

복합적층 박스거더의 유효폭 산정을 위한 기초연구

천경식¹ · 지효선² · 박원태³

포스코건설 R&D센터 책임연구원¹, 대원대학교 철도건설학과 교수², 공주대학교 건설환경공학부 교수³

A Fundamental Study on Effective Width Evaluation of Laminated Composite Box Girder

Chun, Kyoung-Sik¹ · Ji, Hyo-Seon² · Park, Won-Tae³

¹Senior Researcher, R&D Center, POSCO Engineering & Construction, Incheon, Korea

²Professor, Department of Railroad Construction, Daewon University College, Chungbuk, Korea

³Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, Chungnam, Korea

Abstract: The domestic and foreign specifications presented the effective width based on flange length to width ratio only. The existing paper on the effective width grasped of the effect of span, load type and cross-section properties, but localized steel bridges. Recently, The studies are going on in progress for the application of fiber reinforced composite material in construction field. Therefore, it is required to optimum design that have a good grasp the deformation characteristic of the displacements and stresses distribution and predict variation of the effective width for serviceability loading. This research addresses the effective width of all composite material box girder bridges using the finite element method. The characteristics of the effective width of composite structures may vary according to several causes, e.g., change of fibers, aspect, etc. Parametric studies were conducted to determine the effective width on the stress elastic analysis of all composite materials box bridges, with interesting observations. The various results through numerical analysis will present an important document for construct all composite material bridges.

Key Words: effective width, composite material, laminated composite, box girder bridges

1. 서 론

복합재료는 그 자체의 높은 비강성, 비강도와 내구성 등의 특징을 갖고 있으며, 재료의 역학적인 성질에서 발생하는 구조적인 단점을 보완하여 필요한 강도와 강성을 갖도록 배치함으로써 구조적인 효율성을 높일 수 있는 구조형식이다. 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 섬유강화 복합재료를 교량, 건물, 관로 등의 건설분야에 응용하려는 연구가 오래전부터 활발히 진행되어 왔다. 미국은 ASCE에서 FRP 구조 설계 지침서를 1984년에 제정하였으며, 유럽에서는 1996년에 복합재료 구조물 설계, 제작, 시공법에 관한 표준지침

서(EUROCODE)를 제정, 교량 상부구조 등에 이용하는 기술을 개발하여 시험 적용하였다. 국내에서도 교량 적용용 구조데크가 개발되어 가교에 이용되었고(Lee et al., 2001), 전부 유리섬유 보강 폴리에스터와 비닐에스터 폴리머 복합재료를 이용한 고강도 복합신소재 교량을 법정도로에 국내최초로 건설하기도 하였다(Ji et al., 2001, 2002). 이렇게, 복합재료 구조를 교량구조로써 효과적으로 사용하기 위해서는 설계의 목적에 맞는 역학적 응답의 확실한 이해와 충분한 연구가 수행되어야 하며, 변형특성에 대한 정확한 지식이 필요하다. 아울러, 플랜지 거더의 휨과 응력분포를 계산하여 플랜지의 실제폭에 대한 유효폭 산정이 필요하다.

주요어: 유효폭, 복합재료, 복합적층, 박스거더교

Corresponding author: Park, Won Tae

Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, Chungnam, Korea
Tel: +82-41-521-9305, Fax: +82-41-568-0287, E-mail: pwtae@kongju.ac.kr

Received August 28, 2015 / Revised September 15, 2015 / Accepted September 18, 2015

복합재료 거더교의 연구를 보면 Hollaway와 Thorne(1994)은 유한요소법을 사용하여 다공질 박스단면을 해석하였으며, Chamis와 Murthy(1989)는 근사해법에 근거한 화이버 보강된 박스단면을 갖는 보의 설계를 위한 단계적인 사전절차를 제시하였다. Sotiropoulos 등(1994)은 복합재료로 이루어진 구조계를 해석하는데 있어서 해석적인 방법의 비효율성과 함께 전단뒤집 현상을 고려한 단순해법을 필요성을 제시하였다. Rehfiel 등(1990)과 Wu와 Sun(1992)는 폐합단면을 갖는 적층보의 비고전적인 거동에 관한 연구를 하였다. 교량 상판의 유효폭은 시간에 따라 변하고 교량의 평면치수뿐만 아니라 하중분포, 단면성질, 경계조건에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 국내 시방서에서는 유효 플랜지의 폭을 플랜지의 길이에 대한 폭의 비에 의해 단지 주어진다. 하지만 대부분의 기존자료는 강재 또는 콘크리트에 대한 것으로 복합신소재를 적용한 교량의 유효폭에 관한 연구는 미비하여 복합재료 교량을 설계하는데 있어서 충분한 정보를 제공하지 못한다.

본 연구는 복합 신소재 교량의 응력분포를 계산하고, 적층형식 및 배열, 화이버 보강각도 등의 변화에 따른 유효폭의 변화를 분석하고자 한다. 해석모델은 복합재료 박스거더교로, 양단 단순지지로 경계조건을 설정하고, 하중은 플랜지의 상부에 등분포하중을 수직방향으로 재하시켜 해석을 수행하였다. 이상화된 해석모델에서 분석한 유효폭의 변화특성으로 설계에 그대로 반영할 수 있는 수준의 데이터를 제공하지는 못하지만 앞으로 복합재료 교량의 안전하고 효과적인 설계를 위한 기초자료로써 충분한 가치가 있을 것으로 사료된다.

2. 기본이론

1. 기하학적 형상

Fig. 1은 본 논문에서 연구하고자 하는 복합 신소재 박스거더교를 이상화한 모델이다. 단경간으로 지간을 L , 플랜지의 실제폭을 B , 박스단면의 폭과 높이를 각각 b 와 h 로 하고, 형상비는 지간과 플랜지 폭의 비 (b/L)로 정의하였다. 그 밖의 기하학적 형상을 고정하여 변수를 최대한 최소화하였다. 본 연구에서 사용한 기하학적 형상비율은 실제 시공된 복합신소재 교량(Ji, 2002)를 기초로 하여 간단한 실수로 설정하였다.

2. 유한요소 모델

실제 교량의 거동을 해석하는데 영향을 미칠 수 있는 요인으로는 경계조건, 재료의 성질, 하중분배 등으로 판되며, 이러한 요인들의 영향을 비교적 근사하

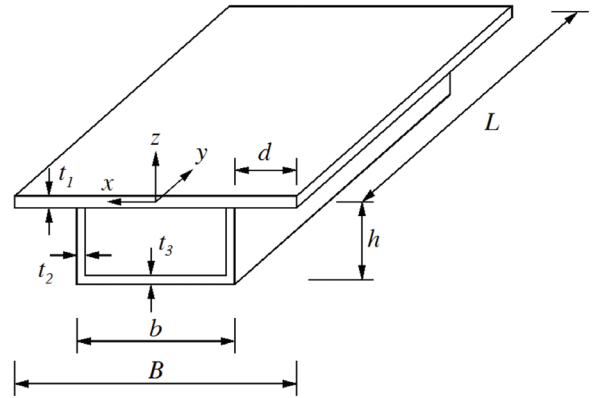


Fig 1. Idealized Model of Box Girder Bridge

게 구현하는 방법으로서 유한요소법에 따른 해석모델의 구현이다. 유한요소 모델로, 복합적층 모델에 적합한 쉘 요소로 사용하였으며, 정확한 정적해석을 수행하여 응력분포를 파악하였다. 모델링은 다음과 같은 기본가정을 토대로 설정하였다.

1. 복합적층은 완전접착이다.
2. 복합재료는 탄성영역에 존재한다.
3. 상부플랜지와 하부박스거더는 일체로 거동한다.
4. 하중은 편심없이 일정한 등분포로 재하된다.

해석모델 구성형식은 샌드위치(sandwich) 및 적층(laminate)형태로 설정할 수 있으나, 보강각도에 따른 확실한 거동 차이를 분석하기 위해 본 연구는 적층형태로 설정하였으며, 모든 구성요소의 재료는 Glass/Vinylester를 사용하였다. Table 1, 2는 해당제원 및 재료의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 적층패턴은 동일한 재료와 두께를 가진 4개의 층으로 ($0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$)으로 설정하였다. 다만 상부구조는 적층배열조건과 보강각도 변화에 따른 유효폭 산성시 다른 적층형태를 갖는다.

Table 1. Basic Data of Box Girder Bridge(Unit: mm)

L	10,000	t_1	40
b	4,000	t_2	40
h	870	t_3	40

Table 2. Properties of Glass/Vinylester

E_1	36.9×10^9 N/m ²	G_{12}	2.9×10^9 N/m ²
E_2	10.1×10^9 N/m ²	G_{23}	2.9×10^9 N/m ²
ν_{12}	0.33	G_{13}	2.9×10^9 N/m ²

3. 유효폭 산정

박스거더교는 플랜지의 폭이 커지기 때문에 전단뒤짐(shear lag) 현상에 의하여 Fig. 2와 같이 플랜지의 교축방향 응력분포상태는 포물선 형태를 나타낸다. 이러한 응력분포의 불균등현상은 전단력이 급격히 변하는 위치에서 더욱 확실하다. 즉, 주형 바로 위에서 응력이 최대가 되고 주형에서 멀어질수록 감소한다. 이와 같은 경우에는 플랜지의 특정한 폭만이 유효하고 이 폭에서는 최대휨응력(f_o)과 동일한 응력이 균등하게 분포한다고 보는 '유효폭 개념'을 일반적으로 설계에 적용한다.

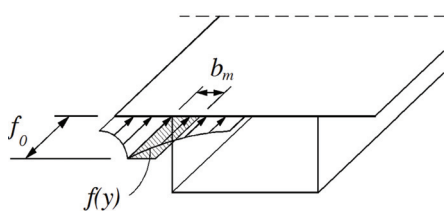


Fig. 2 Stress Distribution and Effective Width

유효폭은 복부판 바로 위 또는 아래에서 발생하는 최대응력이 플랜지에 균일하게 작용하는 것으로 가정하여 구한 플랜지의 이상적인 폭이다. 플랜지의 두께에 따른 응력이 변화하기 때문에 유효폭은 슬래브 상판의 중립축에서의 응력분포를 기준으로 한다. 상판의 y축방향(교축직각방향)의 분포를 $f(y)$, 유효폭을 b_m 라 하면, 본 연구에서 유효폭을 산정하기 위해 적용한 조건식은 식(1)과 같다.

$$b_m = \frac{\int_0^b f(y) dy}{f_o} \quad (1)$$

보통, 강교에서는 $f(y)$ 의 분포는 b/L 과 주형의 휨모멘트 분포형상 등에 의해 주로 영향을 받는다. 복합신소재 박스거더교는 등방성 재료를 갖는 강교와는 달리 비등방성 성질이므로 적층배열조건과 보강각도에 의해 응력분포가 상이하게 발생한다. 본 연구에서는 복합신소재 박스거더교의 상판에 대해서 적층조건을 달리주어 유효폭의 변화특성을 분석한다. 이 때 복합재료의 자중은 고려하지 않는다.

3. 결과분석

1. 적층배열 변화

복합신소재 거더교의 유효폭은 강교나 콘크리트교와 마찬가지로 형상비 b/L 의 영향을 받을 것이다. 복

합 신소재 박스거더의 폭 b 와 지간 L 의 변화에 따른 플랜지의 응력분포를 우선 검토하고, 유효폭을 산정하여 거동특성을 비교·분석한다. 이 때 적층배열은 일방향, 대칭 및 역대칭으로 설정하였다.

해석모델에서 상판의 적층조건은 직교이방성층으로 x축과 y축 방향으로 보강한 경우로, 보강각도를 0° 과 90° 로 하였으며, 양단 단순지지에 대해 정적해석을 수행하였다. 여기서 폭 b 를 일정하게 유지하면서 지간 L 을 변화시켰다. Fig. 3과 4는 각각 x축과 y축 방향으로만 보강한 경우 폭-지간비에 따른 플랜지에 작용하는 휨응력분포를 나타낸 것이다. 폭-지간비가 증가할수록 전체적으로 응력이 크게 발생하고 있으며, y축 보강시 작은 응력분포를 보이고 있다. 최대응력과 최소응력의 차이는 폭-지간비가 감소할수록 감소하고 있으며, y축 보강시 x축 보강된 경우와 비교하여 거의 차이가 나타나지 않는다.

복합적층 구조물은 배열조건에 따라 교축방향의 응력분포상태와 유효폭이 크게 다르게 나타난다. 크로스-플라이에 한하여 대칭, 역대칭 보강인 경우에 중점을 두어 해석을 수행하였다. Fig. 5와 6은 각각 $(0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ)$ 와 $(0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ)$ 의 적층배열을 갖는 경우 휨응력분포를 비교하여 나타낸 것이다.

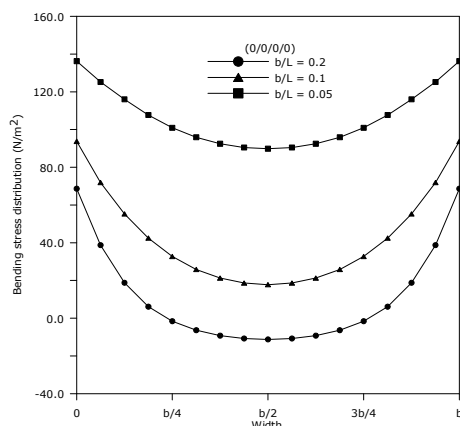


Fig. 3 Bending Stress Distribution ($0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$)

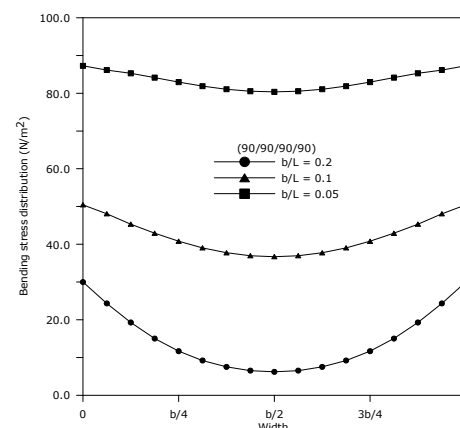


Fig. 4 Bending Stress Distribution ($90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ$)

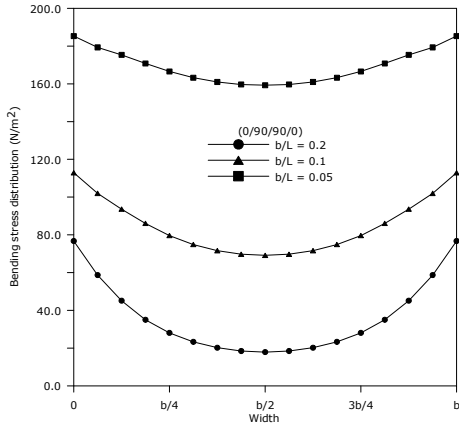


Fig. 5 Bending Stress Distribution (0°/90°/90°/0°)

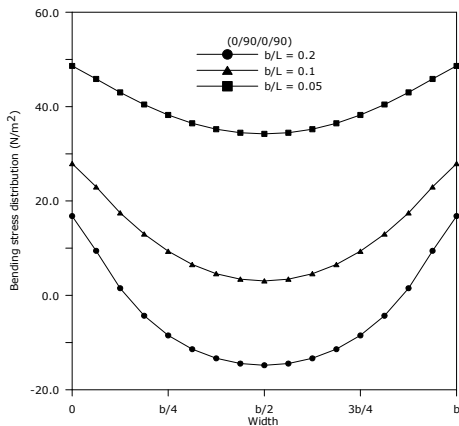


Fig. 6 Bending Stress Distribution (0°/90°/0°/90°)

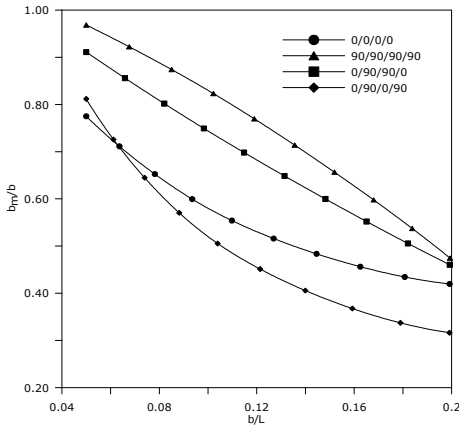


Fig. 7. Effective Width Ratio

Fig. 7과 Table 3은 앞서 제시한 Fig. 3과 Fig. 4, Fig. 5와 Fig. 6의 휨응력분포와 식(1)를 적용하여 유효폭을 산정하고 분포경향을 나타낸 것이다. 그래프의 x축을 폭-지간비 b/L , y축을 유효폭과 플랜지 폭의 비 b_m/b 로 하였다. 각각 해석모델의 좌표축을 기준으로 x와 y축으로 보강한 경우 강성변화로 인하여 최대휨응력이 다르게 발생하며, 그에 따른 유효폭 분포 또한

매우 다른 양상을 보이고 있다.

Table 3. Effective Width Ratio, b_m/b

Laminate	b/L		
	0.05	0.10	0.20
(0°/0°/0°/0°)	0.775	0.580	0.419
(90°/90°/90°/90°)	0.969	0.830	0.472
(0°/90°/90°/0°)	0.911	0.744	0.458
(0°/90°/0°/90°)	0.812	0.520	0.316

폭-지간비의 증가에 따라 비선형적으로 반비례관계를 나타내고 있지만, 보강각도가 전부 0°인 경우 강재의 경우와 마찬가지로 아래로 볼록한 분포형태를, 90°인 경우 위로 볼록한 분포형태를 보이고 있다. 유효폭비를 비교하면 폭-지간비 $b/L=1$ 에서 최대 30% 정도의 거동차이를 가진다. 등방성 재료를 갖는 강상형교는 종리브 또는 횡리브에 따라 강성의 주축이 바뀌는데, 시방서에서는 전혀 고려하지 않음을 알 수 있다. 종리브와 횡리브 보강은 각각 (0°/0°/0°/0°)과 (90°/90°/90°/90°)인 경우로 대비될 수 있으며, 이에 해당하는 유효폭의 경향은 Fig. 7에서 보듯이 다른 분포경향을 나타낸다. 보강효과를 고려하지 않고 산정된 유효폭은 구조물을 불안정 요인이 될 수 있다. 따라서, 리브로 보강된 강상형교의 경우 복합적층이론을 적용하여 단순하면서도 보다 안전된 유효폭을 제시할 수 있을 것이다.

대칭배열 (0°/90°/90°/0°)인 경우 폭-지간비와 유효폭 비는 거의 선형 반비례관계로 보인 반면, 역대칭 (0°/90°/0°/90°)인 경우 비선형 반비례관계를 나타내고 있다. 이는 응력의 분포경향에 의한 것으로 역대칭 배열시 박스수직면과 접하는 플랜지 상판에 응력집중이 크게 발생하기 때문이다.

2. 보강각도 변화

비등방성을 보이는 복합적층 구조물은 화이버의 보강각도에 매우 민감하며 예측하기 어려운 복잡한 거동을 보인다. 본 절에서는 화이버의 보강각도에 따른 유효폭 변화특성을 분석하고자 한다.

Fig. 7, Fig. 8과 9는 보강각도 30°에서 15°씩 증가시키면서 60°까지 각 경우의 휨응력분포를 폭-지간비에 따라 나타낸 것이다. 박스수직부와 접하는 플랜지에서의 최대응력은 보강각도가 증가할수록 감소있으며, 최대응력과 최소응력의 차이 또한 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, 보강각도가 증가할수록 대체적으로 응력분포가 고른 것을 알 수 있다. 또한 임의 보강

각도에 의해 중심축을 기준으로 좌우 비대칭 분포를 보인다. 따라서 유효폭은 최대응력을 기준으로 중심축까지의 응력분포를 고려하여 산정하였다.

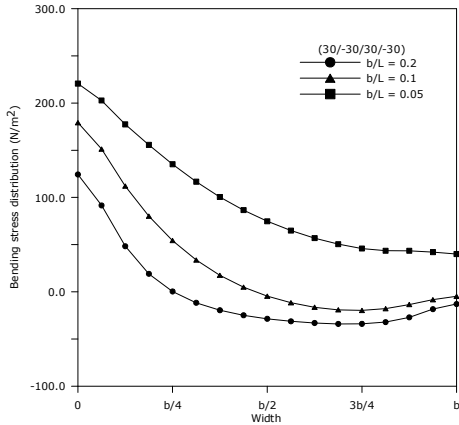


Fig. 8 Bending Stress Distribution of Flange (Fiber Angle=30°)

폭 비는 폭-지간비 $b/L=0.05$ 인 경우 23.5%, $b/L=0.1$ 인 경우 30.3%의 큰 차이를 나타낸다. 전체적으로 폭-지간비가 작을수록 보강각도에 따른 유효폭 비가 증가하는 것을 알 수 있다.

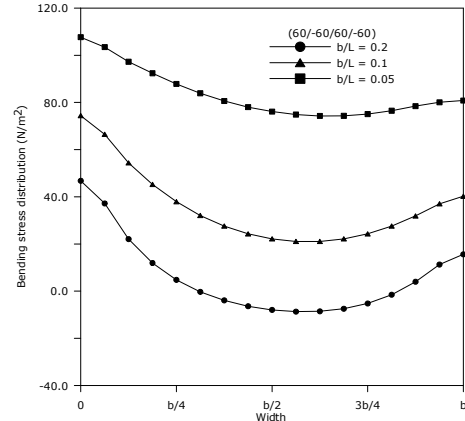


Fig. 9 Bending Stress Distribution of Flange (Fiber Angle=60°)

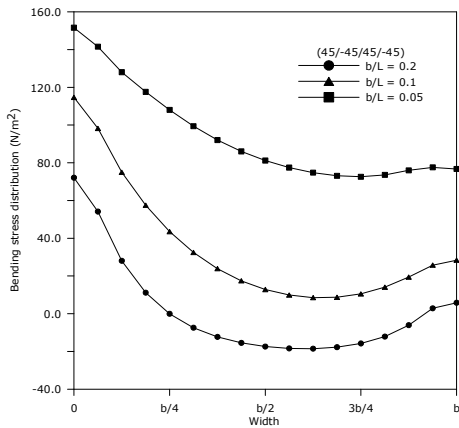


Fig. 8 Bending Stress Distribution of Flange (Fiber Angle=45°)

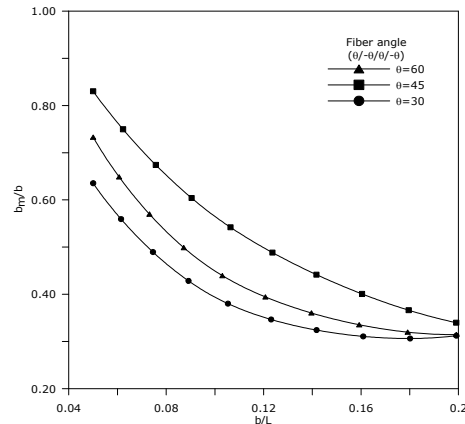


Fig. 10 Effective Width Ratio

Table 4. Width-Span Ratio, b_m/b

Fiber Angle ($\theta/-\theta$) ₂	b/L		
	0.05	0.10	0.20
$\theta = 30^\circ$	0.635	0.394	0.313
$\theta = 45^\circ$	0.733	0.449	0.315
$\theta = 60^\circ$	0.830	0.565	0.339

Fig. 10과 Table 4는 각 보강각도별 폭-지간비에 따른 유효폭 비를 산정하여 나타낸 것이다. 유효폭의 분포경향은 Table 7의 크로스-플라이로 역대칭 배열한 경우와 유사하게 아래로 볼록한 형태의 비선형적 반비례관계를 보이고 있다. 보강각도 30°와 60°의 유효

4. 결론

일반적으로 박스거더교의 설계시 플랜지의 특정한 폭만이 유효하고 이 폭에서는 최대휨응력과 동일한 응력이 균등하게 분포한다고 보는 유효폭 개념을 적용한다. 본 연구는 완전 복합신소재 박스거더교에서 유효폭 산정을 위한 기초단계로써, 폭-지간비, 배열조건, 보강각도에 따른 휨응력분포를 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유효폭 비는 폭-지간비의 증가에 따라 비선형적 비례관계를 나타내고 있으며, x축과 y축으로만 보강한 경우 유효폭 비의 분포경향은 서로 반대로 나타난다. 이는 강상형교와 같은 등방성에서 종리브와 횡리브 보강으로 대비될 수 있으며, 즉, 복합적층뿐만

아니라 등방성 재료에서도 유효폭 산정시 보강재(종리브 또는 횡리브)에 의한 영향을 충분히 고려하여야 함을 알 수 있다.

(2) 대칭배열인 경우 유효폭 비는 폭-지간비에 선형 반비례관계로 보인 반면, 역대칭배열은 일방향 보강과 마찬가지로 비선형 반비례관계를 갖는다. 역대칭배열시 휨과 인장 등에서 연계강성이 발생하여 박스 수직면과 접하는 플랜지 상판에 응력교란이 크게 발생하기 때문에, 복합 신소재박스거더 설계시, 다층배열 또는 대칭배열로 연계강성의 효과를 감소시켜줄 필요가 있다.

(3) 보강각도에 따른 유효폭 비는 폭-지간비가 클수록 보강각도에 의한 영향이 크게 작용하며, 폭-지간비가 0.1인 경우 유효폭 비가 30%정도의 큰 차이를 보인다. 아울러, 폭-지간비가 작을수록 보강각도에 따른 유효폭 비가 증가한다.

본 논문에서 제시한 다양한 수치해석 결과들은 완전복합 신소재 박스거더교에서 유효폭의 분포경향을 이상화된 모델과 등분포하중 조건에 한하여 폭-지간비, 배열조건 및 보강각도에 따라 파악한 것으로, 차후 집중하중이 재하된 상태를 매개변수 해석을 수행하여 실질적인 완전 복합신소재 교량에 적용할 수 있는 유효폭에 관한 상세식을 제시하고자 한다.

References

- Amadio C., and Fragiaco M. (2002). "Effective width evaluation for steel-concrete composite beams.", *Journal of Constructional Steel Research*, 58(3), pp.373-388.
- Chamis, C.C., and Murthy, P.L.N. (1989). "Design procedures for fiber composite box-beams.", *J. Reinf. Plast. Compos.*, 8, pp.370-397.
- Hollaway, L., and Thorne, A. (1994). "Long-term static testing of an FRP prototype highway structure.", *Composite Structures*, 28, pp.441-448.
- Ji, H.S., Son, B.J., and Chang, S.Y. (2001). "An experimental study on the behavior of composite materials bridge decks for use in deteriorated bridge decks replacement.", *Journal of the Korean Society of Steel Structures*, 13(1), pp.631-640. (in Korean)
- Ji, H.S., Son, B.J., Chun, K.S., and Chang S.Y. (2002). "Experimental study on field application of all advanced composite materials bridge superstructure.", *Proc. KSCE Conference*, Korea, pp.139-142. (in Korean)
- Lee, S.W., Lee, S.G., and Kim, J.H. (2001). "Development of light weight and high durable composite bridge

deck.", *Proc. KSCE Conference*, Korea, pp.1-4. (in Korean)

- Rehfield, L.W., Atilgan, A.R., and Hodges D.H. (1990). "Non-classical behaviour of thin walled composite beams with closed cross sections." *J. Am. Helicopt. Soc.*, 35(2), pp.42-50.
- Sotiropoulos, S.N., Gangarao, H.V.S., and Mongi, A.N.K. (1994). "Theoretical and experimental evaluations of FRP components and systems." *J. Struct. Eng., ASCE*, 120, pp.464-485.
- Upadyay A., and Kalyanaraman V. (2003). "Simplified analysis of FRP box-girders." *Composite Structures*, 59, pp.217-225.
- Wu, X.-X., and Sun, C.T. (1992). "Simplified theory for composite thin-walled beams." *AIAA Journal*, 30(12), pp.2945-2951.
- Wang X., and Rammerstorfer F.G. (1996). "Determination of effective breadth and effective width of stiffened plates by finite strip analyses.", *Thin-walled Structures*, 26(4), pp.261-286.