

< 기술논문 >

차량용 와이퍼 블레이드의 접촉압력 해석모델 개발

이 상 진¹⁾ · 노 유 정^{*2)} · 김 경 남¹⁾ · 김 근 우³⁾ · 장 영 근³⁾ · 김 관 회³⁾ · 이 재 천¹⁾

계명대학교 기계자동차공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부²⁾ · KCW 연구3팀³⁾

Development of Contact Pressure Analysis Model of Automobile Wiper Blades

Sangjin Lee¹⁾ · Yoojeong Noh^{*2)} · Kyungham Kim¹⁾ · Keunwoo Kim³⁾ ·
Youngkeun Jang³⁾ · Kwanhee Kim³⁾ · Jaechon Lee¹⁾

¹⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³⁾R&D 3 Team, KCW Corporation, 16 Seongseogongdan-ro 25-gil, Dalseo-gu, Daegu 704-900, Korea

(Received 31 October 2014 / Revised 6 March 2015 / Accepted 6 March 2015)

Abstract : A wiper is a safety device removing rain and debris from windshield and ensuring visibility of drivers. If contact pressure distribution between rubber of the blade and the windshield is unbalanced, unwanted noise, vibration, and abrasion of the blade can occur and sometimes fatal accidents could occur. To improve the safety of the wiper, there have been many researches on the contact pressure analysis of the wiper, but the analysis results were not converged or require much computational time due to material nonlinearity of the rubber and contact conditions between the blade rubber and the windshield. In this research, a simple model with 1D beam and 2D shell elements was used for the contact pressure analysis instead of the 3D blade model. The simplified model saved computational time of the analysis and resolved convergence problems. The accuracy of the analysis results was verified by comparing them with experimental results for different rail spring curvatures.

Key words : Wiper blade(와이퍼 블레이드), Push pressure(누름압), Contact pressure(접촉압력), Simplified model(단순화 모델), Beam and shell element(보와 셸요소)

Nomenclature

- P : push force to press the frame, N
- Θ : angle between the glass and the frame, rad
- H : height of the frame, mm
- L_1, L_2 : left-sided and right-sided length of the frame from a loading point P, mm

Subscript

- a ~ h : reaction force supporting points

1. 서론

차량용 와이퍼 블레이드(wiper blades)는 비, 눈 또는 이물질 등이 운전자의 시야를 방해하는 것을 방지하기 위해 차량의 유리를 닦아내어 시인성을 확보시켜주고, 이로 인해 운전자 및 보행자의 안전을 확보하는 자동차의 중요한 장치이다.

와이퍼 시스템은 암의 누름압을 블레이드 면까지 전달시키기 위해 프라이머리, 세컨더리, 요크가 관절형태로 연결된 프레임(frame) 구조를 가지고 있으며 우수한 닦임 성능을 가지기 위해서는 고무의 단면 형상과 레일스프링(rail spring)의 곡률 그리고 탄

*A part of this paper was presented at the KSAE 2014 Annual Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: yoonoh@pusan.ac.kr

성 등을 고려해야 한다. 그리고 와이퍼 블레이드와 유리의 접촉압력(contact pressure)이 일정하지 않을 경우 유리면과 블레이드 사이에 소음과 진동 그리고 마모 등의 문제가 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 와이퍼의 닦임성능을 좌우하는 중요 요소인 닦임각도, 접촉압력 그리고 마찰계수의 영향에 대한 연구,¹⁾ 고무의 형상을 변경한 누름압 연구,²⁾ 플랫폼 타입 와이퍼의 고무 블레이드의 구조해석³⁾ 등 와이퍼에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 우수한 닦임 성능을 나타내기 이전에 각각의 프레임 결합 상태로부터 유리면에 전달되는 균등한 접촉압력에 대한 모델이 사전에 결정되어야 한다.

실험적인 방법으로는 센서의 민감도와 초기상태 선정의 문제로 인해 수많은 테스트가 요구되며, 해석적인 방법은 와이퍼 프레임의 형상과 고무의 초탄성 재질상의 문제로 인해 많은 해석시간이 소요되고 수렴성 역시 보장될 수 없다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 솔리드(solid) 모델인 와이퍼 블레이드를 단면 정보를 가지는 보요소(beam element)와 두께 정보를 가지는 셸요소(shell element)를 이용하여 와이퍼 형상을 단순화함으로써 와이퍼 접촉압력 해석시간을 최소화하고 해석의 수렴성을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 와이퍼의 구성

와이퍼는 헤드(head), 암(arm), 프라이머리, 세컨더리, 요크, 레일스프링 그리고 고무(rubber) 등의 부품들의 조합체로 구성되어 있다.⁴⁾ 와이퍼의 헤드가 자동차에 체결되면 암과 헤드사이의 와이퍼 스프링 강성으로 인해 암을 헤드 쪽으로 당기게 된다. 암으로 전달된 스프링력은 프라이머리에 누름압(push pressure)으로 전달되고 프레임들의 회전 조인트(revolute joint)결합⁵⁾으로 최종적으로 요크의 각 지점마다 적절하게 누름압이 분배된다.

요크로 분배된 누름압은 레일스프링과 고무를 눌러 유리에 균일한 접촉압력을 형성하는 구조를 가지게 된다. Fig. 1에 연구에 사용된 와이퍼의 시스템 구조를 나타내었다.

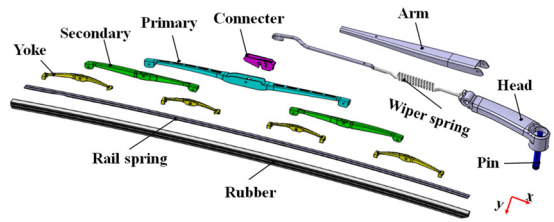


Fig. 1 Exploded view of the wiper system⁶⁾

3. 모델의 단순화 접근법

단순화 모델을 선택하기 위해 3차원의 실제모델, 1차원 보 모델, 힘 평형 방정식을 이용하여 유도된 1차원 수학 모델의 반력을 6가지 닦임각도(0°, 17°, 34°, 51°, 68°, 88°)에 대해 각 모델의 반력을 계산하여 단순화 모델의 타당성을 검증하였다. 6가지 각도는 3차원 설계프로그램인 CATIA V5를 사용하여 Fig. 1의 x축과 세컨더리, 요크가 이루는 각도를 계산하였다.

Table 1 Wiper models for six angles

0 deg	17 deg	34 deg
51 deg	68 deg	88 deg

3.1 스프링에 의한 누름압

접촉압력 해석에 앞서 암과 헤드를 연결하는 스프링에 의해 커넥터에 전달되는 누름압을 계산하기 위해 유한요소해석(FEA)을 이용하여 와이퍼의 초기각도인 0도를 기준으로 프레임의 각도와 고무의 곡률 및 암의 핀을 고정시키고 단순히 암에 연결된 스프링에 의해 프라이머리에 전달되는 누름압을 해석하였다. 해석결과 Fig. 2와 같이 수직인 방향(y축)으로 8.82N 누르는 결과를 나타냈다. 이 결과를 이용하여 헤드와 암 그리고 스프링모델을 제외하고 8.82N의 힘으로 프라이머리에 직접 힘을 부여할 수가 있다. 이는 와이퍼 접촉압력 해석의 하중조건으

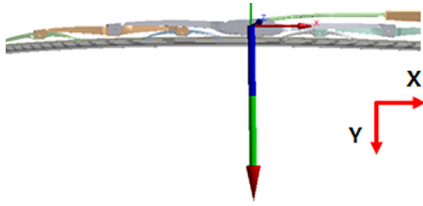


Fig. 2 Direction of push pressure

로 사용하여 해석에 불필요한 모델을 제거함으로써 해석시간을 단축할 수 있다.

유한요소해석에 사용된 스프링 상수는 29.92N/mm이며, 지정하중(preload)은 424.87N으로 사용하였다.

3.2 단순화 모델의 검증

8.82N의 누름압은 프라이머리와 세컨더리를 거쳐 4개의 요크로 분산되어 최종적으로 고무에 접하는 8개 지점에 전달된다.

3차원 모델을 이용하여 계산된 반력(y축)은 6가지 각도의 모델 모두 R_a, R_b 에서 약 0.945N이 나타났고 나머지 6개의 지점에서는 약 1.15N으로 확인되었다. 또한 1차원 보 모델과 수학모델의 반력 결과 역시 거의 일치하는 결과를 얻었다. 그러므로 와이퍼 프레임은 간단한 1차원 모델로도 정확한 해석이 가능하므로⁷⁾ 본 연구에서는 해석시간의 감소를 위하여 와이퍼 프레임을 1차원 모델로 생성하여 해석을 수행하였다. 또한 프레임의 각도가 변화함에 따른 지점별 반력이 유사함으로 자동차 유리면에 작용하는 접촉압력을 결정하는 요소는 레일스프링의 곡률과 고무의 재질 그리고 형상의 영향이 큰 것으로 파악되었다. Fig. 3에 3차원 모델과 1차원 모델을 나타냈다.

1차원과 3차원으로 구성된 모델의 검증을 위해

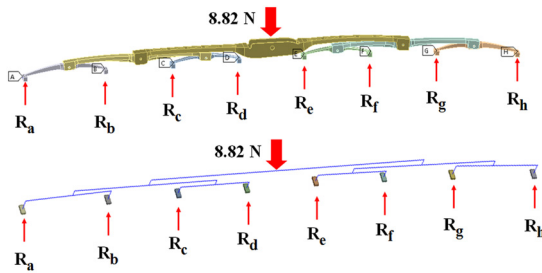


Fig. 3 Reaction forces of 3D and 1D beam models

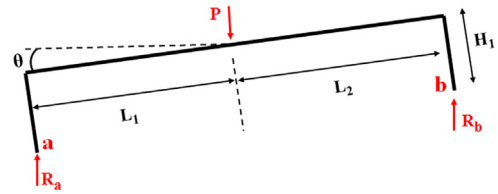


Fig. 4 Free body diagram of the yoke

사용된 수학적 모델은 아래의 식 (1) ~ (4)를 통해 구할 수 있다.

점 b에서의 모멘트 합을 포함하는 평형방정식은 식 (1), (2)로 정의된다.

$$\sum F_y = -P + R_a + R_b = 0 \tag{1}$$

$$\sum M_b = P(L_2 \cos\theta + H_1 \sin\theta) - R_a((L_1 + L_2) \cos\theta) = 0 \tag{2}$$

식 (2)에 식 (1)을 대입하여 정리하면

$$R_b = \frac{P(L_2 \cos\theta + H_1 \sin\theta)}{(L_1 + L_2) \cos\theta} \tag{3}$$

$$R_a = P - R_b \tag{4}$$

두 지점의 반력은 식 (3), (4)와 같이 나타내진다. 이와 같은 방법으로 8개의 요크 지점의 반력을 모두 계산하면 Table 2와 같이 계산된다.

레일스프링과 고무의 민감도를 분석하기 위해 3D 해석으로 프레임과 고무만으로 구성된 모델을 이용하여 접촉압력 해석을 진행하였다.

해석결과 8개의 요크지점에서만 압력이 집중하는 현상이 나타났으며 요크의 사이사이에서는 전혀 압력이 전달되지 않았다. 이로써 레일스프링의 강성과 형상이 와이퍼의 접촉압력에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다.⁸⁾

Table 2 Results of reaction forces for six angles

Angle (deg)	R_a	R_b	R_c	R_d	R_e	R_f	R_g	R_h
0	0.945	1.161	1.151	1.151	1.147	1.158	1.163	0.941
17	0.942	1.163	1.152	1.152	1.151	1.151	1.164	0.942
34	0.945	1.161	1.156	1.151	1.151	1.151	1.164	0.942
51	0.942	1.163	1.157	1.152	1.151	1.152	1.163	0.942
68	0.947	1.158	1.152	1.151	1.151	1.151	1.163	0.942
88	0.947	1.160	1.151	1.151	1.151	1.151	1.164	0.942

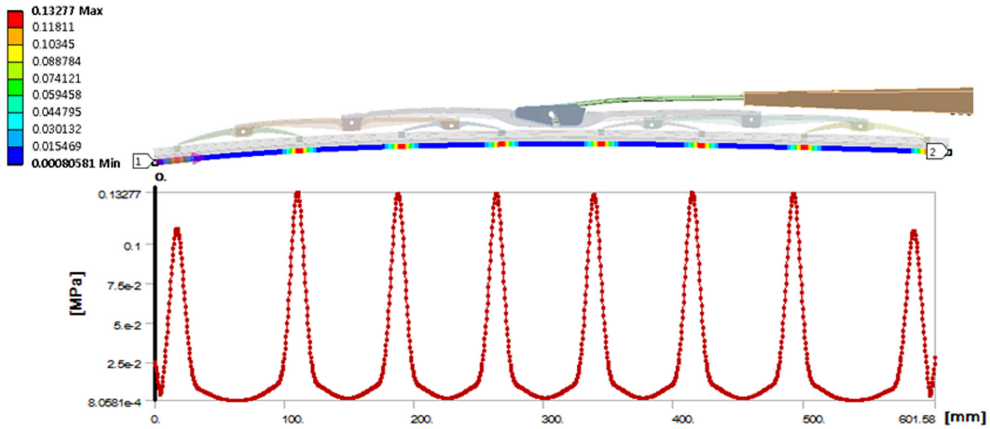


Fig. 5 Stress distribution of the 3D model without rail springs

3.2.1 레일스프링의 영향 분석

실제로 와이퍼 생산업체에서는 레일스프링의 곡률을 변화시켜 접촉압력을 컨트롤하고 있다.⁹⁾ 본 연구에서는 레일스프링의 정방향 곡률(2500mm, 3000mm, 3500mm), 역방향 곡률(2500mm, 3000mm, 3500mm), 일자형에 대해 분석해보았다. 프레임을 1D로 단순화한 모델과 접촉조건을 용의하게 하기 위해 레일스프링 또한 1D 보요소를 이용하여 대리모델을 구성하였다.

실제 본 연구에 사용된 와이퍼의 레일스프링의 단면은 가로 3.5mm × 세로 0.8mm 크기를 가지는 레일스프링이 2개가 들어간다. 하지만 단순화 모델에서는 1개의 레일스프링으로 변환하여 가로 7mm × 세로 0.8mm의 단면정보를 가지는 모델로 생성하였다. 그 이유는 요크와 레일스프링은 1D모델이므로 두 모델들은 선으로 구성되고 각 요크들의 끝점(8개)과 레일스프링의 선은 2개의 레일스프링을 가질 경

우 공간상에 떨어져 있는 상태가 되어 해석상 접촉조건을 줄 수 없으므로 2개의 레일스프링을 1개의 레일스프링으로 변환하여 해석을 진행하였다.

고무를 제외하고 프레임과 레일스프링만으로 구성된 모델의 유한요소해석 결과는 정방향의 곡률을 가지는 레일스프링의 경우 곡률이 커질수록 (2500 mm → 3000mm → 3500mm) 레일스프링의 끝단에서 나타나는 접촉압력이 커지는 것으로 확인되었다. 이는 정방향의 곡률은 초기에 유리면과 레일스프링 양 끝단이 먼저 접촉하여 점차 중간지점까지 내려갈수록 끝단에 많은 에너지가 작용하여 높은 압력이 생성되는 것으로 판단된다.

역방향의 해석결과는 중간지점부터 유리에 접촉하기 때문에中间的 요크에서 상대적으로 큰 접촉압력이 나타났다. 또한 끝단에 위치한 요크에서 나타나는 접촉압력은 정방향의 레일스프링에 비해 0에 가까운 접촉압력을 갖게 되는데 이는 Table 2에서

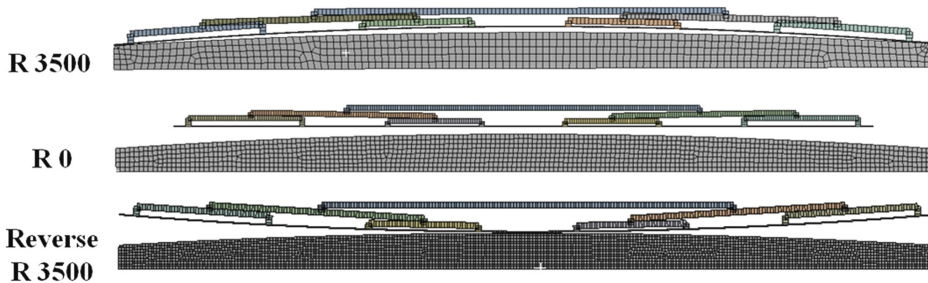


Fig. 6 Simplified FE models without rubbers

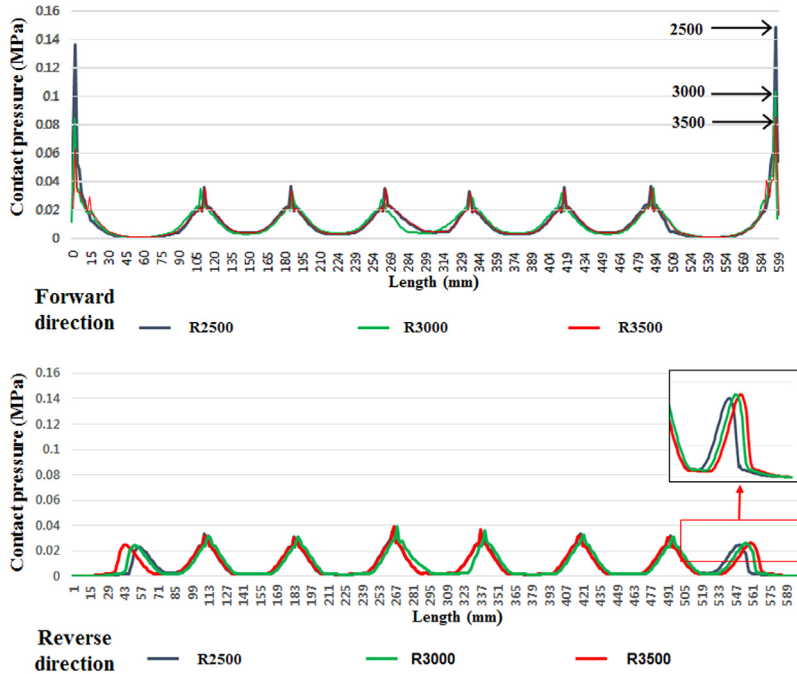


Fig. 7 Analysis results of contact pressure for forward and reverse directional rail springs

나타난 바와 같이 양쪽 끝단에 위치한 요크에서의 반력(R_a , R_b)은 다른 6개의 지점보다 낮은 힘으로 레일스프링을 누르게 되고, 이로 인해 레일스프링의 끝단은 충분히 유리에 접촉하지 못하면서 유리와의 유격이 발생하기 때문이다. 레일스프링의 곡률이 작으면 작을수록 유리와의 유격이 크므로 레일스프링의 끝단을 접촉시키는데 충분한 힘이 작용하기 어려우므로 마지막 요크지점의 접촉압력의 피크값은 곡률이 큰 레일스프링보다 중심방향으로 치우쳐 있다. Fig. 7은 고무를 제외하고 프레임과 레일스프링으로 구성된 해석결과를 보여준다.

3.2.2 고무의 영향 분석

프레임과 레일스프링으로 구성되어진 모델의 결과는 여전히 요크 사이에서 접촉압력이 0으로 나타나고 있다. 프레임과 레일스프링만 고려된 해석 결과는 실험 결과와 차이가 크므로 고무와 레일스프링이 모두 포함된 모델의 해석이 필요하다. 본 연구에서는 레일스프링을 감싸는 고무를 보조요소와의 접촉조건 및 해석의 단순화를 고려하여 2차원 쉘요소로 생성하여 접촉압력 해석을 수행하였다.

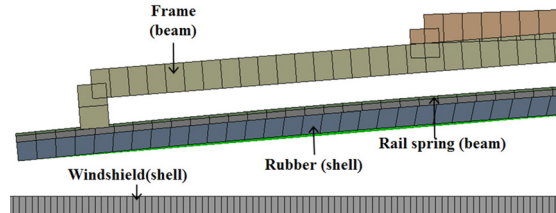


Fig. 8 Simplified FE model with a rubber

고무는 실제형상을 고려하여 0.65mm의 두께를 가지도록 하였다. 최종적으로 접촉압력 측정 모델은 와이퍼 프레임과 레일스프링 부분은 1차원 모델로, 고무는 2차원 모델로 생성하였다. Fig. 8에 와이퍼 단순화 모델을 나타내었으며 해석 결과는 4장에 자세히 기술되어 있다.

4. 와이퍼 단순화 모델의 검증

고무를 포함한 단순화 모델의 해석을 위해 정방향 곡률 3000mm, 일자형, 역방향 곡률 4000mm 3가지 모델을 곡률이 없는 유리면에 수직으로 내려 생성되는 접촉압력에 대한 해석을 진행하였다.

Fig. 9에서 보이는 바와 같이 해석 결과 접촉압

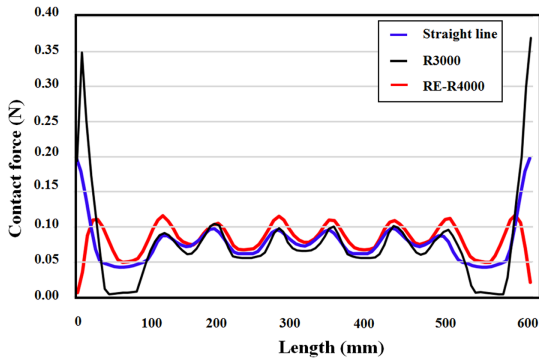


Fig. 9 Analysis results of the contact forces

력은 요크와 고무가 접촉하는 8개의 지점에서 부분적으로 최대값을 가지게 된다. 레일스프링 곡률이 역방향 곡률 4000mm의 경우 가장 높은 접촉압력분포를 가지는 것으로 나타났으며 일자형과 정방향을 가지는 곡률에서는 양 끝의 요크 사이에서 접촉력이 떨어지지만 고무의 끝단에서는 접촉력이 스프링 반경이 3000mm, 0, 역방향 4000mm 순서로 접촉력이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 역방향 레일스프링은 유리면과 반대방향으로 휘어져 있어 와이퍼의 누름압은 레일스프링을 유리면에 접촉하도록 하는 일을 하는데 사용되어 상대적으로 유리와의 변위가 크기 때문에 최종적으로 접촉시 끝단에서는 접촉력은 낮아지게 된다.

반대로 정방향과 일자형 레일스프링은 유리면과 접촉한 상태에서 누름압을 받기 때문에 접촉력은 상대적으로 크게 나타나는 것으로 판단된다.

단순화 모델의 해석 결과를 검증하기 위해 해석과 동일한 조건으로 분포압 측정기를 이용하여 접촉압력을 측정하였다. 와이퍼의 분포압 측정 장치는 Tekscan사의 제품을 사용하였으며 Evolution Handle with attached USB cable, 와이퍼 센서, 수집용 컴퓨터로 구성된다. 센서는 전체길이 610mm, 총 96의 셀(cell)로 구성되어 있으며, 평평한 유리판에 블레이드를 설치 후 일정한 무게의 추를 달아 수차례 반복 측정을 한다. 반복측정으로 계산된 분포압의 평균값을 기준으로 해석결과와 비교하였다. Fig. 10은 실험장치를 보여주는 사진이다.

Fig. 11을 보면 실험결과는 센서의 민감도 문제로 인해 노이즈가 발생하지만 대체적으로 단순화모델

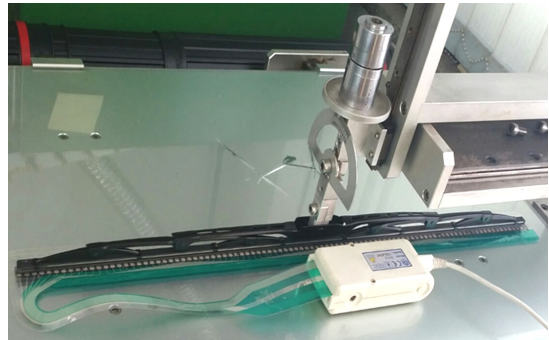


Fig. 10 A measuring set for wiper contact pressures

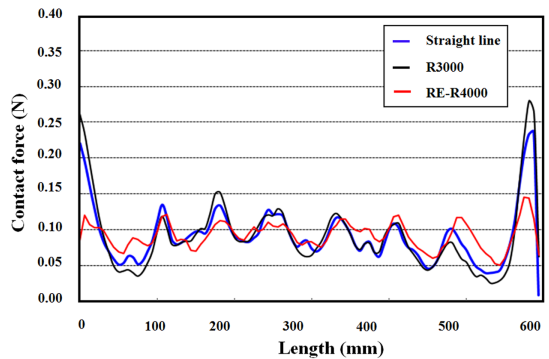


Fig. 11 Experimental results of the contact forces

을 사용한 해석결과와 매우 유사한 결과를 나타냈다. 하지만 접촉력의 값은 끝단 부근에서 실험값과 해석값 사이에 다소 차이가 있었다. 그 이유는 실제 와이퍼 블레이드 모델에서 와이퍼의 누름압이 작용했을 때 블레이드 고무면과 유리면의 접촉부분에서 고무의 변형이 발생하는데 특히 끝단에서의 변형정도가 커서 2차원 쉘 요소로는 그 변형 현상을 정확히 구현하지 못한 것으로 사료된다.

비록 해석결과에서는 끝단에서의 실험값과 차이가 다소 있었지만 전체 와이퍼 길이 방향으로 접촉압력의 값은 유사하며, 레일스프링 반경에 따른 접촉압력의 특성 역시 실험값과 유사한 양상을 보였으므로 해석 결과의 타당성을 확인할 수 있었다. 또한, 3차원 모델을 이용한 해석은 3~4일 정도의 해석 시간이 소요되고 접촉조건에 민감하여 해가 수렴하지 않는 경우도 종종 발생한다. 하지만 단순화 모델의 해석시간은 불과 4~5분이 소요되었으므로 본 연구를 통하여 결과의 정확성 뿐 아니라 해석시간 감소의 효과까지 거둘 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 3차원 솔리드 모델 와이퍼를 1차원 보 모델과 2차원 셸 모델을 이용한 모델 단순화를 통해 결과의 정확성은 유지하면서 해석시간을 감소시키고 해의 수렴성 또한 증가시켰다.

- 1) 스프링에 의한 누름압 해석을 통해 유리면에 수직 방향으로 8.82N이 나타난다는 것을 확인하고 단순화모델에 누름압으로 적용하여 헤드와 암을 해석에서 제외할 수 있었다.
- 2) 레일스프링 곡률에 따른 영향을 알아보기 위해 정방향 곡률(2500, 3000, 3500), 역방향 곡률(2500, 3000, 3500), 일자형에 대해 분석한 결과 전체적으로 요크지점에서 최대압력이 나타나는 것을 확인하였으며 정방향과 역방향에서 요크의 양 끝단 압력이 달라진다는 특징을 찾을 수 있었다.
- 3) 보요소와 셸요소를 사용한 최종 와이퍼 단순화 모델로 접촉압력의 해석과 실험결과를 비교하였다. 접촉압력의 실험결과와 해석결과는 와이퍼 길이방향으로 유사한 분포를 가지며 레일스프링의 곡률 변화에 따른 접촉압력 특성 역시 유사하였다.
- 4) 본 연구결과에서 도출된 단순화 모델은 와이퍼를 제작하기 이전에 제안된 접촉압력 양상을 미리 예측할 수 있는 사전 자료로 활용될 수 있으며 이는 와이퍼 설계의 합리성 및 생산의 효율성 향상에 많은 도움이 될 것이라 판단된다.

향후 단순화 모델의 해석의 정확성을 높이기 위해서 작동 시 발생하는 고무의 변형과 진동 등 분포압에 미치는 다양한 인자의 영향에 대한 연구도 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 · 한국산업기술진흥원 지정 계명대학교 전자화 자동차부품지역혁신센터(B0008866)의 지원에 의한 것입니다.

References

- 1) B. S. Lee and J. Y. Shin, "Contact Pressure Analysis of a Windshield Wiper Blade," Transactions of KSAE, Vol.14, No.3, pp.51-57, 2006.
- 2) Y. H. Kim, J. H. Oh and K. C. Shin, "The Study of Wiper Shape for the Uniformed Pressure on the Glass," KSME Spring Conference Proceedings, pp.245-246, 2010.
- 3) S. H. Hong, Effects of the Cross Sectional Change in the Wiper-blade on the Wiping Angle, M. S. Thesis, Seoul National University of Technology, Seoul, 2010.
- 4) Y. H. Kim, Structural Analysis of a Flat Type Windshield Wiper System and Rubber Blade for Automobiles, M. S. Thesis, Hanyang University of Mechanical Design and Mechatronics, Seoul, 2011.
- 5) W. H. Kim, T. W. Park, J. B. Chai, S. P. Jung and W. S. Chung, "Estimation of Contact Pressure of a Flat Wiper Blade by Dynamic Analysis," Transactions of KSME-A, Vol.34, No.7, pp.837-842, 2010.
- 6) S. J. Lee, Y. J. Noh, K. N. Kim, D. H. Kim, K. W. Kim, Y. K. Jang and K. H. Kim, "Contact Pressure Analysis Using Simplified Models of Automobile Wiper Blades," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.935-937, 2014.
- 7) S. J. Park, Structural Effects of Short Walls in Building Structures for Simplified Modeling for Structural Analysis, M. S. Thesis, Hankyong National University of Architectural Engineering, Gyeonggi, Korea, 2011.
- 8) K. J. Song and H. I. Lee, "Study on the Profile of Body Spring in the Flat Type Wiper Blade for an Intended Contact Pressure Distribution," Transactions of KSME, Vol.21, No.2, pp.55-62, 2013.
- 9) Y. S. Yoon and T. H. Kim, "Development of an Optimum Curve of an One-point Supported Flat Wiper Spring Rail with Uniform Pressure," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.8-12, 2007.