보강을 한 형태이기 때문에 3차원 해석에 기초한 설계과정이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통해 3차원 설계를 위한 해석적인 근거를 제시하고자 한다.

**Keywords** : CBS-RIB Structures, 3-dimentional Effect factors, Finite element method, Strength, Moment

## 1. 서 론

1990년대 캐나다에서는 기존의 멀티플레이트보다 휨변형에 대한 저항성이 탁월한 대골형 파형강판(400×150 mm)을 개발하여 파형강판구조물에 적용함으로써 약 16m까지 장지간화에 성공하였다(포항산업과학연구원, 2002). 하지만 축강성의 증가가 미미하여 깊은 토피고를 이용한 구조물의 경우 구조물의 좌굴강도와 볼트이음부의 강도를 확보할 수 없다(김성곤, 2003). 이 두 가지 문제점에 대한 해결책으로 캐나다 표준 시방서(CSA-S16-01)를 준용하여 콘크리트와 강재의 합성부재인 강합성 빔보강공법을 개발하였다.

Duncan은 Castigliano의 제 2정리를 이용하여 얻은 식을 간략하게 정리하여 기본식으로 이용하고 다양한

1 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Hanyang Univ.)
2 정회원, 한양대학교 토목공학과 석사 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., 140787 @poscoenc.com, 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

형상과 시공조건에 따른 유한 요소 해석을 수행하였다 (Duncan, 1979). 그 결과를 수치해석적 방법을 이용하여 구조물에 적절한 압축력과 휨 모멘트 산정식을 도출하여 다음과 같이 압축력(식 (1))과 휨 모멘트(식 (2)) 산정식을 제안하였다. 지점부에서의 압축력과 헌치부 상부에 활하중이 재하된 경우의 헌치부의 휨 모멘트를 사용하였기 때문에 유한요소해석 결과와 가장 근접한 설계법으로 알려져 있으며, 최근 발표된 CHBDC(2003) 설계법의 근간이 되는 설계법이다(윤희두, 2003).

$$P = K_{p1}\gamma S^2 + K_{p2}\gamma HS + K_{p3}LL \quad (1)$$

$$M_B = R_B(K_{M1}\gamma S^3 - K_{M2}\gamma S^2 H) + R_L K_{M3} SLL$$
$$(0<H/S<0.25) \quad (2)$$

여기에서 $S$는 구조물의 횡방향 지간, $H$는 구조물의 높이$N_f$는 지반과 구조물의 상대강성, $K_{m1,m2,m3}$는 $N_f$에 의존하는 무차원 계수, $K_{p1,\ p2,\ p3}$는 위치별 뒷채움 지반에 대한 무차원계수, $R_B$, $R_L$는 무차원 감소계수, $\gamma$는 뒷채움재의 단위중량, $LL$는 뒷채움재의 액성한계이다. 본 연구에서는 식 (1)과 식 (2)를 바탕으로 산정되는 압축력과 모멘트를 근거로 수치해석을 실시하여 각 구조물 내에서 작용하는 축력과 모멘트의 영향을 검토하고자 한다.

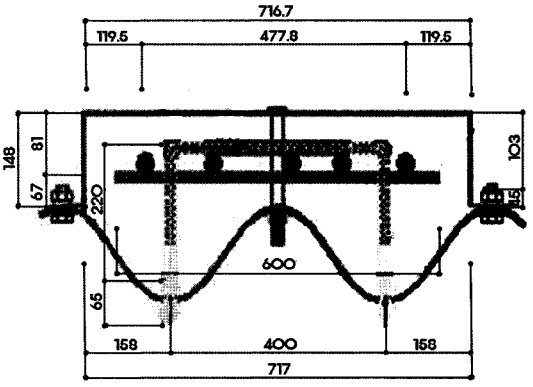



그림 1. 단면형상 및 보강형식

## 2. 강합성 빔보강 공법의 안정성 검토

### 2.1 강합성 빔보강(CBS-RIB)의 개요

아치형 지중강판 구조물은 아치의 형상을 가지고 있다. 강합성 빔보강은 모멘트가 작게 발생하는 압축력 지배구조의 구조적 특성을 가지고 강재를 덧대 중공된 공간을 압축력에 유리한 콘크리트를 충진 강재 콘크리트 합성단면을 형성하여 압축력에 대한 강도발현 증대를 목적으로 개발되었다. 구조적으로 강재와 콘크리트가 합성거동을 하기 위해선 전단 연결재가 필요하므로 L형 앵커를 주부재에 볼트로 채결하여 전단 연결재 역할을 하고 덧댄 강재부분에 철근을 배근하여 주부재와 강재량의 차이를 미소하게 줄여 휨모멘트 방향변화에 대해 단면 강성발현 할 수 있게 하였다. 단면형상 및 보강형식은 그림 1과 같다.

### 2.2 등가단면의 계산방법

합성보강구조물의 경우 구조물 종방향으로의 빔과 타입콘크리트의 보강의 형태를 띄고 보강재가 일정한 간격을 가지고 설치되는 구조물이기 때문에 3차원 해석에 근거한 설계과정이 요구되는 것이 정상이지만 지중에 설치되는 파형강판구조물의 현행 국내외 시방기준은 2차원 해석 및 설계에 맞추어져 있는 실정이다. 그림 2에 보여지는 강합성 빔보강구조물의 비등가적인 종단면을 2차원적인 설계방법으로서 하나의 일관된 단면으로 환산하는 등가단면설계법을 사용하고 있다(윤희두, 2003).

$$\text{등가단면의 성질} = \frac{\text{보강역의 단면성질} + \text{비보강역의 단면성질}}{\text{보강재의 간격}(s)} \quad (3)$$

## 3. 강합성 빔보강 공법의 3차원 유한요소해석

### 3.1 해석개요

강합성 구조물의 설계절차는 파형강판구조물에 대한

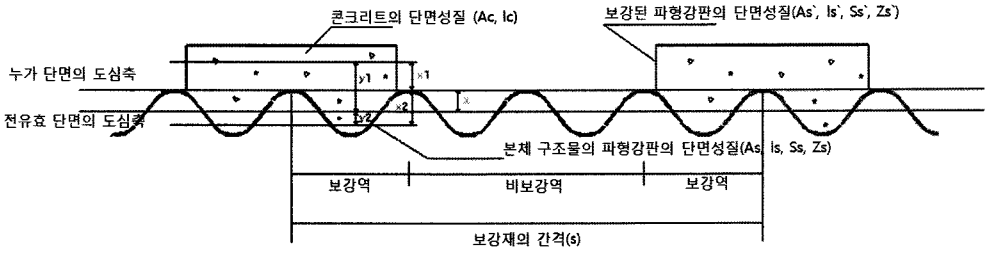



그림 2. 피치 파형강판으로 보강된 합성보강재의 종단면(s = 1,600mm)

(a) 등가단면 구조물 (b) 강합성 빔보강 구조물

그림 3. 등가단면 구조물과 실제 형태의 강합성 빔보강 구조물

현행 국내외 시방기준을 따르고 있는데, 시방기준이 2차원 해석 및 설계를 바탕으로 규정되어 있기 때문에 비등가 단면인 강합성 빔보강 공법에는 현행 시방기준을 적용할 수 없다. 그러나 강합성 빔보강 공법은 종방향을 따라 일정한 간격을 두고 빔과 타입콘크리트를 이용하여 보강을 한 형태이기 때문에 3차원 해석에 기초한 설계과정이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통해 3차원 설계를 위한 해석적인 근거를 제시하고자 한다.

본 연구에서는 3차원 파형강판 구조물의 응력분포와 거동분포 등을 고려하기 위하여 현재 국내 파형강판 구조물의 유한요소해석에 널리 사용되고 있는 PENTAGON을 사용하여 해석을 수행하였으며 3차원적인 거동에 대한 모사를 위해서 지반의 비선형성과 응력의존성을 표현할 수 있는 Duncan & Chang(1980)의 쌍곡선 모델을 이용하여 수치해석을 실시하였다.

## 3.2 모델링

### 3.2.1 구조물 형상

CHBDC(2003)에 의한 파형강판 라이닝의 좌굴 안정성 검토를 수행한 결과를 바탕으로 하였을 때 대골형 파형강판 구조물의 경우 지간이 20m 이상인 경우에 있어서 모든 경우의 하중에 대해 불안정하지만 강합성 빔보강 파형강판구조물의 경우에는 안정한 것으로 계산할 수 있었다. 그러므로 본 연구에서는 계산결과를 바탕으로 모델링을 수행하며 단면은 표준형에서 가장 대표적으로 사용하는 반원형과 낮은 아치형을 택하였고, 지간은 20~25m, 종방향 길이로는 2차선 도로를 나타내기 위하여 9.6m로 선정하였다.

일반적으로 Frame요소로 묘사하며 이를 3차원으로 나타내려면 2차원적인 Frame단면을 z의 방향으로 추진시켜 Frame요소를 Shell요소로 변환시킨다. 대부분의 수치해석 프로그램에서는 소성모멘트 강도를 입력하여 작용하는 모

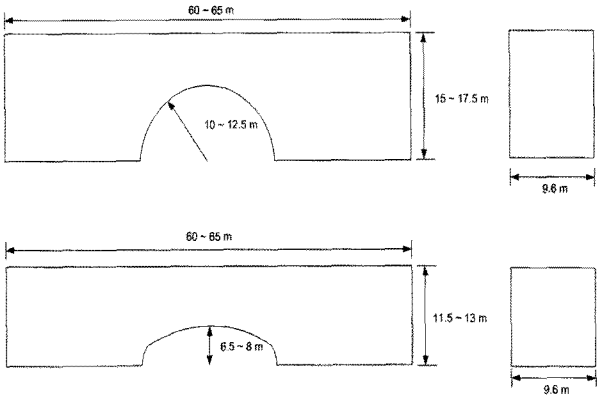



그림 4. 유한요소해석을 위한 구조물 단면

멘트가 소성강도 이상이면 소성힌지가 발생하도록 처리하고 있다. 또한 지점부는 힌지처리를 하여 지점부에는 모멘트가 발생하지 않으며, 현치부(어깨부)와 크라운부(정점)분에서 최대 모멘트가 발생하며 이는 H/S(지간과 높이의 비)에 따라 최대모멘트 발생지점의 양상이 다르게 나타난다.

### 3.2.2 뒷채움재

뒷채움재의 요소를 결정하기 위한 가장 대표적인 방법으로 Duncan(1970)의 쌍곡선 모델(Hyperbolic model)을 기반으로 한 CHBDC(2003)의 할선탄성계수 산정식을 이용하고 ASHTTO 분류법의 SW의 물성치를 가정하여 산정하였다.

### 3.2.3 활하중

활하중의 경우 도로공사 표준시방서의 교량적용 하중인 DB-24 하중을 적용하였으며, 구조물에 가해지는 활하중의 중량과 분포는 다음과 같다.

### 3.2.4 단면의 경계조건

가장 핵심적인 분석내용을 위한 가정조건으로써 등가단면과 입체단면(실제단면)에 대해서 모사하였으며 단면의 설정방법은 그림 6과 같다. Duncan은 파형강판

표 1. 할선탄성계수의 산정(CHBDC, 2003)

| Soil Group | 분 류 | Standard proctor density (%) | $k_E$ range | $k_E$ | 계산한 할선탄성 계수 $E_s$ (MPa) | 추천하는 할선탄성 계수 Es $E_s$ (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| I | GW, GP, SW, SP | 85 ~ 90 | 200 ~ 400 | 300 | 7.5 | 6 |
| | | 90 ~ 95 | 400 ~ 1000 | 600 | 15 | 12 |
| | | > 95 | 1000 ~ 2000 | 1200 | 30 | 24 |
| II | GC, SC, SM | 85 ~ 90 | 100 ~ 200 | 150 | 3.75 | 3 |
| | | 90 ~ 95 | 200 ~ 500 | 300 | 7.5 | 6 |
| | | > 95 | 500 ~ 1000 | 600 | 15 | 12 |

표 2. 유한요소해석을 위한 뒷채움재 물성치

| | | | |
|---|---|---|---|
| 체적탄성계수(tf/m$^2$) | 12000 | 내부마찰각(°) | 33 |
| 포와송비 | 0.3 | x방향 측압계수 | 0.455 |
| 단위중량(tf/m$^3$) | 2 | y방향 측압계수 | 0.455 |
| 점착력(tf/m$^2$) | 0.02 | z방양 측압계수 | 0.455 |

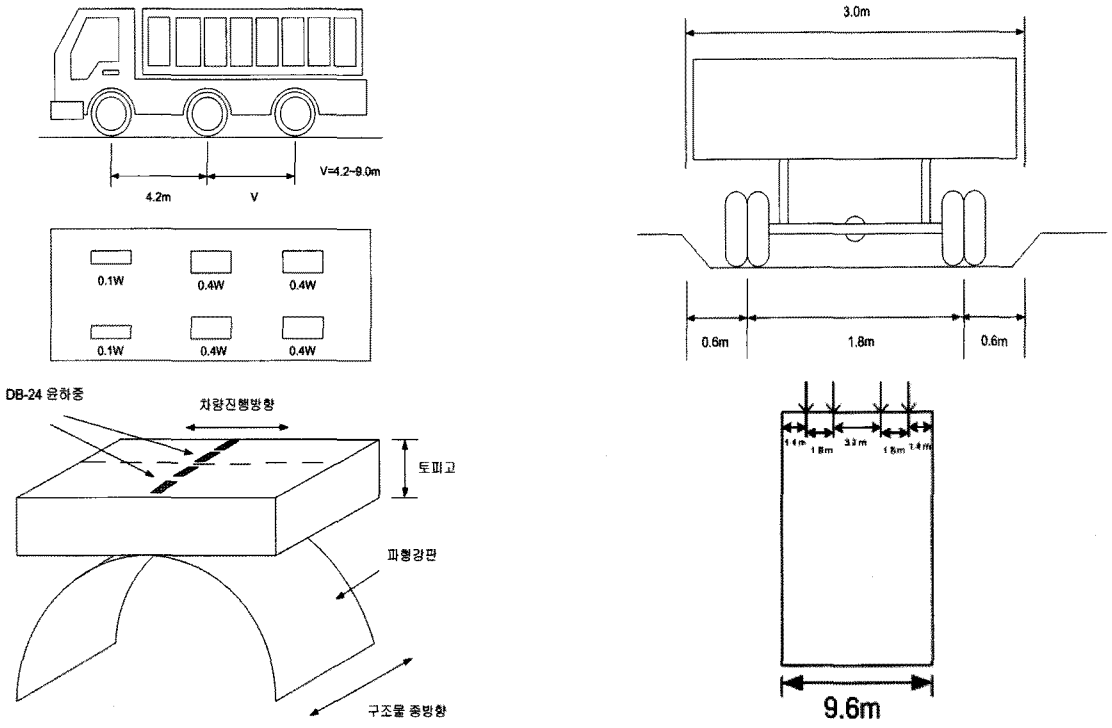
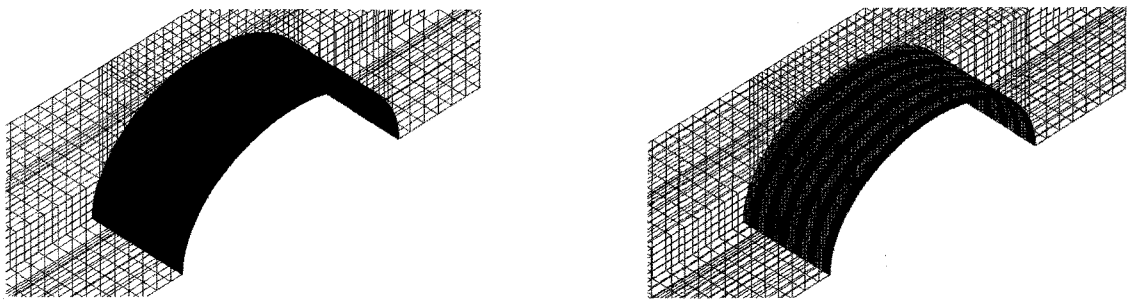



그림 5. DB-24의 재하위치와 재하량(도로설계기준, 2005)



등가단면 입체단면(실제단면)

그림 6. 등가단면과 입체단면

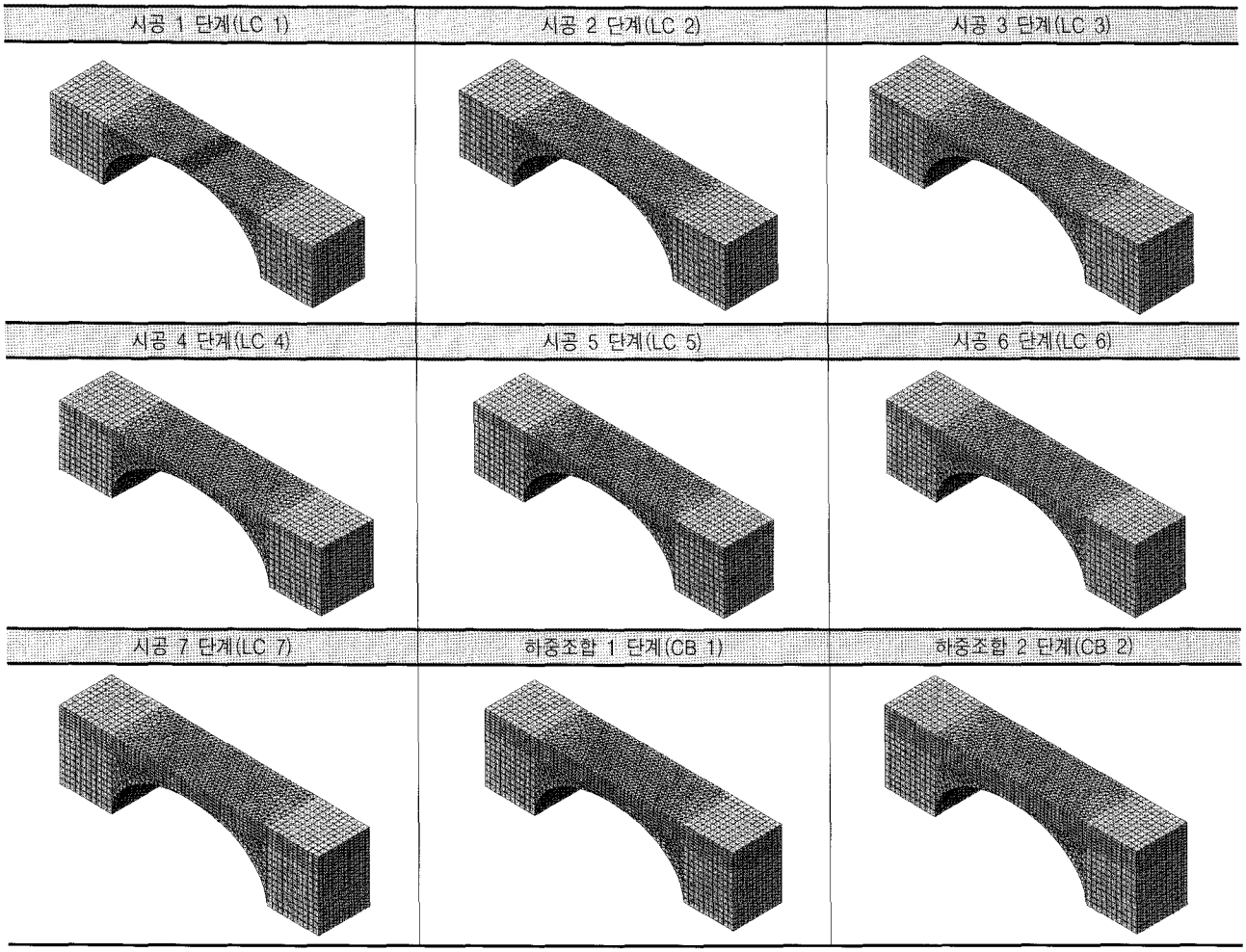



그림 7. 시공단계에 따른 모델링의 설정

과 지반 사이에 Interface 요소를 사용한 결과와 강결로 처리한 결과는 강판과 지반의 미끄러짐이 적으므로 결과는 유사하다는 결론을 도출했고(Duncan, 1979), 본 논문의 해석모델 역시 CHBDC(2003)에 따르는 충분한 토피고를 설정하였기 때문에 뒷채움재와 파형강판은 일체로 거동한다고 가정하고 Iterface 요소를 사용하지 않았다.

### 3.2.5 시공단계의 설정

앞서 규정한 구조물 형태에 대해서 7단계의 시공과정으로 나누어 시공과정에 따른 단면력(압축력, 휨모멘트)의 해석을 수행하였다. 또한, 시공이 완료된 후에 DB-24 하중의 재하상태에서의 단면력과 시공 후 운용 중을 고려한 사하중계수($\alpha$=1.25)와 활하중계수($\beta$=1.7)을 적용한 결과로 나타내었다.

## 3.3 단면의 압축력 해석(지간별)

그림 5는 1600mm 간격의 보강에 대한 최대 압축력을 나타낸 것이며, 등가단면과 입체단면에서의 압축력으로 나누어 나타내었다.

유한요소해석 결과를 보면 모든 보강상태에서 반원형 아치구조물보다 낮은 아치구조물이 더 높은 축력을 나타냈으며, 입체단면과 등가단면의 비교를 보면 두 단면형식 모두 입체단면이 거의 모든 지간에서 등가단면보다 더 큰 축력을 받는 것으로 나타났다.

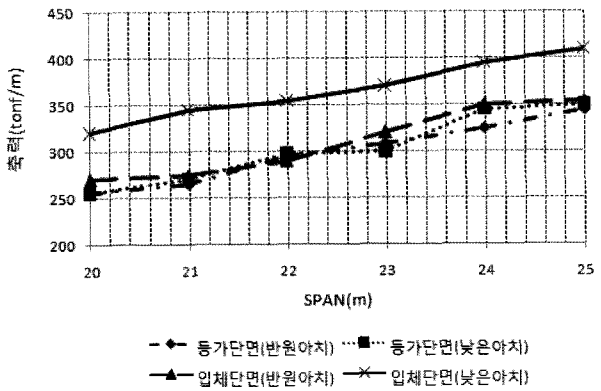



그림 8. 구조물의 지간(span)에 따른 축력분포(1600mm 보강)

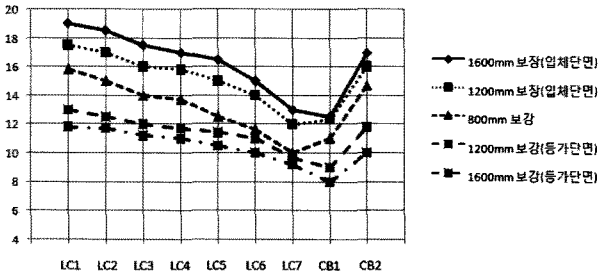



그림 9. 지간 25m에 대한 최대모멘트(정모멘트)

### 3.4 단면의 모멘트 해석(구조물 형상별)

아치구조물의 경우 휨모멘트가 일반적으로 적게 발생하기 때문에 압축력이 가장 중요한 단면력이라 할 수 있다. 하지만 파형강판구조물의 경우 단면자체가 휨에 대해 연성이고 일반 다른 지중 구조물에 비해 토피고가 낮은 구조물이라 할 수 있다. 또한, 장지간화 될수록 휨에 대해서 저항성이 낮아지므로 활하중에 의한 모멘트가 거동을 좌우하게 된다.

압축력에 대한 해석과 마찬가지로 지간 25m에 대하여 반원아치와 낮은 아치 강합성구조물을 모델링하여 모멘트를 비교하였으며, 모멘트는 각 시공단계에서 최대 정(+)모멘트와 부(-)모멘트로 나누어 검토하였다.

반원아치단면의 경우, 지간이 길어질수록 정모멘트는 증가하게 된다. 등가단면으로 가정한 단면은 보강간격이 멀어질수록 작용하는 정모멘트량이 적어지는 것으로 계산되었지만, 입체단면으로 가정한 경우에는 이와 반대로 보강간격이 넓어질수록 단면에 가해지는 정모멘트량은 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 강합성 빔보강 구조물을 설계할 때 사용되는 설계법의 기본개념인 등가단면을 통한 해석과 실제 단면형상을 고려한 입체단면의 유한요소해석을 지간 및 시공단계별로 거동 및 최대 단면력을 비교·검토하여 현행 설계방법의 타당성을 검증하고 구조적 안정성 및 시공중 발생하는 휨모멘트 거동분석을 통해 강합성빔보강이 구조물에 미치는 3차원적인 영향을 연구하고자 하였다.

(1) 단면의 압축력 해석에 있어서는 동일한 단면에 대하여 등가단면의 경우 보강영역에 따른 압축력의 큰 차이는 보이지 않았다. 하지만 입체단면에서의 압축력은 보강영역의 간격이 클수록 큰 압축력을 보였는데, 등가단면에서의 압축력과 비교하면 1600mm 보강의 경우 1.25배 크게 나타났다. 이는 토압의 크기 및 분포를 결정하는 주요인자가 보강영역과 비보강영역의 두께 차에 의한 것이기 때문이다.

(2) 반원아치 및 낮은 아치구조물의 시공단계별 압축력은 시공이 진행됨에 따라 뒷채움재의 증가에 의해 선형적으로 증가하는 양상을 나타내었으며, 활하중 재하 후 공용중인 하중을 모사하기 위한 하중계수($\alpha$, $\beta$)를 고려하였을 때 압축력의 증가가 두드러졌다.

(3) 25m의 지간을 가진 구조물에서의 시공단계별 모멘트 분포는 등가단면 구조물과 비등가단면 구조물 사이에서 반대의 경향을 보였는데, 보강간격이 넓어질수록 등가단면의 경우 모멘트가 줄어들고 비등가단면 구조물의 경우 커지는 경향을 나타내었다. 이는 기존 등가설계방법의 모멘트 산정방식이 실제 모멘트 거동과 큰 차이가 있을 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구결과를 통해 2차원적인 요소만을 고려한 등가단면과 3차원적인 형상을 고려한 단면에서의 단면력과 모멘트분포는 그 크기와 거동에 있어서 큰 차이를 보인다는 것을 입증하였다. 3차원 영향인자를 고려한 설계를 위해서는 해석결과의 시험시공을 통한 시험결과와의 비교·검토를 통해 지간에 따른 단면력 뿐만 아니라 구조물 연장방향에 대한 고려를 병행해야 할 것이다.

## 참 고 문 헌


1. 건설교통부 (2003), 도로공사 표준시방서, pp.154-178.
2. 김성곤 (2003), "*대골형 파형강판 휨강도에 대한 연구*", 석사학위논문, 서울산업대학교 산업대학원 구조공학과, pp.31-45
4. 유호연 (2001), "*장스팬 파형강판 구조물의 설계법 개발*", 석사학위논문, 한양대학교 대학원 토목공학과, pp.26-43.
5. 윤희두 (2003), "*콘크리트 충전 파형강판 구조물의 시공단계별 단면력 평가*", 석사학위논문, 한양대학교 대학원 토목공학과, pp.30-52.
6. 포항산업과학연구원 (1998), *파형강판 지중암거의 설계와 시공*, pp.69-74.
7. 포항산업과학연구원 (2002), *장스팬 파형강판 구조물 실용화 연구*, pp.30-42.
8. Byrne, P. M., Anderson, D. L., and Jinto, H. (1996), *Seismic Anlysis of Large Buried Culvert Structures Transp.* Res. Rec., 1541, pp. 133-139.
9. Canadian Standards Association, *CAN/CSA - S6 - 00* (2001): Canadian Highway Bridge Design Code, Rexdale, Ontario.
10. Duncan, J. M. (1979), "Behaviour and Design of Long-Span Metal Culvert Structures", *ASCE Journal of Geotechnical Division*, Vol.105, No.3, pp.399-417.


(접수일자 2010. 4. 6, 심사완료일 2010. 6. 17)