

페달의 내구성에 대한 구조 해석

조재웅*, 한문식#

Structural Analysis on Durability of Pedal

Jae-Ung Cho*, Moon-Sik Han#

(Received 22 May 2011; received in revised form 25 June 2011; accepted 8 August 2011)

ABSTRACT

In this study, the deformation, stress, vibration, fatigue life and the probability of damage are analyzed at the pedal applied by the force of 300N. The maximum stress at the lower of pedal is shown as 20.801MPa. And the maximum displacement is 0.85mm at the maximum response frequency as 3800Hz. Among the cases of nonuniform fatigue loads, 'SAE bracket history' with the severest change of load becomes most unstable but 'Sample history' becomes most stable. In case of 'Sample history' with the average stress of 0 to -10^5 MPa and the amplitude stress of 0 to 10^5 MPa, the possibility of maximum damage becomes 0.6%. This stress state can be shown with 5 times more than the damage possibility of 'SAE bracket history' or 'SAE transmission'. The structural result of this study can be effectively improved with the design of pedal by investigating durability against its damage.

Key Words : Pedal(페달), Vibration(진동), Nonuniform Fatigue Loads(불규칙 피로 하중들), Fatigue Life(피로수명), Fatigue Damage(피로 손상), 레인플로우(Rainflow), Durability(내구성)

1. 서 론

최근 자동차의 수요가 보편화됨에 따라 자동차의 성능위주에서 탈피하여 운전자 및 차량의 안전에 집중하는 연구가 진행되고 있다. 특히 운전자가 자동차의 속도를 제어하는 데 주된 역할을 하는 부품으로서의 페달에는 브레이크 페달, 클러치 페달, 가속 페달이 있으며 각각 정지, 동력의 단속, 감 가속 기능을 한다. 자동차 페달과 관련된 연구는 대부분 클러치나 브레이크의 제동효율이나 페달 발판을 밟는 힘을 낮추

는 것과 같은 성능에 관한 것이다. 손으로 제어 가능한 장치에 비하여 발로 제어되는 페달은 운전자의 자세에 의해서 제약을 받는 경우가 많다^[1-4]. 페달과 관련된 연구를 살펴보면 주로 클러치나 브레이크의 성능에 주안점을 둔 연구로서, 자동차, 항공기 등과 같은 경우에 실제 적용함에 있어서 페달의 파손 또는 파괴를 막기 위한 안전을 고려한 설계, 즉 구조적 강도 설계가 중요하다^[5-8]. 본 연구에서는 페달에 대한 진동 및 피로해석을 통하여 내구성을 평가하고, 페달의 반복 사용에 따른 피로 하중을 분석하여 구조적 안정성을 연구한다^[9,10]. 따라서 본 연구에서는 페달의 구조 해석을 통하여 변형량과 진동, 피로 수명과 그 손상의 가능성을 시뮬레이션 해석하여 그 내구성을 증진시킬 수 있었다.

* 공주대학교 기계자동차공학부

교신저자 : 계명대학교 기계자동차공학과

E-mail : sheffhan@kmu.ac.kr

2. 해석 결과

2.1 구조 해석

Fig. 1에서와 같이 페달 모델은 길이가 12cm, 폭이 6cm, 높이가 12cm이고, 통상 자동차에 사용되는 실제 모델을 형상화하여 모델링하였으며 그 절점들과 요소수의 개수는 각각 16112 및 6814가 되었다. 이 모델은 보편적으로 알루미늄 합금으로서 그 물성치가 Table 1에 나타나 있다.

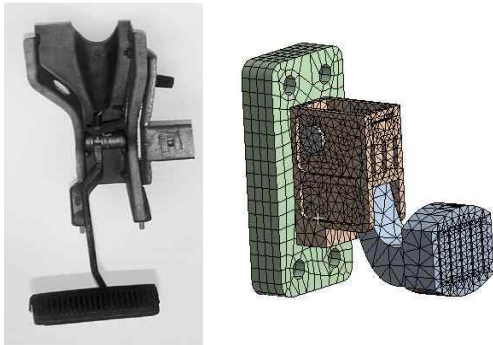


Fig. 1 Configuration and mesh of model

Table 1 Material property

Properties	Values
Young's Modules	$7.1 \times 10^5 \text{MPa}$
Poisson's Ratio	0.33
Density	$2.77 \times 10^{-6} (\text{kg}/\text{mm}^3)$
Tensile Yield Strength	2800MPa
Compressive Yield Strength	2800MPa
Tensile Ultimate Strength	3100MPa

모델의 경계조건으로서는 Fig. 2와 같이 페달의 두 쪽과 볼트에 Fixed Support로 고정을 시켰고 Fig. 3과 같이 페달의 앞면에 통상 운전자가 가하여 줄 수 있는 하중으로서 300N을 가하였다. 페달에서의 등가응력과 전변형량은 Fig. 4 및 5와 같다. 페달의 밑 부분에서 0.013643mm의 최대변형이 일어나며, Bracket의 밑 부분에서 20.801MPa의 최대 응력을 받으므로 이 부분에 대한 설계를 우선 고려하여야 한다.

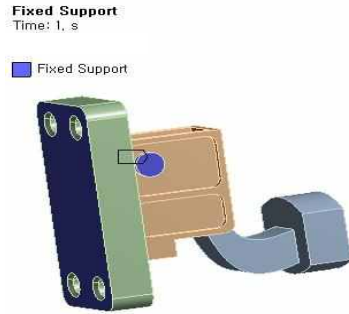


Fig. 2 Fixed condition of structural analysis

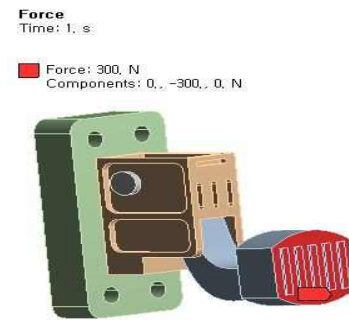


Fig. 3 Force condition of structural analysis

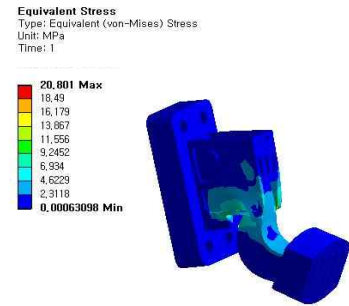


Fig. 4 Equivalent stress at structural analysis

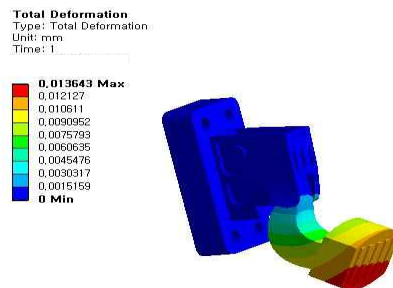
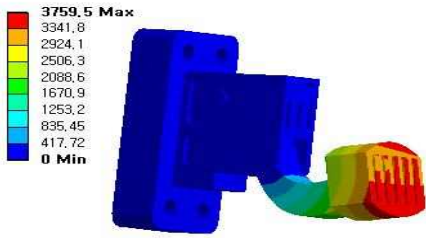


Fig. 5 Total deformation at structural analysis

2.2 진동 해석

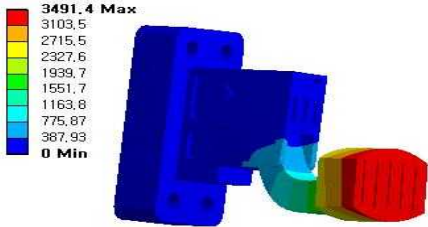
진동 해석에서는 모델의 경계조건을 Fig. 2와 같은 구속 조건으로 하였다. Fig. 6은 본 모델인 페달에 대한 고유 진동수를 나타내는 그림이다. 총 4차까지의 고유진동수를 나타냈는데 1차에서는 923.96Hz, 2차에서는 1060.2Hz, 3차에서는 2386Hz 및 4차에서는 3788Hz 진동을 볼 수가 있다.

Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 923.96 Hz
Unit: mm



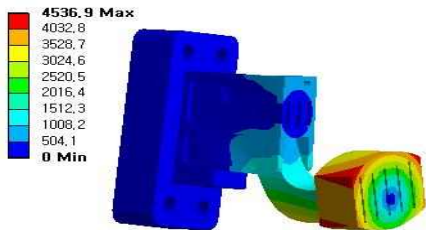
(a) First order

Total Deformation 2
Type: Total Deformation
Frequency: 1060.2 Hz
Unit: mm



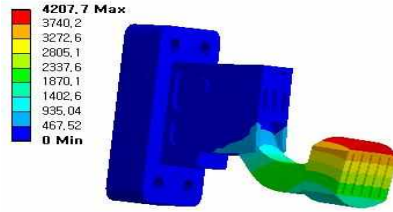
(b) Second order

Total Deformation 3
Type: Total Deformation
Frequency: 2386.8 Hz
Unit: mm



(c) Third order

Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Frequency: 3788. Hz
Unit: mm



(d) Fourth order

Fig. 6 Total deformations at Natural frequencies at 1'st, 2'nd, 3'rd and 4'th orders

Table 2는 각 모드에 대한 최대 진동수를 표로 나타낸 것이다.

Table 2 Natural frequency

Mode	Frequency[Hz]
1	923.96
2	1060.2
3	2386.8
4	3788

또한 모델의 경계조건을 Fig. 2 및 Fig. 3과 같은 구속 조건으로 하였다. 그리고 진동수는 Modal 해석에서의 4차 모드인 3788Hz인 최대 진동수보다 더 큰 값인 5000Hz를 설정하고 해석을 수행하였다. 실제로 이러한 페달의 고유진동은 충분히 5000Hz내에서 일어나므로 그 범위 이상을 잡아서 5000Hz로 설정하였다. Fig. 7은 각 진동수에 따른 변형그래프이다. 이 그래프에서도 볼 수 있는 바와 같이 최대 응답 주파수로서의 3800Hz에서 변형이 가장 높게 나타났다. 이것을 기준으로 하여 진동수가 3800Hz일 때 해석을 수행하였을 때 이러한 최대응답주파수에서의 실제 변위와 응력을 Fig. 8에서 확인해 보았다. Fig. 8은 최대 등가 응력은 2196MPa임을 확인할 수가 있고 페달 위쪽 부분에서 최대 0.85mm 정도 변형된 것을 알 수가 있다. 이러한 등가응력은 항복응력에 미치지 않으므로 페달의 파괴에 이르지 않지만 이러한 주파수에서의 실제 공진 가능성 및 그 응력 및 변형에 대하여도 제작 시 고려하여야 될 것이다.

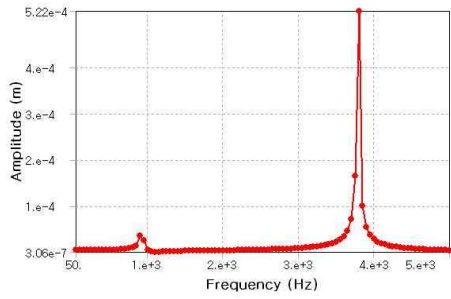
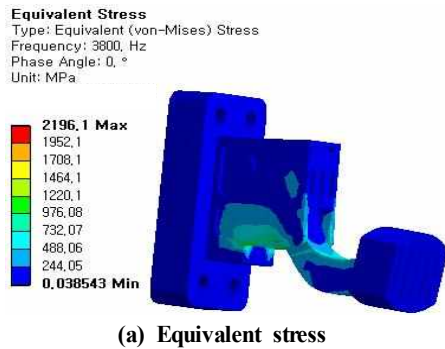
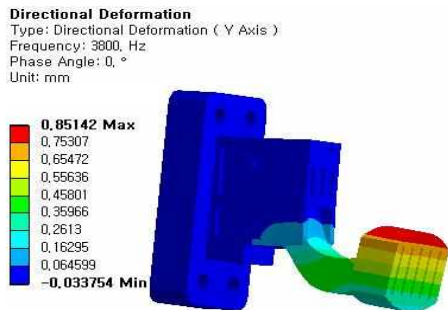


Fig. 7 Frequency response



(a) Equivalent stress

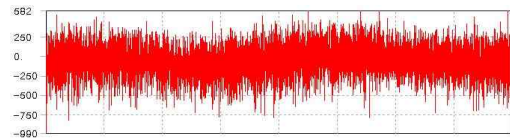


(b) Directional Deformation at Y axis

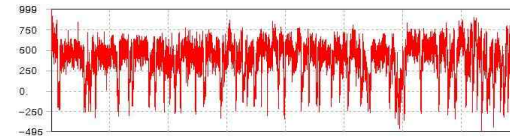
Fig. 8 Equivalent stress and directional deformation at maximum frequency response

2.3 피로해석

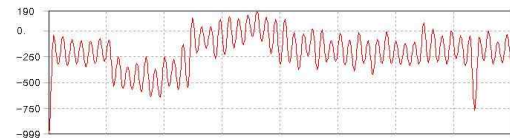
피로해석을 할 때의 모델의 경계조건은 Fig. 2와 Fig. 3과 같은 구조해석 구속 조건으로서 설정하여 준다. 피로해석에서는 다음과 같이 통상적으로 자동차 노면으로부터 받을 수 있는 불규칙 변동 하중을 대표적으로 3가지에 대하여 적용하였다. 이에 대한 3가지 피로 하중 형태는 Fig. 9와 같다.



(a) SAE bracket history



(b) SAE transmission



(c) Sample history

Fig. 9 Loading history

그리고 Fig. 10과 같이 평균 응력은 Goodman의 식^[10]을 적용하였다.

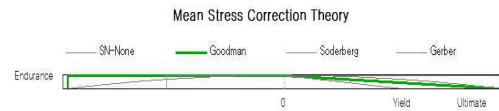


Fig. 10 Mean stress correction theory

각각의 출력들은 불규칙 진폭하중들인 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’, ‘Sample history’들의 하중들로서 서로 비교 될 수 있다. SAE bracket history 피로 하중은 거친 도로상에서 거의 평균하중이 일정하지만 진동이 불규칙적으로 좁게 무작위로 일어나는 경우이다. 그리고 SAE transmission 하중은 평균하중의 변화는 더 일어나지만 진동은 덜 잦아진 경우로서 트랙터에서 일어날 수 있는 피로의 경우이다. 또한 Sample history의 경우는 기차 레일 상에서 받는 하중 내역으로서 사인 커브로서 비교적 완만하지만 변화되는 피로하중이다. 본 연구의 모델에 대하여 사용 가능 수명에 대한 등고선 그림들이 Fig. 11에 나타나 있다. 피로에 대한 해석 결과의 출력들은 피로 수명, 파손, Rainflow 매트릭스 및 Damage 매트릭스들을 포함하고 있다.

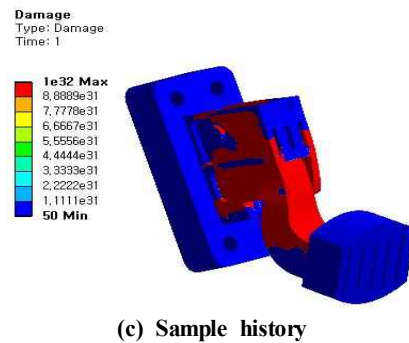
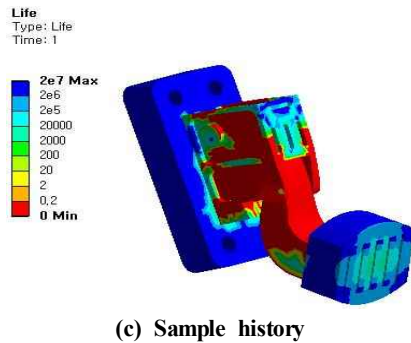
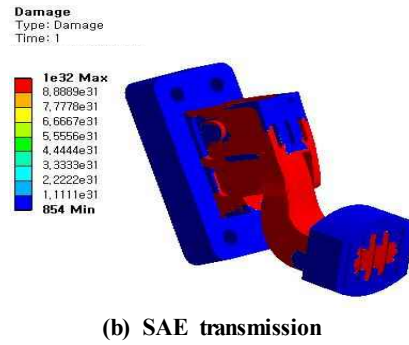
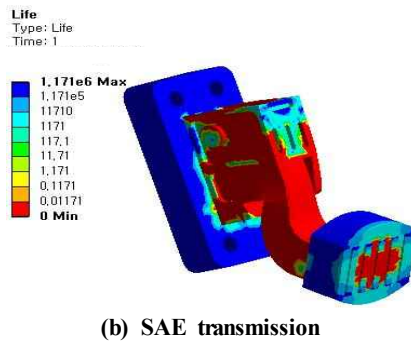
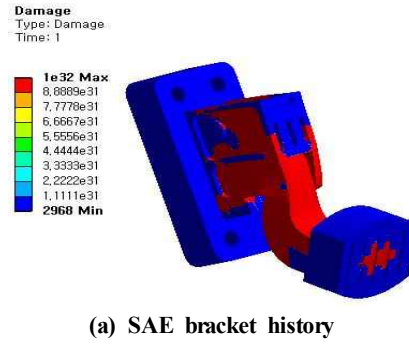
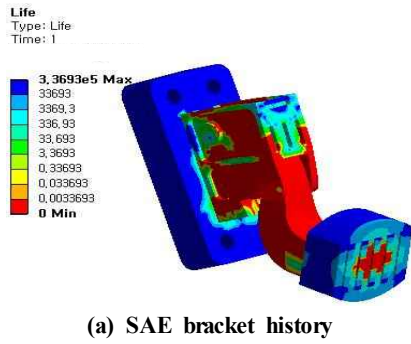


Fig. 11 Contour plots of fatigue Life

Fig. 12 Contour plots of fatigue Damages

Fig. 11에서 보면 (a)의 경우의 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket’의 경우가 사용 가능 수명이 3.37×10^5 Cycle 정도로 가장 짧은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 그 수명이 2.0×10^7 Cycle 정도로 가장 긴 것을 알 수 있었다. 이는 하중의 변화가 작기 때문에 안정적인 것으로 사료된다.

Fig. 12에서 볼 수 있는 바와 같이 등고선으로 된 피로 손상은 설계 수명을 사용 가능 수명으로 나누는 것으로 정의된다. 피로 손상이 아주 적은 부분으로서 3가지 경우들을 공히 비교할 수 있다. (a)의 경우인 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket’의 경우가 손상이 2968로 가장 많은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 그 손상이 50 정도로 가장 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한

‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 역시 일반적으로 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.

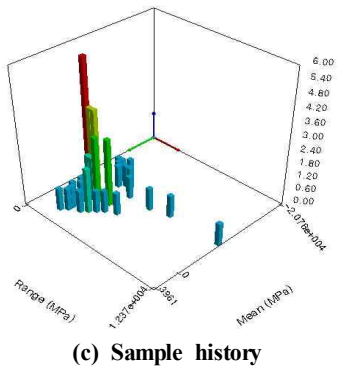
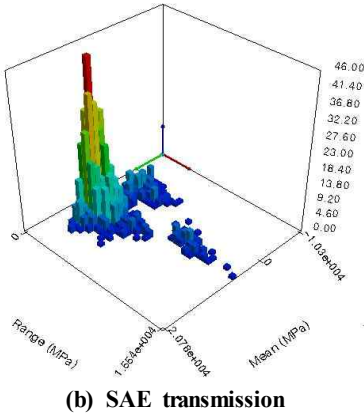
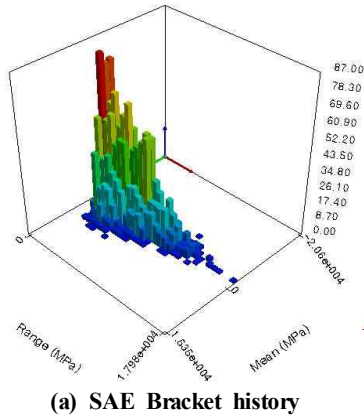


Fig. 13은 임계 위치에 대한 Rainflow 매트릭스들에 대한 그림들로서 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’, ‘Sample history’들의 3가지 불규칙 진폭 하중에 대해서만 적용된다. 그리고 Fig. 13은 본 해석에 가해지는 하중 내역의 구성으로서 진폭 응력과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려지는데, z축은 주어진 진폭 응력과 평균 응력에 대한 빈도수에 해당된다. 해석 결과를 보면 ‘SAE bracket history’의 경우가 상대적인 손상은 평균응력이 0 부근의 상태에서 최대의 빈도수가 87 정도로서 상대적인 손상이 많이 일어져 어떤 다른 경우들보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다. 또한 ‘Sample history’의 경우는 이 상태에서 최대의 빈도수가 5 정도로서 손상이 가장 적게 발생한 것을 알 수가 있다.

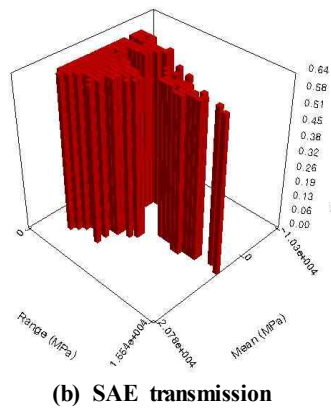
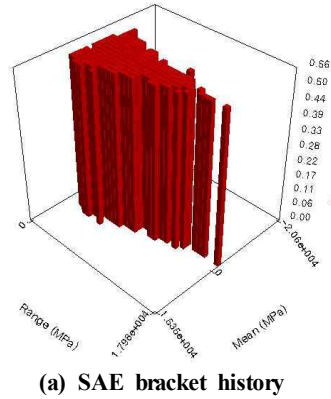
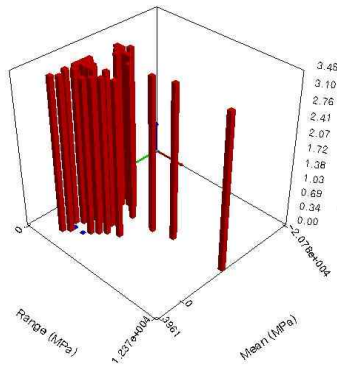


Fig. 13 Plots of rainflow matrices



(c) Sample history

Fig. 14 Plots of damage matrices

불규칙 피로 하중의 종류에 의한 피로 손상 및 하중의 빈도수를 나타낸 Fig. 12 및 13에서 보면 ‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 일반적으로 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.

Fig. 14는 본 연구 모델에서 파손에 대한 임계 위치에서의 Damage 매트릭스들에 대한 그림들로서 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용되는데 10^9 사이클의 무한 수명에 대한 상대적 손상 가능성을 나타내고 있다. Fig. 14에서의 그림을 보면 ‘Sample history’의 경우가 다소 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0Pa부터 -10^5 MPa이고 응력 진폭 0MPa부터 10^5 MPa에 있어서의 특정한 하중 상태에서는 최대 3%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있었다. 그리고 ‘Sample History’의 경우가 최대 0.6% 정도의 파손가능성을 보이는 ‘SAE bracket history’나 ‘SAE transmission’ 경우보다 5배의 파손의 가능성이 큼을 알 수 있었다. 이러한 특정한 피로 하중 상태를 고려한다면 페달에 대한 설계와 제작 시 그 안전성 및 내구성을 향상시킬 수 있다고 사료된다.

3. 결론

본 연구에서는 페달에 300N의 힘을 주었을 때 변형량과 진동의 영향과 피로 수명 및 그 손상의 가능

성을 시뮬레이션 해석할 수 있었다. 페달에 대한 진동 및 피로해석을 통하여 내구성을 평가하고, 페달의 반복 사용에 따른 피로 하중을 분석하여 구조적 안정성을 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

1. 길이가 12cm, 폭이 6cm, 높이가 12cm인 페달에서 페달의 밑 부분에서 0.013643mm의 최대변형이 일어났으며, Bracket의 밑 부분에서 20.801MPa의 최대 응력을 받으므로 이 부분에 대한 설계를 우선 고려하여야 한다.
2. 진동에 대한 최대응답주파수는 3800Hz에서의 최대응력은 2196MPa임을 확인할 수가 있다. 페달 위쪽부분에서 최대 0.85mm 변형된 것을 알 수가 있었다. 그리고 이러한 주파수에서의 실제 공진 가능성 및 그 응력 및 변형에 대하여도 제작 시 고려하여야 될 것이다.
3. 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.
4. ‘Sample history’의 경우가 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0Pa부터 -10^5 MPa이고 응력 진폭 0MPa부터 10^5 MPa에 있어서 최대 0.6%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 ‘SAE bracket history’와 ‘SAE transmission’ 경우보다 5배의 파손의 가능성이 많다고 예측하였다. 이러한 특정한 피로 하중 상태를 고려한다면 페달에 대한 설계와 제작 시 그 안전성 및 내구성을 향상시킬 수 있다고 사료된다.

참고문헌

1. Lee, W. H., Hwang, B. C., Kim, C. and Bae, W. B., "Fatigue and Robust Analysis for Improving the Suspended Pedal of Vehicles", Journal of the KSPE, Vol. 26, No. 7, pp. 105-111, 2009.
2. Kim, J. T., Kim, C., Song, T. S. and Park, C. W., "The Shape Optimization of Automotive Pedal Arms and the Effect of a Rib", 2004 Fall Conference Proceeding of the KSAE, Vol. 2, pp. 932-937, 2004.

3. Lee, B. Y. and Lee, H. W., "Shape Optimal Design of an Automotive Pedal Arm Using the Taguchi Method", Journal of the KSPE, Vol. 24, No. 3, pp. 76-83, 2007.
4. 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.
5. Son, J. H., Hyun, S. J., Kim, C., Cho, K. H. and Song, T. S., "An Effective Shape Optimization Algorithm for the Automotive Pedal Arm", 2003 Fall Conference Proceeding of the KSAE, No. 3, pp. 1373-1378, 2003.
6. Choi, J. P., Jung, E. S., Park, S. J. and Jeong, S. W., "Optimal Layout of Vehicle Pedals Depending on the Types and Positions of Vehicle Pedals", Journal of the ESK, Vol. 26, No. 4, pp. 91-101, 2007.
7. Kim, J. Y. and Seo, K. B., "The Effect of the Heel Rest on the Lower Leg Muscle Activity and Fatigue During Repetitive Pedaling", Journal of the KSPE, Vol. 24, No. 4, pp. 55-62, 2005.
8. Chang, B. C., Park, K. M., Ko, Y. J., Ro, Y. S. and Oh, S. Y., "A study mechanism for improvement of acceleration pedal force of commercial vehicles", 2009 Fall Conference Proceeding of the KSPE, pp. 469-470, 2009.
9. Lee, B. Y. and Lee, H. W., "Structural Analysis and Topology Optimization of an Automotive Pedal Arm Considering Qualification Test Specifications", Journal of the KOSME, Vol. 30, No. 5, pp. 562-571, 2006.
10. Cho, J. U. and Han, M. S., "Structural Strength Analysis of Shock Absorber", Transactions of the KSMPE, Vol. 9, No. 2, pp. 53-59, 2010.