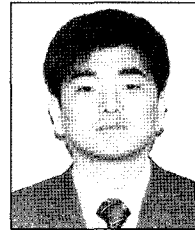


준폐합 단면 스틸 박스 거더를 구성하는 수평브레이싱에 작용하는 부재력의 산정

Estimation of Top-Lateral Bracing Member Forces in Quasi-Closed Steel Box Girders



김 경 식*



권 오 훈**

*GS건설 기술본부 선임연구원
**GS건설 기술본부장

1. 서 론

상부면이 터인 U-타입의 개단면 스틸 박스 상부에 콘크리트 바닥판을 타설하여 폐단면을 이루는 강합성 박스 거더는 재료의 효율적 이용과 동시에 폐단면으로부터 얻을 수 있는 높은 비틀림강성으로 인하여 직선 및 곡선 교량에 많이 적용되고 있다. 그러나 콘크리트 바닥판이 굳어져 충분한 강도를 구현하기 전까지는 스틸 박스는 비합성 상태로 굳지 않은 콘크리트를 포함하는 사하중 뿐만 아니라 기타 시공하중까지 부담하여야 한다. 일반적으로 시공중 비합성 사하중에 의해 발생하는 응력은 전체 응력의 60~70%를 차지할 정도로 큰 비중을 가지므로 시공중에 가장 주의해야 할 단계(Critical stage)로 인식되고 있다.¹⁾ 시공중 이러한 상부가 터인 U-타입 또는 개단면 스틸 박스 거더(Open-Top Steel Box Girder 또는 Steel Tub Girder로 도 알려져 있음)는 상부에 수평방향으로 트러스 형태의 브레이싱이 설치되어 실제로는 완전한 개단면도 아니고 폐단면도 아닌 준폐합 단면(Quasi-Closed Section)으로서의 거동을 보인다. 3개면은 스틸 플레이트 그리고 나머지 한면은 트러스 형태로 이루어진 이러한 준폐합 단면은 특별히 곡선형 교량 연구분야에서 일찍부터 관심의 대상이 되었다. 왜냐하면 곡선형 교량은 자중자체로부터 편심에 의한 비틀림하중을 받게 되고, 폐단면을 이루느냐 개단면

을 이루느냐의 문제에 따라 거더의 비틀림상수는 수백배까지 차이가 나기 때문이다.²⁾ 그림 1은 시공중인 곡선형 스틸 박스 거더교의 예를 보여준다. 특별히 시공중에는 비합성/비폐합 단면 거동을 보이므로 각별한 주의가 필요한데 이러한 거동에 대한 이해의 부족으로 수평 브레이싱 부재가 시공중 좌굴로 인해 기능이 상실되는 사고가 보고된 적이 있다.⁴⁾ 곡선교 뿐만 아니라 직선교에서도 시공중 상부플랜지 레벨에서 개단면 스틸 박스 거더가 벌어지는 현상(Bulging)을 방지하기 위해 이러한 수평브레이싱은 필

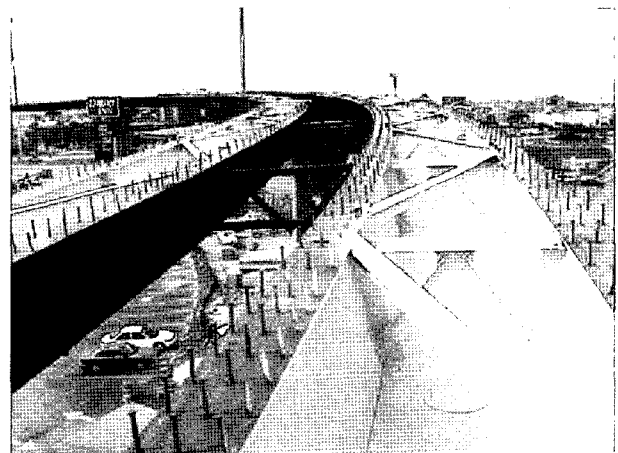


그림 1 바닥판 타설전 수평브레이싱으로 보강된 준폐합 단면 상형³⁾

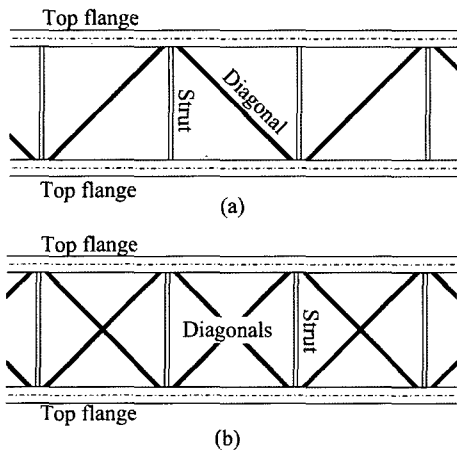


그림 2 수평 브레이싱의 종류: (a) Single Diagonal (SD Type); (b) Crossed Diagonal (XD Type)

수직으로 설치되어야 한다.

개단면 스틸 박스의 상부 플랜지 레벨에 설치되는 수평 브레이싱은 박스 단면을 준폐단면으로 구성해 비틀림 하중에 저항하는 것이 주된 역할이지만, 거더의 휨 거동에 의해서도 이 브레이싱 부재에는 상당한 수준의 부재력이 발생한다. 이에 대한 연구는 Fan and Helwig^{5,6)}에 의해 처음으로 체계화 되었다. 그림 2에서 보듯이 일반적으로 널리 사용되는 수평 브레이싱으로는 Single Diagonal(SD Type) 수평 브레이싱과 Crossed Diagonal(XD Type) 수평 브레이싱이 있다. Fan and Helwig는 해석적 방법에 의하여 각각 SD Type 및 XD Type에 대하여 브레이싱 부재에 발생하는 힘을 비틀림 및 휨 모멘트의 함수로 표현됨을 보였다. 하지만 XD Type에 대해서는 우수한 예측능력을

표 1 수평 브레이싱 배열 형상에 따른 등가의 판두께⁹⁾

수평 브레이싱 배열 형상	등가의 판두께 (Equivalent thickness)
	$t_{eq} = \frac{E}{G} \frac{sb}{\frac{d^3}{A_d} + \frac{s^3}{3} \left(\frac{1}{A_u} + \frac{1}{A_l} \right)}$
	$t_{eq} = \frac{E}{G} \frac{sb}{\frac{2d^3}{A_d} + \frac{b^3}{4A_s} + \frac{s^3}{12} \left(\frac{1}{A_u} + \frac{1}{A_l} \right)}$
	$t_{eq} = \frac{E}{G} \frac{sb}{\frac{d^3}{2A_d} + \frac{s^3}{12} \left(\frac{1}{A_u} + \frac{1}{A_l} \right)}$
	$t_{eq} = \frac{E}{G} \frac{sb}{\frac{d^3}{A_d} + \frac{b^3}{A_s} + \frac{s^3}{12} \left(\frac{1}{A_u} + \frac{1}{A_l} \right)}$
	$t_{eq} = \frac{E}{G} \frac{1}{\frac{sb^2}{12I_s} + \frac{bs^2}{48} \left(\frac{1}{I_u} + \frac{1}{I_l} \right)}$

보였으나 SD Type에는 30%이상의 오차를 보이는 경우가 있었는데, 실제 발생될 수 있는 힘보다 적게 예측되는 경우가 있어 이들의 제안식을 사용하는데 신중함이 필요하다는 논문이 최근 발표되었다.^{7),8)} SD Type은 XD Type에 비하여 거더가 힘을 받고 있는 상태에서 더욱 복잡한 거동을 보인다. XD Type의 경우에는 나타나지 않지만 SD Type으로 보강된 개단면 스틸 박스의 경우 상부 플랜지는 횡방향으로도 휨거동을 보이는데, 수평브레이싱 부재가 부착되는 상부 플랜지의 지점을 기준으로 집중하중을 받는 연속보와 유사한 거동을 보인다. 이러한 거동에 대해서는 이후 부재력의 크기를 예측하는 제안식을 유도하면서 더 자세한 설명이 이루어 질 것이다. 본 연구에서는 SD Type 브레이싱을 가지는 개단면 스틸 박스에 초점을 맞추고, 해석적 방법에 의한 부재력 산정식을 더욱 정확한 방법으로 제안하고, 그 정확도를 유한요소해석을 통해 검증한다.

2. 이론적 배경

수평 브레이싱으로 보강된 개단면 스틸 박스에 대한 비틀림 해석은 준폐합 단면 이론에 의해 수행되는데, 여기서 수평브레이싱 시스템은 일정한 두께를 가지는 가상의 판(Fictitious Plate)으로 치환될 수 있다. Kollbrunner and Basler⁹⁾는 비틀림 하중을 받는 박스 거더의 브레이싱 시스템에 저장되는 변형도 에너지(Strain Energy)를 계산하는 방법으로 몇 가지 수평 브레이싱 배열 형상에 대하여 가상의 판두께를 계산하였다. 표 1에는 수평 브레이싱의 형상과 그에 해당되는 가상의 판두께를 보였다. 반폐합 단면 이론에 근거한 등가의 판 치환 이론은 수평 브레이싱으로 보강된 개단면 스틸 박스의 비틀림 상수의 계산을 가능하게 하였는데, 수평 브레이싱을 대신하는 등가의 판 두께는 브레이싱의 배열 형상과 각 부재의 단면적에 의존한다. 가상의 판두께가 정해지면 수평 브레이싱으로 보강된 개단면 스틸 박스는 폐합 단면으로 간주되어 폐단면의 전단류(Shear Flow) 이론으로 수평 브레이싱에 작용하는 부재력을 산정할 수 있다. 가상의 판에 작용하는 전단류, q 는 다음 식과 같이 수평 브레이싱의 대각 부재(Diagonal Member)에 작용하는 축력으로 전환될 수 있다.

$$D_{tor} = \pm \frac{qb}{\sin \alpha} = \pm \frac{b}{2A_0 \sin \alpha} T \quad (1)$$

여기서 D_{tor} = 비틀림 하중에 대하여 SD 타입에 작용하

는 Diagonal 부재력; b = 상부 플랜지의 중심 대 중심 간격; 그리고 α = 대각 부재와 상부 플랜지가 이루는 각도. 앞에서 언급하였듯이 수평 브레이싱의 각 부재에는 거더의 비틀림 뿐만 아니라 휨거동에 의해서도 추가적인 축력이 발생한다. 대각 부재(Diagonal Member)는 그림 3(a)에서 보인 바와 같이 교축 방향으로 상부 플랜지와 동일한 변형도를 가진다. 뿐만 아니라 경사진 복부판으로 인해 교축직각 횡방향으로의 수평력 성분 또한 브레이싱 부재력에 영향을 미친다. 이러한 수평력 성분의 크기는 그림 3(b)에서 나타낸 것처럼 박스 하단 모서리를 중심에 대하여 산정되는 등가의 모멘트(Equivalent Moment)를 고려함으로써 계산될 수 있다. Fan and Helwig⁵⁾는 비틀림 및 휨 거동에 의해 발생하는 부재력 성분을 취합하여 전체 합력을 다음식을 통해 나타내었다.

$$D = D_{tor} + D_{bend} + D_{lat} \quad (2)$$

$$S = S_{bend} + S_{lat} \quad (3)$$

여기서 D, S = Diagonal 및 Strut 부재에 발생하는 합력; D_{bend}, S_{bend} = Diagonal 및 Strut 부재에 휨 거동에 의해 발생하는 부재력; D_{lat}, S_{lat} = Diagonal 및 Strut 부재에 횡방향 성분력에 발생하는 부재력; 그리고 D_{tor} = 비틀림 하중

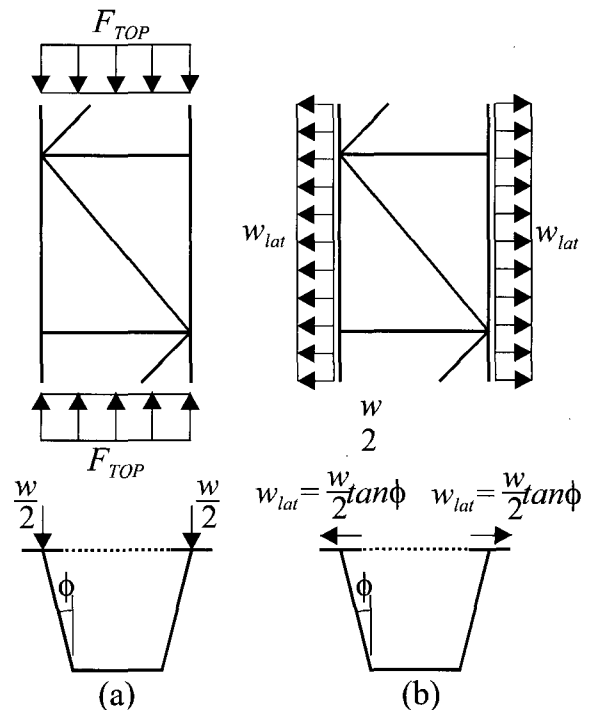


그림 3 상부 플랜지와 수평 브레이싱 부재에 영향을 주는 성분: (a) 힘에 의한 교축직각 방향 성분; (b) 경사진 복부판의 Bulging효과에 의한 횡방향 성분

에 의해 Diagonal 부재에 발생하는 부재력으로 식(1)에 나타나 있고 그 외 항은 다음 식에 나타내었다.

$$D_{bend} = \frac{f_{xTop} s \cos \alpha}{\frac{L_D}{A_D} + \frac{b}{A_s} \sin^2 \alpha + \frac{s^3}{24I_f}} \quad (4)$$

여기서, f_{xTop} = 상부 플랜지 단면 중앙에 작용하는 축방향 응력; s = Strut 간격; L_D, A_D = Diagonal 부재 길이 및 단면적; A_s = Strut 단면적; I_f = 상부 플랜지 횡방향 단면 2차 모멘트

$$D_{lat} = 0 \quad (5)$$

$$S_{bend} = -D_{bend} \sin \alpha \quad (6)$$

$$S_{lat} = s w_{lat} \quad (7)$$

여기서, w_{lat} 는 그림 3(b)에 보였듯이 횡방향 성분력에 해당되는데, Fan and Helwig는 식 (5)와 (7)에서 확인할 수 있듯이 편의상 Strut 부재가 모두 부담한다고 보고 있다. 그러나 실제로는 Diagonal 부재와 Strut 부재가 나누어 부담한다. 또한, 식 (3)에서 알 수 있듯이 Strut 부재는 거더의 비틀림에 대해서는 아무런 영향을 받지 않는다고 이들은 간주하였다. 이러한 가정은 XD Type 브레이싱에서는 부합하지만, SD Type에서는 30%이상의 오차를 내는 원인이 된다.⁷⁾ 본 연구에서는 비틀림 및 휨에 의해 발생하는 SD Type 브레이싱 부재력에 대해 좀 더 엄격한 해석적 방법을 적용해 더욱 정확한 예측을 위한 수식을 개발하고자 한다.

3. 비틀림 하중에 의한 부재력

본 절에서는 반폐합 단면 거더에 작용하는 비틀림 하중에 의해 발생하는 부재력에 대하여 먼저 검토한다. 외력으로 작용하는 비틀림 하중은 그림 4에서 보듯이 그 성분상 순수 비틀림 성분(Pure Torsional Components)과 뒤틀림 성분(Distortional Components)으로 구분이 가능하다.⁶⁾ 비틀림하중은 편심을 가지는 수평력에 의해서 발생하지만, 곡선 거더의 경우 자중과 곡률에 의해 발생되며 그 크기는 M/R 간편법에 의하면 휨모멘트와 곡률반경으로 나타낼 수 있다.¹⁰⁾ 그림 4에는 수직 하중 w 와 편심 e 에 의해 발생한 비틀림 하중과 휨모멘트 M 과 곡률반경 R 에 의해 발생

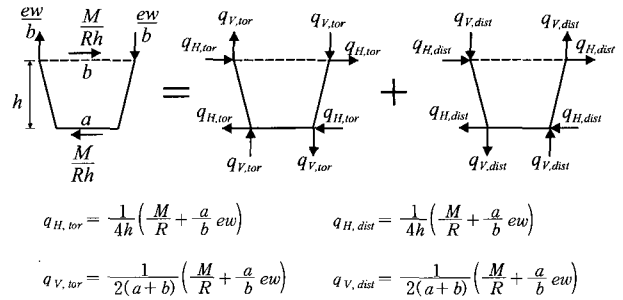


그림 4 박스 거더에 작용하는 비틀림 하중의 성분 분해(순수 비틀림 및 뒤틀림 성분)

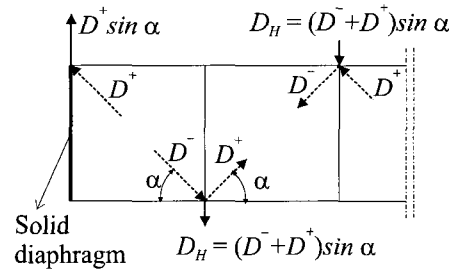


그림 5 Diagonal 부재로부터 전달되는 횡방향 성분의 합력

한 비틀림 하중을 각각 성분 분해하여 사다리꼴 박스의 각 코너에 작용하는 성분력으로 보여주고 있다.

상부 수평 브레이싱은 준폐합 단면을 이루어 순수 비틀림 성분에 저항을 목적으로 설치되며, 내부 프레임(Intermediate Internal Cross-Frame) 또는 다이아프램(Diaphragm)은 뒤틀림 성분에 대한 저항을 목적을 설치된다. 거더의 지점부에서는 강성이 매우 큰 다이아프램을 설치하지만 그 외 지점에서는 내부 프레임을 사용하는 것이 일반적이다. 내부 프레임으로는 K 또는 X 형태의 부재 배치가 많이 이용된다. K 형태의 내부 브레이싱(Internal K-Frame)이 설치되는 경우, 그 위치에서는 Strut 부재는 내부 프레임으로서의 역할과 상부 수평 브레이싱으로서의 역할을 동시에 수행한다. 내부 프레임은 보통 한 개 또는 두 개의 패널 간격으로 설치되는데, 본 연구에서는 K 형태의 내부 프레임이 두 개의 패널을 간격으로 설치되어 있다고 가정한다.

브레이싱에 작용하는 부재력은 상부 플랜지의 교축방향 및 횡방향 변형에 의해 영향을 받는다. 비틀림을 받는 거더의 경우 축방향 변형은 상대적으로 매우 작아 부재력은 상부 플랜지의 횡방향 변형에 의해 주로 결정된다. 두 개의 상부 플랜지 사이에 나타나는 상대적인 변위는 순수 비틀림 성분 뿐만 아니라 뒤틀림 성분에 의해서도 발생하는 것으로 확인되었는데, 이는 외력으로서 비틀림 하중에 의해 Strut 부재에도 그에 상응하는 부재력이 발생된다는 것을 의미한다.

그림 5에는 순수 비틀림 하중 성분에 저항의 결과 발생

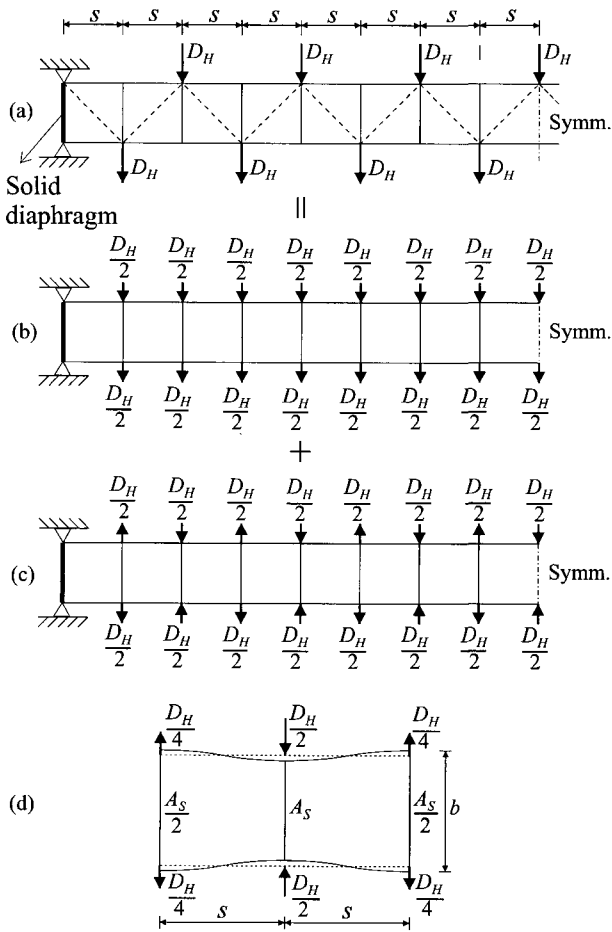


그림 6 브레이싱과 상부 플랜지로 구성된 2차원 구조계에 전달되는 Diagonal 부재력: (a) Diagonal 부재로부터 전달되는 횡방향력; (b) 상부플랜지만 저항하는 성분력 조합; (c) 상부플랜지 및 Strut이 저항하는 성분력 조합; (d) 두 개의 연속된 패널의 변형 형상

된 Diagonal 부재력이 상부 플랜지 및 Strut 부재에 전달될 때 상부 플랜지와 Strut의 교차점에 작용하는 횡방향 수평력의 합을 보여 주고 있는데, 그 크기는 다음 식으로 표현된다.

$$D_H = (D^- + D^+) \sin \alpha \quad (8)$$

여기서, D^- , D^+ = 두 개의 연속되는 패널에 설치된 각각의 Diagonal 부재에 비틀림 하중에 의해 발생한 축력을 나타낸다. 이 때, D^- 와 D^+ 는 교축을 따라 비틀림모멘트의 합수가 되며 SD Type 브레이싱에서는 압축력과 인장력이 교차되며 나타난다. 좀 더 단순한 관찰을 위하여 Diagonal과 Strut으로 구성된 수평 브레이싱 시스템과 스틸 박스 거더의 상부 플랜지만으로 구성된 2차원 구조물을 따로 분

리하여 살펴 보도록 한다. 그림 6은 SD Type 브레이싱을 갖는 단순경간 거더에서 상부 플랜지와 브레이싱 시스템을 분리한 2차원 평면 구조물을 보여준다. 그림 6(a)는 식 (8)에서 구한 비틀림에 의해 발생된 Diagonal 부재력의 수평력 성분, D_H 가 단순화된 2차원 구조물에 작용하는 것을 도시하였는데, 두 개의 평행한 상부 플랜지는 브레이싱 부재가 부착되는 지점에 근거하여 연속보와 유사한 거동을 하게 된다. 이 때, 수평력 D_H 는 그림 6(b)와 6(c)에 나타난 것처럼 두 개의 성분력 조합으로 분리될 수 있다. 그림 6(b)에 나타난 성분력 조합은 거더의 상부플랜지에 의해 저항될 뿐 Strut 부재에는 영향을 주지 못한다. 단, 그림 6(c)에 나타난 성분력 조합은 상부 플랜지 및 Strut 부재에 의해 저항된다는 것을 알 수 있다. 그림 6(c)의 성분력 조합과 연속되는 두 개의 패널만을 고려하면 그림 6(d)에 나타난 변형된 형상을 이루게 된다. 비록 수평력 D_H 가 교축방향을 따라 비틀림 모멘트의 함수이기는 하지만 단 두 개의 연속되는 패널에서 D_H 는 일정하다고 보더라도 그 오차는 그리 크지 않다. 그림 6(d)의 구조계를 해석하면 다음과 같이 순수 비틀림 성분에 의해 Strut에 작용하는 부재력을 얻을 수 있다.

$$S_{tor} = \frac{\frac{(2s)^3}{192I_f}}{\left(\frac{b}{2A_s} + \frac{(2s)^3}{192I_f}\right)} D_H \quad (9)$$

앞에서 언급했듯이 순수 비틀림 성분 뿐만 아니라 뒤틀림 성분에 의해서도 Strut에 부재력이 발생한다. 순수 비틀림 성분력은 일차적으로 수평 브레이싱의 Diagonal 부재에 의해 저항되고 상호작용을 통해 상부 플랜지 및 Strut에 전달되지만, 뒤틀림 성분력은 복부판의 횡방향 강성은 무시되므로 내부 프레임(Intermediate Internal Cross-Frame)에 의해 바로 저항된다. 그러나 내부 프레임이 K-Frame 일 경우, K-Frame이 설치되는 위치에서는 Strut 부재가 수평 브레이싱과 공유되므로 내부 프레임으로서의 Strut에 발생된 부재력은 상호작용 효과에 의해 Diagonal에도 일부 전달되는 메커니즘을 형성한다. 그림 7(a)는 K 형태의 내부 프레임이 설치된 위치에서 K-Frame에 의한 수평력 K_H 가 상부 플랜지 및 수평 브레이싱에 작용하고 있는 것을 보여준다. 이 때, 수평력 K_H 의 크기는 그림 4에 도시된 뒤틀림 성분중 $q_{v, dist}$ 에 간격 $2s$ 를 곱하여 다음 식으로 산정할 수 있다.

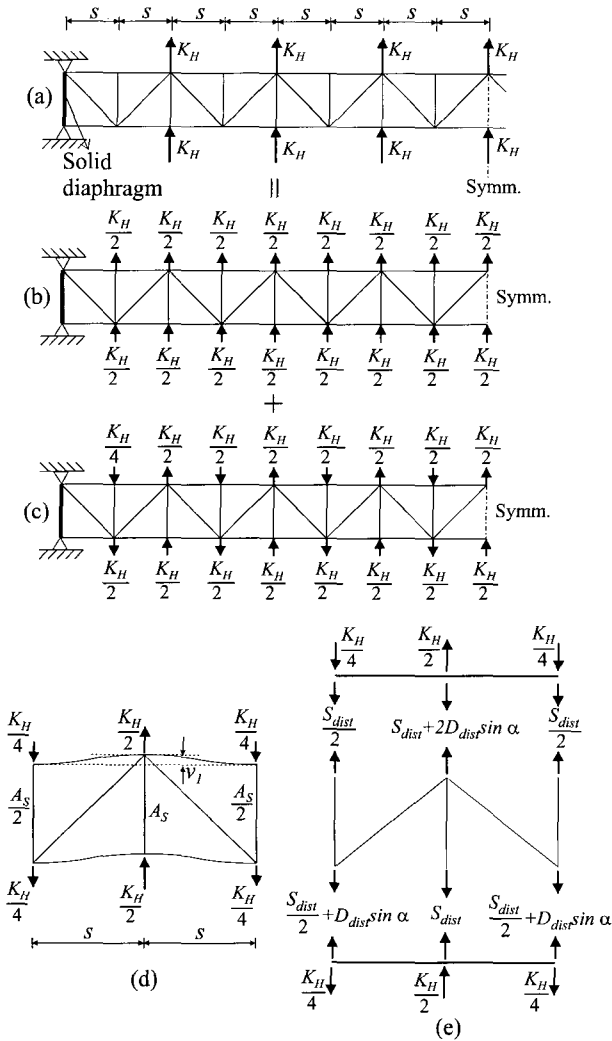


그림 7 브레이싱과 상부 플랜지로 구성된 2차원 구조계에 전달되는 K-Frame의 요소로서의 Strut 부재력: (a) Strut 부재로부터 전달되는 횡방향력; (b) 상부플랜지만 저항하는 성분력 조합; (c) 상부플랜지 및 Strut이 저항하는 성분력 조합; (d) 두 개의 연속된 패널의 변형 형상; (e) 플랜지와 브레이싱의 상호 작용력

$$K_H = 2sq_{H, dist} = \frac{s}{a+b} \left(\frac{M}{R} - \frac{a}{b} ew \right) \quad (10)$$

그림 6에 보인 순수 비틀림 하중의 전달 과정에 보인 바와 유사하게 뒤틀림에 의한 수평력 K_H 의 하중 제하와 그 성분력 분해를 그림 7의 (b)와 (c)에 나타내었다. 그리고 브레이싱에 영향을 주는 그림 7(c)의 하중 성분에 의해, 분리된 두 개의 연속되는 패널이 받게 되는 변형 패턴을 그림 7(d)에 보여주고 있다. 각각의 상부 플랜지는 그림 7(e)에 보인 바와 같이 횡방향으로 브레이싱 부재력과 힘의 평형을 이루어야 하므로 다음 식이 유도된다.

$$S_{dist} = -D_{dist} \sin \alpha \quad (11)$$

여기서 S_{dist} 와 D_{dist} 는 뒤틀림에 의해 Strut과 Diagonal에 각각 발생한 부재력에 해당된다. Diagonal 부재의 축방향 변형량 δ_D 는 그림 8을 참조하여 횡방향 변위만 고려할 경우 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\delta_D = (v_1 + v_2) \sin \alpha \quad (12)$$

여기서 v_1 = 그림 7(d)에 보인 상부 플랜지의 횡방향 상대 변위; v_2 = Strut 부재의 축방향 변위. 그리고 두 개의 연속되는 패널에서 상부 플랜지의 횡방향 상대 변위 v_1 는 그림 7(d)에 보인 구조계를 해석하여 다음과 같이 얻는다.

$$v_1 = \frac{(2s)^3}{192EI_f} \left(\frac{K_H}{2} + S_{dist} \right) \quad (13)$$

여기서 E 는 탄성계수를 나타낸다. 유사한 방법으로, Strut부재의 축방향 변형량 v_2 와 변형량-축력 관계에 의한 Diagonal 변형량 δ_D 는 각각 다음과 같다.

$$v_2 = \frac{bS_{dist}}{EA_s} \quad (14)$$

$$\delta_D = \frac{L_D D_{dist}}{EA_D} \quad (15)$$

식 (13)~(15)를 식 (12)에 대입하고 식 (11)과 (12)를 D_{dist} 에 대하여 연립해서 풀면 다음을 얻을 수 있다.

$$D_{dist} = \pm \frac{A_D A_s s^3 \sin \alpha}{48 A_s L_D I_f + 2 A_s A_D s^3 \sin^2 \alpha + 48 A_D b I_f \sin^2 \alpha} K_H \quad (16)$$

여기서 부호는 부재배치 (SD Type A 또는 SD Type B)와 비틀림 하중의 방향과 관계되는데 이후 제시될 예제에서 자세히 설명된다. 식 (16)은 단순경간 거더에 대하여 유도된 공식이기는 하나 연속경간 거더에서도 적용이 가능하다. 부모멘트 지점부에서는 강성이 큰 내부 다이아프램 등이 설치되므로 내부 지점부 바로 부근에 있는 브레이싱 부재는 뒤틀림에 의해 발생하는 부재력은 무시하여도 큰 차이가 없다.

4. 거더의 휨거동에 의한 부재력

수평브레이싱으로 보강된 준폐합 스틸 박스 거더는 휨 거동으로도 브레이싱에 부재력을 발생시키는데 다음과 같은 가정하에서 해석적 방법으로 부재력을 산정하는 수식이 개발될 수 있다.

- (1) 내부 프레임(Internal Cross-Frame)은 Strut 부재 아래 하나 걸러 하나씩, 매 두 개의 패널 간격으로 설치된다.
- (2) 수직력에 의한 거더의 휨거동은 브레이싱 시스템의 교축방향 변형에 영향을 준다. 또한 경사진 복부판의 벌짐(Bulging) 효과에 기인하여 상부 플랜지의 횡방향 변형에도 영향을 준다.
- (3) 상부 플랜지의 횡방향 변형에 대하여 복부판의 횡방향 강성은 무시된다.

상기의 첫번째 가정은 특히 SD Type 브레이싱에서는 매우 중요한 의미를 가진다. 만약 모든 Strut 부재에 내부 프레임이 설치될 경우, 내부 프레임과 상부 수평 브레이싱은 서로 높은 수준의 상호 작용을 일으키며 각각의 부재에는 추가적인 부재력이 발생된다.⁸⁾ 본 연구에서는 이러한 복잡한 상호 작용을 배제하기 위하여 내부 프레임은 매 두 개의 패널 간격으로 배치된다. 상부 플랜지의 횡방향 강성의 영향은 3%미만으로 무시할 만한 수준이다.¹¹⁾

그림 3(b)에 보인 것처럼 횡방향으로 힘을 받고 있는 SD Type 브레이싱을 고려해 보자. 상부 플랜지와 브레이싱 부재 사이에 상호 작용하는 내력과 교차점에서 자유물체도를 그림 9에 나타내었다. 상호 작용하는 내력 Q_A 와 Q_B 는 플랜지 및 절점에서의 평형 상태에서 얻어지는 다음 식을 고려하여 결정될 수 있다.

$$Q_A + Q_B = 2sw_{lat} \tag{17}$$

$$Q_A + 2D_{lat} \sin \alpha + S_{lat} \tag{18}$$

$$Q_B = S_{lat} \tag{19}$$

식 (18)과 (19)를 식 (17)에 대입하여 정리하면,

$$S_{lat} = sw_{lat} - D_{lat} \sin \alpha \tag{20}$$

을 얻을 수 있다. 연속적인 횡방향 분포 하중에 의해 플랜지는 그림 10에서 보였듯이 패널 절점사이에서 연속보와 유사한 거동을 보인다. 그림 10에 보인 바와 같이 연속되는 두 개의 패널을 분리하였을 때, 두 절점 사이의 상대 변

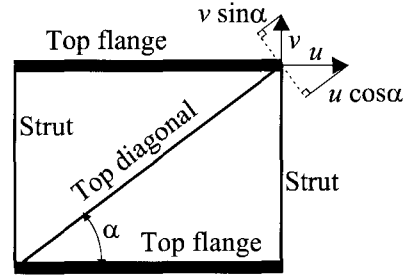


그림 8 Diagonal 부재의 축방향 변형량의 산정

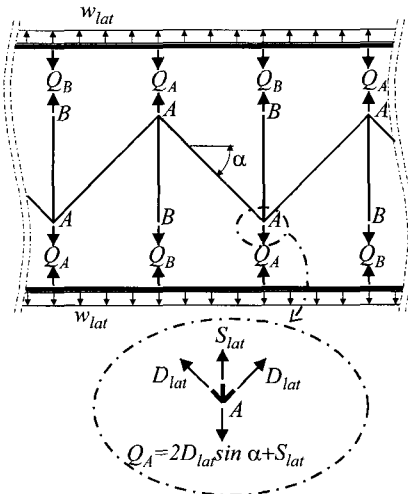


그림 9 횡방향 성분 (w_{lat})에 의한 상호 작용력

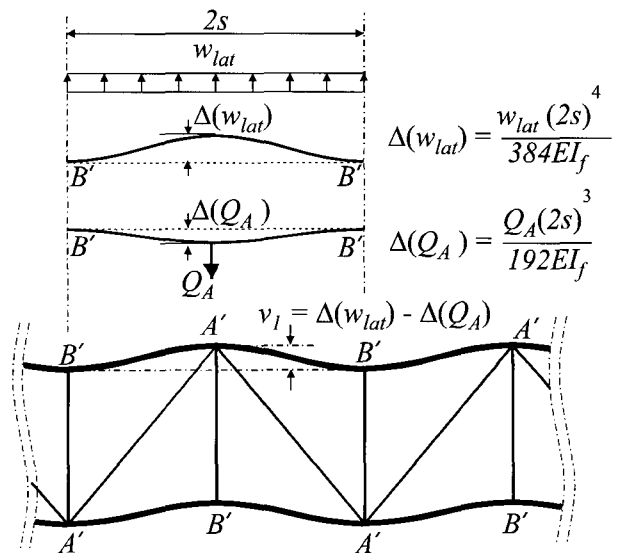


그림 10 횡방향 성분(w_{lat})에 의한 상부 플랜지의 횡방향 휨 변형

위 v_l 는 횡방향으로 작용하는 성분 w_{lat} 와 집중하중으로 작용하는 Q_A 에 의해 발생하는 두 변위를 중첩함으로써 구할 수 있는데, 연속보에 작용하는 분포 하중 및 집중 하중에 의한 처짐 공식을 이용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$v_1 = \frac{w_{lat}(2s)^4}{384EI_f} - \frac{Q_A(2s)^3}{192EI_f} \quad (21)$$

Strut 및 Diagonal 부재 축방향 변형량 v_2 와 δ_D 는 각각 식 (22)와 (23)으로 나타낼 수 있다.

$$v_2 = \frac{S_{lat}b}{EA_S} \quad (22)$$

$$\delta_D = \frac{D_{lat}L_D}{EA_D} \quad (23)$$

식 (21)~(23)을 식 (12)에 대입한 후 D_{lat} 에 대하여 풀면 횡방향 성분, w_{lat} 에 의해 Diagonal에 작용하는 부재력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_{lat} = \frac{24A_DbsI_f \sin \alpha}{24A_S L_D I_f + A_D(A_S s^3 + 24bI_f) \sin^2 \alpha} w_{lat} \quad (24)$$

5. 수평 브레이싱에 작용하는 부재력 산정식 요약

비틀림 하중 및 수직 하중을 받는 역사다리꼴 준폐합 단면 스틸 박스 거더의 수평 브레이싱의 각 부재 Diagonal 및 Strut에 발생하는 부재력의 총합은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$D = D_{bend} + D_{lat} + D_{tor} + D_{dist} \quad (25)$$

$$S = S_{bend} + S_{lat} + S_{tor} + S_{dist} \quad (26)$$

여기서 아래첨자 *bend*, *lat*, *tor* 및 *dist*는 각각 수직 휨, 횡방향 성분력, 순수 휨 및 뒤틀림에 의해 발생된 부재력을 뜻하며 각각의 항들은 다음과 같다.

$$D_{bend} = \frac{f_{xTop} s \cos \alpha}{\frac{L_D}{A_D} + \frac{b}{A_S} \sin^2 \alpha + \frac{s^3}{24I_f}} \quad (27)$$

$$D_{lat} = \frac{24A_DbsI_f \sin \alpha}{24A_S L_D I_f + A_D(A_S s^3 + 24bI_f) \sin^2 \alpha} w_{lat} \quad (28)$$

$$D_{tor} = \pm \frac{b}{2A_0 \sin \alpha} T \quad (29)$$

$$D_{dist} = \pm \frac{A_D A_S s^3 \sin \alpha}{48A_S L_D I_f + 2A_S A_D s^3 \sin^2 \alpha + 48A_D b I_f \sin^2 \alpha} K_H \quad (30)$$

$$S_{bend} = -D_{bend} \sin \alpha \quad (31)$$

$$S_{lat} = sw_{lat} - D_{lat} \sin \alpha \quad (32)$$

$$S_{tor} = \frac{(2s)^3}{192I_f} D_H \left(\frac{b}{2A_S} \frac{(2s)^3}{192I_f} \right) \quad (33)$$

그리고,

$$S_{dist} = -D_{dist} \sin \alpha \quad (34)$$

6. 예제 해석을 통한 부재력 비교 검토

본 절에서는 해석적 방법으로 유도된 식 (25)와 (26)의 타당성을 검토하기 위하여 제안식으로 산정된 부재력을 3

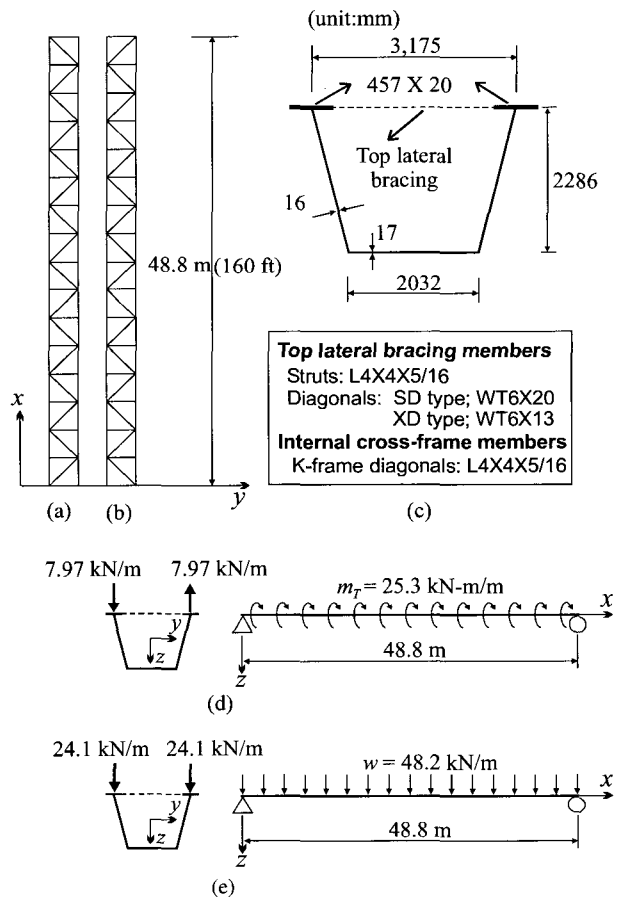


그림 11 수평 브레이싱에 의해 보강된 단경간 준폐합 단면 거더: (a) SD type A; (b) SD type B; (c) 단면 치수 및 부재 사이즈; (d) 비틀림 하중; (e) 수직 하중

차원 유한 요소 모델링을 통한 해석결과와 비교 검토한다. 또한 Fen and Helwig가 1999년 제안했던 부재력 산정식 (식 (2)와 (3))에 의한 결과도 검토된다. 예제 해석에서는 직선형 단경간 거더 및 곡선형 3경간 연속 거더 두 가지에 대한 해석이 수행되었다. 그림 11에는 직선형 단경간 거더 예제에서 사용된 준폐합 단면 강박스 거더에 대한 정보를 보여준다. 그림 11 (a)와 (b)에서는 SD Type 수평 브레이싱에서 Diagonal 부재의 두 가지 가능한 배치 (SD Type A, SD Type B)를 도시하였다. 휨 거동에서는 Type A와 B의 차이는 없으나 비틀림 하중을 받을 때에는 식 (16)의 산정에서 부호가 달라진다. 그림 11(c)에서는 박스 단면

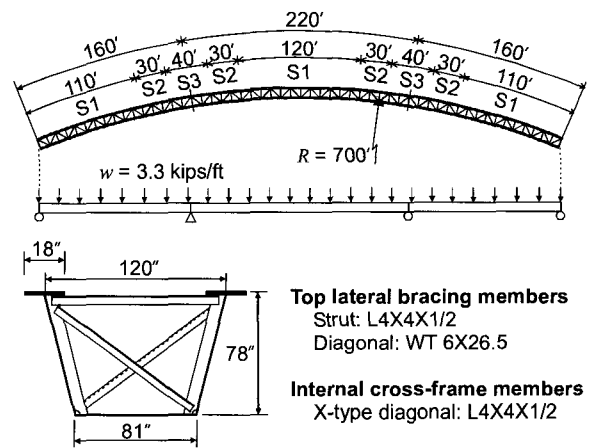
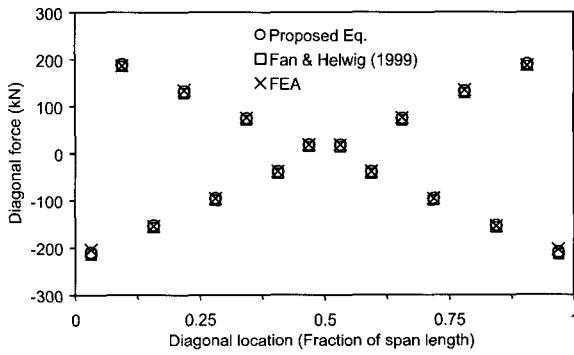


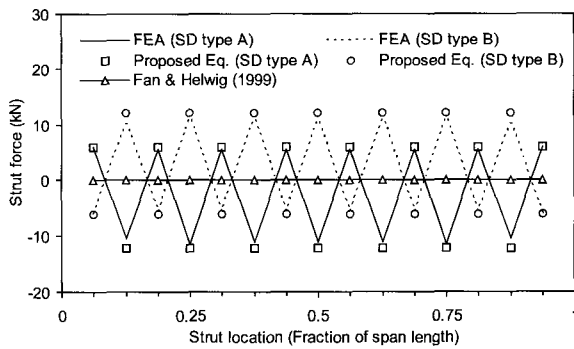
Plate thickness(mm)

Cross-section	Top flange	Web	Bottom flange
S1	25	14	16
S2	38	14	25
S3	57	14	47

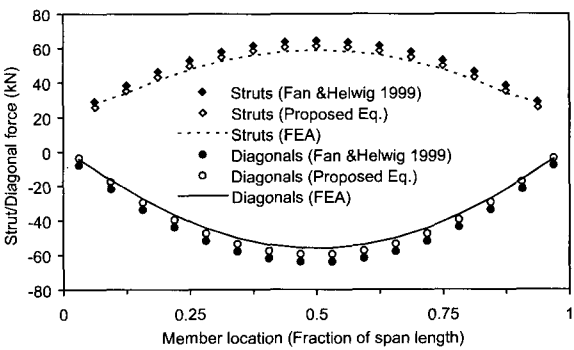
그림 13 예제에 사용된 곡선형 3경간 연속 거더



(a) 비틀림 하중에 의해 발생한 Diagonal 부재력



(b) 비틀림 하중에 의해 발생한 Strut 부재력



(c) 수직 하중에 의해 발생한 Diagonal/Strut 부재력

그림 12 단순경간 예제 거더에 발생한 부재력

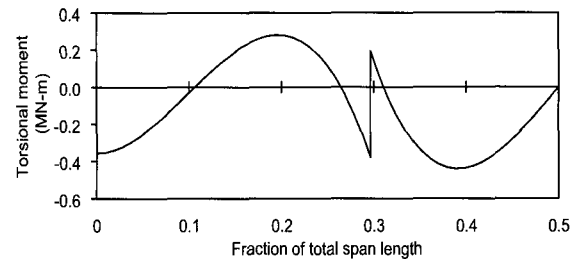
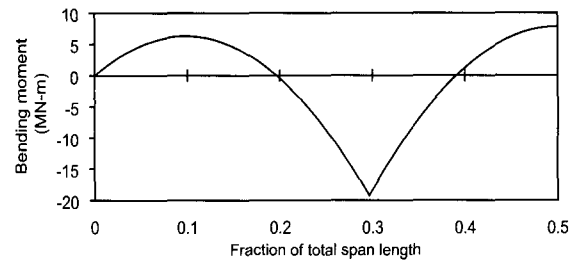
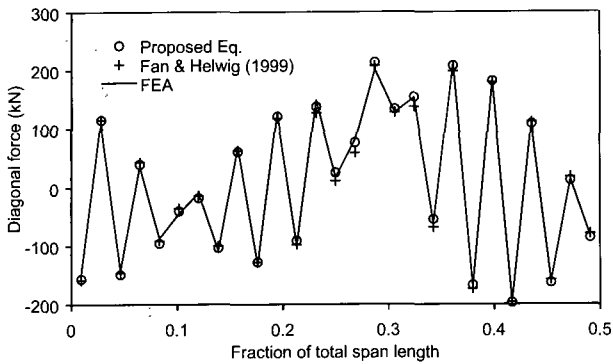
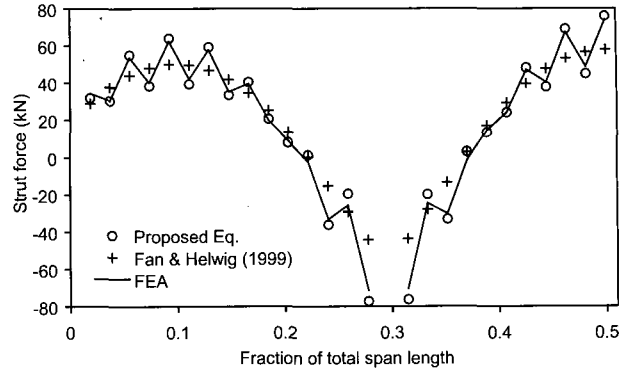


그림 14 곡선형 3경간 연속 거더의 휨모멘트도 및 비틀림모멘트도

및 선택된 브레이싱 부재를 보이고 있으며, 그림 11 (d) 및 (e)에는 재하된 비틀림 하중 및 수직 하중을 각각 나타내었다. 그림 12는 단경간 예제의 유한 요소 해석과 제안식에 의한 부재력 결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림 12 (a)와 (b)는 비틀림 하중에 의한 Diagonal 및 Strut에 발생한 부재력을 각각 보여주고 있으며, 그림 12 (c)는 수직 하중에 의해 발생한 각 부재력을 보여주고 있다. 그림 12에서 알 수 있듯이, 비틀림 하중에 의한 Diagonal 부재력은 큰 차이를 보이지 않으나 Strut의 경우 Fen and Helwig (1999)의 가정과는 다르게 무시할 수 없는 정도의 부재력이 발생함을 알 수 있다. 수직력에 의한 거더의 휨에 의해



(a) Diagonal 부재력



(b) Strut 부재력

그림 15 곡선형 3경간 연속 거더의 브레이싱 부재력의 비교

발생하는 부재력의 경우에도 본 연구에서 제안된 산정식이 기존의 제안식보다 향상된 정확도를 보여줌을 알 수 있다.

그림 13은 곡선형 3경간 연속 거더의 평면도와 재하된 수직하중, 박스 단면, 수평 및 내부 브레이싱에 사용된 부재를 보여주고 있다. 일반적인 경우처럼 본 3경간 예제 거더도 3개의 서로 다른 단면을 가지는 것으로 가정하였다. 수평 브레이싱은 3경간에 걸쳐 전체 54개(16+22+16)의 브레이싱 패널에 설치되었고, 수평 브레이싱과 내부 브레이싱의 상호작용 효과를 배제하기 위하여 X-형태의 내부 브레이싱(Internal X-Frame)을 두 개의 패널 간격으로 설치하였다. 그림 14는 재하된 수직 하중에 의해 발생하는 휨 모멘트와 비틀림모멘트를 거더의 종방향을 따라 그 크기를 도시하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 브레이싱의 부재력은 단면 형상에 따른 계수들에 의존하지만 기본적으로 종방향을 따라 휨 및 비틀림모멘트의 함수이다. 그림 15(a) 및 (b)에는 부재력 산정식으로 구한 결과를 유한요소 해석의 결과와 비교하여 나타내었다. 그림 15에 확인할 수 있듯이, 단순경간 예제매와 유사하게 Diagonal 부재의 경우 각 방식으로 구한 부재력은 서로간에 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 Strut 부재의 경우에, 기존의 산정식은 유한 요소 해석 결과와 상이한 차이를 보인다. 무엇보다도 기존의 산정식은 부모멘트 구간 뿐만 아니라 정모멘트 구간에서도 실제 발생할 수 있는 부재력보다 상당 수준 낮게 평가하고 있다. 그 이유로는 기존의 연구자들은 순수 비틀림과 뒤틀림에 의해서 발생하는 부재력을 고려하지 않았기 때문으로 보여진다. 본 연구에서 제안된 부재력 산정식은 실제 발생하는 부재력 패턴과 매우 유사하며 정/부 모멘트 구간 양측에서 부재력을 상당히 높은 정확도로 예측하고 있다.

7. 결 론

개단면 스틸 박스 거더의 상부에 설치되어 준폐단면을 구성하는 수평 브레이싱 시스템에 대해서 부재력을 예측하는 산정식이 해석적 방법에 의해 새롭게 개발되었다. XD Type의 경우 기존의 산정식에 의해서도 정확한 예측이 가능하였으나 SD Type의 경우 30%이상의 오차를 보였으며 무엇보다도 예측식에 의한 부재력이 실제 발생하는 부재력보다 낮게 산정하는 심각한 문제가 있었다.

Strut 부재의 경우 주로 거더의 휨과 횡방향 성분력에 의해 발생하는 것으로 알려졌지만, 전형적인 곡선 연공교의 경우에도 순수 비틀림 및 뒤틀림 성분력에 의해서 발생하는 부재력 또한 전체 부재력의 35%에 이를 정도로 무시하기 힘든 비율을 차지한다. 본 연구에서는 거더의 휨 및 비틀림 거동에 근거하여 새로운 예측식이 제안되었으며 유한요소해석을 통하여 제안식의 타당성이 검증되었다. 본 제안식에 근거하여 더욱 정확한 부재력의 예측이 가능하게 되었으며 이는 여타의 다른 해석 기법 등과 함께 설계 실무에서 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Topkaya, C., and Williamson, E. B. (2003). "Development of computational software for analysis of curved girders under construction loads." *Comput. Struct.*, 81(2003), 2087-2098.
2. Heins, C. P., and Hall, D. H. (1981). *Designer's guide to steel box girder bridges*, Bethlehem Steel Corporation, Bethlehem, Pennsylvania.
3. Bradberry, T. E., Cotham, J. C., and Medlock, R. D. (2005). "Elastomeric bearings for steel trapezoidal

- box girder bridge.” TRB Annual Meeting CD-ROM, Paper Number 05-2526, Washington, DC, USA. pp. 1-25.
4. B. S. Chen (2002). *Top-lateral bracing systems for trapezoidal steel box-girder bridges*, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, Texas.
 5. Fan, Z., and Helwig, T. A. (1999). “Behavior of steel box girders with top flange bracing.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 125(8), 829-837.
 6. Fan, Z., and Helwig, T. A. (2002). “Distortional loads and brace forces in steel box girders.” *Journal of Structural Engineering*, 128(6), 710-718.
 7. Kim, K and Yoo, C. H. (2006). “Brace forces in steel box girders with single diagonal lateral bracing systems.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, In press.
 8. Kim, K and Yoo, C. H. (2006). “Interaction of top lateral and internal bracing systems in tub girders.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, In press.
 9. Kollbrunner, C. F., and Basler, K. (1969). *Torsion in structures: An engineering approach*, Springer, New York.
 10. Tung, D. H. H., and Fountain, R. S. (1970). “Approximate torsional analysis of curved box girders by the M/R method.” *AISC Engineering Journal*, 7(3), 65-74.
 11. Kim, K (2004). *Research on horizontally curved steel box girders*. Ph.D. Dissertation, Auburn University, Auburn, Alabama 