

# 개단면 리브를 갖는 보강판에 대한 직교이방성 강성의 보정 방법

## The Modified Method of Orthotropic Rigidities for Stiffened Plates with Open Ribs

주 석 범<sup>1)</sup> · 최 영<sup>2)</sup>  
Chu, Seok Beom Choi, Young

요 약 : 본 연구에서는 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우 보강판의 제원에 따라 정확도에 큰 차이를 보이는 단점을 해결하기 위하여, 개단면 리브를 갖는 보강판에 대하여 직교이방성 강성을 보정하는 방법을 제안하였다. 여러 가지 보강판에 대하여 등방성 및 직교이방성 판 요소로 모델링하여 해석하고 최대 처짐을 비교한 결과, 특정 강성비를 중심으로 이보다 강성비가 작아질수록 직교이방성 판이 더 작은 처짐을, 이보다 커질수록 더 큰 처짐을 나타내어 정확도의 향상을 위해서는 강성비에 따른 직교이방성 강성 수정이 이루어져야 함을 알 수 있었다. 거동 분석을 토대로, 직교이방성 판의 처짐식과 판만의 처짐과 관련한 처짐 비율을 이용하는 두 가지 강성 수정 방법을 제안하였으며, 두 경우 모두 오차율 및 오차율의 분포폭이 크게 감소하여 정확도가 크게 향상되지만, 처짐 비율의 방법이 처짐식을 이용한 방법보다 사용성 및 안전성 측면에서 더 적절한 것으로 나타났다. 또한, 측정값이 있는 실험 예제에 적용한 결과 오차율이 감소하여 제안한 강성 수정 방법의 타당성을 입증할 수 있었다. 따라서, 개단면 리브를 갖는 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우, 본 연구에서 제안한 강성 수정 방법을 사용하여 보강판의 직교이방성 휨강성을 보정하게 되면, 상당한 정확성의 증가로 보강판에 대한 간편하고 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT : In this paper, the modified method of orthotropic rigidities for stiffened plates with open ribs is proposed to solve the problem of the inaccurate results of the orthotropic plate analysis according to the dimensions of stiffened plates. In analyzing various types of stiffened plates with open ribs using the isotropic and orthotropic plate element, orthotropic plates are found to have smaller maximum displacements compared to isotropic plates in a range that is smaller than the special rigidity ratio and reversely. Therefore, obtaining a more accurate solution of the orthotropic plate analysis requires modifying the orthotropic rigidities of stiffened plates according to the rigidity ratio. This study presents two modified methods using the displacement function and the displacement ratio. The application of the two methods improves the accuracy of the results of the orthotropic plate analysis, although the modified method using the displacement ratio is better than the method using the displacement function in terms of serviceability and safety. The comparison with the experimental example shows that the proposed modified method improves accuracy. Therefore, the orthotropic plate analysis of stiffened plates with open ribs can achieve more accurate results using the proposed method in this study.

핵심용어 : 보강판, 직교이방성 판 해석, 직교이방성 강성 수정 방법, 처짐 비율, 강성비, 개단면 리브

KEYWORDS : Stiffened Plates, Orthotropic Plate Analysis, Modified Method of Orthotropic Rigidities, Displacement Ratio, Rigidity Ratio, Open Ribs

### 1. 개 요

교량의 강바닥판과 같이 박판에 보강재가 등간격으로 촘촘히 배치되어 있는 경우 보강판이 기하학적 직교이방성 거동을 보인다는 점을 이용하여 직교이방성 판으로 이상화하여 간편

하게 해석할 수 있다(AISC, 1963; Troitsky, 1992). 이러한 해석 방법은 지지조건에 대한 제약이 없고, 보강판의 모델링이 간단하고, 데이터 처리에 드는 시간이 단축되는 등 사용성 면에서 우수하여, 국내의 경우 1996년부터 도로교 시방규정에 강바닥판을 직교이방성 판으로 간주한 Pelikan-

1) 정회원, 세명대학교 토목공학과 조교수, 공학박사  
(Tel. 043-649-1334, Fax. 043-649-1778, E-mail : chusb@semyung.ac.kr)  
2) D. M. 엔지니어링 사원, 공학석사(czero1@dm-eng.com)

본 논문에 대한 토의를 2004년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

Esslinger 방법을 사용하여 설계할 수 있도록 하고 있다(건설교통부, 1996, 2000; AISC, 1963; Troitsky, 1992). 그러나, 이를 적용함에 있어서 리브의 간격, 사용 개수 및 비틀림 강성 등을 고려하여야 함이 명시되었음에도 불구하고, 규정은 바닥강판의 최소 두께와 리브의 최소 두께 및 간격만 제시되었을 뿐 보강판을 직교이방성 판으로 간주할 수 있는 리브의 크기나 수량, 판의 변장비에 대한 규정은 없는 실정이다.

이러한 이유로 김창수(1996)는 판과 보강판의 휨 강성 비율인 강성비라는 매개변수 연구를 통하여, Huffington의 휨 강성식을 사용할 경우 보강판을 직교이방성 판으로 해석할 수 있는 강성비 기준을 제안하였으며, 주석범(2002) 등은 판성비라는 매개변수에 따른 보강판의 직교이방성 거동을 분석하고, 오차율의 상관 함수를 이용하여 처짐값을 보정함으로써 정확도를 향상시키는 연구를 수행하였다(AISC, 1963; Troitsky, 1992). 그러나 이러한 정확도 향상 방법은 오차율로부터 결과 값을 보정하는 방법으로 보강판의 직교이방성 강성과 같은 오차 원인에 대한 근본적인 해결 방안이라고 할 수 없다.

따라서, 본 연구에서는, 이러한 오차 원인에 대한 근본적인 해결을 위하여, 개단면 리브가 일 방향으로 배치된 여러 가지 보강판에 대하여 범용 프로그램인 MIDAS를 이용하여 전부 등방성 판 요소로 모델링한 해석 결과와 보강판을 직교이방성 판 요소로 해석한 결과를 이용하여 다음과 같은 방법으로 정확도를 향상시키기 위한 적절한 방안을 찾고자 한다.

먼저, 보강판을 각 절점당 5 자유도를 갖는 4 절점 등방성 판 요소와 직교이방성 판 요소로 모델링하여 해석을 수행하고 기존 연구에서 제안하였던 강성비를 매개변수로 하여 보강판의 거동을 살펴보고자 한다. 둘째, 두 해석 결과를 비교하여 발생하는 오차의 경향을 살펴보고, 정확도를 향상시키기 위한 적절한 강성 수정 방안을 제안하고자 한다. 셋째, 여러 가지 보강판에 대하여 강성 수정 전·후의 오차율을 비교하고, 참고 문헌의 실험 결과에 적용하여 본 연구에서 제안한 강성 수정 방법에 대한 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 보강판의 이상화

그림 1과 같이 보강재가 등간격으로 촘촘히 배치된 보강판의 경우, 판 두께가 일정한 직교이방성 판으로 이상화할 수 있으며, 식 (1)의 Huber 방정식을 적용하여 해석할 수 있다(AISC, 1963; Szilard, 1974; Timoshenko, 1984; Troitsky, 1992).

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H_{xy} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = -P(x, y) \quad (1)$$

여기서,  $D_x$ 는 판의 강성에 리브의 강성을 포함한  $x$  방향 휨 강성,  $D_y$ 는  $y$  방향 휨 강성,  $H_{xy}$ 는 보강판의 유효 비틀림 강성이고,  $P(x, y)$ 는 임의 점  $(x, y)$ 에 작용하는 하중,  $w$ 는 판의 처짐이다.

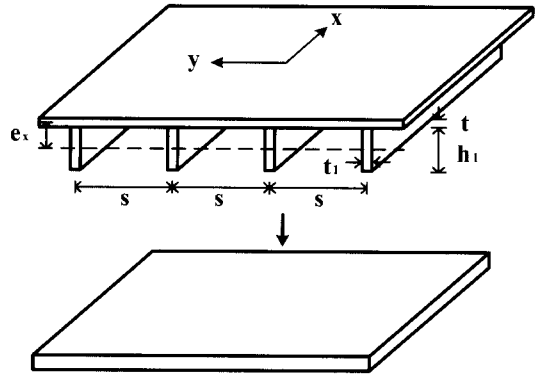


그림 1. 보강판의 이상화

그림 1과 같이 이상화한 직교이방성 보강판의 각 방향 휨 강성  $D_x$ ,  $D_y$  및 유효 비틀림 강성  $H_{xy}$ 는 식 (2)와 같이 산정할 수 있다(AISC, 1963; Troitsky, 1992).

$$\begin{aligned} D_x &= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{Ete_x^2}{(1-\nu^2)} + \frac{EI_n}{s} \\ D_y &= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \\ H_{xy} &= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{Gh_1t_1^3}{6s} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $t$ 는 판의 두께이며,  $e_x$ 는 판의 중심부터 보강판 도심까지의 거리,  $s$ 는 리브 간격,  $I_n$ 은 보강판 도심에 대한 보강재의 단면 2차 모멘트이다.

## 3. 보강판의 직교이방성 거동 분석

본 장에서는 개단면 리브 중 평강 리브를 갖는 보강판에 대하여 그림 2와 같이 각 절점당 5 자유도를 갖는 4 절점 등방성 판 요소(ISO)와 직교이방성 판 요소(ORTHO)로 모델링하여 해석하고(Cook, 1989; Logan, 2002; 마이다스아이티,

2002), 그 결과를 비교·분석하여 매개변수에 따른 오차 경향을 살펴보고자 한다.

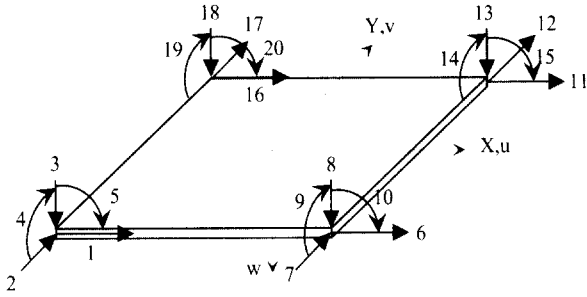


그림 2. 4 점점 판 요소

### 3.1 매개변수

그림 1과 같은 형태의 보강판에 대한 직교이방성 거동을 분석하기 위해, 먼저, 여러 가지 보강판을 표현하기 위한 매개변수로 식 (2)의 판에 리브가 보강된  $x$ 방향 휨 강성을  $y$ 방향 판만의 휨 강성으로 나눈 비율을 강성비  $RR$ (Rigidity Ratio)이라 정의하였으며, 오차 경향을 살펴보기 위한 매개변수로 등방성 판 요소(ISO)로 모델링한 최대 처짐 결과에 대한 직교이방성 판 요소(ORTHO)로 모델링한 최대 처짐 결과의 오차율을  $ER$ (Error Ratio)로 정의하였으며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$RR = \frac{D_x}{D_y} \quad (3)$$

$$ER = \frac{W_m - W_o}{W_m} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

여기서,  $D_x$ 는 리브로 보강된  $x$  방향 휨 강성,  $D_y$ 는 판만의 휨 강성,  $W_m$ 은 전체를 등방성 판 요소(ISO)로 모델링한 최대 처짐,  $W_o$ 는 직교이방성 판 요소(ORTHO)로 모델링한 최대 처짐이다.

### 3.2 해석 예제

본 연구에서는 보강판의 직교이방성 거동 분석을 위하여, 참고문헌(김창수, 1996; 주석범, 2002)의 예제와 유사한 크기의 2번 단순지지 보강판에 대하여 해석을 수행하였다. 보강판의 판 두께 및 리브의 제원은 표 1과 같이 변화시켰으며, 그림 3과 같이 판의 중앙에 리브가 위치하도록 배치시키고, 그 위에  $40t$ 의 하중을 재하하였다.

표 1. 보강판의 제원 (mm)

판 두께 $t$	리브 두께 $t_1$	리브 높이 $h_1$	리브 간격 $s$
10	10	200	300
12	15	250	450
14	20	300	600

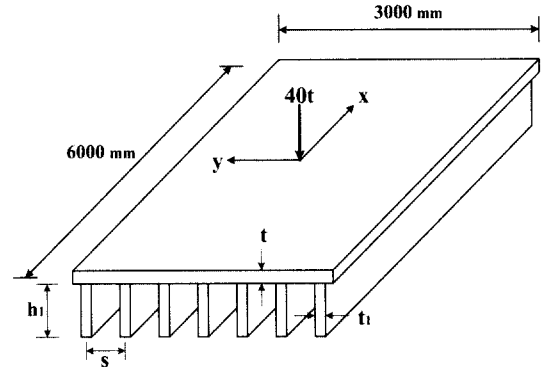


그림 3. 해석 예제

### 3.3 거동 분석

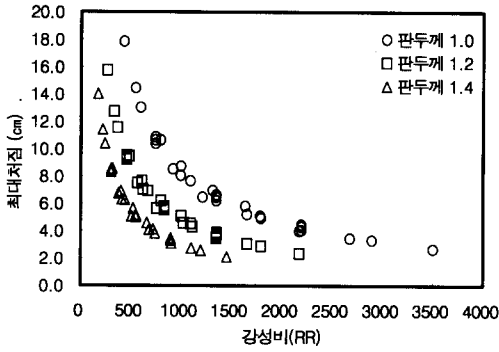
본 절에서는, 해석 예제 보강판에 대하여 강성비에 따른 직교이방성 거동을 살펴보고, 오차율을 이용하여 해석 방법에 따른 오차 원인과 해결 방안을 살펴보고자 한다.

전체를 등방성 판 요소(ISO)로 모델링한 최대 처짐 결과와 직교이방성 판 요소(ORTHO)로 모델링한 최대 처짐 결과를 강성비에 따라 나타내면 그림 4와 같다.

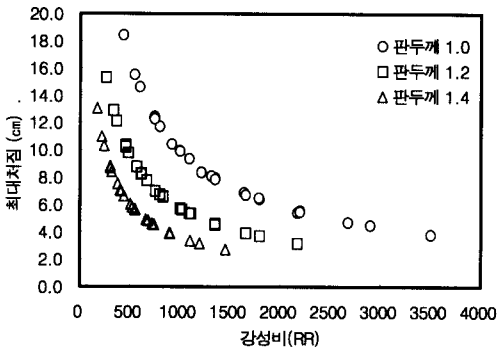
그림 4를 살펴보면, 결과의 절대값에서는 차이를 나타내나, ISO와 ORTHO의 결과 모두 판 두께 별로 강성비에 따른 처짐 양상이 유사하게 나타나 강성비에 따른 함수로 표현 될 수 있음을 알 수 있다.

오차 경향을 살펴보기 위하여 두 해석 결과의 오차율을 나타낸 그림 5를 살펴보면 판 두께와 상관없이 강성비 250에서는 오차율이 거의 0으로 두 결과가 잘 일치하며, 250보다 강성비가 작을수록 (+)오차율이 증가하여 강성비가 작을수록 ORTHO의 처짐이 ISO보다 점점 더 작게 나타나 강성이 더 높게 산정되고, 250보다 강성비가 커질수록 (-)오차율이 증가하여 ORTHO의 처짐이 ISO보다 점점 더 큰 처짐을 나타내 강성이 더 낮게 산정됨을 알 수 있다.

따라서, 이상의 결과로부터 ISO와 ORTHO의 해석 결과 모두 강성비에 따른 함수로 표현 될 수 있으며, 오차를 줄이기 위해서는 강성비에 따라 특정 강성비를 기준으로 그 이하에서는 강성을 감소시키고, 이상에서는 강성을 증가시켜야 함을 알 수 있다.



(a) ISO 해석 결과



(b) ORTHO 해석 결과

그림 4. 최대 처짐 결과

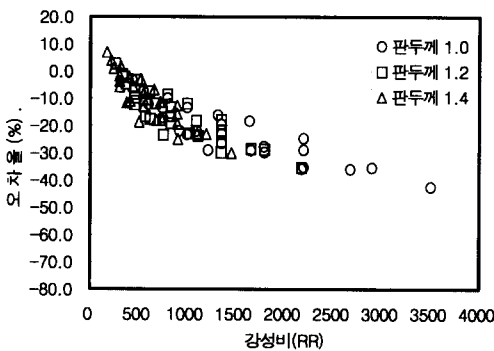


그림 5. 오차율

#### 4. 오차 보정 방법

본 장에서는 거동 분석에서 나타난 바와 같이 강성비에 따라 강성을 보정하는 방법에 대하여 살펴보고자 한다.

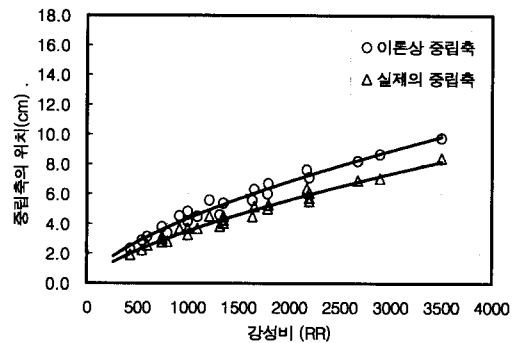
##### 4.1 중립축 이용 방법

식 (2) 중 휨 강성  $D_x$  만 따로 나타내면 식 (5)와 같으며, 참고문헌(주석범, 2002)에 따르면, 강성에 가장 큰 영향을

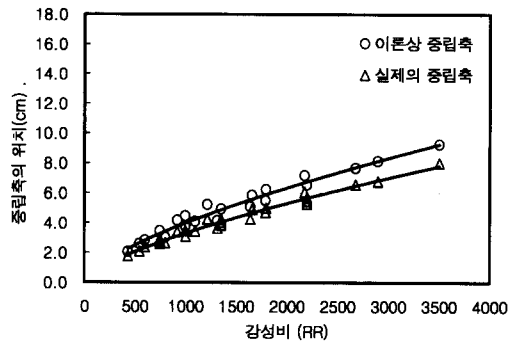
미치는 항은 보강재의 강성항인 우변의 세 번째 항으로, 이 중,  $I_n$  은 중립축의 영향을 크게 받게 된다.

$$D_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{Ete_x^2}{(1-\nu^2)} + \frac{EI_n}{s} \quad (5)$$

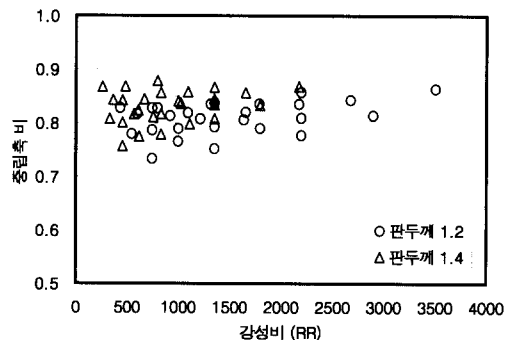
이러한 점에 착안하여 보강재의 편심에 따른 이론상 중립축과 실제 중립축의 관계를 살펴보기 위하여, 해석 예제중 판 두께 1.2cm와 1.4cm의 보강판에 대해 이론상 중립축과 ISO의 해석 결과로 구한 실제 보강판의 중립축의 위치를 판 중심으로부터의 거리로 나타내면 그림 6과 같다.



(a) 판 두께 1.2cm 인 경우



(b) 판 두께 1.4cm 인 경우



(c) 중립축 비율

그림 6. 이론상 중립축과 실제 중립축

중립축 위치를 나타낸 그림 6(a)와 (b)를 살펴보면, 판 두께와 상관없이 실제 중립축이 이론상 중립축보다 항상 작게 발생하여 판 가까이 위치함을 볼 수 있으며, 강성비가 커짐에 따라 이론상 중립축과의 차이가 커짐을 알 수 있다.

실제 중립축을 이론상 중립축으로 나눈 그림 6(c)의 중립축 비율을 살펴보면, 중립축 비율은 판 두께 및 강성비와 상관없이 0.73부터 0.87 까지 폭 넓게 분포하여 실제 중립축과 이론상 중립축 사이의 차이가 크게 발생함을 알 수 있다.

이러한 중립축의 감소는 식 (5)에 나타낸 직교이방성 판의  $x$  방향 휨 강성  $D_x$  중 우변 두 번째 항의 편심에 따른 판의 강성은 감소시키고, 세 번째 항의 중립축에 대한 리브의 강성은 증가시키는 효과를 발생시키게 된다.

이러한 중립축 차이에 따른 결과를 좀더 정확히 살펴보기 위하여 실제 발생하는 중립축을 이용하여 휨 강성을 산정하고 재해석한 결과의 오차율과 이론상 중립축을 이용한 원래의 오차율을 그림 7에 나타내었다.

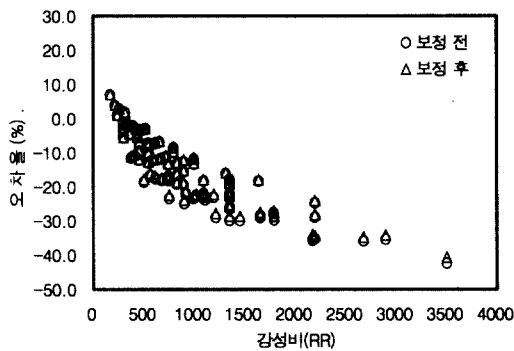


그림 7. 중립축 보정 전·후 오차율 비교

그림 7을 살펴보면, 중립축 보정 후 강성이 증가하여 강성비 250 이상에서는 2%의 미소한 오차율 감소를 나타내고, 250 이하에서는 1% 이하지만 오차율이 약간 증가함을 나타내어, 중립축 차이에 비해 오차율의 변화는 미소함을 알 수 있다.

이상으로부터, 실제 중립축은 이론상 중립축보다 항상 위쪽에 위치하며, 이러한 중립축의 차이를 적용한 강성 수정 효과는 미소하여 중립축 보정에 따른 정확도 향상에는 한계가 있음을 알 수 있으며, 따라서 정확도 향상을 위해서는 강성비에 따른 직접적인 강성 수정이 이루어져야 한다고 할 수 있다.

#### 4.2 처짐식 이용 방법

본 절에서는 앞서 살펴본 바와 같이 직교이방성 판의 처짐이 판 두께별로 강성비와 일정한 관계를 갖고 있다는 성질을 이용하여 강성을 보정하는 방법에 대해 살펴보기로 한다.

직교이방성 판의 처짐을 판 두께별로 나타내고 각각에 대한 추세선을 나타내면 그림 8과 같다.

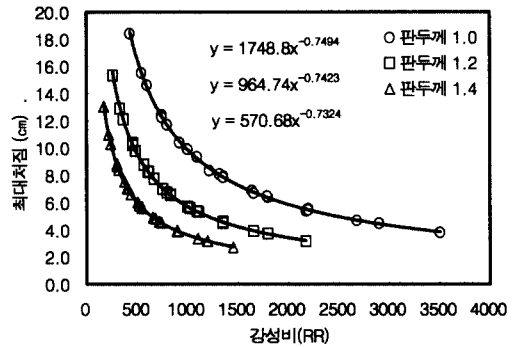


그림 8. 판 두께별 직교이방성 판의 처짐

그림 8의 추세선에서 알 수 있듯이, 직교이방성 판으로 해석한 보강판의 처짐은 판 두께별로 강성비의 함수로 표현할 수 있으며, 이러한 성질을 이용하여 실제 처짐에 해당하는 강성비를 역산하고, 계산된 실제 강성비로부터 직교이방성 판의 휨 강성을 보정하게 되면 오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

판 두께 1.2cm인 경우의 해석 결과를 예로 들어 설명하면, 직교이방성 판의 처짐을 나타내는 추세선으로부터 직교이방성 판의 처짐  $W_o$ 와 강성비  $RR$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$W_o = 964.74 RR^{-0.7423} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 직교이방성 판 요소(ORTHO)의 처짐이 등방성 판 요소(ISO)의 처짐  $W_m$ 과 같은 결과를 나타내기 위해서는 다음과 같은 강성비  $RR^*$ 를 가져야 한다.

$$RR^* = (964.74 / W_m)^{1/0.7423} \quad (7)$$

여기서,  $RR^*$ 는 ISO와 같은 처짐을 발생시키는 직교이방성 판의 실제 강성비라 할 수 있으며, 이러한 방법으로 계산된 판 두께별  $RR^*$ 를 강성비  $RR$ 에 대하여 나타내면 그림 9와 같다.

그림 9를 살펴보면, 판 두께별로 실제 강성비  $RR^*$ 는 강성비  $RR$ 의 2차 함수 형태로 표현됨을 알 수 있으며, 이러한 추세선 식을 이용하면 직교이방성 강성비  $RR$ 을 갖는 보강판의 실제 강성비  $RR^*$ 를 쉽게 산정할 수 있다.

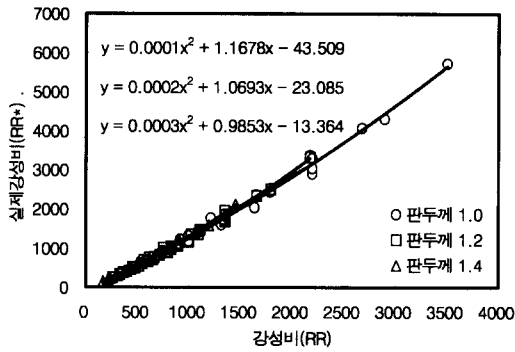


그림 9. 실제 강성비  $RR^*$

보강판의 강성비  $RR$ 로 표현된 실제 강성비  $RR^*$ 의 추세 선 식을 이용하면 식 (8)과 같이 등방성 판 요소(ISO)와 같은 처짐을 발생시키는 직교이방성의 실제  $x$  방향 휨 강성  $D_x^*$ 를 구할 수 있다.

$$D_x^* = RR^* \cdot D_y \quad (8)$$

또한, 실제 강성비  $RR^*$ 와  $RR$ 의 비율을 이용하면 식 (9)와 같이 강성 수정 계수  $A$ 를 정의할 수 있으며, 이를 강성비에 따라 나타내면 그림 10과 같다.

$$\frac{RR^*}{RR} = \frac{D_x^*/D_y}{D_x/D_y} = \frac{D_x^*}{D_x} = A \quad (9)$$

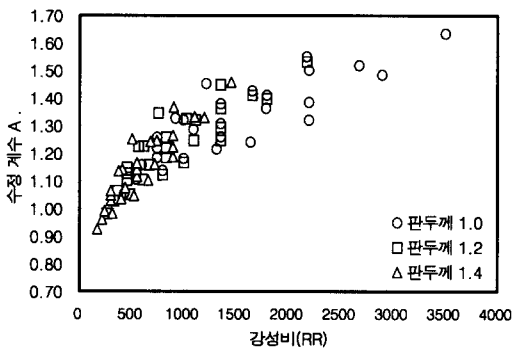


그림 10. 강성 수정 계수  $A$

그림 10의 강성 수정 계수  $A$ 를 살펴보면, 처짐이 거의 일치하는 강성비 250에서는 수정 계수가 1.0을 나타내고, 250이하에선 강성비가 작을수록 수정 계수가 1.0 이하로 점차 감소하여 강성을 감소시키며, 250 이상에서는 강성비가 커질수록 수정 계수가 1.0 이상으로 점차 증가해 강성을 증가시키게 되므로, 앞서 거동 분석에서 지적된 바와 같은 강성

비에 따른 적절한 강성 수정이 이루어짐을 알 수 있다.

이러한 강성 수정 계수  $A$ 를 사용하여 강성을 보정한 해석 결과는 그림 11과 같다.

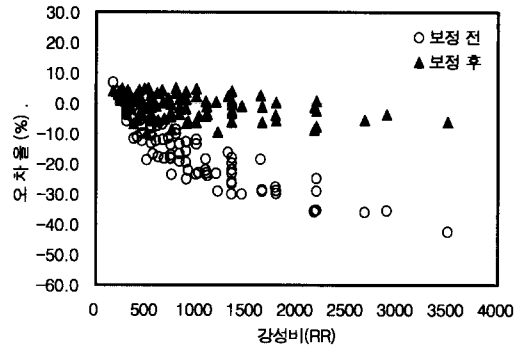


그림 11. 강성 수정 계수  $A$ 를 적용한 해석 결과

강성 수정 계수  $A$ 를 적용하기 전·후의 오차율을 나타낸 그림 11을 살펴보면, 수정 전 (-) 43%부터 (+) 7%까지 나타났던 오차율이 (-) 10%부터 (+) 5%로 상당히 감소하고, 오차율의 분포 또한 50%에서 15%로 조밀해져 강성 수정 계수  $A$ 를 통한 적절한 강성 보정으로 해석의 정확도가 상당히 증가하였음을 알 수 있다.

### 4.3 처짐 비율 이용 방법

보강판에서 리브에 의한 처짐 감소 효과와 직교이방성 판의 처짐 사이의 관계를 살펴보기 위해, 판만의 처짐  $W_p$ 에서 등방성 판 요소의 처짐  $W_m$ 을 뺀 값과 직교이방성 판의 처짐  $W_o$  사이에 다음과 같은 식을 정의하였다.

$$W_p - W_m = k \cdot W_o \quad (10)$$

해석 예제의 각 보강판에 대하여 식 (10)의 상수  $k$ 를 구하고, 이를 강성비에 따라 나타내면 그림 12와 같다.

그림 12를 살펴보면, 리브 보강에 따른 처짐의 감소량을 직교이방성 처짐으로 나눈 처짐 비율  $k$ 는 강성비에 비례하는 경향이 있음을 알 수 있으며, 식 (10)과 그림 12로부터 판만의 처짐  $W_p$ , 등방성 판 요소의 처짐  $W_m$ 과 직교이방성 판의 처짐  $W_o$  사이의 처짐 비율은 강성비와 어떤 비례 관계가 있다고 할 수 있다.

이러한 관계로부터 판의 처짐을 각각 등방성 판 요소의 처짐과 직교이방성 판의 처짐으로 나눈 처짐 비율은 식 (11)과 같이 강성비와 비례 관계가 성립한다고 가정할 수 있다.

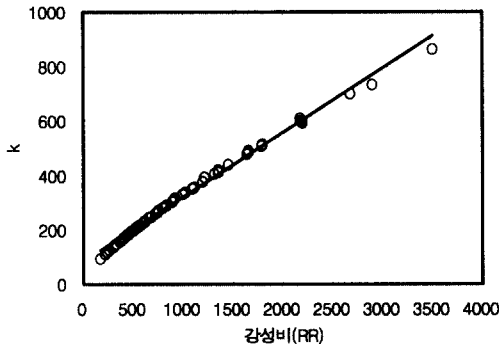
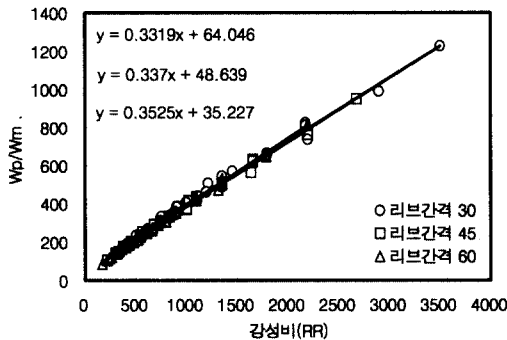


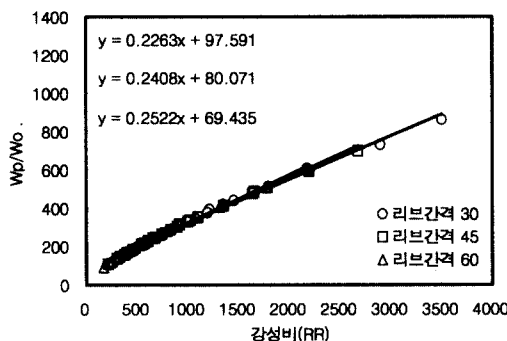
그림 12. 강성비에 따른 상수  $k$

$$\frac{W_p}{W_m} \propto \frac{D_x^*}{D_y}, \quad \frac{W_p}{W_o} \propto \frac{D_x}{D_y} \quad (11)$$

식 (11)의 처짐 비율은 판 두께와 상관없는 무차원의 값이나, 참고문헌(주석법, 2002)에 따르면 판 두께와 강성비가 같은 경우, 직교이방성 판은 리브 간격과 상관없이 같은 처짐을 나타내는 반면, 등방성 판 요소의 경우에는 리브 간격이 다르면 약간의 차이를 보이게 되므로, 그림 13에 리브 간격별 강성비에 따른 처짐 비율을 나타내었다.



(a) 처짐 비율  $W_p/W_m$



(b) 처짐 비율  $W_p/W_o$

그림 13. 처짐 비율

그림 13을 살펴보면, 두 처짐 비율 모두 강성비와 거의 선형 관계를 나타내며, 식 (11)의 비례 관계로부터 보강판의 휨 강성  $D_x$ 와 실제 처짐을 발생시키는 휨 강성  $D_x^*$  사이의 비율인 강성 수정 계수  $B$ 는 다음과 같은 식으로 정의 할 수 있다.

$$B = \frac{D_x^*}{D_x} = \frac{D_x^*/D_y}{D_x/D_y} = \frac{W_p/W_m}{W_p/W_o} \quad (12)$$

리브 간격이 30cm인 경우를 예로 들면, 그림 13에서 얻어진 처짐 비율의 식을 식 (12)에 대입하면, 식 (13)과 같이 강성 수정 계수  $B$ 를 구할 수 있다.

$$B = \frac{W_p/W_m}{W_p/W_o} = \frac{0.3319 RR + 64.046}{0.2263 RR + 97.591} \quad (13)$$

리브 간격별로 식 (13)과 같은 방법으로 강성 수정 계수  $B$ 를 계산하고, 이를 리브 간격별로 강성비에 따라 나타내면 그림 14와 같다.

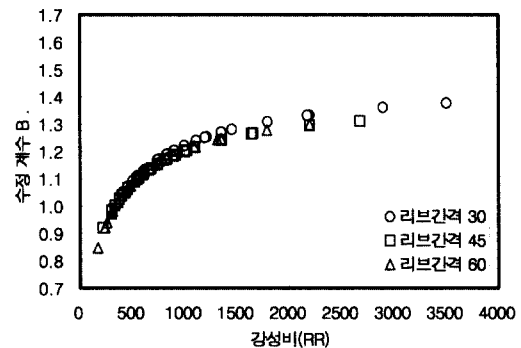


그림 14. 강성 수정 계수  $B$

식 (13)과 그림 14로부터, 강성 수정 계수  $B$ 는 강성비에 따른 일정한 형태의 함수임을 알 수 있으며, 강성 수정 계수  $A$ 와 마찬가지로 실제 처짐과 유사한 결과를 나타내는 강성비 250에서는 수정계수가 1.0을 나타내고, 250 이하에서는 강성비가 작을수록 수정계수가 1.0 이하로 점차 감소하여 강성을 감소시키며, 250 이상에서는 강성비가 커질수록 수정계수가 1.0 이상으로 점차 증가해 강성비에 따라 발생한 (+), (-)의 오차율을 적절하게 보정할 것으로 사료된다.

이러한 강성 수정 계수  $B$ 를 사용하여 강성을 보정한 해석 결과는 그림 15와 같다.

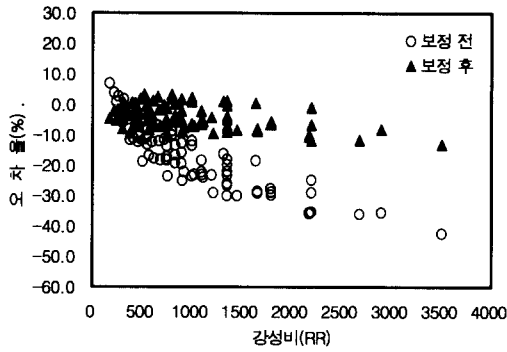


그림 15. 강성 수정 계수 B 를 적용한 해석 결과

강성 수정 계수 B 를 적용하기 전·후의 오차율을 나타낸 그림 15를 살펴보면, 수정 전 (-) 43%부터 (+) 7%까지 나타났던 오차율이 (-) 13%부터 (+) 3%로 감소하고, 오차율의 분포 또한 50%에서 16%로 조밀해져 강성 수정 계수 B 를 적용한 후 강성비에 따라 발생한 (+), (-)의 오차율을 적절하게 보정하여 해석의 정확도가 상당히 증가하였음을 알 수 있다.

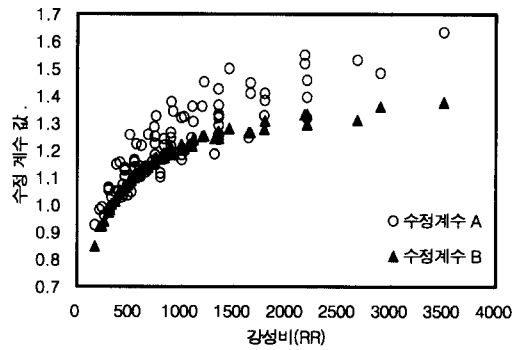
#### 4.4 수정 방법의 비교

본 절에서는 앞에서 살펴본 직접적인 강성 수정 방법인 강성 수정 계수 A, B 를 적용하여 재해석한 결과의 정확도를 살펴보고, 이를 토대로 적절한 강성 수정 방법을 선택하고자 한다.

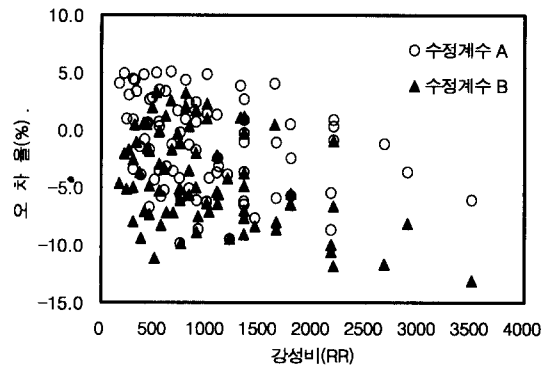
처짐식을 이용하여 얻은 강성 수정 계수 A 와 처짐 비율로부터 얻은 강성 수정 계수 B 를 비교하기 위하여, 강성비에 따른 각각의 강성 수정 계수와 이를 적용하여 재해석한 해석 결과의 오차율을 나타내면 그림 16과 같다.

그림 16(a)에 나타난 강성 수정 계수를 살펴보면, 두 경우 모두 앞서 살펴본 바와 같이 강성비 250을 기준으로 그 이하에서는 1 이하의 값을 가져 강성을 감소시키고, 이상에서는 1 이상으로 강성을 증가시켜 적절한 보정이 이루어짐을 알 수 있다. 그러나, 그림에 나타난 바와 같이 강성 수정 계수 A 는 판 두께에 따라 다른 함수 식을 사용하여 강성 수정 계수가 넓게 퍼지는 반면, 강성 수정 계수 B 는 리브 간격에 따른 차이가 미소하여 하나의 대표 함수로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 강성 수정 계수 자체를 비교하면, 판 두께에 따라 다른 값을 나타내는 강성 수정 계수 A 에 비하여 리브 간격에 따른 차이가 미소하여 하나의 함수로 사용 가능한 강성 수정 계수 B 가 사용성 측면에서 더 우수하다고 할 수 있다.



(a) 강성 수정 계수



(b) 보정 후 오차율

그림 16. 강성 수정 계수의 비교

그림 16(b)의 보정 후 해석 결과의 오차율을 살펴보면, 수정 전 (-) 43%부터 (+) 7%이던 오차율이 강성 수정 계수 A 를 적용한 경우 (-) 10%부터 (+) 5%로, 강성 수정 계수 B 를 적용한 경우 (-) 13%부터 (+) 3%로, 오차율이 크게 감소하고, 오차율의 분포 또한 50%에서 15%와 16%로 조밀해져 정확도가 크게 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 그림에 나타난 바와 같이 강성 수정 계수 A 는 (-) 오차율을 갖는 경우에 대한 강성 보정량이 크게 산정되는 경향으로 본 해석 예제의 40%정도가 (+) 오차율을 갖게 되며, 강성 수정 계수 B 는 강성의 과도한 감소로 인하여 (+)에서 (-) 오차율을 발생시키고, 강성비 250 이상에서는 강성의 과도한 증가로 인하여 비록 작은 양의 오차율이지만 (+) 오차율을 발생시킴을 알 수 있다.

수정 후 해석 결과를 비교하면, 오차율의 절대 값은, 수정 계수 A 를 사용하는 것이 수정 계수 B 보다 3% 정도 더 작은 값을 나타내지만, 실제보다 강성이 높게 산정되어 직교 이방성 처짐이 더 작은 결과를 나타내는 (+) 오차율을 살펴 보면, 수정 계수 B 를 사용하는 것이 수정 계수 A 를 사용한 경우보다 오차율의 절대 값에서 2% 더 작은 값을 나타내고, 전반적으로 더 많은 결과가 (-) 오차율 쪽에 분포하여



좀 더 안전측임을 알 수 있다.

따라서, 이상의 결과로부터 강성 수정 계수  $A$  보다는 강성 수정 계수  $B$  를 적용하여 휨 강성을 보정하는 것이 사용성과 안전성 측면에서 더 바람직하다고 판단된다.

### 5. 적용성 검증

본 장에서는 참고문헌(백운수, 1980)의 실험 결과를 이용하여 본 연구에서 제안한 강성 수정 계수  $B$  의 적용성을 살펴보고자 한다.

실험에 사용된 재료는 탄성 계수  $E = 22,500 \text{ kgf/cm}^2$ , 포아송비  $\nu = 0.38$  를 갖는 아크릴(Acryl)이 사용되었으며, 4변 단순지지 보강판의 제원은 그림 17과 같다. 실험은 판의 중앙에  $0.5 \text{ kgf}$  부터  $8.5 \text{ kgf}$  까지  $1 \text{ kgf}$  간격으로 하중을 일정하게 증가시키며, 판의 중앙점 처짐을 측정하였다.

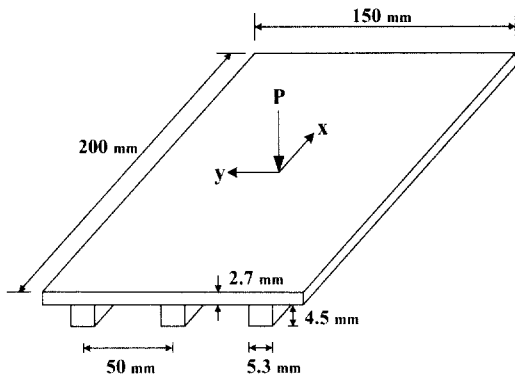


그림 17. 검증 예제

보강판을 등방성 판 요소(ISO) 및 직교이방성 판 요소(ORTHO)로 모델링하여 해석한 결과와 참고문헌의 실험 결과를 나타내면 표 2 및 그림 18과 같다.

표 2. 실험 및 해석 결과

하중 (kgf)	실험 결과 (mm)	ISO (mm)	ORTHO (mm)
0.5	0.23	0.23	0.21
1.5	0.67	0.69	0.64
2.5	1.13	1.15	1.06
3.5	1.60	1.61	1.49
4.5	2.01	2.07	1.91
5.5	2.47	2.53	2.34
6.5	2.93	2.99	2.76
7.5	3.35	3.45	3.18
8.5	3.89	3.91	3.61

표 2와 그림 18의 해석 결과를 살펴보면, 등방성 판 요소(ISO)를 사용한 처짐이 실험값과 거의 같은 결과를 나타내어 본 연구에서 기준으로 삼은 등방성 판 요소의 해석 결과에 대한 타당성을 볼 수 있으며, 실험값에 비해 직교이방성 판 요소(ORTHO)를 사용한 처짐이 약간 더 작은 처짐을 나타내어 강성이 높게 산정되었음을 알 수 있다.

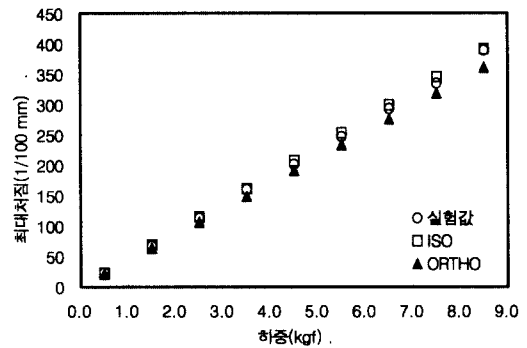


그림 18. 실험 결과와 해석 결과 비교

본 연구에서 제안한 강성 수정 계수  $B$  를 적용하여 재해석을 수행하고, 각 해석 결과를 실험값에 대한 오차율로 나타내면 그림 19와 같다.

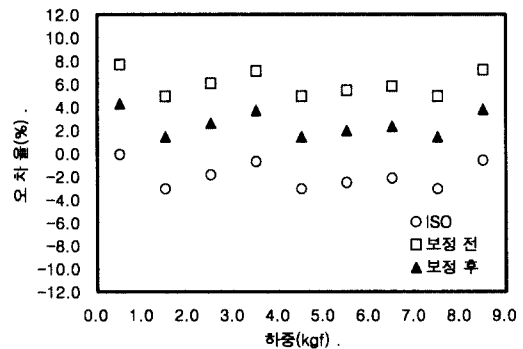


그림 19. 실험값에 대한 오차율

그림 19 중 등방성 판 요소(ISO)의 경우를 살펴보면, 오차율이 일정하지 않고 하중에 따라 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 표 2에서 알 수 있듯이 실험값이 하중에 정확하게 비례하지 않는에서 발생한 오차로 풀이되며, ISO의 경우 평균적으로 (-) 1.9%의 오차율로 실험값과 비교하여 상당한 정확도를 갖는다고 판단된다. 또한 직교이방성 판 요소(ORTHO)로 해석한 결과는 수정 전 (+) 4.9%~7.7%의 오차율을 나타내던 것이 수정 후 (+) 1.4%~4.3%의 오차율로 감소하여 정확도가 향상되었음을 알 수 있다.

따라서, 이상의 결과들로부터 보강판을 직교이방성 판으로

해석하는 경우, 본 연구에서 제안한 강성 수정 계수  $B$  를 적용하면 정확도를 크게 향상시킬 수 있다고 할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우 보강판의 제원에 따라 발생하는 정확도의 차이를 해결하고자, 개단면 리브를 갖는 2면 단순지지 보강판에 대하여 등방성 판 요소(ISO)와 직교이방성 판 요소(ORTHO)로 모델링하여 해석을 수행하고, 매개변수에 따른 해석 결과를 비교·분석하여 이를 토대로 강성을 보정하는 적절한 방법을 제안하고자 하였다.

본 연구에서 매개변수 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 한쪽 면만 리브로 보강된 보강판의 실제 중립축의 위치는 항상 이론상 중립축보다 판에 가깝게 위치함을 알 수 있었으며, 중립축을 이용한 강성 수정 결과 정확도의 향상에는 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.
- (2) 직접적인 강성 수정 방법으로 처짐식을 이용하는 방법과 처짐 비율을 이용하는 방법을 제시하였으며, 이들을 이용하여 강성을 수정한 결과 두 경우 모두 오차율이 크게 감소하고, 오차율의 분포 폭도 조밀해져 정확도가 크게 향상됨을 볼 수 있었다.
- (3) 강성 수정 방법을 비교한 결과, 처짐식을 이용하는 방법보다 처짐 비율을 이용하는 방법이 사용성 및 안전성 측면에서 더 적절함을 알 수 있었다.
- (4) 제안한 강성 수정 방법의 타당성을 검증하기 위하여, 실제 처짐이 측정된 실험 예제의 보강판에 적용한 결과 오차율이 감소되어, 본 연구에서 제안한 강성 수정 방법을 적용하면 정확도가 향상됨을 알 수 있었다.

따라서 개단면 리브를 갖는 보강판을 직교이방성 판으로 해석하는 경우, 본 연구에서 제안한 강성 수정 방법을 사용하여 보강판의 직교이방성 휨 강성을 보정하면, 상당한 정확도

의 증가로 보강판에 대한 간편하고 타당한 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부(1996) 도로교 표준 시방서, 대한토목학회.
- 건설교통부(2000) 도로교 설계 기준, 한국교통협회.
- 김창수(1996) 강상판 해석을 위한 직교이방성 판 요소의 개발, 석사학위논문, 서울대학교.
- 마이더스아이티(2002) 마이더스로 배우는 구조역학, Dooans Communication.
- 백윤수(1980) 이방성 보강판의 강성에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교.
- 주석범, 김창수(2002) 개단면 리브를 갖는 보강판의 직교이방성 판 해석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제 14권, 제6호, pp.701-710.
- 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.
- Logan, D. L.(2002) *A First Course in the Finite Element Method, 3rd Edition*, Brookscole, USA.
- Szilar, R.(1974) *Theory and Analysis of Plate : Classical and Numerical Method*, Prentice-Hall, Inc., USA.
- Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S.(1984) *Theory of Plates and Shells, 2nd Edition*, Mcgraw-Hill International Book Company, USA.
- Troitsky, M. S.(1992) *Orthotropic Bridges : Theory and Design*, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, USA.
- (접수일자 : 2004. 1. 20 / 심사일 2004. 2. 25 / 심사완료일 2004. 3. 26)