

리브 제원을 고려한 평강 리브 보강판의 직교이방성 휨 강성 수정 계수

The Modified Coefficient of the Orthotropic Flexural Rigidity for Stiffened Plates with Rectangular Ribs Considering the Dimensions of Ribs

주 석 범¹⁾

Chu, Seok Beom

요 약 : 본 연구에서는 직교이방성 판 해석의 정확도 문제를 개선하기 위하여 평강 리브를 갖는 보강판에 대하여 리브 제원을 고려한 직교이방성 휨 강성 수정 계수를 제안하고자 하였다. 이를 위하여 먼저, 직교이방성 휨 강성과 최대 처짐에 대하여 보강판 제원에 따른 민감도 분석을 실시하였으며, 보강판의 직교이방성 휨 강성 수정 계수에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 연구 결과, 수정 계수의 비율은 판 두께와 상관없이 리브 높이, 간격, 두께별로 하나의 함수로 표현 가능함을 알 수 있었으며, 이러한 수정 계수의 비율 함수로부터 간편하게 수정 휨 강성을 산정할 수 있음을 알 수 있었다. 지지 조건, 변장비, 리브 배치 및 재하 크기가 다른 여러 가지 보강판에 계수 함수를 적용한 결과, 참고 문헌에 비하여 직교이방성 판 해석의 정확도가 향상됨을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안한 계수 함수식을 사용하면 평강 리브를 갖는 보강판의 직교이방성 판 해석 시 간편하게 상당한 정확도의 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT : In this study, to improve on the inaccurate results of the orthotropic plate analysis, we aim to propose a modified coefficient of the orthotropic flexural rigidity for stiffened plates with rectangular ribs considering the dimensions of ribs. The sensitivity of the flexural rigidity and the maximum displacement according to the dimensions of stiffened plates were analyzed and the parametric study on the modified coefficient of the orthotropic flexural rigidity of stiffened plates was performed. The results show that the ratio of modified coefficients can be expressed as a function for each rib height, space and thickness regardless of plate thickness and the modified flexural rigidity can be easily estimated from the ratio functions of modified coefficients. The application of the coefficient function to various types of stiffened plates with different boundary conditions, aspect ratios, rib arrangement and loading size shows that the proposed function improves the accuracy of the orthotropic plate analysis compared with the results of the reference. Therefore, the orthotropic plate analysis of stiffened plates with rectangular ribs can easily achieve more accurate results using the coefficient function proposed in this study.

핵심용어 : 평강 리브 보강판, 리브 제원, 직교이방성 휨 강성, 수정 계수의 비율 함수, 직교이방성 판 해석, 정확도

KEYWORDS : Stiffened Plates with Rectangular Ribs, Dimensions of Ribs, Orthotropic Flexural Rigidity, Ratio Functions of Modified Coefficients, Orthotropic Plate Analysis, Accuracy

1. 개요

보강판은 얇은 강판에 일정한 간격으로 리브를 덧대어 강판의 강성을 증가시킨 구조체로, 이러한 기하학적 특성으로 인해 직교이방성 거동을 나타내게 된다. 최근 컴퓨터의 발달로 보강판에 대한 3차원 판 해석이 가능하게 되었으나, 보강판을 전부 3차원 판 요소로 모델링하여 해석한다는 것은 대용량의 컴퓨터가 필요하고 많은 시간이 소요되기 때문에 불

필요한 일로 간주되고 있다. 이러한 이유로 실무 설계에서는 보강판의 기하학적 직교이방성 특성을 고려하여 직교이방성 판으로 간주한 해석이 많이 적용되고 있는 실정이지만, 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우 보강판의 제원에 따라 정확도가 크게 달라진다는 문제점이 지적되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 직교이방성 판 해석의 정확도를 향상시키기 위한 여러 가지 연구가 진행되었으나(김창수, 1996; 최영, 2004; 주석범, 2005), 아직까지 정확도나

1) 교신저자, 정회원, 세명대학교 토목공학과 조교수, 공학박사
(T. 043-649-1334, F. 043-649-1778, E-mail: chusb@semyung.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

편리성 부분에서 보완하여야 할 점이 많은 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 먼저, 여러 가지 보강판에 대한 민감도 분석을 통하여 각각의 제원이 직교이방성 휨 강성과 최대 처짐에 미치는 영향을 살펴보고, 보강판을 모두 등방성 판 요소로 모델링한 MIDAS의 해석 결과를 기준으로 직교이방성 판 요소로 모델링한 ORTHO가 가져야 하는 휨 강성을 산정한 뒤, 각각의 제원 변화에 따른 수정 휨 강성의 양상을 정형화하여 제시함으로써, 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우 간편하게 타당한 결과를 얻을 수 있도록 하고자 한다.

2. 해석 예제

본 연구에서 해석 예제로 사용한 평강 리브를 갖는 여러 가지 보강판의 지지 조건과 재하 방법은 그림 1과 같으며, 변화시킨 리브와 판의 제원은 표 1과 같다.

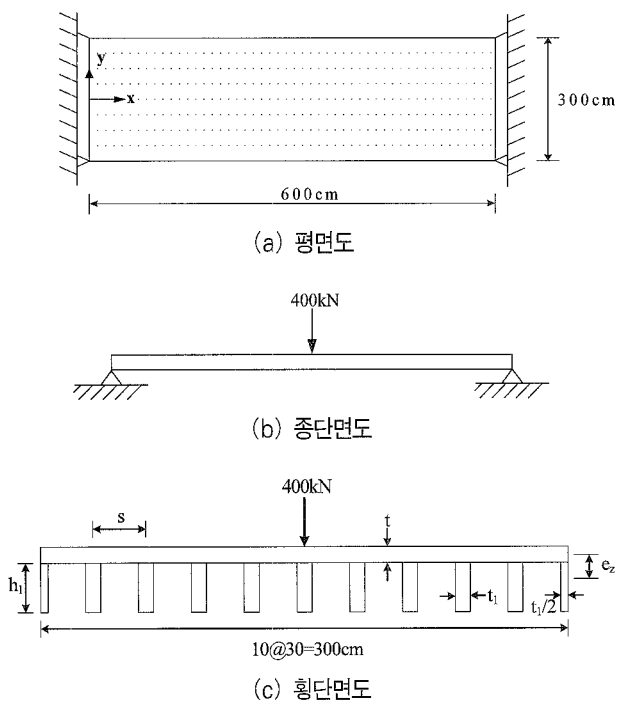


그림 1. 해석 예제 (s=30cm)

표 1. 판 두께 및 평강 리브의 제원 (cm)

판 두께 (t)	평강 리브의 제원		
	높이 (h ₁)	두께 (t ₁)	간격 (s)
1.0	20	1.0	30
1.2	25	1.5	40
1.4	30	2.0	60

하중은 국부 처짐이 발생하지 않도록 그림 1(c)와 같이 판 중앙에 위치한 리브 위에 재하하였으며, MIDAS의 해석은 한 절점당 5 자유도를 갖는 4절점 등방성 판 요소(최창근, 2002; Cook, 1989)를 사용하여 5×5cm로 모델링하여 해석하였고 (마이더스아이티, 2002), 이때 강판과 리브의 물성치는 모두 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.3$ 을 사용하였다.

참고문헌(AISC, 1963; Troitsky, 1992)에 따르면 보강판의 직교이방성 강성은 식 (1)-(3)과 같이 정의할 수 있으며, 이러한 강성에 직교이방성 판 이론을 적용하면 직교이방성 판 해석 시 필요한 물리 상수를 산정할 수 있다(김창수, 1996; 최 영, 2004). 이러한 물리 상수를 이용하여, ORTHO의 해석은 4절점 직교이방성 판 요소(김창수, 1996; 최 영, 2004)를 사용하여 15×15cm로 모델링하여 해석하였다.

$$D_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{Ete_z^2}{(1-\nu^2)} + \frac{EI_n}{s} \quad (1)$$

$$D_y = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

$$H = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{G}{6s} (h_1 t_1^3) \quad (3)$$

여기서, e_z 는 판 중심부터 보강판 도심까지의 거리, I_n 은 보강판 도심에 대한 보강재의 단면 2차 모멘트이다.

또한, 본 연구에서는 보강판의 처짐을 분석하기 위한 변수로 참고문헌(주석법, 2005; 최 영, 2004)과 마찬가지로 식 (4)와 같이 정의되는 보강판의 직교이방성 휨 강성비(RR : Rigidity Ratio)를 사용하였다.

$$RR = D_x / D_y \quad (4)$$

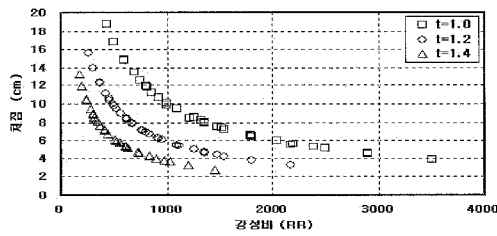
3. 해석 결과

3.1 처짐 양상

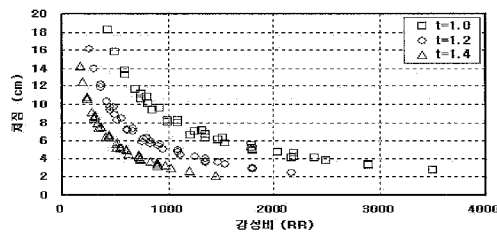
해석 예제의 여러 가지 보강판에 대하여 직교이방성 판 요소로 모델링한 ORTHO의 최대 처짐 결과와 모두 등방성 판 요소로 모델링한 MIDAS의 최대 처짐 결과를 판 두께별로 직교이방성 휨 강성비에 따라 나타내면 그림 2와 같다.

그림 2를 살펴보면, ORTHO와 MIDAS 결과 모두 강성비가 작아질수록 처짐은 급격히 증가하며, 강성비가 커질수록 처짐에 미치는 영향이 작아져 일정한 강성비 이상이 되면 보강재 증가에 따른 처짐의 감소량이 크지 않음을 알 수 있다.

또한, ORTHO와 MIDAS 결과 모두 강성비가 같더라도 판 두께별로 다른 처짐을 갖게 됨을 알 수 있는데, 이는 같은 강성비를 갖더라도 식 (2)에서 보듯이 판 두께에 따라 D_y 값이 다르기 때문에 나타난 현상으로 보강판의 거동을 분석하는 경우 판 두께를 따로 고려하여야 함을 나타낸다고 할 수 있으며, 이에 따라 본 연구에서도 일정한 판 두께를 갖는 보강판에서 리브 제원에 따른 X 방향 휨강성 D_x 의 변화를 중심으로 보강판의 거동을 살펴보고자 한다.



(a) ORTHO



(b) MIDAS

그림 2. 최대 처짐 결과

ORTHO와 MIDAS의 최대 처짐 경향을 비교하기 위하여, 판 두께 1.2cm인 경우를 따로 나타내면 그림 3과 같다.

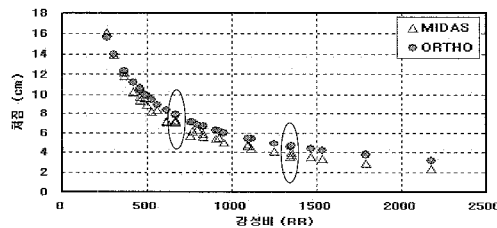


그림 3. ORTHO와 MIDAS의 최대 처짐 비교

그림 3에서 알 수 있듯이 ORTHO의 결과는 일정한 곡선 형태를 나타내어 휨 강성이 같은 경우 처짐 값이 거의 같게 나타나는 반면, MIDAS의 경우 분산된 곡선 형태로 휨 강성이 같은 경우라도 처짐 값에 차이가 발생함을 알 수 있다.

이러한 경향을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여, 그림 3에 표시된 2곳에 대하여 리브의 제원, 강성비 및 비틀림 강성과 ORTHO 및 MIDAS 해석 결과를 나타내면 표 2와 같다.

표 2. 강성비가 같은 경우에 대한 ORTHO와 MIDAS의 최대 처짐

강성비 (RR)	비틀림강성 (10^5)	s (cm)	h_1 (cm)	t_1 (cm)	ORTHO (cm)	MIDAS (cm)
1352	4.6692	30	30.0	1.0	4.6716 (1.0004)	3.9764 (1.0684)
	8.7077	60	30.0	2.0	4.6698 (1.0000)	3.7217 (1.0000)
667	4.1644	40	25.0	1.0	7.8652 (0.9942)	7.3261 (1.0343)
	5.2161	60	25.0	1.5	7.9115 (1.0000)	7.0834 (1.0000)

()안은 비율을 나타냄.

표 2를 살펴보면, 같은 휨 강성비를 갖는 경우라도 다른 리브 제원을 가짐을 알 수 있으며, 이에 따라 비틀림 강성이 달라져 처짐이 다르게 나타남을 알 수 있다. 같은 강성비를 갖는 보강판에 대하여 MIDAS와 ORTHO의 처짐 결과를 비율로 나타낸 () 안의 값을 살펴보면, ORTHO의 처짐 비율은 최대 0.58% 차이를 나타내어 리브 제원에 대한 영향이 거의 없는 반면, MIDAS의 처짐 비율은 최대 6.84% 차이를 나타내어 실제 보강판에서는 강성비 뿐만 아니라 리브 간격과 리브 두께의 영향이 크게 작용함을 알 수 있다.

3.2 민감도 분석

판 두께 1.0cm, 리브 간격 30cm, 리브 높이 20cm, 리브 두께 1.0cm 를 갖는 보강판을 기준으로 보강판의 제원 변화가 휨 강성과 최대 처짐에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 제원 변화에 따른 각 보강판의 해석 결과를 표로 나타내면 표 3과 같으며, 표 3의 결과에 대하여 판 두께 별로 리브 간격, 리브 높이, 리브 두께가 휨 강성 및 최대 처짐에 미치는 영향을 그림으로 나타내면 그림 4-6과 같다.

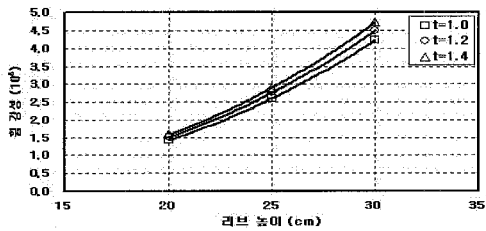
그림 4-6의 (a)에 나타난 각 제원 변화에 따른 휨 강성의 민감도를 비교하기 위하여 기울기를 살펴보면, 보강판의 제원 중에서 리브 높이 변화에 따른 기울기 차이가 가장 크게 나타나 휨 강성에 대한 영향이 가장 크며, 리브 높이가 증가할수록 증가율이 점차 커지는 것을 알 수 있으며, 상대적으로 리브 두께와 리브 간격의 영향은 작으며, 이러한 경향은 판 두께별로 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

또한 그림 4-6의 (b)에 나타난 처짐의 민감도를 살펴보면, 휨 강성과 마찬가지로 리브 높이에 대한 영향이 가장 크며, 리브 간격의 경우 휨 강성과 처짐 모두 리브 간격이 커질수록 다른 제원과 반대되는 경향이 나타남을 알 수 있다.

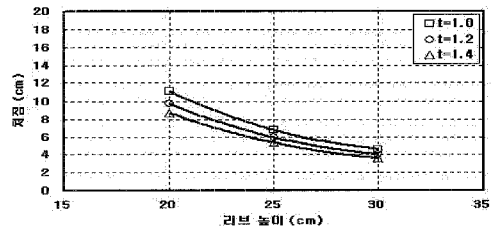
각각의 제원 변화에 따른 휨 강성과 처짐의 경향을 정확하

표 3. 보강판의 제원별 휨 강성 및 최대 처짐

No.	t (cm)	s (cm)	h_1 (cm)	t_1 (cm)	휨 강성 (10^8)	최대 처짐 (cm)
1	1.0	30	20.0	1.0	2.59908	11.0929
2		30	25.0	1.0	4.22429	6.77627
3		30	30.0	1.0	1.91679	4.55379
4		30	20.0	1.5	2.33303	8.21658
5		30	20.0	2.0	1.14912	6.60857
6		40	20.0	1.0	9.62115	13.7490
7		50	20.0	1.0	8.28380	15.8205
8		60	20.0	1.0	1.51695	18.2204
9	1.2	30	20.0	1.0	2.75899	9.73423
10		30	25.0	1.0	4.49122	5.92476
11		30	30.0	1.0	2.04821	3.97642
12		30	20.0	1.5	2.50448	7.19957
13		30	20.0	2.0	1.21033	5.79406
14		40	20.0	1.0	1.00869	12.1118
15		50	20.0	1.0	8.65428	13.9416
16		60	20.0	1.0	1.59239	16.0820
17	1.4	30	20.0	1.0	2.89871	8.71642
18		30	25.0	1.0	4.72421	5.30143
19		30	30.0	1.0	2.16557	3.54925
20		30	20.0	1.5	2.65978	6.44875
21		30	20.0	2.0	1.26412	5.19014
22		40	20.0	1.0	1.04972	10.8058
23		50	20.0	1.0	8.98231	12.4856
24		60	20.0	1.0	0.89823	14.3230

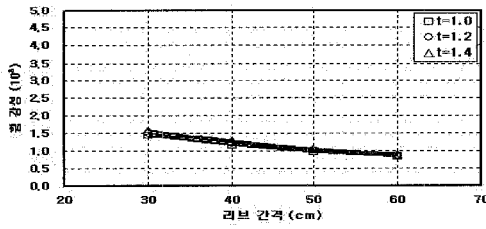


(a) 휨 강성

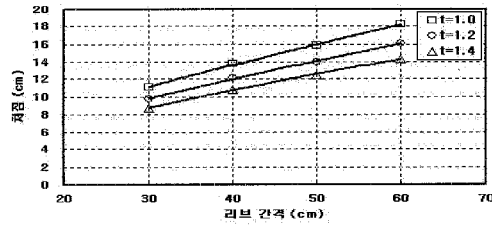


(b) 최대 처짐

그림 4. 리브 높이에 대한 민감도

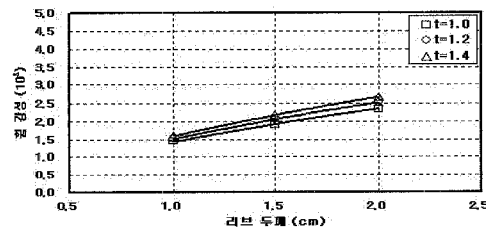


(a) 휨 강성

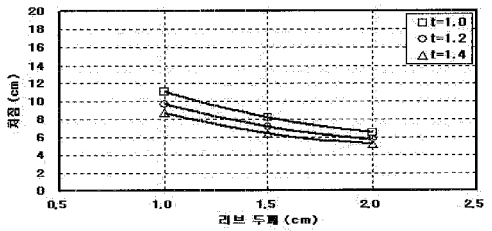


(b) 최대 처짐

그림 5. 리브 간격에 대한 민감도



(a) 휨 강성



(b) 최대 처짐

그림 6. 리브 두께에 대한 민감도

게 판단하기 위하여 표 3에 나타낸 No. 1의 제원을 갖는 보강판을 기준으로 각 제원의 1% 증가에 따른 보강판의 휨 강성과 처짐의 변화율을 나타내면 표 4와 같다.

표 4. 각 제원의 1% 증가에 따른 휨 강성과 최대 처짐의 변화율 (%)

제원 변화		휨 강성	최대 처짐
리브 높이	20 → 25	3.2634	-1.5565
	20 → 30	3.9026	-1.1790
리브 간격	30 → 40	-0.5915	0.7183
	30 → 50	-0.4917	0.6393
	30 → 60	-0.4213	0.6425
리브 두께	1.0 → 1.5	0.6783	-0.5186
	1.0 → 2.0	0.6300	-0.4043
판 두께	1.0 → 1.2	0.2991	-0.6124
	1.0 → 1.4	0.2813	-0.5356

표 4를 살펴보면, 휨 강성은 리브 높이, 리브 두께, 리브 간격, 판 두께 순서로 영향을 받으며, 다른 제원들보다 리브 높이 변화에 따른 영향이 상대적으로 매우 크고, 판 두께에 의한 영향은 상대적으로 매우 작다는 것을 알 수 있다.

또한 최대 처짐에 미치는 영향을 살펴보면 리브 높이, 리브 간격, 판 두께, 리브 두께의 순서로 영향을 미침을 알 수 있으며, 휨 강성과 마찬가지로 다른 제원들 보다 리브 높이 변화에 따른 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 판 두께의 경우 휨 강성과 달리 판 두께 변화가 처짐에 미치는 영향이 증가한 것을 알 수 있는데, 이는 판 두께가 증가함에 따라 보강판의 X 방향 휨 강성 D_x 만 증가하는 것이 아니라 Y 방향 휨 강성 D_y 도 같이 증가하여 처짐에 영향을 미쳤기 때문에 나타난 현상으로 풀이된다.

3.3 수정 계수 산정

본 연구에서는 보강판을 모두 등방성 판 요소로 모델링한 MIDAS의 해석 결과를 기준으로 이에 맞는 직교이방성 휨 강성 D_x' 를 산정하기 위하여, 식 (5)와 같이 기존의 X 방향 휨 강성 D_x 에 수정 계수 A 를 곱하여 새로운 휨 강성 D_x' 를 계산하는 방법을 채택하였다. 각각의 제원을 갖는 보강판에 대하여, MIDAS와의 오차율을 근거로 임의의 수정 계수를 준 뒤 그 양상을 분석하여 수정 계수를 구하는 방식으로 MIDAS와의 오차율 $\pm 0.002\%$ 범위 내의 수정 계수를 산정하였으며, 판 두께 1.2cm를 갖는 보강판에 대하여 각 제원별 휨 강성 수정 계수 A 를 나타내면 표 5와 같다.

$$D_x' = A \cdot D_x \tag{5}$$

표 5. 각 제원별 휨 강성 수정 계수 A

리브 두께	리브 높이	리브 간격			
		30	40	50	60
1.0	20	1.0967	1.0187	1.0060	0.9609
	25	1.1798	1.1005	1.0861	1.0424
	30	1.2437	1.1686	1.1457	1.1136
1.5	20	1.2390	1.1423	1.1166	1.0634
	25	1.3283	1.2390	1.2050	1.1600
	30	1.4007	1.3212	1.2798	1.2493
2.0	20	1.3260	1.2372	1.2107	1.1652
	25	1.4235	1.3350	1.2974	1.2615
	30	1.5081	1.4226	1.3805	1.3599

민감도 분석 결과를 토대로 휨 강성 및 처짐에 가장 큰 영향을 미치는 리브 높이 변화가 휨 강성 수정 계수 A 에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 리브 높이 25cm인 경우의 수정 계수를 기준으로 리브 높이 변화에 따른 휨 강성 수정 계수의 비율을 나타내면 표 6과 같다.

표 6. 리브 높이 변화에 따른 휨 강성 수정 계수 A 의 비율

리브 두께	리브 높이	리브 간격			
		30	40	50	60
1.0	20	0.930	0.926	0.926	0.922
	25	1.000	1.000	1.000	1.000
	30	1.054	1.062	1.055	1.068
1.5	20	0.933	0.922	0.927	0.917
	25	1.000	1.000	1.000	1.000
	30	1.055	1.066	1.062	1.077
2.0	20	0.931	0.927	0.933	0.924
	25	1.000	1.000	1.000	1.000
	30	1.059	1.066	1.064	1.078

표 6을 살펴보면, 리브 두께 및 리브 간격과 상관없이 리브 높이별 수정 계수 비율이 비슷한 값을 나타내어 수정 계수 비율을 하나의 함수로 표현 할 수 있음을 알 수 있다.

처짐에 두 번째로 영향을 주는 리브 간격이 수정 계수 A 에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 리브 간격 40cm인 경우를 기준으로 리브 간격 변화에 따른 수정 계수의 비율을 나타내면 표 7과 같으며, 리브 간격별 수정 계수의 비율은 리브 두께 및 높이와 상관없이 비슷한 값을 나타내어 수정 계수 비율을 하나의 함수로 표현 할 수 있음을 알 수 있다.

표 7. 리브 간격 변화에 따른 휨 강성 수정 계수 A 의 비율

리브 두께	리브 높이	리브 간격			
		30	40	50	60
1.0	20	1.077	1.000	0.988	0.943
	25	1.072	1.000	0.987	0.947
	30	1.064	1.000	0.980	0.953
1.5	20	1.085	1.000	0.977	0.931
	25	1.072	1.000	0.973	0.936
	30	1.060	1.000	0.969	0.946
2.0	20	1.072	1.000	0.979	0.942
	25	1.066	1.000	0.972	0.945
	30	1.060	1.000	0.970	0.956

다음으로, 리브 두께 변화에 따른 수정 계수 A 의 변화를 살펴보기 위하여, 리브 두께 1.5cm인 경우의 수정 계수를 기준으로 리브 두께 변화에 따른 수정 계수의 비율을 나타내면 표 8과 같으며, 리브 두께별 수정 계수의 비율은 리브 높이 및 리브 간격과 상관없이 비슷한 값을 나타내어 수정 계수 비율을 하나의 함수로 표현 할 수 있음을 알 수 있다.

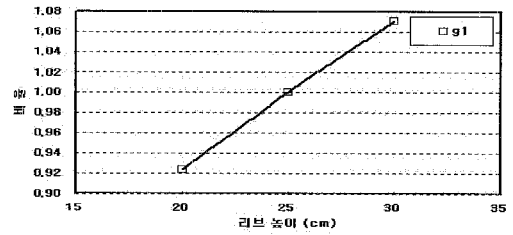
표 8. 리브 두께 변화에 따른 휨 강성 수정 계수 A 의 비율

리브 높이	리브 두께	리브 간격			
		30	40	50	60
20	1.0	0.885	0.892	0.901	0.904
	1.5	1.000	1.000	1.000	1.000
	2.0	1.070	1.083	1.084	1.096
25	1.0	0.888	0.888	0.901	0.899
	1.5	1.000	1.000	1.000	1.000
	2.0	1.072	1.077	1.077	1.087
30	1.0	0.888	0.885	0.895	0.891
	1.5	1.000	1.000	1.000	1.000
	2.0	1.077	1.077	1.079	1.089

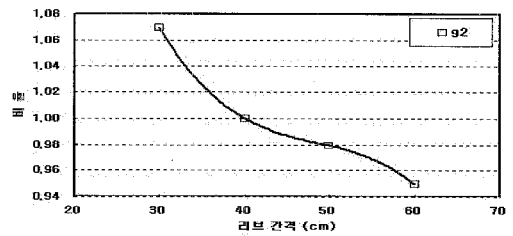
이상의 결과로부터 수정 계수 A 는 리브 높이, 리브 간격, 리브 두께에 따라 일정한 비율로 표현할 수 있음을 알 수 있으며, 이러한 비율은 모든 판 두께에서 거의 같은 결과를 나타내어 판 두께에 대한 영향은 리브 높이 25cm, 리브 간격 40cm, 리브 두께 1.5cm를 갖는 기준 보강판의 수정 계수에 대한 비율로 표현할 수 있음을 알 수 있었다.

이러한 경향을 고려하여, 각 재원 변화에 따른 중앙값을 계산하여 나타내면 그림 7과 같으며, 그림 7로부터 리브 높이 변화에 따른 비율 함수 g_1 , 리브 간격 변화에 따른 비율 함수 g_2 , 리브 두께 변화에 따른 비율 함수 g_3 와 판 두께 변화

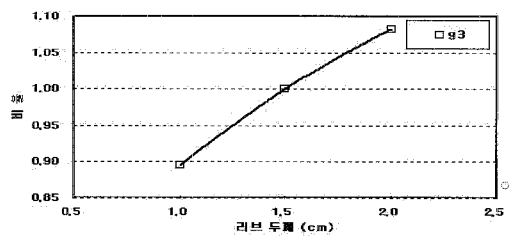
에 따른 비율 함수 g_4 를 얻을 수 있다.



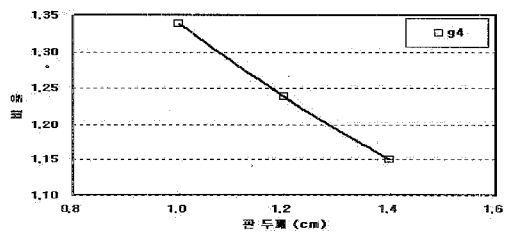
(a) 리브 높이에 대한 함수 (g_1)



(b) 리브 간격에 대한 함수 (g_2)



(c) 리브 두께에 대한 함수 (g_3)



(d) 판 두께에 대한 함수 (g_4)

그림 7. 휨 강성 수정 계수 A 의 비율 함수

이상의 결과로부터, 강성 수정 계수 A 는 리브 높이, 리브 간격, 리브 두께 및 판 두께에 따라 일정한 양상을 나타내어 식 (6)과 같이 리브 높이 변화에 따른 비율 함수 g_1 , 리브 간격 변화에 따른 비율 함수 g_2 , 리브 두께 변화에 따른 비율 함수 g_3 , 판 두께 변화에 따른 기준 수정 계수 함수 g_4 의 곱으로 계산 가능함을 알 수 있으며, 그림 7로부터 구한 각각의 재원에 대한 함수식은 표 9와 같다.

$$A = g_1 \times g_2 \times g_3 \times g_4 \quad (6)$$

표 9. 각각의 제원에 대한 강성 수정 계수의 비율 함수

제원	비율 함수
리브 높이	$g_1 = -1.1992 \cdot 10^{-4} \cdot h_1^2 + 2.0765 \cdot 10^{-2} \cdot h_1 + 0.5558$
리브 간격	$g_2 = -9.4979 \cdot 10^{-6} \cdot s^3 + 13.819 \cdot 10^{-4} \cdot s^2 - 6.8533 \cdot s + 2.1381$
리브 두께	$g_3 = 452.04 \cdot 10^{-4} \cdot t_1^2 + 32.355 \cdot 10^{-2} \cdot t_1 + 0.6164$
판 두께	$g_4 = 0.1332 \cdot t^2 - 0.7913 \cdot t + 1.9981$

따라서, 표 9에 나타난 함수를 식 (6)에 대입하여 수정 계수 A 를 계산하면, 보강판을 직교이방성 판 요소로 해석하기 위한 새로운 휨 강성 D_x' 를 간편하게 산정할 수 있다.

본 연구의 효율성을 살펴보기 위하여, 본 연구의 강성 수정 계수를 사용한 경우와 참고문헌(최 영, 2004)의 강성 수정 계수를 사용한 경우의 최대 처짐 결과를 등방성 판 요소로 모델링한 MIDAS의 처짐과 비교하여 오차율로 나타내면 그림 8과 같다.

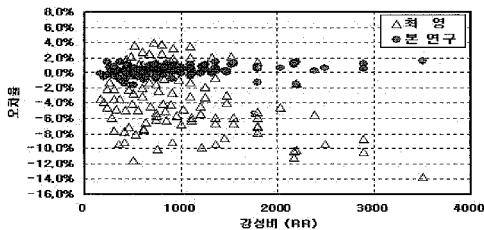


그림 8. 강성 수정 방법의 오차율 비교

그림 8을 살펴보면, 새로운 휨 강성 D_x' 산정을 위하여 본 연구에서 제안한 수정 계수 함수를 적용한 경우 오차율이 $\pm 1.6\%$ 로, 표 5에 나타난 각 보강판에 대한 수정 계수를 적용한 경우의 오차율 $\pm 0.002\%$ 에 비하여 크게 증가하였으나, 사용자의 편리성을 고려할 때 본 연구에서 제안한 수정 계수 함수를 사용하는 것이 더 타당하다고 판단된다.

또한, 최 영(2004)의 수정 계수를 사용한 경우의 오차율이 $-13.7\% \sim +4.1\%$ 인 것에 비해 본 연구의 오차율은 $-1.6\% \sim +1.6\%$ 로 보강판의 제원 변화에 따른 수정 계수를 적용한 본 연구의 결과가 상당한 정확도 향상을 보임을 알 수 있다.

따라서, 평강 리브 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우 본 연구에서 제안한 수정 계수를 적용하면 간편하게 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 적용성 검토

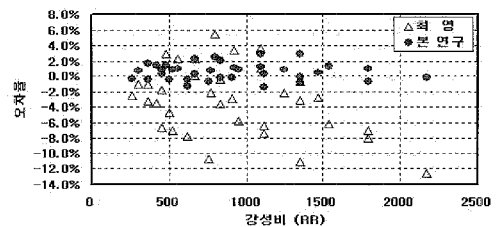
본 장에서는 해석 예제 중 판 두께 1.2cm 인 보강판에 대하여 지지 조건, 변장비, 리브 배치 및 재하 크기에 변화를 주고 제안한 수정 계수 함수식의 효율성을 살펴보았다.

4.1 변장비가 다른 경우

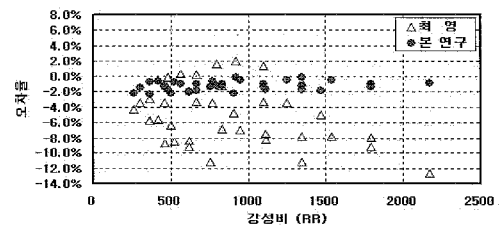
본 절에서는 제안한 함수식의 적용성을 살펴보기 위하여, 표 10과 같이 해석 예제(변장비 2)와 변장비가 다른 보강판에 적용하고, 그 결과를 참고문헌(최 영, 2004)과 비교하였다.

표 10. 변장비에 따른 제원

변장비	$B_x \times B_y$ (cm)
1/2	600 × 1200
3	900 × 600



(a) 변장비 3인 경우



(b) 변장비 1/2인 경우

그림 9. 변장비별 최대 처짐의 오차율

그림 9(a) 변장비 3인 경우를 살펴보면, 제안한 함수식을 적용한 경우 오차율이 $-1.5\% \sim +2.9\%$ 로 해석 예제에 비하여 오차율의 폭 및 최대 오차율이 약간 증가하였으나, 최 영(2004)의 강성 수정 계수를 사용한 경우 오차율이 $-12.5\% \sim +5.4\%$ 인 점을 고려하면, 본 연구에서 제안한 함수식을 사용하면 정확도가 크게 향상됨을 알 수 있다.

그림 9(b) 변장비 1/2인 경우를 살펴보면, 제안한 함수식을 적용한 경우 오차율이 $-2.4\% \sim -0.1\%$ 로 해석 예제에 비하여 최대 오차율이 약간 증가하였으나, 오차율의 폭은 감소

하였음을 알 수 있다. 또한, 참고문헌의 결과와 비교하면 최영(2004)의 강성 수정 계수를 사용한 경우 오차율이 $-12.6\% \sim +2.1\%$ 를 나타내어 제안한 함수식을 사용하는 것이 정확도 측면에서 더 타당한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, 제안한 함수식을 변장비가 다른 경우에 적용한 결과, 해석 예제에 비하여 오차율의 증가가 크지 않으며, 참고문헌의 결과에 비하여 정확도가 크게 향상되는 양상을 나타내어 변장비가 다른 경우에 대한 제안한 함수식의 효율성을 확인 할 수 있었다.

4.2 지지 조건이 다른 경우

본 절에서는 해석 예제와 같은 제원의 평강 리브 보강판에 대하여 지지 조건을 4변 단순지지로 변화시키고, 제안한 함수식을 적용한 뒤, 그 결과를 참고문헌(최영, 2004)과 비교하여 살펴보았다.

지지 조건에 따른 비교를 위하여 2변 단순지지된 경우와 4변 단순지지된 경우의 해석 결과를 나타내면 그림 10과 같다.

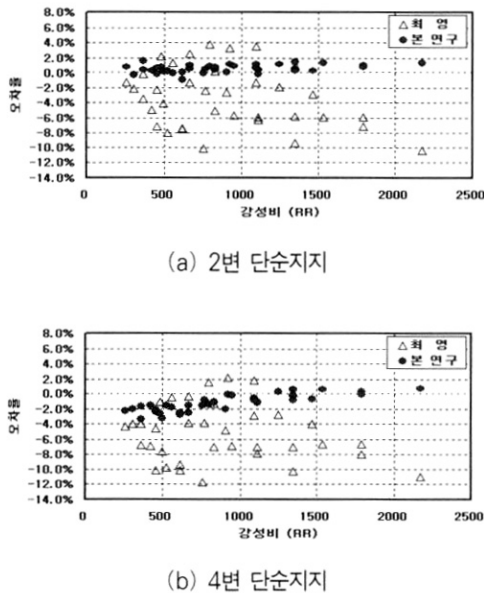


그림 10. 지지조건에 따른 최대 처짐의 오차율

그림 10을 살펴보면, 2변 단순지지된 경우와 4변 단순지지된 경우 모두 최영(2004)의 수정 계수를 적용한 경우에 비하여 정확도가 크게 향상되었음을 알 수 있다. 또한 그림 10에서 최영(2004)의 수정 계수를 적용한 경우를 살펴보면, 2변 단순지지된 경우 $-10.36\% \sim +3.83\%$, 4변 단순지지된 경우 $-11.7\% \sim +2.2\%$ 로 (-)쪽으로 오차율이 약간 내려가는 경향을 나타내었으며, 본 연구의 수정 계수를 적용한 경우에도 2변 단순지지된 경우 $-0.97\% \sim +1.53\%$, 4변 단순지지

된 경우 $-3.37\% \sim +0.73\%$ 로 오차율이 (-)쪽으로 내려가는 양상을 나타내었다. 이러한 경향은 지지 조건이 다른 경우 그림 11에 나타난 바와 같이 전체적인 처짐 양상이 달라짐에 따라 나타난 것으로, 실제 보강판의 처짐에선 리브의 비틀림 강성의 영향이 크게 작용하는 반면, 직교이방성 판 해석시에는 이러한 영향이 제대로 고려되지 않기 때문에 나타난 현상으로 풀이된다.

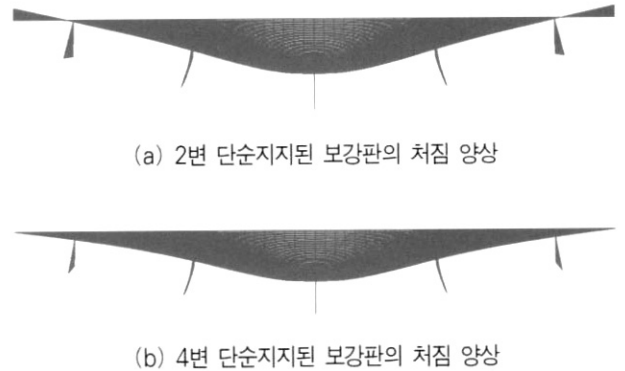


그림 11. 지지 조건에 따른 보강판의 처짐 양상

이상으로부터, 지지 조건에 따라 전체적인 처짐 양상에 차이가 있음을 알 수 있었으며, 지지 조건이 다른 보강판에 제안한 함수식을 적용한 결과, 해석 예제에 비하여 오차율의 증가가 크지 않으며, 참고문헌의 결과에 비하여 정확도가 크게 향상되는 양상을 나타내어 제안한 함수식의 효율성을 확인 할 수 있었다.

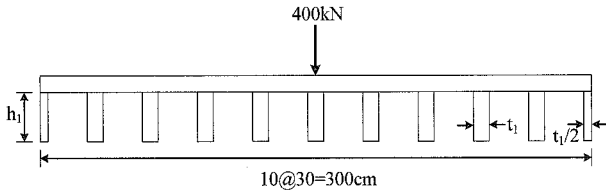
4.3 리브 배치가 다른 경우

본 연구에서는 그림 12(a)에 나타난 것과 같이 보강판 중앙에 위치한 리브 위에 하중이 작용하는 경우를 기준으로 연구를 수행하였으며, 그림 12(b)와 같이 리브 사이 강판에 직접 하중이 작용하는 경우에는 그림 13(b)에 나타난 것과 같이 국부 처짐이 발생하게 되나, 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우 리브의 강성을 전체 판에 나누어 고려하기 때문에 이러한 거동을 표현할 수 없게 된다.

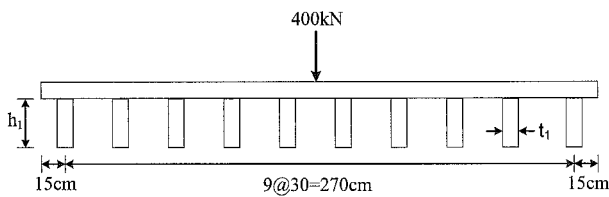
본 절에서는 리브 배치가 달라져 리브 사이 강판에 직접 하중이 작용하여 국부 거동이 발생하는 경우에 대하여 기존의 연구(주석범, 2005)와 연계하여 본 연구에서 제안한 함수식의 효율성을 살펴보려고 한다.

기존의 연구에 따르면, 본 연구의 해석 예제(모델 1)는 보강판의 전체적인 처짐을 나타내며, 리브 배치가 다른 경우(모델 2)에는 하중 재하점 근처에서만 국부 처짐이 발생하게 되므로 모델 2에서 모델 1의 처짐을 뺀 값을 국부 처짐이라 정

의하면, 전체적인 처짐과 국부 처짐 사이에는 일정한 양상을 나타내어 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율은 리브 간격별로 강성비의 2차 함수로 표현할 수 있으며, 이때 리브 간격별 2차 함수의 계수 값은 표 11과 같다.



(a) 본 연구의 해석 예제 (모델 1)



(b) 리브 배치가 다른 경우 (모델 2)

그림 12. 보강판의 리브 배치 형상



(a) 모델 1의 처짐 양상

(b) 모델 2의 처짐 양상

그림 13. 보강판의 처짐 양상

표 11. 국부 처짐 비율 함수

리브 간격	$L/G = a \cdot RR^2 + b \cdot RR + c$		
	a	b	c
30	$-9.80 \cdot 10^{-9}$	$1.943 \cdot 10^{-4}$	0.0241
40	$-2.36 \cdot 10^{-8}$	$3.624 \cdot 10^{-4}$	0.0070
50	$-3.19 \cdot 10^{-8}$	$5.321 \cdot 10^{-4}$	0.0544
60	$-4.79 \cdot 10^{-8}$	$8.101 \cdot 10^{-4}$	0.0239

보강판의 해석시 이러한 국부 처짐 비율 함수를 모델 1의 중앙점 처짐 결과에 적용하여 국부 처짐을 계산한 뒤 그 결과를 합산하면 국부 처짐이 발생한 모델 2의 최대 처짐을 계산할 수 있으며, 모델 1의 MIDAS 해석 결과에 국부 처짐 비

율 함수를 적용한 뒤, 실제 국부 처짐이 발생한 모델 2와 비교하여 오차율로 나타내면 그림 14와 같다.

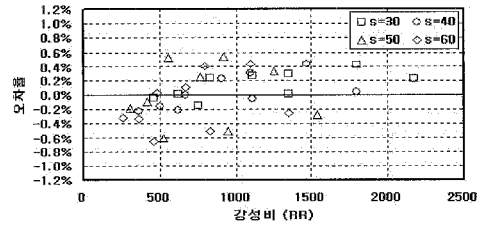


그림 14. 국부 처짐 함수식 적용시 오차율 (MIDAS)

그림 14를 살펴보면 오차율이 $-0.66 \sim +0.55\%$ 로 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있으며, 그림 12(b)와 같이 국부 처짐이 발생하는 보강판에 대하여 최 영의 수정 계수를 사용하는 경우와 본 연구의 수정 계수를 사용하는 경우에 앞서 언급한 방법처럼 표 11의 함수식을 적용한 뒤, 그 결과를 실제 국부 처짐이 발생한 모델 2와 비교하여 나타내면 그림 15와 같다.

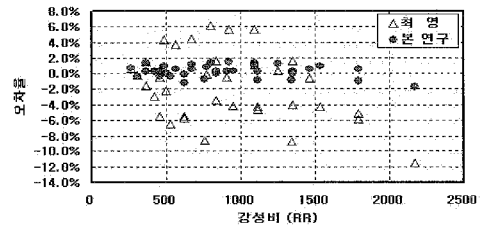


그림 15. 국부 처짐 비율 함수식 적용시 오차율 (ORTHO)

그림 15를 살펴보면, 본 연구에서 제안한 함수식을 적용한 경우 오차율이 $-1.7\% \sim +1.6\%$ 로 해석 예제에 비하여 오차율의 증가가 크지 않으며, 최 영(2004)의 강성 수정 계수를 사용한 경우 오차율이 $-11.5\% \sim +6.2\%$ 인데 비하여 정확도가 크게 향상됨을 알 수 있는데, 이는 앞서 살펴본 바와 같이 모델 1의 최대 처짐 결과에서 본 연구가 더 좋은 정확도를 나타냈기 때문에 나타난 현상으로 풀이된다.

이상의 결과로부터, 리브 배치가 달라져 국부 처짐이 발생하는 보강판의 경우에도, 본 연구 결과가 기존의 연구에 비하여 더 좋은 정확도를 나타내어, 본 연구에서 제안한 함수식과 참고문헌(주석범, 2005)의 결과를 이용하면 간편하게 국부 처짐 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 재하 크기가 다른 경우

본 절에서는 집중하중으로부터 구한 본 연구 결과가 재하 크기가 달라지는 경우에도 적용 가능함을 살펴보기 위하여,

400kN의 하중이 보강판 중앙에 위치한 30×30cm의 정사각 형에 분포하여 재하되는 경우(주석범, 2005)에 대한 해석을 수행하였으며, 그 해석 결과를 참고문헌(최 영, 2004)의 결과와 비교하여 나타내면 그림 16과 같다.

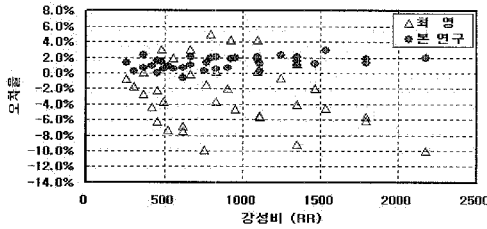


그림 16. 재하 크기가 다른 경우의 오차율

그림 16을 살펴보면, 본 연구의 함수식을 적용한 경우 오차율이 -0.7%~+2.9%로 해석 예제에 비하여 오차율의 폭 및 최대 오차율의 증가가 크지 않음을 알 수 있으며, 최 영(2004)의 강성 수정 계수를 사용한 경우 오차율이 -10.1%~+4.9%인 점을 고려하면, 재하 크기가 다른 경우에도 참고문헌에 비하여 본 연구에서 제안한 함수식을 적용하면 정확도가 크게 향상됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우 보강판 제원에 따라 달라지는 정확도 문제를 해결하기 위하여, 보강판의 휨 강성과 처짐에 대하여 보강판 제원 변화에 따른 민감도 분석을 실시하고, 등방성 판 요소로 모델링한 MIDAS의 해석 결과를 기준으로 각각의 제원별 직교이방성 휨 강성에 대한 수정 계수를 산정하고, 민감도 분석을 바탕으로 수정 계수의 양상을 정형화하고자 하였으며, 본 연구의 수행 결과를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

- (1) 각각의 제원 변화에 따른 민감도 분석 결과, 휨 강성은 리브 높이, 리브 두께, 리브 간격, 판 두께의 순서로 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 처짐은 리브 높이에 대한 영향이 가장 컸으며, 다음으로 리브 간격, 판 두께, 리브 두께 순서인 것을 알 수 있었다.
- (2) MIDAS 결과를 기준으로 직교이방성 휨 강성의 수정 계수를 산정하고 수정 계수의 상대적인 비율을 살펴본 결과, 판 두께와 상관없이 리브 높이 변화, 리브 간격 변화, 리브 두께 변화에 따라 비슷한 값을 나타내었으며, 판 두께는 기준 보강판의 수정 계수에만 영향을 미침을 알 수 있었다.

- (3) 각 제원 변화에 따른 휨 강성 수정 계수의 비율은 중앙 값을 사용하여 하나의 함수로 표현할 수 있으며, 이러한 수정 계수의 비율 함수를 사용하여 간편하게 수정된 직교이방성 휨 강성을 산정할 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 각 제원에 따른 비율 함수를 이용하여 새로운 휨 강성 D_x' 를 산정하고 해석 예제에 적용한 결과, 참고문헌의 강성 수정 계수를 사용한 경우의 오차율이 -13.7%~+4.1%인데 비하여 본 연구의 함수식을 사용한 경우에는 오차율이 -1.6%~+1.6%로 크게 줄어들어 직교이방성 판 해석의 정확도가 크게 향상됨을 알 수 있었다.
- (5) 지지 조건, 변장비, 리브 배치 및 재하 크기가 다른 보강판에 제안한 수정 계수 함수식을 적용한 결과, 해석 예제에 비하여 오차율의 증가가 크지 않으며, 참고문헌의 수정 계수를 사용한 경우에 비해 오차율이 크게 감소하여 제안한 함수의 효율성을 확인 할 수 있었다.

따라서, 평강 리브 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우에 본 연구에서 제안한 수정 계수 비율 함수를 이용하여 보강판의 직교이방성 휨 강성을 보정하면, 간편하게 상당한 정확도의 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김창수(1996) 강상판 해석을 위한 직교이방성 판 요소의 개발, 석사학위논문, 서울대학교.

마이더스아이티(2002) 마이더스로 배우는 구조역학, Dooans Communication.

최 영(2004) 개단면 리브를 갖는 보강판의 직교이방성 강성에 관한 연구, 석사학위논문, 세명대학교.

주석범(2005) 집중하중을 받는 개단면 리브 보강판의 국부 거동, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제 17권, 제 5호, pp. 593-604.

최창근(2002) 유한요소법, 테크노프레스

AISC(1963) Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges, American Institute of Steel Construction, USA.

Cook, R. D., Malkus, D. S. and Plesha, M. E.(1989) Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, USA.

Troitsky, M. S.(1992) Orthotropic Bridges : Theory and Design, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, USA.

(접수일자 : 2007. 1. 15 / 심사일 2007. 2. 12 / 심사완료일 2007. 3. 19)