

# 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>, #배원병<sup>2</sup>, 김철<sup>3</sup>

\*W. H. Lee<sup>1</sup>, #W. B. Bae(wbbae@pnu.edu)<sup>2</sup>, C. Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 기계공학부, <sup>2</sup> 부산대학교 기계공학부, <sup>3</sup> 부산대학교 기계기술연구원

Key words : Suspended Pedal, Finite Element Analysis, Fatigue, Shape Optimization

## 1. 서론

최근 자동차의 수요가 보편화됨에 따라 자동차의 성능 위주에서 탈피하여 운전자 및 차량의 안전에 집중하는 연구가 진행되고 있다. 자동차 부품을 설계하는데 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.

본 연구에서는 기존의 플라스틱 사출 페달을 유한요소 해석 및 검증하고 파인설계 여부를 판단하여 모델의 형상 최적화 기법을 제안하고자 한다. 유한요소해석 소프트웨어를 사용하여 구조해석을 수행하여 안정성을 판단하고, 구조해석 결과를 고려하여 페달의 피로해석을 통한 피로수명을 예측하고자 한다. 형상 최적화 연구에서는 페달의 체적을 목적함수로 정의하고 이 값을 최소화하면서 구조물의 경량화 효과의 극대화과 더불어 구조적인 안정성을 목표로 접근하고자 한다.

## 2. 페달 시험평가 규격

모든 자동차 페달은 제조업체에서 요구하는 시험규격에 맞추어 제작이 되고 각각의 기능에 알맞은 시험 방법을 통하여 안전성을 평가한다. 플라스틱 사출물 소재 페달의 시험 방법에는 정부하 시험, 수평강성 시험, 내구 시험 등이 있으며, Table 1 은 플라스틱 사출물 소재(PA66+33%GF)와 Steel(SPHC) 소재의 페달 시험규격을 나타내었다.

Table 1 Test Standard of Suspended Pedal

| Test Method                  | Evaluation   | Test Standard |               |
|------------------------------|--------------|---------------|---------------|
|                              |              | PA66+33%GF    | SPHC          |
| Fixed Load Test              | Pedal Effort | 300N          | 588N          |
|                              | Displacement | Within 5 mm   | Within 10 mm  |
| Horizontality Stiffness Test | Pedal Effort | 300N          | 98N           |
|                              | Displacement | Within 8 mm   | Within 14 mm  |
| Vertical Stiffness Test      | Pedal Effort | No Apply Test | 294N          |
|                              | Displacement | No Apply Test | Within 6 mm   |
| Durability Test              | Pedal Effort | 0N~300N       | 0N~196N       |
|                              | Displacement | No Crack      | Within 5.5 mm |

## 3. 페달의 구조해석

페달의 시험규격을 유한요소해석으로 구현하였다. Fig. 1 에 서스펜디드 페달의 형상을 나타내었다. 구속 조건은 Housing 의 볼트가 체결되는 곳을 고정하였다.

정부하 시험과 내구시험은 페달 Arm 답변부에 수직방향으로 300N 의 하중을 가하고 수평강성시험은 300N 의 하중을 페달 Arm 답변부 측면에 수평으로 가한다. 유한요소 모델의 요소 크기는 5mm 로 하였고, 요소의 수는 61,168 개 이다. Table 2 는 모델의 물성을 나타내었고, Table 3 에 구조해석결과를 나타내었다.

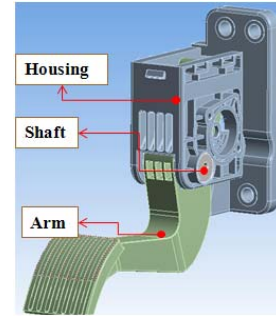


Fig. 1 Schematic of Suspended Pedal

Table 2 Material Properties(PA66+33%GF)

|                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| Young's Modulus (GPa)           | 10.5                  |
| Poisson's Ratio                 | 0.35                  |
| Density (kg/mm <sup>3</sup> )   | 1.39×10 <sup>-6</sup> |
| Tensile Ultimate Strength (MPa) | 193                   |

Table 3 Results of Structural Analysis

|                              |                   | Results   | Standard  | Remark |
|------------------------------|-------------------|-----------|-----------|--------|
| Fixed Load Test              | Max. Stress       | 61.7 MPa  | 193.0 MPa | 31.9 % |
|                              | Max. Displacement | 2.1 mm    | 5.0 mm    | 42.0 % |
| Horizontality Stiffness Test | Max. Stress       | 126.4 MPa | 193.0 MPa | 64.7 % |
|                              | Max. Displacement | 6.5 mm    | 8 mm      | 81 %   |
| Durability Test              | Max. Stress       | 61.7 MPa  | 193.0 MPa | 31.9 % |
|                              | Max. Displacement | -         | -         | -      |

## 4. 페달의 피로해석

피로해석에 사용할 평균응력은 적용된 하중으로부터 직접 계산된 값과 반드시 일치하지는 않으므로, 피로해석을 수행하기 전에 평균응력을 교정해주어야 한다<sup>(1)</sup>. 이는 기존 피로곡선이 완전한 응력반전, 즉 교정된 평균응력이 0 인 상태에서 시험하였기 때문이며, 이에 따른 평균응력의 교정에는 수정된 Goodman 도표와 식을 적용할 수 있다.

### 4-1. 피로해석의 이론적 접근

일반적인 Goodman 식<sup>(3)</sup>은 식(1)과 같다.

$$\frac{\sigma_a}{S_a} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (1)$$

평균응력의 존재는 소재의 피로저항을 감소시키기 때문에 피로곡선을 만들기 전에 0의 평균응력에 대한 교정된 교변응력강도를 계산하여야 한다. 유한요소해석 결과를 이용하여 교변응력  $S'_a$  을 구할 수 있다. 먼저 응력진폭  $S_a$  과 평균응력  $\sigma_a$  을 구하면 다음과 같다.(응력집중계수 :  $K=3$ )

$$S_a = \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{2} = 30.5MPa \quad (2a)$$

$$S_a = \frac{1}{2}K \cdot \frac{(P_{max} - P_{min})}{2} = 45.7MPa \quad (2b)$$

$$\sigma_a = \frac{(P_{max} + P_{min})}{2} = 30.5MPa \quad (3)$$

이로부터 교정된 교변응력  $S'_a$  을 구하면 식(1)과 같다.

$$S'_a = \frac{S_a}{1 - \frac{S_m}{S_u}} = 54.3MPa \quad (4)$$

임의의 응력  $S'_a$  작용 시 요소의 수명을 결정하기 위해  $S'_a$ 의 값을 S-N 선도 위에 놓고, 그 값을 찾으면 피로수명을 구할 수 있다<sup>(4)</sup>. 교정된 교변응력 값을 S-N 선도에서 수명을 찾으면  $10^7$ cycles 이상으로 나타났다.

### 4.2. 유한요소해석을 통한 피로수명 예측

페달의 시험방법 중 내구 시험 구조해석의 결과를 기초로 하여 피로해석을 수행하였다. 본 연구에서의 피로해석 방법은 응력-수명법으로 하였고, 평균응력식은 Goodman 식을 이용하였다.

해석 결과, 서스펜디드 페달의 수명은 페달의 전 영역에서  $1 \times 10^7$ cycles 로 예측되었다. 자동차 부품의 수명이  $1 \times 10^7$ cycles 이면 안전하다고 판단하기 때문에 서스펜디드 페달 역시 안전할 것으로 판단된다.

### 4.3. 페달의 내구성 시험

유한요소해석 결과를 검증하기 위해 서스펜디드 페달을 내구성 시험기를 이용하여 피로수명을 측정하였다. 내구성 시험은 페달에 1000 만회 하중을 가하여 기계적 이상 유무를 검증하고자 하는 시험이다. 하중을 108,000 회/일(1 회당 0.8 초)로 총 3 개월간 시험을 수행하였다. 시험 후 매일 페달의 외관 및 Crack 여부를 확인하였다. Fig. 12 는 내구성 시험기를 나타내었고, Fig. 13 은 내구성 시험 결과이다.

내구성 시험 결과, 페달의 피로수명은 10,044,000 회로 시험규격을 만족하였고, 이는 유한요소해석 결과와 거의 동일하게 나타났다.

### 5. 페달의 형상최적화해석

구조해석의 정부하시험 해석결과를 기초로 하여 형상최적화해석을 수행하였다. 형상최적화해석은 페달 Arm 만을 고려하였다. Housing 에는 Sensor, Shaft 등과 같은 부품이 장착되기 때문이다.

Fig. 2 는 기존의 모델에서 체적 목표감소량을 10% 로 하여 해석을 수행한 결과이다. 해석 결과에 나타난 제거 가능한 부분(붉은색 부분)을 제거하였다. 페달 답변부의 영역은 제거대상에서 제외하였다. 제거율은 약 8.6%이고, 제거된 형상의 안정성을 검증하고자 구조해석을 수행하였다. 그 결과를 Table 4 에 나타내었고, 페달의 시험규격 내에 있음을 확인하였다.

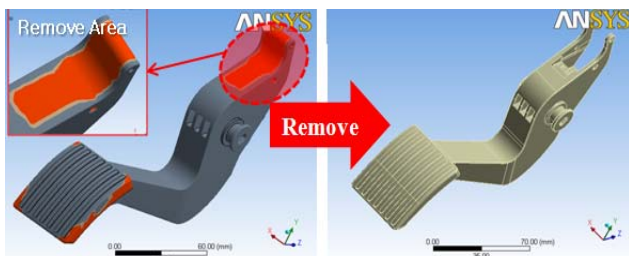


Fig. 2 Results of Shape Optimization analysis

Table 4 Results of Structural Analysis

|                   | Results  | Standard  | Remark |
|-------------------|----------|-----------|--------|
| Max. Stress       | 80.3 MPa | 193.0 MPa | 41.6 % |
| Max. Displacement | 2.1 mm   | 5.0 mm    | 26.2 % |

체적이 8.6% 제거된 모델에서 다시 형상최적화해석을 수행하였다. 체적 제거율은 약 3.1%이었고, 구조적 안정성 평가를 위한 구조해석을 수행하였다. 제거된 모델을 구조해석에 적용한 결과 페달의 시험규격 내에 있음을 확인하였다.

기존의 모델에서 형상최적화해석을 수행한 결과 총 체적감소량은 11.7%로 나타났다.

Table 5 Results of Structural Analysis

|                   | Results  | Standard  | Remark |
|-------------------|----------|-----------|--------|
| Max. Stress       | 82.5 MPa | 193.0 MPa | 42.7 % |
| Max. Displacement | 2.1 mm   | 5.0 mm    | 26.2 % |

### 6. 결론

본 연구에서는 차량용 서스펜디드 플라스틱 페달의 유한요소해석을 이용한 구조적인 안정성 평가와 피로해석을 통한 피수명예측, 그리고 형상최적화해석을 이용하여 페달의 과잉설계 여부를 판단하고 최적의 형상을 제안하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 페달의 각 시험평가 방법을 구현하여 유한요소해석한 결과, 정부하시험과 수평강성시험 및 내구시험 모두 시험규격을 만족하였고, 다소 안전율이 높은 것으로 나타났다.

(2) 구조해석 결과를 고려하여 피로수명을 예측하였다. 유한요소해석 결과 수명은  $1 \times 10^7$ cycles 이고, 내구성 시험기를 이용한 피로시험에서 수명이 10,044,000cycles 로 나타났다. 이는 해석 결과와 시험 결과가 거의 동일하였다.

(3) 구조해석의 결과를 이용하여 모델의 체적 감소를 목적함수로 두고 페달의 Arm 부품만을 고려하여 시험규격을 만족하는 최적의 형상을 제안하였다. 총 체적 감소율은 11.7%로 나타났다.

### 후기

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. H.H. Bednar, 1986, *Pressure Vessel Design Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp.39~54.
2. Son, J. H., Hyun, S. J. and Kim, C., 2003, "An Effective Shape Optimization Algorithm for the Automotive Pedal Arm," *Trans. KSAE*, Vol 4, No. 2, pp. 1371~1378.
3. 이용복, 김호경, 정진성., "피로해석의 기초," 청문각, 1999.
4. 김종대. 2004, "평균 응력의 변화 시점에 따른 피로수명 변화 예측," 금오공과대학교, 석사학위논문.
5. 이현우. 2003, "자동차 페달 암의 유한요소해석과 최적설계," 계명대학교, 석사학위논문.