

음의 포아송비 거동 격자체로 보강한 시멘트 복합체의 인장특성 평가

Evaluation of Tensile Characteristics of Cementitious Composites Reinforced by Auxetic Mesh

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

(Received June 8, 2017 / Revised June 19, 2017 / Accepted June 19, 2017)

Typical materials including concrete behaves with positive poisson's ratio when external force is applied. However, it is also available to manufacture a grating system which has negative poisson's ratio(Auxetic). In this study, double arrow type 2-D auxetic mesh was manufactured and mechanical behaviors were observed. Also, direct tensile tests of cementitious composites reinforced by auxetic mesh were performed and the results were compared with composites reinforced by typical mesh. The results showed that auxetic mesh more effectively restrained the deformation(shortening) of cementitious composites perpendicular to the load direction comparing with typical mesh.

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

1. 서론

수경성 시멘트를 결합재로 한 콘크리트는 우수한 경제성 및 시공성으로 주요 건설재료로 이용되어 지고 있다. 한편, 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 압축강도에 비하여 낮은 인장강도를 가짐으로써 구조부재에의 적용에 제한을 받고 있다. 이러한 제한을 극복하고자 부재의 압축하중은 콘크리트가, 인장하중은 철근이 받도록 한 철근콘크리트 구조가 주로 사용되어지고 있는 실정이다.

한편, 콘크리트는 일반적인 재료와 마찬가지로 양의 포아송비 거동특성을 가진다. 즉, Fig. 1 및 식 (1)에 나타난 바와 같이 부재 축방향으로 인장하중이 작용할 경우 하중 작용방향으로 양의 변형률, 즉 길이의 증가가 발생할 경우 하중 직교방향으로는 음의 변형률, 즉 길이의 감소가 발생하게 된다.

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

한편, 격자모양을 특정하게 구성할 경우, 음의 포아송비 거동(Auxetic), 즉 하중 작용방향으로 길이의 감소 또는 증가가 발생할 시 하중 직교방향으로도 동일하게 길이의 감소 또는 증가가 발생

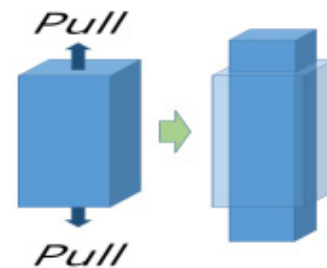


Fig. 1. Deformation of conventional materials under tension

* 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)

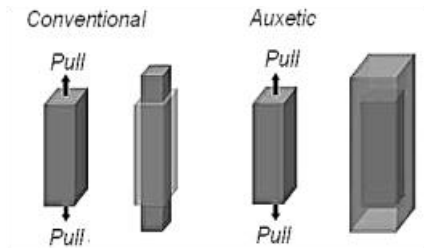


Fig. 2. Auxetic behavior(Grima et al. 2006)

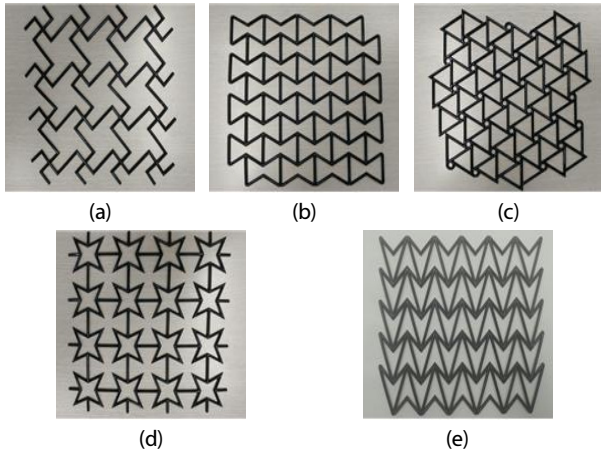


Fig. 3. 2-D types of auxetic mesh(Kim et al. 2017)

하게 할 수 있으며, 개념도는 Fig. 20에서 확인할 수 있다. 이와 같은 음의 포아송비 거동특성을 가지는 일부 대표적인 2차원적 격자체는 Fig. 3에 나타내었다(Juan C.A. Elípe and Andres D. Lantada, 2012).

본 연구에서는 음의 포아송비 거동 특성을 가지는 격자체 중 1종류를 선택, 콘크리트에 매립하여 해당 복합체의 인장거동 특성을 실험적으로 분석하였으며, 이러한 결과로부터 콘크리트 복합체의 부재강성 증대에 어떠한 효과가 있는지 검토하였다.

2. 격자체 및 시험체 제작

2.1 음의 포아송비 격자체, 직접인장 시험체 제작

Kim et al.(2017)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 포아송비는 Qiao and Chen이 2015년도에 개발한 Fig. 4 및 식 (2)의 이론식으로부터 구할 수 있다.

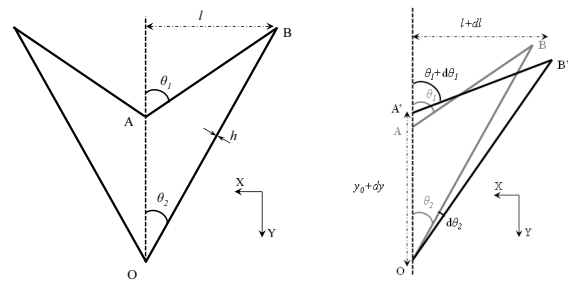


Fig. 4. Basic model of double arrow unit cell(Kim et al. 2017)

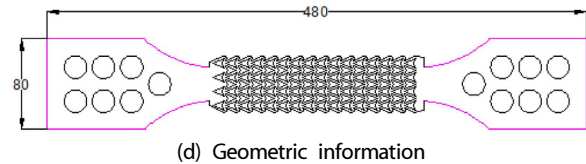
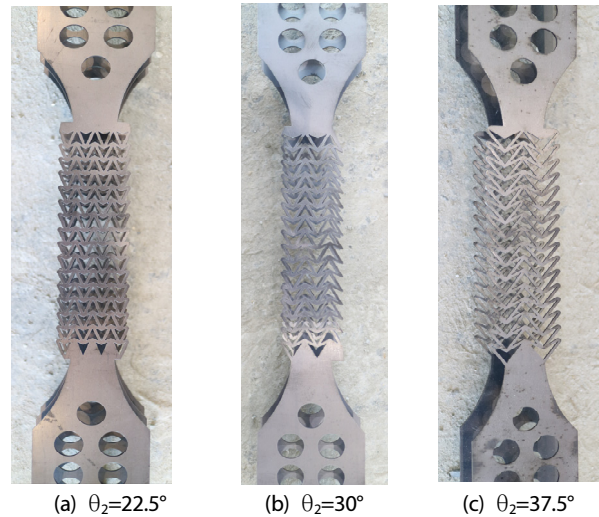


Fig. 5. Manufacture of double arrow mesh($\theta_1=60^\circ$)

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

선행연구에서는 이중화살촉 단위격자체의 형상에 따른 포아송비 및 탄성계수의 예측과 이중화살촉으로 구성된 격자체의 역학적 거동 특성을 이론식으로 검토한 바 있으며, 본 연구에서는 이중화살촉 격자체를 실제 제작 및 실험을 통한 역학적 특성을 검토하고자 하였다.

이에 우선적으로 Fig. 5와 같이 2mm 두께의 SS400 강판을 가지고 Fig. 4의 $\theta_1=60^\circ$ 로 고정하고, $\theta_2=22.5^\circ, 30^\circ, 37.5^\circ$ 로 변화시킨 세가지 종류의 직접인장 시험용 격자체를 제작하였으며, 제작은 레이저 절삭가공 방식을 적용하였다. 이때 인장시험을 수행함

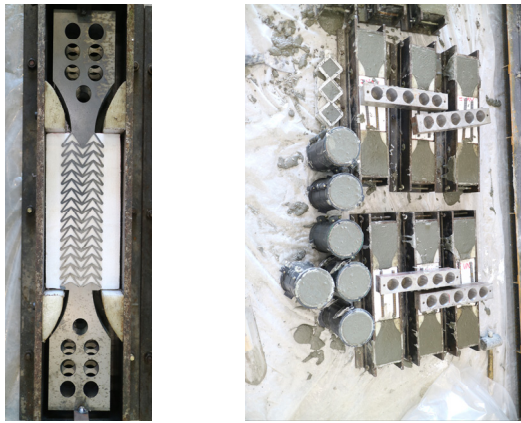


Fig. 6. Manufacture of test specimen for direct tensile test(auxetic mesh only)

에 있어서 각 격자체별 상호비교를 위하여 격자 구성면적을 최대한 유사하도록 제작하였으며, 적용된 격자부 면적은 $\theta_2=22.5^\circ$, 30° , 37.5° 각각 $4,570.5\text{mm}^2$, $4,180.6\text{mm}^2$, $4,532.9\text{mm}^2$ 이었다.

이와 같이 제작된 격자체를 2열로 배치하여 직접인장 시험체를 제작하였으며, 양 단 지그 체결부는 고강도 섬유보강 시멘트 모르타르로 제작하였다(Fig. 6).

2.2 격자체 매립 모르타르 인장시험체 제작

2.1에서 제작된 음의 포아송비 거동 격자체 중 $\theta_2=30^\circ$ 인 경우에 있어서 콘크리트 매립용으로 별도 제작을 하여 1열 및 2열로 격자

Table 1. Mixture proportions of Mortar

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

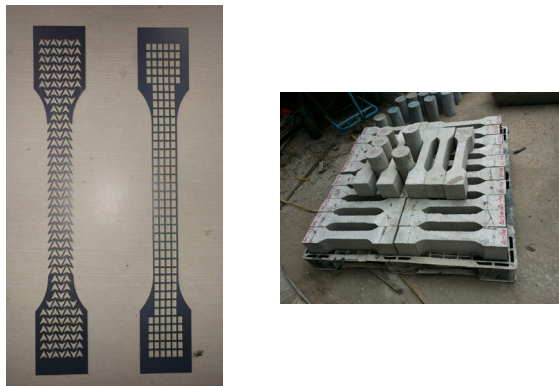


Fig. 7. Manufacture of test specimen for direct tensile test(auxetic mesh+mortar & normal mesh+mortar)

체를 배열하고, 격자부위에 Table 1과 같은 재령 28일 기준 압축강도 40MPa 모르타르 배합으로 충전하여 복합체를 구성하였다(Fig. 7). 또한 이중화살촉 격자체의 단면적과 동일한 값을 가지는 일반 격자체를 제작하여 동일한 방식으로 시험체를 제작하여 상대비교를 수행할 수 있도록 하였다.

이와 같이 제작된 시험체는 재령 28일 기준으로 모르타르의 압축강도가 40MPa 수준에 도달된 시점에서 직접인장 시험을 수행하였다.

3. 실험수행 결과

3.1 음의 포아송비 격자체 직접인장 시험 결과

직접인장 시험은 Fig. 8과 같이 1mm/min의 변위제어 방식으로 수행하였으며, 각 종류별 3개의 시험체에 대하여 인장하중 증가에 따른 격자부위의 발생변위를 화상 이미지 분석을 통하여 구하였다. 이렇게 구한 결과로부터 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 각 격자체별 대표적인 하중-변위 관계선도를 구하였다. Fig. 9에 보이는 바와 같이 $\theta_2=22.5^\circ$, 30° , 37.5° 순으로 격자체의 강성이 낮아짐을 확인할 수 있었다. 또한, 각 격자체의 하중-변위 구간 중 초기 기울기 구간에 있어서의 강성을 분석한 결과, $\theta_2=22.5^\circ$, 30° , 37.5° 순으로 각각 5.917, 1.943, 0.974kN/mm의 값을 보였다. 즉, 2.1에서 밝힌 바와 같은 유사한 격자체 구성면적을 가질 경우에 있어서도 격자체의 구성 상태에 따라 전체 격자시스템이 가지게 되는 하중 응답 강성의 발현에 차이가 있음을 확인하였다. 다만, 본 실험에서는 격자체 전체 구성면적을 유사하게 적용하기 위하여 각 경우에 있어서의 단위격자체의 크기가 변화하게 되었으며, 이로 인하여 $\theta_2=22.5^\circ$ 의 경우가 다른 격자체와 비교했을 때 상대적으로 조밀한



Fig. 8. Direct tensile test of auxetic mesh

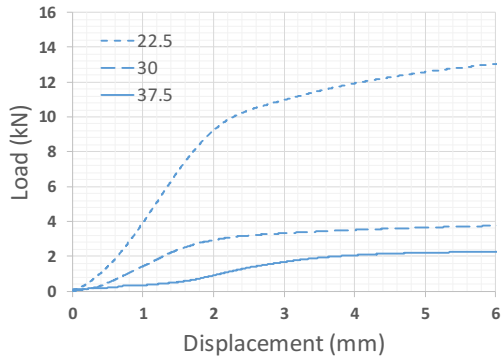


Fig. 9. Load-displacement of auxetic mesh



Fig. 10. Auxetic behavior of double arrow mesh($\theta_2=37.5^\circ$)

격자상태를 가짐으로써 보다 높은 강성거동을 가졌음을 분석결과를 이해하는데 고려할 필요가 있음을 확인하였다.

또한 Fig. 10에 보이는 바와 같이, 인장하중이 증가함에 따라 하중방향으로의 길이 증가뿐만 아니라, 이중화살촉 구조형상의 변화로 인해 하중 직교방향으로도 폭이 증가하는 음의 포아송비 거동이 발생하는 것을 육안으로 확인할 수 있었다.

3.2 격자체 매립 모르타르 시험체 직접인장 시험 결과

3.1에서 보인 바와 같이, 이중화살촉 격자체의 음의 포아송비 거동효과가 콘크리트와 같은 취성재료에 매립할 경우 해당 복합체의 역학적 거동에 어떠한 변화가 발생하는지를 확인하고자 하였다. 이에 본 연구에서는 $\theta_1=60^\circ$, $\theta_2=30^\circ$ 인 경우에 있어서의 격자체 매립 직접인장 시험체를 제작하였으며, 계측은 LVDT 및 표면 변형률게이지를 부착하여 축방향, 직교방향 거동을 측정하였다

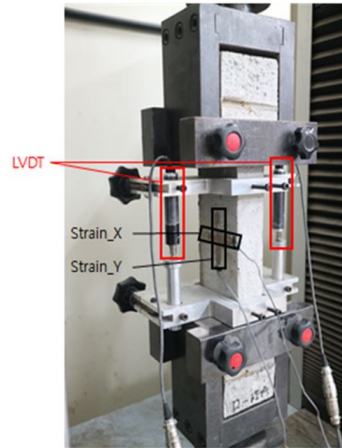


Fig. 11. Direct tensile test of composites

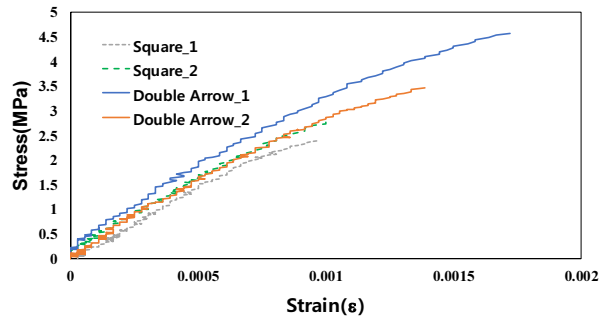


Fig. 12. Stress-strain relationships(load direction-Y)

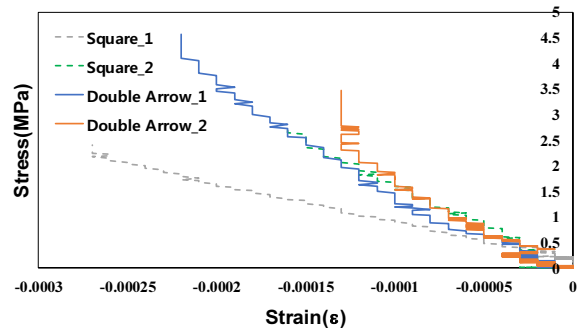


Fig. 13. Stress-strain relationships(perpendicular to load direction-X)

(Fig. 11).

Fig. 12는 일반(Square) 및 이중화살촉(Double arrow) 격자를 1열 및 2열로 매립한 복합체의 인장하중 방향 응력-변형을 선도이며, Fig. 13은 하중 직교방향 응력-변형을 측정 결과를 보이고 있다.

Fig. 12에서 보이는 바와 같이, 인장하중 작용방향에 있어서 일반 및 음의 포아송비 격자체를 1열로 매립한 경우의 탄성계수를 구한 결과, 음의 포아송비 격자체가 약 6.6%의 높은 값을 보여주었

다. 그러나 2열 매립의 경우에 있어서는 일반격자와 음의 포아송비 격자 두 종류 모두 거의 동일한 거동을 보였으며, 그 수치는 1열 매립 시험체와 큰 차이점을 보이지 않았다. 이러한 시험결과를 볼 때 약간의 거동상의 차이점이 비록 확인되기는 하였으나, 본 연구에서 수행된 측정구간에서 인장하중 작용방향에 있어서는 격자체의 매립으로 인한 영향보다는 모르타르 부분의 변형거동이 전체 복합체의 거동을 지배하였다고 판단된다.

이에 반해, Fig. 13에서 보이는 바와 같이 인장하중의 직교방향에 있어서는 일반 격자체를 매립한 경우보다 음의 포아송비 격자체를 매립한 경우 동일 응력 대비 변위의 감소가 확실히 감소함을 확인할 수 있었다. 즉, 1열 매립의 경우 일반격자체 복합체의 탄성계수 대비 1열 매립 음의 포아송비 격자체는 약 142%의 강성 증가가 확인되었으며, 2열 매립의 경우는 일반 격자체 대비 약 20%의 강성 증가가 확인되었다.

이와 같은 결과를 볼 때, 해당 실험조건에 있어서는 격자체 매립 복합체의 하중 작용방향 강성에 격자체 매립 영향은 미미하였으나, 하중 직교방향의 복합체의 단면축소 부분에 있어서는 유의미한 영향을 주었음을 확인할 수 있었다. 특히 동일 단면적을 가지는 음의 포아송비 격자체를 매립한 경우 일반 격자체의 경우보다 복합체의 외부 인장하중으로 인한 단면축소를 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 음의 포아송비 거동을 가지는 이중화살촉 격자체를 금속으로 제작하여 자체적인 역학적 인장거동 특성과 모르타르에 매립하였을 경우 해당 복합체의 인장거동 특성을 확인하기 위하여 직접인장시험을 수행하였으며, 시험수행 및 분석 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 음의 포아송비 격자체 중 이중화살촉 격자체에 대하여 검토하였으며, 단위 격자형상에 있어서 $\theta_1=60^\circ$ 로 고정하고, $\theta_2=22.5^\circ, 30^\circ, 37.5^\circ$ 로 변화시킨 세가지 종류의 격자체에 대하여 직접인장시험을 수행한 결과, 격자체의 형상에 따라 강성 및 포아송비 거동이 상이하게 발생함을 확인할 수 있었다.
2. 비록 유사한 격자면적률을 가진 이중화살촉 격자체 중 $\theta_2=22.5^\circ$ 의 경우 다른 각도의 격자체보다 가장 높은 강성을 가짐을 확인하였으나, 이는 각도변수만에 의한 영향 보다는 해당 격자체가 다른 격자체에 비하여 보다 조밀한 격자형상을 가지게 된 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다.
3. 이중화살촉 격자체 중 $\theta_1=60^\circ, \theta_2=30^\circ$ 의 경우에 있어서는 시멘

트 모르타르에 1열 및 2열 매립한 복합체를 제작하여 직접인장 시험을 수행하였다. 동일 격자단면적을 가지는 일반 격자체를 매립한 복합체의 실험결과와 비교한 결과, 인장하중 작용방향에 있어서는 역학적 거동에 큰 차이가 없음을 확인하였다. 이는 본 연구에서 적용한 격자체 매립 정도가 복합체의 인장하중 방향의 거동에 미치는 영향이 크지 않았기 때문으로 판단된다.

4. 이에 반해 인장하중 직교방향에 있어서는 음의 포아송비 거동 격자체를 매립한 경우, 동일 보강량의 일반 격자체의 경우보다 복합체의 변형이 유의미한 수준으로 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 음의 포아송비 거동 격자체로 인해 시멘트 모르타르의 하중 직교방향으로의 변형거동을 구속, 억제한 효과로 판단된다.
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 인장특성 평가

콘크리트를 포함한 일반적인 재료는 외부 하중의 작용 시 양의 포아송비 거동을 가진다. 한편, 격자시스템에 있어서는 음의 포아송비 거동을 가지도록 제작할 수 있다. 이에 본 연구에서는 이중화살촉 형식의 2차원 음의 포아송비 격자체를 제작하여 역학적인 거동을 검토하였다. 또한 이러한 음의 포아송비 격자체로 보강한 시멘트 모르타르 복합체의 직접인장시험을 수행하였으며, 실험결과는 일반 격자체를 적용한 경우와 비교하였다. 연구 결과, 음의 포아송비 거동 격자체를 적용한 경우 복합체의 하중 직교방향의 변형을 구속하는 효과가 일반 격자체보다 더 효과적임을 보여주었다.