

조립판구조물에 대한 경계요소법의 적용

서 일 교* · 김 도 훈**

Application of the Boundary Element Method to Assembled Plate Structures

Ill-Gyo Suh* and Do-Hoon Kim**

ABSTRACT

This paper presents an application of the boundary element method to assembled plate structures which have light weight and great loading capacity.

First, we formulate the boundary integral equations of a single plate which represents bending and plane stress behaviour and discretize the formulations using boundary elements. Next, each plates are assembled on 3-D space.

As numerical examples, 2 types of plate structures are selected and the applicability of the method is demonstrated through the comparison with the solutions by other method.

Key words : Boundary element method, Assembled plate structures,
Boundary integral equations, Fundamental solution

1. 서 론

조립판구조물은 경량이면서 적재능력이 크다는 이점을 가지는 것으로 절판 구조와 같은 형태에서 대규모 아파트 단지 건설에 사용되는 대형 PC판 구조물에 이르기까지 그 적용범위는

넓다고 할 수 있다¹⁾. 현재 이러한 조립판구조물의 해석에는 대부분 유한요소법이 적용되고 있으나, 유한요소법을 대체할 수 있는 해석법으로서 1970년대 말에 개발되어 현재 여러 분야에서 그 적용성 및 유효성을 인정받고 있는 경계요소법은 대상문제를 경계상에 있는 요소 절점의 미지량만으로 다루어 문제의 차원을 한 차원 낮게 해석하는 境界形 解析法이기 때문에 기존의 타 해법에 비해 2차원 및 3차원 문제를 적은 데이터와 컴퓨터 기억용량으로 짧은 시간에 보다 정확한 결과를 얻을 수 있으며 현재 다

* 제주대학교 건축공학과
Dept. of Architectural Eng., Cheju Nat'l Univ.
** (주)청구 기술연구소
Technical Institute, Chonggu Co.

양한 문제에 적용되어 그 우수성이 입증되고 있다²⁾. 단일 판에 대한 경계요소법의 적용은 Bezine 과 Gamby³⁾, Stern^{4),5)}, Brebbia⁶⁾, Kamiya⁷⁾ 등 어느 정도 연구가 이루어져 왔으나, 조립판의 거동을 해석하기 위한 경계요소법의 적용은 Tanaka⁸⁾ 등의 연구를 제외하고 거의 없는 형편이다^{2),9),10)}.

따라서 본 연구에서는 다양한 형태와 하중 및 경계조건을 갖는 조립판 구조물을 해석하기 위하여 경계요소법에 의한 근사해석법의 개발을 목표로 한다.

먼저 단일 판에서 면내력에 의한 평면응력문제와 면외력에 대한 薄板의 휨문제로 분리하여 각각의 기초 관계식에서 경계적분방정식을 유도하여 정식화하고, 다음으로 개개의 판을 3차원 공간 내에서 조립하여 조립판 구조물을 형성한다. 이러한 전과과정을 바탕으로 조립판 구조물 해석에 경계요소법을 적용한 프로그램을 개발하여 다양한 수치해석 모델을 설정하여 수치계산하고 그 결과를 타 해법과 비교·고찰하여 본 논문에서 제안한 해법의 유효성을 밝힌다. Fig. 1에 해석법의 개요를 보인다.

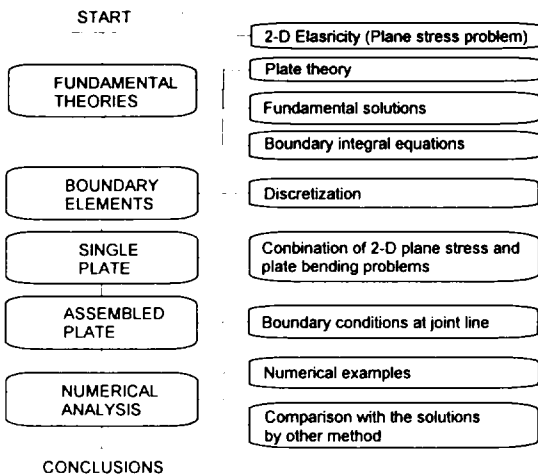


Fig. 1 Flowchart of numerical analysis

II. 조립판의 경계적분방정식 정식화

2.1 면내력을 받는 단일판의 경계적분방정식 정식화

2.1.1 평면탄성문제

2차원 평면내에서 영역 Ω 를 차지하는 선형탄성체의 경계표면을 Γ 로 한다. 이 탄성체의 정역학적 거동을 지배하는 기초 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0 \quad (1)$$

여기서 σ_{ij} 는 응력도 텐서, b_i 는 단위면적당 물체력 벡터를 나타낸다. 식 (1)에 대하여 가상처짐의 원리를 적용하면 다음과 같은 경계적분방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} c^{ij} u_j &= \int_{\Gamma} u_k p_{ik}^* d\Gamma \\ &= \int_{\Gamma} p_k u_{ik}^* d\Gamma + \int_{\Omega} b_k u_{ik}^* d\Omega \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)는 경계상의 임의의 점 y 의 변위와 경계상의 점 y' 에서의 변위와 표면력의 관계를 나타내는 연립적분방정식이다. 이 적분방정식에 사용되는 2차원 기본해는 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned} u_{ik}^* &= \frac{1}{8\pi G(1-\nu)} \left\{ (3-4\nu) \log\left(\frac{1}{r}\right) \Delta_{ik} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial r}{\partial x_i} \frac{\partial r}{\partial x_k} \right\} \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} p_{ik}^* &= -\frac{1}{4\pi(1-\nu)r} \left\{ \frac{\partial r}{\partial n} \left\{ (1-2\nu) \Delta_{ik} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2 \frac{\partial r}{\partial x_k} \frac{\partial r}{\partial x_i} \right\} - (1-2\nu) \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{\partial r}{\partial x_i} n_k - \frac{\partial r}{\partial x_k} n_i \right) \right\} \end{aligned} \quad (3-2)$$

여기서, n 은 물체표면에서의 외향단위법선벡터이고 δ_{jk} 는 Kronecker delta이다. 그리고, r 은 하중이 작용하는 점에서 고려점까지의 거리를 나타내며, n_j 는 방향여현을 나타낸다. 또한 계수 c^i 는 형상계수로서 경계점의 상태에 따라 매끄러운 표면위의 점에 대해서는 1/2이며, 내부점에서는 1이 된다.

2.2.2 판의 휨문제

판면에 수직 분포하중 q 가 작용하며 두께가 일정한 선형재료로 된 판의 휨문제를 생각한다. 판의 영역을 Ω , 그 경계를 Γ 로 하고 평면 x_1-x_2 가 판두께의 중앙면과 일치하도록 직교좌표계 $0-x_1x_2x_3$ 를 취한다. 이러한 박판의 휨문제에 대한 지배방정식을 두께 중앙면의 x_3 축 방향의 처짐 w 로 나타내면 다음의 식과 같다.

$$\nabla^4 w = \frac{q}{D} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} \nabla^4 &= \nabla^2 \nabla^2, \\ \nabla^2 &= (\quad)_{,11} + (\quad)_{,22} \end{aligned} \quad (5)$$

이다.

또한, 매끄러운 경계상의 점에서 휨모멘트 M_n , 비틀림 모멘트 M_{nt} , 등가전단력 V_n 은 다음과 같다.

$$M_n(w) = M_{ij} n_i n_j \quad (6-1)$$

$$M_{nt}(w) = M_{ij} n_i t_j \quad (6-2)$$

$$V_n = -D \frac{\partial(w)}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial t} M_t \quad (6-3)$$

또한 직각좌표계에서의 휨모멘트와 전단력은 다음과 같이 주어지게 된다.

$$\begin{aligned} M_{11} &= -D (w_{,11} + w_{,22}) \\ M_{22} &= -D (w_{,22} + \nu w_{,11}) \\ M_{12} &= -D (1-\nu) w_{,12} \\ Q_1 &= -D (w_{,111} + w_{,221}) \\ Q_2 &= -D (w_{,112} + w_{,222}) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (4)에 부분적분을 적용하고 극한조작을 하면 매끄러운 경계인 경우 다음과 같은 경계적분방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} w(y) \\ &= \int_{\Gamma} (w^*(y, y') V_n(y') - \theta_n^*(y, y') M_n(y')) d\Gamma(y') \\ &\quad - \int_{\Gamma} (V_n^*(y, y') w(y') - M_n^*(y, y') \theta(y')) d\Gamma(y') \\ &\quad + \int_{\Omega} w^*(y, x') q(x') d\Omega(x') \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)은 경계상의 처짐 w 와 경계상의 외향법선방향의 처짐각 θ_n , 휨모멘트 M_n , 등가전단력 V_n 에 대한 관계식이다. 경계조건으로부터 w, θ_n, M_n, V_n 중에서 2가지 값이 규정되기 때문에 경계상의 임의의 점에서 미지수는 2개로 된다. 따라서 식(8)만으로는 문제를 풀 수 없고, 이 식과는 별도로 독립된 경계적분방정식이 필요하게 된다. 여기서 y 점에서 단위법선벡터인 n 방향으로 방향적분한 것을 이용한다. 즉,

$$\{\widehat{w}^*, \widehat{\theta}^*, \widehat{V}_n^*, \widehat{M}_n^*\} = \frac{\partial}{\partial n_y} \{w^*, \theta_n^*, V_n^*, M_n^*\} \quad (9)$$

인 관계를 이용하여 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \bar{\theta}_n(y) \\ = & \int_r \widehat{w}^*(y, y') V_n(y') - \bar{\theta}_n^*(y, y') M_n(y') d\Gamma(y') \\ & - \int_r (\widehat{V}_n^*(y, y') w(y') - \widehat{M}_n^*(y, y') \theta(y')) d\Gamma(y') \\ & + \int_Q \bar{\theta}_n^*(y, x') q(x') d\Omega(x') \end{aligned} \quad (10)$$

여기서

$$\widehat{w}(y') = w(y') - w(y) \quad (11)$$

이다.

이상의 판의 휨문제에 대한 기본해는 다음과 같이 주어진다.

$$w^*(x, x') = \frac{r^2}{8\pi D} \log r \quad (12)$$

2.2 이산화

평면탄성문제 및 판의 휨문제에 대한 경제적인 분방정식 (8)과 (10)에 대하여 경계상에 n개의 경계요소를 설정하면 다음과 같은 이산화 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n h_{11}^{jj} u_1^j + \sum_{j=1}^n h_{12}^{jj} u_2^j \\ = & \sum_{j=1}^n g_{11}^{jj} p_1^j + \sum_{j=1}^n g_{12}^{jj} p_2^j + b_1 \end{aligned} \quad (13-1)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n h_{21}^{jj} u_1^j + \sum_{j=1}^n h_{22}^{jj} u_2^j \\ = & \sum_{j=1}^n g_{21}^{jj} p_1^j + \sum_{j=1}^n g_{22}^{jj} p_2^j + b_2 \end{aligned} \quad (13-2)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n H_{11}^{jj} w(y') + \sum_{j=1}^n H_{12}^{jj} \theta(y') \\ = & \sum_{j=1}^n G_{11}^{jj} V_n(y') + \sum_{j=1}^n G_{12}^{jj} M_n(y') \quad (13-3) \\ & + \sum_{k=1}^M B_1^{jk} q(x') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n H_{21}^{jj} w(y') + \sum_{j=1}^n H_{22}^{jj} \theta(y') \\ = & \sum_{j=1}^n G_{21}^{jj} V_n(y') + \sum_{j=1}^n G_{22}^{jj} M_n(y') \quad (13-4) \\ & + \sum_{k=1}^M B_2^{jk} q(x') \end{aligned}$$

여기서,

u^j : 요소 j에서의 처짐

p^j : 요소 j에서의 표면력

$$\begin{aligned} \widehat{h}_{11}^{jj} &= \int_{e_j} p_{11}^*(y, y') d\Gamma(y') \\ h_{12}^{jj} &= \int_{e_j} p_{12}^*(y, y') d\Gamma(y') \\ h_{21}^{jj} &= \int_{e_j} p_{21}^*(y, y') d\Gamma(y') \\ \widehat{h}_{12}^{jj} &= \int_{e_j} p_{22}^*(y, y') d\Gamma(y') \\ g_{11}^{jj} &= \int_{e_j} u_{11}^*(y, y') d\Gamma(y') \\ g_{12}^{jj} &= \int_{e_j} u_{12}^*(y, y') d\Gamma(y') \\ g_{21}^{jj} &= \int_{e_j} u_{21}^*(y, y') d\Gamma(y') \\ g_{22}^{jj} &= \int_{e_j} u_{22}^*(y, y') d\Gamma(y') \quad (14) \\ \widehat{H}_{11}^{jj} &= \int_{e_j} V_n^*(y, y') d\Gamma(y') \\ H_{12}^{jj} &= - \int_{e_j} M_n^*(y, y') d\Gamma(y') \\ H_{21}^{jj} &= \int_{e_j} \frac{\partial V_n^*(y, y')}{\partial n_y} d\Gamma(y') \\ \widehat{H}_{22}^{jj} &= - \int_r \frac{\partial M_n^*(y, y')}{\partial n_y} d\Gamma(y') \\ G_{11}^{jj} &= \int_{e_j} w^*(y, y') d\Gamma(y') \\ G_{12}^{jj} &= - \int_{e_j} \theta_n(y, y') d\Gamma(y') \\ G_{21}^{jj} &= \int_{e_j} \frac{\partial w^*(y, y')}{\partial n_y} d\Gamma(y') \end{aligned}$$

$$G_{22}^{ij} = - \int_e \frac{\partial \theta_n^*(y, y')}{\partial n_y} d\Gamma(y')$$

을 나타낸다. 그리고

$$h_{ij} = \hat{h}_{ij}, \quad H_{ij} = \hat{H}_{ij} \quad \text{when } i \neq j$$

$$h_{ij} = \hat{h}_{ij} + \frac{1}{2}, \quad H_{ij} = \hat{H}_{ij} + \frac{1}{2} \quad \text{when } i = j$$

위의 식들을 이용하여 면내 변형문제와 면외 휨 문제를 중첩하는 하나의 연립대수 방정식을 형성하면 다음과 같은 행렬의 형태로 표현할 수 있다.

$$H U = G P + B \tag{15}$$

이제 식(15)를 주어진 경계조건을 고려하여 정리하면

$$A X = F \tag{16}$$

의 연립1차방정식을 얻는다. 여기서 X 는 미지 절점벡터를 나타낸다.

III. 조립판 구조물에 대한 적용

3.1 경계요소법의 적용

Fig. 2와 같이 복수의 薄板을 접합한 조립판 구조물의 응력 해석에 이상의 단일판에 대한 내용을 적용해 본다. 각 판에 대해서 중앙면에 x_1', x_2' 가 있도록 국소 직각좌표계 $0' - x_1'x_2'x_3'$ 를 선택한다. 국소직각 좌표계에서의 경계변수는 변위 u_i ($i=1-3$), 표면력 p_i , 처짐각 θ_n , 휨모멘트 M_n 및 비틀림 모멘트 M_{nt} 의 9개이다. 이와 같이 하여 국소직각 좌표계로 변수를 나타내면 각 판에 관한 경계적

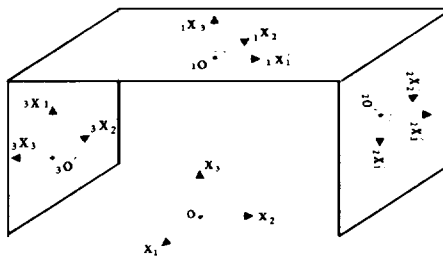


Fig. 2 Assembled plate structure

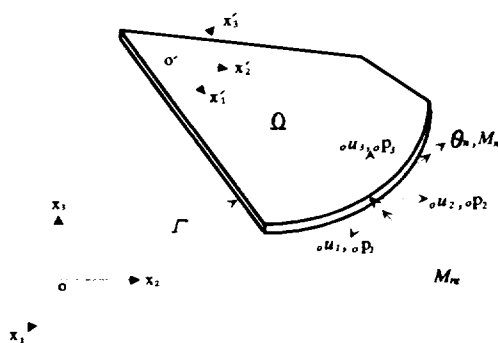


Fig. 3 Variables in global coordinate system

분방정식을 구할 수 있고, 판 마다의 대수방정식계를 만들 수 있다. 또 구조물 전체의 방정식계를 구하기 위하여 변위와 표면력을 국소좌표로부터 전체좌표로 변환하여 나타낸다. 따라서 실제로 다루는 변수는 전체좌표계에서 본 변위 u_i 와 표면력 p_i 및 국소좌표계에서 본 처짐각 θ_n 과 휨모멘트 M_n 으로 합계 8개가 된다. (Fig. 3)

이러한 경계변수들을 사용하여 각 판에 관한 대수방정식계를 구하고 그것을 중첩시키므로써 전체방정식계가 얻어진다.

그러나, 얻어진 전체방정식계에 경계조건만을 이용하면 방정식의 수보다 미지수가 많아서 해석할 수 없다. 그래서, 접합선상에서의 변위와 처짐각의 適合條件 및 힘과 모멘트의 平衡條件을 고려하여 전체방정식을 형성하여야 한다.

3.2 변수의 좌표 변환

각 판에 관해서 판 경계상의 절점 변위 및 표면력 벡터를 $\mathbf{u}^n, \mathbf{p}^n$ 으로 하고 전체좌표계로의 변환 성분을 ${}_o\mathbf{u}^n$ 와 ${}_o\mathbf{p}^n$ 로 표시한다. 이때 국소좌표계와 전체좌표계의 관계는 다음과 같다.

$$\mathbf{u}^n = \mathbf{L}^n \cdot {}_o\mathbf{u}^n \quad (17)$$

$$\mathbf{p}^n = \mathbf{L}^n \cdot {}_o\mathbf{p}^n \quad (18)$$

여기서

$$\mathbf{L}^n = \begin{bmatrix} \mathbf{L}^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{L}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{L}^{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{L}^m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}^m = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 0 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 0 \\ l_3 & m_3 & n_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

= m번 판의 법선방향여현

l_i, m_i, n_i ($i=1-3$)

: 국소좌표계 x_1, x_2, x_3 축에 관한 법선방향여현

또한 \mathbf{u}^n 은 전체구조물의 변위벡터, \mathbf{u}^i 는 각 판의 변위벡터, \mathbf{u}_j 는 각 절점의 변위벡터,

\mathbf{p}^n 은 전체 구조물의 하중벡터, \mathbf{p}^i 는 각 판의 하중벡터, \mathbf{p}_j 는 각 절점의 하중벡터이다. 식(17)과 (18)을 이산화한 연립방정식(15)에 이용하면 다음과 같은 일반식이 구해진다.

$$\mathbf{H L U} = \mathbf{G L P} \quad (19)$$

따라서 최종적으로 다루게 되는 경계변수는 전체좌표계의 변위 ${}_o\mathbf{u}^n$ 와 표면력 ${}_o\mathbf{p}^n$. 국소좌표계에서 본 처짐각 θ_n 과 휨모멘트 M_n 으로 모두 8개가 된다.

3.3 구조물의 일반적인 경계조건

경계상의 임의의 점에서의 경계변수는 ${}_o\mathbf{u}_i, {}_o\mathbf{p}_i, T_n, M_n$ 의 8개이다. 먼저, 경계적분방정식은 면내변형문제(평면탄성문제)와 면외휨문제(판의 휨문제)에 관한 식 (2), (8), (10)으로 합계 4개가 얻어진다. 앞의 8개의 경계변수 중 나머지 4개가 경계조건에서 규정된다. 즉

$${}_o\mathbf{p}_i = 0, \quad M_n = 0 \quad (\text{자유 단})$$

$${}_o\mathbf{u}_i = 0, \quad \theta_n = 0 \quad (\text{고정 단})$$

$${}_o\mathbf{u}_i = 0, \quad M_n = 0 \quad (\text{단순지지})$$

이와 같이 단일판에서는 경계변수 8개에 대해서 관계식을 8개(경계적분방정식 4개, 경계조건 4개)로 둘 수 있기 때문에 해석이 가능하게 된다.

3.4 접합선에서의 경계조건

복수의 판이 접합되어 있는 선을 접합선으로 부르기로 한다. 이 접합선상의 임의의 점은 n개의 판에 속하게 된다. 전체 8n개의 변수 중에서 경계적분방정식에 의한 관계식이 4n개이므로 다음의 조건들을 이용해서 4n개의 관계식을 구해야 한다.

① 변위 적합 조건

접합선상의 점에서는 전체좌표계에서 본 각 판의 변위가 같아야 한다.

즉,

$${}_0u_i^1 = {}_0u_i^2 = \dots = {}_0u_i^n \quad (i=1\sim 3) \quad (20)$$

여기서 윗 첨자는 판의 번호를 나타낸다.

② 표면력 평형 조건

접합선상에서의 표면력 ${}_0P_i$ 의 합력은 그 점에 가해지는 외력 ${}_0P_i^0$ 와 평형을 이룬다.

$${}_0P_i^1 + {}_0P_i^2 + \dots + {}_0P_i^n = {}_0P_i^0 \quad (i=1\sim 3) \quad (21)$$

③ 처짐각 적합 조건

접합선에서 판과 판이 이루는 각은 변형 후에도 변하지 않는다고 가정하면 다음의 관계식을 만족한다.

$$\beta^1\theta_n^1 = \beta^2\theta_n^2 = \dots = \beta^n\theta_n^n \quad (22)$$

여기서 $\beta^j (j=1, 2, \dots, n)$ 는 기준으로 한 판의 경계방향과 같은 경계방향이라면 1, 반대방향이라면 -1로 한다.

④ 모멘트 평형 조건

접합선상에서 각 판의 휨모멘트를 합한 값은 외부에서의 휨모멘트 M_n^0 와 같게 된다. 즉,

$$\beta^1M_n^1 + \beta^2M_n^2 + \dots + \beta^nM_n^n = M_n^0 \quad (23)$$

이러한 적합 조건 및 평형조건으로부터 필요한 만큼의 관계식이 얻어진다. 즉 변위의 적합조건식(20)으로부터 $3(n-1)$ 개, 표면력의 평형조건식(21)으로부터 3개, 처짐각의 적합조건식(22)으로부터 $(n-1)$ 개, 휨모멘트의 평형조건식(23)으로부터 1개, 합계 $4n$ 개의 관계식이 얻어진다. 따라서 접합면상에서 $8n$ 개의 경계변수에 대해서 $4n$ 개의 경계적분 방정식과 적합조건 및 평형조건으로부터 $4n$ 개의 관계식이 얻어

지기 때문에 문제를 풀 수 있다.

이와 같이 하여 전체 대수방정식계에 경계조건과 접합선에서의 적합조건 및 평형조건으로부터 얻어지는 관계식을 이용하여 연립 1차 대수방정식계를 만든다. 그리하여, 이것을 풀면 모든 미지 절점량을 구할 수 있게 된다.

IV. 계산예

본 논문의 해석 대상은 등방 등질의 선형탄성 판으로 구성된 조립판이며, 경계요소로는 일정 요소를 사용하여 해석한다. 또한 이상의 과정에서 전개한 해법의 유효성을 보이기 위해 다음과 같은 예제모델을 설정하여 수치해석예를 보인다. 또한 제안해법의 유효성을 밝히기 위해 유한요소프로그램인 SAP90에 의한 결과와 비교하였다.

- ① 접합선상에 2개의 판이 접합된 구조물
- ② 접합선상에 다수의 판이 접합된 구조물

4.1 접합선상에 2개의 판이 접합된 조립판 구조물의 해석

본 수치해석모델은 접합선상의 경계조건과 적합조건이 적용되는 모델이다. 수치해석모델의 재료적 성질은 Table 1 과 같다.

Table 1 Material properties

Young's modulus	2.1x10 ⁶ kg/cm ²
Poisson's ratio	0.3
Length of short side (L)	100 cm
Thickness (h)	1 cm

이 해석 모델은 밀판(flange)의 유무에 따라 모델A와 모델B로 한다.

모델A : 밑판이 있는 경우 (Fig. 4)

모델B : 밑판이 없는 경우 (Fig. 5)

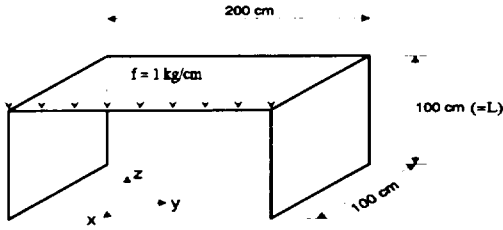


Fig. 4 Assembled plate structure without under plate (Model A)

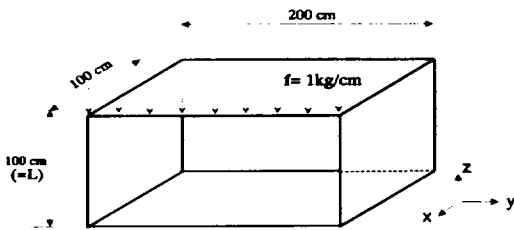


Fig. 5 Assembled plate structure with under plate (Model B)

본 연구에서는 모델A에서는 120개의 요소를 모델B에서는 160개의 일정요소를 사용하였고, SAP90에서는 모델A에서 400개의 요소와 모델B에서 600개의 사각형 쉘요소를 적용하여 수치해석을 수행하였다.

먼저 각 모델의 해석결과로 나온 변형형상을 살펴보면 Fig. 6 및 7 과 같다. 경계상의 변형

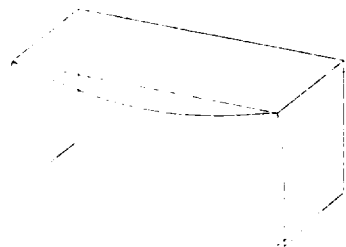


Fig. 6 Deformed shape of Model A

형상을 살펴보면 옆판에 붙어있는 접합선상에서는 처짐이 거의 생기지 않았다. 이것은 옆판이 강성이 큰 보의 역할을 하기 때문이다.

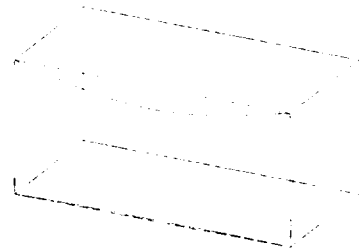


Fig. 7 Deformed shape of Model B

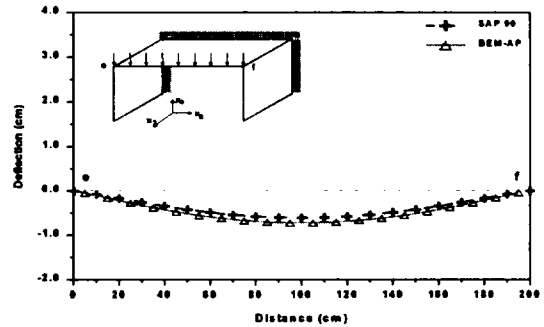


Fig. 8 Deflection of free end in Model A (end e-f)

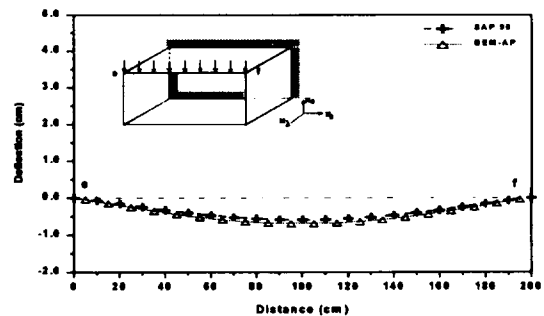


Fig. 9 Deflection of free end in Model B (end e-f)

Fig. 8~9는 자유단(e-f면)에서의 처짐량을 나타낸 것인데 본 연구의 결과가 SAP90의 결과보다 조금 더 큰 값을 나타내고 있지만 잘 일치

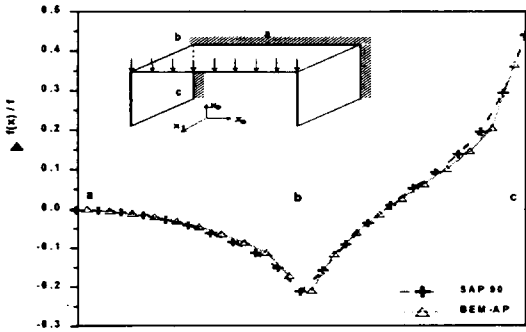


Fig. 10 Distribution of inplane forces of fixed end in Model A

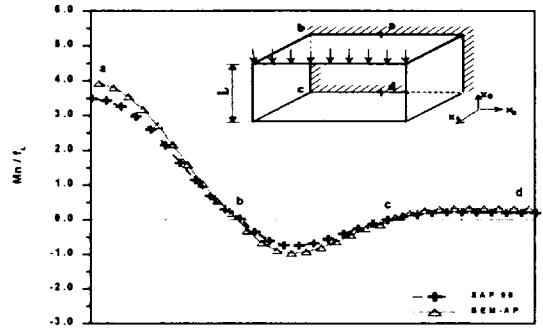


Fig. 13 Distribution of moment of fixed end in Model B

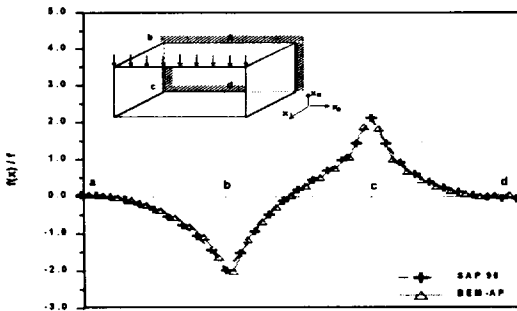


Fig. 11 Distribution of inplane forces of fixed end in Model B

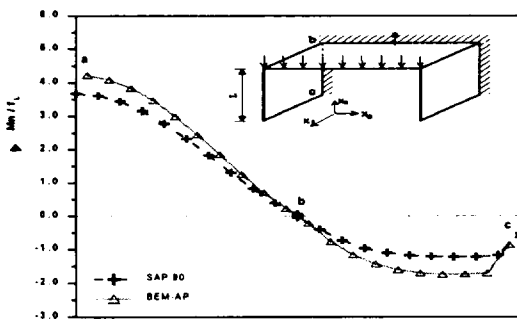


Fig. 12 Distribution of moment of fixed end in Model A

하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10~11은 고정단(a-d면)에서의 표면력 분포를 나타내는 그림이다. 분포형태를 알아보기 위해 표면력을 단변

길이 L에 작용하는 하중으로 일반화시켜 나타내었는데 BEM에 의한 결과와 SAP90의 결과가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 12~13은 고정단(a-d면)에서의 모멘트 분포를 나타낸다. SAP90의 결과보다 BEM에 의한 결과가 조금 더 큰 값을 보이고 있으며, 그 편차는 최대치에서 약 10% 정도이다. 이것은 본 연구에서 요소 내에서 함수값이 일정하다고 가정하는 일정요소의 사용에서 기인한다고 볼 수 있다.

4.2 접합선상에 다수의 판이 접합된 조립 판구조물의 해석

다음은 앞의 예제들보다 좀 더 다양한 형태의 조립판 구조물에 대한 적용성을 알아보기 위해 접합선상에 다수의 판이 접합되는 예를 선택하였다. 모델의 재료적 성질은 표 1 과 같고, 크

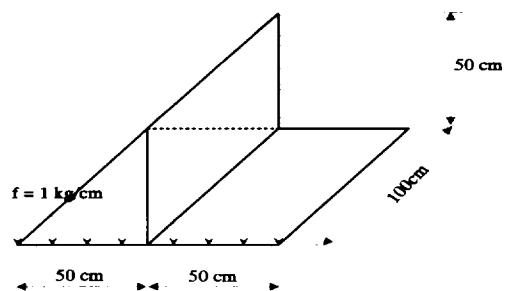


Fig. 14 Structure assembled 3 plates at assemble line

V. 결 론

본 논문에서는 조립판 구조물을 해석하기 위한 近似解析法으로서 경계요소법에 의한 수치해석법을 개발하였다.

하나의 단일판을 해석하기 위해 면내력과 면외력에 대한 2가지 문제를 중첩하여 적용하였고, 이렇게 형성된 단일판을 3次元 공간에서의 경계조건과 接合線에서의 조건을 적용하여 조립하였다. 그리고, 해석으로서 구조물의 형태에 따라 하나의 접합선상에 2개의 판이 접합되는 경우와 3개의 판이 접합되는 경우의 예제 모델을 설정하여 해석하였다. 또한 본 논문에서 전개한 수치해법의 妥當性을 檢證하기 위해 현재 구조해석분야에서 가장 많이 사용되는 유한요소법을 이용한 해석프로그램인 SAP90의 결과와 비교 분석하였다. 그 결과 본 해법을 이용한 계산에서는 적은 수의 一定要素를 사용하였음에도 불구하고 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 그러나, 표면력과 모멘트에서는 모서리점에서 응력의 급격한 변화로 인한 차이가 발생하는 것을 볼 수 있었는데, 이것은 본 연구에서 요소내에서 미지함수의 값이 일정하다고 가정하는 一定要素를 사용하였기 때문으로 추정된다. 그러므로, 요소 내에서의 함수의 변화를 고려할 수 있는 高次要素를 사용한다면 좀 더 정밀한 해석을 할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) 정하선, 정시현, 1995, 프리캐스트 구조물 해석기법연구 보고서, 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터, 2.
- 2) Tosaka, N. and Nakayama, T., 著, 서일교, 김남형, 譯, 1995, 境界要素法の基礎, 원창출판사
- 3) Beskos, D.E., *Boundary Element Analysis of Plates and shells*, Springer-Verlag, pp.1-34.

Fig. 15 Deformed shape

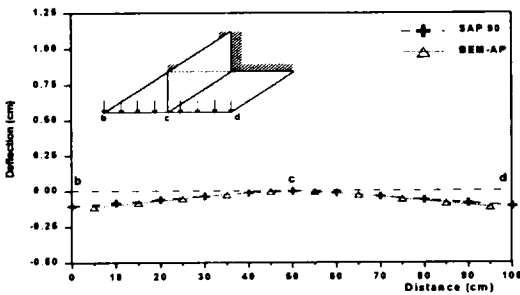
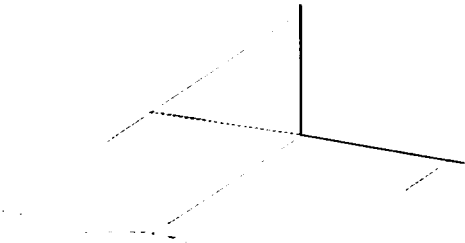


Fig. 16 Deflection of free end (end b-c-d)

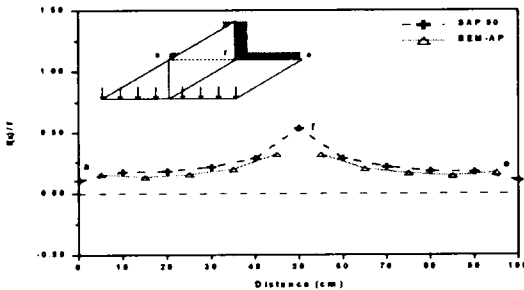


Fig. 17 Sharing forces at fixed end (end a-f-e)

기에서 단변의 길이(L)를 50cm로 설정하였다. 해석모델은 Fig. 14 에 보인다. 이 해석모델에 대한 해석 결과인 변형형상과 처짐, 표면력을 나타내면 Fig. 15~17 과 같다. Fig. 16 의 자유단에서의 처짐형상을 보면 SAP90의 결과와 잘 일치하고 있으며, Fig. 17의 전단력분포도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

- 4) Stern, M., and Lin, T.L., 1986. Thin Elastic Plates in Bending, *Developments in Boundary Element Methods-4*, pp.91-119.
- 5) Stern, M., 1979 A General Boundary Integral Formulation for the Numerical Solution of Plates and Shells, *Int. J. of Solids and Structures*, Vol.15 pp.769-782.
- 6) Brebbia, C.A., Tels, J.C.F., and Wrobel, L.C., 1984 *Boundary Element Technique*, Springer-Verlag, Berlin
- 7) Kamiya, N., and Sawaki, I., 1984, Finite Deflection of Plates, *Topics in Boundary Element Research-1*, Springer-Verlag, pp.204-224.
- 8) Tanaka, M., 1986 Elastic Buckling Analysis of Assembled Plate Structure by Boundary Element Method, *Boundary Element VIII Conference*.
- 9) 서일교, 권택진, 1992. 박판의 동적 휨문제에 대한 경계적분방정식 정식화, *대한건축학회 학술논문집*, 제12권, 제1호, pp.303-308.
- 10) Suh, I.G., Kwan, T.J. and Tosaka, N., 1993, Transient analysis of plate bending problems by the boundary element method," *Proc. of 2nd Asian-Pacific Conf. Computational Mechanics*, Vol.1, S.Valliapan, V.A. Pulmano and F.Tin-Loi, eds., Rotterdam, A.A.Balkema, pp. 215-220.