

주름판구조물의 강성계수 해석 및
응용에 관한 연구

정 강*, 정 석 주**

A Study on the Analysis and Application
for stiffness of Corrugated Plate

Chung Kang*, Suk-Choo Chung**

Abstract

In this study, the bending and twisting stiffnesses of corrugated plate are analyzed by applying equivalent idea. And the natural frequencies as an application example of the stiffnesses are analyzed by considering corrugated plate as orthotropic plate. The validity of analytic results is examined by comparing with experimental results by fast Fourier transformation analyzer.

**삼우시스템
* 서울산업대학 기계설계학과

1. 서론

판구조물은 많은 산업분야에서 하나의 중요한 구조물 구성요소로서 널리 이용되어 왔다. 특히, 주름판 (corrugated plate) 등과 같은 판구조물은 자동차, 조선, 항공 및 우주 등의 산업분야에서 중요한 구조물 구성요소로서 비중이 큰 판구조물이다. 따라서, 주름판을 비롯한 판구조물의 안정성 및 동적 문제 등에 대한 보다 정확한 해를 마련함으로써, 실제 구조물의 설계문제에 기여할 수 있도록 하여야 한다. 이러한 판구조물의 안정성 및 동적 문제 등과 관련한 여러가지 파라메타 가운데 필수적인 파라메타의 하나로서 강성계수를 예로 들 수 있다. 그러나, 주름판을 비롯한 판구조물에 대한 강성계수는 그 중요성 및 이용도에 비하여 보다 엄밀한 해가 마련되어 있지 않은 실정이다.

이에 따라서 판구조물의 강성계수의 해석을 보다 엄밀하게 하고자 노력하는 많은 연구자를 찾아 볼 수가 있다. 특히, 주름판 자체의 기하학적 특징을 고려해야 하는 주름판의 강성계수 해석에 대하여 많은 논문이 발표되어 왔다. Seydel¹⁾은 파형 주름판에 대하여 주름진 방향이 일정한 방향을 갖고 있으면서 주름수가 많고 주름의 길이가 판의 측면길이에 비하여 매우 짧다면 직교이방성판으로 간주할 수 있다는 가정을 전제로 하고 압축실험을 통하여 등가의 강성계수를 산정하는 식을 제시하였고, Fung²⁾은 파형 주름판을 평판에 부착시킨 구성요소에 대하여 유한차분법을 이용하여서 직교이방성판의 방정식과 같은 형의 지배방정식을 유도함으로써 기하학적 해석방법을 제시함과 아울러 기존의 일반 판이론인 비틀림모멘트 $M_{xy} = M_{yx}$ 가 성립하지 않음을 지적하였으며, Kinloch³⁾은 사다리꼴형 주름판과 평판이 조립된 판넬에 대하여 합리적인 강성계수의 해석을 하고자 노력하였다.

Perel⁵⁾은 사다리꼴형 주름판에 대하여 하나의 주름요소에 대한 간단한 기하학적인 관계만을 이용함으로써 비틀림모멘트 $M_{xy} = M_{yx}$ 조건인 강성계수식을 구하였고 또, 이 주름판을 직교이방성판이 아닌 셀의 집합체로 가정하여 불안정성문제로서 좌굴을 해석하

였다. 그러나, 이들 논문은 강성계수식을 엄밀한 해석방법이 아닌 근사적 해석방법으로 제시하고 있거나 주름판의 경우 비틀림모멘트는 $M_{xy} \neq M_{yx}$ 임에도 불구하고 $M_{xy} = M_{yx}$ 로서 취급하고 있음으로써 보다 합리적인 강성계수식을 제시하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 등가의 개념을 도입하여 주름판구조물에 대한 합리적인 굽힘 및 비틀림 강성계수식을 이론적으로 유도하고, 기존의 Perel의 강성계수해석결과⁵⁾와 비교 검토하고자 한다. 또한, 하나의 응용 예로서 본 연구에서 유도한 강성계수를 적용하여 직교이방성판으로서의 주름판 구조물에 대한 고유진동수를 해석하며, F. F. T. (fast fourier transformation) 분석기에 의한 실험결과와 비교함으로써 그 타당성을 검증하고자 한다.

2. 주름판의 강성계수

본 연구의 해석모델인 주름판은 Fig. 1의 사다리꼴형 주름판으로서 원점을 주름판의 대칭면에 위치시키고 주름의 진행방향을 x축, 주름의 진행방향과 수직인 방향을 y축, 이 두 방향과 수직인 축을 z축으로 한다.

이와 같은 주름판의 강성해석은 단위 주름요소에 대하여 기하학적 관계와 등가의 개념을 적용시켜서 모멘트와 곡률과의 관계식을 유도하고, 그 결과에 대한 구성방정식을 완성하도록 한다.

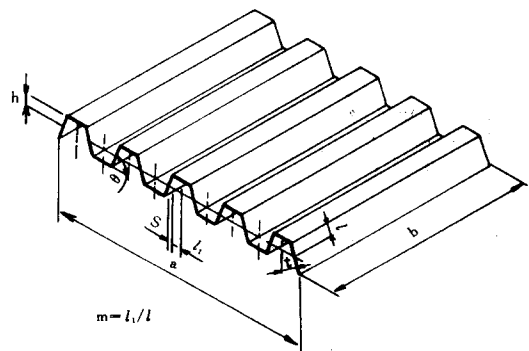


Fig. 1 Geometry and coordinate of the corrugated plate.

1) 굽힘모멘트와 곡률의 관계

x방향으로 순수굽힘모멘트가 작용할 경우, 굽힘모멘트와 곡률의 관계는 Fig. 2에 나타난 바와 같은 기하학적 적합조건에 의하여 구한다.

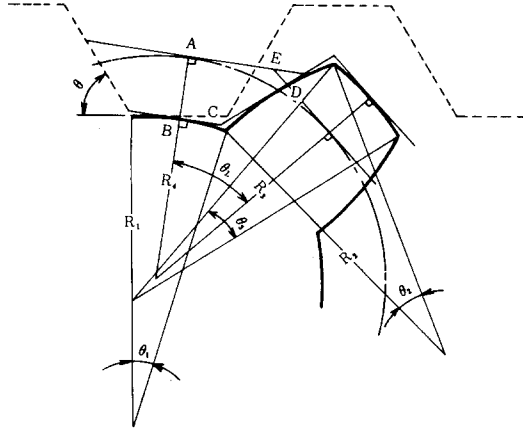


Fig. 2 Geometric relationship of curvature change and moment

먼저, Fig. 2에서의 5각형 ABCDE로 부터 다음의 관계식이 성립한다.

$$\theta_4 = \frac{1}{2} (\theta_1 + 2\theta_2 + \theta_3) \quad (1)$$

따라서, 경사면과 수평면에서 발생하는 곡률반경 R_1, R_2, R_3 와 중앙면에서의 곡률반경 R_4 와의 관계는 중앙면의 길이는 변형후에도 변하지 않기 때문에 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$R_4 = \frac{2(m + \cos \theta)}{\left(\frac{m}{R_1} + \frac{2}{R_2} + \frac{m}{R_3}\right)} \quad (2)$$

여기서, R_1 과 R_3 는 같으므로, (2)식은 다음과 같다.

$$R_4 = \frac{(m + \cos \theta)}{\left(\frac{m}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \quad (3)$$

따라서, x방향으로 순수굽힘모멘트가 작용할 경우의 수평판의 곡률 R_1 과 경사판의 곡률 R_2 에 대한 모멘트의 관계식을 (3)식에 대입하면, 중앙면에 대한 굽힘모멘트와 곡률의 관계는 다음과 같다.

$$M_x = E I_x \frac{1}{\rho_x}, \quad (\rho_x = R_4) \quad (4)$$

여기서,

$$I_x = \frac{t^3}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{(m + \cos \theta)}{(m+1)} \quad (5)$$

산형 주름판의 경우는 $m = 0$ 이므로

$$I_x = \frac{t^3}{12(1-\nu^2)} \cos \theta \quad (6)$$

y방향으로 순수굽힘모멘트가 작용할 경우, 굽힘모멘트와 곡률의 관계는 Fig. 3에 나타난 바와 같은 단면의 2차 관성모멘트를 구함으로써 결정할 수 있다.

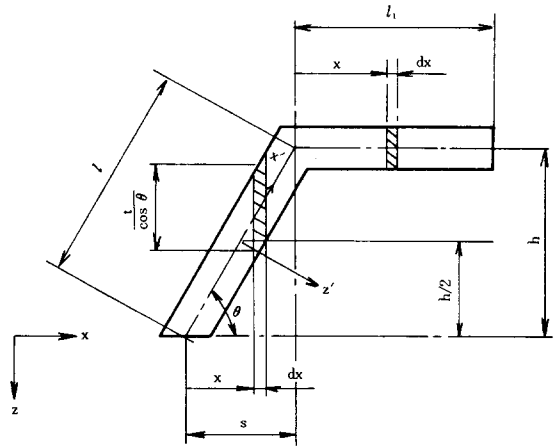


Fig. 3 Geometry of representative width

경사면에서의 좌표를 x', z' 로 취하면,

$$I_{z z} = \frac{t l^3}{12}, \quad I_{x x} = \frac{l t^3}{12}, \quad I_{x z} = 0 \quad (7)$$

그러므로, 경사축의 중립상태에 관한 2차 관성모멘트 I_y' 는모아 원(Mohr's circle)을 이용하면 다음과 같다.

$$I_y' = \frac{t l^3 \sin^2 \theta + l t^3 \cos^2 \theta + 3 l t h^2}{12} \quad (8)$$

또한, 수평면에서의 중립축에 관한 2차 모멘트 I_y'' 는 다음과 같으므로,

$$I_y'' = \frac{l_1 t^3}{12} + l_1 t h^2 \quad (9)$$

전체부재에 대한 단위 길이당의 2차 관성모멘트 I_y 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_y = (I_y' + I_y'') / (l \cos \theta + l_1) = \frac{t^3 (m + \cos^2 \theta) + 4 t h^2 (1 + 3m)}{12 (m + \cos \theta)} \quad (10)$$

결국, y방향 단위길이당의 굽힘모멘트와 곡률의 관계는 다음과 같다.

$$M_y = E I_y \frac{1}{\rho_y} \quad (11)$$

(11)식에서 $m=0$ 라면, 산형 주름판의 굽힘모멘트와 곡률의 관계가 된다.

2) 비틀림모멘트와 곡률의 관계

주름판의 비틀림모멘트는 일반 평판과는 달리 M_{xy} , $\neq M_{yx}$ 이므로, M_{xy} 와 M_{yx} 를 각각 고려해야 한다.

먼저, Fig. 4와 같은 y방향 단면에 대한 비틀림모멘트 M_{yx} 와 곡률의 관계는 경사면에 대한 등가의 전단탄성계수를 고려하여 수평면과의 합으로서 결정된다.

즉,

이 식은 Perel⁵⁾의 결과와 일치한다.

한편, Fig. 5의 (a)에서와 같이 비틀림모멘트가 작용할 경우, x방향 단면에 대한 비틀림모멘트 M_{xy} 와 곡률의 관계는 (b)에서와 같이 경사면에 작용하는 비틀림모멘트 M'_{xy} 와 (c)에서와 같이 비틀림모멘트

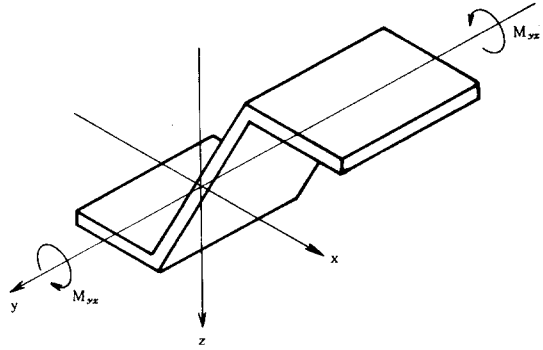


Fig. 4 Geometry of twisting moment M_{yx}

$$\begin{aligned} \text{즉, } M_{yx} &= 2G' \frac{\cos \theta}{(m + \cos \theta)} \int (z')^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} dz' + \\ &= 2G \frac{m}{(m + \cos \theta)} \int z^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} dz \\ &= \frac{E t^3}{12(1 + \nu)} \frac{(m + 1)}{(m + \cos \theta)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (12) \end{aligned}$$

M'_{xy} 에 의한 곡률 $(\partial^2 w / \partial x \partial y)'$ 와 중앙면 등가를 생각함으로써 결정이 된다.

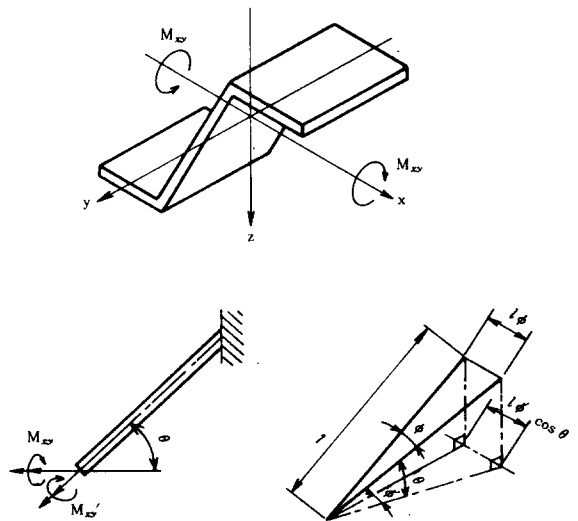


Fig. 5 Geometry of twisting moment M_{xy}

즉, $M'_{xy} = M_{xy} \cos \theta$, $\phi' = \phi / \cos \theta$ 이므로, 경사면에 대한 비틀림모멘트와 곡률의 관계는 다음과 같다.

$$M_{xy} = \frac{E t^3}{12(1+\nu)} \frac{1}{\cos^2 \theta} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (13)$$

또한, 수평면에 대한 비틀림모멘트와 곡률의 관계는 다음과 같으므로

$$M_{xy} = \frac{E t^3}{12(1+\nu)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)'' \quad (14)$$

전체부재에 대한 등가의 곡률 $\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} &= \frac{\cos \theta}{(m + \cos \theta)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)' + \frac{m}{(m + \cos \theta)} \\ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)'' &= \frac{12(1+\nu) M_{xy}}{E t^3} \\ &\frac{(m + \cos^3 \theta)}{(m + \cos \theta)} \end{aligned} \quad (15)$$

따라서, 사다리꼴형 주름판의 x방향 단면에 대한 비틀림모멘트 M_{xy} 와 곡률의 관계는 다음과 같다.

$$M_{xy} = \frac{E t^3}{12(1+\nu)} \frac{(m + \cos \theta)}{(m + \cos^3 \theta)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (16)$$

(12)식과 (16)식에서 $m = 0$ 라면, 산형 주름판의 비틀림모멘트와 곡률의 관계가 된다.

3) 구성 방정식

앞에서 유도한 모멘트의 관계식을 종합하여 Almroth⁶⁾의 표기방법에 의한 행렬식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ M_{yx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \\ k_{yx} \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서, C는 강성계수로서 사다리꼴형 주름판에 대하여 Table 1에 정리하였다.

$$\begin{aligned} k_x &= -\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \quad k_y = -\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad k_{xy} = k_{yx} \\ &= \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (18)$$

즉, 굽힘강성계수 D_x 와 D_y 는 C_{44} , C_{55} 이고, 비틀림강성계수 D_{xy} 와 D_{yx} 는 C_{66} , C_{77} 과 같다.

Table 1. Coefficients of constitutive equation

C_{44}	$\frac{E t^3 (m + \cos \theta)}{12(1-\nu^2)(1+m)}$
C_{55}	$\frac{E t \{t^2 (m + \cos^2 \theta) + 4h^2 (1+3m)\}}{12(1-\nu^2)(m + \cos \theta)}$
C_{66}	$\frac{E t^3 (m + \cos \theta)}{12(1+\nu)(m + \cos^3 \theta)}$
C_{77}	$\frac{E t^3 (m+1)}{12(1+\nu)(m + \cos \theta)}$

3. 주름판의 강성계수의 응용 예

본 연구에서 유도한 주름판구조물의 강성계수의 응용 예로서 주름판에 대한 수치적 진동해석을 하고자 한다. 이 때, 주름판에 대한 진동해석은 주름판을 직교이방성판으로 간주하여 외팔상태의 경계조건에 대해 본 연구에서의 강성계수를 적용함으로써 해석한다. 이러한 수치적 진동해석결과는 F. F. T. (fast Fourier transformation) 분석기에 의한 진동실험결과와 비교함으로써 검증한다.

1) 수치적 진동해석

본 연구에서의 수치적 진동해석에 도입되는 변위함수는 보의 특성함수로서 외팔 상태의 주름판구조물의 경우 변위함수는 다음과 같다.

i) $x=0$, $x=a$ 에서 자유인 경우

$$X_1(x) = 1 \quad (19)$$

$$X_2(x) = 1 - 2x/a \tag{20}$$

$$X_m(x) = \cosh \frac{\lambda_m}{a} x + \cos \frac{\lambda_m}{a} x - \sigma_m \left(\sinh \frac{\lambda_m}{a} x + \sin \frac{\lambda_m}{a} x \right) \quad (m=3, 4, 5, \dots) \tag{21}$$

ii) $y=0$ 에서 고정, $y=b$ 에서 자유인 경우

$$Y_n(y) = \cosh \frac{\lambda_n}{b} y - \cos \frac{\lambda_n}{b} y - \sigma_n \left(\sinh \frac{\lambda_n}{b} y - \sin \frac{\lambda_n}{b} y \right) \tag{22}$$

여기서, λ_m , σ_m 과 λ_n , σ_n 은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

Table 2. λ and σ for boundary conditions in beam functions

$\lambda_m; m=1, 2, 3, \dots$	$\sigma_m; m=1, 2, 3, \dots$
0.00000000	0.00000000
0.00000000	0.00000000
4.73004074	0.98250221
7.85320462	1.00077731
10.99560780	0.99996645
14.13716550	1.00000145
17.27875970	0.99999993
$(2m-3)\pi/2; m>7$	1.0; $m>7$
$\lambda_n; n=1, 2, 3, \dots$	$\sigma_n; n=1, 2, 3, \dots$
1.87510407	0.73409551
4.69409113	1.01846731
7.85475744	0.99922449
10.99554073	1.00003355
14.13716839	0.99999855
$(2n-1)\pi/2; n>5$	1.0; $n>5$

한편, 직교이방성판의 최대 변형에너지 (V_{max})와 최대 운동에너지 (T_{max})는 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$V_{max} = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left[D_x \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + D_y \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + \right.$$

$$D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + (D_{xy} + D_{yx}) \left. \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \tag{23}$$

$$T_{max} = \frac{1}{2} \rho t \omega^2 \int_0^b \int_0^a w^2 dx dy \tag{24}$$

여기서, $D_1 = \nu(D_x + D_y)$ 이고, ω 는 각 진동수 (angular frequency)이다. 그리고, 무차원 강성계수

$$\alpha_1 = D_x/D, \quad \beta_1 = D_y/D, \quad \delta_1 = D_1/D, \tag{25}$$

$$\gamma_1 = (D_{yx} + D_{xy})/D$$

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

를 도입하고, (23)식을 다시 나타내면,

$$V_{max} = \frac{1}{2} D \int_0^b \int_0^a \left[\alpha_1 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \beta_1 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + \delta_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \gamma_1 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \tag{26}$$

한편, 주름판의 처짐함수 W 는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$W(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} X_m(x) Y_n(y) \tag{27}$$

여기서, $X_m(x)$ 과 $Y_n(y)$ 는 경계조건을 만족시키는 변위함수이다. 또한, 최소 전체에너지 원칙 (minimum total energy principle)에 의하여 다음의 관계식이 성립된다.

$$\frac{\partial V}{\partial A_{kl}} - \frac{\partial T}{\partial A_{kl}} = 0, \quad (k=1, 2, \dots, M; \tag{28}$$

$$l=1, 2, \dots, N)$$

(27)식을 (24)식과 (26)식에 대입하고, (28)식에 대하여 풀면,

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [C_{mn}^{kl} - \lambda^2 \delta_{mn}] A_{mn} = 0, \tag{29}$$

$$(k=1, 2, \dots, M; l=1, 2, \dots, N)$$

여기서, $\lambda^2 = \omega^2 \rho t a^3 b / D$

$$\delta_{mn} = 1, \quad (m=k, n=l)$$

$$= 0, \quad (m \neq k \text{ or } n \neq l)$$

C_{mn}^{kl} 은

i) $m=k, n=l$ 인 경우

$$C_{mn}^{kl} = \alpha^1 \frac{b}{a} k_m^4 + \beta_1 \frac{a^3}{b^3} k_n^4 + \delta_1 \frac{a}{b} E_{mm} F_{nn} + \gamma_1 \frac{a}{b} G_{mm} D_{nn} \quad (30)$$

ii) $m=k, n \neq l$ 인 경우

$$C_{mn}^{kl} = \delta_1 \frac{a}{2b} E_{mm} (F_{nl} + F_{ln}) + \gamma_1 \frac{a}{b} G_{mm} D_{nl} \quad (31)$$

iii) $m \neq k, n=l$ 인 경우

$$C_{mn}^{kl} = \delta_1 \frac{a}{2b} F_{nn} (E_{km} + E_{mk}) + \gamma_1 \frac{a}{b} G_{mk} D_{nn} \quad (32)$$

iv) $m \neq k, n \neq l$ 인 경우

$$C_{mn}^{kl} = \delta_1 \frac{a}{2b} (E_{km} F_{nl} + E_{mk} F_{ln}) + \gamma_1 \frac{a}{b} G_{mk} D_{nl} \quad (33)$$

2) F. F. T. 에 의한 진동실험

본 연구에서는 앞서 전개한 주름판구조물의 수치적 진동해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 F. F. T. 법에 의한 분석기를 이용함으로써 실험하였다.

본 진동실험에서 사용한 센서는 공간의 제약을 거의 받지 않고 일반 구조물의 실험에 널리 사용되는 스트레인 게이지를 사용하였다.

특히, 스트레인 게이지의 부착위치에 따라서 고유진동수는 영향을 받기 때문에, 평판의 스트레인 게이지의 부착위치 변화에 따른 고유진동수 측정치와 이론적 고유진동수치를 비교하여서 오차가 거의 유발되지 않도록 부착위치를 결정하고서 고유진동수 측정을 하였다.

주름판의 고유진동수의 측정은 Fig. 6과 같이 외팔상태의 경계조건하에서 동적 스트레인 증폭기와 F. T. 분석기를 이용함으로써 실시하였다.

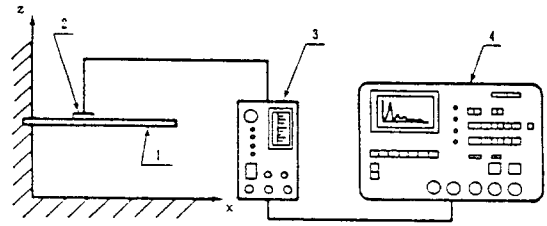


Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus

이때의 스트레인 게이지 부착위치는 Fig. 7에 나타낸 바와 같고, 본 연구에서 이용한 F. F. T. 분석기는 spectral dynamics SD380 signal analyzer이다.

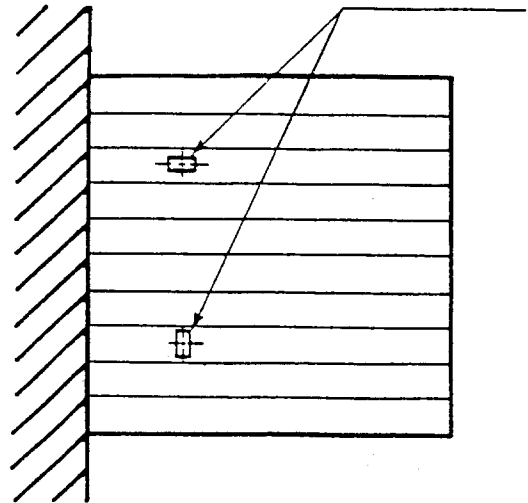


Fig. 7 Locations of strain gauge for experiment by F. F. T.

외팔상태의 경계조건을 갖는 시험편의 지그장치와 다이의 제작은 진동수에 미치는 감쇠등의 영향을 유발시키지 않도록 제작함으로써 오차의 최소화를 도모하였다. 또한, 타격방법은 안내장치를 이용하여 강구를 자유낙하시킴으로써 잡음이 없는 깨끗한 스펙트럼

을 얻도록 하였다. 외팔상태의 경계조건을 갖는 주름판과 타격방향은 Fig. 8에 나타난 바와 같다.

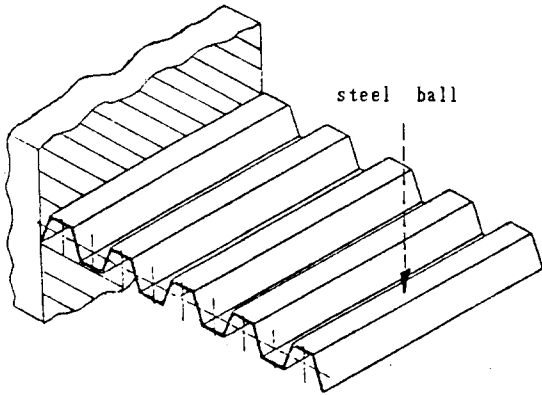


Fig. 8 Corrugated plate cantilever and blow direction for vibration experiment

본 연구의 실험에 사용한 시험편 재료는 구조용 알루미늄판(AI 5052P)으로서, 기계적 성질은 Table 3에 나타난 바와 같다.

Table3. Material properties of specimen. (AI 5052P)

Young's Modulus E (kgf/mm ²)	Poisson's Ratio ν	Specific Weight (g/cm ³)
7100	0.333	2.699

시험편의 제작은 절곡부위의 소성변형으로 인한 파손이 유발되지 않도록 주의를 기울여 가공하였고, 고정 경계조건을 만족시키기 위하여, x방향의 경우에는 고정부위를 보울트와 너트로 고정시키기 위하여 천공을 하였으며, 특히, y방향의 경우에는 주름의 방향을 유지시킬 수 있는 고정 경계조건을 갖도록 하기 위하여 콘크리트 성형과 금형 등의 여러가지 제작법을 시

도한 후에 최적 고정조건을 갖추었다고 생각되는 충전용 에폭시 시스템을 이용하여 24시간 이상을 가압 성형하여 고정 경계조건을 만족시키도록 하였다.

Table 4는 실험에 사용된 주름판의 시험편 모델의 치수를 나타낸 것이다.

Table4. Dimensions of specimens

Type	Specimen No.	a	b	h	ϕ	m	
X	X - 1	142.5	209.0	7.35	54.5	0.00	
	X - 2	203.0	205.0	7.60	52.0	0.00	
	X - 3	217.0	217.0	6.65	44.0	0.00	
	X - 4	162.0	164.0	5.65	41.0	0.00	
	Y	Y - 1	186.0	186.0	6.50	39.0	0.00
		Y - 2	172.0	174.5	8.40	56.5	0.00
		Y - 3	181.0	179.0	5.20	29.0	0.00
		Y - 4	157.0	158.0	8.00	51.0	0.00
X	X - 1	170.0	170.0	7.00	57.0	0.50	
	X - 2	213.0	215.5	5.50	62.0	0.88	
	X - 3	224.0	224.0	4.80	60.5	1.23	
	X - 4	165.5	165.5	3.85	60.5	1.00	
	Y	Y - 1	173.0	173.0	5.30	66.0	1.21
		Y - 2	164.0	164.0	6.00	66.5	1.00
		Y - 3	135.0	135.0	4.60	70.0	1.50
		Y - 4	166.0	166.0	3.70	60.0	1.00

4. 결과 및 고찰

1) 강성계수해석 결과 및 고찰

주름판의 굽힘강성계수 D_x 와 D_y 는 순수굽힘모멘트 상태에서의 경사판과 수평판에 대한 곡률을 구하고 주름판의 중앙면에 대한 곡률과의 관계와 등가의 개념을 도입하여, 주름판의 굽힘모멘트 M_x 와 곡률과의 관계식 (4)과 굽힘모멘트 M_y 와 곡률과의 관계식 (11)을 유도함으로써 구하였다. 또한, 주름판의 경우는 비틀림모멘트 $M_{xy} = M_{yx}$ 가 성립하지 않기 때문에, 순수전단상태에서의 경사판에 대한 등가의 전단탄성

계 수식 $G' = E / \{2(1+\nu) \cos \theta\}$ 을 구하고, 이 전 단탄성계수와 기하학적 관계를 도입하여 비틀림모멘트

$M_{xy} = M_{yx}$ 가 성립하지 않음을 검토 규명하였고, 비틀림모멘트 M_{xy} 와 곡률과의 관계식 (12) 과 비틀림모멘트 M_{yx} 와 곡률과의 관계식 (16) 을 구함으로써 주름판의 비틀림강성계수 D_{xy} , D_{yx} 를 구하였다. 본 강성계수와 기존의 Perel의 결과⁵⁾ 를 비교하면, Table 5에서 보는 바와 같이 비틀림강성계수 D_{yx} 는 서로 일치하고 있다. 그러나, Perel의 경우는 주름판의 비틀림강성계수는 $D_{xy} = D_{yx}$ 로 취급하고 있음으로써 이 해석은 불합리하다고 생각된다. 굽힘강성계수의 경우는 본 연구의 결과가 Perel의 결과보다 약간 큰 값을 나타

실험적 방법으로서, Table 4에 나타난 바와 같은 산형과 사다리꼴형 주름판에 대한 고유진동수를 F. F. T. 분석기를 이용하여 측정하였다.

F. F. T. 분석기를 이용하여 측정한 기본 고유진동수에 대한 스펙트럼은 $x=0$ 와 $y=0$ 에서 고정인 시험편에 대하여, 산형 주름판의 경우, Fig. 9에 나타난 바와 같고, 사다리꼴형 주름판의 경우, Fig. 10에 나타난 바와 같다. 그리고, 본 연구에서 유도한 주름판의 강성계수를 이용하여 보의 특성함수에 의한 진동해석을 함으로써 얻은 결과는 Table 6에 나타난 바와 같다. 이와 같은 수치해석에 의한 고유진동수와 실험에 의한 고유진동수를 비교하여 보면, 그 오차는 Table 7에 나타난 바와 같다. 이 결과, 산형 주름판

Table 5. Comparison of present results and perel's results for rigidities

	Present results [1]	Perel's results [2]	[1] / [2]
D_x	$\frac{Et^3 (1 + \cos \theta)}{24(1 - \nu^2)}$	$\frac{Et^3 (1 + \cos \theta)}{24}$	$\frac{1}{(1 - \nu^2)}$
D_y	$\frac{Et \{t^2 (1 + \cos^2 \theta) + 16h^2\}}{12(1 - \nu^2) (1 + \cos \theta)}$	$\frac{4Eth^2}{3(1 + \cos \theta)}$	$\frac{1}{(1 - \nu^2)} + \frac{t^2 (1 + \cos^2 \theta)}{16h^2 (1 - \nu^2)}$
D_{xy}	$\frac{Et^3 (1 + \cos \theta)}{12(1 + \nu) (1 + \cos^3 \theta)}$	$\frac{Et^3}{6(1 + \nu) (1 + \cos \theta)}$	$\frac{(1 + \cos \theta)^2}{2(1 + \cos^3 \theta)}$
D_{yx}	$\frac{Et^3}{6(1 + \nu) (1 + \cos \theta)}$	$\frac{Et^3}{6(1 + \nu) (1 + \cos \theta)}$	1

내고 있다. 특히, 본 연구의 결과로는 $m(\ell_1/\ell) = 0$ 이면, 산형 주름판의 강성계수를 구할 수 있고, $h = \theta = 0$ 이면, 평판의 강성계수를 구할 수 있는데 반하여, Perel의 결과로는 산형 주름판의 강성계수와 평판의 강성계수를 구할 수 없다. 따라서, 본 연구에서 유도한 강성계수식은 임의의 판구조물에도 적용할 수 있는 보다 합리적이고 일반화된 식이라고 할 수 있다.

2) 진동해석 결과 및 고찰

주름판에 대한 진동해석의 타당성을 검증하기 위한

의 오차는 $x=0$ 에서 고정인 경우에는 평균 2.6% 이내, $y=0$ 에서 고정인 경우에는 평균 3.1% 이내를 나타내고 있고, 사다리꼴형 주름판의 경우는 $x=0$ 에서 고정인 경우에는 평균 4.0% 이내, $y=0$ 에서 고정인 경우에는 평균 3.5% 이내를 나타내고 있다.

Fig. 11은 본 연구에서의 수치적 진동해석 컴퓨터 프로그램의 주프로그램에 대한 흐름도를 나타낸 것이다. 한편, 수치해석에서의 고유치는 모우드 차수 $M \times N = 3 \times 5$ 이상이 되면 수렴성을 나타내게 되는데, 본 연구에서의 수치적 고유진동수는 $M \times N = 5 \times 5$ 인 결과를 정리한 것이다.

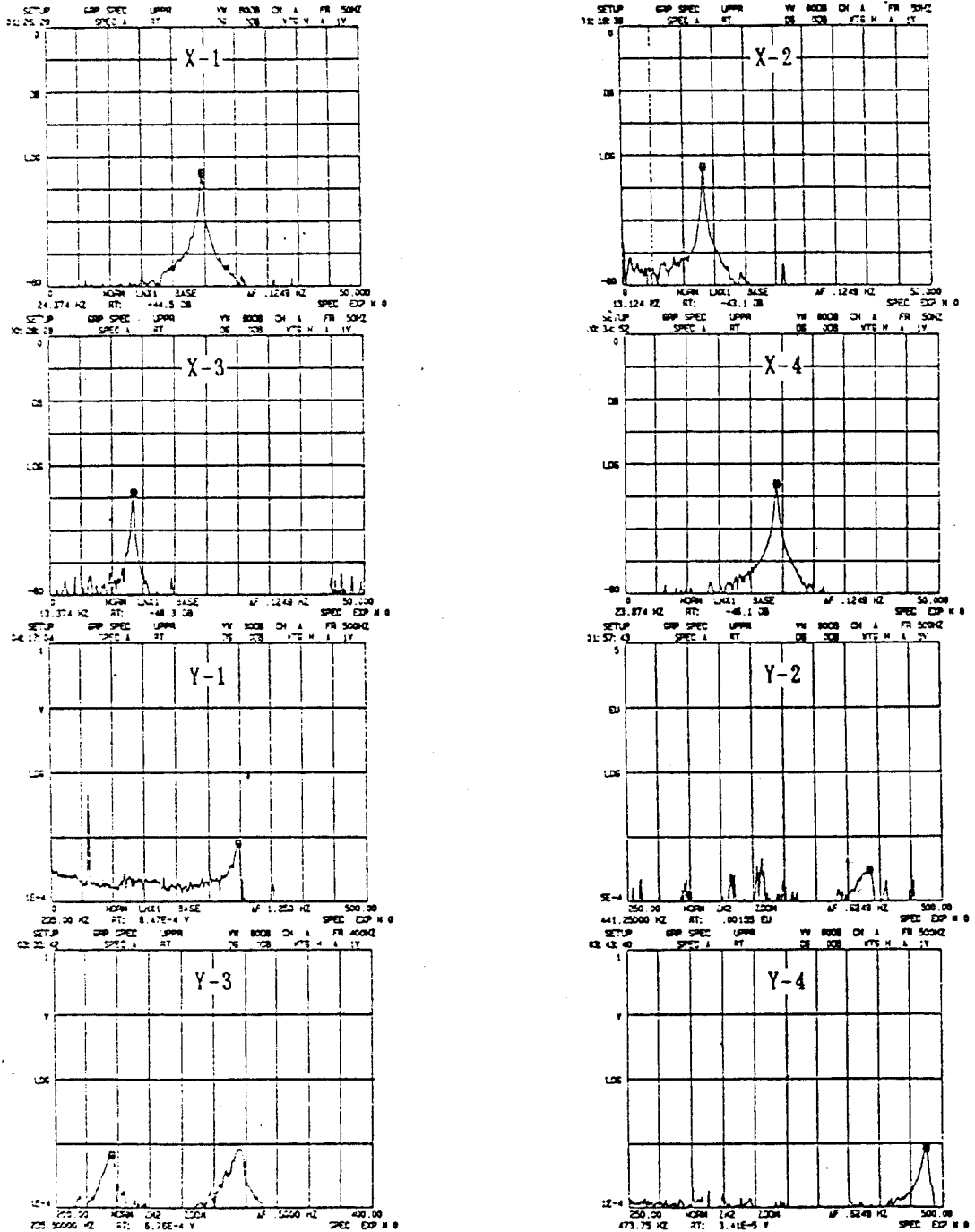


Fig.9 Vibration spectrums by F. F. T.
(Triangular type)

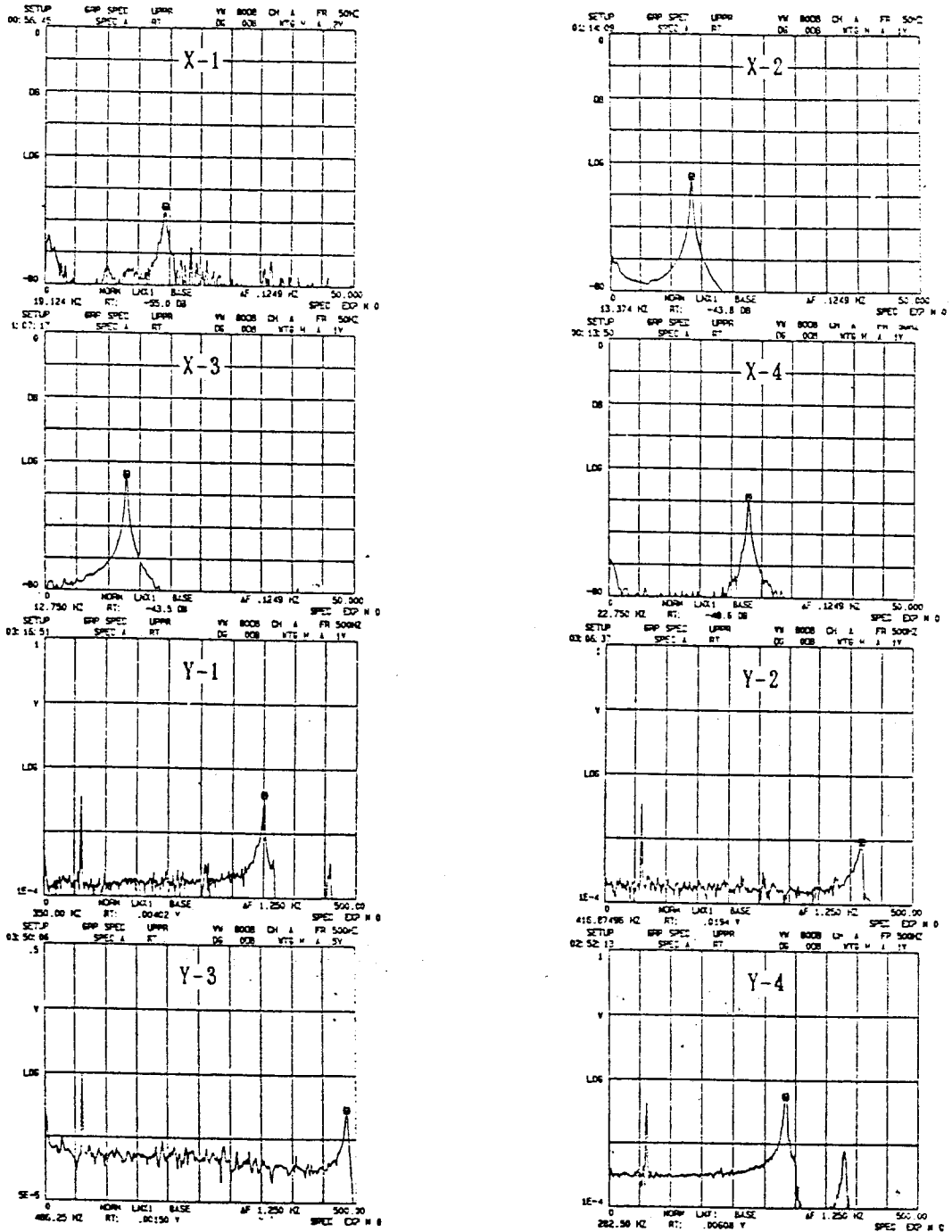


Fig.10 Vibration spectrums by F. F. T.
(Trapezoidal type)

Table6 Numerical results for specimens

Type	Specimen No.	Eigenvalues λ	Frequencies
Triangular Type	X-1	1.95	23.77
	X-2	2.14	12.85
	X-3	2.49	13.07
	X-4	2.63	24.76
	Y-1	42.37	303.00
	Y-2	50.37	421.25
	Y-3	31.50	237.90
	Y-4	49.21	493.91
Trapezoidal Type	X-1	2.32	19.85
	X-2	2.36	12.86
	X-3	2.71	13.36
	X-4	2.42	21.84
	Y-1	40.60	335.58
	Y-2	45.87	421.89
	Y-3	36.95	501.70
	Y-4	33.27	298.70

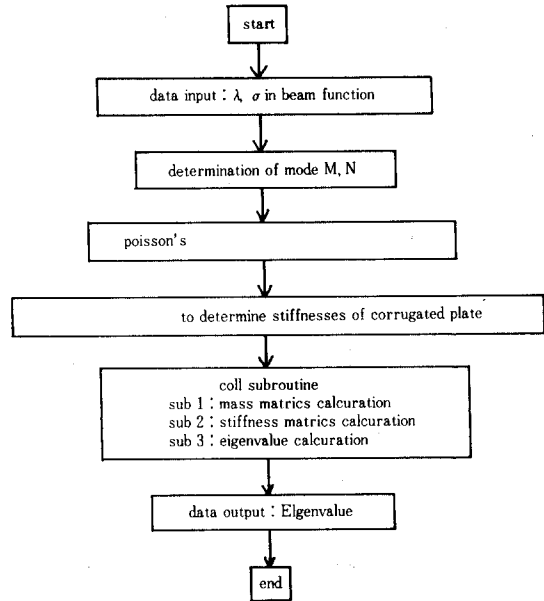


Fig.11 Flow chart of main program

Table7 Comparison of experimental and numerical results

Type	Specimen No.	Experimental Fre.	Theoretical Fre.	Dev (%)
Triangular Type	X-1	24.37	23.77	2.52
	X-2	13.12	12.85	2.10
	X-3	13.37	13.07	2.29
	X-4	23.87	24.76	3.59
	Y-1	295.00	303.00	2.64
	Y-2	441.25	421.25	4.74
	Y-3	235.50	237.90	1.00
	Y-4	473.75	493.91	4.08
Trapezoidal Type	X-1	19.12	19.85	3.67
	X-2	13.37	12.86	3.96
	X-3	12.75	13.36	4.56
	X-4	22.75	21.84	4.16
	Y-1	350.00	335.58	4.29
	Y-2	416.87	421.89	1.18
	Y-3	486.25	501.70	3.07
	Y-4	282.50	298.70	5.42

5. 결론

본 연구에서는 등가의 개념을 도입하여 주름판 구조물에 대한 합리적인 굽힘 및 비틀림 강성계수식을 이론적으로 유도하고, 하나의 응용 예로서 본 연구에서 유도한 강성계수식을 적용하여 직교이방성판으로서의 주름판 구조물에 대한 고유진동수를 해석하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사다리꼴형 주름판을 기준하여 유도한 강성계수들은 산형 주름판 및 일반 평판에 까지 사용될 수 있도록 일반화시켰다.
2. 순수전단상태의 경사판의 등가전단탄성계수를 구하고, 이 전단탄성계수와 기하학적 관계를 적용시켜 주름판의 x방향과 y방향의 비틀림모멘트가 같지 않음을 규명하였다.
3. 본 연구에서 유도한 주름판 구조물의 강성계수를 하나의 응용 예로서 수치적 진동해석에 적용시켜봄으로써, 그 타당성을 검증하였다.

참고문헌

1. V.E. Seydel, 1931, "Schubknickversuche mit Wellblechtafeln", DVL-Jahrbuch, pp.233-245.
2. Y.C. Fung, 1962, "On Corrugation-Stiffened Panels", Calif. Inst. Tech. GALCIT SM 62-85.
3. H. Kinloch, 1967, "An Experimental and Theoretical Investigation of Orthotropic Plate Structure", Thin Walled Structure Symposim at Swansed, pp.213-235.
4. H. Kinloch, 1967, "analysis and Design of Anisotropic Plate Structures with Particular Reference to Decking System", Thin Walled Structure, pp.271-299.
5. D. Perel, 1976, "The General Instability of Infinitely Long Trapezoidally Corrugated Plates Under Shear", Requirment Thesis for the Degree of Ph.D., Syracuse Univ.
6. B.O. Almroth and D.O. Brush, 1975, "Buckling of Bars, Plates and Shells", McGrow-Hill.

정형 가공기술 韓·日심포지엄

韓國정밀공학회가 주최하고 每日經濟新聞社가 후원하는 첨단정형가공 기술에 관한 韓·日 심포지엄이 21, 22 양일간 여의도 중소기업회관에서 개최됐다.

국내외전문가 및 관계자 2백여명이 참석한 가운데 개최된 이번 심포지엄에서 세계최고수준인 日本의 정밀正形가공기술, 즉 원소재로부터 정밀한 최종제품을 직접 생산하는 기술등이 소개됐다.

이번 심포지엄에서는 8명의 韓國측전문가와 9명의 日本전문가가 주제발표를 했는데 발표된 주제는 다음과 같다.

△정밀정형단조 (히데아키·구도 東京電機大교수)
 △기계제품용 Ni-Mo소결강에서 신분말성형기술의 응용 (문인형 漢陽大교수) △소결기계부품 제조에서 최근의 분말성형기술 (다케오·나카가와 東京大교수)
 △구조품용고의 컴퓨터해석 (홍준표 延世大교수) △

주물의응고해석과제어 (에이스케·니이야마 東北大교수) △스퀴즈캐스팅 알루미늄합금의 시제품생산및 금속특성 이호인박사 KIST) △스퀴즈캐스팅 (스즈키·슈) △프레스가공의 최근동향과 특징 (마유키·이와마츠) △정밀단조공정의 컴퓨터원용해석 (양동열박사 KAIST) △對向液壓성형 (히로유키·아미노) △금형설계단계에서 자동차 차체패널성형공정의 해석 (기아산업 전기찬박사) △탄소성 유한요소법에 의한 板성형과정의 시뮬레이션 (아키다케·마키노우치) △근사정형가공을 위한 세라믹스공정의 요소 (정순길박사 한국티타늄) △엔지니어링 플라스틱의 성형가공기술 (야스시·오야나기) △반응사출 성형기술 (김성철박사 KAIST) △사출성형프로세스에 의한 열경화성수지의 견성개질 (K·나카무라) △복합재료의 정형성형 (전의진박사기계연구수)

*심포지움 초록집은 6,000원에 판매합니다. 필요하신분은 학회사무국으로 연락바랍니다.