

개량형 격자지보재의 성능 평가

김학준^{1*} · 배규진² · 김동규³

¹정회원, 대전대학교 지반방재공학과 교수

²정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라 연구실 선임연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라 연구실 연구위원

Evaluation of the performance for the reformed lattice girders

Hak-Joon Kim^{1*}, Gyu-Jin Bae², Dong-Gyu Kim³

¹Department of Geotechnical Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Professor

²Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology (KICT), Senior Research Fellow

³Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology (KICT), Research Fellow

ABSTRACT: Lattice girders are widely used as a substitute for H-steel ribs at domestic tunnels. However, lattice girders have a weak point in terms of the support capacity compare to H-steel ribs because of the lower stiffness and the weakness of the welded parts. To improve the weakness of the lattice girder, reformed lattice girders are developed in Korea by adding one more spider and having flat welded surface. Laboratory tests and field measurements were performed for the original and the reformed lattice girders to evaluate the performance of the reformed lattice girders. According to the laboratory compression test, reformed lattice girders have 16% higher load bearing capacity than that of original lattice girders. Reformed lattice girders are more stable than original lattice girders because reformed lattice girders tend to bend less according to the field measurements.

Keywords: Lattice girder, H-steel ribs, Field measurements, Reformed lattice girder

초 록: 격자지보재는 기존의 H형강 지보재를 대체하여 현재 국내의 터널현장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 격자지보재는 H형강 지보재에 비하여 강성이 떨어지며 이음부를 연결하는 용접에 안전을 기해야 한다는 단점이 있다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 연결용 부재가 추가되고 용접부위를 편평하게 만든 개량형 격자지보재가 국내 기술에 의하여 개발되었다. 본 연구에서는 기존 격자지보와 개량형 격자지보에 대한 실내시험 및 현장계측을 수행하여 개량형 격자지보의 성능을 평가하였다. 실내 압축시험결과에 의하면 개량형 격자지보가 기존 격자지보에 비하여 약 16% 정도 큰 지지하중을 보였다. 현장 계측 결과에 의하면 개량형 격자지보가 기존 격자지보보다 강봉의 휨이 적게 발생하여 터널의 안정성 측면에서 더 우수하였다.

주요어: 격자지보재, H형강 지보재, 현장 계측, 개량형 격자지보재

1. 서 론

국내 터널에서 가장 활발히 사용되고 있는 NATM 공법은 주로 슛크리트, 록볼트 및 H형 강지보를 일차 지보재로 사용하였다. 그러나 H형 강지보가 자체중량으로 인하여 시공성이 떨어지며 슛크리트 타설시 강

지보재 배면과 굴착 지반사이에 공동이 발생한다는 문제점 등으로 국내 NATM 공법 현장에서는 H형 강지보를 대체한 격자지보 사용이 급속히 증가하고 있다.

국내 격자지보 연구는 KICT (1995, 1996), Moon et al. (1996, 1997), Yoo et al. (1997), Kim and Bae (2008)에 의하여 수행되었으며 Ministry of Construction & Transportation (1996)에 의하여 개정된 터널표준시방서에서 격자지보를 새로운 강지보재로 인정하여 국내 터널공사에 사용이 가능하게 되었다.

*Corresponding author: Hak-Joon Kim

E-mail: hakkim@dju.kr

Received April 11, 2013; Revised May 2, 2013;

Accepted May 12, 2013

일반적으로 격자지보는 H형 강지보재에 비하여 지지력이 낮은 것으로 알려져 있다. 따라서 국내 터널 현장의 갱구부, 저토포구간 및 연약지반에서는 격자지보의 사용이 제한되고 있다. 특히 최근에는 과도한 지반하중에 의하여 터널 붕괴 사고가 자주 발생하고 있어 기존 격자지보의 성능 개선에 대한 필요성이 제기되고 있다. 격자지보의 지지력을 유지하기 위해서는 강봉을 서로 연결해주는 스파이더와 강봉의 용접상태가 매우 중요하다. 일반적으로 용접부는 전단력에 저항할 수 있도록 3 cm 이상의 길이가 되어야 하며 취성파괴가 발생하지 않도록 완전한 접합이 되어야 한다. 그러나 기존 격자지보의 스파이더는 곡률을 가지고 있어서 강봉과 스파이더의 용접에 어려움이 있었다. 기존 격자지보 강봉의 연결성 문제를 개선하기 위하여 기존 격자지보에 연결용 부재가 추가되고 용접부위를 편평하게 만든 개량형 격자지보재가 KICT (2009)에 의하여 개발되었다. 본 연구에서는 실내시험 및 현장 계측 결과를 통하여 기존 격자지보와 개량형 격자지보의 지보재로서의 성능을 비교평가하고자 한다.

2. 격자지보 제원 및 구성

격자지보재는 일반적으로 표준형 3개 강봉, 보강형 4개 강봉, 침하방지용 4개 강봉으로 분류되는데 국내에서는 주로 Fig. 1과 같은 표준형 3개 강봉 격자지보재를 사용하고 있다. 격자지보재는 각 유형별로 지반조건, 하중조건 및 시공조건 등에 따라 다양한 제원을 가지고 있으나 국내에서는 Table 1과 같은 3가지 유형만 주로 사용되고 있다.

격자지보재가 국내터널에서 활발히 사용되면서 강봉과 스파이더의 용접부위 취약성, 하중지지의 효율성 등의 문제점들이 제기되었다. 기존 스파이더는 상단의 1개 주강봉과 하단의 2개 부강봉과 접촉하는 부분에서 일정한 곡률을 가지고 있다. 이러한 곡률에 의해 강봉과 스파이더는 점접촉 및 곡선용접을 하여야 하며 곡선용접이 제대로 안 될 경우 접촉부에서 용접불량이 발생할 수 있다.

KICT (2009)은 실내실험, 수치해석 및 위상최적화 작업을 통하여 기존의 격자지보재와 동일한 강재량을 사용하면서도 기존 격자지보재의 단점을 보완하고 격자지보재의 지지성능을 향상시킨 개량형 격자지보

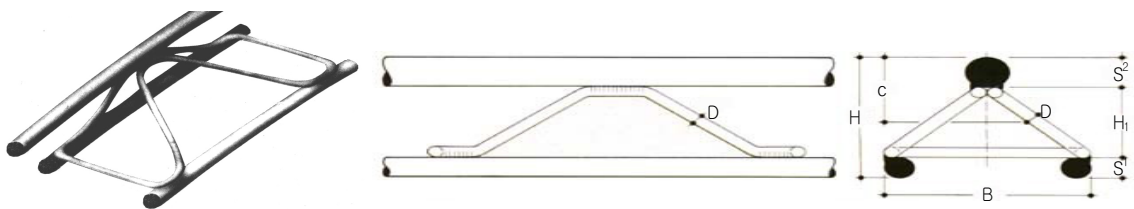


Fig. 1. Standard 3-bar lattice girder

Table 1. Dimension and specification of the standard 3-bar lattice girder

Type	Dimension (mm)					Area (cm ²)	Density (kg/m ³)	Second moment of area (cm ⁴)		Section modulus (cm ³)	
	S ¹	S ²	H	B	D			I _x	I _y	Z _x	Z _y
50	20	30	100	100	10	13.6	12.3	193	106	38	21
70	20	30	120	140	10	13.6	12.5	306	232	51	33
95	22	32	149	180	10	15.6	14.9	589	482	78	54

재를 개발하였다. Table 2는 기존 격자지보재에 사용되는 스파이더와 새롭게 개발된 2개의 개량형 스파이더를 보여주고 있다. 개량형 스파이더-1과 개량형 스파이더-2는 주강봉과 부강봉에 접촉하는 부분에서 최소 3 cm 이상 직선부분을 확보하여 선 접촉 용접이 가능하다. 개량형 스파이더-1은 주강봉에 작용하는

하중을 부강봉으로 전달하는 역할을 하며 역삼각형 형태를 가진다. 개량형 스파이더-1은 2개의 부강봉을 연결시키지 못하므로 개량형 스파이더-2를 이용하여 부강봉을 연결함으로써 주강봉과 부강봉을 일체화시킨다. Table 3은 한 종류의 스파이더를 사용하는 기존 격자지보재와 두 종류의 개량형 스파이더를 사용한

Table 2. Shape and dimension of spiders

Spider type	Dimension (mm)	Shape
Original spider		
Reformed spider-1		
Reformed spider-2		

Table 3. Shape of lattice girders

Specimen	Shape
Original lattice girders	
Reformed lattice girders	

개량형 격자지보재를 보여주고 있다. 개량형 격자지보재의 제원은 기본적으로 기존 격자지보와 동일하다.

3. 격자지보 실내 압축시험

본 연구에서는 기존 격자지보재와 개량형 격자지보재의 성능 비교 및 현장 계측에 사용될 로드셀의 정확도를 검증하기 위하여 격자지보재에 대한 압축시험을 수행하였다. 실험에 사용된 로드셀은 Kim and Kang (2012)에 의하여 개발되었는데 편심의 영향을 최소화

하기 위해 로드셀 내부를 Fig. 2 (a)와 같이 원형으로 깎고 원주형 봉을 원형으로 절삭하였으며 2.5인치 (6.35 cm) 진동현식 변형률 게이지를 Fig. 2 (b)와 같이 90° 간격으로 로드셀 내부의 원주 부분에 설치하였다.

제작된 로드셀의 게이지 상수 결정을 위하여 로드셀에 500~3,000 kg 까지 6단계로 하중을 가하였으며 2회 반복시험 후 평균값을 이용하여 로드셀의 게이지 상수를 결정하였다. 게이지 상수의 결정방법은 진동 초기값과 측정값의 차이를 계산한 후 이 값을 작용하중에 나누어 계산하였다. 총 6개의 로드셀에 대한



(a) Inside of the load cell

(b) Four strain gauges installed in the load cell

Fig. 2. Load cell developed for lattice girder instrumentation (Kim and Kang, 2012)

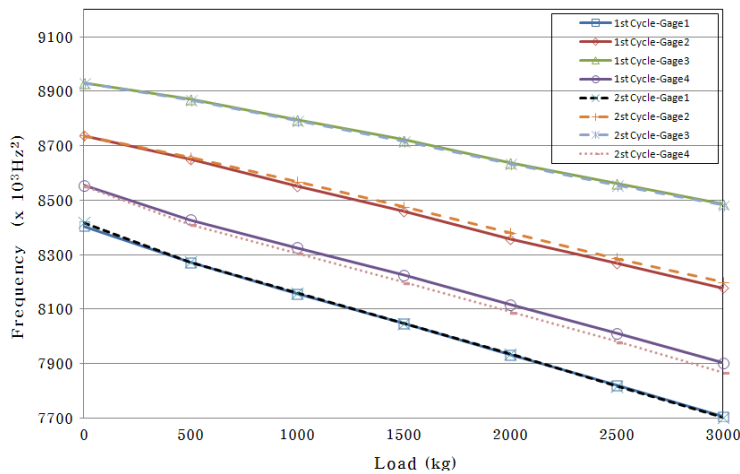


Fig. 3. Determination of the gauge factor for a load cell using the compression test

실험이 수행되었으며 하나의 로드셀에서 얻어진 대표적인 실험 결과 예는 Fig 3과 같다. 이 로드셀의 게이지 상수는 1.2676 kg/digit로 결정되었고 로드셀에 작용하는 하중은 식 (1)에 의하여 계산할 수 있다.

$$\text{작용 하중(kgs)} = \text{게이지 상수} \times (\text{초기값} - \text{측정값}) \quad (1)$$

기존 격자지보재와 개량형 격자지보재에 각각 3개씩 총 6개의 로드셀을 격자지보(Type-70*20*30) 시료



Fig. 4. Original (left) and reformed lattice girders used for the compression test

의 주강봉 1곳과 부강봉 2곳에 설치하여 압축시험을 수행하였다. 실험에 사용된 시료는 격자지보를 45 cm 높이로 절단한 후 Fig. 4와 같이 상부와 하부에 한 번의 길이가 0.21 m인 정사각형 철판을 용접하여 제작하였다. 격자지보 시료의 높이는 압축시험기의 제원과 스파이더를 포함한 격자지보재의 형상을 고려하여 결정하였다. Fig. 5는 격자지보에 부착된 로드셀 및 압축시험기에 설치된 격자지보를 보여주고 있다. 부강봉의 명칭은 Fig. 5와 같이 격자지보의 가장 굵은 주강봉을 관찰자와 가깝게 세운 상태에서 오른쪽은 부강봉 1, 왼쪽은 부강봉 2로 명명하였다.

격자지보에 대한 압축시험은 최대용량 50,000 kg의 일축압축시험기를 사용하였으며 1,000 kg부터 36,000 kg까지 여러 단계로 나누어 격자지보에 일정한 하중을 가한 상태에서 진동현식 측정기를 이용하여 각 단계별로 로드셀 계측을 수행하였다. 실험은 육안상 격자지보에 휨이 과도하게 발생되어 변형이 항복상태로 충분히 진행될 때까지 지속되었다. Fig. 6은 압축시험 후 개량형 격자지보의 변형된 모습을 보여주고 있으며 특히 부강봉 2에서 많은 변형이 발생되어 로드셀이 중심축에서 이탈되어 있는 것이 관찰

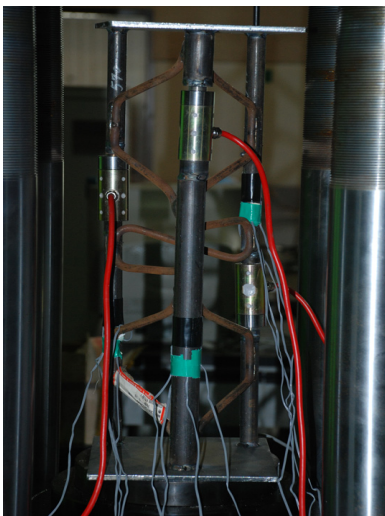


Fig. 5. Load cells installed in the lattice girder for the compression test

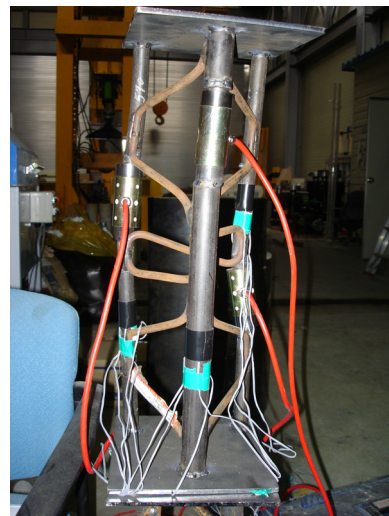


Fig. 6. Deformed shape of the reformed lattice girder after the compression test

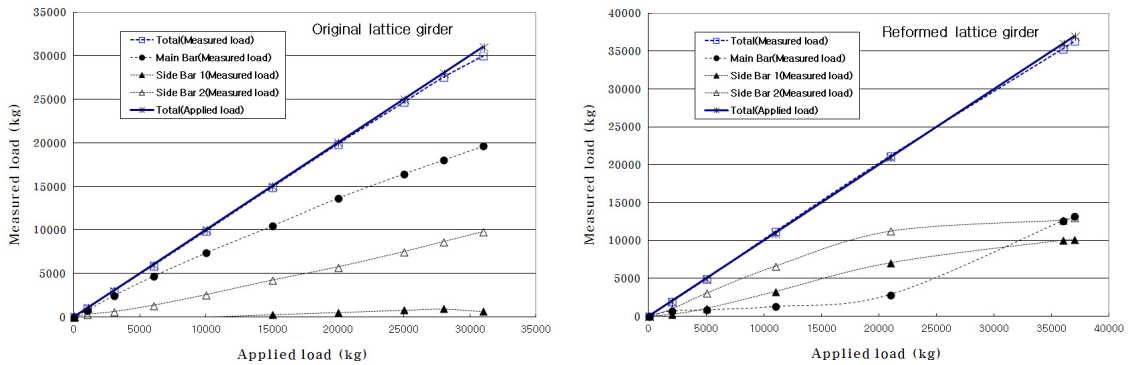


Fig. 7. Measured loads using load cells at the lattice girder for the each loading stage

된다. 격자지보는 특정 강봉에 과도한 변형이 발생되어 항복 상태까지 진행된 후에도 연성과파 양상을 보여서 상당히 큰 하중을 지지해 주고 있으며 스파이더는 강봉과 접촉을 유지하고 있었다.

실내 압축시험을 통하여 기존 격자지보재와 개량형 격자지보재를 비교해 본 결과 두 격자지보재의 최대 압축하중은 Fig. 7과 같이 기존 격자지보재가 31,000 kg이며 개량형 격자지보재가 36,000 kg으로 개량형 격자지보재가 약 16%정도 큰 지지하중을 보였다. 기존 격자지보재의 경우 31,000 kg의 하중이 작용했을 때 주강봉(19,613 kg), 부강봉 2 (9,776 kg), 부강봉 1 (627 kg)의 하중이 로드셀에서 측정되었다. 개량형 격자지보재는 36,000 kg의 작용하중에서 주강봉 (13,204 kg), 부강봉 2 (12,979 kg), 부강봉 1 (10,100 kg)의 하중이 측정되었다. 기존 격자지보와 개량형 격자지보에서 측정된 총 하중은 각각 30,016 kg과 36,283 kg으로 작용하중과 측정하중 사이에는 평균 2% 이내의 오차를 보여서 격자지보용 로드셀의 신뢰성이 검증되었다.

4. 격자지보 현장 시험

4.1 터널 개요

본 연구에서는 기존 및 개량형 격자지보재의 성능

비교평가를 위해 터널시험구간을 선정하고 지보재 거동을 현장 계측하였다. 계측이 이루어진 터널현장은 OO고속철도 O공구 OO터널로서 터널연장이 약 6,340 m인 장대터널이다. 본 현장의 경우 터널시점부에서 약 1.5 km 떨어진 지점에 계곡부가 위치하고 있는데 이 계곡부는 3~7 m의 매우 얇은 저토퍼 구간으로 구성되어 있어 개착터널로 굴착되었다. 또한 터널 중앙부에는 사갱을 두어 원활한 환기, 버럭처리, 양방향 굴착이 가능토록 설계되었으며 NATM 공법으로 시행되었고 상·하반 분할 굴착공법이 적용되었다.

터널구간 지질은 주로 엽리상 화강암으로 구성되어 있고 종점부에는 편마암, 반암, 화강암 등이 서로 교호하고 있다. 터널시공에 큰 영향을 미치는 단층대는 시점부, 종점부, 그리고 계곡부를 중심으로 발달되어 있으며 계곡부 구간에는 풍화가 크게 진행되어 매우 불량한 지반상태를 보인다.

계측 수행 구간은 지반상태가 불량하여 격자지보재에 작용하는 하중의 측정이 비교적 용이할 것으로 판단되는 지점을 선정하였다. 계측구간에 적용된 지보타입은 PD-6 타입이며 일차지보재는 격자지보 (Type-95*22*32)가 1 m 간격으로 강섬유보강 슛크리트(20 cm)와 함께 사용되었고 5 m 길이의 록볼트 (SD350)가 종방향 1 m 간격, 횡방향 1.2 m 간격으로 설치되었다. 또한 불량한 지반상태를 고려하여 길이 12 m의 소구경 보강 그라우팅 시공법이 적용되었다.

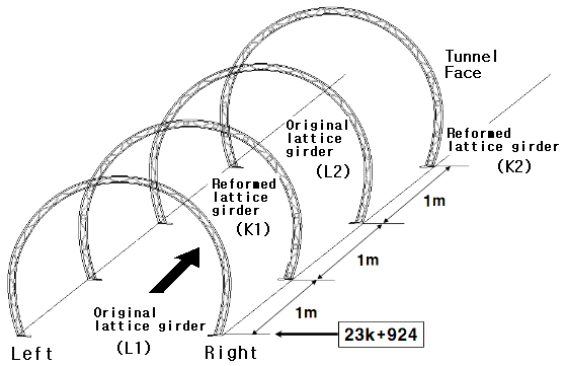


Fig. 8. Locations of instrumented lattice girders



Fig. 9. Load cells and vibration wire strain gauges installed in the lattice girder

4.2 현장 계측 현황

격자지보 계측은 7 m이내의 매우 얇은 토피를 갖고 터널 갱구부에서 불과 20 m 떨어진 NATM 구간에서 실시하였다. 계측 구간은 풍화암이 터널 인버트 하단 까지 발달되어 있고 저토피 구간이며 풍화가 매우 심하고 단층대도 통과하고 있어 터널의 아칭 효과를 크게 기대하기 어렵기 때문에 지보재에 상당한 지압이 작용할 것으로 예상하고 이 구간에 대해 격자지보재 거동계측을 집중적으로 실시하였다. Fig. 8은 시험 구간 20 m에 설치된 계측용 격자 지보재의 개수와 계측이 이루어진 기존 및 개량형 격자지보재의 배치도를 보여 주고 있다. 본 연구에서 격자지보 계측의 목적은 격자지보에 대한 하중지지효과, 특히 개량형 격자지보재와 기존 격자지보재의 성능비교에 중점을 두었으므로 1 m 간격으로 기존 격자지보재 L1, 개량형 격자지보재 K1, 기존 격자지보재 L2, 개량형 격자지보재 K2의 순서로 시공하였다. 그리고 나머지 16 m에 대해서는 1 m 간격으로 개량형 격자지보재들이 시공되었는데, 계측기기의 설치비용 등을 고려하여 K1, K2, L1, L2 등 4단면에 대해서만 계측이 수행되었다.

격자지보재의 거동특성을 파악하기 위하여 격자지보재에 로드셀과 2.5 인치(6.35 cm) 진동현식 변형률 게이지를 Fig. 9와 같이 설치하였다. 로드셀은 지반 하중을 충분히 지지할 수 있도록 로드셀 윗면과 아랫면에 각각 사각 연결판과 볼트를 이용하여 격자지보와 연결하였으며, 지면과 수직방향으로 터널바닥에서 좌, 우측 약 1 m 정도의 높이에 설치하였다. 로드셀은 좌, 우 측벽부에 각각 1개소의 주강봉과 2개의 부강봉에 설치되었으며 한 단면에 6개씩 총 24개의 로드셀이 사용되었다.

진동현식 변형률 게이지는 격자지보재 응력을 추가로 측정하고 종횡 방향의 휨 응력을 측정하기 위하여 격자지보재의 천단부와 좌,우측부 등 3개소에 설치하였다. 변형률 게이지는 각 강봉별로 전후, 좌우 등 4개 지점에 부착시켰으며 한 단면에 36개씩 총 144개의 변형률 게이지가 설치되었다.

4.3 현장 계측 결과 및 논의

격자지보 계측을 위하여 설치된 총 24개의 로드셀 중에서 Table 4와 같이 4개의 로드셀이 작동하지 않았다. 격자지보재는 지면부에 주강봉, 터널 내부 쪽에

Table 4. Working conditions of load cells installed at the lattice girder

Lattice girder	Sidewall (Left)			Sidewall (Right)		
	Main bar	Sidebar 1	Sidebar 2	Main Bar	Sidebar 1	Sidebar 2
L1	X	O	O	O	O	O
K1	O	O	O	O	O	O
L2	O	O	O	X	X	X
K2	O	O	O	O	O	O

O: Working, X: Failed

Table 5. Maximum normal loads measured using load cells installed at the lattice girder

Lattice girder	Sidewall (Left)			Sidewall (Right)			Sidewall (Total)		
	Normal load (kg)			Normal load (kg)			Total normal load (kg)		
	Simple addition	Calculation using Eq.(2)	Differ-ences	Simple addition	Calculation using Eq.(2)	Differ-ences	Simple addition	Calculation using Eq.(2)	Differ-ences
L1	-	-	-	8,170	8,359	189	-	-	-
K1	9,051	9,123	72	7,835	8,046	211	16,886	17,169	283
L2	8,780	8,973	193	-	-	-	-	-	-
K2	3,789	3,893	104	9,803	9,880	77	13,592	13,773	181

2개의 부강봉이 놓이도록 설치하였고 막장에 가깝게 설치된 부강봉을 부강봉 1, 먼 쪽을 부강봉 2로 명명하였다.

격자지보에 작용하는 하중은 실내 보정시험을 통하여 각 로드셀마다 얻어진 게이지 상수값과 식 (1)을 이용하여 산정하였다. 격자지보에 작용하는 축력은 단순히 1개의 주강봉 및 2개의 부강봉에서 측정된 하중을 합쳐서 계산하는 것이 일반적이지만 격자지보에 휨 응력이 작용되었을 수 있으므로 Kim et al. (2009)이 제안한대로 식 (2)를 이용하여 산정한 축력을 함께 계산하여 Table 5와 같이 비교하였다. 두 계산방법에 의하여 발생하는 오차는 최소 72 kg에서 최대 283 kg으로 발생된 축력에 비해서는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 본 논문에서는 측정 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 휨 응력을 고려한 축력을 제시하였다.

$$\text{축력(휨 응력 고려)} = A \times 0.5 \times \{ (L_M/a_1) + [(L_{s1} + L_{s2})/a_2] \times 0.5 \} \quad (2)$$

식 (2)에서 A, a₁, a₂는 각각 전체 격자지보, 주강봉, 부강봉의 단면적이며 L_M, L_{s1}, L_{s2}는 각각 주강봉, 부강봉 1, 부강봉 2에서 측정된 로드셀 하중이다.

로드셀을 이용한 격자지보재 축력 측정 결과는 Fig. 10과 같다. 축력 크기의 변화 경향은 모든 강봉에서 유사하며 단지 K2 좌측부에서만 3,893 kg의 상당히 낮은 축력이 측정되었다.

L1 격자지보재의 축력 측정 결과는 Fig. 11과 같으며 좌측부 주강봉에서는 로드셀이 파손되어 계측값을 얻지 못했다. 측정된 축력은 우측 주강봉에서 811 kg으로 가장 작고 좌측 부강봉 2에서 5,265 kg으로 가장 크다.

주강봉의 단면적(8.04 cm²)이 부강봉의 단면적(3.80 cm²)에 비하여 더 크므로 이론적으로는 주강봉에 더 큰 축력이 작용하는 것이 일반적이지만 우측 부강봉에서 측정된 하중의 경우, 부강봉 1은 3,315 kg, 부강봉 2는 4,045 kg으로 811 kg이 작용한 주강봉에 비하여 더 큰 축력이 측정되었다. 주강봉보다 부강봉에 더 큰 하중이 작용하는 원인으로서는 주강봉에

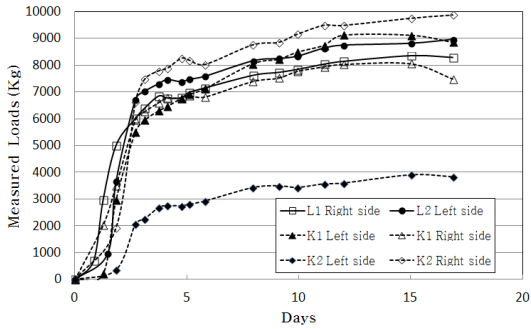


Fig. 10. Measured normal loads using load cells at the lattice girder

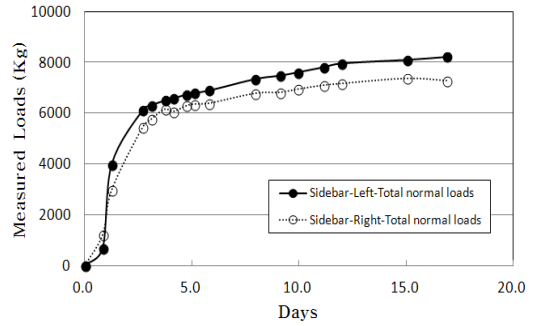


Fig. 12. Measured normal loads at the sidebar of L1 lattice girder

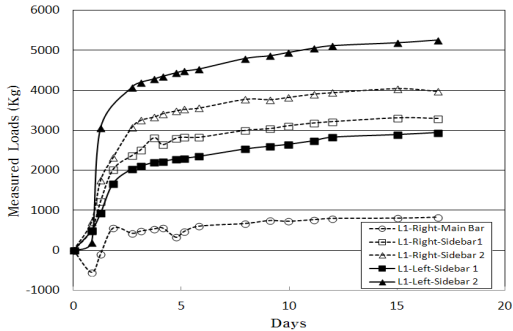


Fig. 11. Measured normal loads using load cells at the L1 lattice girder

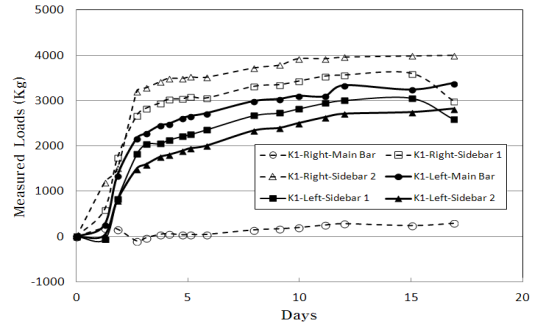


Fig. 13. Measured normal loads using load cells at the K1 lattice girder

하중이 실제로 적게 작용한 경우, 격자지보재가 부강봉이 위치한 터널 내부 방향으로 휘는 경우, 로드셀의 측정 오차 등이 있을 수 있다. 주강봉의 로드셀에 부착된 4개의 변형률 게이지 측정 결과에 의하면 모든 게이지가 일률적으로 적은 하중을 받고 있음이 관찰 되었으므로 로드셀의 측정오차는 주강봉 하중이 작게 측정된 것의 원인이 아닌 것으로 판단된다.

격자지보재의 구조상 휨 응력이 없이 부강봉에 비하여 주강봉에만 특별히 하중이 작게 작용하기는 어려우며 따라서 주강봉 하중이 작은 것은 주강봉과 부강봉 사이의 휨 응력에 의한 것으로 판단된다. 즉, 주강봉과 부강봉 사이의 휨은 부강봉에 압축응력을 증가시키는 방향으로 발생하였으며 주강봉과 부강봉 사이의 휨 응력은 약 432 kg/cm^2 으로 계산되었다.

L1 좌측부의 주강봉 계측자료를 얻지 못했으므로

우측부와의 하중 비교가 어려우나 부강봉의 하중만 비교하면 Fig. 12와 같이 유사한 경향을 보이며 좌측부 부강봉이 우측부 부강봉에 비해 855 kg 정도 큰 값을 보인다.

L2 격자지보재의 경우 우측부의 3개 강봉에 설치한 로드셀은 모두 작동하지 않았으며 공사 중 부주의로 게이지가 파손된 것으로 판단된다. 격자지보재의 좌측부에서 측정된 축력은 주강봉에서 1,041 kg으로 가장 작고 부강봉 1은 4,148 kg으로 가장 크며 부강봉 2는 3,590 kg이 측정되었다.

K1 격자지보재의 축력 측정 결과는 Fig. 13과 같다. 측정된 축력은 우측 주강봉에서 245 kg으로 가장 작고 우측 부강봉 2에서 3,986 kg으로 가장 크다. K1 격자지보재의 좌측부와 우측부에 작용한 축력을 합친 최대 하중 값은 17,169 kg이다.

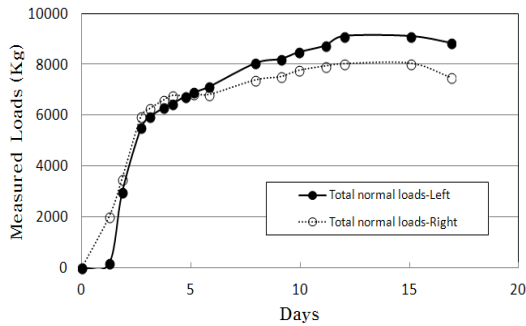


Fig. 14. Total normal loads measured at the K1 lattice girder

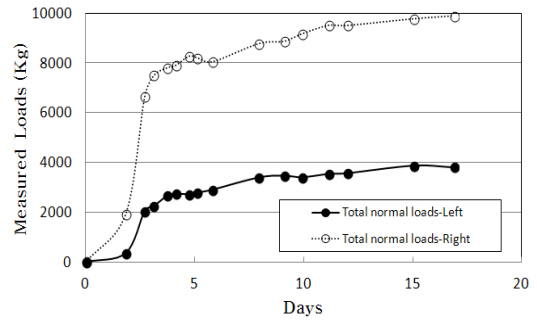


Fig. 16. Total normal loads measured at the K2 lattice girder

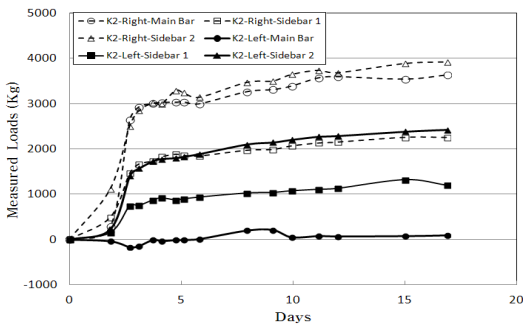


Fig. 15. Measured normal loads using load cells at the K2 lattice girder

K1 좌측부와 우측부의 축력 결과를 종합하여 비교 하면 Fig. 14와 같이 서로 유사한 경향을 보인다. 좌측 부 강봉 축력의 합은 8,859 kg으로 우측부 축력의 합인 8,045 kg에 비해 814 kg 정도 큰 값을 보이는데 이렇게 좌측부에 더 큰 하중이 작용하는 것은 L1 계측 결과와 일치한다.

K2 격자지보재의 계측 결과는 Fig. 15와 같다. 측정 된 축력은 좌측부 주강봉에서 78 kg으로 가장 작고 우측 부강봉 2에서 3,922 kg으로 가장 크다. 좌측부 주강봉에서 측정된 78 kg의 매우 낮은 축력 측정 결과에 대한 신뢰성을 검토하기 위하여 로드셀 내부에 설치된 4개의 변형률 게이지의 측정값을 조사한 결과 3개의 게이지는 -33 kg, -69 kg, -279 kg으로 인장값을 보였고 1개의 게이지는 458 kg으로 압축값을 보였다. 계측값들이 일관성을 보이므로 게이지 결함에 의한

측정오차는 아닌 것으로 판단된다. 좌측부 부강봉의 축력도 K1 격자지보재의 부강봉의 축력보다 약 2,000 kg 작으므로 전반적으로 K2 좌측부에는 작은 축력이 작용하였다. K2 우측부에는 Fig. 16과 같이 9,880 kg의 큰 축력이 작용하였으나 지보재의 좌측부와 우측부의 하중 증가 추세는 유사하였다. K2 격자지보재 전체의 최대 하중값은 13,773 kg이며 K1 격자지보재에 작용한 하중보다 3,396 kg의 더 작은 축력이 작용하였다.

격자지보재에 작용하는 축력 및 휨 응력 측정을 위하여 양 측벽부와 천단부에 진동현식 변형률 게이지를 설치하였다. 각 강봉마다 터널 중 방향과 횡 방향으로 2개씩 총 4개의 2.5인치 진동현식 변형률 게이지가 사용되었다. 계측에 사용된 게이지는 강봉 3개(주강봉, 부강봉1, 부강봉2), 3개 지점(좌측부, 우측부, 천단부), 4개 게이지(중 방향 2, 횡 방향 2), 격자지보재 4개(L1, K1, L2, K2)이므로 총 144개의 게이지가 설치되었다. 게이지는 횡 방향(지면부-1번, 터널 내부-3번), 중 방향(막장쪽-2번, 터널 후방쪽-4번)으로 번호를 부여하였다. 변형률 게이지의 작동현황은 Table 6에 요약되어 있는데 총 144개의 변형률 게이지 중에서 작동 게이지는 93개(O)이고 51개(X)는 작동하지 않았다. 변형률 게이지 손실의 주요 원인은 공사 중 부주의로 인한 게이지 파손이었다.

변형률 게이지 측정값을 변형률로 환산할 때는 Kim and Park (2008)에 의하여 실내시험을 통하여 얻어진

Table 6. Working conditions of strain gauges installed at the lattice girder

Lattice girder	Bar type	Sidewall (Left)				Crown				Sidewall (Right)			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
L1	Main bar	O	O	O	O	X	O	X	X	X	O	O	X
	Sidebar 1	O	O	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O
	Sidebar 2	O	X	X	O	X	X	X	X	O	O	O	O
K1	Main bar	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O
	Sidebar 1	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	X	O
	Sidebar 2	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
L2	Main bar	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	Sidebar 1	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	Sidebar 2	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X
K2	Main bar	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O
	Sidebar 1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	Sidebar 2	O	X	X	O	O	X	X	O	X	X	X	O

O: Working, X: Failed

0.3767을 게이지 상수로 사용하였으며 격자지보재의 탄성계수는 Kim et al. (2009)에 의하여 제안된 2,240,000 kg/cm²을 사용하였다.

L1 격자지보재의 우측 부강봉 1에서 측정된 응력 측정 결과는 Fig. 17과 같다. 횡 방향으로 설치된 게이지 1번과 3번의 결과를 비교해보면 강봉이 3번 방향(터널 내부 방향)으로 휘어졌으며 따라서 1번에는 최대 561 kg/cm²의 인장응력이 작용하였고 3번에는 최대 839 kg/cm²의 압축응력이 작용하였다. 힘의 방향은 로드셀 계측 결과와 일치한다. 종 방향으로 설치된 게이지 2번과 4번의 계측 결과에 의하면 강봉이 2번

방향(막장 방향)으로 휘어졌으며 따라서 2번에는 최대 610 kg/cm²의 압축응력이 작용하였고 4번에는 2번보다 작은 최대 520 kg/cm²의 압축응력이 작용하였다.

L1-우측 부강봉 1의 휨 응력 계산 결과에 의하면 횡 방향은 450 kg/cm², 종 방향은 약 80 kg/cm²에서 수렴되었으며 따라서 횡 방향에 비하여 종 방향으로 는 지보재의 휨이 약하게 발생하였다. 이러한 현상은 L2-좌측부-주강봉의 휨 응력(횡 방향: 603 kg/cm², 종 방향: 187 kg/cm²)과 K2-천단부-부강봉 1의 휨 응력(횡 방향: 869 kg/cm², 종 방향: 47 kg/cm²)에서도 동일하였다. 그러나 L2-좌측부-부강봉 1의 계측 결과는 종 방향으로도 상당히 큰 휨 응력(횡 방향: 623 kg/cm², 종 방향: 466 kg/cm²)이 발생되고 있음을 보여 주고 있으며 K1-좌측부-부강봉 1에서는 종 방향으로 더 큰 휨 응력(횡 방향: 483 kg/cm², 종 방향: 900 kg/cm²)이 측정되었다. 변형률 게이지에서 측정된 강봉의 휨 방향은 대체로 로드셀 결과와 일치함을 확인 하였다.

대체적으로 변형률 게이지에 의한 격자지보재의 계측 결과는 만족스럽지 못하다. 설치 과정에서 손상이 심해서 65%정도만이 작동을 하였으며 각 강봉에 설치된 4개의 변형률 게이지 중에서 1개만 작동을

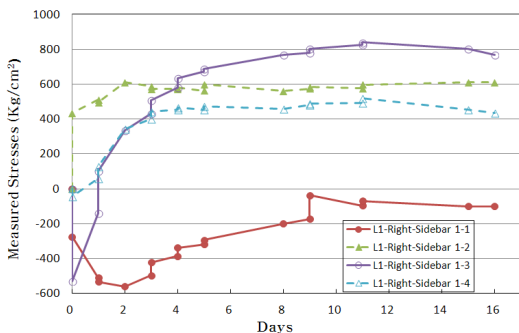


Fig. 17. Stresses measured using strain gauges at the sidebar 1 of L1 lattice girder

Table 7. Maximum normal loads, bending stresses, and normal stresses measured using load cells at the lattice girder

Lattice girder	Sidewall (Left)					Sidewall (Right)				
	Normal loads (kg)			Bending stresses	Normal stresses	Normal loads (kg)			Bending stresses	Normal stresses
	Main bar	Sidebar 1	Sidebar 2	(kg/cm ²)		Main bar	Sidebar 1	Sidebar 2	(kg/cm ²)	
L1	Failed	2,950	5,265	-	-	811	3,315	4,045	434	534
K1	3,337	3,007	2,707	168	583	245	3,604	3,986	484	513
L2	1,041	4,148	3,590	444	574	Failed	Failed	Failed	-	-
K2	78	1,326	2,385	239	249	3,626	2,254	3,922	181	632

하지 않을 경우 나머지 3개의 변형률 게이지 결과도 사용할 수 없으므로 실제 계측에 사용된 게이지는 64개에 불과하다. 또한 Kim et al. (2008)의 격자지보 계측과 본 계측 현장에서의 측정 결과에 의하면 강봉의 휨은 방향이 일정하지 않으므로 격자지보재의 축력 측정을 위하여 변형률 게이지를 사용하는 것은 바람직하지 못하며 로드셀을 이용한 격자지보재 계측이 권장된다.

격자지보재에서 로드셀을 이용하여 측정한 최대 축력, 휨 응력 및 축 응력은 Table 7과 같다. 계측이 이루어진 모든 격자지보재에서 주강봉과 부강봉 사이의 휨은 부강봉에 압축응력을 증가시키는 방향으로 발생하였다. 따라서 K1 좌측부를 제외한 대부분의 격자지보재에서 주강봉보다 부강봉에 더 큰 하중이 작용하였다. 휨 응력은 K1 우측부에서 484 kg/cm²으로 가장 크며 K1 좌측부는 168 kg/cm²으로 가장 작다. 축 응력은 K2 우측부에서 632 kg/cm²으로 가장 크며 K2 좌측부에서 249 kg/cm²으로 가장 작다. 또한 평균적으로 터널 우측부가 좌측부에 비해 더 큰 축 응력(좌측: 469 kg/cm², 우측: 560 kg/cm²) 및 휨 응력(좌측: 284 kg/cm², 우측: 366 kg/cm²)이 작용하였다.

기존 격자지보재(L1, L2)와 개량형 격자지보재(K1, K2) 사이의 평균 휨 응력을 비교해 본 결과, 기존 격자지보재는 좌측부(444 kg/cm²), 우측부(434 kg/cm²)이고 개량형 격자지보재는 좌측부(204 kg/cm²), 우측부(333 kg/cm²)로서 개량형 격자지보재가 기존

격자지보재에 비하여 더 작은 휨 응력을 받는 것으로 측정되었다. 이것은 개량형 격자지보재가 기존 격자지보재 보다 강봉들을 연결해주는 연결용 부재(spider)가 하나 더 추가되었고 강봉의 연결 부재가 더 넓은 면적으로 부착되어 있어 강봉의 휨이 더 작게 발생되었기 때문으로 판단된다.

기존 격자지보재와 개량형 격자지보재 사이의 평균 축 응력을 비교해 본 결과, 기존 격자지보재는 좌측부(574 kg/cm²), 우측부(534 kg/cm²)이고 개량형 격자지보재는 좌측부(416 kg/cm²), 우측부(573 kg/cm²)로서 두 지보재간에 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었다. 이것은 Table 5에서와 같이 K2 좌측부에서 발생된 최소 축력(3,893 kg) 및 K2 우측부에 작용한 최대 축력(9,880 kg)은 실내에서의 일축압축시험 결과에서 얻어진 두 격자지보재의 축력에 대한 강도인 31,000~36,000 kg에 비하여 상당히 작은 값이므로 측정되는 축력에 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다.

결론적으로 계측 결과를 분석한 결과 개량형 격자지보재는 기존 격자지보재에 비하여 발생하는 축력은 유사하나 연결용 부재의 강화로 휨이 적게 발생하였다. 따라서 격자지보재의 일축압축강도에 근접하는 하중이 격자지보재에 작용할 경우 개량형 격자지보재는 기존 격자지보재에 비하여 지보재 자체의 압축강도가 약 16% 크다는 장점 이외에도 강봉의 휨이 적게 발생하여 터널의 안정성 측면에서 더 우수한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 격자지보와 개량형 격자지보에 대한 실내시험 및 현장계측을 수행하여 개량형 격자지보의 성능을 평가하였다. 본 연구로부터 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 계측이 이루어진 모든 격자지보재에서 휨은 부강봉에 압축응력을 증가시키는 방향으로 발생하였다. 따라서 본 연구대상 현장의 경우에는 개량형 격자지보재 K1 좌측부를 제외한 대부분의 격자지보재에서 주강봉보다 부강봉에 더 큰 하중이 작용하였다.
2. 격자지보재 계측에 변형률 게이지를 사용할 경우 설치과정에서 파손이 심하고 계측 결과의 신뢰성이 떨어지므로 로드셀을 이용한 격자지보재 계측이 권장된다.
3. 기존 격자지보재와 개량형 격자지보재에 발생되는 축 응력의 크기는 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 이것은 본 터널 현장에의 격자지보재에 작용한 축력이 두 격자지보재의 강도인 31,000 ~ 36,000 kg에 비하여 상당히 작은 값이므로 측정되는 축력에 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.
4. 개량형 격자지보재가 기존 격자지보재에 비하여 더 작은 휨 응력을 받는 것으로 측정되었으며 이러한 현상의 원인은 개량형 격자지보재가 기존 격자지보재보다 강봉들을 연결해주는 연결용 부재(spider)가 하나 더 추가되었고 강봉의 연결 부재가 더 넓은 면적으로 부착되어 있어 강봉의 휨이 더 작게 발생되었기 때문으로 판단된다.
5. 연구가 수행된 터널의 경우 격자지보재에 작용한 하중이 격자지보재의 강도와 비교해서 크지 않으므로 개량형 격자지보재의 우수성을 충분히 검증하지는 못하였다. 그러나 격자지보재의 일축압축강도에 근접하는 하중이 격자지보재에

작용할 경우 개량형 격자지보재는 기존 격자지보재에 비하여 지보재 자체의 압축강도가 약 16% 크다는 장점이외에도 기존 격자지보재에 비하여 강봉의 휨이 적게 발생하여 터널의 안정성 측면에서 더 우수한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. KICT (1995), "A study of the effectiveness of lattice girders for tunnel support", Sambo Construction Equipment Manufacturers, 196p.
2. KICT (1996), "Study of the applicability of lattice girders for tunnel support", Chunwon Industry, 281p.
3. KICT (2009), "Development of rapid and safe tunnel construction method using IT and new materials (4th)", Report, Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs.
4. Kim, D.G., Bae, G.J. (2008), "Development of a laboratory testing method for evaluating the loading capacity of lattice girder", Tunnelling Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 371-382.
5. Kim, H.J., Jin, S.H., Park, S.H. (2008), "Field measurements for the lattice girder and the shotcrete lining", The Journal of Engineering Geology, The Korean Society of Engineering Geology, Vol. 19, No. 1, pp. 93-102.
6. Kim, H.J., Kang, H.W. (2012), "Tunnel instrumentation on the lattice girder using load cells", The Journal of Engineering Geology, The Korean Society of Engineering Geology, Vol. 22, No. 3, pp. 323-330.
7. Kim, H.J., Park, S.H., Lee, K. (2009), "Suggested method for the tunnel instrumentation on the lattice girder from the results of the laboratory test using load cells", The Journal of Engineering Geology, The Korean Society of Engineering Geology, Vol. 19, No. 3, pp. 269-275.
8. Ministry of Construction & Transportation (1996), "Standard Specification for Tunnelling", Korean

- Tunnelling Association, 154p.
9. 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.
 10. 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.
 11. Yoo, C.S., Kim, Y.J., Bae, G.J., Moon, H.D. (1997), "An experimental study on load bearing capacity of lattice girder as a steel support in tunnelling", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 13, No. 4, pp. 163-175.