

# 차량용 서스펜디드 페달 구조체의 피로 내구 분석 및 설계 개선

## Fatigue and Robust Analysis for Improving the Suspended Pedal of Vehicles

이우형<sup>1</sup>, 황범철<sup>2</sup>, 김철<sup>2</sup>, 배원병<sup>3,✉</sup>

Woo-Hyung Lee<sup>1</sup>, Bum-Chul Hwang<sup>2</sup>, Chul Kim<sup>2</sup> and Won-Byong Bae<sup>3,✉</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan Natl. Univ.)

<sup>2</sup> 부산대학교 기계기술연구원 (Research Institute of Mechanical Technology, Pusan Natl. Univ.)

<sup>3</sup> 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구원 (School of Mechanical Engineering and RIMT, Pusan Natl. Univ.)

✉ Corresponding author: wbbae@pusan.ac.kr, Tel: 051-583-9686

Manuscript received: 2009.2.17 / Revised: 2009.3.13,4.8 / Accepted: 2009.4.13

*This study was carried out to evaluate structural stability of the suspended plastic pedal used in vehicles and to predict its fatigue life with the results obtained from finite element analysis. And also shape optimization was performed to reduce its weight. Structural analysis of the suspended plastic pedal was based on the evaluation tests such as static test, stiffness test, and fatigue test in the actual field, which were frequently carried out in the companies manufacturing plastic pedals. The evaluation for the plastic pedal was carried out by structural and fatigue analyses using a commercial FEA program and according to it, maximum stress and strain and fatigue life of the pedal satisfied all the requirements in the evaluation tests. The results of structural analysis of the suspended plastic pedal were used in the fatigue analysis. Fatigue test was performed to verify validity of the theoretical fatigue life of the plastic pedal. And the life by theoretical calculation was in good agreement with that by the experiment. Object function for optimizing shape of the plastic pedal is its volume, and total volume of the plastic pedal was reduced to about 11.7% through shape optimization.*

Key Words: Suspended Pedal (서스펜디드 페달), Finite Element Analysis (유한요소해석), Fatigue Life (피로수명), Shape Optimization (형상최적화)

### 1. 서론

최근 자동차의 수요가 보편화됨에 따라 자동차의 성능위주에서 탈피하여 운전자 및 차량의 안전에 집중하는 연구가 진행되고 있다. 자동차 부품을 설계하는 데 있어서 구조물의 파손을 막기 위한 안전 설계가 필요하다. 그러나 안정성 확보만을 위해 구조물의 형상을 고려하지 않을 수만은 없다. 그렇기 때문에 구조 설계에 있어서 안정성과 형상 최적화가 동시에 중시되고 있다.

자동차 부품 중의 하나인 페달은 운전자가 가

하는 페달을 밟는 힘을 클러치나 브레이크 시스템에 전달하는 역할을 한다. 또한 페달은 운전자와 직접적으로 접촉하는 부품이기 때문에 구조적 안정성 설계가 매우 중요시되는 부품이다. 그러나 그동안 자동차 페달에 대한 체계적인 설계방안이 없었고 설계자의 경험에 의한 직관적 설계로 인해 구조적으로 과잉 설계된 제품이 사용되었다. 그래서 기존 모델을 해석적으로 분석하여 페달의 안정성 및 과잉설계에 대한 평가가 필요하다.

자동차 페달과 관련된 연구는 대부분 클러치나 브레이크의 제동 효율이나 페달 발판을 밟는 힘을

낮추는 것과 같은 성능에 관한 것이다.<sup>1,2</sup> 즉, Lee 등<sup>3</sup>의 브레이크 페달의 발판을 밟는 힘, 페달의 변형, 제동 효율 등에 관한 연구를 들 수 있다. 최근에는 페달 구조에 관한 연구가 진행되고 있다. Kim 등<sup>4</sup>은 복합재 브레이크 페달의 구조해석 기법을 확립하였다. 그러나, 내구성과 관련된 페달의 피로수명에 관한 해석은 수행되지 않았다. 최적설계에 관한 연구로는 Hwang 과<sup>9</sup> Lee 등<sup>5,10</sup>의 자동차 부품 및 페달 암의 구조해석과 위상최적화에 관한 것과, Shin and Im<sup>6</sup>과 Son 등<sup>7</sup>의 페달 암의 경량화를 위한 연구가 이루어졌다. 현재 자동차의 경량화 추세에 따라 플라스틱 사출 페달의 수요가 증가하고 있다. 그런데 이 플라스틱 페달에 관한 체계적인 연구가 부족하기 때문에 이에 대한 유한요소해석 기법의 확립이 필요하다.

본 연구에서는 현재 사용되기 시작한 플라스틱 페달의 유한요소해석을 통하여 구조적 안정성을 평가하고, 과잉설계 여부를 검토하여 플라스틱 페달의 형상 최적화 방안을 제안하고자 한다.

## 2. 페달의 구조해석

### 2.1 해석 모델

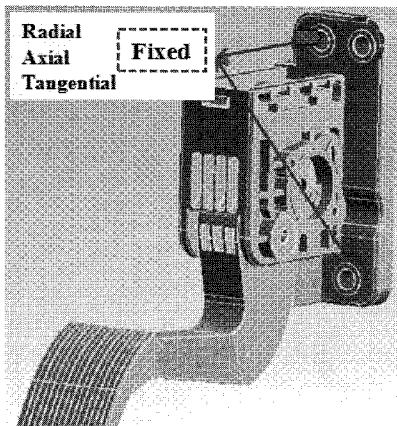


Fig. 1 Boundary condition for FE Analysis

페달의 구속 조건은 Fig. 1 과 같이 하우징의 볼트가 체결되는 곳을 원통 구속 조건을 주어서 고정하였다. 페달 암을 운전자가 발로 누를 초기에는 암이 큰 힘을 받지 않고, 암의 끝부분이 하우징에 접촉했을 때 가장 큰 힘을 받는다. 그러므로 Fig. 2 와 같이 암이 최대한 힘을 받는 정적상태,

즉 암과 하우징이 접촉하는 상태에서 유한요소해석을 수행하였다. ANSYS Workbench 에서 설정할 수 있는 접촉조건들(bonded, no separation, frictional, frictionless, rough) 중에서 떨어짐이나 미끄럼이 없는 bonded 조건을 부여하였는데, 이는 페달암이 하우징과 이미 접촉되어 있는 상태에서 해석을 수행하기 때문이다. Fig. 3 에 페달암과 하우징의 접촉 상태를 나타낸다.

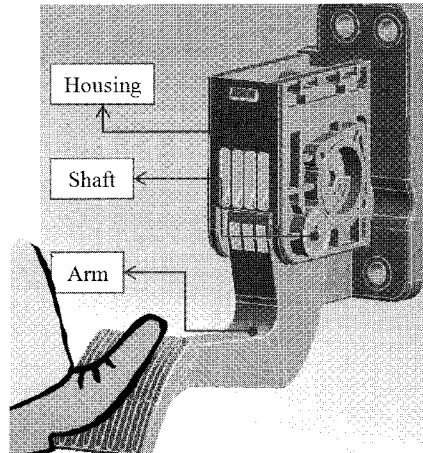


Fig. 2 Modeling of a plastic pedal

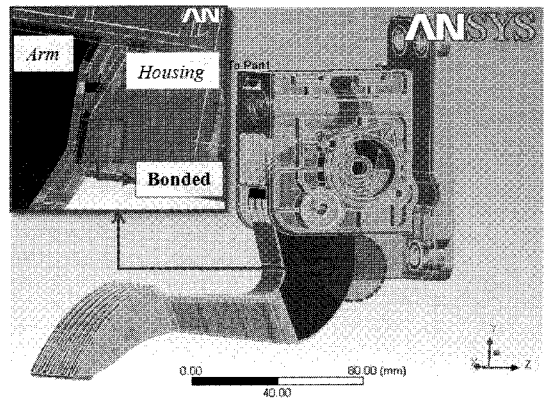


Fig. 3 Contact condition for FE Analysis

페달의 구조해석에 사용된 유한요소해석 소프트웨어는 ANSYS Workbench 11.0 이고, 해석 모델인 플라스틱 페달(PA66+33%GF)의 물성은 Table 1 에 나타낸다. 해석 모델의 메쉬 방법은 오토 메쉬법을 사용하였으며, 이때 메쉬 타입은 육면체 요소(Hex dominant)로 하였고, 요소의 수는 약 6 만개다. Fig. 4 는 유한요소모델을 나타낸다.

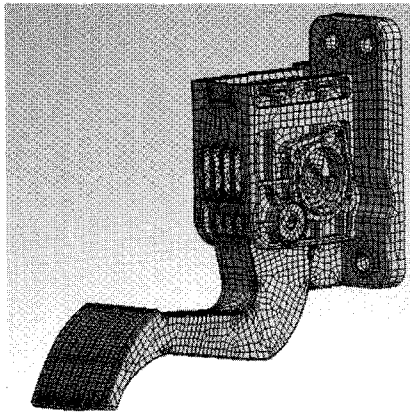


Fig. 4 Finite element model

Table 1 Material properties of a plastic pedal

Young's modulus (GPa)	10.5
Poisson's ratio	0.35
Density (kg/mm <sup>3</sup> )	1.39×10 <sup>-6</sup>
Ultimate tensile strength (MPa)	193

**2.2 평가 기준**

모든 자동차 페달은 통일된 시험규격이 없고, 제조업체에서 요구하는 평가기준에 맞추어 제작된다. 페달 각각의 기능과 목적에 알맞은 시험 방법을 통하여 안정성을 평가한다.

본 연구에서는 현재 페달 제조업체에서 적용 중인 평가기준을 이용하여 페달의 안정성과 과잉 설계 여부를 유한요소해석으로 검증하려 한다. 플라스틱 페달의 시험은 정부하 시험, 수평강성 시험, 피로 시험 등이 있다. Table 2는 차량용 플라스틱 페달의 평가기준을 나타낸다.

정부하 시험은 Fig. 5와 같이 페달 암의 발판에 수직방향으로 300N의 하중을 가하고 제거하는 과정을 5회 반복하고 하중 제거 후 암의 영구 변형이 5mm 이내이어야 한다. 피로시험은 정부하 시험의 하중 방향과 마찬가지로 0~300N의 반복하중을 페달 발판에 수직하게 1000만회 가한다. 시험 후 페달 부품의 외관상 균열이 없어야 하고, 제품의 작동에 이상이 없어야 한다. 수평강성시험은 Fig. 6과 같이 300N의 하중을 페달 발판 측면에 수평으로 가하고 제거하는 과정을 5회 반복하고 하중 제거 후 암의 영구 변형이 8mm 이내이어야 한다.

Table 2 Test standard for a plastic pedal

Test Method	Check Items	Test Standard
Static test	applied force	300N (5times)
	permanent deformation	below 5mm
Horizontal stiffness test	applied force	300N (5times)
	permanent deformation	below 8mm
Fatigue test	applied force	0~300N
	deformation	no crack

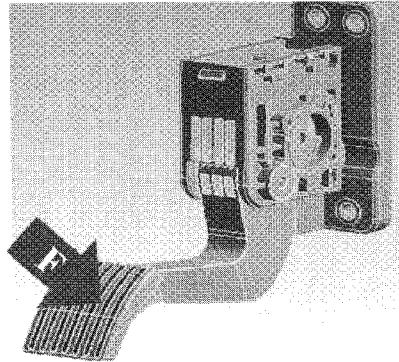


Fig. 5 Loading condition for static test

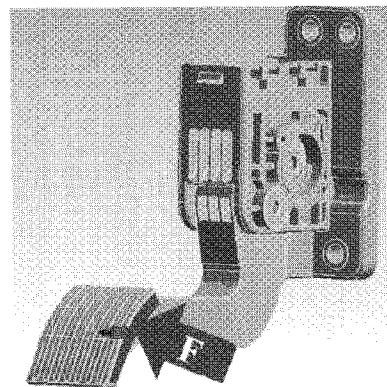


Fig. 6 Loading condition for horizontal stiffness test

**2.3 구조해석 결과 및 고찰**

**2.3.1 정부하 시험**

정부하 시험의 평가기준을 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 7과 같이 암과 하우징이 접촉하는 부분에서 최대 응력이 발생

하고, 그 크기는 53.3MPa 이다. 재료의 허용응력은 57MPa 이고, 인장강도는 193MPa 이므로 안전계수는 약 3.4 이다. 일반적인 자동차 부품의 안전계수가 1.6 임을 고려할 때,<sup>11</sup> 최대응력 53.3MPa 는 안전한 것을 알 수 있다. Fig. 8 은 하중을 제거하고 난 후의 영구변형을 나타낸다. 페달의 암 부분에서 영구 변형이 거의 없으므로 평가기준인 영구 변형 5mm 이내를 만족한다.

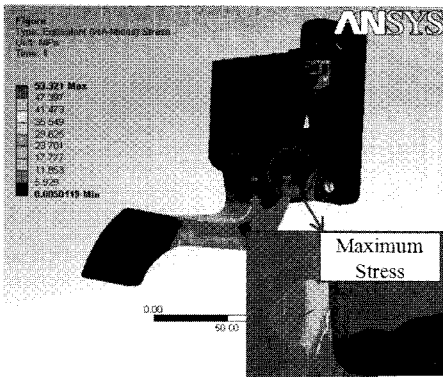


Fig. 7 Results of stress analysis in static test

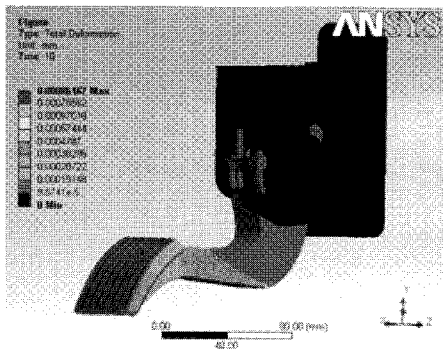


Fig. 8 Results of deformation analysis in static test

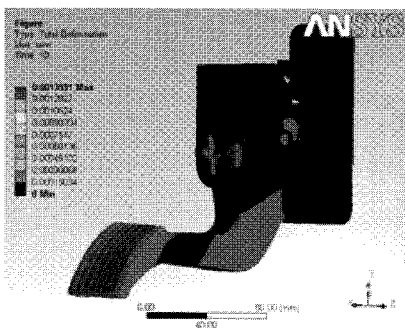


Fig. 9 Results of deformation analysis in horizontal stiffness test

수평강성 시험의 평가기준을 적용하여 유한요소해석을 수행하여 얻은 영구 변형을 Fig. 9 에 나타낸다. Fig. 9 에서 보면, 페달 암 부분에서 영구 변형이 없으므로 평가기준인 영구 변형 8mm 이내 에 있음을 만족한다.

### 3. 페달의 수명해석

#### 3.1 피로수명 예측

페달의 내구성을 파악하기 위하여 구조해석의 결과를 기초로 하여 피로해석을 수행한다. 피로 시험조건은 0~300N 의 반복하중을 1000 만회 가하여 균열이 발생하지 않아야 한다.

본 연구에서는 300N 의 하중을 페달 발판에 수직으로 작용시키는 정부하 해석에서 얻은 최대응력 53.3MPa 을 피로해석의 반복하중으로 잡았다. 그리고 페달의 수명을  $10^7$  사이클을 기준으로 안정성을 판단하였고, 피로해석 시 입력되는 S-N 곡선 데이터의 최대 수명을  $10^7$  사이클로 설정을 하였다. Fig. 10 은 플라스틱 페달의 피로해석 결과를 나타낸다. 피로해석 결과에 의하면, 페달의 수명은 페달의 전 영역에서  $10^7$ 사이클 이상으로 예측된다.

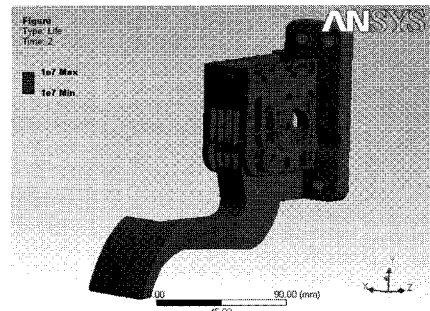


Fig. 10 Results of fatigue life analysis

#### 3.2 피로시험

유한요소해석 결과를 검증하기 위해 서스펜디드 페달을 피로시험기를 이용하여 피로수명을 측정하였다. 피로시험기는 유압 장치를 사용하여 페달 발판에 0~300N 의 하중을 1000 만회 반복하여 가한다. 시험 후 페달의 외관에 육안으로 검사 가능한 균열이 없어야 하며, 페달의 동작에 이상이 없어야 한다. 하중을 108,000 회/일(1 회당 0.8 초)로 총 3 개월간 시험을 수행하였다. 시험 후 매일 페달의 외관 및 균열 발생 여부를 확인하였다. Fig. 11 은 피로시험기를 나타내고, Fig. 12 는 피로시험

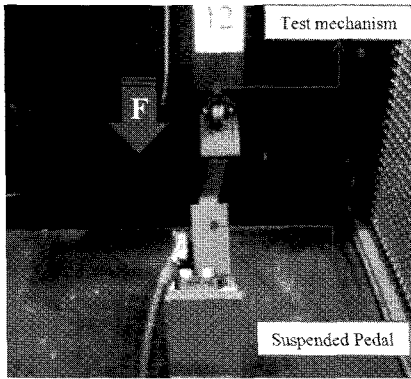


Fig. 11 Fatigue tester

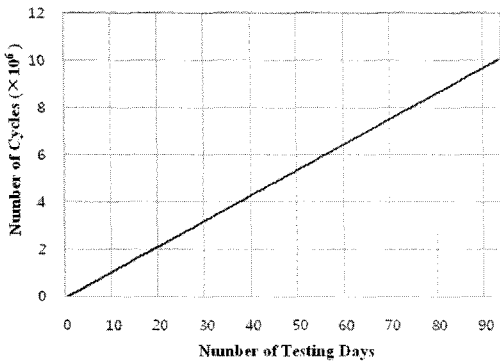


Fig. 12 Results of fatigue test

결과이다.

Fig. 12의 피로시험 결과에 의하면, 페달에 반복하중이 약 1000 만회를 넘게 작용해도 균열이 나타나지 않았으므로 자동차 페달의 시험기준을 만족한다. 이는 유한요소해석 결과와 거의 일치한다.

#### 4. 페달의 형상 최적화해석

##### 4.1 형상 최적화해석 조건

페달의 체적을 목적함수로 정의하여 형상 최적화해석을 수행하여 기존 페달의 형상에 대한 과잉 설계 여부를 해석적으로 검증하고자 한다.

형상 최적해석은 구조해석의 결과를 기초로 하여 해석되기 때문에 본 연구에서는 페달의 시험 중 정부하 시험 조건을 적용하였다. 페달에 가해지는 하중에 대해 강성을 유지하면서 응력이 작게 작용하는 곳의 재료를 제거할 수 있다. 목표 체적 감소량을 %로 지정하면 제거 가능한 부분을 표시해 주며, 이 결과를 참고로 불필요한 부분을 줄임으로써 재료의 체적을 줄인다. 본 연구에서는 목

표 체적감소량을 10%로 하여 불필요한 부분을 제거한 후, 구조 및 피로해석을 수행하여 최적화 해석결과와 형상이 시험기준을 만족하는지 판단하였다.

그리고 페달의 하우징 부분에는 센서나 스프링 등 부품이 장착되기 때문에 하우징 근처에서는 체적을 줄이지 않고, 암 부분에서 체적을 줄였다. 또한 암의 발판에 운전자의 발이 접촉하기 때문에 발판의 체적은 줄이지 않았다.

##### 4.2 형상 최적화해석

구조해석의 정부하 해석결과를 기초로 하여 형상 최적화해석을 수행하였다. Fig. 13은 기존 모델에서 체적 10%감소를 목표로 하여 해석을 수행한 결과이다.

해석 결과를 토대로 체적을 줄일 수 있는 부분을 제거하였다. 체적제거율은 약 8.6%이고, 제거된 형상의 구조적 안정성을 검증하고자 구조 및 피로해석을 수행하였다. 그 결과는 Table 3과 같으며, 구조 및 피로해석 결과가 페달의 평가기준을 만족한다.

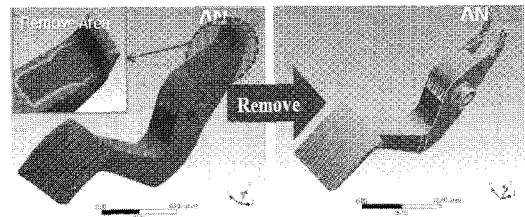


Fig. 13 Results of 1st shape-optimization analysis

Table 3 Results of 1st FE Analysis

	Check items	Results	Standard
Structural Analysis	Max. stress	54.1MPa	57MPa
	Max. deformation	2.1mm	5.0mm
Fatigue Analysis	Fatigue life	over 10 <sup>7</sup> cycles	10 <sup>7</sup> cycles

형상이 제거된 모델을 다시 형상 최적화해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 14에 나타내었고, 불필요한 부분을 제거한 체적 제거율은 약 3.1%이다. 제거된 형상을 이전과 마찬가지로 구조적인 안정성 검증하고자 구조 및 피로해석을 수행하였고, 그 결과는 Table 4와 같이 페달의 평가기준을 만족한다.

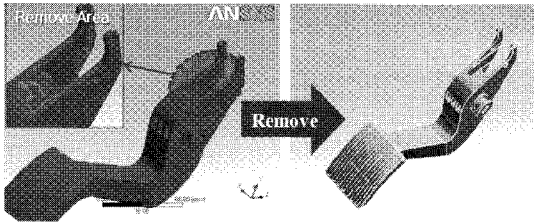


Fig. 14 Results of 2nd shape-optimization analysis

Table 4 Results of 2nd FE Analysis

	Check items	Results	Standard
Structural Analysis	Max. stress	56.6MPa	57MPa
	Max. deformation	2.1mm	5.0mm
Fatigue Analysis	Fatigue life	over $10^7$ cycles	$10^7$ cycles

앞에서와 같은 과정을 반복하여 세 번째 최적화 해석을 수행한 결과를 Fig. 15 에 나타낸다. 이 형상은 Fig. 16 과 같이 페달의 부품 중 센서샤프트가 장착이 불가능한 형상이다.

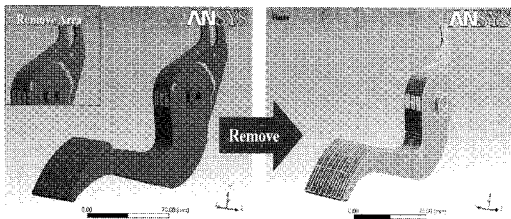


Fig. 15 Results of 3rd shape-optimization analysis

그러므로 두 번째 최적화 해석 결과의 형상을 최종 형상으로 결정하였다. 기존의 페달형상에서 최적화 해석을 수행한 결과, 총 체적감소량은 11.7%로 나타났다.

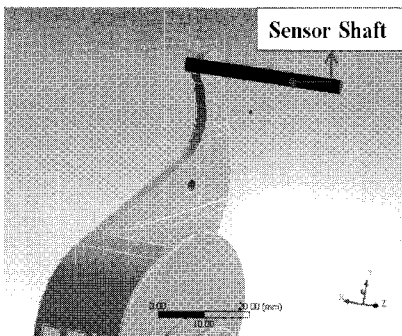


Fig. 16 Location of sensor shaft

## 5. 결론

본 연구는 차량용 플라스틱 페달의 유한요소해석을 이용한 구조적인 안정성 평가와 피로해석을 통한 수명예측 및 형상최적화 해석을 수행한 것으로 그 결과에서 얻는 결론은 다음과 같다.

(1) 유한요소해석을 이용하여 차량용 플라스틱 페달의 평가기준들을 만족하는 페달 암의 구조해석 기법을 확립하였다.

(2) 페달의 구조해석 결과를 바탕으로 피로해석에서 예측된 피로수명은 약 1000 만회이고, 일반적인 자동차 부품의 수명은 1000 만회 정도이므로 페달의 수명은 안전하다.

(3) 플라스틱 페달의 경량화를 위한 형상 최적화해석을 수행하여 페달의 체적 감소율이 11.7%인 최적형상을 제안하였다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

1. Son, G. R., "A Study on the Reduction of Clutch Pedal Effort in Automobile," M. S. Thesis, Department of Mechanical Precision Engineering, Pusan National University, 2000.
2. Lee, J. C., "Computerized Analysis of Clutch Hydraulic System and Optimization of Clutch Pedal Characteristics," Proc. of the Center for Automobile Parts Technology, Vol. 8, pp. 7-11, 2003.
3. Lee, S. H., Park, T. W., Jung, I. H. and Seo, J. H., "Development of Automotive Braking Performance Analysis Program Considering Dynamic Characteristic," Trans. KSAE, Vol. 12, No. 2, pp. 175-181, 2004.
4. Kim, K. S., Joe, C. R. and Kim, H. S., "Development of Composite Brake Pedal for KTX-1 and Tests for Structural Certification," Trans. KSME(A), Vol. 23, No. 7, pp. 1104-1111, 1999.
5. Lee, H. W., "Finite Element Analysis and Optimal Design of an Automotive Pedal Arm," M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering Graduate School, Keimyung University, 2003.

6. Shin, H. M. and Im, M. H., "Development of the Weight Optimized Clutch and Brake Arms for Automobiles," Proc. of the Center for Automotive Parts Technology, Vol. 7, pp. 109-116, 2002.
7. Son, J. H., Hyun, S. J. and Kim, C., "An Effective Shape Optimization Algorithm for the Automotive Pedal Arm," Trans. KSAE, Vol. 4, No. 2, pp. 1371-1378, 2003.
8. TAE SUNG S&E Inc., "ANSYS Workbench Training Manual," SIGMA Press, Ch. 4, 2007.
9. Hwang, Y. J., Kang, S. K., Kim, J. B., Lee, S. S., Choi, C. G. and Son, J. H., "Topology Optimal Design for Lightweight Shape of the Vehicle Mechanical Component," J. of KSPE. Vol. 20, No. 7, pp. 177-184, 2003.
10. Lee, B. Y. and Lee, H. W., "Shape Optimal Design of an Automotive Pedal Arm Using the Taguchi Method," J. of KSPE, Vol. 24, No. 3, pp. 76-83, 2007.
11. Jang, S. W. and Lim, M. S., "Robust Design Technology for Plastic Parts' Reliability," GIJEON Press, p. 560, 2007.