

의자 다리 부재에 대한 형상 최적 설계

강성수*, 정영수⁺

(논문접수일 2011. 05. 03, 수정일 2011. 07. 26, 심사완료일 2011. 08. 17)

Shape Optimal Design for the Leg Parts of Chair

Sung-Soo Kang*, Young Soo Jeong⁺

Abstract

In this study, a chair with 5 or 6 legs was designed using the commercial program CATIA V5 in order to efficiently design considering the load conditions. In addition, the stress analysis and shape optimization were carried out using ANSYS Workbench for the chair consisting of stainless steel, aluminum alloys, magnesium alloys and structural steel. As a result, a chair with five legs showed the maximum equivalent stress at the end of the edge of the wheel parts and on the other hand, a chair with six legs showed the maximum equivalent stress at the corner of the connecting parts of the pillar and leg. In addition, the material and the weight was reduced by shape optimization for the chair model with 5 legs and maximum equivalent stress for stainless steel was found that greatly relaxed, compared with that of before shape optimization model.

Key Words : Chair(의자), Structural Design(구조 설계), Finite Element Analysis(유한요소해석), Optimal Design(최적 설계)

1. 서론

일반적으로 의자의 구조는 의자를 지지하는 다리, 이용자의 엉덩이 부분의 압력을 받는 좌판, 허리의 부담을 줄이고 기대는 등받이, 이용자의 휴식 등을 위한 팔걸이 등으로 구분할 수 있다⁽¹⁾. 현재 사무실, 학교, 가정 등에서 주로 사용되고 있는 의자의 종류로는 바닥에 고정이 되어 회전되지 않는 의자 또는 자유자재로 움직일 수 없는 고정 의자, 5~6개로 구성되어 있는 다리에 바퀴가 달려 있어 손쉽게 이동할 수 있는 회전의자 등으로 분류되고 있다. 그 중에서도 PVC 재질로 만들어진 회전의자가 가장 많이 사용되고 있지만, 파손사례 또한 많이 발생하고 있다. 5~6개의 다리가 사람의 무게를 분산시켜 지지한다 하더라도, 어느 순간 한 바퀴에 힘이 집중될 경우, 의자의 중심기둥에

서 바퀴로 연결되는 부분이나, 바퀴와 의자다리가 연결되는 부분이 파손되는 경우가 종종 발생하기도 한다⁽²⁾. 이러한 경우에 사람의 신체와 의자가 지탱하고 있는 바닥부분과의 충돌이 발생하여 사람에게 치명적인 부상을 초래할 수도 있다⁽³⁾. 이와 같은 사고에 의한 피해를 최소화하기 위해, PVC재질에 비해서 강도가 훨씬 강화된 스테인레스 강을 사용한 의자다리가 개발되어 시중에서 판매되고 있다. 또한 다양한 자세 구현과 각 자세간 전환이 가능한 의자 구조의 설계와 기구학적 해석과 사용자의 감성적 요소와 육체적 요소를 실시간으로 설계에 반영한 설계기법 등이 제시되기도 하였다^(4~6).

본 연구에서는 의자의 파손에 의한 사용자의 부상은 크게 줄었지만, 의자의 무게가 비실용적으로 무거워진 점에 착안하여, 의자의 구조 중에서 가장 하중을 많이 받는 다리 부분의 설계를

* 전주대학교 기계자동차공학과 (sskang@jj.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지
⁺ 전주대학교 대학원 기계공학과

통하여 무게를 최소한으로 줄이면서, 재료의 강도는 유지할 수 있도록 하는 형상최적설계에 본 연구의 목적을 두고 있다^(7~10). 또한 의자 다리 부재의 재질에 대하여 스테인레스 강과 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 및 구조용 강 등을 사용하여 각 재질에 따른 강도를 평가하고자 한다.

2. 재질에 따른 구조해석

2.1 해석 모델

회전의자의 구조로는 의자 등받이, 의자 방석, 강봉 기둥, 의자다리, 바퀴로 나뉘어져 있으며 의자다리는 대체로 5개 또는 6개로 일정한 각도를 이루며 나뉘어져 있다. Fig. 1은 인체의 하중을 가장 많이 전달하는 강봉 기둥과 5개의 의자다리로 이루어진 모델로, Fig. 1(a)는 상면에서 본 치수와 형상을 나타내고 있으며, Fig. 1(b)는 측면에서 본 치수와 형상을 나타내고 있다. 본 해석에서 의자에 대한 모델링은 CATIA V5를 사용하였으며, 구조해석에 대해서는 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다^(11,12). Fig. 2는 Fig. 1의 치수에 따라 CATIA V5로 모델링한 3D 형상을 나타내고 있다. 그림과 같이 각 다리의 형상은 안쪽으로 خم이 깊게 파인 구조이다.

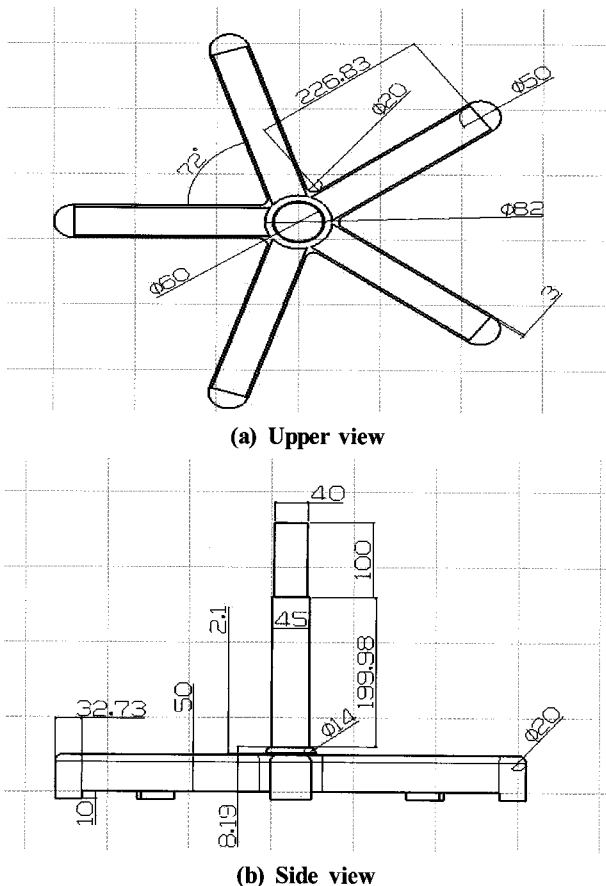
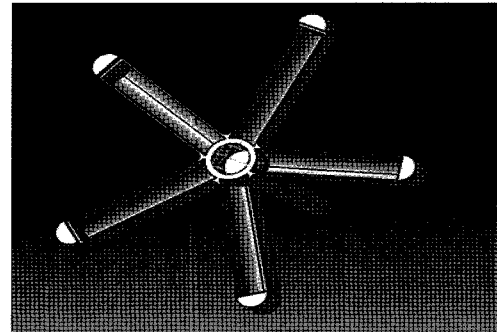


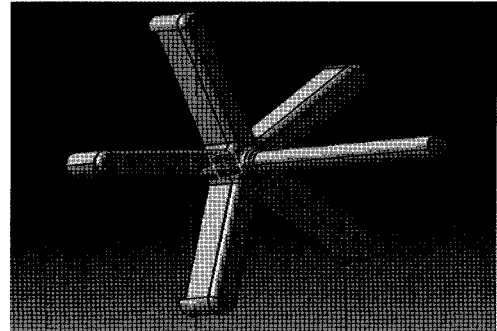
Fig. 1 Schematic view of chair [mm]

2.2 하중 조건 및 재료 상수

의자의 구조해석을 실시하기 위해, 일반적인 사람의 평균 체중보다는 약간 무겁게 100kg의 중량과 의자 다리의 자체 중량

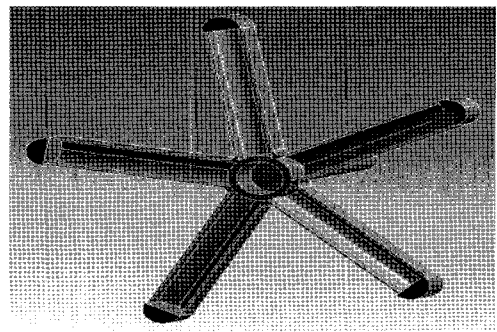


(a) Bottom view

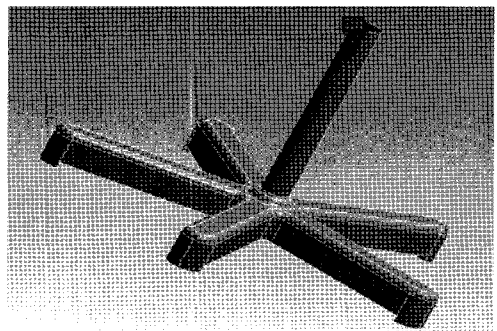


(b) Front view

Fig. 2 CATIA model of chair



(a) Fixed condition



(b) Loading direction

Fig. 3 Fixed condition and loading direction

Table 1 Mechanical properties of materials

	Stainless steel	Aluminum alloy	Magnesium alloy	Structural steel
Young's modulus	193GPa	71GPa	45GPa	200GPa
Poisson's ratio	0.31	0.33	0.35	0.30
Yield strength	207MPa	280MPa	193MPa	250MPa

10kg를 고려하였다. 사람이 의자에 빠르게 앉을 수 있는 상황을 고려하여, 가속도를 $20m/s^2$ 으로 가정하였으며, 수직하중(사람중량×가속도)으로 2000N의 하중을 가하였고, Fig. 3과 같이 지면과 접촉되는 바퀴 부분에 대한 마찰이 없도록 한 구속 조건과 기동에 적용된 하중조건을 통하여 해석하였다. 또한 사용된 재료는 Table 1과 같이, 스테인레스 강과 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 및 구조용 강을 사용하여 의자 다리가 5개 내지 6개인 경우에 대하여 구조 해석을 실시하였다.

2.3 최대등가응력 비교

Fig. 4는 스테인레스 강을 사용한 의자 다리에 대한 구조해석 결과이다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 각각 다리 개수를 5개와 6개로 한 경우의 해석 결과로써, 의자 다리가 5개인 경우의 최대등

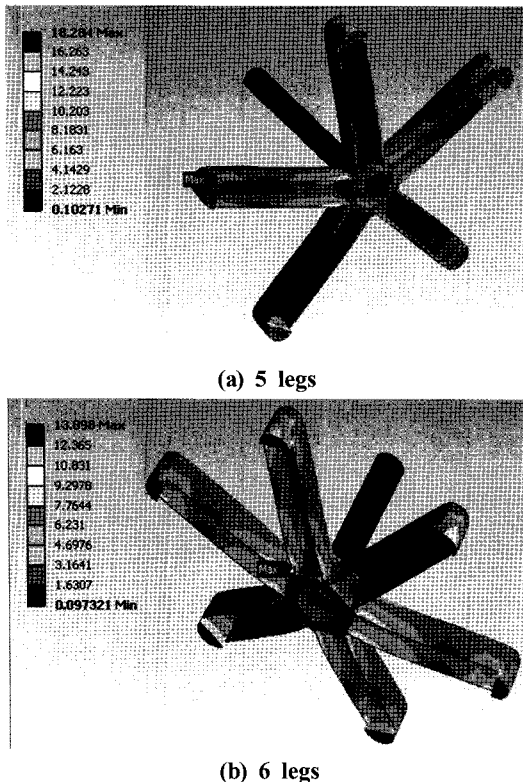


Fig. 4 Stress distribution for stainless steel

가응력이 18.284MPa에서 6개인 경우 13.898MPa로 크게 완화되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5는 스테인레스 강을 사용한 의자 다리에 대한 변형 결과이며, 의자 다리가 6개인 경우의 수직방향 변형량이 0.052mm에서 5개인 경우 0.039mm로 크게 줄어들었음을 알 수 있다.

Table 2는 이상의 4가지 재료로 만들어진 의자에 대한 구조 해석 결과, 최대등가응력을 비교한 것으로, 의자다리의 개수가 5개인 경우에는 지면과 접촉이 되는 바퀴가 달린 부분의 모서

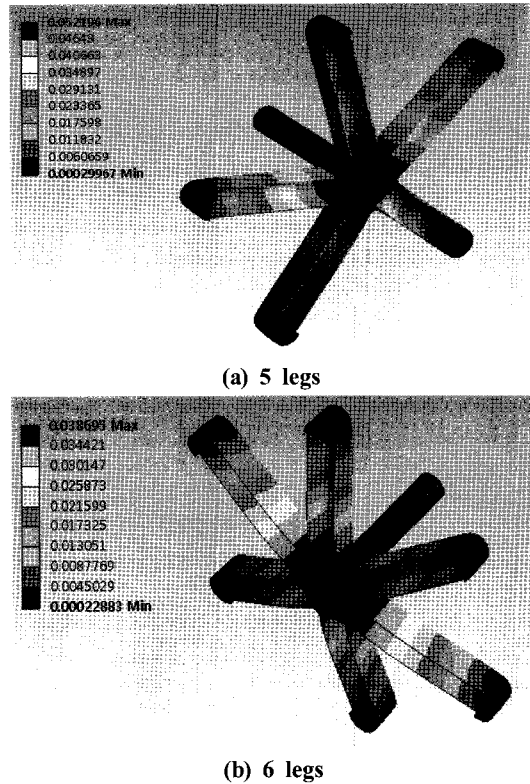


Fig. 5 Deformation distribution for stainless steel

Table 2 Maximum equivalent stress for materials

	Stainless steel	Aluminum alloy	Magnesium alloy	Structural steel
5 legs (MPa)	18.284	18.265	18.263	18.292
6 legs (MPa)	13.898	13.9	13.901	13.897

Table 3 Maximum y-directional deformation for materials

	Stainless steel	Aluminum alloy	Magnesium alloy	Structural steel
5 legs (mm)	0.052	0.141	0.223	0.050
6 legs (mm)	0.039	0.105	0.167	0.037

리 끝부분에서 가장 큰 응력을 받고 있으며, 다리의 개수가 6개인 경우는 기둥과 다리의 연결 부분의 모서리 부분에서 가장 큰 응력을 나타냈으며, 모든 경우에 대해 소성변형은 발생하지 않았다.

또한, 다리의 개수가 5개인 경우의 최대등가응력은 4가지 재질에 대해 모두 18.2MPa 전후를, 다리의 개수가 6개인 경우의 최대등가응력은 13.90MPa 전후를 나타냈고, 재질에 상관없이 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 3은 이상의 4가지 재질로 만들어진 의자에 대한 수직 변형량을 비교한 것으로, 의자다리의 개수가 5개인 경우와 6개인 경우에 관계없이 모두 기둥의 아래 부분에서 가장 큰 처짐을 보였으며, 마그네슘 합금과 알루미늄 합금, 스테인레스 강, 구조용 강의 순서대로 수직 변형이 크게 되었다. 따라서 의자를 제작함에 있어 재질에 따른 강도의 차이는 거의 보이지 않았지만, 재질에 따른 처짐량의 차이는 반드시 고려해야 되는 사항임을 알 수 있다.

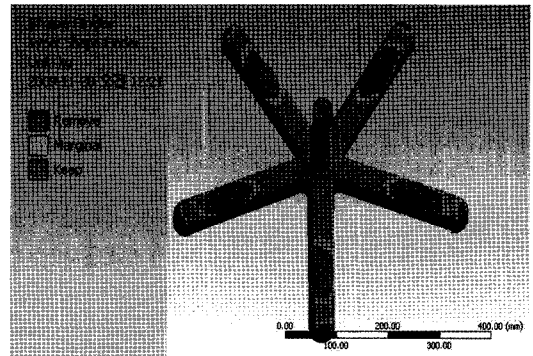
스테인레스 강의 경우를 비교해 볼 때, 의자다리의 개수가 5개일 때와 6개일 때의 최대 등가응력 차이가 4.386MPa 정도로 응력이 크게 완화되었지만, 이를 위해 다리의 개수를 추가함으로써 인하여 재료가 보다 많이 사용된다는 점이 비효율적임을 알 수 있다. 따라서 다리의 개수를 증가시켜 안전성을 높이기보다 구조의 최적화를 통해 강도는 비슷하게 유지하고, 재료를 절감하면서 무게를 줄이는 것이 더 효율적이다.

3. 형상 최적 설계

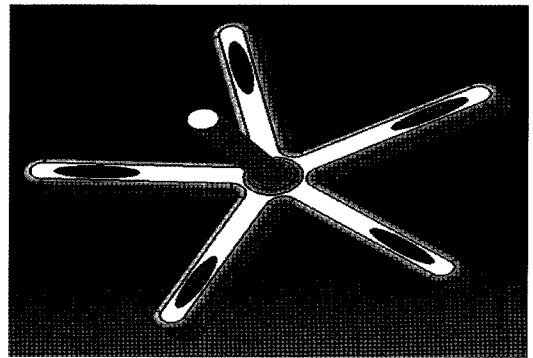
제품의 실용성을 생각한다면 경량화가 필요하지만, 지나치게 경량화에 중점을 두는 경우 강도가 저하된다. 강도가 떨어지게 되면 외부하중 또는 충격에 의해 바람직하지 않은 변형이 발생하게 되기 때문에, 현재의 설계와 비교하여 무게는 줄이거나 같도록 유지하면서 강도를 높일 수 있도록, 효율적이고 경제성 있는 구조를 설계하고자 형상 최적화(Shape optimization)를 실시하였다.

형상 최적화는 개략적인 기하학적 형상을 얻을 수 있지만, 상세한 형상이나 치수를 결정해 주지는 않는다. 구조물의 최종적인 설계를 위해서는 정확한 형상과 치수가 필요하기 때문에 형상 최적화를 통하여 얻어진 결과는 리모델링 과정을 거쳐 실제 제작될 형상을 결정하기 위한 기초자료로 이용된다.

Fig. 1과 Fig. 2의 설계조건과 동일하도록, 아무런 형상과 구속 및 하중 조건의 변화 없이 의자 다리의 상세 형상을 결정하기 위해 형상 최적화를 토대로 형상 최적 설계를 수행하였다. 본 연구에서는 상용해석 프로그램인 ANSYS/Shape optimization의 shape finder 솔루션을 이용하여, 최적화 이전 모델에 대한 무게의 20% 절감을 목표로 실시한 결과, 스테인레스 강의 경



(a) Before shape optimization



(b) After shape optimization

Fig. 6 Shape optimization model

Table 4 Maximum equivalent stress for optimization model with 5 legs

Stainless steel	Aluminum alloy	Magnesium alloy	Structural steel
13.898MPa	13.9MPa	13.901MPa	13.897MPa

우 11.156kg에서 8.9005kg, 알루미늄 합금의 경우 3.9874kg에서 3.1787kg, 마그네슘 합금의 경우 2.5911kg에서 2.0494kg, 구조용 강의 경우 11.3kg에서 9.0153kg으로 각각 줄일 수 있었다. 5개의 다리를 갖는 의자 모델링의 최적화를 실시한 결과, Fig. 6(a)와 같이 바퀴 부분과 기둥 사이의 중간 부분이 제거할 대상이 되는 부분임을 알 수 있다. 대상이 되는 부분을 제거한 후, Fig. 6(b)와 같이 모델을 재설계하였다.

2장에서 구조해석과 동일한 조건을 사용하여, 스테인레스 강과 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 및 구조용 강을 사용하여 Fig. 6의 의자 다리가 5개인 경우에 대하여 구조 해석을 실시하였으며, Table 4와 같이, 최적화 이전 모델의 스테인레스 강의 최대 등가응력이 18.284MPa에서 최적화 이후의 모델인 경우 18.143MPa로 응력이 다소 완화되었으며, 다른 3가지 재질에 대해서도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 5개 내지 6개의 다리를 갖는 의자에 가해지는 하중조건을 고려하여, 보다 가볍고 효율적인 의자 구조를 설계하기 위해 상용 프로그램인 CATIA V5를 사용하였고, 4가지 재질로 구성된 의자에 대해 ANSYS Workbench를 사용하여 응력해석과 형상최적설계를 실시한 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 스테인레스 강과 알루미늄 합금, 마그네슘 합금 및 구조용 강 등으로 만들어진 의자에 대한 최대등가응력을 비교한 결과, 다리의 개수가 5개인 경우는 바퀴가 달린 부분의 모서리 끝부분에서 가장 큰 응력을 받았으며, 6개의 다리를 갖는 경우는 기둥과 다리의 연결 부분의 모서리 쪽에서 가장 큰 응력을 받음을 확인하였다.
- (2) 다리의 개수가 5개인 경우의 최대등가응력은 18.28MPa 전후의 값을 나타냈으며, 다리의 개수가 6개인 경우의 최대등가응력은 13.90MPa 전후의 값을 나타내어, 재질에 상관없이 거의 일정한 값을 나타냈으며, 특히 스테인레스 강 의 경우 의자다리의 개수가 6개일 때 4.386MPa 정도로 응력이 크게 완화되었다.
- (3) 5개의 다리를 갖는 의자 모델에 대한 형상최적설계를 통하여 재료와 무게를 줄일 수 있었으며, 스테인레스 강 재질로 된 최적화 이전 모델의 최대등가응력이 18.284MPa에서 최적화 이후 18.143MPa로 응력이 완화되었으며, 다른 3가지 재질에 대해서도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.
- (4) 처짐량에 대한 해석 결과, 의자다리의 개수가 5개인 경우와 6개인 경우에 관계없이 모두 기둥의 아래 부분에서 가장 큰 처짐을 보였으며, 마그네슘 합금과 알루미늄 합금, 스테인레스 강, 구조용 강의 순서대로 처짐이 발생함을 알 수 있었다.
- (5) 따라서 재질에 따른 강도의 차이는 거의 보이지 않았지만, 처짐량의 차이는 반드시 고려해야 되는 중요한 사항임을 알 수 있다. 또한 다리의 개수를 증가시켜 안전성을 높일 수도 있겠지만, 형상최적화를 통해 강도는 비슷하게 유지 하면서 재료를 절감하는 방법이 보다 효율적인 설계라고 판단된다.

본 연구에서는 의자의 여러 구성요소 중에서 다리 부분에 대한 구조해석과 최적화 설계를 수행하였지만, 향후 다리, 좌판, 등받이 및 팔걸이 등의 의자의 구성 요소를 모두 갖춘 모델에 대해 적용하면 보다 효율적이고 경제적이며 안전성을 고려한 의자 구조를 설계할 수 있으리라 판단된다.

참고 문헌

- (1) In, S., I., 2004, "Analytical Study for the Data Formation of Chair Structure," *Transactions of the KSDS*, Vol. 17, No. 1, pp. 347~360.
- (2) Wee, H., L., 2009, "A Study on Functional and Design Improvements in the Fastening Hardware for Chair Legs," *Transactions of the KSDS*, Vol. 22, No. 3, pp. 5~13.
- (3) Yang, W., H., Park, Y., S., Park, G., J., Park, S., H., and Lee, H., J., 1999, "Frontal and Rear Crash Analyses and Design of a Belt Integrated Seat for Occupant Safety," *Transactions of the KSAE*, Vol. 7, No. 4, pp. 295~310.
- (4) Bae, J., H., Kim, G., S., Ryu, J., C., and Moon, I., H., 2008, "Design of Seat Mechanism for a Wheelchair Controllable Multi-postures", *Proceedings of KSPE Spring Conference*, pp. 251~252.
- (5) Lee, S., D., Lee, H., A., Song, J., B., and Chae, S., W., 2010, "Human-oriented Design of Backrest of Office Chair Using Haptic-aided Design and Lumber Angle Prediction," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 11, pp. 1581~1586.
- (6) Kim, D., M., Chae, S., W., Kang, Y., S., Lee, I., H., and Kim, B., J., 2008, "On the Effects of the Back of Chair on Human Body," *Proceedings of KSPE Fall Conference*, pp. 635~636.
- (7) Kim, K., T. and Kang, S., J., 2010, "Design Process of Light-weighted Fuel Cell Vehicle Body Frame," *Transactions of the KSAE*, Vol. 18, No. 6, pp. 114~121.
- (8) Won, C., J., and Lee, J., S., 1998, "Sensitivity Analysis and Optimal Design for the Elasto-plastic Buckling of Vehicle Structures," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 7, No. 5, pp. 106~112.
- (9) Kim, H., G., Choe, G., H., Lee, B., H., Cho, Y., T., and Lee, D., J., 1999, "A Study on the Lightweight Design of a Seat Frame in Automotive Vehicles," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 8, No. 5, pp. 83~89.
- (10) Lee, S., B., 2000, "Design Optimization for Vehicle Pillar Section Shape Using Simple Finite Element Model," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 9, No. 5, pp. 133~139.
- (11) Moaveni, S., 2008, *Theory and Application with ANSYS*, Pearson Education/Prentice Hall., USA.
- (12) Swanson, J., 2009, *Ansys12.0*, Ansys Inc., USA.