

격자지보재(Lattice Girder)의 실내성능평가기법 개발

김동규^{1*}, 배규진²

Development of a laboratory testing method for evaluating the loading capability of lattice girder

Dong-Gyou Kim, Gyu-Jin Bae

Abstract The objective of this study is to develop the laboratory testing method for evaluating the loading capacity of lattice girder used for support in tunnel structure. 3-point flexible strength test and 4-point flexible strength test were performed on three types of lattice girder, such as LG-50×20×30, LG-70×20×30, and LG-95×22×32, mainly used in Korea. Two types of loading position for each flexible strength test were used to analyze the behavior of load-deformation. The loading distribution in the lattice girder was analyzed by means of strains measured by strain gauges attached on chords and diagonal bars. In 3-point flexible strength test, the difference of the average of maximum flexible strength according to loading position had the range from 10% to 33%. In 4-point flexible strength test, the average of maximum flexible strength according to loading position was almost no difference. The difference between the average of maximum flexible strengths obtained from 3-point and 4-point flexible strength tests was from 13.55% to 31.55%. The load applied on the lattice girder was concentrated to the main chord in 3-point flexible strength test. The load applied on the lattice girder in 4-point flexible strength test was distributed to three chords and diagonal bars.

Keywords: Lattice girder, flexible strength, loading capacity evaluation technique

요 지 본 연구의 목적은 국내터널현장에서 강지보재로 주로 사용되어지고 격자지보재(Lattice Girder)의 공학적인 성능을 보다 객관적으로 판단하기 위한 실내성능평가기법의 제안에 있다. 본 연구를 위하여 국내에서 격자지보재로 주로 사용되는 LG-50×20×30, LG-70×20×30, 및 LG-95×22×32를 사용하여 3-point 휨강도 실험 및 4-point 휨강도 실험을 수행하였다. 또한, 하중재하위치에 따른 격자지보재의 하중-변위거동을 분석하기 위하여 각각의 실험방법에서 두 가지 하중재하방식을 사용하여 실험을 수행하였다. 각 부재에 스트레인 게이지를 부착하여 각각의 실험방법에 따라 각 부재에 작용하는 하중분포를 분석하였다. 3-point 휨강도 실험에 적용한 두 가지 하중재하방식으로 측정된 평균 최대하중은 10%~33%까지 차이가 나타났으며, 4-point 휨강도 실험에 적용한 두 가지 하중재하방식에 의해 측정된 평균 최대하중은 거의 차이가 없었다. 4-point 휨강도 실험의 평균 최대하중은 3-point 휨강도 실험보다 13.55% ~ 31.55%와 정도 크게 나타났다. 3-point 휨강도 실험은 주강봉에 주로 하중이 집중되는 반면 4-point 휨강도 실험은 각 부재로 비교적 골고루 하중이 작용하는 것으로 나타났다.

주요어: 격자지보재, 휨강도, 성능평가기법

1. 서 론

국내에서 터널에 적용되는 NATM은 서울지하철 3호선 및 4호선 건설당시 국내에 처음으로 소개된 후 현재 발파굴착공법의 표준으로 자리잡고 있다. NATM의 지보재중에 하나인 강지보재는 굴착직후 타설되는 슛크리트가 완전히 경화되기 전까지 지반의 초기변형을 억제하기 위해 사용되어 지고 있다. NATM도입초기에는 강지보재로 H형강을 사용하였으나, H형강은 자체중량이

무거워 시공성이 떨어지고, 후속되는 지보재의 시공에도 영향을 주어 종종 공기지연을 발생시키기도 하였다. 또한, 슛크리트 타설시 H형강 배면과 굴착 지반사이에 공동이 발생하여 굴착지반과 지보재가 완전히 밀착되지 않거나, 슛크리트와 강지보재가 일체화되지 않는 경우도 발생하였다. 그래서, 유럽에서는 80년대부터 시공성 향상 및 굴착지반과 지보재의 완전 밀착을 위해 격자지보(Lattice Girder)를 개발하여 사용하고 있다(Baumann and Betzle, 1984). 국내에서는 90년대초부터 격자지보재의 국내실정 적합성 연구를 수행한 후(한국건설기술연구원, 1996, 문홍득, 1997) 현재는 터널갱구부, 저토 피구간 및 연약지반을 제외한 모든 지반조건에서 격자

¹정회원, 한국건설기술연구원, 지하구조물연구실 선임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원, 지하구조물연구실 책임연구원

*교신저자: 김동규 (dgkim2004@kict.re.kr)

지보재를 강지보재로 사용하고 있다.

일반적으로 격자지보재는 고강도의 특수강을 사용하여 수작업에 의한 용접으로 제작되므로 격자지보재의 품질이 보증되지 않을 경우 터널 공사중 사고의 원인이 되기도 한다. 독일 연방철도국에서 제안한 격자지보재의 품질검사는 재질특성, 용접검사 및 3-point 휨강도 실험으로 구성되어 있지만 이 중 격자지보재의 공학적인 특성을 파악할 수 있는 3-point 휨강도 실험에서는 간격이 1.5 m 인 지지점에 시편을 놓고 하중을 지지점 중간에 적용한다는 내용만 있을 뿐 구체적인 실험절차나 방법(하중제어방식 또는 변위제어 방식)이 제시되어 있지 않다. 이러한 경우 실험자의 주관에 의해 격자지보재의 공학적인 성능은 매우 상이하게 나타날 수 있다.

본 연구에서는 격자지보재의 공학적인 성능을 보다 객관적으로 판단하기 위하여 3-point 휨강도 실험에서 하중재하위치에 따른 성능평가와 콘크리트분야에서 적용되어지고 있는 4-point 휨강도 실험에서 하중재하위치에 따른 성능평가를 수행하였다. 또한 스트레인 게이지를 이용하여 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험시 격자지보재의 각 부재에 작용하는 하중분포에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 위해서 국내서 주로 사용되고 있는 세 가지 타입의 격자지보재인 LG-50×20×30, LG-70×20×30, 및 LG-95×22×32를 사용하였다.

2. 시편 및 실험방법

2.1 격자지보재 실험시편

그림 1은 본 연구에서 사용된 세 가지 타입(그림 1에서 위부터 LG-90×22×32, LG-70×20×30, LG-50×20×30)의 격자지보재를 보여주고 있다. 표 1은 세 가지 타입의 격자지보재의 제원을 보여주고 있으며, 격자지보재를 구성하는 1개의 주강봉과 2개의 보조강봉의 최소항복강도는 510 N/mm²이고, 주강봉과 보조강봉을 연결해 주는 스파이더의 최소항복강도는 500 N/mm²이다. 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험을 위한 지지점 간격은 독일 연방철도국에서 제안한 1.5 m를 그대로 적용하기로 하였으며, 하중재하점에 따라 지지점사이의 중심선을 기준으로 시편모양이 최대한 대칭을 이룰 수 있도록 시편은 2.0 m 이상으로 제작하였다.

2.2 실험 방법 및 절차

실내성능평가실험에 대한 평가 및 개발을 위하여 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험을 적용하여 다양한 경우에 대하여 실내실험을 수행하였다. 두 실험 방식에서는 변위제어방식을 채택하였으며 변위제어속도는 2.0 mm/min을 적용하였다(김동규 외, 2007).

그림 2는 한국건설기술연구원서 보유하고 있는 유



그림 1. 세 가지 타입의 격자지보재 시편

표 1. 격자지보재의 특성

| 종류 | 스파이더 직경(mm) | 강봉 항복강도(N/mm ²) | 스파이더 항복강도(N/mm ²) |
|-------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------|
| LG-50×20×30 | 10 | 510 | 500 |
| LG-70×20×30 | 10, 12 | 510 | 500 |
| LG-90×22×32 | 10, 12 | 510 | 500 |

압서브 다목적 인장압축장비를 이용한 3-point 휨강도 실험을 보여주고 있다. 그림 3은 3-point 휨강도 실험에 적용된 두 가지 하중재하방식을 보여주고 있다. 그림 3(a)는 하중을 스파이더와 스파이더 사이에 적용하는 경우(취약부)이고, 그림 3(b)는 하중을 스파이더와 주강봉의 접촉부에 적용하는 경우(접촉부)를 보여주고 있다. 그림 4는 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 유압서브 다목적 인장압축장비를 이용한 4-point 휨강도

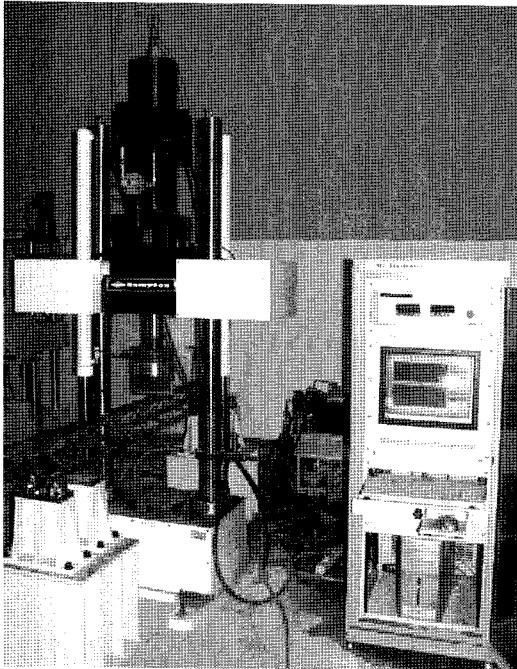
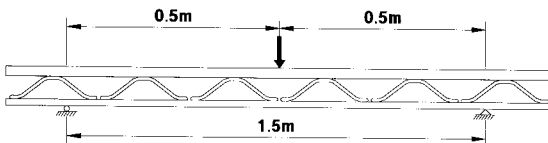
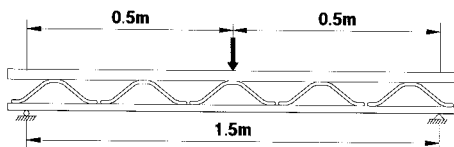


그림 2. 다목적 인장압축시험기를 이용한 3-point 휨강도 실험



(a) 하중재하점: 스파이더와 스파이더 사이(취약부)



(b) 하중재하점: 스파이더와 주강봉 접촉부(접촉부)

그림 3. 3-point 휨강도 실험에 적용된 두 가지 하중재하방식

실험을 보여주고 있다. 그림 5는 4-point 휨강도 실험에 적용된 두 가지 하중재하방식을 보여주고 있다. 그림 5(a)는 시편에 가해지는 두개 하중의 중심선을 스파이더와 주강봉 접촉부에 위치시키는 경우(접촉부)이고, 그림 5(b)는 시편에 가해지는 두개 하중의 중심선을 스파이더와 스파이더 사이에 위치(취약부)하는 경우를 보여주고 있다.

그림 6은 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험 시 격자지보재의 각 부재에 작용하는 하중분포를 파악하기 위해 각 부재에 부착된 스트레인 게이지의 위치를 보여주고 있다. 3-point 휨강도 실험의 경우, 스트레인 게이지는 주강봉 상단에 2개, 주강봉 하단에 1개, 하중재하점을 기준으로 양쪽 스파이더에 각 1개, 두 개의 보

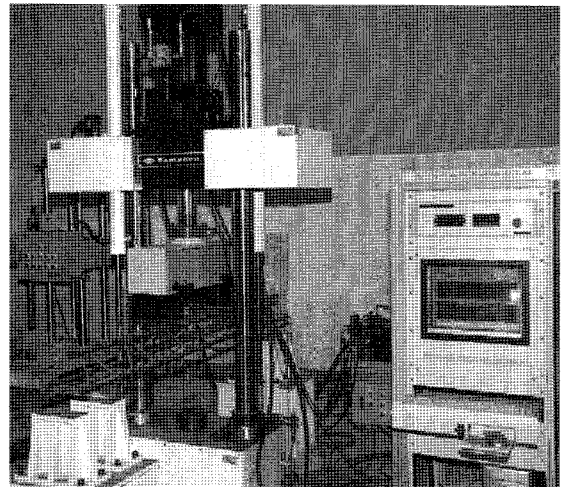
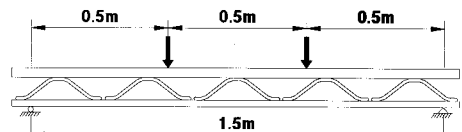
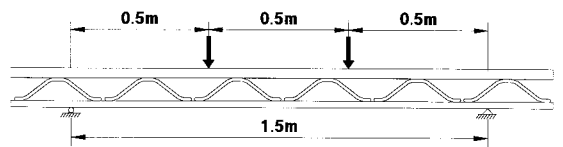


그림 4. 다목적 인장압축시험기를 이용한 4-point 휨강도 실험



(a) 하중 중심선: 스파이더와 주강봉 접촉부(접촉부)



(b) 하중 중심선: 스파이더와 스파이더 사이(취약부)

그림 5. 4-point 휨강도 실험에 적용된 두 가지 하중재하방식

조강봉 하단에 각 1개씩 부착되었다. 4-point 휨강도 실험의 경우, 재하되는 두개 하중의 중심선을 기준으로 각 부재에 부착된 스트레인 게이지는 주강봉 상단에 1개, 주강봉 하단에 2개, 각 스파이더에 1개, 두 개의 보조강봉 하단에 각각 1개이다.

식 (1)은 독일연방철도국에서 제안한 격자지보재의 성능평가식이고 이 식을 사용하여 본 연구에서 사용된 격자지보재의 성능을 평가하였다. 실내 휨강도 실험에서 측정된 최대하중의 80%에 해당하는 하중에 대응하는 실제 변위는 단순보 이론에서 계산된 중앙의 최대변위의 5배보다 작아야 한다. 독일연방철도국에서는 3-point 휨강도 실험만 제안하여 4-point 휨강도 실험을 위한 이론적 변위량은 단순보 이론을 적용하여 아래와 같이 나타내었다.

$$\frac{f_i(\text{실제적 변위량})}{f_r(\text{이론적 변위량})} \leq 5 \quad (1)$$

여기서, f_r : 이론적 변위량(단순보에서 중앙부의 최대 처짐량)

$$3\text{-point 경우: } f_r = \frac{P_{\max} \times L^3}{48 \times E \times J}$$

$$4\text{-point 경우: } f_r = \frac{23 \times P_{\max} \times L^3}{648 \times E \times J}$$

P_{\max} : 휨강도 실험에서 측정된 최대하중(kg)

L : 지지점 간격(150 cm)

E : 탄성계수(kg/cm²)

J : 단면이차모멘트(cm⁴)

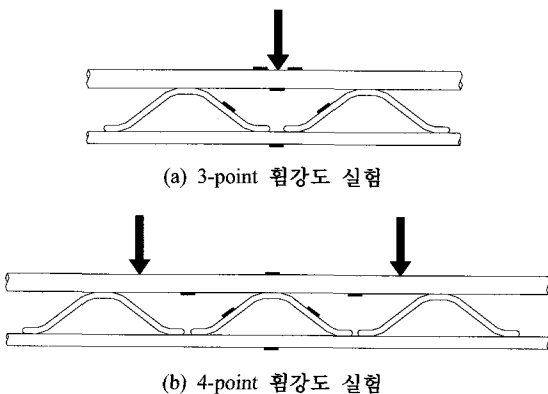


그림 6. 스트레인 게이지 부착위치

f_i = 실제적 변위량($P_{\max} \times 0.8 = P$ 의 하중으로 누를때 실제적 변위량(mm))

3. 실험결과와 비교 및 분석

3.1 하중재하지점

그림 7에서 9는 LG-50×20×30, LG-70×20×30 및 LG-95×22×32에서 수행된 3-point 휨강도 실험결과를 보여주고 있다. 여기서 사용된 격자지보재의 스파이더 직경은 10 mm이며 각각의 경우를 위해 4개이상의 시편을 사용하여 실험을 수행하였다. 각각의 실험결과에서 검은색으로 표시된 하중-변위 곡선은 하중을 스파이더와 주강봉의 접촉부(접촉부)에 적용한 결과이며, 회색으로 표시된 하중-변위 곡선은 하중을 스파이더와 스파이더 사이(취약부)에 적용한 결과이다. 하중을 스파이더와 주강봉의 접촉부에 적용하여 측정한 최대하중은 스파이더와 스파이더 사이에 하중을 적용하여 측정한 최대하중보다 크게 나타났다. 격자지보재의 규격이 커질수록 하

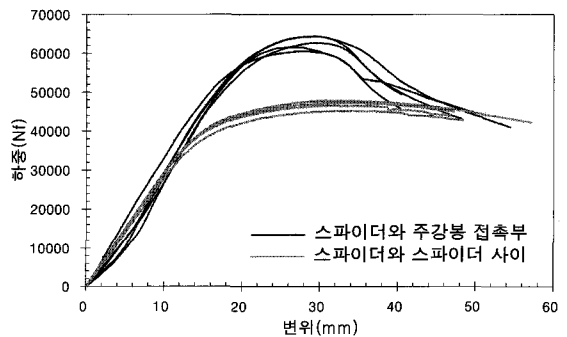


그림 7. LG-50×20×30의 3-point 휨강도 실험 결과

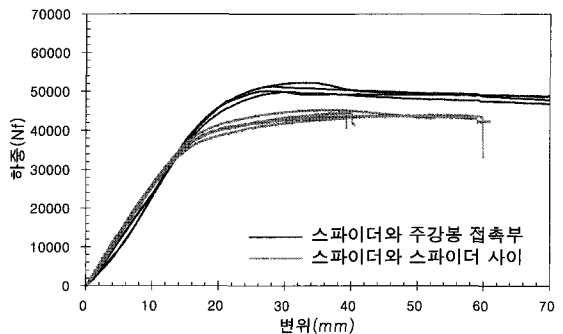


그림 8. LG-70×20×30의 3-point 휨강도 실험결과

중을 스파이더와 접촉부에 적용하여 측정된 최대하중과 하중을 스파이더와 스파이더 사이에 적용하여 측정된 최대하중의 차이는 감소하는 경향을 보여주었다. 또한 LG-50×20×30과 LG-70×20×30에서 탄성영역의 강성은 하중 재하위치에 따라 거의 차이가 없으나, LG-95×22×32인 경우 하중을 스파이더와 주강봉 접촉부에 적용한 경우의 강성이 하중을 스파이더와 스파이더 사이에 적용한 경우의 강성보다 크게 평가되었다.

표 2는 격자지보재에 두 가지 하중재하방식을 적용하여 측정된 최대하중의 평균을 보여주고 있다. LG-50×20×30인 경우, 하중을 스파이더와 주강봉 접촉부에 적용하여 측정된 최대하중의 평균은 62.8 kN이며, 하중을 스파이더와 스파이더 사이에 적용한 경우의 최대하중 평균은 47.1 kN이다. 하중을 스파이더와 스파이더 사이에 적용한 경우를 기준으로 할 때 하중을 스파이더와 주강봉 접촉부에 적용한 경우의 최대하중 평균은 33% 더 크게 나타났다. LG-70×20×30에서는 하중을 스파이더와 주강봉 접촉부에 적용한 경우의 최대하중 평균은 51.3 kN이며, 하중을 스파이더와 스파이더 사이에 적용한 경우의 최대하중 평균은 44.5 kN이다. 하중을 스파이더와 주강봉 접촉부에 적용한 경우의 최대하중 평균은 하중

을 스파이더와 스파이더 사이에 적용한 경우의 최대하중 평균보다 15% 더 크게 나타났다. LG-95×22×32인 경우, 하중을 스파이더와 주강봉 접촉부에 적용한 최대하중 평균은 50.7 kN이며, 하중을 스파이더와 스파이더 사이에 적용한 경우의 최대하중 평균은 46.0 kN이다. 하중을 스파이더와 스파이더 사이에 적용한 경우를 기준으로 할 때, 하중을 스파이더와 주강봉 접촉부에 적용한 경우의 최대하중 평균은 10% 더 크게 나타났다.

세 가지 타입의 격자지보재를 대상으로 수행된 3-point 휨강도 실험에서, 하중재하점에 따른 격자지보재의 최대하중 평균은 최대 33%에서 최소 10%까지 차이를 보였으며, 이것은 실험자에 따라 하중재하위치가 다를 경우 격자지보재의 성능이 상이하게 판정될 가능성을 보여 주고 있다.

일반적으로 콘크리트분야에서 적용되어지고 있는 4-point 휨강도 실험을 적용하여 네 가지 타입의 격자지보재 성능을 평가해 보았다. 4-point 휨강도 실험에서는 그림 5에서 보여주듯이 두 가지 형태의 하중재하방식(적용되는 두 개의 하중 중심선이 스파이더와 주강봉의 접촉부(접촉부)에 위치하는 것과 적용되는 두개 하중의 중심선이 스파이더와 스파이더 사이(취약부)에 위치하는 것)를 적용하였다. 4-point 하중재하 방식의 결정을 위하여, 10 mm와 12 mm의 스파이더 직경을 가진 두 가지 타입의 LG-70×20×30 시편과 10 mm와 12 mm의 스파이더 직경을 가진 두 가지 타입의 LG-90×22×32 시편을 사용하였다. 각각의 경우에 대하여 2개 이상의 동일시편을 사용하여 실험을 수행하였다.

그림 10에서 13은 두 가지 하중재하형태를 10 mm와 12 mm의 스파이더 직경을 가진 LG-70×20×30와 LG-90×22×32 시편에 적용하여 얻어진 4-point 휨강도 실험결과를 보여주고 있다. 각 그림에서 검은색으로 표시된 하중-변위 곡선은 시편에 가해지는 두개 하중의 중심선이 스파이더와 주강봉 접촉부(접촉부)에 위치한 결과이며, 회색으로 표시된 하중-변위 곡선은 시편에 가해지는 두개 하중의 중심선이 스파이더와 스파이더 사이(취약부)에 위치한 결과이다. 본 실험결과로부터, 하중-변위 거동, 최대하중, 및 탄성영역에서 강성은 하중재하위치에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

표 3은 4가지 타입의 격자지보재에서 수행된 4-point 휨강도 실험결과인 최대하중의 평균을 보여주고 있다.

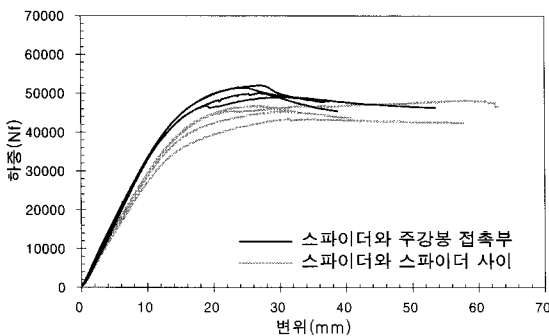


그림 9. LG-95×22×32의 3-point 휨강도 실험 결과

표 2. 3-point 휨강도 실험 결과에 얻어진 평균 최대하중

| 종류 | 스파이더와 주강봉 접촉부(1) | 스파이더와 스파이더 사이(2) | (1)/(2)*100 |
|-------------|------------------|------------------|-------------|
| LG-50×20×30 | 62.8 kN | 47.1 kN | 133% |
| LG-70×20×30 | 51.3 kN | 44.5 kN | 115% |
| LG-90×22×32 | 50.7 kN | 46.0 kN | 110% |

10 mm의 스파이더 직경을 가진 LG-70×20×30 시편에서, 하중 중심선을 스파이더와 스파이더 사이(취약부)에 적용하여 얻어진 최대하중의 평균은 53.66 kN이고, 두 개의 하중 중심선을 스파이더와 주강봉의 접촉부(접촉부)에 적용한 최대하중 평균은 51.44 kN이다. 접촉부를 기준으로 취약부의 최대하중 평균은 약 4.32% 크게 나타났다. 스파이더 직경이 12 mm인 LG-70×20×30시편

에서, 취약부의 최대하중 평균은 69.97 kN이고, 접촉부의 최대하중 평균은 69.57 kN이다. 접촉부를 기준으로 취약부의 최대하중 평균은 약 0.57% 크게 나타났다. 10 mm의 스파이더 직경을 가진 LG-95×22×32 시편에서, 취약부의 최대하중 평균은 53.32 kN이고, 접촉부의 최대하중 평균은 51.72 kN이다. 접촉부를 기준으로 취약부의 최대하중 평균은 약 3.09% 크게 나타났다. 스파이

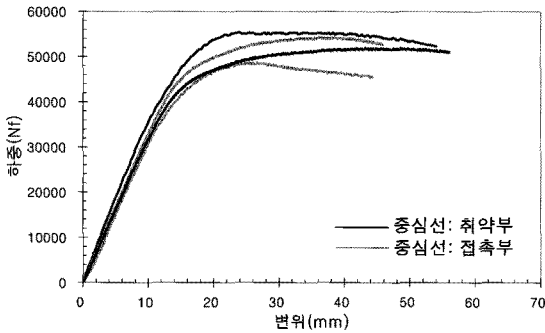


그림 10. LG-70×20×30(스파이더 직경: 10 mm)의 4-point 휨강도 실험 결과

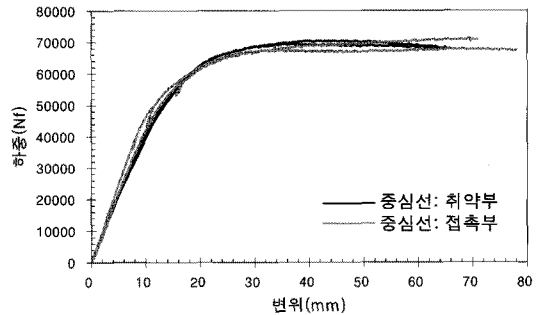


그림 11. LG-70×20×30(스파이더 직경: 12 mm)의 4-point 휨강도 실험 결과

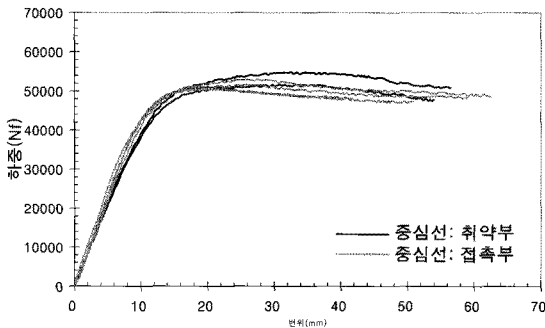


그림 12. LG-95×22×32(스파이더 직경: 10 mm)의 4-point 휨강도 실험 결과

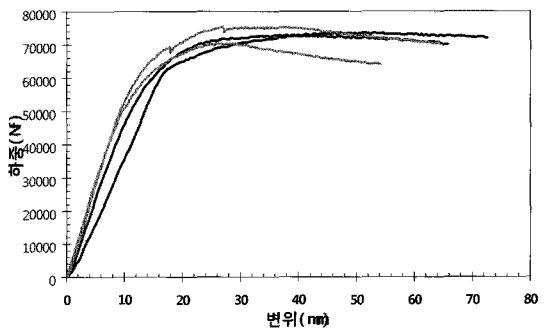


그림 13. LG-95×22×32(스파이더 직경: 12mm)의 4-point 휨강도 실험 결과

표 3. 4-point 휨강도 실험 결과에 얻어진 평균 최대하중

| 종류 | 하중 중심선: 취약부(1) | 하중 중심선: 접촉부(2) | (1)/(2)*100 |
|--------------------------------|----------------|----------------|-------------|
| LG-70×20×30, 스파이더 직경: 10 mm | 53.66 kN | 51.44 kN | 104.32% |
| LG-90×22×32 스파이더 직경: 10 mm | 53.32 kN | 51.72 kN | 103.09% |
| LG-70×20×30, 스파이더 직경: 12 mm | 69.97 kN | 69.57 kN | 100.57% |
| LG-90×22×32 스파이더 직경: 12 mm | 73.26 kN | 72.96 kN | 100.42% |

더 직경이 12 mm인 LG-95×22×32 시편에서, 취약부의 최대하중 평균은 73.26 kN이고, 접촉부의 최대하중 평균은 72.96 kN이다. 접촉부를 기준으로 취약부의 최대하중 평균은 약 0.42% 크게 나타났다.

본 실험의 결과로부터, 두개 하중의 중심선이 취약부에 위치한 경우의 최대하중 평균은 두개 하중의 중심선이 접촉부에 위치한 경우의 최대하중 평균보다 약 0.42%~4.32% 크게 나타났다. 그림 5(a)에서 보여주듯이 두개 하중의 중심선이 접촉부에 있는 경우에는 작용하는 두개 하중 사이에 한 개의 스파이더가 존재하는 반면, 그림 5(b)에서 보여주듯이 두개 하중 중심선이 취약부에 있는 경우, 작용하는 두개 하중 사이에 두 개의 스파이더가 존재한다. 이것은 두개 하중의 중심선이 취약부에 작용하는 경우가 두개 하중의 중심선이 접촉부에 작용하는 경우보다 휨에 저항이 증가되었다고 볼 수 있다. 또한 스파이더 직경이 12 mm인 경우의 최대하중 평균은 스파이더 직경이 10 mm인 경우의 최대하중 평균보다 각각 3.75%(LG-70×20×30 시편)와 2.67%(LG-95×22×32) 크게 나타났다. 이것은 스파이더 직경이 커지면서 스파이더의 허용 응력이 증가하여, 주강봉과 보조강봉에서 받는 하중을 스파이더가 더 부담하고, 스파이더의 응력집중이 감소되어 나타난 현상으로 판단된다. 다시 말하면, 각 부재에 작용하는 응력이 하중중심선이 접촉부에 있는 경우보다 하중중심선이 취약부에 있는 경우가 골고루 분포된다고 할 수 있다.

4-point 휨강도 실험에서 하중재하위치에 따른 실험결과 분석으로부터, 하중재하위치에 따라 최대하중의 평

균의 차이가 크지 않지만, 4-point 휨강도 실험을 이용한 격자지보재의 성능평가시, 작용하는 두개 하중의 중심선이 스파이더와 주강봉의 접촉부(접촉부)에 위치하는 것이 격자지보재의 성능을 좀 더 객관적이고 과대 평가하지 않을 것을 판단한다.

3.2 3-point와 4-point 휨강도 실험 비교

세 가지 타입의 격자지보재를 대상으로 수행한 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험을 비교분석하였다. 또한 부재별 응력분포를 파악하기 위하여 세 가지 타입의 격자지보재에 그림 6에서 나타난 것 같이 각 시편의 부재에 스트레인 게이지를 부착하여 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험을 수행하였다. 비교분석을 위하여 사용된 시편은 10 mm의 스파이더 직경을 가진 LG-50×20×30, LG-70×20×30, 및 LG-90×22×32 시편이다.

그림 14는 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험을 수행한 후 변형된 시편의 모습을 보여주고 있다. 그림 14의 왼쪽사진에서 위에 있는 시편은 3-point 휨강도 실험 후 변형된 시편모습이고, 그림 14의 왼쪽사진에서 아래쪽 있는 시편은 4-point 휨강도 실험 후 변형된 시편 모습을 보여주고 있다. 그림 14의 오른쪽은 시편 중앙부를 확대해서 보여주고 있다. 본 그림에 나타난 것 같이 3-point 휨강도 실험은 하중이 재하되는 중앙부분에서만 국부적으로 심한 변형을 보여주고 있다. 이것은 시편의 전체적인 성능을 평가하기 보다는 주강봉의 성능에 의해 격자지보재가 평가되어 진다고 볼 수 있다. 반면

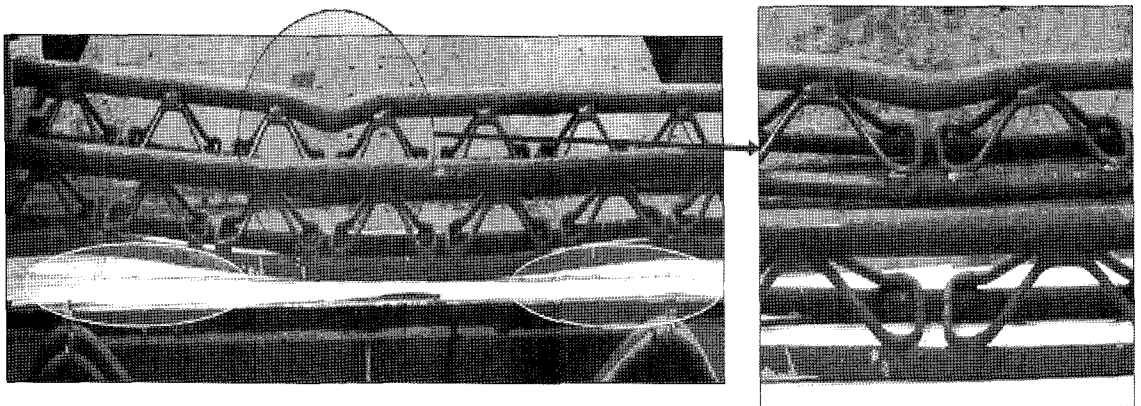


그림 14. 3-point 및 4-point 휨강도 실험후 시편형상 비교

4-point 휨강도 실험에 의해 변형된 시편모습을 보면 3-point 휨강도 실험과 같이 부재의 국부변형은 없고, 주어진 하중에 의해 시편이 전체적으로 휘어진 모습을 보여주고 있다. 이것은 시편이 하중에 의해 전반적으로 거동한 것으로 볼 수 있다.

그림 15는 하중에 의해 스파이더가 변형된 모습을 보여주고 있는데 이러한 현상은 주로 3-point 휨강도 실험에서만 나타났고 4-point 휨강도 실험에서는 나타나지 않았다. 이러한 현상은 주강봉으로부터 하중이 집중되면서 주강봉 변형과 동시에 격자지보재중 가장 취약부 부분인 스파이더의 변형을 가져온 것으로 판단된다.

그림 16에서 18은 LG-50×20×30, LG-70×20×30, 및 LG-90×22×32 시편에서 수행된 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험의 결과를 보여주고 있다. 3-point 휨강도 실험결과는 하중을 스파이더와 스파이더 사이에 적용하여 얻는 결과를 사용하였다. 4-point 휨강도 실험에서는 하중재하위치에 따라 최대하중 및 하중-변위 곡선이 거의 차이가 없으므로 모든 4-point 휨강도 실험결과를 사용하였다. 4-point 휨강도 실험에 의한 얻어진 각 타입의 격자지보재 최대하중은 3-point 휨강도 실험에 의한 얻어진 각 타입의 격자지보재 최대하중보다 크게 나타났다. 또한, 탄성영역의 강성도 4-point 휨강도 실험결과가 3-point 휨강도 실험결과보다 크게 나타났다. 이것은 3-point 휨강도 실험에서는 주로 주강봉의 성능에 의해 하중-변위곡선이 결정된 반면 4-point 휨강도 실험에서는 시편전체의 성능에 의해 하중-변위곡선이 결정된 것으로 판단된다.

표 4는 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험에

서 얻어진 격자지보재의 최대하중과 식 (1)에 의해서 계산된 성능평가값을 보여주고 있다. 시편 LG-50×20×30에서는, 3-point 휨강도 실험에 의한 최대하중 평균이 47.19 kN인 반면 4-point 휨강도 실험에 의한 최대하중 평균은 62.07 kN으로 3-point 휨강도 실험의 최대하중 평균보다 31.55%(14.88 kN) 크게 나타났다. 성능평가값에서는 3-point 휨강도 실험에서는 1.63이고 4-point

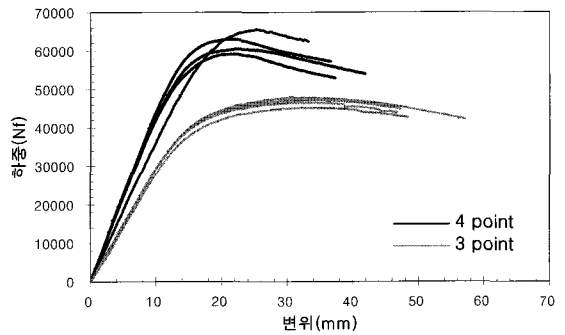


그림 16. 3-point와 4-point 휨강도 실험결과 비교(LG-50×20×30)

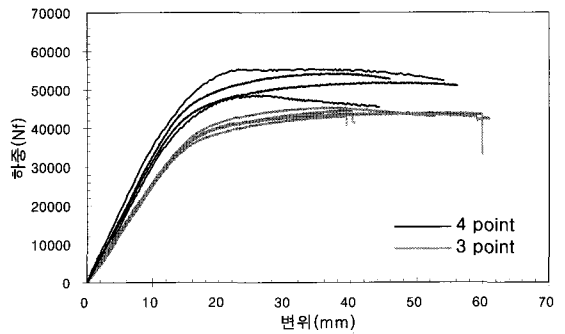


그림 17. 3-point와 4-point 휨강도 실험결과 비교(LG-70×20×30)

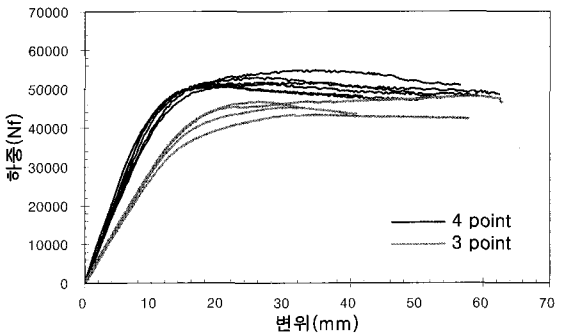


그림 18. 3-point와 4-point 휨강도 실험결과 비교(LG-90×22×32)



그림 15. 3-point 휨강도 실험에서 스파이더 변형

표 4. 3-point와 4-point의 평균 최대하중 및 성능평가값

| 종류 | 평균 최대하중 | | | 성능평가값 | |
|-------------|------------|------------|-------------|---------|---------|
| | 3-point(1) | 4-point(2) | (2)/(1)*100 | 3-point | 4-point |
| LG-50×20×30 | 47.19 kN | 62.07 kN | 131.55% | 1.63 | 0.65 |
| LG-70×20×30 | 44.46 kN | 52.03 kN | 117.02% | 2.92 | 0.85 |
| LG-90×22×32 | 46.01 kN | 52.3 kN | 113.56% | 5.12 | 0.63 |

휨강도 실험에서는 0.65를 나타냈으며, 두 실험방식 모두 격자지보재의 성능 합격치인 5보다 작았다. 시편 LG-70×20×30에서 최대하중 평균은 3-point 휨강도 실험이 44.46 kN인 반면 4-point 휨강도 실험이 52.03 kN으로 17.02%(7.57 kN)정도 크게 나타났다. 성능평가값에서는 3-point 휨강도 실험이 2.92이고 4-point 휨강도 실험에서는 0.85를 나타냈으며 두 실험방식 모두 격자지보재의 성능 합격치인 5보다 작았다. 시편 LG-95×22×32의 최대하중 평균은 3-point 휨강도 실험이 46.01 kN인 반면 4-point 휨강도 실험이 52.3 kN으로 13.56%(6.29 kN)정도 크게 나타났다. 성능평가값에서는 3-point 휨강도 실험이 5.12로 격자지보재의 성능 합격치인 5보다 크게 나타났으며, 4-point 휨강도 실험에서는 0.63으로 격자지보재의 성능 합격치인 5보다 작았다.

최대하중 평균에서 시편의 규격이 증가할수록 3-point 휨강도 실험결과와 4-point 휨강도 실험결과의 차이가 줄어드는 경향을 보이고 있다. 성능평가값에서는 3-point 휨강도 실험결과와 4-point 휨강도 실험결과가 과다하게 차이가 났으며, 3-point 휨강도 실험결과에서는 시편 규격이 증가할수록 성능평가값이 증가하였다. 3-point 휨강도 실험결과와 4-point 휨강도 실험결과의 성능평가값보다 크게 평가된 것은 시편중앙에서 하중을 직접 받는 주강봉의 과도한 국부변형으로 시편 중앙부에 발생하는 실제 변위량이 하중에 의해 발생하는 시편 전체의 변위량보다 크게 평가되어기 때문이다.

본 연구에서 수행한 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험으로부터 평균최대하중은 LG-50×20×30이 가장 높게 평가되었고, 그 다음이 LG-90×22×32이고 LG-70×20×30이 가장 낮게 평가되었다. 그림 1에서 보여 주듯이 LG-50×20×30과 LG-70×20×30은 직경 30 mm의 주강봉 한 개와 직경 20 mm의 보조강봉 두 개를 직경 10 mm의 스파이더로 연결하고 있다. LG-50×20×30에서 두개의 보조강봉 간격은 100 mm이고 주강봉과 보조

강봉의 수직간격은 100 mm이지만 LG-70×20×30에서는 두개의 보조강봉 간격은 140 mm이고 주강봉과 보조강봉의 수직간격은 120 mm로 전체 형상과 규격이 증가하였다. 이와같이 LG-50×20×30과 LG-70×20×30을 구성하는 각 부재의 제원은 동일하지만 전체적인 형상과 규격이 증가하여 LG-70×20×30이 LG-50×20×30보다 전체적인 구조적 안정성이 감소되어서 LG-70×20×30의 평균최대하중이 LG-50×20×30의 평균최대하중보다 낮게 평가된 것으로 판단된다. 또한 LG-90×22×32인 경우, 주강봉(직경: 32 mm)과 보조강봉(직경: 22 mm)의 직경이 각각 2 mm씩 증가하였지만, 스파이더 직경이 10 mm이고 두개의 보조강봉 간격과 주강봉과 보조강봉의 수직간격이 각각 180 mm와 149 mm로 증가되어 LG-90×22×32의 전체적인 구조적 안정성 향상이 미흡하여 최대하중의 평균이 높게 평가되지 않은 것으로 판단된다. 격자지보재는 각 타입별(LG-50, LG-70, LG-95 등등)로 다양한 부재 제원(주강봉, 보조강봉 및 스파이더의 직경)을 가지고 있다(한국건설기술연구원, 1996, 문홍득, 1997). 또한 격자지보재의 각 타입별로 다양한 부재 제원에 따른 허용지지력 및 허용응력 계산법도 제시하고 있다(Baumann and Betzle, 1984). 이것은 굴착지반의 다양하고 복잡한 조건에 따라 적합한 격자지보재의 사용을 위해 제시되었다. 그러나, 격자지보재가 국내에 도입된 후 이러한 상세한 격자지보재의 설계 및 제작에 관한 내용들은 연구에만 국한되었으며, 실제 터널공사를 위한 강지보재의 설계 및 시공에 반영되지 않고 있다. 이러한 이유로 H형강처럼 격자지보재의 규격이 증가할수록 하중저항력이 커진다는 막연한 개념이 터널기술자들에게 일반적인 격자지보재의 개념으로 정착되었다. 향후 각 타입별로 다양한 부재제원에 대한 허용지지력과 허용응력에 대한 연구를 진행하여 다양한 지반조건 및 주변여건에 적합한 격자지보재의 선택과 터널 지보설계에 반영되어야 할 것이다.

그림 19에서 24는 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험에 의해 측정된 시편 LG-50×20×30, LG-70×20×30, 및 LG-95×22×32의 부재별 변형률을 보여주고 있다. 그림 6에서 보여주듯이 격자지보재의 각 부재에 스트레

인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 본 결과에서 변형률의 (+)는 인장을 의미하며 변형률의 (-)는 압축을 의미한다.

그림 19, 21과 23에서 보여주듯이 3-point 휨강도 실험

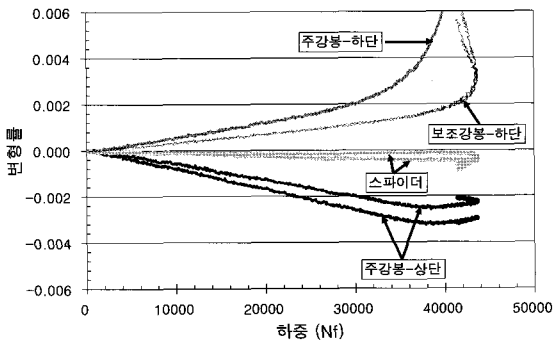


그림 19. LG-50×20×30 시편의 부재별 변형률(3-point 휨강도 실험)

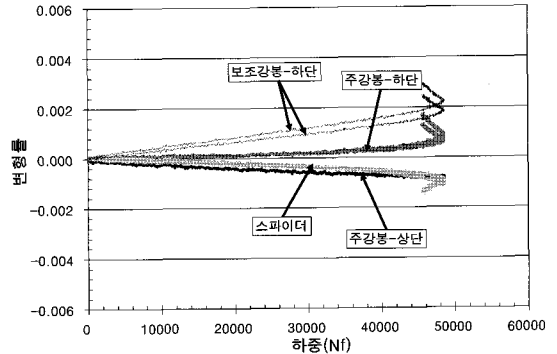


그림 22. LG-70×20×30 시편의 부재별 변형률(4-point 휨강도 실험)

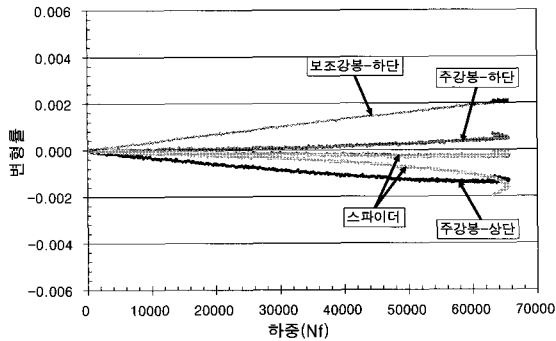


그림 20. LG-50×20×30 시편의 부재별 변형률(4-point 휨강도 실험)

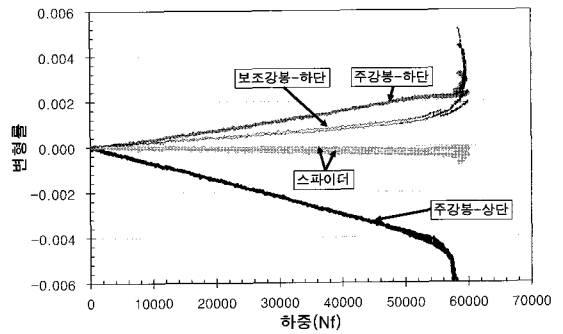


그림 23. LG-90×22×32 시편의 부재별 변형률(3-point 휨강도 실험)

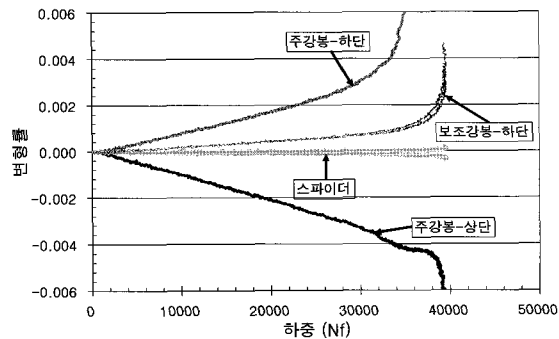


그림 21. LG-70×20×30 시편의 부재별 변형률(3-point 휨강도 실험)

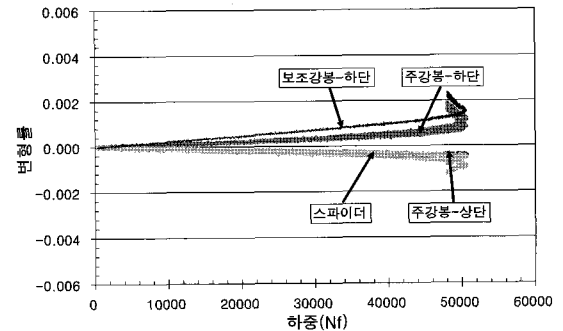


그림 24. LG-90×22×32 시편의 부재별 변형률(4-point 휨강도 실험)

험에서는 주강봉의 변형률이 가장 크며 그 다음이 보조강봉의 변형률이고 스파이더의 변형률은 거의 미미한 것으로 나타났다. 주강봉의 압축변형률은 보조강봉의 인장변형률 보다 약 2~5배정도 크게 나타났으며, 주강봉의 인장변형률은 보조강봉의 인장변형률보다 최소 2배 이상 크게 측정되었다. 이것은 작용하는 하중이 주로 주강봉에 작용하고 그 다음에 보조강봉에 작용하며 스파이더에는 거의 하중이 작용하지 않는다는 것을 보여주고 있다. 그림 20, 22, 및 24에서 보여주듯이 4-point 휨강도 실험에서는 보조강봉의 변형률이 가장 크게 나타났으며 주강봉과 스파이더의 변형률이 거의 유사한 것으로 나타났다. 보조강봉의 변형률은 주강봉과 스파이더의 변형률에 약 2배정도 크게 나타났으며 전반적으로 각 부재의 변형률은 ± 0.002 보다 작게 나타났다.

각각의 격자지보재 시편에서 수행된 3-point 휨강도 실험의 결과와 4-point 휨강도 실험의 결과를 비교해 보면, 3-point 휨강도 실험의 주강봉 인장변형률은 4-point 휨강도 실험의 주강봉 인장변형률보다 약 5~7배정도 크게 나타났으며, 3-point 휨강도 실험의 주강봉 압축변형률은 4-point 휨강도 실험의 주강봉 압축변형률보다 3~5배 정도 크게 나타났다. 3-point 휨강도 실험의 보조강봉 인장변형률은 LG-50×20×30과 LG-70×20×30에서는 4-point 휨강도 실험의 보조강봉 인장변형률보다 약 2배정도 작게 나타났으며, LG-95×22×32에서는 4-point 휨강도 실험의 보조강봉 인장변형률보다 약 1.5배 크게 나타났다. 스파이더의 경우에는 차이가 거의 미미하지만 4-point 휨강도 실험이 3-point 휨강도 실험보다 약 2배정도 크게 나타났다. 실험방식에 따른 부재별 변형률 분석으로부터, 3-point 휨강도 실험은 하중이 주강봉에 집중되는 반면 4-point 휨강도 실험은 3-point 휨강도 실험보다는 하중이 각 부재에 골고루 분포된다고 판단되어 진다. 이것은 3-point 휨강도 실험방법은 격자지보재의 성능이 주로 주강봉의 성능에 의존한다고 할 수 있으며, 시편전체의 성능을 객관적으로 평가하기에는 부적합한 실험 방법으로 판단된다.

앞에서 설명한 모든 실험결과 분석으로부터 3-point 휨강도 실험방법은 격자지보재의 객관적인 성능평가를 위해서는 부적합한 것으로 판단되며, 4-point 휨강도 실험방법에서 시편에 작용하는 두개 하중의 중심선을 스파이더와 주강봉 접촉부에 위치하는 실험방법이 격자지

보재의 성능을 보다 객관적이고 시편 전체의 성능을 평가 할 수 있는 실험방법이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 격자지보재의 공학적인 성능을 보다 객관적으로 판단하기 위하여 국내터널 현장에서 주로 사용되어지고 있는 격자지보재의 세 가지 타입인 LG-50×20×30, LG-70×20×30, 및 LG-95×22×32를 사용하여 3-point 휨강도 실험 및 4-point 휨강도 실험을 수행하였다. 또한 하중재하위치에 따른 격자지보재의 성능을 비교/평가하기 위하여 각각의 실험방법에 두 가지 하중재하위치를 사용하여 실험을 수행하였다. 또한, 각각의 실험방법에 따라 격자지보재의 각 부재에 작용하는 하중분포를 분석하기 위하여 각 부재에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 3-point 휨강도 실험에 적용한 두 가지 하중재하위치, 즉 스파이더와 스파이더 사이에 하중재하(취약부)와 스파이더와 주강봉 접촉부에 하중재하(접촉부),에 따라 격자지보재의 최대하중 평균은 접촉부가 취약부보다 10%~33%까지 크게 나타났으며, 3-point 휨강도 실험에서는 하중재하위치에 따라 격자지보재의 성능이 상당한 차이를 보여주고 있다.
2. 4-point 휨강도 실험에 적용한 두 가지 하중재하위치, 즉 스파이더와 스파이더 사이에 하중 중심선 위치(접촉부)와 스파이더와 주강봉 접촉부에 하중 중심선 위치(취약부),에 따라 격자지보재의 최대하중 평균은 취약부가 접촉부보다 약 0.42%~4.32%정도 차이를 보이나 차이정도가 매우 미미한 것으로 판단되며 4-point 휨강도 실험에서는 하중재하위치에 따라 격자지보재의 성능이 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.
3. 3-point 휨강도 실험과 4-point 휨강도 실험의 비교에서는 4-point 휨강도 실험에서 얻어진 최대하중 평균은 3-point 휨강도 실험에서 얻어진 최대하중 평균보다 13.56%~31.55%정도 크게 나타났으며, 성능평가값도 3-point 휨강도 실험이 1.63~5.12를 나타낸 반면 4-point 휨강도 실험은 0.65~0.85를 나타냈다. 이것은 3-point 휨강도 실험에서 하중이 직접적으로 작용하는 주강봉의 과도한 국부변형으로 기인

된다.

4. 격자지보재의 각 부재에 작용하는 하중분포에서 3-point 휨강도 실험은 주강봉에 주로 하중이 집중되는 반면 4-point 휨강도 실험은 비교적 각 부재로 골고루 하중에 작용하는 것으로 나타났다. 3-point 휨강도 실험의 주강봉 인장변형률과 압축변형률은 4-point 휨강도 실험의 주강봉 인장변형률 및 압축변형률보다 각각 약 5~7배와 3~5배 정도 크게 나타났다.

본 연구로부터 3-point 휨강도 실험방법은 격자지보재 시편전체에 대한 객관적인 성능평가로 부적합한 것으로 판단되며, 4-point 휨강도 실험방법에서 시편에 작용하는 두개의 하중 중심선이 스파이더와 주강봉 접촉부에 위치하는 실험방법이 격자지보재의 성능을 보다 객관적이고 시편 전체의 성능을 평가 할 수 있는 실험방법이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 첨단도시개발사업인 'IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공 기술 개발(05 건설핵심 D03)' 연구단 과제에서 '급속안정화 터널시공을 위한 신지보 시스템 개발' 연구결과와 일부이다.

참고문헌

1. 김동규, 최윤호, 김동률 (2007), "레티스거더 성능평가를 위한 실내시험기법의 평가", 2007 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 1113-1120.
2. 문홍득 (1997), 격자지보의 터널지보재의 특성 및 현장 적용성 평가, 경희대학교 박사학위 논문.
3. 한국건설기술연구원 (1996), 터널지보용 레티스거더의 현장적용성 연구, 천원공업(주).
4. Baumann, T. and Betzle, M. (1984), "Investigation of the performance of lattice girders in tunnelling", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 17/2, pp. 67-81.



김 동 규

한국건설기술연구원
지하구조물연구실
선임연구원

E-mail: dgkim2004@kict.re.kr



배 규 진

한국건설기술연구원
지하구조물연구실
책임연구원

E-mail: gjbae@kict.re.kr