

집중하중을 받는 개단면 리브 보강판의 국부 거동

The Local Behavior of Stiffened Plates with Open Ribs Subject to a Concentrated Load

주 석 범¹⁾

Chu, Seok Beom

요약 : 본 논문에서는 개단면 리브를 갖는 보강판에 대하여 직교이방성 강성비를 매개변수로 하여, 집중하중이 작용하는 경우 발생하는 보강판의 국부 처짐 및 국부 모멘트에 대한 연구를 수행하였다. 보강판의 국부 거동을 파악하기 위하여 리브 사이에 위치한 판의 중앙점에 하중이 작용하는 경우를 고려하였으며, 전체적인 거동을 산정하기 위하여, 판의 중앙에 위치한 리브 위에 하중이 작용하는 경우를 해석하였다. 여러 가지 보강판에 대한 국부 거동을 분석한 결과, 국부 모멘트의 증가 비율은 리브 간격과 상관없이 리브 크기에 따라 일정함을 알 수 있었으며, 또한, 보강판의 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율은 리브 간격과 강성비의 함수로 표현할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 관계식을 예제에 적용한 결과, 실제 국부 처짐이 발생하는 경우와 상당한 정확도를 나타내었으며, 또한 직교이방성 판 해석에 적용한 결과, 상당한 정확도의 증가를 나타내었다. 따라서, 본 연구에서 제안한 함수식을 이용하면, 개단면 리브를 갖는 보강판의 전체 거동으로부터 간편하게 국부 거동 결과를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT : In this paper, the parametric study on the local displacement and the local moment due to a concentrated load is performed for stiffened plates with open ribs and the orthotropic rigidity ratio of stiffened plates is selected as the parameter. For estimating the local behavior, stiffened plates loaded on the center of plates between the ribs were considered and for the global behavior, stiffened plates loaded on the rib at the center of plates were analyzed. The Analyzed results for the local behavior of stiffened plates show that the increasing ratio of the local moment according to rib sizes is constant regardless of rib spaces and the ratio of the local displacement to the global displacement can be expressed as a function of the rib space and the rigidity ratio. The application of functions to examples shows good accuracy in comparison with the local behavior of stiffened plates loaded on the center of plates and the application to the orthotropic analysis of stiffened plates improves accuracy. Therefore, using functions proposed in this study, the local behavior can easily be estimated from the global behavior of stiffened plates with open ribs.

핵심용어 : 보강판, 국부 처짐, 국부 모멘트, 강성비, 리브 간격, 개단면 리브

KEYWORDS : Stiffened Plates, Local Displacement, Local Moment, Rigidity Ratio, Rib Spaces, Open Ribs

1. 개요

얇은 강판에 리브를 덧붙인 구조의 보강판에서 리브가 전체 구조계의 강성을 증가시키는 효과에 대한 연구는 많이 수행되었지만, 집중하중 또는 작은 면적의 분포하중이 보강재 사이의 강판에 직접 작용하여 국부 처짐이 크게 발생할 때, 리브가 국부 거동에 미치는 영향에 대해서는 아직 명백히 밝혀진 바가 없다. 또한, 보강판을 간편하게 해석하기 위하여 여러 가지 연구가 진행되었으나, 대부분 전체적인 거동에 초점

이 맞추어져 있으며, 특히 직교이방성 판으로 해석하는 경우, 연구가 보강판의 전체적인 거동에 국한되어 있어 집중하중 등에 의해 발생하는 국부 거동을 표현하는데 한계를 나타내고 있다(김창수, 1996; 최 영, 2004).

리브가 보강판의 국부 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 하중의 형태, 리브의 형태, 크기 및 간격, 판의 두께 및 변장비 등 여러 가지 변수가 고려되어야 하나, 본 연구에서는 다음과 같은 범위에 국한하여 매개변수 연구를 수행하도록 하고, 나머지 변수에 대해서는 본 연구를 토대로 추후에 연구

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

본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

하고자 한다.

먼저, 하중의 형태는 보강판의 국부 처짐을 가장 크게 발생시키는 집중하중을 선택하였다. 둘째, 리브의 형태는 매개변수를 줄여 보강판의 거동 파악을 쉽게 하기 위하여, 보강판의 비틀림 강성에 거의 영향을 주지 않는 개단면 리브를 선택하였다. 셋째, 하중의 재하 형태는 보강판의 중앙에 위치한 리브 위에 재하되는 경우와 리브 사이에 위치한 보강판의 중앙점에 재하되는 두 가지 경우를 고려하였다.

2. 매개변수 및 해석 예제

본 연구에서는 평강 리브와 L형 리브를 갖는 여러 가지 보강판에 대한 매개변수 연구를 통하여, 리브가 보강판의 국부 거동에 미치는 영향을 파악하고자 하며, 이를 위한 매개변수 및 해석 예제는 다음과 같다.

2.1 매개변수

그림 1과 같은 개단면 리브가 촘촘히 배치된 보강판은 기하학적 직교이방성 거동을 보이게 되며, 이 점에 착안하여, 본 연구에서는, 보강판의 거동을 나타내기 위한 매개변수로 식 (1)과 같은 보강판의 직교이방성 강성비(RR : Rigidity Ratio)를 사용하였다.

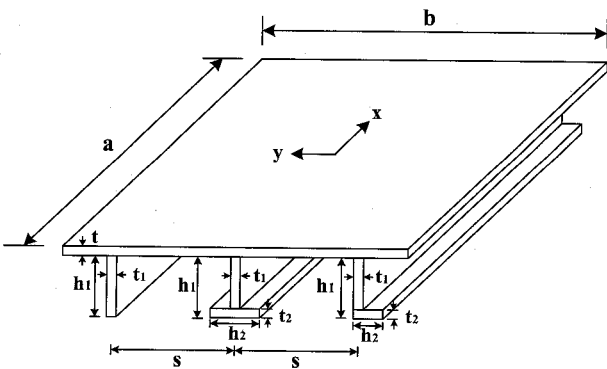


그림 1. 개단면 리브를 갖는 보강판

$$RR = \frac{D_x}{D_y} = \frac{D_y + \frac{Ete_y^2}{(1-\nu^2)} + \frac{EI_n}{s}}{D_y} \quad (1)$$

여기서, e_y 는 판 중심부터 보강판 도심까지의 거리, I_n 은 보강판 도심에 대한 보강재의 단면 2차 모멘트이며, D_y

는 판만의 휨 상성이다 (AISC, 1963; Troitsky, 1992).

2.2 해석 예제

본 연구에서는 리브의 영상 빛 크기 등이 보강판의 국부 거동에 미치는 효과를 살펴보기 위하여, 그림 2와 같이 폭 300cm, 길이 600cm를 갖는 2변 단순지지 보강판을 기본으로, 리브의 크기와 간격 및 판 두께를 변화시킨 예제를 해석하였다.

본 예제에서 변화시킨 평강 리브를 갖는 보강판의 제원은 표 1과 같으며, L형 리브를 갖는 보강판의 제원은 표 2와 같다(최영, 2004).

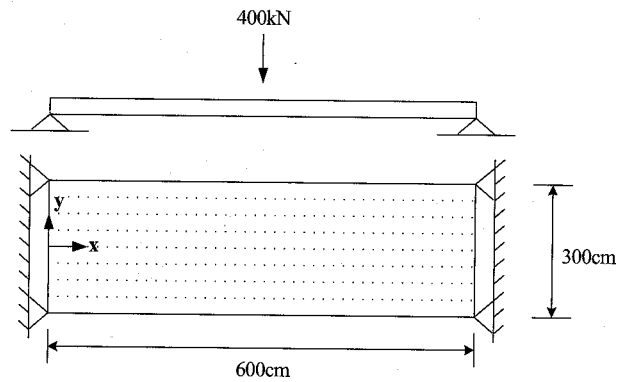


그림 2. 해석 예제

표 1. 판 두께 및 평강 리브의 제원 (cm)

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

표 2. 판 두께 및 L형 리브의 제원 (cm)

판 두께 (t)	L형 리브의 제원		리브 간격 (s)
	h ₁ × h ₂	t ₁ × t ₂	
1.0	20 × 9	0.9 × 1.4	30
1.2	25 × 9	1.0 × 1.5	40
1.4	30 × 9	1.1 × 1.6	60

L형 리브의 경우 매개변수 연구를 위하여 표 2에 나타난 3개의 기본적인 L형 리브 외에 리브 두께를 변화시킨 L형 리브까지 포함하여 9가지 형태로 해석하였다.

하중은 집중하중 400kN을 보강판의 중앙점에 재하하였으며, 보강판의 전체 거동과 국부 거동 산정을 위하여 그림 3 및 4와 같이 각각의 제원에 대하여 2가지 형태로 모델링하고, 한 절점당 5 자유도를 갖는 등방성 판 요소를 이용하여 선형 해석하였다(마이다스아이티, 2002; Cook, 1989).

그림 3의 모델 1은 보강판의 전체 거동을 산정하기 위한 것으로 중앙에 위치한 리브 위에 하중을 재하하였으며, 그림 4의 모델 2에서는 국부 거동을 발생시키기 위하여 리브 사이에 위치한 판의 중앙에 하중을 재하하였다. 이때, 모델 1은 그림 3에서 보듯이 판의 양 끝단에 위치한 리브를 원래 리브 크기의 반을 사용함으로써 그림 4의 모델 2와 보강판의 강성이 같도록 모델링 하였다.

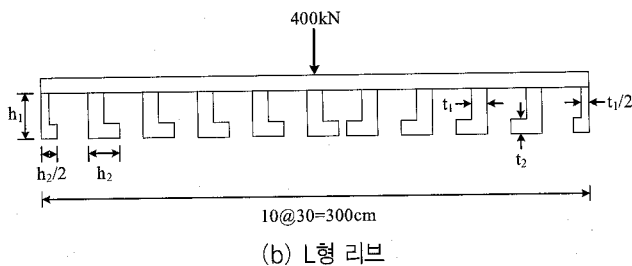
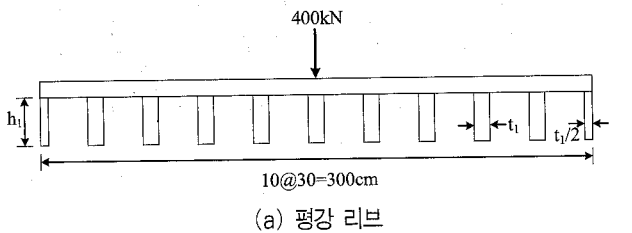


그림 3. 전체 거동 산정을 위한 모델 1 (s=30cm)

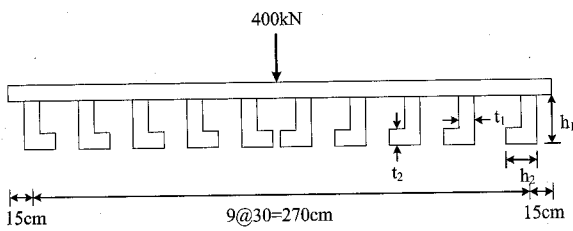
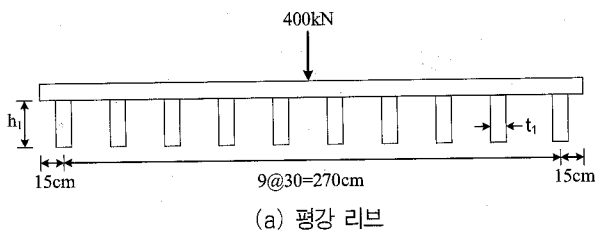


그림 4. 국부 거동 산정을 위한 모델 2 (s=30cm)

3. 해석 결과

3.1 평강 리브를 갖는 보강판

3.1.1 국부 처짐 양상

전체 거동 산정을 위한 모델 1과 국부 거동 산정을 위한 모델 2를 비교하기 위하여 먼저, 모델 1과 모델 2의 전체적인 처짐 양상을 나타내면 그림 5와 같다.



(a) 모델 1의 처짐 양상



(b) 모델 2의 처짐 양상

(b) 모델 2의 처짐 양상

그림 5. 보강판의 처짐 양상 (s=30cm)

그림 5를 살펴보면 모델 1과 모델 2 모두 전체적인 처짐 양상이 완전한 곡선을 그리며 비슷하게 나타남을 알 수 있으며, 모델 2에서는 보강판의 중앙점에서 집중하중으로 인한 국부 처짐이 발생하는 것을 알 수 있다.

매개변수에 따른 최대 처짐의 양상을 살펴보기 위하여 전체 처짐만 발생한 모델 1과 국부 처짐이 함께 발생한 모델 2의 최대 처짐 결과를 판 두께별로 나타내면 그림 6과 같다.

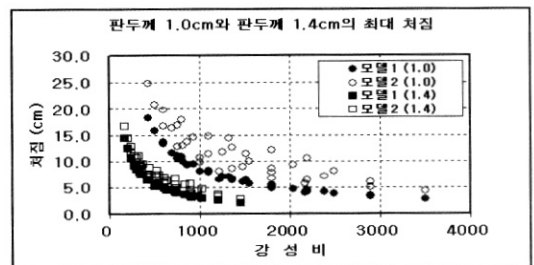


그림 6. 보강판의 최대 처짐

그림 6을 살펴보면, 전체 처짐을 나타내는 모델 1은 강성비에 따라 일정하게 감소하는 양상을 보이며, 국부 처짐이 함께 발생한 모델 2는 전체 처짐과 비슷하게 강성비가 증가

함에 따라 감소하는 경향을 나타내나, 판 두께가 얇을수록 전체 처짐으로부터 넓게 퍼지는 경향을 나타내어, 판 두께가 얇을수록 국부 처짐이 크게 발생하고, 리브가 국부 처짐에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있다.

모델 2에서 전체 처짐과 국부 처짐을 구분 짓기는 어려운 일로, 본 연구에서는 모델 2에서 모델 1의 값을 뺀 값을 국부 처짐으로 가정하고(주석범 등, 2005), 중앙점의 국부 처짐을 판 두께 및 리브 간격별로 나타내면 그림 7과 같다.

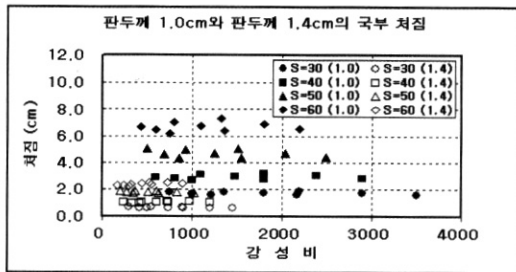


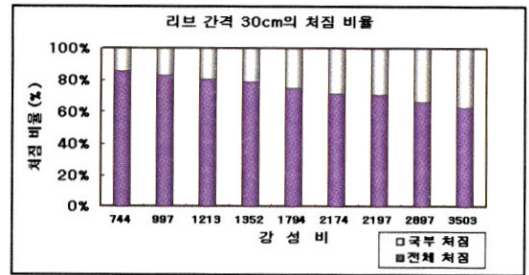
그림 7. 보강판의 국부 처짐 (평강 리브)

그림 7을 살펴보면, 일정한 판 두께를 갖는 보강판에서 리브 간격이 증가함에 따라 훨씬 큰 국부 처짐이 발생하고, 리브 간격별로 강성비와 상관없이 비슷한 국부 처짐이 발생하여, 리브의 크기보다는 리브의 간격이 국부 처짐에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 리브의 크기와 간격이 같더라도 판 두께가 두꺼워짐에 따라 국부 처짐이 작아짐을 알 수 있으며, 이는 판 두께 증가에 따른 y 방향 휨 강성 D_y 및 x 방향 휨 강성 D_x 가 증가하여 나타난 현상으로, 그림 6에 나타난 전체 처짐에서도 이와 유사한 양상을 나타내었다.

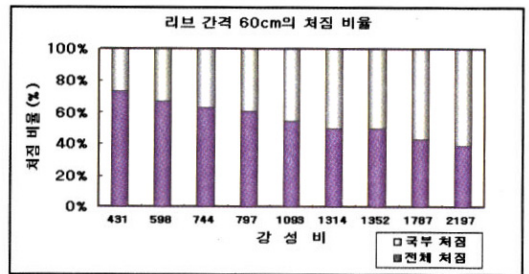
리브 간격에 따른 국부 처짐의 경향을 살펴보기 위하여, 판 두께 1.2cm인 모델 2의 처짐에서 전체 처짐과 국부 처짐이 차지하는 비율을 나타내면 그림 8과 같다.

그림 8을 살펴보면, 모든 간격에서 강성비가 증가함에 따라 국부 처짐 비율이 증가함을 볼 수 있는데, 이는 그림 7에서 보듯이 국부 처짐은 리브 간격에 따라 강성비와 상관없이 비슷한 반면, 전체 처짐은 그림 6에서 보듯이 강성비가 증가함에 따라 감소하기 때문에 나타난 현상으로 풀이된다.

또한 리브 간격이 증가함에 따라 국부 처짐 비율이 증가함을 알 수 있으며, 이중 강성비 744에서 국부 처짐 비율을 비교해보면 리브 간격 30cm일 때 14.1%에서 리브 간격 60cm일 때 36.8%로 증가함을 알 수 있는데, 이는 전체 처짐은 강성비가 같으면 같은 처짐을 나타내는 반면, 국부 처짐은 리브 간격의 증가에 따라 증가하기 때문에 나타난 현상으로 풀이된다.



(a) 리브 간격 30cm 인 경우



(b) 리브 간격 60cm 인 경우

그림 8. 모델 2의 처짐 비율 (평강 리브)

그림 8로부터 국부 처짐 비율은 강성비가 커짐에 따라 증가하며, 그 비율은 리브 간격에 따라 다름을 알 수 있으며, 이러한 경향을 고려하여 모든 판 두께에 대하여 각각의 리브 간격별로 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율을 나타내면 그림 9와 같다.

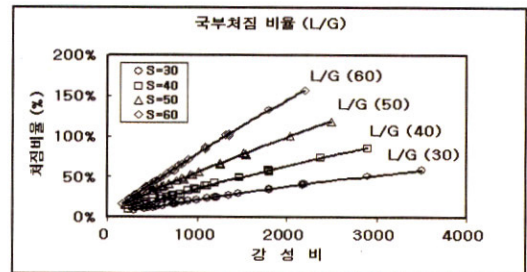


그림 9. 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율 (평강 리브)

그림 9를 살펴보면, 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율은 판 두께와 상관없이 일정한 형태로 나타남을 알 수 있는데, 이는 그림 6 및 그림 7에서 보듯이 전체 처짐과 국부 처짐 모두 판 두께의 영향을 받으며, 이러한 영향이 서로 상쇄되어 나타난 결과로 풀이된다.

또한 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율은 각각의 리브 간격별로 직교이방성 강성비에 따른 일정한 함수 형태로 나타나며, 분석 결과 강성비에 대한 2차 함수 형태만 사용하여도 좋은 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

각 리브 간격별 함수를 정리하여 나타내면 표 3과 같다.

표 3. 국부 처짐 비율 함수 (평강 리브)

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

표 3의 각 계수 값은 리브 간격에 대한 3차 함수로 표현할 수 있으며, 이를 표로 나타내면 다음과 같다.

표 4. 계수 함수 (평강 리브)

항	(계수) = $a \cdot s^3 + b \cdot s^2 + c \cdot s + d$		
	A	B	C
a	$-2.200 \cdot 10^{-12}$	$+1.778 \cdot 10^{-8}$	$-2.373 \cdot 10^{-5}$
b	$+2.915 \cdot 10^{-10}$	$-2.126 \cdot 10^{-6}$	$+3.171 \cdot 10^{-3}$
c	$-1.365 \cdot 10^{-8}$	$+9.983 \cdot 10^{-5}$	$-1.358 \cdot 10^{-1}$
d	$+1.966 \cdot 10^{-7}$	$-1.369 \cdot 10^{-3}$	+1.886

표 3과 표 4의 식을 모델 1에 적용하여 전체 처짐으로부터 모든 예제의 국부 처짐을 계산하고, 그 결과를 국부 처짐이 발생한 모델 2와 비교하면 그림 10과 같다.

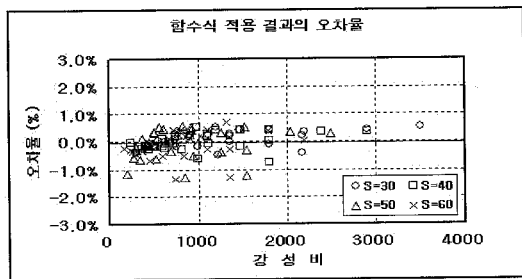
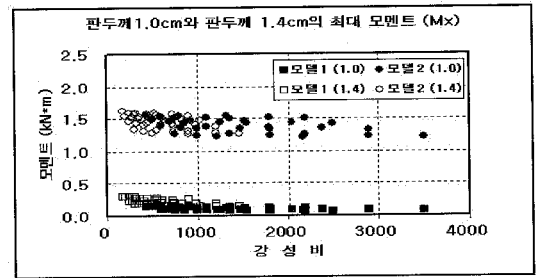


그림 10. 처짐 함수식 적용 결과 (평강 리브)

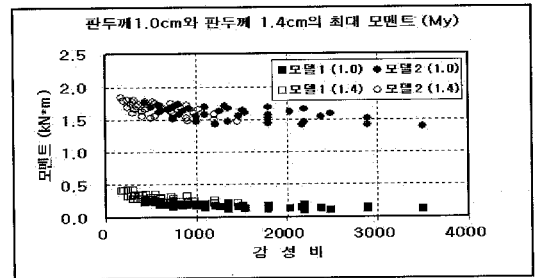
그림 10에서 보듯이 제안한 함수식을 이용하여 국부 처짐을 계산한 결과, 실제의 국부 처짐이 발생하는 모델 2와 비교하여 오차율이 (-)1.34~(+)0.69% 이내로 매우 작아 제안한 함수식이 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있다.

3.1.2 국부 모멘트 양상

재하 형태에 따른 모멘트의 양상을 살펴보기 위하여 전체 처짐만 발생한 모델 1과 국부 처짐이 함께 발생한 모델 2의 최대 모멘트 결과를 판 두께별로 비교하여 나타내면 그림 11과 같다.



(a) Mx

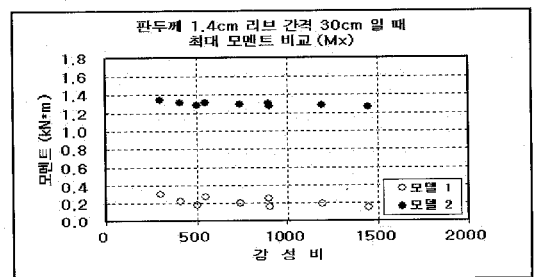


(b) My

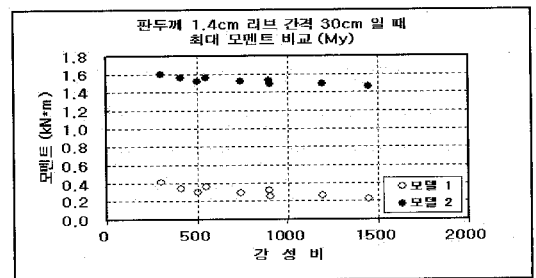
그림 11. 보강판의 최대 모멘트 결과

그림 11을 살펴보면, Mx 및 My 모두 처짐의 양상과 다르게 판 두께에 따른 영향이 크지 않음을 알 수 있으며, 모델 1에 비하여 모델 2의 결과가 매우 크게 발생하여 국부 모멘트가 크게 발생하였음을 알 수 있다.

강성비에 따른 모델 1과 모델 2의 모멘트 변화를 살펴보기 위하여, 판 두께 1.4cm 리브 간격 30cm인 경우만 따로 나타내면 그림 12와 같다.



(a) Mx

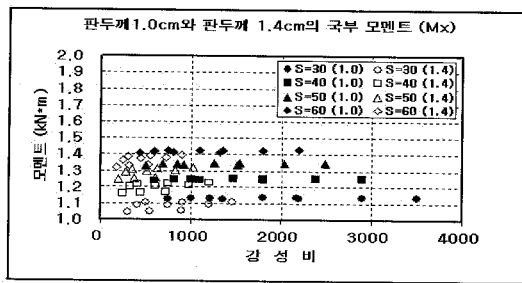


(b) My

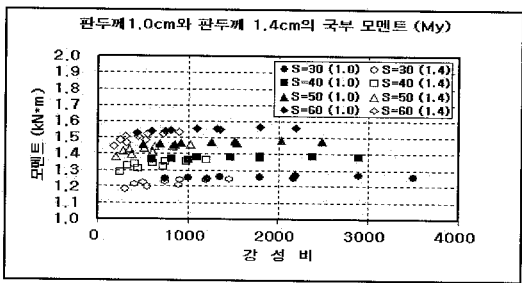
그림 12. 모델 1과 모델 2의 결과 비교

그림 12를 살펴보면 모델 1과 모델 2 모두 강성비의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내나, 모델 2의 감소율에 비하여 모델 1의 감소율이 좀 더 크게 발생하여, 국부 모멘트가 강성비에 따라 증가하게 됨을 알 수 있다. 또한 분석 결과, 판 두께, 리브 간격, 리브 두께 등이 각 모멘트에 미치는 영향이 달라 치짐에서와 같이 전체 모멘트에 대한 국부 모멘트의 비율이 일정한 양상으로 나타나지 않음을 알 수 있었다.

모델 2에서 모델 1의 결과를 뺀 값을 국부 모멘트로 가정하고, 판 두께 및 리브 간격별로 나타내면 그림 13과 같다.



(a) Mx



(b) My

그림 13. 보강판의 국부 모멘트 (평강 리브)

그림 13을 살펴보면, 판 두께가 증가함에 따라 국부 모멘트가 감소하나 그 감소량은 리브 간격에 따른 차이에 비하여 작음을 알 수 있으며, 분석 결과 같은 크기와 간격의 리브를 갖는 보강판에서 판 두께가 1.0cm에서 1.4cm로 증가함에 따라 국부 모멘트가 약 7% 정도 감소하고, 그 감소 비율은 리브 간격과 상관없이 거의 일정함을 알 수 있었다.

또한 같은 판 두께를 갖는 경우, 모든 리브 간격에서 강성비가 증가함에 따라 국부 모멘트가 약간 증가하는 경향을 나타내는데, 분석 결과 이러한 증가는 판 두께별로 리브 간격과 상관없이 리브 크기에 따라 일정한 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

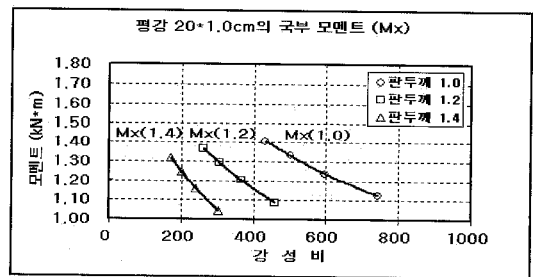
그 증가 비율을 리브 두께 1.0cm, 리브 높이 20cm일 때를 기준으로 나타내면 표 5 및 6과 같으며, 기준 크기의 리브를 갖는 보강판에서 리브 간격과 판 두께에 따라 달리 발생하는 국부 모멘트를 따로 나타내면 그림 14와 같다.

표 5. 리브 크기에 따른 Mx 증가 비율 (평강 리브)

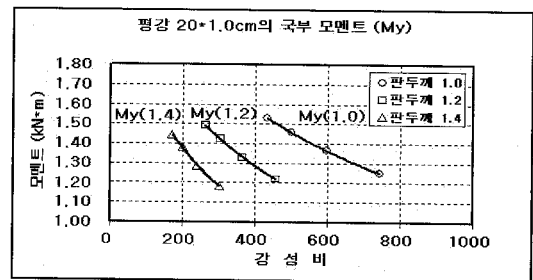
판두께	리브두께		1.0	1.5	2.0
	리브높이				
1.0	20		1	1.0084	1.0094
	25		1.0032	1.0106	1.0116
	30		1.0053	1.0122	1.0132
1.2	20		1	1.0219	1.0292
	25		1.0046	1.0252	1.0319
	30		1.0075	1.0273	1.0338
1.4	20		1	1.0367	1.0522
	25		1.0062	1.0413	1.0559
	30		1.0100	1.0441	1.0583

표 6. 리브 크기에 따른 My 증가 비율 (평강 리브)

판두께	리브두께		1.0	1.5	2.0
	리브높이				
1.0	20		1	1.0050	1.0020
	25		1.0097	1.0131	1.0097
	30		1.0165	1.0190	1.0155
1.2	20		1	1.0167	1.0197
	25		1.0122	1.0268	1.0287
	30		1.0205	1.0337	1.0351
1.4	20		1	1.0289	1.0393
	25		1.0149	1.0414	1.0502
	30		1.0249	1.0498	1.0577



(a) Mx



(b) My

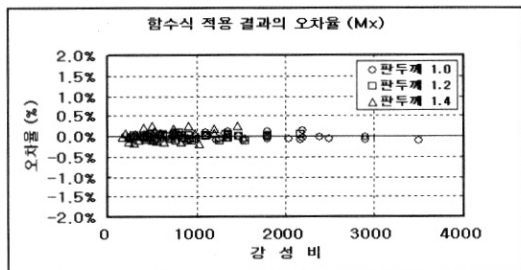
그림 14. 기준 리브를 갖는 보강판의 국부 모멘트 (평강 리브)

그림 14를 살펴보면, 앞서 언급한 바와 같이 국부 모멘트는 리브의 크기와 간격이 같더라도 판 두께가 증가함에 따라 약간 감소하며, 그 차이는 리브 간격에 따른 차이에 비하여 작음을 알 수 있다. 또한 그림 14의 두께 1.0cm, 높이 20cm의 기준 리브를 갖는 보강판의 모멘트는 표 7과 같이 강성비의 2차 함수로 표현 가능함을 알 수 있다.

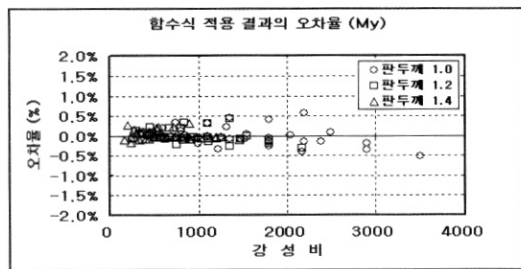
표 7. 모멘트 함수 (평강 리브)

모멘트	판두께	Mo = A · RR ² + B · RR + C		
		A	B	C
Mx	1.0	6.514 10 ⁻⁷	-1.673 10 ⁻³	2.007
	1.2	1.696 10 ⁻⁶	-2.646 10 ⁻³	1.942
	1.4	3.848 10 ⁻⁶	-3.913 10 ⁻³	1.875
My	1.0	6.513 10 ⁻⁷	-1.650 10 ⁻³	2.118
	1.2	1.622 10 ⁻⁶	-2.549 10 ⁻³	2.044
	1.4	3.544 10 ⁻⁶	-3.699 10 ⁻³	1.972

표 5, 6, 7의 결과를 모델 1에 적용하여 국부 모멘트를 산정하고, 그 결과를 모델 2에 대한 오차율로 나타내면, 그림 15와 같다.



(a) Mx



(b) My

그림 15. 모멘트 관계식 적용 결과 (평강 리브)

그림 15를 살펴보면, 제안한 관계식을 이용하여 국부 모멘트를 계산한 결과, 실제 국부 처짐이 발생하는 모델 2와 비교하여 Mx는 (-)0.17~(+)0.26% 이내의 오차율을, My는 (-)0.51~(+)0.55% 이내의 오차율을 나타내어 제안한 관계식이 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있다.

3.2 L형 리브를 갖는 보강판

3.2.1 국부 처짐 양상

모델 1과 모델 2의 최대 처짐 양상을 살펴본 결과, 모델 1과 모델 2 모두 강성비에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 모델 2는 판 두께가 얇을수록 전체 처짐으로부터 넓게 퍼지는 경향을 나타내어 평강 리브와 유사함을 알 수 있었다.

모델 2의 결과에서 모델 1의 결과를 뺀 값을 국부 처짐으로 산정하고, 판 두께와 리브 간격별로 국부 처짐을 나타내면 그림 16과 같다.

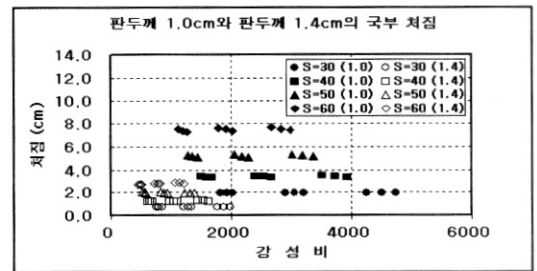
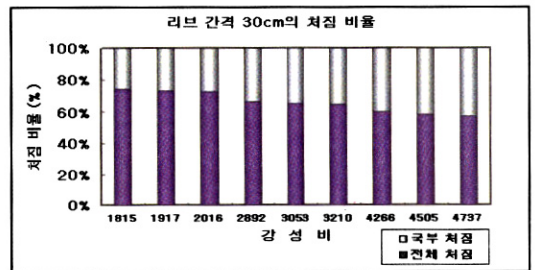
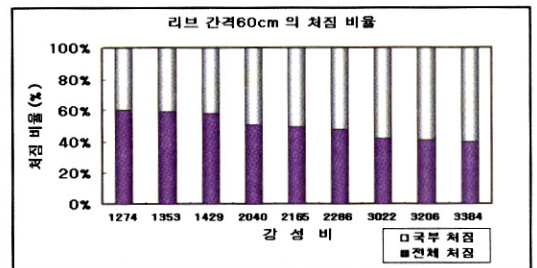


그림 16. 보강판의 국부 처짐 (L형 리브)

그림 16을 살펴보면, 평강 리브보다도 더 뚜렷하게 리브 간격별로 강성비와 상관없이 비슷한 국부 처짐이 발생함을 알 수 있으며, 리브 간격에 따른 국부 처짐의 양상을 살펴보기 위하여, 모델 2의 처짐에서 전체 처짐과 국부 처짐이 차지하는 비율로 나타내면 그림 17과 같다.



(a) 리브 간격 30cm 인 경우



(b) 리브 간격 60cm 인 경우

그림 17. 모델 2의 처짐 비율 (L형 리브)

그림 17을 살펴보면, 평균 리브와 마찬가지로, 모든 리브 간격에서 강성비가 증가함에 따라 국부 처짐 비율이 증가하고, 리브 간격이 증가함에 따라 국부 처짐 비율이 증가하는 경향을 나타내어, 리브 간격과 강성비가 국부 처짐에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

국부 처짐의 경향을 살펴보기 위하여, 모든 판 두께에 대하여 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율을 리브 간격별로 나타내면 그림 18과 같다.

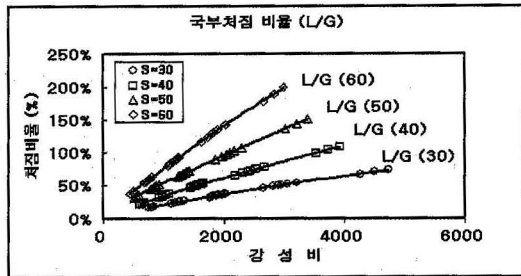


그림 18. 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율 (L형 리브)

그림 18을 살펴보면, 평균 리브와 마찬가지로 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율은 리브 간격별로 직교이방성 강성비의 2차 함수 형태로 표현 가능함을 알 수 있다.

리브 간격별 각각의 함수를 정리하여 나타내면 표 8과 같으며, 표 8의 각 계수 값은 표 9와 같이 리브 간격에 대한 3차 함수로 표현 가능하다.

표 8. 국부 처짐 비율 함수 (L형 리브)

리브 간격	$L/G = A \cdot RR^2 + B \cdot RR + C$		
	A	B	C
30	$-3.00 \cdot 10^{-8}$	$7.378 \cdot 10^{-4}$	0.0575
40	$-1.51 \cdot 10^{-8}$	$4.679 \cdot 10^{-4}$	0.0923
50	$-1.39 \cdot 10^{-8}$	$3.236 \cdot 10^{-4}$	0.0321
60	$-5.40 \cdot 10^{-9}$	$1.727 \cdot 10^{-4}$	0.0431

표 9. 계수 함수 (L형 리브)

항	(계수) = $a \cdot s^3 + b \cdot s^2 + c \cdot s + d$		
	A	B	C
a	$-3.500 \cdot 10^{-12}$	$+2.203 \cdot 10^{-8}$	$-2.770 \cdot 10^{-5}$
b	$+4.565 \cdot 10^{-10}$	$-2.677 \cdot 10^{-6}$	$+3.680 \cdot 10^{-3}$
c	$-1.986 \cdot 10^{-8}$	$+1.210 \cdot 10^{-4}$	$-1.562 \cdot 10^{-1}$
d	$+2.739 \cdot 10^{-7}$	$-1.642 \cdot 10^{-3}$	+2.165

표 8과 표 9의 식을 모델 1에 적용하고, 그 결과를 국부 처짐이 발생한 모델 2와 비교하면 그림 19와 같다.

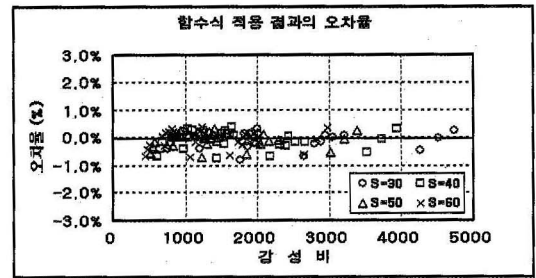
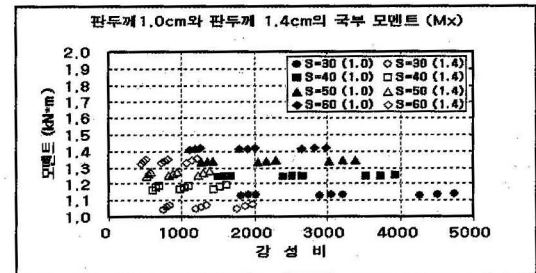


그림 19. 처짐 합수식 적용 결과 (L형 리브)

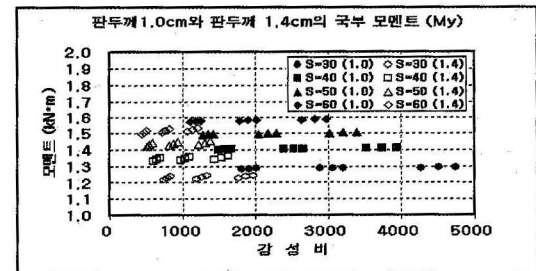
그림 19에서 보듯이 합수식을 적용한 결과, 실제의 국부 처짐이 발생하는 모델 2와 비교하여 오차율이 (-)0.79~(+)0.40% 이내의 범위로 매우 작아 제안한 합수식이 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있다.

3.2.2 국부 모멘트 양상

매개변수에 따른 모델 1과 모델 2의 최대 모멘트 양상은 평균 리브와 유사하게 나타났으며, 모델 2의 결과에서 모델 1의 결과를 뺀 값을 국부 모멘트로 가정하고, 판 두께와 리브 간격별로 나타내면 그림 20과 같다.



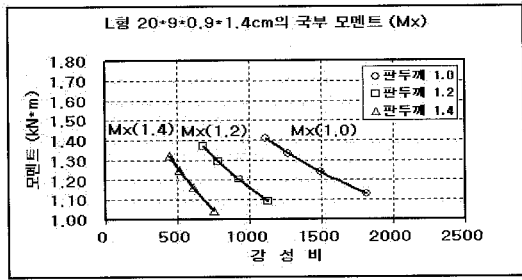
(a) Mx



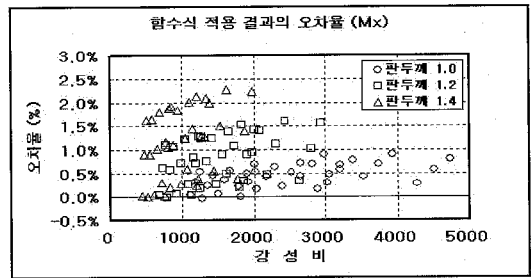
(b) My

그림 20. 보강판의 국부 모멘트 (L형 리브)

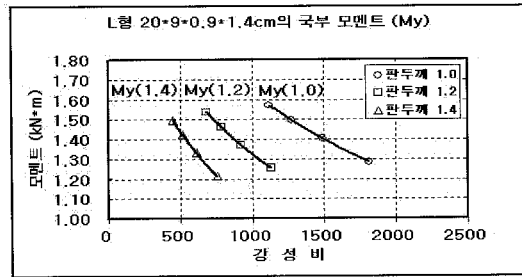
그림 20을 살펴보면, 판 두께의 증가에 따라 모멘트가 약간 감소하고, 판 두께가 일정한 경우 리브 간격이 증가함에 따라 더 큰 국부 모멘트가 발생함을 알 수 있으며, L형 리브 20×9×0.9×1.4를 기준 리브로 하고, 기준 리브를 갖는 보강판의 국부 모멘트만 따로 나타내면 그림 21과 같다.



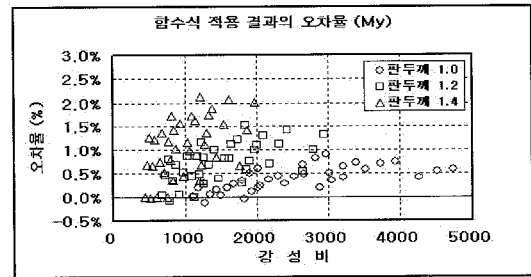
(a) Mx



(a) Mx



(b) My



(b) My

그림 21. 기준 리브를 갖는 보강판의 국부 모멘트 (L형 리브)

그림 22. 기준 리브의 함수식만 적용한 결과

그림 21에 나타난 기준 L형 리브 20×9×0.9×1.4를 갖는 보강판의 모멘트는 강성비의 2차 함수로 표현 가능함을 알 수 있으며, 이를 정리하여 표로 나타내면 표 10과 같다.

표 10. 모멘트 함수 (L형 리브)

모멘트	판두께	$M_0 = A \cdot RR^2 + B \cdot RR + C$		
		A	B	C
Mx	1.0	$1.078 \cdot 10^{-7}$	$-7.178 \cdot 10^{-4}$	2.075
	1.2	$2.737 \cdot 10^{-7}$	$-1.122 \cdot 10^{-3}$	2.007
	1.4	$6.099 \cdot 10^{-7}$	$-1.645 \cdot 10^{-3}$	1.937
My	1.0	$1.243 \cdot 10^{-7}$	$-7.723 \cdot 10^{-4}$	2.281
	1.2	$2.981 \cdot 10^{-7}$	$-1.173 \cdot 10^{-3}$	2.201
	1.4	$6.304 \cdot 10^{-7}$	$-1.679 \cdot 10^{-3}$	2.124

그림 21과 표 10의 모멘트 함수식만을 모델 1에 적용하고, 모델 2의 결과와 비교하면 그림 22와 같다.

그림 22를 살펴보면, Mx 및 My 모두 2.5% 이내의 오차율을 나타내어, 기준 리브의 함수식만 적용하여도 간편하게 상당한 정확도의 국부 모멘트를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

또한, Mx 및 My 모두 판 두께가 두꺼울수록 더 큰 오차가 발생함을 알 수 있으며, 좀 더 정확한 결과를 위하여 L형 20×9×0.9×1.4를 기준으로 리브 크기에 따른 모멘트의 증가 비율을 나타내면 표 11 및 12와 같다.

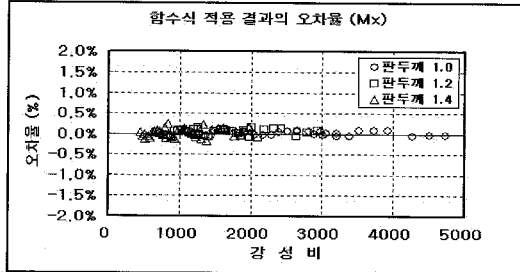
표 11. 리브 크기에 따른 Mx 증가 비율 (L형 리브)

판두께	리브두께 리브높이	0.9 × 1.4	1.0 × 1.5	1.1 × 1.6
		1.0	20 × 9	1
	25 × 9	1.0020	1.0051	1.0073
	30 × 9	1.0038	1.0069	1.0090
1.2	20 × 9	1	1.0073	1.0130
	25 × 9	1.0023	1.0095	1.0150
	30 × 9	1.0045	1.0115	1.0170
1.4	20 × 9	1	1.0116	1.0210
	25 × 9	1.0029	1.0142	1.0234
	30 × 9	1.0055	1.0167	1.0258

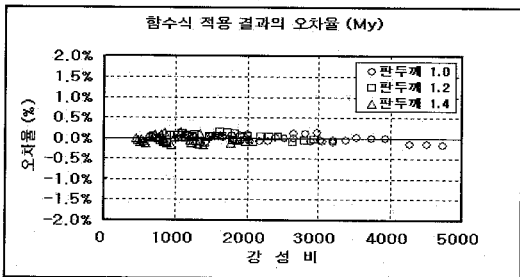
표 12. 리브 크기에 따른 My 증가 비율 (L형 리브)

판두께	리브두께 리브높이	0.9 × 1.4	1.0 × 1.5	1.1 × 1.6
		1.0	20 × 9	1
	25 × 9	1.0033	1.0049	1.0057
	30 × 9	1.0063	1.0078	1.0084
1.2	20 × 9	1	1.0054	1.0093
	25 × 9	1.0040	1.0090	1.0126
	30 × 9	1.0077	1.0124	1.0158
	1.4	20 × 9	1	1.0090
	25 × 9	1.0052	1.0137	1.0204
	30 × 9	1.0097	1.0178	1.0242

표 10의 함수식과 표 11 및 12의 증가 비율을 모델 1에 적용하여 좀 더 정확한 국부 모멘트를 계산하고, 이를 모델 2에 대한 오차율로 나타내면 그림 23과 같다.



(a) Mx



(b) My

그림 23. 모멘트 관계식 적용 결과 (L형 리브)

그림 23을 살펴보면, 본 연구에서 제안한 기준 리브의 모멘트 함수식과 모멘트 증가 비율을 이용하여 국부 모멘트를 계산한 결과, 실제의 국부 처짐이 발생하는 모델 2와 비교하여 오차율이 Mx는 (-)0.16~(+)0.23% 이내의 범위로, My는 (-)0.18~(+)0.16% 이내의 범위로 나타나 제안한 함수식이 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있다.

4. 적용성 검토

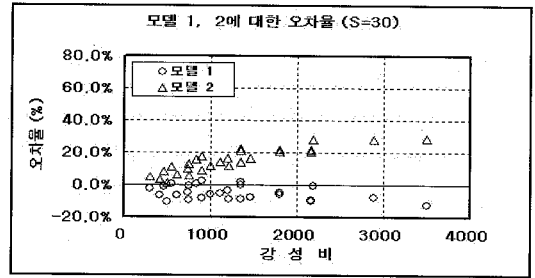
보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우, 전체 처짐만 발생하는 모델 1과 국부 처짐까지 발생하는 모델 2 모두 같은 형태로 모델링하여 해석하기 때문에 국부 거동에 대한 고려를 할 수 없게 된다.

본 장에서는 참고문헌(최 영, 2004)의 결과에 본 연구에서 제안한 함수식을 적용하여 결과를 비교함으로써, 직교이방성 판 해석에 대한 함수식의 효율성을 살펴보고자 한다.

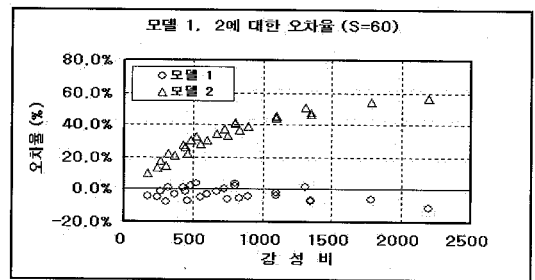
4.1 평강 리브를 갖는 보강판

직교이방성 판 해석에 대한 문제점을 살펴보기 위하여, 모델 1 및 모델 2의 결과에 대한 참고문헌(최 영, 2004) 결과

의 오차율을 나타내면 그림 24와 같다.



(a) 리브 간격 30cm 의 경우



(b) 리브 간격 60cm 의 경우

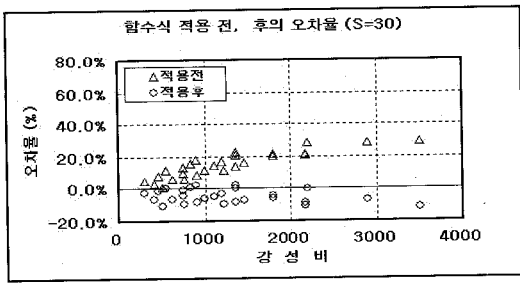
그림 24. 직교이방성 판 해석의 오차율 (평강 리브)

그림 24를 살펴보면, 모델 1에 대한 오차율에 비하여 모델 2에 대한 오차율이 훨씬 더 크다는 것을 알 수 있으며, 이는 직교이방성 판 해석시 국부 처짐을 고려하지 못하기 때문에 발생한 현상으로 풀이된다.

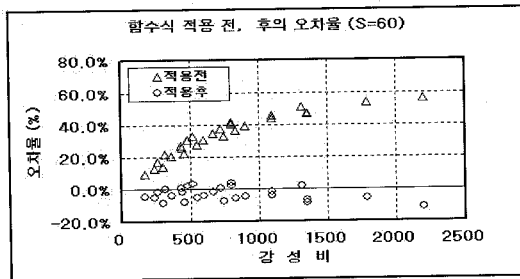
또한 모델 1에 대한 오차율은 리브 간격 30cm일 때 최대 (-)12.5%, 리브 간격 60cm일 때 최대 (-)11.4% 로 리브 간격에 따른 오차율 차이가 크지 않은 반면, 모델 2의 경우 리브 간격 30cm일 때 최대 (+)29.1% 까지 발생하던 오차율이, 리브 간격 60cm일 때 최대 (+)56.7% 까지 크게 증가함을 알 수 있는데, 이는 모델 1의 전체 처짐은 리브 간격과 거의 상관이 없는 반면, 모델 2에서 발생하는 국부 처짐은 앞서 언급한 바와 같이 리브 간격에 따라 큰 차이를 보이기 때문으로 풀이된다.

참고문헌의 결과에 본 연구에서 제안한 국부 처짐에 대한 함수식을 적용하고, 모델 2와의 오차율을 구하여 나타내면 그림 25와 같다.

그림 25 (a)의 리브 간격 30cm일 때를 살펴보면, 적용 전 강성비에 따라 (+)0.8~(+)29.3% 까지 증가하던 오차율이 함수식 적용 후 (-)11.9~(+)2.3% 로 크게 줄어들고, 그림 25 (b)의 리브 간격 60cm일 때를 살펴보면, 적용 전 (+)10.0~(+)56.7% 이던 오차율이 적용 후 (-)11.3~(+)3.9% 로 최대 오차율이 크게 줄어들고, 오차율의 폭 또한 조밀해져 정확도가 크게 향상되었음을 알 수 있다.

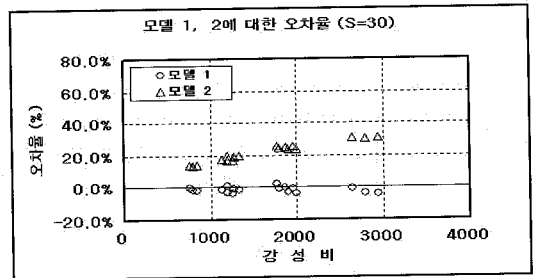


(a) 리브 간격 30cm 의 경우

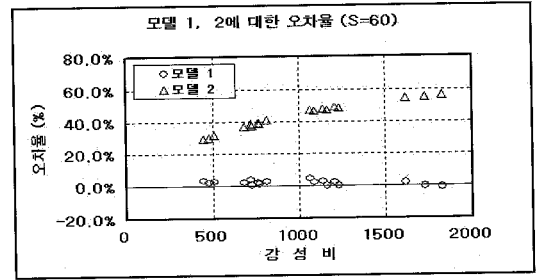


(b) 리브 간격 60cm 의 경우

그림 25. 합수식 적용 전·후의 오차율 (평강 리브)



(a) 리브 간격 30cm 의 경우



(b) 리브 간격 60cm 의 경우

그림 26. 직교이방성 판 해석의 오차율 (L형 리브)

또한 그림 24에 나타난 참고문헌의 모델 1에 대한 최대 오차율이 리브 간격 30cm일 때 (-)12.5%, 리브 간격 60cm일 때 (-)11.4% 이고, 합수식 적용 후 발생한 모델 2에 대한 최대 오차율이 리브 간격 30cm일 때 (-)11.9%, 리브 간격 60cm일 때 (-)11.3% 인 점을 고려하면, 국부 처짐에 대한 합수식을 적용한 결과의 오차율 대부분이 전체 처짐의 오차율로 인해 발생한 것임을 알 수 있다.

이러한 점을 고려할 때, 본 연구에서 제안한 합수식은 국부 처짐이 발생하는 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우 상당한 효율성을 가진다고 할 수 있다.

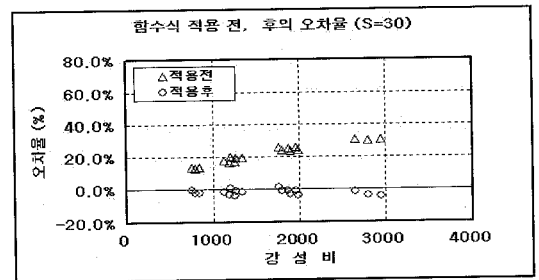
4.2 L형 리브를 갖는 보강판

L형 리브를 갖는 보강판에 대하여 평강 리브와 마찬가지로 참고문헌(최 영, 2004)의 결과를 모델 1 및 모델 2의 결과에 대한 오차율로 나타내면 그림 26과 같다.

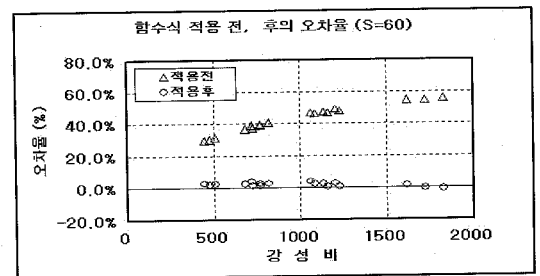
그림 26에서 보듯이 평강 리브와 마찬가지로 모델 1에 대한 오차율은 강성비와 상관없이 일정한 범위를 나타내는 반면, 모델 2의 경우 강성비의 증가에 따라 훨씬 더 큰 오차율을 발생시킴을 알 수 있다.

또한, 국부 처짐이 발생한 모델 2에 대한 오차율은 리브 간격 30cm일 때 최대 (+)30.7% 까지 발생하던 오차율이 리브 간격 60cm일 때 최대 (+)56.2% 로 크게 증가하여, 리브 간격이 증가함에 따라 오차율이 더 크게 발생함을 알 수 있다.

참고문헌의 결과에 제안한 국부 처짐에 대한 합수식을 적용하고, 그 결과의 오차율을 나타내면 그림 27과 같다



(a) 리브 간격 30cm 의 경우



(b) 리브 간격 60cm 의 경우

그림 27. 합수식 적용 전·후의 오차율 (L형 리브)

그림 27 (a)의 리브 간격 30cm인 경우를 살펴보면, 적용 전 (+)13.4~(+30.7% 이던 오차율이 합수식을 적용한 후 (-)4.3~(+1.2% 로 크게 줄어들고, 그림 27 (b)의 리브 간격 60cm인 경우, 적용 전 (+)29.6~(+56.2% 이던 오차율이 적

용 후 (-)1.0~(+)4.1% 로 크게 줄어들었음을 알 수 있다.

또한, 그림 26에서 보듯이 모델 1에 대한 오차율이 리브 간격 30cm인 경우 (-)4.4~(+)2.0% 이고, 리브 간격 60cm인 경우 (-)1.1~(+)4.8% 인 것을 고려하면, 평강 리브와 마찬가지로 함수식을 적용한 결과의 오차율 대부분이 전체 처짐의 오차율로 인해 발생된 것임을 알 수 있다.

따라서, 이상의 결과들로부터, 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우에도 본 연구에서 제안한 함수식은 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있으며, 국부 거동을 표현하지 못하는 직교이방성 판 해석에서 간편하게 국부 거동을 예측하는데 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 평강 및 L형 리브를 갖는 여러 가지 보강판에서, 집중하중에 의해 발생하는 국부 처짐 및 국부 모멘트의 양상을 파악하고, 이를 정형화하기 위한 연구를 수행하였으며, 그 결과를 요약하여 나타내면 다음과 같다.

- (1) 일정한 판 두께를 갖는 보강판에서 리브 간격이 증가함에 따라 훨씬 큰 국부 처짐과 국부 모멘트가 발생하고, 리브 간격별로 강성비와 상관없이 비슷한 국부 처짐과 모멘트가 발생하여, 리브의 크기보다는 리브의 간격이 보강판의 국부 거동에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었다.
- (2) 보강판의 전체 처짐에 대한 국부 처짐의 비율은 리브 간격별로 강성비의 2차 함수 형태로 표현 가능하며, 이러한 함수식을 이용하여 국부 처짐을 계산한 결과를 실제 국부 처짐이 발생하는 경우와 비교하면, 평강 리브의 경우 오차율이 (-)1.34~(+)0.69% 이내의 범위로, L형 리브의 경우 오차율이 (-)0.79~(+)0.40% 이내의 범위로 발생하여 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있었다.
- (3) 국부 처짐에 따른 보강판의 국부 모멘트는 같은 크기의 리브를 갖는 경우 강성비의 2차 함수 형태로 표현 가능함을 알 수 있었으며, 같은 판 두께를 갖는 경우 리브 크기에 따라 리브 간격과 상관없이 일정한 증가 비율을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 함수식과 증가 비율을 이용하여 국부 모멘트를 계산하고, 실제 국부 모멘트가 발생한 경우와 비교한 결과, 평강 리브의 경우 오차율이 M_x 는 (-)0.17~(+)0.26% 이내, M_y 는 (-)0.51~(+)0.55% 이내의 범위로, L형 리브의 경우 오차율이 M_x 는 (-)0.16~(+)0.23% 이내, M_y 는 (-)0.18~(+)0.16% 이내의 범위로 발생하여 상

당한 정확도를 가짐을 알 수 있었다.

- (4) 본 연구에서 제안한 함수식을 직교이방성 판 해석에 적용한 결과, 오차율이 크게 줄어들고, 분포 폭 또한 조밀해져 정확도가 향상됨을 알 수 있었으며, 직교이방성 판 해석시 발생한 전체 처짐에 대한 오차율을 고려할 때, 제안한 국부 처짐에 대한 함수식은 상당한 정확도를 가짐을 알 수 있었다.

따라서, 본 연구에서 제안한 함수식을 이용하면, 개단면 리브를 갖는 보강판의 전체 거동으로부터 간편하게 국부 처짐에 따른 해석 결과를 예측할 수 있어 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우에도 그 적용성이 뛰어난 것으로 판단되며, 좀더 실질적인 함수식을 위해서는 향후 분포 하중 및 하중 위치 등 다른 변수 등에 대한 다양한 국부 거동 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2004학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구로 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 김창수(1996) 강상판 해석을 위한 직교이방성 판 요소의 개발, 석사학위논문, 서울대학교.
- 마이다스아이티(2002) 마이다스로 배우는 구조역학, Dooans Communication.
- 주석법, 임관혁(2005) 평강 리브를 갖는 보강판의 국부 처짐에 관한 연구, 2005년 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, 제 16권, 제1호, pp. 456-459.
- 최 영(2004) 개단면 리브를 갖는 보강판의 직교이방성 강성에 관한 연구, 석사학위논문, 세명대학교.
- 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 : 2005. 8. 12 / 심사일 2005. 9. 2 / 심사완료일 2005. 10. 10)