

콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 유효폭 평가

박영훈* · 이승용**

Park, Young Hoon*, Lee, Seung Yong**

Evaluation on Effective Width of Concrete Unfilled Composite Steel Grid Deck

ABSTRACT

In this study, analyzed the effective width of concrete unfilled composite steel grid deck which has different shear connector details from that of composite bridge. The effective width of concrete unfilled composite steel grid deck according to effective width calculation method, load size and main bearing bar spacing-span ratio was evaluated. As a result of analysis, it is analyzed that the effective width is calculated to be nearly equal to the actual effective width by idealizing the stress shape as a trapezoidal shape. In addition, shear hole penetration reinforcing bars applied to increase the shear strength is shown to increase the effective width. From the results of the analysis of the effective width according to main bearing bar spacing-span ratio, proposes the correction factor that can calculate the effective width ratio of the unfilled steel composite steel grid deck.

Key words : Concrete unfilled composite steel grid deck, Effective width, Finite element method, Influence analysis, Correction factor

초 록

본 연구에서는 합성형교와는 다른 전단연결 상세를 가지는 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 유효폭을 수치적으로 분석하였다. 유효폭 산정 방법 및 위치, 작용하중 크기, 메인 베어링 바 간격-지간장비에 따른 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 유효폭을 평가하였다. 분석 결과 응력 형태를 사다리꼴로 이상화하여 유효폭을 산출하여도 실제 유효폭과 거의 동일한 것으로 분석되었다. 또한, 전단 강도 증가를 위해 적용된 전단홀 관통 철근이 유효폭을 증가시키는 역할을 하는 것으로 나타났다. 메인 베어링 바 간격-지간장비에 따른 유효폭 분석 결과로부터 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 유효폭비를 산출 할 수 있는 보정 계수를 제안하였다.

검색어 : 콘크리트 비충전 강합성 바닥판, 유효폭, 유한요소해석, 영향 분석, 보정계수

1. 서론

합성보에 있어서 전단연결재는 철근콘크리트 바닥판과 거더를 합성시키면서 바닥판 변형을 억제시켜 바닥판 자체의 횡방향 응력을 불균일하게 한다. 또한, 바닥판에 발생하는 전단변형에 의한 전단뒤짐(shear lag) 현상에 의하여서도 변형이 변화되어 합성된 거더와 떨어질수록 철근콘크리트 바닥판에는 일정하지 않은 응력이 발생하게 된다(Nie et al., 2008).

전단연결재와 전단뒤짐 현상에 의해 철근콘크리트 바닥판에 일정하지 않은 응력이 발생하는 현상을 효과적으로 설계에 반영하기 위하여 유효폭(effective width) 개념을 적용하고 있으며, 유효폭은 모멘트, 전단력, 비틀림, 처짐 계산에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 거더 제원과 전단연결재 결정에 영향을 미치게 된다(Castro et al., 2006).

* 중신회원 · 교신저자 · 부천대학교 토목과 부교수 (Corresponding Author · Bucheon University · pyh@bc.ac.kr)

** 중신회원 · 한국교통대학교 건설환경도시교통공학부 교수 (Korea National University of Transportation · sylee@ut.ac.kr)

Received November 18, 2016/ revised February 4, 2017/ accepted May 8, 2017

1920년대부터 T-beam 등의 전단뒤집 현상에 대한 연구가 진행되어 실제에 근접하는 유효폭 산정 규정을 개발해 오고 있으며, 기존의 연구에 의해서 유효폭은 하중형태 및 크기, 거더 간격-시간장비 등에 의해 변화되는 것으로 나타나고 있다(Chiewanichakorn et al., 2004). 또한, 철근콘크리트 바닥판의 두께 방향으로 발생응력 형태의 변화가 발생하여 동일 바닥판에서 두께 방향의 위치에 따라 유효폭의 차이가 발생하게 된다(Chiewanichakorn et al., 2004).

한편, 긴장에 의해서는 강합성보의 유효폭이 미소하게 증가하는 것으로 나타났으며, 콘크리트 크립에 의한 유효폭 증가, 건조수축에 의한 유효폭의 감소가 분석되었다(Chen and Zhang, 2005).

특히, 전단연결부와는 무관한 웹 개구부(web opening)까지 강합성보 유효폭에 영향을 주는 것으로 평가되고 있어(Mohammad A., 2016), 합성보와 상이한 전단연결부를 가지는 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 유효폭 평가가 필요한 것으로 판단된다.

콘크리트 비충전 강합성 바닥판은 철근콘크리트 바닥판과 강격자구조로 구성되고, 스터드 전단연결재(stud shear connector)가 아닌 메인바(main bearing bar) 복부 상단의 유공 전단연결재(perfobond shear connector)에 의해 합성되어, 기존의 합성보 유효폭 평가 방법이 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 유효폭 산정에 적합한 지에 대한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

이에, 본 연구에서는 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 전단뒤집 현상이 고려되는 3차원 유한 요소 해석을 실시하여, 유효폭 산정 방법과 유효폭 영향인자인 하중크기, 거더 간격-시간장비를 고려한 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 유효폭을 분석하였다.

또한, 거더 간격-시간장비에 의한 현행 합성보 유효폭 평가 방법 적용의 결과와 비교하여, 현행 합성보 유효폭 산정 설계 기준을 활용하여 연구 대상의 콘크리트 비충전 강합성 바닥판 유효폭비를 산정 할 수 있는 보정계수를 수치적으로 도출하였다.

2. 유효폭 영향인자

합성보의 바닥판 유효폭 산정에 있어 모든 조건에 적합한 표준화된 기준은 없는 실정으로 바닥판의 응력상태를 고려하거나 합성보의 강성을 고려한 유효폭을 산정하게 된다(Castro et al., 2006). 바닥판의 응력상태를 고려하는 방법은 기본적으로 바닥판의 응력 분포를 고려하는 방법으로 전단뒤집 현상과 직접적인 연관이 있다. 유효폭은 Fig. 1과 같이 실제 바닥판에 있어 동일한 응력이 발생하는 부분으로 간주되며, 그에 따른 유효폭은 다음 Eq. (1)과 같이 거더 위치의 바닥판 응력(f_{max})과 동일한 응력이 발생하는 영역이다.

$$b_{eff} = \frac{1}{[f_x]_{y=0}} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} f_x dy \quad (1)$$

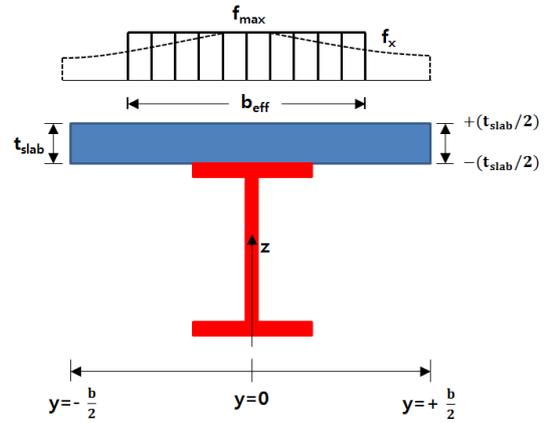


Fig. 1. Stress-based Effective Width

Eq. (1)에 있어서 바닥판 두께 방향 어느 위치의 응력을 적용할 것인가에 대해서는 명확히 정의 되지 않고 있으나, 바닥판 두께 방향의 상단 및 중앙면의 응력이 Eq. (1)에 적용될 수 있다.

Fahmy and Robinson (1986)은 Eq. (2)와 같이 바닥판 전체의 응력 합에 대한 거더 상단에 발생하는 바닥판 두께 방향 최대응력 합의 비로 유효폭을 산정하는 개선된 방안을 적용하였다.

$$b_{eff} = \frac{\int_{-\frac{t_{slab}}{2}}^{+\frac{t_{slab}}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} f_x dy dz}{\int_{-\frac{t_{slab}}{2}}^{+\frac{t_{slab}}{2}} [f_x]_{y=0} dz} \quad (2)$$

유효폭 산정 위치 및 방법, 하중크기, 거더 간격-시간장 비가 유효폭에 미치는 영향에 대한 기존 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

2.1 유효폭 산정 위치 및 방법의 영향

I단면형에 발생하는 전단 변형률에 의한 플랜지 면 외 변형이 이루어 질 수 없는 상황에서는 2차적인 축 응력이 발생하게 되고, 그 결과로 Fig. 2와 같이 플랜지 폭 방향으로의 축응력이 일정하지 않게 된다. 이러한 현상을 전단뒤집 이라고 한다.

Eq. (1)을 이용하여 바닥판 유효폭을 산정할 경우 Figs. 2 and 3과 같이 고려되는 위치와 응력형태에 따라 실제 바닥판의 유효폭이 상이하게 된다.

Fig. 2를 살펴보면, 발생 최대응력(f_{max})과 주변 응력형태의 변화에 의해 고려되는 위치에 따라 유효폭이 변화하게 된다(Castro et al., 2006).

한편, Fig. 3(a)에서와 같이 바닥판의 실제 응력형태를 고려하는 경우와 바닥판의 응력 형태를사다리꼴 형태로 고려하는 Fig. 3(b)의

유효폭은 상이하게 되며(Chiewanichakorn et al., 2004), Fig. 3(a)의 유효폭은 Eq. (2)에 의해 구해지고 Fig. 3(b)의 유효폭은 4.1절의 Eq. (6)에 의해 계산 되어 진다.

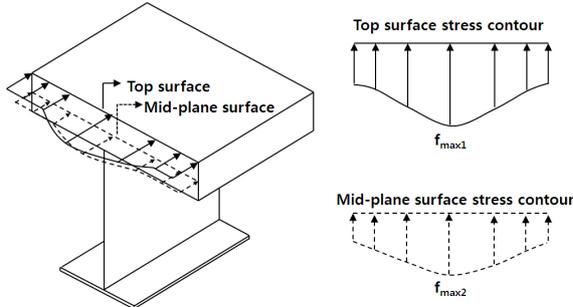
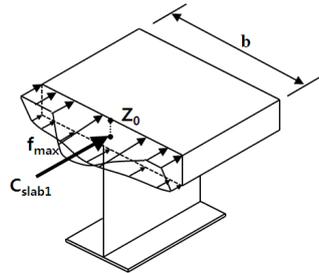
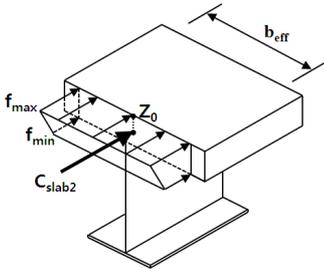


Fig. 2. Stress Distribution in Position



(a) Actual Stress Distribution



(b) Trapezoidal Stress Distribution

Fig. 3. Stress Distribution Pattern

2.2 하중 크기 영향

Amadio and Fragiaco (2004)에서는 정모멘트와 부모멘트를 받는 강합성보의 유효폭에 대한 선형 및 비선형 해석을 수행한 결과 파괴상태에 가까워질수록 전단뒤짐 현상의 영향이 감소하는 것으로 분석되어, 비탄성 상태의 유효폭이 탄성상태의 유효폭 보다 큰 것으로 평가되었다. Nie et al. (2008)에서는 지간장-합성보 바닥판 폭의 비와 하중형태의 변화의 영향이 전단뒤짐에 미치는 정도가 극한변형 상태에서 증가하는 것으로 분석되었다.

2.3 거더 간격-지간장 비 영향

슬래브 거더교의 거더 간격이 상대적으로 증가할 경우 바닥판 폭에서의 유효폭비는 감소하며 대부분 국가의 유효폭 산정 설계기준에서 거더 간격-지간장 비를 중요 영향인자로 고려하고 있다. 한편, 연속보의 유효폭 산정에 있어서는 Fig. 4와 같이 유효지간장을 적용하여 외·내측 경간 및 내부지점의 유효폭을 산출한다(Ahn et al., 2004).

2.4 전단연결재 상세 영향

합성보 상단의 철근 콘크리트 바닥판과 하단의 강 거더는 Fig. 5(a)와 같이 스테드 형태의 전단연결재에 의해 합성되나, Fig.

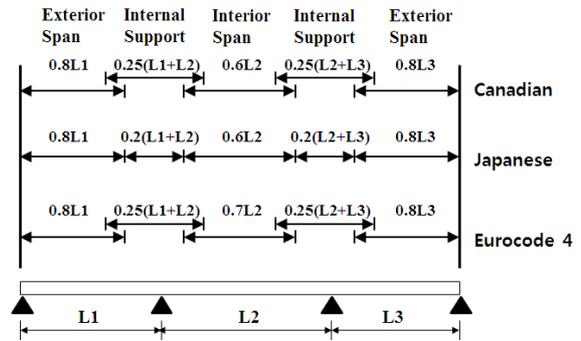


Fig. 4. Effective Span Length Ratios

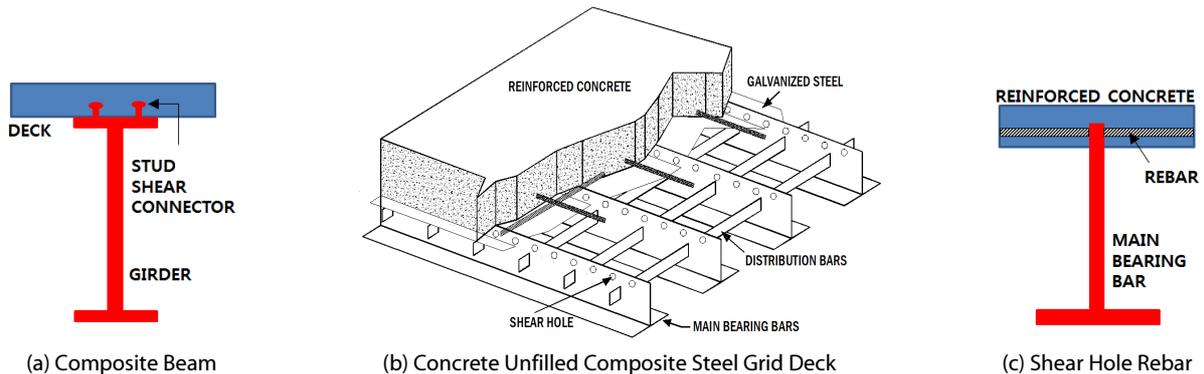


Fig. 5. Detail Difference between Composite Beam and Concrete Unfilled Composite Steel Grid Deck

5(b)의 콘크리트 비충전 강합성 바닥판에서는 Fig. 5(c)에서와 같이 철근 콘크리트 바닥판 하단에 매립된 메인바 상단 일부(유공 강판)에 의해 상단의 철근 콘크리트 바닥판과 하단의 강 격자 구조가 합성된다.

콘크리트 비충전 강합성 바닥판 상단의 철근 콘크리트 바닥판과 하단의 강 격자 구조의 경계면에 작용하는 전단력을 전달시키기 위한 충분한 강성과 강도를 위하여 Fig. 5(c)와 같이 전단홀(shear hole)에 철근을 관통 시키게 된다.

이와 같이, 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 전단력 전달 상세와 합성보의 해당 상세가 상이 하여, 전술한 유효폭 영향 인자들의 영향이 합성보의 경우와 일치 하는지에 대한 분석이 필요한 것으로 판단된다.

3. 유한요소해석

Kim et al. (2008)은 Fig. 6의 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 정적재하시험을 실시하였으며, 유효폭 분석을 위한 Fig. 7의 유한요소해석 모델의 검증에 위하여 해석결과와 실험결과를 비교 하였다.

Figs. 7(a) and 7(b)와 같이 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 철근콘크리트 바닥판에는 솔리드 요소(HX8M)를 적용하고, 메인 베어링 바와 분배바(distribution bar) 모델링에는 셸요소(QTS4)를 사용하였다. 상단의 철근콘크리트 바닥판과 하단의 메인 베어링 바의 합성강도 증진을 위하여 Fig. 6의 전단홀(shear hole)에 철근을 관통시켰다. 철근을 관통시킨 유한요소해석 모델은 Fig. 7(a)의 case A와 같으며, 관통철근을 적용하지 않은 유한요소해석 모델은 Fig. 7(b)의 case B와 같다. 관통철근은 보요소(BMS3)로 모델링하였다.

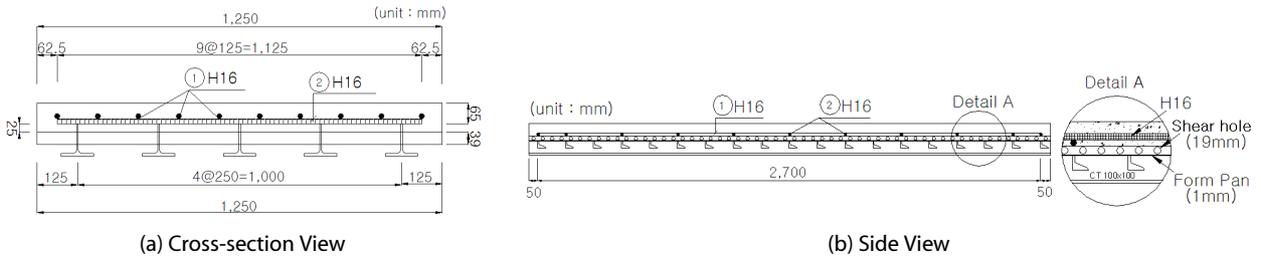


Fig. 6. Geometry of Unfilled Composite Steel Grid Deck



Fig. 7. Finite Element Model

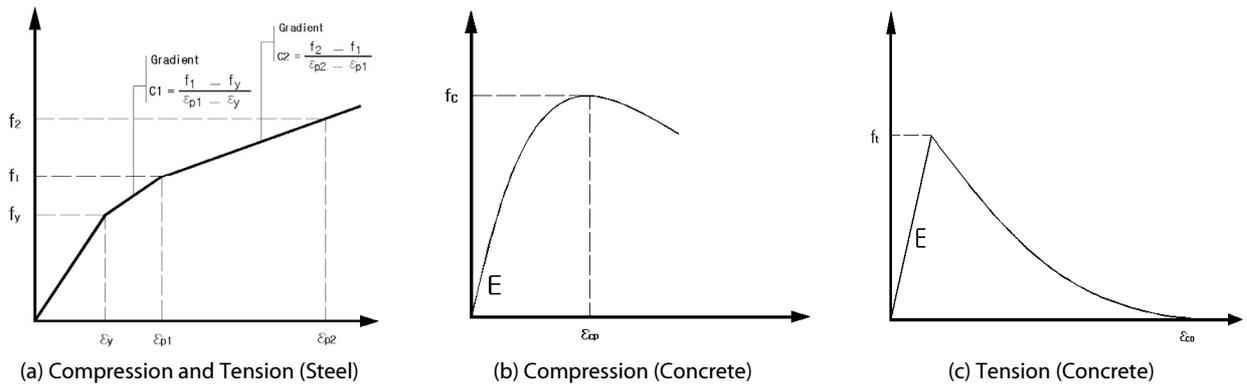


Fig. 8. Stress-strain Relation

비선형 유한요소해석에서 강제 및 철근의 압축과 인장의 응력-변형률 관계가 유사하여 Fig. 8(a)와 같은 항복 이후 기울기가 선형적으로 변화하는 모델을 압축 및 인장에 적용하였다. 한편, 콘크리트의 응력-변형률 관계는 압축과 인장에서 차이를 가지며, Figs. 8(b) and 8(c)와 같이 구조해석 프로그램 LUSAS에서 채택하고 있는 응력-변형률 관계를 적용하였다.

Fig. 7의 유한요소해석 모델 검증을 위하여 Fig. 9에 나타난 위치의 해석 및 측정 변형률을 Figs. 10 and 11에 비교하였다. 유효폭 분석과 관련하여 유한요소해석 모델을 검증하기 때문에

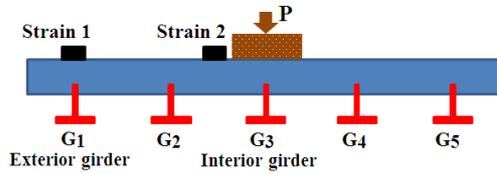


Fig. 9. Location of Strain Gauge

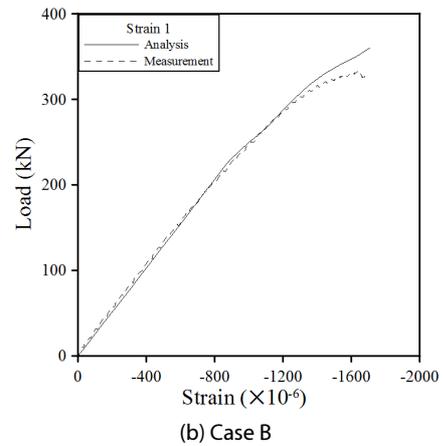
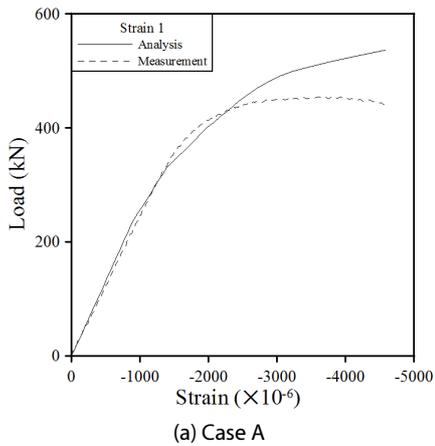


Fig. 10. Load-strain Curves for Strain 1

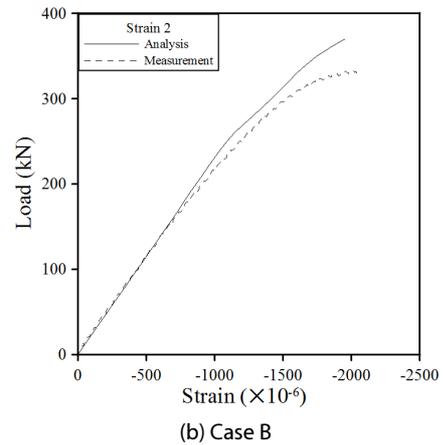
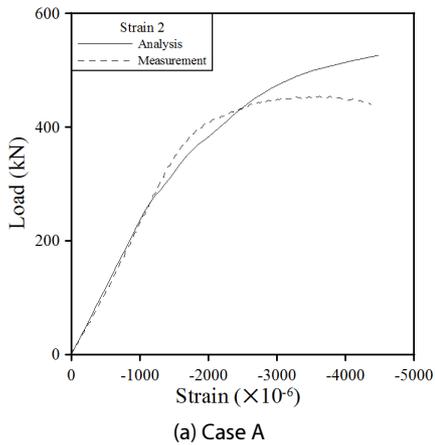


Fig. 11. Load-strain Curves for Strain 2

Fig. 9와 같이 철근콘크리트 바닥판 상단의 측정 및 해석 변형률을 비교하였다.

Figs. 10 and 11의 측정 변형률은 Fig. 6의 시험체 정적 휨과괴 실험 결과로서 변형률계이지 및 하중 작용위치는 Fig. 9와 같다 (Kim et al., 2008). 시험체 파괴까지 완전한 합성거동이 이루어지는 가정하의 Fig. 6의 이론적 파괴하중은 322 kN이며, 파괴하중까지 해석결과와 측정결과가 거의 일치하는 것으로 Figs. 10 and 11에 분석되었다.

4. 유효폭 분석

4.1 유효폭 산정방법 영향 분석

Fig. 2에서와 같이 철근콘크리트 바닥판의 두께 방향에 따라 응력분포 형태가 변화된다. Fig. 7의 유한요소해석 모델에 의해 도출된 철근콘크리트 바닥판 두께 방향에 따른 해석응력을 Fig. 12에 정리하였다.

Fig. 12(a)는 외측거더의 응력분포이기 때문에 비대칭이고 Fig. 12(b)는 내측거더의 경우로 응력 분포가 대칭이다. Fig. 12의 전단홀 관통철근 유무(Case A와 B)와 철근콘크리트 바닥판 두께 방향의 응력에 따른 유효폭비를 Table 1에 정리하였다.

Table 1의 유효폭비(b_{eff}/b)는 Eq. (1)을 이용하여 산출한 결과이며, Fig. 12에서 압축응력이 발생하는 $Z_1 \sim Z_3$ 의 유효폭비이다. Table 1을 살펴보면, 일부 조건에서 1 이하의 유효폭비가 분석되었고, 동일 조건에서 철근콘크리트 바닥판 두께 방향 위치에 따라 유효폭비가 1.22~7.36% (평균 3.86%) 정도 변화되는 것으로 나타났다.

또한, Table 1에서 전단홀 관통철근 위치와 근접한 $Z_2 \sim Z_3$ 의 전단홀 관통철근 유무에 따른 유효폭비 차이가 Z_1 의 경우보다 높은 것으로 분석되었으며, 전단홀 관통철근의 응력 분배 효과에 의하여 전단홀 관통철근이 없는 경우보다 유효폭비가 증가하는 것으로 평가 되고 있어 전술한 바와 같이 철근콘크리트 바닥판의 위치에 따라 유효폭비의 변화가 발생하는 것으로 나타났다.

한편, 철근콘크리트 바닥판 전체응력을 고려한 유효폭비를 산출함에 있어서는 Fig. 3(a)의 실제 응력 형태와 Fig. 3(b)와 같은 사다리꼴 형태의 응력을 고려 할 수 있다(Chiewanichakorn et al., 2004).

실제 응력 형태를 고려한 Fig. 3(a)의 경우에는 Eq. (2)를 적용하고, Fig. 3(b) 경우의 철근콘크리트 바닥판 총압축력(C_{slab})과 휨모멘트(M_{slab})는 다음의 Eqs. (3) and (4)과 같이 계산 되어 질 수 있다.

$$C_{slab} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot A_i \quad (3)$$

$$M_{slab} = \sum_{i=1}^n C_{i,slab} \cdot z_i \quad (4)$$

Eqs. (3) and (4)에서 C_{slab} 는 바닥판 총압축력, M_{slab} 는 바닥판 발생모멘트, n 은 바닥판 압축부 총 요소수, I 는 바닥판 요소번호, f_i 는 바닥판 요소 종방향응력, A_i 는 바닥판 요소 단면적, z_i 는 기준점에서 바닥판 요소 자체 중심까지의 거리이다.

바닥판 상단에서 압축력의 중심까지의 거리를 3(b)에서와 같이 z_0 로 나타낼 수 있다. z_0 는 다음 Eq. (5)에 의해서 구할 수 있으며, 중립축이 바닥판에 존재하게 될 경우 압축응력을 받는 바닥판 부분만 Eqs. (3) and (4)에서 고려된다. 최종 유효폭비는 Eq. (6)에 의해 구해진다.

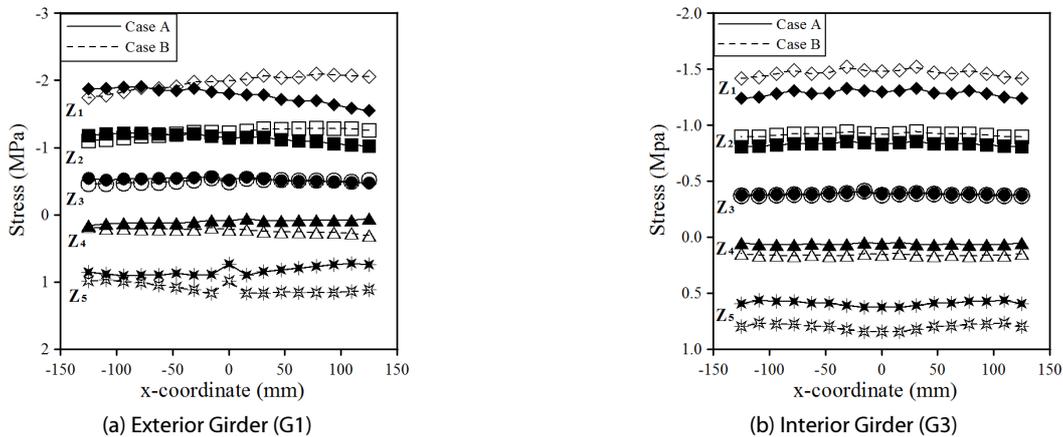


Fig. 12. Stress Distribution

Table 1. Effective Width Ratio by Eq. (1)

ID.	b_{eff}/b			[max-min] / min (%)	
	Z_1	Z_2	Z_3		
Exterior girder	Case A ^(a)	0.990	0.996	1.041	5.15
	Case B ^(b)	0.992	0.980	0.991	1.22
	(a)-(b) / (b) (%)	-0.20	+1.63	+4.80	-
Interior girder	Case A ^(a)	0.991	1.032	1.064	7.36
	Case B ^(b)	0.994	0.977	0.991	1.74
	(a)-(b) / (b) (%)	-0.30	+5.63	+7.36	-

$$z_0 = \frac{M_{slab}}{C_{slab}} \quad (5)$$

$$b_{eff} = \frac{C_{slab}}{F} = \frac{C_{slab}}{0.5t_{slab}(f_{max} + f_{min})} \cdot \frac{1}{b} \quad (6)$$

Eq. (6)에서 b_{eff} 는 유효폭비, C_{slab} 는 Eq. (3)에 의해 계산되는 바닥판 총압축력, t_{slab} 는 압축력을 받는 총 바닥판 두께, f_{max} 는 바닥판 최대 압축응력, f_{min} 은 바닥판 최소 압축응력이다.

철근콘크리트 바닥판 두께 방향 위치에 따른 영향이 배제된 유효폭비를 산출하기 위해서 3차원 유한요소해석 결과를 바탕으로 Eqs. (2) and (6)에 의한 유효폭비를 Table 2에 정리하였다.

철근콘크리트 바닥판 전체 응력을 고려하여 유효폭비를 산출함에 있어 Fig. 3(a)에서와 같이 실제 응력을 고려할 경우, 철근콘크리트 바닥판 모든 위치의 응력 크기를 유한요소 해석 결과에서 확인하고 Eq. (2)에 적용 하여야 함으로 계산 과정이 매우 복잡한다.

한편, Fig. 3(b)에서와 같이 철근콘크리트 바닥판 응력 형태를 사다리꼴로 고려할 경우 f_{max} , f_{min} 만을 유한요소 해석 결과에서 확인하고 Eq. (3)의 C_{slab} 계산 후 Eq. (6)으로 유효폭비를 산출할 수 있어, 실제 응력 상태를 고려하여 유효폭비를 산출 하는 경우 보다 상대적으로 간편하다.

Table 2를 살펴보면, 철근콘크리트 바닥판의 실제 응력형태를 고려하는 경우와 철근콘크리트 바닥판의 응력을 사다리꼴로 고려할 경우의 유효폭비 차이는 0~0.2%로 매우 미소한 것으로 분석되어, 콘크리트 비충전 강합성 바닥판에 있어 철근콘크리트 바닥판 전체 응력을 고려한 유효폭비를 산정할 경우에는 Fig. 3(b)에서와 같이 발생 응력 형태를 사다리꼴로 고려하여도 유효폭비 산정 정확도에 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

한편, Table 1의 경우와 동일하게 전단홀 관통철근에 의한 추가적인 응력분배에 의하여 전단홀 관통 철근 적용에 의해 유효폭비가 상대적으로 증가하는 것으로 Table 2에서도 나타났으며, 유효폭비의 증가 정도는 Table 1의 경우 보다는 낮은 것으로 평가된다.

4.2 하중크기 영향 분석

전단연결이 파괴시까지 완벽하게 이루어 질 경우, 강도한계상태의 유효폭비가 탄성 상태의 유효폭비 보다 상대적으로 높아 철근콘크리트 바닥판의 실제폭을 유효폭으로 간주할 수 있는 것으로 기존 연구에서 평가되고 있다(Amadio and Fragiaco 2004). 하중 증가에 따른 유효폭비를 분석하여 그 결과를 Fig. 13에 정리하였다.

Fig. 13을 살펴보면, 하중증가에 의해 유효폭비가 증가하는 것으로 나타나 기존의 연구결과와 동일한 경향을 보여 주고 있으며, 유효폭비 증가 정도는 철근콘크리트 바닥판 두께 방향의 위치에 따라 상이한 것으로 분석되었다.

한편, Fig. 3에서와 같이 철근콘크리트 바닥판의 실제 응력형태를 고려하는 경우와 철근콘크리트 바닥판의 응력형태를 마름모꼴로 고려하는 경우에 있어서의 Eq. (5)의 z_0 와 그에 따른 유효폭비를 Fig. 14에 나타내었다.

하중증가에 따라 철근콘크리트 바닥판의 실제 응력형태를 고려한 Eq. (2)의 유효폭비는 증가하는 것으로 나타났으며, 철근 콘크리트 바닥판의 응력형태를 마름모꼴로 고려하는 Eq. (6)의 유효폭비 또한 최종적으로 증가하는 것으로 Fig. 14에서 분석되었다.

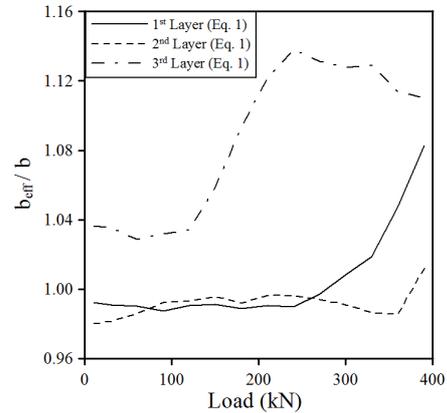


Fig. 13. Effective Width Ratio by Eq. (1) (load effect)

Table 2. Effective Width Ratio by Eqs. (2) and (6)

ID.		b_{eff}/b		[(1)-(2)] / (1) (%)
		Fig. 3(a) (Eq. (2)) ⁽¹⁾	Fig. 3(b) (Eq. (6)) ⁽²⁾	
Exterior girder	Case A ^(a)	0.985	0.985	0.0
	Case B ^(b)	0.976	0.974	0.20
	(a)-(b) / (a) (%)	+0.91	+1.11	-
Interior girder	Case A ^(a)	0.972	0.971	0.10
	Case B ^(b)	0.972	0.971	0.10
	(a)-(b) / (a) (%)	0.0	0.0	-

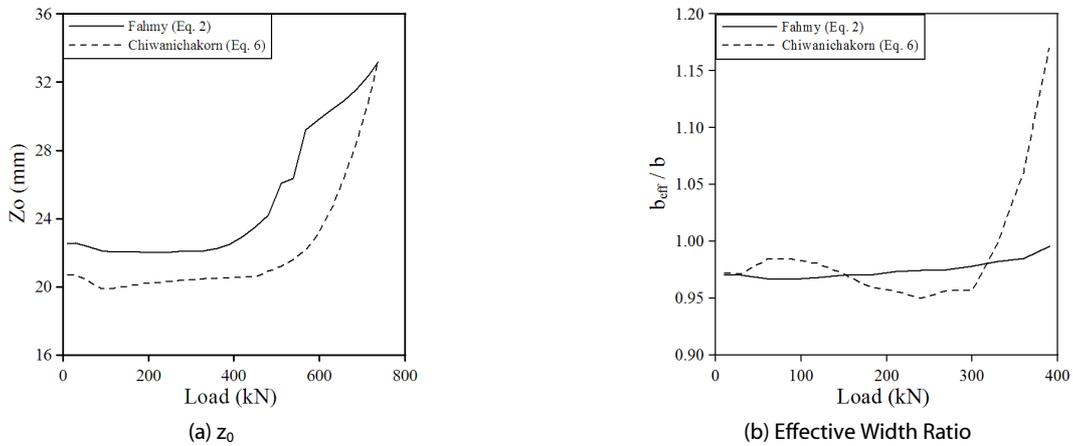


Fig. 14. z_0 and Effective Width Ratio (Load Effect)

4.3 메인 베어링 바 간격-지간장 비 영향 분석

Eq. (7)에서와 같이 한국 등 많은 국가에서는 지간장과 거더 간격의 비를 직접적으로 고려하여 유효폭비를 산정하고 있다.

$$\lambda = b \text{ for } \frac{b}{l} \leq 0.02 \quad (7)$$

$$\lambda = [1.06 - 3.2(\frac{b}{l}) + 4.5(\frac{b}{l})^2] \cdot b \text{ for } 0.02 < \frac{b}{l} < 0.3$$

$$\lambda = 0.15l \text{ for } \frac{b}{l} \geq 0.3$$

Eq. (7)에서 l 은 지간장, b 는 거더 간격이다. Eq. (7)에서 거더 간격이 상대적으로 감소하거나 지간장이 증가하여 거더 간격-지간장 비가 감소할수록 유효폭비가 증가한다.

탄성 영역에서의 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 메인 베어링 바 간격-지간장 비의 변화에 따른 유효폭을 분석하기 위하여 메인 베어링 바 간격-지간장 비 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5 경우의 유효폭비를 유한요소해석과 Eq. (6)으로 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 15에 정리하였다.

Fig. 15의 도출된 회귀식을 살펴보면, 메인 베어링 바 간격-지간장 비(b/l)가 감소할수록 유효폭비가 증가하는 것으로 나타났으며, 회귀식에 의해 설명되는 변동량이 최소 95.9% (R-squared)로 회귀식의 높은 적합성이 분석되고 있다. Fig. 15의 회귀식 및 Eq. (7)의 적용 결과를 비교하면 Fig. 16과 같다.

메인 베어링 바 간격-지간장 비(b/l) 0.03~0.5 범위에서 Eq. (7)은 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 유효폭비를 과소평가하는 것으로 Fig. 16에서 분석되고 있다.

유효폭비는 최적의 설계 단면 산출에 매우 중요한 항목으로 Fig. 15의 회귀식과 Eq. (7)의 적용 결과의 차이는 강합성보와

콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 전단 연결재 상세 차이와 단면 높이, 폭, 두께 등의 비율 등의 차이 등에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

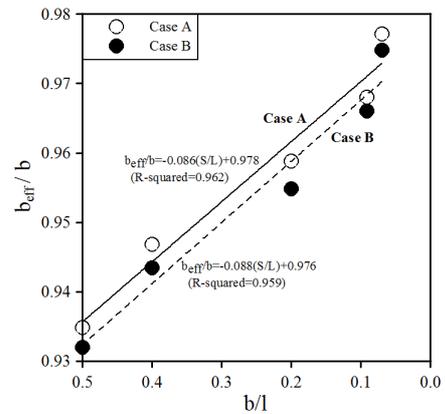


Fig. 15. Effective Width Ratio ((Main Bearing Bar Spacing / Span Length) Effect)

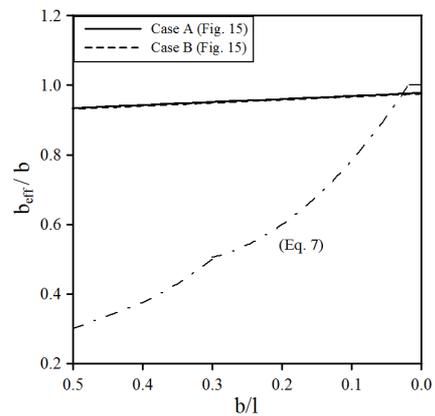


Fig. 16. Effective Width Ratio Difference

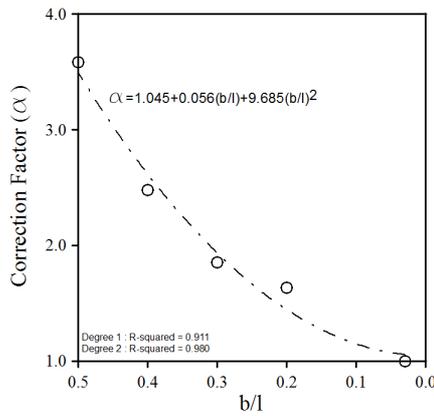


Fig. 17. Correction Factor (α)

메인 베어링 바 간격-지간장 비(b/l)에 따른 Fig. 15의 회귀식에 의한 유효폭비와 Eq. (7)에 의한 유효폭비의 차이를 도식화 하면 Fig. 17과 같다.

Fig. 17에서 도출된 이차곡선 회귀식은 변동량의 최대 98%를 설명하는 높은 적합성을 보여주고 있다. 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 상단 철근콘크리트 바닥판 유효폭비 산출에 있어 Eq. (7)을 적용할 경우, Eq. (8)과 같이 메인 베어링 바 간격-지간장 비(b/l)에 따른 Fig. 17의 보정계수 (α)를 고려한다면 보다 정확한 유효폭비를 산출 할 수 있을 것으로 판단되며, 보다 다양한 메인 베어링 바 간격 - 지간장비의 경우에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

$$b_{eff} = \frac{\lambda_{(Eq.7)}}{b} \cdot \alpha_{(Fig.17)} \quad (8)$$

5. 결론

본 연구는 합성보와는 상이한 전단연결 상세 및 단면 비율을 가지는 콘크리트 비충전 강합성 바닥판 상단의 철근콘크리트 바닥판 유효폭비에 대하여 수치적으로 분석하였다. 유효폭비 분석에 있어 고려된 조건은 유효폭비 산정 방법, 작용 하중 크기, 메인 베어링 바 간격-지간장 비이다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 사용한계상태 뿐만 아니라 강도한계상태의 바닥판 유효폭을 분석하기 위하여 비선형해석을 실시하였으며, 그 결과를 실제 파괴실험 결과와 비교하여 유한요소해석 결과의 정확성을 평가 하였다.
- (2) 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 철근콘크리트 바닥판 두께 방향 위치 차이에 따라 유효폭비의 변화가 발생하는 것으로 나타났으며, 합성강도 증진을 위해 적용된 전단홀 관통철근의

영향으로 유효폭 변화 정도가 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다.

- (3) 철근 콘크리트 바닥판 실제 응력형태를 고려하는 경우와 실제 응력형태를 사다리꼴로 이상화 시킨 경우의 유효폭비 차이는 거의 없는 것으로 분석되었으며, 철근콘크리트 바닥판 전체 응력을 고려할 경우 합성강도 강화를 위한 전단홀 관통철근의 유효폭에 대한 영향은 감소하는 것으로 분석되었다.
- (4) 작용하중 증가에 의해 유효폭비가 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 슬래브 거더교 거더 간격과 지간장 비를 고려한 현행 합성보 유효폭비 산출 기준은 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 유효폭비를 과소평가하는 것으로 나타나, 콘크리트 비충전 강합성 바닥판의 정확한 유효폭비를 산출 할 수 있는 보정계수(α)를 분석하였다.

References

- Ahn, I.S., Chiewanichakorn, M., Chen, S. S. and Aref, A. J. (2004). "Effective flange width provisions for composite steel bridges." *Engineering structures*, Vol. 26, pp. 1843-1851.
- Amadio, C. and Fragiaco, M. (2004) "Effective width evaluation for steel-concrete composite beams." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, No. 3, pp. 378-389.
- Castro, J. M., Elghazouli, A. Y. and Izzuddin, B. A. (2006). "Assessment of effective slab widths in composite beams." *Journal of Constructional Steel Research*, 63, pp. 1317-1327
- Chen, S. and Zhang, Z. (2005). "Effective width of a concrete slab in steel-concrete composite beams prestressed with external tendons." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp. 493-500.
- Chiewanichakorn, M., Aref, A. J., Chen, S. S. and Ahn, I-S. (2004). "Effective flange width definition for steel-concrete composite bridge girder." *Journal of Structural Engineering*, pp. 2016-2031.
- Fahmy, E. H. and Robinson, H. (1986). "Analyses and tests to determine the effective widths of composite beams in unbraced multistory frames." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp.66-75.
- FEA Ltd. (2002). *Powerful FE technology for specialist applications*. LUSAS Ver. 13.4
- Kim, S. H., Park, Y. H., Lee, S. Y. and Choi, J. H. (2008). "Experimental study on the flexural behavior of inverted t-shaped steel · concrete composite deck for bridges." *Journal of KSCE*, Vol. 28, No. 3A, pp. 331-340 (in Korean).
- Mohammad, A. A. Alsarraf and Hamdy Shehab El Din (2016). "Effects of web openings on the effective slab widths in composite steel beams." *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 6-10.
- Nie, J.G., Tian, C.-Y. and Cai, C. S. (2008). "Effective width of steel-concrete composite beam at ultimate strength state." *Engineering structures*, Vol. 30, pp. 1396-1407.