수치해석을 통한 고성능 격자지보재의 성능 평가

김동규[1*] · 안성율[2]

[1]정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원
[2]정회원, (주)에스와이텍 대표이사

Performance evaluation of high-performance lattice girder using numerical analysis

Dong-Gyou Kim[1*] · Sungyoull Ahn[2]

[1]Research Fellow, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
[2]CEO, SYTEC Co.

***Corresponding Author :** Dong-Gyou Kim, dgkim2004@kict.re.kr

Abstract

The objective of this study is to evaluate the field support performance of high-performance lattice girder (BK-Lattice Girder) by using numerical analysis. Three types (50, 70, 95-type) of existing and high performance lattice girders were applied to the cross section of highway 2, 3, and 4 lane tunnels to compare the supporting performance. The numerical analysis was the finite element method and the lattice girder was modeled in three dimensions with an elasto-plastic frame. The ground was modeled as a spring receiving only compression. The load was applied as a concentrated load on the central ceiling of the tunnel section. The yield strengths of the lattice girders were determined from the numerical results to compare the supporting performance of lattice girder. In case of 50-type, the yield strengths of high-performance lattice girders were increased by 6.7~10.0% compared with those of the existing lattice girders. In the case of 70-type, the high-performance lattice girders increased yield strengths by 12.1~14.9% than the existing lattice girder. In the case of 95-type, the high-performance lattice girders increased yield strengths by 13.3~20.0% than the existing lattice girder. As a result of numerical analysis, it was considered that the high-performance lattice girder supported better than the existing lattice girder when only the lattice girders were constructed.

Keywords: Tunnel, Lattice girder, Yield strength, Performance, Numerical analysis

초 록

본 연구의 목적은 수치해석을 수행하여 고성능 격자지보재(BK-Lattice Girder)의 현장 지지성능을 평가하기 위한 것이다. 고속도로 2차로, 3차로와 4차로 터널 단면에 3가지

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
21(6)897-908(2019)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.6.897

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received October 1, 2019
Revised October 29, 2019
Accepted November 5, 2019

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

형태(50, 70, 95 타입)의 기존 및 고성능 격자지보재를 적용하여 지지성능을 비교하였다. 수치해석은 유한요소방법을 사용하였고 격자지보재는 탄소성 프레임으로 3차원으로 모델링하였다. 지반은 압축만을 받는 스프링으로 모델링하였다. 하중은 터널 단면의 중앙 천정부에 집중하중으로 적용하였다. 수치해석 결과로부터 격자지보재의 항복강도를 결정하여 지지성능을 비교하였다. 50타입의 경우, 고성능 격자지보재는 기존 격자지보재보다 항복강도가 6.7~10.0% 증가하였다. 70타입의 경우, 고성능 격자지보재는 기존 격자지보재보다 항복강도가 12.1~14.9% 증가하였다. 95타입의 경우에도, 고성능 격자지보재는 기존 격자지보재보다 항복강도가 13.3~20.0% 증가하였다. 수치해석을 수행한 결과, 격자지보재만 시공된 경우에 고성능 격자지보재는 기존 격자지보재보다 지지성능이 우수한 것으로 판단되었다.

주요어: 터널, 격자지보재, 항복강도, 성능, 수치해석

1. 서 론

NATM은 터널 건설을 위하여 지반을 화약 또는 기계장비를 사용하여 굴착하는 공법이다. NATM의 지보재중에 하나인 강지보재는 굴착 직 후 숏크리트가 타설되어 완전히 경화되기 전까지 지반의 초기변형을 억제하기 위하여 사용된다. NATM 도입초기에는 강지보재로 주로 H형강을 사용하였으나, H형강은 자체중량이 무거워 시공성이 떨어지고, 후속되는 지보재의 시공에도 영향을 주어 종종 공기지연을 발생시키기도 하였다. 또한, 숏크리트 타설시 H형강 배면과 굴착된 지반사이에 공동이 발생하여 숏크리트와 강지보재가 일체화되지 않는 경우도 발생하였다. 그래서 유럽에서는 80년대부터 시공성 향상 및 굴착지반과 지보재의 완전 밀착을 위해 격자지보재(Pantex Lattice Girder)를 개발하여 사용하고 있다(Baumann and Betzle, 1984).

국내에서는 90년대 초부터 격자지보재의 국내 적합성 연구를 수행하였다(Cha et al., 2010; Jung et al., 2016; KICT, 1996; Kim et al., 2002; Moon et al., 1996; Moon et al., 1997). 현재는 터널갱구부, 저토피구간 및 연약지반을 제외한 모든 지반조건에서 격자지보재를 강지보재로 사용하고 있다. 그러나 최근에는 과도한 지반하중에 의하여 터널 붕괴 사고가 자주 발생하고 있어 기존 격자지보재의 성능 개선에 대한 필요성이 제기되고 있다. 또한 격자지보재의 지지성능을 유지하기 위해서는 주강봉과 보조강봉을 연결해주는 스파이더와 강봉의 용접상태가 매우 중요하다. 그러나 기존 격자지보재의 스파이더는 일정한 곡률을 가지고 있어서 직선 단면인 강봉과 용접 연결에 어려움이 존재하고 있다. 기존 격자지보재에서 강봉과 연결재인 스파이더의 용접 연결성 문제를 개선하기 위하여 스파이더 형상을 수정 보완하여 용접성과 지지성능을 향상시킨 고성능 격자지보재(BK-Lattice Girder)가 개발되었다(KICT, 2010; Kim et al., 2011).

본 연구에서는 고성능 격자지보재가 실제 현장에 적용되는 형태로 제작되어 설치될 경우, 기존 격자지보재와 지지성능을 비교/평가하기 위하여 수치해석을 수행하였다.

2. 고성능 격자지보재의 수치해석

2.1 설계패턴 및 지반정수

고성능 격자지보재는 직선시편 및 곡선시편을 사용하여 실내실험 및 실대형 실험을 통한 성능검증을 수행한 후 개발되었다(Kim et al., 2011). 시편 형태의 격자지보재 성능은 터널 설계 시 적용되는 현장타입 격자지보재와 성능 차이를 보일 수 있다. 유한요소방법을 사용한 수치해석을 수행하여 현장타입의 고성능 격자지보재와 기존 격자지보재의 성능과 거동을 비교/분석하였다.

Table 1은 수치해석을 위해 적용된 지보패턴과 지반등급을 보여주고 있다. 터널 굴착 직후, 고성능 격자지보재와 기존 격자지보재의 지보성능을 평가하기 위하여 고속도로 2차로, 3차로와 4차로 터널단면에 3가지 지보패턴을 각각 적용하여 수치해석을 수행하였다. 터널단면과 지보패턴은 고속도로 건설에 사용된 기존 터널 설계자료를 분석하여 결정하였다(KICT, 2010). 국내에서는 3가지 형태(50, 70, 95 타입)격자지보재가 주로 사용되는데 지보패턴 Type-4에는 격자지보재 50타입을 적용하였고, 지보패턴 Type-5에는 70타입을, 지보패턴 Type-6에는 격자지보재 95타입을 적용하였다. 지보패턴 Type-4에는 지반등급 IV, 지보패턴 Type-5에는 지반등급 V, 지보패턴 Type-6에는 지반등급 VI를 적용하였다. 현장 타입의 기존 격자지보재와 고성능 격자기보재의 성능을 평가하기 위하여 총 9가지의 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다.

Table 1. Support pattern for numerical analysis

Lane	Lattice girder type	Type of support	Rock mass class
2-lane	50-type	Type-4	IV
	70-type	Type-5	V
	95-type	Type-6	VI
3-lane	50-type	Type-4	IV
	70-type	Type-5	V
	95-type	Type-6	VI
4-lane	50-type	Type-4	IV
	70-type	Type-5	V
	95-type	Type-6	VI

Table 2는 수치해석에 적용된 각 지반등급별 지반정수들을 보여주고 있다. 지반정수들은 고속도로 건설에 사용된 기존 터널 설계자료를 분석하여 결정하였다(KICT, 2010).

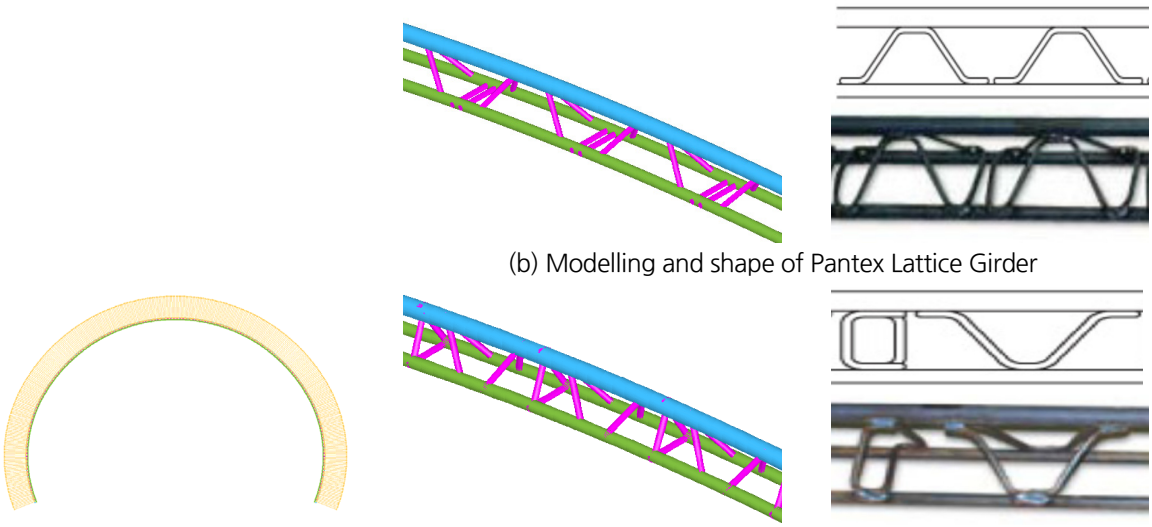
Table 2. Rock mass properties for numerical analysis

Rock mass class	Unit weight (kN/m^3)	Cohesion (kPa)	Angle of internal friction (°)	Modulus of deformation (MPa)	Poisson's ratio
IV	23	300	35	2,000	0.28
V	21	100	33	1,000	0.30
VI	20	50	30	500	0.33

2.2 모델링

현장타입 격자지보재에 대한 거동 분석은 굴착 후 격자지보재가 설치되는 시공 단계에서만 수행되었다. 숏크리트 및 록볼트가 설치되지 않거나 그 역할을 하지 못할 때 막장 붕괴를 막기 위한 지보재로서의 성능이 기존 격자지보재에 비해 고성능 격자지보재가 어느 정도 효과가 있는지 판단하기 위한 것이다.

Fig. 1은 기존 및 고성능 격자지보재의 모델링과 형상을 보여주고 있다. 기존 격자지보재(Fig. 1(b))와 고성능 격자지보재(Fig. 1(c))는 주강봉과 보조강봉을 연결하는 스파이더 형상 및 제원만 상이할 뿐 모든 제원과 형상은 동일하다(Kim et al., 2011). 이를 위하여 모델링은 3차원으로 이루어졌고 격자지보재를 구성하는 주강봉, 보조강봉, 스파이더는 탄소성 프레임으로 모델링하였다. 굴착되는 지반은 압축만을 받는 스프링으로 모델링하였다.



(b) Modelling and shape of Pantex Lattice Girder

(a) Modelling of full lattice girder

(c) Modelling and shape of BK-Lattice Girder

Fig. 1. Modelling of lattice girder

경계조건은 격자지보재의 주강봉 및 보조강봉의 양측 하단에 변위를 고정시키는 것으로 하였다. 하중은 터널 단면의 중앙 천정부에 집중하중으로 적용하였다. 지반은 스프링으로 모사하였으며 그 값은 지반의 변형계수와

반지름을 이용한 Wölfer 공식을 이용하여 결정하였다. 식 (1)에서 E는 지반의 변형계수이고 R은 현장타입 전체 격자지보재의 반지름이다. Table 3은 수치해석에 적용된 반지름과 스프링 계수를 보여주고 있다. 수치해석에 적용된 타입별 격자지보재를 구성하는 강봉과 스파이더의 제원과 물성은 Table 4와 같다.

$$k = \frac{E}{R} \tag{1}$$

Table 3. Spring coefficient and radius for numerical analysis

Lane	Lattice girder type	Rock mass class	Modulus of deformation (MPa)	Radius (m)	Spring coefficient (kN/m)
2-lane	50-type	IV	2,000	7.05	1.64E4
	70-type	V	1,000	7.09	8.18E3
	95-type	VI	500	7.09	4.09E3
3-lane	50-type	IV	2,000	8.19	1.42E4
	70-type	V	1,000	8.24	7.04E3
	95-type	VI	500	8.24	3.52E3
4-lane	50-type	IV	2,000	10.62	1.09E4
	70-type	V	1,000	10.68	5.43E3
	95-type	VI	500	10.70	2.71E3

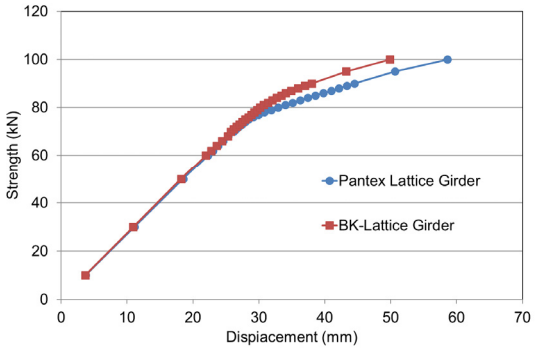
Table 4. Dimensions and properties of steel bar

Type of lattice girder		Diameter (mm)	Cross-sectional area (m^2)	Modulus of elasticity (MPa)	Iy, Iz (m)	Sy, Sz (m)	Yield strength (MPa)
50-type, 70-type	Major steel bar	30	7.07e-4	2.10e8	3.98e-8	4.50e-6	510
	Minor steel bar	20	3.14e-4	2.10e8	7.85e-9	1.33e-6	510
	Stiffener	10	7.85e-5	2.10e8	4.91e-10	1.67e-7	510
95-type	Major steel bar	32	8.04e-4	2.10e8	5.15e-8	5.46e-6	510
	Minor steel bar	22	3.80e-4	2.10e8	1.15e-8	1.77e-6	510
	Stiffener	10	7.85e-5	2.10e8	4.91e-10	1.67e-7	510

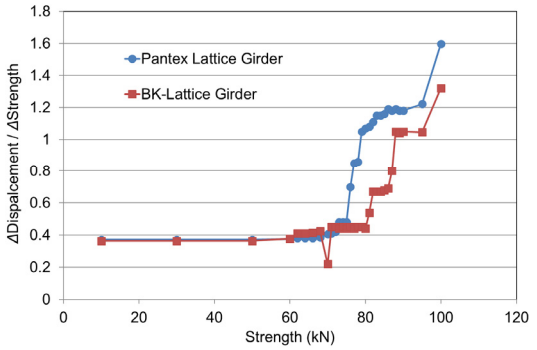
3. 고성능 격자지보재의 거동 분석

3.1 50타입 격자지보재

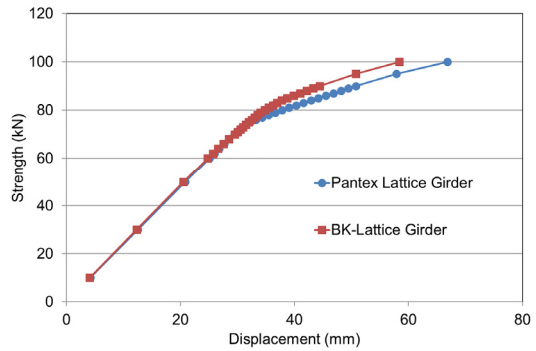
50타입의 기존 및 고성능 격자지보재를 고속도로 2차로, 3차로 및 4차로 터널에 적용하였을 때 지지성능을 비교하기 위하여 격자지보재의 항복강도를 결정하였다.



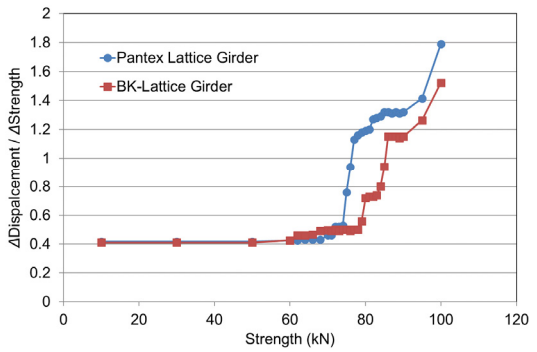
(a) Strength vs. displacement (2-lane)



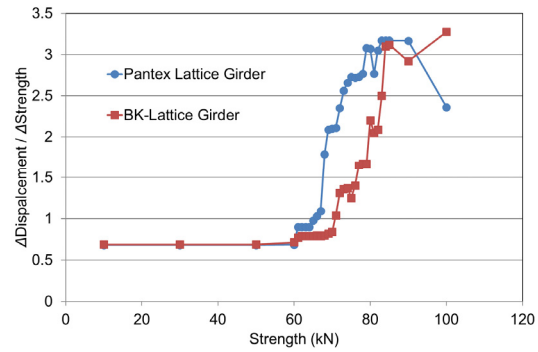
(b) ⊿Displacement/⊿Strength vs. strength (2-lane)



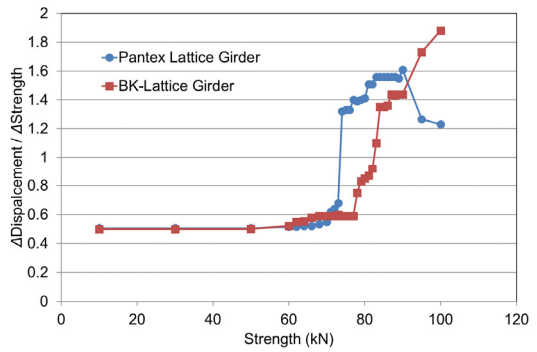
(c) Strength vs. displacement (3-lane)



(d) ⊿Displacement/⊿Strength vs. strength (3-lane)



(e) Strength vs. displacement (4-lane)



(f) ⊿Displacement/⊿Strength vs. strength (4-lane)

Fig. 2. Results of numerical analysis for 50-type lattice girder

Table 5. Yield strength of 50-type lattice girder

Lane	Yield strength of Pantex Lattice Girder (1)	Yield strength of BK-Lattice Girder (2)	(2)-(1) ((2)/(1)*100)
2-lane	75 kN	80 kN	+5 kN (+6.7%)
3-lane	74 kN	79 kN	+5 kN (+6.8%)
4-lane	70 kN	77 kN	+7 kN (+10.0%)

Fig. 2는 2차로, 3차로 및 4차로 터널 단면을 사용하여 수치해석한 결과로부터 얻어진 하중-변위 곡선과 하중-⊿변위/⊿하중 곡선을 보여주고 있다. 일반적으로 격자지보재의 항복강도는 하중-변위 곡선으로부터 결정할 수 있다. 그러나 Fig. 2의 (a), (c) 및 (e)에서 보여주듯이 수치해석 결과로부터 얻어진 하중-변위 곡선으로는 항복강도 결정이 쉽지 않았다. Fig. 2의 (b), (d) 및 (f)에서 보여주듯이 하중-⊿변위/⊿하중 곡선을 사용하여 격자지보재의 항복강도를 결정하였다. ⊿변위/⊿하중의 값이 상대적으로 갑자기 커지는 경우를 선정하여 그 점을 항복강도로 결정하였다. Table 5는 2차로, 3차로 및 4차로 터널 단면에 적용한 50타입의 기존 및 고성능 격자지보재의 항복강도를 보여주고 있다. 또한 기존 격자지보재의 항복강도 대비 고성능 격자지보재의 항복강도 변화량도 보여주고 있다. Fig. 2과 Table 5에서 기존과 고성능 격자지보재는 Pantex Lattice Girder와 BK-Lattice Girder로 표현되었다.

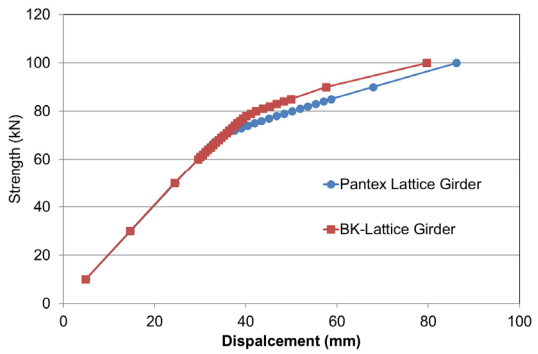
Fig. 2(b)와 Table 5에서 보여주듯이, 고속도로 2차로 터널에 적용한 기존 격자지보재의 항복강도는 75 kN이고 고성능 격자지보재의 항복강도는 80 kN으로 나타났다. 고성능 격자지보재는 기존 격자지보재 대비 항복강도가 5 kN (6.7%) 증가한 것으로 나타났다. Fig. 2(d)와 Table 5에서 보여주듯이, 고속도로 3차로 터널에 적용한 기존 격자지보재의 항복강도는 74 kN이고 고성능 격자지보재의 항복강도는 79 kN으로 산정되었다. 고성능 격자지보재는 기존 격자지보재 대비 항복강도가 5 kN (6.8%) 증가한 것으로 나타났다. Fig. 2(f)와 Table 5에서 보여주듯이, 고속도로 4차로 터널에 적용한 기존 격자지보재의 항복강도는 70 kN이고 고성능 격자지보재의 항복강도는 77 kN으로 결정되었다. 고성능 격자지보재는 기존 격자지보재에 비해 항복강도가 7 kN (10.0%)증가하는 것으로 나타났다.

3.2 70타입 격자지보재

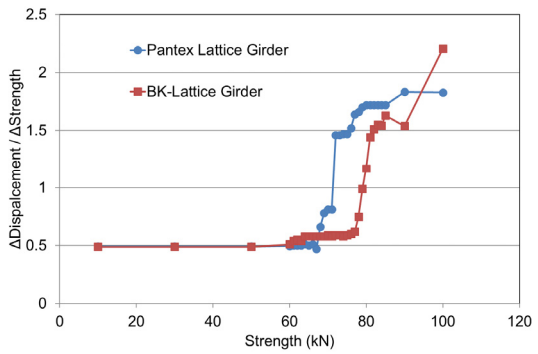
70타입의 격자지보재의 경우도 기존 및 고성능 격자지보재의 지지성능을 비교하기 위하여 수치해석 결과로부터 격자지보재의 항복강도를 산정하였다. Fig. 3은 2차로, 3차로 및 4차로 터널 단면을 사용하여 수치해석한 결과로부터 얻어진 하중-변위 곡선과 하중-⊿변위/⊿하중 곡선을 보여주고 있다. Fig. 3의 (a), (c) 및 (e)는 수치해석으로부터 계산된 하중과 변위의 관계를 보여주고 있으며 이것을 이용하여 격자지보재의 항복강도를 판단하기에는 어려움이 있었다. 50타입 격자지보재와 마찬가지로, Fig. 3의 (b), (d) 및 (f)에서 보여주고 있는 하중-⊿변위/⊿하중 곡선을 사용하여 격자지보재의 항복강도를 결정하였다. Table 6은 2차로, 3차로 및 4차로 터널 단면에 적용한 70타입의 기존 및 고성능 격자지보재의 항복강도를 보여주고 있다. 또한 기존 격자지보재의 항복강도 대비 고성능 격자지보재의 항복강도 변화량도 보여주고 있다. Fig. 3과 Table 6에서 기존과 고성능 격자지보재는 Pantex Lattice Girder와 BK-Lattice Girder로 표현되었다.

고속도로 2차로 터널단면의 경우 기존 격자지보재의 항복강도는 67 kN으로 나타났고, 고성능 격자지보의 항복강도는 77 kN으로 나타났다. 고성능 격자지보재가 기존 격자지보재 대비 항복강도가 10 kN (14.9%) 증가한 것으로 나타났다. 고속도로 3차로 터널단면에서는 기존 격자지보재의 항복강도는 67 kN이고 고성능 격자지보재

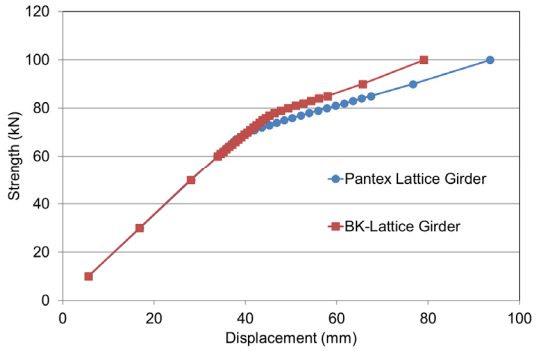
의 항복강도는 76 kN으로 결정되었다. 고성능 격자지보재가 기존 격자지보재 대비 9 kN (13.4%)의 항복강도 증가가 나타났다. 고속도로 4차로 터널단면에 적용한 기존 격자지보재는 항복강도는 66 kN이고 고성능 격자지보재의 항복강도는 74 kN였다. 고성능 격자지보재가 기존 격자지보재 대비 8 kN (12.1%)의 항복강도 증가가 발생하였다.



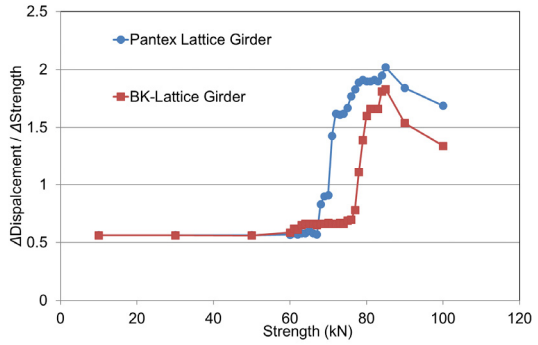
(a) Strength vs. displacement (2-lane)



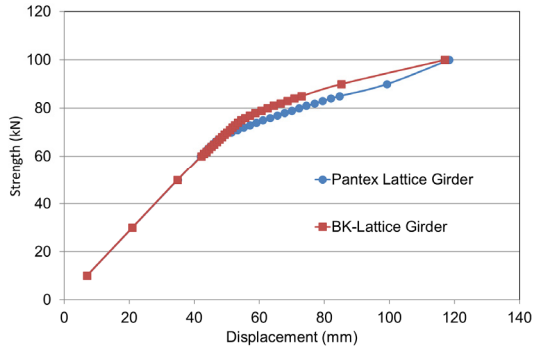
(b) ⊿Displacement/⊿Strength vs. strength (2-lane)



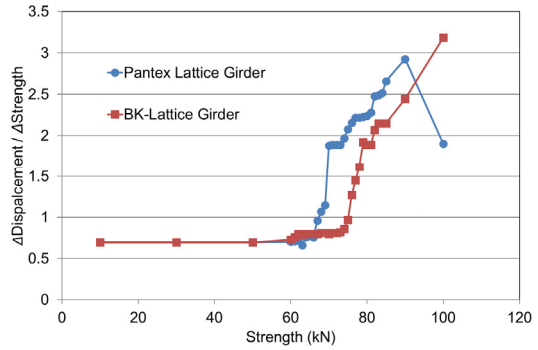
(c) Strength vs. displacement (3-lane)



(d) ⊿Displacement/⊿Strength vs. strength (3-lane)



(e) Strength vs. displacement (4-lane)



(f) ⊿Displacement/⊿Strength vs. strength (4-lane)

Fig. 3. Results of numerical analysis for 70-type lattice girder

Table 6. Yield strength of 70-type lattice girder

Lane	Yield strength of Pantex Lattice Girder (1)	Yield strength of BK-Lattice Girder (2)	(2)-(1) ((2)/(1)*100)
2-lane	67 kN	77 kN	+10 kN (+14.9%)
3-lane	67 kN	76 kN	+9 kN (+13.4%)
4-lane	66 kN	74 kN	+8 kN (+12.1%)

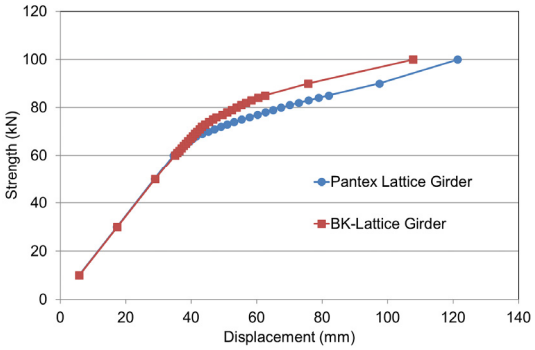
3.3 95타입 격자지보재

95타입의 격자지보재의 경우도 기존 및 고성능 격자지보재의 지지성능을 비교하기 위하여 수치해석 결과로부터 격자지보재의 항복강도를 산정해 보았다.

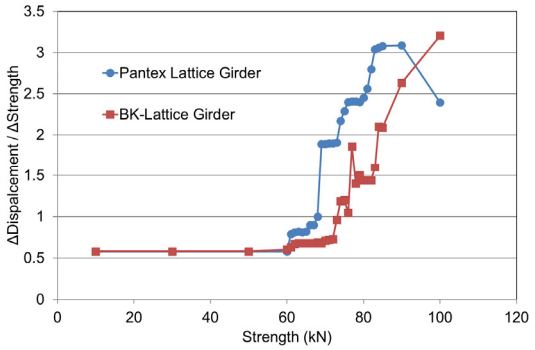
Fig. 4는 2차로, 3차로 및 4차로 터널 단면에 적용한 기존 및 고성능 격자지보재의 하중-변위 곡선과 하중-⊿변위/⊿하중 곡선을 보여주고 있다. Fig. 4의 (a), (c) 및 (e)는 수치해석으로부터 산정된 하중-변위 곡선을 보여주고 있다. 50타입 및 70타입 격자지보재와 마찬가지로 이것을 이용하여 격자지보재의 항복강도를 판단할 수 없었다. Fig. 4의 (b), (d) 및 (f)는 기존 및 고성능 격자지보재의 하중-⊿변위/⊿하중 곡선을 보여주고 있으며 격자지보재의 항복강도를 결정하는데 사용하였다. Table 7은 95타입의 기존 및 고성능 격자지보재를 2차로, 3차로 및 4차로 터널 단면에 적용한 경우 산정된 격자지보재의 항복강도를 보여주고 있다. 또한 기존 격자지보재의 항복강도를 기준으로 고성능 격자지보재의 항복강도 변화량도 보여주고 있다. Fig. 4와 Table 7에서 기존과 고성능 격자지보재는 Pantex Lattice Girder와 BK-Lattice Girder로 표현되었다.

고속도로 2차로 터널 단면인 경우 항복강도는 기존 격자지보재가 60 kN이고 고성능 격자지보재는 72 kN으로 나타났다. 고성능 격자지보재가 기존 격자지보재 대비 12 kN (20.0%)의 성능 향상이 있는 것으로 나타났다. 고속도로 3차로 터널 단면인 경우 기존 격자지보재의 항복강도는 60 kN으로 나타났고, 고성능 격자지보재의 항복강도는 70 kN으로 결정되었다. 고성능 격자지보재가 기존 격자지보재 대비 10 kN (16.7%)의 성능 향상이 있는 것으로 나타났다. 고속도로 4차로 터널 단면에 적용한 기존 격자지보재의 항복강도는 60 kN으로 나타났고, 고성능 격자지보재의 항복강도는 68 kN으로 나타났다. 고성능 격자지보재가 기존 격자지보재 대비 8 kN (13.3%)의 성능 향상이 있는 것으로 나타났다.

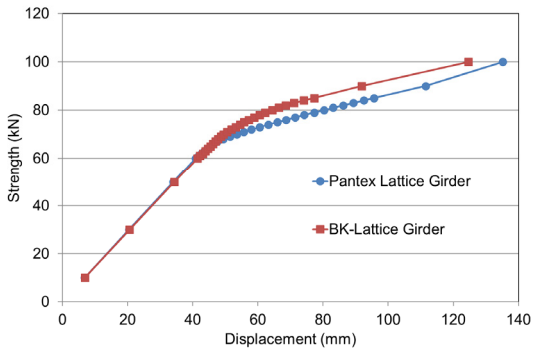
수치해석 결과로부터 도출된 기존 격자지보재와 고성능 격자지보재의 하중-⊿변위/⊿하중 곡선에서 결정된 항복강도를 비교한 결과, 전체적으로 고성능 격자지보재의 항복강도가 기존 격자지보재의 항복강도 대비 6.7~20.0%정도 크게 나와 성능이 더 우수한 것으로 나타났다. 이상의 결과로 볼 때 격자지보재만 있는 경우에는 연결재인 스파이더의 역할이 격자지보의 성능과 밀접한 관계를 가지고 있으며 고성능 격자지보재가 기존 격자지보재에 비해 지지성능이 우수한 것으로 판단되었다.



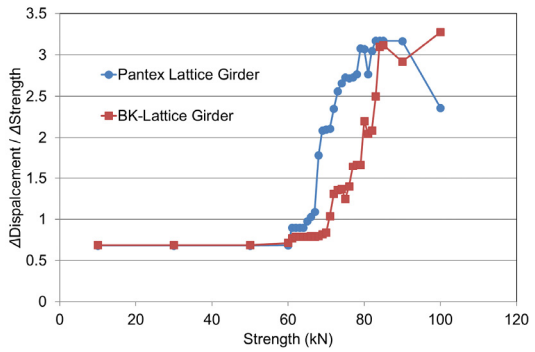
(a) Strength vs. displacement (2-lane)



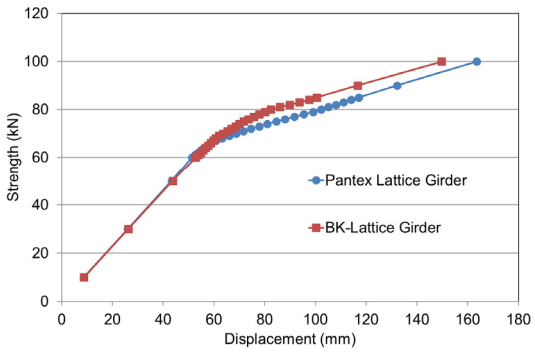
(b) ⊿Displacement/⊿Strength vs. strength (2-lane)



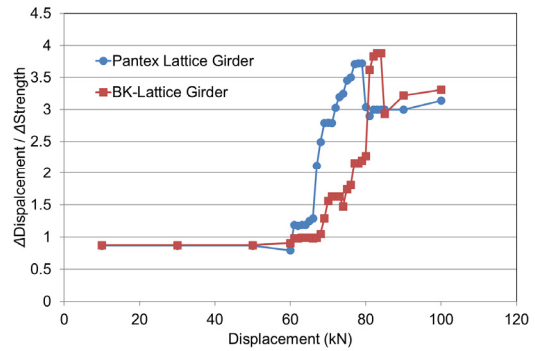
(c) Strength vs. displacement (3-lane)



(d) ⊿Displacement/⊿Strength vs. strength (3-lane)



(e) Strength vs. displacement (4-lane)



(f) ⊿Displacement/⊿Strength vs. strength (4-lane)

Fig. 4. Results of numerical analysis for 95-type lattice girder

Table 7. Yield strength of 95-type lattice girder

Lane	Yield strength of Pantex Lattice Girder (1)	Yield strength of BK-Lattice Girder (2)	(2)-(1) ((2)/(1)*100)
2-lane	60 kN	72 kN	+12 kN (+20.0%)
3-lane	60 kN	70 kN	+10 kN (+16.7%)
4-lane	60 kN	68 kN	+8 kN (+13.3%)

4. 결 론

고성능 격자지보재가 실제 현장에 적용되는 형태로 제작되어 설치될 경우, 기존 격자지보재와 지지성능을 비교/평가하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 고속도로 2차로, 3차로와 4차로 터널 단면에 적용한 현장 타입의 기존 및 고성능 격자지보재의 지지 성능을 항복강도로 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 고속도로 2차로, 3차로와 4차로 터널에서 각각의 터널 단면에 3가지 지반등급을 가정하여 3가지 지보패턴, 즉 3가지 기존 및 고성능 격자지보재를 적용하여 지지성능을 비교하였다. 수치해석은 유한요소방법을 사용하였고, 격자지보재를 구성하는 주강봉, 보조강봉, 스파이더는 탄소성 프레임으로 3차원으로 모델링하였다. 굴착되는 지반은 압축만을 받는 스프링으로 모델링하였다. 하중은 터널 단면의 중앙 천정부에 집중하중으로 적용하였다. 수치해석결과로부터 격자지보재의 하중-Δ변위/Δ하중 곡선을 도출하였고 Δ변위/Δ하중의 값이 상대적으로 갑자기 커지는 점을 항복강도로 결정하여 지지성능을 비교하였다.
2. 50타입의 기존 및 고성능 격자지보재를 고속도로 2차로, 3차로와 4차로 터널 단면에 적용한 경우, 기존 격자지보재의 항복강도는 70~75 kN으로 나타났고 고성능 격자지보재의 항복강도는 77~80 kN으로 나타났다. 고성능 격자지보재는 기존 격자지보재 대비 항복강도가 6.7~10.0% 증가한 것으로 나타났다.
3. 70타입의 기존 및 고성능 격자지보재를 고속도로 2차로, 3차로와 4차로 터널 단면에 적용한 경우, 기존 격자지보재의 항복강도는 66~67 kN으로 나타났고 고성능 격자지보재의 항복강도는 74~77 kN으로 나타났다. 고성능 격자지보재의 항복강도는 기존 격자지보재의 항복강도보다 12.1~14.9% 상승한 것으로 나타났다.
4. 95타입의 기존 및 고성능 격자지보재를 고속도로 2차로, 3차로와 4차로 터널 단면에 적용한 경우, 기존 격자지보재의 항복강도는 60 kN으로 나타났고 고성능 격자지보재의 항복강도는 68~72 kN으로 나타났다 기존 격자지보재의 항복강도보다 고성능 격자지보재의 항복강도가 13.3~20.0% 증가한 것으로 나타났다.
5. 수치해석 결과, 전체적으로 고성능 격자지보재의 항복강도가 기존 격자지보재의 항복강도 대비 6.7~20.0%정도 크게 나와 성능이 더 우수한 것으로 나타났다. 이상의 결과로에서 격자지보재만 있는 경우에는 고성능 격자지보재가 기존 격자지보재에 비해 지지성능이 우수한 것으로 판단되었다.

References

1. Baumann, T., Betzle, M. (1984), “Investigation of the performance of lattice girders in tunnelling”, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 67-81.
2. Cha, B.G., Kim, Y.S., Kwon, T.S., Kim, S.H. (2010), “The prediction of deformation according to tunnel excavation in weathered granite”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 12, No. 4, pp. 329-340.
3. Jung, H.S., Shin, Y.W., Son, K.I., Shin, J.H. (2016), “Performance evaluation of lattice girder depending on the quality of steel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 2,

pp. 165-173.

4. Kim, D.G., Yoo, C.S., Kim, H.J., Bae, G.J. (2011), “Development of high-performance lattice girder’, Proceedings of the Korean Geotechnical Society Spring National Conference 2011, Yongin, pp. 435-440.
5. Kim, Y.I., Yoon, Y.H., Cho, S.K., Yang, J.H., Lee, N.Y. (2002). “A case study on the construction of a long tunnel in the youngdong railroad (Mt. Dongbaek-Dokye)”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 4, No. 2, pp. 155-165.
6. Korea Institute of Construction Technology (KICT) (1996), Application of lattice girders in tunnelling, Chunwon Industry Co. Ltd., pp. 141-203.
7. Korea Institute of Construction Technology (KICT), (2010), Development of rapid and safe tunnel construction method using IT and new materials (development of new support system for rapid stabilization tunnel construction), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, pp. 214-220.
8. Moon, H.D., Lee, S.W., Bae, G.J. (1996), “Evaluation of an applicability of lattice girders for the tunnel support”, Tunnel and Underground Space, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 6, No. 2, pp. 122-130.
9. Moon, H.D., Paik, Y.S., Bae, G.J. (1997), “An experimental study on the characteristics of a composite structure of lattice girder and shotcrete”, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 13, No. 2, pp. 155-167.