

균질화기법을 이용한 다공평판의 단순화된 응력해석

Simplified Stress Analysis of Perforated Plates Using Homogenization Technique

이진희*
Lee, Jin - Hee

요 약

다공평판에서의 응력해석에 균질화기법이 사용되었다. 표준적인 유한요소법에 미소좌표계확장을 도입한 균질화기법은 다공평판을 microscale 모델과 macroscale 모델로 나누어 해석한다. 같은 패턴이 반복되는 최소의 기하학적단위를 microscale에서의 단위구조로 취하여 등가물성치를 산출한다. Macroscale 모델에서는 다공평판을 구멍이 없는 일반평판으로 가정하여 앞에서 산출한 등가물성치와 주어진 경계조건을 이용하여 변위를 산출하고, microscale 모델에서 다공평판의 응력을 계산한다. 균질화기법은 다공평판외에도 기본단위의 반복도가 심한 복합구조의 응력해석에서 유용한 전처리 및 후처리 개념을 제공하며, 계산에 필요한 자유도를 현저히 줄이면서 적절한 등가물성치와 응력분포의 계산을 가능케 하여준다.

Abstract

A simplified stress analysis of perforated plates was carried out using homogenization technique. Homogenization technique, which introduced microscale expansion in the standard finite element method, reconstructed the plate with regularly placed holes into a set of macroscale and microscale models. The microscale model helped compute homogenized material constants of the unit cell, which were used to compute macroscale displacements in the macroscale model. Also it was possible to compute the stress field of the plate using the microscale model. It was found that reasonable equivalent material constants were computed and that the required degrees of freedom was drastically reduced when homogenization technique was employed in the stress analyses. The microscale modeling in the homogenization technique provided a useful concept of pre- and post-processing in the stress analysis of perforated plates.

1. 서 론

다공평판등의 복합구조체에서 주어진 경계치문제는 엄밀해를 구하기가 어렵고 수치해석을 통하

여 얻을 수 있는 근사해도 복합구조체를 구성하고 있는 각각의 요소들의 분포특성을 고려하기 위해서는 계산상 매우 많은 자유도를 요구하게 된다. 이러한 문제의 해결을 위한 대표적인 접근방법의

* 홍익대학교 기계설계학과 조교수

이 논문에 대한 토론을 1996년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1996년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

하나로 복합구조체를 대표하는 등가의 물성치를 산출하고, 이 균질화된 물성치를 사용하여 단순화된 경계치 문제의 해를 해석적 또는 수치적 방법으로 구하는 방식을 들 수가 있다. Hashin^[1]은 복합구조의 탄성계수, 열팽창계수, 열전도계수 등에 대한 등가물성치를 산출하는 방법으로 변분유계법(variational bounding method)등의 소개와 함께 여러 연구자들의 연구결과를 비교하고 있는데, 예시된 방법들은 CSA(composite sphere assemblage)나 CCA(composite cylinder assemblage) 처럼 복합구조를 이루는 각 요소들의 기하학적 구성이 비교적 간단한 경우외에는 적용이 어려운 단점을 갖고 있다. Sanchez de Palencia^[2]는 복합구조체의 동적해석을 위하여 점근확장법(asymptotic expansion)을 이용하여 등가물성치를 산출하였고, Guedes^[3]는 유한요소법에 균질화기법을 도입하여 복합구조체의 응력해석문제에 대한 해석을 시도하였다. 또한 균질화기법은 열전달해석 등 다른 분야에서도 응용될 수 있음을 보여주고 있다.^[4]

파이프등의 지지와 효과적인 열전달을 위하여 원자로계통을 비롯한 각종 열교환기에는 많은 다공평판이 사용되고 있는데, 다공평판의 응력계산 시에는 기하학적 특성때문에 구멍이 없는 평판에 비하여 대단히 많은 자유도와 계산시간을 요구받게 된다. 이를 극복하기 위하여 등가평판이론등을 이용한 해석적 또는 수치적인 방법으로 다공평판에서의 응력해석이 시도되어 왔으나^[5,7] 이들 방법은 평판에서의 구멍의 크기가 균일하고 그 분포가 단순한 경우에만 적용시킬 수 있는 단점을 갖고 있다.

본 연구에서는 유한요소법과 균질화기법을 사용하여 다공평판의 응력해석에 필요한 자유도를 현저히 줄이면서 적절한 근사해를 얻을 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 일반적으로 선형탄성학에서 변형률-응력의 관계는

$$\sigma_{ij} = E_{ijmn} \epsilon_{mn} \quad (1)$$

로 설명되는데, 등방성재료에서 탄성계수텐서 E_{ijmn} 는 Lamé 상수와 Kronecker delta 를 이용하여

$\lambda\delta_{ij}\delta_{mn} + \mu(\delta_{im}\delta_{jn} + \delta_{in}\delta_{jm})$ 로 표현된다. 다공평판을 비롯한 각종 복합구조의 응력해석에 균질화기법을 적용하기 위해서는 먼저 구조체를 형성하고 있는 소재물질의 기하학적 분포에 따라 기본단위가 정의되어야 하며, 이로부터 단위구조를 대표하는 등가물성치가 결정된다. 구조체를 구성하고 있는 구성요소들의 탄성학적 특성이 등방성일 경우에도 구조체 전체로서의 탄성학적 특성은 비등방성이 될 수도 한다. 기본단위가 정의되면 다음과 같이 균질화기법을 적용하여 기본단위의 등가물성치를 산출한다.

2. 유한요소 응력해석과 균질화기법

선형탄성문제의 유한요소식은 가상변위법을 이용하여 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\int_{\Omega} E_{ijmn} \frac{\partial u_m^e}{\partial x_n} \frac{\partial v_i^e}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} b_i v_i^e d\Omega + \int_{\Gamma} t_i v_i^e d\Gamma \quad (2)$$

기본단위가 반복되는 복합구조체에서 식(2)의 변위 u^e 과 가상변위 v^e 는 절대값이 충분히 작은 실수 ϵ 를 이용하여 macroscale의 u^0, v^0 와 microscale의 u^1, v^1 으로서 다음과 같이 확장시킬 수 있다.

$$\begin{cases} u^e = u^0 + \epsilon u^1(x, y) + O(\epsilon^2) \\ v^e = v^0 + \epsilon v^1(x, y) + O(\epsilon^2) \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 $y = \frac{x}{\epsilon}$ 는 미세구조에서의 좌표계를 뜻하고 있으며, 식 (3)의 구배는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{cases} \nabla_x u^e = \nabla_x u^0 + \epsilon \nabla_x u^1 + \nabla_y u^1 \\ \nabla_y v^e = \nabla_x v^0 + \epsilon \nabla_x v^1 + \nabla_y v^1 \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하면 ϵ 에 관한 항과 ϵ^2 에 관한 항, ϵ 에 무관한 항들의 합으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} E_{ijmn} \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n} \right) \left(\frac{\partial v_i^0}{\partial x_j} + \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} \right) d\Omega \\
 & + \varepsilon \int_{\Omega} E_{ijmn} \left(\frac{\partial u_m^1}{\partial x_n} \right) \left(\frac{\partial v_i^0}{\partial x_j} + \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} \right) \\
 & + \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n} \right) \frac{\partial v_i^1}{\partial x_j} d\Omega \\
 & + \varepsilon^2 \int_{\Omega} E_{ijmn} \frac{\partial u_m^1}{\partial x_n} \frac{\partial v_i^1}{\partial x_j} d\Omega \\
 & = \int_{\Omega} b_i (v_i^0 + \varepsilon v_i^1) d\Omega + \int_{\Gamma} t_i (v_i^0 + \varepsilon v_i^1) d\Gamma
 \end{aligned} \tag{5}$$

식 (5)에서 ε 를 0에 접근시키면 ε 에 관한 항과 ε^2 에 관한 항들은 없어지고 ε 에 무관한 항들만 남게 된다.

$$\begin{aligned}
 & \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\Omega} E_{ijmn} \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n} \right) \left(\frac{\partial v_i^0}{\partial x_j} + \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} \right) d\Omega \\
 & = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\int_{\Omega} b_i v_i^0 d\Omega + \int_{\Gamma} t_i v_i^0 d\Gamma \right)
 \end{aligned} \tag{6}$$

또한 가상변위 $\underline{v}^\varepsilon = \underline{v}^0 + \varepsilon \underline{v}^1$ 은 그 크기가 임의적이기 때문에 \underline{v}^0 와 \underline{v}^1 도 각각 임의적인 값을 갖게 되므로 식 (6)은 아래와 같이 macroscale과 microscale에 관한 두개의 식으로 분리될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\Omega} E_{ijmn} \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n} \right) \frac{\partial v_i^0}{\partial x_j} d\Omega \\
 & = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\int_{\Omega} b_i v_i^0 d\Omega + \int_{\Gamma} t_i v_i^0 d\Gamma \right)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\Omega} E_{ijmn} \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n} \right) \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} d\Omega = 0 \tag{8}$$

여기에서 식 (7)과 식 (8)은 서로 독립적이 아니고 $\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n}$ 을 통하여 결합되어 있음을 알 수가 있다. 같은 패턴이 반복되는 복합구조체에서 작은 단위구조체에 대한 일반적인 Y-주기함수 $\Phi(\underline{y}) = \Phi(\underline{y} + \underline{Y})$ 에 대한 적분이 아래와 같이 미세구조에서의 평균화된 크기로 나타낼 수 있는 점을 고려하여

$$\begin{aligned}
 & \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\Omega} \Phi(\underline{x}, \underline{y}) d\Omega \\
 & = \int_{\Omega} \frac{1}{|\underline{Y}|} \int_Y \Phi(\underline{x}, \underline{y}) dY d\Omega
 \end{aligned}$$

식 (7)과 식 (8)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} \frac{1}{|\underline{Y}|} \int_Y E_{ijmn} \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n} \right) \frac{\partial v_i^0}{\partial x_j} dY d\Omega \\
 & = \int_{\Omega} b_i v_i^0 d\Omega + \int_{\Omega} t_i v_i^0 d\Omega
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} \frac{1}{|\underline{Y}|} \int_Y E_{ijmn} \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n} \right) \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} dY d\Omega \\
 & = 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

식 (10)을 만족시키기 위하여 윗식에서 나타나는 $u^0(\underline{x})$ 와 $u^1(\underline{x}, \underline{y})$ 사이의 선형적 특성을 고려할 경우 microscale의 매개변수 $\chi^{pq}(\underline{y})$ 를 이용하여 $u^1(\underline{x}, \underline{y})$ 를 다음과 같이 변수분리형으로 나타낼 수 있는데,

$$u_i^1(\underline{x}, \underline{y}) = \chi^{pq}_i(\underline{y}) \frac{\partial u_p^0(\underline{x})}{\partial x_q} \tag{11}$$

이것을 식 (10)에 대입하면

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{|\underline{Y}|} \int_Y E_{ijmn} \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n} \right) \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} dY \\
 & = \frac{1}{|\underline{Y}|} \int_Y (E_{ijmn} - E_{ijpq}) \frac{\partial \chi^{mn}_p}{\partial y_q} \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} dY \frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} \\
 & = 0
 \end{aligned} \tag{12}$$

을 얻는다. 다음의 식 (13)은 식 (12)를 만족시키는 충분조건이므로 식 (13)과 경계조건 (14)로부터 χ^{mn}_p 를 산출한다.

$$\int_Y E_{ijpq} \frac{\partial \chi^{mn}_p}{\partial y_q} \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijmn} \frac{\partial v_i^1}{\partial y_j} dY \tag{13}$$

$$\chi^{mn}_p(\underline{y}) = \chi^{mn}_p(\underline{y} + \underline{Y}) \tag{14}$$

χ^{mn}_p 가 산출되면 macroscale과 microscale이 공존하는 원래의 식 (7)은 균질화된 탄성계수텐서 E^{H}_{ijmn} 을 사용하여 다음과 같이 macroscale만의 식으로 만들 수 있다.

$$\int_{\Omega} E_{ijmn}^H \frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} \frac{\partial v_i^0}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} b_i v_i^0 d\Omega + \int_{\Gamma} t_i v_i^0 d\Gamma \quad (15)$$

$$E_{ijmn}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y (E_{ijmn} - E_{ijpq} \frac{\partial \chi_{pq}^{mn}}{\partial y_q}) dY \quad (16)$$

식 (15)로부터 macroscale 변위 $u^0(\underline{x})$ 를 구하면 식 (1)의 변형도-응력관계식으로부터 복합구조체의 응력을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^e &= E_{ijmn} \frac{\partial u_m^e}{\partial x_n} \\ &= E_{ijmn} \left(\frac{\partial u_m^0}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m^1}{\partial y_n} \right) + O(\varepsilon^2) \end{aligned} \quad (17)$$

3. 다공평판의 등가물성치 계산

Fig. 1과 같은 규칙적인 삼각형 형상으로 배열된 구멍을 가진 다공평판(단위두께와 평면응력가정)에 있어서 같은 패턴이 반복되는 최소단위인 단위구조가 Fig. 2에 주어져 있다. Fig. 2의 단위구조에 대하여 간극효율($\eta=h/P$)을 0에서 1까지 변화시켜가며 식 (16)을 이용하여 균질화된 탄성계수텐서를 구하고, 이로부터 등가탄성계수와 등가 Poisson 비를 산출한 결과가 Fig. 3에 주어져 있다. 계산결과는 다공평판을 이루는 소재의 재질을 탄성계수 $E=2.83 \times 10^7$ psi, Poisson 비 $\nu=0.3$ 으로 가정하여 산출되었다. 또한 비교를 위하여 Warren^[8]이 제시한 해석적인 방법으로 산출한 등가물성치가 Fig. 3에 같이 주어져 있다. Warren은 간극효율이 매우 작은 foam 구조체의 등가물성치를 구하기 위한 해석적인 방법을 제안하였는데, 이를 삼각형배열의 다공평판에 적용하기 위해서는 구조체의 두께를

$$t(x) = P \left\{ (1 - \sqrt{(1-\eta)^2 - (x - \frac{1-\eta}{2})^2}) \right\}$$

로 하여 계산해 주어야 한다.

Fig. 3은 균질화기법을 적용하여 산출한 다공평판의 등가탄성계수 E^* 이 η 이 증가함에 따라 커지고 있음을 보여주고 있는데, 본 연구의 계산결과

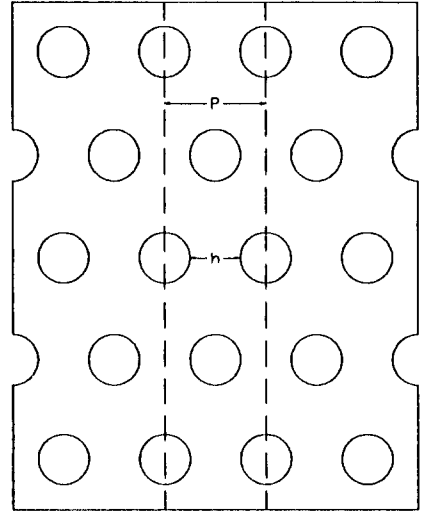


Fig.1 Perforated plate, staggered(triangular) array

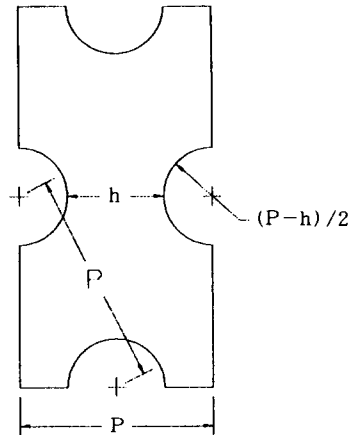


Fig.2 Unit cell of staggered array

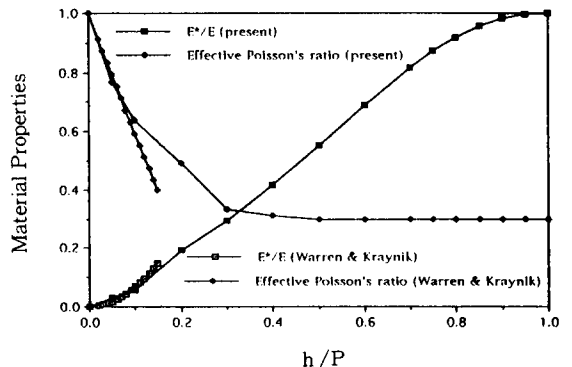


Fig.3 Equivalent material properties of perforated plates with staggered array pattern

와 Warren의 해석적인 방법을 이용한 결과가 간극효율이 작은 범위($\eta < 0.1$)에 있어서 상당히 합치되고 있음을 알 수 있다. Warren의 해석적인 방법은 간극효율이 작은 경우에만 이용될 수 있어 그 적용 범위가 제한되어 있으나 균질화기법을 사용하여 다공평판의 등가물성치를 계산할 경우에는 그러한 제한을 받지 않는 장점이 있다. 균질화기법은 다공평판의 등가 Poisson 비 ν^* 의 산출도 가능케 하여준다. Warren은 삼각형배열의 다공평판의 경우 $\eta \rightarrow 0$ 의 극한에서 $\nu^* \rightarrow 1$ 이 됨을 예측하였고 상식적으로 $\eta \rightarrow 1$ 의 극한에서 $\nu^* \rightarrow \nu$ 이 됨을 생각할 수 있는데, Fig. 3의 결과는 균질화기법을 이용한 결과가 이러한 예상과 부합되고 있음을 보여준다. 또한 Warren의 계산법에 의한 등가 Poisson비는 η 이 0.1보다 큰 범위에서 비현실적으로 급격히 감소함을 보이고 있는데 비해 균질화기법을 이용할 경우 다공평판의 등가 Poisson비를 안정적으로 산출할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5에 사각형배열을 갖는 다공평판과 그 기본단위가 각각 주어져 있다. 앞의 경우와 마찬가지로 사각형배열을 갖는 다공평판에 균질화기법을 적용하여 η 를 0에서 1까지 변화시켜 가며 균질화된 탄성계수텐서를 계산하였고, 이로부터 등가탄성계수와 등가 Poisson 비를 산출하였다. Fig. 6을 보면 사각형배열을 갖는 다공평판의 경우 등가탄성계수는 앞에서와 마찬가지로 η 가 증가함에 따라 증가하고 있지만 η 값에 따른 등가탄성계수의 크기가 삼각형배열의 다공평판에서보다 약간 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 경우 등가 Poisson 비가 삼각형배열의 다공평판과는 달리 $\eta \rightarrow 0$ 의 극한에서 $\nu^* \rightarrow 0$ 이 됨을 보이고 있다. Warren의 해석적인 방법으로는 삼각형배열의 다공평판의 경우에만 등가 물성치를 산출할 수 있었는데 비하여 균질화기법은 사각형배열은 물론 규칙적인 배열을 갖는 어떠한 형상의 다공평판의 계산에도 사용될 수 있는 장점이 있다.

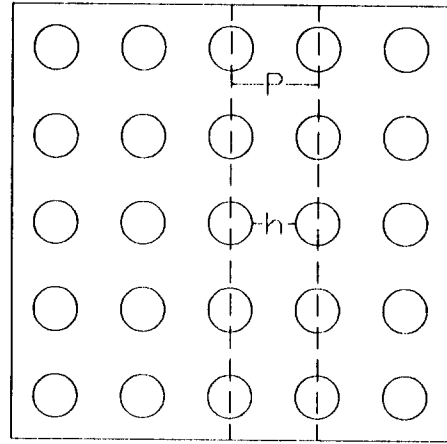


Fig.4 Perforated plate, in-line(rectangular) array

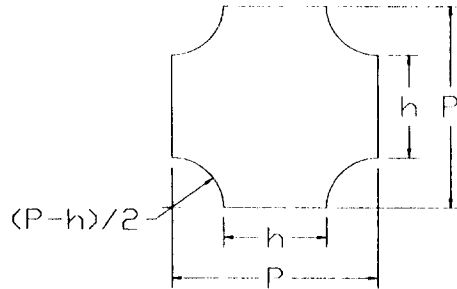


Fig.5 Unit cell of in-line array

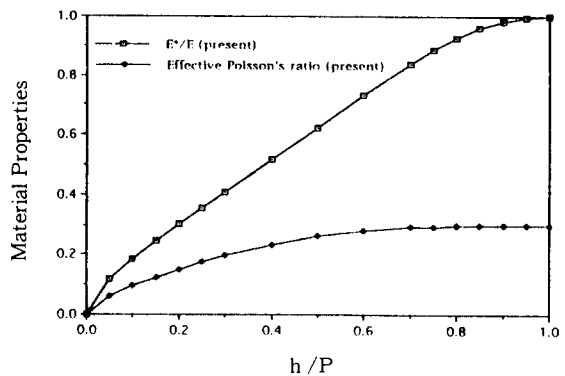


Fig.6 Equivalent material properties of perforated plates with in-line array pattern

4. 균질화기법과 다공평판의 응력해석

균질화기법을 이용한 다공평판의 응력해석의 응용으로서 다음과 같은 2차원 응력문제에 균질화

기법을 적용하였다. Fig. 7에서 보듯이 직경 5"의 구멍 100개가 고르게 분포해 있는 100"×100"×1" 크기의 강철판($E=2.83 \times 10^7$ psi, $\nu=0.3$)의 마주 보는 두변의 중심에 1000 lb의 인장력이 작용하는 경우를 생각해 보자. 이는 간극효율 $\eta=0.5$ 인 사각형배열을 갖는 다공평판에 대한 문제로서, 단순한 평면응력문제이지만 강철판에 분포한 구멍들의 존재 때문에 엄밀해를 구하기가 어렵고, 표준적인 유한요소법으로 수치해를 구하려 할 경우 대칭판계를 이용하여 대상체의 4면변 중 하나만을 모델링하여 문제를 풀려해도 많은 자유도를 요구하게 된다. (Fig. 8 참조)

균질화기법을 사용하여 이같은 문제의 해를 구하고자 할 경우 먼저 기본단위가 기하학적으로 정의되어야 한다. Fig. 7의 문제에서 상하좌우로 같은 패턴이 반복되는 가장 간단한 기본단위는 Fig. 9의 microscale 모델에서 보듯이 10"×10" 크기의 얇은 철판조각 중앙에 직경 5"의 구멍이 있는 것으로 볼 수 있다. 이 기본단위에 대하여 식 (13)을 적용시켜 χ^m_p 값을 구하고, 다시 식 (16)을 이용하여 산출한 등가탄성계수와 등가 Poisson 비는 각각 $E^*=1.769 \times 10^7$ psi, $\nu^*=0.26$ 으로 나타났다. 이 값을 이용할 경우 Fig. 9의 macroscale 모델이 Fig. 8의 복잡한 mesh를 대신할 수 있고, 표준적인 유한요소법을 사용하여 macroscale 변위 $u^o(x)$ 를 계산할 수 있다. 계산된 변위 $u^o(x)$ 는 χ^m_p 와 함께 식 (17)을 적용하여 응력 σ^o 을 계산할 수 있다. Fig. 10에는 표준적인 유한요소법을 사용하여 산출한 결과중 Fig. 8에서 집중하중이 가해진 왼쪽 윗부분에 대한 Mises 등가응력과, 같은 부분에 대하여 균질화기법을 이용하여 계산된 Mises 등가응력이 주어져 있다. Fig. 10에서 보여준 응력의 비교는 표준적인 유한요소법(1632 자유도)을 사용한 경우와 그에 비하여 월등히 작은 자유도를 가지고 계산한 균질화기법(272 자유도)의 결과가 비슷한 크기로 나타나고 있음을 보여준다. 균질화기법을 사용할 경우 모델링에 필요한 자유도와 계산시간을 크게 절약해줄 뿐아니라, 등가평판이론이 다공평판에 대한 평균적인 응력계수를 계산하는데 비하여 균질화기법을 이용한 응력해

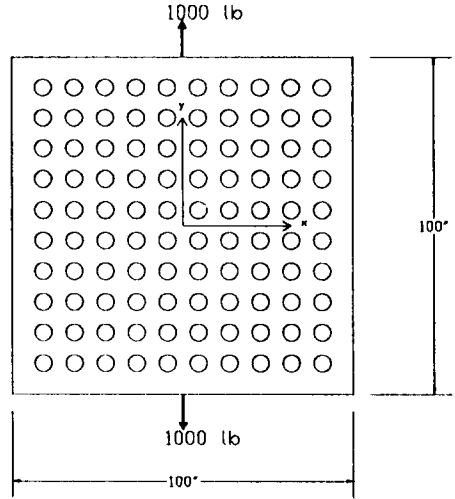


Fig.7 Perforated plate subject to tension

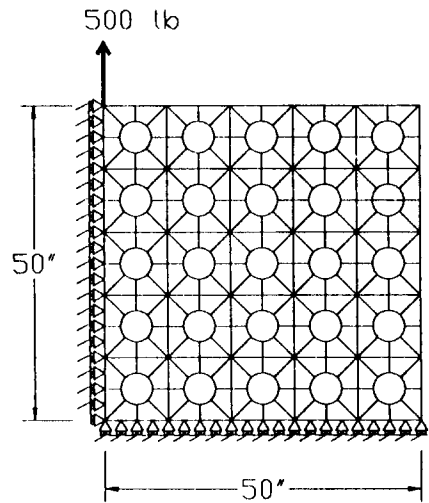
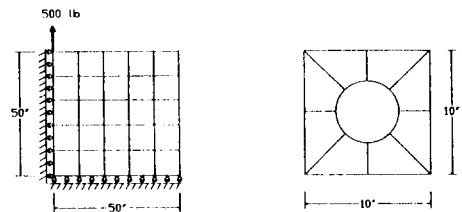
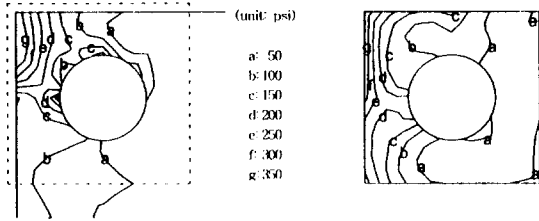


Fig.8 Conventional quarter model(200 QUAD8 elements, 816 nodes)



(25 QUAD8 elements, 96 nodes) (8 QUAD8 elements, 40 nodes)

Fig.9 Macroscale- and microscale- model of homogenization technique



(a) Conventional FEM (b) Homogenization Technique

Fig.10 Equivalent stress(von Mises) of perforated plate
($0 \leq x \leq 10, 40 \leq y \leq 50$)

석은 다공평판의 모든 부위에 대한 구체적인 응력을 산출하는 것을 가능케 해주기 때문에 균질화기법은 다공평판의 응력계산에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

5. 결 론

다공평판에서의 응력해석에 균질화기법이 사용되었다. 표준적인 유한요소법에 미소좌표계확장을 도입한 균질화기법은 다공평판을 microscale 모델과 macroscale 모델로 나누어 해석한다. 다공평판에서 같은 패턴이 반복되는 기하학적단위를 microscale에서의 단위구조로 취하여 균질화된 탄성계수텐서를 계산하였고, 이로부터 다공평판의 등가탄성계수와 등가 Poisson 비를 구할 수 있었다. 계산된 등가물성치를 이용하여 macroscale 모델에서 macroscale 변위를 산출하고, 다시 microscale에서 macroscale 변위와 microscale 매개변수의 구배로부터 다공평판의 응력을 계산하였다. 다공평판과 같은 복합구조체에서의 응력해석에 균질화기법을 적용하는 과정에서 도입되는 microscale 모델링은 기본단위의 반복도가 심한 구조체의 응력해석에서 유용한 전처리 및 후처리 개념을 제공하며, 계산에 필요한 자유도를 현저히 줄이면서 적절한 근사해의 산출을 가능케 하여준다.

약어해설

- b_i 체적력
- E 탄성계수
- E_{ijmn} 탄성계수텐서
- E^H_{ijmn} 균질화된 탄성계수텐서
- E^* 등가탄성계수
- h 간극폭
- P 구멍간의 간격
- t_i 표면력
- u_i 변위
- v_i 가상변위
- x_j macroscale 좌표계
- y_j microscale 좌표계
- ϵ_{mn} 변형도텐서
- σ_{ij} 응력텐서
- λ, μ Lamé 상수
- ν Poisson 비
- ν^* 등가 Poisson 비
- χ^{pq}_k microscale 매개변수
- η 간극효율
- δ_{ij} Kronecker delta

참 고 문 헌

- [1] Hashin, Z., "Analysis of Composite Materials-A Survey," *J. Appl. Mech.*, Vol.50, 1993, pp. 481-505.
- [2] Sanchez-Palencia, E., *Nonhomogeneous Media and Vibration Theory*, Lecture Notes in Physics, Nb. 127, Springer Verlag, 1980.
- [3] Guedes, J. M., *Nonlinear Computational Models for Composite Materials Using Homogenization*, Ph. D. Thesis, University of Michigan, 1990.
- [4] 이진희, 이봉래, "균질화기법을 이용한 복합재료의 등가열전도계수의 계산," 대한기계학회, 18권 5호, 1994, pp.1245-1252.
- [5] O'Donnell, W. J., "Design of Perforated Plates," *J. Eng. Industry*, Vol.84, No.3, 1962, pp. 307-320.

- [6] Porowski, J. S., "Elastic Design Methods for Perforated Plates," *J. Eng. Power*, Vol.100, No.2, 1978, pp.356-362.
- [7] 박태철, 김범식, "다공평판의 단순화된 응력해석 방법", *전산구조공학*, 7권 2호, 1994, pp.121-129.
- [8] W. E. Warren and A. M. Kraynik, "Foam Mechanics: the Linear Elastic Response of Two-Dimensional Spatially Periodic Cellular Materials", *Mech. Mat.*, Vol.6, 1987, pp.27-37.
(접수일자 : 1994. 9. 8)