

## 자동설계프로그램과 유한요소법을 활용한 래칫 휠 설계에 관한 연구

김민주\* · 이승수\* · 전언찬†  
(2002년 1월 24일 접수, 2002년 6월 19일 심사완료)

### A Study on the Design of Ratchet Wheel Using Automatic Design Program and Finite Element Analysis

Min-Ju Kim, Seung-Soo Lee and Eon-Chan Jeon

**Key Words:** Optimum Design Condition(최적설계조건), FEM(Finite Element Method : 유한요소법), Automatic Design Program(자동설계프로그램)

#### Abstract

This study is to develop a automatic design program of mechanical elements as the integrated system which can create automatically 3-dimensional solid and surface model using visualLISP. By the applying developed system to CAE system, the following objects are realized. At first, constructing the library of automatic design program for unexperienced design engineer, the 3-dimensional modeling of mechanical elements can be obtained easily. at second, the 3-dimensional model for ratchet wheel design is created by finete element model of CAE system and the optimal design condition of key way.

#### 1. 서 론

현재 많은 생산 현장에 도입되어 사용되는 CAD(Computer aided design)/CAM(Computer aided manufacturing)시스템은 3차원 모델을 사용한다. 이러한 3차원 모델은 AutoCAD, MDT 및 CATIA, 그리고 Solid-Edge등에서 제공된다.

어떠한 프로그램에서 작업을 수행하더라도 정밀가공을 위한 3차원 모델을 생성하는데 많은 시간이 필요하고, 이를 수행하는 전문인력을 교육하는데 많은 경비가 소요된다. 이를 해결하기 위한 방법의 일환으로 자동설계프로그램이 이용되어진다.

자동설계프로그램은 설계에 필요한 몇 가지 요

소만을 입력받아 2차원 및 3차원 모델을 생성하는 프로그램을 통칭하는 것인데, 일반적으로 AutoCAD나 MDT 기반의 VisualLISP 프로그램이 주로 사용된다. 그리고 자동설계프로그램은 3차원 모델링 전문가가 아니더라도 기계공학 지식 을 가진 사용자의 편의성을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 자동설계프로그램에 관한 연구를 살펴보면, 김 등<sup>(1)</sup>이 VisualLISP을 이용한 마스터기어 자동설계프로그램을 개발하였고, 조 등<sup>(2)</sup>이 AutoLISP을 이용한 기어설계 프로그램을 개발하는 등 활발히 진행되고 있다. 그리고 김 등<sup>(3)</sup>이 하향식 설계방식을 지원하는 새로운 개념의 CAD 시스템에 대하여 연구를 수행하고, Tavakoli 등<sup>(4)</sup>이 스퍼기어의 최적 프로파일 형상을 모델링하고, 이를 활용하여 응력 해석을 수행한 연구등 활발히 이루어지고 있다. 또 최근에는 CAD와 CAM시스템간의 직접적인 연결에 의한 실패를 줄이기 위하여 그사이에 CAE(Computer analysis engineering)시스템을 두는

† 책임저자, 회원, 동아대학교 기계·산업시스템공학부  
E-mail : ecjeon@daunet.donga.ac.kr

TEL : (051) 200-7644 FAX : (051) 200-7656

\* 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과

경우가 일반화하고 있으며, 컴퓨터를 이용한 기계요소해석의 비중이 점점 증가하고 있다.

Savage와 Carroll등<sup>(5,6)</sup>은 최적의 스퍼기어를 설계하기 위하여 컴퓨터를 이용한 굽힘응력과 접촉응력 해석을 했으며, Tsay는 컴퓨터를 이용하여 기어의 기하학적 모델을 형상화하였고,<sup>(7)</sup> 그리고 국내에서도 이 등<sup>(8)</sup>이 유한요소해석을 이용한 Lug의 피로수명을 평가한 연구 및 이<sup>(9)</sup>의 단순유한요소모델을 이용한 차체필라 형상최적설계에 관한 연구, 박 등<sup>(10)</sup>의 유한요소법을 이용한 유정압테이블의 운동정밀도 해석 및 김 등,<sup>(11)</sup> 박 등<sup>(12)</sup>의 자동설계프로그램과 FEM(Finite element method)을 응용한 연구와 같이 다양하게 이루어지고 있다. CAD 및 CAE시스템 각각에 대한 연구는 전술한 바와 같이 많이 행하여지고 있지만 이들을 효율적으로 통합하는 연구는 거의 없는 실정이다. 특히 해석 결과를 피드백하여 재 설계하는 데 걸리는 시간을 최소화하고, 3차원 모델을 최적화하는 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 래칫 휠 자동설계프로그램을 AutoCAD 기반의 개발프로그램인 VisualLISP을 이용하여 개발하고, 이를 통해 생성된 3차원 서피스 또는 솔리드모델을 유한요소해석의 유한요소모델로 활용하고자 한다. 또한 해석결과와 피드백 및 자동설계프로그램을 이용한 신속한 재모델링을 통해 모델의 수정에 걸리는 시간을 최소화하고, 최적형상의 래칫 휠을 모델링하고자 한다.

## 2. 자동설계프로그램 개발

기계요소 자동설계프로그램을 개발하기 위하여 AutoCAD상의 개발프로그램인 VisualLISP을 사용하였다. 그리고 기계요소 자동설계프로그램을 개발하기 위한 과정을 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 자동설계할 대상물체를 선정하고, ISO, JIS 및 KS 등을 참조하여 대상물체의 규격을 결정한다. 다음으로 입력창을 구성하는 프로그램을 개발한다. 이 때 입력창의 상단에 대상물체를 슬라이드 파일로 만들어 생성될 요소의 형태를 사용자에게 미리 보여준다. 그리고 입력창을 주 프로그램에 링크시키고, 생성될 요소의 모델링 방법을 결정한 후 이를 프로그래밍한다. 자동설계프로그램에서 가장 중요한 부분이 이 모델링 방법의 결정으로 새로운 모델을 생성시킴에 있어서 항상 새로

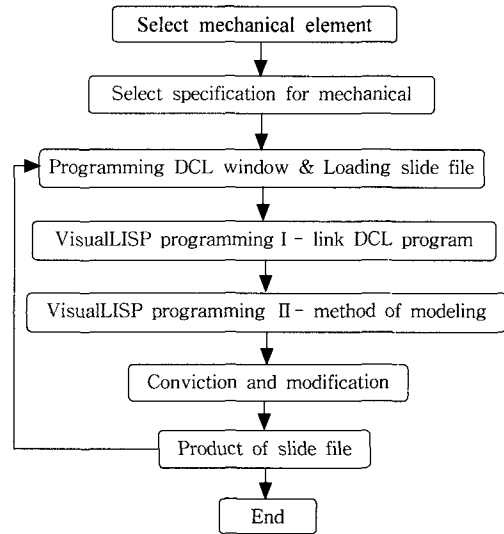


Fig. 1 Flowchart for automatic design program

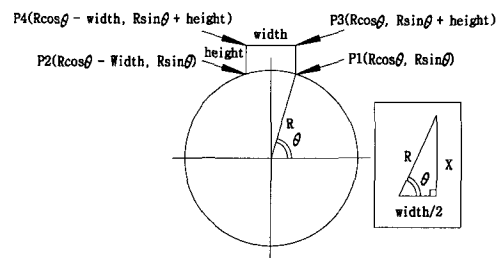


Fig. 2 Mathematical transformation of positional coordinate

운 수학적·기하학적 알고리즘을 적용하여야 하며, 프로그래머의 경험치가 상당히 중요하다. 이와 같은 전반적인 과정을 확인하고, 입력창에 치수 및 모델의 규격을 입력한 후 모델이 생성되는 과정 전체를 확인함으로써 기계요소 자동설계프로그램을 완성한다.

래칫 휠의 키 홈(Key way)을 모델링하기 위한 위치좌표 획득방법을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2는 입력요소인 키의 폭과 높이, 반경 값을 모델링에 필요한 위치좌표값으로 변환하는 과정을 나타낸 그림이다. 중심점을 (0, 0)으로 하였을 때 P<sub>1</sub>점의 X축 좌표는 w/2이고, 이는 Rsinθ로 표현된다. 그리고 Y축 좌표는 Rcosθ이다. 따라서 P<sub>1</sub>점의 좌표는 (Rcosθ, Rsinθ)이다. P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> 및 P<sub>4</sub>점의 좌표는 P<sub>1</sub>점을 기준으로 높이 값 h와 폭 값 w를 가감하여 구하였다.

```
ratchet01 : dialog { label = "래칫 휠 그리기 ";
: column {
: image {key = "ratchet01"; height = 15
: aspect_ratio = 1.5; color = 0
: allow_accept = true;}
: row{
: boxed_column{ label = " 래칫 휠 입력사항 ";
: edit_box { label = " 래칫 휠 반경 "; key = "key01"
: edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 래칫 휠 두께 "; key = "key02"
: edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 래칫 휠 외분반경 "; key = "key03"
: edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 래칫 휠 외분깊이 "; key = "key04"
: edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 내분 반경 "; key = "key05"; edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 내분 사이의 거리 "; key = "key06"
: edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 베어링 외분 "; key = "key07"; edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 베어링 폭 "; key = "key08"; edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 키의 폭 "; key = "key09"; edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 키의 높이 "; key = "key10"; edit_width = 10;}
: edit_box { label = " 축반경 "; key = "key11"; edit_width = 10;}
}
}
}
ok_cancel;
}
```

Fig. 3 DCL program for ratchet wheel

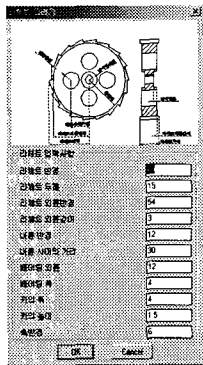


Fig. 4 Dialog box of ratchet wheel using visualLISP

$P_2$ 점의 좌표는  $(R\cos\theta, R\sin\theta + h)$ 이고,  $P_3$ 점의 좌표는  $(R\cos\theta - w, R\sin\theta + h)$ , 그리고  $P_4$ 점의 좌표는  $(R\cos\theta - w, R\sin\theta)$ 이다.

래칫 휠 자동설계프로그램의 대화 입력창을 설계하는 DCL프로그램을 Fig. 3에 나타내었다. 세 번째 줄에서 이미지를 이용하여 슬라이드 파일이 위치한 부분의 높이 및 폭, 색깔 등을 정하였고, 'edit\_box'부는 수치를 입력받을 부분의 타이틀과 수치입력상자의 크기를 정하는 부분이다. 줄 끝

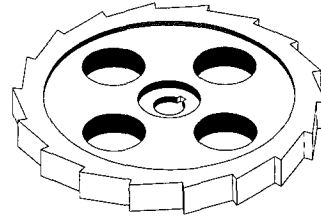


Fig. 5 3D model of ratchet wheel using automatic design program

에 위치한 'edit\_width = 10'은 수치입력상자의 길이를 10으로 한다는 의미를 가지고 있다.

AutoCAD를 실행한 상태에서 주 프로그램을 호출하기 위하여 'ratchet'을 입력하면 Fig. 4와 같은 래칫 휠 자동설계프로그램 입력창이 나타난다. 여기에 사용자의 요구대로 치수 및 규격을 입력하고, OK버튼을 클릭하면 Fig. 5와 같은 3차원 솔리드 모델을 얻을 수 있다. 이와 같은 일련의 과정이 매우 짧은 시간동안에 이루어진다.

### 3. 자동설계프로그램과 FEA를 이용한 최적 설계조건 선정

유한요소해석이란 구조물 안에 있는 무한개의 미지수 점을 절점을 이용하여 유한개의 이산화된 위치로 나타내고, 이들간에 서로 유기적 관계를 맺어 주는 요소라는 블록을 이용하여 전체 구조물이나 실제의 물리적 시스템 내부에 있는 임의의 점에서의 원하는 값을 수치적인 근사화를 통해 얻어내는 것을 말한다.

자동설계프로그램을 CAE에 활용하는 방법의 하나로 생성된 3차원 모델을 해석프로그램의 유한요소모델로 사용하는 예를 제시하였다. 자동설계프로그램의 가장 큰 장점중의 하나인 모델링의 신속성과 모델 수정의 편의성을 확인하기 위하여 자동설계프로그램과 CAE를 구현하는 프로그램인 ANSYS를 이용한 최적 설계조건 선정과정을 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 해석대상인 기계요소를 선정하고, VisualLISP을 이용한 자동설계프로그램을 통해 3차원 모델을 생성한다. 그리고 구조해석 프로그램인 ANSYS에서 사용되는 IGES 파일로 변환하고, 변환된 파일을 ANSYS에서 로딩하여 요소망 생성, 하중조건 및 경계조건을 입력하여

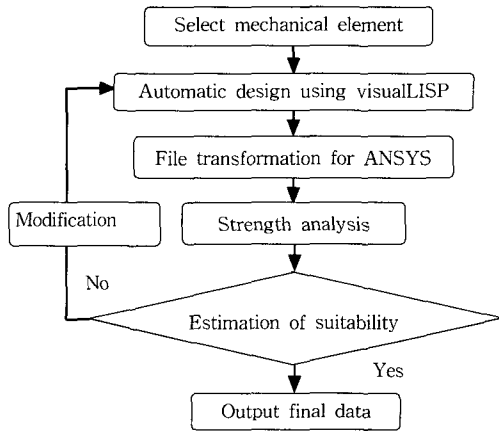


Fig. 6 Flowchart of selection for optimum design condition

해석을 수행한다. 최종적으로 해석결과를 분석하여 어느 부위에 응력집중현상이 나타나는지를 판단하고, 이 부분의 치수를 변경하여 다시 재설계 및 구조해석의 순서를 반복한다.

반복의 횟수는 데이터의 적합성을 판단하여 증가시킬 수 있는데, 적합성의 기준은 안전성과 경제성이다. 본 연구에서는 Fig. 6의 순서를 적용하여 래칫 휠을 자동설계하고, 이 모델에 대하여 유한요소해석을 수행한다. 등가응력이 키 홈에서 발생할 것으로 예측되기 때문에 기준 데이터를 KS B 1311에 근거하여 키 홈을 설계-해석한 값으로 설정하고, 키 홈의 폭과 높이에 변화를 주어서 최적 설계조건을 선정하고자 한다. 기준 데이터를 얻기 위한 설계조건은 키 홈의 폭이 4 mm이고, 높이가 1.5 mm이다. 이 치수는 KS 규격에 나타난 키의 크기 4×4 mm(축경이 10~13 ϕ 일 때)에서 축에 2.5 mm가 묻히고, 1.5 mm가 키 홈에 체결되는 데 기인한다.

유한요소해석 프로그램인 ANSYS에서 응력해석을 하기 위해서는 자체적으로 유한요소모델을 생성하든지 아니면 외부의 프로그램을 이용하여 설계한 모델을 불러들이는 방법이 있다. 간단한 형태의 유한요소모델은 ANSYS 자체적으로 모델링이 가능하지만 복잡한 형상의 모델은 외부 프로그램을 이용하여 주로 모델링한다.

본 연구에서는 후자의 경우로서 래칫 휠 자동설계프로그램을 통해 생성된 3차원 솔리드 모델을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 7은 본 연구에 사용된 래칫 휠의 유한요소

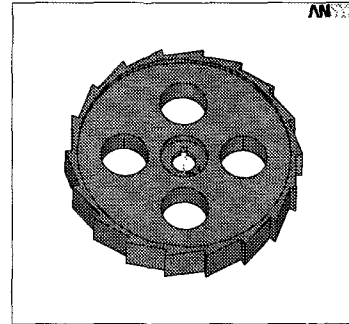


Fig. 7 Finite element model of ratchet wheel

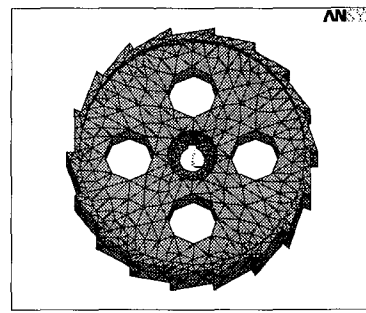


Fig. 8 Mesh generation of finite element model

모델을 나타낸 것으로 솔리드 모델을 유한요소모델로 사용하였으며, 키 홈의 규격은 KS B 1311을 참조하여 설계하였다. 그리고 응력해석을 수행하기 위한 래칫 휠의 특성 값을 계산해 주어야 한다. 래칫 휠의 재질이 기계구조용 강인 SM45C이기 때문에 여기에 기초하여 특성 값을 입력하였다. Fig. 8은 유한요소해석을 수행하기 위하여 유한요소모델에 요소망을 생성한 그림이다. 요소망은 네 개의 절점을 가진 삼각뿔로 구성되어 있으며 절점 수는 11,257개이고, 요소 수는 6,114개이다. 본 연구에 사용된 래칫 휠은 휠 중심에 위치한 키 홈부분에서 등가응력이 예상되어진다. 따라서 효율적인 해석을 위하여 키 홈 부근의 요소망 간격을 조밀하게 생성하였다.

본 연구에 사용된 유한요소모델인 래칫 휠에 적용된 경계 조건을 Fig. 9에 나타내었다. 래칫 휠이 축과 키로 체결되어 있으므로 중심부분에 작용하는  $x, y, z$ 방향의 변위량이 0이고,  $x, y, z$ 방향 회전 모멘트 성분도 0이기 때문에 원주방향 및 키 접촉면 전체를 구속하였다.

Fig. 10은 유한요소모델에 작용하는 하중조건을 나타낸 그림이다. 래칫 휠 자체가 동력을 전달하지 않고, 역회전을 방지하는 작용을 하기 때문에 치면에 수직방향으로 하중이 작용한다. 현장에서 주로 사용되는 10 kPa을 작용시켜 해석을 수행하여 얻어진 응력 집중부위와 크기를 바탕으로 키 홈의 높이 및 폭을 수정, 재모델링하는 단계를 반복하여 키 홈의 높이 및 폭을 결정하는 최적 설계조건을 구하고자 한다.

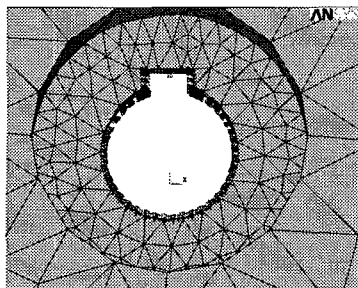


Fig. 9 Boundary condition of finite element model

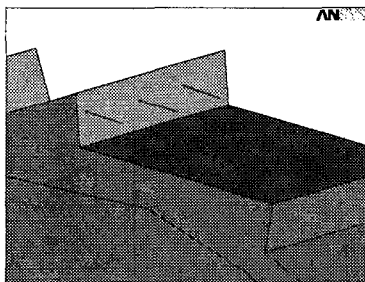


Fig. 10 Load condition of finite element model

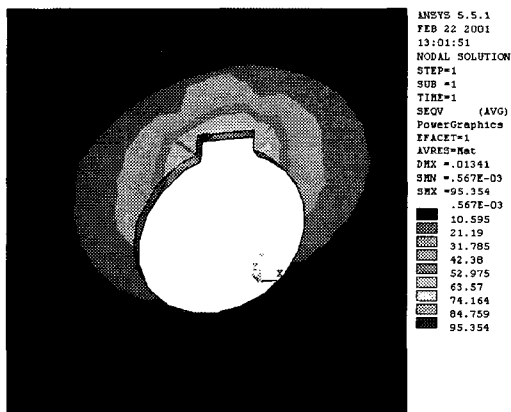


Fig. 11 Distributed equivalent stress (key width is 4.0 mm, key height is 1.5 mm)

기계요소 자동설계프로그램에 의해 생성된 래칫 휠의 3차원 솔리드 모델을 유한요소모델로 활용하여 응력해석을 수행한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 예상된바와 같이 키 홈 모서리 부위에서 등가응력( $M_x$ )이 발생한 것을 볼 수 있다. 이 때의 설계 조건은 KS에서 정한 규격인 키 홈의 폭이 4 mm이고, 높이가 1.5 mm인 경우이다. 키 홈의 모서리에 발생한 응력의 크기는 95.35 MPa이다. Fig. 11의 조건을 기준으로 설계치수를 변경하여 해석을 재수행하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 이 때 두 개의 변수가 존재하므로 먼저 키 홈의 폭을 고정시키고, 높이 값을 변화시켰다. 그리고 래칫 휠 자동설계프로그램을 통하여 치수가 다른 유한요소모델을 생성하고, 응력해석을 수행하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 4.0 mm × 1.1 mm일 때 등가응력값이 132.67 MPa로 가장 높게 나타나고, 4.0 mm × 1.7 mm일 때 등가응력값이 91.15 MPa로 최소가 되는 것을 알 수 있다. 이는 KS규격에서 지정한 4.0 mm × 1.5 mm의 등가응력값 95.35 MPa보다 더 낮은 수치인데, 이는 수치해석의 근사오차에 관계된 것으로 보인다. 왜냐하면 0.2 mm간격을 좀 더 세분화한 0.1 mm간격을 주어 유한요소모델을 생성하고, 해석을 수행한 결과 4.0 mm × 1.6 mm의 등가응력값이 100.90 MPa로 증가하는 경향을 보이기 때문이다. 그리고 또 다른 변수중의 하나인 키 홈의 높이를 고정하고, 폭 치수를 변화시켰을 때 4.4 mm ×

Table 1 Equivalent stress for change of key width and height

Condition	Key width (mm)	Key height (mm)	Equivalent stress (MPa)	
condition-1	4.0	1.1	132.67	
condition-2		1.3	131.79	
KS		1.5	95.35	
condition-3		1.7	91.15	
condition-4	3.6	1.9	97.59	
condition-5		1.5	3.6	96.61
condition-6			3.8	98.16
KS			4.0	95.35
condition-7	4.2		105.02	
condition-8	4.4	100.93		

1.5 mm의 등가응력값이 100.93 MPa로 가장 크게 나타나고, KS 규격에서 정한 치수인 4.0 mm × 1.5 mm를 경계로 V자형을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 키의 높이와 폭의 변화에 상관 없이 KS 규격에서 지정한 4.0 mm × 1.5 mm의 치수가 가장 안정적된 설계임을 알 수 있었다. 그리고 자동설계프로그램과 해석프로그램 ANSYS 사이의 피드백 시간을 최대 10분 이내로 단축할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서 AutoCAD상의 VisualLISP 프로그램을 이용하여 래칫 휠을 자동설계하는 래칫 휠 자동설계프로그램을 개발하고, 이를 통해 생성된 3차원 솔리드 모델을 유한요소모델로 사용하여 CAE 프로그램인 ANSYS에서 응력해석을 수행하였다. 그리고 해석결과를 토대로 래칫 휠의 최적형상설계를 위한 모델 수정을 반복 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 설계 및 모델링에 대한 지식이 부족한 사용자의 편의성을 높이고, 기계요소들을 3차원 모델링할 수 있도록 지원하는 기계요소 자동설계프로그램을 개발하였다.

(2) 래칫 휠 자동설계프로그램을 통해 생성된 3차원 모델을 CAE시스템의 유한요소모델로 활용하여 응력해석을 수행한 결과 키 홈의 모서리부분에 등가응력이 발생하는 것을 알 수 있었고, 모서리부의 등가응력 값을 최소화시키는 키의 최적설계조건이 4.0 mm × 1.5 mm임을 알 수 있었다.

(3) 래칫 휠의 최적형상설계를 위한 자동설계프로그램과 유한요소법을 통합하는 방법을 제시하였다.

#### 참고문헌

(1) Kim, Y. N., Lee, S. S., 2000, "Development of Automatic Design Program for Measuring Master Gear using VisualLISP," *Proc. KSMTE*, pp. 169~174.  
 (2) Cho, K. Z., Kim, J. S., 2000, "A Study on the

Development of the Gear Design Program by using AutoLISP," *Proc. KSMTE*, pp. 422~427.

(3) Kim, S. H., Lee, K. W., 1995, "AD System of New Concept to Support Top-Down Approach in Design," *Journal of KSME*, Vol. 19, No. 7, pp. 1604~1618.

(4) Tavakoli, M. S. and Houser, D. R., 1986, "Optimum Profile Modifications for the Minimization of Static Transmission Errors of Spur Gears," *Journal of Mechanism in Design*, MARCH, Vol. 108, pp. 86~95.

(5) Savage, M., Coy, J. J. and Townsend, D. P., 1982, "Optimal Tooth Numbers for Compact Standard Spur Gear Sets," *ASME Journal of Mech. Design*, Vol. 104, No. 3, pp. 749~758.

(6) Carroll, R. K. and Johnson, G. E., 1989, "Dimensionless Solution to the Optimal Design of Spur Gear Sets," *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 111, pp. 290~296.

(7) Tsay, C. B., 1988, "Helical Gears with Involute Shaped Teeth: Geometry, Computer Simulation, Tooth Contact Analysis, and Stress Analysis," *ASME*, Vol. 110, pp. 481~491.

(8) Lee, W. S., Lee, H. W., 1998, "A Study on the Prediction of the Fatigue Life of a Lug through the Finite Element Analysis," *Journal of KSPE*, Vol. 15, No. 10, pp. 88~95.

(9) Lee, S. B., 2000, "Design Optimization for Vehicle Pillar Section Shape Using Simple Finite Element Model," *Journal of KSMTE*, Vol. 9, No. 6, pp. 133~139.

(10) Park, C. H., Chung, J. H., 2000, "Finite Element Analysis on the Motion Accuracy of Hydrostatic Table," *Journal of KSPE*, Vol. 17, No. 12, pp. 137~144.

(11) Kim, M. J., Lee, S. S., 2001, "A Study on the Optimum Design using FEM and ADS," *Proc. KSMTE*, pp. 146~151.

(12) Park, J. H., Lee, S. S., 2001, "A Study on the Selection of Optimum Automatic Design Data using FEA," *Proc. KSPE*, pp. 406~409.