



아치형 복부판 보강재가 설치된 플레이트거더 강합성교의 구조적 거동특성

우상벽¹ · 유중호¹ · 이홍규¹ · 원용석² · 김선희² · 윤순종³

홍익대학교 토목공학과 석사과정¹, 홍익대학교 토목공학과 박사과정², 홍익대학교 토목공학과 교수³

Structural Characteristics of Steel-Concrete Composite Plate Girder with Arch-Type Web Stiffener

Woo, Sang-Pyuk¹ · Yoo, Jong-Ho¹ · Lee, Hong-Kyu¹ · Won, Yong-Seok² · Kim, Sun-Hee² · Yoon, Soon-Jong³

¹Graduate Research Assistant, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

²PhD. Candidate, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

³Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

Abstract: In this paper, we present the result of analytical investigation pertaining to the structural behavior of steel-concrete composite plate girder with arch-type web stiffener. In the arch-type web stiffener located in the compression side of web, infill concrete is cast to strengthen the arch-type stiffener and also to exert resisting force against compression force. This type of composite steel-concrete plate girder bridge is built and is in service. To understand the behavior thoroughly, analytical parametric study was conducted by using the finite element method. As a result it was found that the effect of arch-type stiffener with infill concrete is considerable for the design of such type composite girder bridge.

Key Words: steel-concrete composite, finite element analysis, arching effect

1. 서 론

장경간 교량 및 곡선교에서는 보통 강합성 박스형 단면을 적용하고 있지만 최근 강재의 원자재비 상승으로 인하여 부득이한 경우를 제외하고 대부분 콘크리트 교량으로 설계하고 있다(Lee, 2013). 그러나 콘크리트 교량은 과대한 단면 설계와 거푸집 제작공정 등으로 시공 및 품질관리와 유지관리가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 기존 강교의 장점을 가지며 콘크리트를 효율적으로 조합한 강합성거더에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.

강합성교량 형식 중의 하나로 제안된 아치 강합성거더는 지점부가 폐단면으로 구성되어 있고 중

양부가 I형과 혼합되어 있어 아치형 복부 보강재의 폭원 조절이 가능하며, 강재와 콘크리트를 동시에 사용하기 때문에 기존 강박스거더에 비해 강재량은 감소하고 콘크리트 교량에 비해 중량을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 강합성교량을 적용하기 전에 구조적인 거동을 명확히 파악할 필요가 있으며 이에 따른 연구도 지속적으로 필요하다.

경간 60m 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더의 중간플랜지 폭원(1200mm, 1300mm, 1400mm, 1500mm, 1600mm)변화에 따른 아치형 복부판 보강재내의 충전 콘크리트 함성 전과 후에 대해서 유한요소해석을 수행하여, 기존 Flat-type 강합성거더와 아치 강합성거더

주요어: 강합성교량, 유한요소해석, 아칭효과

Corresponding author: Yoon, Soon-Jong

Department of Civil Engineering, Hongik University, 72-1 Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 172-732, Korea.
 Tel: +82-2-3141-0774, Fax: +82-2-3141-0774, E-mail: sjyoon@hongik.ac.kr

Received October 5, 2015 / Revised October 22, 2015 / Accepted October 30, 2015

의 구조적 거동특성을 해석적으로 조사하였으며, 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 아치 합성거더

아치 합성거더는 기존 강합성 교량형식에 아칭효과가 발휘되도록 개선한 강합성거더이다. 즉, 단면 외부는 강재로 구성되어 있으며, 내부는 콘크리트를 충전하여 압축응력을 지지하는 구조적 원리를 가지고 있다. 또한, 중앙부로 갈수록 높이가 줄어드는 아치형상의 개구박스형(U) 단면과 변환단면을 가지는 I형을 결합한 합성거더이다(Lee et al., 2015). 아치 합성거더의 단면 형태를 Fig. 1에 나타내었다.

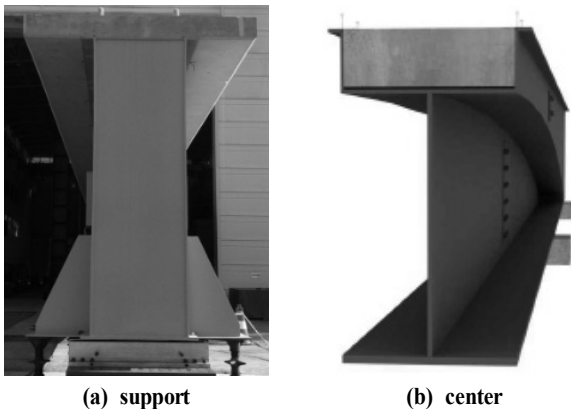


Fig. 1 Cross-Section of the Arch-type Composite Girder

아치 합성거더는 개구박스형(U)과 I형 단면이 효율적으로 결합된 강거더에 아치형태로 콘크리트를 충전하여 이중재료의 상호보완 효과를 극대화 하고, 처짐과 비틀림에 유리하며, 장경간 적용시 경제적인 설계가 가능하여 강재량이 감소되도록 신형식의 강합성 거더공법이다.

2.1 아치형 복부판 보강재 (Arch-type Web Stiffener)

아치구조는 역학적, 미학적 우수성으로 고대에서 현재에 이르기까지 다양한 형식으로 구조물에 적용되어 왔으며, 외력을 부재 내 압축력으로 전환하여 모멘트를 경감시키며, 아치형상의 미적 효과와 넓은 시야확보로 미적 교량설계를 추구할 수 있다(Lee et al., 2007).

아치 강합성거더는 아치형상의 박스형 거더와 I형 거더의 혼용으로 주변 경관과 조화를 이루어 미관이 수려하며, 폭원조절이 가능하므로 비틀림에 유리한 장점을 가지고 있다. 또한, U형태의 개구박스형 강재에 아치 콘크리트를 충전한 상태에서 전단면이 압축

력에 저항하기 때문에 강박스거더에 비해서 강재량을 줄일 수 있는 장점이 있다.

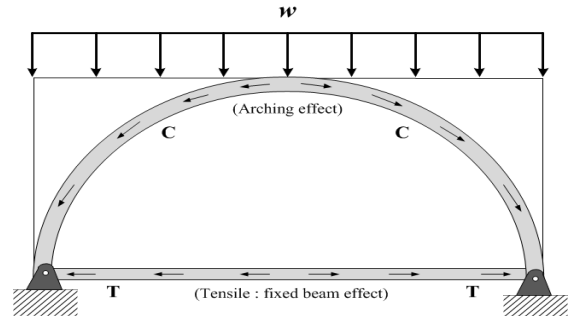


Fig. 2 Arch-type Composite Girder Under Uniformly Distributed Load

Fig. 2와 같이 아치 강합성거더에 등분포하중이 작용할 경우 충전콘크리트와 하부플랜지는 압축과 인장에 저항하는 구조를 갖게 된다. 등분포하중 작용시 단면에 발생하는 모멘트는 포물선 형상으로 동일하지만 단면의 중립축과 콘크리트와의 편심거리가 다르게 되므로 모멘트를 편심거리로 나누게 되면 축력은 포물선과 일정응력으로 차이가 발생하게 된다. 따라서 거더의 축방향으로 아치형상을 가지는 콘크리트를 충전하여 아치형태의 중립축을 배치함으로써 단면력을 분산시켰으며, 아치형태의 충전콘크리트가 압축 주응력 방향으로 배치되어 외력에 효율적으로 대응하도록 설계되었다. 부모멘트 구간인 지점부에서는 박스 하단 압축부를 콘크리트로 충전하여 전단보강 효과와 부모멘트에 대해 효율적으로 단면강성을 확보할 수 있으며, 충전콘크리트의 합성에 의하여 이중재료의 상호보완효과와 단면의 강성을 효율적으로 확보할 수 있는 구조형식을 가지고 있다. 충전콘크리트가 전단면에서 압축력에 저항을 하게 되므로 강거더의 종방향 보강재를 생략할 수 있고 복부의 횡방향 보강재를 최소화 할 수 있으며, 거더 단부를 구속하여 거더의 처짐 및 진동을 감소시키는 효과를 가지고 있다 (Yoon, 2014). 따라서 Fig. 2와 같이 등분포하중이 아치 합성거더에 작용할 경우 충전콘크리트와 하부 인장플랜지가 전단면에서 압축과 인장에 각각 저항하는 구조를 갖게 된다.

2.2 시공순서

Fig. 3과 같이 실제 시공되고 있는 아치 강합성거더의 시공순서는 공장제작과 현장시공으로 나누어 진다. 먼저 공장제작 과정은 아치형태의 거더 제작과 충전콘크리트 타설 순으로 이루어진다. 아치 강합성 거더의 제작공정은 강박스거더의 제작공정과 일치하며 공장제작한 강거더를 현장으로 운반하여 가설 크

라인으로 인양할 수 있는 중량만큼 지상에서 조립하고 크레인으로 교대 또는 교각 위에 거치한다. 가로보를 연결한 후 개구 박스 내부에 아치형태의 충전콘크리트를 별도의 거푸집 없이 일정한 두께로 타설하고, 교대부분 박스 내부에 콘크리트를 타설한다. 단경간 교량의 경우 강거더에 콘크리트 거푸집 설치를 완료한 후 지상에서 아치형태의 충전콘크리트를 타설하고 양생을 거쳐 거치하게 된다.

현장시공 과정은 기초 및 교대를 시공한 다음 공장에서 제작하여 현장에 운반된 부재와 교대를 결합하고 가로보를 설치한 후 교대벽체와 바닥판을 타설하고 포장 및 부대시설을 설치함으로써 아치 합성거더가 시공된다. Fig. 4는 아치 강합성거더의 시공순서를 나타내었다.



Fig. 3 Arch-type Composite Girder



(a) fabrication



(b) erection



(c) arch concrete casting



(d) deck construction

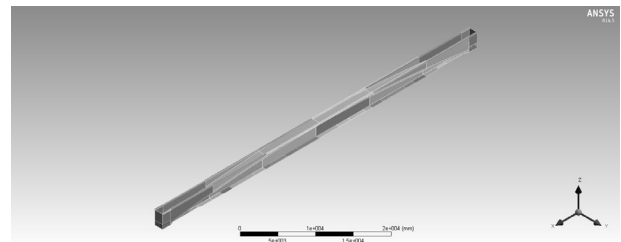
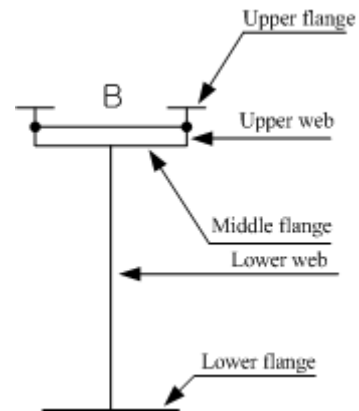


(e) completion

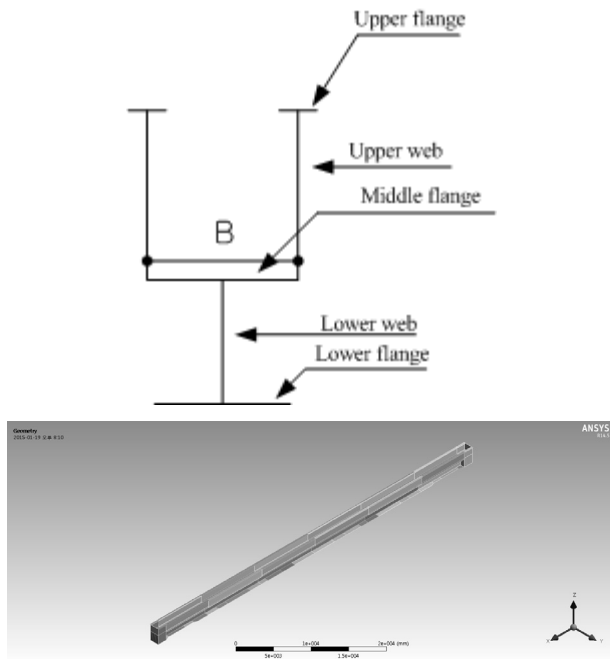
Fig. 4 Construction Process of the Arch-type Composite Girder (http://www.n-sb.co.kr/sub3/1_2.php)

3. 아치 강합성거더의 유한요소해석 모델

아치 강합성거더와 기존 Flat-type 강합성거더에 대하여 경간 중간플랜지의 폭원(B) 변화에 따른 구조적 거동특성의 상관관계를 비교 검토하기 위하여 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 ANSYS Ver. 14.5 Workbench를 사용하여 구조해석을 수행하였다. 유한요소해석은 실제 도면과 동일한 모델을 만들기 위하여 다음 Fig. 5와 같은 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더의 모형을 Auto Cad로 3차원(3D)으로 모델링을 하였다.



(a) arch-type composite girder



(b) flat-type composite girder

Fig. 5 Models for the Finite Elements Analysis

여기서, 경간 중간플랜지 부분이란 아치 강합성거더의 복부판 보강재를 아치형태로 설치하여 플랜지처럼 거동하게 만든 부분으로 아치 합성거더 교량공법에서 사용하는 편의상의 명칭으로 Fig. 4에 나타내었다.

아치 강합성거더와 기존 Flat-type 강합성거더에 대하여 경간 중간플랜지의 폭원(B) 변화에 따른 구조적 거동특성의 상관관계를 비교 검토하기 위하여 같은 부재치수를 사용하였으며 부재의 물성치는 다음 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Material Properties of the Arch-type Composite Girder Using Finite Elements Analysis

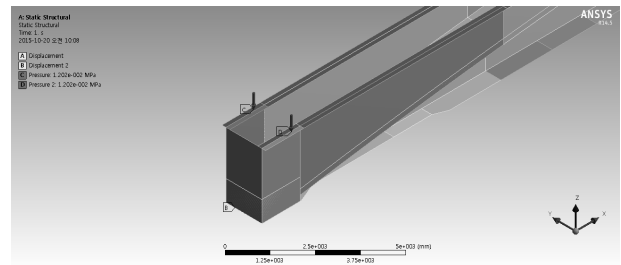
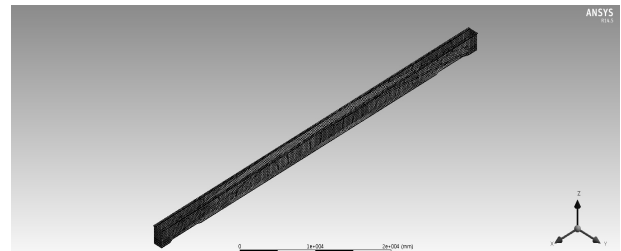
Description	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio (ν)	Unit weight (kN/m^3)
Steel (HSB500)	2×10^2	0.3	76.93
Infill concrete ($f_{ck} = 40MPa$)	31.879	0.18	22.54

경간 60m 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더의 하중은 1등급의 재하하중(DB-24, 432kN)을 등분포하중으로 치환하여 강합성거더 양쪽 상부플랜지에 $1.202 \times 10^{-2} MPa$ 등분포 재하하였으며, 모델의 지점조건은 일반적인 보의 지점조건인 Pin-Roller조건으

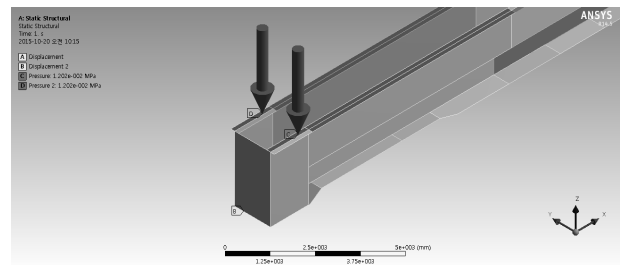
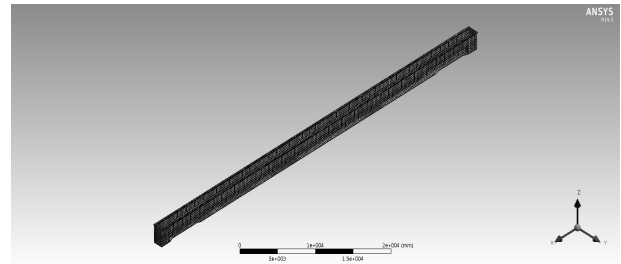
로 단순보로 가정하였다. 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더의 유한요소분할(Mesh)은 ANSYS Ver. 14.5 Workbench에 있는 Mesh Application 기능을 사용하였다.

여기서, 유한요소분할은 CAD 모델을 절점(node)과 요소(element)로 구성된 해석모델이며, ANSYS Workbench의 Mesh Application은 모델의 형상을 자동으로 인식하여 최적화된 Mesh를 생성하는 기능이다(ANSYS, 2012).

이에 관한 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더의 유한요소해석 모델 기본설정을 Fig. 6에 나타내었다.



(a) arch-type composite girder



(b) flat-type composite girder

Fig. 6 Conditions for the Finite Elements Analysis

4. 유한요소해석 결과 비교 및 분석

4.1 하중-폭(B) 관계

경간 60m 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더의 양쪽 상부플랜지에 $1.202 \times 10^{-2} MPa$ 하중을 등분포로 재하하였으며, 모델의 지점조건은 단순보로 가정하여 중간플랜지 폭원(1200mm, 1300mm, 1400mm, 1500mm, 1600mm)변화에 따른 충전콘크리트 합성 전의 조건에서 먼저 해석하였고, 이에 대한 해석결과를 Table 2와 같이 나타내었다. 해석결과 구해진 최대응력은 지점에서 발생하였으나 이것은 반력에 인한 것이므로 제외하고 경간 중앙부 단면의 응력만을 검토하였다.

Table 2. Load-Width Relationships without Infill Concrete

Description	Middle flange width (mm)	Ultimate bending stress		
		Without infill concrete		Difference (%) (①-②/①) ×100
		Compression (MPa, ①)	Tensile (MPa, ②)	
Arch-type (60m)	1200	32.505	14.333	55.905
	1300	33.110	14.200	57.113
	1400	34.678	14.033	59.553
	1500	35.646	13.926	60.933
	1600	36.330	13.792	62.037
Flat-type (60m)	1200	32.753	15.488	52.713
	1300	33.385	15.414	53.830
	1400	33.904	15.672	53.775
	1500	34.676	15.201	56.163
	1600	35.401	15.070	57.431

충전콘크리트 합성전 중간플랜지 폭원 변화에 따른 해석 결과 경간 중앙부 단면의 응력은 압축응력과 인장응력으로 나누어 볼 수 있으며, Table 2에서 확인할 수 있듯이 압축응력이 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더에 대하여 지배적인 응력이라고 볼 수 있다. 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더의 중간플랜지 폭원 변화에 따라 단면의 형상이 변하게 되므로 압축응력과 인장응력의 차이가 중간플랜지 폭이 커질수록 같이 커지는 것을 확인할 수 있다. 중간플랜지의 폭이 커질수록 인장응력의 값은 서서히 줄어드는 반면에 압축응력의 값은 인장응력에 비하여

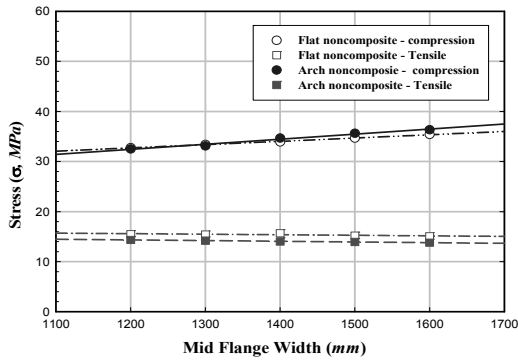
값이 크게 변하므로 차이가 증가하고 있음을 Fig. 7에 의하여 확인할 수 있다. 또한 아치 강합성거더는 아칭효과로 인하여 등분포하중인 외력을 부재 내 압축력으로 전환시키므로 인장응력은 Flat-type 강합성거더 보다 덜 받으면서 압축응력은 Flat-type 강합성거더 보다 더 많이 받는 것으로 나타났다.

다음으로 충전콘크리트 합성후의 중간플랜지 폭원 변화에 따른 해석결과를 살펴보면 Table 3과 같다. 충전콘크리트 합성전과 마찬가지로 휨에 의한 압축응력과 인장응력의 값이 중간플랜지 폭 변화에 따라 둘 다 감소하는 경향을 보였다. 이것은 충전콘크리트의 영향으로 생각된다. 충전콘크리트를 합성함으로써 강재와 콘크리트의 상호구속효과를 얻고, 단면을 효율적으로 이용하여 부재의 변형과 강성, 내력을 향상시키는 합성구조형태가 된다. 따라서 충전콘크리트 합성후에도 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더에서 압축응력이 지배적이지만 강재와 콘크리트가 합성구조형태를 이루므로 중간플랜지의 폭 변화에 따라 감소하는 경향이 나타난 것으로 생각된다.

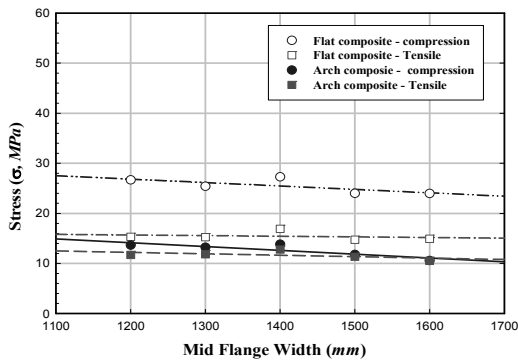
또한 아치형태의 충전콘크리트 합성후 아치 강합성거더는 Flat-type 강합성거더에 비해 압축 및 인장응력의 차가 많이 줄어 들었음을 Fig. 7을 통하여 확인할 수 있다.

Table 3. Load-Width Relationships with Infill Concrete

Description	Middle flange width (mm)	Ultimate bending stress		
		With infill concrete		Difference (%) (①-②/①) ×100
		Compression (MPa, ①)	Tensile (MPa, ②)	
Arch-type (60m)	1200	13.666	11.695	14.423
	1300	13.230	11.831	10.574
	1400	13.821	12.777	7.554
	1500	11.796	11.338	3.883
	1600	10.584	10.528	0.529
Flat-type (60m)	1200	26.673	15.310	42.601
	1300	25.413	15.257	39.964
	1400	27.289	16.911	38.030
	1500	23.981	14.741	38.531
	1600	23.974	14.927	37.737



(a) without infill concrete



(b) with infill concrete

Fig. 7 Stress-Width Relationships

4.2 처짐-폭(B) 관계

경간 60m인 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더에서 처짐-폭의 관계는 중간플랜지 폭원(1200mm, 1300mm, 1400mm, 1500mm, 1600mm)변화에 대하여 충전콘크리트의 합성 전과 후로 해석을 수행하여 결과값을 Table 4와 같이 나타내었다. 단순보로 가정하였으며 하중은 등분포하중을 재하하였기 때문에 최대 처짐은 거더의 중앙에서 발생하였다.

충전콘크리트의 합성 전과 후의 처짐값의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더는 충전콘크리트 합성 전과 후에 압축응력이 지배적이었으므로, 처짐의 경향 또한 압축응력과 비슷한 경향을 나타내었다. 폭원의 변화에 따른 응력분포는 압축에 약한 강재에 충전콘크리트를 합성하여 합성단면으로 거동하므로 처짐값이 감소하는 경향을 보이는 것으로 생각된다. 이에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Table 4. Deflection-Width Relationships w/o Infill Concrete

Description	Middle flange width (mm)	Maximum deflection		
		Without infill concrete (mm, ①)	With infill concrete (mm, ②)	Difference (%) (①-②/①) × 100
Arch-type (60m)	1200	43.551	21.456	50.734
	1300	45.037	21.398	52.488
	1400	46.873	23.097	50.724
	1500	47.901	19.543	59.201
	1600	49.259	17.391	64.695
Flat-type (60m)	1200	39.761	31.215	21.493
	1300	40.933	29.309	28.398
	1400	42.048	32.239	23.328
	1500	43.088	27.739	35.622
	1600	44.324	27.899	37.057

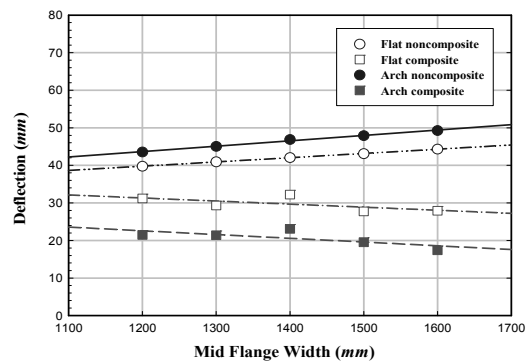


Fig. 8 Deflection-Width Relationships

5. 결론

이 연구의 목적은 새로운 강합성거더 형식인 아치 강합성거더를 소개하고, 유한요소해석을 이용하여 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더의 구조적 거동 특성을 조사하여 그 결과를 비교 분석하는 것이다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 해석결과 폭원 변화에 따라 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더는 충전콘크리트 합성 전과 후로 압축응력이 지배적이었으며, 충전콘크리트 합성 후 거더가 합성거동을 하므로 응력이 합성 전에 비해 더 균등하게 분포되어 구조물의 강성이 증가하였다.

(2) 아치 강합성거더와 Flat-type 강합성거더의 폭원 변화에 따른 처짐은 아치 강합성거더의 경우 충전콘크리트를 합성하기 전보다 합성 후에 약 55% 감소하였음을 알 수 있었으며, Flat-type 강합성거더는 충전콘크리트 합성전보다 합성 후에 거더의 처짐이 약 29% 감소하였음을 알 수 있었다. 해석결과로부터 Flat-type 강합성거더와 같은 기존 합성거더에 비하여 아치 강합성거더는 충전콘크리트 합성을 통해 처짐을 크게 줄이는 효과가 있음을 알 수 있었다.

(3) 충전콘크리트 합성 후 아치 강합성거더는 Flat-type 강합성거더에 비하여 압축응력을 약 13% 더 작게 받으며 처짐은 약 9% 더 작게 나타났다. Flat-type 강합성거더를 포함한 기존 강합성거더와는 다르게 아치 강합성거더는 아치형태의 충전콘크리트가 전단면에서 압축력에 저항을 하게 되므로 강거더의 복부판 보강재(수직,수평)의 사용을 최소화 할 수 있으며, 거더 단부를 구속하여 거더의 처짐 및 진동을 감소시키는 효과를 가지고 있음을 확인하였다.

and Width of the SBarch Composite Girder, Research Report, Hongik University, Seoul, Korea. (in Korean).

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2015학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었으며, 이 지원에 감사드립니다.

References

- ANSYS Workbench (2012), Release 14.5 Documentation for ANSYS, Pennsylvania.
http://www.n-sb.co.kr/sub3/1_2.php.
- Lee, H., Park, H., Lee, S. Y., Park, K. H., and Kong, J. S. (2007), "Analysis of Static Behavior of CFTA Composite Girder," *Proceedings of the 18th Annual Conference*, Korean Society of Steel Construction, 2007, pp. 514-517. (in Korean).
- Lee, H. K., Kim, S. H., Won, Y. S., and Yoon, S. J. (2015), "Characteristics of Structural Behavior of Steel-Concrete Composite Girder Having Web with an Arch-Shaped Middle Flange," *Proceedings of the 26th Annual Conference*, Korean Society of Steel Construction, 2015, pp. 153-154. (in Korean).
- Lee, S. Y. (2013), "Eco-friendly Construction and Activation of Steel Structure," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 61, No. 2, pp. 19-21. (in Korean).
- Yoon, S. J. (2014), A Study on the Middle Flange Shape