Transactions of KSAE, Vol. 14, No. 3, pp.51-57 (2006)

Copyright © 2006 KSAE
1225-6382/2006/081-07

와이퍼 블레이드의 누름압 해석

이 병 수[*1] · 신 진 용[2]

계명대학교 기계자동차공학부[1] · 자동차부품연구원[2]

Contact Pressure Analysis of a Windshield Wiperblade

Byoungsoo Lee[*1] · Jin-Yong Shin[2]

[1]*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea*
[2]*Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea*
(Received 29 August 2005 / Accepted 6 December 2005)

Abstract : The contact pressure distribution between a rubber wiper blade and a glass windshield is a major factor for wiping performance. A modeling and simulation method has been developed to forecast the contact pressure distribution on a wiper blade. For modeling multi-body dynamics of an wiper linkage system and flexible nature of wiper blade, ADAMS and ADAMS/flex are employed. A simulation study has been also conducted to obtain contact pressure distribution. Comparison between simulation and measurement is provided to ensure fidelity of the model and the simulation method.

Key words : Automotive windshield wiper blade(자동차 유리 와이퍼 블레이드), Wiper-glass contact pressure(와이퍼-유리 접촉 압력), Contact(접촉), Flexible body(유연체), Multi-body dynamics(다물체 동역학), Mode shape(모드 형태)

1. 서 론

와이퍼는 자동차 전후방 유리면에 부착된 오염물질들을 닦아내어 운전자의 시야를 확보하게 한다. 이러한 와이퍼에서 소음, 떨림, 부상 같은 문제점들은 운전자들에게 불쾌감을 주거나 안전 운행에도 지장을 초래한다. 여러 인자 중 와이퍼 블레이드의 누름압 분포는 와이퍼 닦음 성능을 좌우하는 중요한 인자이고 와이퍼 블레이드의 누름압을 균일하게 분포시킬 수 있는 기술 개발에 대한 연구는 필수적인 과제가 되었다.[1-5]

와이퍼 종방향(x방향)의 신축, 횡방향(y방향)의 굽힘, 비틀림 운동을 수반하는 고무 재질의 와이퍼 블레이드에 와이퍼의 암으로부터 가해지는 하중을 균일하게 분포시켜 누름압을 블레이드의 종방향(Fig. 1 참고)으로 일정하게 유지하는 것이 바람직하다. 하지만 블레이드의 누름압은 정적인 상태에서조차 그 구조 때문에 종방향을 따라 일정하지 않아서 와이퍼가 작동 중 줄무늬(streaking)가 나타나고, 유리면이 균일하게 닦이지 않거나(smearing), 부분적으로 닦이지 않는 구간(unwiped area)이 나타나는 현상 등을 유발한다.

본 연구에서는 와이퍼의 닦음 성능을 좌우하는 누름압 분포에 대한 예측 설계 기술 개발을 목적으로 와이퍼 누름압 모델을 구성하고 해석결과를 정적 누름압 실측결과와 비교함으로써 신뢰성 있는 모델을 구성한다.

*Corresponding author. E-mail: blee@kmu.ac.kr

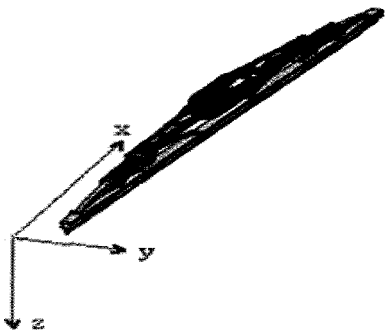

Fig. 1 A typical wiper blade

2. 와이퍼 시스템의 모델링

와이퍼는 암과 블레이드로 구성되어 있다. 본 장에서는 KCW(주)가 생산하는 대표적인 와이퍼를 대상으로 모델링에 대해 기술한다.

2.1 암 모델

암 부분은 Fig. 2와 같이 암헤드(arm head, part_1)와 암로드(arm rod, part_2)로 구성되어 있으며 두 부속품은 joint_1(핀 조인트)으로 연결되어 있다. 재질은 강철이며 joint_1의 핀은 암헤드에 대해 암로드가 y축에 대한 회전만 하도록 허용하는 회전조인트이다. 와이퍼 블레이드의 누름압을 발생시키는 요소는 와이퍼 암부분에 위치한 스프링이며 제원은 Table 1과 같다. 이 스프링력은 후크 지점(joint_2)을 통해서 요크와 각각의 링크에 전달되며 와이퍼 블레이드가 유리면에 접촉되는 압력을 형성하도록 한다.

Table 1 Arm spring specification

파라미터	값
강성	38,650N/m
자유길이	79.1mm
프리로드	437N

2.2 링크 모델

Fig. 3의 블레이드 부분에 있는 요크(part_3), 링크(part_4, part_5), 소링크(part_6, part_7)의 재질은 강철이며, 고무 블레이드(part_8)는 유연체이다. 요크와 링크의 연결부분(joint_2~joint_4), 링크와 소링크

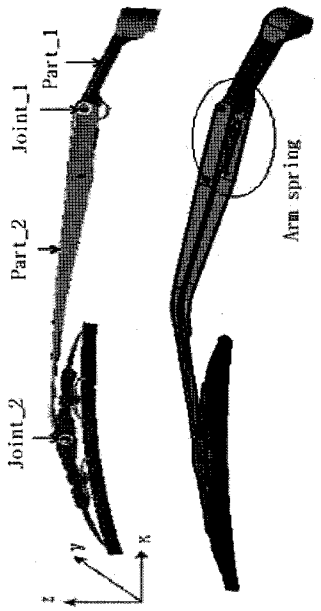

Fig. 2 Wiper arm and spring

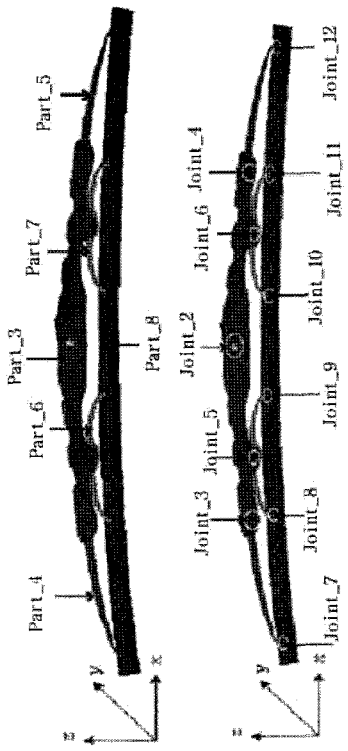

Fig. 3 Parts and constraints

의 연결부분(joint_5, joint_6)은 y축에 대해 회전만 가능한 회전조인트이다. 고무 블레이드를 잡아 주는 6개의 클러(claw) 중 joint_7~joint_11은 x방향의 병진운동과 y축에 대한 회전운동을 동시에 할 수 있는 핀-슬롯조인트인 반면 joint_12는 y축에 대한 회전운동만 허용된 회전조인트이다. 블레이드 부분의 구속 위치는 Fig. 3과 같으며 와이퍼 구속 조건은 Table 2와 같다. 연결 핀 사이에서 발생하는 마찰은 매우 작아서 각각의 조인트에서 발생하는 마찰력이 무시된 이상적인 조인트라고 가정한다.

Table 2 Parts and constraints associated

위치	종류	연결파트	
joint_1	회전조인트	part_1	part_2
joint_2	회전조인트	part_2	part_3
joint_3	회전조인트	part_3	part_4
joint_4	회전조인트	part_3	part_5
joint_5	회전조인트	part_4	part_6
joint_6	회전조인트	part_5	part_7
joint_7	핀-슬롯 조인트	part_4	part_8
joint_8	핀-슬롯 조인트	part_6	part_8
joint_9	핀-슬롯 조인트	part_6	part_8
joint_10	핀-슬롯 조인트	part_7	part_8
joint_11	핀-슬롯 조인트	part_7	part_8
joint_12	회전조인트	part_5	part_8

2.3 블레이드 모델

와이퍼 블레이드와 같은 특정 부품의 유연성이 시스템 특성의 주체가 되는 기계장치 해석에서는 부품의 유연 효과를 고려해야 한다. 이러한 이유로 ADAMS/flex를 이용한다.

ADAMS/flex를 이용하여 유연체(flexible body)를 구현하기 위해서는 FEM code로부터 파트의 모드해석 결과를 modal neutral file(mnf)을 통해 읽어 들인다. ADAMS는 유연체 파트의 고유 모드들을 중첩시켜 시뮬레이션 도중 유연체에 작용하는 반력이나 변위를 산출해낸다. 따라서 전체 시스템 중에 유연체 효과가 고려된 파트의 역할, 고유모드 해석 결과치, mnf를 통한 모드의 선택 및 강체와의 연결 방법 등이 해석의 정확도에 영향을 미친다.

ADAMS/flex에서의 유연체는 지역좌표계에 대해 작은 선형 변형을 하는 입자(particle)의 집단이다.[4] 반면 지역좌표계는 전역적인 비선형 대변형이 가능하다. 입자는 대부분의 경우 유한 요소 모델의 절점이다. 개개의 입자들의 운동 궤적을 추적하는 것은 비현실적이므로 선형적 지역 운동을 다음과 같은 모드 형상의 선형조합으로 근사화한다.

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{x} + \mathbf{A}(\mathbf{s}_i + \boldsymbol{\phi}_i \mathbf{q}) \tag{1}$$

여기서

$\mathbf{x}$ = 지역좌표계의 위치 벡터
$\mathbf{A}$ = 지역좌표계의 회전좌표변환행렬
$\mathbf{s}_i$ = 입자 i 의변형전 위치벡터
$\boldsymbol{\phi}_i$ = 입자 i 에 대한모드형상의 기여도
$\mathbf{q}$ = 모드좌표 벡터

오일러 각을 이용하여 일반좌표계를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ \psi \\ \theta \\ \phi \\ q_{j,j=1,m} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

여기서

x, y, z = 지역좌표계의 위치
ψ, θ, ϕ = 전역 기준좌표계에 대한 지역좌표계의 오일러 각
q_j = 해석에 포함된 모드좌표

일반좌표계를 사용하여 위치와 속도를, 이로부터 위치에너지와 운동에너지를 구하고 라그랑지 운동방정식을 이용하여 다음과 같은 유연체의 운동방정식을 얻는다.

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \dot{\boldsymbol{M}}\dot{\boldsymbol{\xi}} - \frac{1}{2}\left[\frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial \boldsymbol{\xi}}\dot{\boldsymbol{\xi}}\right]^T \dot{\boldsymbol{\xi}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{\xi} + \mathbf{f}_g + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{\xi}} + \left[\frac{\partial \boldsymbol{\Psi}}{\partial \boldsymbol{\xi}}\right]^T \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{Q} \tag{3}$$

여기서

$\boldsymbol{K}, \boldsymbol{D}$ = 모드 강성과 감쇠 행렬
$\mathbf{f}_g$ = 중력
$\boldsymbol{\lambda}$ = 구속조건의 라그랑지 승수
$\boldsymbol{Q}$ = 외력

2.4 블레이드 모드해석[6,7]

본 연구에서 사용되는 와이퍼 블레이드 고무처럼 프아송비가 보통 0.5에 가까운 큰 변형을 일으키는 초탄성 비압축성 재질은 해석에서 특별한 고무 재질을 위한 요소가 필요하다. 금속 재료는 인장 시 항복점 이후부터 소성변형이 발생하므로 변형률 에너지가 보존되지 않는다. 대변형의 탄성거동에 대하여 단위체적당 변형률 에너지 함수의 변화률이 응력에 대한 일률과 같다는 가정을 이용한다. 주어진 변형률에 대한 고무에서의 응력은 각 변형률 성분에 대한 변형률에너지함수의 도함수로부터 얻어진다. 변형률 에너지 함수는 Mooney- Rivlin 모델을 이용하였으며 식 (4)와 같다.

$$W(I_1,I_2,I_3)=\sum_{K+L=1}^{N}\alpha_{KL}(I_1-3)^K \qquad (4)$$
$$(I_2-3)^L+\frac{1}{2}K(I_3-1)^2$$

여기서

α_{KL} : Mooney-Rivlin 상수

I_1,I_2,I_3 : 변형률 불변량 (strain invariant)

$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2$

$I_2=\lambda_1^2\lambda_2^2+\lambda_2^2\lambda_3^2+\lambda_3^2\lambda_1^2$

$I_3=\lambda_1^2\ \lambda_2^2\ \lambda_3^2$

$K=\frac{2(a_{10}+a_{01})}{(1-2\nu)}$: 체적탄성계수

$\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$: 주축 방향의 신장비

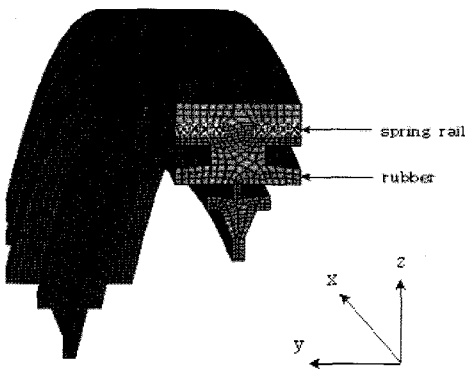

Fig. 4 FEM model of wiper blade for mode analysis

고무 블레이드의 ANSYS FEM 모델이 Fig. 4에 있고, 고무의 물성치는 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of rubber

Component	Specification
Mooney-Rivlin 상수 α_{KL}	α_{10} =-0.135974E+00 α_{01} = 0.314083E-01 α_{20} =-0.515943E+00 α_{11} = 0.264628E+00 α_{02} =-0.205773E+00
프아송비 ν	0.495

모드 해석에는 Fig. 4와 같이 와이퍼 블레이드 고무 사이에 위치하면서 와이퍼 블레이드 고무에 적절한 압력을 주어 유리면에 접촉시키는 역할을 하는 탄성 재질의 스프링 레일이 고무 블레이드와 함께 포함되어있다.

2.5 접촉 모델[6]

해석 시 와이퍼 블레이드가 유리면을 침투하거나 지나가는 것을 막고 두 물체 간에 접촉이 이루어지도록 하기 위하여 두면 사이의 적절한 관계를 부여하여야 한다. 방법으로는 스프링의 강성 또는 접촉강성을 벌칙 변수(penalty parameter)라고 놓고 스프링을 사용하여 두 물체간의 접촉 적합성을 부여 할 수 있는 벌칙법(penalty method)이 있다. 접촉 적합성을 부여하는 또 하나의 방법으로는 다른 물체를 침투할 수 없다는 조건을 만족시키기 위하여 접촉력이라는 자유도를 추가 하는 방법인 라그랑지 승수법(Lagrange multiplier method)이 있다. 본 연구에서는 벌칙법과 라그랑지 승수법을 조합하여 사용하는 방법을 수정 라그랑지(augmented Lagrange) 승수법을 사용하였다.

수정 라그랑지 승수법은 일련의 반복과정에서 우선 접촉강성에 기초하여 접촉의 적합성을 판별하고 평형이 만족되면 침투량을 점검하며, 접촉력은 식 (5)와 같이 계산 된다. 복원계수는 ADAMS가 제공하는 기본 값을 사용하였다.

$$F_n^{(k)}=\lambda^{(k)}+p\frac{dg^{(k)}}{dt}\ \text{for}\ k=1,2,\ldots k_{\max} \qquad (5)$$

여기서

$\lambda^{(k)}=0$ for the first iteration, i.e., k = 1

$\lambda^{(k)}=F_n^{(k-1)}$ for k > 1.

ADAMS/flex 유연체는 접촉 계산에서 제외되므로 응답에 영향을 미치지 않을 최소 크기의 더미 파트를 부착시켜 사용하여야 한다. 그렇게 함으로써 유리면과 고무 블레이드 사이에 접촉을 일으킬 수 있다. 더미파트로는 Fig. 5에서처럼 실린더와 구를 사용할 수 있는데 실린더를 사용하게 될 경우 실린더의 모서리에서 대부분의 접촉이 발생하여 해석이 수렴하지 못하고 발산하는 어려움이 있다. 따라서 본 해석에서는 구를 더미파트로 사용하였다.

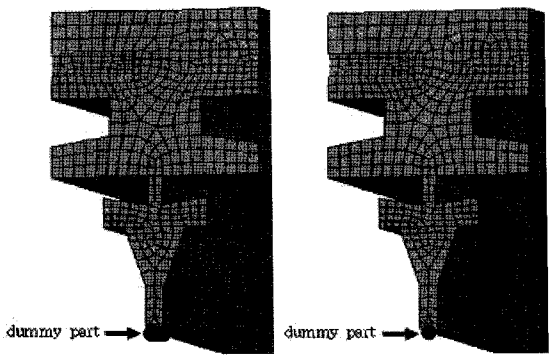

Fig. 5 Cylindrical and Spherical dummies

접촉강성은 접촉해 있는 면들의 상대적인 값으로 접촉강성에 따라 허용될수 있는 침투량의 정도가 달라지며 이 허용된 침투량을 가지고 수렴된 접촉력을 얻는다. 접촉강성은 유연체에 달린 더미 파트가 유리에 대한 침투량을 결정하는 값으로 큰 값을 가질 경우 상대적인 침투량이 작아 정확한 접촉력을 계산할 수 있지만 수렴이 잘 되지 않는 단점과 다른 부분의 더미 파트가 유리면과의 접촉을 방해하는 역할도 하게 된다. 너무 낮은 접촉강성 값을 사용한다면 블레이드가 유리면을 관통해서 발산할 것이다. 따라서 접촉지점의 수가 많아질수록 접촉강성 값의 수정을 요하게 된다.

본 연구 과정에서는 적절한 접촉강성 값을 결정하기 위해서 10에서 100까지 시행 착오적인 방법을 이용하여 값을 선정하고 해석을 수행하였다.

3. 와이퍼 누름압 해석

3.1 시뮬레이션 해석[8)]

대상 와이퍼는 KCW(주)에서 생산하는 현대 투싼의 보조석에 장착되는 것이며, 유리의 곡면은 와이퍼가 원점에 있을 때의 것을 사용하였다.

누름압 시뮬레이션 해석에 필요한 시간, 해의 수렴 등에 큰 영향을 미치는 접촉 파트(지점)의 수, 해석에 포함되는 와이퍼 블레이드의 모드 형상, 접촉강성 및 더미 파트의 크기이다. 이 중 접촉 파트의 수는 ADAMS가 정상 상태의 누름압 해석 결과를 도출하는데 많은 영향을 미치므로 접촉 파트의 수를 3개, 6개 등으로 늘려가면서 나머지 인자들의 영향을 관찰하였다. 최종적으로 16개 더미 파트 모델을 사용하였으며 접촉 더미 파트(지점)의 위치와 번호는 Fig. 6과 같다.

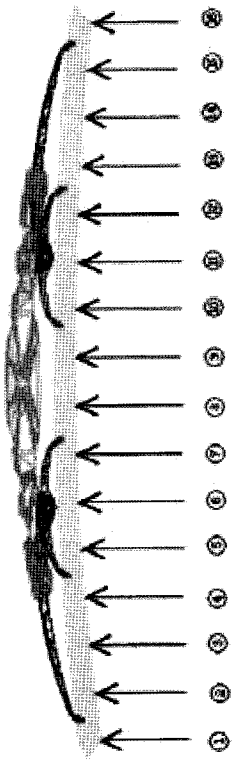

Fig. 6 Sixteen dummies and their positions(① is farthest from the pivot)

ADAMS/flex는 진동모드를 선택적으로 시뮬레이션에 포함시킬 수 있는 옵션을 제공한다. 와이퍼 블레이드는 클러와 링크의 구속에 의해 y축 방향의 회전운동만이 가능하며 와이퍼 블레이드의 운동을

x-z평면에 국한시킨다. 이러한 운동에 해당하는 진동모드는 7, 29, 31번째 모드이며 모드 진동수는 각각 13.058, 206.38, 343.16 Hz이다. 7번째 모드를 제외한 두 모드의 진동수는 매우 높아 실제로 가진된다고 보기 힘들며 또한 수치해의 수렴을 매우 어렵게 만들므로 본 시뮬레이션에서는 7번째 모드만 포함시키며 7번째 모드 형상은 Fig. 4에서 보여주는 형상과 같다.

유리와 실질적인 접촉을 이루는 더미 파트는 직경이 0.7mm인 구로, 접촉강성 값은 10으로 선정하였다. 해석 수행 중 16개의 더미 파트와 유리 사이의 접촉력이 모두 수렴 값에 접근하면 해석을 멈추고 그 시점에서의 접촉력을 와이퍼와 유리 사이의 누름압으로 선정하였으며 각 접촉지점에서의 누름압을 Fig. 7에 그래프로 나타내었다.

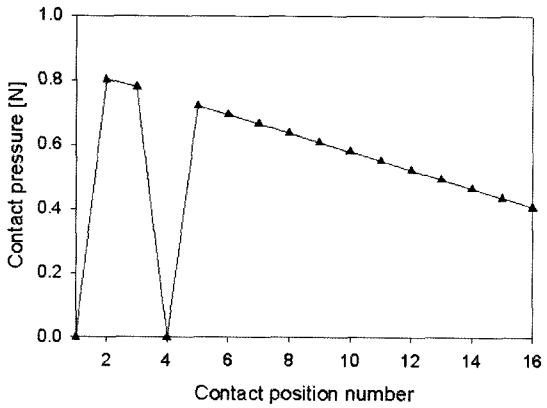

Fig. 7 Calculated contact pressure

와이퍼의 누름압은 와이퍼 암에 위치한 스프링에 의해서 결정되며 이 값은 후크지점에서 약 800g정도로 블레이드를 누르도록 설계되어있다. 해석 결과로 얻은 접촉력을 합하였을 경우 851g이며 이 값은 설계 기준과 유사하다.

3.2 누름압 실측 및 비교 분석

와이퍼 누름압 측정 장치는 Xsensor Technology 사의 제품을 사용하였으며 구성 요소는 압력 센서, 인터페이스, 전원 공급 장치, 데이터 수집용 컴퓨터이다. 외부 압력은 센서를 통해서 인터페이스 전달되고 읽어드린 정보를 수치적으로 변환하여 컴퓨터

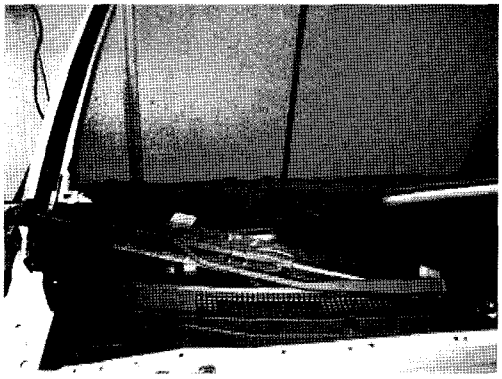

Fig. 8 Home position of passenger side wiper

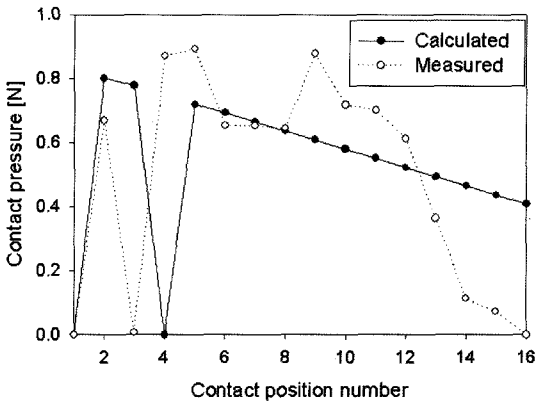

Fig. 9 Measured and calculated contact pressure

상에 나타낸다. Fig. 8과 같이 와이퍼 블레이드의 밑에 선세를 정렬하여 배치한다. 누름압 측정을 수차례 반복한 후 평균값을 계산하고 해석값과 비교하여 누름압 그래프를 그렸다(Fig. 9 참조).

Fig. 9의 실측값에서 와이퍼 블레이드의 두 가장자리인 (1)위치와 (16)위치에서는 접촉력이 존재 하지 않으며 (3)위치에서는 영에 가까운 미세한 값이 존재한다. 그리고 (4)위치와 (5)위치에서 최고값을 가짐을 알 수 있다. 반면 해석 결과에서는 와이퍼 블레이드의 양 가장자리인 (1)위치에서는 실측치와 같게 접촉력이 존재하지 않음을 보여주나 (16)위치에서는 어떠한 접촉력이 있음을 나타낸다. 또한 (4)위치에서 접촉력을 나타내지 않아 실측치의 (3)위치에서 접촉이 이뤄지지 않는다는 결과와 유사함을 알 수 있다. 실측 값과 해석 값이 (8)위치 이후에 차이를 보이지만 전반적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 따라서 해석적으로 와이퍼의 전체적인 누름압

경향은 파악 가능한 것으로 판단하였다.

와이퍼 암 스프링력이 전달되는 후크 바로 아래 부근과 와이퍼 블레이드를 잡아주는 클러 부위에서 누름압 피크 값이 존재 할 것이라는 예상과 비슷한 결과를 관찰할 수 있다. 운전자의 시야 확보에 영향이 가장 큰 후크 부분(와이퍼 블레이드의 중앙 부분)에서 와이퍼의 누름압이 형성되는 것을 알 수 있다.

닦음 성능은 와이퍼 블레이드 종방향으로 누름압이 일정하게 분포되는 것이 바람직하지만 실측 결과에서는 와이퍼 누름압 분포가 그렇지 않음을 알 수 있다. 또한 와이퍼 블레이드의 좌, 우 두 가장자리 구간에서는 유리면과의 틈이 발생하여 누름압 값이 존재 하지 않음을 알 수 있다. 이 구간은 운전자의 시야 확보와 직접적인 상관관계가 떨어지는 부위로 이 곳에서 유리의 곡률이 상대적으로 크기 때문인 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 와이퍼의 성능을 좌우하는 누름압에 대한 예측 설계 기술 개발을 목적으로 현대 투싼 차종의 와이퍼를 대상으로 동역학적 모델을 구성하고 누름압 해석 결과를 정적인 실측 결과와 비교함으로써 신뢰성 있는 모델을 구성하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 실차에서 정지 상태의 와이퍼 블레이드와 유리면 사이에서 발생하는 접촉 압력 분포를 압력센서를 이용하여 측정하고 와이퍼 시스템에 대한 해석 모델을 구성하기 위해 각 각의 링크와 와이퍼 블레이드의 운동과 구속 조건을 정의하였다.
2) 와이퍼 블레이드를 유연체로 모델링하기 위해 ADAMS/flex 모듈을 이용하였다. 해석 시 해의 수렴도는 와이퍼 블레이드의 모드 해석 결과로 얻은 진동 모드의 선택에 매우 민감하였다. 참고로 모든 진동 모드를 해석에 포함시켰을 경우 수렴하는 해를 얻을 수 없었으므로 7번째 모드만 고려하여 해석하였다.
3) 와이퍼 블레이드의 유연체는 횡방향축에 대한 회전운동만 하도록 구속되어있다. 따라서 효율적인 누름압 해석을 위해서는 실제 운동과 관계없는 모드를 제한하는 것이 바람직하다.
4) 접촉 강성 값에 따라 해의 수렴도가 달라지므로 실험적으로 얻은 적절한 값을 제안하였다.
5) 정적 누름 압력에 대한 수치 해석 결과와 실측 결과를 비교하였다. 해석 결과가 실측값과 유사함을 보여 모델링 및 해석 매개 변수의 유용하다고 판단하였다. 그러므로 와이퍼 누름압의 예측 설계가 가능할 것으로 예상된다.
6) 와이퍼 작동 상태에서의 와이퍼 누름압 측정을 위해서 와이퍼 시스템의 동적인 모델의 연구가 추가적으로 필요하다.

후 기

본 과제는 석박사 인력 양성사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1) W. S. Yu, "Dynamic Analysis of a Flexible Windshield Wiper Mechanism," Transactions of KSME A, Vol.10, No.4, pp.450-455, 1986.
2) B. Lee, "Measuring Angular Speed and Angular Acceleration for Automotive Windshield Wiper Pivot," Transactions of KSAE, Vol.13, No.4, pp.58-65, 2005.
3) S. Okura and T. Sekiguchi, "Dynamic Analysis of Blade Reversal Behavior in a Windshield Wiper System," SAE 2000-01-0127, pp. 183-192, 2000.
4) S. Goto, H. Takahashi and T. Oya, "Clarification of the Mechanism of Wiper Blade Rubber Squeal Noise Generation," JSAE Review, Vol.22, pp.57-62, 2001.
5) R. Grenouillat and C. Leblanc, "Simulation of Mechanical Pressure in a Rubber-Glass Contact," SAE 2002-01-0790, 2002.
6) MSC Software Corporation, Theory and User Information, MSC Software Corporation, Los Angeles, pp.7.22-7.30, 2000.
7) ANSYS Inc, ANSYS 비선형 해석, 태성에스엔이, 2003.
8) MSC Software Corporation, Using ADAMS/Solver, MSC Software Corporation, Los Angeles, 2002.