

음의 포아송비 거동 격자체로 보강한 시멘트 복합체의 압축특성 실험평가

Experimental Evaluation of Compressive Characteristics of Cementitious Composites Reinforced by Auxetic Mesh

김원우¹ · 이장화¹ · 문재흠^{1*}Won-Woo Kim¹ · Jang-Hwa Lee¹ · Jae-Heum Moon^{1*}

(Received June 12, 2017 / Revised June 21, 2017 / Accepted June 21, 2017)

This study observed the effects of auxetic mesh reinforcement in concrete on the mechanical characteristics under compression. Series of double arrow type 2-D auxetic mesh were manufactured and embedded into concrete specimens. Compression tests were performed and results showed that the application of auxetic mesh as concrete reinforcement can restrain the deformation of concrete resulting in the enhancement of stiffness of composites.

키워드 : 포아송비, 음의 포아송비, 격자체, 복합체**Keywords** : Poisson's ratio, Auxetic, Mesh, Composites

1. 서론

콘크리트는 우수한 경제성 및 시공성으로 주요 건설재료로 이용되어 지고 있으며, 최근 들어서는 다양한 시설물 및 건축물의 규모가 대형화 및 초고층화 함에 따라 기존 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성을 추가적으로 향상시키는 연구가 활발히 수행되어지고 있다.

그러나 콘크리트는 우수한 압축강도 및 강성에 비하여 인장강도는 상대적으로 매우 낮은 값을 가지기 때문에 콘크리트 자체만 가지고는 구조부재에의 적용에 제한을 받게 된다. 이러한 제한을 극복하고자 부재에 작용하게 되는 인장하중은 철근이 부담하도록 한 철근콘크리트 구조가 주로 사용되어지고 있는 실정이다.

한편, 콘크리트는 압축하중이 작용하는 경우에 있어서도 경계 조건에 따라 차이는 있으나, Fig. 1에서 보이는 바와 같이 국부적으로 응력이 집중하게 되며 이로 인하여 압축하중 작용방향의 직교 방향으로 단면적이 증가함에 따라 균열파괴에 이르게 된다. 이러한 거동은 대부분의 일반적인 재료와 마찬가지로 양의 포아송비 거동특성을 가지기 때문이다. 즉, 식 (1)에 나타난 바와 같이 부재

축방향으로 압축하중이 작용할 경우 하중 작용방향으로 음의 변형을, 즉 길이의 감소가 발생할 경우 하중 직교방향으로는 양의 변형을, 즉 길이의 증가가 발생하게 된다.

$$\nu = - \frac{\epsilon_{transverse}}{\epsilon_{axial}} \quad (1)$$

한편, Figs. 2 및 3과 같이, 특정 형상을 가진 구조체의 경우에

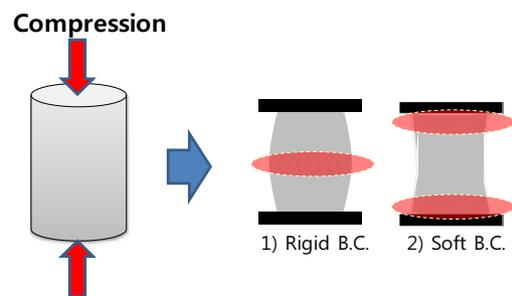


Fig. 1. Concrete failure pattern by compression

* Corresponding author E-mail: mjh4190@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 구조융합연구소 (Structural Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

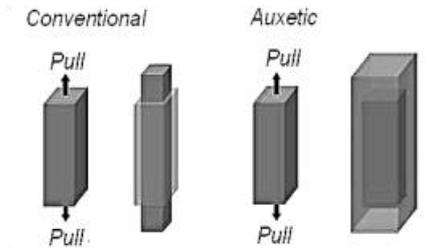


Fig. 2. Auxetic behavior(Grima et al. 2006)

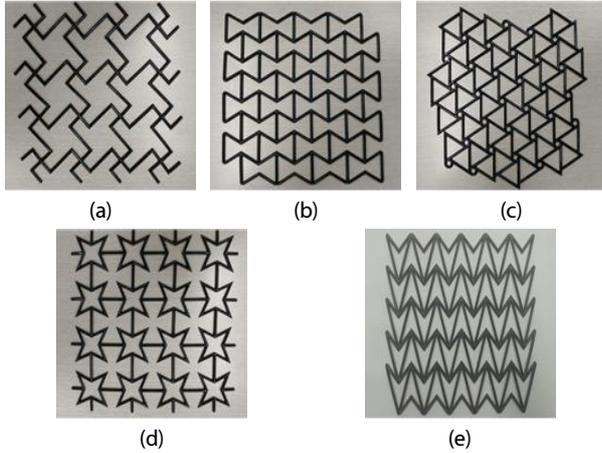


Fig. 3. 2-D types of auxetic mesh(Kim et al. 2017)

있어서는 음의 포아송비 거동(Auxetic), 즉 하중 작용방향으로 길이의 감소 또는 증가가 발생할 시 하중 직교방향으로도 동일하게 길이의 감소 또는 증가가 발생하게 된다(Juan C.A. Elipe and Andres D. Lantada, 2012; Kim et al. 2017).

본 연구에서는 Fig. 3에서 보인 음의 포아송비 거동 특성을 가지는 격자체 중 1종류를 선택, 콘크리트에 매립하여 해당 복합체의 압축 거동 특성을 실험적으로 분석하였으며, 이러한 결과로부터 복합체의 부재강성에 어떠한 효과가 있는지를 검토하였다.

2. 격자체 및 시험체 제작

2.1 음의 포아송비 격자체 제작

Kim et al.(2007)이 수행한 선행연구에서는 Fig. 3에서 보인 음의 포아송비 거동 격자체 중 (e)와 같은 이중화살촉 격자체를 선정하여 격자체의 형상에 따른 역학적 특성을 검토하였다. 기본적으로 이중화살촉 단위격자체의 포아송비 및 탄성계수는 Qiao and Chen이 2015년도에 개발한 Fig. 4, 식 (2) 및 (3)의 이론식으로부터 구할 수 있다.

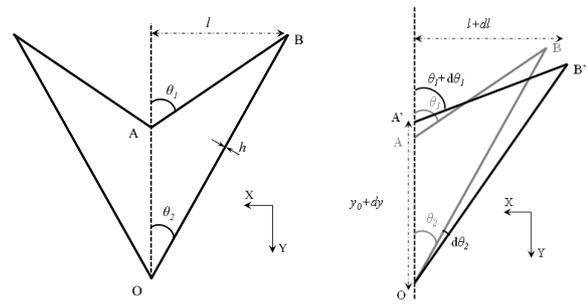


Fig. 4. Basic model of double arrow unit cell(Kim et al. 2017)

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

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

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

선행연구에서는 이중화살촉 단위격자체의 θ_1 , θ_2 를 다양하게 변화시켜 단위격자 및 단위격자로 구성된 격자시스템의 각도형상에 따른 포아송비 및 탄성계수를 이론적으로 검토한 바 있다(Kim et al. 2017). 이에 본 연구에서는 이중화살촉 격자체 중 특정 형상에 대하여 격자체 두께 및 보강량 등을 변수로 하여 격자체를 제작, 콘크리트에 매립한 복합체에 대한 압축하중 작용 시의 역학적 거동 평가를 위한 실험연구를 수행하고자 하였다.

이에 압축강도 시험용 격자체는 Fig. 5와 같이 두께 2mm 및 5mm의 SS400 강판을 가지고 Fig. 4의 단위격자체 형상을 $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=30^\circ$ 로 고정하여 레이저 절삭 가공 방식으로 제작하였다. 또한 z각 격자체별 격자체를 구성하는 단위격자의 크기는 Fig. 6과 같이 2종류로 적용하였다.

한편 음의 포아송비 거동 격자체의 경우와 상대비교를 수행하기 위하여 각 음의 포아송비 격자체 경우별 유사한 격자체 총면적을 가지는 일반격자를 제작하였으며, 그 예를 Fig. 7에 나타내었다.

2.2 격자체 매립 압축시험체 제작

2.1에서 제작된 격자체를 매립한 콘크리트 복합체는 폭 525mm,

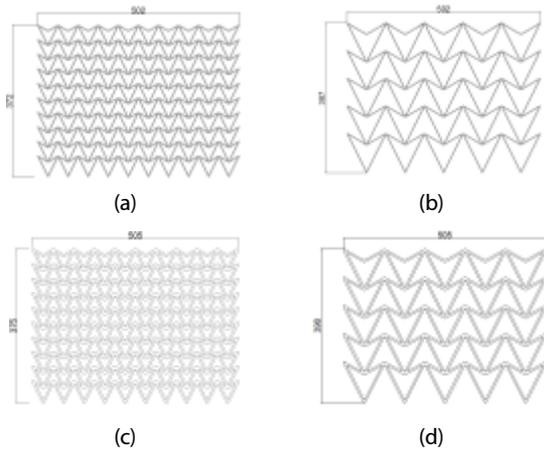


Fig. 5. Auxetic mesh for compression test(A, B: t=2mm, C, D: t=5mm, unit: mm)

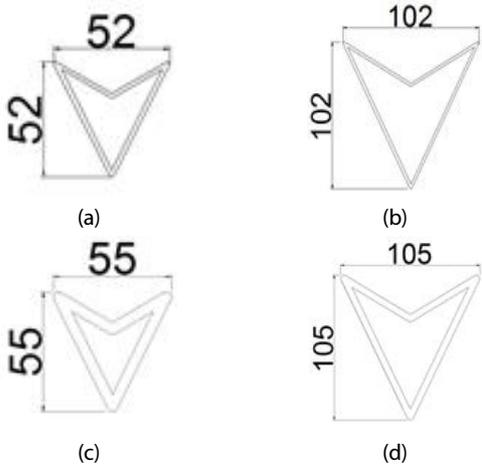


Fig. 6. Size of unit cell for auxetic mesh(A, B: t=2mm, C, D: t=5mm, unit: mm)

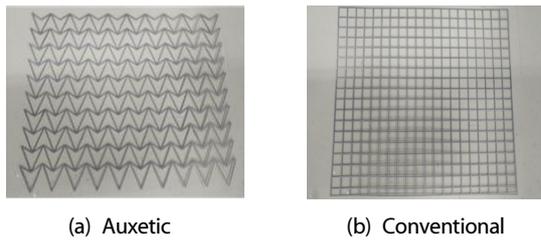


Fig. 7. Manufactured mesh(t=2mm, case A in Fig. 5)

높이 395mm, 두께 160mm를 가지는 직육면체로 제작하였다. 또한, Fig. 5에서 보인 4종류의 음의 포아송비 격자체를 가지고 Table 1과 같이 2열, 3열 매립하였으며, Fig. 5의 A 격자체의 경우에는 8열 매립을 추가적으로 하였다.

또한 각 복합체별 격자체 보강비를 산출한 결과를 Table 1에

Table 1. Variables of auxetic mesh specimens for compression test

Mesh thickness (mm)	Unit cell size (mm)	Mesh array	Reinforcement ratio (conventional mesh)
2	52×52	2	0.00376
		3	0.00564
		8	0.01504
	102×102	2	0.002
		3	0.00299
		3	0.00299
5	55×55	2	0.02189
		3	0.03284
	105×105	2	0.01210
		3	0.01816
		3	0.01816

Table 2. Mixture proportions of concrete

Compressive strength	W/C	Unit weight(kg/m ³)				
		Water	Cement	Gravel	Sand	Ad.
40MPa	50	180	360	1108	738	1.8

Table 3. Mixture proportions of mortar

Compressive strength	W/C	Unit weight(kg/m ³)			
		Water	Cement	Gravel	Sand
40MPa	48.5	281	580	-	1421



Fig. 8. Manufacture of composite specimens

나타내었다.

복합체의 제작에 있어서는 8열 매립 복합체의 경우를 제외하고는 Table 2의 압축강도 40MPa 수준의 콘크리트를 사용하였다. 8열 매립 복합체의 경우에는 격자체간 간격이 좁아지는 문제로 굵은골재가 포함된 콘크리트의 타설이 불가능하였기 때문에 동일 압축강도 수준의 Table 3의 모르타르 배합을 사용하였다.

Fig. 8은 본 연구에서 제작한 각 복합체의 제작 예를 보여주고 있으며, 각 변수별로 시험체를 3개씩 제작하였다.

상대비교를 위하여 동일한 크기의 무보강 콘크리트 및 모르타르 시험체도 제작하였으며, 이와 같이 제작된 시험체는 재령 28일 기준으로 콘크리트 및 모르타르의 압축강도가 40MPa 수준에 도달된 시점에서 압축하중 인가 시험을 수행하였다.

3. 실험수행 결과

3.1 격자체 매립 복합체 압축 시험 결과

압축시험은 Fig. 9와 같이 시험체에 1mm/min의 변위제어 방식으로 압축하중을 증가시키면서 수행하였으며, 하중 증가에 따른 하중방향 및 하중 직교방향의 변위 및 변형률을 전면 및 배면부위 양측에서 측정하였다.

실험수행 결과 격자 두께 2mm에 2열 및 3열 매립 복합체의 경우, 음의 포아송비 거동 격자체 및 일반 격자체 모두 무보강 콘크리트와의 역학적 거동에 큰 차이가 없음이 확인되었다. 이는 낮은 보강량에 기인한 것으로 판단된다.

이에 반해 두께 2mm, 단위격자 52x52mm 격자체를 8열 매립한 시험체의 경우에 있어서는 하중 작용방향으로는 무보강 모르타르 시험체와 거의 동일한 역학적인 거동을 보인 반면(Fig. 10), 하중 직교방향으로는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 무보강 시험체에 비해 음의 포아송비 매립 시험체가 상대적으로 매우 낮은 변형률 발생량을 보여주었으며, 거의 유사한 보강량을 가진 일반격자 매립 시험체에 비해서도 큰 수준으로 변형률이 감소되었음을 보여주었다.

이는 비록 하중 작용방향에 있어서의 복합체 전체의 역학적 거동에는 격자체의 보강량이 작기 때문에 큰 영향을 미치지 못하였으나, 하중 연직방향으로는 복합체가 압축하중을 받아서 발생하는 길이의 증가를 상대적으로 유의미한 수준으로 구속하였음을 나타낸다고 볼 수 있다. 또한 약 1.5% 수준의 유사 보강량을 가진



Fig. 9. Compression test with measurements

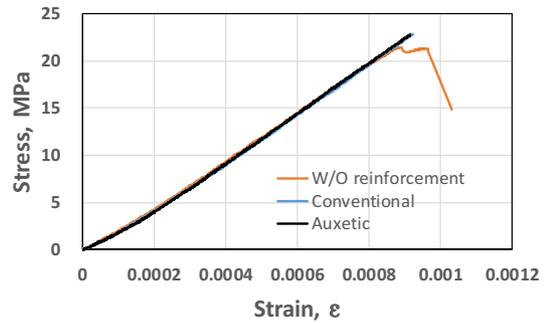


Fig. 10. Stress-strain relationships on load direction($t=2\text{mm}$, auxetic unit cell: $52\times 52\text{mm}$, 8 array)

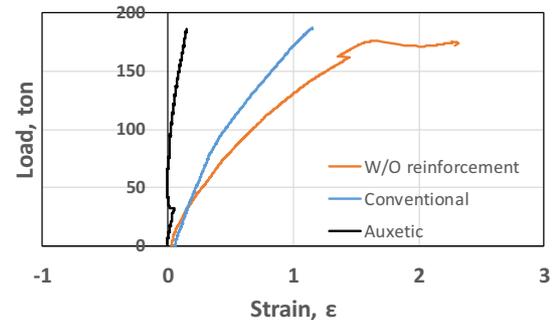


Fig. 11. Load-strain relationships on perpendicular to load direction ($t=2\text{mm}$, auxetic unit cell: $52\times 52\text{mm}$, 8 array)

일반 격자체의 경우와 비교했을 때 복합체의 하중 직교방향으로의 변형률을 상대적으로 크게 억제한 것으로 볼 때 음의 포아송비 격자체의 형상 거동에 의한 모르타르의 변형거동을 효과적으로 구속한 결과로 판단된다.

Figs. 12 및 13은 두께 5mm로 제작된 격자체의 경우에 있어서의 압축하중 작용방향으로 분석된 각 복합체별 탄성계수를 보이고 있다.

두께 2mm의 경우와는 달리, 5mm 두께의 격자체를 매립한 경우에 있어서는 하중 작용방향에 있어서의 탄성계수 증가 현상이 확인되었다. 이는 기본적으로 격자체 보강량이 Table 10에서 보인 바와 같이 최소 1.2% 이상, 최대 3.2% 수준임을 고려할 때, 압축하중 작용방향으로의 복합체의 거동에 격자체의 영향이 매우 크게 작용하였음을 알 수 있다. 또한, Fig. 12의 두께 5mm, 음의 포아송비 단위격자 크기 55x55mm의 경우에 있어서 일반격자 보강의 경우와 비교할 때, 2열 보강의 경우는 일반격자 대비 약 15%, 3열 보강의 경우는 약 3.8% 정도 탄성계수가 높게 나타났다.

또한 Fig. 13의 두께 5mm, 음의 포아송비 단위격자 크기 105x105mm의 경우는 3열 보강의 경우 일반격자 보강 대비 약 14.3%의 탄성계수 증가를 나타내었으며, 2열 보강의 경우는 시험체 제작상

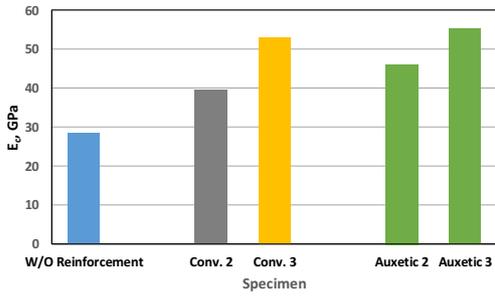


Fig. 12. Elastic modulus(t=5mm, auxetic unit cell: 55x55)

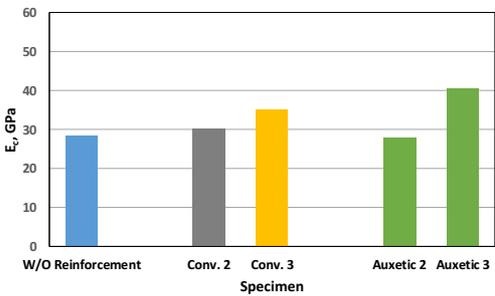


Fig. 13. Elastic modulus(t=5mm, auxetic unit cell: 105x105)

의 문제로 탄성계수 수치가 무보강의 경우보다 낮게 측정되어 비교검토에서 제외하였다.

이와 같은 결과를 볼 때, 음의 포아송비 거동 격자체를 콘크리트와 같은 양의 포아송비 거동 재료에 매립, 보강을 함으로써, 외부 압축하중의 작용으로 인한 단면 부피의 변화 뿐 만 아니라, 보강량에 따라 강성의 증대효과도 기대할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

다만 격자체의 보강량이 지나치게 높을 경우, 음의 포아송비 효과보다는 금속 격자체 자체의 강성이 전체 복합체의 역학적 거동을 지배하는 영향이 더욱 커질 수 있음도 확인되었다.

이러한 결과를 볼 때 향후 연구에 있어서는 콘크리트의 양의 포아송비 거동을 제어하는데 최적화된 음의 포아송비 격자체 형상과 보강량에 대한 이론 및 실험연구를 수행할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 음의 포아송비 거동을 가지는 이중화살촉 격자체를 금속으로 제작하여 콘크리트 및 모르타르에 매립하였을 경우 해당 복합체의 압축거동 특성 분석실험을 수행하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1. 격자체는 음의 포아송비 거동특성을 가지는 이중화살촉 형상을, 단위 격자형상에 있어서는 $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=30^\circ$ 로 고정하였으

며, 격자 두께를 2 및 5mm 두 종류로 적용한 금속 격자체를 제작하여 콘크리트에 매립하였다.

2. 압축실험 수행 결과, 두께 2mm의 음의 포아송비 격자체를 1% 이하로 보강한 경우는 무보강 시험체와 비교할 때 복합체의 거동에 큰 변화는 발생되지 않았다. 그러나 약 1.5% 수준으로 보강한 경우에 있어서는 압축하중 방향으로 큰 변화는 없었으나, 하중 직교방향에 있어서는 복합체의 변형이 크게 감소함을 확인할 수 있었다.
3. 두께 5mm를 적용한 음의 포아송비 거동 격자체를 매립한 경우에 있어서는 기본적으로 보강량이 최소 1.2% 이상이었으며, 이러한 수준에서는 압축하중 작용방향으로의 탄성계수 증가 효과가 확인되었다. 또한 동일 보강량 수준의 일반격자 매립 복합체와 비교함에 있어서도 음의 포아송비 격자체를 매립한 경우, 보다 높은 탄성계수 증가 효과가 있음을 확인하였다.
4. 다만 격자체를 매립, 보강함에 있어서 보강량이 일정 수준 이상이 되면 금속 보강체의 자체 강성이 전체 복합체의 역학적 거동을 지배하게 되어 음의 포아송비에 의한 효과는 상대적으로 감소하게 됨을 확인할 수 있었다.
5. 이러한 실험결과 등을 기반으로 후속연구에서는 콘크리트 복합체의 역학적 거동 특성의 개선 및 성능향상을 위한 최적 보강 방식 및 보강량과 관련된 연구결과를 제시하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 15CTAP-C098246 과제의 연구 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Elipe, Juan C.A., 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)

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

Kim, W.W., Lee, J.H., Moon, J.H. (2017). A preliminary study of applicability of auxetic mesh for construction industry, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance*

and Inspection, (Accepted to be published in 2017) [in Korean].

Qiao, J.X., Chen, C.Q. (2015), Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs, Impact Engineering, **83**, 47–58.

음의 포아송비 거동 격자체로 보강한 시멘트 복합체의 압축특성 실험평가

본 연구는 압축하중 하의 콘크리트에 음의 포아송비 거동 격자체를 보강함으로써 역학적 특성에 효과가 있는지를 검토하였다. 이중화살촉 형상의 2차원 음의 포아송비 격자체를 종류별로 제작하여 콘크리트 시험체에 매립하였다. 압축시험을 수행한 결과, 음의 포아송비 격자체를 콘크리트에 매립함으로써 콘크리트의 변형을 구속함에 의해 복합체의 강성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.