



다면체 유한요소를 이용한 복합재 구조의 주기 격자망 생성

손 동 우¹ · 박 종 연² · 조 영 삼³ · 임 재 혁⁴ · 이 행 수^{5*}

¹한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부, ²포스코 철강솔루션센터 제품솔루션 연구그룹, ³원광대학교 기계자동차공학부,
⁴한국항공우주연구원 위성구조팀, ⁵울산과학기술대학교 기계공학부

Periodic Mesh Generation for Composite Structures using Polyhedral Finite Elements

Dongwoo Sohn¹, Jong Youn Park², Young-Sam Cho³, Jae Hyuk Lim⁴ and Haengsoo Lee^{5*}

¹Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, College of Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 606-791, Korea

²Product Solution Research Group, Steel Solution Center, POSCO, Incheon, 406-840, Korea

³Division of Mechanical and Automotive Engineering, College of Engineering, Wonkwang University, Iksan, 570-749, Korea

⁴Satellite Structure Department, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, 305-806, Korea

⁵Faculty of Mechanical Engineering, Ulsan College, Ulsan, 682-715, Korea

Abstract

Finite element modeling of composite structures may be cumbersome due to complex distributions of reinforcements. In this paper, an efficient scheme is proposed that can generate periodic meshes for the composite structures. Regular meshes with hexahedral finite elements are first prepared, and the elements are then trimmed to fit external surfaces of reinforcements in the composite structures. The trimmed hexahedral finite elements located at interfaces between the matrix and the reinforcements correspond to polyhedral finite elements, which allow an arbitrary number of nodes and faces in the elements. Because the trimming process is consistently conducted by means of consistent algorithms, the elements of the reinforcements are automatically compatible with those of the matrices. With the additional consideration of periodicity of reinforcements in a representative volume element(RVE), the proposed scheme provides periodic meshes in an efficient manner, which are compatible for each pair of periodic boundaries of the RVE. Therefore, periodic boundary conditions for the RVE are enforced straightforwardly. Numerical examples demonstrate the effectiveness of the proposed scheme for finite element modeling of complex composite structures.

Keywords : polyhedral finite elements, composite structures, periodic mesh generation, periodic boundary conditions

1. 서 론

높은 비강성 및 비강도를 보이는 복합재의 특성으로 인하여 기계, 항공, 토목 등 다양한 분야에서 복합재가 널리 활용되고 있으며, 이와 함께 복합재 구조에 대한 전산해석적인 연구도 활발히 수행되고 있다. 하지만 기지재(matrix) 내의 강화재(reinforcement)의 복잡한 분포로 인하여 복합재에 대한 유한요소 모델링은 상당히 까다로운 문제가 될 수 있다. 다양한 모델링 도구의 발달에도 불구하고 강화재와 기지

재 사이에서 절점과 요소가 일치하는 적합성(compatibility) 조건을 만족시키는 동시에, 고품질의 격자망을 얻기 위해서는 여전히 상당한 노력과 시간이 요구된다.

한편, 복합재의 기계적 특성 및 열적 특성을 전산역학 기법으로 예측하기 위하여, 강화재의 주기적인 배열에 근거한 대표체적영역(representative volume element: RVE)과 이에 대한 주기 격자망 모델이 널리 활용되고 있다(Chung *et al.*, 2001; Wang *et al.* 2007; Yun, 2000). 이러한 주기 격자망에 주기 경계조건을 부여하면 균일한 변위 또는

* Corresponding author:

Tel: +82-52-279-3109; E-mail: haengsoolee@uc.ac.kr

Received July 10 2014; Revised July 25 2014

Accepted July 26 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

균일한 트랙션을 경계조건으로 부여하는 경우보다 효율적이고 정확하게 복합재의 균질화(homogenization) 물성치를 얻을 수 있다는 것이 알려져 있다(Reis and Andrade Pires, 2014). 그러나 대표체적영역의 형상이 복잡한 경우에는 주기 격자망 생성을 위해서 복잡한 알고리즘을 추가적으로 이용하거나 매우 번거로운 과정을 거쳐야 한다(Fritzen and Böhlke, 2011; Fritzen *et al.*, 2009). 여기에서 대표체적영역의 주기 경계 쌍(pair)에 대하여 절점과 요소의 형태가 일치하지 않으면, 주기 경계조건을 부여하기 위해서 라그랑지 승수, 벌칙 함수 등을 추가적으로 도입해야 하므로 계산의 효율성과 정확성이 저하될 우려가 있다(Oliveira *et al.* 2009; Pinho-da-Cruz *et al.* 2009).

본 연구에서는 복잡한 복합재 구조에 대한 주기 격자망을 단순한 알고리즘을 이용하여 효율적으로 생성시킬 수 있는 기법을 제안하고자 한다. 먼저 규칙적인 육면체 유한요소로 구성된 격자망을 준비하고, 이를 강화재의 표면 정보에 맞추어 깎아내는 방법으로 복합재 구조에 대한 격자망을 생성시킬 수 있다. 여기에서 깎여진 육면체 유한요소는 임의의 절점 및 면의 형태를 허용하는 다면체 유한요소(polyhedral finite element)에 해당한다. 이러한 방법은 조각기법(carving technique)이라는 이름으로 Sohn 등(2012; 2013)에 의해 제안되었으며, 삼차원 영역의 임의의 격자망 생성에 활용되었다. 본 연구에서는 이러한 조각기법을 복합재 모델링에 응용함으로써 효율적인 방법으로 강화재와 기지재 사이에서 적합성을 보장하는 격자망을 생성시키고, 더 나아가서 주기 경계 쌍에서도 절점과 요소의 형태가 일치하는 주기 격자망을 생성시킨다. 또한 구형 입자강화 복합재(spherical particle reinforced composite)와 단방향 섬유강화 복합재(unidirectional fiber reinforced composite) 대상의 수치예제에서는, 본 연구에서 제안한 기법을 이용함으로써 효율적인 격자망 생성과 정확한 주기 경계조건 부여가 가능함을 확인한다.

2. 다면체 유한요소를 이용한 복합재 구조 모델링

다수의 구형 강화재가 국부적으로는 불규칙하지만 전체적으로는 주기적으로 배열되어 있는 경우를 생각해 볼 수 있다. 예를 들어 Fig. 1과 같이 구형 강화재가 배열되어 있을 때, 강화재의 주기성을 바탕으로 하나의 주기에 대한 대표체적영역을 선정할 수 있다. 이러한 삼차원 영역에 대한 모델링에는 형상에 대한 적응성이 뛰어난 사면체 유한요소가 일반적으로 사용되고 있지만, 사면체 유한요소는 육면체 유한요소에 비하여 성능이 현저히 떨어지는 문제를 지니고 있다. 반대로 육면체 유한요소를 사용하면 형상에 대한 적응성이

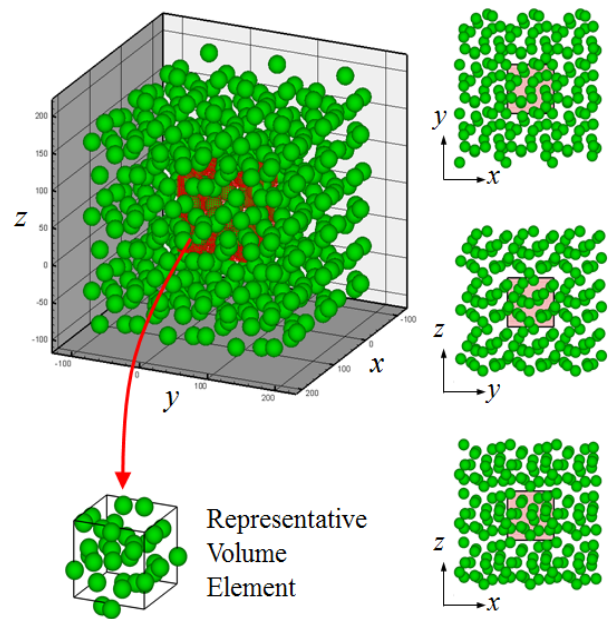


Fig. 1 A representative volume element based on geometrical periodicity of reinforcements

매우 좋지 못하기 때문에 강화재와 기지재 사이에서 격자망의 생성 자체가 불가능할 수도 있다. 이와 같이 품질과 성능이 우수한 격자망의 생성은 여전히 어려운 문제로 남아있다. 게다가 대표체적영역의 주기 경계 쌍에서 절점과 요소의 형태가 일치하는 주기 격자망을 생성시키기 위해서는 더욱 까다로운 과정이 수반된다. 그러므로 격자망의 생성 과정을 효율적으로 단순화시키면서도 우수한 품질의 격자망 생성이 가능한 조각기법의 활용을 고려해 볼 가치가 있다.

2.1 강화재와 기지재 계면에서의 적합성

조각기법에 의한 복합재의 격자망 생성 절차는 Fig. 2와 같다. 먼저 Fig. 2(a)와 같이 육면체 유한요소로 구성된 규칙적인 배경 격자망을 준비하고, Fig. 2(b)와 같이 강화재의 표면 정보를 대입한다. 이어서, 강화재의 표면 정보에 맞추어 육면체 유한요소를 깎아내면 Fig. 2(c)의 격자망을 얻을 수 있다. 깎여진 요소는 절점과 면의 수뿐만 아니라 면의 형태에 대한 제약이 없는 다면체 유한요소로 표현될 수 있다. 이때, 규칙적인 육면체 유한요소를 일관된 마칭큐브 알고리즘(Lorensen *et al.*, 1987)을 이용하여 깎아내기 때문에 자동적으로 강화재와 기지재의 요소 면은 완전하게 일치한다. 한편, 강화재와 기지재의 계면 부분을 제외한 나머지 영역에서는 배경 격자망의 육면체 유한요소가 그대로 남아있게 된다. 따라서 대부분의 영역에서는 육면체 유한요소의 우수한 성능을 이용할 수 있게 된다(Sohn *et al.*, 2012; 2013).

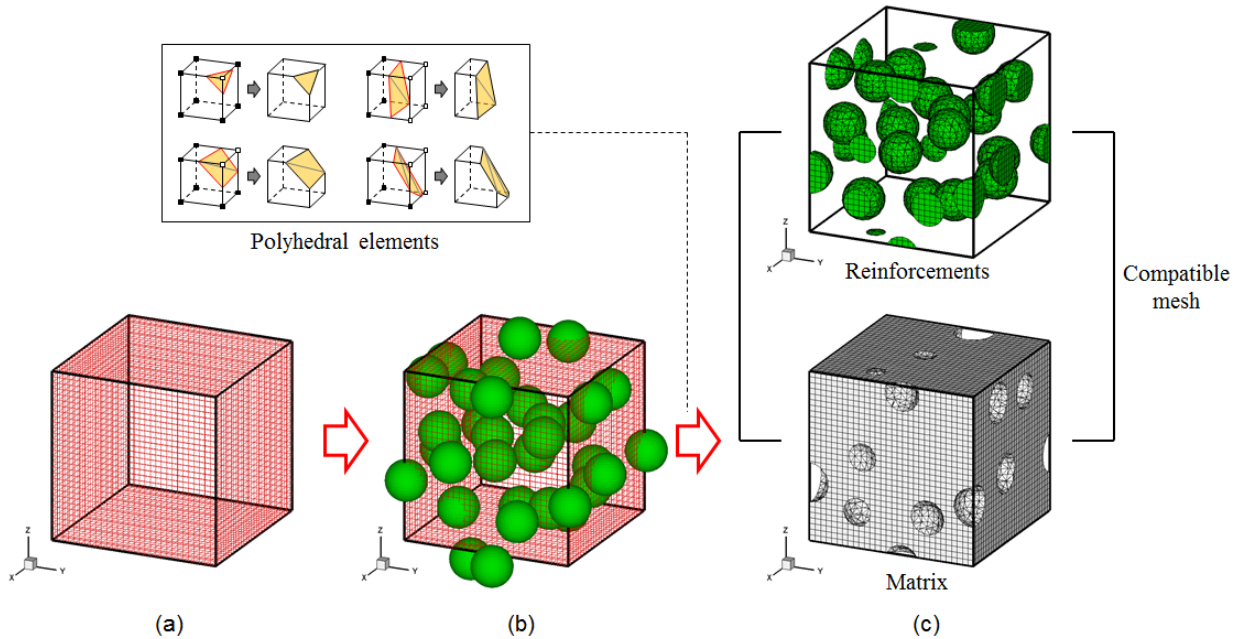


Fig. 2 Mesh generation using polyhedral elements: (a) background hexahedral elements, (b) insertion of surface information, (c) final mesh configuration obtained by trimming the hexahedral elements

2.2 주기 경계 쌍에서의 적합성

육면체 형태의 대표체적영역을 고려하면 Fig. 3과 같이 3개의 주기 경계 쌍이 나타난다. 양(+)의 경계면과 음(-)의 경계면은 각각 주기적으로 배열된 강화재의 일부를 포함할 수 있다. 이러한 형상에 대하여 널리 사용되고 있는 전형적인 격자망 생성 도구를 이용하면 유한요소 격자망을 생성시킬 수는 있으나, 주기 경계면에 일부만 포함되어 있는 강화재의 형상으로 인하여 적합한 주기 격자망을 얻기는 어렵다. 이 뿐만 아니라, 여기에 주기 경계조건을 부여하기 위해서는 비교적 번거로운 절차가 수반되며 해석의 정확성도 저하될 수 있다. 그러나 조각기법을 도입하면, 마칭큐브 알고리즘을 이용한 일관된 규칙으로 육면체 배경 격자망을 깎아내기 때문에 각각의 주기 경계 쌍에서 자동적으로 절점과 요소의 적

합성이 유지된다. 그러므로 주기 경계 쌍에 놓인 절점에 직접적인 방법으로 주기 경계조건을 부여할 수 있고, 해석의 효율성을 향상시킬 수 있다.

3. 수치예제

본 연구에서 제안한 방법의 효율성을 확인하기 위하여, 구형 입자강화 복합재와 단방향 섬유강화 복합재를 대상으로 주기 격자망을 생성시키고 주기 경계조건을 부여하여 유한요소 해석을 수행하였다. 여기에서 규칙적인 육면체 유한요소를 깎아서 생성된 다면체 유한요소를 해석에 직접적으로 활용하기 위해서는 다면체 유한요소에 대한 수학적 정식화 과정이 필요하다. 최근 활발히 연구되고 있는 다양한 형식의 다면체 유한요소(Bishop, 2014; Kim, 2014; Martin *et al.*, 2008, Rashid and Selimotic, 2006)를 해석에 적용할 수 있으나, 본 연구에서는 정식화 과정이 간단하면서도 정확하고 효율적인 수치적분이 가능한 다면체 유한요소(Sohn *et al.*, 2013)를 사용하였다. 이 요소는 완화 유한요소법(cell-based smoothed finite element method)에서의 변형을 완화(strain smoothing) 기법에 발산 정리(divergence theorem)를 결합함에 따라서 형상함수뿐만 아니라 형상함수의 미분함수를 외연적으로 정의할 필요가 없는 장점을 지닌다.

한편, 앞서 2장에서 언급한 바와 같이 조각 기법을 이용하면 적합한 주기 경계 쌍이 나타나는 주기 격자망이 자동적으로 생성되므로, 주기 경계조건 부여를 위한 추가적인 처리가

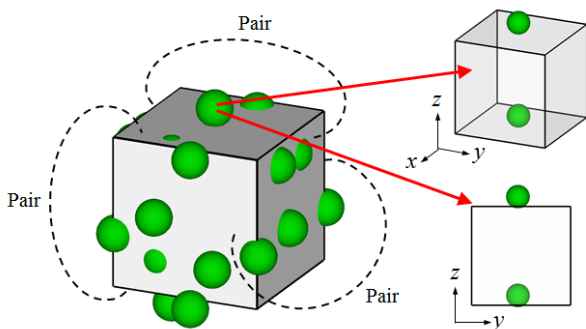


Fig. 3 Three pairs of periodic boundaries of the representative volume element

필요하지 않다. 그러므로 다음의 식 (1)에 해당하는 주기 구조에 대한 변위장 u_i 을 이용하여 직접적으로 경계조건을 부여한다.

$$u_i(x_1, x_2, x_3) = \langle \epsilon_{ik} \rangle x_k + u_i^*(x_1, x_2, x_3), \quad i, k = 1, 2, 3 \quad (1)$$

여기에서 x_k 는 삼차원 공간 상의 좌표(x, y, z)를 나타내며, $\langle \epsilon_{ik} \rangle$ 는 대표체적영역에 대한 평균 변형률을 의미한다. 또한, u_i^* 는 대표체적영역에 대하여 주기 함수로 주어지는 변위를 나타낸다. 즉, $\langle \epsilon_{ik} \rangle x_k$ 는 대표체적영역에 대해서 선형 함수로 주어지는 거시적인 변위, u_i^* 는 미시적인 변위 변동(fluctuation)으로 간주할 수 있다. 주기 경계 쌍에서 나타나는 변위는 다음과 같다(Wang *et al.*, 2007).

$$u_i^{j+} = \langle \epsilon_{ik} \rangle x_k^{j+} + u_i^*, \quad j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$u_i^{j-} = \langle \epsilon_{ik} \rangle x_k^{j-} + u_i^*, \quad j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

여기에서 $j+$ 와 $j-$ 는 주기 경계 쌍의 양의 경계면과 음의 경계면을 의미한다. 또한 식 (2)와 (3)에서 주기 경계 쌍의 변위 변동 u_i^* 가 같기 때문에 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$u_i^{j+} - u_i^{j-} = \langle \epsilon_{ik} \rangle (x_k^{j+} - x_k^{j-}) = \langle \epsilon_{ik} \rangle \Delta x_k^j \quad (4)$$

여기에서 Δx_k^j 는 결국 주기 격자망에 대한 j 방향으로의 길이($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)를 의미하게 된다. 본 수치예제에서는 다음의 평균 변형률을 사용하였다.

$$\langle \epsilon \rangle = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.003 & 0.002 \\ 0.003 & 0.000 & 0.001 \\ 0.002 & 0.001 & 0.000 \end{bmatrix} \quad (5)$$

그러므로 각 주기 경계 쌍에 놓인 절점에 대하여 다음의 식을 주기 경계조건으로 부여할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_1^{1+} - u_1^{1-} &= 0, \quad u_2^{1+} - u_2^{1-} = 0.003\Delta X, \\ u_3^{1+} - u_3^{1-} &= 0.002\Delta X \\ u_1^{2+} - u_1^{2-} &= 0.003\Delta Y, \quad u_2^{2+} - u_2^{2-} = 0, \\ u_3^{2+} - u_3^{2-} &= 0.001\Delta Y \\ u_1^{3+} - u_1^{3-} &= 0.002\Delta Z, \quad u_2^{3+} - u_2^{3-} = 0.001\Delta Z, \\ u_3^{3+} - u_3^{3-} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

3.1 구형 입자강화 복합재

먼저, Fig. 2에 나타내었던 구형 입자강화 복합재에 대한 대표체적영역을 다루어 보았다. 대표체적영역의 크기는 100mm×100mm×100mm이며, 반지름 12mm의 다수의 구형 입자가 강화재로 포함되어 있다. 구형 입자강화재의 체적 분율은 약 14.0%이다. 또한 강화재는 붕소(B), 기지재는 알루미늄(Al)으로 구성되어 있으며, 모두 등방성 재료로 가정하였다. 재료의 탄성계수와 프와송비는 각각 붕소에 대하여 379.3GPa, 0.1, 알루미늄에 대하여 68.3GPa, 0.3을 사용하였다.

Fig. 4와 같이 대표체적영역에 대하여 조각기법을 이용하여 얻은 격자망은 3개의 주기 경계 쌍에서 모두 절점과 요소의 형태가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 식 (6)에

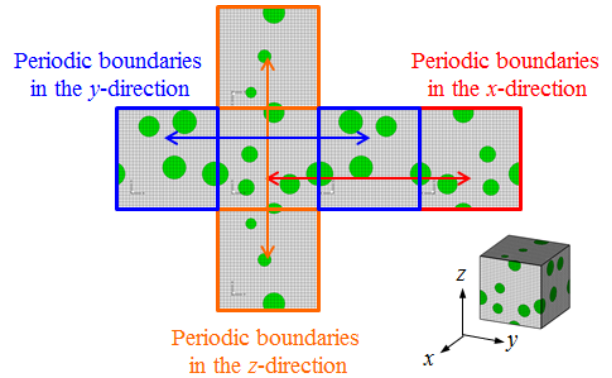


Fig. 4 Compatible pairs of periodic boundaries for a spherical particle reinforced composite

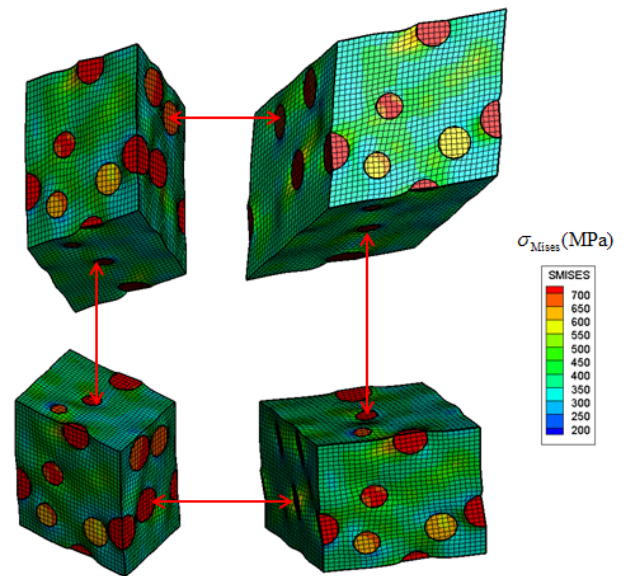


Fig. 5 Stress distribution of the spherical particle reinforced composite under periodic boundary conditions

해당하는 주기 경계조건을 부여하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석결과는 변위를 100배 과장하여 다양한 각도로 Fig. 5에 나타내었다. 주기 경계조건이 완전하게 반영되어 주기 경계 쌍에서 미시적인 변위 변동을 정확하게 주기적으로 표현하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 단방향 섬유강화 복합재

다음으로, 원 기둥 모양의 탄소섬유가 에폭시 기지재에 포함되어 있는 경우를 다루어 보았다. 조각기법을 이용한 단방향 섬유강화 복합재의 주기 격자망 생성 과정은 Fig. 6과 같다. 대표체적영역의 크기는 100mm×100mm×100mm이다. 강화재로 사용된 탄소섬유의 반지름은 12mm이며, 강화재의 체적분율은 약 35.8%이다. 일반적으로 탄소섬유는 이방성 거동을 나타내지만, 본 수치예제는 주기 격자망 생성 기법의 검증 목적을 하고 있으므로 등방성으로 가정하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 탄소섬유 강화재의 탄성계수와 프와송비는 각각 270GPa, 0.3이다. 또한 에폭시 기지재도 등방성 재료로 가정하여 탄성계수와 프와송비를 각각 3.45 GPa, 0.39로 사용하였다.

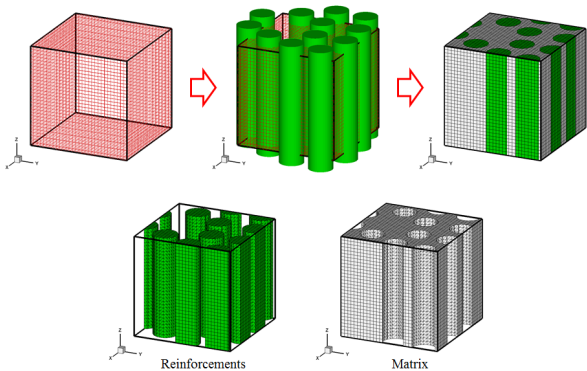


Fig. 6 Periodic mesh generation for a unidirectional fiber reinforced composite

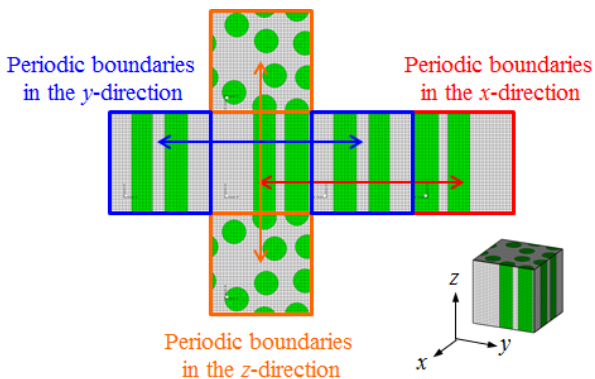


Fig. 7 Compatible pairs of periodic boundaries for the unidirectional fiber reinforced composite

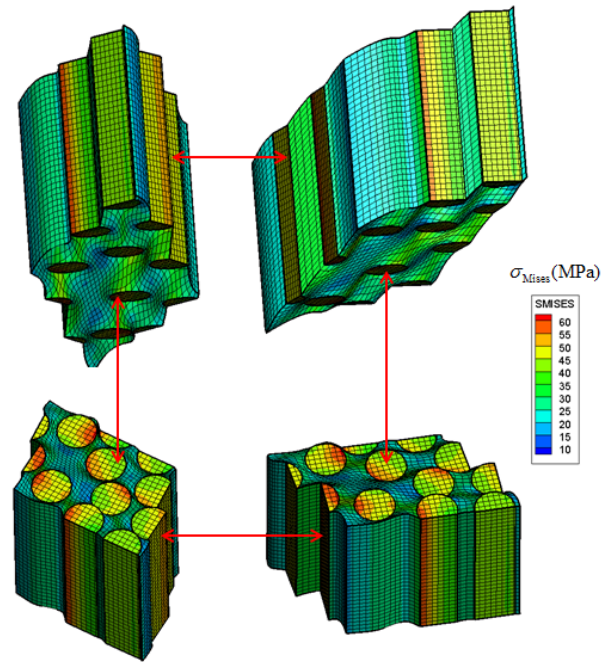


Fig. 8 Stress distribution of the unidirectional fiber reinforced composite under periodic boundary conditions

구형 입자강화 복합재의 경우와 마찬가지로, 조각기법으로 깎아낸 육면체 유한요소는 강화재와 기지재 사이에서 다면체 유한요소로 대체된다. 이때 강화재와 기지재 사이에서는 절점과 요소가 자동적으로 일치하게 된다. 이 뿐만 아니라, Fig. 7과 같이 주기 경계 쌍에서 절점의 위치와 요소 면의 형상이 자동적으로 일치하기 때문에 효율적인 주기 경계조건 부여가 가능하다. 이러한 주기 격자망을 이용한 해석결과는 Fig. 8과 같다. 구형 입자강화 복합재의 결과와 마찬가지로 변위를 100배 확대하여 나타내었으며, 여기에서도 주기 경계조건이 정확하게 부여된 것을 확인할 수 있다. 이로부터, 적합한 주기 경계 쌍이 나타나는 복합재 구조의 주기 격자망이 정확하게 얻어졌다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 복잡한 복합재 구조에 대하여 주기 격자망을 생성시키기 위한 효율적인 기법을 제안하였다. 기본적인 개념은 육면체 유한요소를 강화재의 표면 정보에 맞추어 깎아내어 다면체 유한요소로 바꾸는 조각기법을 활용하는 것이다. 이를 통하여 강화재와 기지재 사이뿐만 아니라, 대표체적 영역의 주기 경계 쌍에서도 적합한 형태의 격자망을 효율적으로 생성시킬 수 있었다. 구형 입자강화 복합재와 단방향 섬유강화 복합재에 대한 수치예제에서 보인 바와 같이, 주기

격자망을 이용하면 주기 경계 쌍의 절점에 주기 경계조건을 직접 적용할 수 있기 때문에 해석의 효율성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서 제안한 기법을 주기 경계조건이 필요한 균질화 기법과 결합하면 복합재에 대한 등가 물성치를 효율적으로 예측할 수 있다. 특히, 복잡한 형태의 복합재 구조를 자동적으로 모델링할 수 있기 때문에 다양한 조합의 복합재 구조를 손쉽게 고려할 수 있다. 그러므로 다양한 복합재 구조에 대하여 등가 물성치를 예측하고, 그 결과를 종합하여 통계적으로 접근할 수 있을 것이다. 더 나아가서 본 연구에서 제안한 기법을 복합재 구조의 등가 물성치를 이용한 멀티스케일 해석 기법으로까지 확장할 수 있을 것이다. 또한, 본 연구에서는 복합재 내의 강화재 배열을 임의적으로 가정하였지만 영상처리 기법을 결합하면 더욱 실제적인 모델링과 해석이 가능할 것으로 예상된다.

Reference

- Bishop, J.E.** (2014) A Displacement-based Finite Element Formulation for General Polyhedral using Harmonic Shape Functions, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 97, pp.1~31.
- Chung, P.W., Tamma, K.K., Namburu, R.R.** (2001) Asymptotic Expansion Homogenization for Heterogeneous Media: Computational Issues and Applications, *Composites: Part A*, 32, pp.1291~1301.
- Fritzen, F., Böhlke, T.** (2011) Periodic Three-dimensional Mesh Generation for Particle Reinforced Composites with Application to Metal Matrix Composites, *International Journal of Solids and Structures*, 48, pp.706~718.
- Fritzen, F., Böhlke, T., Schnack, E.** (2009) Periodic Three-dimensional Mesh Generation for Crystalline Aggregates based on Voronoi Tessellations, *Computational Mechanics*, 43, pp.701~713.
- Kim, H.-G.** (2014) A Study on the Development of Shape Functions of Polyhedral Finite Elements, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 27, pp.183~189.
- Lorensen, W.E., Cline, H.E.** (1987) Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 21, pp.163~169.
- Martin, S., Kaufmann, P., Botsch, M., Wicke, M., Gross, M.** (2008) Polyhedral Finite Elements using Harmonic Basis Functions, *Computer Graphics Forum*, 27, pp.1521~1529.
- Oliveira, J.A., Pinho-da-Cruz, J., Teixeira-Dias, F.** (2009) Asymptotic Homogenisation in Linear Elasticity. Part II: Finite Element Procedures and Multiscale Applications, *Computational Materials Science*, 45, pp.1081~1096.
- Pinho-da-Cruz, J., Oliveira, J.A., Teixeira-Dias, F.** (2009) Asymptotic Homogenisation in Linear Elasticity. Part I: Mathematical Formulation and Finite Element Modelling, *Computational Materials Science*, 45, pp.1073~1080.
- Rashid, M.M., Selimotic, M.** (2006) A Three-Dimensional Finite Element Method with Arbitrary Polyhedral Elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 67, pp.226~252.
- Reis, F.J.P., Andrade Pires, F.M.** (2014) A Mortar based Approach for the Enforcement of Periodic Boundary Conditions on Arbitrarily Generated Meshes, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 274, pp.168~191.
- Sohn, D., Cho, Y.-S., Im, S.** (2012) A Novel Scheme to Generate Meshes with Hexahedral Elements and Poly-pyramid Elements: The Carving Technique, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 201~204, pp.208~227.
- Sohn, D., Han, J., Cho, Y.-S., Im, S.** (2013) A Finite Element Scheme with the aid of a New Carving Technique Combined with Smoothed Integration, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 254, pp.42~60.
- Wang, X.F., Wang, X.W., Zhou, G.M., Zhou, C.W.** (2007) Multi-scale Analyses of 3D Woven Composite based on Periodicity Boundary Conditions, *Journal of Composite Materials*, 41, pp.1773~1788.
- Yun, S.-H.** (2000) The Finite Element Analysis for Calculations of Equivalent Elastic Constants using the Homogenization Method, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 13, pp.51~61.

요 지

강화제의 복잡한 배열로 인하여 복합재 구조에 대한 유한요소 모델링은 상당히 까다로운 문제가 될 수 있다. 본 논문에서는 복합재 구조에 대하여 효율적으로 주기 격자망을 생성시킬 수 있는 기법을 제안한다. 먼저 육면체 유한요소로 구성된 규칙적인 격자망을 준비하고, 이를 복합재 내의 강화제에 대한 표면 정보에 맞추어 깎아낸다. 강화제와 기지재 사이에서 깎여진 육면체 유한요소는 임의의 절점과 면을 가질 수 있는 다면체 유한요소에 해당한다. 일관된 알고리즘을 이용하여 육면체 유한요소를 깎아내기 때문에 강화제와 기지재 사이의 요소는 자동적으로 적합한 형태로 구성된다. 또한 대표체적영역 내에서 강화제의 주기성을 추가적으로 고려하면, 대표체적영역에 대한 각각의 주기 경계 쌍에서 절점과 요소의 형태가 모두 일치하는 주기 격자망을 효율적으로 생성시킬 수 있다. 그러므로 별도의 처리 없이 대표체적영역에 주기 경계조건을 부여할 수 있다. 수치예제에서는 본 논문에서 제안한 기법의 효용성을 검증한다.

핵심용어 : 다면체 유한요소, 복합재 구조, 주기 격자망 생성, 주기 경계조건