

MIDAS 프로그램의 비선형 동적해석 소개

Introduction to Nonlinear Dynamic Analysis of MIDAS Program



최원호*



김종민**

*㈜미다스아이티 기술연구소 개발기획실 과장 공학박사
**㈜미다스아이티 기술연구소 개발팀 과장 공학박사

1. 비선형 동적해석의 개요

1.1 비선형 동적해석의 필요성

오늘날 토목 및 건축 구조물은 해석과 설계기술의 향상, 고성능 컴퓨터와 고강도 및 고품질 건설재료의 개발, 사회적인 요구 등으로 인하여 장대화, 세장화 및 대형화 추세에 있다. 이러한 대형 구조물은 지진 및 바람과 같은 예기치 못한 자연재해에 대해서 구조부재의 심각한 손상 또는 붕괴 등의 구조적 안전성 문제를 야기할 수 있다. 그러므로 지진 및 바람과 같은 동적하중에 의해 구조물에 발생하는 과도한 진동을 저감시키는 것은 구조공학 분야에서 매우 중요한 과제 중 하나이다.

구조물에 입력되는 에너지가 매우 큰 대규모 지진에 대해서 구조물이 탄성상태에서 입력지진에너지를 모두 흡수하기 위해서는 구조물에 매우 큰 내력이 필요하다. 부재의 단면이 매우 커지게 되고 이에 따른 경제성의 문제가 심각하게 발생하게 된다. 그러나 구조물의 소성변형을 허용하면 구조물의 요구내력을 크게 저감시켜 설계내력의 저감효과를 기대할 수 있다. 내진설계 개념은 구조물을 강하게 만들어 지진에 저항하는 강도증가와 구조물의 거동을 유연하게 만들어 연성을 증가시키는 방법으로 생각할 수 있다. 대부분의 내진설계 기준에서는 지진시 수

평내력의 확보와 잔류변위에 대해서 강성과 연성의 균형을 고려한 설계가 되도록 규정하고 있다. 구조물의 연성능력이 커지면 지진시에 변형이 커지게 되고, 강성의 저감과 구조물의 소성흔지 메커니즘에 의하여 구조물의 진동주기는 길어지게 된다. 이러한 거동으로 인하여 구조물에 발생하는 관성력은 줄어들고 구조물에 전달된 지진에너지가 이 소성흔지에 의해 감쇠되는 효과로 구조물의 붕괴를 예방할 수 있다.

1.2 MIDAS 프로그램의 비선형 동적해석 기능

MIDAS 프로그램은 점차적으로 늘어가는 국내의 동적 비선형해석 분야의 요구에 부응하고 해외시장 진출을 겨냥하여 면진 및 제진해석을 비롯한 비선형 시간이력해석에 대한 연구개발을 지속적으로 수행해 왔다. MIDAS 프로그램은 구조물의 비선형해석에서 필수적으로 요구되는 정확도와 해석성능이 향상된 새로운 비선형 알고리즘을 도입하였고, 비선형 동적해석에서는 부재의 비선형 복원력 특성을 표현하는 다양한 이력모델과 재료모델 등이 탑재되어 있다. 본 원고에서는 MIDAS 프로그램(MIDAS/Gen 및 MIDAS/Civil)에서 제공하는 비선형 해석기능에 대한 이론적 내용에 대하여 프로그램 기능을 중심으로 소개하고자 한다(그림 1 참조).

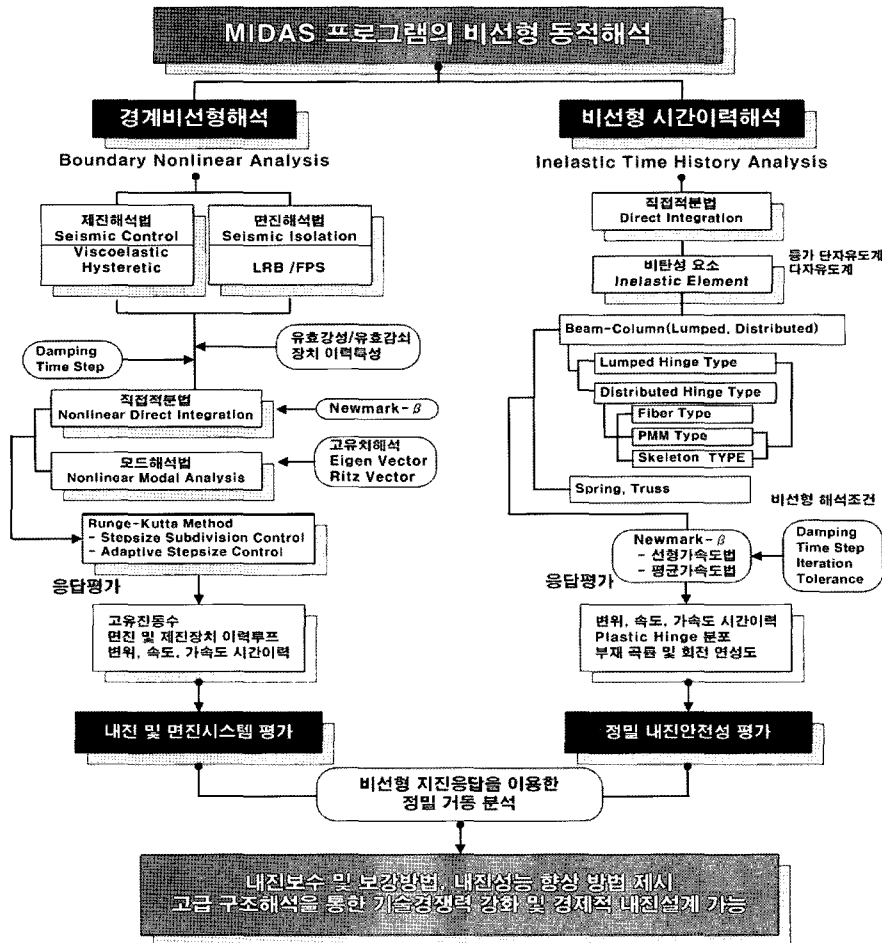


그림 1 MIDAS 프로그램의 비선형 동적해석 개요

2. 경계비선형 해석

면진 및 제진장치가 설치된 구조물의 거동을 실용적으로 평가하기 위해서는 경계 비선형 해석을 수행할 필요가 있다. 면진 및 제진장치가 설치된 구조물은 진동제어장치에 의해 설계하중에 대한 구조물의 소성변형을 방지하거나 최소화시키기 때문에 구조부재가 탄성범위 내에서 거동하는 것으로 생각할 수 있다. MIDAS 프로그램의 경계 비선형 해석에서는 3차원으로 구조물을 모델링한 후에 면진 및 제진장치를 비선형 경계요소로 고려하고 나머지 구조부재들은 선형 탄성으로 고려하는 해석을 수행하고 있다. 이와 같은 방법은 현재 면진 및 제진장치에 대한 해석에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 접근방법이다.

MIDAS 프로그램에서는 면진 및 제진장치에 대한 모델링과 해석을 위하여 범용연결요소(general link)를 제공한다. 이 요소는 2개의 절점을 연결하는 6개의 자유도에 대한 독립된 6개의 스프링으로 구성된다. 각각의 스프링은 유효강성을 가지며, 각각 독립 혹은 상호 연관된 비선형 특성을

가질 수 있다. 범용연결요소를 이용하면 LRB 및 FPS 면진장치 뿐만 아니라 점탄성감쇠기(viscoelastic damper), 이력거동시스템(hysteretic system), 압축전담요소(gap), 인장전담요소(hook)의 비선형 거동 특성을 효과적으로 모델링할 수 있다.

2.1 면진장치

MIDAS 프로그램에 탑재된 면진장치는 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 납삽입고무베어링(lead rubber bearing: LRB)과 마찰진자형시스템(friction pendulum system: FPS)이며, 각각의 면진장치에 대한 특성은 다음과 같다.

1) 납삽입고무베어링

LRB 방식은 가장 널리 사용되는 면진장치로서 방진고무를 주된 재료로 하고 수직강성을 보강하기 위하여 강판을 조합하여 제작한다. 그리고 초기강성 및 에너지 소산능력을 증가시키기 위하여 단면중앙에 납을 삽입한다. 고무

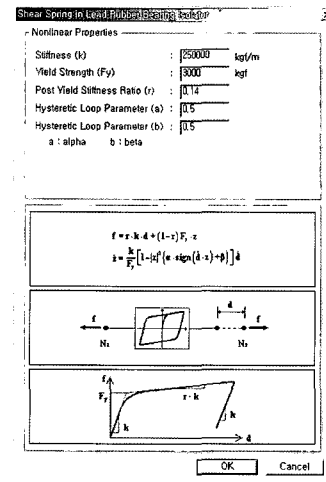
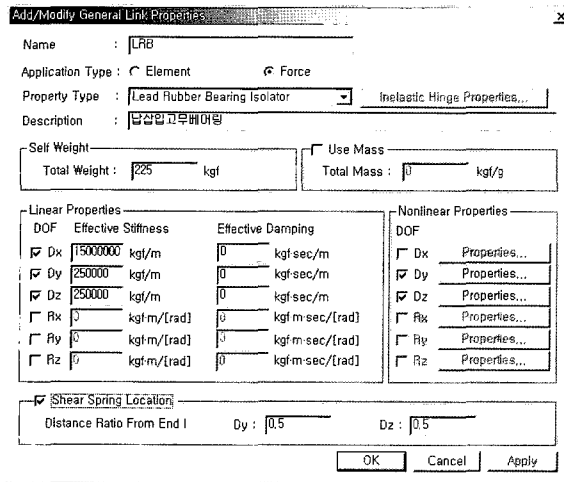


그림 2 납삽입고무베어링의 모델링

는 납의 항복시에 수평방향의 복원력을 제공하는 기능을 하며 납은 지진시 항복하여 구조물의 진동주기를 증가시키는 역할과 이력저동에 의한 에너지 소산작용으로 면진 장치의 변형을 줄이는 기능을 한다.

LRB 면진장치의 수학적 모델링은 2개의 전단방향에 대해서는 상호연관된 2축 소성의 특성을 가지며, 나머지 4개 방향의 변형에 대해서는 상호 독립된 선형탄성 스프링의 특성을 갖는다. 면진장치의 전단방향 스프링의 힘-변형 관계식은 1축 소성에 의한 Wen(1976)모델을 확장시킨 Park, Wen and Ang(1986)의 2축 소성 모델을 사용하였다(그림 2 참조).

2) 마찰진자형시스템

FPS 방식은 미끄럼작용과 형상에 의한 복원력 작용을 조합한 것이다. 구형의 스테인리스강 표면에 접합하여 움직이는 접합미끄럼 기구를 가지고 있다. 미끄럼기구가 구

형 표면상을 움직이므로 지지하는 질량을 솟아오르게 하고 이것은 시스템에 복원력을 제공하는 역할을 한다. 접합 미끄럼기구와 구형 표면 사이의 마찰은 면진장치에 감쇠를 제공한다. 면진장치의 유효감쇠와 구조물의 면진주기는 옴목면의 곡률반경을 사용하여 제어하는 원리이다.

FPS 면진장치의 수학적 모델링은 2개의 전단방향 변형에 대해서는 상호 연관된 2축 소성의 특성을 가지며 축방향 변형에 대해서는 일정간격 이상에서 스프링 강성이 발현되는 압축전담요소와 같은 비선형 특성을 가진다. 나머지 3개의 회전변형에 대해서는 상호독립된 선형탄성 스프링을 가진다. 마찰면에서 발생하는 마찰력은 작용하는 압축력과 마찰계수의 곱에 의해 결정되며 전단스프링은 시간에 따라 변화하는 압축력의 영향도 받는다. 마찰계수는 2개 전단방향 변형의 속도와 관련되며 Constantinou, Mokha and Reinhorn(1990)의 제안식에 의해 결정된다(그림 3 참조).

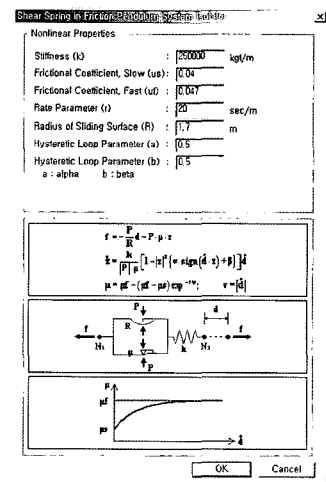
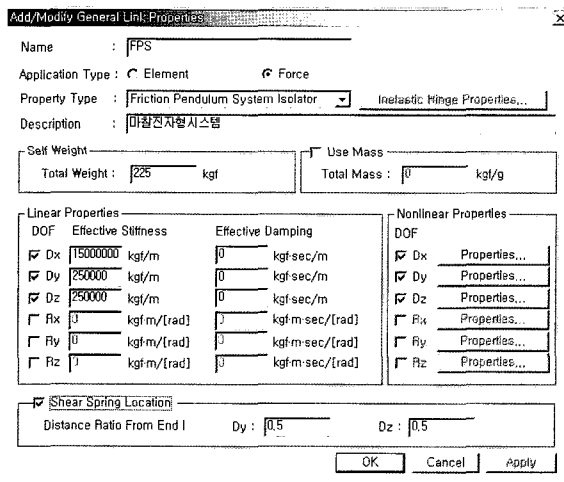


그림 3 마찰진자형시스템의 모델링

2.2 제진장치

MIDAS 프로그램의 대표적인 제진장치는 점탄성감쇠기(viscoelastic damper)와 이력거동시스템(hysteretic system)이며, 각각의 제진장치에 대한 특성은 다음과 같다.

1) 점탄성감쇠기

점탄성 감쇠기 요소는 6개의 독립적인 스프링으로 구성된다. 점탄성 감쇠기는 구조물의 감쇠능력을 증대시켜 지진 및 바람 등에 의한 동적응답을 감소시켜 구조물의 안전성과 사용성을 확보하기 위한 목적으로 사용된다. 점탄성 감쇠기의 대표적인 수학적 모델은 선형스프링과 점성감쇠기가 직렬로 연결된 Maxwell 모델과 병렬로 연결된 Kelvin 모델이다. MIDAS 프로그램에서는 두가지 모델 외에 Kelvin 모델에 스프링이 연결된 damper brace assembly 모델을 제공하고 있다(그림 4 참조).

2) 이력거동시스템

이력거동시스템은 1축소성(uniaxial plasticity)의 특성을 가진 6개의 독립적인 스프링으로 구성된다. 이력거동시스템은 이선형(bilinear) 형태의 이력거동을 모델링하기 위한 비선형 연결요소로서 유사한 거동을 보이는 금속 항복형감쇠기(metallic yield damper)와 마찰댐퍼 등을 모델링하는데 사용될 수 있다. 금속 항복형감쇠기는 주구조물보다 상대적으로 큰 강성을 가지면서 낮은 항복강도를 갖도록 제작되어 주변 부재보다 먼저 소성변형을 일으킴으로써 주 구조물을 보호할 목적으로 사용된다. 강재 댐퍼 등과 비교하여 많은 반복에 대하여 안전한 성능을 발휘할 수 있고, 진폭 및 진동수에 의존하지 않기 때문에 일정한 마찰력을 얻을 수 있다. 이력거동시스템의 힘-변형 관계는 Park, Wen and Ang(1986)에 의해 제안된 식에 의하여 표현된다(그림 5 참조).

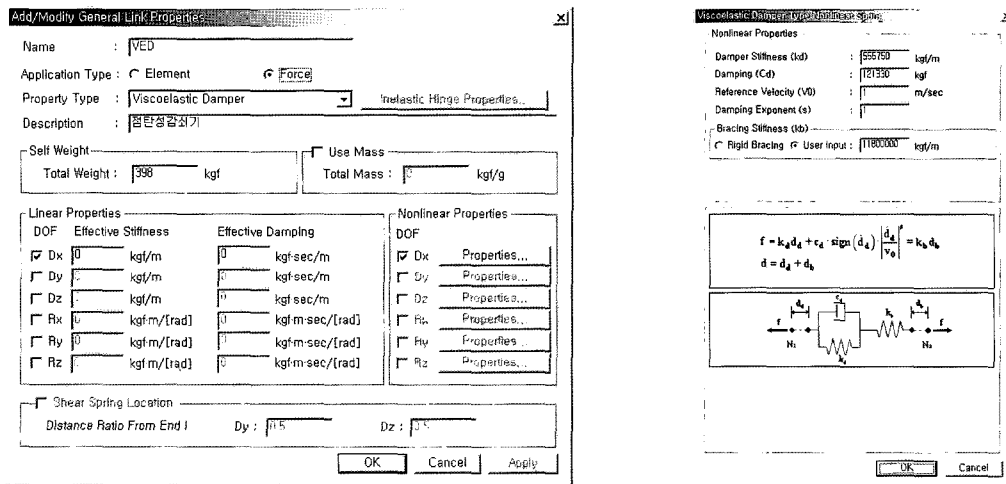


그림 4 점탄성감쇠기의 모델링

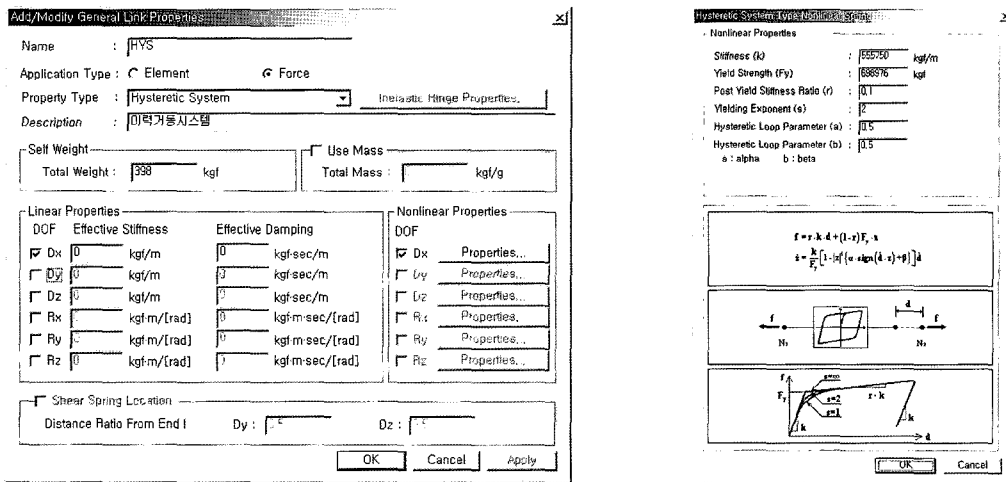


그림 5 이력거동시스템의 모델링

2.3 경계비선형 시간이력해석

경계비선형 시간이력해석(boundary nonlinear time history analysis)은 현재 면진 및 제진장치가 설치된 구조물에 대한 가장 일반적인 해석 방법으로 알려져 있다. 면진장치의 경우에 그 거동이 일반부재보다 상대적으로 단순하고 여러 실험을 통해 충분히 검증된 모델이 존재한다. 또한 장치의 특성 및 사용 목적에 있어서 구조물의 소성변형을 방지하거나 낮은 수준에 머물게 하는 것이기 때문에 비선형 거동은 이들 장치에서만 발생하고 나머지 부재들은 탄성인 것으로 가정하여 해석하는 것이 합리적이고 효율적이다. MIDAS 프로그램에서는 전체 구조물을 선형계와 비선형계로 구분하고 비선형계에서 발생하는 비선형 부재력을 선형계에 가해지는 외부 동적하중으로 치환한 후에 모드중첩법을 통하여 해석을 수행한다. 반복계산을 위한 수치해석 알고리즘으로는 Runge-Kutta Fehlberg method를 사용하고 있다. 이 방법은 미분방정식의 수치해석에 가장 널리 사용되는 수치해석 가운데 하나로써 빠른 해석속도와 높은 정확성을 제공하여 준다.

3. 비선형 시간이력해석

구조물에 지진동이 작용할 때 변형이 작은 범위에서는 구조물은 거의 탄성거동 한다. 그러나 외력의 증가에 의해 변형이 커지게 되면 부재응력은 탄성한계를 넘게 되어 균열, 항복 등의 현상이 발생한다. 이때 복원력과 변형의 관계는 이력곡선 형태로 표현되며, 이와 같은 복원력 특성을 탄소성 복원력 특성이라 한다. 구조물이 큰 규모의 지진하중을 받는 경우에는 골조가 항복하여 소성영역에 들어가는 것은 피할 수 없다. 그러므로 구조물의 소성변형능력과 이력에너지 흡수능력은 지진에 대한 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 매우 중요한 인자가 된다. 비선형 시간이력해석은 구조부재의 비선형 복원력 특성을 단순화한 이력모델을 통하여 구조물의 비선형 거동을 파악하는 동적해석 방법이다.

3.1 비탄성 보요소

MIDAS 프로그램의 비탄성 보요소는 기존의 강성도법(stiffness-based method)에 비하여 높은 정확성을 보유하는 유연도법(flexibility-based method)에 근거하고 있다. 비탄성 보요소는 하중이 재하되는 동안 미소변형, 평면보존의 가정을 전제로 하는 Euler Bernoulli 보 이론에 의해 정식화된다. 기하학적 비선형성은 무시하며, 비틀림성분은 축력, 모멘트 성분과 연계되지 않는 것으로 가정한다.

구조부재의 비탄성 거동을 추적하고 이를 통해 변위연성능력을 평가하기 위해서는 부재의 항복변형을 초과하는 변형영역에 대한 해석이 필수적으로 필요하다. 그러나 기존의 강성도법은 형상함수(shape function)에 기초하여 정식화 되므로 비탄성 해석시에 실제 변형형상과 정식화에서 가정된 형상함수 간에 차이가 생길 수 있다. 또한 강성도법은 최대극한강도 부근에서 단면 모델이나 부재 모델 측면에서 수치적인 문제가 발생한다. 이러한 강성도법의 대안으로 Menegotto and Pinto(1977) 등의 연구에서 제안된 유연도법에 기초한 모델은 단면력에 대한 형상함수를 적용하여 정식화 된다. 그러므로 유연도법에서의 부재내력(element section force)분포는 실제 분포와 일치하기 때문에 보다 정확한 해석이 가능하다. 유연도법에서 단면력에 대해 선형의 형상함수를 적용하는 것은 포물선 형태의 강성도 변화를 가정하는 것에 해당한다. 이는 강성도법에서 3차함수의 변형 형상함수를 사용하는 것이 선형의 곡률분포를 가정하는 것과 비교될 수 있다. 그러므로 더 적은 수의 단면으로도 강성도법과 같은 정도의 결과를 낼 수 있는 수치적 이점을 갖는다. 결과적으로 유연도법을 사용하면 보다 적은 수의 요소로 정확한 모델링이 가능하고 그에 따라 보다 빠른 해석 속도를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 비탄성 보요소는 부재의 비탄성 거동을 파악하는 소성힌지의 위치 및 해석방법에 따라 집중형 힌지 모델과 분포형 힌지 모델로 구분된다(그림 6 참조).

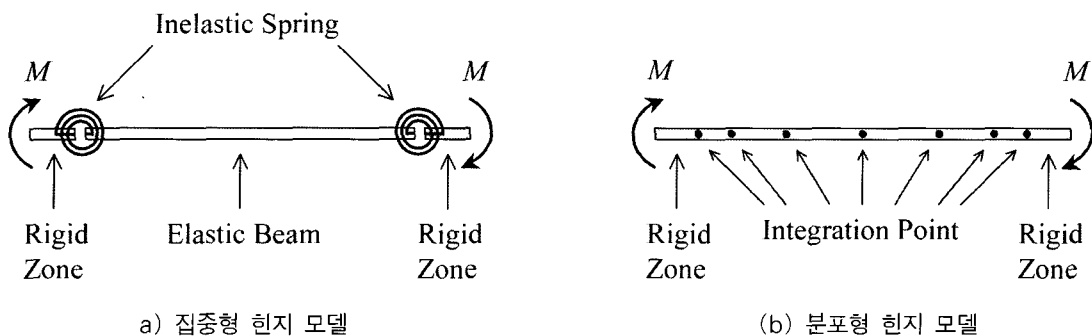


그림 6 힌지 분포형태에 따른 비탄성 보요소의 종류

3.2 비탄성 범용 연결요소

범용연결요소(general link)는 그림 7과 같이 요소좌표계의 x, y, z의 3방향 병진 및 회전을 표현하는 6개의 스프링으로 2절점을 연결하는 요소이다. 범용연결요소는 element type link와 force type Link로 구분된다. 경계비선형 해석에서는 force type link가 사용되고, element type link는 범용연결요소에 비탄성 힌지 속성을 부여함으로써 비선형 요소화되며 이력모델에 의한 비탄성 해석이 가능하다.

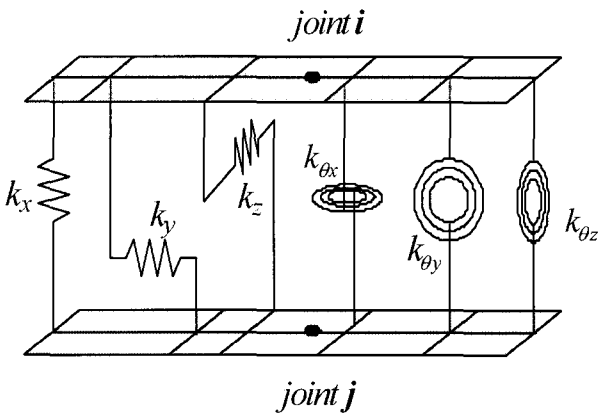


그림 7 범용연결요소의 스프링 강성

3.3 비탄성 트러스 요소

트러스 요소는 축방향 강성만을 갖는 요소로서 비탄성 힌지 속성은 truss type으로 정의된다. 요소의 비선형성은 그림 8과 같이 축방향 성분만이 정의 가능하며, truss type 비탄성 힌지는 일축힌지 이력모델에 의거한 상태판정으로부터 강성을 갱신하고 요소강성을 구성한다.

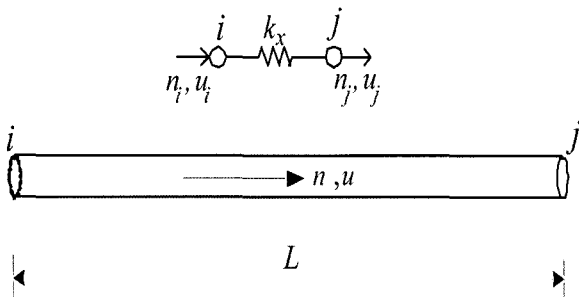


그림 8 비탄성 트러스요소와 축방향 강성

3.4 동적비탄성 시간이력해석

동적비탄성 시간이력해석(dynamic inelastic time history

analysis)은 보다 정밀한 비선형 해석에 의한 거동 분석을 위하여 사용될 수 있다. 구조물의 모든 부재에 대하여 비탄성 거동을 고려한 비선형 특성을 반영하여 시간이력해석을 수행하는 방법이다. 이 해석에서는 직접적분법(direct integration method)을 적용하고 반복과정에서 탄소성 요소 및 연결요소의 부재력의 상태관정을 통하여 계속해서 갱신한다. 각 단계마다 부재의 강성이 변화함에 따라서 발생하는 불평형력을 해소하기 위하여 Newton-Raphson 방법을 사용한다.

MIDAS 프로그램에서는 비선형 시간이력해석을 수행하기 위하여 그림 9와 같은 여러 가지 사항들을 고려할 수 있다. 해석방법, 하중조건, 하중 연속성, 감쇠(모드감쇠, Rayleigh 감쇠, 에너지 비례감쇠), 수치해석 방법, 비선형 수렴조건 등을 다양하게 선택할 수 있다. MIDAS 프로그램에서는 동적탄소성 시간이력해석을 수행하기 위하여 이력 곡선모델, 소성이론모델, 파이버모델 등을 제공하고 있다.

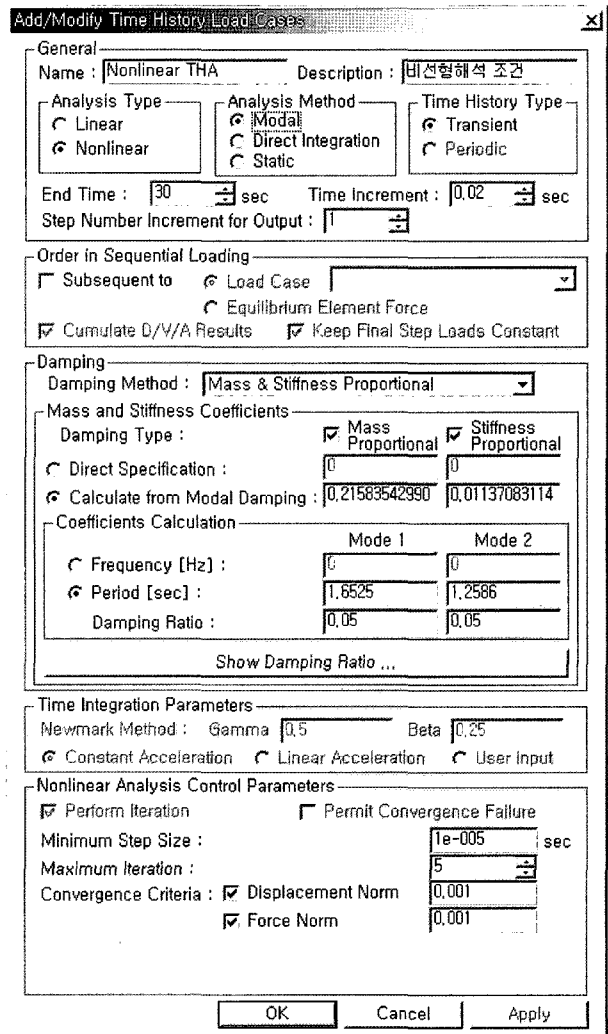


그림 9 비탄성 시간이력해석 조건

4. 이력곡선 모델

구조물이 지진하중과 같은 불규칙한 반복하중을 받아서 균열 및 항복 등이 발생하면 현재까지의 변위이력이 이후의 복원력-변위관계에 영향을 미치기 때문에 정적하중을 받을 때와 달리 매우 복잡한 거동을 나타낸다. 부재의 1방향 하중에 대한 힘과 변형의 관계를 골격곡선(skeleton curve)이라 한다. 이력곡선 모델은 골격곡선을 기본으로 하여 정(+), 부(-)의 반복하중이 작용할 때, 제하시(unloading)시와 재재하(reloading)시의 힘과 변형의 관계를 규칙화한 것으로 비선형해석에서는 부재의 복원력 특성을 이력곡선 모델로 정의하는 것이 일반적이다. 비선형 해석에서 사용하는 이력곡선 모델은 비선형 해석조건 설정에 의해 해석결과가 크게 달라질 수 있으므로, 적절한 해석결과를 얻기 위해서는 충분한 검토를 통하여 사용재료와 부재의 복원력특성을 충실히 반영할 수 있는 이력곡선 모델을 선택하여야 한다.

비탄성 힌지에 설정되는 이력모델은 항복강도와 항복후의 강성저감률로 정의된다. 요소의 항복강도는 사용자가 직접 입력하거나 또는 항복강도 자동계산 기능을 통해서 설정가능하다. 철골 단면의 경우에 그림 10과 같이 1차 항복은 중립축으로부터 가장 먼 위치의 휨 응력이 항복응력에 도달한 것으로 간주한다. 2차 항복은 전단면의 휨응력이 항복응력에 도달한 것으로 간주한다. RC 단면의 경우에 그림 11과 같이 1차 항복은 중립축으로부터 가장 먼 위치의 휨 응력이 콘크리트의 균열응력에 도달한 것으로 간주한다. 2차 항복은 콘크리트의 압축연단이 극한변형도에 도달한 것으로 간주하며 이때 철근의 응력은 항복응력보다 작거나 같다. SRC 단면의 경우에 콘크리트 충전강관 형태인 경우에는 철골단면, 콘크리트 피복형인 경우에는 RC단면의 계산 기준을 적용한다.

이력곡선 모델은 3개의 병진 및 3개의 회전 성분이 상호 독립적으로 거동하는 일축 힌지(uni-axial hinge) 작용을 한다. MIDAS 프로그램에서 일축힌지를 대상으로 제공되는 이력곡선모델은 골격곡선에 기초하고 있는 것으로서, 표 1의 모든 이력곡선모델이 일축힌지로 정의 가능하다. 이들 모델은 비대칭의 단면 혹은 재료 특성에 대응할 수 있도록 1, 2차 항복 강도 및 강성저감률을 정(+), 부(-) 비대칭으로 지정할 수 있다. 단, 이동경화형 모델의 경우에는 이력의 특성상 강성저감률은 비대칭성을 지원하지 않는다.

철근 콘크리트부재의 경우에 콘크리트의 균열, 철근의 항복에 의한 강성저감이 일어난다. 또한, 반복하중이 작용하는 경우에 항복후의 제하시에도 강성 및 강도가 저하되는 특징

에 도달한 것으로 간주한다. 2차 항복은 전단면의 휨응력이 항복응력에 도달한 것으로 간주한다. RC 단면의 경우에 그림 11과 같이 1차 항복은 중립축으로부터 가장 먼 위치의 휨 응력이 콘크리트의 균열응력에 도달한 것으로 간주한다. 2차 항복은 콘크리트의 압축연단이 극한변형도에 도달한 것으로 간주하며 이때 철근의 응력은 항복응력보다 작거나 같다. SRC 단면의 경우에 콘크리트 충전강관 형태인 경우에는 철골단면, 콘크리트 피복형인 경우에는 RC단면의 계산 기준을 적용한다.

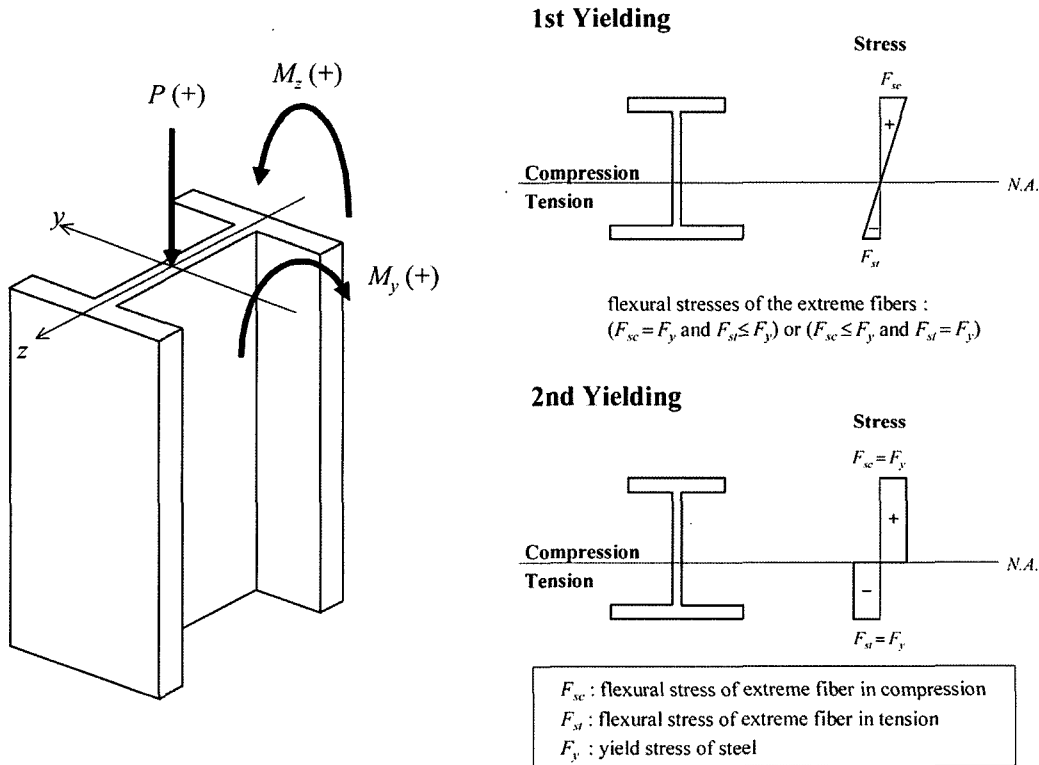
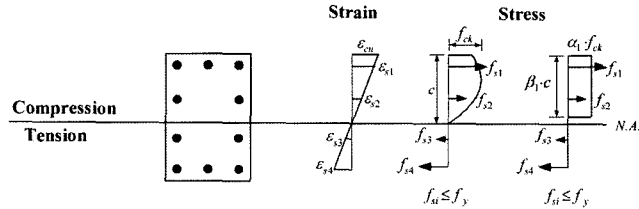
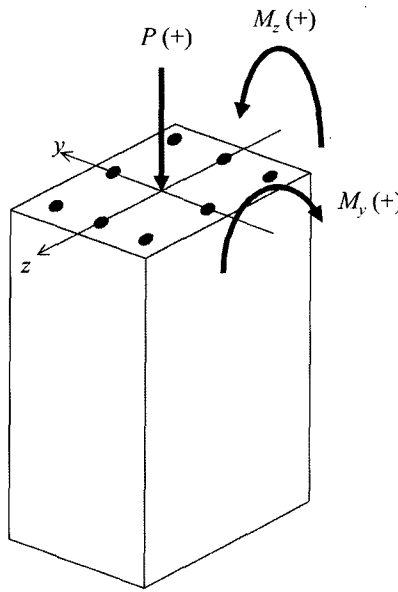


그림 10 철골 부재의 항복강도 정의

1st Yielding (Cracking)

cracking moment : $M_{cr} = k\sqrt{f_{ck}}Z + \frac{Z}{A}P$

2nd Yielding



- M_{cr} : cracking moment
- P : axial force (positive for compression)
- k : coefficient for the cracking moment
(ACI=7.5 in lb-in unit, AIJ=1.8 in kgf-cm unit)
- Z : elastic section modulus
- f_{ck}, e_{ck} : ultimate compressive strength and strain of the concrete, respectively
- f_y : yield stress of the reinforcing bar
- f_{si}, e_{si} : stress and strain of the reinforcing bar, respectively
- α_1 : coefficient for the ultimate strength of the concrete
- β_1 : coefficient for the height of the concrete stress block
- c : distance from the neutral axis to the compressive extreme fiber

그림 11 철근콘크리트 부재의 항복강도 정의

표 1 MIDAS 프로그램의 이력곡선 모델

분류	이력모델	적용요소	축력-모멘트 상호작용	주요 용도
simplified model	이동경화형(kinematic hardening/trilinear)	beam, truss, spring	P-M, P-M-M	강재, 교량 상부구조
	원점지향형(origin-oriented/trilinear)			
	최대점지향(peak-oriented/trilinear)			
	정규 이선형(normal bilinear)			
degrading model	클러프(clough/bilinear)형	beam, truss, spring	P-M	철근 콘크리트 부재
	강성저감삼선형(degrading trilinear)형			
	다케다(original takeda trilinear)형			
	다케다(original takeda tetralinear)형			
	수정 다케다(modified takeda trilinear)형			
nonlinear elastic	탄성 이선형(elastic bilinear)	beam, truss, spring	P-M	교량 상부구조
	탄성 삼선형(elastic trilinear)			
	탄성 사선형(elastic tetralinear)			
slip model	슬립(slip bilinear)형	beam, truss, spring	P-M	강재, 고무 서포트
	슬립(slip bilinear/tension)형			
	슬립(slip bilinear/compression)형			
	슬립(slip trilinear)형			
	슬립(slip trilinear/tension)형			
	슬립(slip trilinear/compression)형			
special model	Ramberg Osgood	spring	-	비선형 지반용
	Hardin Drnevich	spring	-	비선형 지반용

이 있다. 철근콘크리트 모델을 대표하는 것이 Takeda 모델이며, Clough형, 강성저감 삼선형 등도 사용된다.

강재는 한번 어느 방향에서 소성변형을 받은 후 역방향의 하중이 작용하면, 소성변형을 받지 않은 강재와 동일한 방향의 하중이 작용한 경우보다도 작은 응력에서 소성화하는 것으로 알려져 있다. 또한 변형도가 크게 되면 응력이

증대하는 성질, 즉 변형도경화(strain hardening)가 일어난다. 이와 같은 성질을 갖는 강재의 복원력 특성은 이동경화형의 정규 이선형(normal bilinear) 이력곡선 모델로 표현하는 것이 일반적이며, 정규 삼선형(normal trilinear) 이력곡선 모델을 적용하는 경우도 있다.

5. 소성이론 모델

지진과 같은 복잡한 형태의 하중에 대해서 축력과 2축 휨을 받는 기둥은 3개 성분 사이에 복잡한 상호작용이 존재한다. 이와 같은 상호작용을 보다 상세하게 모델링하기 위해서는 하나의 기둥을 입체요소로 세분하여 해석할 수 있으나, 상당한 계산량이 요구되기 때문에 요소의 갯수를 줄이기 위해 다축힌지 모델(multi-axial hinge model)이 일반적으로 사용되고 있다. 다축힌지 모델은 요소내에 복수의 비선형 힌지를 할당하여 힌지의 상태에 의해 부재의 비탄성거동을 해석하는 모델이다.

다축힌지 이력모델은 축력과 2축 휨성분을 항복곡면에 의해 정의하고, 소성이론(plasticity theory)에 의해 축력과 2축 휨성분들 사이의 상호작용을 고려하는 모델이다. 축력과 휨성분은 연계하지만 각각의 성분은 이력모델로서 정의되므로, 단면을 세분하는 파이버모델에 비해 힌지의 상태판정에 소요되는 계산량이 대폭 감소되어 대규모 구조물의 동적 비선형해석에도 적용 가능하다.

5.1 이동경화 거동

다축힌지를 대상으로 하는 이동경화(kinematic hardening) 형 이력모델은 2개의 항복면을 사용한 이동경화 법칙을 따른다. 이는 기본적으로 일축힌지를 대상으로 하는 삼선형 이동경화형 축성분과 2축 휨성분으로 확장시킨 것이다. 힌지의 상태 판정 및 그에 따른 유연도 행렬 계산은 정해진 항복면에 대한 하중점의 상대적 위치관계에 의해 결정된다. 재하강성은 탄성강성과 동일하며, 2개의 항복면은 항복에 의

해 위치만 이동하고 형태나 크기 변화는 없다고 가정한다. 항복의 판정은 그림 12에 나타난 것과 같이 하중점이 1차 항복면 내부에 위치한 경우에는 탄성상태로 간주한다. 재하 과정에서 하중점이 1차 항복면과 만나면 1차 항복이 발생한 것으로 간주하며 계속해서 하중점이 2차 항복면에 도달하면 2차 항복이 발생한 것으로 간주한다.

5.2 P-M 및 P-M-M 상관작용

기둥이나 교각과 같이 축력과 휨 모멘트가 동시에 작용하는 부재의 경우 축력과 모멘트의 상관작용에 의해 각 성분이 독립적으로 작용할 때와는 다른 항복강도를 갖게 된다. 특히 3차원 시간이력해석에서는 2방향 지진에 의해 기둥 부재 내부의 2축 휨 모멘트 및 축력 사이에 복잡한 상관작용이 발생하고 이는 구조물의 동적응답에 큰 영향을 미칠 수 있다. MIDAS 프로그램의 비선형 시간이력 해석에서는 P-M 상관작용 또는 P-M-M 상관작용을 고려한 해석을 수행할 수 있다(그림 13 및 14 참조).

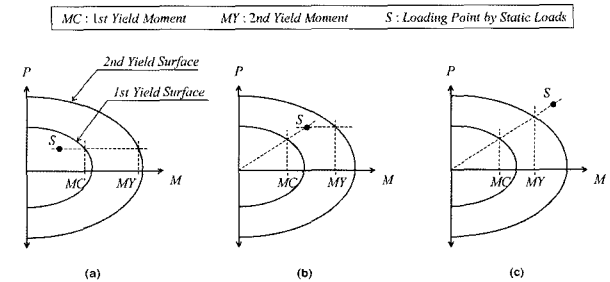


그림 13 P-M 상관작용에 의한 휨 항복강도 산정

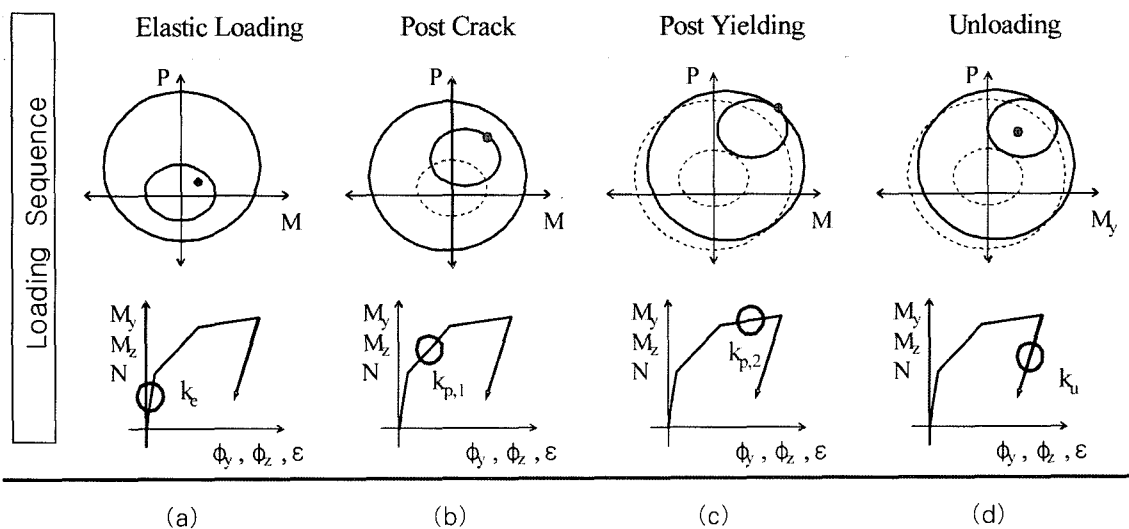
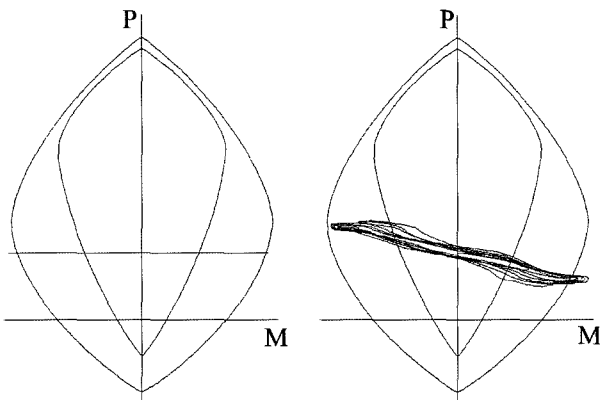


그림 12 항복면의 이동 및 강성변화



a) P-M Type(초기축력) (b) P-M-M Type(변동축력)

그림 14 P-M과 P-M-M 상관계에서의 축력관계

5.3 항복면의 근사화

힌지의 항복강도 산정 또는 상태판정에 있어서 P-M 또는 P-M-M 상관작용을 고려하기 위해서는 P-M 상관곡선

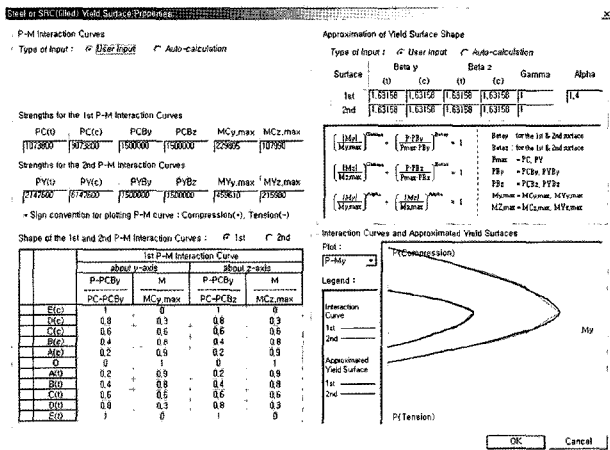


그림 15 RC 부재의 항복곡면

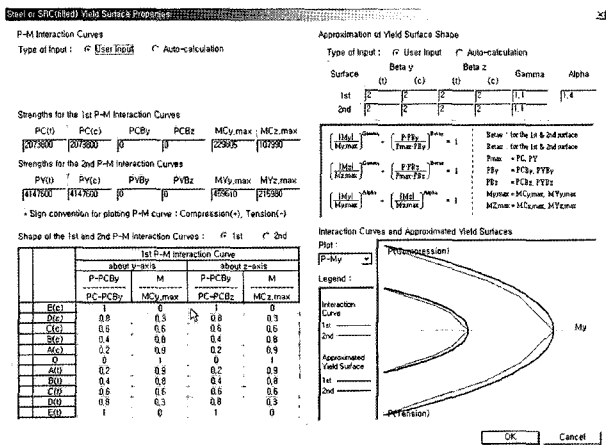


그림 16 Steel 부재의 항복곡면

으로부터 3차원 상의 항복면을 정의할 필요가 있다. 그러나 제한된 P-M 상관곡선의 데이터로부터 정확한 3차원 상의 항복면을 정의하는 것은 어렵기 때문에 MIDAS 프로그램에서는 P-M 상관곡선 및 항복면을 단순한 수식으로 근사화한다(그림 15 및 16 참조).

6. 파이버모델

파이버모델(fiber model)은 보 요소의 단면을 축 변형만을 일으키는 섬유로 분할하여 해석하는 모델이다. 파이버모델을 사용하게 되면 섬유의 재료-응력-변형도 관계 및 단면의 변형도 분포형상 가정에 기초해서 단면의 모멘트-곡률 관계를 비교적 정확하게 추적할 수 있으며, 특히 축력에 의한 중립축의 이동을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 골격곡선에 기초한 기존의 이력모델은 반복하중에 대한 보요소의 거동을 몇 가지 이상화된 법칙을 사용하여 모델링하기 때문에 실제 거동을 정확하게 나타내는데 한계가 있다. 그러나 파이버모델을 이용하여 재료모델을 적절히 구성하면 횡구속 철근에 의한 구속효과(confinement effect)와 콘크리트의 압괴(crushing), 콘크리트의 인장균열, 철근의 인장항복, 파단 등의 비선형적 거동을 정밀하게 모사할 수 있다.

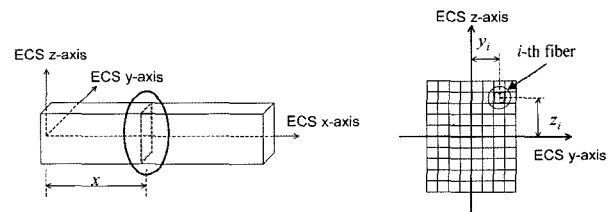


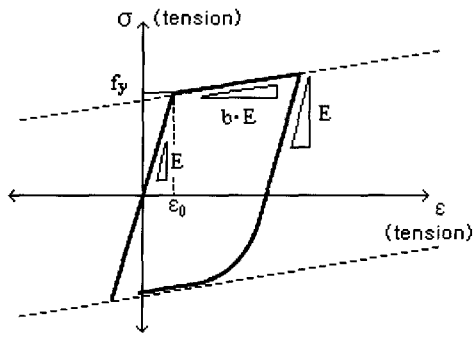
그림 17 파이버모델에서의 단면 분할

6.1 강재 및 콘크리트의 구성모델

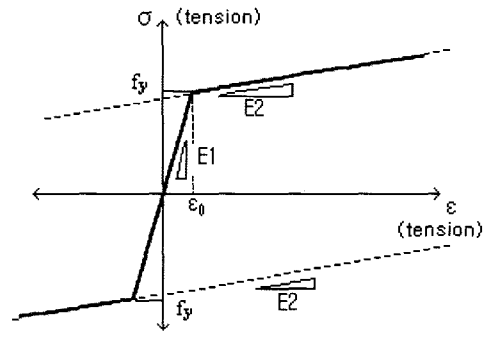
파이버모델에서 단면의 비선형 거동 특성은 비선형 섬유의 응력-변형도 관계에 의해서 정의된다. 부재의 비선형적 거동은 모두 섬유의 응력-변형도 관계로부터 구현되기 때문에 MIDAS 프로그램에서는 다양한 강재 및 콘크리트의 재료 모델을 제공하고 있다(그림 18 및 19 참조).

6.2 파이버모델을 이용한 비선형 시간이력해석

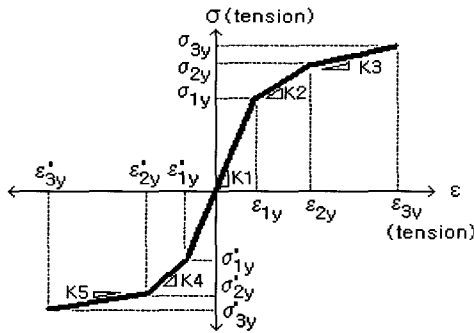
철근 콘크리트의 비선형 시간이력해석은 콘크리트의 인장 균열, 압축 파괴, 인장철근의 항복 및 구속 철근의 횡구속에 의한 구속효과 등 다양한 고려사항으로 인해 끊임없



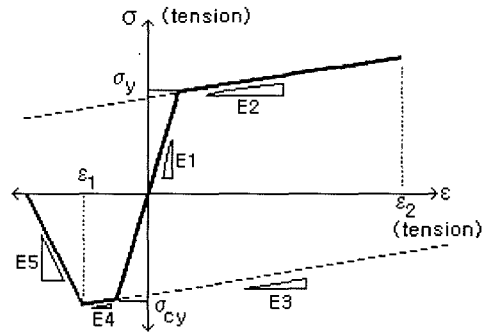
(a) Modified Menegotto-Pinto Steel Model



(b) Bilinear Steel Model

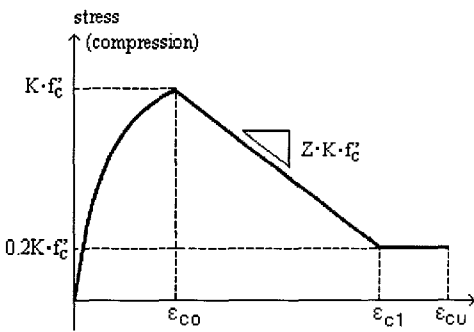


(c) Asymmetrical Bilinear Steel Model

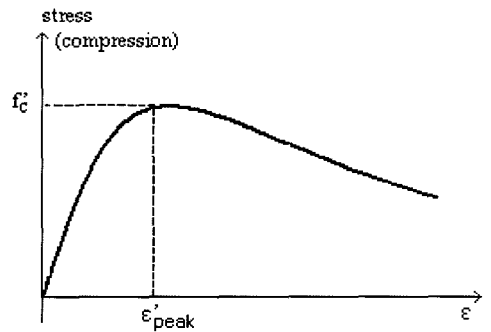


(d) Trilinear Steel Model

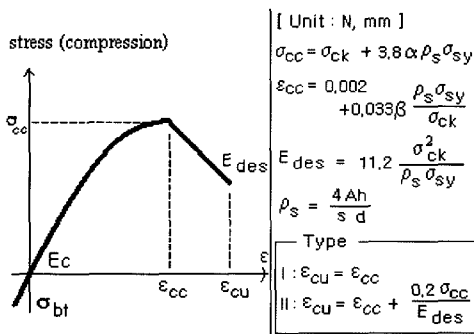
그림 18 MIDAS 프로그램에서 제공하는 강재 구성모델



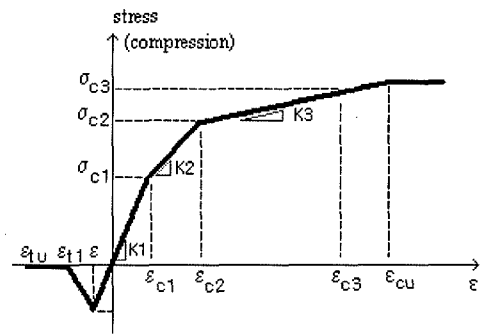
(a) Modified Kent & Park Concrete Model



(b) 일본 콘크리트 표준 시방서 모델



(c) 일본 도로교 시방서 콘크리트 모델



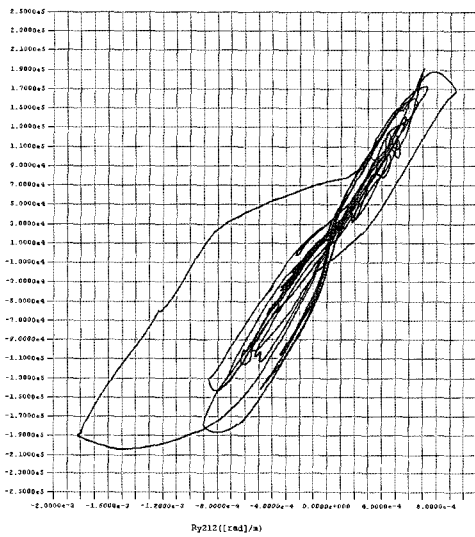
(d) Trilinear Concrete Model

그림 19 MIDAS 프로그램에서 제공하는 콘크리트 구성모델

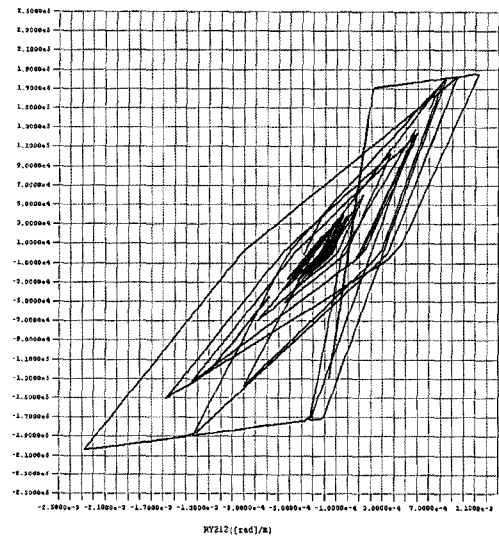
는 강성 변화와 비선형적 거동이 발현된다. 기존방식으로
 는 다양한 실험적 결과들을 바탕으로 철근 콘크리트 부재
 전체의 비선형적 거동을 하나의 이력으로 표현하기에는
 어려움이 있었다. 그러나 파이버요소는 부재 전체에 대한
 등가의 강성을 구하는 것이 아니라 단면 자체를 분할하여
 각 섬유가 비선형성을 발현하도록 하여 이들의 결과를 적
 분하여 부재 전체의 결과를 얻어내기 때문에 보다 쉽게
 해석을 수행할 수 있으며 정밀한 결과를 얻어낼 수 있다
 (그림 20 및 21 참조).

7. 맺음말

이상으로 MIDAS 프로그램에서 제공되는 비선형 동적
 해석에 대한 이론 및 기능 소개에 대하여 살펴보았다. 경
 계비선형 해석은 먼진 및 제진장치가 설치된 구조물의 내
 진성능과 장치의 안전성을 평가하는데 매우 유용하다. 그
 리고 보다 정밀한 성능평가를 위해서는 구조물의 모든 부
 재가 비선형 특성을 가지면서 탄소성을 거동을 하는 동적
 비탄성 시간이력해석을 수행할 수 있다. 이러한 비선형
 동적해석 기능들은 향후 정밀 내진성능 평가 및 내진 향
 상 기법에 대한 적용 분야에도 효과적으로 활용될 수 있

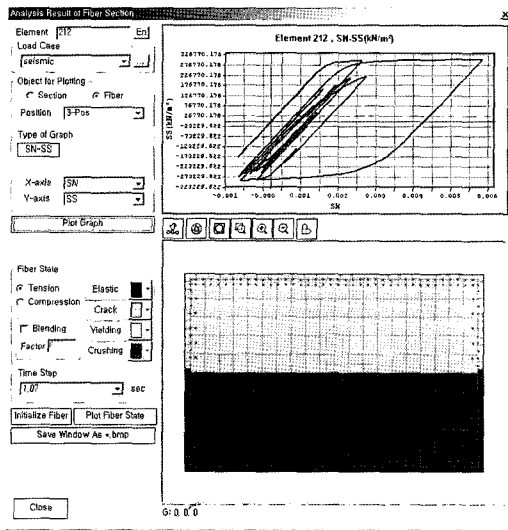


(a) 파이버모델

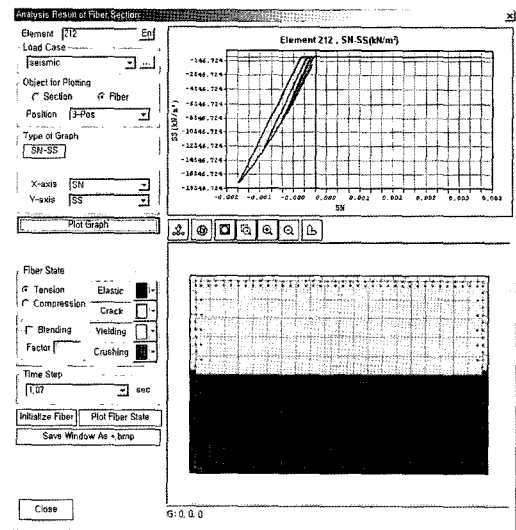


(b) 다케다모델

그림 20 이력모델에 따른 Moment-Curvature 결과 비교



(a) 콘크리트 파이버 이력결과



(b) 철근 파이버 이력결과

그림 21 콘크리트 및 철근의 파이버 이력 결과 비교

을 것으로 판단된다.

(주)마이다스아이티는 2005년 11월30일에 세계적인 비선형 프로그램 개발사인 TNO DIANA 사(<http://tnodiana.com>)와 기술력 강화 및 새로운 고급 해석 프로그램 공동개발에 대한 전략적 제휴계약을 정식으로 체결하였다. 향후 마이다스아이티는 TNO DIANA사와 고급 비선형 해석 알고리즘에 대한 연구와 솔버 개발에 협력함으로써 세계적인 수준의 비선형 해석 기능을 탑재한 프로그램을 공동으로 개발하고 유럽 및 미주를 포함한 전세계에 보급할 계획이다.

참 고 문 헌

1. Fabio Taucer, et al., "A Fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures", EERC-91/17, College of Engineering, University of California at Berkeley, 1991.
2. Filippou, F.C., Popov, E.P. and Bertero, V.V., "Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints", EERC Report 83-19, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, 1983.
3. John H. Thomsen IV and John W. Wallace, "Displacement-Based Design of Slender Reinforced Concrete Structural Walls-Experimental Verification", Journal of the Structural Engineering, ASCE, 2004.
4. Kent, D.C., and Park, R., " Flexural Members with Confined Concrete", Journal of the Structural Division, ASCE, 97(ST7), 1971.
5. Menegotto, M. and Pinto, P.E., "Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending", Proceedings, IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads", Lisbon, 1973.
6. Scott, B.D., Park, R. and Priestley, M.J.N., "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates", ACI Journal, Vol. 79, No. 1, 1982.
7. Earthquake Response of Symmetric and Asymmetric One-Story Elastic Systems with Nonlinear Fluid Viscous Dampers or Nonlinear Viscoelastic Dampers, EERC- 2003-02, Anil K. Chopra.
8. FEMA, NEHRP Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings, National Earthquake Hazards Reduction Program, FEMA-273, 1997.
9. SEAOC, Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, Structural Engineers Association of California, Blue Book, 1999.
10. Wilson, E. L., Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, Computers and Structures, Inc., 2000. 