
 論 文

大韓造船學會誌
 第20卷 第4號 1983年 12月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 20, No. 4, December 1983

補剛된 有孔板의 挫屈強度解析(第2報)

—剪斷挫屈—

張 昌 斗* · 羅 昇 洙**

The Buckling Analysis of Stiffened Plate with Hole(2nd Report)

—Shear Buckling—

by

C.D. Jang · S.S. Na

Abstract

When the perforated panels are under in-plane shear loads, shear buckling analysis is also necessary because of the presence of stress concentration around holes.

To constrain it, we need some reinforcement. The methods of reinforcement are attaching doubler around hole and stiffeners in the arbitrary directions.

In this paper, two kinds of methods mentioned above are investigated, it is also clarified that which of the two is the more effective reinforcement.

For the sake of convenience those arbitrary directions were selected parallel (90°) and oblique (135°) to the edge.

From the results of the above investigation, following conclusion was obtained. In case of parallel stiffeners, doubler reinforcement gives higher buckling strength than stiffener, however, in case of oblique stiffeners, stiffener reinforcement gives higher buckling strength than doubler when the external load direction is known.

1. 緒 言

最近 船舶의 大型化로 transverse web frame은 相對的으로 두께가 얇어지고 各種의 開口를 갖는 것이 常例가 되어 從來에는 問題가 되지 않았던 開口部의 強度가 큰 問題로 대두되고 있다. 開口가 壓縮挫屈에 미치는 影響에 對해서는 Yim 등이 다루었으며[1], 本論文에서는 剪斷挫屈에 미치는 影響에 對해서 檢討해 보고자 한다.

正方形 有孔板의 剪斷挫屈에 對한 처음 시도는 1949년에 Kroll에 依해서 었는데, 여기서는 Timoshenko의

energy method가 使用되었다.

1967年 Rokey, Anderson, Cheung[2]이 有限要素法을 利用하여 같은 問題를 해결하였다.

開口가 剪斷挫屈에 미치는 影響에 對해서는 正方形板의 中心에 圓形開口를 設置해 그 直徑이 變化하는 경우[3], 板幅比와 境界條件의 變化에 따른 挫屈係數 등이 계산되었다[4].

西原[12]등은 補剛시킨 경우를 解析하여 구멍을 뚫음으로서 생긴 挫屈強度의 弱화를 크게 補剛시킬 수 있다는 것을 보여주었다.

本 論文에서는 먼저 正方形板의 中心에 圓形開口를 設置해 有孔板을 解析하였다. 그리고 補剛된 有孔板을

接受日字: 1983年 10月 24日, 再接受日字: 1983年 11月 7日.

* 正會員, 서울大學校 工科大学

** 正會員, 서울大學校 大學院

解析하였는데, 開口에 接해 板의 兩邊에 平행한 경우 (90°)와 경사진 경우(135°)에 對해 stiffener를 板의 中央面에 對稱으로 붙인 補剛板과 開口주위에 doubler를 붙인 補剛板에 剪斷荷重을 加하여 挫屈値를 有限要素法에 依해 求하였다.

여기서 求한 挫屈値를 基礎로 여러가지 補剛方法에 對하여 가장 效果의인 方法을 提示하고자 한다.

2. 解析方法

2.1. 概 要

Fig. 1에서 보인 것같이 剪斷荷重을 받는 비교적 얇은 平板과 stiffener에 對해서 挫屈變形에 따른 energy

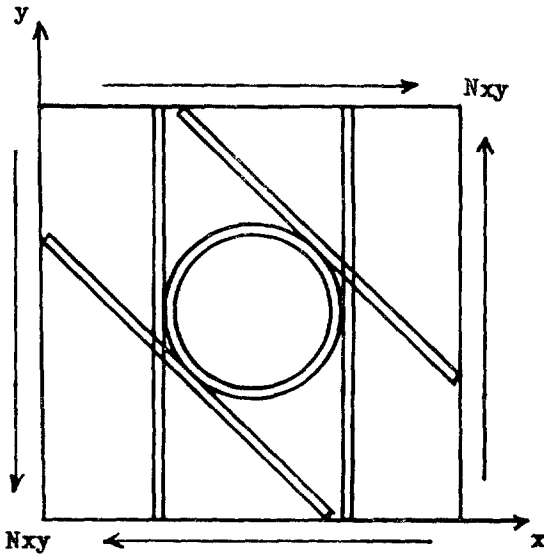


Fig. 1 Inplane load

를 考察하고 이것을 最小 potential energy原理를 利用하여 有限要素法으로 定式化하여 挫屈解析을 하였다.

2.2. 有限要素法の 定式化[1]

total potential energy Π 는

$$\begin{aligned} \Pi &= U + V \\ &= \frac{D}{2} \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \\ &\quad - \frac{1}{2} \iint \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2N_{xy} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] dx dy \end{aligned} \quad (1)$$

有限要素法으로 定式化시키면, 變形에 너지 U 는

$$U = \frac{1}{2} \iint_{AN} \{\delta_N\}^T [B]^T [D] [B] \{\delta_N\} dx dy \quad (2)$$

여기서

$$[K_N] = \iint_{AN} [B]^T [D] [B] dx dy$$

外力(初期應力)의 potential energy V 는

$$V = \frac{1}{2} \iint_{AN} t \{\delta_N\}^T [G]^T [\sigma] [G] \{\delta_N\} dx dy$$

여기서

$$[K_N'] = \iint_{AN} t [G]^T [\sigma] [G] dx dy$$

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix}$$

σ 는 外力으로서 剪斷荷重이 주어졌을 때 面內에 分布되어 있는 應力으로 有孔板에서는 應力集中이 생기므로 有限要素法에 依해 面內應力을 求해야 한다.

以上の 結果에서 板全體의 total potential energy Π 는

$$\Pi = \frac{1}{2} \{\delta\}^T [K + K'] \{\delta\} \quad (4)$$

變分을 取해 0으로 놓으면

$$\delta \pi = [K + K'] \{\delta\} = 0 \quad (5)$$

여기서 求한 固有値中 제일 작은 값이 挫屈荷重을 決定한다.

本 論文에서는 이 固有値를 subspace iteration method를 使用하여 挫屈係數를 求하였다

3. 解析例

3.1. Program의 構成

本 論文의 program은 平板과 stiffener의 特性値, 境界條件등의 入力은 subprogram INPUT에서 하고, subprogram STiFPB에서는 3角形要素를 使用하여 subprogram STiFS에서는 stiffener要素를 使用하여 굽힘 剛性和 幾何學的 剛性行列을 求하고 subprogram ADDBAN과 ASSEM에서 assemble시켰으며 subprogram BAND에서 band特性을 고려하여 面內應力을 求했으며 subprogram DSUB에서는 band幅을 고려하여 subspace iteration method로 풀어서 挫屈係數와 挫屈形狀을 求하였다.

3.2. 解析例

model은 600×600mm의 正方形板으로 板두께는 6.5 mm이다. 形狀은 Fig. 3에 보인것같이 板의 中心에 圓孔이 뚫어져 있고 그 直徑은 160mm와 250mm이다 (Table 1).

stiffener는 平板과 同一한 材料로 두께는 6.5mm이고 平板의 表面으로부터 13mm씩 兩表面에 對稱으로 붙인것이다.

簡單한 例題에서 計算한 結果를 Table 2에 보인다. Table 2는 아래 그림에 보인 것 같이 單純支持의 正方

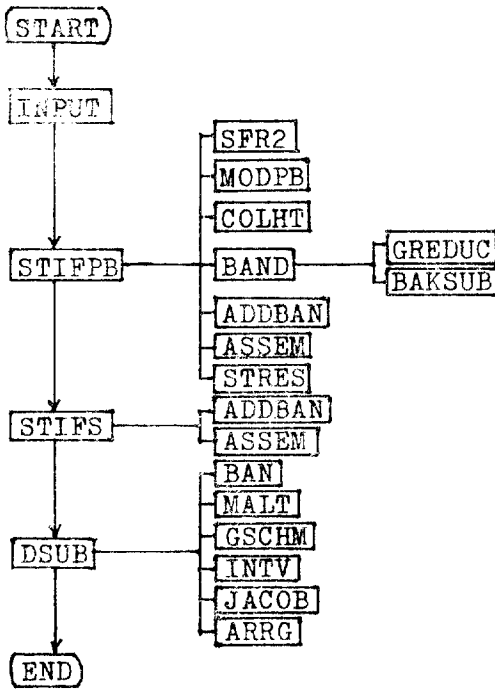


Fig. 2 Structure of program

Table 1 Types of models

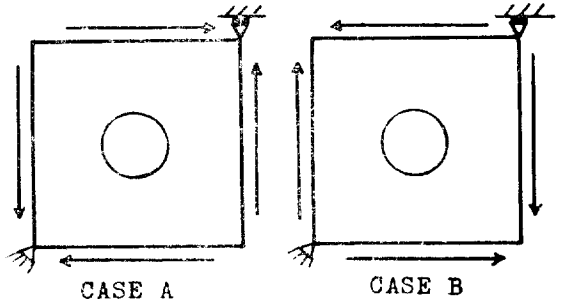
	Hole radius (mm)	Length of stiffener (mm)	Angle(°)
Model S1	160	0	
S2	160	212.5	90
S3	160	435.4	90
S4	160	600	90
S5	160	251.2	
S6	160	200	135
S7	160	455	135
S8	160	648.4	135
Model L1	250	0	
L2	250	200	90
L3	250	400	90
L4	250	600	90
L5	250	392.5	
L6	250	141.4	135
L7	250	353.5	135
L8	250	565.6	135

形板에 剪斷荷重을 加했을 때의 挫屈係數이며 그 正解는 $k=9.34$ 이다.

이 結果로 부터 本 論文의 挫屈計算法은 mesh를 크게 늘려 有孔板을 解析하였으므로 충분히 正解에 수렴

Table 2 Test calculation

	Mesh	4×4	8×8	12×12
Timoshenko	K	9.34	9.34	9.34
Authors	K	8.282	8.968	9.23
	error(%)	11.4	3.9	1.2



하리라고 생각한다.

다음은 Fig. 3에서 도시한 各 model에 對하여 剪斷挫屈係數를 두가지 荷重方向 즉, CASE A 및 CASEB에 對하여 계산한 結果를 Table 3에 실었다.

stiffener를 90°로 붙인 model과 doubling을 한 model은 CASE A와 CASE B 모두 거의 같은 값을 나타내었으며 stiffener를 135°로 붙인 model은 荷重方向에 對

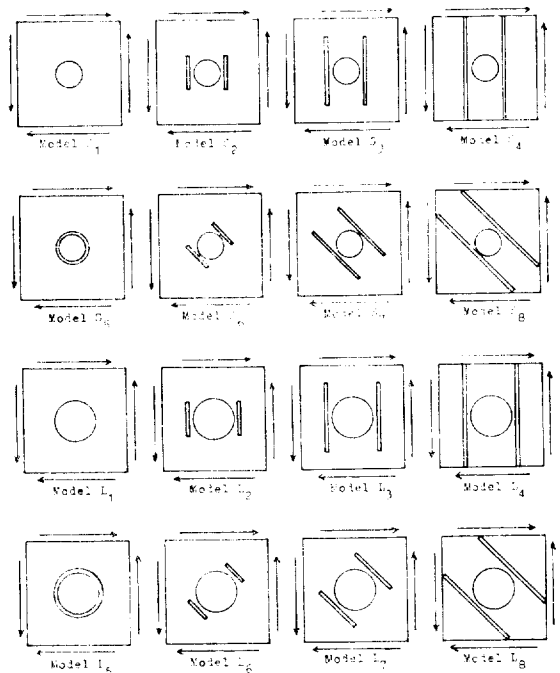


Fig. 3 Shapes of models

Table 3 Buckling coefficients of models

	Buckling coefficient (CASE A)	Buckling coefficient (CASE B)
Model S1	6.254	
S2	7.935	
S3	12.690	
S4	13.677	
S5	10.483	
S6	12.659	6.859
S7	17.346	7.982
S8	20.970	8.778
Model L1	4.353	
L2	4.797	
L3	7.784	
L4	9.523	
L5	9.261	
L6	7.362	4.665
L7	11.985	5.283
L8	14.014	6.084

해 커다란 차이를 보여주었다.

荷重方向을 모를때 CASE A와 CASE B에서 求한 挫屈荷重을 실제 構造物에 적용할 때는 상당한 주의를 기울여야 하겠다. 또한 壓縮挫屈時와 마찬가지로 圓孔이 작은 Model Si에 비해 圓孔이 큰 Model Li가 挫屈強度가 低下되고 있는데 이것은 圓孔이 커짐에 따라 應力集中이 커지고 構造物의 굽힘剛性이 低下되는데 기인된다고 본다. 補剛材의 길이가 길수록 挫屈強度는 증가하지만 stiffener補剛과 doubler補剛中 어느것이 有

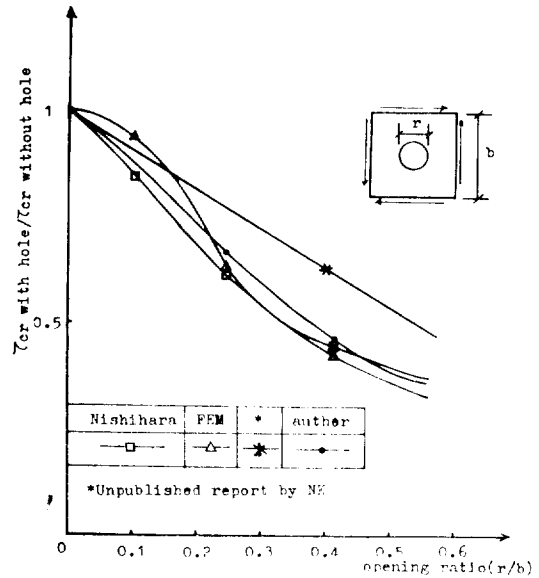


Fig. 4 Comparison of buckling strength of perforated panels

利할 것인가는 荷重方向에 따라 상당한 차이가 있으므로 注意를 해야 하겠다.

以上の 結果에 對해 挫屈時의 補剛板의 挫屈形狀 및 面內初期應力分布를 검토하여 보다 구체적인 考察을 해 보고자 한다.

4. 考 察

剪斷荷重에 依해서 구멍 주위에서는 壓縮荷重과는

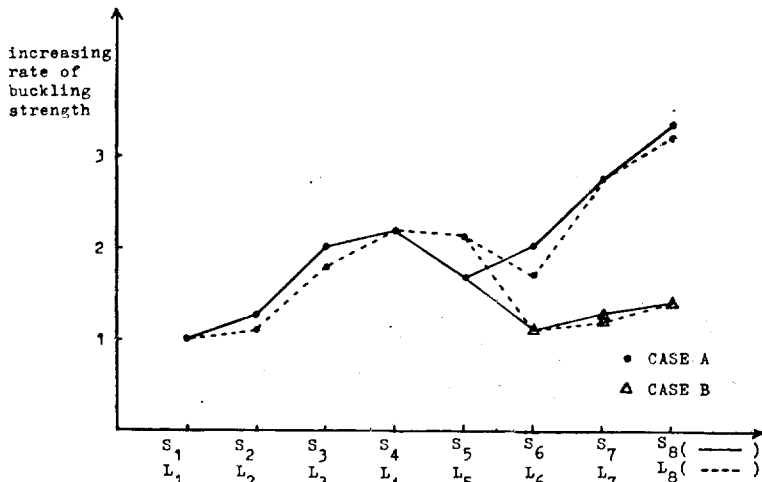


Fig. 5 The increasing rate of buckling strength based on Model S1 and L1

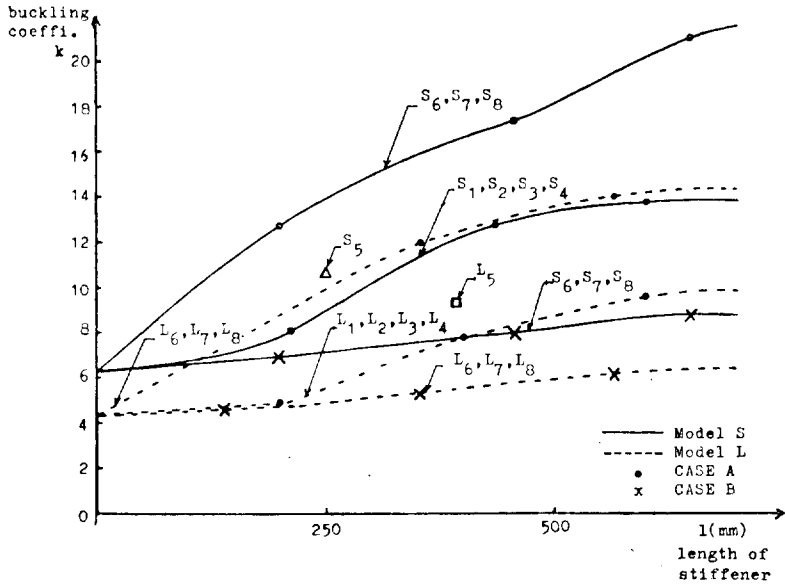


Fig. 6 The Buckling coefficient in proportion to length of stiffener

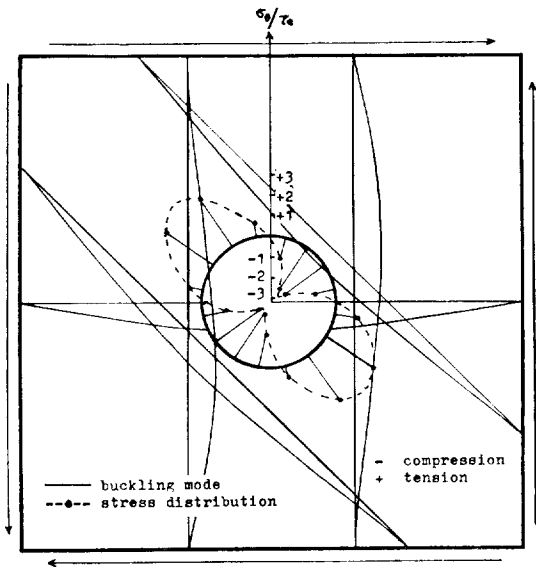


Fig. 7 The buckling mode and stress distribution of Model S_1

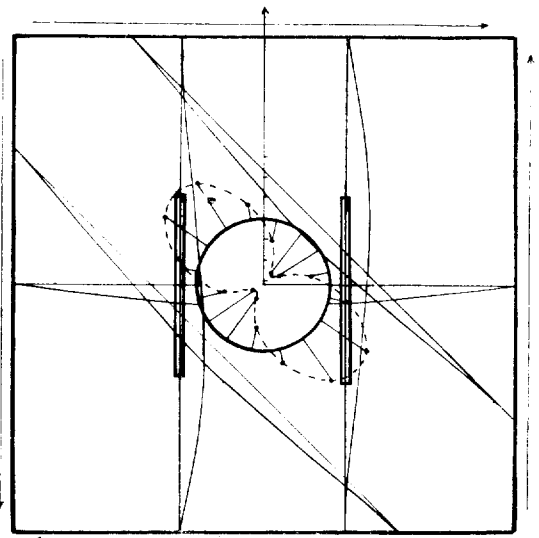


Fig. 8 The buckling mode and stress distribution of Model S_2

달리 壓縮應力과 引張應力 모두 集中됨을 보여주었다. 壓縮應力과 引張應力集中이 90° 간격으로 교대되었으며 그 集中率은 3배 정도였다.

Model S_1 과 Model L_1 에서 直徑을 늘려 挫屈形狀과 挫屈時의 板內의 應力分布를 比較한 結果 直徑이 커짐에 따라 應力集中이 커져 壓縮應力과 引張應力이 커졌으며 剛性도 그만큼 떨어져 挫屈強度는 낮아졌다.

Model S_1 과 S_2 , L_1 과 L_2 를 比較한 結果, 應力集中面에서 큰 차이를 나타내지 못했는데, 이것은 荷重方向과는 45° 기울어져 補剛되었기 때문에 應力集中을 크게 防止 못했으나 stiffener의 剛性이 커진 영향으로 挫屈強度가 증대되었다. Model S_3 와 S_4 , L_3 와 L_4 도 마찬가지로 stiffener의 剛性때문에 挫屈強度가 더 증대되었다.

Model S_1 과 S_6 , L_1 과 L_6 를 比較한 結果, 구멍 直徑

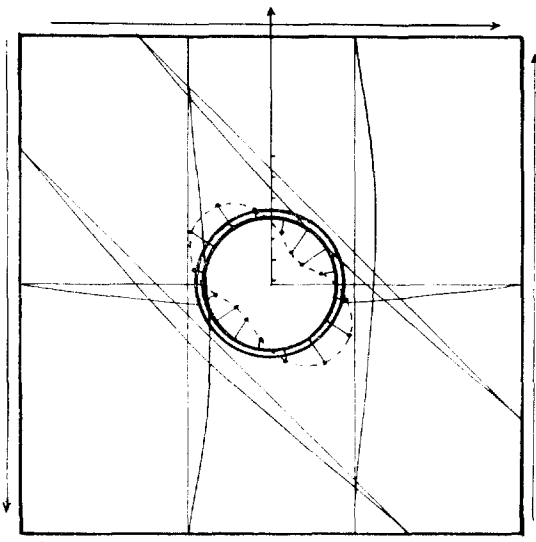


Fig. 9 The buckling mode and stress distribution of Model S_5

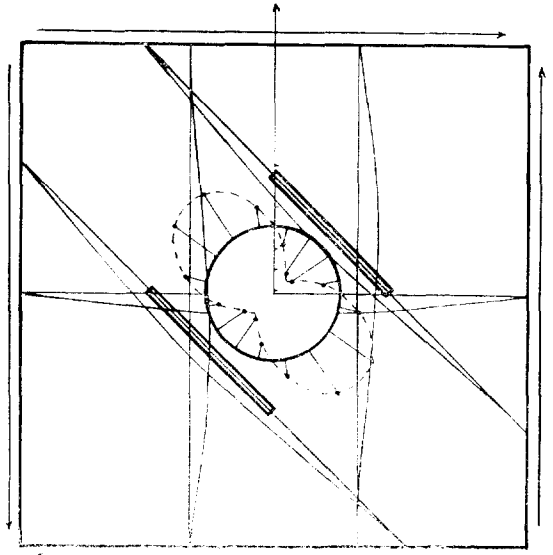


Fig. 10 The buckling mode and stress distribution of Model S_6

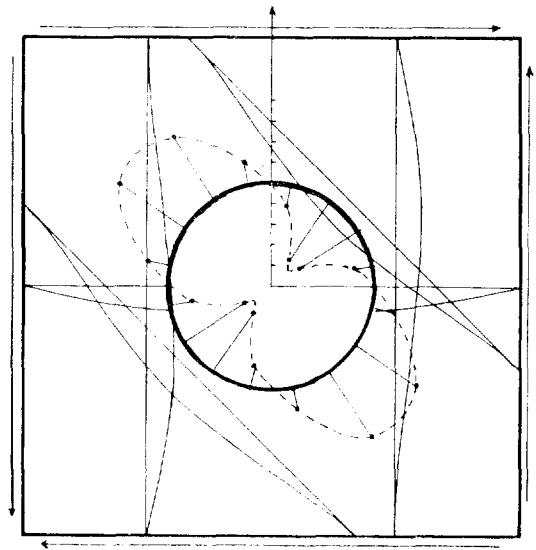


Fig. 11 The buckling mode and stress distribution of Model L_1

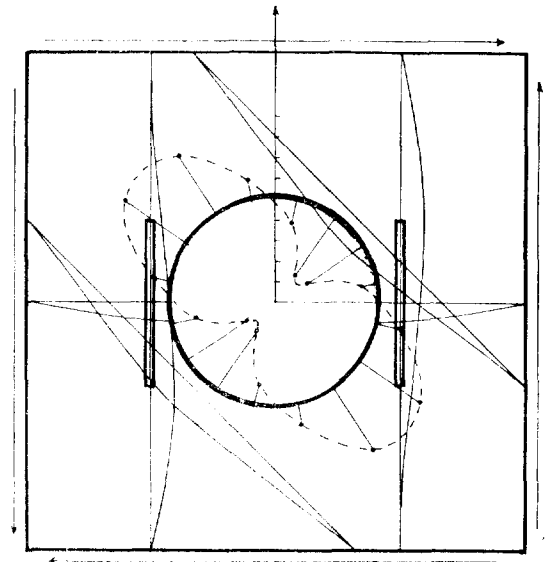


Fig. 12 The buckling mode and stress distribution of Model L_2

크기의 stiffener를 붙인 效果는 대단히 커 應力集中을 크게 防止하여 壓縮應力이 크게 줄어들었으며, 引張應力은 별 차이가 없었다. 게다가 剛性까지 증대되어 높은 挫屈強度를 나타내었다. 이것은 荷重方向으로 補剛을 시킨 경우와 같아 應力集中을 크게 防止한 結果라 생각된다. Model S_7 과 S_8 , L_7 과 L_8 도 마찬가지로 應力集中面에선 Model S_6 , L_6 와 별 차이가 없었으나 剛

性이 커져 挫屈強度가 대단히 크게 되었다.

荷重方向에 따른 CASE A와 CASE B를 比較해 본 結果 Model S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 및 L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 는 별 차이가 없었으나 Model S_6 , S_7 , S_8 및 L_6 , L_7 , L_8 은 커다란 차이를 보여주었다.

이것은 荷重方向이 바뀌면 前者는 같은 形狀을 이루지만 後者は 剛性面에서 stiffener의 方向이 壓縮荷重方

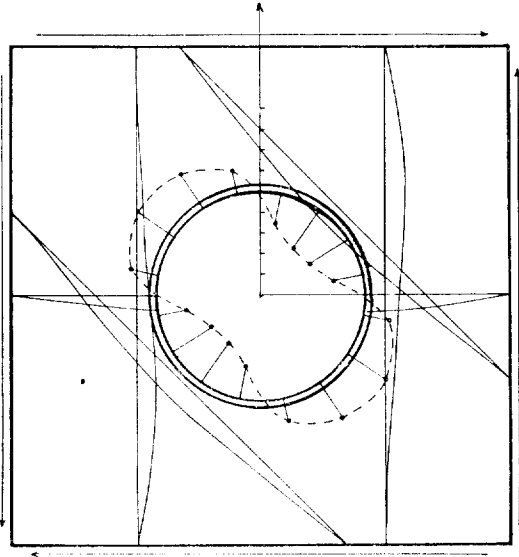


Fig. 13 The buckling mode and stress distribution of Model L_5

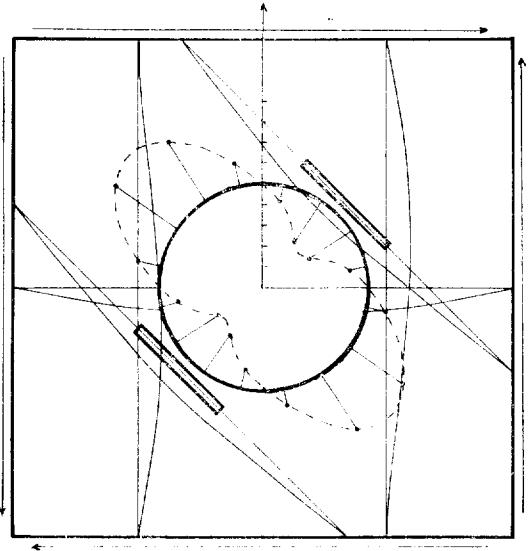


Fig. 14 The buckling mode and stress distribution of Model L_6

向과 一致하던 것이 荷重方向과 90° 를 이루어 剛性이 크게 떨어지는 것에 기인된 것이라 생각된다.

다음에 doubler와 stiffener의 補剛을 比較하기 위해 doubler의 길이만큼의 直線 stiffener를 붙인 경우와 doubler를 붙인 Model S_5 와 L_5 를 比較했는데, CASE A에서는 Model S_5 와 L_5 는 stiffener를 135° 로 붙인 model보다는 挫屈強度가 낮았지만 stiffener를 90° 로 붙인 model보다는 높았다. CASE B에서는 Model S_5 와 L_5 는 stiffener를 135° 로 붙인 model과 90° 로 붙인 model보다 挫屈強度가 컸다. Fig. 6에서 Δ 表는 doubler를 붙인 S_5 의 挫屈係數이며 \square 表는 doubler를 붙인 Model L_5 의 挫屈係數이다.

結論적으로 荷重方向을 안다면 즉, CASE A와 CASE B를 定할수 있다면 CASE A에서는 doubler補剛보다는 stiffener補剛이 훨씬 有利하고, CASE B에서는 doubler補剛이 stiffener補剛보다 有利한 것을 알수 있다.

이밖에 平板의 대각선方向으로 一直線으로 補剛材를 붙혀 解析했는데, CASE A에서는 $k=7.192$ 가 나왔고 CASE B에서는 5.271이 나왔다. 같은 길이로 補剛한 Model L_1 과 比較하면 상당히 挫屈強度가 낮은 것을 알수있다. 또한 사각형의 stiffener를 붙혀 解析한 결과 doubling을 한 效果와 거의 같은 結果를 보여 주었다.

5. 結 言

本 論文에서 有孔板과 補剛된 有孔板에 對해 剪斷挫屈解析을 하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

- (1) 孔의 直徑이 커짐에 따라 挫屈強度는 낮아진다.
- (2) 보통 平板과는 달리 有孔板에서는 孔주위에서 應力(剪斷荷重에서는 壓縮과 引張應力) 集中이 發生하므로 初期應力을 面內境界條件을 주어 求해야 한다.
- (3) 剪斷荷重의 方向에 따라 挫屈係數는 달라진다.
- (4) stiffener를 길게 補剛시키면 挫屈強度는 크게 된다.
- (5) stiffener의 重量이 같을때 CASE A에서는 doubler로 補剛한 model이 stiffener를 135° 로 붙인 model보다 挫屈強度가 낮았고 90° 로 붙인 model보다는 컸으며 CASE B에서는 doubler로 補剛한 model이 stiffener를 135° 나 90° 로 붙인 model보다 挫屈強度가 컸다.
- (6) 따라서 效果의인 補剛方法은 荷重方向을 알때는 stiffener를 壓縮應力方向으로 붙혀 補剛하면 좋고, 荷重方向을 모를때는 doubler나 4각형 stiffener로 補剛하는 것이 좋다.

앞으로 shear와 compression을 同時에 받는 補剛된 有孔板에 對해 解析할 예정이다. 끝으로 本 研究는 한국과학재단의 支援事業의 一環으로 遂行되었음을 付記한다. 또한 本 研究遂行에 적절한 助言을 주신 서울工

大任尙鑣教授와 진해 기계창의 송준테 박사께 감사드립니다.

參 考 文 獻

- [1] 任尙鑣, 張昌斗, 羅昇洙, “補剛된 有孔板의 挫屈 強度解析(第 1 報)”, J. of SNAK. Vol. 19, No. 4, Dec. 1982.
- [2] K.C. Rokey, R.G. Anderson and Y.K. Cheung, “The Behavior of Square Shear Webs Having a Circular Hole”, Thin Walled Steel Structures. 1968. pp.48-172.
- [3] W.D. Kroll, “Instability in Shear of Simply Supported Square Plates with Reinforced Hole,” J. of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 43. Nov., 1949.
- [4] S.P. Timoshenko and J.M. Gere, “Theory of Elastic Stability,” 2nd ed. McGraw-Hill Ltd. 1941.
- [5] C.D. Dym and I.H. Shame, “Solid Mechanics, a Variational Approach,” McGraw-Hill Ltd. 1973.
- [6] Szilard, “Theory and Analysis of Plates”, Prentice-Hall Inc. 1974.
- [7] K.C. Rokey and H.R. Evans, “The Finite Element Method”, Granada Publishing Ltd. 1975.
- [8] Klaus-Jürgen Bathe and Edward L. Wilson, “Numerical Method in Finite Element Analysis”, Prentice-Hall Inc. 1976.
- [9] E. Hinton and D.R.J. Owen, “Finite Element Programing”, Academic Press 1977.
- [10] Kanwar K. Kapur and B.J. Hartz, “Stability of Plates using the Finite Element Method”, EM. 1966.
- [11] J.F. Grosskurth and R.H. Gallagher, “Shear Buckling of Square Perforated Plates”, ASCE. EM 6. 1976.
- [12] 西原誠一郎 外, “有孔板의 剪斷強度と補強について”, 日本造船學會春季講演會, 昭和 55年 5月
- [13] Y. Fujita, K. Yoshida and H. Arai, “Instability of Plates with Hole” (2nd Report), J. Soc. Naval Arch. Japan, Vol. 127, 1969.
- [14] Y. Fujita, K. Yoshida and H. Arai, “Instability of Plates with Hole” (3rd Report), J. Soc. Naval Arch. Japan, Vol. 127, 1970.