강구조 부재와 골조의 거동 성상에 대한 해석수법의 개발에 관한 연구

A Study on Development of Numerical Analysis Method Behavior for Properties of Steel Structure Member and Frame

박 정 민*
Park, Jung-Min
김 화 중**
Kim, Wha-Jung
이 상 재***
Lee, Sang-Jae

요 약

본 논문은 기하학적 비선형과 재료적 비선형을 고려하여 강구조 부재 및 골조의 비선형 해석을 위한 프로그램을 개발하고 강재의 응력도 변형도 관계를 정식화 하였다.

본 프로그램의 효율성을 검증하기 위하여 단조 하중을 받는 H형강 보와 각형강관 기둥, 그리고 반복 수평력을 받는 브레이스 강재 라멘에 대한 수치해석을 행하였다.

본 프로그램에 의해 얻어진 결과는 대체적으로 기존의 실험 및 해석결과와 일치하였다.

Abstract

This paper was developed to computer program, which is about to analyize nonlinear behavior of structural member and frame including to geometric and material nonlineality, and formulated to the relationship of stress-strain of steel.

In order to examplity the efficiency of this program, the numerical analysis was done for H section steel beam and square steel tube column subjected to monotonic load, and braced steel frame subjected to repeated horizontal forces.

The obtained results by this program were in accordance with existing experimental and analytical results respectively.

* 경북대학교 건축공학과 연구 조교
** 경북대학교 건축공학과 부교수
*** 원광대학교 건축공학과 교수

이 논문에 대한 토론을 1996년 9월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

골조 구조물의 거동은 본래 3차원적인 취급에 의해서 다루어지기 때문에 구성부재의 탄·소성역에서의 거동을 해석하기 위해서는 그 골조를 구성하고 있는 개개 부재의 거동을 명확히 하지 않으면 안된다.

각 부재를 독립으로 취급하는 것은 임의형상의 라멘 구조물에 대해 적용할 수 있고 또한 개개 부재의 거동 파악이 용이하며 소성화 또는 좌굴 등의 비선형 성상의 도입이 용이하기 때문에 보요소의 성질과 연속체의 성질을 고려하여 평면 라멘을 연속체로 치환하는 수법에 비해 좋다고 생각된다. 한편, 각각의 부재를 독립으로 다루는 방법은 미지수가 증가하는 문제점도 있지만, 최근 계산기의 성능향상으로 이러한 문제점은 어느 정도 해소 된다고 본다.

또한 단위 부재가 단순히 수가 많다고 하는점도 지금의 대형 컴퓨터의 이용으로 가능하다고 생각된다. 본 논문에서는 구성 부재의 응력도-변형도 관계에 대한 정식화를 행하여, 그 식을 이용하여 최근 특히 발달한 매트릭스 대수를 이용해서 증분변위를 포텐셜 에너지의 정유원리에 기초하여 변형에너지를 전부 수학 적분에 의해 계산하여 결정하는 방법을 제안하여 강구조 부재 및 골조의 탄소성 거동 성상을 예측할 수 있는 해석수법을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 해석상의 가정

2.1 해석상의 기본 가정

본 해석을 행하는데 있어서 기본적인 가정은 다음과 같다.

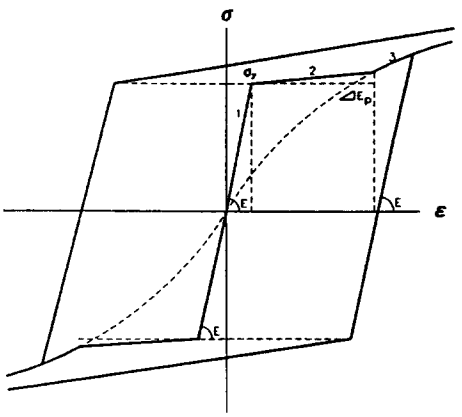
① 부재는 모두 선재로 해서 취급한다.
② 단면은 변형후도 평면을 유지하는 것으로 한다.
③ 축방향 변형 및 휨변형을 고려하고 전단변형은 무시한다.
④ 재료의 응력도-변형도 관계는 그림 1에 나타내는 것을 이용한다.
⑤ 단면내 응력도-변형도에 대해서는 단면을 세밀하게 층상으로 분할하고 그 단위 분할중에서는 일정하게 한다.
⑥ 잔류응력은 고려하지 않는다.

2.2 강재의 응력도-변형도 관계의 모델화

골조의 탄소성 해석에는 골조를 구성하는 부재의 소성역을 소성 힌지로 집약하여 소성화역의 넓이를 무시하는 무시하는 소성 힌지법과 부재를 필요에 따라서 얼마의 요소로 분할하여 유한 요소법 혹은 차분법을 이용하는 수법과 같이 크게 2가지로 분류할 수 있다. 유한 요소법에 의한 라멘 구조물의 단조 혹은 반복재하에서의 탄소성 거동을 해석하기 위해서는 강재의 응력도-변형도 관계 혹은 부재의 복원력 변형 관계를 어떤 이력측으로 모델화할 필요가 있다. 그때 해석 대상에 필요한 정도에 따라서 거동에 영향을 미치는 항복내력, 항복변형 외에 비교적 큰 영향을 주는 재료의 변형 경화에 의한 내력의 소성화 및 탄성강성의 연화 현상등의 제요인들을 파악해야만 한다.

특히, 소성역에 미치는 반복하중을 받는 구조물 및 부재를 해석 대상으로 하기 위해서는 복잡한 이력에도 충분히 추적할 수 있는 응력도-변형도 관계를 상정할 필요가 있다.

본 논문에서 사용하는 강재의 응력도-변형도 관계는 Ralph M. Richard의 응력도-변형도 관계 모



여기서 : E : 탄성계수, σ_y : 항복강도, E_1 : $(E-E_P)$
E_p : 소성계수(E/1000), n : 재료상수

그림 1. 강재의 응력도-변형도 곡선 모델

델에 기초하여 불완전하지만 현실적인 측에 가깝게 변형경화 및 Bauschinger 효과적인 성질을 고려하여, Elastic-Plastic-Strain hardening으로 상정하여 해석하였다. 본 논문에서 사용한 강재의 응력도-변형도 관계 모델은 그림 1과 같으며, 각각의 단계에 있어서 응력도-변형도 관계식은 다음과 같다.

σ_y 1 2 3 E E E E ε ε

$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon$

$$\sigma_2 = \frac{E \cdot \varepsilon}{1000} + \sigma_y$$

$$\sigma_3 = \frac{E_1 \cdot \varepsilon}{(1+|\frac{E_1 \cdot \varepsilon}{0.758\sigma_y}|^n)^{\frac{1}{n}}} + E_p \cdot \varepsilon$$

3. 수치 해석법

3.1 축하중과 모멘트를 받는 부재의 강성 매트릭스와 내력 벡터

(1) 요소 내부의 변위 증분과 변형도 증분

요소 내부의 변위함수는 가능한 한 실제의 변위 곡선에 근사하게 가정하는 것이 좋으나, 계산상의 문제가 있으므로 대부분 절점의 자유도를 만족시킬 수 있는 최소의 다항식으로 선정된다. 본 해석법에서는 한 부재를 5~20 정도로 분할하는 것을 전제로 하나 하나의 요소는 통상의 선재로 이용하는 간단한 변위 함수를 이용한다. 다시 말해, 요소 좌표 x축 방향 변위 증분 Δ_u, y축 방향의 변위 증분 Δ_v 및 x축과 이루는 각도 증분 Δ_θ를 다음과 같은 다항식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta u &= \alpha_1 + \alpha_2 x \\ \Delta v &= \alpha_3 + \alpha_4 x + \alpha_5 x^2 + \alpha_6 x^3 \\ \Delta\theta &= \alpha_4 + 2\alpha_5 x + 3\alpha_6 x^2 \end{aligned} \quad (3)$$

이 요소의 변위 증분 벡터 $\Delta_m u$와 미정계수 α의 관계는 변위 증분 함수와 변위 증분 함수를 미분한 함수에 요소 양단의 좌표치를 대입한 매트릭스에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_m u = {}_m T \cdot {}_m \alpha \quad (2)$$

또 T의 역 매트릭스를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}_m \alpha = T^{-1} \Delta_m u \quad (3)$$

한편, 요소 내부의 임의의 점에 있어서 요소 축방향의 변형증분 $\Delta\varepsilon_x$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\varepsilon_x = \frac{d\Delta u}{dx} + \frac{1}{2}(\frac{d\Delta v}{dx})^2 - y\frac{d^2\Delta v}{dx^2} \quad (4)$$

(2) 변형도 에너지 증분의 계산

변위 증분에 의해서 1개의 요소에 저장되는 변형 에너지 증분 $\Delta_m u$는 그림 2에 나타낸 바와 같이 그 Step 혹은 Iteration의 계산을 행하기 직전에 초기응력에 의해 생기는 Δu_1과 응력도 증분에 의해서 생기는 Δu_2의 합으로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta_m U_1 = \int_l \int_A \sigma_x \, \Delta\varepsilon_x \, dA \, dx \quad (3)$$

$$= \int_l \int_A \sigma_x [\frac{d\Delta u}{dx} + \frac{1}{2}(\frac{d\Delta v}{dx}) - y\frac{d^2\Delta v}{dx^2}] \, dA \, dx$$

$$\Delta_m U_2 = \frac{1}{2}\int_l \int_A E \, \Delta\varepsilon_x^2 \, dA \, dx \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2}\int_l \int_A E[\frac{d\Delta u}{dx} + \frac{1}{2}(\frac{d\Delta v}{dx})^2 - y\frac{d^2\Delta v}{dx^2}]^2 \, dA \, dx$$

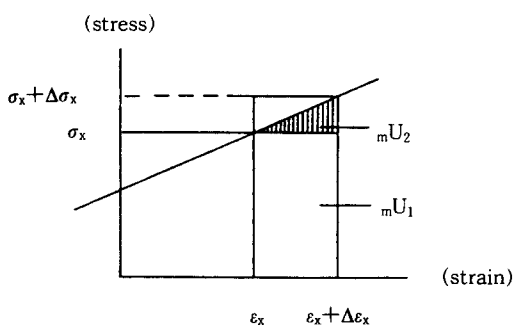


그림 2. 증분 변형 에너지

식(3)~식(4) 중에는 면적에 대한 적분항을 포함하지만, 그것은 요소의 양단에서 계산하고 요소 내부에서는 선형으로 변화하고 있는 것으로 가정하여 행한다.

위에서 계산된 $\Delta_m u_1$, $\Delta_m u_2$의 합은 1개의 요소에 저장되는 변형에너지 증분이다.

$$\Delta_m U=\Delta_m u^T({}_mT^{-1T}\,{}_ma_1-{}_mT^{-1T}\,{}_ma_2)$$
$$=-\frac{1}{2}\Delta_m u^T({}_mT^{-1T}\,{}_mA_1\,{}_mT^{-1}+{}_mT^{-1T}\,{}_mA_2\,{}_mT$$
$$-{}_mT^{-1T}\,{}_mA_3\,{}_mT^{-1}+{}_mT^{-1T}\,{}_mA_4\,{}_mT^{-1})$$
$$=\Delta_m u^T\,{}_mf_{in}-\frac{1}{2}\Delta_m u^T\,{}_mK\,\Delta_m u \qquad (5)$$

여기서

$${}_mf_{in}={}_mT^{-1T}\,{}_ma_1-{}_mT^{-1T}\,{}_ma_2 \qquad (6)$$

: 요소 m의 내부 응력 조합을 위해 필요한 국부좌표에 있어서의 절점 내력벡터

$${}_mK={}_mT^{-1T}\,{}_mA_1\,{}_mT^{-1}+{}_mT^{-1}\,{}_mA_2\,{}_mT^{-1}$$
$$-{}_mT^{-1T}\,{}_mA_3\,{}_mT^{-1}+{}_mT^{-1}\,{}_mA_4\,{}_mT^{-1} \qquad (7)$$

: 요소 m의 국부좌표에 있어서의 강성 매트릭스

(3) 변위의 증분과 미정계수 벡터

변형도 에너지 증분과 필요한 요소 내부의 변형도를 구하고 x축상에 대해 $\frac{d\Delta u}{dx}$, $\frac{d\Delta v}{dx}$, $\frac{d\Delta\theta}{dx}$ 등의 변위의 도함수가 필요하다. 이것의 도함수는 변위함수를 미분하는 것에 의해 구할 수 있으며, 절점변위 변형증분 $\Delta\varepsilon_x$는 다음과 같이 표시할 수 있다.

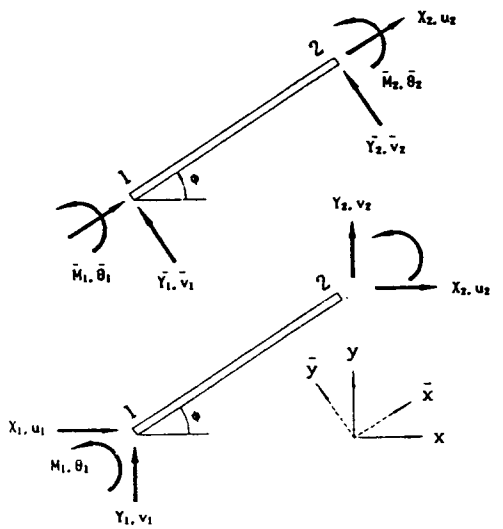


그림 3. 요소좌표와 전체좌표

$$\Delta\varepsilon_x=\frac{d\Delta u}{dx}+\frac{1}{2}\left(\frac{d\Delta v}{dx}\right)^2-\left(\frac{d^2\Delta v}{dx^2}\right)y \qquad (8)$$

3.2 좌표 변환 매트릭스

강성 매트릭스 (7)식은 보요소에 고정된 좌표축에 의한 좌표계에 관한 것이다.

이들 축은 국부 혹은 요소축으로서 전체 구조물은 Global 혹은 System 축으로 이루어진다. 따라서 구조물 전체의 변위는 요소 매트릭스가 국부좌표 축에서 Global 좌표축으로 변환하게 되는 과정이다.

그림 3에서 응력 변환을 매트릭스로 표현하면 다음과 같다.

$$\{\bar{F}\}=[T]\{F\} \qquad (9)$$

이 과정을 반복하여 국부좌표에서의 절점 변위와 구조물 좌표에서의 절점 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\delta\}=[T]\{\bar{\delta}\} \qquad (10)$$

여기서, 국부좌표계에 있어서의 강성에 (9), (10)식의 $\{\delta\}$를 $\{F\}=\{K\}[T]\{\delta\}$에 대입하면 식(11), 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[T]\{\bar{F}\}=\{K\}[T]\{\bar{\delta}\} \qquad (11)$$
$$\{\bar{F}\}=[T]^{-1}\{K\}[T]\{\bar{\delta}\} \qquad (12)$$

여기서 ; $[T]^{-1}$는 $[T]$의 전치행열

그러나 식(9)에서 $[T]$는 직교 매트릭스이므로 $[T]^{-1}=[T]^T$이므로 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\bar{F}\}=[\bar{K}]\{\bar{\delta}\} \qquad (13)$$

여기서 ; $[\bar{K}]=[T]^T[K][T]$

3.3 연립 1차 방정식의 유도

하나의 요소 m에 저장되는 변형에너지 증분 $\Delta_m U$는 앞 절에서 설명한 것과 같이 요소의 좌표계에 있어서 변위 증분의 2차 형식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_m U = \Delta_m u^T \, {}_mF_{in} + \frac{1}{2}\Delta_m u^T \qquad (14)$$

여기서 ;

$\Delta_m u$: 요소 좌표계에 있어서 절점 변위증분

$\Delta_m u^T$: $\Delta_m u$의 전치벡터

${}_mF_{in}$: 증분 계산전의 내부응력에 대해 필요한 요소의 절점내력벡터

${}_mK$: 요소의 강성 매트릭스

요소 m의 요소 좌표계에 있어서 변위증분 $\Delta_m u$는 앞 절에서 설명한 좌표변환 매트릭스이고 전구조체의 절대좌표계에 의한 변위증분을 사용하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_m u = {}_mL^{-1}\Delta_m u_g \qquad (15)$$

(15)식의 변환을 고려함으로서 각 요소에 저장된 변형도 에너지의 총합을 취함으로서 전구조체에 저장되는 변형도 증분 에너지 ΔU가 구해진다.

$$\Delta U = \Sigma_m \Delta_m U = \frac{1}{2}\Delta u^T K \Delta u F_{in} \qquad (16)$$

여기서 ;

$$K = \sum_m {}_mL^T \cdot {}_mK \cdot {}_mL$$

$$F_{in} = \sum_m {}_mL^T \cdot {}_mF_{in}$$

한편 외력의 포텐셜 에너지 증분 ΔW_{ex}는 다음식으로 표시한다.

$$\Delta W_{ex} = \Delta u^T \cdot F_{ex} \qquad (17)$$

여기서 ;

F_{ex} : 증분 외력을 포함한 전절점 외력벡터

변위 증분 Δu가 생긴 후의 포텐셜 에너지 증분 $\Delta\prod$는 아래의 식과 같이 Δu의 2차식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta\prod = \Delta U - \Delta W_{ex}$$
$$= \frac{1}{2} \cdot \Delta u^T \cdot K \cdot \Delta u + \Delta u^T \cdot F_{in} - \Delta u^T \cdot F_{ex} \qquad (18)$$

위의 식을 2차 형식의 변분 원리를 이용하여 임의의 $\delta\Delta_u$에 대해서 $\delta\Delta\prod = 0$로 두면 다음 식과 같은 연립 1차 방정식을 얻을 수 있다.

$$K \cdot \Delta u + F_{in} - F_{ex} = 0 \qquad (19)$$

위의 식에서 1차 연립 방정식을 풀면 Δu를 구할 수 있고 이것을 이용하여 각 절점의 좌표를 수정한다.

3.5 해석 수법의 개요 및 해석절차

(1) 해석 수법의 개요

본 논문에 사용된 비선형 해석법은 에너지 증분의 정유원리를 이용하여 전 포텐셜 에너지를 증분변위의 2차 형식으로 표시하여 포텐셜 에너지를 증분 원리에 따라 전 포텐셜 에너지의 1차 변분을 0으로 두어 증분 변위에 관한 방정식을 유도하여, 변형도와 변위의 관계를 정식화하고 강성 매트릭스, 내력 벡터, 외력 벡터를 만들어 프로그램을 개발한다. 위에서 유도된 증분 변형의 방정식을 Step-by-Step 법과 Iteration법을 이용하여 해석을 행한다.

(2) 해석 절차

(4)식에서 구해진 증분 변형 $\Delta\varepsilon_x$를 이용하여 각 요소 양단의 변형 및 응력을 수정하면 1단계 계산이 종료한다.

이상의 계산을 Step-by-Step법에 의해 중첩함으로서 소기의 해석이 가능하게 된다.

하지만, 여기서 구해진 Δu_g 만큼의 변형이 진행된 상태에서는 하강역의 진행, 변형에 의한 좌표의 변화 등에 의해 외력과 내력이 반드시 조합하지는 않는다.

그래서 동일 경계 조건에서 Iteration을 행할 필요가 있다.

특히, Post-Buckling 등의 해석을 행하는 경우는 불균형력의 영향이 매우 크기 때문에 Iteration은 없어서는 안되는 것으로 생각된다.

따라서 본 해석에서는 Newton-Raphson법을 Iteration기법으로 사용한다. 또한 수속의 수렴도는 $(F_{in}-F_{ex}, F_{in}-F_{ex})/(F_{in}, F_{ex}) \le 10^{-9}$로 했다.

반복 절차는 수속이 만족될 때까지 계속된다.

수속이 될 때 부재 각면은 항복과 비재하 변형에 대해 조사된다. 적분점에서 곡률이 계산되고 단면상의 각 변형이 계산된다. 이상의 해석절차에 대한 흐름도를 그림 4에 나타낸다.

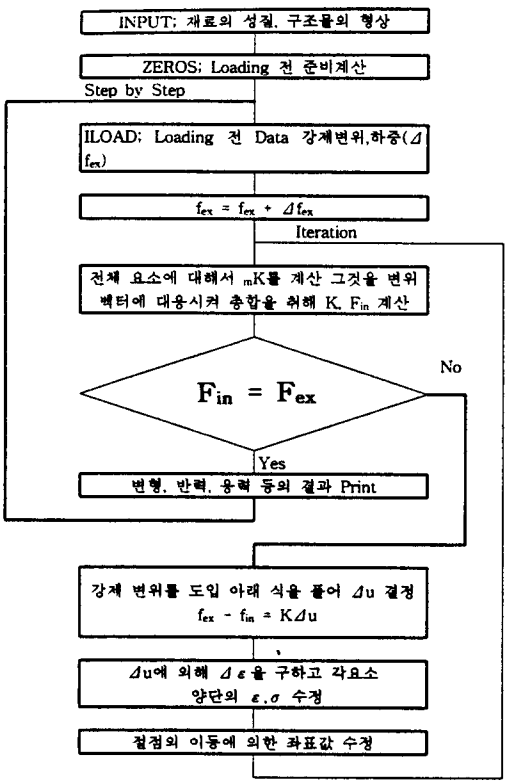


그림 4. 해석절차

4. 수치해석

본 절에서는 앞에서 개발된 수치해석용 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 단조 증가 및 반복하중을 받는 철골 부재 및 골조에 대해 그 탄소성 거동을 수치해석하고 기존의 해석 결과 및 실험결과와 비교를 행했다.

4.1 단조 증가하중을 받는 부재의 거동

(1) 해석 예제 1

① 해석 모델

먼저 해석 모델 1은 H형 단면을 가진 1단 고정 타단자유의 수평 및 수직하중을 받는 캔킬레버 보를 대상으로 수치해석을 행하여 기존의 해석 결과와 비교를 행하였다.

해석에 있어서 단면내 요소 분할수는 10분할로 하였으며, 부재의 요소분할은 5분할로 하였다. 하중의 가력에 있어서는 비교적 변형경로 추적이 용이한 탄성역에서는 각 하중 Step마다 5ton씩 단조증가 시켰으며 변형경로 추적에 있어서 수렴계산상 계산시간이 소요되는 항복점 부근에서 소성역에서는 각 하중 Step마다 0.1~0.2ton씩 하중을 변화시켜 재하하였다.

표 1. 해석 모델의 재료적 특성

특성 \ 모델	모델 1
탄성계수(t /cm²)	2,100
항복강도(t /cm²)	2,400
단면형상 및 크기	(H-100×100×6×8)
세장비(λ)	30, 60, 120, 180
요소분할	5 분할
단면내 분할 층수	10 분할
부재의 길이(cm)	75, 150, 300, 450

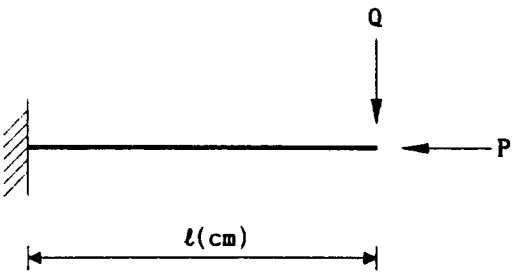


그림 5. 해석 모델(1)

② 해석 결과의 타당성 검토

그림 6은 해석 모델 1에 대한 보 단부의 하중-변형 관계를 기존의 해석결과와 비교하여 나타낸 것이다.

해석 결과를 살펴보면, 대체적으로 세장비가 작은 부재는 대략 50(ton) 부근에서 내력저하가 일어나고 있으며, 본 해석 결과와 기존의 결과를 비교해 볼 때 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 한편, 세장비가 큰 경우(λ=120, 180) 기존의 부재 최대내력은 각각 30ton, 20ton 부근에서 내력의

저하가 일어나고 있으며 본 해석결과의 경우 기존 결과에 비해 약간 과소평가되고 있는 것으로 나타났다.

하지만, 전체적으로 볼 때 세장비에 관계없이 탄성역에서는 기존의 결과와 거의 유사한 양상을 나타내고 있으며, 항복점 이후의 소성역에 있어서 기존의 결과에 비해 약간 급격하게 내력 저하가 일어나고 있음을 알 수 있다.

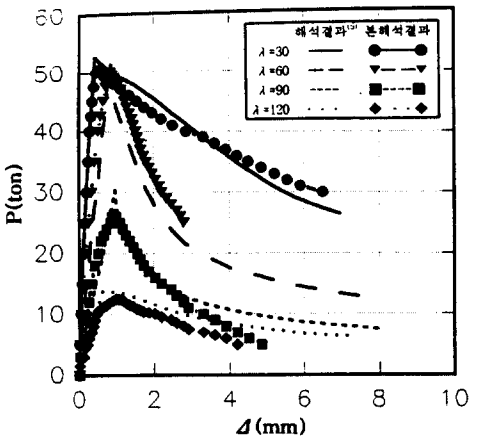


그림 6. 하중－변위 관계

(2) 해석 예제 2

① 해석 모델

해석 모델 2는 중심축압을 받는 중공 각형강관 기둥으로서 폭두께비를 변수로하여 기존의 해석결과와 실험결과와의 비교를 행한다.

해석에 있어서 부재의 길이는 기존의 연구성과와 동일하게 단면폭의 3배로 하였으며, 폭두께비는 B/t=25, 33, 42의 3종류로 하였다.

또한 단면내 요소 분할수는 14분할로 하였오며 부재의 요소분할은 4분할로 하였다.

하중의 가력에 있어서는 해석 모델 1의 경우와 마찬가지로 탄성역에서는 각 하중 Step마다 5ton씩 단조증가 시켰으며, 소성역에서 각 하중 Step마다 하중을 변화시켜 재하하였다.

해석 모델의 재료적 특성을 표 2에 나타내며, 해석 모델을 그림 7에 나타낸다.

표 2. 해석 모델의 재료적 특성

특성 \ 모델	모델 1
탄성계수(t/cm²)	2,050
항복강도(t/cm²)	3,535
단면형상 및 크기	각형강관 (□-200×200)
폭두께비(B/t)	25, 33, 42
요소분할	4 분할
단면내 분할 충수	14 분할
부재의 길이	부재폭의 3배

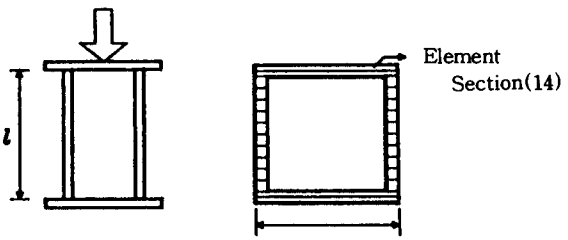


그림 7. 해석 모델(2)

② 해석 결과의 타당성 검토

그림 8은 폭두께비를 변수로 한 중공 강관 기둥의 무차원 좌굴내력과 축변위 관계에 대한 기존의 해석 및 실험 결과와 본 해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

먼저 그림에서 알 수 있는바와 같이 대체적으로 폭두께비에 관계없이 탄성역에서는 비교적 변형경로를 잘 추적하고 있으며, 좌굴 후 내력 저하구배에 있어서도 폭두께비의 변화에 따라 약간씩의 차이는 보이지만 대체적으로 하중변형 곡선은 양호한 양상을 나타낸다고 할 수 있다.

또한 최대내력에 대한 해석 결과를 기존 결과와 비교해 보면 대체적으로 해석 결과가 기존의 연구결과에 비해 5~10% 정도 과소평가되고 있으며 변형능력에 있어서도 최대내력의 저하로 인해 약간씩 과소평가되고 있음을 알 수 있다.

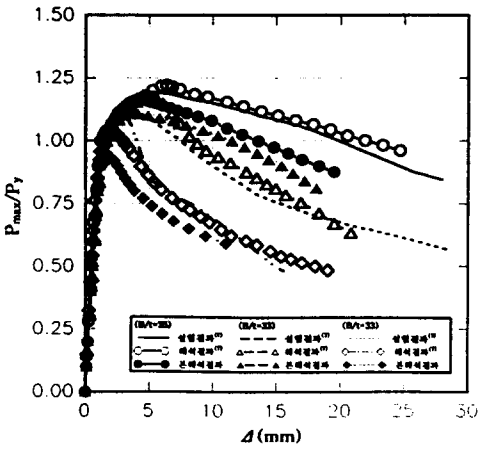


그림 8. 하중-변위 관계

4.2 반복하중을 받는 K형 Brace형 철골라멘의 거동

(1) 해석 모델

먼저 본 해석 모델은 K형 Brace를 가진 철골라멘에 반복한 수평력이 작용하는 경우를 상정하여 그 탄소성 거동을 수치해석하고 기존의 실험결과와 해석결과와의 비교를 행했다.

요소 분할에 있어서는 대변형 및 소성역의 복잡한 이력 분포에도 충분히 추적할 수 있도록 기둥은 5요소, 보는 10요소로 분할하고 Brace재를 7요소로 분할 했다. 단면 형상은 기둥 및 보 부재는 H-194×150×6×9로서 단면내에서 28개의 층분할을 행했고, brace재는 H-100×100×6×8로 단면내에서 20개의 층분할을 행했다. 해석 대상으로 한 모델의 재료적 특성을 표 3에 해석 모델을 그림 9에 나타낸다.

표 3. 해석 모델의 재료적 특성

부재 / 특성	기둥	보	Brace
탄성계수(t/cm²)	2,100		
항복강도(t/cm²)	3,040		
단면형상	(H-194×150×6×9)		(H-100×100×6×8)
요소분할	4	10	6
단면내 분할 층수	28	20	16

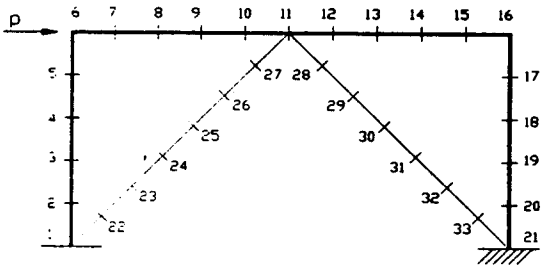


그림 9. 해석 모델

(2) 해석 결과의 타당성 검토

기존의 실험 및 해석결과와의 비교에 있어서 Step마다 10ton씩 반복하중을 가력 했고 소성역에서는 각 하중 Step마다 단계적으로 하중을 점차 감소시켜 가력한 후, 변형이 25mm되는 지점에서 하중을 제하시켰다. 그 후 변형이 0이 되는 점에서 다시 하중을 증가시켜 구조물의 전체적 거동에 대해 수치해석을 행했다. 그 결과를 보면 전체적인 거동은 부분적인 차이를 보이지만 기존의 결과와 비교해 보면 대체적으로 근사함을 알 수 있다. 또한 최대 하중은 실험결과와 비교해 보면 다소 높은 값을 나타내지만, 시험체의 불안정성, 즉 초기변형 및 접합부 등의 잔류응력의 영향을 고려하면 거의 유사하다고 보여진다. 한편 제하에서 재재하의 과정은 비교적 일치하고 있다. 그러한 이유로는 brace가 좌굴한 후 대변형이 생기는 것에 의해서 시험체와 모델과의 초기의 기하학적 형상, 잔

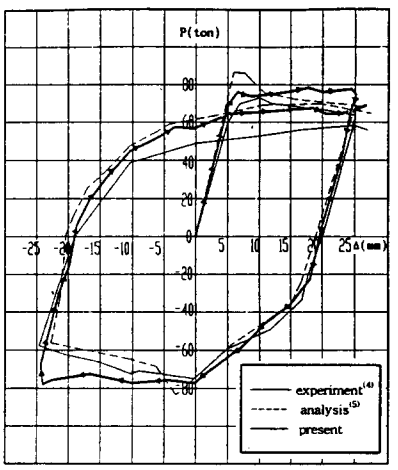


그림 10. 하중-변형 관계

류응력 등의 차이를 무시했기 때문이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 절에서는 기하학적 비선형과 재료적 비선형을 고려한 부재 및 골조의 수치해석 프로그램을 개발하여 기존의 실험 및 해석적 연구 성과들과 비교 검토를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 반복하중을 받는 강재의 응력도-변형도 관계 모델을 제시하였다.

(2) 재료적 비선형과 기하학적 비선형을 고려해 C언어를 사용하여 개발한 프로그램은 부재 및 골조의 해석을 수행한 결과 기존의 실험 및 해석적 연구결과들과 근사치를 나타냄으로서 본 프로그램의 타당성이 입증되었다.

(3) 본 연구에서 사용한 Iteration 기법으로 사용한 Newton-Raphson법은 소성역에서 변형경화 개시점까지의 변형을 추적하는데 상당히 어려움이 많았다. 따라서 향후 최근 선진 각국에서 많이 연구되고 있는 Arc Length Method와 같은 Iteration 기법의 적용성이 필요하다.

추후 원형 단면 부재 및 골조 해석을 위해 비틀림 변형을 포함한 수치해석용 프로그램을 개발할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Galambos, T.V., *Structural Members and Frames*, Prentice Hall Inc. 1968.

[2] Zienkiewicz, O.C., *The Finite Element Method*, McGrow-Hill Co, 1967, pp.500-526.

[3] Richard, R.M., Abbott, B.J., Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula, *ASCE*, Vol.101, No.EM4, 1975.

[4] 山田 捻 外 2人, "繰り返し水平荷重を受げる鐵骨筋違付骨組の彈塑性性狀に關する研究," **日本建築學會大會學術講演集**, 昭和46年11月.

[5] 藤本盛久 外 2人, "任意形平面骨組の非線形應力解析," **日本建築學會論文集**, 189號, pp.59-70.

[6] 3. 山田 捻 外 1人, "Baushinger Model," **日本建築學會大會學術講演集**, 昭和48年10月.

[7] 山田 哲 外 2人, "局部座屈を伴う箱形斷面部材の劣化域を含む終局擧動," **日本建築學會論文集**, 第444號, pp.135-143.

[8] 五十嵐正義 外 2人, "鋼構造筋違付多層骨組の塑性設計に關する研究," **日本建築學會論文集**, 第263號, pp.43-49.

[9] 鷲律久一郎 外 4人, **有限要素法ハンドブツク基礎編**, 培風館, pp.34-43.

[10] 新建築學大系偏執委員會, **新建築學 大系36-骨組構造の解析**, 章國社刊, pp.283-296.

[11] 金鍾聲, **Beam-Columnの耐力變形能力の評價と骨組解析への適用**, 東京大學博士論文, 1989.

[12] 朴正旻 外 2人, "단조증가 및 반복하중을 받는 강구조 부재 및 골조의 탄소성 성상에 관한 해석적 연구," **대한건축학회 대구 · 경북지부 논문집**, 제2권 제1호, 1993, pp.189-196.

(접수일자 : 1996. 1. 17)