

탈착식 자전거 캐리어용 흡착 패드의 실험 및 전산적 방법을 활용한 구조해석

서영성¹*, 임근원²

¹한남대학교 기계공학과, ²아이앤엠(주)

Structural Analysis of a Suction Pad for a Removable Bike Carrier using Computational and Experimental Methods

Yeong Sung Suh¹*, Geun Won Lim²

¹Department of Mechanical Engineering, Hannam University

²CEO, INM, Co., Ltd.

요약 자동차에 부착하여 사용하는 자전거 캐리어 지지용 흡착 패드는 운행 중 임의의 진동과 원심력과 같은 과도한 동적 하중을 받을 수 있어, 구조 안전성의 검토가 중요하다. 이를 위해서는 유체-구조 연계 유한요소해석을 이용하여 패드의 하부 압력이 패드에 가해지는 하중이나 모멘트의 변화에 따라 실시간으로 변화하는 것을 고려하여야 하나, 실제 상황의 모델링이 어렵고 계산을 위한 소프트웨어 비용이 높은 단점이 있기도 하지만, 정확한 결과를 얻기도 어렵다. 따라서 이 논문에서는 실험과 전산적인 방법을 조합하여 활용하는 새로운 방법을 제시한다. 이는 변화하는 하중에 따라 패드 하부의 압력과 접촉 면적을 실시간으로 측정하고 여기서 얻어진 데이터를 비선형 탄성 유한요소해석에 입력하여 활용하는 방법이다. 개발 단계의 제품 형상으로 실험 및 계산을 수행한 결과, 마운트 패드는 축 방향 하중에 대해서는 비교적 안전하나, 회전 하중이 과도하게 작용할 경우 패드가 바닥으로부터 분리되거나 패드 표면에 국부적인 손상이 일어날 수 있어 안전 여유가 많지 않음을 보여주었다. 작용하는 하중의 크기 및 형태에 따라 변화하는 접촉 거동을 예측하는 결과는 실험 결과와 잘 일치하였다. 본 연구에서 제안하는 해석 방법은 유사한 흡착 패드 시스템을 설계할 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다.

Abstract As the suction pad-supporting bike carrier attached to a car may be subject to an excessive dynamic load due to random vibrations and centrifugal forces during driving, its structural safety is of great concern. To examine this, the finite-element method with a fluid-structure interaction should be used because the pressure on the pad bottom is changed in real time according to the fluctuations of the force or the moment applied on the pad. This method, however, has high computing costs in terms of modeling efforts and software expense. Moreover, the accuracy of computation is not easily guaranteed. Therefore, a new method combining the experiment and computation is proposed in this paper: the bottom pressure and contact area of the pad under varying loads was measured in real time and the acquired data are then used in the nonlinear elastic finite-element calculations. The computational and experimental results obtained with the product under development showed that the safety margin of the pad under the axial loading is relatively sufficient, whereas with an excessive rotational loading, the pad is vulnerable to separation or a local surface damage; hence, the safety margin may not be secured. The predicted contact behavior under the variation of the magnitude and type of the loading were in good agreement with the one from the experiment. The proposed analysis method in this study could be used in the design of similar vacuum pad systems.

Keywords : Computational and experimental methods, Nonlinear elastic finite-element methods, Structural analysis, Structural safety, Suction pad with a vacuum pump

본 논문은 2014년도 산업통상자원부 지역특화산업육성사업(R003096)의 지원을 받은 연구 결과의 일부임.

*Corresponding Author : Yeong Sung Suh(Hannam Univ.)

Tel: +82-42-629-7999 email: suhy@hnu.kr

Received November 23, 2015

Revised (1st January 21, 2016, 2nd February 15, 2016)

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

1. 서론

최근 들어 여가 활동에 자전거의 활용이 급증하면서, 자전거를 자동차에 적재하여 장거리를 이동하는 경우가 많아지고, 자전거 캐리어(carrier)의 수요도 늘어나게 되었다. 자전거를 자동차에 적재하는 방법에는 오랫동안 사용되어 오던 고정식 루프 랙(roof rack)이 있지만, 진공펌프 및 패드를 활용하여 사용자가 캐리어를 수월하게 탈 부착할 수 있게 만든 탈착식 진공 마운트 모델도 있으며 이러한 유형에는 주로 미국에서 유통되고 있는 씨씨커(SeaSucker)라는 제품이 있다. 이 유형의 모델은 사용이 간편하고, 자동차의 미관을 해치지 않는 장점이 있으나 장시간 운전 중 지속되는 자동차의 진동이나 선회할 때 발생하는 원심력에 의하여 돌발적으로 탈착될 수 있는 가능성을 배제할 수 없으므로, 이러한 점을 고려하여 진공펌프식 흡착 마운트를 장착한 탈착식 자전거 캐리어에 무선 경보장치를 부착하여 캐리어 패드 바닥 아래의 음압이 강하여져 탈착이 될 가능성을 알려주고, 또한 진동, 바람이나 원심력 등의 횡하중에 의해 예기치 않은 탈착이 일어나지 않도록 구조적 디자인을 개선한 제품을 국내에서 개발하는 중에 있다. 본 연구에서는 이 제품을 개발하는 과정에서 유한요소법을 활용한 전산적 방법과 실험적 방법을 병합하여 진공 흡착 마운트 패드에 대한 구조 안전성을 검토하였다. 흡착 패드에 걸리는 하중이 변화함에 따라 패드 바닥 아래의 진공에 의한 음압이 변화하는데, 흡착 패드에 대하여 유한요소해석을 수행한 기존 연구에서는 패드에 가해지는 하중에 따른 진공압의 변화를 고려하지 않고 패드의 변형 거동을 예측하였다[1-3]. 유체-구조 연성해석이 아닌, 비선형 탄성 유한요소법만으로는 패드 바닥 아래의 진공압의 변화에 따라 실시간으로 변동하는 패드의 접촉 면적을 고려한 실제적 응력 변화를 예측할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 먼저 실험을 통하여 패드에 가해지는 하중에 따라 변화하는 패드 바닥 아래의 진공 압력의 변화와 이에 따른 접촉 면적의 변화를 측정하고, 이 데이터를 활용하여 축하중 및 모멘트 하중을 받는 마운트 패드에 대한 새로운 구조해석 방법을 제시하고, 개발 중인 자전거 흡착 마운트 패드의 구조 안전성을 확인하였다.

2. 접근 방법

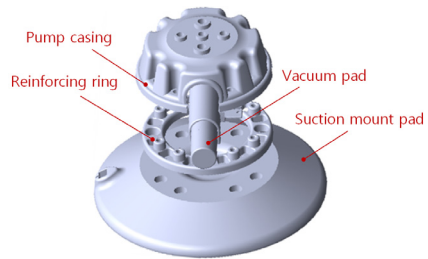


Fig. 1. Vacuum-suction mount pad assembly

탈착식 자전거 캐리어 마운트는 Fig. 1에 나타낸바와 같이 진공 흡착 패드(vacuum pad)의 중앙부에 진공펌프를 장착하고, 내부에 있는 공기를 외부로 배출시켜 패드 바닥에서 진공상태를 형성함으로써 마운트를 고착시키는 구조로 설계되어있다. 패드 내부에는 알루미늄 강화링(reinforcing ring)을 삽입하여 보다 높은 강성도를 갖도록 강화하였다. 자전거를 장착하여 운송하는 중에는 자전거에 대한 풍압, 가속도 및 원심력에 의한 횡 하중에 의한 모멘트를 주로 받으나, 흡착 마운트의 설계 관례상 우선 수직 축 하중에 대한 해석을 수행하고, 추가로 모멘트 하중을 부가하여 흡착 패드의 구조 안전성을 검토하였다. 흡착되어 있는 마운트 패드에 인장력이나 모멘트를 작용시켜 패드 아래의 공간을 확장시키면 음압의 크기가 증가한다. 이것을 즉각적으로 계산하려면 유체-구조 해석을 수행하여야하는데, 매우 많은 시간과 노력이 들기도 하지만 예측의 정확도도 확보하기 어려우므로, 하중의 변화에 따른 음압의 변화 데이터는 별도로 실험을 수행하여 압력 - 비접촉 투영 면적 - 축력 또는 모멘트의 관계를 확보하고, 상업용 음함수(implicit) 유한요소해석 프로그램인 Abaqus/Standard 6.14[4]를 활용하여 정적 비선형 탄성 유한요소해석을 수행하였다. 변동 하중에 의한 진공 압력을 정확히 측정하기 위하여 UTM 및 본 연구에서 개발한 경보장치의 실시간 압력 측정 모듈을 활용하였다. 압력 측정을 위한 측정 프레임도 제작하였다.

3. 실험

3.1 실험 장비 설계 및 제작

변화하는 축 하중 또는 횡 하중에 따라 마운트 패드에 걸리는 진공 압력 및 비접촉 투영 면적을 측정하기 위해서, Fig. 2에 보인 바와 같은 프레임을 설계하고 제작하

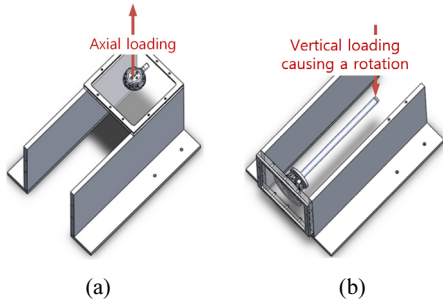
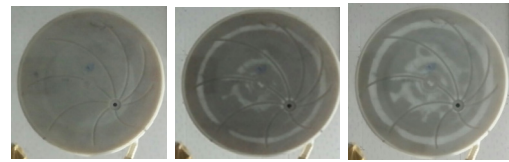


Fig. 2. Experimental setup for (a) axial and (b) rotational loading.

였다. 축 하중은 UTM으로 가하였으며, 패드에 모멘트를 일으키기 위한 자유단 수직 하중은 상대적으로 허용 하중이 작으므로, 여러 개의 무거운 추를 이용하여 가하였다. 비접촉 투영 면적을 관찰하기 위하여 투명한 아크릴 판 위에 흡착 패드를 부착할 수 있도록 설계하였다.

3.2 실험 결과

우선 흡착 패드에 하중을 가하지 않고 진공 펌프로 음압을 만들어 흡착시키는 과정을 스캐너로 스캔하며 관찰하였다. Fig. 3에 보인 바와 같이 음압을 증가시키면서 접촉면적의 변화하는 과정을 관찰하였다. 사진에서 밝게 보이는 부분이 과도하게 접촉하는 부분으로, 진공 압력이 증가함에 따라 접촉 면적이 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 다음에는 하중을 가하지 않았을 때의 진공 압력이 자연적으로 어느 정도 감소하는지를 확인하기 위하여 무하중 상태에서 20시간 이상을 관찰하였다. 압력은 시간에 따라 감소하지만, 최초 68 kPa로부터 20시간이 지나도 10 kPa 정도의 진공 압력을 유지하였다. 패드의 위 방향으로 하중을 작용시키면 패드 바닥 아래의 체적이 증가하므로 진공 압력도 증가한다. 통상 자전거를 캐리어 위에 적재하고 계속 운행하는 시간을 최대 10시간 이내로 가정한다면, 데이터로 볼 때 이때에도 24 kPa까지는 유지하는 것을 확인하였으므로, 실제로 운전 중 무하중 상태는 일어날 수 없지만, 이 경우에도 지지하기에 충분한 진공 압력을 유지할 것으로 예측된다. 다음 단계로, 패드를 흡착시킨 후 UTM으로 축 방향 인장 하중을 증가시키면서 접촉 형태를 관찰하고 그에 상응하는 패드 바닥 아래의 진공 압력을 측정하였다. 이 때 일정한 진공 압력에서의 접촉면을 사진으로 찍은 후, 3차원 CAD 프로그램인 SolidWorks[5]를 활용하여 접촉 면적을 계산하였다. 여기서 유한요소해석의 편의상, 흡착 패드 바닥



(a) 0 kPa (b) 30 kPa (c) 50 kPa

Fig. 3. Temporal variation of the contact surface of the mount pad and the vacuum pressure as the negative pressure is increased.

의 유효투영 면적(active projected area) 개념을 도입한다[3]. 흡착 패드 바닥은 두 부분으로 구분할 수 있는데, 즉, 패드와 흡착 면(실험에서는 아크릴 판)이 접촉하는 부분과 접촉하지 않는 부분이다. 후자를 유효 투영 면적으로 규정하고 A_e 로 표시한다. 세 번의 실험을 통하여 데이터의 반복성(repeatability)이 양호함을 확인하였다. Fig. 4에 축 하중 대 패드 음압 대 유효 면적을 수록하였다. 축 하중이 증가함에 따라 패드 바닥 아래의 체적이 증가하면서 접촉 면적은 줄어들고(유효 투영 면적은 증가), 압력이 함께 증가하나, 축 하중에 의하여 중심으로 부터 바깥 방향으로 접촉 면적이 점차로 감소하게 되어 축 하중이 1.08 kN(110 kgf)에 도달할 때에는 거의 패드가장자리 부분만 접촉하고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 다음에는 원심력이나 풍압에 대한 구조 안전성을 관찰하기 위하여 회전(모멘트) 하중을 가하는 시험을 수행하였다. 모멘트 팔의 길이는 490 mm이며 모멘트 팔의 끝단에 모멘트팔의 작용을 하는 강(steel) 막대에 의한 모멘트(4.46 N)를 포함하여 총 모멘트를 0~62.14 N·m를 가하였다. 모멘트 하중이 증가함에 따라 회전에 의하여 아래 부분으로 접촉 면적이 점차로 감소되는 것을 관찰할 수 있었다. 모멘트 하중이 62.14 N·m일 때의 모멘트 팔 기울기는 15.3° 이었다. 모멘트 하중이 62.14 N·m보다 약간 더 커지면 흡착 패드가 분리되는 것을 관찰하였다. 이를 통해 축 하중보다는 모멘트 하중에 의하여 캐리어 마운트가 더 분리가 잘 일어날 수 있다는 것을 확인하였다. Fig. 5에는 모멘트 대 패드 진공 압력 대 유효 투영 면적을 수록하였다. 축 하중의 경우와는 유형이 다르지만, 모멘트 하중을 가하였을 경우에도 모멘트가 증가함에 따라 패드 바닥 아래의 체적이 증가하면서 음압이 증가하고 접촉 면적은 줄어들게 되므로 유효 투영 면적이 비선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

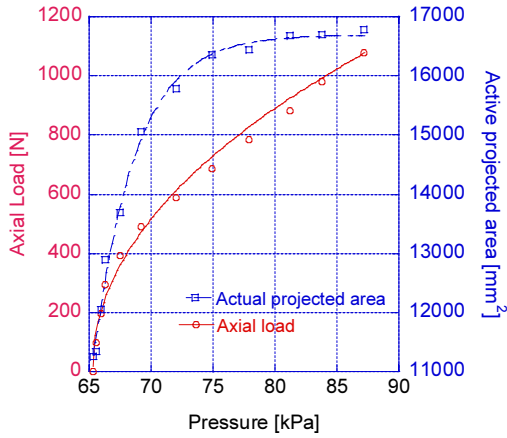


Fig. 4. Vacuum pressure(p) vs. Active projected area (A_a) fitted with $A_a = 16695(1 - e^{-0.2948(p - 61.57)})$ and Vacuum pressure(p) vs. Axial load(F) fitted with $F = 246.2(p - 65.3)^{0.4781}$.

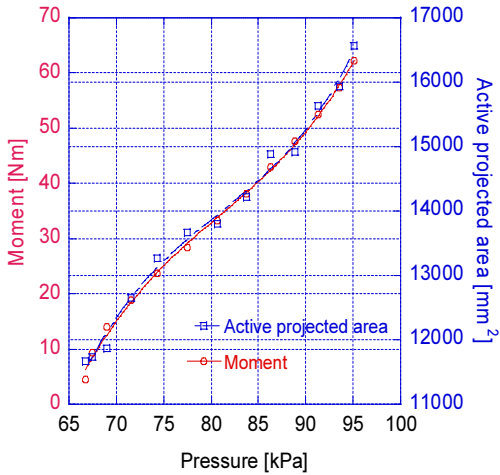


Fig. 5. Vacuum pressure(p) vs. Active projected area(A_a) fitted with $A_a = -143340 + 5611.2p - 68.069p^2 + 0.28115p^3$ and Vacuum pressure(p) vs. Moment load(M) fitted with $M = -1441.7 + 51.649p - 0.62037p^2 + 0.0025558p^3$

4. 구조해석

4.1 기계적 물성값

아직 시제품 사양이 최종적으로 확정되지 않은 설계 단계이므로, 캐리어 마운트 패드만을 관여 흡착시킨 상태에서 일정한 축 하중과 모멘트 하중을 가하여 구조 안

Table 1. Material properties of major parts of the bike carrier mount

Component	Material	Elastic Modulus, E [MPa]	Poisson's Ratio, ν	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Reference
Suction Pad	TPV (Innoprene 1550N/B)	2.0	0.48	5.88 (@25.0 °C, ISO 37)	13.5 (@23.0 °C, ISO 527)	[6], [7]
Reinforcing Ring	Aluminum ALDC8 (ADC12)	70000	0.33	165	331	MATWEB
Pump Casing	PC/ABS (LG Chemical HR5007A)	21000	0.38	56.9	77.5	MATWEB, [8]

Note: MATWEB is located at <http://www.matweb.com/>

전을 검토하였다. 실험을 통해서 각 설계 하중에 대하여 충분한 흡착력을 유지하는 것을 확인하였지만, 최대 하중에 가까울 때 마운트 패드에 걸리는 최대유효응력에 의하여 패드가 손상을 입을 수도 있으므로, Abaqus/Standard 6.14를 활용한 유한요소해석을 통해서 이 점을 집중적으로 검토하였다. Fig. 1에 보인 바와 같이 진공 흡착 마운트는 카운트 커버, 알루미늄 강화 링, 진공 펌프, 흡착 패드로 구성되어 있으며 이 마운트 위에 캐리어 프레임이 설치된다. 마운트를 구성하는 각 부품 소재의 기계적 성질을 Table 1에 수록하였다. 흡착 패드의 재료인 TPV(thermoplastic vulcanizate, 열가소성 가황물 - 금호폴리켄(주)의 상품명으로는 열가소성 탄성체 이노프렌)는 통상 Mooney-Rivlin 유동 모델을 적용하여 거동을 나타낸다. 공학적 실무에서는 탄성중합체 (elastomer)를 비압축성으로 가정할 수 있으며, 변형에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

여기서 I_1 및 I_2 는 응력의 첫 번째 및 두 번째 불변항 (invariant)이며, C_{01} 및 C_{10} 는 재료상수로서 이 경우, 탄성계수(E)를 이용하여 다음과 같이 근사적으로 계산될 수 있다.

$$C_{01} \cong 0.25C_{10} \quad (2)$$

$$6(C_{10} + C_{01}) \cong E \quad (3)$$

TPV의 탄성계수를 (2), (3)식에 대입하여 $C_{01} = 0.2667$, $C_{10} = 0.2667$ 을 얻었다.

4.2 유한요소 모델링

유한요소 계산 중, 가급적 접촉 계산의 신속성과 수렴성을 높이기 위하여, 제품 설계 모델링에서 해석에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되는 부분은 과감히 단순화시키고 대칭을 최대한 이용하였다. 비선형 탄성체인 흡착 패드와 접촉하는 바닥 부분은 강체(rigid body)로 설정하고 서로 면대면(surface to surface) 조건을 부여하였다. 진공 흡착기 내부와 알루미늄 강화 링, 그리고 모멘트 하중을 가하기 위하여 모멘트 팔 작용을 하는 막대 부분과 패드 상부는 Tie 조건을 이용하여 고착시켰다. TPV와 아크릴 판 사이의 마찰계수는 TPU와 유리와의 건조 마찰 데이터를 참조하여[2] 0.6으로 가정하였다. 흡입 패드는 C3D20RH(20절점 감차 적분 및 혼합 정식화를 적용한 2차 육면체) 및 C3D15H(15절점 혼합 정식화 및 선형 압력을 적용한 2차 삼각 프리즘) 요소로 구성하고 알루미늄 강화 링과 회전 하중을 가하기 위한 강(steel) 막대는 C3D8R(8절점 선형, 모래시계모드 제어를 포함하여 감차적분을 적용한 육면체) 요소로 구성하였다.

5. 결과

5.1 축 하중을 고려한 경우

흡착 패드에 하중을 가하지 않고, 강체 바닥에 흡착만 시켰을 경우의 음의 압력 값은 실험을 통하여 68 kPa임을 측정할 바 있다. 이를 흡착만 가한 경우의 유한요소 계산에 적용하여 패드 표면에 걸리는 최대유효응력이 0.184 MPa으로 패드 소재의 항복응력에 비하여 매우 작은 값을 관찰하였다. 패드 안에는 알루미늄 보강 링이 삽입되어 있어서 이 링이 패드에서보다 훨씬 더 큰 응력을 받아주도록 설계되어 있다.

흡착 패드의 축 방향으로 1.08 kN(110 kg)을 가하였을 때의 최종 압력 및 면적은 실험에서 각각 87.2 kPa 및 16779 mm²이었으며 이 값들을 유한요소해석에 입력하였다. Fig. 6에서 나타낸 대로 흡착 패드 내에 걸리는 최대유효응력(maximum effective stress or von Mises effective stress)은 0.3 MPa (TPV의 항복응력은 5.88 MPa)로 여전히 낮았다. 알루미늄 링에 걸리는 최대유효

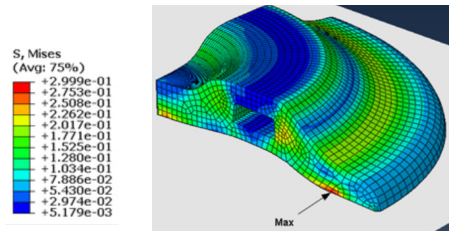


Fig. 6. von Mises effective stress in the suction pad under axial loading hiding the aluminum reinforcement ring

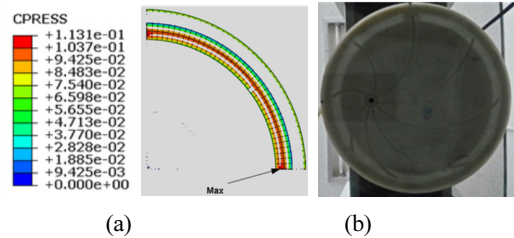


Fig. 7. (a) Contact stress distribution on the bottom surface of the suction pad (a quarter model) and (b) contact region (lighter) on the bottom surface of the suction pad (under axial loading)

응력은 4.3 MPa(알루미늄 ALDC8의 항복응력은 165 MPa)로 충분히 안전할 것으로 예측된다. Fig. 7(a)와 (b)에 접촉면에 걸리는 접촉 압력의 분포와 실험에서 관찰한 접촉 형상을 각각 비교하였으며 서로 유사함을 보이고 있다.

5.2 모멘트 하중을 고려한 경우

추가적으로 자전거 캐리어에 걸리는 횡하중에 대한 흡착 패드의 구조 안전성을 확인하기 위하여 이번에는 흡착 패드에 강 막대를 부착하고 끝단에 횡하중을 부가함으로써 고정 단에 모멘트 하중을 가하는 계산을 수행하였다. 실험에서 강 막대의 무게를 고려하고 막대의 끝에 118 N(12 kg)을 부가함으로써 62.14 N·m의 모멘트 하중을 가하였을 때의 패드 하부의 최종 압력 및 면적은 각각 95.2 kPa 및 16566 mm²이었으며(Fig. 5), 이 값들을 유한요소 계산에 입력하였다. 단, 유한요소해석에서는 모멘트 팔(arm)의 작용을 하는 강(steel) 막대의 무게를 고려하지 않았으므로, 여기서 기인하는 오차가 있을 것이나, 설계에 큰 영향은 미치지 않을 것으로 가정하였으며, 이는 막대의 기울기를 계산한 값과 측정된 값

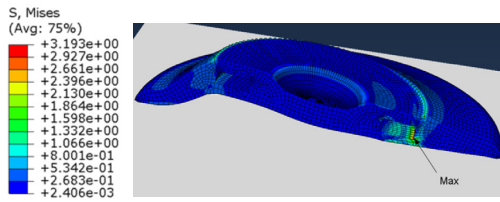


Fig. 8. von Mises effective stress in the suction pad while the aluminum reinforcement ring is hidden (under the rotational loading $M = 62.14 \text{ N} \cdot \text{m}$)

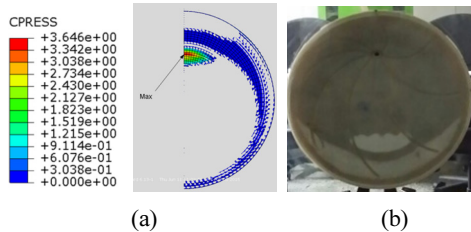


Fig. 9. (a) Contact pressure distribution on the bottom surface of the suction pad (a half model) and (b) contact region (lighter) on the bottom surface of the suction pad (under the rotational loading $M = 62.14 \text{ N} \cdot \text{m}$)

을 비교하였을 때(오차 11.6%), 모델링의 이상화를 고려한다면 비교적 타당한 것으로 판단된다. Fig. 8에서 나타난 대로 흡착 패드의 알루미늄 강화 링과 접촉되면서 모멘트에 의하여 접어지는 부분에 걸리는 최대유효응력은 3.2 MPa로서 패드 재료인 TPV의 항복응력 5.88 MPa와 비교할 때 안전하기는 하나 그 여유는 축 하중의 경우만큼 크지 않다(안전계수 $FS = 1.83$). 따라서 보다 과도한 모멘트 하중이 캐리어 장치에 작용하였을 경우에는 흡착 패드에 파손이 일어날 수 있음을 가리킨다. 물론 실험에서 62.14 $\text{N} \cdot \text{m}$ 이상의 모멘트를 작용시켰을 때, 흡착 패드가 분리되는 현상을 관찰하였으므로, 과도한 변형이 일어나기 전에 흡착이 해소된다. 그러나 이 또한 자전거 캐리어로서는 운전 중에 일어나서는 안 되는 것이기에, 운전 중 과도한 동적 횡하중이 가해지지 않도록 주의해야 한다. 접촉면에 걸리는 접촉 응력의 분포와 실험에서 관측한 접촉 형상을 Fig. 9에 비교하였으며 접촉 형상이 유사함을 보이고 있다. 패드 바닥의 접촉면 변화를 예측한 실험 결과에서, Fig. 9(b)의 위 접촉 부분이 점차로 감소하며 최상단에서 분리가 일어나는 것을 관찰하였다.

6. 결론

자전거 캐리어를 지지하는 흡착 마운트 패드는 자전거가 자동차 외부에 거치되어 주행 중 진동이나, 회전 중 원심력 등에 의하여 과도한 동하중을 받을 수 있으므로, 개발 단계에서 주요지지 부분인 흡착 패드의 구조 안전성을 검토하였다.

- (1) 비선형 탄성 유한요소법만으로는 패드 바닥 아래 진공압의 변화에 따라 실시간으로 변동하는 패드의 접촉 면적을 고려한 실제적 응력 해석을 수행하기가 어렵기 때문에 먼저 실험을 통하여 패드 바닥 아래 압력에 대한 접촉 면적을 측정하고, 이 데이터를 활용하여 축 하중 및 모멘트 하중을 받는 패드에 대한 유한요소해석을 수행하는 새로운 방법을 채택하였다. 이렇게 해서 예측된 패드의 접촉 거동은 실험 결과와 유사함을 확인하였다.
- (2) 과도한 모멘트 하중이 작용하는 경우에는 축 방향 하중이 작용하는 경우에 비하여 마운트를 구성하는 흡착 패드에 파손이 일어나거나 마운트 패드가 바닥으로부터 분리될 수도 있음을 관찰하였으므로 이에 대비하여 캐리어 마운트의 구조 및 배치를 적절히 설계하여야 한다.
- (3) 본 연구에서 활용한 방법으로 실험이나, 전산적 방법 단독으로는 확인하기 어려운 패드의 구조 안전성에 대한 여유(margin)를 예측하였다. 본 연구에서 제시하는 해석 방법은 유사 분야에서 진공 펌프를 이용한 흡착패드를 설계하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 본다.

References

- [1] M. Horak, F. Novotny, "Numerical model of contact compliant gripping element with an object of handling", *International Carpathian Control Conference ICC' 2002*, Malenovice, Czech Republic, pp. 691-696, 2002.
- [2] M. Horak, M. F. Novotny, "The study of mechanics of deformation behavior of service robots gripping systems," *18th International Conference Engineering Mechanics*, Svratka, Czech Republic, pp. 427-432, 2012.
- [3] J. Liu, K. Tanaka, L. M. Bao, I. Yamaura, 2006, "Analytical modelling of suction cups used for window-cleaning robots," *Vacuum*, Vol. 80, No. 6, pp. 593-598., 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.10.002>

- [4] Dassault Systèmes, Abaqus V6.14, 2014.
- [5] Dassault Systèmes, SolidWorks, 2014.
- [6] H. J. Qi, M. C. Boyce, 2005, "Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethane," *Mechanics of Materials*, Vol. 37, No. 8, pp. 817-839, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2004.08.001>
- [7] M. C. Boyce, K. Kear, S. Socrate, K. Shaw, "Deformation of thermoplastic vulcanizate," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 49, No. 5, pp. 1073-1098, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-5096\(00\)00066-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-5096(00)00066-1)
- [8] H. Kwon, W. J. Choi, J. H. Choi, Y. K. Kim, "Mechanical behavior analyses of plastics under environmental changes," *18th International Conference on Composite Materials (ICCM18)*, ICC Jeju, Korea, W27-6-1K0272, 2011.

서 영 성(Yeong Sung Suh)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1982년 2월 ~ 1984년 12월 : 롯데슈나이더엔진(주) 계장
- 1990년 12월 : 미국 Rensselaer Polytechnic Institute 기계공학과 (공학석사(1987년 5월) 및 박사)
- 1991년 10월 ~ 1993년 3월 : 미국 Ohio 주립대 박사후연구원
- 1993년 8월 ~ 1997년 2월 : 시스템공학연구소 선임연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한남대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

전산고체역학, 소성역학, CAE

임 근 원(Geun Won Lim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 국민대학교 기계설계학과
- 1990년 7월 ~ 2002년 : 성원정밀 대표
- 2002년 5월 ~ 현재 : 아이엔엠(주) 대표이사
- 2014년 2월 : 한밭대학교 산업대학원 기계설계학과 석사 수료

<관심분야>

기계설계, 금형설계