



3차원 래티스 모델을 사용한 고강도 철근콘크리트 구조물의 비선형 비틀림 해석

권민호¹⁾ · 서현수²⁾ · 임정희²⁾ · 김진섭^{2)*}

¹⁾경상대학교 토목공학과 공학연구원 ²⁾경상대학교 토목공학과

Analysis of Nonlinear Torsional Behavior for High Strength Reinforced Concrete Structure Using 3-Dimensional Lattice Model

Min-Ho Kwon,¹⁾ Hyun-Su Seo,²⁾ Jeong-Hee Lim,²⁾ and Jin-Sup Kim^{2)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

ABSTRACT Because of earthquakes that have recently struck, seismic design criteria that considered performance of structure were included in the design concepts. Thus, a simple analysis tool is needed to predict the strength and ductility of RC structures. In this study, three-dimensional lattice model was developed to expand the two-dimensional lattice model. Torsional analysis of the structure was done to evaluate the developed three-dimensional lattice model. Lattice model was evaluated by comparing analytical results with experimental results. Lattice element size was evaluated using the results of analysis. Torsional analysis results, using three-dimensional lattice model, show that the results are relatively consistent with the experimental values.

Keywords : torsion, non-linear, 3-dimension lattice, high strengthened concrete, RC structure

1. 서 론

일반적으로 구조물의 설계는 구조물의 주방향으로 작용하는 하중을 적용하여 이루어진다. 그러나 지진이 구조물에 작용할 때에는 지진 하중이 구조물에 각을 이루어 작용하게 되고 이에 따라 예상하지 못했던 비틀림 하중이 발생하게 된다. 그러므로 지진을 받는 구조물에서 하중 상태는 휨, 전단 및 비틀림이 작용하는 다소 복잡한 양상을 나타나게 된다.

철근콘크리트 구조물에 발생하는 비틀림은 휨이나 전단력에 비하여 그 영향이 적어 1960년 이전에는 2차 응력으로 간주하여 설계 시 다소 소홀이 되었다. 구조물 설계 시 비용의 관점에서 좀 더 넓은 공간 창출이 요구됨에 따라 보의 단면의 크기는 상대로 감소하고 장지간의 보를 선호하게 된다. 이러한 영향으로 구조물에서 비틀림 강성은 소홀히 할 수 없는 요소가 된다. 특히 풍하중이나 지진하중과 같이 임의의 방향에서 작용하는 하중이 발생

함에 따라서 비틀림에 대한 설계 및 검토가 필요한 상황이다.

비선형 영역에서 구조물의 성능은 실험적으로 측정 가능하며 3차원 비선형 유한요소 해석법으로 평가가 가능하지만, 실제 설계과정에서 적용할 수 있는 간편하면서도 신뢰성 있는 해석 도구의 개발이 필요하다. 또한 구조물의 고층화, 대형화 및 장지간화에 따른 고강도 콘크리트 사용의 뚜렷한 증가로 인하여 고강도 콘크리트 구조물의 성능 평가 및 해석법에도 보다 면밀한 연구가 필요할 것이다.

기존의 스트럿-타이 모델 이론은 응력 교란 영역을 해석하는 방법으로 널리 사용되어 왔지만, 평형 방정식에 근거한 모델로서 구조물의 극한 강도는 예측 가능하나 연성을 예측하지 못하는 단점을 가지고 있었다. 이를 개선하기 위하여 다양한 연구자들이 스트럿-타이법을 개선하고 있으나 아직 대중화 되지 못하고 있다.¹⁾ 따라서 권민호²⁾ 등은 평형방정식과 적합방정식에 근거하여 강도와 연성 예측이 가능하며 고강도 콘크리트 구조물에 적용할 수 있는 2차원 래티스 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 사용하여 축력을 받는 고강도 철근콘크리트 기둥의 성능 평가에 적용하였다. 이 모델은 단면 형상이 정사각형으로 이루어진 기둥의 반복하중 거동 예측을 비교적

*Corresponding author E-mail : jskim7085@naver.com

Received July 24, 2012, Revised September 7, 2012,

Accepted September 20, 2012

©2013 by Korea Concrete Institute

정확하게 예측하였다. 또한 Miki^{3,4)}는 RC 구조물의 3차원 비틀림 해석을 연구하였다. 그러나 사용된 단면은 정사각형에 가까운 단면이었으며 래티스 단면에서 아치부분의 폭과 깊이에 대한 비율 t_b 와 t_d 를 결정하는 과정이 명확하지 않았다.

이 연구에서는 개발된 2차원 래티스 모델을 확장하여 3차원 래티스 모델을 개발하였다. 모델을 개선하기 위하여 래티스의 단위 크기를 변수로 두었고 각 래티스 모델의 중요 변수를 결정하기 위하여 최적화 기법을 도입하였다. 개발된 래티스 모델을 비틀림 시험체에 적용하여 모델의 적정성을 평가하였다.

2. 래티스 모델의 개발

2.1 고정트러스의 래티스 모델

비틀림을 받는 부재의 해석에 이용할 3차원 래티스 모델은 Fig. 1과 같이 8개 절점을 갖는 요소로 모델 되었으며 요소의 내부는 콘크리트와 철근 부재로 구성되어 있다. 래티스 모델에서 콘크리트는 휨 압축 부재, 휨 인장 부재, 대각 압축 부재, 대각 인장 부재, 수직 부재로 모델링한다. 철근콘크리트 부재의 종방향 및 횡방향 철근은 수평 및 수직 부재로 각각 모델링 한다. 래티스 모델에서 대각 압축 부재와 대각 인장 부재는 전단력을 저항하는 트러스 거동을 묘사하기 위해서 사용되며 이 부재들은 45° 또는 135°의 각도를 가지는 것으로 가정한다. 그러므로 래티스 모델에서 전단 파괴의 방향은 45°로 고정된다. 이는 전단 파괴가 45°로 발생하는 것으로 가정하므로 래티스 모델은 고정 트러스 모델로 분류된다. 따라서 이 모델은 골재의 맞물림과 마찰, 철근의 다월 액션, 직접 전단과 같이 전단에 저항하는 각 요소들을 직접적으로 고려할 수 없다.

또한 구조물 전체에 아치 부재를 두어 대각 균열 발생 후의 내부의 압축응력 흐름 변화를 직접적으로 고려할 수 있도록 하였다. 주철근과 전단철근은 철근 부재로 등가면적으로 치환하여 구성하였고 대각 트러스 콘크리트와 아치 부재의 면적은 최소 변형에너지 원리를 바탕으

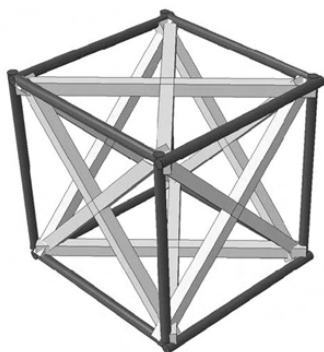


Fig. 1 8-node lattice element

로 결정하였다. 따라서 래티스 모델은 콘크리트와 철근 래티스 그리고 아치 부재의 합으로 RC 구조물의 거동을 예측하며, 이를 개념적으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

2.2 부재의 모델링

철근콘크리트 부재의 2차원 거동과는 달리 3차원에서는 이방향 모멘트와 비틀림에 대하여 저항하도록 래티스 모델을 구성하여야 한다. 그러므로 트러스 부재를 래티스 모델의 모든 면에 배치하여야 한다. 대각 콘크리트 트러스 12개와 철근 부재 12개 총 24개의 트러스 요소로 구성된 3차원 래티스 요소를 유한요소 정식화 기법에 따라서 정식화하고 이를 8개의 절점을 갖는 요소로 전산화한다. 가상 변위 원리에 의해서 유도된 8절점을 갖는 래티스 요소의 강성도 행렬은 다음과 같다.

$$K_{Lattice} = \int_V \mathbf{B}_c^T \mathbf{D}_c \mathbf{B}_c dV + \int_V \mathbf{B}_{cd}^T \mathbf{D}_{cd} \mathbf{B}_{cd} dV + \int_V \mathbf{B}_s^T \mathbf{D}_s \mathbf{B}_s dV \quad (1)$$

여기서, B_c, B_{cd}, B_s 는 각각 콘크리트, 대각 트러스, 철근 부재의 변형 행렬이고, D_c, D_{cd}, D_s 는 각각 콘크리트, 대각 트러스, 철근 부재의 재료 행렬이다.

부재의 단면은 Fig. 3과 같으며 각 래티스의 단면을 계산하기 위해서 아치부재의 단면 폭을 결정하는 t_b 값과 t_d 값을 추정하여야 한다. 이 연구에서는 식 (2)를 사용하여 변형에너지가 최소가 되도록 이 값을 결정하였고 이를 위하여 최적화 기법을 적용 하였다.

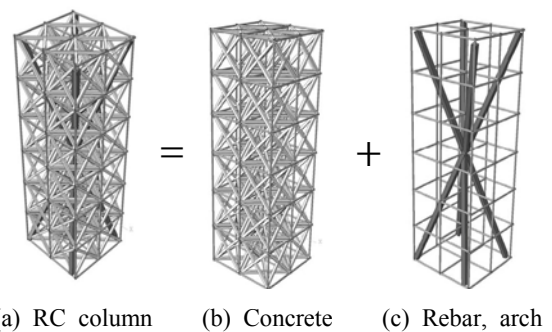


Fig. 2 3D lattice member

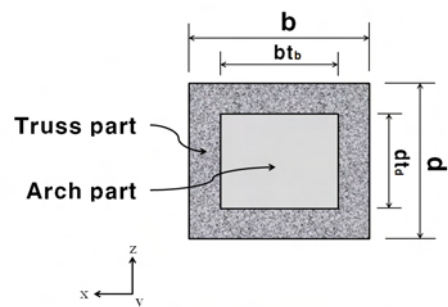


Fig. 3 Partition of cross section of 3D lattice model

$$\sum F_i l_i \varepsilon_i \quad (2)$$

여기서, F_i 는 부재력, l_i 는 부재의 길이, ε_i 는 부재의 변형률이다.

콘크리트의 부재는 Fig. 3에서 트러스부분을 차지한다. 트러스부재는 코너의 피복두께와 일반부 피복두께로 나뉘며 일반부의 경우 각 단면방향의 부재로 계산된다. 수직철근부재의 단면적은 단면의 한 변의 철근의 개수를 래티스 요소의 수를 고려하여 등가적으로 모델하였다. 따라서 래티스 모델의 횡방향 철근비와 종방향 철근비는 RC 구조물의 철근비와 동일하도록 구성된다.

전단 및 비틀림 저항 메커니즘을 구현하기 위하여 모델 내부에 아치 부재를 배치하였다. 아치의 위치와 방향이 전단 저항에 중요한 요소이며 하중과 기하학적 조건에 따라 달라지므로 탄성해석을 통한 응력 흐름 등을 바탕으로 그 배치위치를 결정하였다.

이상으로부터, 이 래티스 모델에 고려된 철근콘크리트 부재의 콘크리트의 아치, 트러스부재와 철근의 수평 및 수직 부재들 각각에 대한 단면적은 Table 1과 같이 산정된다.

2.3 래티스 부재의 최적화 문제 형성

래티스 모델에서 아치부재 및 트러스 부재의 단면적을 계산하기 위하여 t_b 와 t_d 가 필요하다. 이 해석을 수행하기 앞서 이 두 변수를 결정하여야 한다. t_b 와 t_d 는 부재의 단면에서 아치부재에 대한 비(比)를 의미하며 0에서 1사이

Table 1 Section area of member

Member	Section area	Note
Arch	$A_{arch2D} = \frac{1}{2} b t_b d t_d \cdot \sin\theta$ $A_{arch3D} = \left(\frac{1+m^2+n^2}{1+m^2} \right)^{\frac{3}{2}} A_{arch2D}$	b, d : size of RC section θ : angle between RC section and arch member
Truss	$A_{truss-xy} = \frac{b(1-t_b)}{2m} \cdot \frac{d}{2} \sin 45^\circ$ $A_{truss-yz} = \frac{h(1-t_b)}{2} \cdot \frac{d}{2} \sin 45^\circ$ $A_{truss-zx} = \frac{a}{2n} \cdot \frac{d}{2} \sin 45^\circ$	$m = (b-c)/d$ $n = h/d$ h : height of RC structure a : length of shear span
Conc. vertical	$A_v = \frac{1}{4} c(1-t_b)b(1-t_d)d$	c : cover of RC member A_i : vertical rebar area
Bar vertical	$A_{s1} = \left(\frac{n_l}{4} + \frac{n_s}{4} - 1 \right) \cdot A_l$ $A_{s2} = \frac{n_l}{2} \cdot A_l$ $A_{s3} = \frac{n_s}{2} \cdot A_l$	A_w : horizontal rebar area n_l, n_s : number of rebar each direction of section
Bar horizontal	$A_{w-lattice} = \frac{0.5d}{s} \cdot A_w$	

의 값을 가진다. 최적의 t_b 와 t_d 값은 구조물에 최소의 변형에너지를 발생시키므로, 이를 최적화 문제로 형성하게 되면 목적함수는 변형에너지가 된다.

2.4 최적화 기법

연속 함수에 대한 최적화 기법으로는 주로 축차선형계획법(successive linear programming, SLP)과 축차 무제약 최소화 기법(sequential unconstrained minimization technique, SUMT)등이 많이 이용되고 있다.⁵⁾ 이 중 이 연구에서는 SUMT법을 적용하였다. SUMT법은 설계변수와 제약조건을 갖는 비선형 최적화 문제를 일련의 별칙 매개변수들을 사용하여, 무제약 최소화 문제로 변형시킨 목적함수의 최소 해를 가능 해의 영역 안에서부터 지배적인 제약조건의 경계 부로 연속적으로 접근시켜 최적 해를 구하는 방법이다. SUMT법은 내부 별칙 함수법, 외부 별칙 함수법 그리고 혼합 내-외부 별칙 함수법이 있다.

이 연구에서는 래티스 모델의 최적화를 위해 외부 별칙 함수법을 사용하였다. 최적화 기법을 이용하여 변형에너지를 찾아야 하므로 식 (8)과 같이 변형에너지를 목적함수로 취하여 정식화 하였다. 설계변수는 t_d 와 t_b 가 된다. 따라서 최적화 문제의 목적함수와 제약조건식은 다음과 같다.

$$\text{Min. } \Pi(t_d, t_b) \quad (3)$$

Subject to constraints

$$G(1) = 1 - t_d \geq 0 \quad (4)$$

$$G(2) = t_d \geq 0 \quad (5)$$

$$G(3) = 1 - t_b \geq 0 \quad (6)$$

$$G(4) = t_b \geq 0 \quad (7)$$

$$\Pi(t_d, t_b) = \sum_{ele=1}^{N_{m,ele}} \sigma_i A_i \delta_i / l_i \quad (8)$$

여기서, Π 는 변형에너지, σ_i 는 각 부재의 응력, A_i 는 각 부재의 면적, δ_i 는 각 부재의 변위, l_i 는 각 부재의 길이이다.

3. 콘크리트 및 철근 재료의 구성모델

3.1 콘크리트 구성모델

콘크리트의 응력 및 변형을 관계는 Mohd-Yassin⁶⁾의 이

력 거동을 고려한 모델을 적용하였다. 이 모델은 Kent & Park⁷⁾의 단조하중 상태 및 반복하중 하에서의 Karsan & Jirsa⁸⁾의 제안식을 따르는 이력곡선으로 구성된다.

Fig. 4는 이 모델의 단조하중에 의한 콘크리트 응력-변형도 관계로서 세 개 구간으로 해석된다. OA 구간은 식 (9)와 같이 이차식으로, AB 구간은 식 (10)과 같이 일차식, BC 구간에서는 식 (11)과 같이 상수로 표현된다.

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$f_c = f'_c [1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)] \quad (10)$$

$$f_c = 0.2f'_c \quad (11)$$

여기서, f_c 는 콘크리트 응력, f'_c 는 콘크리트 압축강도를 나타낸다. 또한 Z 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$Z = \frac{0.5}{\varepsilon_{50c} - \varepsilon_0} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{50c} = \frac{3 + 0.002f'_c}{f'_c - 1000} + \frac{3}{4} \rho'' \sqrt{\frac{b''}{s}} \quad (13)$$

여기서, ρ'' 는 횡방향 철근비, b'' 는 콘크리트 코어 부분의 폭, 그리고 s 는 횡방향 철근의 간격이다. 콘크리트의 인장모델은 인장강도까지는 선형탄성으로 인장강도 도달 이후에는 선형적으로 인장연화 거동하는 것으로 가정하였다.

3.1.1 보통콘크리트 구속효과

보통콘크리트의 구속에 따른 강도 증진은 Mander⁹⁾의 제안식을 고려하였다.

$$f_{\alpha'} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f'_l}{f'_c}} - 2 \frac{f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (14)$$

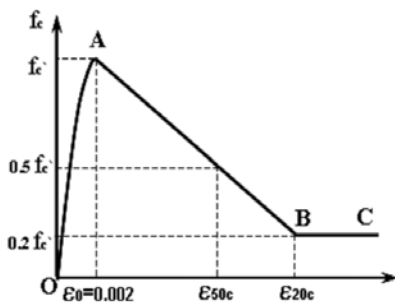


Fig. 4 Stress-strain relationship by monotonic loads

$$f'_l = 0.75 \rho_w f_{wy} \quad (15)$$

여기서, f'_c 는 구속전 콘크리트 압축강도, f'_l 는 횡방향 철근비 ρ_w 및 횡방향 철근의 항복강도 f_{wy} 로부터 산정된다.

3.1.2 고강도 콘크리트 구속효과

고강도 콘크리트의 횡방향 철근에 의한 구속효과는 Sheikh¹⁰⁾의 연구에 따라 다음 식과 같이 고려하였다.

$$f_{\alpha'} = 0.85 f'_c + 10.3 (\alpha \rho_w f_{yw})^{0.4} \quad (16)$$

여기서, b_i 는 수직 철근의 간격, b_c 는 횡방향 철근의 중심간 가로 폭, d_c 는 횡방향 철근의 중심간 세로 폭, s 는 횡방향 철근 간격, α 는 다음 식과 같다.

$$\alpha = \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_c d_c} \right) \left(1 - \frac{s}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s}{2d_c} \right) \quad (17)$$

3.2 철근의 구성모델

철근의 구성모델은 탄성영역과 소성영역을 고려하였으며 응력-변형률 곡선은 Fig. 5와 같다. 곡선에서 초기강성 E_0 및 항복이후의 강성 E_h 을 갖는 두 개의 기울기를 가지는 직선으로 고려하였다.

4. 고강도 철근콘크리트 구조물의 해석

비틀림 하중을 받는 고강도 철근콘크리트 구조물에 대한 3차원 비선형 래티스 모델의 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 해석 결과의 검증에 수행하였다. 앞서 언급된 연구에서는 해석단면의 가로와 세로의 비가 거의 같은 단면으로 래티스 이론의 적용이 비교적 간편하였다. 이 연구에서는 가로와 세로의 단면비가 세 배 이상 차이가 있는 단면에 대하여 3차원 래티스 모델을 적용함으로써 3차원 래티스 모델의 해석의 효율성과 적용성 그리고 해의 정확도를 검증하고자 하였다. 또한 래티스 요소의 크기를 다르게 모델하여 래티스 요소의 크기에 따른 영

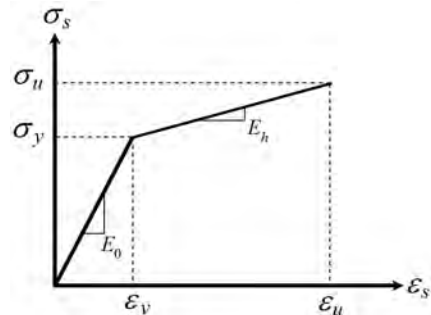


Fig. 5 Stress-strain relationship of steel bars

향을 연구하고자 하였다.

4.1 고강도 철근콘크리트 시험체

비틀림 하중을 받는 고강도 철근콘크리트 구조물에 대한 3차원 비선형 래티스 모델의 해석 결과와 실험 결과의 비교 검증을 수행하였다. 검증을 위해 Peng&Wong¹¹⁾의 비틀림 실험연구를 참고하였다(Fig. 6, 7).

이 실험에서는 고강도 콘크리트의 높이는 875 mm, 단면의 폭은 125 mm이고 단면의 높이가 서로 다른 세 시험체로 구성되어 있다. 시험체에 대한 자세한 내용은 Table 2에 정리하였다. 래티스 크기에 대한 사용성 검토를 위하여 b 에 대하여 래티스 요소의 크기를 1배, 0.5배, 0.25배로 모델하여 해석을 수행하였다. Fig. 7은 SW4 시험체의 래티스 크기에 따른 해석 모델링이다.

4.2 해석 결과

시험 결과 분석을 위하여 비틀림 모멘트와 비틀림 각의 관계그래프를 사용하였다. 실험에서는 시편의 네 점을 선정하여 네 점 각각의 변위와 서로간의 거리를 사용하여 비틀림 각도를 산정하였다. 해석 결과를 실험과 비교하기 위하여 실험에서 사용한 위치를 참고하여 네 점을 선정하였다. 선정된 네 점의 변위를 사용하여 실험에

서의 비틀림 각도는 Peng과 Wong¹¹⁾이 사용한 식 (18)의 산정법을 사용하였다.

$$\theta = \left[\arctan\left(\frac{L_{3i} - L_{3j}}{b}\right) - \arctan\left(\frac{L_{2i} - L_{2j}}{b}\right) \right] / h \quad (18)$$

여기서, b 는 시험체의 동일높이의 두 측점간의 거리이고, h 는 두 측정높이간의 거리이다. L_{3i} , L_{3j} , L_{2i} , L_{2j} 는 시편의 동일높이의 좌우에서 측정된 변위이다.

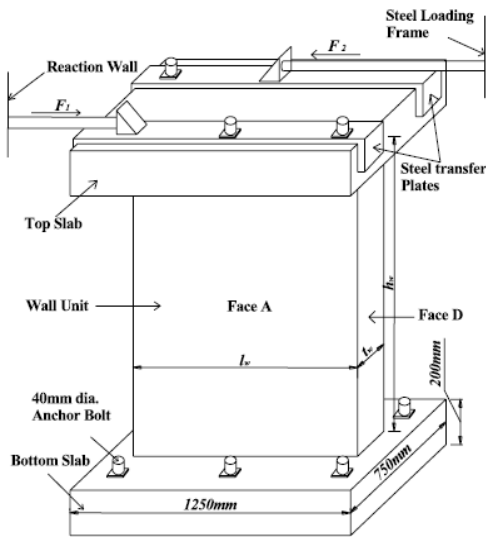
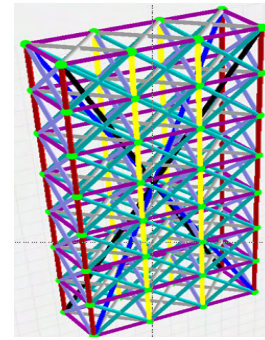
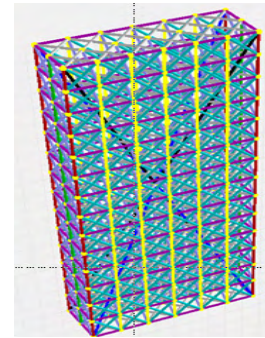


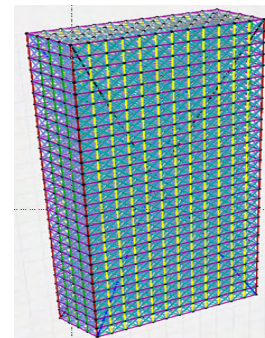
Fig. 6 Arrangements of specimen (Peng&Wong)



(a) SW4



(b) SW42



(c) SW43

Fig. 7 3D lattice modeling

Table 2 Detail of specimens

Specimen	Dimensions (mm)		Longitudinal rebars	ρ_l (%)	f_{yl} (MPa)	Transverse rebars	ρ_t (%)	f_{yt} (MPa)	ρ_{total} (%)	f_c (MPa)
	$l_w \times t_w$	$l_{w1} \times t_{w1}$								
SW4	450×150	400×100	5T10EF	1.16	459	T10@200	0.58	459	1.74	44.2
SW10	1000×150	948×98	8T12EF	1.21	480	T12@150	1.05	480	2.26	44.2
SW12	1200×150	1150×100	10T12EF	1.26	480	T10@200	0.55	459	1.81	44.2

래티스 부재의 단면에서 전단면(트러스 부분)에 대한 아치부분의 폭과 깊이에 대한 비율을 각각 t_b 와 t_d 로 정의하였다. 이 두 값은 최적화 기법을 사용하여 탄성 상태에서 최소변형에너지를 갖는 값으로 결정하였다. 최소 변형에너지는 구조물의 형상 및 하중의 형태에 따라 다르지만, 이 연구에서 개발된 래티스 모델의 적용성을 검토하기 위해 비교대상 시험 결과로 사용한 시험체와 하

중을 사용함으로써 구조물의 형상과 하중은 고정된다. 그러므로 최소변형에너지를 목표값으로 두고 t_b 와 t_d 에 대한 제약조건($0 < t_b, t_d < 1$)을 사용하였다. Table 3은 해석에 적용된 최적의 t_b 와 t_d 값을 래티스의 크기에 따라 결정된 해석변수별로 정리하였다.

Table 3 Lattice parameter

Specimen		t_b	t_d
SW4	SW41	0.05	0.60
	SW42	0.01	0.10
	SW43	0.30	0.20
SW10	SW101	0.12	0.35
	SW102	0.20	0.12
	SW103	0.11	0.20
SW12	SW121	0.18	0.20
	SW122	0.10	0.25
	SW123	0.10	0.20

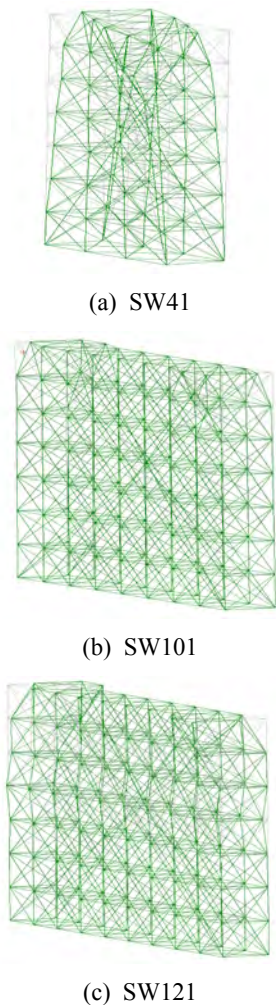


Fig. 8 Deformation of specimens

Fig. 8에서 SW4 시편에 대한 실험 결과와 래티스 모델을 사용한 비틀림 해석 결과를 비교하였다. 해석 결과 초기강성은 SW41과 SW42의 경우 실험 결과와 비교하여 다소 작게 예측되었고, SW43의 경우는 실험 결과와 유사하게 예측되었다. 이는 RC 부재를 래티스로 모델함에 따라서 단면의 면적이 다소 감소함에 따른 것으로 보인다. 최대토크의 경우 SW41은 실험값과 유사하게 예측되었고, SW42는 실험값 보다 크게 예측되었다. SW43은 거의 실험값과 동일하게 예측되었으나, 최대토크의 발생 변위가 다소 작았다. 세 경우 모두 최대 토크이후의 토크감소 현상이 뚜렷하게 발생하지는 않았다. SW4 시험체의 해석은 초기강도는 SW43이 가장 유리한 것으로 판단된다. 최대토크는 세 경우에서 비슷한 정확도를 나타내고 있으나 최대토크 도달시점이 각각 다르게 나타났다. 초기거동과 최대강도의 발현시점에서 약간의 차이가 발생하였지만 전체적인 거동은 실험 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 9에서 SW10 시편에 대한 실험 결과와 래티스 모델을 사용한 비틀림 해석 결과를 비교하였다. 해석 결과 초기강성은 세 경우 모두 실험값과 비슷하였다. 하지만 해석 초기의 토크강도가 실험값보다 다소 크게 산정되었다. 최대토크의 크기와 강도가 지속되는 비틀림 각도의 범위도 세 경우 모두 실험값과 거의 일치하는 결과를 나타내고 있다. 최대토크 이후의 거동도 실험 결과와 거의 유사하게 나타났다. 최대토크 이후의 거동은 해석상 SW101의 감소폭이 가장 크고 SW102의 감소폭이 가장 작았다. 해석초기에 토크 강도가 다소 차이가 있으나 최대강도의 크기와 지연특성에서 실험 결과와 거의 유사한 거동을 나타내고 있다.

Fig. 10에서 SW12 시편에 대한 실험 결과와 래티스 모델을 사용한 비틀림 해석 결과를 비교하였다. 해석 결과 SW12 시험체의 초기 강성은 세 경우 모두 실험값과 거

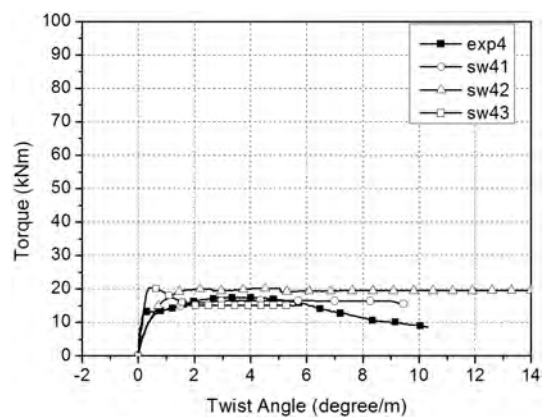


Fig. 9 Torque and twist-angle relation for SW4

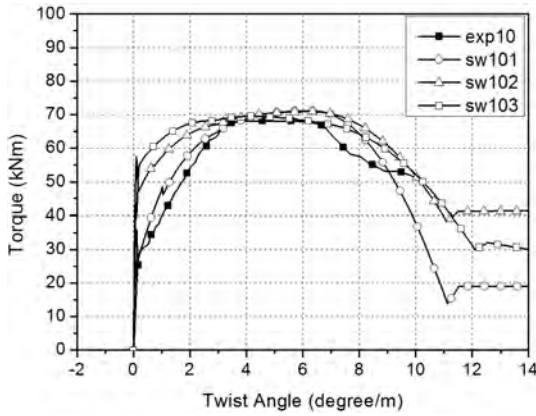


Fig. 10 Torque and twist-angle relation for SW10

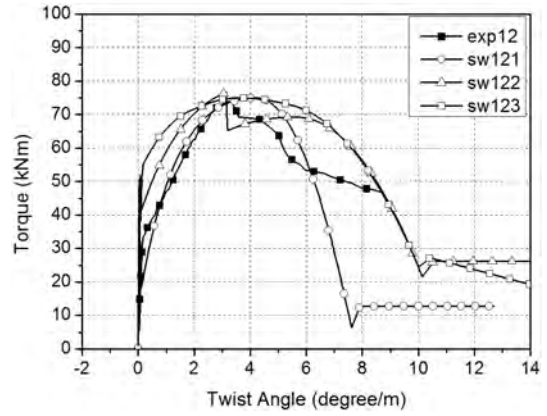


Fig. 11 Torque and twist-angle relation for SW12

의 일치 하였다. 해석초기의 경우 토크의 크기는 SW121은 실험 결과와 거의 일치하였고 SW122와 SW123은 다소 크게 산정되었다. 최대토크 발생 비틀림 각도는 세 경우 모두 실험값과 비슷하였다. 최대토크 이후의 거동은 SW121이 가장 일치하는 강도와 거동을 나타내지만 토크의 감소폭이 크게 발생하였고, SW122와 SW123의 경우 항복 이후의 토크크기가 다소 크게 산정되었고 다소 차이가 나는 거동을 나타냈다.

4.3 결과 분석 및 고찰

세 가지 형상의 비틀림 시험 결과를 사용하여 3차원 래티스 모델의 적용성을 분석하였다. 3차원 래티스 모델의 해석 결과 초기강도는 실험 결과와 거의 일치하게 산정되었다. 또한, 일부 해석 결과에서는 초기의 토크강도가 크게 산정되기도 하였지만 최대토크의 크기와 비틀림 각도 등의 산정 결과가 실험 결과와 잘 일치하였다.

최대토크 이후의 거동에서 콘크리트의 파괴메카니즘이 해석적으로 일부 구현이 되고 있음을 알 수 있었다. 해석초기에 토크 예측이 다소 크게 예측이 되는 경향이 발생하고 있지만, 3차원 래티스 모델을 사용한 고강도 철근콘크리트 구조물의 비틀림 해석으로 최대강도의 산정과 최대토크 즉 항복 이후의 거동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

래티스 요소의 크기에 따른 적용성과 사용성을 평가하기 위하여 토크강도와 거동특성을 분석하였다. 해석초기에 토크의 크기를 비교해보면 래티스의 크기가 클수록 토크가 비교적 작게 산정되고, 래티스의 크기가 작을수록 토크의 크기가 크게 산정되었다. 또한 항복 이후의 거동에서도 래티스 요소의 크기가 클수록 토크의 감소가 급격히 발생하고 감소량도 많은 것으로 나타났다. 이러한 토크의 크기와 감소 경향은 요소의 크기에 대한 일반적인 현상과 일치하고 있다.

스트럿-타이 모델은 평형방정식에 근거한 방법으로 구조물의 변위에 대한 정확한 정보획득이 쉽지 않았다. 래티스 모델을 사용할 경우 해석 결과 그래프에서 보듯이

거의 정확한 값을 나타내고 있다. 이러한 변위정보를 바탕으로 구조물의 정확한 거동예측이 가능할 것으로 사료된다. Fig. 11은 해석 결과 구조물의 변형을 나타내고 있다. 실험을 통한 변형형상과 파괴형상을 해석을 통하여 완벽하게 재현할 수는 없지만, 해석 결과와 실험 결과와 거의 일치하므로 평가를 위한 해석도구로 사용가능할 것으로 판단된다.

해석의 정확도와 효율성을 제고하기 위하여 해석부재의 특성을 효율적으로 고려할 수 있는 기준에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 래티스 모델의 개발과는 별개로 3차원 래티스 부재의 단면산정법과 각 부재의 단면산정에 대한 최적화 기법에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

이 연구에서는 2차원 래티스 모델을 확장하여 3차원 래티스 모델을 개발하였다. 개발된 3차원 래티스 모델을 사용하여 비틀림 해석을 수행하였다. 래티스 모델의 적용성과 사용성을 평가하기 위하여 래티스 요소의 크기를 변수로 하여 해석을 수행하였다. 실험에 의한 결과값과 해석값을 비교한 개발된 3차원 래티스 모델의 평가 결과는 다음과 같다.

- 1) 3차원 래티스 모델을 사용한 고강도 철근콘크리트 구조물의 비틀림 해석결과 초기강성은 실험과 일치하는 결과를 나타낸다. 또한, 실험 결과와 거의 일치하는 변위정보를 제공해 준다.
- 2) 초기 토크는 다소 크게 산정되는 경향이 있지만 최대토크의 크기는 실험 결과와 거의 일치하는 결과를 나타낸다. 항복이후의 거동이 다소 크게 예측되지만 실제 구조물의 거동을 비교적 실제에 가깝게 예측하고 있다.
- 3) 3차원 래티스 모델은 모델링 형상의 차이와 그에 따른 매개변수의 차이에 따라 해석 결과와 실험 결과에서 구조물의 초기거동과 최대강도의 발현시점 및 지연특성에서 약간의 차이를 보이고 있으나, 고

강도 철근콘크리트 구조물의 전체적인 비틀림 거동 특성을 파악하는 데는 적합할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 2012년도 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제관리번호: 11첨단도시C10)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Yun, Y. M., "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, Issue 4, 2000, pp. 581-590.
2. Kwon, M. H., Ha, G. J., Park, T. G., and Cho, C. G., "Analysis of Reinforced Concrete Columns under Cyclic Loads Using a 2-Dimensional Lattice Model," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 103-111.
3. Miki, T., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Loads by Using Three-Dimensional Lattice Model," Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 2004, pp. 23-48.
4. Miki, T. and Niwa, J., "Nonlinear Analysis of RC Structural Members Using 3D Lattice Model," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2, No. 3, 2004, pp. 343-358.
5. Kwon, M. H., "Optimization of Framed Structural Models with Composite Section," Master's Thesis, Gyeongbuk National University, 1994, pp. 25-43.
6. Mohd Yassin, M. H., "Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures under Monotonic and Cyclic Loads," Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, UC Berkeley, 1994, pp. 32-84.
7. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural Members with Confined Concrete," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969-1990.
8. Karsan, I. D. and Jirsa, J. O., "Behavior of Concrete under Compressive Loadings," *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 95, No. ST12, 1969, pp. 2543-2563.
9. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1829. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114: 8\(1804\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114: 8(1804)))
10. Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M., "Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 108, No. ST12, 1982, pp. 2703-2722.
11. Peng, X. N. and Wong, Y. L., "Behavior of Reinforced Concrete Walls Subjected to Monotonic Pure Torsion-An Experimental Study," *Engineering Structural*, Vol. 33, No. 9, 2011, pp. 2495-2508. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.022>)

요 약 최근의 지진을 경험하면서 지진에 대한 성능 설계 개념이 설계기준에 포함되기 시작하였다. 따라서 RC 구조물의 강도와 연성을 예측할 수 있는 간단한 해석도구가 필요하다. 이 연구에서는 2차원 래티스 모델을 확장하여 3차원 래티스 모델을 개발하였다. 개발된 3차원 래티스 모델을 평가하기 위하여 구조물의 비틀림 해석을 수행하였다. 해석의 평가를 위하여 실험 결과와 비교하였다. 래티스 요소의 크기에 따른 해석 결과를 분석하여 사용성을 검토하였다. 개발한 3차원 래티스 모델을 사용한 비틀림 거동해석이 실험값과 비교적 일치하는 결과를 보여주었다.

핵심용어 : 비틀림, 비선형, 3차원 래티스, 고강도 콘크리트, RC 구조물