

기하비선형과 재료비선형을 동시에 고려한 철근콘크리트 부재의 비선형 해석

Nonlinear Analysis Method of the Reinforced Concrete Member
Considering the Geometric and the Material Nonlinearities

한 재 익* 이 경 동**
Han, Jae-Ik Lee, Kyung-Dong

Abstract

The purpose of this study is to propose the nonlinear analysis method which combines the nonlinear incremental method with the layered method to solve the problems due to the geometric and the material nonlinearities. As numerical analysis models, the reinforced concrete simple beam and the steel arch frame are used to verify the algorithm of the proposed nonlinear method. The results are gotten from the computation procedures. According to the results of this study, the fracture pattern of the beam according to the ratio of tensile steel and the strength of the concrete and the steel can be estimated by the proposed method. Therefore, the load-deflection curve of structure can be, exactly, depicted by the proposed method. Also, the rupture load, the site and the depth of crack of the beam can analytically be checked by the proposed method. In this respect, the proposed method contributes for the solving the stability problem of the actual structure.

keywords : Nonlinear analysis, Geometric nonlinear, Material nonlinear, Load-deflection curve, Stress-strain curve, Crack

1. 서 론

최근에 안정문제는 실제 구조물에 대하여 임계하중의 결정뿐만 아니라 비선형 하중-처짐곡선을 작성하는

것을 포함하고 있다. 현재, 다수의 연구에서 이러한 비선형 하중-변위곡선을 작성하기 위한 유한요소법의 수행절차를 제시하고 있다(Connor et al., 1968; Powell, 1969; Wen and Rahimzadeh, 1983).

* 정회원, 서남대학교 토목공학과 조교수
** 정회원, 순천대학교 토목공학과 부교수

E-mail : han0233@tiger.seonam.ac.kr 018-618-9551

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2003년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

그러나 이들 방법의 상대적인 복잡성과 수행방법에 따른 편차가 존재함으로 인하여 기존의 연구 자료를 가지고 근본적으로 명확한 곡선을 구하는 것은 극히 어렵다. 이러한 문제점을 극복하고 기하학적 비선형 문제에 대한 하중-처짐 곡선을 작성하기 위하여 유한요소법을 사용한 선형 증분법, 비선형 증분법, 직접법의 세 가지 방법(Chajes and Churchill, 1987)이 개발되어 적용되고 있으며, 구조재료의 비선형성 문제에 대한 하중-변위 곡선을 작성하기 위해서는 충분할법(강영진, 1983; 이차돈 외, 1995; 한재익 외, 2001)이 개발되어 적용되고 있다. 충분할법은 부재의 단면을 분할하여 단면의 위치에 따라 응력-변형률 모델의 재료의 비선형 특성을 부여하는 방법으로서, 응력-변형률 모델의 접선탄성계수를 사용하는 방법(강영진, 1983)과 할선탄성계수를 사용하는 방법(이차돈 외, 1995, 한재익 외, 2001)이 사용되고 있다.

기하학적 비선형 문제는 때때로 대변형문제로 취급되지만 이러한 문제는 대변형이 일어나기 때문만이 아니라 오히려 구조물의 강성에 중요한 영향을 미치는 축의 직각방향으로의 변위로 인한 축방향 응력이 발생하기 때문에 선형 또는 소변형 문제와도 무관하지 않다. 선형문제에서는 계의 강성행렬을 구성하는 항이 일정하나, 기하학적 비선형문제에서는 강성행렬의 항은 구조물의 변위에 관한 함수를 포함하고 있다. 다시 말하자면, 방정식 $[K]\{D\} = \{F\}$ 에서 힘 $\{F\}$ 와 변위 $\{D\}$ 의 관계인 강성행렬 $[K]$ 가 기하학적 비선형 문제에서는 미리 알 수 없는 변형된 형상에 대하여 표현되어야만 한다. 이 방정식을 설정하고 해를 구함으로써 기하학적 비선형 문제에 대한 하중-변위 곡선을 작성할 수 있다(Chajes and Churchill, 1987). 구조물이 변형을 일으킬 때 선형 문제 및 기하학적 비선형 문제에 있어서 임의의 단면에 대한 계의 강성행렬은 구성재료 특성 및 위치에 관계없이 일정하나, 구조재료의 비선형 문제에 있어서는 임의의 단면에 변형이 발생하면 단면을 구성하는 재료의 특성 및 위치에 따라 응력-변형률 곡선이 다르게 나타나므로 또한 강성행렬도 달라진다. 따라서 강성행렬의 항에 단면을 구성하는 재료의 특성 및 위치에 대한 비선형을 반영함

으로서 구조재료의 비선형 문제에 대한 하중-변위 곡선을 작성할 수 있다. 이때 강성행렬의 항은 각 층의 응력-변형률 곡선으로부터 할선탄성계수를 구함으로써 수행된다(한재익 외, 2001). 접선탄성계수는 응력-변형률 곡선의 접선이 음의 값을 갖는 경우에는 재료의 특성을 반영할 수 없는 반면에 할선탄성계수를 사용할 경우에는 재료의 특성을 반영할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구는 기하학적 비선형 문제가 구조재료의 특성 및 위치에 따른 비선형을 고려하지 못하고, 구조재료의 비선형 문제가 기하학적 형상에 따른 비선형을 고려하지 못한다는 상호간의 단점을 해결하기 위하여, 두 방법을 결합함으로써 기하학적 비선형 문제뿐만 아니라 구조재료의 비선형 문제를 동시에 고려할 수 있는 비선형 해석 방법을 제시하고자 한다.

2. 해석이론

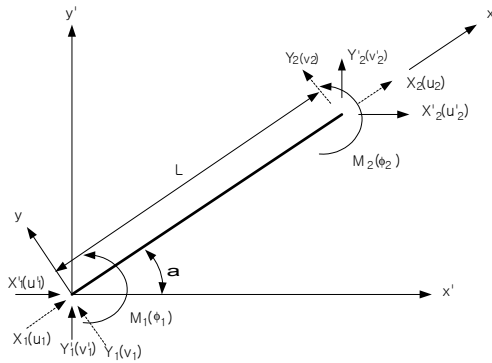
보의 강성행렬을 구하기 위하여 Fig. 1과 같이 임의의 요소에 대하여 길이를 L , i 번째 layer의 단면적, 단면2차모멘트, 탄성계수를 각각 A_i , I_i , E_i 라고 가정하고, 그리고 6개의 절점 변위 벡터 $\{d\}$ 와 힘 벡터 $\{f\}$ 가 정의되었다고 하자(T.Y. Yang, 1996; Harold C. Martin, 1996, 少堀爲雄, 1980).

보-기둥 요소에 대한 변형률-변위 관계식은 다음과 같다.

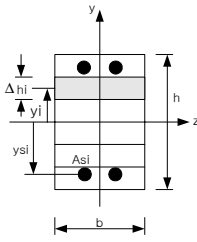
$$\epsilon_{a(x,y)} = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 - y \frac{d^2v}{dx^2} \quad (1)$$

여기서 $\epsilon_{a(x,y)}$ 는 변형률의 변화량이고, u 와 v 는 그에 대응하는 변위의 변화량이다.

요소의 변형 증가량과 그에 대응하는 힘의 증가량 사이에 관계식을 얻기 위하여 부재의 임의의 점 x 및 y 에서의 증분단계의 시작점에서 축방향 변형률을 $\epsilon_0(x,y)$ 라 하고, 단계가 진행되는 중의 추가적인 변형률을 $\epsilon_{a(x,y)}$ 라고 하면 단계에 대한 변형에너지의 변화량은 식(1)을 사용하고, n 개의 층으로 분할된 단면에 대하여 적분하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다



(a) 요소의 힘과 변위에 관한 좌표계



(b) 단면의 형상

Fig. 1 구조해석 모델

$$\begin{aligned}
 U = & P \int_0^L \left[\frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right] dx \\
 & + \frac{1}{2} \int_0^L \left[\sum_1^n E_i A_i \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \sum_1^n E_i I_i \left(\frac{d^2v}{dx^2} \right)^2 \right. \\
 & \left. + \sum_1^n E_i A_i \frac{du}{dx} \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 + \sum_1^n \frac{E_i A_i}{4} \left(\frac{dv}{dx} \right)^4 \right] dx \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서,

$P = \int_A E_i \epsilon_{0(x,y)} dA$ 로서 증분단계의 시작점에서 부재의 축방향력이다.

그리고 형상함수를 사용하고 가상일의 원리를 적용하면 다음 식을 이끌어 낼 수 있다.

$$\{\Delta f\} = [k]\{\Delta d\} \quad (3)$$

식(3)에서 $[k]$ 는 증분 강성행렬로 부재의 증분 힘

$\{\Delta f\}$ 와 그에 대응하는 증분 변위량 $\{\Delta d\}$ 와 관계를 갖으며, 다음 식과 같이 4개의 서로 다른 강성행렬의 합으로 정의된다.

$$[k] = [k_0] + [k_p] + [k_1] + [k_2] \quad (4)$$

또한, Fig. 1에서 보는 바와 같이 요소좌표 x 는 기준좌표 x' 와 비교할 때 α 만큼 회전하고 있으므로 요소좌표계는 전체좌표계로 변환되어야 한다. 따라서, 변환행렬 $[T]$ 를 사용하면 식(3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{\Delta F\} = [T]^T [k] [T] \{\Delta D\} = [K_e] \{\Delta D\} \quad (5)$$

식(5)에서 $[K_e]$ 는 기하학적 비선형성을 포함하는 절점 변위 u_i, v_i, θ_i 및 u_j, v_j, θ_j 와 구조재료의 비선형성을 포함하는 할선탄성계수 E_i 가 포함되어 있다. 절점변위 u_i, v_i, θ_i 및 u_j, v_j, θ_j 는 비선형 증분법을 사용하여 반복계산으로 구할 수 있고, 할선탄성계수 E_i 는 재료의 응력-변형률 모델로부터 각각의 layer에 대하여 반복계산에 의하여 수렴하는 값이다.

3. 해석방법

본 연구의 해석방법은 기하학적 비선형 문제를 포함하는 비선형 증분법과 구조재료의 비선형 문제를 포함하는 층분할법을 조합한 비선형 해석법으로 식(4)의 증분 강성행렬을 사용하여 구조해석을 수행하는데, 증분 강성행렬에는 기하학적 비선형을 고려하기 위하여 해석시 계산되는 부재의 축방향력 및 절점 변위를 포함하고, 그리고 각 단면의 구조재료의 특성을 고려하기 위한 단면의 특성이 포함된다.

따라서 증분 강성행렬 $[k]$ 의 모든 항은 층(layer)의 응력 및 변형률에 의하여 계산되는 할선탄성계수의 함수이고, 더불어 $[k_p]$ 는 부재에 발생하는 축방향력, $[k_1]$ 과 $[k_2]$ 의 항은 하중 단계에서 발생하는 증분 변위를 추가적으로 포함하는 함수이다.

그리고 하중 단계의 시작에서는 이들 증분변위 및 각 층의 응력-변형률을 알 수 없기 때문에 반복과정을 통하여 해를 얻게 된다. 주어진 하중단계에 대한 증분 변위를 구하는데 증분 강성행렬 $[k] = [k_0] + [k_p]$ 이 사용되지만 반복과정을 통하여 $[k_1]$ 과 $[k_2]$ 항이 앞 과정의 증분변위량을 사용하여 수렴될 때까지 계산 되므로 증분 강성행렬 $[k]$ 는 계속 더 나은 값으로 수정 된다. 이때 단면의 중립축의 위치 및 탄성계수는 힘의 평형방정식 및 응력-변형률 모델에 의하여 수정된다.

또한 좌표변환 행렬 $[T]$ 는 반복과정 중에는 일정 하지만 하중단계에 따라 새로운 값으로 수정된다.

즉, 수행과정은 Fig. 2의 하중-변위 곡선에서 하중 증분 $\{\Delta F\}$ 에 대응하는 증분변위 $\{\Delta D\}$ 를 결정하기 위한 과정이다. 초기 단계에서 점 A에서 계산된 증분 강성행렬 $[k]_0$ 를 사용한 방정식 $[k]_0\{\Delta D\}_1 = \{\Delta F\}$ 에 의하여 $\{\Delta D\}_1$ 을 결정하고, $\{\Delta D\}_1$ 에 의하여 수정된 강성행렬 $[k]_1$ 을 사용한 방정식 $[k]_1\{\Delta D\}_1 = \{\Delta F\} - \{\Delta F\}_1$ 에 의하여 불평형 힘 $\{\Delta F\}_1$ 을 계산한다. 그리고 반복적으로 방정식 $[k]_1\{\Delta D\}_2 = \{\Delta F\}_1$ 에 의하여 $\{\Delta D\}_2$ 를 계산하고, 다시 $\{\Delta D\}_2$ 에 의하여 수정된 강성행렬 $[k]_2$ 을 사용한 방정식 $[k]_2\{\Delta D\}_2 = \{\Delta F\} - \{\Delta F\}_2$ 을 사용하여 새로운 불평형 힘 $\{\Delta F\}_2$ 을 계산한다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

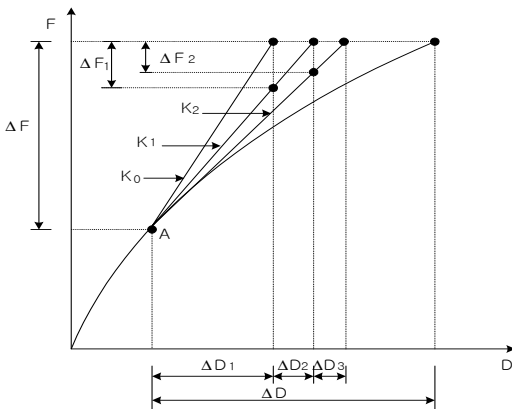


Fig. 2 비선형 증분법의 반복과정

$$[k]_{i-1}\{\Delta D\}_i = \{\Delta F\}_{i-1} \quad (6)$$

$$[k]_i\{\Delta D\}_i = \{\Delta F\} - \{\Delta F\}_i \quad (7)$$

식(6) 및 식(7)에 의하여 불평형 힘 $\{\Delta F\}_i$ 가 아주 작은 값을 가질 때까지 반복 계산함으로써 증분변위 $\{\Delta D\}$ 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\{\Delta D\} = \{\Delta D\}_1 + \{\Delta D\}_2 + \dots + \{\Delta D\}_i \quad (8)$$

3.1 해석절차

해석절차를 흐름도로 나타내면 Fig. 3과 같다.

3.2 증분강성행렬

식(4)의 임의의 부재에 대한 증분 강성행렬은 대칭행렬로서 상삼각요소의 0이 아닌 각 항은 다음과 같다.

$$k_{0(1,1)} = -k_{0(1,4)} = k_{0(4,4)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{L} \quad (9)$$

$$k_{0(2,2)} = -k_{0(2,5)} = k_{0(5,5)} = \sum_1^n \frac{12E_i I_i}{L^3} \quad (10)$$

$$k_{0(2,3)} = k_{0(2,6)} = -k_{0(3,5)} = k_{0(5,6)} = \sum_1^n \frac{6E_i I_i}{L^2} \quad (11)$$

$$k_{0(3,3)} = k_{0(6,6)} = 2k_{0(3,6)} = \sum_1^n \frac{4E_i I_i}{L} \quad (12)$$

$$k_{p(2,2)} = -k_{p(2,5)} = k_{p(5,5)} = \frac{6P}{5L} \quad (13)$$

$$k_{p(2,3)} = k_{p(2,6)} = -k_{p(3,5)} = -k_{p(5,6)} = \frac{P}{10} \quad (14)$$

$$k_{p(3,3)} = k_{p(6,6)} = -4k_{p(3,6)} = \frac{2PL}{15} \quad (15)$$

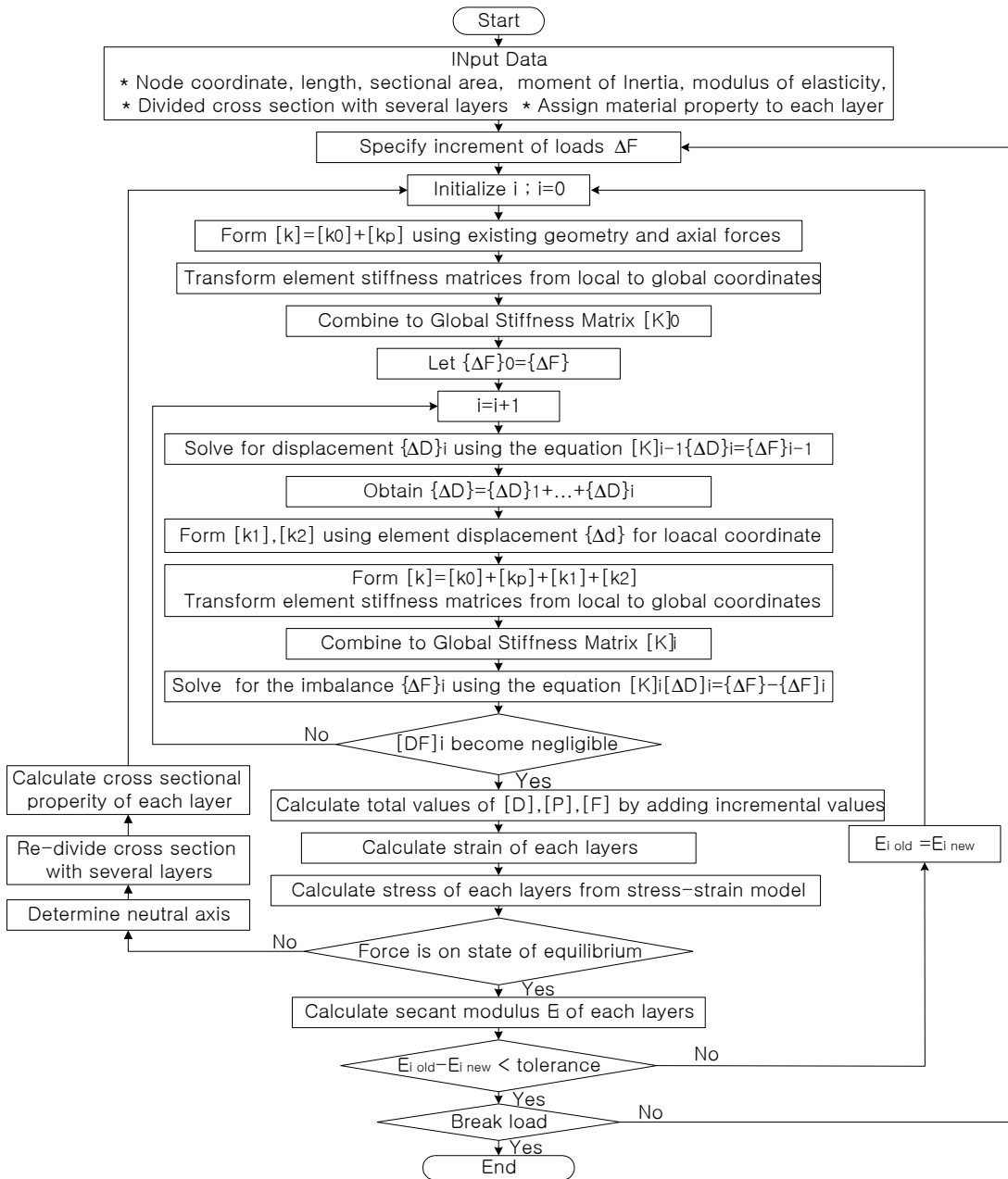


Fig. 3 수치해석의 수행 순서도

$$k_{1(1,2)} = k_{1(4,5)} = -k_{1(2,4)} = -k_{1(1,5)} \quad (16)$$

$$= \sum_1^n \frac{3E_i A_i}{5L^2} (v_2 - v_1) - \sum_1^n \frac{E_i A_i}{20L} (\theta_1 + \theta_2)$$

$$k_{1(1,3)} = -k_{1(3,4)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{20L} (v_2 - v_1) \quad (17)$$

$$+ \sum_1^n \frac{E_i A_i}{60} (\theta_2 - 4\theta_1)$$

$$k_{1(1,6)} = -k_{1(4,6)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{20L} (v_2 - v_1) \quad (18)$$

$$+ \sum_1^n \frac{E_i A_i}{60} (\theta_1 - 4\theta_2)$$

$$k_{1(2,2)} = k_{1(3,5)} = -k_{1(2,5)} = \sum_1^n \frac{3E_i A_i}{5L^2} (u_2 - u_1) \quad (19)$$

$$k_{1(3,3)} = k_{1(6,6)} = -4k_{1(3,6)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{15} (u_2 - u_1) \quad (20)$$

$$k_{1(3,5)} = k_{1(5,6)} = -k_{1(2,3)} = -k_{1(2,6)} \quad (21)$$

$$= -\sum_1^n \frac{E_i A_i}{20L} (u_2 - u_1)$$

$$k_{2(2,2)} = k_{2(5,5)} = -k_{2(2,5)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{420} \left[\frac{18}{L} (\theta_1^2 \right.$$

$$\left. + \theta_2^2) + \frac{432}{L^3} (v_2 - v_1)^2 - \frac{108}{L^2} (v_2 - v_1)(\theta_1 + \theta_2) \right] \quad (22)$$

$$k_{2(2,3)} = -k_{2(3,5)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{840} \left[-3\theta_1^2 + 3\theta_2^2 \right.$$

$$\left. + 6\theta_1\theta_2 + \frac{108}{L^2} (v_2 - v_1)^2 - \frac{72}{L} (v_2 - v_1)\theta_1 \right] \quad (23)$$

$$k_{2(2,6)} = -k_{2(5,6)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{840} \left[3\theta_1^2 - 3\theta_2^2 \right.$$

$$\left. + 6\theta_1\theta_2 + \frac{108}{L^2} (v_2 - v_1)^2 - \frac{72}{L} (v_2 - v_1)\theta_2 \right] \quad (24)$$

$$k_{2(3,3)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{420} \left[12L\theta_1^2 + L\theta_2^2 - 3L\theta_1\theta_2 \right.$$

$$\left. + \frac{18}{L} (v_2 - v_1)^2 + 3(v_2 - v_1)(\theta_1 - \theta_2) \right] \quad (25)$$

$$k_{2(3,6)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{840} \left[-3L\theta_1^2 - 3L\theta_2^2 \right.$$

$$\left. + 3L\theta_1\theta_2 - 6(v_2 - v_1)(\theta_1 + \theta_2) \right] \quad (26)$$

$$k_{2(6,6)} = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{420} \left[L\theta_1^2 + 12L\theta_2^2 - 3L\theta_1\theta_2 \right.$$

$$\left. + \frac{18}{L} (v_2 - v_1)^2 + 3(v_2 - v_1)(\theta_2 - \theta_1) \right] \quad (27)$$

4. 수치해석

4.1 수치해석모델

기하 비선형과 재료비선형을 고려한 비선형 해석방법에 대한 알고리즘을 검증하기 위하여 수치해석 모델로 두 가지 모델을 사용하였다. 먼저 기하학적 비선형성을 검증하기 위하여 前田幸雄(1974)의 연구를 참고하여 Fig. 4와 같은 평면 아치프레임의 각 절점에 하중이 작용하도록 하고, 단면은 층으로 분할하여 각 층에 대하여 강재의 재료적 특성을 부여하였다.

그리고 재료적 비선형을 검증하기 위하여 두 점에 수직하중에 의한 휨을 받는 철근콘크리트 단순보를 신성우(1996)의 연구를 참고하여 Fig. 5와 같이 2점 가력을 하도록 하였으며, 단면의 분할층에 Table 1과 같이 철근콘크리트 및 철근의 재료적 특성을 달리하여 부여한 4개의 보를 선택하여 해석을 수행하였다.

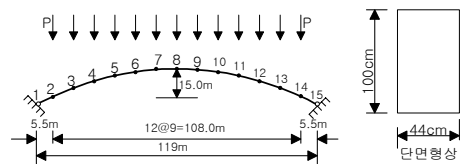


Fig. 4 2한지 아치(모델 1)

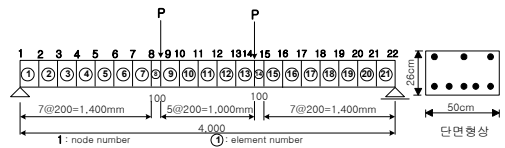


Fig. 5 철근콘크리트 단순보(모델 2)

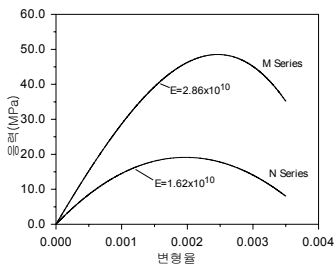
Table 1 모델1의 압축강도 및 인장철근비

구분	콘크리트 압축강도 f_{ck} (MPa)	철근 항복강도 f_y (MPa)	평형 철근비 ρ_b	인장 철근비 ρ
N1	19.62	294.30	0.021	0.0124
N2		343.35		0.0195
M1	51.01	343.35	0.044	0.0306
M2		392.40		0.0441

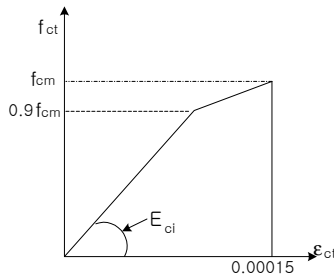
콘크리트의 파괴변형률	0.0035	* 구성재료 중 파괴변형률에 먼저 도달되어 최종적으로 구조물의 파괴를 지배하는 구성재료를 알아보기 위하여 가정한 값임.
철근의 파괴변형률	0.004	

4.2 응력-변형률 모델

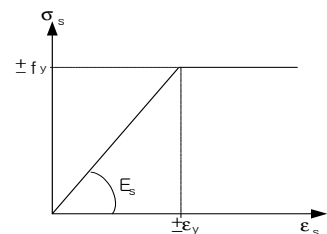
본 연구의 비선형 해석방법에 있어서 재료적 비선형을 고려하기 위한 알고리즘을 검증하기 위하여 수치해석에 적용된 콘크리트의 응력-변형률 모델은 사용된 각각의 재료에 대하여 작성하였다. 콘크리트의 압축에 대한 응력-변형률 모델은 신성우(1996)의 실험모델이 고강도 콘크리트를 사용한 점을 감안하여 문헌의 실험 결과를 Fig. 6(a)와 같이 모델화하여 적용하였고, 콘크리트의 인장에 대한 응력-변형률 모델은 CEB-FIP MODEL CODE를 참조하여 Fig. 6(b)와 같이 작성하여 적용하였다(Comite Euro-International Du Beton, 1993). 그리고 철근의 응력-변형률 곡선은 시방서를 참조하여 Fig. 6(c)와 같이 작성하여 적용하였다(건설교통부, 1996).



(a) 콘크리트의 압축



(b) 콘크리트의 인장



(c) 철근의 인장 및 압축

Fig. 6 응력-변형률 모델

4.3 수치해석 결과

수치해석을 수행한 결과, 모델1의 2번지 아치의 중앙점에 대한 하중-처짐곡선을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 본 연구의 해석은 구조물의 기하비선형 및 재료비선형을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

또한 철근콘크리트의 각 실험모델에 대하여 보의 중앙점의 거동을 파악한 결과, 균열하중 및 인장철근의 항복시 작용하중, 철근의 응력과 변형률, 균열깊이, 그리고 압축콘크리트의 항복시 작용하중, 압축연단의 응력과 변형률, 균열깊이를 계산한 결과는 Table 2에 나타내었고, 하중-처짐 곡선, 압축콘크리트 및 인장철근의 응력-변형률 곡선, 압축콘크리트 및 인장철근의

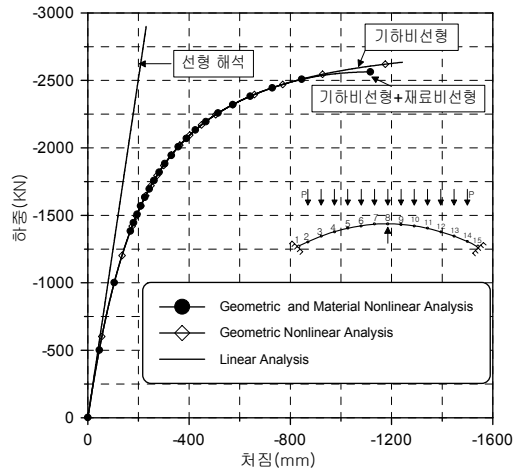


Fig. 7 모델1의 하중-처짐곡선

Table 2 보의 중앙단면에 대한 해석결과

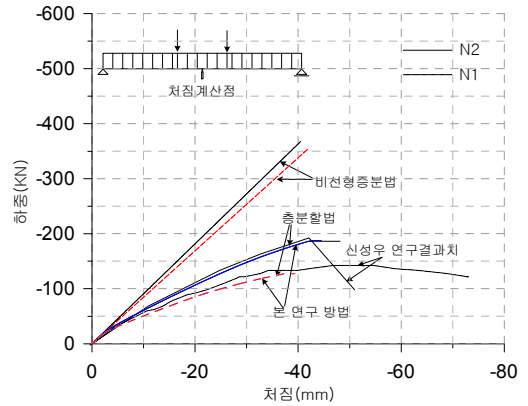
구분	균열하중 (KN)	인장철근의 항복			압축콘크리트의 항복				
		하중 (KN)	응력 (MPa)	변형율 ($\times 10^{-3}$)	균열깊이 (m)	하중 (KN)	응력 (MPa)	변형율 ($\times 10^{-3}$)	균열깊이 (m)
N1	17.11	77.31	294.3	1.4732	0.14276	127.70	18.926	1.8587	0.24813
N2	19.01	132.51	343.4	1.7167	0.12411	125.91	18.980	1.9660	0.12411
M1	29.61	199.21	343.4	1.7172	0.13471	313.60	48.422	2.3742	0.24907
M2	33.51	323.51	392.4	1.9613	0.11893	302.11	48.511	2.4633	0.11893

하중-변형률 곡선 그리고 하중과 균열깊이와의 관계를 Fig. 8~Fig. 11에 각각 도시하였다.

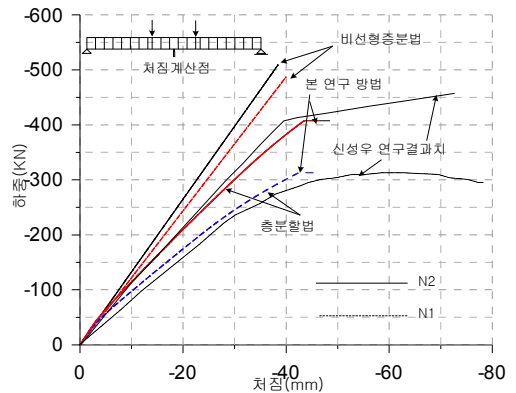
Fig. 8에서 비선형 증분법은 하중-처짐곡선이 비례관계로 나타나고 있는데, 이것은 비선형 증분법이 처짐이 미소하게 발생하여 기하강성의 변화가 미소한 경우에는 선형해석법과 차이가 없어 신성우(1996)의 실험치와 상당한 차이를 보였다. 그리고 증분할법과 본 연구의 해석방법은 기하강성의 변화가 미소하여 두 방법에 의한 결과치는 거의 일치하고 있으며, 신성우(1996)의 실험치와 비교적 근사하여 재료비선형을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 9의 응력-변형률 곡선은 콘크리트의 압축강도 및 철근의 항복강도에 따른 중앙단면의 응력-변형률 곡선이 Fig. 6의 응력-변형률 모델과 일치하면서 거동하고 있음을 보여주며, 인장철근비에 따라 파괴시의 콘크리트 및 철근의 응력과 변형률의 크기를 파악할 수 있었다. 그리고 Fig. 10은 파괴하중에 이를 때까지의 콘크리트와 인장철근의 변형률을 인장철근비에 따라 나타낸 것으로써, 해석모델 N1 및 M1은 인장철근이 본 해석에서 가정한 값인 파괴변형률 0.004에 도달하여 인장철근의 파괴에 의하여 보가 파괴되었고, N2 및 M2는 압축콘크리트가 본 연구에서 가정한 값인 파괴변형률 0.0035에 도달하여 압축콘크리트의 파괴에 의하여 보가 파괴되었음을 알 수 있었다.

Fig. 11는 하중의 증가에 따른 균열깊이를 나타낸 것으로써, 인장철근비에 따른 균열깊이의 양상을 파악할 수 있음을 나타내주며, 본 실험모델의 경우에는 평형철근비인 N2 및 M2는 균열깊이가 보의 높이의 1/2에서 파괴되었음을 알 수 있다.



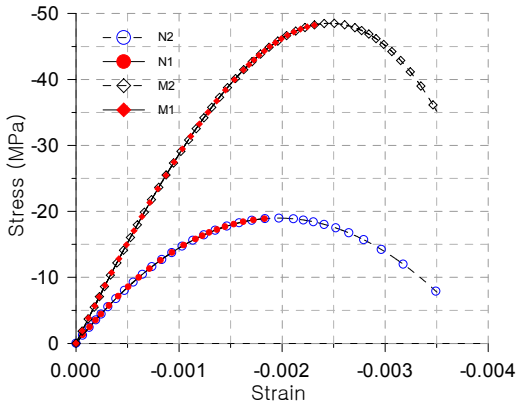
(a) N의 하중-처짐 곡선



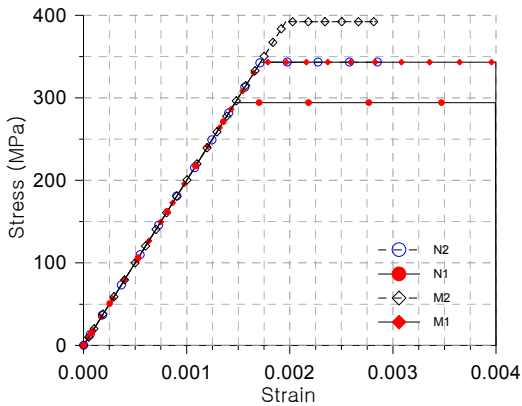
(b) M의 하중-처짐 곡선

Fig. 8 중앙단면의 하중-처짐 곡선

이상의 결과로 볼 때, 본 연구의 비선형 해석 방법을 사용하면 서로 다른 재료로 구성된 단면의 비선형 특성을 잘 파악할 수 있음을 알 수 있었다.



(a) 압축콘크리트의 응력-변형률 곡선



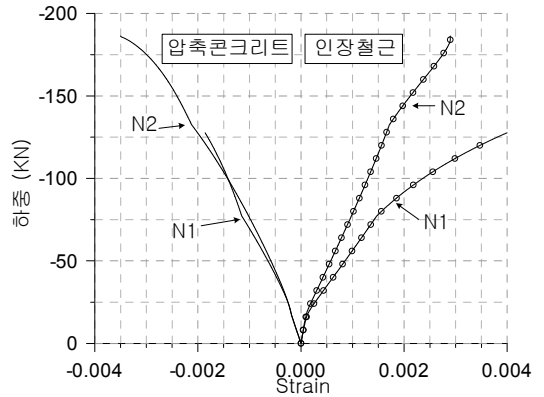
(b) 인장철근의 응력-변형률 곡선

Fig. 9 중앙단면의 응력-변형률 곡선

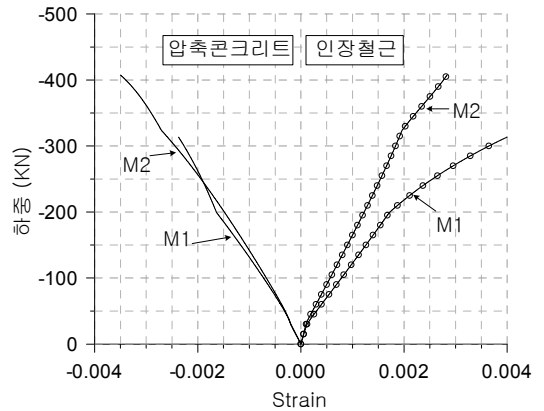
5. 결론

본 연구는 기하비선형과 재료비선형을 동시에 고려할 수 있는 비선형 해석방법을 제안하였다. 제안된 해석방법의 알고리즘을 검증하기 위하여 2힌지아치와 철근콘크리트 단순보를 각각 수치해석 모델로 하여 수치해석을 수행한 결과, 2힌지아치의 경우에서 기하비선형이 잘 반영되고 있음을 알 수 있었으며, 철근콘크리트 단순보의 처짐 및 응력, 변형률 등에서 철근 및 콘크리트의 재료비선형을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 연구의 해석방법은 축방향력 및 휨을 받



(a) N의 하중-변형률 곡선



(b) M의 하중-변형률 곡선

Fig. 10 중앙단면의 하중-변형률 곡선

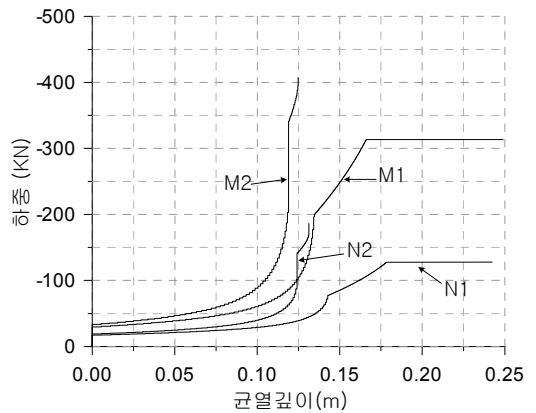


Fig. 11 중앙단면의 하중-균열깊이 곡선

는 부재의 비선형 하중-처짐곡선 및 응력-변형률 곡선 등 구조물의 비선형 거동을 비교적 정확하게 파악할 수 있을 뿐만 아니라 부재의 단면에 대한 균열하중, 그리고 균열의 발생부위 및 균열 깊이의 발전양상을 해석적으로 손쉽게 구할 수 있고, 인장철근의 비 및 철근 및 콘크리트의 강도에 따른 보의 파괴양상을 파악할 수 있어서 실제 구조물의 안정문제를 해결하는데 기여할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, “콘크리트표준시방서”, 1996.
2. 신성우, 유석형, 안중문, 이광수, “고강도 철근 콘크리트 보의 휨설계 및 연성능력”, 콘크리트학회논문집, 제8권, 6호, 1996, pp.141~149.
3. 강영진, “철근콘크리트 평면뼈대구조물의 비선형해석”, 대한토목학회논문집, 제3권 제4호, 1983, pp.149~155.
4. 이차돈, 홍성원, 이수권, “강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨 거동”, 대한건축학회논문집, 11권, 5호, 1995, pp.151~161.
5. 한재익, 이경동, “휨을 받는 철근콘크리트 단순보의 비선형해석”, 한국구조물진단학회논문집, 제5권, 2호, 2001, pp.129~136.
6. T. Y. Yang, “Finite Element Structural Analysis”, Prentice-Hall, Inc., 1986.
7. Wen, R. K., and Rahimzadeh, J., “Nonlinear Elastic Frame Analysis by Finite Element”, Journal Structural Engineering, ASCE, Vol. 109. No. 8, 1983, pp. 1952~1971.
8. Alexander Chajes, James E. Churchill, “Nonlinear Frame Analysis by Finite Element Methods”, Journal Structural Engineering, ASCE, Vol. 113. No. 6, 1987, pp. 1221~1235.
9. Comite Euro-International Du Beton, “CEB-FIP MODEL CODE - Design Code”, Thomas Telford, 1993.
10. Harold C. Martin, “Introduction to Matrix methods of Structural Analysis”, Mcgraw-Hill, Inc., 1996.
11. Connor J.J., Logcher R.D., and Chan S.C., “Nonlinear Analysis of Elastic Framed Structures”, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 94, No. 6, 1968, pp.1525~1547.
12. Powell, G. H., “Theory of Nonlinear Elastic Structures”, Journal Structural Div., ASCE, Vol. 95. No. 12, 1969, pp. 2687~2701.
13. 前田幸雄, 林 正, 中村守, “増分法による平面骨組構造物の大變形解析の加速計算法”, 日本土木學會論文集, 第223号, 1974, pp.1~9.
14. 少堀爲雄, 吉田博, “有限要素法による構造解析プログラム”, 丸善株式會社, 1983.6.

(접수일자 : 2002년 5월 19일)