

# 材料常數가 相異한 要素로 이루어진 積層平板型構造物의 Brazier效果에 관한 研究

## A Study on the Brazier Effect of Laminated Plate Structures Having Different Material Constants for Each Element

김 재 열\* · 한 상 을\*\* · 권 택 진\*\*\*  
Kim, Jae-Yeol · Han, Sang-Eul · Kwun,Taek-Jin

### 요 약

圓筒管에 휨모멘트가 작용하면 변형후 단면은 楕圓形상을 갖게 된다. 단면의 타원화에 의해 단면이 감소하게 되면 휨강성이 감소하게 되며, 따라서, 휨모멘트-곡률관계가 荷重漸減型으로 된다. 이 휨강성의 감소 현상을 Brazier이론 또는 Brazier 현상이라고 한다.

적층평판에 있어서도 각층의 재료상수가 뚜렷하게 다른 경우 원통관에서의 Brazier현상과 유사한 현상이 발생한다. 본 논문에서는 평판에서의 Brazier현상을 규명하기 위하여 3층 적층모델을 만들어 각층의 재료정수가 현저히 다른 경우 어떠한 현상이 일어나는가를 실험적으로 규명하였고, 이론해석을 위하여 스프링모델을 사용하였다. 본 논문의 모델에서 알 수 있듯이 중간층의 재료상수가 상하층 요소의 재료상수 보다 뚜렷하게 작은 경우 중간층의 기동이 현저히 크게됨을 알 수 있었다. 즉, 본 논문에서 채택한 모델의 경우에 있어서도 원통관에서 일어나는 Brazier현상이 일어나고 있음이 실험적 그리고 해석적으로 규명되었다.

### Abstract

When an initially straight thin cylinder is bent, there is a tendency for the cross section to flatten. This phenomenon was investigated by L.G. Brazier in 1927 and is called "Brazier Effect" or "Brazier Theory". The main characteristic is the reduction of carrying capacity due to the decrease of bending stiffness by shortening of thickness with the increase of external load. And the relationship of curvature-bending moment becomes a soft spring type as shown in Fig.2.

In this paper, the Brazier theory on plate type structures is investigated from the following view points : (1) What is the Brazier effect ? (2) the reason of the occurrence of the Brazier effect in plate type structures by using beam model and (3) factors which cause the brazier effect.

**Keywords :** brazier effect, laminated plate, curvature, soft spring type, delamination

\* Virginia P.I.S.U. Post Doctor 과정

\*\* 정회원 · 인하대학교 건축공학과 교수

\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

• 이 논문에 대한 토의를 1996년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 序 論

평판이론의 발전과정중 가장 큰 의미를 부여할 수 있는 것은 극히 단순화된 Kirchhoff 이론의 최초 완성이라고 볼 수 있다. 1900년대 평판이론의 연구는 3차원 탄성이론에 기초를 둔 厚板(thick plate)이론의 정립과 薄板(thin plate)이론의 정립으로 크게 분류할 수 있다. 이러한 이론적 흐름의 하나로써, 두꺼운 판에 속하는 적층판 구조물의 거동을 생각할 수 있으며, 1960년대에는 기본적인 평판이론에 근거한 기초이론의 확립, 1960년대 후반부터 1970년대에 들어와서는 주로 적층판의 안정문제, 진동문제등이 연구의 대상이었다. 또한 1980년대부터는 접촉부분의 박리문제(de-lamination), 하중에 따른 좌굴문제(thermal buckling), 최적화문제(optimization) 등 응용에 관한 문제가 중점적으로 연구되었다.

平板型積層構造物로서는, 적층평판, 中空슬래브, 평판형 다층입체트러스 등이 대표된다. 이들 구조물은 서로 다른 층으로 이루어진 적층구조물이며, 특히, 각층의 재료상수가 뚜렷하게 다른 경우, 그 평판에는 지금까지의 Kirchhoff 이론과는 다른 구조거동이 예상된다. 예를들어, 적층판 또는 中空슬래브, 평판형 다층입체트러스에 휨모멘트가 작용되면 원통관에 모멘트가 작용될 때 생기는 Brazier<sup>1)</sup> 현상과 비슷한 현상이 발생한다.

지금까지의 Brazier이론에 관한 既往의 연구로는, 1927년 Brazier에 의해 이론이 발표된 후, Calladine,<sup>2)</sup> 半谷裕彥, 崔鉉植,<sup>3)</sup> 松岡里<sup>4)</sup> 등에 의해 타원화에 관한 연구가 있다. 그러나, 대부분의 연구가 셀형구조물에 국한되어 있고 평판형구조에의 응용은 찾아볼 수 없다. 이러한 맥락에서 평판형 구조에서의 Brazier현상 규명의 필요성이 제기되었다.

본 논문은 Brazier에 의해 제안되었던 원통관에서의 Brazier이론을 적층평판에 적용하는데 있어서, 적층 평판에서의 Brazier현상을 규명하고자 하는데 목적을 두고 제 1 단계로서 3 층적층보 모델실험과 力學的相互關係를 이용하여 이론적 근거를 제시한다. 또한, 3층 적층보 모델에서 중간층

을 스프링으로 간주한 스프링 보 모델을 도입하여 실제의 Brazier현상을 규명하였다.

## 2. Brazier현상

원통쉘의 진동이나 좌굴문제를 다룰 때 Brazier 현상은 피할 수 없는 현상 중의 하나이다.

圓筒管에 휨모멘트가 작용되면 그림 1과 같이 변형후에 단면이 橢圓形상으로 변하게 되며, 이러한 현상에 관한 이론적 연구결과가 1927년 L. G. Brazier<sup>1)</sup>에 의해 최초로 발표되었다. 이것은 St. Venant의 보에 있어서의 휨문제의 解와 Kirchhoff의 解의 唯一性과 안정문제를 다루는 과정에서 발견되었다. 그 이론을 요약하면 괄호안의 내

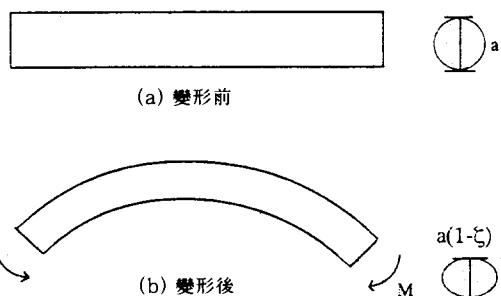


그림 1 圓筒管의 타원화

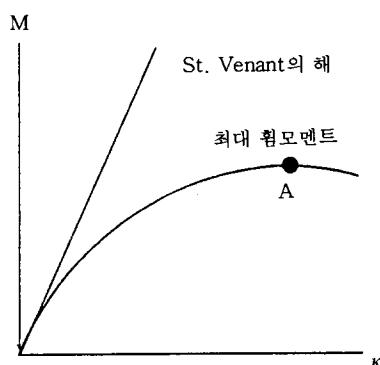


그림 2 휨모멘트-곡률관계 곡선

용과 같다. 「무한히 긴 圓筒에 휨모멘트  $M$ 을 가하면 축방향에 임의의 곡률이 발생한다. 그 단면에 생기는 휨응력은 중립축을 향하는 성분을 가지게 되어, 그것에 의해 단면이 타원화된다. 즉, 변형전 직경  $a$ 의 원형 단면은 변형후 직경이  $a(1-\zeta)$ 로 변화한다. 여기서,  $\zeta$ 는 타원화에 의한 단면의 감소 비이다. 단면이 감소하면 휨강성이 감소하게 되며, 모멘트-곡률관계가 그림 2와 같이 荷重漸減型 (soft spring type)으로 된다. 이 휨강성의 감소 현상을 Brazier이론 또는 Brazier현상이라고 하며, 휨강성의 감소는 載荷能력을 현저히 저하시킨다.」

이때 휨강성이 저하됨에 따라 곡률이 증대하게 되며, 따라서 평판화가 진행되기 시작한다. 계속해서 임의형상까지 편평화가 진행되면 최대저항을 나타내게 되고, 그 이후에는 아주 작은 모멘트가 아니면 평형을 이룰 수 없게 된다. 이때, 그림 2처럼 모멘트-곡률관계 곡선에 극한점이 생기게 되며, 이것을 휨항복 좌굴이라고 한다.

### 3. 평판형구조물에서의 Brazier이론

#### 3.1 평판의 Brazier이론

Kirchhoff의 假定은 평판의 미소변형이론에 대한 가정으로 다음 3항목으로 요약할 수 있다.

(1) 변형전에 중립면에 수직이고 직선이었던 단면은 변형후에도 직선이고 수직을 유지한다.

(2) 변형후에도 법선의 길이는 변하지 않는다.

(3) 중립면에 평행한 면에 작용하는 수직응력은 다른 응력에 비해 생략할 수 있을 정도로 미소하다.

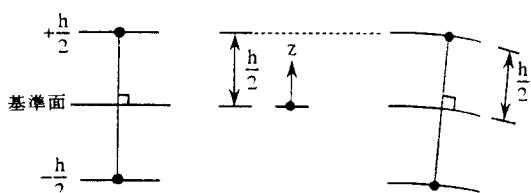


그림 3 법선의 길이 일정( $\epsilon_z=0$ )

이상을 식으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

#### (i) 微小變形

$$w \ll h, \quad (\frac{\partial w}{\partial x})^2 \ll 1, \quad (\frac{\partial w}{\partial y})^2 \ll 1 \quad (1)$$

#### (ii) 中立面의 不伸長變形(翹問題)

$$\varepsilon_x|_{z=0}=0, \quad \varepsilon_y|_{z=0}=0, \quad \gamma_{xy}|_{z=0}=0 \quad (2)$$

#### (iii) 법선유지

$$\gamma_{yz}=0, \quad \gamma_{yz}=0 \quad (3)$$

#### (iv) 법선의 길이 일정

$$\varepsilon_z=0 \quad (4)$$

#### (v) 법선방향의 응력무시

$$\sigma_z \approx 0 \quad (5)$$

이상의 Kirchhoff의 假定에서는 그림 3과 같이

“(iv) 법선의 길이 일정( $\varepsilon_z=0$ )”을 도입해서,  $W(x,y,z)=w(x,y,z)$ 를 전제로 하고 있다. 즉, 기준면의 변위  $w(x,y,z)$ 는 기준면에서  $z$  만큼 떨어진 점의 변위  $W(x,y,z)$ 와 일치한다고 가정한 것이다. 그러나, Brazier이론에서는 그림 4와 같이 기준면의 변위  $w(x,y)$ 는 기준면에서  $z$  만큼 떨어진 점의 변위  $W(x,y,z)$ 와 일치하지 않는다. 즉, “(iv) 법선의 길이 일정”的 가정이 성립하지 않는 이론( $\varepsilon_z \neq 0$ )을 평판의 Brazier이론이라고 한다.

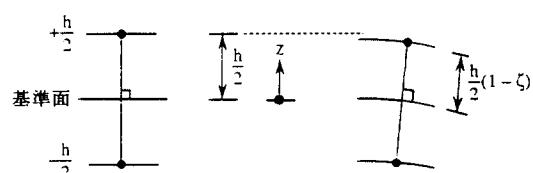


그림 4 법선 길이의 변화( $\varepsilon_z \neq 0$ )

#### 3.2 모델에 의한 Brazier현상의 파악

사진 1과 사진 2는 상하 2개의 얇은 판의 양끝에 모멘트를 가한 모델을 나타내고 있다. 사진 1에서는 두 개의 판 사이에 아무것도 넣지 않은 상태에서 모멘트를 가한 경우이고, 사진 2는 두 개의 판

사이에 상하판 보다 훨씬 작은 영계수를 갖는 스폰지를 넣은 상태에서 모멘트를 가한 경우이다. 사진 2에서 확실히 알 수 있듯이 중앙부의 판 사이의 거리는 변형 후 짧아졌음을 알 수 있다.

변형 전(사진 1, 2의 (a)) 및 변형 후(사진 1, 2의 (b, c))의 경우에 있어서 단면 2차 모멘트는, 그럼 5를 참고하여 상하판의 단면적을 각각  $A/2$ (양면  $A, A=2bt$ )라고 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{사진 1, 2(a)의 경우 : } I(0) = \frac{1}{4} A a^2 \quad (6)$$

사진 1, 2(b, c)의 경우 :

$$I(\xi) = \frac{1}{4} A a^2 (1 - \xi)^2 \quad (7)$$

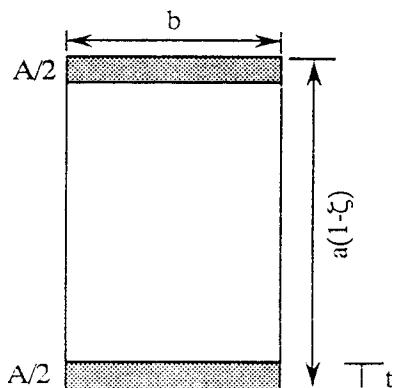


그림 5 단면의 치수

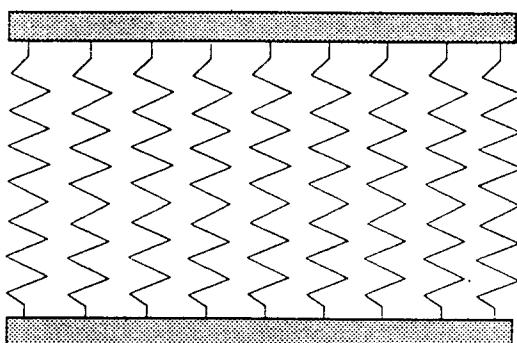
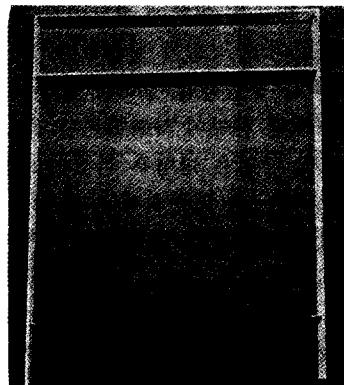
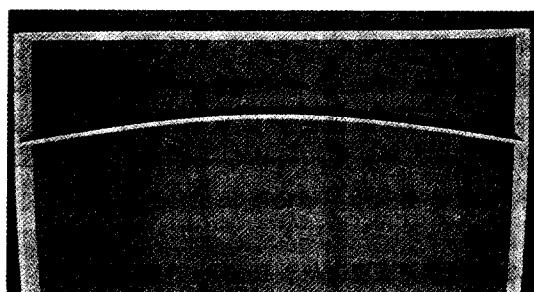


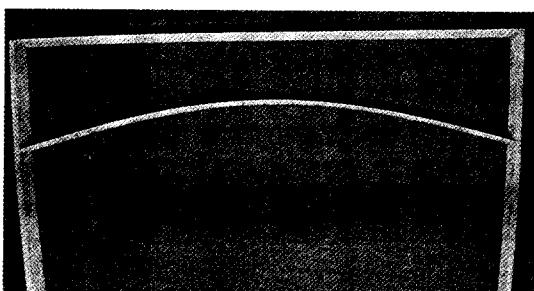
그림 6 스프링 보 모델



(a) 변형 전



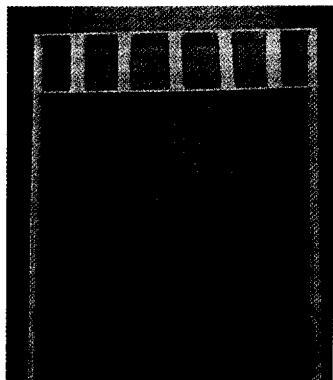
(b) 변형 후



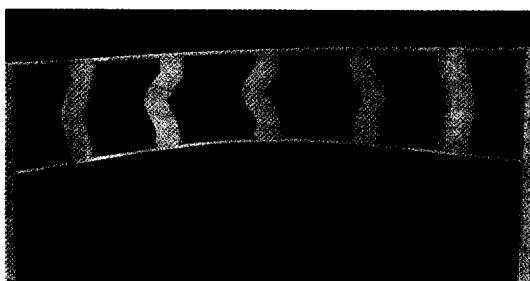
(c) 변형 후

사진 1 휨모멘트를 받는 3층적 층보

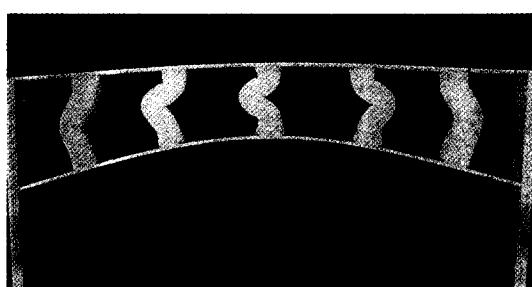
위 식에서 알 수 있듯이,  $\xi$ 가 커짐에 따라  $I(\xi)$ 는 작아지고, 휨강성  $EI(\xi)$ 는 감소한다. 이것이 편평화에 의한 휨강성의 감소 이유이다.



(a) 변형전



(b) 변형후



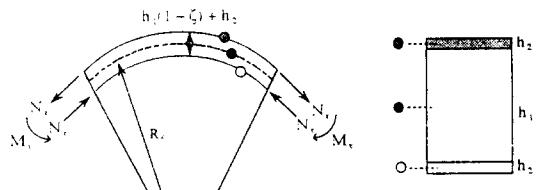
(c) 변형후

사진 2 휨모멘트를 받는 3층적층보

여기에서, 휨을 받는 상하판의 거리가 짧아지는 이유에 대해 다음의 보 모델을 들어 설명한다.

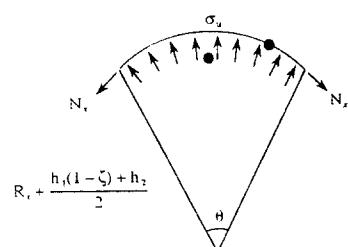
그림 6에서와 같이 상하판을 판 사이에 삽입한

스프링으로 지지한 보를 고려해 보자. 이하 스프링 보라고 표현한다. 그림 7에서 나타난 것 같이 휨모멘트  $M$ 의 작용하면, 곡률반경이  $R$ 이 되고 상하판사이의 거리는  $a(1-\zeta)$ 의 위치에서 평형을 이루고 있다. 휨모멘트  $M$ 에 의해 상판에는 引張力  $N$ 이 생기고, 하판에는 壓縮力  $-N$ 이 생긴다.

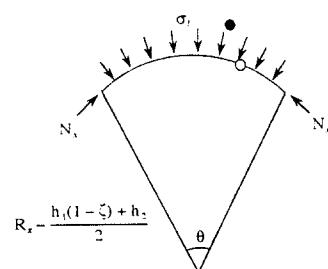


(a) 변형후 상태

(a) 변형후 상태



(b) 상부판과 중간부와의 평형



(c) 하부판과 중간부와의 평형

그림 7 상하판의 평형

휨모멘트  $M$ 와 축력  $N$ 과의 관계는 변형후에 있어서는 중심간 거리가  $a(1-\xi)$ 로 되기 때문에 다음의 관계가 성립된다.

$$M = Na(1-\xi) \quad (8)$$

다음에 상하판에 있어서의 평형을 생각해 보자. 그림 7과 같이, 引張力  $N$ 이 작용하면 그것에 평형을 이루는 일정한 법선방향의 응력  $p_u$ 가 발생한다. 법선방향응력  $p_u$ 의 크기는 곡률  $R$ 과 축력  $N$ 과의 관계를 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_u = \frac{N}{R + \frac{1-\xi}{2}a} \quad (9)$$

여기에서,  $p_u$ 는 단위폭에 대한 힘이다. 같은 방식으로 하판의 평형식으로 부터 다음을 유도할 수 있다.

$$p_l = \frac{N}{R - \frac{1-\xi}{2}a} \quad (10)$$

$p_u$ ,  $p_l$ 을 중립위치에서의 단위폭에 대해 작용하는 법선방향 성분을  $\bar{p}_u$ ,  $\bar{p}_l$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{p}_u \cdot R\theta = p_u \cdot \left(R + \frac{1-\xi}{2}a\right)\theta \quad (11)$$

$$\bar{p}_l \cdot R\theta = p_l \cdot \left(R + \frac{1-\xi}{2}a\right)\theta \quad (12)$$

위식을 정리하면

$$\bar{p}_u = \frac{N}{R}, \quad \bar{p}_l = -\frac{N}{R} \quad (13)$$

여기서,  $p_u$ 와  $p_l$ 의 부호는 반대이고, 상하판 사이에 있는 스프링에는 반력의 압축력이 작용하고 있는 것이 된다. 그 압축력을  $p$ 라고 하면 식(13)으로부터  $p = -N/R$ 이 된다. 이 압축력에 의해 상하판 사이의 거리는 줄어들게 된다.

다음은 스프링보 모델에서 실제 어떠한 현상이 일어날 것인가를 알아본다. 스프링 상수를  $k$ 라고

하고, 줄어든 양을  $-a\xi$ 라고 하면 다음의 관계가 성립한다.

$$p = k(-a\xi) = -k a \xi \quad (14)$$

다음에 모멘트  $M$ 과 곡률  $\kappa = (1/R)$ 의 관계를 유도해 보자. 우선, 상판의 변형도를 구하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\varepsilon = \frac{(R + \frac{1-\xi}{2}a) \cdot \theta - R\theta}{R\theta}$$

로 부터

$$\varepsilon = \frac{1-\xi}{2R}a \quad (15)$$

상하판의 영계수가  $E$ 일 때, 응력  $\sigma$ 는 후크의 법칙으로 부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \frac{2N}{A} = E \varepsilon \quad (16)$$

위식에 식(15)를 대입하여 정리하면 축력-곡률의 관계는 다음식과 같이 유도된다.

$$N = \frac{E A (1-\xi)}{4R} a \quad (17)$$

식(13)으로부터  $p = -N/R$ 을 대입하면

$$N = ka\xi R \quad (18)$$

식(17), (18)로 부터

$$\frac{\xi}{1-\xi} = \frac{EA}{4kR^2} = \frac{EA}{4k} \kappa^2 \quad (19)$$

의 관계를 얻을 수 있으며,

$\frac{\xi}{1-\xi} = \frac{1}{1-\xi} - 1$ 의 관계를 이용하면, 다음식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{1-\xi} = 1 + \frac{EA}{4k} \kappa^2 \quad (20)$$

위 식들로 부터 모멘트의 일반식은 다음과 같이 유도 된다.

$$M = \frac{EA}{4R} a^2 (1-\xi)^2 \quad (21)$$

위식에 식(20)을 대입하고,  $\kappa=1/R$ 을 이용하면

$$M(1 + \frac{EA}{4k} \kappa^2)^2 = \frac{EA}{4} a^2 \kappa \quad (22)$$

여기서, 다음의 無次元量을 도입한다.

$$\bar{M} = \frac{2M}{\sqrt{kEA} \cdot a^2}, \bar{\kappa} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{EA}{k}} \cdot \kappa \quad (23)$$

위식을 이용하여 정리하면 모멘트-곡률관계는 다음식과 같이 유도된다.

$$\bar{M} = \frac{\bar{\kappa}}{(1+\bar{\kappa}^2)^2} \quad (24)$$

위식을 그래프로 나타낸 것이 그림 8의 上部 實線이다. 모멘트  $M$ 이 최대가 되는  $\bar{\kappa}$ 는

$$\bar{\kappa} = \sqrt{\frac{1}{3}} = 0.577 \quad (25)$$

이때의 최대모멘트  $\bar{M}_{max}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{M}_{max} = 0.324 (\bar{M}_{max} = 0.162 \sqrt{kEA} a^2) \quad (26)$$

식(23)의  $\bar{\kappa}$ 를 식(20)에 대입하면

$$\xi = \frac{\bar{\kappa}^2}{1+\bar{\kappa}^2} \quad (27)$$

위식이  $\xi$ 와  $\bar{\kappa}$ 의 관계식이 된다. 이 관계식을 나타낸 것이 그림 8의 下部 實線이다. 위식에 식(25)

의  $\bar{\kappa}=1/\sqrt{3}$ 를 대입하면

$$\xi = \frac{1}{4} \quad (28)$$

위식은 모멘트가 최대가 되는 점에서의 상하판 사이의 거리가  $a(1-\xi)=3a/4$ 이 되고 있음을 나타내고 있다. 식(6), (7)에  $\xi=1/4$ 를 대입하면  $I$

$(1/4)/I(0)=0.562$ 이 되기 때문에 휨강성  $EI(\xi)$ 는 無荷重狀態時의 약 56%가 되고 있음을 알 수 있다.

그림 8로부터 알 수 있듯이,  $\bar{M}-\bar{\kappa}$  관계는 荷重漸減型의 상태가 됨을 알 수 있다. 또한,  $\xi$ 는  $\bar{\kappa}$ 의 증가와 함께 일정하게 증가하고 있음을 나타내고 있다.  $\bar{\kappa}<1.0$ 에서  $\bar{M}$ 는 최대가 되므로 식(24), (27)을  $\bar{\kappa}<1.0$ 로써 근사화하면, 다음의 식이 된다.

$$\bar{M} = \bar{\kappa} (1 - 2\bar{\kappa}^2), \quad \xi = \bar{\kappa}^2 \quad (29)$$

이 근사곡선은 그림 8의 점선으로 나타내고 있다.

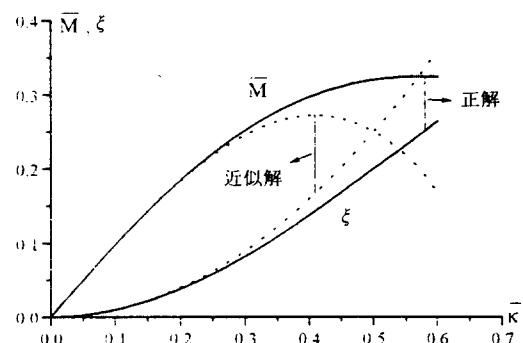


그림 8 모멘트-곡률-감소비 관계곡선

### 3.3 전포텐셜 에너지(Total Potential Energy) 최소의 원리를 이용한 기초식의 유도

스프링 보 모델의 경우 유도했던 기초식에 있어서, 전 포텐셜에너지 최소의 원리를 이용하여 기초식을 유도하고, 그 결과식을 비교한다.

보의 탄성 휨방정식은 다음과 같다.

$$M = \kappa EI \quad (30)$$

또한,  $I(\xi)$ 는 식(6)에서 주어지기 때문에, 2개의 판에 있어서 변형에너지는 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \kappa^2 EI(\xi) \quad (31)$$

이때, 상하판간의 스프링에 저장되는 변형도에너지는 다음과 같다.

$$\frac{1}{2}\kappa a^2\xi^2 \quad (32)$$

모멘트  $M$ 에 의한 외력 포텐셜에너지는  $M\kappa$ 이므로, 이것들을 이용하면, 전 포텐셜에너지  $U$ 는 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{2}\kappa^2 EI(\xi) + \frac{1}{2}\kappa a^2\xi^2 - M\kappa \\ = \frac{1}{8}\kappa^2 EAa^2(1-\xi)^2 + \frac{1}{2}\kappa a^2\xi^2 - M\kappa \quad (33)$$

위식에 있어서  $U(\kappa, \xi)$ 의 함수관계를 갖기 때문에, 전 포텐셜에너지의 최소원리를 도입하면 다음의 기초식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{4}\kappa EAa^2(1-\xi)^2 - M = 0 \quad (34)$$

$$-\frac{1}{4}\kappa^2 EAa^2(1-\xi) + \kappa a^2\xi = 0 \quad (35)$$

위식은 식(20), (21)과 일치하고 있으며, 식(33)에서  $(1-\xi)^2 = 1 - 2\xi + \xi^2$ 의 고차항  $\xi^2$ 를 생략하면 다음의 식이 된다.

$$U = \frac{1}{8}\kappa^2 EAa^2(1-2\xi) + \frac{1}{2}\kappa a^2\xi^2 - M\kappa \quad (36)$$

전 포텐셜에너지의 최소원리를 도입하면 다음의 평형방정식이 유도된다.

$$\frac{1}{4}\kappa EAa^2(1-2\xi) - M = 0 \quad (37)$$

$$-\frac{1}{4}\kappa^2 EAa^2 + \kappa a^2\xi = 0 \quad (38)$$

식(37), (38)을 식(23)과 같이  $M$ 와  $\kappa$ 를 무차원화하면

$$\bar{M} = \bar{\kappa}(1-2\bar{\kappa}^2), \xi = \bar{\kappa}^2 \quad (39)$$

위식은 식(29)와 일치하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

적층왕관에 있어서 각 층의 재료상수가 뚜렷하게 다른 경우, 그 평판은 지금까지의 Kirchhoff이

론과는 다른 구조거동을 나타내고 있다. 본 논문은 평판에서의 그러한 거동을 파악하는데 있어서 원판에서의 Brazier 현상과 유사한 현상이 일어날 것을 전제로 하고 있다. 우선, 평판에서의 Brazier 현상을 규명하기 위해 보 모델을 만들어 각 층의 재료정수가 뚜렷하게 다른 경우 어떠한 현상이 일어날 것인가를 실험을 통해 규명하였고, 수학적 계산을 위해 스프링 보 모델을 채택하여 정식화하였다. 보 모델에서 알 수 있듯이 중간층의 재료상수가 상하판의 재료상수 보다 뚜렷하게 작은 경우 중간층이 줄어듦을 알 수 있었다. 스프링 보 모델의 해석에서는 휨강성  $EI(\xi)$ 는 無載荷狀態時의 약 56%가 되어 있음을 알 수 있다. 여기서, 그림 8로부터 알 수 있듯이  $\bar{M} = \bar{\kappa}$  관계는 荷重漸減型의 상태가 됨을 알 수 있다. 즉, 본 논문에서 채택한 모델의 경우에 있어서도 원통판에서 일어나는 Brazier 현상이 일어나고 있음을 알 수 있으며, Kirchhoff의 가정 중 제4의 가정, 즉 “법선의 길이는 일정( $\varepsilon_z=0$ )”이 성립하지 않음을 보여주고 있다.

본 논문은 지금까지의 웨일링구조에서 다루어졌던 Brazier 현상을 평판형구조에의 응용의 第1步로써 보 모델을 사용하여 이론을 전개하였으며, 실제의 평판형 구조물에 적용한 응용해석 결과는 다음의 기회에 발표하기로 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 1995년도 초대형 구조시스템 연구센터의 지원으로 수행되었습니다. 이에 대해 귀 센터에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Brazier, L. G., On the flexure of Thin Cylindrical shells and Other Thin Sections, Proceedings of Royal Society of London, Series A, Vol. 116, 1927, pp. 104-114
2. Calladine, C. R., Theory of Shell Structures, Cambridge University Press, 1983.
3. 半谷裕彦, 崔鉉植 : 水平力を受ける塔状型圓筒シ

- エル局部座屈, 日本建築學會論文報告集, 第346號,  
1984. 12, pp. 71-77,
4. 松岡理 : シエルの三次元解析, 空間構造, 第1卷,  
1993, pp. 45-60.
5. 山田耕司, 松岡理, 松井徹也, 大森博司 : 縦型圓筒  
シエルの3次元解析による曲げ問題の解, 日本建築  
學會大會學術講演梗概集, 1993, pp.1463-1464.
6. 松岡理, 山田耕司, 上村充範 : 純曲げの作用する  
縦型圓筒シエルの有限變形解析, 日本建築學會大  
會學術講演梗概集, 1993,pp. 1461-1462.
7. 金 在烈 : 積層平板構造ブラジル現象に関する解  
析的研究, 東京大學 博士學位論文, 1996
8. 半谷裕彦 : 平板の基礎理論, 彰國社, 1995

(접수일자 : 1996. 8. 7)