

콘크리트 장대교량의 구조해석 기법

## 콘크리트 박스거더교의 구조해석

Structural Analysis of Concrete Box Girder Bridges



김 병 석\*

### 1. 머리말

콘크리트 박스거더는 경제적, 미적 측면에서 우수한 것으로 인정되어 중지간의 교량 건설에 사용되어 왔으며, 특히 1950년대 이후 유럽을 중심으로 개발되어 온 프리스트레스트 콘크리트(PC) 박스거더의 경우에는 지형 조건에 따라 다양한 공법을 적용할 수 있고 기계화 시공이 가능하게 됨에 따라 국내외적으로 적용사례가 증가되는 추세에 있다.

국내에서는 1981년에 대형교량으로는 처음으로 원효대교가 Dywidag 공법을 사용하여 PC 박스거더교로 건설된 이후 급격한 건설 증가추세를 보이고 있으며 현재까지 건설된 PC 박스거더 교량 수는 100개를 상회하고 있다.

그러나 국내에서 박스거더교를 구조 해석하는 방법은 설계회사별로 많은 차이를 보이고 있으며, 특

히 횡방향 해석에 있어서 일부의 경우에는 해석과 정의 타당성이 의문시되는 부분도 있는 실정이다.

그러므로, 본 고에서는 설계 실무자들에게 도움이 될 수 있도록 박스거더의 거동 특성을 소개하고, 전산 프로그램을 사용하여 콘크리트 박스거더교를 선형탄성해석 할 수 있는 방법들을 중심으로 소개하고자 한다.

### 2. 박스거더의 구조거동

박스거더의 구조거동으로는 휨(bending), 비틀림(torsion), 횡단면 변형(distortion), 전단뒤짐(shear lag), 비틀림(torsional warping), 횡단면 변형에 의한 뒹(distortional warping), 국부휨(local bending) 등이 있다. 그림 1은 박스거더의 주요거동에 대한 변형과 응력유형을 보여준다.

\* 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사

횡단면 변형에 의한 횡방향 힘은 횡방향 격벽 (diaphragm)을 많이 배치하면 방지할 수 있으나 일반적으로 콘크리트박스거더의 경우에는 단면치수에 따라 3m~12m 이하의 간격으로 격벽을 배치해야 충분한 효과를 기대할 수 있다. 그러므로 격벽 배치를 줄이고 횡단면 변형을 고려하여 설계하는 것이 시공성 향상을 통해 더욱 경제적인 설계가 될 수 있다. Mrotztek의 연구에 의하면 1실 박스거더에 격벽을 배치하지 않으면 횡방향 배근량이 5%정도 증가하는 것으로 분석되었다.

횡단면의 뒹은 비틀 하중에 의해 횡단면 면외 변위가 발생하는 것이다. 면외 변위가 구속되면 종방향 법선응력이 발생한다. 뒹은 비틀뒹과 횡단면 변형에 의한 뒹으로 대별될 수 있는데, 전자는 플랜지와 복부의 면내 전단변형과 관련되며, 후자는 플랜

지와 복부의 면내 휨과 관련이 있다(그림 2 참조). 콘크리트 박스거더의 경우에는 후자가 뒹응력 유발의 주요인이다.

대칭하중에 의해, 비틀 없이 휨만에 의해서도 뒹 변위가 발생할 수 있는데 이러한 현상을 전단뒹짐이라 한다(그림 3 참조). 물론 비틀 하중에 의해서도 전단뒹짐이 발생할 수 있다. 전단뒹짐은 플랜지의 면내 전단변형과 관련이 있으며, 복부 위치에서는 플랜지의 종방향 법선응력이 크고, 복부에서 멀어질수록 감소하는 특성이 있다. 그러므로 휨에 대한 플랜지 유효폭을 감소시키는 결과를 초래한다. 전단뒹짐을 고려하면, 일반적인 등보이론에 의한 계산 값보다 종방향 법선응력의 최대값이 80%이상 증가하기도 한다.

Bakhoun 등의 연구에 의하면 BS5400 과 DIN에 규정된 활하중으로 해석할 경우에 비틀뒹, 횡단면 변형에 의한 뒹, 전단뒹짐 등을 고려하면 종방향 법선응력이 활하중 응력 대비 25%이상 증가되는 것으로 보고되었다.

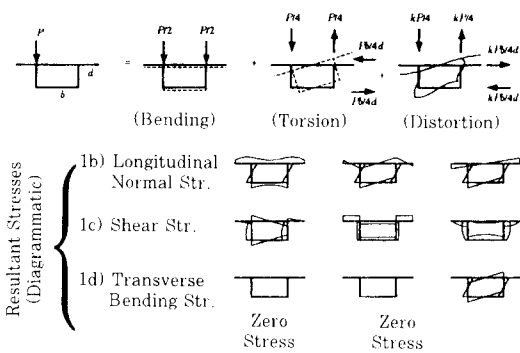


그림 1 박스거더의 주요거동

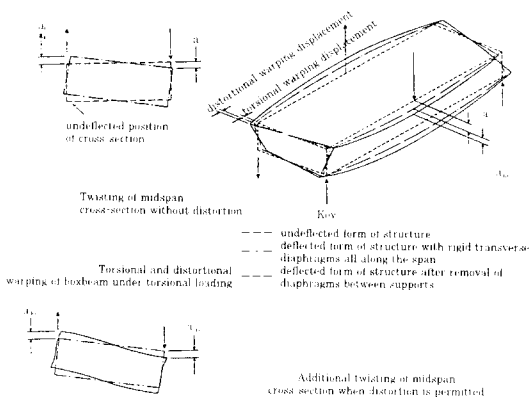


그림 2 박스거더의 뒹

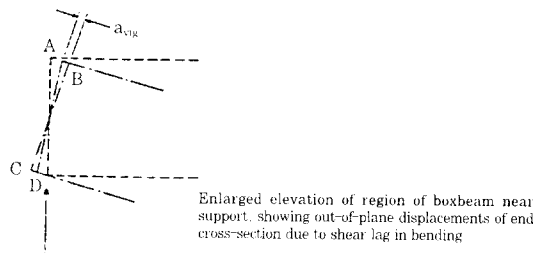
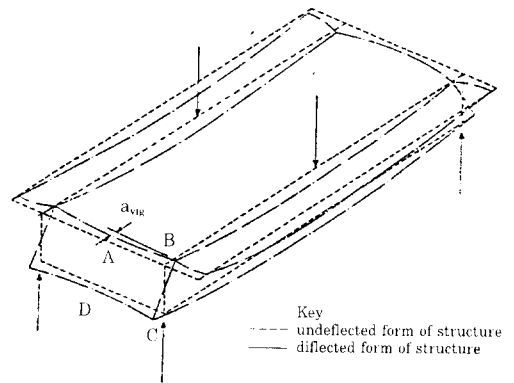


그림 3 박스거더의 전단뒹짐

### 3. 구조해석

#### 3.1 개요

콘크리트 박스거더는 판구조요소들의 복합체이므로 실제거동은 매우 복잡하고, 횡방향과 종방향의 거동이 상호 연계되어 나타나지만 일반적으로는 종방향과 횡방향 거동을 분리시켜 구조해석을 실시한다. 표 1은 박스거더교의 구조해석에 사용될 수 있는 방법들을 정리한 것이다.

이중에서 (1)~(8)은 비교적 간단하게 계산할 수 있는 방법이고 (9)~(12)는 전자계산기를 사용하여 하는 복잡한 해석법이다.

해석법(1)은 일반적인 들보이론으로서 횡방향 휨모멘트 효과를 고려할 수 없지만, 종방향 해석에 이 방법을 사용하여 거더높이나 복부두께 등을 결정하고, (8)의 방법에 의해 상부슬래브를 설계하며 (4)~(6)의 해석법에 의해 뒹(warping)이나 횡단면 변형(distortion)의 영향을 고려하면 된다.

(2),(3),(4)나 (6)의 방법은 횡단면 변형해석에만 적용하는 것이고 (7)은 전단뒤짐(shear lag) 효과만을 고려할 수 있다. 강박스거더교(steel box girder bridge) 처럼 두께가 매우 얇을 때는 전단뒤짐이 매우 큰 영향을 미치지만 콘크리트 교량에서는 상대적으로 영향이 크지 않으므로, 일반적으로는 유효폭 개념으로 전단뒤짐효과를 고려하고 있다.

(9)의 방법은 횡방향 효과를 충분히 반영할 수 없으며 다중박스거더교(multi-cell box girder bridge) 일 경우에 일반적으로 적용된다. (10)~(12)의 방법은 박스거더교에 발생될 수 있는 모든 효과를 고려할 수 있으나 입출력 자료가 복잡하고, 프로그램의 배경이론을 충분히 숙지해야만 신뢰성 있는 해석을 할 수 있다는 문제점이 있다.

국내의 경우는 일반적으로 (1)의 방법을 사용하여 종방향 구조해석을 하고, 횡방향 해석은 도로교 시방서의 바닥판 설계 휨모멘트 산정식을 사용하여 DB하중의 분포폭을 결정한 뒤, 이 분포폭을 사용하여 횡방향 프레임 해석을 실시하는 방법을 채택하고 있다.

그러나 도로교 표준시방서에 있는 바닥판 설계휨

모멘트 산정식은 슬래브교의 횡방향 휨모멘트 산정식을 근거로 한 것이므로, 횡방향 현차가 있으며 폐함단면인 PC 박스거더 해석에 이 방법을 적용하는 것은 불합리하다. 선진국에서는 이미(10), (11), (12)의 정밀해석법을 상세설계단계에서 사용하고 있으므로, 국내에서도 향후 이 방법들을 사용하는 방향으로 점진적으로 개선되어야 할 것으로 판단된다.

표 1 박스거더 구조해석 방법별 특성

해석 방법	해석범위						
	종방향 휨	순수 비틀림	횡단면 변형	뒹	횡단면 변형률	전단 뒤짐	국부 효과
(1) 들보이론	○	○					
(2) Knittel			○				
(3) Richmond			○		○		
(4) Kupfer			○		○		
(5) Kollbrunner and Hajdin				○			
(6) BEF 유사법			○		○		
(7) Reissner						○	
(8) 영향면							○
(9) 격자법	○	○	○				
(10) 결관법	○	○	○	○	○	○	○
(11) 유효대판법	○	○	○	○	○	○	○
(12) 유효요소법	○	○	○	○	○	○	○

#### 3.2 종방향 구조해석

박스거더교의 대표적인 단면모양에는 단일 박스거더, 다주 박스거더, 다중 박스거더교의 3종류가 있다. 각 단면모양 및 교폭과 지간의 비에 따라 주거더의 단면력을 산출할 때의 해석이론이 다르므로 기본설계된 박스거더에 적합한 해석이론을 이용하는 것이 가장 중요하다. 판이론을 적용하면 모든 경우에 적합하지만 실무에서는 일반적으로 단순한 해석이론을 적용하고 있다. 판이론에 근거한 해석방법은 3.4절에서 기술하고 여기서는 실무에서 일반적으로 사용하는 해석방법을 단면유형별로 기술한다.

##### (1) 단일 박스거더교

단일 박스거더교는 비틀림 강성이 크고 활하중에 대한 하중분배도 양호하므로 박스거더 전단면을 하나의 거더로 보고 교축방향 단면력을 산출할 수 있다. 사각이 70° 이하인 경우는 단일 박스거더교에도 격자구조이론을 이용하거나 판요소를 사용해서 단

면력을 산출하는 것이 좋다.

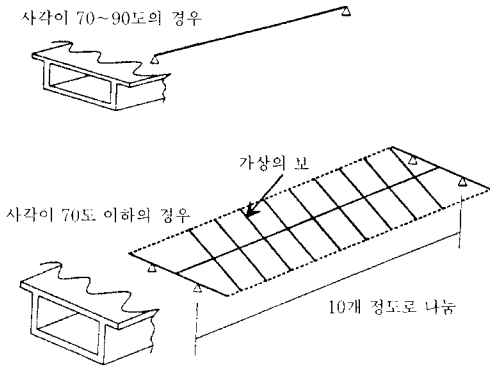


그림 4 단일 박스거더교의 해석모델의 예

(2) 다주형 박스거더교

다주 박스거더교는 판이론을 적용하지 않는다면 격자구조이론을 적용하여 주거더 단면력을 산출하는 것이 원칙이다. 이 경우 각 박스거더를 하나의 거더로 하고 가로보가 각 박스거더를 연결하는 격자구조로 모델링하는 것이 일반적이다. 따라서 단면상수의 산정은 각 박스거더마다의 단면적, 단면2차모멘트 이외에 비틀 강성을 계산할 필요가 있다. 또한 가로보에 관해서도 단면상수를 구해야만 한다.

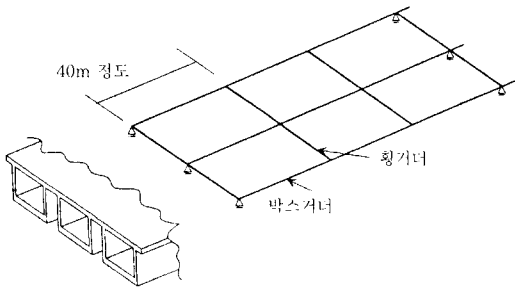


그림 5 다주 박스거더교의 해석모델 예

(3) 다중 박스거더교

다중 박스거더교는 교량의 전폭과 지간의 비(전폭/지간)가 0.5 이하의 경우에는 박스거더 전단면을 하나의 보로 보고 교축방향 단면력을 산출할 수 있다. 그러나 0.5 이상의 비교적 폭이 큰 다중 박스거더의 경우는 판요소를 사용하여 유한요소 해석을

하든지, 직교이방성판이론(Guyon-Massonnet 방법) 또는 격자구조이론에 의해 단면력을 산출하는 것이 원칙이다.

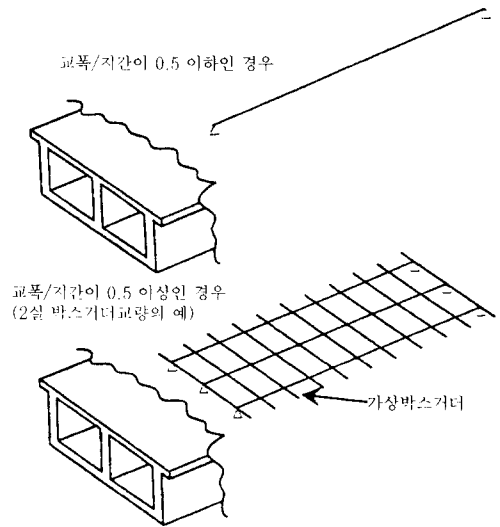


그림 6 다중 박스거더교의 해석모델 예

3.3 횡방향 구조해석

박스거더교에 작용하는 DB하중에 대해 횡방향 구조해석을 실시할 수 있는 방법을 대별하면 다음과 같다.

- ① 도로교 시방서의 설계휨모멘트를 사용하여 국부휨모멘트(local moment)를 구한 뒤 프레임 해석하는 방법
- ② 도로교 시방서의 설계휨모멘트를 사용하여 하중분포폭을 결정한 뒤 프레임 해석하는 방법
- ③ 영향면(influence surface)을 사용하여 국부휨모멘트를 구한 뒤 프레임 해석하거나 질점하중에 대한 횡방향 해석을 할 수 있는 방법을 사용하는 것
- ④ 복부를 고정단으로 하여 DB하중을 재하해서 바닥판을 유한요소법으로 해석하고, 동일한 하중에 대해 박스거더 횡단면을 프레임으로 구조해석한 뒤, 두값의 비교분석을 통해 분포폭을 결정하고, DB하중을 감소시켜 프레임 모델에 수정된 하중을 재하하는 방법
- ⑤ 절판법(Folded Plate Method), 유한대판법

(Finite Strip Method), 유한요소법(Finite Element Method) 등을 사용하여 정밀해석하는 방법

이중에서 ①의 방법은 미국의 AASHTO 시방서를 배경으로 하는 것으로서 일반적으로 상당히 안전측의 결과를 얻을 수 있다.

그러나 AASHTO의 바닥판 설계식은 슬래브교의 휨모멘트에 대한 연구를 근거로 한 것이므로, 횡방향 현차가 있으며 폐합단면인 PC 박스거더교의 횡방향 설계에 그대로 적용하는 것은 불합리하다.

②의 방법은 국내의 설계회사들이 대부분 적용하고 있는 방법으로서 AASHTO식의 근본취지와는 부합되지 않는 것으로 판단되며 내부바닥판 지간이 길어질 수록 지나치게 안전측으로 설계되는 문제점을 안고 있다. 그러므로 향후에는 사용이 배제되어야 할 것으로 판단된다.

③의 방법은 Homberg나 Purcher의 영향면을 이용하여 바닥판의 국부휨모멘트를 구하고, 고정단 모멘트를 사용하여 프레임 해석, 혹은 Kupfer의 횡방향 해석법, 또는 Steinle, Wright 등의 BEF(Beam on Elastic Foundation) 유사법을 사용하여 해석하는 방법이다. 이 방법은 ⑤의 방법보다는 비교적 용이하면서 ①, ②의 방법 보다는 정밀한 해석을 할 수 있는 장점이 있다.

④의 방법은 ⑤에 비해 근사적인 방법이지만 ①~③의 방법에 비해서는 상대적으로 정확한 값을 구할 수 있다.

⑤의 방법은 횡단면 변형, 국부휨모멘트, 전단뒹임 등을 모두 고려할 수 있는 방법이지만 입출력이 번잡하고, 설계휨모멘트를 구하기 위해서는 영향선으로 하중재하 위치를 결정해야만 하므로 비교적 복잡하다. 그러므로 국내 설계회사에서는 거의 사용하지 않고 있다.

결국, 횡방향 구조해석시에 적용할 수 있는 가장 정밀한 방법은 ⑤의 방법이지만, ⑤의 방법을 적용하려면 실무에서는 약간의 어려움이 따르므로 국내에서는 거의 사용하고 있지 않다. 그러나 이미 선진 외국에서는 박스거더교를 상설설계할 때 정밀해석 방법을 일반적으로 사용하고 있다. 그러므로 국내에서도 앞으로는 정밀해석방법을 실무에서도 사용하는 방향으로 유도되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.4 정밀 구조해석법

#### 3.4.1 개요

국내에서는 콘크리트 박스거더를 구조해석할 경우, 돌보 요소를 사용하여 구조해석을 하고, 횡방향으로는 영향면을 이용하여 고정단 모멘트 혹은 하중분포폭을 결정한 뒤 프레임 해석을 하거나, 도로교 표준시방서에 규정된 바닥판 설계휨모멘트 산정식을 이용하여 하중분포폭을 결정한 뒤 프레임 해석을 하는 방법을 사용하고 있다.

횡방향 구조해석 방법에 있어서 영향면을 이용하는 방법은 어느 정도 정당성을 확보할 수 있지만, 도로교 표준시방서에 규정된 바닥판 설계 휨모멘트를 이용하는 것은 불합리하다.

도로교 표준시방서를 이용하여 하중분포폭을 결정하는 방법은 이론적 근거가 불확실한데 국내 설계회사에서는 일반적으로 이 방법을 사용하고 있다.

선진국에서는 기본설계단계에서는 근사적인 방법을 사용하지만 상세설계 및 구조해석 단계에서 응력 및 강도 검사를 할 때는 정밀한 방법을 일반적으로 사용하고 있다. 국내에도 근래에는 정밀구조해석 이론을 적용하는 컴퓨터 프로그램이 점차 보급되는 추세이므로 향후에는 보다 경제적이고 신뢰성있는 설계방향으로 개선되어야 할 것으로 판단된다.

특히 사각이 70° 이하이거나 지간에 대한 교폭의 비가 0.5를 넘는 비교적 폭이 넓은 박스거더교는 종방향 구조해석에도 정밀구조해석법을 적용하든지 혹은 격자이론에 따라 단면력을 계산하는 것이 원칙이다. 또한, 횡방향 구조해석에 근사적인 방법을 적용하면 지나치게 안전측의 설계를 할 수 있으므로 유의해야 한다.

정밀구조해석법은 아래와 같이 세가지로 대별될 수 있다.

- ① 절판법 (Folded Plate Method)
- ② 유한대판법 (Finite Strip Method)
- ③ 유한요소법 (Finite Element Method)

이들 방법은 각각 장단점과 적용제한이 있으므로 실무에서 사용할 때는 그 특성을 고려하여 해석방법을 선택해야 한다.

본 고에서는 전문한 세가지 방법의 기본개념과

특성에 대해 기술하고 균열이 없는 균질의 콘크리트 구조(uncracked concrete system)에 대한 선형탄성해석(linear elastic analysis)이론을 중심으로 소개한다. 또한, 미국에서 일반적으로 사용되고 있는 관련 컴퓨터 프로그램인 MUPDI4, CURDI4, CELL4를 사용하여 국내의 설계 트럭하중인 DB 24 하중을 고려한 구조해석예를 소개하고자 한다.

### 3.4.2 절판법 (FPM : Folded Plate Method)

#### (1) 개요

이 방법은 박스거더를 종방향 절점을 따라 상호 연결되고 격벽에 의해 지지된 직사각형 평판의 집합체로 본다. 고전적인 얇은 평판이론과 평면응력 이론에 의해 각 평판요소의 휨모멘트와 막응력을 계산한다.

단면이 일정하고 사교가 아니며, 횡방향 강성이 커서 단면변형이 잘 일어나지 않는 경우는 박스거더를 절판구조로 해석하면 매우 편리하다. 단면이 일정해야 한다는 것은 이 방법을 직접적으로 적용하기 위한 선행조건이지만 변단면인 경우도 반복법으로 계산하면 해석이 가능하다.

컴퓨터를 사용하여 해석할 수 있고, 이 이론 자체가 탄성론에 바탕한 평면응력 이론이나 plate-bending이론을 따르므로 단면형태가 복잡하더라도 문제가 되지 않는다. 박스거더를 판(plate)들이 결합된 형태로 보므로 일반적인 탄성론에서의 가정조건을 만족하는 한도내에서는 근사해석이 아니고 정확한 해석법이라 볼 수 있다. 그러므로 개단면, 폐단면, 일실박스, 다중박스, 다주박스 등 형상에 관계없이 해석할 수 있으며, 하중형태도 어떤 것이건 장애받지 않는다.

절판법은 연속슬랩형태나 라멘형태의 거더, 내부에 격벽이 있는 형태 또는 지점이 불규칙적으로 배치되어 있는 등의 경우에 대해 모두 적용될 수 있다. 그러나 기본적으로는 내부에 격벽이 없으며 양단에서 격벽에 의해 횡단면 변형이 완전히 구속되고  $\tau$ 에 대해서는 완전히 자유로운 단순지지된 박스거더를 기본으로 하여 해석이 된다.

이 이론으로 박스거더를 해석할 경우 일반적으로 조화함수를 이용한 직접강도법을 사용한다. 즉, 임

의 하중을 Fourier 급수를 이용하여 분해한 뒤 각 특정조화함수에 대해 직접강도법으로 해석을 수행하며, 최종결과를 구하기 위해 모든 조화함수에 대한 결과치를 합산하는 방법을 사용한다. 일단 하나의 조화함수에 대한 해석과정이 확립되면, 나머지는 같은 과정을 반복하므로 컴퓨터 프로그램에 적합한 방법이라 할 수 있다. 그림 7은 박스거더를 절판법으로 해석할 경우의 절판요소 분할을 보여준다.

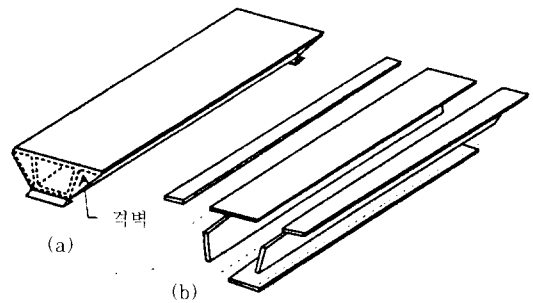


그림 7 절판 요소

### 3.4.3 유한대판법 (FSM : Finite Strip Method)

판요소가 등방성이 아닌 경우는 절판법처럼 강도 매트릭스를 결정하는데 탄성론을 바로 적용해서 조화함수를 이용한 직접강도법으로 해석하면 너무 복잡해지므로 보다 간단한 해석법이 필요하다.

FSM은 FEM(Finite Element Method)에서 약간 변형된 형태로서 이방성인 경우에 적합한 방법이다. 이 방법은 각판을 종방향의 좁은 띠모양으로 분할하여 종방향으로는 변위를 조화함수형태로 가정하며 횡방향으로는 다항식 형태로 가정한다(그림 8 참조).

일반적인 FEM 과정처럼 변형도-변위관계, 응력-변형도관계, 그리고 가상일의 원리나 최소 포텐셜에너지를 적용하면 요소 강도 매트릭스와 절점하중 등을 구성할 수 있다.

이 방법을 사용하면 중간격벽이 없는 단순지지된 직선박스거더교일 경우에 가장 간단하게 해석할 수 있지만, 곡선연속교로서 중간격벽이 있는 경우에도 계산가능하며, 프리스트레스 효과도 고려하여 해석할 수 있다. FSM에 의한 구조해석의 일반적인 과정은 다음과 같다.

① 연속체를 가상의 선을 그어 유한개의 대판 요소로 분할한다.

② 요소들은 서로 절선(nodal line)으로 연결되어 있다고 가정한다. 이 절선은 요소 축방향 경계와 일치한다.

③ 변위함수를 절점변위로 나타낸다. 이때 종방향으로는 조화함수를 사용하는데 대판요소의 양단 경계조건을 만족해야 한다. 횡방향으로는 다항식을 사용하는데 이것은 균일한 변형도를 표현할 수 있어야 하며 인접 대판요소와의 경계를 따라서 변위에 대한 적합조건을 만족해야 한다.

④ 가정한 형상함수를 사용하여 요소의 폭에 걸쳐서 분포된 모든 하중을 등가절점력으로 치환한다.

⑤ 등가절점력을 Fourier 급수로 나타내고 Fourier 급수의 한 항에 대해 하중 벡터를 구한다.

⑥  $8 \times 8$  강도 매트릭스를 구한다.

⑦ 요소 강도 매트릭스와 하중벡터를 전체좌표계로 변환시킨 뒤 이를 이용하여 전체 강도 매트릭스와 전체 하중 벡터를 구한다.

⑧ 연립방정식을 풀어 절점변위를 구한다.

⑨ 절점변위를 요소좌표계로 변환시켜 내부응력을 구한다.

⑩ 앞의 과정을 모든 Fourier 급수항에 대해 반복한다.

복한다.

⑪ 각 Fourier 급수에 대한 결과를 합산한다.

기본적으로 FSM은 절편법과 마찬가지로 조화함수를 사용한 직접강도법에 근거를 두는데 이 방법의 장단점은 다음과 같다.

(1) 장점 :

① 컴퓨터 프로그래밍에 적절하고 상당히 정확한 결과가 나오며 계산시간이 FEM 등에 비해 매우 절약된다.

② 각 대판요소의 거동에 대해 임의의 적절한 이론의 적용이 가능하다.

③ 프리스트레스와 같이 종방향으로 값이 변화하는 하중들도 고려할 수 있다.

④ 종방향 절점을 따라서 변위나 하중의 어떤 조합에 의한 경계조건도 적용가능하다.

(2) 단점 :

① 일반적으로 사용가능한 프로그램으로는 등단면 형식에만 적용할 수 있고, 내부에 지점이 배치될 수 있으나 최외측지점은 단순지지되어야만 한다.

② 종방향으로의 재료성질과 단면의 기하학적 성질은 일정해야만 한다.

### 3.4.4 유한요소법(FEM : Finite Element Method)

FSM과 FEM의 큰 차이는, FSM은 횡방향만 다항식으로 하고 종방향은 조화함수로 변위를 가정하는데 비해서 FEM은 두 방향 모두 다항식으로 가정한다는 것이다.

이 방법은 1970년대에 거의 완벽한 이론적체계를 갖추게 된 것으로 근래에 역학문제의 해결책으로는 가장 보편적인 방법으로 각광을 받고 있다.

이 방법의 장단점은 다음과 같다.

(1) 장점 :

① 가장 일반적인 방법으로 임의하중, 임의 경계조건, 재료나 단면의 기하성질이 변하는 경우 등에 적용가능하다.

② 1차원 프레임요소, 2차원, 3차원 요소 등의 결합된 형태로서의 해석이 가능하다.

(2) 단점 :

① 조화함수를 사용한 직접강도법보다 상당히 많은 계산시간을 요한다.

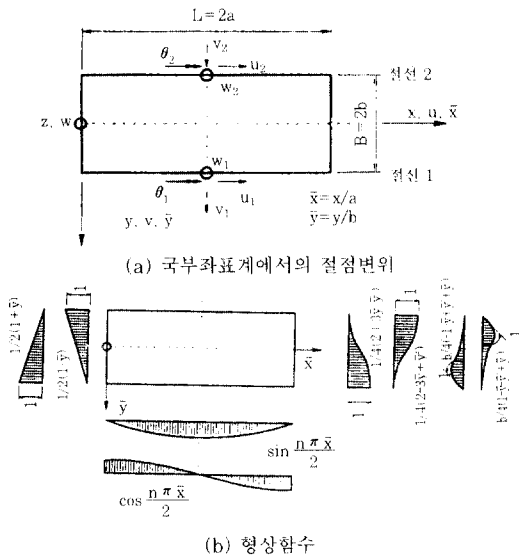


그림 8 FSM의 전형적인 요소

- ② 응력변화가 큰 곳은 요소분할을 상당히 세밀하게 해야 좋은 결과를 얻을 수 있다.
- ③ 일반적으로 사용되는 해석모델일 경우 정역학적 평형관계가 자동적으로 만족되지 않는다. 그러나 요소분할을 세밀히 할 수록 수렴하므로 요소분할과 이에 따른 결과해석에 대해 숙련된 판단이 요구된다.
- ④ 많은 양의 데이터 입력을 필요로 하므로 이를 수동으로 할 경우 시간소비뿐만 아니라 작업상의 실수가 유발될 수 있으므로 요소분할과 하중항계산 등이 자동으로 이루어질 수 있도록 해야 한다.

박스거더가 변단면이거나 사교인 경우, 또는 곡

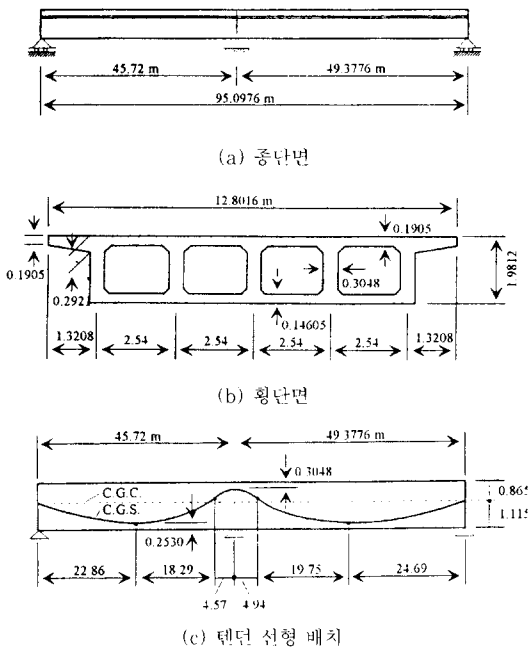


그림 9 해석구조물

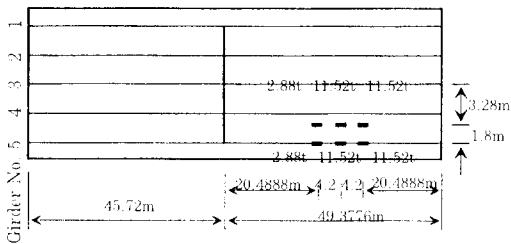


그림 10 하중 재하 위치

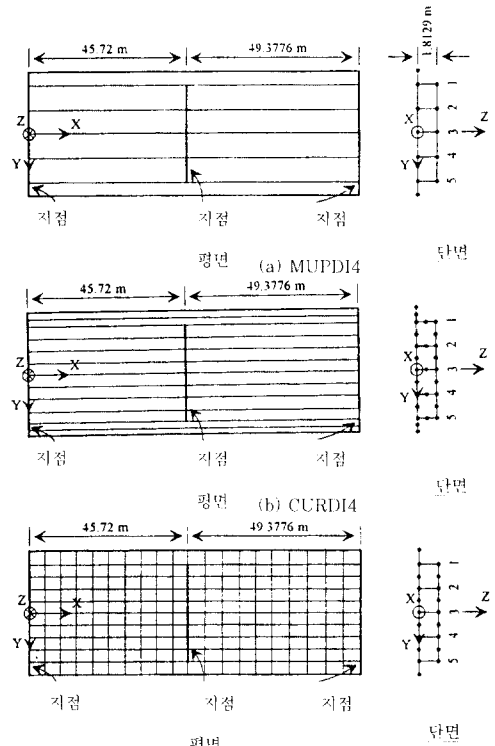


그림 11 해석모델

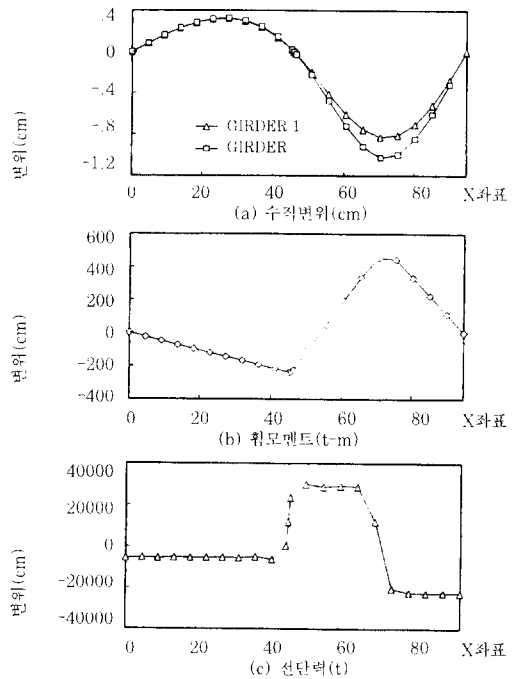


그림 12 종방향 단면력 분포



물이 변하는 구조거나 분기구조(ramifying structure)일 경우에는 다른 방법에 의한 해석이 곤란하므로 FEM을 사용해야만 한다. 그러나 원하는 만큼의 정확도를 얻기 위해서는 많은 계산시간을 요하게 된다. 등단면 박스거더일 경우에도 절관법과 비교해 볼 때 10배 정도의 계산시간을 필요로 하는 것이 보통이다.

따라서 구조물을 FEM으로 해석할 경우 가능하면 두단계로 나누어 수행하는 것이 바람직하다. 즉, 구조물 전체 해석은 보다 빠른 방법을 사용하고 이 해석결과를 토대로 경계조건을 도입하여 전체 거동에는 크게 영향을 미치지 않는 국부적인 불규칙부분(구멍이나 보강재 설치 등)에 대해서만 충분한 요소분할을 하여 별도로 FEM 해석을 수행하는 것이 합리적이다.

### 3.4.5 적용예

FPM, FSM, FEM 방법을 적용한 구조해석예를 작성하기 위해 미국의 버클리대학교에서 개발하여 일반적으로 사용되고 있는 MUPDI4, CURDI4, CELL4를 이용하여 PC 박스거더를 구조해석하였다. 대상구조물은 그림 9와 같다. 그림 10은 하중재하위치를 표시한 것이고 그림 11은 MUPDI4, CURDI4, CELL4 사용을 위해 구조해석 모델을 작성한 것이다.

그림 12는 종방향처짐, 휨모멘트, 전단력을 출력한 것이고, 그림 13은 각 하중 경우별로 해석 결과를 출력한 것이다.

그림 14는 횡방향 휨모멘트와 전단력 그리고 수직응력을 출력한 예이다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 정밀해석 프로그램을 사용하면 종방향 및 횡방향 해석을 동시에 수행할 수 있으므로, 상세설계 및 해석단계에서 사용하면 매우 편리하고 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있다.

## 4. 맺는말

콘크리트 박스거더는 중기간 교량에 적용하면 경제성이 뛰어나고, 내구성이 우수하며, 미관이 수려하므로 앞으로도 적용 현상이 증가할 것으로 판단

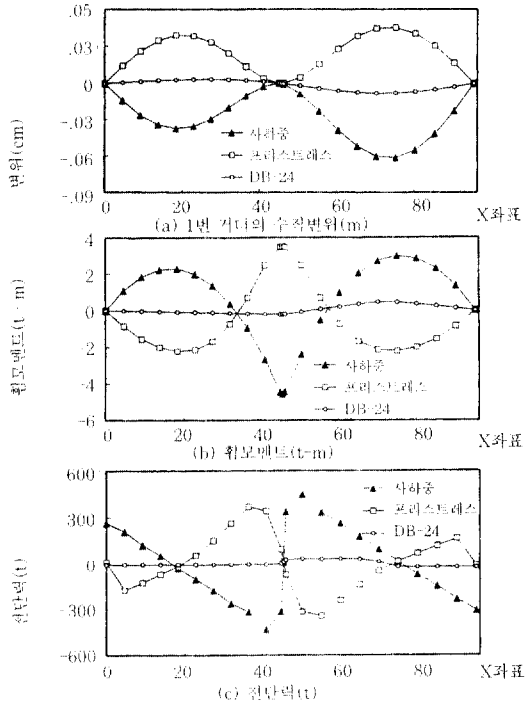


그림 13 하중 경우별 종방향 전단력

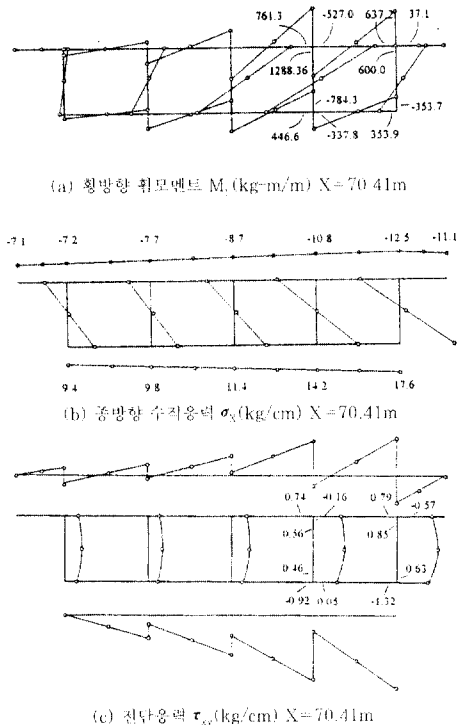


그림 14 횡방향 단면력 및 종방향 수직응력

된다. 그러나 전술한 바와 같이 구조거동이 복잡하고 해석방법이 체계화 되어 있지 않으므로 설계 실무자들은 어려움을 겪고 있으며, 횡방향 해석에 있어서는 일부 문제점도 노출되고 있다. 본 고에서 소개한 정밀 해석 방법들은 기본 개념과 사용방법을 잘 숙지하면 이러한 문제점들을 해결해 줄 수 있는 방법들이므로, 구조해석 신뢰성을 높이기 위해 향후에는 콘크리트 박스거더교를 상세 설계하고 해석할 때 정밀해석 방법들을 활발히 사용해야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. 김병석 외 4인, "콘크리트 교량 가설 특수공법 설계 시공 유지관리지침", 건설부 한국건설기술연구원, 1994.
2. 김병석 외 6인, "경제적인 PS콘크리트 교량 건설 공법에 관한 연구", 한국건설기술연구원 연구보고

- 서, 1986.
3. 김병석, 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계 및 최적화에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 논문, 1992.
4. B.I.Maisel et al., "Method of Analysis and Design of Concrete Boxbeams with Side Cantilevers", Cement and Concrete Association, 1974.
5. Jorg Schlaih et al., "Concrete Box-Girder Bridges", IABSE Structural Engineering Documents, 1982.
6. A.C.Scodelis et al., "Computer Programs for Prestressed Concrete Box Girder Bridges", UCB/SESM Report No. 85-02, 1985.
7. M.M.Bakhoum et al., "Box Girder Bridges:Modelling with FBM, Influence Lines, Live Load Stresses Considering Bending,ShearLag, Torsion, Distortion, and Warping", Bridges into the 21st Century, 1995. 