

## 통합된 CAD/CAE 자동화 System을 이용한 구조강도해석 및 설계최적화에 관한 연구

윤종민\*, 원준호\*, 최주호\*\*, 김종수\*\*\*

### A Study on the Structural Analysis & Design Optimization Using Automation System Integrated with CAD/CAE

Yoon, J.-M.\*, Won, J.-H.\*, Choi, J.-H.\*\* and Kim, J.-S.\*\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, a CAD/CAE integrated optimal design system is developed, in which design and analysis process is automated using CAD/CAE softwares for a complex model in which the modeling by parametric feature is not easy to apply. Unigraphics is used for CAD modeling, in which the process is automated by using UG/Knowledge Fusion for modeling itself and UG/Open API function for the other functions respectively. Structural analyses are also carried out automatically by ANSYS using the imported parasolid model. The developed system is applied for the PLS(Plasma Lighting System) consisting of more than 20 components, which is a next generation illumination system that is used to illuminate stadium or outdoor advertizing panel. The analyses include responses by static, wind and impact loads. As a result of analyses, tilt assembly, which is a link between upper and lower body, is found to be the most critical component bearing higher stresses. Experiment is conducted using MTS to validate the analysis result. Optimization is carried out using the software Visual DOC for the tilt assembly to minimize material volume while maintaining allowable stress level. As a result of optimization, the maximum stress is reduced by 57% from the existing design, though the material volume has increased by 21%.

**Key words** : CAD/CAE integrated optimal design, CAD based optimization, Gradient based method, Response surface method

#### 1. 서 론

기계시스템의 설계를 위해서는 설계 대상의 기하학적 모델링, 정적·동적 해석을 포함하는 하중 해석과 같은 공학 해석의 기법, 치수 및 형상 설계 등의 최적화 기법이 요구된다. 그러나 현재 이들은 각기 개별적이고 단순 반복적으로 수행되고 있어 인력 및 물질 자원이 비효율적으로 활용되고 있는 실정이다. 따라서 급변하는 시장 요구와 수요에 신속히 대처하고 기업의 생산성 향상과 제품 개발 기간 단축을 위해서는 설

계단계에서부터 CAE기술을 적용하여 정량적인 설계 과정과 동시에 이 결과를 개발자가 쉽게 공유하게 하는 효율적인 동시공학설계 과정이 필요하다. 이러한 동시공학설계 설계를 위해서는 기하학적 모델링을 하는 CAD와 성능해석을 수행하는 CAE를 효과적으로 연계, 통합하는 것이 필수적인 문제로 대두되고 있다. 최근에는 CATIA, EDS/Unigraphics, I-DEAS 등의 상용 CAD 소프트웨어에서 CAE 해석 및 최적화 기능을 추가로 제공하여 CAD 소프트웨어 내에서 해석과 설계까지도 수행하도록 하고 있지만, 아직은 전문 CAE 프로그램에서 제공해 주는 수준의 다양한 해석 및 결과처리를 하지 못하는 한계가 있어 CAD와 CAE를 연계하는 시스템 구축의 필요성이 요구되고 있다. 지금까지 국내·외적으로 CAD와 CAE 그리고 설계 최적화를 통합하려는 몇몇 사례가 보고되었으나, Hardee 등<sup>[1]</sup>은 Pro/Engineer 기반의 최적화 방법을 제

\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부, 대학원

\*\*교신저자, 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부, 교수

\*\*\*LG전자 DAC 연구소 C4그룹

- 논문투고일: 2005. 04. 22

- 심사완료일: 2005. 11. 21

안하였는데, Pro/Engineer 내부에 최적화 모듈을 완전히 통합시키고, turbine blade의 dove tail부 형상 최적화에 응용하였다. Guan 등<sup>[2]</sup>은 AutoCAD/MDT와 자체 유한요소해석 프로그램을 이용하여 간단한 문제에 대한 형상 최적화를 구현하였다. Wu 등<sup>[3]</sup>은 iSIGHT, Maxwell, I-DEAS 등의 소프트웨어를 통합한 시스템을 구축하였다. 또한, 상용 최적설계 소프트웨어와 CAD를 고급 프로그래밍 언어인 C++를 기반으로 하는 API(Application Programming Interface) 함수를 이용하여 통합한 연구가 수행되었다. Kosaka 등<sup>[4]</sup>은 GENESIS와 I-DEAS와 최적설계코드를 통합하는 인터페이스를 개발하였다. 국내 연구사례로는 FDM, Taguchi Method, RSM(Response Surface Method) 등의 최적화 기법을 적용하여 이를 Pro/Engineer 및 Solid Works에 하나의 모듈로 통합시킨 사례<sup>[5]</sup>와 I-DEAS, ABAQUS와 Fe-safe를 통합시킨 사례<sup>[6]</sup>가 있다. 지금까지 열거한 연구들은 대부분 CAD 환경 내에서 자체개발 또는 상용 해석코드에 연계하여 최적설계를 수행한 것으로 CAD의 간편한 기능, 특히 파라메트릭 모델링 기능을 최대한 효율적으로 사용하였다. 그러나 이들의 대부분은 응용 예로 비교적 단순한 형상의 설계문제를 다루었으며, 이를 통해 CAD 기반 최적화의 가능성을 보여주는 수준에 머물렀다. 그러나 Hardee의 turbine blade의 dove tail부 형상 최적화가 가장 실용성 있는 적용 사례였다. 그 원인은 CAD 소프트웨어가 이직은 단순한 형상만을 파라메트릭 모델링을 통해 생성하기 때문인 것으로 판단된다. 현재까지는 이러한 문제점을 해결하기 위해 고도의 프로그래밍 지식을 가지고 CAD 모델링 자동화에 필요한 별도의 코드를 작성해야 하는 어려움이 있다. 이러한 프로그래밍 환경은 대부분의 CAD 소프트웨어에서 제공되며, 해당 소프트웨어의 고유언어나 API 함수로 구성된다.

따라서 본 연구에서는 CAD의 파라메트릭 모델링 기능만으로는 구현이 불가능한 복잡한 형상을 대상으로 최적 설계 자동화 시스템을 개발하였다. 이를 위해서는 CAD/CAE의 연계를 통한 설계 및 해석 자동화가 선행되어야 한다. 따라서 시스템은 자동화 시스템과 최적 설계 시스템의 두 단계로 나누어 개발하였다. 자동화 시스템에서 사용된 CAD/CAE 소프트웨어는 각각 FDS/Unigraphics version NX2.0<sup>[7,8]</sup> 및 ANSYS version 8.0<sup>[9]</sup>이며, 최적화를 위해서는 최적화 전용 소프트웨어 Visual DOC version 3.1<sup>[10]</sup>, 그리고 전체 시스템 통합에는 Microsoft Visual C++<sup>[11]</sup>를 활용하였다. CAD 모델링 자동화는 Unigraphics에서 제

공하는 C++언어 기반의 UG/OPEN API 함수와 UG/Knowledge Fusion을 사용하여 구현하였고, 생성된 모델을 파라솔리드(Parasolid) 데이터 포맷을 통해 해석 코드로 전달하였다.

본 논문에서 사용한 방법은 모델 생성 자동화를 위해 별도의 API 함수를 활용하여 전용코드를 생성하는 불편이 있지만, 기존의 연구에서 다루지 못한 복잡한 형상의 최적화 문제를 실질적으로 해결할 수 있는 방법이다. 또한 UG/Knowledge Fusion을 활용하면 시스템 개발 시 UG interface에서 작업하기 때문에 수행한 작업을 바로 확인할 수 있는 이점이 있다. 본 연구의 대상은 PLS(Plasma Lighting System)라 부르는 차세대 야외 조명 시스템으로써 대형 경기장 조명장치나 옥외 광고판에 고정 설치되어 사용된다. 이에 따라 PLS는 각종 하중 및 진동조건에 놓이게 되는데, 이를 설계단계에서 고려할 필요가 있어 본 시스템을 개발하게 되었다. 본 연구에서는 PLS에 대해 자동 모델링과 정적·동적 해석 등을 수행하고, 나아가서 이러한 해석의 반복을 통하여 최적 설계를 구하는 시스템을 개발하였다.

## 2. CAD 기반 최적설계

### 2.1 시스템 개념도

본 시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 구조강도해석 자동화 시스템과 최적설계 자동화 시스템의 두 가지 모듈로 구성되었다. 구조강도해석 자동화 시스템은 안전율 및 피로를 고려한 설계 기준으로써 정적 해석(정하중, 풍하중 해석) 및 동적 해석(낙하충격)을 수행하며, 사용자 편의에 맞게 선택적으로 해석을 수행할 수 있고, 기존 설계의 검증 및 개선의 용도로 사용된다. 파라메트릭 CAD 모델 생성, 유한요소해석을 통한 구조 강도 해석, 해석 결과를 손쉽게 확인할 수 있는 후처리(post-processing) 과정이 통합되어 사용자가 쉽게 사용할 수 있다. 구조강도해석 자동화 시스템의 구성은 Fig. 1(a)와 같다. 최적설계 자동화 시스템은 구조강도해석 자동화 시스템을 이용하여 최적해를 구하기 위한 해석을 반복한다. 최적설계 자동화 시스템의 구성은 Fig. 1(b)와 같다. 우선 Visual DOC에서 최적 설계 문제를 정의하고 최적화 알고리즘을 선택한다. 그리고 Unigraphics에서 제공하는 API함수를 이용하여 설계변수를 파라메트릭 model에 적용한다. 최적설계 수행 과정은 Visual DOC에서 정의된 최적 설계 문제를 구하기 위해 지정된 설계변수를 구조강도 해석 자동화 시스템에 보낸다. 여기서는 변화된 설

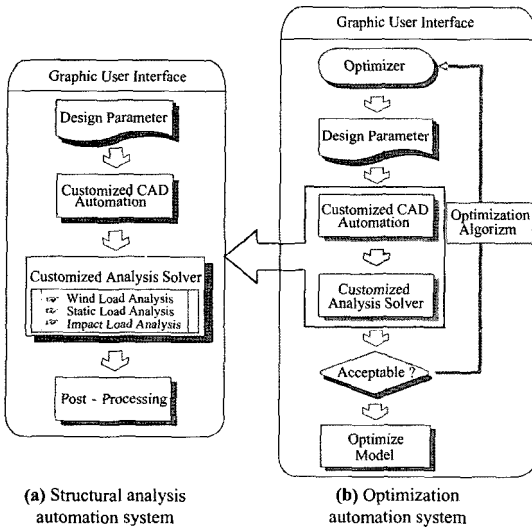


Fig. 1. System flow chart.

계변수를 대상으로 모델이 자동 생성, 해석과정을 거쳐 지정된 결과를 추출한다. 이 결과를 바탕으로 Visual DOC는 목적함수와 제한조건 등을 계산하여 최적설계를 수행한다.

2.2 파라메트릭 CAD 모델링 자동화

대부분의 CAD 프로그램은 GUI(Graphic User Interface)환경에서 형상 모델링을 수행하는 것과 함께 일련의 프로그래밍을 통해 같은 기능을 수행할 수 있도록 함수를 제공하고 있다. Unigraphics 역시 모델링을 수행할 수 있는 모듈로서 C++ 기반의 UG/OPEN API함수와 UG/Knowledge Fusion(UG/KF)을 제공하고 있다. 이러한 모듈을 이용하여 생성된 파라메트릭 CAD 시스템의 모델은 변수와 수식으로 표현되는 규칙, 특징형상을 나타내는 하위 객체, 그리고 특정 기능을 반복적으로 수행하는 함수 부분으로 이루어져 있다. 때문에 입력 사항에 따라 제품 모델 내의 각 변수와 객체는 긴밀한 연관관계를 가지고 변화한다. 편집설계 시 한계가 있는 형상의 경우, geometry를 생성, 편집하는 기능이 제공되어 input 값에 의해 geometry의 topology를 변화시킬 수 있다. UG/OPEN 함수는 시스템 개발 시 업데이트된 모델을 확인할 경우 개번 실행파일을 생성하여 실행하여야 하는 단점이 있고, UG/KF는 업데이트된 모델을 실시간으로 확인할 수 있어 개발시간을 단축할 수 있지만 외부에서 실행파일을 만들어 줄 수 없다. 때문에 두 모듈의 장점을 각각 이용하여 UG/KF는 모델링과정에서 사용하고, UG/OPEN 함수는 외부에서 UG/KF를 실행시키

는 함수를 생성하는 과정에 사용하였다. 실행파일을 생성하는 방식에는 Unigraphics 내부의 UG/OPEN 모듈을 이용하여 작성된 DLL(Dynamic Loadable Library) 형식의 실행파일을 실행 시키는 내부수행 방식(internal mode)과 EXE 형식의 별도의 실행파일을 작성함으로써 Unigraphics를 실행하지 않고 batch mode에서 모델을 생성하는 외부수행 방식(external mode)이 있다. 내부수행 방식은 Unigraphics 내에서 모델의 생성 과정을 직접 확인할 수 있고, 모델링 속도가 빠른 장점이 있어 구조강도 해석용 자동화 시스템에 적용되었다. 그리고 외부수행 방식은 전용코드를 통해 최적화가 실행될 경우 모델링 과정이 최적화 코드에 포함되어야 하며, 매 iteration 마다 변화된 설계변수를 대상으로 모델이 자동으로 생성되어야 하므로 최적설계 자동화 시스템에 적용되었다. 이러한 모델 생성을 위한 외부실행 파일은 Visual C++을 활용하였다.

3. 공학 구조물에 대한 적용

3.1 연구 목표

연구의 대상은 PLS(Plasma Lighting System)로 옥외 간판 조명, 경기장 조명 등에 쓰이는 차세대 야외 조명 시스템이다(Fig. 2 참조). 이 구조물은 외관은 단순해 보이나 내부적으로 18종의 cavity assembly, 7종의 light guide assembly 등 총 25종의 부품 및 이들의 조립체로 구성되어 구조가 복잡하기 때문에 새로운 형태의 구조물을 설계 및 제작하는 과정에서는 많은 노력, 시간, 비용 등이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자동 CAD 모델링에 의한 구조강도 해석 및 설계최적화 시스템을 구축하고, 이를 설계, 개발단계에서 활용하였다. 이러한 시스템은 모든 과정을 통합화, 편리화 하기 위한 사용자 편의의 GUI로 개발하

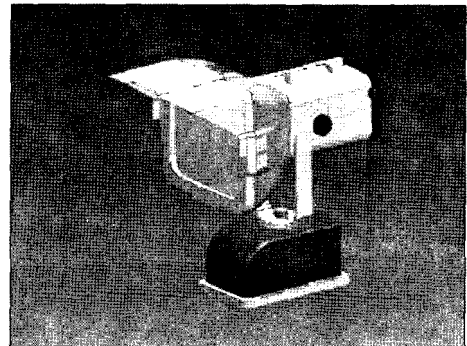


Fig. 2. PLS(Plasma Lighting System).

어, 구조적 측면에서의 안전율을 고려한 설계 기준과 강도해석 및 최적화 기법을 활용한 설계 개선안을 제시하여 분체를 해결하였다.

**3.2 CAD 모델링 기반 해석 모델의 생성**

파라메트릭 모델은 모든 작업이 CAD기반에서 이루어지기 때문에 변수의 변화에 따라 올바른 모델이 생성될 수 있도록 치수 간의 관계를 설정해 주어야 한다. 또한 Unigraphics에서 만들어진 모델을 가지고, ANSYS에서 적절한 메쉬를 생성할 수 있도록 작업을 해주어야 하고, 용도와 형상에 따른 재료물성치를 지정해야 한다. 이러한 작업을 위해서는 ANSYS에서 재료별로 component라는 그룹을 지정하여 활용한다. 하지만 이러한 component 작업은 기본적으로 각 요소의 번호에 의존하는 경우가 많다. 그런데 형상이 복잡하거나, 형상이 변하면서 모델이 생성되는 경우에는 각 요소의 번호가 시시각각 변하기 때문에 이를 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 시스템 자동화를 위해 Unigraphics에서 component를 ANSYS에 각각 export하여 형상이 임의로 변하더라도 이에 대응할 수 있게 하였다. 이러한 PLS의 component를 Fig. 3에 일부 예시하였다. 여기서 Hood, Reflector\_area, Cover\_Front는 플라스틱, Cover\_Middle, Reflector\_volume은 알루미늄 합금, 그리고 Glass는 유리재료로 구성되어 있다.

해석을 위해 사용된 element type은 SOLID95(20 node element)와 SHELL93(8 node element)이며, 이는 각 element의 응력을 2차 보간을 사용하여 구하기

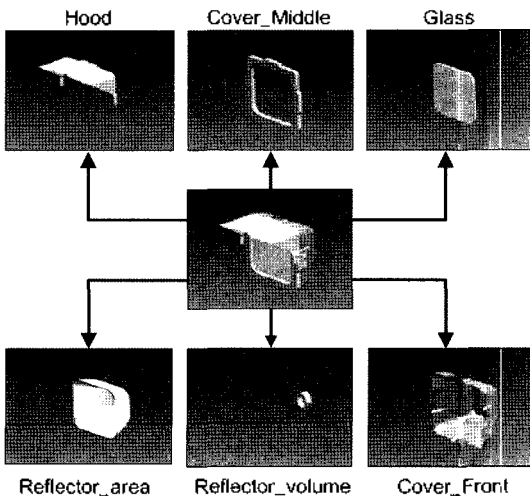


Fig. 3. Components of PLS.

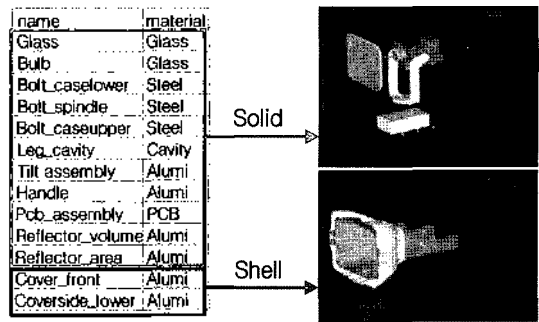


Fig. 4. Solid and shell element.

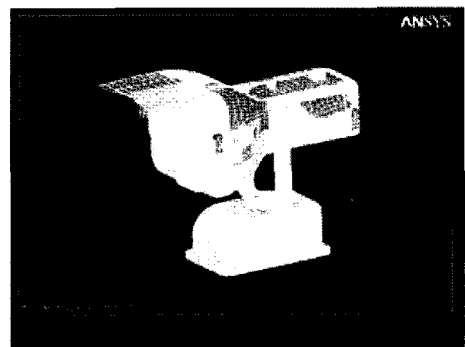


Fig. 5. Finite element model.

때문에 더욱 정확한 결과를 구할 수 있다. 형상의 특성에 따라 두께가 얇은 것은 셸 요소(SHELL93)로, 그렇지 않은 것은 솔리드 요소(SOLID95)로 지정하여 메쉬를 생성하도록 구성하였다. Fig. 4는 솔리드 요소와 셸 요소로 모델링된 component들의 예를 보인 것이다. 모델에 대해 메쉬를 생성하기 위해 솔리드 요소의 경우 요소크기를 30 mm로 하고, 스마트 사이징 기능을 6으로 하여, 자동으로 사면체 요소를 생성하였다. 한편 셸 요소의 경우 요소크기는 10 mm로, 스마트 사이징은 4로 하여 메쉬를 생성하였다. 그 결과 56500개 가량의 질점 및 26300개 가량의 요소가 생성되었으며, 이는 Fig. 5에 나타내었다. 해석을 위한 고정조건은 전체모델을 고정하는 바닥면과 연결된 6개의 bolt로 하였다.

**3.3 구조 강도 해석**

각종 하중 및 진동조건하에 있는 야와 구조물의 경우 구조강도 해석을 위해서는 일반적으로 여러 종류의 해석을 수행해야 하는데, 대체로 정하중 해석(static load analysis), 풍하중 해석(wind load analysis), 낙하충격 해석(impact load analysis), 모우드 해석(modal analysis), 하모닉 하중 해석(harmonic load

analysis) 및 피로 해석(fatigue analysis) 등이 필요하다. 이들 해석은 단순히 각각 수행되기만 하면 되는 것이 아니고, 상호 연관을 가지면서 설계기준에 활용되어야 한다. 이 중에서 정적해석은 정하중 하에서 제품이 항복하는지 여부를 체크하는 것이다. 이를 위해 두 종류의 정하중(임의의 집중하중 및 풍하중) 조건하에서 해석을 실시하고 최대응력을 계산하여 항복응력 대비 안전율을 구한다. 한편 풍하중의 경우, 하중이 불규칙하게 반복되는 특성을 가지므로 이러한 효과를 고려하기 위해 해석결과를 가지고 피로해석을 실시한다. 그 결과 한계수명 또는 회망수명 대비 안전율을 알아낸다. 낙하충돌해석은 낙하조건하에서 제품이 파손되는 지를 체크하는 것인데, 파손기준에 따라 해석 내용이 달라질 수 있다. 즉 낙하 충돌 시 최대 변형률 속도가  $1 \text{ sec}^{-1}$  이하이면 통상적으로 정적 상태에서 구한 인장강도와 비교해도 무방하지만 그 이상일 경우에는 별도의 동적 물성치를 적용해야 한다. 참고로 가진회사에서 수행한 TV 낙하충격 시험의 경우에 변형률 속도가  $1 \text{ sec}^{-1}$  이하로 나타났으므로 본 경우에도 이와 유사한 조건이 될 것으로 추정한다면 정적 안전율 조건을 적용해도 무방할 것으로 생각된다. 이 경우에도 충돌 시 최대 응력을 계산하고 이로부터 파괴 여부 또는 파괴대미 안전율을 계산한다. 모드 해석은 전체 시스템의 고유진동수 및 해당 모우드를 알아내는 것인데, 내부 또는 외부로부터 반복 가진력이 존재하는 경우 공진여부를 판정하기 위해 필요하다. 해석결과 해당 주파수와 모우드가 외부에서 가하는 가진 모우드와 일치하고, 주파수 크기도 유사한 것이 밝혀지게 되면 공진 가능성을 우려해야 한다. 이러한 경우 외부 가진력을 하모닉 하중으로 가정하여 하모닉 하중해석을 실시하면 이로 인한 최대응력의 크기를 정밀하게 산출할 수 있으며, 이것을 피로해석에 연결하면 이러한 진동으로 인한 피로 한계수명 또는 피로 안전율을 알아 낼 수 있다. 이러한 이들 간의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 한편, PLS의 경우 분석 결과 공진 가능성이 거의 없을 것으로 판단되어 모드 해석과 하모닉 하중 해석은 포함하지 않았다.

또한 구조강도 자동화 시스템에서는 정하중, 풍하중, 낙하충돌 해석을 모두 수행할 수 있도록 개발하였으나 최적화에서는 정하중만을 고려하였기 때문에 본 연구에서는 정하중 해석만을 상세히 소개한다. 정하중 해석은 정하중(집중하중)의 방향에 따른 여러 케이스(13가지)의 해석을 시도하여 그 중 가장 큰 응력을 유발하는 방향을 결정하도록 하였다. 여기서 정하중의 크기는 성인 남자 1인이 의학적으로 한 팔로 가할

수 있는 최대 하중 50 kg으로 정하였다. Fig. 7은 일정한 정하중에 대한 PLS의 가장 취약한 방향을 찾기 위해 가해준 13가지 하중 방향을 나타내고 있고, 해석 결과는 Table 1에 나타내었다. 이 결과에서 case11, 13을 제외한 모든 경우 tilt assembly 부위에 가장 큰 응력이 발생하며 35 MPa에서 402 MPa까지의 값을 보이고 있다. 알루미늄의 항복응력이 170 MPa, 파단 응력이 300 MPa임을 감안하면 case5, 13을 제외하고

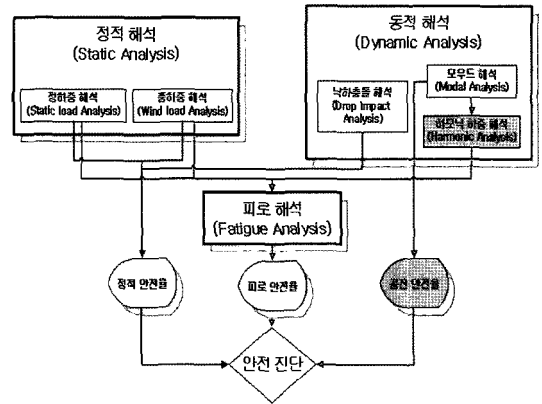


Fig. 6. Structural analysis flowchart for PLS.

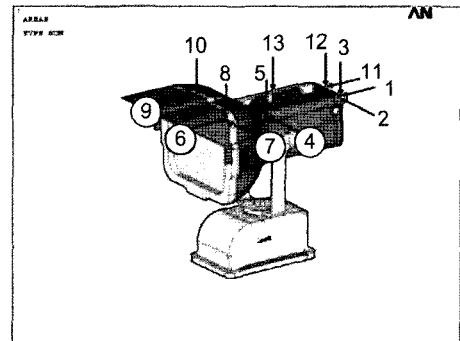


Fig. 7. Load directions.

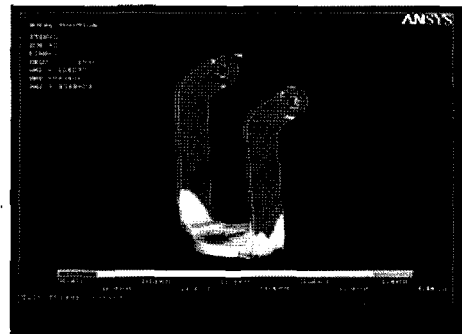


Fig. 8. Stress contour of tilt assembly.

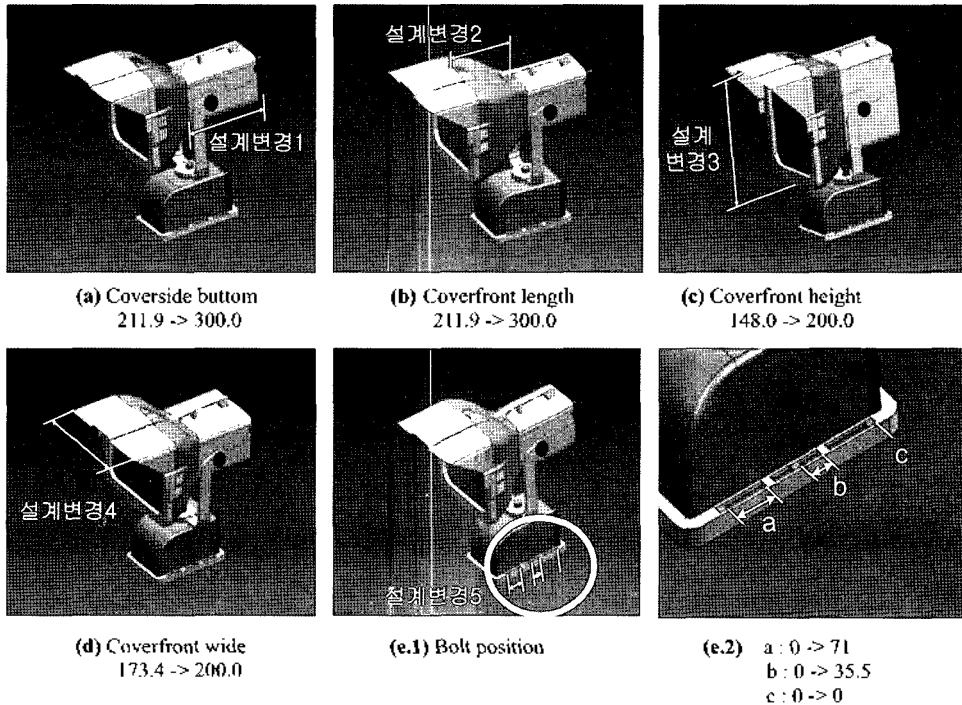
**Table 1.** Analysis results of several cases

Max. Stress [MPa]														
Name	Material	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	case10	case11	case12	case13
Glass	Glass	0.76	1.08	0.80	3.87	0.42	0.43	3.89	2.95	0.61	1.84	0.08	0.05	0.46
Bulb	Glass	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bolt_caselower	Steel	13.86	10.24	7.87	7.77	3.02	16.64	10.00	9.34	15.29	7.08	13.27	6.86	1.98
Bolt_spindle	Steel	400.70	545.87	427.97	333.44	224.49	800.59	1022.30	693.69	340.33	571.41	184.44	383.11	21.94
Bolt_caseupper	Steel	167.40	182.48	128.91	183.09	64.53	202.52	221.22	130.86	211.97	122.05	169.42	131.04	25.61
Leg_cavity	Cavity	10.70	55.27	13.53	86.32	7.21	11.46	88.16	29.76	3.55	7.03	2.14	5.42	5.59
Tilt_assembly	Alumi	184.70	338.66	148.76	293.05	73.83	261.42	402.55	216.50	233.96	180.97	186.92	151.19	35.09
Handle	Alumi	0.91	2.90	1.95	2.98	1.67	1.77	2.76	2.51	2.44	1.91	5.07	1.39	93.43
Pcb_assembly	PCB	0.88	0.65	0.51	0.29	0.23	1.11	0.27	0.55	0.92	0.37	0.79	0.44	0.11
Reflector_volume	Alumi	1.18	1.80	1.34	5.72	0.57	0.71	7.32	2.81	0.16	0.20	0.06	0.03	0.21
Reflector_area	Alumi	3.76	4.76	3.41	11.59	3.08	5.24	15.48	8.02	3.83	4.39	2.27	2.19	4.59
Cover_front	Alumi	10.17	27.28	7.43	91.50	89.77	23.57	52.86	15.14	16.07	13.88	12.55	7.78	81.53
Coverside_lower	Alumi	69.55	261.47	62.78	247.03	32.94	146.05	313.73	81.24	50.65	82.88	29.28	56.38	18.77

는 항복이 발생할 가능성이 크며, 특히 case2, 4, 7의 경우는 tilt assembly의 파괴까지도 예상된다. 여기서 tilt assembly는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 상부 몸체와 하부 지지체를 연결한 다리(leg) 구조물이다. 이러한 사실은 실제 모델의 운반 중 우연히 가해진 하중에 의해 tilt assembly가 파손된 사례에서도 드러났다. Table 1의 결과를 토대로 할 때 본 연구에서는 PLS에

가장 큰 영향을 주는 하중의 작용 방향을 case7로 선택하였고, 정하중 해석 수행 시 case7의 방향으로 하중이 작용하도록 설정해 두었다.

여러 가지 설계 변경에 따른 정하중의 영향을 고려하기 위해 Fig. 9와 같은 5가지 설계에 대하여 case7에 해당하는 방향으로 500 N의 힘을 적용하여 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Table 2에 나타내었다. 모든



**Fig. 9.** Design case study.

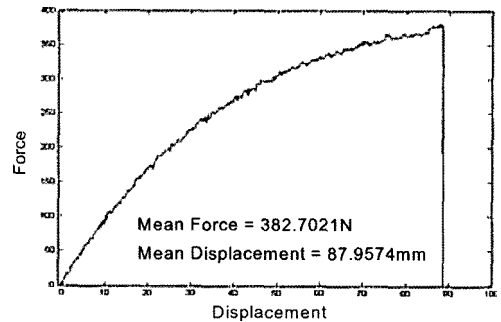
**Table 2.** Results of analysis by design change

최대 응력 [MPa]	Glass	Bulb	Bolt case/cupper	Bolt spindle	Bolt case/upper	Leg cavity	Tilt assembly	Handle	Pcb assembly	Reflector volume	Reflector area	Cover front	Coverside lower
default	3.89	0.07	10.00	1022.30	221.22	88.16	402.55	2.76	0.27	7.32	15.48	52.86	313.73
설계변경1	3.83	0.09	10.70	1022.90	215.36	109.37	407.10	3.49	0.53	12.58	13.60	51.72	342.29
설계변경2	3.90	0.22	11.87	1255.70	217.21	132.27	435.17	3.99	0.67	14.98	17.13	54.07	357.94
설계변경3	2.35	0.05	11.65	1059.80	243.55	44.79	438.31	3.36	0.52	4.96	7.44	111.70	410.27
설계변경4	2.64	0.04	10.73	836.04	214.40	60.69	400.15	1.81	0.53	8.85	9.64	50.70	288.09
설계변경5	3.91	0.09	10.52	1022.00	215.40	87.82	407.21	2.96	1.11	13.01	13.91	52.28	318.23

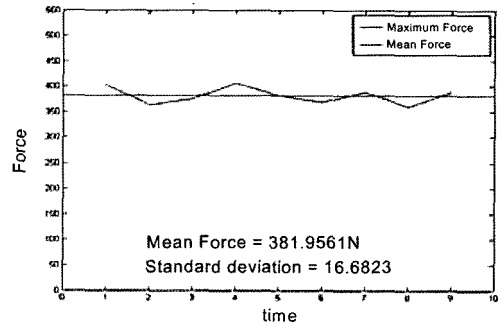
경우에서 역시 tilt assembly부에 최대 응력이 발생하였는데, 설계 2, 3의 경우는 응력이 오히려 10% 가량 증가되었고, 그 외의 경우는 별 변화가 없었다. 따라서 tilt assembly의 응력을 낮추기 위해서는 이 부위의 설계를 직접 변경해야 하며, 이에 대한 상세한 해석이 요구된다.

**3.4 Tilt assembly 파단 실험 및 해석 검증**

정하중 해석의 신뢰도를 높이기 위하여 tilt assembly의 파단 실험을 하였다. 파단실험에 사용된 시험기기는 MTS(Material Testing System)이다. MTS는 만능시험기(4485 모델)에 GRIP, CHAMBER를 부착하여 각종 재료의 환경 물성 평가, 고온에서의 인장 및 압축 실험을 통한 모듈러스 측정이 가능한 2축 재료시험 기기이다. Fig. 10과 같이 MTS에 장착한 후 변위를 증가시키는 방법으로 정하중을 부여하였다. 그리고 파단 시 나타난 하중을 측정하였다. 이러한 방법으로 파단 실험을 15회 반복 실시한 결과 Fig. 11에서 나타난 바와 같이 측정된 파손 하중의 평균은 380 N이었으며, 16.68 N의 표준편차를 나타내었다.

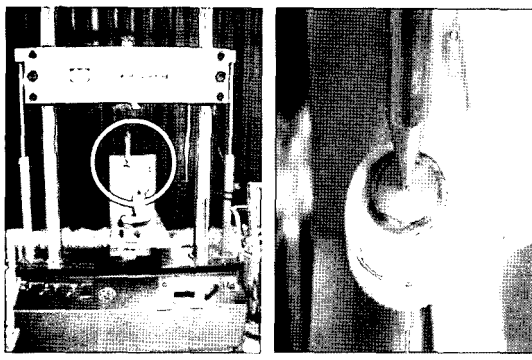


(a) Load in terms of displacement



(b) Critical loads distribution

**Fig. 11.** Result of rupture experiments



**Fig. 10.** Tilt assembly mounted in MTS.

Fig. 12에서 보는 바와 같이 tilt assembly 해석은 모델의 대칭성으로 인해 1/2모델링을 하였으며, 이에 따른 대칭 경계조건을 지정해 주었다. Tilt assembly 기저에 위치한 볼트(bolt case/upper) 체결부에는 3방향 자유도를 구속하였다. 그리고 파단 실험의 평균치인 380 N을 tilt assembly상부와 PLS상부 몸체의 체결면에 수직인 방향으로 적용해주었다. 유한요소 해석 수행 결과 나타난 최대응력은 297 MPa로 알루미늄의 파단강도와 동일하게 나타났다. 또한 최대응력 발생 부위 역시 실험에서 나타난 파단 부위와 동일한 것으로 확인되었는데 Fig. 13은 실제 tilt assembly의 파단 형상을 나타내었고, Fig. 14는 ANSYS를 이용한

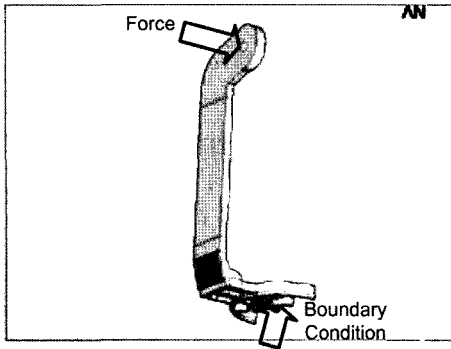


Fig. 12. Loading and boundary condition of tilt assembly.

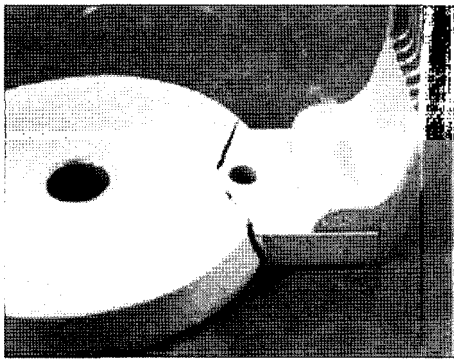


Fig. 13. Tilt assembly ruptured in the experiment.

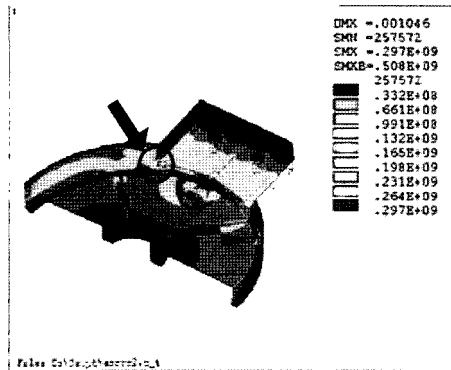


Fig. 14. Result of finite element analysis.

유한 요소 해석 결과를 나타낸 것으로 최대 응력 부위가 파단 부위와 동일함을 보이고 있다.

3.5 최적 설계 수행

앞에서 수행한 초기해석 결과에 의해 최적 설치는 전체가 아니라 tilt assembly를 대상으로 하였다. Tilt assembly에 대한 최적설계문제를 식 (1)과 같이 정의하였다.

목적함수 : 무게(=부피)의 최소화  
 설계변수 :  $x_1, x_2, x_3$ 의 두께  
 제한조건 : tilt assembly에 발생하는 최대응력  $\leq$  알루미늄의 항복응력(170 MPa)

최적화 알고리즘으로는 Gradient Based Method와 RSM(Response Surface Method)를 사용하여 최적화 결과를 비교하였다. 식 (1)에서 설계변수  $x_1, x_2, x_3$ 는 모두 두께를 나타내는 치수 변수로서 Fig. 15에서 보는 바와 같이 tilt assembly를 구성하고 있는 12개의 변수(치수) 중에서 파단부의 응력에 가장 큰 영향을 주는 것들이다. Tilt assembly의  $x_1, x_2, x_3$ 의 초기 설계 값은  $x_1 = 11 \text{ mm}, x_2 = 6 \text{ mm}, x_3 = 3 \text{ mm}$ , 이때의 부피는  $78018.78 \text{ mm}^3$ , 그리고 최대 응력은  $297 \text{ MPa}$ 이었다. 제한 조건인 최대응력을  $170 \text{ MPa}$ 로 감소시키는 설계 변경 중 tilt assembly의 무게 즉, 부피를 최소화 하기 위해 최적화를 수행한 결과 RSM은 해의 수렴 과정에 문제가 발생하였다. 반면에 Gradient Based Method를 사용한 최적화 결과는 아래와 같다. 우선 Fig. 16과 같이 tilt assembly의 부피는 21% 증가한  $94656.45 \text{ mm}^3$ 으로 변경 되었으며 Fig. 17에 나타난 바와 같이 tilt assembly에 발생하는 최대응력은 57%로 감소한  $169.83 \text{ MPa}$ 로 나타났다. 또한 Fig. 18

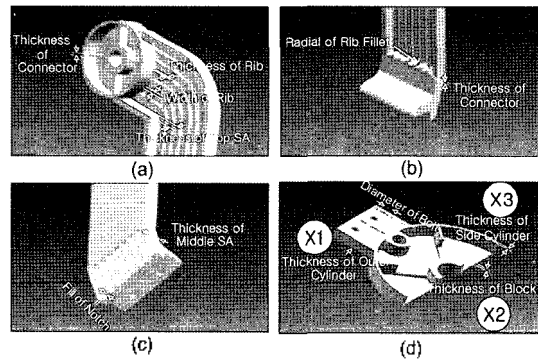


Fig. 15. Design variables at subsections of tilt assembly. Design variables  $x_1, x_2, x_3$  are shown in (d).

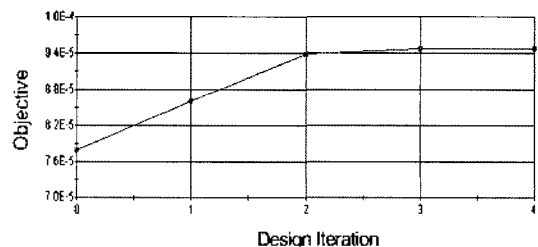


Fig. 16. Objective function history.



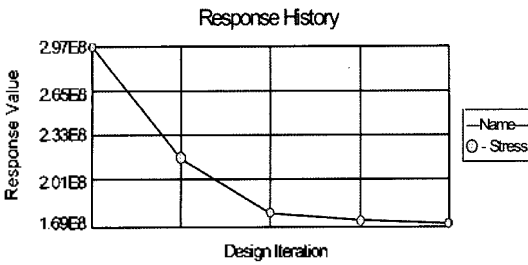


Fig. 17. Maximum stress history.

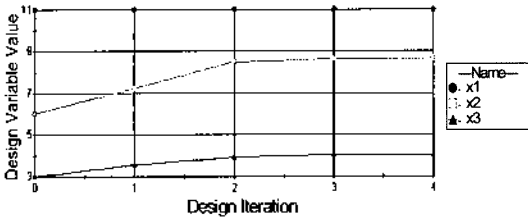


Fig. 18. Design variable history.

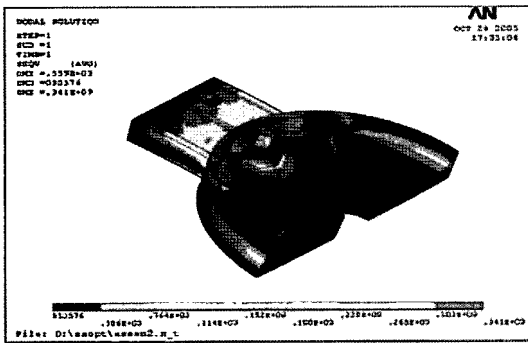


Fig. 19. Model after optimize.

과 같이 설계변수  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ 는 11 mm, 8.66 mm, 4.03 mm로 변경되었고 변화된 형상은 Fig. 19에 나타내었다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 CAD/CAE/설계최적화 소프트웨어인 Unigraphics, ANSYS 그리고 Visual DOC를 연계하여 구조강도 해석용 자동화 시스템과 최적설계 자동화 시스템을 개발하였다. 설계 및 개발단계에서 이러한 통합 시스템을 활용하면 구조물 설계 및 제작 과정에서 많은 노력과 시간, 비용 등을 절감할 수 있고, 또한 지속적인 성능 개선에 유용하다. 그리고 구조해석과 최적설계를 수행 및 후처리 시 사용자가 겪

게 되는 어려움을 사용자 편의의 GUI를 통하여 감소시켜 줄 수 있다. 또한 구조적 측면에서의 안전율을 고려한 설계 기준과 강도해석 및 최적화 기법을 활용한 설계 개선안을 제시하여 문제를 해결할 수 있다. 그리고 활용예로서 PLS에 본 시스템을 적용하였다.

본 연구에서의 이러한 시스템을 이용하게 되면 설계 작업의 생산성과 작업 결과물의 질을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 빠른 속도로 변해 가는 설계환경에서 보다 나은 설계를 더욱 쉽고 빠르게 수행하는 데에 효과적인 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 LG전자(주)의 지원 하에 이루어졌으며 이에 감사하는 바입니다.

### 참고문헌

- Hardee, E., Chang, K. H., Tu, J., Choi, K. K. and Grindcanu, I., "A CAD-based Design Parameterization for Shape Optimization of Elastic Solids", *Advances in Engineering Software*, pp. 185-199, 1999.
- Guan, Z. and Sui, X., "A CAD-based Parameterization Method of Finite Element Modeling for Structural Shape Optimization", *WCSMO-4*, pp. 418-419, 2001.
- Wu, Y. X., Bohn, J. H. and Boroyevich, D., "Software Integration for IPDM Design, Modeling, and Analysis", *CPES Seminar Proceedings*, 2002.
- Kosaka, I., Charpentier, C. and Weston, B. C., "An Interface between SDRC I-DEAS and the Genesis Structural Analysis and Optimization Code", *AIAA Symposium*, 2002.
- 신정호, 광병만, 광기성, 황영근, "CAD 기반 최적 설계 시스템인 DS/FDM의 개발과 공학 구조물에 대한 적용", *대한기계학회 춘계 학술대회 논문집*, pp. 720-724, 2000.
- 유용균, 광병만, "케드 기반 범용 최적설계 시스템 개발 및 피로수명을 위한 구조형상최적설계에의 응용", *대한기계학회 추계 학술대회 논문집*, 2003.
- UG/OPEN API Programmer's Guide, Unigraphics Solution Inc., 1999.
- UG/KF Programmer's Guide, Unigraphics Solution Inc., 2002.
- ANSYS Release 8.0, SASI IP, Inc., 2003.
- Visual DOC Theoretical Manual, Vanderplaats Research & Development Inc., 1999.
- MSDN Library Visual Studio 6.0, Microsoft, 1998.



**윤 종 민**

2004년 한국항공대학교 항공우주 및 기계 공학과 학사

2006년 한국항공대학교 항공우주 및 기계 공학과 석사

관심분야: CAD integrated optimization, Design sensitivity analysis



**최 주 호**

1981년 한양대학교 공과대학 기계공학과 학사

1983년 한국과학기술원 기계공학과 석사

1987년 한국과학기술원 기계공학과 박사  
1997년 현재 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 부교수

관심분야: Design sensitivity analysis, Analysis and optimization of material process, CAD integrated optimization, Design and optimization for six sigma



**원 준 호**

2004년 한국항공대학교 항공우주 및 기계 공학과 학사

2006년 한국항공대학교 항공우주 및 기계 공학과 석사

관심분야: Design sensitivity analysis, Analysis and optimization of material process



**김 종 수**

2002년 한국항공대학교 항공기계공학과 학사

2004년 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 석사

2004년-현재 1.G 전자 주임연구원  
관심분야: 3d Implant Optimum Design, Analysis and optimization of material process