

래티스거더에 대한 수치해석적 거동분석

양형식^{1)*}, 정현석²⁾, 김원범³⁾

Numerical Analysis for the Structural Behavior of Lattice Girder

Hyung-Sik Yang, Hyeon-Seok Jeong and Won-Beom Kim

Abstract Structural behavior of lattice girders of different loading conditions, loading patterns and shapes was analyzed by MIDAS, the finite element method. Optimal condition for lattice girders was represented.

KeyWords Lattice girder, FEM

초 록 터널 굴착 시 최근 사용이 늘어난 격자지보(lattice girder)의 구조적 거동분석을 위해 유한요소해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 하중 조건, 재하 방법, 지보재의 형상을 달리하여 해석하였다. 격자지보의 시공 최적 조건을 제시하였다.

핵심어 격자지보, 유한요소해석

1. 서 론

최근 세계 각국에서는 도심지의 활용 가능한 지상공간의 절대적인 부족으로 인해 각종 형태의 지하공간 개발을 위한 많은 노력을 기울이고 있다. 국내에서는 터널 굴착시 NATM이 주요 굴착법으로 채택되고 강지보재로는 H형강 지보재를 사용하는 경우가 대부분이었는데 이것은 비교적 무거워서 시공시 불편함이 따르고 또한 지보재 설치 후 지보재 배면에 슛크리트가 완전히 타설 되지 않아 공동이 발생하는 문제점 등이 종종 발생하고 있다. H형강 지보재를 사용함으로써 발생하는 문제해결을 위해 스위스, 독일에서는 H형강 지보재 대신 원형 강봉을 삼각대형태로 엮어 만든 격자지보(lattice girder)를 개발하여 사용하고 있다.

최근 국내의 일부 설계회사에서도 격자지보에 대해 많은 관심을 가지고 있고 또한 현장에서도 이러한 지보재를 적용하고 있다. 하지만 대부분이 외국의 시공 사례를 그대로 도입하거나 경험적으로 시공하고 있는 실정이다.

국내에서도 격자지보의 적용성 검토나 격자지보의 실험적 연구가 이루어졌으나(문홍득, 1997) 격자지보의 구조적인 거동분석은 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 안정성, 경제성이 우수한 격자지보를 터널지보재로 사용하고자 격자지보의 수치 해석적 거동분석을 통한 지보의 적정성을 판단 하려한다. 수치해석 프로그램은 비선형해석이 가능한 MIDAS를 이용하여 다양한 하중조건, 하중의 재하방법, 지보재의 형상에 따른 지보재의 거동을 분석하였다. 이 연구의 궁극적 목적은 격자지보를 시공하는데 있어 최적 조건을 결정하고 또한 설계에 대한 수치 해석적 근거를 마련하고자 하는데 있다.

2. 격자지보

2.1 격자지보의 특징

세계 각국에서 최근까지 터널공사에 사용되는 여러 가지 지보재를 개발하여 왔는데, 이러한 지보재 중 강지보재의 일종인 격자지보는 기존의 H형강 지보재의 단점을 보완하기 위해 만들어진 것으로서, 기본적으로 기존의 강지보재와 동일한 역할을 하도록 되어 있으나, 격자지보재의 구조적 특성상, H형강 강지보재에 비해 지보효과 및 시공성, 경제성이 우수한 것으로 알려져 있다. 터널 지보용으로써 격자지보의 시공상의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다(Bauman and Betzle, 1984).

¹⁾ 정회원, 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

²⁾ 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사과정

³⁾ 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사과정

* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr

접수일 : 2005년 6월 3일

심사 완료일 : 2005년 6월 21일

- 격자지보는 H형강 지보재에 비해 40~60% 정도 가볍기 때문에 작업인부들에 의한 운반이 쉽고 설치가 용이하다.
- 격자지보의 배면까지 슛크리트 타설이 가능하므로 지보재 배면의 슛크리트 미타설 공동의 발생 가능성을 최소화시킬 수 있다.
- 격자지보는 슛크리트와의 부착력이 우수하여 슛크리트 리바운드 량을 현저히 감소시키는 장점이 있다.
- 슛크리트와 결합성(밀착성)이 우수하여 방수효과가 뛰어나고, 고품질의 콘크리트 구조체를 만들 수 있다.
- 비교적 연약한 지반을 굴착할 때는 굴착 전에 지반보강을 한 후 시공하게 되는데, 포아폴링이나 스파일(spile)의 설치각도를 최대한 줄여 시공할 수 있다. 또한 록볼트를 격자지보 사이로 설치해야 하는 경우에도 시공이 가능하다.
- 지반조건이 열악한 경우 분할굴착으로 터널을 시공하는 2아치 또는 3아치 터널 지보재의 이음부 연결작업을 손쉽게 할 수 있다.

2.2 격자지보재의 구조적 특성 및 종류

Fig. 1에 나타난 표준형 3-bar 격자지보의 각 부재별 특성을 살펴보면, 먼저 하중의 대부분을 지탱하는 원형 강봉은 직경이 큰 강봉 1개와 직경이 작은 강봉 2개로 이루어져 있으며 이 강봉은 상부지반의 하중을 지지해주는 주요 부재이기 때문에 H형강 지보재에 비해 단면적이 작아 전체 강성이 작은 점을 고려하여 항복응력과 인장응력이 큰 고강도강으로 제작된다.

그러나 격자지보는 모든 부재들이 서로 용접으로 결합되어야 하기 때문에 가능한 한 용접성이 좋은 특수강을 사용한다. 그리고 강봉을 연결하는 부재인 Spider는 원형강봉과 비슷한 특수강으로 이루어져 있으나 원형

강봉 보다는 약간 작은 강도를 갖게 함으로써 지반변위에 대한 격자지보의 변형흡수 효과를 갖도록 하고 있다. 또한 강봉과 연결용 부재를 서로 용접하여 격자지보를 만든 후에는 지보재 양쪽 끝에 일정길이의 격자지보를 서로 연결할 수 있는 이음부를 두어 현장에서 볼트로 쉽게 연결하도록 제작하는데, 이음부는 SS41의 강재특성을 가진 flat steel이나 angle steel과 볼트로 이루어져 있다(천원공업(주), 1996).

3. 수치해석을 이용한 격자지보재의 구조적 검토

일반적인 설계에서는 대부분 구조물에서 선형가정을 전제로 수치해석을 수행하게 되지만 아치 지보재와 같이 응력이 탄성범위를 초과하여 발생할 경우에는 반드시 구조물의 비선형 해석이 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 격자지보재의 거동을 분석하고자 기하비선형해석이 가능한 구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 다양한 하중조건, 하중의 재하방법, 지보재의 형상에 따른 변형에 관련된 인자를 가지고 하중-변위 곡선그래프를 작성하였다.

3.1 비선형해석

구조물에서 대변형이 발생하는 경우나 응력이 탄성의 범위를 초과하여 발생할 경우에는 반드시 구조물의 비선형 해석을 수행하는데 비선형의 원인으로는 다음과 같이 3가지로 구분할 수 있다.

- 재료비선형(Material Nonlinearity : 재료특성의 비선형성에 의한 것, 즉 비탄성체)
 - 기하비선형(Geometric Nonlinearity : 대변형 또는 대변형률을 동반하는 변형거동)
 - 경계비선형(Boundary Nonlinearity : 주로 접촉 및 분리 등을 동반하는 변형거동)
- 탄소성변형 특성은 하중 재하(Loading) 및 제하(Unl-

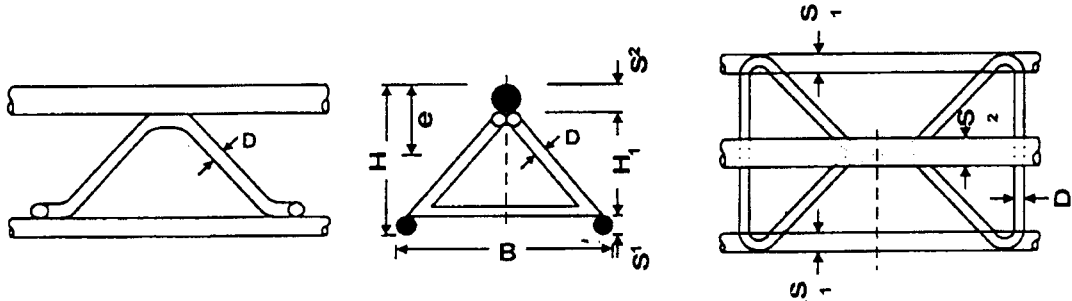


Fig. 1. Standard lattice girder

loading)의 이력상태에 의하여 결정할 수 있다. 강재구조의 변형 및 파괴거동은 지속적인 하중재하의 영향에 의한 재료 비선형적인 특성에 의한 것이다. 따라서 이러한 구조의 응답은 선형탄성해석에 의해서는 평가할 수 없기 때문에 반드시 비선형해석을 수행할 필요가 있다. Fig. 2는 기하 비선형 해석의 알고리즘이다.

3.2 해석조건 및 모델링

격자지보는 삼각형 꼭지점을 이루는 3개의 주부재를 경사방향의 철근으로 용접한 복합 구조체이므로 주철근부재의 단면적비나 경사방향의 철근의 기울기, 단면적, 용접 길이나 배치형상 등에 따라 해석결과가 상이하게 나타난다(채수연, 1996). 따라서 본 연구에서는 이러한 조건들을 이상화한 아치구조형태로써 모델링 하였다. 해석에 사용된 프로그램은 해석결과를 입체화표현기능을 이용하여 부재의 실제형상과 같은 거동을 확인할 수 있는 MIDAS/GEN을 이용하였고 항복 이후의 거동해석을 위해 기하 비선형해석을 수행하였다. 비선

형 평형방정식의 해를 구하는 방법으로 Newton - Raphson, Arc - Length, Displacement - Control방법을 제공하고 있으나 일반적으로 사용하는 Newton - Raphson을 사용하였다.

다음은 해석을 수행하는데 필요한 가정조건이다.

- 모든 구조요소들은 금속의 부재이므로 비선형·탄성이론을 적용한다.
- 6자유도 보요소를 이상화하여 3차원 격자로 해석한다.
- 주철근과 보조철근의 연결부는 강제 연결이 되어 있다고 가정한다.

이와 같은 조건들을 고려하여 Fig. 3 과 같이 3차원적인 격자지보를 모델링 하였다.

지보재의 형상은 Fig. 4와 같이 기본적인 3가지 파라메타에 의해서 정의될 수 있다.

먼저 아치지보재의 직경 D, $\lambda = h/H$, 그리고 지보재 다리의 각도 ϕ 에 의해서 결정이 되는데 다음과 같은 3가지 타입으로 분류된다.

Table 1은 해석에 사용된 LG 70 series의 제원이다.

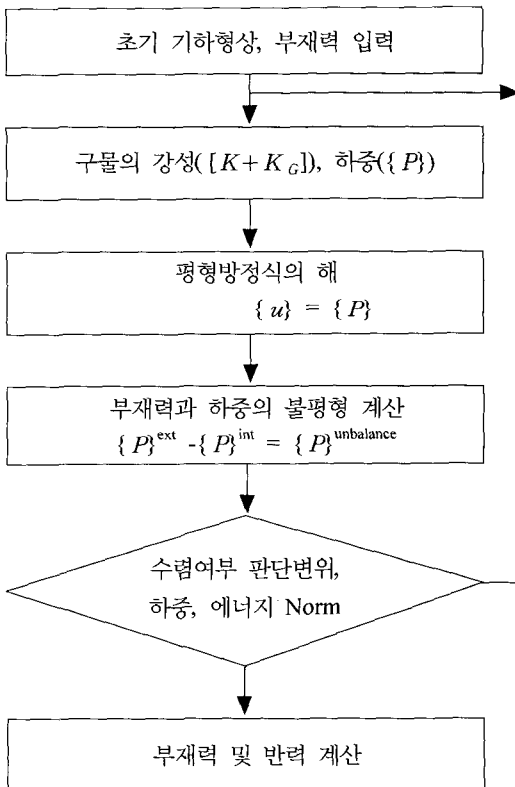


Fig. 2. Geometric nonlinearity

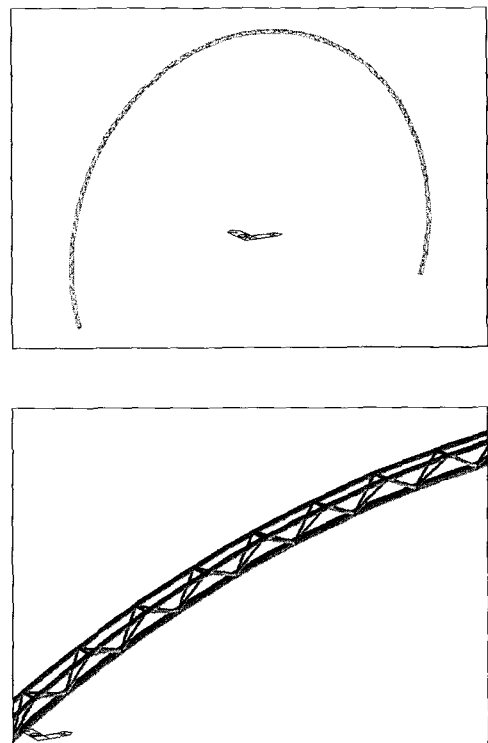


Fig. 3. Model of lattice girder

Table 1. Type of lattice girder

type	dimensions (mm)					area (cm ²)	unit weight (kg/m)	moment of inertia (cm ⁴)		section modulus (cm ³)	
	S ₁	S ₂	H	B	D			I _x	I _y	Z _x	Z _y
70	18	26	114	140	10	10.4	10.2	223	192	39	27
	20	30	120	140	10	13.6	12.5	306	232	51	33
	22	32	124	140	10	15.6	14.3	375	272	60	39
	26	34	130	140	10	19.7	17.5	501	356	71	51

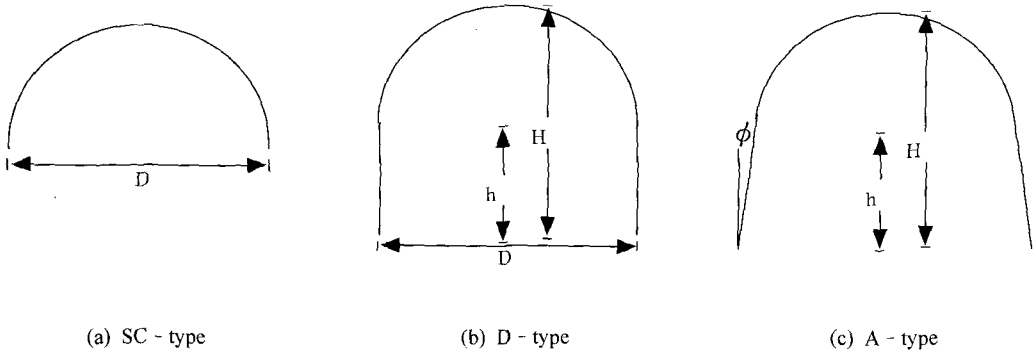


Fig. 4. Typical shape of beam

4. 해석결과

본 연구의 목적은 앞서 언급한 것처럼 격자지보의 수치해석적 거동을 파악하고 격자지보의 최적의 조건을 결정하는데 있다. 이를 위해서 지보재 형태, 하중의 종류, 하중의 재하방법 따른 각각의 해석을 실시하였다. 지보재의 특성은 하중-변형곡선으로부터 잘 표현될 수 있고 하중에 대한 변형은 δ 크라운부의 수직변형 Δ 지보재의 직경 D일 때 다음 식 (1)과 같다.

$$\delta = \frac{\Delta}{D} \times 100 \tag{1}$$

4.1 하중의 종류에 따른 변화

1) 등분포하중

먼저 등분포하중이 주어지는 경우 등분포하중의 작용 길이에 따른 결과를 살펴보고자 Fig. 5와 같이 LG 70×30×20, 직경 12 m의 격자지보에 크라운부 길이의 10%, 30%, 50%, 70%로 등분포하중의 작용 길이를 증가시키면서 수치해석을 수행하였다.

Fig. 6은 등분포하중의 작용 길이에 따른 하중-변위 곡선으로 지보재가 견뎌낼 수 있는 최대극한 하중은 등분포하중의 작용길이가 크라운길이의 10%, 30%, 50

%, 70%로 증가할 때 각각 49 kN, 104 kN, 216 kN, 295 kN으로 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 분포하중 작용밴드가 작아지면 사실상 집중하중으로 작용하면서 천단부 변위가 많이 발생함에 따라 적은 하중으로도 파괴가 발생한 것으로 해석할 수 있다.

2) 집중하중

집중하중 재하시 지보재의 크라운부에 1점 하중, 3점 하중, 5점 하중을 재하시키고 또한 집중하중 사이의 간

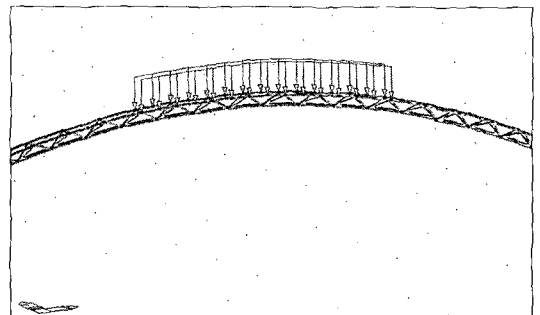


Fig. 5. Distributional loading on lattice girder

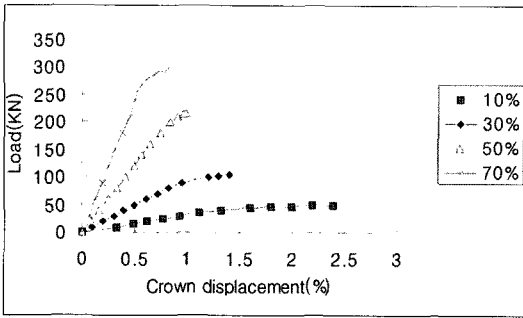


Fig. 6. Load displacement curve of girders under different loading width

격이 지보재의 거동에 어떠한 영향을 주는지를 검토하기 위해 3점 하중 재하 시 간격을 달리한 해석을 수행하였다.

해석결과는 하중점이 증가할수록 지보재가 견딜 수 있는 극한 하중이 49, 125, 213 kN으로 증가하고 있고 하중밴드 면적이 늘어나게 되면 보다 적은 변위를 허용하면서 파괴가 형성되는 취성적인 파괴거동을 나타내었다.

Fig. 8은 집중하중사이의 간격이 지보재의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 3점하중을 재하간격을 달리 하면서 해석을 수행한 하중 - 변위곡선 그래프이다.

집중 하중점의 간격이 증가될 때 거동을 살펴보면 좁은 간격과 보통간격에서 하중을 재하시킬 경우 지보재가 견딜 수 있는 하중이 125 kN에서 154 kN으로 증가하였다. 그러나 보통간격과 넓은 간격의 극한하중은 154 kN에서 255 kN으로 급작스런 증가를 보인다. 이러한 결과는 하중이 거더의 측벽부에 접근하면서 접촉면적이 넓어지고 또한 지보재의 수직부에 재하 됨으로써 하중의 분산효과로 인한 영향으로 볼 수 있다.

이러한 결과를 종합해 볼 때 격자지보를 효과적으로 시공하고자 한다면 격자지보와 지반의 접촉점이 많을수록 또한 지보간격이 넓을수록 지보효과가 커진다는 것을 알 수 있었다. 지보재와 지반이 접촉이 잘되기 위해서는 슛크리트의 타설 상태가 중요한데 앞서도 언급하였듯이 격자지보는 격자형태의 구성으로 배면 공극이 발생하지 않으므로 지반과 지보재와의 결합성이 탁월하다.

4.2 지보재의 형태

3가지의 지보재 형태 SC-type, D-type, A-type에 대하여 집중하중과 등분포하중을 적용하였다. 집중하중은

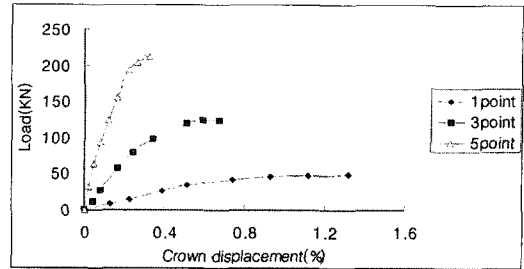


Fig. 7. 집중하중 재하 시 하중 - 변위곡선

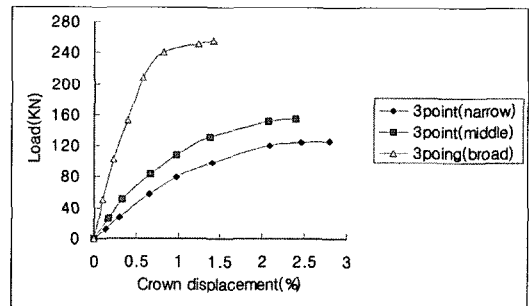


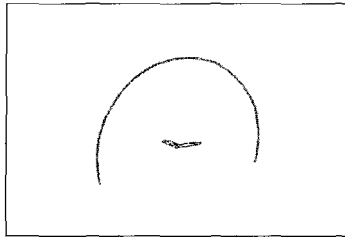
Fig. 8. 간격이 다른 3점 하중 재하 시 하중 - 변위곡선

3점 집중하중, 등분포하중은 하중밴드길이가 크라운 부 길이의 50% 해당하는 하중을 적용하였다. Fig. 9와 Table 2는 해석에 사용된 모델과 해석조건이다.

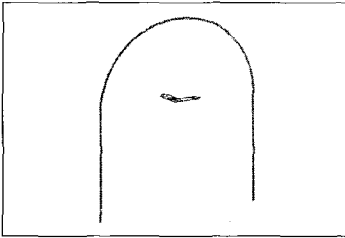
결과로부터 D - type에서 등분포하중과 집중하중이 재하된 경우를 비교하면 최대 극한하중이 각각 216, 125 kN으로 등분포하중이 재하된 경우에 상대적으로 우수한 지보능력을 나타내고 있다. 나머지 SC - type, A - type의 경우에도 등분포 하중이 재하된 경우 보다 높은 극한하중 값을 보여준다.

그리고 타입별 해석결과는 등분포하중이 적용된 경우에 SC - type 216 kN, D - type 200 kN, A - type 280 kN의 극한하중 값으로 A - type이 가장 우수한 형태로 판명됐다.

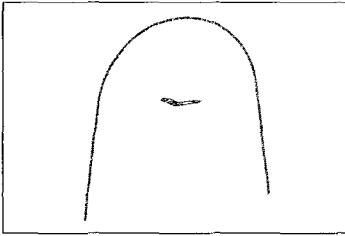
위의 결과와 같이 격자지보를 적용하였을 때 다리가 있는 지보재와 아치형태의 지보재의 경우 아치형태의 지보재가 보다 뛰어난 지보 능력을 보여주고 있지만 다리가 있는 경우라 하더라도 다리에 각도를 주면 보다 뛰어난 효과를 발휘할 수도 있었다.



(a) SC-type

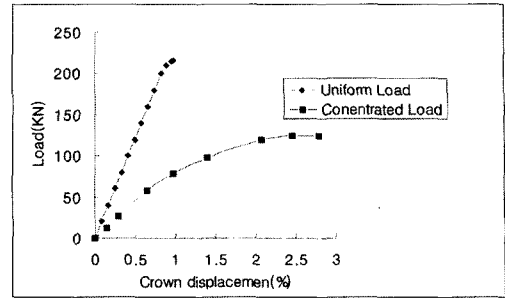


(b) D-type

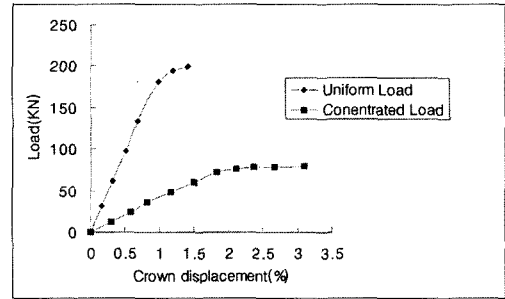


(c) A-type

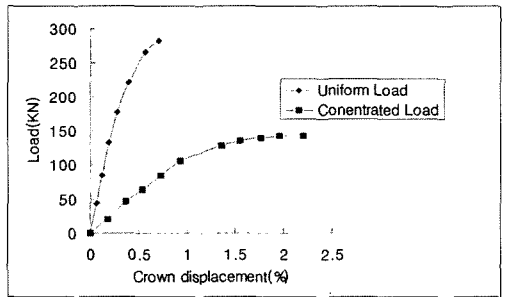
Fig. 9. Models



(a) SC - type



(b) D - type



(c) A - type

Fig 10. Load displacement curve for 3 girder types

5. 결 론

본 연구에서는 안정성, 경제성이 우수한 격자지보를 터널지보재로 사용하고자 격자지보의 수치해석적 거동 분석을 통한 지보의 적정성을 판단하였다. 비선형해석이 가능한 MIDAS를 이용하여 다양한 하중조건, 재하 방법, 지보재의 형상에 따른 지보재의 거동을 분석함으

로써 격자지보를 시공하는데 있어 최적 조건을 결정하고 또한 설계에 대한 수치 해석적 근거를 마련하고자 하였다.

- 1. 등분포하중의 작용 길이가 크라운부의 10%, 30%, 50%, 70%일 때 각각 49, 104, 216, 295 kN으로

Table 2. Analytical conditions

Type	D(m)	$\lambda = h / H$	ϕ (degrees)
SC - type	12	0	0
D - type	12	0.6	0
A-type	12	0.6	10

작용 길이가 긴 경우일수록 최대 극한하중이 증가하였다.

2. 집중하중이 재하된 경우 하중점이 많을수록, 그리고 재하간격이 넓을수록 보다 큰 극한 하중값을 갖는다. 이로부터 지보재와 지반과의 접촉상태가 양호할수록 지보효과가 우수해진다는 것을 알 수 있다.
3. 재하간격의 영향에서 하중이 측벽으로 접근하면서 극한하중이 급격하게 증가된 것은 하중이 거더의 측벽부에 접근하면서 접촉 면적이 넓어지고 또한 지보재의 수직부에 재하되어 하중의 분산효과로 인한 영향으로 볼 수 있다.
4. 지보형태 SC-type, D-type, A-type에 하중을 재하한 결과 등분포하중이 집중하중의 경우보다 높은 극한 하중값을 보여준다.
5. 극한하중 값의 비교결과 A - type, SC - type, D - type 순서로 우수한 지보효과를 보여 주었고 이와 같은 결과로부터 다리가 있는 지보재와 아치형태의 지보재의 경우 아치형태의 지보재가 보다 뛰어난 지보 능력을 보여주고 있지만 다리가 있는 경우라 하더라도 다리에 각도를 주면 보다 뛰어난 효과를 발휘할 수 있었다.

를 발휘할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2004년 전남대학교 학술연구재단의 연구비 지원으로 연구되었음.

참고문헌

1. 문홍득, 1997, 격자지보의 터널지보재로서의 특성 및 현장 적용성 평가, 경희대학교 대학원 박사학위논문.
2. 채수연, 1996, Lattice girder를 이용한 Tunnel 鋼支保工에 관한 研究, 한양대학교 산업대학원 석사학위 논문.
3. 천원공업(주), 1996, 터널용 강지보(Lattice Girder), 홍보 팜플렛.
4. Bauman T, and M. Betzle, 1984, Investigation of the performance of lattice girders in tunnelling, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 17, pp. 67 - 81.
5. Mitri E. T. and F. P. Hassani, 1990, Structural characteristic of coal mine steel arch supports. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 27, pp. 121 - 127.

양형식

1979 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사
1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr
현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수



정현석

2003 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사
2005 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사

E-mail: jolaman123@hanmail.net
현재 (주)삼보기술단



김원범

2002 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사
2004 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사

E-mail: hp96042345@nate.com
현재 전남대학교 공과대학 조교, 박사과정

