

캐드 기반 범용 최적설계 시스템 개발 및 피로수명을 위한 구조형상최적설계에의 응용

유 용 균[†] · 곽 병 만^{*}

Development of a CAD-based General Purpose Optimal Design and Its Application to Structural Shape for Fatigue Life

Yonggyun Yu and Byung Man Kwak

Key Words : Optimization(최적설계), Fatigue life(피로 수명), CAD based(캐드 기반), I-DEAS, Open I-DEAS, API

Abstract

In this paper, an integrated optimal design software system for structural components has been developed which interfaces existing commercial codes for CAD, CAE and Optimization. They include specialized optimal design software codes such as iSIGHT and VisualDOC, optimization module imbedded in CAD software developed by CAD developers, and optimal design software systems based on API of commercial CAD software. The advantages of the CAD imbedded optimal design approach and those of specialized optimal design software are taken to develop the system. The user defines optimal design formulation in the user interface for problem definition in the CAD control stage, where design variables are directly selectable from the CAD model and various properties and performance functions defined. The commercial CAD codes, Open I-DEAS are used for the development. The resulting software is minimally connected to CAD and CAE systems while keeping maximum independence from each other. This assures flexibility and freedom for problem definition. Fatigue life optimization is taken as a nontrivial application area. As a specific example, the shape design of a knuckle part of an automobile is performed, where the minimum fatigue life over the material domain in terms of the number of cycles of a curb strike are maximized under the constraint of not exceeding the current mass. The fatigue life has been improved by four times of the initial life. The developed software is illustrated to maintain the advantages of existing optimal design software systems while improving independency and flexibility.

1. 서 론

1.1 연구 배경

1.1.1 최적설계관련 소프트웨어

기존의 유한요소법을 이용한 최적설계의 어려움을 극복하기 위한 방법의 한가지로 3 차원 캐드

소프트웨어의 파라메트릭한 기능을 이용하는 방법이 있다. 이 방법으로 최적설계를 수행하는 경우 모델의 형상을 결정짓는 몇 가지의 캐드 치수만으로 유한요소 모델을 자유롭게 재생성할 수 있어 설계변수에 따라서 유한요소 모델을 재생성하는데 드는 기존의 노력을 크게 줄일 수 있다. 현재 많은 대형 캐드 소프트웨어들은 손쉽게 최적설계를 수행할 수 있도록 최적설계 모듈을 포함하고 있으나 기능이 미비하여 다양한 방법으로 최적설계를 수행하기 어렵다.

또한, 다양한 최적설계 이론을 손쉽게 적용할 수 있는 VisualDOC, iSIGHT 등의 소프트웨어가 개

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : ykyou@khp.kaist.ac.kr
TEL : (042)869-8264 FAX : (042)869-8270

^{*} 회원, 한국과학기술원 기계공학과 교수

발되었다. 이러한 소프트웨어를 기존의 CAE 소프트웨어와 연계하여 최적설계를 수행할 때에는 대부분 배치 작업으로 최적설계에 이용되는 소프트웨어를 실행하고 텍스트 파일로 이루어진 입출력 파일을 이용한다. 이 경우 인터페이스를 구성하기 위하여 많은 노력이 필요하고 최적설계가 진행 중에 발생할 수 있는 많은 문제에 대처하기 힘들다.

1.1.2 캐드 API 를 이용한 시스템 통합

현재 I-DEAS, CATIA, Solid Works, Pro/E 등의 상용 캐드 소프트웨어들은 프로그래밍 언어 수준에서 각 기능을 제어하고 데이터를 추출하는 것을 가능하게 하는 프로그래밍 툴을 제공한다. 이러한 툴을 이용하여 복잡한 시스템을 통합한 연구가 진행되었다. K.M. Adb El-Ghany 등⁽¹⁾은 유한요소해석과 비파괴 테스트 프로그램간의 인터페이스를 구축하였다. YingXiang Wu 등⁽²⁾은 iSIGHT, Maxwell, I-DEAS 등의 소프트웨어를 통합한 시스템을 구축하였다. 또한, 상용 최적설계 소프트웨어와 CAD 를 API 를 이용하여 통합한 연구가 수행되었다. Iku Kosaka 등⁽³⁾은 GENESIS 와 I-DEAS 와 최적설계 코드를 통합하는 인터페이스를 개발하였다. Mayles L. Baker 등⁽⁴⁾은 Model Center 와 I-DEAS 와 여러 해석 프로그램들을 통합하여, 항공기의 최적설계 시스템을 구축하였다.

1.1.3 피로수명을 고려한 구조물의 최적설계

응력을 고려한 최적설계의 사례는 많이 발견된다. 하지만 많은 부분의 기계부품은 동적인 하중을 받는다. 최적설계에서는 응력을 고려하는 것보다 피로 수명을 고려하는 것이 더 중요하다고 알려져 있다⁽⁵⁾. 그러나, 실제로 이러한 피로수명을 고려한 구조물의 최적설계에 대한 사례는 많이 알려져 있지 않다^(6,7). 한석영 등⁽⁶⁾은 피로수명 시험 시편에 균열이 존재하는 경우에 대하여 최적설계를 수행하였다. L. Gani 등⁽⁷⁾은 빔과 솔더 결합(solder joint)에 균열이 존재하는 경우에 대하여 피로수명을 고려한 최적설계를 수행하였다. 하지만, 복잡한 기계부품에 대하여 CAE 를 이용하여 최적설계를 수행한 사례는 많지 않다. Yeh-Liang 등⁽⁸⁾은 캐드 소프트웨어를 이용하여 동적인 하중을 고려하여 알루미늄 휠(wheel)의 형상에 대하여 최적설계를 수행하였다. W. Steiner 등⁽⁹⁾은 자체 개발한 유한요소해석과 피로수명을 동시에 고려하는 FEMFAT 소프트웨어를 개발하여 파워 트레인부품에 대하여 피로수명을 개선시키는 최적설계를 수행하였다.

1.2 연구 목적 및 개요

기존의 여러 가지 최적설계 방법들을 분석하고 각 방법의 장점을 살리고 여러 다양한 문제에 접근할 수 있는 범용 최적설계 시스템을 구축한다.

우선, 최적화에 관련된 부분과 해석부분을 독립적 다양한 최적설계 이론을 적용한 최적설계 소프트웨어를 개발하고, 캐드 API 를 이용하여 최적설계에 필요한 데이터 입출 및 작업 제어를 가능하게 해주는 제어 프로그램을 개발하였다. 개발된 소프트웨어를 그 동안 널리 수행되지 않은 피로수명을 고려한 최적설계를 복잡한 구조물에 대하여 적용시켜봄으로써 본 연구에서 개발된 소프트웨어의 기능을 검증한다.

2. 캐드 기반 범용

최적설계 시스템의 개발

본 연구에서 개발된 최적설계 시스템은 응용범위를 넓히기 위하여 최적설계 이론을 구현한 부분과 해석 소프트웨어를 제어하기 위한 부분의 두 가지로 나누어진다. 최적설계의 과정에 필요한 해석부분과 최적화 부분 중 최적화 부분만을 분리하여 여러 가지 소프트웨어를 최적설계에 이용하고자 할 때 필요한 노력을 최소화할 수 있다. 기존에 최적설계에서 외부 해석 프로그램을 최적설계에 이용하기 위하여 이미 널리 이용되는 배치 작업과 파일을 통하여 데이터를 교환할 뿐만 아니라, 이후 설명할 캐드 제어 프로그램을 통하여 직접 데이터를 교환할 수 있도록 개발되었다.

2.1 최적설계 소프트웨어

효과적으로 다양한 최적화 이론을 적용하기 위한 VisualDOC, iSIGHT 등의 많은 상용 소프트웨어가 개발되어 출시되고 있다. 이러한 상용 소프트웨어를 모델로 개발된 본 소프트웨어는 Fig. 2 와 같이 사용자와 데이터베이스를 연결하는 사용자 인터페이스, 문제 정의와 결과 저장에 필요한 데이터베이스, 그리고 최적설계 이론을 탑재한 최적설계 모듈의 세 부분으로 이루어져 있다.

최적화 소프트웨어의 인터페이스는 Fig. 3 과 같다. 스프레드시트로 데이터를 손쉽게 정의하고 관찰할 수 있으며 과정을 파일로 저장하는 것이 가능하다. 또한 최적설계의 각 과정을 그래프로 관찰하는 것이 가능하다.

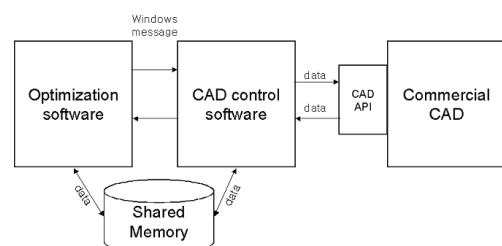


Fig. 1 Overview of optimization system

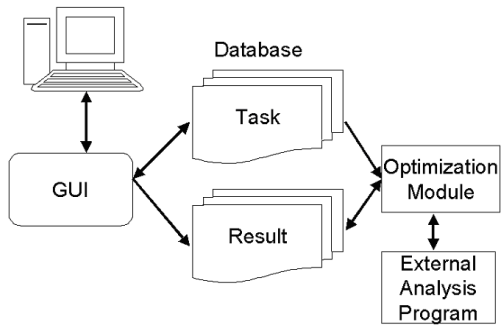


Fig. 2 Basic structure of the optimization software

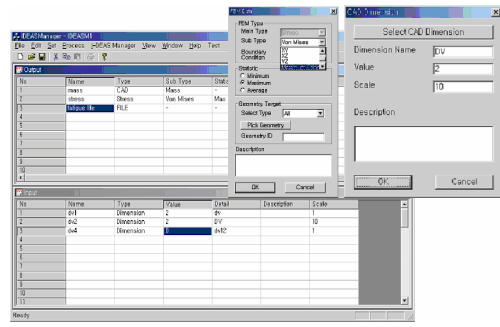


Fig. 4 User interface of the CAD control software

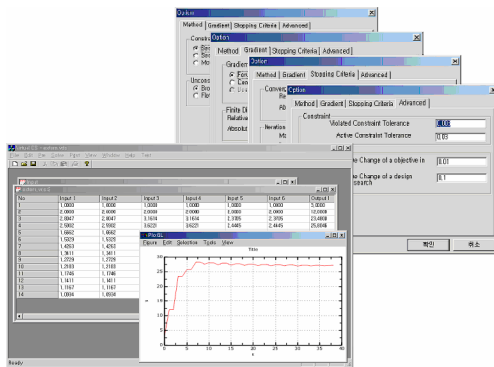


Fig. 3 User interface of the optimization software

2.2 캐드 제어 소프트웨어

본 연구에서는 보다 복잡한 설계과정과 다양한 데이터를 최적화에 이용하기 위하여, 실행되고 있는 CAD 소프트웨어와 데이터를 실시간으로 교환하고, 최적화에 필요한 과정을 유연하게 제어하기 위한 캐드 제어 소프트웨어를 개발하였다.

복잡한 설계과정을 최적설계에 이용하기 위해서는 설계과정의 자동화, 입력의 정의 및 모델의 변화, 해석 후 정의된 결과 관찰의 세가지 기능이 필요하다.

입력으로는 모델의 치수와 2 차원 유한요소의 두께 등을 설정하는 것이 가능하며, 출력으로는 응력 등의 정적 해석 결과와 모드 해석의 고유진동수를 관찰할 수 있다.

2.2.1 I-DEAS의 제어 방법

본 연구에서 사용된 I-DEAS 는 방대한 종류의 해석모듈을 하나의 소프트웨어에 효과적으로 집약해놓아 스크립트를 이용하여 손쉽게 복잡한 해석과정을 손쉽게 제어할 수 있고, 또한 여러 다른 상용 소프트웨어와의 입출력 인터페이스를 제공함으로써 다른 상용 해석 소프트웨어를 이용할 때 인터페이스를 위한 노력이 적다.

또한, I-DEAS 는 Open I-DEAS 와 Open Language 두 가지의 제어 틀을 제공한다. Open I-DEAS 는 I-DEAS 의 기능을 제어하기 위하여 C++과 Java 로

제공되는 CORBA 기반 틀이다. I-DEAS 의 형상 데이터와 각 해석데이터에 프로그램 레벨에서 접근이 가능하여 다양한 방법으로 I-DEAS 의 기능을 사용하고 자동화 및 확장하는 것이 가능하다. Open Language 는 I-DEAS 의 각 작업과정을 자동화를 가능하게 해주는 자체적으로 간단한 프로그래밍 기능을 가지고 있는 스크립트 언어이다.

2.3 최적설계 수행 과정

우선 최적화 소프트웨어에서 최적화 문제를 정의하고 어떠한 최적화 이론을 적용할 것인가를 결정한다. 그리고, 캐드 제어 소프트웨어에서는 최적화 소프트웨어의 각 설계변수와 성능척도를 캐드 소프트웨어의 어떤 데이터와 연결될 것인가를 정의한다.

최적설계의 과정은 Fig. 5 와 같다. 최적화가 시작되면 최적화 소프트웨어에서 지정된 설계변수 값에 따른 목적함수와 제한조건 값을 구하기 위하여 캐드 제어 소프트웨어에 약속된 윈도우 메시지를 보내고 캐드 제어 소프트웨어의 응답을 기다린다. 메시지가 도착하면 캐드 제어 소프트웨어는 공유된 메모리에서 설계변수 값을 읽어 정의된 캐드의 각 데이터들의 값을 변경한다. 변경된 캐드 데이터 값에 따라 캐드 모델을 다시 만들고 정의된 해석과정을 수행한 다음 지정된 결과를 추출한다. 캐드 소프트웨어에서 모든 작업이 완료되면, 최적화 소프트웨어에 해석과정이 완료되었다는 메

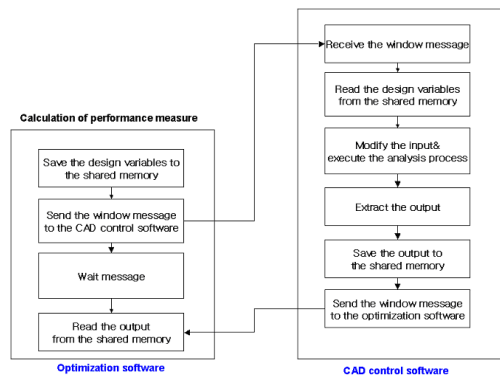


Fig.5 The process flow of optimization

시지를 보내게 되고, 메시지를 받은 최적화 소프트웨어는 공유메모리에서 결과 값을 읽어 목적함수와 제한조건 등의 필요한 값들을 계산하여 최적설계를 수행한다.

3. 피로 수명을 고려한 구조물의 형상 최적설계

3.1 피로수명을 고려한 최적설계

피로수명을 고려한 최적설계 시스템은 Fig. 6 과 같다. 캐드 시스템으로는 I-DEAS 8m3 을, 정적해석에는 ABAQUS 6.2 를, 피로해석에는 Fe-Safe 를 사용한다. Fig. 7 은 I-DEAS, Fe-safe, 최적설계 소프트웨어 그리고 캐드 제어 소프트웨어가 동시에 실행되면서 최적설계가 수행되는 장면을 나타낸 것이다.

수행과정은 Fig. 8 과 같다. 제시된 설계변수에 따라 수정된 캐드 모델에 따라 캐드 모델과 유한요소 모델을 재생성한 다음 ABAQUS 를 사용하여 유한요소 정적해석을 수행한다. 정적 해석 결과와 물성치 및 하중 데이터를 조합하여 피로수명을 계산한 후 캐드 제어 소프트웨어는 계산된 피로수명과 유한요소해석 데이터를 최적설계 소프트웨어에 전해주어 최적설계가 수행된다.

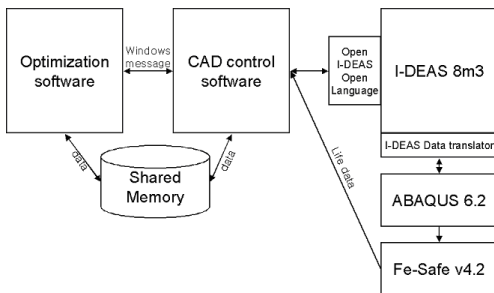


Fig.6 Optimization system with consideration of fatigue life

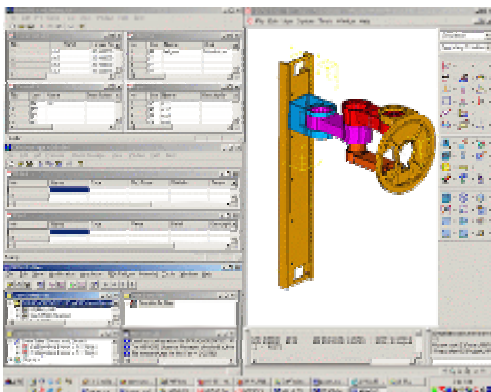


Fig. 7 Screen capture of fatigue optimization system

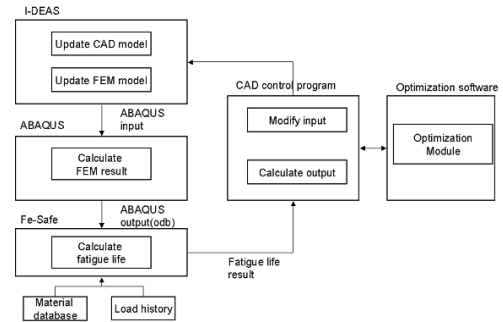


Fig.8 Optimization process with consideration of fatigue life

3.2 피로 수명을 고려한 너클의 형상 최적설계

차체의 경량화와 파손방지의 두 가지 모두를 고려하는 것이 중요한 자동차 부품 중 너클과 같이 반복하중을 받는 기계요소의 피로파손은 설계 과정에서 반드시 고려되어야 할 중요한 사항이다. 따라서, 너클 부품의 응력만을 고려하는 고전적인 방법은 불충분하며 설계에 피로수명을 고려하는 것이 중요하다.

3.2.1 유한요소 해석

차량개발과정에서 차체 및 샤시 부품들의 강도 해석을 하는데 사용하는 하중조건은 그 차량이 수행할 수 있는 최악의 운전조건을 가정하여 해석을 수행하게 된다. 본 예제에서는 여러 가지 최악 운전조건 중 측면연석충돌(Lateral Kerb Strike) 조건을 고려하였다. 해석에 사용되는 하중조건은 최천 등⁽¹⁰⁾에서 인용하였다.

유한요소 모델은 Fig. 9 와 같다. 2 차 6 면체 요소와 2 차 5 면체 요소로 이루어져 있으며, 9640 개의 절점과 1587 개의 요소로 이루어져 있다. 댐퍼, 타이로드, LCA 와 연결되는 부분은 강제 빔 요소를 사용하여 연결구조를 표현하였다. 너클의 중심 부위를 원통좌표계를 사용하여 축 방향과 반경 방향의 자유도를 구속하고, 브레이크효과를 고려하여 브레이크가 연결되는 부위의 방향 자유도를 구속한다. 또한 조향장치가 연결되는 부위는 비틀림 모멘트의 영향을 받지만, 본 해석에서는 핸들 조작과는 무관한 상태에서 가해지는 최악의 경우만을 고려한다.

최악조건을 고려한 유한요소해석 결과, 해석결과 최대응력은 556 MPa 이며 브레이크 구동축 구속부에서 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 댐퍼 연결부위를 보강하여 강도를 향상시킬 수 있음을 예측할 수 있다.

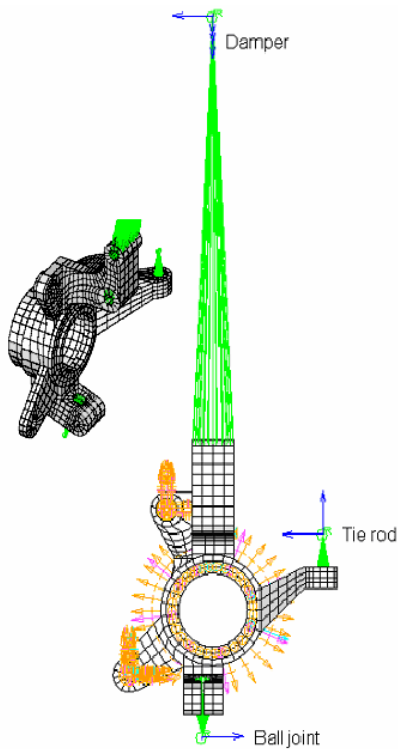


Fig.9 Finite element model and boundary condition of the knuckle

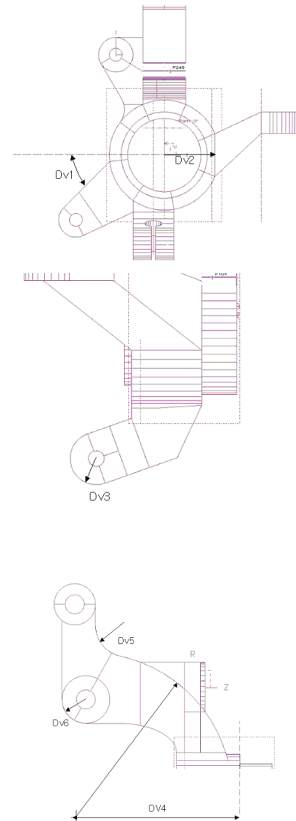


Fig. 11 Design variables of the knuckle

3.2.2 피로 수명의 계산

일반적으로 너클과 같은 차량부품의 피로해석에는 피로수명이 길고 소성변형 영역이 상대적으로 작기 때문에 피로해석방법으로 응력-수명(stress-life)법을 주로 사용하고 있으며, 크랙의 시작과 성장에 구분을 두지 않고 전체 파단수명을 기준으로 피로수명을 산출한다⁽¹¹⁾. 너클의 피로수명 계산에는 SAE-1045 를 사용하였다. 피로수명 해석이 수행된 후, 각 절점의 수명을 로그(log)값으로 나타낸 것은 Fig. 10 과 같다. 댐퍼 연결 부위가 가장 취약한 것으로 나타났으며, 피로 수명 해석결과 수명은 1.36×10^4 회로 나타났다.

3.2.3 너클의 최적설계

최적설계에 사용되는 설계변수로는 Fig. 11 과

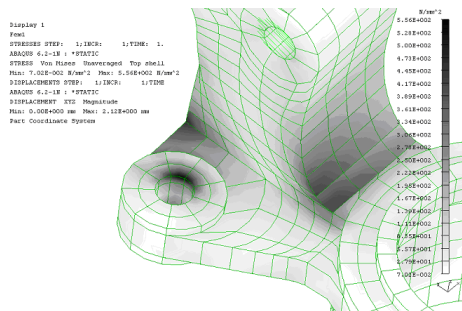


Fig.10 Stress contour of the knuckle in Lateral Kerb Strike condition

같이 6 개의 캐드 치수를 선정하였다. 부피를 현재 값으로 유지하면서 피로수명을 최대화 하는 최적 설계를 수행하였다.

Maximize:	$\log(N)$
subject to:	$V \leq V_0$
where:	
	N: fatigue life
	V: volume
	V_0 : initial volume (1)

총 5 번의 측차 후에 최적설계가 완료되었다. Fig. 12 과 같이 형상이 변화하였고, 부피는 $5.472 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 에서 $5.474 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 으로 현재값이 거의 유지되면서, 피로수명은 초기값인 1.37×10^4 회에서 5.64×10^4 회로 약 4 배 증가한 최적의 형상을 얻을 수 있었다. 댐퍼 연결부위가 보강되면서, 상대적으로 응력이 적은 부분은 줄어들어 것을 관찰할 수 있다.

4. 결론

기존의 최적설계를 수행하기 위한 방법들에 대한 조사를 수행하여 상용 최적설계 소프트웨어와, 캐드 소프트웨어에 포함된 최적설계 모듈 그리고 기존의 캐드 API 를 이용한 최적설계 소프트웨어에 대하여 조사하고 장단점을 파악하였다. 각 소

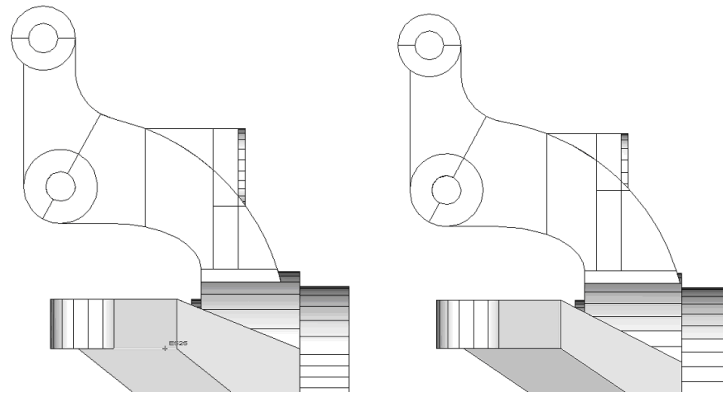


Fig. 12 Initial and optimum shape of the knuckle (2)

소프트웨어가 가진 장점을 살리기 위한 최적설계 시스템을 구상한 후 여러 가지 최신 소프트웨어 개발 기법을 적용하여 안정적이고 확장성이 우수한 최적설계 시스템을 개발하였다. 우선 상용최적설계 소프트웨어의 장점을 살리기 위한 최적화 소프트웨어를 개발하였고, 캐드 내부의 최적설계 모듈과 기존의 캐드 API 를 이용한 최적설계 소프트웨어의 장점을 살리기 위한 캐드 제어 소프트웨어를 개발하였다. 캐드 제어 소프트웨어와 최적화 소프트웨어를 독립적으로 개발하여, 최적화 소프트웨어의 응용성을 넓히고 캐드 제어 소프트웨어를 이용하여 보다 다양한 설계 데이터를 최적화에 이용할 수 있도록 하였다. 개발된 소프트웨어를 여러 가지 문제에 대하여 성능을 테스트하고 기존의 소프트웨어들과 비교하여 본 소프트웨어를 사용하면 최적설계를 실제 제품 설계에 보다 쉽게 적용할 수 있음을 보였다. 또한, 그 동안 연구된 경우가 적은 피로수명을 고려한 최적설계를 토크 압과 자동차 현가장치의 일부분인 너클에 대하여 수행함으로써, 본 소프트웨어의 기능을 검증하였다.

캐드의 API 를 이용하여 기존의 최적설계 방법에 비하여 다양한 데이터를 최적설계에 이용하고, 설계자가 손쉽게 최적설계를 수행하여 볼 수 있다. 본 최적설계 시스템은 최적설계 모듈과 해석과정의 입출력 등을 분리하고 사용자가 자유롭게 시스템을 정의할 수 있어, 본 연구에 사용된 피로수명을 고려한 최적설계뿐만 아니라 다른 복잡한 해석과 데이터를 요구하는 최적설계에도 적은 노력으로 적용이 가능하고 실제 제품의 설계 효율을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 한국과학기술원 동시공학센터에서 수행하고 있는 과학기술부의 국가지정연구실사업의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) K.M. Adb El-Ghany and M.M. Farag, 2000, "Expert System to Automate the Finite Element Analysis for Non-destructive Testing," NDT&E International, Vol. 30, pp. 409-415
- (2) Yingxiang Wu, Jan Heloge Bohn and Dushan Boroyevich, 2002, "Software Integration for IPDM Design, Modeling, and Analysis," CPES seminar proceedings
- (3) Iku Kosaka, Christophe Charpentier and Brian C. Waston, 2002, "An Interface between SDRC I-DEAS and the Genesis Structural Analysis and Optimization Code," AIAA symposium
- (4) Myles L. Baker, Katherine Y. Alston and Michael J. Munson, 2002, "Integrated Hypersonic Aeromechanics Tool (IHAT)," AIAA symposium
- (5) E. Schnack and W. Weikl, 2002, "Shape Optimization under Fatigue using Continuum Damage Mechanics," Computer-Aided Design, Vol. 34, pp. 929-938
- (6) Seog Young Han and See Yeob Song, 2002, "Shape Optimization of Structures in Opening Mode," KSAE, Vol. 10, No. 2, pp. 141-149
- (7) L. Gani and S. D. Rajan, 1999, "Use of Fracture Mechanics and Shape Optimization for Component Designs," AIAA JOURNAL, Vol. 37, No. 2, pp. 255-260
- (8) Yeh-Liang Hsu and Ming-Sho Hsu, 2001, "Weight reduction of aluminum disc wheels under fatigue constraints using a sequential neural network approximation method," Computers in Industry, Vol. 46, pp. 167-179
- (9) W. Steinger, G. Steinwender and B. Unger, 2001, "Fatigue Simulation of Power Train Components during the Design Process," International Journal of Automotive Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 9-16
- (10) Chun Choi and Kyung Il Bae, 1996, "The Stress Analyses of Chassis Components in the Early Stage of Vehicle Development," KSME, Vol. 36, No. 9
- (11) Sang Beom Lee, Tae Won Park and Hong Jae Yim, 2000, "A Study on Computational Method for Fatigue Life Prediction of Vehicle Structures," KSNVE, Vol. 10, No. 4, pp. 686-691