

## 다이캐스팅용 알루미늄 합금 브레이크 페달의 내구성 해석

조승현<sup>a\*</sup>, 강슬기<sup>b</sup>, 김한구<sup>c</sup>

## Durability Analysis of Aluminum Alloy Brake Pedal Manufactured by Die Casting

Seunghyun Cho<sup>a\*</sup>, Seul-Ki Kang<sup>b</sup>, Hango Kim<sup>c</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University, 445, Gyeongin-ro, Guro-gu, Seoul 08221, Korea<sup>b</sup> KODACO Co., Ltd., 8, Sindae-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan, Chungnam-do, 31061, Korea<sup>c</sup> NEDEC Co., Ltd., 94-17, Saneop-ro 92Beon-gil, Gwonseon-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16643, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	31	March	2016
Revised	12	May	2016
Accepted	18	May	2016

## Keywords:

Brake pedal  
Al alloy  
Die-casting  
Durability

## ABSTRACT

Computer-Aided Engineering (CAE) durability analysis and experiments of an aluminum alloy brake pedal were carried out for the car lighter by die casting method. In the CAE analysis, KS standards and criteria of the Volvo Car Corporation were applied, and in the experiment, KS standards were applied. The CAE analysis results show that aluminum alloy brake pedals are stronger than the conventional steel brakes pedals because the yield strength of the aluminum alloy increased by almost 97% over that of steel. Further, the structures of the cylinder and the frame were reinforced with increasing thickness of flange and were changed to suit the die-casting process. Through a durability test based on the KS standard, the strength of a prototype of the aluminum alloy brake pedal was confirmed to be sufficient.

## 1. 서론

차량 사양의 고급화는 필연적으로 차량의 무게를 증가시키는 경향이 있으나 세계 각국의 환경규제로 인해 차량 고급화와 동시에 경량화를 위한 연구개발이 진행되고 있다. 자동차 부품의 경량화 연구는 80년대 이후 지속적으로 진행되고 있으며<sup>[1-4]</sup>, 카본복합재<sup>[5-7]</sup>, 알루미늄, 마그네슘 등과 같은 비철합금<sup>[8-10]</sup> 적용 등이 최근에 적극적으로 연구되고 있다.

대표적인 경량소재인 Al은 가벼운 무게로 인해 적용분야가 확대되고 있으나 기계적 특성의 제약으로 인해 개선해야 할 부분이 많다. 특히 낮은 연신율을 극복해야 할 기계적 특성이기 때문에 Mg를 적용하여 강도와 연신율을 동시에 증가시키는 Al-Mg 합금의

연구도 또한 진행되고 있다.

이러한 신소재 Al합금을 적용하여 본 논문에서는 브레이크 페달의 내구성 해석을 수행하였다. 본 논문에서 제시된 Al소재 브레이크 페달의 강도 우수성은 기 개발된 Al합금이 자동차 경량화를 위해 다양한 자동차용 전신재(wrought alloy)로 적용가능성을 보여주고 있다.

## 2. 본론

## 2.1 내구성 해석

Fig. 1은 미국 볼보사의 대형트럭에 적용되는 브레이크 페달의 어셈블리 모습과 실제 부분을 분석한 그림이다. 브레이크 페달은

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-2610-5191

Fax: +82-2-2610-5191

E-mail address: coolsh@dongyang.ac.kr (Seung Hyun Cho).

12 mm 두께의 중공형태 프레임과 실린더를 가지고 있다. 실린더와 페달은 프레스 단조, 절단 후 용접가공으로 접합되어 있다.

본 논문에서 브레이크 페달로 적용하고자 하는 Al합금은 고강도, 고신율 연계형 다이캐스팅용 Al합금으로써 단순합금화(Mg 첨가)가 아닌 복합합금(Mg+Al<sub>2</sub>Ca)이다. Al<sub>2</sub>Ca의 Al 합금에서의 작용으로 Al합금은 조직이 미세화되어 강도와 신율이 동시 향상되었다. Al합금은 중요한 첨가원소인 Mg의 산화성을 제어함으로써 Mg에 기인한 산화개재물로 기계적 특성이 낮아지는 것을 방지하였다. 특히 내산화성이 강한 Mg를 사용함으로써 Mg 함량을 5% 이상 함유하고, 기포결함을 제어함으로써 다양한 파생 소재 개발이 가능한 것이 특징이다. 이와 같은 알루미늄 합금을 다이캐스팅 공법으로 부품을 일체성형으로 제작함으로써 프레스, 용접, 절곡 등의 공정이 단순화하여 비용이 절감되고 부품 경량화와 리사이클링이 되는 브레이크 페달의 제조가 가능하였다. Fig. 2는 논문에서 사용한 Al합금의 응력-변형률 특성을 보여주고 있다.

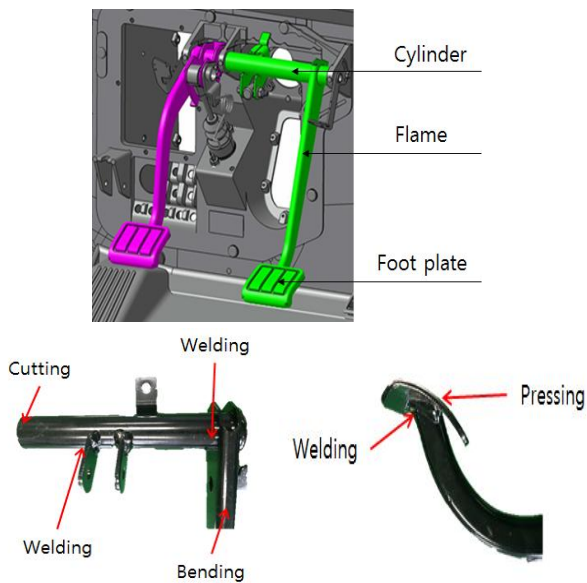


Fig. 1 Brake pedal of volvo heavy truck

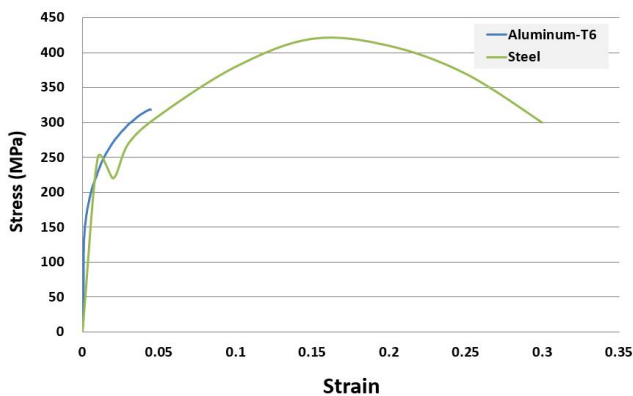


Fig. 2 Stress-strain property of Al alloy

Fig. 3(a), (b)는 각각 기존 볼보사의 스틸 브레이크 페달과 다이캐스팅 공법용 알루미늄 합금 브레이크 페달을 모델링한 그림이다. 알루미늄 합금 브레이크 페달은 금형간섭을 고려하여 발판의 형상을 그림과 같이 변경하였고, 실린더와 프레임을 중공형태에서 중실형태로 변경하였다. 또한, 프레임의 두께를 기존 스틸 브레이크의 12 mm에서 18 mm로 증가하였다. 이와 같은 디자인 변경을 통해서 스틸 브레이크 페달의 질량 1.14 kg을 0.84 kg으로 경량화하였다. 기존 스틸 브레이크 페달과 디자인 변경된 알루미늄 합금 브레이크 페달의 강도비교를 KS기준과 볼보사의 자체 기준에 따라 범용 소프트웨어인 MSC/Marc 2013을 사용하여 노드 8 개인 hexagonal 요소를 사용하여 정적(static) 해석을 수행하였다<sup>[11]</sup>.

Table 1은 브레이크 페달의 CAE해석에 사용된 스틸과 알루미늄 합금의 기계적 특성값이고, Table 2는 해석에 적용된 압력조건 기준으로 압력은 제시된 하중을 브레이크 페달 발판의 면적을 고려하여 재계산된 수치이다. 브레이크 페달 내구성 평가를 위한 KS의

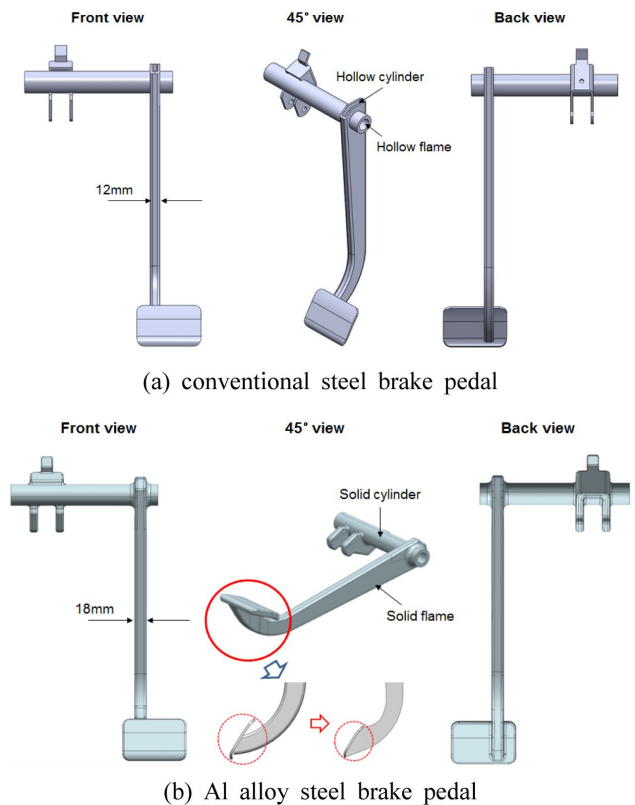


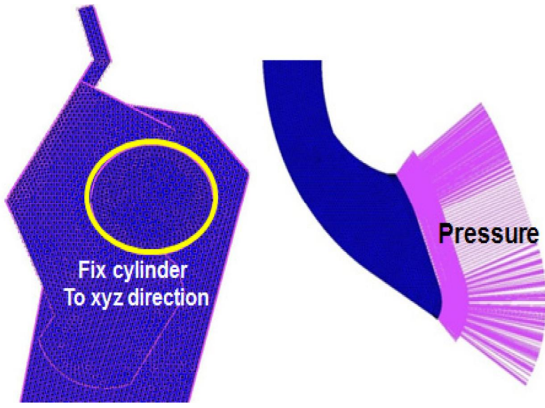
Fig. 3 Modeling of brake pedal

Table 1 Material properties of steel and Al alloy for brake pedal

Material	Density, Kg/m <sup>3</sup>	Elastic modulus, GPa	Yield strength, MPa	Fatigue strength, MPa	Poisson's ratio
Steel	7,872	205	285	-	0.29
Al alloy	2,700	68.9	276	96.5	0.33

**Table 2 Pressure conditions for durability analysis of brake pedal**

Model	Pressure, MPa	Standard
Conventional design (Steel)	0.19	KS
	0.14	
Optimized design (Al alloy)	0.28	Volvo
	0.41	
	0.83	

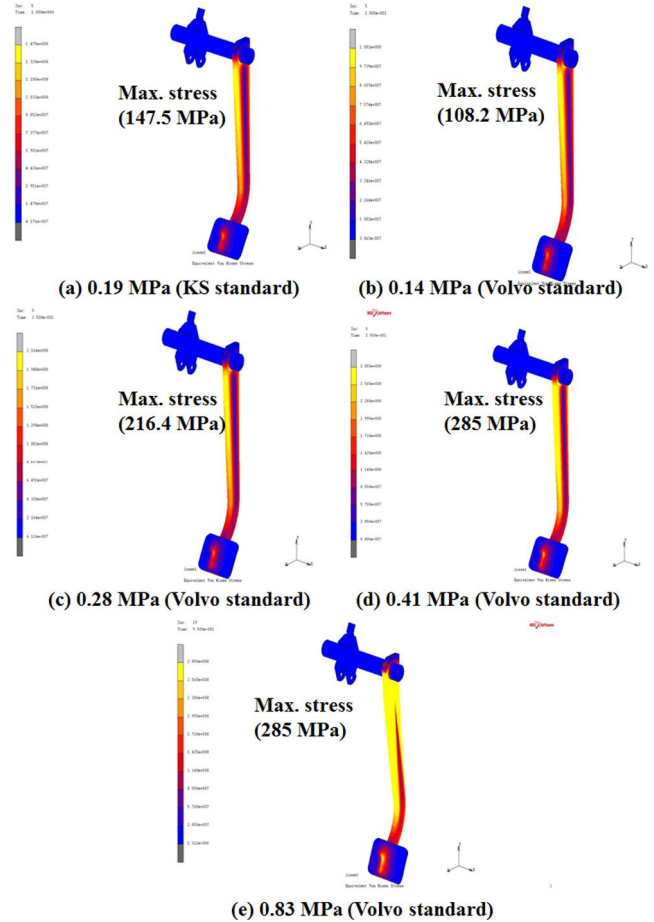


**Fig. 4 Boundary conditions of CAE simulation**

압력조건 기준은 0.188 MPa 하나지만 볼보사의 자체 기준은 0.138 MPa (볼보사 20 psi), 0.276 MPa (40 psi), 0.414 MPa (60 psi), 0.827 MPa (120 psi)의 4종류를 가했을 때 파손여부를 확인하도록 되어있는 것이 특징이다.

Fig. 4는 CAE해석을 위한 경계조건으로 브레이크 페달 프레임의 강도를 비교평가하기 위해 실린더는 고정하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 스틸 브레이크 페달과 알루미늄 합금 브레이크 페달에서 발생한 von Mises 응력 분포를 보여주는 그림이다. 응력은 실린더와 프레임의 접합부분에서 집중되고 프레임에서 상대적으로 높게 발생하였다. 스틸 브레이크 페달의 발판에서는 높은 집중응력이 발생하였으나 (Fig. 5 참조), 알루미늄 합금 브레이크 페달의 발판에서는 응력이 많이 완화되었다 (Fig. 6 참조). 스틸소재와 알루미늄 합금의 항복강도가 각각 285 MPa와 276 MPa임을 고려할 때 KS 기준으로는 모두 안정적인 탄성범위 내 응력이 발생하였는데 볼보사 기준에 따르면 스틸 브레이크 페달은 0.41 MPa과 0.83 MPa의 압력에 소성변형이 발생하였고 알루미늄 브레이크 페달은 0.83 MPa에서 소성변형이 발생하였다.

Fig. 7(a), (b)는 압력조건에 따라 브레이크 페달에서 발생한 최대 von Mises 응력과 최대 변위량을 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 기존 스틸 브레이크 페달에 비해 알루미늄 합금 브레이크 페달은 발생한 최대 von Mises 응력은 작고 변위량은 크게 발생하였다. 그러나 스틸 브레이크 페달의 소성변형으로 인하여 0.83 MPa의 압력에서 발생한 스틸 브레이크 페달의 최대



**Fig. 5 von Mises stress distribution of a conventional steel brake pedal under pressure on foot plate**

변위량은 46.38 mm로 0.41 MPa의 압력 시 발생한 변위량 5.644 mm에 비해 약 8배가 급증하여 알루미늄 합금 브레이크 페달의 최대 변위량인 15.02 mm보다 약 3.5배가 증가하였다. 이와 같은 CAE해석의 결과에 따라 스틸 브레이크 페달은 0.41 MPa 이상의 압력에서 급속한 소성변형과 함께 변위량이 증가하지만 알루미늄 합금 브레이크 페달은 상대적으로 안정적인 내구성을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

**2.2 실험**

Fig. 8(a)~(c)는 브레이크 페달의 파괴형태를 분석하기 위한 파괴실험의 시험조건과 파괴현상을 나타낸 그림이다. 브레이크 페달의 핀홀 판(pin hole plate)이 지지된 상태에서 파괴될 때까지 하중을 가하게 되면 Fig. 8(c)와 같이 실린더에서 45° 방향으로 크랙이 발생하였다. 이와 같은 현상을 CAE해석으로 규명하였는데 Fig. 9는 파괴실험과 동일한 경계조건을 보여주고 있다. 강체 모션(motion of rigid body)현상을 억제하기 위해 실린더의 양단을 축 방향으로 변위고정을 하였고 핀홀 판의 뒷면을 고정된 상태에서

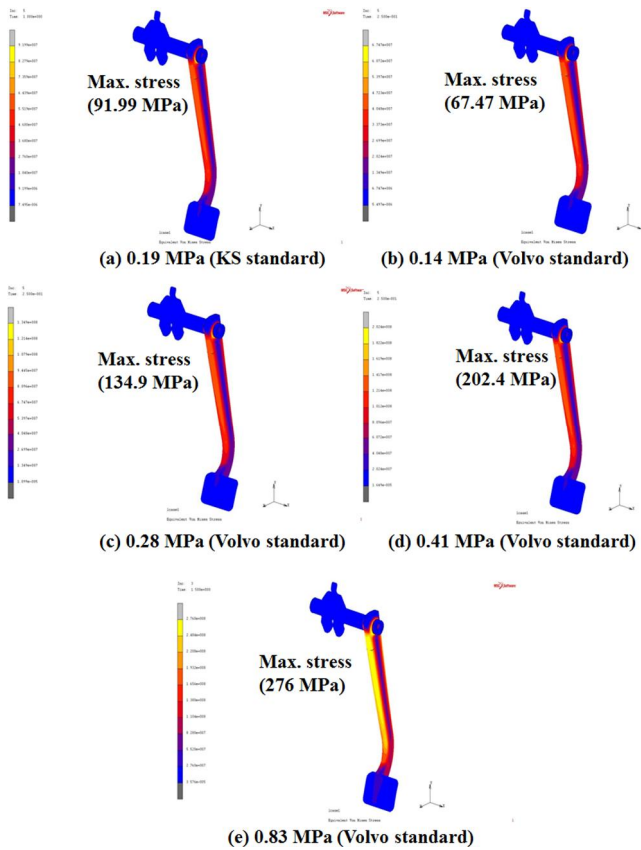
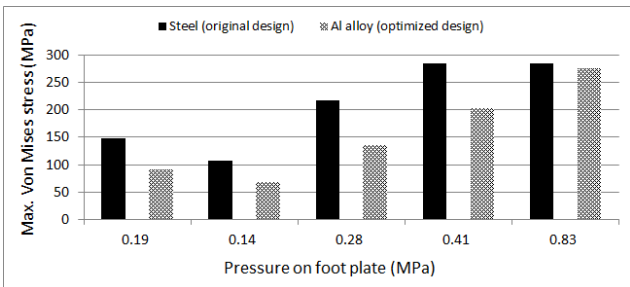
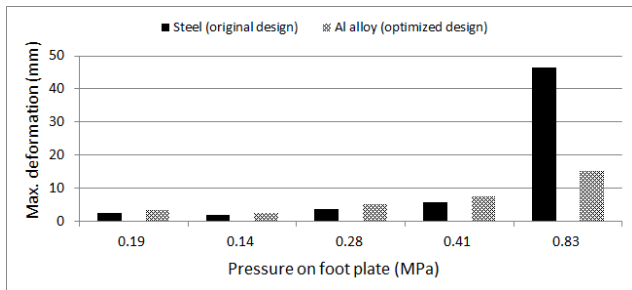


Fig. 6 von Mises stress distribution of an optimized Al alloy brake pedal under pressure on foot plate



(a) von Mises stress



(b) Deformation under pressure

Fig. 7 Maximum von mises stress and deformation of brake pedal as a function of pressure on foot plate

발판에 압력을 가하도록 하였다.

Fig. 10은 볼보사의 압력조건 중 하나인 0.41 MPa의 압력이 발

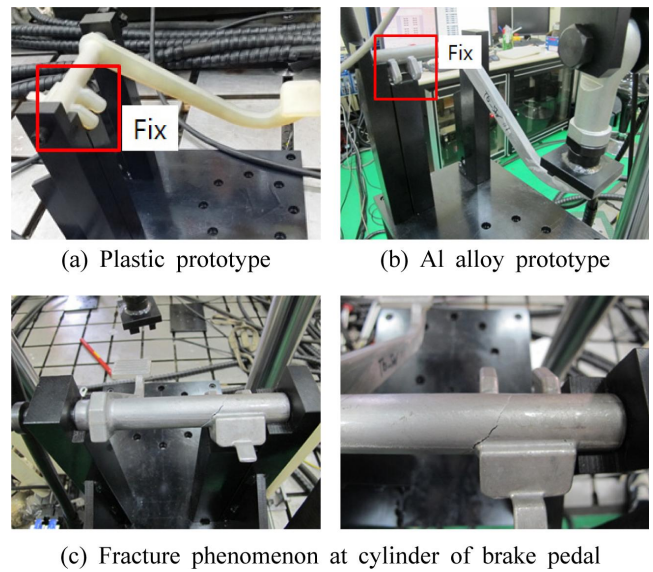


Fig. 8 Fracture experiment

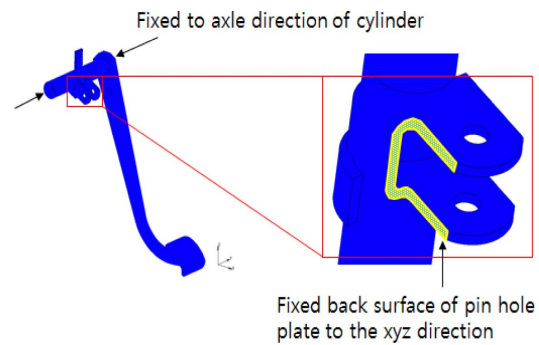


Fig. 9 Boundary conditions for fracture analysis of brake pedal

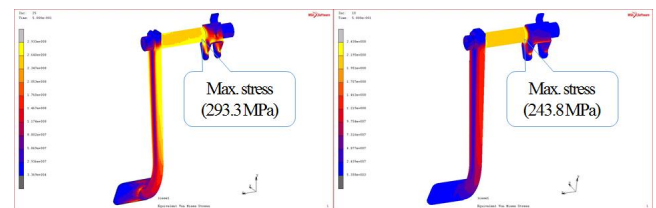


Fig. 10 Stress distribution of a brake pedal

판에 가해질 때 각각 스틸 브레이크 페달과 알루미늄 합금 브레이크 페달에서 발생한 von Mises 응력 분포를 나타낸 그림이다. 스틸 브레이크 페달과 알루미늄 합금 브레이크 페달에서 발생한 최대 von Mises 응력은 각각 293.3 MPa와 243.8 MPa이 발생하였고 실린더와 프레임의 접합위치에서 최대 응력이 발생하였고 응력분포가 Fig. 8의 파괴방향과 유사하게 비틀림 응력에 의한 파괴가 발생하고 있음을 의미한다.

본 논문에서는 브레이크 페달의 내구성 평가를 위해 공인인증기관인 한국산업기술시험원에 의뢰하여 KS기준으로 평가를 수행하였다. KS기준은 수직방향으로 600 N 하중을 가했을 때 브레이크

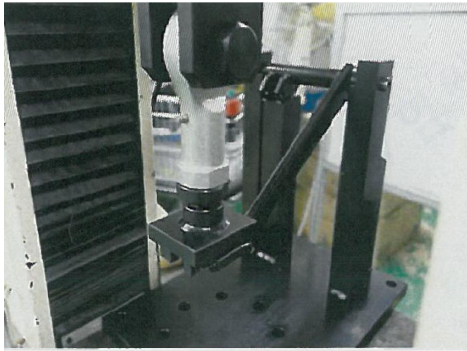
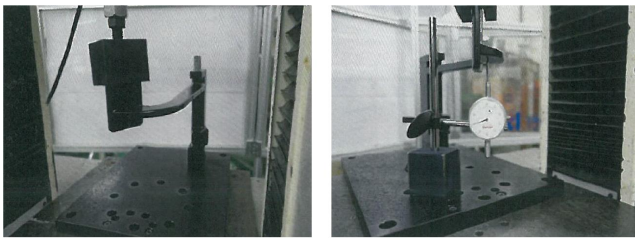


Fig. 11 Normal strength test



(a) Fracture (b) Displacement  
Fig. 12 Horizontal strength test

페달의 파손유무를 확인하는 것인데 Fig. 11은 수직강도를 평가한 사진으로 5톤 만능재료시험기(대경엔지니어링, 모델명: DUT-3000CM)를 사용하여 파손이 발생하지 않았음을 확인하였다. Fig. 12는 수평강성을 시험한 사진이다. 수평강성 평가는 수평방향으로 300 N 하중을 5회 반복 후 브레이크 페달의 변형량을 측정하고 파손여부를 확인하는 것이다. 본 논문에서는 방향으로 만능재료 시험기와 다이얼게이지(PEACOCK, 모델명 : 207S)를 사용하여 파손은 발생하지 않았고, 변형량은  $0.048 \pm 0.012$  mm으로 매우 작게 발생하였음을 확인하였다. Fig. 13은 파괴가 발생할 때까지 하중을 가해서 최대하중을 측정한 수직방향과 수평방향의 파단강도 시험 사진이다. 만능재료시험기를 사용하여 수직방향으로 5 mm/min의 속도로 압축하중을 가하여 브레이크 페달의 파손하중을 측정하였는데 최대 수직강도와 수평강도는 1,860 N, 수평강도 1,064 N으로 측정되었다.

Fig. 14는 이와 같이 개발이 완료된 알루미늄 합금 브레이크 페달의 개선된 효과를 나타낸 그림으로 절단, 절곡 등으로 제작된 부품을 용접한 스틸 브레이크 페달이 다이캐스팅공법으로 일체화되었고 무게도 약 26% 감소하였다.

### 3. 결론

본 논문에서는 자동차 경량화와 다이캐스팅공법을 위한 알루미늄 합금 브레이크 페달의 내구성 CAE해석과 실험을 수행하였다. CAE해석은 KS기준과 볼보사 기준을 함께 적용하였고, 실험은



(a) Normal strength (b) Horizontal strength

Fig. 13 Fracture test

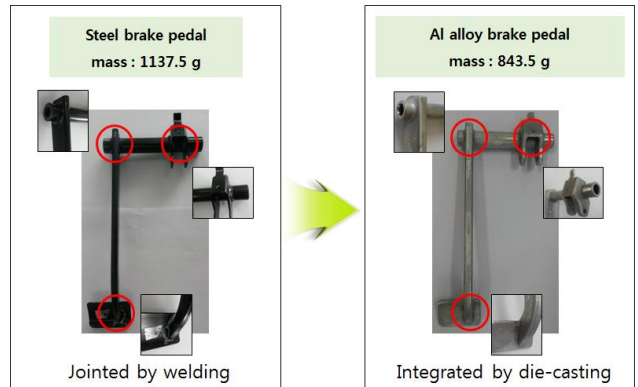


Fig. 14 Weight reduction and simplified manufacturing process by die-casting and Al alloy brake pedal

KS기준을 적용하였다. CAE해석 결과에 의하면 기존 스틸 브레이크 페달보다 알루미늄 합금 브레이크 페달이 우수한 강도를 나타내었는데, 이것은 알루미늄 합금의 항복강도가 기존 스틸대비 97% 만큼 개선되었고, 실린더와 프레임이 다이캐스팅공법에 적합하도록 변경되면서 구조가 보강되었기 때문이다.

알루미늄 합금 브레이크 페달의 시제품은 내구성시험을 통해 KS기준을 충분히 만족할 만큼 강도가 확보되었음을 확인하였다. 이와 같은 연구결과를 바탕으로 경량화와 제조공정 단축을 통한 제조비용 절감을 위해 다양한 자동차 전신재(wrought alloy) 부품으로 연구개발을 확대할 예정이다.

### 후 기

이 연구는 지식경제 기술혁신사업(글로벌전문기술개발사업)의 지원으로 수행되었음 [과제번호: 10044655, 과제명: 전신재(wrought alloy)부품 대체를 위한 다이캐스팅용 합금 및 공정기술 개발].

### References

[1] Choi, B. S., Lee, D. Y., Jin, C. K., 2013, Study of Plastic Deformation of Steel Wire for Weight Reduction of Automotive Weather Strip, The

- Korean Society of Automotive Engineers, 21:5 82-86.
- [2] Park, J. -H., Kim, K. J., Yoon, J. -G., 2013, Light-weight Design of Automotive Spring Link Based on Computer Aided Engineering, The Korean Society of Automotive Engineers, 21:5 157-161.
- [3] Kim, Y. S., Kim, I. K., Tark, J. H., Kim, D. S., 1999, A Study of Light Weight of Tie Rod End in Auto Supplies, The Korean Society for Power System Engineering, 3:3 70-75.
- [4] Cho, J. G., Koo, J. S., Jun, H. S., 2013, A Weight-reduction Design Method by Underframe Material Substitution in a Box-type Bodyshell with Cut-outs, The Korean Society of Automotive Engineers, 21:2 45-54.
- [5] Jin, S. G., Park, D. H., Lee, G. S., Kim, C. W., 2013, Material Optimization of BIW for Minimizing Weight, The Korean Society of Automotive Engineers, 21:4 16-22.
- [6] Park, K. S., Kong, C. D., Park, H. B., 2015, Structural Design of Light Weight Natural Fiber Composites for Next Generation Automobile Bonnet, Composites Research, 28:2 46-51.
- [7] Kim, K. S., KBae, K. M., Oh, S. Y., Seo, M. K., Kang, C. K., Park, S. J., 2012, Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles, *Elastomers and Composites*, 47:1 65-75.
- [8] Kim, G. J., Lim, J. H., Park, J. H., Choi, B. I., Lee, J. W., Kim, Y. J., 2012, Light-weight Design of Automotive AA6061 Rear Sub-frame Based on CAE Simulation, The Korean Society of Automotive Engineers, 20:3 77-82.
- [9] Park, S. C., Shin, K. S., 1996, Mg Alloys for Weight Reduction of Automobiles, *Bulletin of the Korean Inst. of Met & Mat*, 9:2 160-171.
- [10] Sanji, K., 1995, Automobile Weight Reduction and Quality Improvement of Al-Alloy Castings, *Korean Foundrymen's Society*, 15:2 127-137.
- [11] MSC/MARC, 2013, MSC/MARC User's Manual Volume A, MSC Software Corporation.