

위상최적화에 의한 경량화 설계 안을 반영하기 위한 CAD 인터페이스¹⁾

글 _ 민승재 _ 연암대학교 기계공학부/자동차공학과 _ seungjae@hanyang.ac.kr

서론

시뮬레이션기반 구조물 경량화 설계를 위하여 초기 설계 안인 기하 CAD모델로부터 이산화된 해석모델을 생성하고 구조해석 및 위상최적화를 수행하는 일련의 과정을 진행하지만, 그 결과는 해석모델에만 반영된 것이고 CAD모델에 반영하기 위해서는 설계자가 해석 및 최적화 결과를 보고 판단하여 수작업으로 초기 CAD모델을 수정하는 방식으로 진행하고 있는 실정이다. 또한 개념설계 단계에서는 CAD모델 없이 직접 유한요소 해석모델로부터 설계 프로세스를 진행할 수도 있으므로 이러한 경우 해석결과를 반영할 CAD 모델 자체가 존재하지 않는다. 따라서 설계프로세스의 중심이 되는 CAD모델과 시뮬레이션기반 설계에 필수적인 해석모델이 동시에 요구되는 현재 CAD/CAE 개발환경 하에서 기존의 CAD모델로부터 해석모델을 생성하는 Top-Down형식의 모델변환뿐 아니라 해석 결과로부터 CAD모델을 수정 또는 생성하는 Bottom-Up형식의 모델변환이 필요하며, 이러한 상호 유기적인 모델변환이 가능해짐으로써 진정한 의미의 시뮬레

이션기반 설계의 효율이 극대화될 수 있다.

현재 CAD모델로부터 유한요소 해석모델을 생성하는 과정은 부분적으로 자동화를 지원하는 상용 전처리 소프트웨어들이 제공되어 설계 프로세스의 시간을 단축할 수 있는 반면, 해석이나 최적설계 결과를 CAD 모델에 반영하는 상용 소프트웨어는 거의 없거나 그 기능이 미약한 수준이다. 최근 상용 CAD시스템에서 기본적인 구조해석이나 최적화 기능을 구비하여 자체적으로 설계변경내용을 CAD모델에 반영할 수 있는 모듈을 발표하고 있으나 아직 현업에 적용할 만큼 검증받지 못하고 있는 실정이다. 또한 CAD모델 수정을 설계자가 수작업으로 진행함으로써 시간을 들여 계산한 해석결과를 제대로 CAD모델에 반영하지 못하는 결과를 초래하고 이는 성능확인을 위한 시뮬레이션의 반복수행으로 인하여 설계 프로세스 전체를 지연시키는 원인이 될 수 있다. 따라서 해석결과로부터 CAD 모델을 생성하는 과정을 부분적이라도 자동화할 수 있다면 제품설계에 있어서 시간 단축을 체계적으로 확보할 수 있다.

현재 구조물 경량화 설계에 활용하고 있는 상용 소프트웨어인 HyperWorks/OptiStruct에서는 위상최적설계 결과를 CAD모델로 변환시키는 기능을 제공하고 있다. 그러나 생성된 CAD모델은 삼각형 폴리곤 세트로서 이를 이용하여 추후 수정 및 추가 모델링 작업

¹⁾ 2009년 한국CAD/CAM학회 우수논문상 수상 논문(김성훈, 민승재, 이상현, "위상최적설계 결과를 이용한 CAD 인터페이스" 한국CAD/CAM학회 논문집, 제14권 제4호, pp.281-289)에서 발췌하였음.

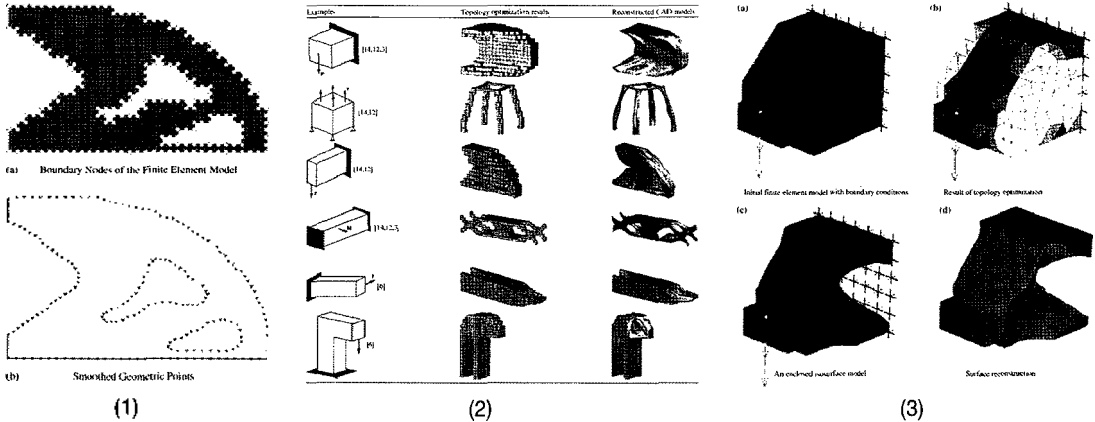


그림 1. 기존에 제안된 CAD 인터페이스 방법들

을 하기에는 부적절하므로 설계업무에 적합한 CAD 모델을 생성할 필요가 있다. 3차원 위상최적설계 결과를 바탕으로 CAD 모델을 생성하는 연구로는 단면에서의 경계 평활화를 통하여 B-spline 곡선을 생성하고 이를 기준으로 스키닝하여 3차원 서피스를 생성하는 방법²(그림1(1)), 절점 노드 밀도를 활용하여 단면 곡선을 생성한 후 스위핑을 이용하여 3차원 모델을 구축하는 방법³(그림1(2)), 요소 삼각화를 통한 등밀도 서피스(isosurface) 추출 알고리즘을 응용하여 단면 등밀도 서피스를 생성한 후 쌍이차 스플라인 서피스를 재구축하는 방법⁴(그림1(3)) 등이 있다. 기존 연구들에서는 위상최적설계시 지정한 재료사용량을 고려하지 않고 곡

선 또는 곡면을 생성하므로 설계자의 의도를 반영하지 못하는 문제점이 있다. 또한 정확한 형상의 CAD 모델 생성 자체를 정의하기가 어려우므로 위상최적설계 결과를 해석하는 설계자가 의도하는 서피스 또는 솔리드 모델을 생성할 수 있도록 CAD 시스템에 곡선 모델로 제공하는 가이드라인 역할을 수행하는 것이 현실적이라고 판단한다.

밀도 분포 데이터로부터 곡선 생성

위상최적설계 결과인 밀도 분포 데이터를 곡선 모델로 변환하기 위한 첫 번째 단계는 절점 밀도를 생성하는 것이다. 위상최적설계 결과는 부피를 갖는 요소의 밀도값으로 출력되므로 요소의 밀도를 이용할 경우 정확한 형상을 추출하는데 어려움이 있다. 특히 요소의 크기가 설계영역에 비하여 상대적으로 크다면 정확한 임계값을 결정하기 어려울 뿐 아니라 임계값을 계산하여 이진 이미지로 변환한다고 해도 경계선이 매끄럽게 나오지 않고 연속된 구조물이 아닌 끊어진 형상이 된다. 요소의 크기가 작은 경우에도 매끄럽지 않은 형상이나 끊어진 형상이 나타날 수 있고 바둑판 무늬형상도 빈번하게 발생하기 때문에 이러한 문제점을

² Tang, P.-S. and Chang, K.-H., "Integration of topology and shape optimization for design of structural components," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 22, pp.65-82, 2001.
³ Hus, M.-H. and Hsu, Y.-L., "Interpreting three-dimensional structural topology optimization results," *Computers & Structures*, Vol. 83, pp.327-337, 2005.
⁴ Koguchi, A. and Kikuchi, N., "A surface reconstruction algorithm for topology optimization," *Engineering with Computers*, Vol. 22, pp. 1-10, 2006.

$$\rho_{new}^{(i)} = \frac{\sum_{n=1}^k w^{(n)} \rho_{old}^{(n)}}{\sum_{n=1}^k w^{(n)}}$$

해결하기 위하여 절점 밀도 개념을 도입하여 이진화된 이미지를 생성하고 형상을 추출한다.

다음 단계로 가상 그리드를 생성하고 유한 요소 모델의 절점 밀도를 가상 그리드의 절점 밀도로 변환한다. 서로 다른 유한 요소들(TETRA, HEXA, PENTA)로 이루어진 유한 요소 모델로부터 동일한 알고리즘으로 곡선 CAD모형을 생성하기 위하여 가상 그리드를 도입한다. 유한 요소 모델의 밀도 데이터를 통한 절점 밀도의 정의, 가상 그리드 절점의 내/외부 구분, 가상 그리드 절점 밀도로 변환, 변환된 가상 그리드 절점 밀도의 이진화, 이진화된 절점 밀도를 통한 곡선 생성의 전체 과정이 가상 그리드의 도입을 통하여 모든 요소들에 동일하게 적용된다. 가상 그리드는 3차원 공간의 가상 격자로 전체 유한 요소 모델을 포함할 수 있는 최소 크기로 0~1 사이 값을 갖는 그리드 절점으로 구성된다.

가상 그리드 절점 밀도를 생성하는 방법으로 디지털 이미지 처리 기법인 가중치 평균 필터기법을 사용

한다. 가중치 평균 필터기법은 그림 2(1)과 같이 가상 그리드 절점을 기준으로 가중치를 부여하기 위한 최소반경(r_{min})을 생성하고, 최소반경 내부에 있는 유한 요소의 절점들에 가중값($w(n)$)을 부여한다. 가중값은 최소반경에서 유한 요소의 절점(n)과 가상 그리드 절점(i)사이의 거리($dist(i, n)$)를 뺀 값으로 다음과 같다. 따라서 유한 요소의 절점 밀도($\rho_{old}^{(n)}$)로부터 가상 그리드 절점 밀도($\rho_{new}^{(i)}$)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

가상 그리드의 크기, 단면 사이의 간격, 변환 밀도를 구하기 위한 최소반경 설정은 그림 2(2)와 같다. 가상 그리드의 크기는 유한 요소들 중 가장 작은 요소의 대각선길이(D_{min})를 기준으로 s_g 배 스케일링하고, 가상 그리드 사이의 간격은 D_{min} 을 기준으로 s_g 배 스케일링한다. 변환밀도를 구하기 위한 최소반경(r_{min})은 유한 요소들 중 가장 큰 요소의 대각선길이(D_{max})를 기준으로 p 배 스케일링한다.

위상최적설계에서 정의한 부피 제한조건을 이용하여 임계 밀도값(ρ_m)을 구하고 그 값을 기준으로 변환된 가상 그리드 절점의 밀도값(ρ)을 이진화한다. 각 요소를 이루고 있는 절점의 밀도값이 임계 밀도값보다 크면 1로, 작으면 0으로 이진화하면 모든 요소들은 그림 3과 같이 10가지로 분류되는데 각 요소에 해당되

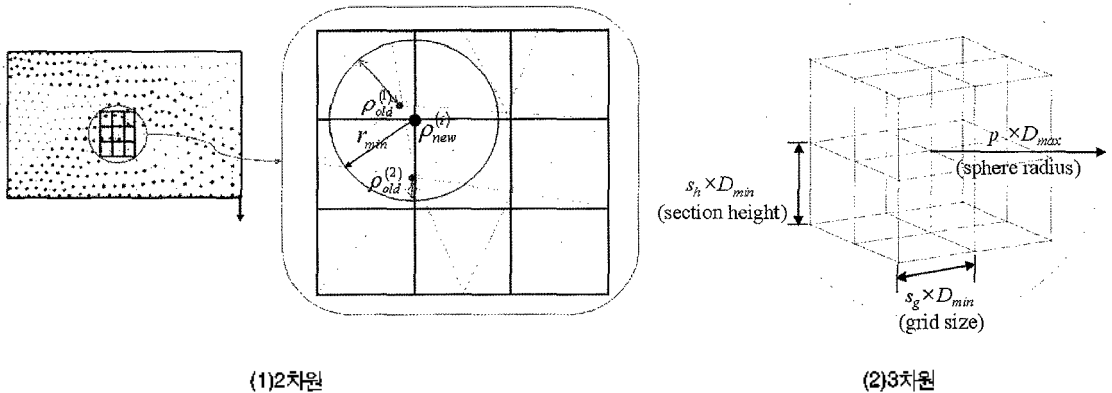


그림 2. 가상 그리드

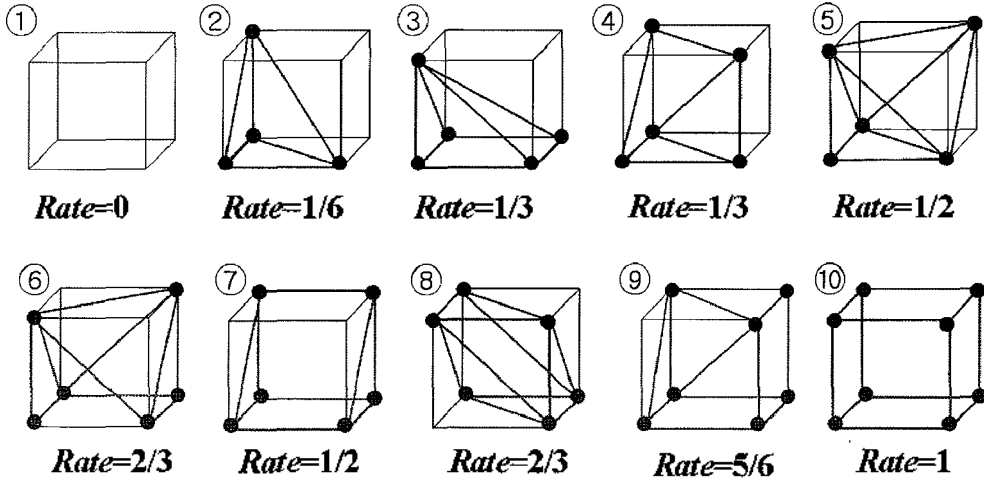


그림 3. 요소 부피비 분류

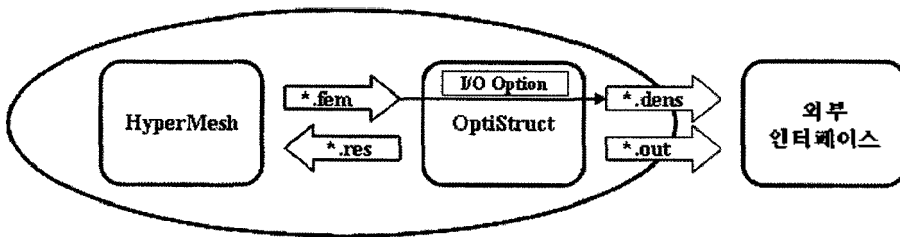


그림 4. HyperWorks 인터페이스 구조

는 요소 부피비(Rate)를 계산하여 해당 임계 밀도값에 해당하는 임계 부피값을 구한다. 이를 부피 제한조건과 비교하여 만약 부피 제한조건이 임계 부피값보다 크면 임계 밀도값을 감소시키고 임계 부피값보다 작으면 임계 밀도값을 증가시키는 방법으로 임계 부피값과 부피 제한조건이 같아지는 임계 밀도값을 찾게 된다.

그리드 절점 밀도의 이진화 과정을 통하여 형상 표현에 필요한 그리드 절점을 추출한 후 각 단면을 기준으로 외형선을 이루는 절점들을 연결하여 폐곡선을

생성함으로써 곡선 CAD모형을 생성할 수 있다. 절점 데이터를 연결하여 곡선을 생성할 경우 평활화를 위하여 지그재그 방지 알고리즘을 적용한다.

인터페이스 구현사례

구조물의 경량화 설계를 위한 위상 최적화 프로그램인 HyperWorks/OptiStruct를 수행하는데 있어서 최적화에 필요한 유한 요소 모델의 생성과 결과의 출력은 전후 처리 프로그램인 HyperWorks/HyperMesh를 사용한다. 최적화를 수행하기 위한 이 두 프로그램간

```

$
FORMAT OPTI          I/O options section
$
$HMNAME LOADSTEP          1"ss"
$
SUBCASE              1
  SPC =              2
  LOAD =             3
$
BEGIN BULK
$
$ GRID Data
$
GRID      5340      0.0      3.0      0.0
GRID      5341      0.0      2.5      0.0
...
$
$ CHEXA Elements: First Order
$
$ CHEXA      7680      3      9951      9952      9959      9958      10182      10183
+
  10190      10189
...
$
$ FORCE Data
$
FORCE      3      7653      01.0      0.0      0.0      -10000.0
$
$ SPC Data
$
SPC        2      10190      1234560.0
SPC        2      10189      1234560.0
...

```

그림 5. 입력파일 (*.fem) 구조

ITERATION 31					iter	31	3840
the 2nd satisfied convergence ratio = 2.3361E-04						3841	1.00000E-02
Objective Function (Minimize COMPL) = 3.418045E+03	% change =	-0.02				3842	1.00000E-02
Maximum Constraint Violation % = 0.00000E+00						3843	1.00000E-02
Design Volume Fraction = 5.00000E-01	Mass =	0.00000E+00				3844	1.00000E-02
						3845	1.00000E-02
						3846	1.00000E-02
Subcase Weight Compliance	Weight*Comp.					3847	1.00000E-02
1 1.000E+00 3.418045E+03	3.418045E+03					3848	1.00000E-02
	-----					3849	1.00000E-02
Sum of Weight*Compliance	3.418045E+03					3850	1.00000E-02
						3851	1.00000E-02
						...	

(1)결과파일 (*.res)

(2)요소밀도파일 (*.dens)

그림 6. 출력파일 구조

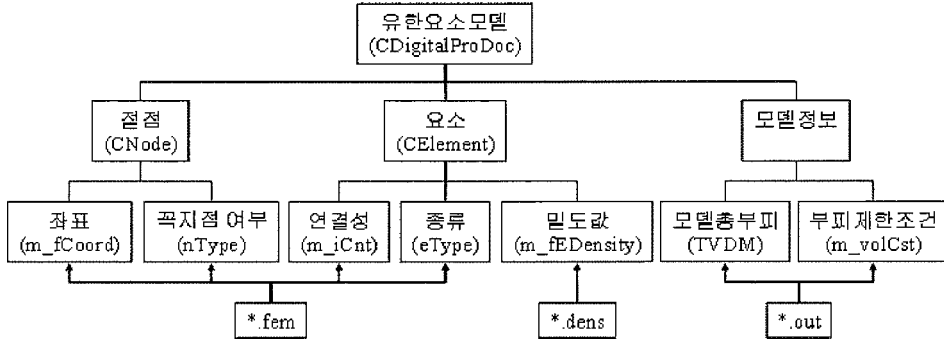


그림 7. 유한요소모델의 데이터 구조

의 인터페이스 구조는 그림 4와 같다. OptiStruct 입력 파일(*.fem)의 형식은 그림 5와 같이 세 부분으로 구성된다. 결과 파일의 형식은 I/O Options section의 설정을 통하여 제어된다. Subcase Information section은 최적화를 수행하기 위해 적용되는 경계조건과 최적화의 목적함수 정보를 포함한다. Bulk Data section은 절점 좌표 및 요소의 종류와 연결성, 재료 상수, 경계 조건 등의 유한 요소 모델에 대한 모든 정보와 최적화를 수행하기 위한 정보를 포함한다. 위상 최적화 수행의 결과로 HyperMesh 결과 파일(*.res), 해석 정보 파일(*.out)과 입력파일의 I/O Options 설정에 의한 결과 파일(*.dens)이 생성되고 그 형식은 그림 6과 같다.

유한 요소 모델은 절점(node), 요소(element), 모델 정보의 3가지 자료구조로 구성된다. 절점 정보는 절점의 좌표 값과 꼭지점 여부에 대한 정보를 포함한다. 요소 정보는 요소의 연결성, 종류와 밀도값을 포함한다. 모델 정보는 모델의 총 부피와 부피 제한조건으로 이루어진다. 그림 7은 유한 요소 모델을 구성하는 자료구조와 각 정보를 얻기 위한 결과 파일 간의 관계를 나타낸다.

변환 밀도에 의하여 이진화된 점 데이터를 이용하

여 상용 CAD프로그램인 Pro/ENGINEER의 입력파일(*.ibf)을 생성한다. 입력 파일은 곡선을 이루는 점 데이터로 이루어져 있으며, Pro/ENGINEER에서 이 파일을 읽어 들여 각 점들을 연결하는 2차원 스플라인 곡선을 생성한다. 모든 곡선은 폐곡선을 이루어야 하기 때문에 시작점과 끝점은 같아야 한다. 각각의 ibf파일은 같은 평면상의 곡선들로 이루어져 있으며, 단면이 총 N 개로 이루어질 경우 N 개의 ibf 파일이 생성된다. 단면 곡선 파일들을 자동으로 입력 받기 위하여 텍스트 파일 형식의 스크립트 파일을 이용한다.

제안한 방법론과 개발한 프로그램을 사용하여 자동차 현가장치로 사용되는 더블위시본 타입 서스펜션(double wishbone type suspension)의 로어 컨트롤암(Lower Control Arm)의 경량화 설계에 적용하여 그 타당성을 검토하였다. 설계영역을 10,826개의 HEXA요소로 모델링 한 유한 요소 모델에서 설계영역의 45% 재료량을 사용하도록 한 위상최적설계 결과 밀도 분포 데이터는 그림 8과 같다. 검은색 부분이 경량화를 위하여 재료를 제거해야 할 설계영역을 나타낸다. 입력 파라미터인 그리드 크기($s_g = 1$), 단면 사이 간격($s_h = 1/2$), 최소반경 ($p = 1.5$)을 설정한 결과 그림 9와 같은 곡선

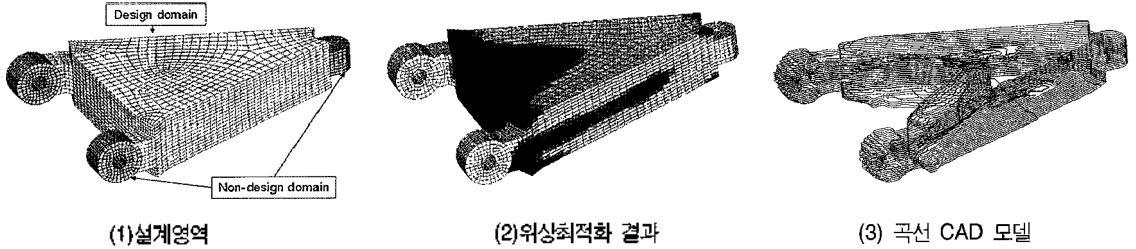


그림 8. 로어 컨트롤 암 경량화 설계

CAD모델을 생성하였고, 이 곡선들은 설계자가 의도한 구조물의 중량을 만족시키는 곡면 및 솔리드 모델을 생성하는 기초 데이터로 활용하여 제품 설계 시간 단축에 유용하리라 예상된다.

결론

CAE가 후행 설계검증으로부터 선행 개념설계 및 설계안 도출로 그 역할이 확대됨에 따라서 기존 CAD

와의 유기적인 인터페이스의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 구체적 사례로 구조물의 개념설계 및 경량화 설계에 유용한 위상최적화 결과를 설계자가 보다 효과적으로 활용할 수 있는 CAD-CAE 인터페이스가 절실히 요구되는 실정이다. 따라서 CAE의 재료분포 결과를 곡선 CAD모델로 생성하여 설계자가 거부감 없이 3D모델링 작업의 효율성을 높이고 설계시간을 단축할 수 있으리라 기대한다.

1. SimplyCam

SimplyCam은 2D CAD/CAM 시스템이다. 이것은 DXF format에서 드로잉을 열고, 만들고, 편집하고, 저장할 수 있다. 또한 래스터 이미지(Bmp와 Jpeg)를 벡터로 변환한다.

SimplyCam은 벡터를 생성하고 CAD 드로잉을 만들어내거나 수정하는 것을 가능하게 한다.

SimplyCam은 또한 트루타입 폰트도 벡터로 변환시킬 수 있다.

SimplyCam은 256 layer까지 사용할 수 있다. 색, 펜의 두께, layer간의 이동 등의 특성들이 각각의 layer에 적용 될 수 있다.

SimplyCam은 CNC G code를 제공한다. SimplyCam은 NC 프로그램을 받아들이고, 시뮬레이션하고, 그것들을 기하학적 구조로 변환시킬 수 있다.

기존의 밀링에 대해서는 G0, G1, G2, G3 명령만을 읽을 수 있다.

SimplyCam에는 Anilam, Fanuc, Fadal, Haas, Heidehain, Siemens, Mach2/3, TurboCnc와 같은 다양한 후처리 프로그램들이 포함되어있다.

파일크기 : 2.9MB

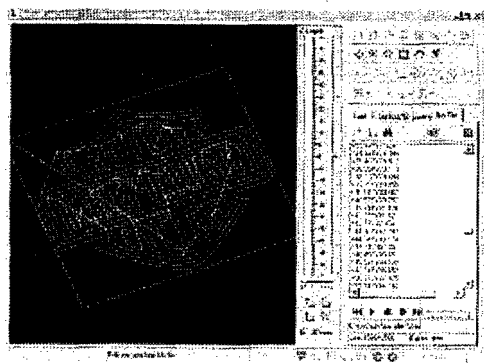
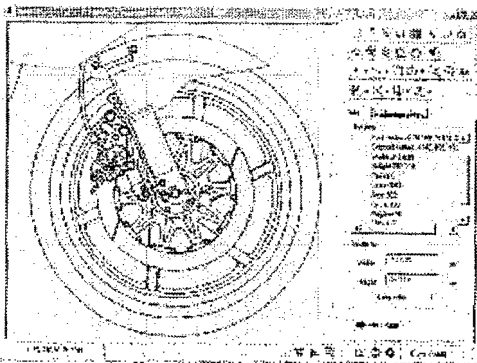
국산여부 : 외산

사용언어 : 영어

공개여부 : Shareware

권장사항 : Microsoft Windows 98, ME, 2000, XP or Vista, Pentium 3/4 or AMD CPU - 300 MHz or more

홈페이지 : <http://www.mr-soft.net>



2. ProFold

ProFold는 PC CAD 시장에서 새로운 플랫 패턴 프로그램으로 명성을 얻고 있다. ProFold는 전개 과정을 단순화한다. Windows 2000과 Windows XP에서 AutoCAD, Mechanical Desktop, KeyCreator, CADKEY와 통합하여 오류를 줄이면서 계산 시간을 절약할 수 있다. 파트를 직접 디자인하거나 고객들로부터 CAD파일을 받을 때에 ProFold는 그 파일들을 계산하고 가져오는 데에 드는 시간을 단축시킨다. 이와 동시에 ProFold는 플랫 패턴의 정확성을 증가시켜준다.

- ProFold Solids

ProFold Solids는 카드 시스템 내에서 솔리드 모델로부터 올바른 flat blank layout을 자동적으로 만들어 낸다. 사용자는 적은 노력으로도 솔리드 모델을 열 수 있다. 또한 ProFold Solids는 이 작업을 완벽한 hybrid solution으로 만들기 위한 ProFold Wireframe을 포함한다.

- ProFold Wireframe

ProFold Wireframe은 3D Wireframe model을 전개하는 최초의 프로그램으로, 파트를 전개하거나 접거나 두께를 부여한다. 2D의 플랫 패턴을 3D의 Wireframe model로 만들어주거나 3D 모델을 2D의 플랫 패턴으로 바꾸어 준다.

파일크기 : 7.3MB

국산여부 : 외산

사용언어 : 영어

공개여부 : Shareware

권장사항 : Windows 98/NT/ME/2000/XP

홈페이지 : <http://www.appliedproduction.com>

