

# 셀요소를 이용한 박판다실박스거더에서의 비틀림과 뒤틀림 해석기법 연구

## A Study of Torsional and Distortional Analysis of Thin-walled Multicell Box Girder Using Shell Elements

김승준\* · 박종섭\*\* · 김성남\*\*\* · 강영종\*\*\*\*

Kim, Seung Jun · Park, Jong Sub · Kim, Sung Nam · Kang, Young Jong

### Abstract

Thin-walled multicell box girders subjected to an eccentric load can be produced the three global behaviors of flexure, torsion, and distortion. But it is very difficult to evaluate each influences of major behaviors numerically. If we can decompose an eccentric load  $P$  into flexural, torsional, and distortional forces, we can execute quantitative analysis each influences of major behaviors. Decomposition of Applied Load for Thin-walled Rectangular multi-cell box girders is reserched by Park, Nam-Hoi(Development of a multicell Box Beam Element Including Distortional Degrees of Freedom, 2003). But researches about thin-walled trapezoidal multi-cell section is insufficient. So, this paper deals with decomposition process and independent analysis method of multi-cell box girders include trapezoidal section.

**key words** : Distortional Analysis, Force-Decompositon, Multicell Box Girders.

### 1. 서 론

편심하중이 작용하는 박판 다실박스거더에서의 주요 거동인 비틀림 및 뒤틀림거동에 대한 유한요소해석에 있어서 보요소를 사용한 해석법과 셸요소를 사용한 해석법에 대해 많은 연구가 이루어져왔다. 보요소를 이용한 해석법에서는 먼저 단면에서의 비틀림 및 뒤틀림상수들을 계산해야 하는 어려움이 따른다. 그리고 기존의 셸요소를 이용한 해석법에 있어서는 작용하는 편심하중에 대해서 비틀림 및 뒤틀림거동에 의한 법선응력 및 변위등을 독립적으로 얻을 수가 없다. 하지만 보요소해석법과 달리 이 셸요소를 이용한 해석법에서는 비틀림 및 뒤틀림상수를 먼저 계산할 필요가 없다는 장점이 있다. 본 연구에서는 작용하는 편심하중을 휨과 비틀림 그리고 뒤틀림을 유발하는 하중상태로 분리하고 이를 각각 셸요소 모델에 재하하여 각 거동에 대한 영향을 정량적으로 얻어내는 해석법을 제시한다. 직사각형 단면을 갖는 다실 박스거더에서의 편심하중의 분리연구는 박남희 등(2002)에 의해 수행되었지만 제형단면을 갖는 다실박스거더에서의 편심하중분리는 많은 연구가 이루어지지 않았기에 본 논문에서는 이 부분에 대한 연구를 추가하여 분리식 및 해석법을 제안하였다.

### 2. 하중분리식의 유도

제형 박스거더에 작용하는 편심하중  $P$ 는 크게 순수 휨을 유발하는 하중, 순수 비틀림을 유발하는 하중, 그리고 순수 뒤틀림을 유발하는 하중으로 분리할 수 있다. 이러한 각각의 거동을 일으키는 하중상태는 기본적으로 힘의 평형조건과 중첩의 원리를 이용하여 분리해 낼 수 있다. 내부에 2개 이상의 셸(cell)을 갖는 단

\* 비회원 · 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 박사과정 · E-mail:rocksmell@korea.ac.kr

\*\* 정회원 · 상명대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail:jonpark@smu.ac.kr

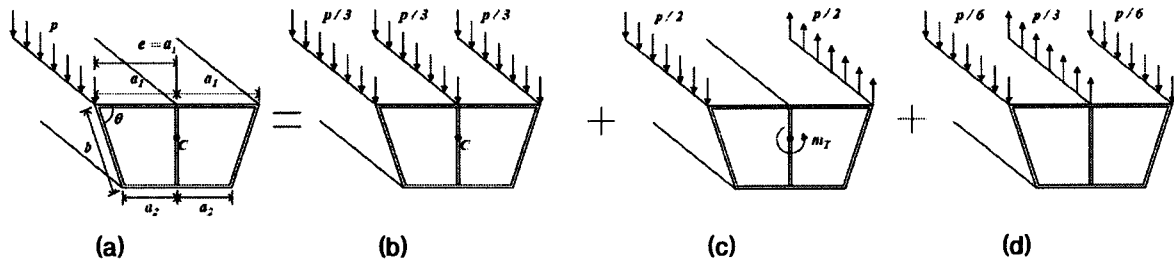
\*\*\* 정회원 · 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 박사과정 · 공학박사 · E-mail:magach7@korea.ac.kr

\*\*\*\* 정회원 · 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수 · 공학박사 · E-mail:yjkang@korea.ac.kr

면에서는 평형조건 및 중첩의 원리에 의해 추가적인 뒤틀림하중이 유도된다. 단면에 작용하는 편심하중을 먼저 각 복부판에 일정한 크기로 작용하는 휨하중과 비틀림모멘트  $m_T$ 를 유발시키는 비틀림하중을 양 끝의 복부판에 떨어지는 우력으로서 표현이 가능하다. 그런데 이 두 하중상태를 중첩시키면 단실 제형단면에서와 달리 다실 단면에서는 편심하중상태하중과 맞지 않다. 따라서 이 두 상태의 차이를 맞출 수 있는 추가적인 하중상태가 유도되고 이 하중상태를 추가적인 뒤틀림하중상태로서 고려할 수 있다.

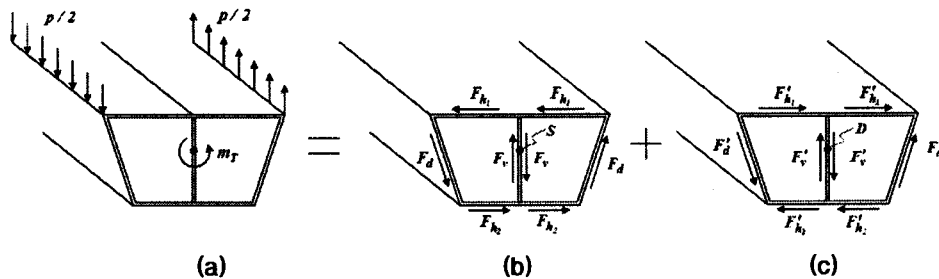
### 2.1 2실 제형 다실 박스거더에서의 편심하중분리

그림 1과 같이 2실 제형 박스거더에서는 작용하는 편심하중에 대해 휨하중(그림 1(b))과 비틀림하중(그림 1(c)) 그리고 중첩시 힘의 일치를 만족하기 위해 추가적인 뒤틀림하중(그림 1(d))로 분리가 된다. 그리고 비틀림하중은 다시 순수뒤틀림을 유발하는 하중(그림 2(b))과 순수뒤틀림하중(그림 2(c))로 분리가 된다. 순수비틀림하중은 단면 내 작용하는 비틀림하중이 모두 단위길이당 같은 하중으로서 작용하고 이 하중들은 비틀림모멘트  $m_T$ 를 유발한다는 조건으로서 유도가 가능하다. 이렇게 유도한 순수비틀림하중상태를 비틀림하중(그림 2(a))에서 배면 중첩의 원리에 따라 뒤틀림하중상태를 유도해 낼 수 있고, 단면 내에서 작용하는 뒤틀림하중은 하중의 평형을 만족하게 된다.



(a) 편심하중; (b) 휨하중; (c) 비틀림하중; (d) 순수뒤틀림하중(2<sup>nd</sup>)

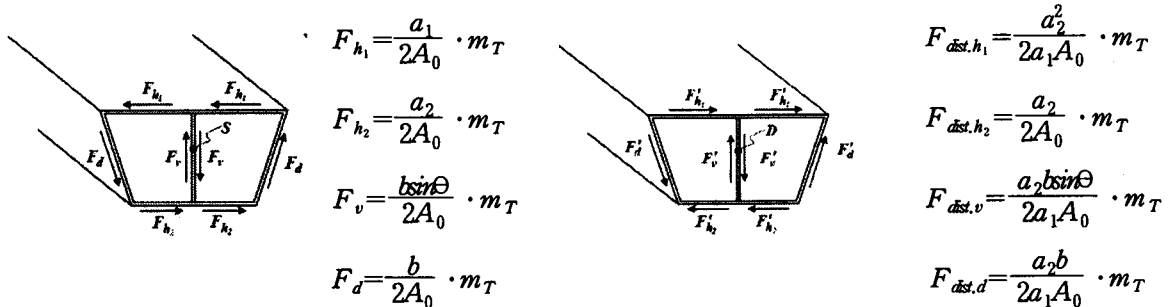
그림 1. 2실 단면에서의 편심하중의 분리



(a) 비틀림하중; (b) 순수비틀림하중; (c) 순수뒤틀림하중(1<sup>st</sup>)

그림 2. 비틀림하중의 분리

순수비틀림하중과 1차 순수뒤틀림하중의 크기 및 작용방향은 다음과 같다.



(a) 순수비틀림하중

(b) 순수뒤틀림하중(1<sup>st</sup>)

그림 3. 2실 단면에서의 순수비틀림하중과 순수뒤틀림하중(1<sup>st</sup>)

### 3. 분리식을 통한 독립적인 해석

앞서 유도한 분리식을 이용하여 순수하게 비틀림 및 뒤틀림에 의한 응력 및 변위를 얻을 수 있다. 본 절에서는 예제모델을 이용하여 작용하는 편심하중에 대한 거더 내의 주요거동에 의한 독립적인 결과물을 얻어내는 과정을 나타내고 앞서 유도한 분리식을 검증하였다. 검증법은 분리된 하중에 의한 독립적인 결과물의 합이 편심하중을 재하했을 때 발생하는 결과물과 같다는 것을 보임으로서 검증하였고 법선응력과 수직방향 처짐을 비교하여 검증하였다. 본 절에서 사용된 모델은 그림 16과 같이 단순지지된 보 구조물이다. 지간 길이, 단면 형상, 하중의 재하 위치 및 크기 등은 그림 16과 같도 양 지점에 다이아프램을 모사하였는데 그림에서 2실단면을 보이기 위해 프로그램의 뷰 옵션에서 다이아프램을 숨겼다.  $E=210000\text{MPa}$ ,  $\nu=0.3$ 을 적용하였고 지점은 실제 구조물의 시공 상태를 고려하여 복부판의 최 하단에 모사하였다. 해석에 사용된 요소는 4 절점을 갖는 thin shell 요소를 사용하였고 총 사용된 요소수는 12256개이다.

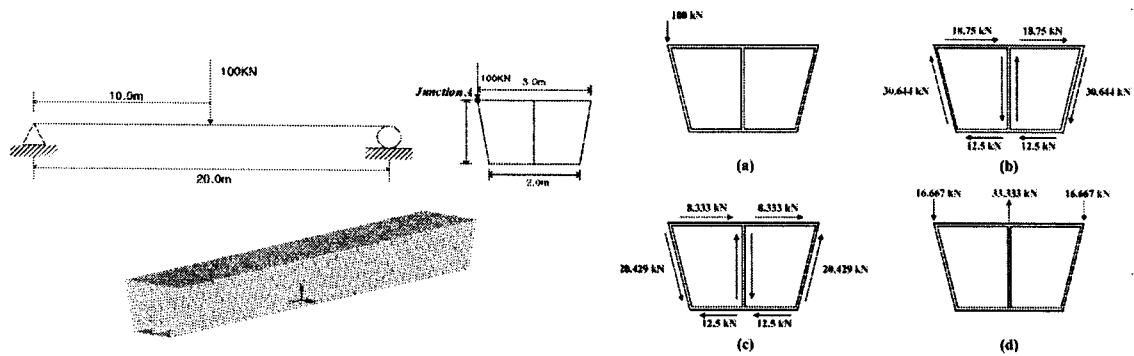


그림 4. 검증모델 및 분리된 하중  
(a) 편심하중;(b) 순수비틀림하중;  
(c) 순수뒤틀림하중(1<sup>st</sup>);(d) 순수뒤틀림하중(2<sup>nd</sup>)

그림 4은 분리된 하중상태를 나타내고 있다. 그림 4(a)와 같은 편심하중 100kN이 세 복부판 위에 33.33kN씩 재하되는 휨하중과 그림 4(b)와 같은 순수비틀림하중 그리고 그림 4(c), (d)와 같은 순수뒤틀림하중으로 분리가 되고 이러한 각각의 하중에 대해 독립적으로 해석을 수행하였다.

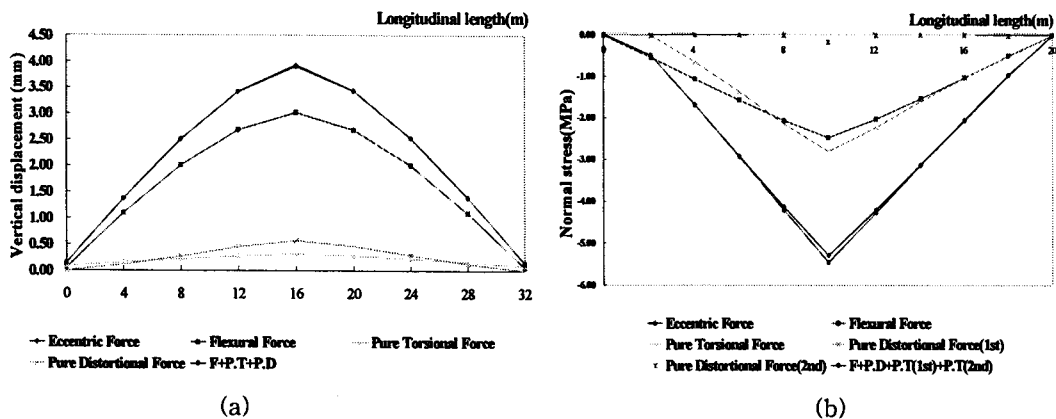


그림 5. 길이에 따른 Junction A에서 발생하는 수직방향 변위 및 법선응력  
(a) 수직방향 변위 (b)법선응력

그림 5에서 보는 바와 같이 시간길이에 따라 분리된 각 하중에 의해 발생하는 수직변위 및 법선응력의 합은 편심하중에 의한 법선응력과 거의 일치함을 보이고 있어 유도된 식은 타당하다고 볼 수 있다. 시간 중앙부에서 합산의 오차가 있는데 이것은 집중하중재하에 따른 쉘모델에서 발생한 국부적인 요인에 의한 것으로 판단되고 오차는 약 2.3%이다. 이러한 분리식에 의하여 편심하중에 의해 비틀림 및 뒤틀림에 의해 거더에 발생하는 휨 법선응력 및 변위등을 이와 같이 독립적으로 얻어낼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 박스거더에 작용하는 편심하중을 힘의 평형조건과 중첩의 원리를 이용하여 각 주요 거동을 야기하는 독립된 하중상태로 분리하는 식을 유도하였고 이를 유한요소해석을 이용하여 검증하였다. 본 논문에는 2실 제형박스거더에서의 하중분리식만을 유도하였는데, 앞서 언급한 가정을 이용하면 3실 이상의 다실 박스거더에서의 편심하중분리식을 어렵지 않게 유도해 낼 수 있다. 3실 이상의 단면에 대해서는 비틀림하중을 유발하는 우력의 위치에 따라 여러 경우의 하중분리형태를 고려할 수 있고 이에 따라 다양한 뒤틀림하중 형태를 유도할 수 있다. 즉, 이러한 다실박스거더에서의 하중분리연구를 통해 다양한 뒤틀림모드를 도출하고 독립적으로 해석할 수 있게 된다. 제시된 분리식의 검증을 위해 예제모델을 이용하였는데 유한요소해석을 이용한 검증에서는 유도된 각 하중상태를 독립적으로 재하하여 단면 내 특정점에서 발생하는 법선응력을 각각 얻을 수 있었고 이를 합산하여 편심하중만을 재하한 모델에서의 법선응력값과의 비교를 통하여 유도된 식을 검증하였다. 비교결과 거의 일치함을 알 수 있었다. 본 연구에서 제안한 분리식을 거더의 쉘요소 모델에 적용하면 각 거동에 의한 영향을 정량적으로 분석할 수 있다. 본 연구에서 제안한 해석법의 가장 큰 장점은 사전에 단면의 뒤틀림 상수를 계산할 필요가 없다는 것이고 기존의 쉘요소해석에 있어서 각 거동에 의해 발생하는 정량적 결과물을 분리해 낼 수 없는 단점을 해결한 데에 있다. 예제모델에서 본 바와 같이 이러한 하중 분리식의 적용을 통하여 거더에서 발생하는 비틀림 및 뒤틀림거동에 대해 정량적인 연구가 쉘요소 모델을 이용하여 손쉽게 수행될 수 있다. 그리고 제형박스거더의 설계에 있어서 작용하는 하중에 의해 발생하는 뒤틀림 휨 법선응력을 손쉽게 알 수 있기 때문에 특히 다이어그램의 설계에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Dabrowski, R., "Curved Thin-Walled Girders Theory and Analysis", *Cement and Concrete Association*, 1968
2. Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington D.C, 1993
3. Jonsson, J., "Distortional theory of thin-walled beams", *Thin-Walled Structures*, 33, 269-303, 1999
4. Maisel, B.I., "Review of Literature Related to the Analysis and Design of Thin-Walled Beams", *Cement and Concrete Association*, Technical Report 440, London, UK, 1970
5. Maisel, B.I., "Analysis of concrete box beams using small computer capacity", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12, 265-278, 1985
6. Nakai, H., and Yoo, C.H., "Analysis and Design of Curved Steel Bridges". McGraw-Hill, New York, 111-117, 1988
7. Park, Nam-Hoi. Development of a multicell Box Beam Element Including Distortional Degrees of Freedom, 2002