

## 상자형 거더의 격벽이 뒤틀림에 미치는 영향 The Effect of Diaphragm on the Distortion of Box Girders

황 선호\*, 홍 성수\*, 최 진유\*\*, 강 영중\*\*\*

Hwang SunHo, Hong SungSoo, Choi JinYu, Kang YoungJong

---

### ABSTRACT

It is well known that I-girders are weak in torsion and it might be more economical to use a box girder, which has great torsional rigidity. The use of box beams does, however, present a potential problem in that cross-sectional distortions can induce large warping normal stresses and transverse bending stresses. Accordingly a sufficient number of diaphragms are provided to make the distortional effects minimal.

In engineering practice, diaphragms are spaced in 5m intervals without reasonable basis. It is considered to be noneconomical design to the almost design engineers, and it may produce the unsafe structural systems in special cases such as curved bridges with large initial curvature. These problems have not been solved for the lack of adequate tools of structural analysis.

In this study, on the basis of the parametric studies, the design formulas for the distortional warping stress and the reasonable diaphragm spacing of box girder were presented.

---

### 1. 서 론

현재 사용되고 있는 교량은 거더의 형식으로 구분할 때, I형 플레이트 거더와 상자형 거더로 대별할 수 있다. 일반적으로 상자형 거더가 I형 거더에 비해 순수비틀림 강성이 크기 때문에 큰 편재 하중을 받는 교량에 적합한 것으로 알려져 있다. 그러나 상자형 거더에서는 편재하에 의한 단면의 뒤틀림으로 인해 그림 1과 같이 단면이 변형하게 되고 이에 수반하여 설계자가 고려하지 않은 상당히 큰 크기의 뒤틀림 뒹뎡선응력 및 횡방향 휨응력이 상자거더 단면에 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 상자형 거더 내부에 격벽(diaphragm)을 설치하여 뒤틀림 변형을 사용성 이내로 제한하게 된다.

---

\* 고려대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\* 고려대학교 토목환경공학과 박사과정

\*\*\* 고려대학교 토목환경공학과 부교수

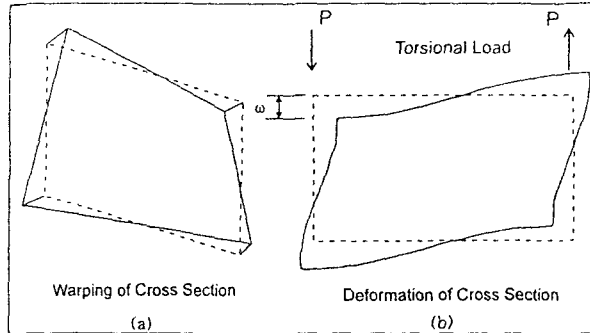


그림 1 단면의 뒤틀림(distortion) 및 뒤틀림 뒸(distortional warping)현상

격벽에 대한 설계규정은 국내 “도로교 표준시방서”에서는 다루어지지 않고 있으며, 미국 AASHTO의 “Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges”과 일본의 “Guidelines for the Design of Horizontally Curved Girder Bridges”에서만 규정하고 있을 뿐이다. 더욱이 이들 시방규정조차 실규 시방규정이 아닌 안내시방규정일 뿐으로 상자형 거더의 격벽을 설계하는 데 있어 국내 실무자가 참고할 만한 설계규정은 미비한 실정이다.

이러한 이유로 국내에서 시공되는 강상자형 거더는 합리적인 근거가 없이 격벽간격이 일률적으로 5m의 격벽간격을 갖도록 설계되고 있다. 이는 대부분의 경우 과다설계의 가능성을 내포하고 있으나 국내에서는 이에 대한 적절한 간격을 제시할 만한 기초연구가 수행된 바 없다. 실제로 격벽의 설치는 강상자거더 전체의 강성에 영향을 미치지 않으면서 많은 양의 수작업 용접을 요구하여 강상자거더의 제작단가를 높이는 요소로 지적되고 있으므로 경제적이면서 구조적으로 안전한 격벽의 설치를 위한 기초연구가 시급한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 격벽의 간격이 뒤틀림 뒸뒸선응력과 횡방향 휨응력에 미치는 영향을 살펴보고 이 응력들을 적절하게 제어할 수 있는 합리적이고 경제적인 내부격벽의 설치를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 연구의 내용

### 2.1. 격벽(diaphragm)의 역할

단면의 변형에는 휨에 기인한 경우와 비틀림에 기인한 경우로 나눌 수 있는데 휨에 기인한 경우에는 단면 2차 모멘트가 감소하게 되도록 단면형상이 변형되고, 비틀림에 의한 경우에는 단면이 사면형 모양으로 뒤틀린다. 휨에 의한 단면의 뒤틀림 문제는 종방향 및 횡방향 보강재 등 휨에 의한 변형을 방지하는 보강재들이 단면의 국부좌굴을 방지하기 위해 조밀하게 설치되므로 다른 보강이 없이 억제할 수 있으나 비틀림에 기인한 단면의 뒤틀림은 상자형 거더 내부에 일정한 간격으로 격벽(diaphragm)을 설치하여 제한하여야 한다.

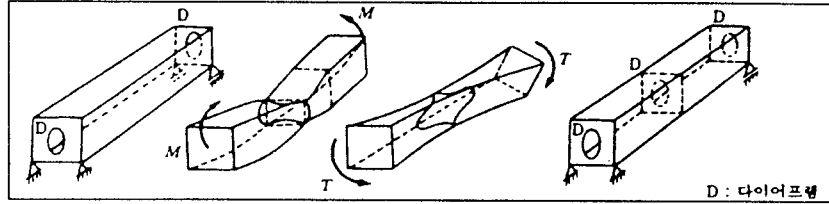


그림 2. 상자형 거더에서 단면의 뒤틀림(distortion)

일반적으로 내부격벽이 설치되어 있지 않은 상자거더에서는 뒤틀림에 의한 법선응력(distortional warping normal stress:  $\sigma_{Dw}$ )이 휨에 의한 법선응력(flexural bending stress)에 비견가는 크기를 갖으며 또한 횡방향 휨응력(transverse bending stress:  $\sigma_{DB}$ )도 허용응력 이상으로 발생하는 것으로 알려져 있다.

## 2.2. 격벽(diaphragm)의 효과

앞에서도 언급한것과 같이 뒤틀림응력이나 횡방향 휨응력이 과도하게 발생하는 것을 막기 위해 격벽을 설치하게 되는데, 격벽이 적절한 강성과 간격으로 배치된다면 이 응력들을 설계시 영향을 고려하지 않아도 될 수준 이내로 감소시킬 수 있다. 이는 박스안에 제시된 모델을 사용하여 확인할 수 있다. 이 결과는 보요소를 사용하는 CVBOX 라는 수치해석프로그램을 개발하여 해석하였다. CVBOX 는 일반 범용프로그램의 8 절점 쉘요소로 3 차원 해석한 결과와 비교하였을 때 정확한 값을 출력한다는 것이 입증되었다.

해석모델 : 곡률반경( $R$ ) =  $\infty$ , 지간장( $L$ ) = 40m, 경간수 = 단순지지  
 단면의 폭( $B$ ) = 300cm, 단면의 높이( $H$ ) = 200cm  
 플랜지의 두께( $t_f$ ) = 1.4cm, 웨브의 두께( $t_w$ ) = 1.4cm  
 격벽의 간격( $L_D$ ) = 8m, 격벽의 두께( $t_D$ ) = 1.4cm  
 하중 : 웨브에 등분포편심하중 =  $2t/m$

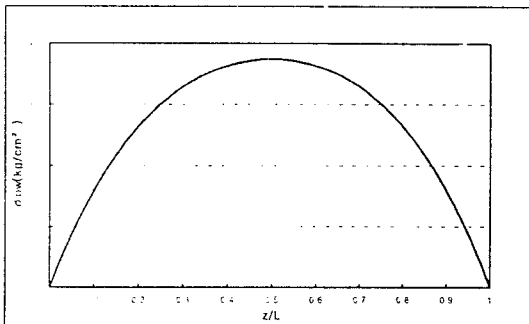


그림 3. 중간격벽이 설치되지 않음

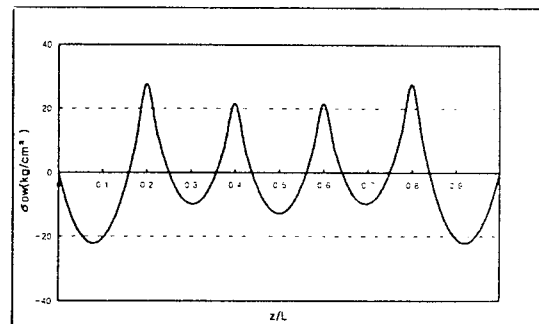


그림 4. 4 개의 중간격벽이 설치됨

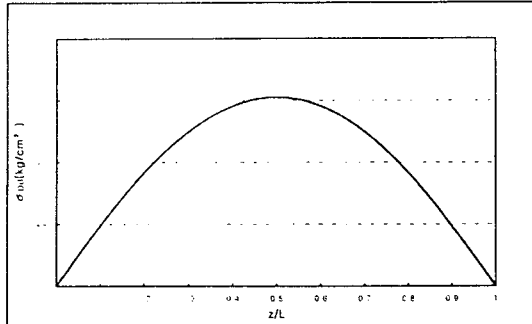


그림 5. 중간격벽이 설치되지 않음

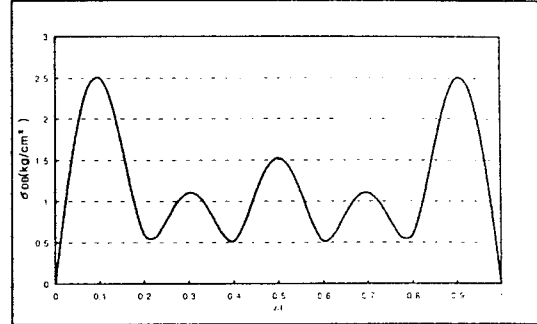


그림 6. 4 개의 중간격벽이 설치됨

그림 3, 4 는 등분포편심하중 작용될 경우 뒤틀림 뒀법선응력을 나타내고 그림 5, 6 은 횡방향 힘응력을 나타내고 있다. 위의 결과에서 주목할 것은 내부격벽이 설치되지 않은 경우의 뒀법선응력은 크기가  $400\text{kg/cm}^2$  에 육박하지만 내부격벽이 8m 간격으로 설치된 경우에는 그 크기가 1/10 이하로 감소함을 알 수 있다. 더욱이 놀라운 것은 횡방향 힘응력은 내부격벽이 설치되어 있지 않은 경우  $1200\text{kg/cm}^2$  를 초과하나 내부격벽의 설치만으로 그 크기가  $3\text{kg/cm}^2$  이하로 감소함을 알 수 있다. 이로부터 어느 정도의 강성과 간격으로 내부격벽이 설치된다면 뒀법선응력과 횡방향 힘응력이 충분히 작아지지만 일정 수준의 강도와 간격을 갖지 못하면 뒀법선응력은 힘법선응력에 상응하거나 경우에 따라서는 더 큰 크기로 발생하게 되어 힘법선응력으로 설계된 단면이 허용응력을 초과할 수 있음을 나타내어 격벽의 효과를 잘 보여주고 있다.

### 2.3. 각국의 시방규정

HANSHIN 시방서에서는 다음과 같이 격벽을 규정하고 있다. 뒤틀림 뒀법선응력과 힘법선응력의 비를 5% 이내, 횡방향 힘응력을  $50\text{kg/cm}^2$  이내로 제한하여 그림 7 과 같이 직선 및 곡선교의 격벽의 간격을 제시하고 있다.

또한 AASHTO 에서는 뒤틀림 뒀법선응력과 힘법선응력의 비를 10% 이내, 횡방향 힘응력을  $1400\text{kg/cm}^2$  이내로 제한하여 격벽의 간격을  $S \leq L \left( \frac{R}{200L - 7500} \right)^{1/2} \leq 25'$  로 제시하고 있다.

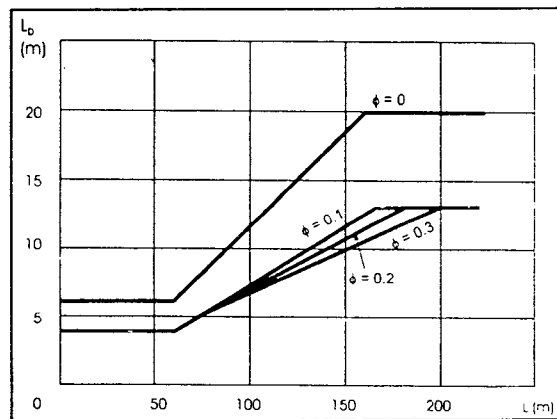


그림 7. 직선 및 곡선교의 격벽간격

그리고 일본과 달리 미국에서는 X 자형 브레이싱 형태의 격벽을 사용하는데 격벽의 단면적을

$A_b \geq 75 \frac{Sb}{d^2} \frac{t_w'}{(d+b)}$  로 제한하고 있다. 여기서 S는 격벽간격, L은 지간장, R은 곡률반경, b와 d는

각각 단면의 폭과 높이,  $t_w'$ 는 웨브의 두께를 나타낸다.

반면, 우리나라에서는 격벽에 대한 특별한 규정은 거의 없고, 단지 관행상 설계에서 5m 간격으로 격벽을 설치하고 있다.

#### 2.4. DL 하중에 대한 격벽간격

우리나라의 도로교 시방서에서 하중의 형태는 지간장의 길이에 따라 DB 하중과 DL 하중으로 나뉘는데 보통 단순교나 연속교에서 사용되는 지간장이 40m 이상이므로 DL 하중을 고려하기로 하였다. 특히 큰 휨법선응력과 뒤틀림 휨법선응력을 유발하는 DL-24 하중분포는 1, 2, 3 경간에 대해서 다음과 같다.

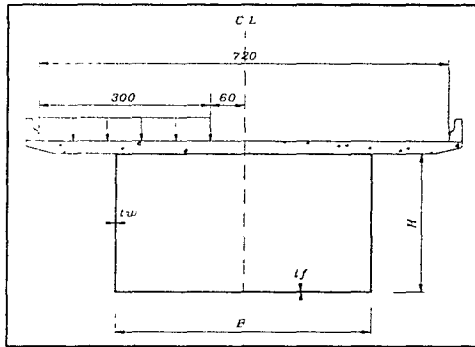


그림 8. 정면도

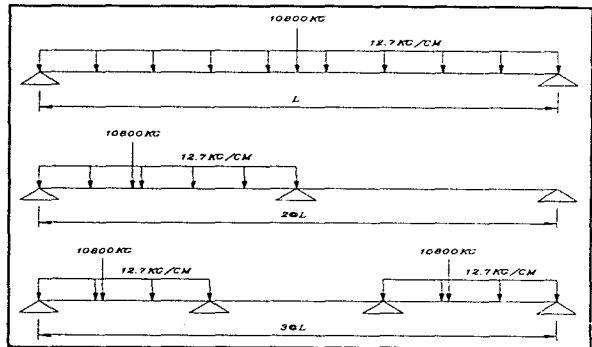


그림 9. 측면도

DL-24 하중분포에 의한 휨모멘트를 등분포하중과 집중하중으로 분리하면

- 등분포하중에 의한 휨모멘트

$$M = C_{B1} w L^2 \quad (1)$$

- 집중하중에 의한 휨모멘트

$$M = C_{B2} P_m L \quad (2)$$

등분포하중과 집중하중에 의한 총 휨응력은

- 휨응력

$$\sigma_B = (C_{B1} w L^2 + C_{B2} P_m L) \frac{H}{2I} \quad (3)$$

여기서,  $w$ 는 등분포하중(12.7kg/cm),  $P_m$ 은 집중하중(10800kg),  $L$ 은 지간장,  $H$ 는 단면의 높이  $I$ 는 단면 2 차모멘트를 나타내고 있다. 그리고  $C_{B1}$ ,  $C_{B2}$ 는 경간수에 따른 계수로서 다음과 같다.

	$C_{B1}$	$C_{B2}$
1SPAN	0.125	0.250
2SPAN	0.078	0.205
3SPAN	0.086	0.208

뒤틀림 뒤틀림선응력은 해석프로그램을 이용하여 여러가지변수, 즉 격벽의 강성(단 격벽의 두께는 1.8cm 이심), 지간장, 경간수, 하중의 형태, 단면의 특성치, 격벽의 간격에 따라 회귀분석을 행하여 다음과 같이 제시하였다.

•등분포편심하중에 의한 바이모멘트

$$Bi = 1.59 \times 10^{-2} m_T L_D^2 \quad (4)$$

•집중편심하중에 의한 바이모멘트

$$Bi = 8.938 \times 10^{-2} M_T L_D \quad (5)$$

바이모멘트와 뒤틀림 뒤틀림선응력과의 관계는  $\sigma_{D\omega} = \frac{Bi}{I_{D\omega}} \omega_D$  이고, 단면의 특성을 나타내는  $\omega_D/I_{D\omega}$  는  $12/BH(A_f + A_w)$  로 변화시키면 식(6)과 같이 뒤틀림 뒤틀림선응력을 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{D\omega} = \frac{0.191(m_T L_D^2 + 5.619 M_T L_D)}{BH(A_f + A_w)} \quad (6)$$

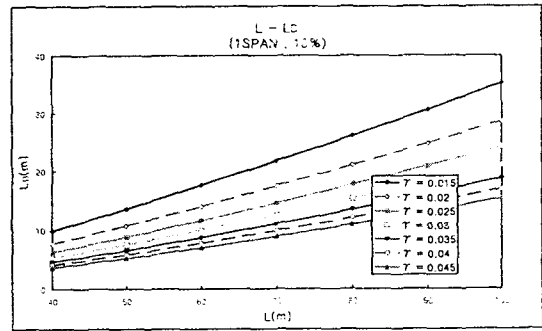
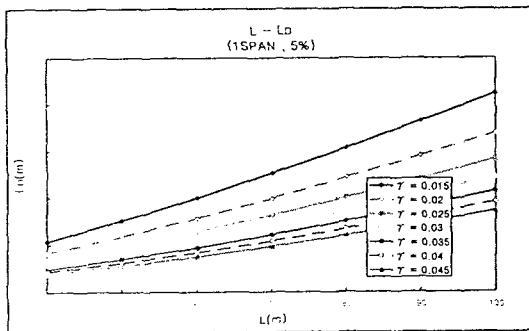
여기서  $m_T$  는 등분포편심하중,  $M_T$  는 집중편심하중,  $A_f (= A_u)$  은 하부플랜지의 단면적,  $A_w$  의 웨브의 단면적을 나타낸다.

따라서 휨응력과 뒤틀림 뒤틀림선응력의 비를 식(3)과 식(6)을 이용하여

$$\frac{\sigma_{D\omega}}{\sigma_B} = \frac{1.59 \times 10^{-2} (m_T L_D^2 + 5.619 M_T L_D) \omega_D / I_{D\omega}}{(C_{B1} w L^2 + C_{B2} P_m L) H / 2I} \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_{D\omega}}{\sigma_B} = \frac{1.59 \times 10^{-2} (m_T L_D^2 + 5.619 M_T L_D) \gamma}{(C_{B1} w L^2 + C_{B2} P_m L) L} \quad (8)$$

여기서  $\gamma = \frac{\omega_D / I_{D\omega}}{H / 2I} = \frac{24I}{BH^2(A_f + A_w)}$  으로 단면이 가지는 특성을 나타내는데 단면의 크기나 판의 두께가 증가하면  $\gamma$  의 값은 감소한다. 그리고 일반적으로 사용되는 단면은 보통 0.015 ~ 0.045 의 범위를 갖는다. 식(8)을 5% 또는 10%로 제한하여 다음과 같이 경간, 지간장, 단면의 특성치에 따라 격벽간격을 유도할 수 있다.



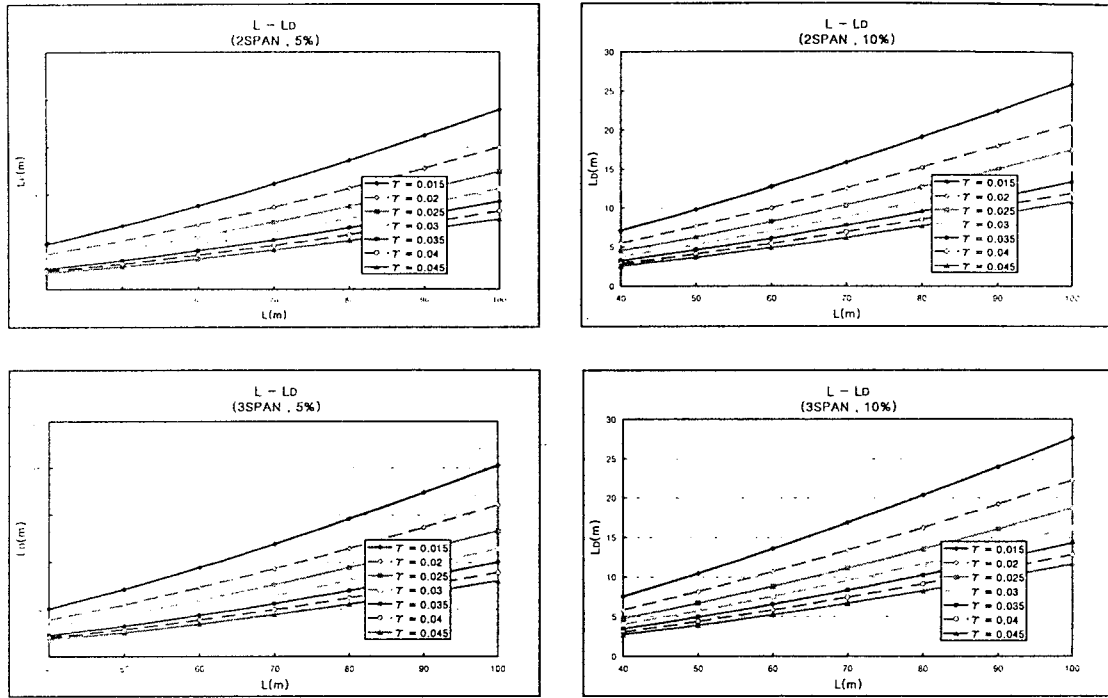


그림 10. 직선박스형교의 격벽간격

그래프에 나타나듯이 단면이 커지면 뒤틀림에 대한 강성이 크므로 격벽의 간격이 증가하고 경간 수가 증가하면 휨응력이 감소하므로 격벽의 간격이 감소하게 되고, 4 경간이상인 경우는 3 경간과 휨응력이 비슷하기 때문에 거의 같은 결과를 나타낸다. 또한 격벽의 간격은 주로 지간장에 영향을 받게 되는데, 지간장이 짧을 경우 현행 설계되는 5m의 격벽간격보다 더 적은 수치가 나오고 반대로 지간장이 길 경우 큰 격벽간격이 제시되고 있다. 하지만 현재 설계되는 격벽간격이 큰 문제가 되지 않고, 가로보의 최대간격이 20m이므로 격벽의 간격을 최소 5m, 최대 20m로 제한한다.

• 격벽의 최소, 최대간격

$$5m \leq l_p \leq 20m$$

그림 10에 제시된 것과 같이 격벽을 배치하면 횡방향 휨응력을 허용범위이내로 제한할 수 있어 특별히 고려할 필요가 없다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 상자형 거더에서는 문제가 되는 뒤틀림을 다루어 보았다. 상자형 거더는 큰 비틀림강성을 가지므로 별 문제가 되지 않지만 뒤틀림에 의해 단면이 왜곡되어 추가적인 응력 즉, 뒤틀림 뒤틀림선응력, 횡방향 휨응력이 발생한다. 특히 뒤틀림 뒤틀림선응력은 경우에 따라서는 휨법선

응력과 비슷한 크기로 발생하여 단면에 발생하는 응력이 허용응력을 초과할 수 있다. 이를 방지하기 위해 격벽을 배치하게 되는데 뒤틀림 뒹뒹선응력의 크기를 정확히 구할 수 없기 때문에 적절한 격벽간격을 제시할 수 없었다. 그리하여 본 연구에서는 뒤틀림 뒹뒹선응력에 영향을 줄 수 있는 여러가지 변수를 알아보고 이에 따라 회귀분석을 하여 공식을 유도하였고, 이 응력과 뒹뒹선응력과의 비율 5%, 10%로 제한하여 격벽간격을 5m ~ 20m로 제시하였는데, 격벽의 두께를 0.8cm 이상으로 할 때, 주로 경간수, 단면의 특성치( $\gamma$ ), 지간장에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 또한 횡방향 뒹뒹선응력은 본 연구에서 제시된 간격으로 격벽을 배치하면 허용범위이내로 제한할 수 있어 특별히 고려할 필요가 없었다.

이번 연구에서 뒤틀림을 구속하는 격벽의 역할에 대한 영향이 정확히 규명되었고, 이를 통해 보다 합리적이고 경제적인 격벽의 설계에 대한 설계지원자료를 제시할 것으로 본다.

#### 참고문헌

- [1] "Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges", American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [2] "Guidelines for the Design of Horizontally Curved Girder Bridges", The HANSHIN Expressway Public Corporation.
- [3] Heins, C. P.: Bending and Torsional Design in Structural Members, Lexington Books, Lexington Mass., 1975
- [4] Hiroshi Nakai, Chai Hong Yoo : Analysis and Design of Curved Steel Bridges
- [5] Sakai, F., and M Nagai: "A Recommendation on the Design of Intermediate Diaphragms in Steel Box Girder Bridges," Proceedings of Japanese Society of Civil Engineers, no. 261, pp. 21-34, May, 1977 (in Japanese)
- [6] Richard N. Wright, Sana R. Abdel-Samad and Arthur R. Robinson, "BEF Analogy for Analysis of Box Girders", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 94, No. ST7., July, 1968, pp. 1719-1743.
- [7] Yao T. Hsu, C. C. Fu, and David R. Schelling, "EBEF Method for Distortional Analysis of Steel Box Girder Bridges", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No.3. march, 1995, pp.557-566.
- [8] James C. Oleinik, Conrad P. Heins, "Diaphragms for Curved Box Beam Bridges", Computers & Structures, Vol. 6. pp. 66-73. 1976.