

전산구조 탐방

MacNeal-Schwendler Corporation

- NASTRAN을 이용한 구조해석 -

이영신*

* MSC, KOREA

MSC사(MacNeal-Schwendler Co.)는 유한 요소법을 이용한 구조해석 소프트웨어를 개발하는 CAE(computer aided engineering) 전문업체로서 이 분야에서 세계적으로 가장 높은 시장 점유율을 기록하고 있으며 특히 NASTRAN 및 PATRAN으로 잘 알려져 있다. NASTRAN은 1960년대에 미국 항공 우주국(NASA)에서 처음 개발된 이후 1971년부터 현재까지 MSC사에서 개발 공급되어 현재 가장 최신 버전인 MSC/NASTRAN V68에 이르고 있다.

MSC사에서는 현재 NASTRAN 이외에 범용 전후처리 프로그램인 PATRAN, 3차원 모델러인 ARIES, 피로해석용 FATIGUE, 충돌해석용 DYT-RAN 등의 solver들과 재료 물성 정보 데이터 베이스인 MVISION등의 부속 소프트웨어들을 개발 공급하고 있다.

본 고에서는 자동차, 항공, 전자, 중공업 및 건설등의 분야에

널리 사용이 가능한 MSC/NASTRAN의 개략적인 기능을 살펴보고자 한다.

1. 모델 생성

1.1 형상 정의

해석 대상 구조물의 기하학적 형상을 정의하는 과정이다. MSC/NASTRAN과 연계하기 위해 형상을 정의하는 방법은 2가지가 있다. 첫번째는 CAD프로그램을 이용하는 방법이다. 이 방법으로 형상을 정의하는 경우, CAD 관련 부서로부터 이미 제작된 형상을 넘겨 받아 이용할 수도 있고, CAD 프로그램의 다양한 기능을 이용하여 직접 정의할 수도 있다.

두번째 방법은 유한 요소 모델링 프로그램을 이용하는 방법으로서, 일반적으로 형상의 정의 자체는 앞의 방법보다 다소 어려운 반면 형상 정의 이후에 수반되는 요소 생성에 장점을 가지고 있다. 이를 방법들에 사용되는 프로그램을 전처리(pre-

processor) 프로그램이라 하는데 상용 전처리 프로그램의 상당수가 MSC/NASTRAN을 지원하고 있다.

최근에는 형상은 CAD 프로그램으로 정의하고 그 이후의 과정(요소 생성, 물성치 정의, 경계/하중 조건 정의)은 유한 요소 모델링 프로그램으로 수행하는 경향, 즉 CAD 및 CAE 각 분야의 장점을 최대한 살리며 데이터를 공유하는 시스템 인테그레이션에 대한 노력이 지속적으로 이루어지고 있다.

1.2 요소 생성(meshing)

MSC/NASTRAN은 1, 2, 3 차원 기본 요소뿐 아니라 강체 요소, 축대칭요소, 음향요소, 공 탄성요소, 감쇄요소, 질량요소, 스프링요소 및 열전달요소 등 광범위한 요소 라이브러리를 제공한다. 아울러 해석과 실험의 연계를 위해 구조물의 일부나 전체에 대한 강성, 감쇄, 질량 행렬을 정의할 수 있다.

일반적으로 이 요소 생성 과

정은 전처리 프로그램으로 수행되는데, 요소를 분할하는 방법에 따라 mapped meshing과 automatic meshing으로 나뉘어진다. 해석결과의 정확도를 높이기 위해서는 automatic meshing보다 mapped meshing이 유리하다고 할 수 있다.

1.3 물성치 정의

해석 대상의 재료 성질을 정의하는 과정이다. 실제 재료의 성질은 매우 복잡하여 그 정의가 아주 어렵다. 따라서 이 성질을 해석 목적에 따라 이상화하여 정의한다. MSC/NASTRAN에서 지원되는 이상화된 재료는 다음과 같다.

– 등방성 재료(isotropic) : 재료 성질이 방향에 무관.

– 이방성 재료(anisotropic) : 방향에 따라 재료 성질이 변화.

– 직교성 재료(orthotropic) : 직교되는 두 방향에 대하여 서로 다른 재료 성질.

– 복합 재료 : 성질이 다른 재료가 혼합된 재료(예: 적층 복합 재료)

– 비선형 탄성 재료 : 응력-변형률 관계가 비선형이며 영구변形이 거의 없는 재료.

– 소성 재료 : 영구 변형이 생기는 재료.

– Creep 재료 : 일정한 하중 하에서 변형이 시간에 따라 변하는 재료.

– Temperature dependent 재료 : 성질이 온도에 따라 변하는 재료.

– Hyperelastic 재료 : Poisson ratio가 0.5에 가까운 재료.

2. 해석 및 최적화

MSC/NASTRAN에서 지원되는 해석 유형을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

2.1 선형 정적 해석(linear static analysis)

해석 대상에 가해지는 하중 조건이 시간에 따라 변하지 않으면 이 하중에 대한 구조물의 응답이 하중의 크기에 비례하는 경우에 대한 해석으로 가장 많이 이용되고 있는 해석 유형이다.

1) 응력 해석

해석 대상 내부에 생기는 변위, 응력, 변형 에너지 등을 구하는 해석이다.

2) Inertia relief 해석

해석 모델이 외부에 연결되어 있지 않아 강체 운동이 일어날 수 있는 구조물에 대한 해석이다. 주로 운항중인 항공기, 주행 중인 자동차, 궤도를 선회중인 인공위성 등의 해석에 응용된다.

3) 탄성 좌굴 해석

재료의 상태는 탄성 영역에 있으나 구조물이 불안정해지는

현상을 규명하는 해석으로 eigenvalue 문제의 일종이다. 이 eigenvalue 문제를 푸는 방법으로 lanczos법, inverse power법, sturm modified inverse power 법 등이 제공된다.

2.2 진동 해석

시간에 따라 변하는 하중에 대한 구조물의 응답을 구하는 해석 유형이다.

1) 고유 진동 해석

해석 대상이 갖고 있는 고유한 진동 특성(고유 진동수와 진동 모우드)을 구한다. 이 해석의 지배 방정식 역시 eigenvalue 문제 형태이다. 이 eigenvalue 문제를 풀기 위하여 lanczos법, givens법, householder법, 수정 givens법, 수정 householder법, inverse법, sturm modified inverse power법, 선택적 givens 법, 선택적 householder법 등이 제공된다. 이 해석을 통해 강체 진동 해석에 필요한 정보를 얻게 된다.

2) 주파수 응답 해석(frequency response analysis)

회전 기계류, unbalanced 타이어, 헬리콥터 날개 등과 같이

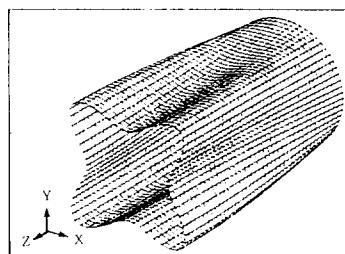


그림 1 실린더 구조물의 1번째 좌굴 모우드

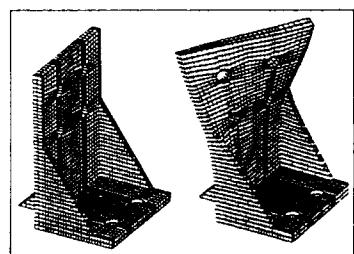


그림 2 자동차용 브라켓의 유한 요소 모델과 2번째 진동 모우드

주기성을 가진 가진력이 가해지고 있는 구조물의 정상(steady state) 응답을 구하는 해석이다. 운동 방정식이 복소수 방정식으로 계산되는 응답 역시 복소수(실수와 허수 또는 진폭과 위상각)이다. 일반적으로 가진력은 주파수의 함수이나, 시간의 함수일 수도 있다. 이런 경우에는 Fourier 변환을 이용하여 프로그램 내부에서 주파수 함수로 바꾼 후 해석한다. 최종 운동 방정식의 성질에 따라 두 가지의 해석 방법(direct법과 modal법)이 제공된다. direct법은 운동 방정식을 시간에 대하여 직접 수치적분하여 응답을 구한다. Modal법은 진동 모우드

의 수학적 특성(orthogonality)을 이용하여 연성 운동 방정식을 각 자유도마다 독립적인 운동 방정식으로 변환하여 구조물의 응답을 구한다. 이 방법을 사용하는 경우, 감쇄(damping)는 modal damping을 사용하는 것이 효율적이다.

일반적으로 direct법은 modal법보다 정확도가 우수하며, modal법은 direct법 보다 해석 시간이 짧다. 단순화된 자동차 차체 모델(그림 3)에 unbalanced 타이어에 의한 가진력이 가해졌을 때, 차체의 응답(그림 4)을 구하는 것도 이 해석의 한 사례이다.

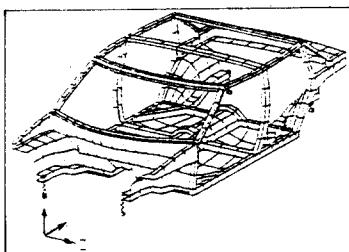


그림 3 자동차 차체의 해석 모델

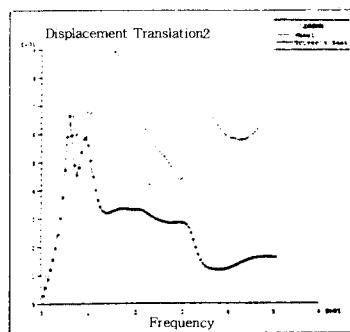


그림 4 주파수 응답해석 결과

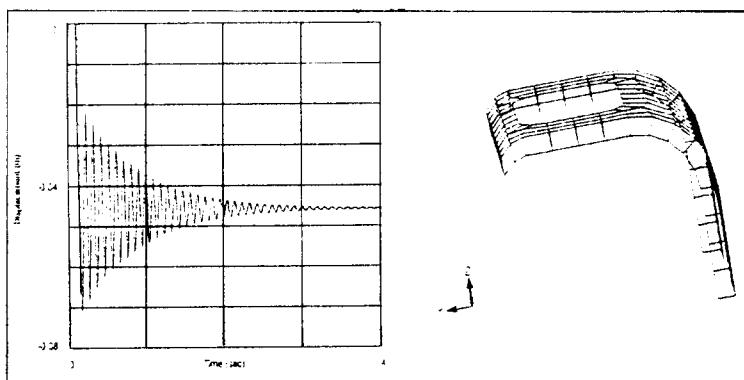


그림 5 브라켓 모델과 그 과도 응답

3) 과도 응답 해석(transient response analysis)

지진, 낙하 충격 등과 같이 시간의 함수로 정의되는 가진력이 가해질 때의 구조물의 응답을 구하는 해석으로 가장 일반적인 진동해석 유형이다. 주파수 응답 해석에서와 같이 direct법과 modal법이 제공된다.

4) Random vibration 해석

해양의 파도, 제트 엔진의 소음과 같이 통계적(평균, 표준 편차)으로 표현되 가진력에 의한 구조물의 응답을 구하는 해석이다.

5) Response spectrum 해석 (일명 shock spectrum 해석)

과도적인 가진력이 가해지고 있는 대형 구조물의 최대 응답을 대략적으로 구하는 해석으로 과도 응답 해석의 한 변형이라 할 수 있다. 토목 분야에서는 지진에 따른 빌딩 내부 각 부위의 최대 응답 예측에 응용되고, 항공 산업 분야에서는 비행기에 충격하중이 가해졌을 때의 비행기 내부 각 장비의 최대 응답의 예측에 사용된다. 이 해석은 spectrum을 생성하는 과정과 이를 이용하여 전체적인(overall) 응답을 구하는 과정으로 이루어 진다. 그림 6은 이 해석의 전체적인 개념도이다. 최대 응답으로부터 전체적인 응답을 구하는 방법으로는 SRSS (square root of the sum of the square) 법, ABS (absolute value) 법, NRL(U.S. Naval Response Lab shock design modal summation) 법 등이 제공된다.

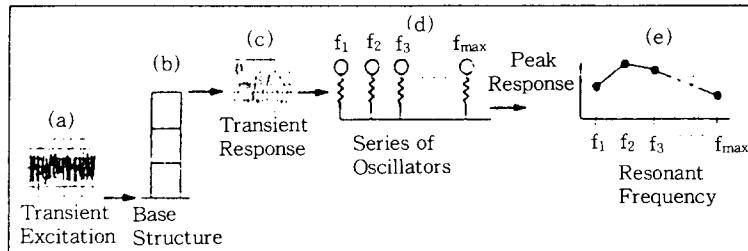


그림 6 Response spectrum 해석의 개념도

6) 음향해석

자동차나 비행기 내부의 소음을 유한 요소 해석 기법으로 구하는 해석이다.

음향 전달 매개체인 유체는 3 차원 솔리드 요소로 모델링되며 유체를 둘러싼 구조 요소와 연결된다. Direct법과 modal법이 제공되고 있으며 음향 해석용 특수 요소(acoustic source, acoustic barrier)가 지원된다. 아울러 구조물의 각 부분(panel)의 음향 성질에 대한 기여도(participation factor)도 구해진다.

7) 복소수 Eigenvalue 해석

감쇄를 고려한 구조물의 고유 진동을 구하거나 전달 함수로 정의된 계(system)의 안정도 평가에 이용되는 해석이다. eigenvalue 추출법으로는 complex lanczos법, upper hessenberg 법, inverse power법, determinant search법 등이 제공된다.

8) Dynamic reduction

앞에서 소개된 모든 진동 해석은 정적 해석에 비해 과도한 해석 시간과 메모리가 요구된다. 따라서 경제적이며 효과적인 진동 해석을 수행하기 위해

해석 모델의 수학적 크기(해석에 이용되는 실제 자유도의 크기)를 줄일 필요가 있다.

그 방법으로 static condensation, GDR(general dynamic reduction), CMS(component mode synthesis) 등이 제공된다.

2.3 비선형 해석

구조물의 변형이 가해진 하중에 비례 하지 않는 경우에 그 변형을 반복 수치해석을 이용하여 구하는 해석이다. 비선형성이 유래되는 원인에 따라 기하 비선형(geometric nonlinear), 재료 비선형(material nonlinear), 경계 비선형(boundary nonlinear)로 구분된다. 비선형 문제를 푸는 수치해석 방법으로는 NR(Newton Rapson)법, 수정 NR법, 자동 선택 NR법, Criesfield법, Riks법, Modified Riks

법 등이 제공되며 수렴성에 접근하는 속도를 가속하는 BFGS 법과 line search법이 제공된다. 아울러 사용자의 편의와 수렴성 보장을 위해 자동 반분(bisection)법, adaptive time stepping, adaptive load increment

등이 제공된다.

재료 비선형에 속하는 문제로는 비선형 탄성, 소성, thermo-elasticity, hyper-elasticity, creep 등이 있다. 비선형 재료의 경화(hardening) 현상에 대한 모델로는 kinematic 경화, isotropic 경화, 혼합 경화가 제공되며 항복 조건으로는 Von-Mises, Tresca, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 등이 제공된다.

기하 비선형은 변위와 변형률의 비선형성에 의하여 발생되는 현상으로 snap-through, post-buckling, follower force 등이 속한다.

경계 비선형은 경계 조건의 비선형성에 기인하는 문제로 접촉 문제가 이에 속한다. 점 접촉과 선 접촉 해석 기능이 제공되고 있다.

2.4 열전달 해석

전도, 대류, 복사 현상, thermal control, 상변화 등을 독립적으로 또는 함께 해석할 수 있으며 필요시에는 구조 해석과 조합시켜 풀 수 있다. 문제의 성격과 해석 목적에 따라 선형, 비선형, 정상(steady state), 과도(transient)해석을 수행한다.

2.5 공탄성 해석

항공기, 헬리콥터, 미사일, 현수교 등의 응답을 구하는 해석이다. 해석 유형은 3가지(static aeroelastic, dynamic aeroelastic, flutter 해석)이며 설계 최적화도 가능하다. Flutter 해석시 사용되는 방법으로는 K-법

(American flutter법), PK-법 (British flutter법), KE-법 (efficient K-법) 등이 제공된다.

2.6 Adaptive 해석

68버전부터 p-요소(형상함수의 정수 다항식 차수가 바뀌는 요소)와 이를 이용한 p-adaptivity(해석 결과가 사용자가 정의한 허용 오차 범위내에 들어가도록 각 요소의 형상 함수의 다항식 차수가 프로그램 내에서 자동으로 변하는 기능)가 제공되고 있다. 버전68 이전의 요소는 h-요소이며 이를 이용하여 구조물의 해석 결과가 허용 오차 범위내에 들도록 하는 반복적이며 수동적인 과정(요소분할→해석→결과 분석→요소 재분할→재해석.)을 h-adaptivity라 한다.

p-adaptivity는 해석 대상의 기하학적 형상을 있는 그대로 이용하며 adaptive 해석 과정이 자동적이고 수렴된 해석 결과를 쉽게 구할 수 있는 장점이 있다.

MSC /NASTRAN은 하나의 해석 모델에 두가지의 adaptivity를 혼합하여 사용할 수 있는 특징이 제공된다. 하나의 사례로 모터 날개에 대하여 두가지

adaptivity를 이용하여 해석을 수행한 후 그 결과를 비교하여 보았다(표 1. 참조). p-adaptivity 이용시 적은 자유도로 손쉽게 수렴된 고유 진동수를 구할 수 있음을 알 수 있다.

2.7 설계 최적화

현재의 해석 모델로부터 제한 조건(변위, 응력등 여러 가지 해석 결과에 대한 제한)을 만족시키면서 목적 함수(무게, 부피, 1 번째 고유진동수, 소음 레벨, 오차함수 등등)를 최소(또는 최대)화 시키는 새로운 모델을 찾는 기능이다. 그 속성상 해석이라기 보다는 합성(synthesis)이라함이 합당하다. 최적화 과정에서 그 값이 변하는 설계변수는, 형상 최적화와 관련된 형상 변수(절점의 좌표)와 sizing 최적화와 관련된 sizing 변수(판요소의 두께, 보요소의 크기나 단면적 등등)로 대별된다. 선형 정적해석, 고유진동해석, 좌굴해석, 주파수 응답해석, 과도 응답해석, 음향 해석, 공탄성 해석, superelement 해석 등에 대한 설계 최적화가 제공되고 있으며, inertia relief 해석에 대해서는 민감도 해석이 제공된다.

제한 조건식이나 목적 함수로 사용되는 해석 응답으로는 해당 해석에서 출력되는 일반적 해석 결과뿐 아니라, 사용자가 수식으로 정의한 임의의 함수도 사용 가능하다. 구조 해석, 민감도 해석 그리고 수치 최적화 과정을 반복적으로 수행해야 하는 속성으로 인하여 많은 소요 시간과 메모리가 필요하다. 이런 문제를 해결하기 위해 설계 변수의 그룹화, 제한 조건식의 잠정적 삭제, formal approximation(구조 해석의 횟수를 줄이기 위해 해석 응답을 explicit 한 수학식으로 표현)등의 간단하면서도 효율적인 방법들이 제공된다. 수치 최적화의 방법으로는 modified feasible direction법, 연속적 선형 프로그래밍법, 연속적 2차함수 프로그래밍법 등이 제공된다.

2.8 대형 구조물 해석

자유도가 수십만 또는 그 이상인 해석 모델을 그대로 해석하는 경우 사용 가능한 메모리와 시간 제약으로 인해 여러 가지 난관에 봉착한다. 이런 대형 구조물을 효율적으로 해석하기 위한 여러 가지 방법들이 제공된다.

Superelement(substructuring과 자동 D/B관리), 축대칭, cyclic symmetry(해석 모델의 주기성을 이용) 등을 통해 해석 모델의 자유도를 크게 줄인 후, 최신 수치 연산 알고리즘을 이용하여 해석함으로써 해석 시간과 메모리 용량을 격감시킨다.

표 1 모터 날개에 대한 h/p adaptive 해석 결과

Adaptivity 유형	mesh	요소수	자유도 숫자	1번 째 진동수	2번 째 진동수
h-adaptivity	course	4	90	623	651
	medium	80	441	645	955
	fine	1250	4878	660	1052
p-adaptivity	p=3	10	276	738	1065
	p=5		1161	676	1071
	p=6		2112	675	1071

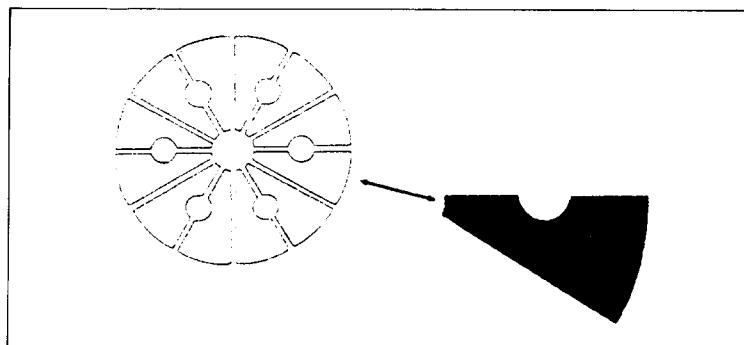


그림 7 Cyclic symmetry 모델

2.9 DMAP(Direct Matrix Abstract Programming)

MSC /NATRAN을 구동하는 마크로 언어다. 이를 이용하여 MSC /NASTRAN의 표준 해석 절차를 수정하거나, 특수한 기능을 수행하는 사용자 고유의 프로그램을 작성할 수도 있으며 해석을 실험과 연계시킬 수도 있다.

3. 결과 분석

해석이나 설계 최적화가 끝난 후 그 결과를 면밀하게 평가, 분석하는 과정이다.

사용자가 갖고 있는 공학적 지식이나 경험을 최대한 활용하여 유용한 정보를 찾아내야 한다. 이를 위하여 해석 결과를 대화 형식으로 다양하게 표현해주는 후처리 프로그램을 많이 사용하고 있다. MSC /NASTRAN과 연결되는 후처리 프로그램으로 MSC /PATRAN, MSC /ARIES, I-DEAS 등이 있다. MSC /NASTRAN의 해석 결과 출력 형태는 그림8과 같

이 다양하며 이중에서 output2, xdb, pch 파일 등은 후처리 프로그램과의 interface에 사용된다.

4. 유지 보수

프로그램의 기능을 계속해서 확대, 개선시키고 프로그램 사용과 관련된 교육, 문제 해결, 매뉴얼의 재작성과 신속한 제공 등에 연속적이며 집중적인 노력이 경주되고 있다. 프로그램을 사용자에게 제공하기 전에 약 000여개의 시험 모델로 엄격한 testing이 수행된다. 프로그램의 사용법 습득을 쉽게 하기 위해

각 해석 분야 별로 쉽게 풀어 설명한 7종의 user's guide가 제공되며, 고급 지식(배경 이론과 응용 사례)을 제공하는 4종의 매뉴얼과 이 모든 책자들을 컴퓨터를 통해 손쉽게 참조해 볼 수 있는 CD(모든 워스테이션과 PC에서 사용 가능)도 제공된다.

고객의 사용법 습득과 기술 향상을 위해 14개의 교육 과정이 한국을 포함해 전세계적으로 실시되고 있고 고객들간의 정보 교환을 돋기 위해 한국을 포함한 주요 국가에서 매년 users' conference가 정기적으로 열리고 있다.

5. 지원되는 H/W

수퍼 컴퓨터(CRAY, CONVEX, IBM...), 메인 프레임(DEC, IBM...), 엔지니어링 워스테이션(DEC, HP, IBM, SGI, SUN...), PC등의 대부분의 기종이 지원된다.

문의처 : MSC, KOREA(전화 : 02-929-8711, 팩스 : 02-929-8710) ☎

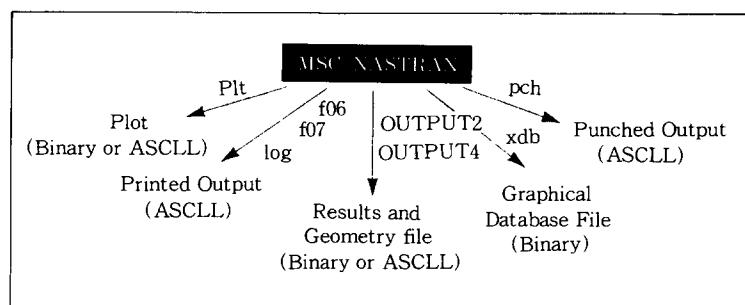


그림 8 MSC/NASTRAN의 출력 형태