

음의 포아송비 거동 격자체의 건설산업에의 적용 가능성 연구

김원우¹, 이장화², 문재흠^{3*}

A Preliminary Study of Applicability of Auxetic Mesh for Construction Industry

Won-Woo Kim¹, Jang-Hwa Lee², Jae-Heum Moon^{3*}

Abstract: This study has been investigated the applicability of auxetic mesh for the reinforcement of structural members. Typical materials including concrete behaves with positive poisson's ratio when external force is applied. In this study, it has been theoretically verified that metallic auxetic mesh restrains as such mechanical behaviors of concrete resulting in the stiffness increase. Also, regarding the applicability to construction field, a type of auxetic mesh has been suggested and the mechanical characteristics were numerically analyzed.

Keywords: Poisson's ratio, Auxetic, Mesh, Structural member, Reinforcement

1. 서 론

건축물 및 시설물의 건설에 있어서 콘크리트는 우수한 경계성, 시공성 및 역학적 특성으로 많이 사용되어지고 있다. 이에 반해, 압축강도에 비해 인장강도가 상대적으로 낮은 관계로 이를 극복하기 위하여 철근 등의 보강재를 사용하고 있는 실정이며, 이를 위한 구조설계기준이 제시되고 있다.

최근 들어서는 초고층빌딩, 초장대교량 등 건축물 및 시설물이 대형화됨에 따라 보다 높은 강도 및 역학적 물성을 가진 콘크리트 재료 및 구조부재가 요구되고 있다.

일반적으로 콘크리트 등 대부분의 재료는 외부 하중의 작용 시 포아송비가 양의 값을 가지게 된다. 즉, 하중 작용방향으로 재료의 길이가 줄어들어 따라, 하중 작용 연직방향으로 길이가 증가하게 된다. 이러한 양의 포아송비 거동에 의해 하중 작용 연직방향으로 작용하게 되는 길이의 증가, 즉 인장 거동 현상이 발생되며, 이러한 인장거동 현상이 어느 이상 발생하게 되면 균열의 발생에 의한 재료의 파괴 등 역학적인 거동에 중요한 역할을 하게 된다. 즉, 콘크리트를 포함한 일반적인 재료는 양의 포아송비 거동에 따른 재료특성을 가지게 되

며, 만일 이러한 거동특성을 구속할 경우 보다 높은 재료물성을 가질 수 있음을 예측할 수 있다.

한편, 소재산업 분야에서는 이러한 일반적인 재료특성과는 반대로 음의 포아송비 거동을 가지는 복합체에 대한 연구가 꾸준히 진행되어져 오고 있으며, 이러한 음의 포아송비 거동이 가져올 수 있는 다양한 적용기술 또한 개발되고 있다(Lakes, 1987; Alderson, 1999).

본 연구에서는 콘크리트와 같은 건설용 구조재료의 양의 포아송비 거동을 감소 또는 억제하기 위하여 음의 포아송비 거동(Auxetic)을 가지는 격자체를 콘크리트에 매립, 보강하는 방식의 적용 가능성을 검토하였다. 또한 일반 건설산업에서 적용이 가능한 수준의 단순화된 음의 포아송비 격자체의 형태 및 형식을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 기술적 배경

2.1.1 음의 포아송비 거동 재료의 개요 및 건설분야 적용방안

일반적인 재료는 압축하중이 작용할 경우 하중의 직각방향으로는 팽창을, 인장하중이 작용할 경우 하중의 직각방향으로는 수축을 하게 되며, 포아송비는 하중방향 변형률에 대한 하중 직각방향의 변형률비로 나타낸다.

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \quad (1)$$

¹정회원, 한국건설기술연구원, 신진연구원

²정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원, 수석연구원, 교신저자

*Corresponding author: mjh4190@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT),
Il-san-City, Gyonggi-Do, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

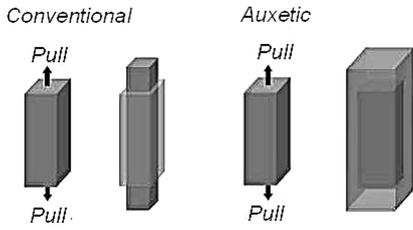


Fig. 1 Auxetic behavior(Grima et al., 2006)

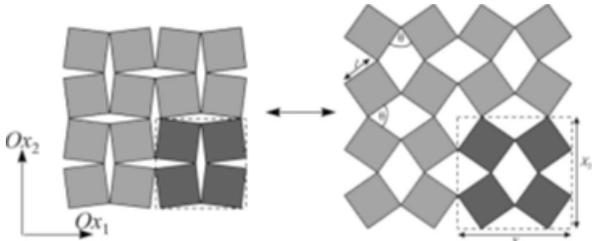


Fig. 2 Auxetic behavior(Grima and Evans, 2000)

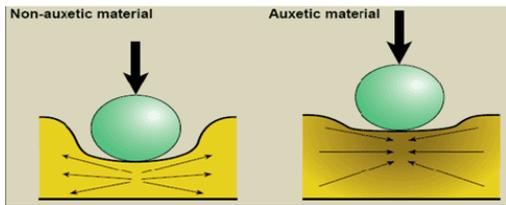


Fig. 3 Auxetic behavior under impact load(Alderson, 1999)

건설분야에 있어서 대표적으로 사용되고 있는 콘크리트는 약 0.1~2, 강재는 약 0.25~0.35의 포아송비를 가진다고 알려져 있다.

한편, 음의 포아송비를 가지는 재료는 이와는 반대로 압축 하중이 작용할 경우 하중의 직각방향으로는 수축을, 인장하중 작용 시 하중의 직각방향으로는 팽창을 하게 되며, 그 개념 및 재료의 거동 사례를 Figs. 1~3에 제시하였다.

이러한 음의 포아송비 거동으로부터 얻어질 수 있는 장점으로서는 작용 하중에 대하여 강성 및 저항성을 능동적으로 증대시켜 대응할 수 있다는 부분으로, 이러한 장점을 활용한 다양한 제품개발 연구가 수행되어지고 있다(Lakes and Witt, 2002; Friis et al., 1988; Henderson et al., 2007; Lira et al., 2009; Schwerdtfeger et al., 2011; Kaminakis et al., 2015). 이의 대표적 사례로는 합판, 종이박스, 비공기압 타이어, 항공기 동체, 완충재, 방탄 소재 등이 있으며, 의료산업 분야 및 기초소재 분야 등 거의 전 산업분야에서 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

한편, 콘크리트 재료 자체적으로는 구조물 건설에 요구되는 압축강도를 충족하고 있으나, 구조물의 대형화 및 초고층화에 따라 추가적인 성능향상이 요구되고 있다. 또한 정적 하

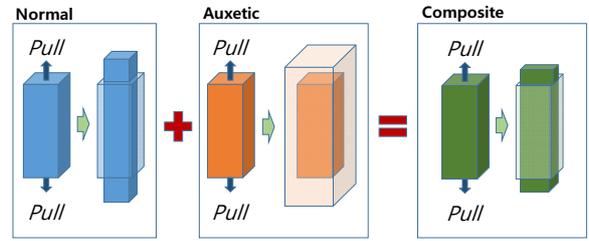


Fig. 4 Theoretical concept of composites with auxetic material

중 뿐만 아니라, 지진, 항공기 또는 차량 등에 의한 충격 및 폭발에 의한 하중에 대하여 구조물의 안전성을 추가적으로 확보하기 위한 대책 수립이 필요하다. 이를 위한 방안으로 다양한 건설재료 및 자재의 개발연구가 수행되고 있으며, 주된 관심사는 강도, 강성 및 인성 등의 증대에 있다.

본 연구에서는 콘크리트의 강성, 즉 탄성계수를 증대시키는데 있어서 음의 포아송비 거동을 가지는 격자체를 매립하는 방식을 취하고자 하였다. 즉, 콘크리트가 양의 포아송비 거동을 일으킬 때 매립된 음의 포아송비 거동 격자체가 구속력을 발휘함으로써 해당 복합체의 평균 탄성계수를 증대시키고자 하며, 그 이론적 개념은 Fig. 4와 같다.

2.2 음의 포아송비 거동 재료로 보강 된 콘크리트의 거동 예측 해석

2.2.1 복합체 사전 해석

본 연구에서는 1차적으로 음의 포아송비 거동 재료의 요구되는 성능을 검토하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 적용된 기하학적 적용사항은 100 mm 직경의 콘크리트기둥 외측에 보강재를 부착한 가정조건 하에 보강재의 두께 및 역학적 물성 변수를 적용하였다.

Table 1은 본 해석에 적용된 변수를 나타내며, 기본적으로 외측 보강재의 탄성계수를 1~6배, 포아송비를 -0.1~-0.5까지 변화시키면서 해석을 수행하였다. 해석은 선형탄성조건으로, 콘크리트와 외측 보강재는 일체화 거동을 한다고 가정하였다.

Figs. 5 및 6은 외측 보강재의 두께 5, 10 mm 적용시의 강성(하중/변위) 증가율을 나타낸 그래프로서, 보강재의 두께가

Table 1 Variables for composites simulations

Materials	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Diameter (mm)	Outer layer thickness (mm)
Concrete	30	0.16	100	-
Outer layer	30,60,90,120,150,180	-0.1, -0.2, -0.3, -0.4, -0.5	-	5, 10

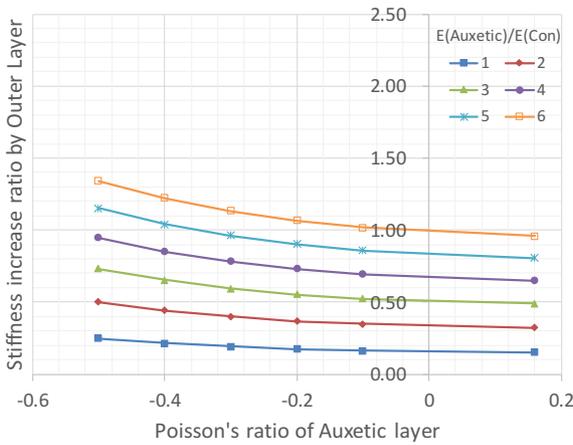


Fig. 5 Stiffness increase ratio of composites by outer layer(layer thickness: 5 mm)

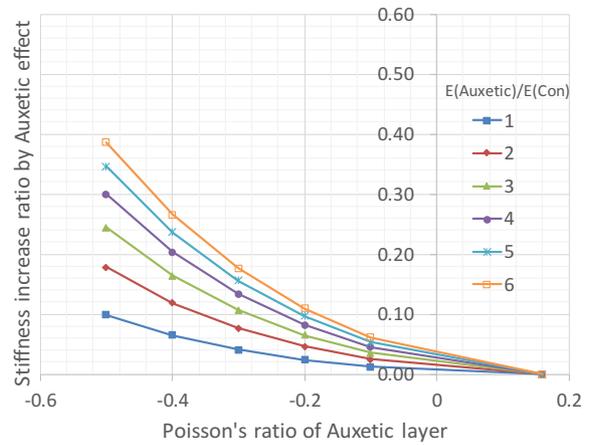


Fig. 7 Stiffness increase ratio of composites by auxetic effect(layer thickness: 5 mm)

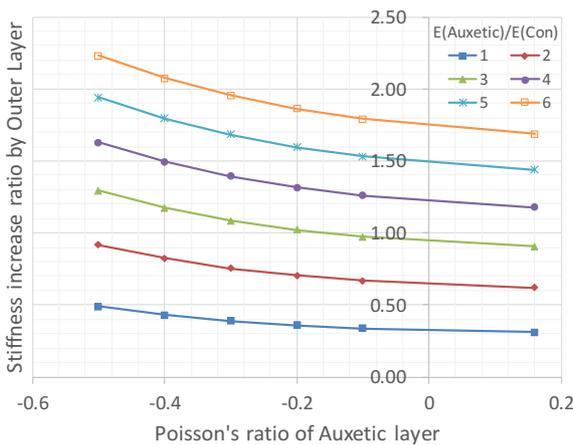


Fig. 6 Stiffness increase ratio of composites by outer layer(layer thickness: 10 mm)

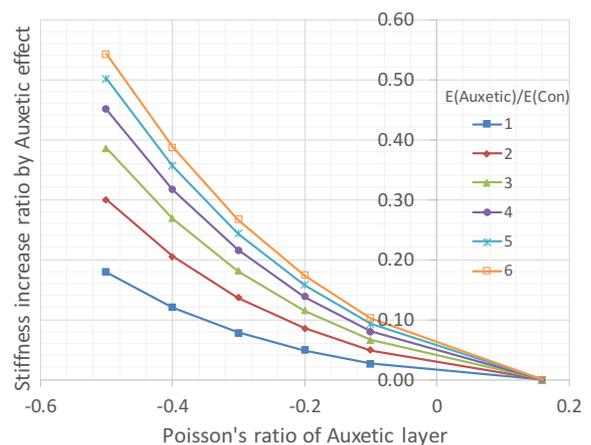


Fig. 8 Stiffness increase ratio of composites by auxetic effect(layer thickness: 10 mm)

증가함에 따라 강성증가 효과가 커짐을 확인할 수 있다. 이는 보강재의 존재에 의한 복합체의 전체 단면적 증가, 보강재의 탄성계수 효과 및 포아송비 효과가 합쳐져서 발생한 것으로서, 음의 포아송비 효과만에 의한 강성증가 효과를 별도로 구분할 필요가 있다.

Figs. 7 및 8은 Figs. 5 및 6에서 구한 각 보강재 두께별 해석 결과에서 음의 포아송비에 의한 강성증가치를 별도로 나타낸 결과이다. 비록 본 해석은 보강재의 음의 포아송비 수치를 -0.5 까지 검토하였으나, 음의 포아송비 수준이 높아질수록 강성증가 효과가 포물선 형태로 증가함을 확인하였다. 또한 보강재의 두께가 증가할수록, 탄성계수가 증가할수록 복합체의 강성증대에 보강재의 음의 포아송비 효과 또한 증가함을 확인하였다.

이와 같이 본 사전해석 수행 검토결과, 콘크리트에 음의 포아송비 거동을 가지는 보강재가 포함된 복합체에 있어서 보

강재의 음의 포아송비 효과가 유의미한 수준으로 영향을 가질 수 있음을 확인하였으며, 음의 포아송비 수준이 높아질수록 그 효과가 급격히 증가함을 확인하였다.

다만 보강재의 두께 및 탄성계수가 커짐에 따라 이에 의한 복합체의 강성증대 효과 정도가 음의 포아송비에 의한 강성증대 효과보다 상대적으로 매우 클 수 있음도 확인하였다. 즉, 두께 5 mm 보강재의 경우 탄성계수가 콘크리트와 동일한 경우 (Fig. 5의 $E(\text{Auxetic})/E(\text{Con})$) 보강재의 포아송비가 -0.5에 있어서 총 강성증가 효과는 약 25%이었으며, 이 중 15%는 단면적의 증가에 의한 효과이며, 10%는 음의 포아송비에 의한 효과이었다. 이에 반해, 보강재의 탄성계수가 콘크리트의 6배인 경우에 있어서는 총 134%의 강성증가 효과가 있는 반면에 음의 포아송비에 의한 효과는 약 39% 수준으로 총 강성증가 효과에 음의 포아송비 효과가 미치는 영향이 상대적으로 감소함을 확인하였다.

즉, 콘크리트 복합체의 구성에 있어서 음의 포아송비 거동을 가지는 보강재의 구성 시, 음의 포아송비 효과를 극대화 하기 위해서는 보강재 자체가 가지는 다양한 역학적 특성에 따른 영향을 함께 고려할 필요가 있다.

2.3 건설산업용 음의 포아송비 거동 격자 제시 및 성능 예측

2.3.1 음의포아송비 거동 최소 단위 형상의 기하학적 형태 선정

2.2에서 사전 검토한 내용을 기반으로 건설산업에 적용이 가능한 음의 포아송비 거동 보강재 적용방식 및 기하학적 형상에 대한 연구를 수행하였다. 건설산업의 특성상 복잡한 형상의 보강재는 취급 및 시공이 어렵다는 문제점이 있기 때문에 선행 연구를 참고하여 최대한 단순한 형상을 선택하고자 하였다.

다음 Fig. 9는 선행연구(Juan C. A. Elipe and Andres D. Lantada, 2012)를 참고로 본 연구에서 선별한 2차원 형상의 Auxetic 격자체로서, 고무재질 원료를 사용하여 3D 프린터로 제작한 샘플이다.

상기 샘플에서 (a) 및 (b) 타입의 경우는 요구되는 격자 자체의 강성유지의 한계가, (c) 및 (d) 타입의 경우는 제작 및 실제 적용상의 어려움이 예상되었다. 또한, (a)~(d) 타입의 경우에

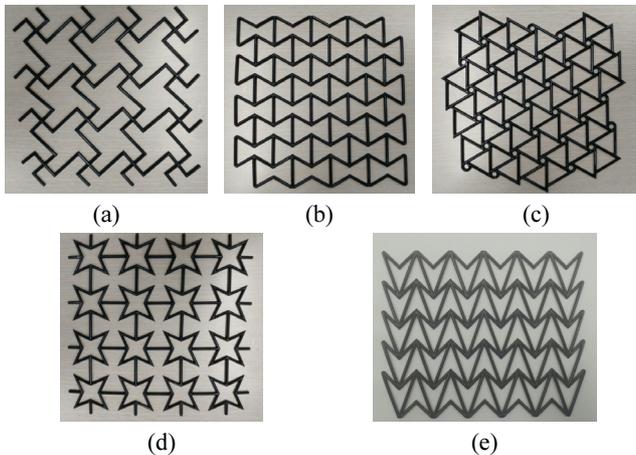


Fig. 9 Potential types of auxetic mesh for construction industry

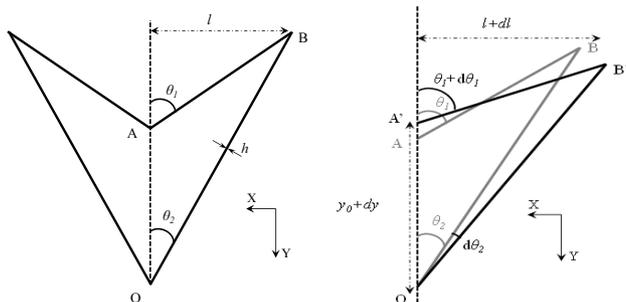


Fig. 10 Basic model of double arrow unit cell

있어서 응력 발생 시 특정 지점에 집중되는 경향이 클 수 있다는 문제점도 예상되었다. 이에 본 연구에서는 (e)에서 보이는 바와 같은 이중화살구조 형상이 음의 포아송비 거동 격자 방식으로 건설산업에 적용하는 것이 유리한 것으로 판단되어 해당 형상을 선정하여 연구를 수행하였다.

한편, 음의 포아송비 거동 격자로서 이중화살구조 형상의 경우에 있어서 화살촉의 형상 정도에 따라서도 역학적 거동에 미치는 영향이 변화하기 때문에 이에 대한 검토연구를 수행하였다.

Fig. 10은 이중화살구조에서 격자 구성 최소단위 형상의 기하학적 형상을 정하는데 필요한 기본 변수를 보이고 있다.

Qiao and Chen은 이중화살구조 격자 구성 최소단위 형상의 기하학적 형태에 따른 역학특성을 산출할 수 있는 이론식을 개발하였다(Qiao and Chen, 2015). 해당 이론식에 따르면 다음 식 (2) 및 (3)에 의해 포아송비 및 탄성계수를 계산할 수 있다.

$$\nu_{yx} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = -\frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\sin \theta_1 \sin \theta_2} \quad (2)$$

$$E_y = \frac{3E_s I}{bl^3} \alpha(\theta_1, \theta_2) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \alpha(\theta_1, \theta_2) = & \frac{-4(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\sin \theta_1 \sin \theta_2} \\ & - \frac{(\cos \theta_1 \cos \theta_2 - 1)^2 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - 3)}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)} \\ & + \frac{(\cos \theta_1 \cos \theta_2 + 3)(\cos \theta_1 \cos \theta_2 - 1)}{(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)} \end{aligned}$$

이며, E_s 는 재료 자체의 탄성계수, I 는 단면2차모멘트, b 는 out of plane 상의 두께(폭)을 나타낸다.

상기의 이론식과 유한요소해석을 통해 기하학적 형상에 따른 이중화살구조 격자 구성 최소단위 형상의 포아송비 및 탄성계수 변화를 검토하였으며, 기본적인 가정치로는 재료 자체의 탄성계수는 200 GPa, 재료 자체의 포아송비 0.3, $l=0.03$ m, $h=b=0.001$ m를 적용하여 수행하였다.

Fig. 11은 θ_1 , θ_2 의 변화에 따른 포아송비 변화를 보여주고 있으며, 이론식 및 유한요소해석 결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 이중화살촉의 두 각도가 감소하면 할수록 음의 포아송비 수치가 더욱 증가함을 알 수 있다.

Fig. 12는 θ_1 , θ_2 의 변화에 따른 격자 구성 최소단위 형상의 정규화된 탄성계수 변화에 대한 이론식과 유한요소 해석 결과를 보여주고 있으며, 사용된 이론식은 식 (4)과 같다. 한편, Table 2는 이러한 해석 결과 중 $\theta_2=15^\circ$ 의 경우에 θ_1 의 변화에 따른 이론식과 유한요소해석 상의 탄성계수 오차발생률을 보여주고 있다.

$$E_y = \frac{E_s}{E_s} \left(\frac{l}{h} \right)^3 \quad (4)$$

Fig. 12에서 보이는 바와 같이, 탄성계수의 경우에 있어서는 θ_1 , θ_2 의 변화에 따라 이론식과 유한요소 해석 결과가 상이하게 발생하고 있음을 확인하였다. 즉, θ_1 , θ_2 의 값이 작아질수록 이론식과 유한요소 해석 결과의 차이가 더욱 커짐을 확인하였다. 이러한 경향은 격자 구성 최소단위 형상의 기하학

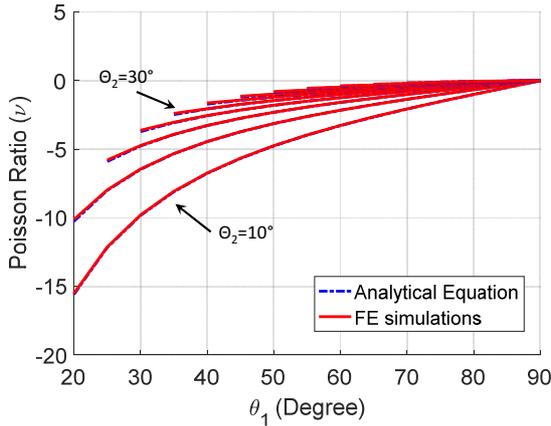


Fig. 11 Poisson's ratio of double arrow unit cell

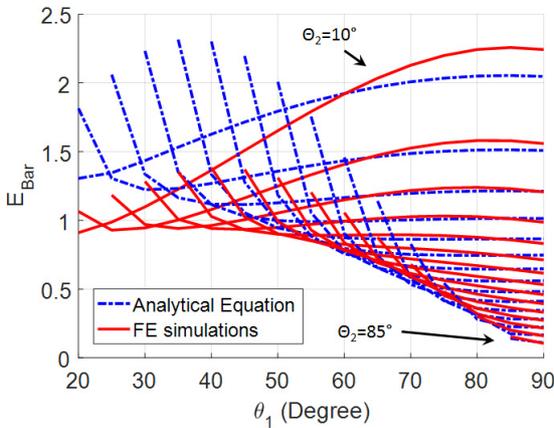


Fig. 12 Normalized elastic modulus of double arrow unit cell

Table 2 Elastic modulus of double arrow unit cell ($\theta_2=15^\circ$)

θ_1	Elastic modulus(GPa)		Normalized E		Error(%)
	Analytical	FEA	Analytical	FEA	
20	34.6	26.6	1.33	1.02	22.9
25	24.4	23.3	0.94	0.89	4.8
30	22.6	23.1	0.87	0.89	-2.1
35	22.3	23.1	0.86	0.89	-3.7
40	22.4	22.7	0.86	0.87	-1.5
45	22.4	21.5	0.86	0.83	4.0

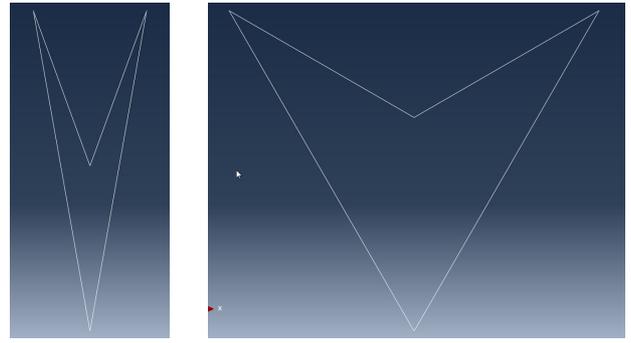


Fig. 13 Shape of double arrow unit cell(Left: $\theta_1=10^\circ$ $\theta_2=5^\circ$, Right: $\theta_1=30^\circ$ $\theta_2=15^\circ$)

적 형상에 기반한 거동에 있어서 탄성론에 기반한 선형거동 이론식과는 달리, 실제 거동에 있어서는 비선형거동이 발생할 수 있음을 나타낸다고 할 수 있다. 즉, 이중화살구조 격자 구성 최소단위 형상의 거동에 있어서 Fig. 13에서 참고할 수 있는 바와 같이 θ_1 , θ_2 의 값이 작아질수록 격자 구성 최소단위 형상을 구성하는 요소에 축력의 전달 뿐만 아니라 세장비 (l/h)의 영향에 의한 좌굴변형이 커질 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

이와 같은 연구결과를 기반으로 할 때, 음의 포아송비 극대화를 위해서는 θ_1 , θ_2 의 최소화가 필요한 반면, 탄성영역 내에서의 격자 구성 최소단위 형상에 대한 거동을 기대하기 위해서는 각도 설정에 제한을 둘 필요가 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 적용된 변수인 재료 자체의 탄성계수 200 GPa, 재료 자체의 포아송비 0.3, $l=0.03$ m, $h=b=0.001$ m의 경우에 있어서 음의 포아송비 효과를 높이면서 선형거동을 유지할 수 있는 형상은 $\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=15^\circ$ 수준이며, 해당 형상 조건에서의 최소단위 형상의 포아송비는 -1, 탄성계수는 약 23 GPa 수준이었다. 다만 앞에서 기술한 바와 같이 이중격자 구조 최소단위 형상의 최적형태를 정하는데 있어서는 각도 뿐만 아니라 l 및 h 에 따라 변화하기 때문에 다각적인 고려가 필요한 부분이다.

2.3.2 이중화살구조 격자 구성 최소단위 형상 적용시 음의 포아송비 거동 격자의 역학적 거동 검토

2.3.1에서는 이중화살구조의 격자 구성 최소단위 형상의 선정 및 가정된 변수 하에서의 역학적 거동을 검토하였으며, 이러한 이중화살구조의 격자 구성 최소단위 형상으로 구성된 격자의 경우에 있어서는 역학적 거동을 유한요소해석을 통하여 검토하였다.

음의 포아송비 거동 격자의 해석에 있어서는 격자 구성 최소단위의 형상에 따른 검토연구의 경우와는 다르게 $l=8$ mm, $h=b=3$ mm로 구성하여 비선형 거동 영향을 감소시켜 보다 작

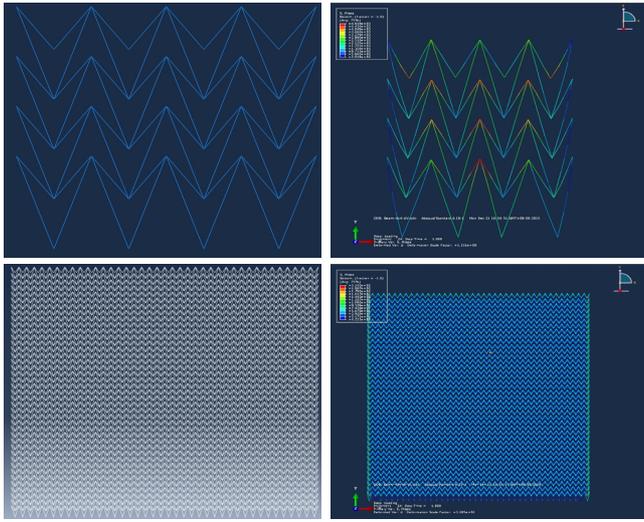


Fig. 14 Examples of FEA with auxetic mesh(upper: 4×4, lower: 40×40 unit cells)

은 각도 값의 적용이 가능하도록 하였다. 즉, $\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=15^\circ$ 를 적용하였으며, 재료 자체의 탄성계수는 앞선 경우와 동일하게 200 GPa, 재료 자체의 포아송비는 0.3을 적용하였다. 또한, 음의 포아송비 거동 격자에 포함되는 격자 구성 최소단위 형상의 개수가 전체 격자의 거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 격자 구성 최소단위 형상의 개수를 4×4, 6×6, 8×8, 10×10, 15×15, 20×20, 30×30, 40×40으로 변화시키면서 상단 y축 방향 변위하중에 대한 격자 전체의 평균 탄성계수 및 평균 포아송비 수치를 분석하였다(Fig. 14).

Figs. 15 및 16은 각 격자별 탄성계수 및 포아송비 수치의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 15에서 보이는 바와 같이 탄성계수의 경우에 있어서는 하중 직교방향인 x축 방향의 경우 4×4 격자의 경우 0.5 GPa를 보였으며, 격자를 구성하는 최소단위 형상의 개수가 많아질수록 증가하는 경향을 가져, 최종적으로는 0.9 GPa에 수렴하였다. 이러한 경향과는 반대로 하중방향인 y축 방향의 경우에는 4×4 격자의 경우 약 24 GPa의 탄성계수 값을 보였으나, 최소단위 형상의 개수가 증가할수록 격자 전체의 탄성계수는 감소하여 최종적으로는 15 GPa에 수렴할 것으로 예측되었다.

한편, 포아송비의 경우에 있어서는 이중화살구조 형태상 하중작용 방향인 y축 방향을 고려할 때 y축방향의 발생변형률보다 x축방향의 발생변형률이 클 수 밖에 없기 때문에 v_{yx} 값이 v_{xy} 보다 큰 값을 가짐을 확인하였다. 또한 탄성계수의 경우와 마찬가지로 격자를 구성하는 최소단위 형상 개수가 증가함에 따라 일정값으로 수렴, v_{yx} 의 경우 -2.4에 도달하였다. 한편 식 (2)에서 제시한 포아송비 계산식에 $\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=15^\circ$ 를

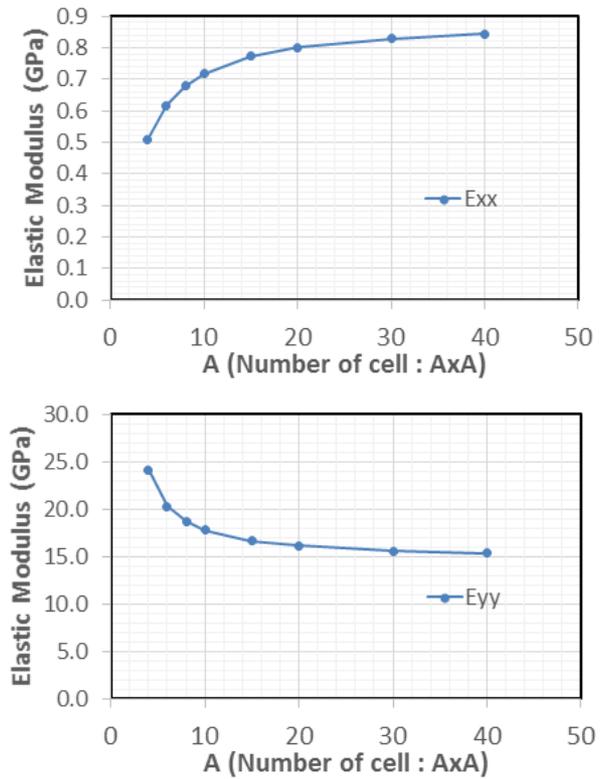


Fig. 15 Elastic modulus of auxetic mesh with number of unit cells

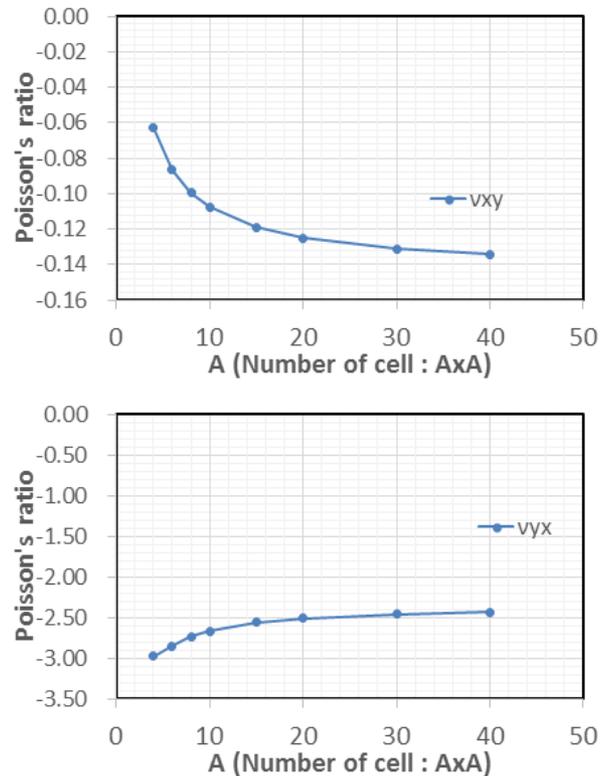


Fig. 16 Poisson's ratio of auxetic mesh with number of unit cells

적용할 경우 최소단위 형상의 포아송비는 -6.41을 가짐에 비해, 동일한 최소단위 형상으로 구성된 격자시스템 전체의 평균 포아송비는 이의 37% 수준으로 수치의 감소가 크게 발생함을 확인하였다.

이러한 동일 최소단위 형상으로 구성된 격자간의 역학적 물성의 차이는 각 최소단위 형상간의 추가적인 구속력 작용에 의한 영향과, 단부에 작용한 외력이 격자에 전파, 분포되면서 발생하는 영향에 따른 것으로 판단되며, 이러한 영향성을 추가적으로 검토할 필요성이 있다.

본 연구 수행 결과, 비록 이론 및 해석에 기반한 연구를 수행, 제한된 결과가 도출되었으나, 결과수치를 고려할 경우 건설산업에의 적용 가능성이 충분함을 확인하였다. 이에 후속 연구에서는 본 연구를 기반으로 한 실제 실험에 기반한 연구를 수행 중이며, 건설산업 분야에 있어서 새로운 방식의 부재 및 부재 보강 방식을 제시한다.

3. 결 론

본 연구에서는 콘크리트와 같은 건설용 구조재료의 양의 포아송비 거동을 감소 또는 억제하는 방식의 일환으로 음의 포아송비 거동(Auxetic)을 가지는 격자체를 콘크리트에 매립, 보강하는 방식의 적용 가능성을 이론적으로 검토하였다. 이를 위하여 우선적으로 또한, 일반 건설산업에서 적용이 가능한 수준의 단순화된 음의 포아송비 격자체의 형태 및 형식을 제시, 해당 음의포아송비 격자체의 역학적 거동 특성을 검토하였으며 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트에 음의 포아송비 거동 보강재를 탑재한 복합체의 역학적 거동을 이론적으로 검토한 결과, 음의 포아송비 거동 보강재의 거동 특성에 의한 복합체의 강성 증가 효과가 발현될 수 있음을 확인하였다.
- 2) 다만, 음의 포아송비 거동 보강재의 양이 높거나 보강재 자체의 강성이 커질수록 전체 복합체의 강성 증가에 음의 포아송비에 의한 기여율이 감소함을 확인하였다.
- 3) 건설산업 분야에서 적용이 가능한 음의 포아송비 거동 격자체를 구성함에 있어서 이중화살구조 형식을 제시하였으며, 이중화살구조 최소단위 형태의 기하학적 형상에 따른 역학적 특성을 이론식 및 유한요소해석을 통하여 검토하였다. 이 결과, 이중화살구조를 구성하는 요소의 세장비의 영향에 의해 비선형 거동이 발생할 수 있음을 확인하였으며, 최소 단위 형상에 대한 탄성계수 및 포아송비 수치에 대한 사전 예측이 가능함을 확인하였다.
- 4) 음의 포아송비 거동 형상으로 구성된 격자를 구성하여 외부 하중에 대한 역학적 거동을 유한요소해석으로 검토하

였으며, 격자를 구성하는 단위 형상의 개수가 증가함에 따라 일정 값으로 수렴함을 확인하였다. 또한, 단위 형상의 역학적 특성과 동일 단위 형상으로 구성된 격자의 역학적 특성에는 차이가 존재함을 확인하였으며, 이는 각 단위 형상이 격자체를 구성함에 따라 추가적인 구속력의 작용 및 외력의 분포, 전파됨에 따라 발생된 것으로 판단된다.

- 5) 이러한 이론적인 검토 연구를 기반으로 후속연구에서는 실제 콘크리트에 음의 포아송비 거동 격자체를 보강하는 방식의 실증연구를 수행, 실제 음의 포아송비 거동 격자체의 건설산업에의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 15CTAP-C098246 과제의 연구 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Alderson, A. (1999), A triumph of lateral thought, *Chemistry and Industry*, 384-391.

Elipse, Juan C. A., and Lantada, Andres D., (2012), Comparative Study of Auxetic Geometries by Means of Computer-aided Design and Engineering, *Smart Materials and Structures*, 21(10), p.105004(12pp).

Friis, E. A., Lakes, R. S., and Park, J. B. (1988), Negative Poisson's Ratio Polymeric and Metallic Materials, *Materials Science*, 23, 4406-4414.

Grima, J. N., and Evans, K. E. (2000), Auxetic Behavior from Rotating Squares, *Materials Science Letters*, 19, 1563-1565.

Grima, J. N., Gatt, R., Ravirala, N., Alderson, A., and Evans, K. E. (2006). Negative Poisson's Ratios in Cellular foam Materials, *Materials Science and Engineering*, 423, 214-218.

Henderson, B., Whitty, J. P. M., Myler, P., and Chirwa, C. (2007), Crash Performance of Cellular Foams with Reduced Relative Density Part 2: Rib Deletion, *International Journal of Crashworthiness*, 12, 689-698.

Kaminakis, N. T., Drosopoulos, G. A., and Stavroulakis, G. E. (2015), Design and Verification of Auxetic Microstructures Using Topology Optimization and Homogenization, *Architectural Applied Mechanics*, 85, 1289-1306.

Lakes, R. S. (1987), Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio, *Science*, 80(235), 1038-1040.

Lakes, R. S., and Witt, R. (2002), Making and Characterizing Negative Poisson's Ratio Materials, *Mechanical Engineering Education*, 30, 50-58.

Lira, C., Innocenti, P., and Scarpa, F. (2009), Transverse Elastic Shear of Auxetic Multi Re-entrant Honeycombs, *Composite Structures*, 90, 314-322.

Qiao, J. X., and Chen, C. Q. (2015), Impact Resistance of Uniform and Functionally Graded Auxetic Double Arrowhead Honeycombs, *Impact Engineering*, 83, 47-58.

Schwerdtfeger, J., Wein, F., Leugering, G., Singer, R. F., Korner, C., Stingl, M., and Schury, F. (2011), Design of Auxetic Structures via Mathematical Optimization, *Advanced Materials*, 23, 2650-2654.

Received : 05/15/2017

Revised : 05/31/2017

Accepted : 06/19/2017

요 지 : 본 연구는 음의 포아송비 거동을 가지는 격자체의 구조부재 보강재로의 적용이 가능한지에 대한 검토를 수행하였다. 콘크리트를 포함한 일반적인 재료는 외부 하중의 작용 시 양의 포아송비 거동을 가진다. 이러한 콘크리트의 역학적 거동을 음의 포아송비 특성을 가지는 금속 격자체가 구속함으로써 콘크리트의 강성을 증대시킬 수 있음을 이론적으로 확인하였다. 또한 실제 건설산업에 적용이 가능한 수준의 음의 포아송비 거동을 가지는 격자체의 형식을 제시, 역학적 거동 특성을 수치 해석적으로 검토하였다.

핵심용어 : 포아송비, 음의 포아송비, 격자체, 구조부재, 보강
