http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2016.25.2.138

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2283-4846(Online) / ISSN 2233-6036(Print)

자동차 경량화를 위한 다이캐스팅용 알루미늄합금 브레이크 페달의 강도해석

조승현[a*], 장준영[a]

Strength Analysis of Die-cast Aluminum-alloy Brake Pedals for use in Lightweight Cars

Seunghyun Cho[a*], Junyoung Jang[a]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University, 445, Gyeongin-ro, Guro-gu, Seoul 08221, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 31 March 2016
Revised 13 Arpil 2016
Accepted 14 Arpil 2016

Keywords:
Brake pedal
Al alloy
Die-casting
Strength
Light car

ABSTRACT

In this study, a strength analysis was performed to assess die-cast aluminum alloy brake pedals as an improved alternative to wrought alloys. Aluminum brake pedal shapes are considered to be suitable for the die-casting process. The strength criterion of Volvo trucks was used as the criterion for the pedal strength. The results of this analysis showed that the frame thickness of the aluminum brake pedal must be increased from 12 mm to 18 mm to have a strength superior to that of a steel brake pedal. Additionally, the stress and weight of the aluminum brake pedal were found to be approximately 24% and 26% lower than those of the steel brake pedal, respectively. Mounting tests and strength assessments verified that the proposed die-cast aluminum alloy brake pedal demonstrated sufficient strength.

1. 서 론

최근 자동차산업 분야는 경량화 기술개발에 기업의 명운이 달려있다고 해도 과언이 아닐 만큼 많은 연구개발을 진행하고 있다. 이것은 국제 환경규제 강화와 연비규제 뿐만 아니라 에너지 자원의 불안정한 가격 등으로 자동차 연비향상 기술이 핵심적인 자동차의 차별화 기술로 인식되기 때문이다. 그러나 안전성, 편의성, 감성을 갖춘 차량의 수요로 차량의 무게가 증가하는 추세로 최근 20년간(1990~2010) 연간 평균 15 kg씩 무게가 증가하였다. 세계 각국의 연비와 환경규제를 만족시켜야 할 뿐만 아니라 자동차 무게는 연비 효율, 주행저항 감소, 승차감, 제동성 등에 가장 큰 영향을 미치는 핵심설계 항목이기 때문에 경량화 기술개발은 매우 중요하다. 차량 무게를 줄이기 위한 연구는 1980년대부터 지속적으로 진행되어 왔다. 자동차 부품의 경량화 연구는 꾸준히 이루어지는데[1-4], 최근에는 CFRP와 같은 경량 복합소재의 적용[5-7], 철강재를 대체하는 알루미늄, 주물, 마그네슘 등의 비철합금의 연구[8-10], 제조공법의 변경을 통한 경량화 연구[11,12] 등이 활발하게 이루어지고 있다. 특히, 자동차 경량화를 위해서는 Al의 적용이 활발하게 연구되고 있는데 기존 Al은 강도 및 신율 특성 저하 등으로 적용할 수 있는 부품에 제한이 있으며 경량화율이 낮아 허용 가능한 가격 절감에 한계가 있다. 또한, Al의 연신율을 향상시키기 위해 Mg을 첨가하는 것은 산화와 발화로 Al의 품질 저하와 그에 따른 용탕관리의 어려움이 크고 성형성이 저하되는 문제로 Mg의 첨가 비율이 제한적이다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해 국내에서는 Al_2Ca를 ppm 단위로 제어한 내산화성이 강한 Mg을 Al에 사용하여 강도-연신율의 동반제어가 가능한 Al합금이 개발

* Corresponding author. Tel.:+82-2-2610-5191
Fax: +82-2-2610-5191
E-mail address: coolcsh@dongyang.ac.kr (Seunghyun Cho)

된 바 있다. 이러한 신소재 Al합금을 적용하여 본 논문에서는 브레이크 페달의 강건설계를 연구하였다. 본 논문에서 제시된 Al소재 브레이크 페달의 강도 우수성은 기 개발된 Al합금이 자동차 경량화를 위해 다양한 자동차용 전신재(wrought alloy)로의 적용 가능성을 보여주고 있다.

2. 시뮬레이션

2.1 스틸 브레이크 페달 강도해석

기존 스틸 소재 브레이크 페달의 현 수준을 파악하기 위해 미국 볼보사의 대형트럭에 적용되는 브레이크 페달을 시뮬레이션 강도해석을 수행하였다. Fig. 1(a)~(c)는 브레이크 페달을 분석한 그림으로써 브레이크 페달은 12 mm 두께의 중공형태 프레임과 실린더를 가지고 있다. 실린더와 페달은 그림과 같이 프레스 단조, 절단 후 용접가공으로 접합되어 있다. 브레이크 페달은 Fig. 2(a)~(c)과 같이 3차원 스캐너를 이용한 형상데이터를 기초로 하여 Fig. 3(a), (b)와 같은 형상모델링한 후 CAE 해석을 위한 8절 hexagonal 메쉬를 사용하였다. 프레임 형상설계를 위해 실린더를 x, y, z방향으로 고정한 상태에서 수직방향 하중으로 600 N의 힘을 면압 0.188 MPa로 변환하였고, 수평방향 하중으로 300 N의 힘을 면압 2.5 MPa로 변환하여 각각 발판에 수직방향과 수평방향으로 가하였다.

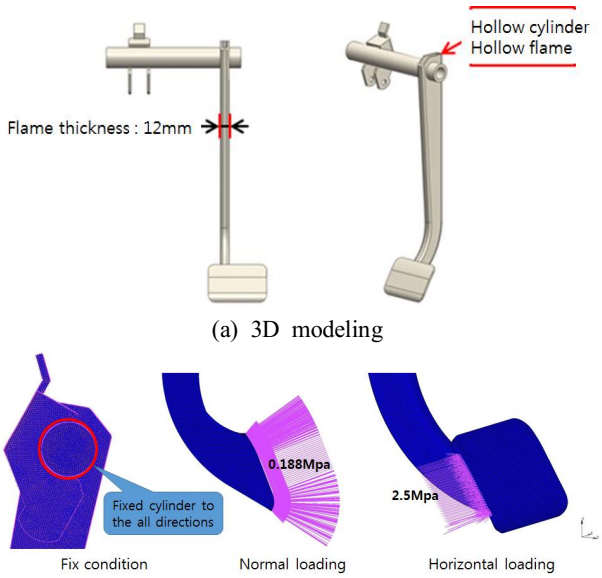
Fig. 4는 범용 소프트웨어인 MSC/Marc 2013을 사용하여 기존 스틸 브레이크 페달에 600 N의 하중을 발판에 균일하게 가했을 때 발생한 von Mises 응력 분포와 300 N의 하중을 발판의 측면에 가했을 때 발생한 변위량 분포를 나타낸 그림으로써 발생한 최대 응력과 변위량은 각각 147.5 MPa과 4.12 mm이다. 실린더와 프레임의 용접 연결위치와 프레임 전면부, 페달과 프레임의 용접부에 응력이 집중되는 것을 알 수 있다[13]. CAE 해석에 적용된 스틸은 AISI 1006소재로 탄성계수는 205 GPa, 항복강도는 285 MPa, 포아송비는 0.29이다.

(a) Foot plate (b) Cylinder and flange (c) Flange

Fig. 1 Welding joining in brake pedal of Volvo heavy truck

(a) Front view (b) Back view (c) 45° view

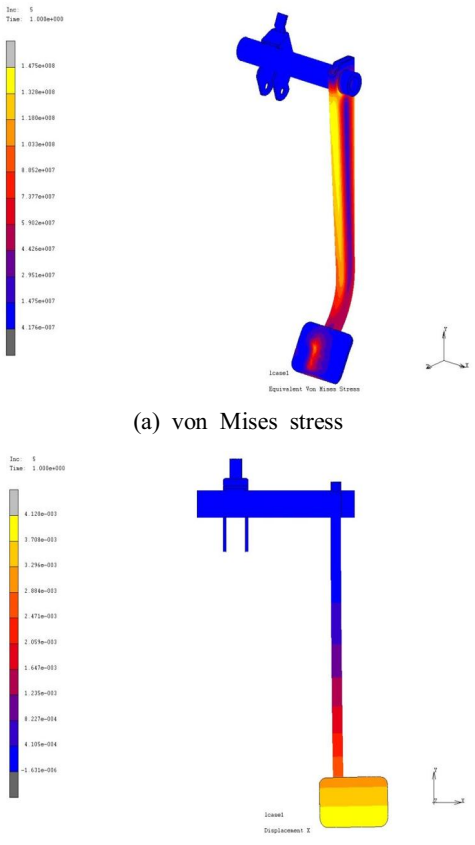
Fig. 2 Three dimensional scanning for reverse design



(a) 3D modeling

(b) Boundary conditions for CAE analysis

Fig. 3 Modeling for CAE analysis



(a) von Mises stress

(b) Displacement to the horizontal direction

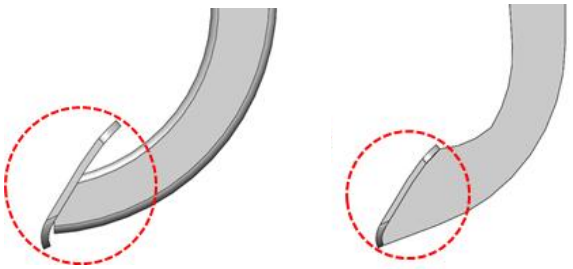
Fig. 4 Strength analysis results of conventional steel brake pedal

3. 고 찰

3.1 강도해석

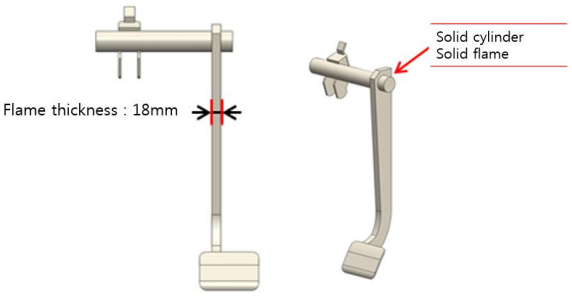
본 논문에서 브레이크 페달로 적용하고자 하는 Al합금은 고강도, 고신율 연계형 다이캐스팅용 Al합금으로서 단순합금화(Mg 첨가)가 아닌 복합합금(Mg+Al2Ca)이다. Al2Ca의 Al합금에서의 작용으로 Al합금은 조직이 미세화하여 강도와 신율이 동시에 향상되었다. Al합금은 중요한 첨가원소인 Mg의 산화성을 제어함으로써 Mg에 기인한 산화개재물로 기계적 특성이 낮아지는 것을 방지하였다. 특히 내산화성이 강한 Mg을 사용함으로써 Mg 함량을 5% 이상 함유하고, 기포 결함을 제어함으로써 다양한 파생 소재 개발이 가능한 것이 특징이다. Fig. 5는 논문에서 사용한 Al합금의 응력-변형률 특성을 보여주고 있다. Al합금의 탄성계수는 68.9 GPa, 항복강도는 226 MPa, 포아송비는 0.33이다.

알루미늄합금을 적용한 브레이크 페달을 다이캐스팅 공법으로 제작하기 때문에 기존 브레이크 페달의 발판 형상은 Fig. 5(a)와 같이 금형간섭의 문제가 있어 간섭이 발생하지 않는 Fig. 5(b)와 같이 변경하여 금형문제를 해결하였고, 강도를 고려하여 프레임의 두께는 Fig. 6(a)와 같이 18 mm로 하였으며 금형공정을 고려하여 Fig. 6(b)와 같이 중공형태인 실린더와 프레임을 내부가 채워져 있는 중실형태로 변경하였다. 이와 같이 형상을 변경한 브레이크 페달을 동일한 하중 600 N이 가해졌을 때 발생한 응력이 112 MPa로 기존 스틸소재 대비 약 24%가 감소하였고 무게는 0.84 kg으로 기존 스틸 브레이크 페달(1.14 kg) 대비 약 26%의 경량화를 달성하였다. Fig. 7은 600 N의 수직하중이 발판에 가해질 때 발생한 최대 von Mises 응력과 300 N의 수평방향 하중이 발판의 측면에 가해질 때 발생한 변위량을 브레이크 페달의 프레임 두께변화에 따라 표시한 그림으로서 프레임 두께는 12 mm, 13 mm, 14 mm, 18 mm, 22 mm, 24 mm로 6종을 해석하였다. 동일한 조건에서



(a) Conventional foot plate (b) New foot plate

Fig. 5 Shape of foot plate change for die-casting process



(a) Flame thickness (b) Structure of cylinder and flame

Fig. 6 Shape of new aluminum-alloyed brake pedal for die-casting proces

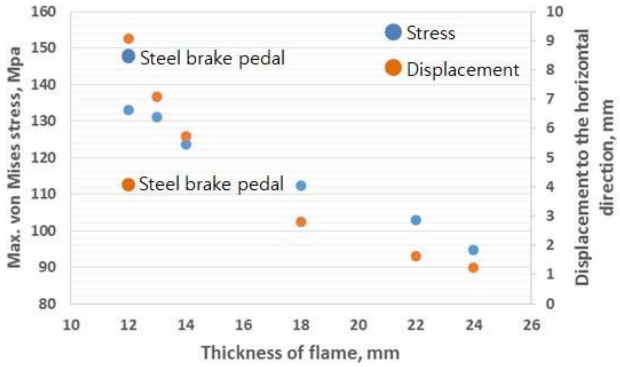
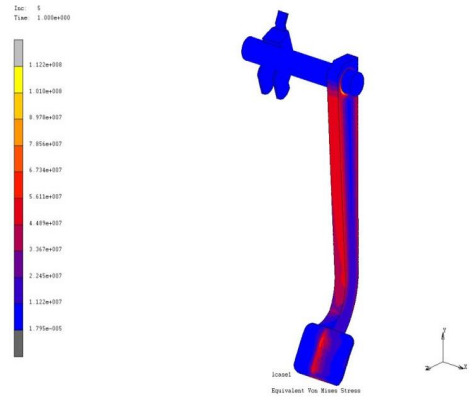
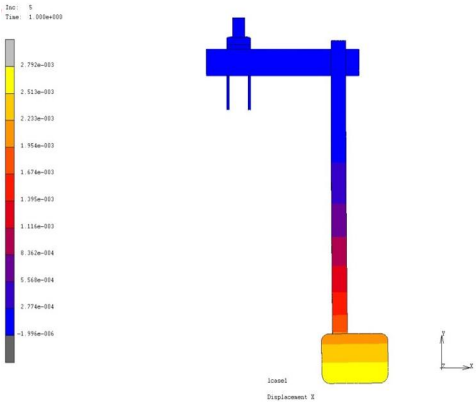


Fig. 7 Maximum von Mises stress and displacement to the horizontal direction of Al brake pedal as a function of thickness of flame



(a) von Mises stress



(b) Displacement to the horizontal direction

Fig. 8 Strength analysis results of Al brake pedal

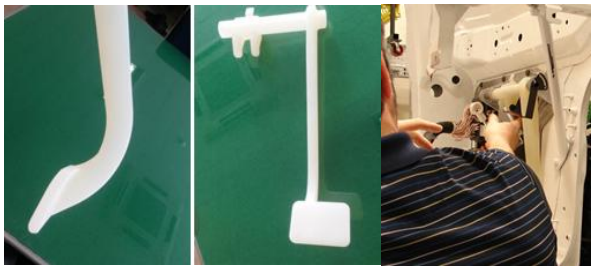
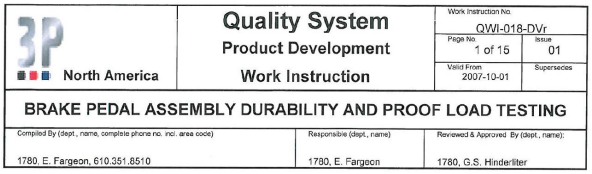
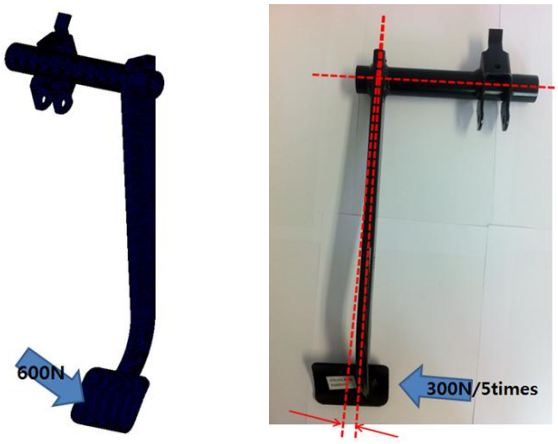


Fig. 9 Rapid prototype manufacturing and interference test for volvo heavy truck



(a) Test standard of Volvo truck



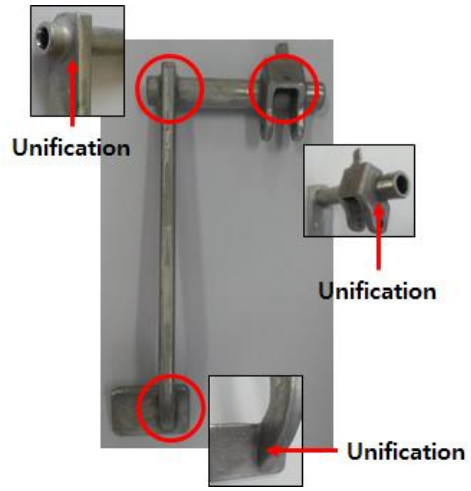
(b) Normal strength (c) Horizontal strength

Fig. 10 Test method of normal and horizontal strength for volvo heavy truck

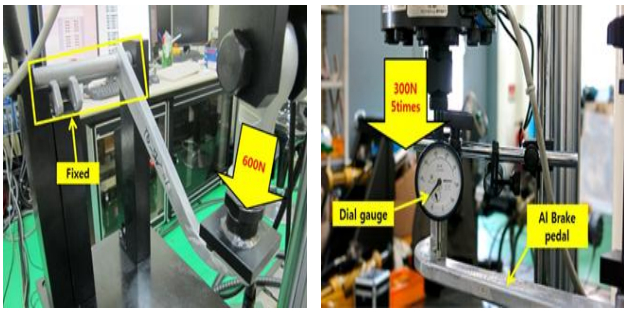
스틸 브레이크 페달에서 발생한 최대 von Mises 응력과 수평방향 변위량이 각각 147.5 MPa과 4.12 mm인데 Al 브레이크 페달 프레임의 두께가 18 mm로 스틸 브레이크 페달과 동일할 때 발생한 최대 von Mises 응력과 수평방향 변위량이 각각 112 MPa과 2.8 mm로 기존 스틸 브레이크 페달보다 모두 우수한 강도를 확보한 것으로 판단되어 프레임 두께는 18 mm로 결정하였다.

3.2 강도 실험

Fig. 9는 CAE 해석을 통해 결정된 브레이크 페달의 실차 장착성을 평가한 그림으로서 플라스틱 프로토 타입을 제작하여 볼보트럭에 장착하여 문제가 없음을 확인하였다. 실차 장착 평가를 마친 후 Al 브레이크 페달의 시제품을 제작하였으며 자동차부품연구원에서 볼보사의 브레이크 페달 평가기준에 따라 강도와 변위량을 실험하였다. Fig. 10(a)~(c)는 각각 볼보사가 자체적으로 시행하는



(a) Prototype of Al brake pedal



(b) Fracture by normal force of 600 N (c) Displacement by horizontal force of 300 N 5 times

Fig. 11 Fracture and displacement test with prototype of Al brake pedal

브레이크 페달의 수직강성과 수평강성을 평가하는 기준으로 수직강도는 600 N의 하중을 발판에 가했을 때 파괴현상이 발생하지 않아야 하고, 수평강성은 발판의 수평방향으로 300 N의 하중을 5회 가했을 때 변위량이 8 mm 이하가 되어야 한다. Fig. 11은 실차 평가를 보여주고 있는데 600 N의 수직하중 평가에서 크랙이나 균열과 같은 파괴현상이 발생하지 않았으며, 300 N의 수평하중을 5회 반복적으로 가했을 때 발생한 변형량은 0.03 mm로 매우 작은 수치이며 볼보사의 평가기준을 충분히 만족하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 자동차 경량화와 다이캐스팅 공법으로 전신재 부품 제작을 위해 개발된 알루미늄합금으로 브레이크 페달을 개발하기 위한 강도해석을 수행하였다. 기존 스틸 브레이크 페달을 3차원 스캐너를 이용한 역설계로 모델링한 후 CAE 해석을 함으로써 현 수준을 파악하고 스틸 브레이크 페달 대비 우수한 알루미늄 브레이크 페달의 구조를 제시하였다. 이때 다이캐스팅 공법에 적합한 형

상을 고려하였는데, 중공형태로 되어있던 브레이크 페달의 실린더와 프레임을 중실형태로 변경하였고 발판의 형상도 변경하였다. 강도해석을 위해 적용 차량인 볼보 트럭의 강도기준인 600 N 수직하중과 300 N의 수평하중을 각각 적용하였으며 스틸 브레이크 페달보다 우수한 강도와 변형량을 갖도록 알루미늄 브레이크 페달의 프레임 두께를 기존 12 mm에서 18 mm로 증가시켰다. 해석결과에 의하면 알루미늄 브레이크 페달의 응력은 스틸 브레이크 페달 대비 약 24% 감소하였고 무게는 약 37% 경량화 되었다. 강도해석을 통해 설계된 브레이크 페달은 플라스틱 프로토 타입으로 제작하여 실차의 장착테스트를 거쳐 시제품으로 제작된 후 실험을 함으로써 디자인과 강도해석의 적절성을 확인하였다. 이와 같은 연구결과는 다이캐스팅 공법과 강도가 향상된 알루미늄합금으로 다양한 자동차 부품을 제조할 수 있음을 시사하고 있으며 향후 다양한 관련 연구가 진행될 것으로 예상된다.

후 기

이 연구는 지식경제 기술혁신사업(글로벌전문기술개발사업)의 지원으로 수행되었습니다 [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. W., Park, D. D., Lee, G. S., Kim, C. W., Yang, H. W., Kim. D. S., Choi, D. H., 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., Bae, K.-M., Oh, S.-Y., Seo, M.-K., Kang, C.-G., Park, S.-J., 2012, Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles, Elastomers and Composites, 47:1 65-75.

[8] Kim., G. J., Im, 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] Kitaoka, S., 1995, Automobile Weight Reduction and Quality Improvement of Al-alloy Castings, Journal of Korea Foundry Society, 15:2 127-137.

[11] So, S.-W., Hwang, H. T., Lee, J. H., Choi, H. W., 2011, Development of Automotive Lower Arm using Hybrid Manufacturing Process, KSMTE, 20:2 214-218.

[12] Kim, E. S., 2012, A Study of Optimal Design for Mg Armrest Frame by using Response Surface Method, KSMTE, 20:5 797-804.

[13] MSC/MARC, 2013, MSC/MARC User's Manual Volume A, MSC Software Corporation.