

## 변절점 평판힘요소를 이용한 전면기초의 해석

Mat Foundation Analysis Using Variable Node Plate Bending Element

최창근\* 김한수\*\*  
Choi, Chang-Koon Kim, Han-Soo

### ABSTRACT

The variable node plate bending element, ie, the element with one or two additional mid-side nodes is used in the analysis of mat foundation to generate the nearly ideal grid model in which more nodes are defined near the column location. The plate bending element used in this study is the one based on Mindlin/Reissner plate theory with substitute shear strain field and the nodal stresses of that element are obtained by the local smoothing technique. The interaction of the soil material with the mat foundation is modeled with Winkler springs connected to the nodal points in the mat model. The vertical stiffness of the soil material are represented in terms of a modulus of subgrade reaction and are computed in the same way as to the computation of consistent nodal force of uniform surface loading. Several mesh schemes were proposed and tested to find the most suitable scheme for mat foundation analysis.

#### 1. 서론

전면기초는 독립기초가 건물의 기초면적의 대부분을 차지할때나 독립기초로써 건물을 안전하게 지지할 수 없을때 주로 사용되는 기초 형식이다. 전면기초는 그 연속적인 특성과 상부구조와의 일체성으로 각 기둥들의 부등침하를 방지하여 주어 더욱더 그 지지효과를 높여주게 된다.

전면기초를 해석하는 방법으로는 지반반력의 분포를 선형으로 가정하는 관용법, ACI위원회에서 제안한 근사연성 해석법과 기초판을 유한개의 요소로 분할하여 해석하는 유한요소법, 유한차분법등이 있다<sup>[1]</sup>. 관용법은 지반반력이 선형이라고한 가정이 독립기초와 같은 작은 기초의 경우에는 적절히 적용될 수 있지만 전면기초의 경우에는 너무나 큰 오차를 유발시키게 된다. 따라서 관용법은 초기 설계를 위한 약산 정도로 사용되고 실제 기초판을 설계하는 방법으로는 부적당하다. 근사연성 해석법은 탄성지반위의 평판의 미분방정식의 해에 그 근거를 둔 방법으로, 일단 관용법에 의하여 그 두께가 결정된 전면기초에 대하여 기초판의 강성을 구하고 지반 반력 계수와와의 비에 의하여 Heteny가 제안한 영향계수를 구하여 알고자 하는 지점에서의 처짐과 모멘트, 전단력등을 계산하게 된다. 이러한 방법으로 구한 값은 극좌표계에 의한 값이므로 다시 직각 좌표계로 변환하여 설계에 사용하게 된다. 이방법은 필산으로 하기에는 너무나 계산절차가 복잡하고, 도표를 이용하여 영향계수등의 값을 구하게 되므로 전산화하기도 곤란한 점이 있어 잘 사용되고 있지 않다. 가장 신뢰할 수 있는 전면기초의 해석 방법은 유한요소법에 의한 해석법으로 최근의 유한요소법의 발달과 컴퓨터의 보급으로 유한요소법에 의한 전면기초의 해석이 일반화되고 있다.

유한요소법에 의한 전면 기초의 해석은 지반에

의해 지지되는 평판힘요소를 이용한 해석법으로 기초판을 유한개의 평판요소로 분할하게 된다. 유한요소법의 특성상 사용되는 요소의 수를 늘리게 되면 더욱더 정확한 해를 구할 수 있지만 모델링의 어려움, 컴퓨터 기억용량, 계산 속도 등의 이유로 실제적으로는 아주 많은 요소를 사용할 수는 없다. 따라서 기둥선과 같은 응력의 집중이 예상되는 지점이나 큰 응력의 변화가 예상되는 지역에 많은 요소를 사용하고 집중하중이 작용하는 지점에서 먼 지역은 적은 수의 요소를 사용하는 것이 이상적인 해석모델이라 할 수 있다<sup>[2]</sup>. 본 연구에서는 이러한 이상적인 해석모델에 근사한 모델을 만들기 위하여 그림1과 같은 변절점 평판 힘요소를 이용하여 기둥 위치에는 많은 절점을 사용하고 기둥에서 먼 지역은 적은 절점을 사용한다.

#### 2. 변절점 평판 힘 유한요소

많은 연속체 응력해석에 있어서 그 모양이 갑자기 변하는 지점, 집중하중을 받는 지점 등에는 응력집중 현상이 발생된다. 이러한 문제를 효율적으로 해석하기 위해서는 응력의 변화가 큰 지역에는 많은 절점을 사용하고 다른 지역에는 비교적 적은 절점을 사용하는 것이 이상적인 방법이다. 4-절점 요소의 변에 추가적인 절점을 가지는 변절점 요소를 사용하면 상기의 이상적인 해석 모델을 쉽게 구성할 수가 있다.

본 연구에서 사용된 변절점 평판 힘 요소는 다음과 같은 형상함수를 이용하여 강성행렬을 구성하였다<sup>[3]</sup>.

$$\begin{aligned} N_1 &= N_1' - \frac{1}{2}(N_8 + N_5) & N_5 &= \frac{1}{2}(1-|\xi|)(1-\eta) \\ N_2 &= N_2' - \frac{1}{2}(N_5 + N_6) & N_6 &= \frac{1}{2}(1+\xi)(1-|\eta|) \\ N_3 &= N_3' - \frac{1}{2}(N_6 + N_7) & N_7 &= \frac{1}{2}(1-|\xi|)(1+\eta) \\ N_4 &= N_4' - \frac{1}{2}(N_7 + N_8) & N_8 &= \frac{1}{2}(1-\xi)(1-|\eta|) \end{aligned} \quad (1)$$

\* 정회원, 한국과학기술원 교수  
\*\* 정회원, 한국과학기술원 박사과정

여기서

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \zeta_i \zeta)(1 + \eta_i \eta) \quad \text{for } i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

식(1)에서 변절점에 해당하는 형상함수  $N_5, N_6, N_7, N_8$  는 해당 절점이 존재할때만 영이 아닌 값을 가진다. 예를 들면, 그림1에서 점 5에 실제로 절점이 존재하고 점 6, 7, 8에는 절점이 존재하지 않으면  $N_5$  는 영이 아니지만  $N_6, N_7$  및  $N_8$  은 모두 영이 된다. 한편, 형상함수를 살펴볼때 변절점에 해당되는 형상함수는 부분적 1차 직선임을 알 수 있다.

동매개변수법에 의한 Mindlin평판원소소의 강성행렬은 전단강성이 실제보다 과다하게 평가되어 얇은 평판을 해석할 때 대단히 나쁜 결과를 주는데, 이러한 현상은 저차요소일수록 심해지며 지극히 얇은 평판의 해석시는 이른바 'shear locking' 현상을 유발한다. 이러한 바람직하지 못한 현상을 피해 요소의 올바른 강성을 구하기 위해 여러가지 방법이 제안되었는데, 그 방법으로는 다음과 같은 방법들이 있다.

- 1) 비적합변위형의 추가
- 2) 선택적 감차적분
- 3) 대체전단변형률장

본연구에서 사용된 요소는 대체전단변형률장을 사용한 Mindlin의 평판이론에 의하여 구성된 것이다. 사용된 대체전단변형률장은 참고문헌[3]에 제시되어 있다.

동매개변수법에 의한 요소 강성행렬은 자연좌표계 상으로 사상된 요소영역에서 Gauss 적분에 의해 구하는 것이 일반적이지만, 본연구에서 사용된 변절점 요소는 변절점이 존재하는 점을 중심으로 변위장의 미분치가 불연속을 이루므로 특이적분(singular integral)이 된다. 따라서 수치적분은 그림2에 나타난 바와 같이 점선으로 구분된 각 부영역별로 수행해야 한다. 즉, 5절점 요소의 경우 적분 영역은 두개의 부영역으로, 6절점 및 7절점 요소는 네개의 부영역으로 분할하여 각 부영역마다 2X2 적분을 수행한다. 이와 같은 수정된 Gauss 수치적분을 위한 자연좌표계 상의  $\zeta$  및  $\eta$  축 방향의 적분점의 좌표 및 가중치는 표 1에 나타나 있다.

### 3. 절점 응력

유한요소법은 부분적인 함수로 표현된 범함수의 최소화와 관련되어 있는데 이에 사용되는 함수는 일정차수의 요소간 연속성을 가지고 있어야 한다. 한편, 유한요소 해석의 주된 관심이 되는 값(예를 들어 응력)은 사용된 함수의 미분치로 표현되는데 많은 경우, 특히 낮은 차수의 요소의 경우에는 이들 값들은 요소간의 연속성을 만족시키지 못하게 된다. 즉, 변위장을 가정한 유한요소 해석에 있어서 요소간의 응력은 연속적이지 못하게 된다. 동매개변수법과 같이 수치적분을 이용하여 응력을 구하는 방법에 있어서 적분점에서 구한 응력값이 가장 좋은 값을 가지는 반면, 가장 유용한 응력 출력지점이 되는 절점에서의 응력값은 가장 좋지 못한 응력값을 가진다고 알려져 있다[4]. 따라서 절점에서의 응력값을 구하기 위해서는 Gauss적분점에서 구한 값을 이용하여 후처리하는 방법이 필요하게 된다. 전면기초의 설계와 같은 문제에 있어서는 기초

판의 처짐도 중요하지만 모멘트, 전단력과 같은 응력이 더욱 중요하므로 보다 정확한 절점응력을 구하는 것은 중요한 문제가 된다. 본연구에서는 최소자승법을 이용한 local stress smoothing 방법을 이용하여 절점응력을 구하였다[5].

최소자승법에서의 미지수를 smoothing된 절점 응력으로 둔다면, 임의 지점에서의 smoothing된 응력분포  $g(\zeta, \eta)$ 는 다음 식과 같이 나타 낼 수 있다.

$$g(\zeta, \eta) = \sum_{i=1, n} N_i \bar{\sigma}_i \quad (3)$$

여기서  $N_i$ 는 식(1)에서 사용된  $i$ 번째 절점에서의 형상함수인데 자연좌표계  $\zeta, \eta$ 의 함수로 표현된다.  $\bar{\sigma}_i$ 는  $i$ 번째 절점에서의 smoothing된 절점응력이며  $n$ 은 요소당 절점수이다.

요소내 임의 지점에서의 smoothing된 응력과 유한요소응력(unsmoothed stress)과의 오차는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$e(\zeta, \eta) = \sigma(\zeta, \eta) - g(\zeta, \eta) \quad (4)$$

임의 지점의 요소내 유한요소응력  $\sigma(\zeta, \eta)$ 은 다음과 같은 응력-변위 관계식에서 구할 수 있다.

$$\sigma(\zeta, \eta) = [D][B]\{\delta\}^e \quad (5)$$

여기서  $[D]$ 는 재료행렬이며,  $[B]$ 는 변형률/변위 관계 행렬이고  $\{\delta\}^e$ 는 절점에서의 변위이다.

smoothing된 절점응력을 구하는 문제는 다음의 범함수를 최소화시키는 절점응력  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p$  을 구하는 문제로 귀착된다.

$$\Pi = \sum_{j=1, n^e} \iint e(\zeta, \eta) dx dy \quad (6)$$

여기서  $p$ 는 절점의 총갯수이며  $n^e$ 는 총요소수이다. 범함수  $\Pi$ 가 최소화되기 위해서는

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \bar{\sigma}_i} = 0 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

을 만족해야 한다. 따라서 각 요소별로 동력학 문제에서의 질량행렬과 유사한 다음과 같은 smoothing 행렬을 얻을 수 있다.

$$[S]^e = \begin{bmatrix} \iint N_1 N_1 \det J d\zeta d\eta & \dots & \iint N_1 N_n \det J d\zeta d\eta \\ \vdots & & \vdots \\ \iint N_n N_1 \det J d\zeta d\eta & \dots & \iint N_n N_n \det J d\zeta d\eta \end{bmatrix} \quad (8)$$

또한 다음 식과 같은 하중벡터와 유사한 'smoothing force vector'을 얻을 수 있다.

$$\{F\}^e = \begin{bmatrix} \iint N_1 N_1 \det J d\zeta d\eta \\ \vdots \\ \iint N_n N_n \det J d\zeta d\eta \end{bmatrix} \quad (9)$$

상기에서 구한 행렬들을 요소별로 적용시켜 요소당 절점응력은 다음과 같은 행렬식의 해를 구함으로써 얻을 수 있다.

$$[S] \cdot \{\delta\} = \{F\} \quad (10)$$

식(10)에서 구한 값은 요소내에서 smoothing된 값이므로 각 절점에서 연결된 요소에 따라 그 값이 다르게 된다. 최종 절점응력을 요소별로 구한 smoothing된 응력의 평균값으로 한다.

선형 형상함수를 사용한 평형사변형 모양의 4-절점 요소의 경우, 자코비안 행렬의 determinant가 일정한 값을 가지므로 식(1)에서 사용된 형상함수를 대입하고 그의 역행렬을 구하면 다음과 같은 식을 이용하여 직접적으로 smoothing된 절점응력을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 + \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 1 + \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_I \\ \sigma_{II} \\ \sigma_{III} \\ \sigma_{IV} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서  $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}, \sigma_{IV}$  는 Gauss 적분점에서 구한 응력값이다.

식(11)을 살펴볼때 local stress smoothing 방법은 Gauss 적분점에서 구한 응력값의 절점좌표에로의 외삽값(extrapolated values)임을 알 수 있다 (그림3).

#### 4. 변절점 요소의 수치해석

전면기초의 해석에서 사용할 변절점 요소의 적합성과 효율성을 알아 보기 위하여 집중하중을 받는 4변 고정된 얇은 평판을 해석해 보았다. 대칭성을 고려하여 평판의 1/4만 해석하였고 해석에 사용된 평판의 자료와 해석 체는 그림4에 나타나 있다. 해석에 사용된 요소수와 절점수 그리고 처짐과 응력값의 최대값은 표2에 나타나 있다.

X 축에 따른 수직방향의 처짐( $w_z$ )과 휨모멘트( $M_x$ )의 분포를 4절점 요소로 구성된 16X16 체를 해석한 결과와 비교한 그림을 그림5에 나타내었다. 수직처짐의 경우 16X16 체의 경우와 거의 유사한 분포를 보이며 모멘트 분포에 있어서는 4절점요소와 변절점요소가 만나는 지역에서는 다소 차이를 보인다. 그러나 최대값에 있어서는 16X16 체에 의한 값과 거의 일치함을 알 수 있다.

사용된 요소수와 절점수를 감안할때 변절점 요소는 상당히 우수한 결과를 얻을 수 있어, 전면기초의 해석에서 아주 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 전면기초의 해석 모델링

전면기초의 해석과 같은 지반과 구조물의 상호 작용 해석에 있어서는 지반의 모델링이 선행되어야 한다. 지반의 모델링 방법으로는 크게 다음과 같은

방법으로 구분할 수 있다[6]. 지반의 선형 탄성 거동을 모델링하는 가장 간단한 방법으로는 Winkler 모델을 들 수 있다. 이는 지반의 모든 지점의 변위는 그 지점에 작용되는 응력에 비례한다는 가정을 바탕으로 한 것으로 지반은 촘촘히 배치된 스프링으로 모델링 된다. Winkler 모델은 사용하기에 가장 간단하다는 장점이 있는 반면 한 지점의 변위는 인접한 지점이라 할지라도 다른 지점의 응력이나 변위와는 무관하다는 약점을 갖게 된다. 다른 하나의 지반 모델링의 방법은 지반을 연속체로 보아 탄성 반무한 영역(elastic half-space)으로 모델링하는 방법이 있다. 이 방법은 지반의 실지 거동을 잘 표현할 수 있다는 장점이 있지만 그 유도과정과 적용 방법이 상당히 복잡하게 된다. 최근에는 Winkler 모델의 비연속성을 보완하고 연속체 모델의 복잡함을 피하기 위한 모델링 방법이 많이 연구되고 있다. two-parameter 모델이라고 지칭되는 이 방법들은 Winkler 모델이 하나의 매개변수로 모델링 되는 것과는 달리 서로 독립적인 두개의 매개변수로 모델링된다. 이는 Winkler 모델의 비연속성을 보완할 수 있는 장점이 있지만 사용되는 parameter의 정확한 값을 구하기가 곤란하다는 단점이 있다.

지반은 그 성질이 상당히 복잡하므로 다른 지반 모델링을 사용할때 필요한 매개변수의 정확한 값을 구하기가 어렵다. 따라서 연속체 모델과 같은 복잡한 방법으로 지반을 모델링하였다 하더라도 사용되는 매개변수의 신뢰성이 떨어지므로 그 해석결과와 타당성을 확보하기가 쉽지 않다. Winkler 모델에서의 스프링의 탄성계수는 기초설계의 실무에서 가장 많이 사용되는 허용지내력에서 그 값을 유도할 수 있으므로[7] 본 전면기초의 해석에서는 쉽게 실무에서 적용할 수 있도록 Winkler 모델을 사용하였다.

Winkler 모델에서의 지반은 기초판을 모델화한 평판요소의 각 절점에 연결된 수직방향의 강성만 가지는 스프링으로 모델링된다. 스프링의 강성은 지반의 지반 반력 계수(modulus of subgrade reaction)로써 표현되는데, 지반반력계수는 다음 식과 같이 지반의 표면에 작용하는 접촉 압력(contact pressure) p와 그 지점에서 p에 의해 발생하는 수직변위 y와의 비로 표현된다.

$$k_s = \frac{p}{y} \quad (12)$$

따라서 스프링의 탄성계수는 그 스프링이 표현하는 지반의 면적을 지반반력계수에 곱함으로써 구할 수 있다. 즉, 각 요소별로 분포하중을 절점하중으로 바꾸는 방법과 같은 방법으로 각 절점에서의 스프링 탄성계수를 구하고 요소별로 구해진 절점 스프링 계수를 합하여 최종 절점에서의 스프링 탄성계수로 사용한다. 본 연구에서 사용된 변절점 요소의 경우, 요소의 모양이 정사각형일때 요소별 절점 스프링 탄성계수는 그림6과 같은 비율로 분배된다.

전면기초판의 배근 설계에 있어서 모멘트의 분포에 따라 배근량을 달리하는 것이 효율적이지만 시공의 간편성등의 이유로 최대 정/부 모멘트에 해당하는 철근량을 상단과 하단에 일정하게 배근하는 것이 일반적이다. 따라서 전면기초판의 해석에 있어서 최대 모멘트, 전단력 값을 구하는 것이 중요하므로 최대 응력이 발생하는 기둥과 기둥열에 많은 절점을 배치하는 것이 효율적인 모델링 방법이다.

다. 많은 자유도를 사용할수록 정확한 해석결과를 주게 되지만 모델링의 어려움, 컴퓨터 기억용량의 한계, 해석결과 판독의 어려움등의 이유로 아주 많은 자유도를 사용할 수는 없다. 이러한 점은 감안하여 그림7과 같은 전면기초판의 기본구조에 대한 해석 모델 방안을 제안하였다. Scheme-A의 경우는 기본 구조에 대하여 2X2의 6절점요소를 사용하여 체눈을 구성하였고, Scheme-B는 4X4의 4절점요소를 사용한 체눈에 기둥주위에만 추가적인 절점을 더한 모델이며, Scheme-C는 4X4의 체눈에 기둥열을 따라 추가적인 절점을 더한 모델이다. 이 세가지 Scheme에 대하여 예제해석을 수행하여 어떤 방안이 가장 효율적인 방안인지를 판단하고자 한다.

## 6. 전면기초 체눈 방안의 수치 해석

제안된 체눈 방안들중 가장 효율적인 방안을 선택하기 위하여 그림8과 같은 전면기초판<sup>[8]</sup>에 대하여 제안된 체눈 방안을 각각 적용하여 해석하여 그 결과를 분석해 보았다. 전면 기초판은 크기가 51 ft X 51 ft (15.5 m X 15.5 m) 이고 두께는 2.0 ft (0.61 m) 이다. 사용된 재료는 콘크리트로서  $E_c = 3122$  ksi (21.52 GPa),  $\mu = 0.15$  이고 지반반력계수  $k_s = 28.4$  k/ft<sup>3</sup> 이다. 하중이 대칭으로 작용되므로 전면기초판의 1/4 만 해석하였다. 제안된 체눈 방안외에 비교를 위하여 4절점 요소만으로 구성된 4X4 체눈과 8X8 체눈도 해석해 보았다. 제시된 전면기초와 같은 경우는 정확한 해가 알려져 있지 않으므로 많은 4절점 요소를 사용한 해석모델을 참고모델로 삼는다. 참고모델은 요소의 크기를 기둥의 1/4로 하여 기둥하중을 집중하중으로 작용시키지 않고 대신 기둥을 구성하는 4개의 요소에 분포하중으로 작용시켰다. 각 해석모델에 사용된 요소수와 절점수는 표3에 나타내었다.

제안된 체눈방안과 참고모델의 해석결과를 기둥열에 따른 처짐, 모멘트, 전단력등의 분포로서 그림9에 나타내었다. 제시된 그림을 살펴볼때 Scheme-A의 해석 결과는 참고 모델과 상당한 차이를 보여주어 전면기초의 해석에는 사용되기가 곤란하다는 점을 알 수 있다. Scheme-B와 Scheme-C의 결과를 비교해 보면 기둥과 기둥사이의 지점에서 약간의 차이를 보일뿐 최대 모멘트 값이 생기는 기둥에서의 값은 거의 차이를 보이지 않음을 볼 수 있어 Scheme-C의 기둥열사이의 추가적인 절점은 그다지 큰 역할을 하지 못함을 알 수 있다. 따라서 해석결과와 해석에 사용된 요소수와 절점수를 고려할때 Scheme-B가 제안된 체눈방안중 가장 적절한 방안임을 알 수 있다.

제안된 체눈방안중 가장 효율적인 방안으로 선택된 Scheme-B의 성능을 알아 보기위하여 4X4 체눈과 8X8 체눈으로 해석한 결과를 그림10에서 비교해 보았다. 추가적인 절점이 있는 기둥열을 따른 ( $Y=18.0$ ) 응력분포를 보면 Scheme-B의 해석 결과는 8X8 체눈의 결과와 유사하고 기둥사이의 지역 ( $Y=10.5$ )에서의 응력분포는 4X4 체눈의 결과와 유사함을 볼 수 있어 Scheme-B에서의 변절점요소의 사용의 타당성을 확인할 수 있다. 한편, 집중하중이 작용하는 기둥에서의 응력값을 비교해 보면 Scheme-B의 값이 오히려 8X8 체눈을 사용한 값보다 더 참고모델의 값에 가까움을 알 수 있는데 이는 local stress smoothing 방법을 사용하여 절점응력을 구할 경우 변절점요소가 응력집중을 더 잘 표현하기 때문이라고 판단할 수 있다.

전면기초의 설계에 있어서 사용되는 모멘트값은 기둥의 중심에서 생기는 모멘트가 아닌 기둥의 측면에서 생기는 모멘트값이므로 300k 의 하중을 받는 기둥에서의 모멘트( $M_x$ )값을 표4에서 비교해 보았다. 기둥의 중심에 집중하중을 작용시킨 참고모델에 의한 모멘트값도 함께 비교해 보았다. 제시한 표에서 볼 수 있듯이 Scheme-B에 의해 구한 기둥측면의 모멘트값은 참고모델의 값과 유사함을 알 수 있다.

## 7. 결 론

변절점 평판원소들을 전면기초의 해석에 적용시켜 그 결과를 분석해 보았다. 사용한 변절점 평판원소는 부분적 선형 형상함수를 사용하여 강성행렬을 구성하여 요소간 적합성을 만족하게 하였고 대체전단변형률장을 사용하여 과다하게 평가되는 전단강성을 보완하였다. 절점응력을 구하는 방법으로 local stress smoothing 방법을 4절점요소 및 변절점요소에 적용하였다. 지반의 모델링 방법으로 Winkler 모델을 사용하였고 그 스프링 강성은 등분포하중의 처리방법과 유사하게 형상함수를 사용하여 그 값을 구하였다. 집중하중을 받는 평판의 해석에 적용될 수 있음을 판단하였고 세가지 체눈방안을 제안하여 예제해석을 통하여 그중 가장 적절한 체눈방안을 선택하였다. 제안된 체눈방안중 기둥이 위치한 지점 주위에 추가적인 절점을 둔 Scheme-B가 가장 효율적인 체눈방안으로 선택되었다. 해석결과를 분석을 통해 볼때 Scheme-B는 4X4 체눈에 불과 몇개의 절점을 추가함으로써 해석결과 정확성을 상당히 높일 수 있음을 알 수 있어, 전면기초의 해석에서 변절점 평판원소가 성공적으로 적용될 수 있음을 알았다. 본연구에서 제안된 전면기초 해석을 위한 체눈방안은 BUILDS의 기초설계 프로그램인 BUILDS-F<sup>[9]</sup>의 전면기초해석 프로그램에 적용되어 전면기초판의 크기, 기둥배치, 기둥하중등의 전면기초의 설계에 필요한 기본적인 자료만 입력되면 해석에 필요한 체눈, 유한요소 자료등이 자동적으로 발생되어 자동해석할 수 있도록 되었다.

## 참고문헌

1. ACI Committee 336, Suggested Design Procedures for Combined Footings and Mats, (ACI 336.2R-66) (Reaffirmed 1980), American Concrete Institute, Detroit, 1966
2. Ball, Steven C., and Notch, James S. Notch, Computer Analysis/Design of Large Mat Foundations, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 5, May 1984, pp. 1180-1191.
3. Y.M. Park, Adaptive mesh h-refinement method using transition elements in plate bending problems, Ph.D. Dissertation, KAIST, Seoul, Korea, 1990.
4. Barlow, John, Optimal Stress Locations in Finite Element Models, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 10, 1976, pp. 243-251.
5. Hinton, E., and Campbell, J.S., Local and Global Smoothing of Discontinuous Finite Element Functions Using a Least Squares

- Method, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 8, 1974. pp 461-480.
- A. P. S. Selvadurai, Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction, Elsevier Scientific publishing Company, 1979
  - Bowles, Joseph E., Mat Design, ACI Journal, Proceedings, Vol. 83, No. 6, Nov.-Dec., 1986, pp. 1010-1017.
  - Shukla, Shyam N., A Simplified Method for Design of Mats on Elastic Foundations, ACI Journal, Proceedings, Vol. 81, No. 5, Sept.-Oct. 1984, pp.469-475.
  - C.K.Choi and H.S.Kim, Integrated Building Design System (Part 4) : Foundation Design, SEMR 90-03, Dept. of Civil Engr. KAIST, (1990).

표4 300k 의 하중을 받는 기둥에서의 모멘트값

Mesh Model	Column Center	Column Face
Ref. (DL)	-42.02	-31.76
Ref. (CL)	-59.18	-35.42
Scheme-B	-45.71	-32.46†

† extrapolated value

DL : Distributed Load

CL : Concentrated Load

표1 변절점요소를 위한 수정된 가우스적분

Point	$\xi_i, \eta_i$	$W(\xi_i), W(\eta_i)$
1	-0.788675	0.5
2	-0.211325	0.5
3	+0.211325	0.5
4	+0.788675	0.5

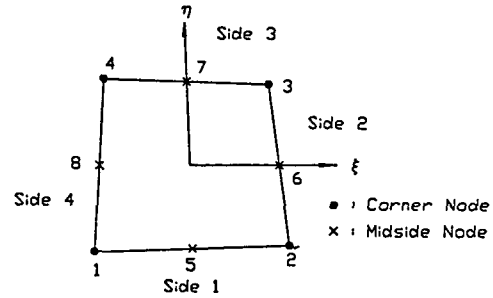


그림1 변절점 평판원요소

표2 사변 고정지지된 정방형 평판해석의 최대값

	Variable Node Element	16 by 16 4-Node
Elements	31	256
Nodes	48	289
Max. $W_z$	-0.053295	-0.052501
Pos. $M_x$	92.96	114.50
Neg. $M_x$	-317.00	-311.70
Pos. $Q_x$	56.52	56.54

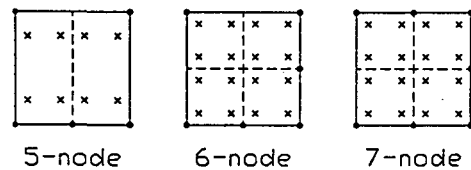


그림2 변절점 평판원요소의 가우스적분 부영역

표3 전면기초 해석의 요소수, 절점수 및 최대값

	Ref. Mesh	4X4 Mesh	8X8 Mesh	Scheme A	Scheme B	Scheme C
Elements	1156	49	196	16	49	49
Nodes	1225	64	225	37	80	92
Max. $W_z$	-0.05945	-0.05797	-0.05902	-0.05641	-0.05819	-0.05837
Pos. $M_x$	29.68	27.41	28.74	33.48	25.84	28.62
Neg. $M_x$	-42.02	-14.58	-33.48	-25.25	-45.71	-45.86
Pos. $Q_x$	34.75	13.64	33.36	13.62	30.16	29.85
Neg. $Q_x$	-35.85	-14.65	-34.45	-14.01	-31.09	-30.85

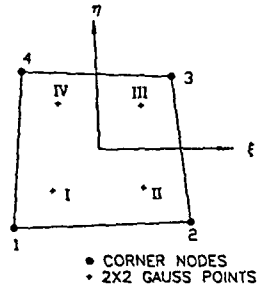


그림3 4절점요소의 절점응력

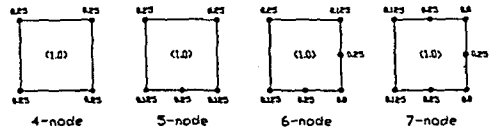


그림6 변절점요소에서의 절점 스프링 상수의 분배

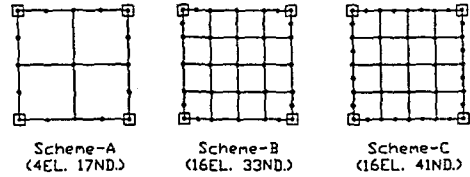
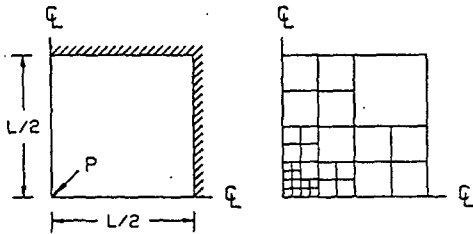


그림7 제안된 전면기초 해석을 위한 체눈방안



$E=3.0 \times 10^6$ ,  $\nu=0.3$ ,  $L=200.0$ ,  $t=2.5$ ,  $P=1000.0$

그림4 사변 고정지지된 정방형 평판(1/4 부분)

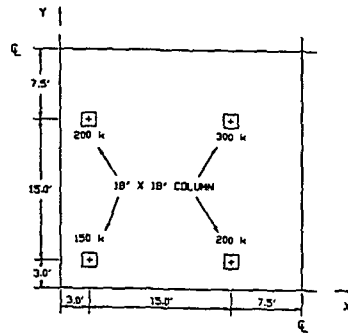


그림8 적합한 체눈방안 선정을 위한 전면기초 예제 모델

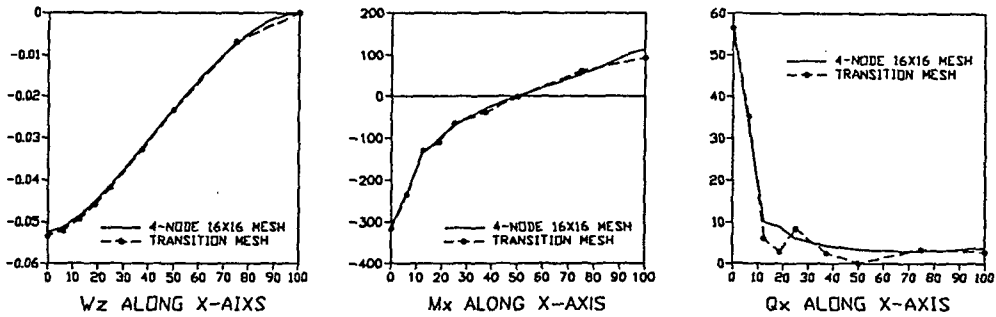


그림5 정방형 평판해석의 X축에 따른 처짐, 모멘트 분포

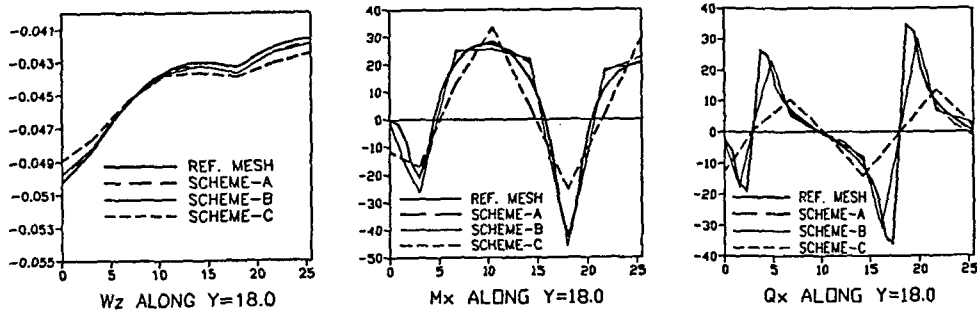


그림9 제안된 체눈방안의 처짐, 모멘트 및 전단력