

강상자형교의 뒤틀림 해석을 위한 프로그램 개발

A Program for Distortional Analysis of Steel Box Girder Bridges

이 희 업¹⁾ · 양 창 현²⁾
Lee, Hee Up Yang, Chang Hyun

요 약 : 본 연구에서는 처짐각법을 개선하여 강박스형교의 뒤틀림 거동을 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 박스거더의 뒤틀림 거동을 분석하는 대표적인 방법으로 BEF유사법과 EBEF법이 있으나, 전자는 등단면에 국한되고 경계조건에 따른 적분상수를 계산하기 위해 복잡한 삼각함수를 적용해야 하는 번거로움이 있다. 후자는 격벽의 강성을 무한으로 하여 연속보로 해석하는 근사적인 수치해석 방법이다. 따라서 본 연구에서는 변 단면과 격벽의 강성을 해석에 반영할 수 있는 방법을 개발하였다. 몇 가지 예제 해석을 통하여 본 연구에서 개발한 프로그램의 타당성을 검증하였고, 격벽의 강성에 따른 매개변수 연구를 수행하였다.

ABSTRACT : The objective of this paper is to develop a program for distortional analysis of steel box girder bridges. This program is formulated by using MSDM(modified slope deflection method). Two examples are carried out to verify the validity of the developed technique and its computational procedures. The analyzed results are compared with the previously proposed methods, BEF(beam on elastic foundation) and EBEF(equivalent beam on elastic foundation). The BEF method is limited only to prismatic straight box girders. In the EBEF method, stiffness of the intermediate diaphragms is infinitely considered. On the other hand, stiffness of the intermediate diaphragms is idealized as spring constant in this study. And then, nonprismatic straight box girders can be analyzed using the same procedure. Therefore, the comparison shows that the MSDM algorithm proposed in this paper is more efficient and reliable. Also parametric studies are performed using the proposed algorithm.

핵심용어 : 뒤틀림 해석, 강박스형교, 처짐각법, 격벽

KEYWORDS : distortional analysis, steel box girder, slope-deflection method, diaphragm

1) 정희원, 인하대학교 토목공학과 박사과정
2) 정희원, 인하대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 1999년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

일반적으로 강박스형교의 거동은 휨이론에 지배적이나 격벽(diaphragm)의 간격이 넓고 강성이 작으면 뒤틀림(distortion)의 영향도 크게 받는다. 또한 강박스형 합성보 등은 시공중 하중으로 인하여 단면이 변형이 되기 쉽다. 따라서 강박스형교는 적절한 브레이싱 시스템으로 보강되어야 하며 시공중 하중에 대하여 시공단계별 뒤틀림에 대한 검토가 요구된다.

그러나 뒤틀림에 대한 거동분석의 자료와 도로교시방서(1996)의 규준은 비흡하다. Wright등(1968)은 BEF(beam on elastic foundation) 유사법으로 강박스형교의 뒤틀림을 분석하였지만 등단면에 제한을 두었고, 복잡한 삼각함수를 적용하여야 문제가 해결되었다. Hsu등(1995)은 EBEF(equivalent beam on elastic foundation) 법을 이용하였으나 격벽의 강성을 무한대로 하는 연속보로 하여 격벽의 강성을 해석에 반영하지 못하였다.

본 연구에서는 처짐각법을 개선하여 강박스형교의 뒤틀림 거동을 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 격벽의 강성을 고려할 수 있고, 변단면 등도 해석 가능하다. 해석결과를 이용하여 강성에 따른 뒤틀림 거동에 관하여 분석하고 효과적인 격벽의 간격과 강성, 효율적인 격벽의 유형 등을 제시하고자 한다.

2. 뒤틀림 해석 이론

그림 1과 같은 박스단면의 복부에 편심 하중이 작용하여 비틀을 받으면 뒤틀림에 대한 전체 퍼텐셜에너지는 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \Pi &= U_\sigma + U_\tau + V_m \\ &= \frac{EI_{Dw}}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2\Theta}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{K_{Dw}}{2} \int_0^l \Theta^2 dz \end{aligned}$$

$$- \int_0^l \frac{m_T}{2} \Theta dz \quad (1)$$

식 (1)에 최소 퍼텐셜에너지 원리를 적용하고, 박스거더 양단의 경계조건을 도입하면 다음 식(2)와 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$EI_{Dw} \frac{d^4\Theta}{dz^4} + K_{Dw}\Theta = \frac{m_T}{2} \quad (2)$$

$$I_{Dw} = \frac{b^2 h^2}{48(1+\beta)} [A_I \beta + A_w (2\beta - 1)] \quad (3)$$

$$K_{Dw} = \frac{24EI_w}{a_o h} \quad (4)$$

여기서 E 는 탄성계수, I_{Dw} 는 뒤틀림 상수이고, K_{Dw} 는 뒤틀림 강성, Θ 는 뒤틀림 각이고 m_T 는 작용하중에 의한 비틀모멘트이다.

한편, 탄성지반위에 놓인 보의 미분방정식은 다음 식과 같다.

$$EI \frac{d^4 w}{dz^4} + kw = q \quad (5)$$

여기서 k 는 탄성지반계수, q 는 작용하중이다. 식 (2)와 식 (5)의 미분방정식은 유사성을 가지고 있다. 따라서 박스단면의 뒤틀림은 그림 2와 같이 BEF법으로 해석이 가능하다. 식 (2)의 일반해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Theta &= A \sin \lambda z \sinh \lambda z + B \sin \lambda z \cosh \lambda z \\ &+ C \cos \lambda z \sinh \lambda z + D \cos \lambda z \cosh \lambda z \\ &+ \frac{1}{K_{Dw}} \frac{m_T}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 λ 는 $\sqrt[4]{\frac{K_{Dw}}{4EI_{Dw}}}$ 이며, BEF계수이다.

식 (6)에 경계조건을 도입하여 Θ 를 구하면, 다음

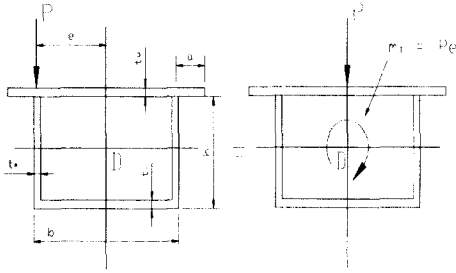


그림 1. 편심하중을 받는 박스단면

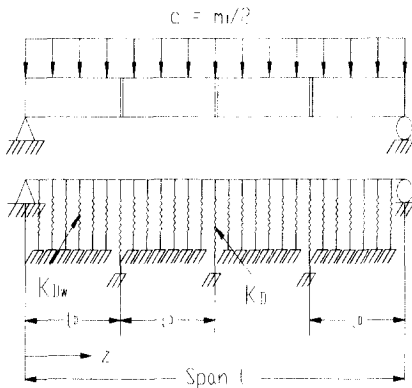


그림 2. 박스거더의 뒤틀림해석을 위한 BEM

과 같이 뒤틀림 모멘트(distortional warping moment) T_{Dw} 를 계산할 수 있다.

$$T_{Dw} = K_{Dw} \theta \quad (7)$$

3. 뒤틀림 해석 알고리즘

본 연구에서는 식 (2)의 지배미분방정식을 수치 해석하기 위해 처짐각법을 개선하였으며, 이를 개략적으로 설명하고자 한다. 다음 식 (8)은 처짐각 방정식(slope-deflection equation)이라고 하며, 부정정연속보와 부정정라멘을 해석할 때 이 방정식을 적용하는 방법을 처짐각법이라고 한다.

$$M_{nf} = 2EK_n(2\theta_n + \theta_f - 3R_{nf}) + C_{nf} \quad (8)$$

여기서, n 은 고려하는 근단 f 는 원단을 나타내는 기호, K 는 강성계수, R 은 지점 침하에 의한 회전각, 그리고 C 는 고정단 모멘트이다. 식 (8)을 이용하여 그림 3과 같은 축력의 영향을 무시한 휨과 전단을 받는 부재의 처짐각 방정식을 구하면 다음 식 (9)와 같다.

$$M_1 = \frac{2EI}{L} [2\theta_1 + \theta_2 + \frac{3}{L}(v_1 - v_2)] + C_{M1} \quad (9a)$$

$$M_2 = \frac{2EI}{L} [2\theta_2 + \theta_1 + \frac{3}{L}(v_1 - v_2)] + C_{M2} \quad (9b)$$

$$S_1 = \frac{M_1 + M_2}{L} + C_{S1} \quad (9c)$$

$$S_2 = C_{S2} - \frac{M_1 + M_2}{L} \quad (9d)$$

여기서 C_M 과 C_S 는 각각 고정단 모멘트와 고정단 전단력이다. 위의 식 (9)를 박스단면의 뒤틀림 강성을 고려하기 위한 프로그램으로 구성되도록 매트릭스 형태로 표현하면 다음 식 (10)과 같다.

$$\{P\} = [K]\{u\} + \{C\} \quad (10a)$$

$$\text{여기서, } \{P\} = \{S_1 \ M_1 \ S_2 \ M_2\}^T \quad (10b)$$

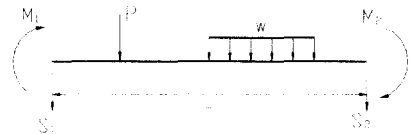


그림 3. 하중을 받는 보의 임의부분

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ & & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \text{Sym.} & & & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (10c)$$

$$\{u\} = \{v_1 \ \theta_1 \ v_2 \ \theta_2\}^T \quad (10d)$$

$$\{C\} = \{C_{S1} \ C_{M1} \ C_{S2} \ C_{M2}\}^T \quad (10e)$$

이다. 식 (10a)의 우변항의 벡터{C}를 좌변으로 이항하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (11)$$

식 (11)의 [K]는 그림 4의 보요소의 강성 매트릭스와 동일하지만, 처짐각법을 이용한 본 연구는 지점을 절점(node)으로 하여 고정단력을 계산하여 해석하는 방법이다. 따라서 평형 방정식의 수가 줄어서 해석시간이 줄어든다.

식 (11)의 요소 강성 매트릭스를 전체 시스템에 적용하여 전 부재의 강도매트릭스를 형성하고, 경계조건을 도입하는 과정은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 \\ \frac{12EI}{L^3} + K_D & * & * & * \\ * & * & * & * \\ \cdot & * & * & * \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \text{중첩} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ \frac{4EI}{L} & * & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

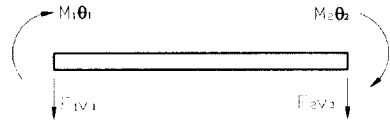


그림 4. 보요소의 자유도

식 (12)는 2번 지점에 스프링 강성이 있는 경우의 중첩 과정을 보인 것이며, K_D 는 해당 절점에 추가된 뒤틀림 강성이 된다. 그리고 요소 당 절점차와 자유도를 고려하여 half bandwidth를 계산하고 절점 굽하기 자유도에 해당하는 전 시스템에 대한 방정식을 표현한 것이다. 문헌¹⁾의 가우스 소거법, SLBSI법으로 변위를 계산하여 식 (9)에 대입하면 재단모멘트와 전단력을 계산할 수 있다. 식 (9)의 결과에서 반력을 구하고, 변위의 결과에서 스프링 강성이 있는 절점에서의 v 가 뒤틀림 각이 된다.

본 연구에서 개발한 처짐각법을 개선한 뒤틀림 해석 프로그램 MSDMDA(Modified Slope Deflection Method for Distortional Analysis)의 흐름도는 그림 5와 같다.

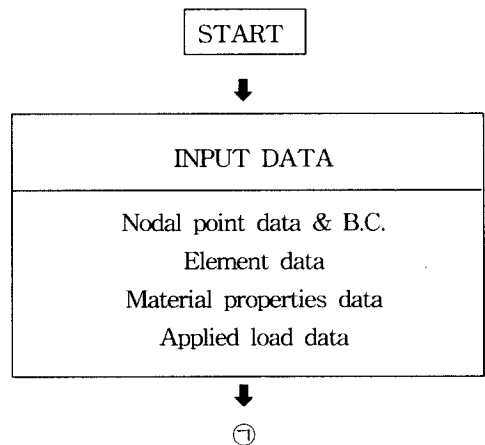


그림 5. MSDMDA의 흐름도

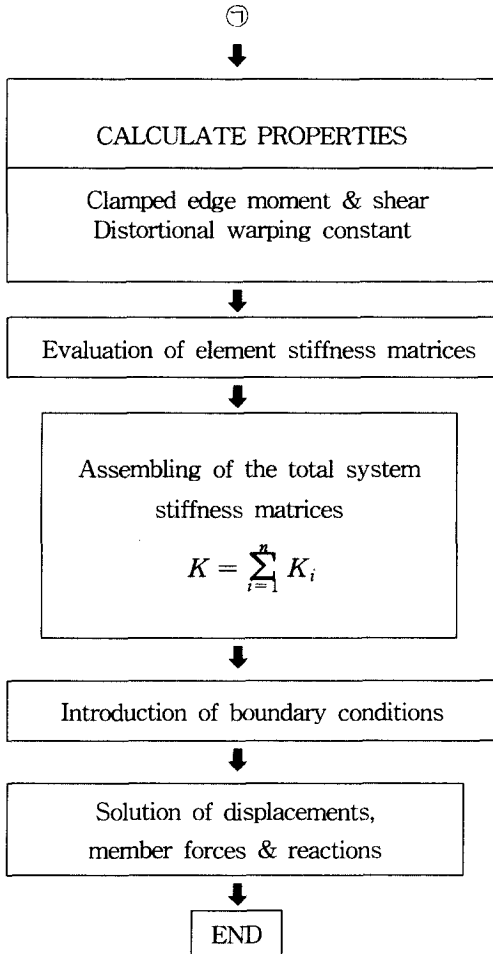


그림 5. MSDMDA의 흐름도(계속)

4. 해석결과 비교 및 고찰

4.1 프로그램의 타당성 검증

본 연구에서 개발한 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 그림 6과 같은 문헌에 있는 탄성지반위의 보(예제 1)를 해석하였다. 단면의 물성치 I 는 $2.45 \times 10^6 \text{mm}^4$ 이고 탄성계수 E 는 $72 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 이며, 탄성지반계수 k 는 110N/mm 이다. 해석 결과는 표 1에 나타냈으며, 지점별 휨모멘트,

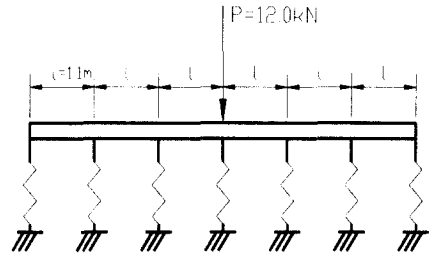


그림 6. 탄성지반위의 보(예제 1)

표 1. 해석결과(예제 1)

지점 번호	모멘트(kNm)		지점반력(N)		수직처짐(mm)	
	Boresi	본연구	Boresi	본연구	Boresi	본연구
①			-454	-453.9		-4.13
②		-0.5	1216	1215.7		11.05
③		0.34	3094	3093.9		28.13
④	4.58	4.58	4288	4288.5	38.98	39.99

반력과 수직처짐을 비교하였다. 비교 결과 Boresi(1968)가 BEF유사법으로 계산한 결과와 본 연구의 결과는 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 해석 프로그램도 탄성지반위의 보의 거동을 분석할 수 있는 자료가 됨을 알 수 있다.

박스거더의 뒤틀림 해석의 결과를 비교하기 위하여 그림 7과 같은 단면(예제 2)의 구조물에 대하여 해석을 수행하였다. 단면의 물성치 I_y 는 6896.6in^4 , 탄성계수 E 는 $29,000 \text{k/in}^2$ 이고, 탄성지반계수 k 는 2.0k/in^2 이다. 표 2는 Wright 등(1968)이 BEF법과 Hsu 등(1995)이 EBEF법으로 해석한 것을 본 연구의 해석결과와 비교한 것이다. 격벽의 간격을 좁게 하여 강성이 증가된 경우는 Wright(1968)과 Hsu 등(1995)의 결과는 잘 일치하나, 강성이 작은 경우는 조금 상이한 결과를 보인다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 격벽의 강성을 반영하여 해석할 수 있으나, 여기서는

Hsu 등(1995)의 결과와 비교하기 위해 연속보로 해석하였다. 문헌²⁾에 의하면 무차원 강성계수가 일정 값 이하이면 격벽의 강성 K_D 를 무한대로 하는 해석은 다소의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 격벽의 강성을 무한대로 하여 연속보로 해석하는 Hsu 등(1995)의 해석보다는 해석시 격벽의 강성을 고려하는 것이 더 타당함을 알 수 있다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 격벽의 강성을 고려하여 해석하므로 Hsu 등(1995)의 방법보다 더 효과적인 것으로 판단된다.

표 2. 해석 결과(예제 2)

$l_d(\text{in})$	λl_d	x/l_d	R_o/T		
			Wright	Hsu	본 연구
400	4	0.2	0.71	0.78	0.765
		0.4	0.37	0.43	0.398
		0.6	0.09	0.17	0.142
		0.8	-0.03	0.04	0.028
200	2	0.2	0.85	0.88	0.885
		0.4	0.65	0.67	0.665
		0.6	0.40	0.41	0.411
		0.8	0.18	0.18	0.176
100	1	0.2	0.89	0.89	0.895
		0.4	0.69	0.69	0.694
		0.6	0.44	0.44	0.446
		0.8	0.20	0.20	0.198
10	0.1	0.2	0.89	0.89	0.896
		0.4	0.69	0.69	0.696
		0.6	0.44	0.44	0.448
		0.8	0.20	0.20	0.200

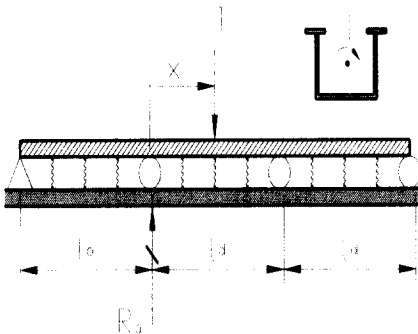


그림 7. 탄성지반위의 박스단면(예제 2)

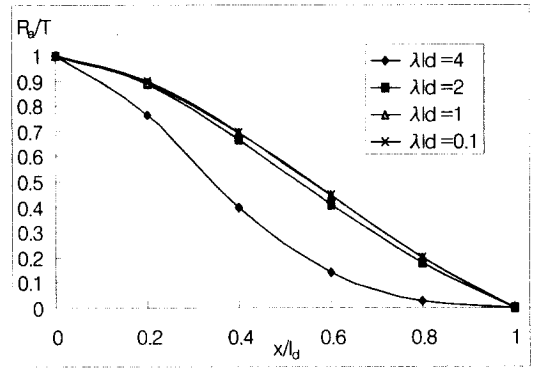


그림 8. 반력에 관한 영향선(예제 2)

그림 8과 같이 반력에 관한 영향선을 검토하면 λl_d 가 점점 감소할 때 반력은 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수가 있다. 이것은 격벽의 간격을 일정거리 이하로 좁게 배치하더라도 뒤틀림의 거동에 저항하는 능력은 크게 향상되지 못함을 보여준다.

4.2 박스 거더의 뒤틀림 해석 적용 예

본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 표 3의 단면 제원을 가진 그림 9와 같은 박스 거더를 해석하였다. 탄성계수는 $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이고 격벽의 간격 l_d 는 6m로 하였다. 하중은 지간 중앙점에 집중하중을 편심 재하하여 비틀모멘트 $10.153t \cdot m$ 를 작용하였다.

개발된 프로그램은 등분포의 뒤틀림 저항 강성 K_{DW} 를 집중 뒤틀림 강성으로 해석하는 간략적인 근사해법이므로 그림 10과 같이 수렴성을 검토하였다. 식 (4)를 이용하면 K_{DW} 는 14638이고, 집중 뒤틀림 강성은 K_{DW} 에 요소의 길이를 곱하여 계산하였다. 그림 9의 모델에서 격벽이 없는 경우에 대하여, 스프링의 간격을 변화시키면서 해석하고 그 결과는 단위길이당 배치된 스프링의 경우의 bimoment M_{DW}^* 로 무차원화하여 그림 10에 나타내었다.

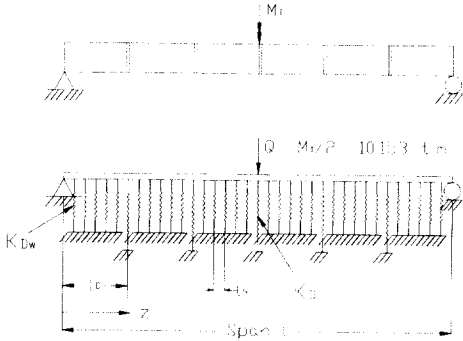


그림 9. 적용예제의 박스 거더

표 3. 단면 제원

h	b	a	t_u	t_c	t_f	L	단위
2.0	4.1	0.8	0.0198	0.01	0.0129	36.0	m

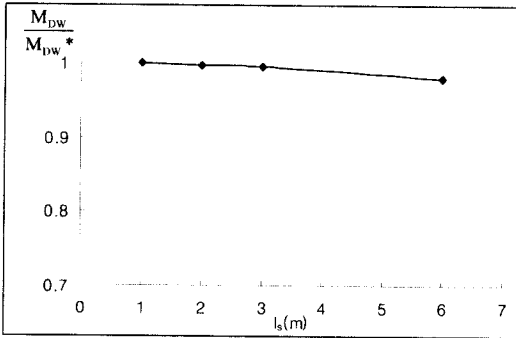


그림 10. 스프링 간격에 따른 수렴성 검토

문헌⁷⁾에 의하면 등 간격의 스프링으로 지지된 보의 경우, 스프링 간격 l_s 가 식 (13)의 범위를 만족하면 타당성 있는 결과를 얻을 수 있다고 언급하고 있다.

$$l_s \leq \frac{\pi}{4\lambda} \quad (13)$$

본 연구에서는 식 (13)의 조건을 만족하는 범위에서 해석하였고, 그림 10에서와 같이 해석 결과들은 타당하다고 판단된다.

개발된 해석 프로그램으로 뒤틀림 응력을 구하는 과정과 결과의 타당성을 분석하기 위하여 다음과 같은 무차원 강성계수²⁾를 도입하여 해석을 수행하였다.

$$\gamma = \frac{K_D}{K_{D0} I_d} \quad (14)$$

그림 9의 박스 거더에서 격벽의 간격을 6m로 하고 강성계수 1500인 경우에 대하여 뒤틀림 응력을 구하면 다음과 같다. 표 3의 단면에서 I_{Dw} 는 $0.13396m^6$ 이고, ω_D 는 $1.608m^2$ 이다. 본 연구의 해석 프로그램을 이용하여 bimoment를 구하면 M_{Dw} 는 $8.608tm^2$ 이다. 이 결과들을 다음 식에 대입하면 뒤틀림 응력 $10.3kgf/cm^2$ 이 된다.

$$\sigma_{Dw} = \frac{M_{Dw}}{I_{Dw}} \omega_D \quad (15)$$

강성계수별로 3가지 모델에 대하여 해석하고 범용 유한요소 프로그램 ADINA의 결과와 비교하여 그림 11에 나타내었다. 그림 11을 분석하면 본 연구의 뒤틀림 해석은 FEM결과 보다 약간 크게 산정 되지만 거의 일치함을 알 수가 있다.

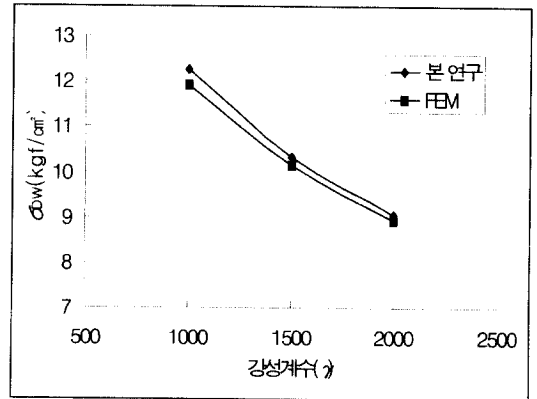


그림 11. 해석 결과의 비교

4.3 효과적인 격벽의 강성

효과적인 격벽의 간격과 강성을 검토하기 위하여 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 표 3에서와 같은 제원의 단면을 단성계수와 하중은 앞 절의 조건과 동일하게 하고, 격벽의 강성계수를 달리하여 11개의 모델에 대하여 해석하였다. 또한 격벽의 강성을 무한대로 하여 연속보로 뒤틀림 해석을 가능하게 하는 무차원 강성계수의 범위를 검토하였다.

격벽의 강성에 따른 반력의 영향은 그림 12에 나타내었고, 이 반력은 격벽의 내력이 된다. 그림 12에서와 같이 격벽의 강성에 따른 반력의 영향을 분석하면 강성계수가 증가하여 20000이상이 되면 강성계수가 무한대 일 때의 반력 값으로 수렴함을 알 수가 있다. 따라서 강성계수가 20000이상이면 격벽을 롤러 지점으로 하여 연속보로 뒤틀림을 해석하여도 가능하다고 판단된다. 그림 13은 격벽의 강성계수에 따른 뒤틀림에 의한 bimoment의 변화를 격벽이 없는 경우의 결과인 최대값으로 무차원화한 결과이다. 결과에 의하면 격벽의 강성계수가 일정 값 이상이 되면 박스거더는 뒤틀림의 영향은 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

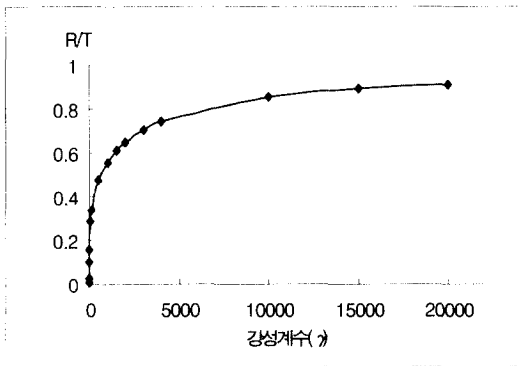


그림 12. 격벽 강성계수에 따른 반력/하중

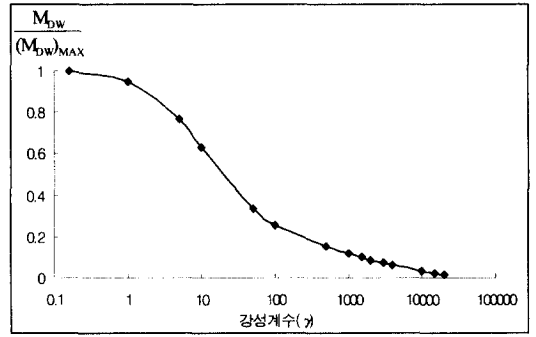


그림 13. 강성계수에 따른 bimoment의 변화

이 것은 격벽을 일정 간격이하로 좁게 배치하여도 구조물의 뒤틀림 거동에는 더 이상 크게 저항을 하지 못하며, 오히려 자중만 증가시키는 결과를 나타냄을 알 수 있다. 또한 이 결과는 합성 박스거더의 시공중 하중에 대한 뒤틀림 검토나, 설계시 격벽의 강성에 따른 간격을 결정하는 참고 자료가 되리라 판단된다.

4.4 격벽 형식별 효율성 분석

다음은 박스단면의 뒤틀림에 저항하도록 설계되는 격벽의 여러 가지 유형에 따른 뒤틀림의 영향을 분석하였다. 일반적으로 강상자형교의 격벽은 그림 14와 같은 형식들을 사용하며 뒤틀림 강성 K_D 는 다음 식 (16)에서 식 (18)까지와 같다.

$$\text{판형 격벽, } K_D = Gt_D b h \quad (16)$$

$$\text{X형 격벽, } K_D = \frac{2EA_b b^2 h^2}{l_b^3} \quad (17)$$

$$\text{V형 격벽, } K_D = \frac{EA_b b^2 h^2}{2 l_b^3} \quad (18)$$

표 3의 단면 제원의 구조물에서 격벽의 강성계수가 1500인 경우의 강성 K_D 를 기준으로 V형의 강성계수와 일치시킨 후 자중을 계산하고, 이를

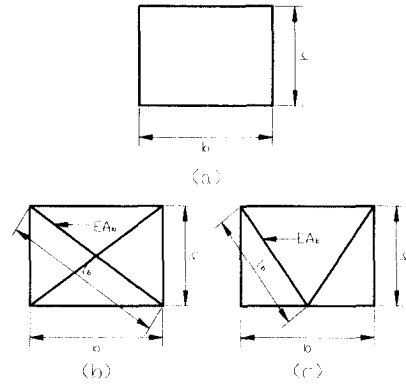


그림 14. 격벽 유형 (a) 판형, (b) X형, (c) V형

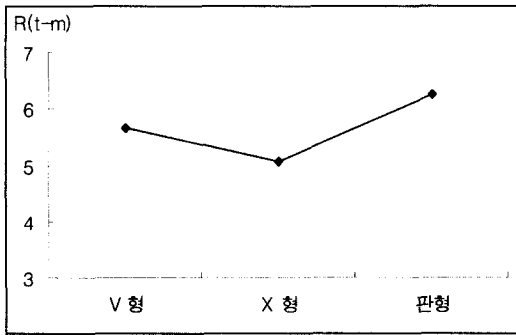


그림 15. 격벽의 형식별 반력

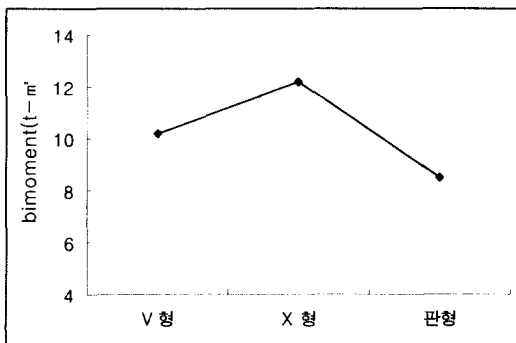


그림 16. 격벽의 형식별 bimoment

기준으로 판형과 X형의 자중을 동일하게 하여 각각의 강성을 계산하였다. 격벽의 유형별로 자중을 일정하게 유지한 상태에서 각각의 다른 강성 값을 계산하여 해석을 수행한 결과는 그림 15와 그림 16에 나타내었다. 해석 결과를 분석하면 일정한 자중 하에서 최소 중량설계의 개념으로 분석할 때 판형의 격벽이 뒤틀림에 가장 효과적인 저항을 함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 처짐각법을 개선하여 강박스형 교의 뒤틀림 거동을 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 몇 가지 예제 해석을 통하여 프로그램의 타당성을 검토한 결과, BEF법과 EBEF법의 해석결과와 잘 일치하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 구조물 해석시 절점의 수를 줄여서 실행시간을 단축하고, 격벽의 강성을 반영하여 해석할 수 있는 장점이 있다. 무차원 강성계수에 따른 박스거더의 뒤틀림 거동을 분석한 결과는 다음과 같다. 무차원 강성계수가 20000이상이면 격벽의 강성을 무한으로 하여 연속보로 뒤틀림 해석을 하는 것은 타당한 것으로 나타났다. 격벽의 간격을 일정값 이하로 좁게 하여도 박스거더의 뒤틀림 거동에 저항하는 능력은 크게 향상되지 못함을 보여 주었다. 최소 중량설계의 개념으로 자중을 일정하게 한 상태에서 격벽의 형식별로 뒤틀림 저항능력을 분석한 결과 판형이 가장 뛰어난 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) C. A. Brebbia, A. J. Ferrante, 1978, "Computational Methods for the Solution of Engineering Problems", Pentech Press
- (2) H. Nakai, C. H. Yoo, 1988, "Analysis and Design of Curved Steel Bridges", McGraw-Hill

- (3) R. N. Wright, S. N. Abdel-Samed, 1968, "BEF analogy for analysis of box girders", J. of Str. Div., ASCE, Vol.94, No.7
- (4) Y. T. Hsu, C. C. Fu, 1995, "EBEF method for distortional analysis of steel box girder bridges", J. of Str. Eng., ASCE, Vol.121, No.3
- (5) F. A. Branco, R. Green, 1985, "Composite box girder bridge behavior during construction", J. Str. Eng., ASCE, Vol.111, No.3, pp.577~593
- (6) 양창현, 1994, "구조역학", 청문각
- (7) P. Boresi, J. O. Smith, 1978, "Advanced Mechanics of Materials", John Wiley & Sons
- (8) M. Prokop, 1979, "Theory of Box Girders", John Wiley & Sons

(접수일자 : 1998년 12월 2일)