

유한요소해석을 통한 자동차용 글라스의 승강성능 예측§

문형일* · 김현영*† · 최 천** · 이인혁*** · 김도형****

*강원대학교 기계의용공학과, **우송정보대학 기계/자동차/설비계열, ***한국 이에스아이, ****화승 R&A

Prediction of Lift Performance of Automotive Glass Using Finite Element Analysis

Hyung-il Moon*, Heon Young Kim*†, Cheon Choi**, In Heok Lee*** and Do Hyung Kim****

* Dept. of Mechanical & Biomedical Engineering, Kangwon National University.

** Division of Mechanical/Automotive/HVAC & Plumbing Engineering, Woosong Information College.

*** Analysis consulting part, HANKOOK ESI Co. Ltd.

**** W/S design team, Hwaseung R&A Co. Ltd.

(Received May 14, 2010 ; Revised August 12, 2010 ; Accepted August 20, 2010)

Key Words : Glass Lift Performance(글라스 승강성능), Window Regulator(윈도우 레귤레이터), Glass Run(글라스 런), Explicit Code(익스플리시트 코드)

초록: 파워 글라스 시스템의 특성은 주로 윈도우 레귤레이터의 거동 특성과 글라스 런에 의한 저항에 의해 결정되며, 시험 결과 분석을 통해 시스템의 성능을 예측한다. 본 논문에서는 시험적인 방법의 한계를 해결하기 위해, 익스플리시트 코드를 사용한 해석적 방법을 제안하였다. 해석 모델에 사용한 글라스 런은 무니-리블린 모델을 사용하여 모델링 하였고, 다양한 조건에서의 마찰 시험을 실시하여 마찰계수를 구하였다. 또한, 윈도우 레귤레이터 파트의 메커니즘은 패스트 벨트 시스템과 슬립 링 요소를 사용하여 모델링 하였고, 상승 시 발생하는 전류와 하중과의 상관관계 분석을 통해 레귤레이션 메커니즘의 신뢰성을 검증하였고, 모터의 특성을 고려하여 신뢰성 있는 글라스 상승 시간을 예측하였다.

Abstract: The performance of power window system was decided by driving characteristics of the window regulator part and reaction by the glass run. The performance of power window system usually has been predicted by experimental methods. In this paper, an analytical method using the explicit code was suggested to overcome the limit of the experimental methods. The friction coefficient of glass run was obtained by the friction test at various conditions and the Mooney-Rivlin model was used. Also, a mechanism of window regulator consisted of the fast belt system and the slip ring elements. And, we conducted the analysis considering characteristic of a motor and obtained the lifting speed of automotive glass with high reliability

1. 서 론

자동차의 감성적인 설계 기술의 중요성이 증가함에 따라, 자동차용 도어 시스템은 기본적인 성능뿐만 아니라 사용자의 편의성 및 안락함에 대한 기능을 추가적으로 고려하여야 한다. 자동차용 글라스 작동 시스템 역시 감성적인 설계가 필수적인 부분으로서, 기본적인 실링(sealing) 성능과 더불어

시스템의 효율에 대한 고려가 반드시 필요하다.⁽¹⁾

최근, 대부분의 자동차의 글라스 작동 시스템은 모터를 사용한 파워 글라스 시스템을 사용한다. 파워 글라스 시스템의 승강 성능의 향상을 위해서는 레귤레이터(regulator)와 글라스 런(glass run or glass run channel)의 설계기술이 개선되어야 한다. 레귤레이터와 글라스 런의 설계 과정에서 제품의 특성을 예측하고 평가하는 방법은 주로 시제품의 시험 결과 분석을 통해 이루어진다. 그러나 비용 및 시간, 설계 프로세스에서의 활용성 등의 문제로 인하여 해석을 통한 평가 기술의 필요성이 증가되고 있다. 해석을 통한 파워 글라스 시스템은 주로 동역학 해석을 기반으로 한 레귤레이터의 거

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임.

† Corresponding Author, khy@kangwon.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

동에 대한 연구가 주를 이루고 있다.^(2~7) 하지만, 글라스 런의 변형 효과까지 고려한 해석 방안에 대한 연구는 아직까지 미비한 상태이다.

본 논문은 글라스 런의 효과를 포함한 파워 글라스 시스템의 해석 방안을 기술하였다. 비선형 유한요소 해석을 통해 글라스 런의 변형 효과를 고려할 수 있도록 하였으며, 패스트 벨트 시스템(fast belt system)을 이용하여 레귤레이터의 작동 메커니즘을 구현하였다. 또한, 제안된 해석 모델을 사용하여 케이블에 발생하는 장력(tension)의 변화 및 글라스와의 밀폐성을 평가하였고, DC 모터의 특성을 고려하여 글라스의 승강시간까지 예측해 보았다. 마지막으로 승강 해석 모델의 신뢰성 평가를 위해 승강 해석 시험 결과와 해석 결과를 비교해 보았다.

2. 파워 윈도우 시스템

파워 윈도우 시스템은 크게 3 부분으로 나눌 수 있다. 가장 기본이 되는 글라스, 글라스와 도어 프레임 사이에 위치한 글라스 런, 마지막으로 윈도우 레귤레이터로 구분할 수 있다.

글라스 런은 윈도우 프레임(chassis frame)에 장착되어 주행 중 발생하는 진동으로부터 글라스의 파손을 방지하고, 외부로부터의 이물질 유입을 방지하는 자동차용 웨더스트립이다. 글라스 런의 장착으로 인하여 윈도우 시스템은 승강(하강) 시 저항(마찰)을 고려하여 설계되어야 한다. 특히 유선형 기하(geometry) 구조를 가진 윈도우 프레임을 고려하면, 글라스 런의 마찰 특성은 승강성능에 있어 매우 중요한 요인이라 할 수 있다. 글라스 런은 주로 고무 재료를 사용하여 압출 공정을 통해 제조된다. 이때 저항력 감소를 위하여, 글라스와 접촉하는 립(lip) 부분에 플로킹(flocking) 또는 우레탄(urethane) 코팅을 사용한다.

윈도우 레귤레이터는 자동차의 글라스 승/하강 거동을 발생시키는 모듈을 말한다. 파워 윈도우 시스템의 레귤레이터의 작동원리는 다음과 같다. 운전자가 파워 윈도우 스위치를 조작하면 전기극성 변화에 따라 회전 변환이 가능한 모터에 연결된 케이블이나 기어장치에 의해 유리가 오르내리게 된다. 모터와의 연결방식과 작동 방식에 따라 다양한 형태로 분류되는데, 현재 대부분의 차량의 경우 듀얼 레일 케이블 방식(dual-rail cable type)을 사용한다. 본 연구에서도 해석 모델 역시, Fig. 1과 같은 듀얼 레일 케이블 방식의 레귤레이터를 사용한 파워 윈도우 시스템을 사용하였다.^(7,8)

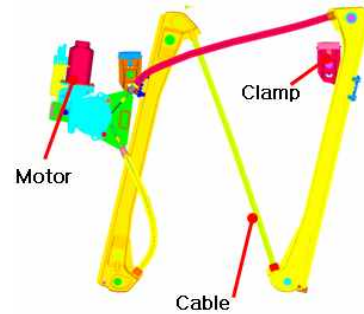


Fig. 1 The dual channel window regulator of cable type

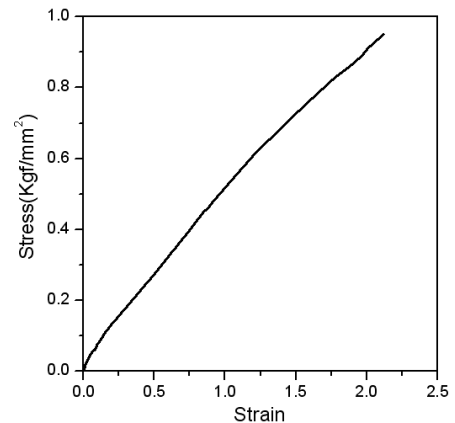


Fig. 2 Stress-strain curve of rubber material

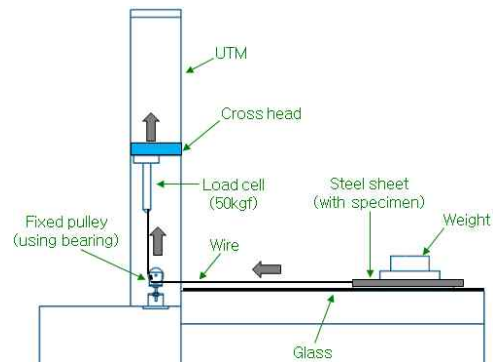


Fig. 3 Test equipment for measuring friction coefficient

3. 파워 윈도우 시스템

3.1 초탄성 모델

고무 재료는 낮은 응력에서도 높은 변형성을 가지며, 고 변형률에서도 탄성의 성질을 나타낸다. 또한 하중과 변형과의 관계가 비선형적으로 나타나므로 후크의 법칙(Hook's law)도 적용할 수 없게 된다. 이러한 대변형 탄성 거동을 해석적으로 구현하기 위해서 식 (1)과 같은 에너지(W)와 응력(T)-변형률(ϵ)의 관한 식을 사용한다.

$$T = \partial W / \partial \epsilon \quad (1)$$

식 (1)을 변형률 불변량(strain invariants)의 함수로 표현하면 식 (2)와 같이 표시되고,

$$W = W(I_1, I_2, J) \tag{2}$$

변형률 불변량을 주 신장량(principal stretch)으로 변환하면 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ J &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \tag{3}$$

또한 고무재료는 비압축성 ($J = 0$) 이므로, W 는 I_1, I_2 의 함수가 된다. W 의 정의에 관한 연구는 현재 많은 연구자들에 의해 제시되었다. 본 논문에서는 무니-리블린(Mooney-Rivlin)모델을 사용하였다.^(9,10)

Table 1 Friction test result as variation of length

L (mm)	M (Kgf)			μ
	Min.	Max.	Mean	
140	3.28	3.45	3.325	0.314
120	3.37	3.42	3.35	0.316
100	3.34	3.63	3.45	0.325
80	3.55	3.67	3.55	0.335
60	3.33	3.61	3.45	0.325

Table 2 Friction test result as variation of speed

V (mm/min)	M (Kgf)			μ
	Min.	Max.	Mean	
60	2.68	2.81	2.71	0.313
30	2.51	2.72	2.59	0.302
10	2.53	2.75	2.62	0.305
5	2.55	2.85	2.65	0.308
3	2.41	2.84	2.60	0.302

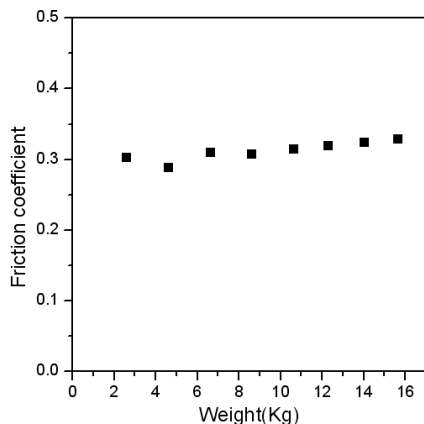


Fig. 4 Variation of friction coefficient according to load

3.2 단축인장 시험 및 마찰시험

글라스 런의 재료 모델링을 위한 시험은 단축인장 시험과 마찰시험을 실시하였다.

먼저 단축인장 시험의 경우, 다음과 같은 가정과 조건을 사용하였다. 일반적인 3 차원 고무 부품의 해석의 경우, 단축인장 시험 결과와 더불어 평면변형, 이축인장 등의 시험 결과를 사용한다. 하지만 글라스 런의 경우, 단면 두께가 비교적 얇고(3mm 이내), 대부분의 변형이 굽힘(bending) 모드이므로 단축인장 시험 결과만을 사용하여 재료를 모델링 하였다.

단축인장 시험용 시편은 KS 규격의 아령형 3 호 시편을 사용하였고, 표점거리 20mm, 20mm/min 의 속도로 시험하였다. 해석에 사용한 데이터는 5 번의 시험 결과의 평균값을 사용하였다.(Fig. 2)

또한, 글라스 런에 사용된 코팅재의 마찰계수를 구하기 위하여 Fig. 3 과 같은 마찰 시험을 실시하였다. 시험 방법은 넓은 유리 평판 위에 글라스 런 코팅부를 부착한 판재와 로드 셀을 연결시키고 판재 위에 일정한 하중(N)을 가한 후, 판재를 수평 방향으로 이동 시킬 때 발생하는 와이어의 장력(F)을 측정 후, 식 (4)에 대입하여 마찰계수 (μ)를 구하였다.

$$F = \mu N \tag{4}$$

마찰 시험용 시편은 실제 글라스 런의 코팅부를 가공(폭=10mm)하여 사용하였고, 판재에 나란한 방향으로 2 개를 나란히 부착하여 실험을 실시 하였다. 또한 장력 측정용 로드 셀은 50kgf 을 사용하였고, 접촉면적(길이, L) 및 속도(V), 그리고 하중(M)을 다르게 하여 실시하였다.

마찰면적 및 속도의 영향성 평가를 위한 시험은 각각 $V=10\text{mm/min}$, $M=10.6\text{Kg}$ 의 조건과 $L=100\text{mm}$, $M=8.6\text{kg}$ 의 하중 조건을 사용하였다. 시험 결과는 Table 1, 2 와 같이 마찰면적 및 속도에 따라 최대 약 0.03 의 차이가 발생됨을 확인할 수 있었다. 시험상의 오차 및 시편의 불균일성을 감안할 때 마찰 면적 및 속도의 영향성은 크게 발생하지 않았음을 확일 할 수 있었다.

두 시험 결과를 바탕으로 하여 $V=10\text{mm/min}$, $L=100\text{mm}$ 의 조건에서 하중을 2.6kg ~ 15.6kg 까지 변화시키며 마찰 계수를 측정하였다. 10 번 이상의 반복 측정 후 얻어진 마찰계수의 평균값은 Fig. 4 와 같다. 우레탄 코팅의 경우 평균 0.31, 플로킹 코팅의 약 0.43 정도의 마찰계수를 구할 수 있었다. 플로킹 코팅이 우레탄 코팅에 비해 약 38% 정도 큰 마찰계수를 갖는 것으로 평가되었다.

Table 3 Conditions and values for the solid 17 model

Option	value
Frozen metric	Not Active
Elasticity	Poisson's ratio load = 0.499 Poisson's ratio unload = 0.499
Unloading/Reloading condition	Tension curve = uniaxial tension test data
Bulk and Hourglass viscosity coefficient	Quadratic bulk coef. = 1.2 Linear coef. = 0.06 Hourglass coef. = 0.1 (※ default value)
Element formulation	Selective Reduced integration

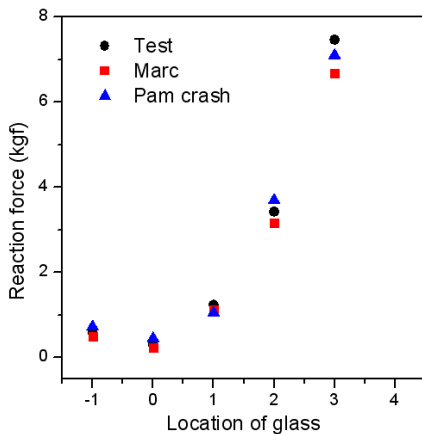
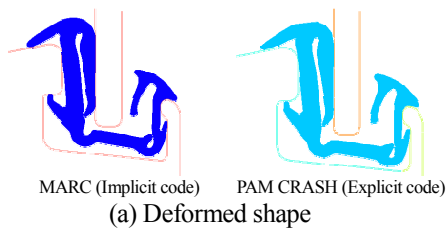


Fig. 5 Comparison of test and 2 kinds of code analysis

4. 초탄성 모델의 익스플리시트 코드 적용성 평가

일반적으로 고무와 같이 강성이 약한 재료는 임플리시트(implicit) 코드를 사용하여 해석한다. 그러나 임플리시트 코드는 승강 해석 모델과 같이 요소 수가 증가하거나, 복잡한 경계조건(boundary condition) 및 다양한 접촉(contact pair)을 갖는 문제의 해석에 있어 수렴성 및 효율성이 크게 저하된다. 반면 익스플리시트(explicit) 코드는 상대적으로 이러한 문제들을 손쉽게 해결할 수 있다.

초탄성 모델의 익스플리시트 코드 적용성 평가는 글라스 런 립의 반력 측정 결과와 해석을 통해 계산된 반력 결과를 비교하여 확인하였다. 또한,

임플리시트 코드를 사용한 해석(MARC 사용) 결과와 익스플리시트 코드를 사용한 해석(PAM CRASH 사용) 결과를 비교해 보았다.

먼저 립 반력 시험은 실제 윈도우 프레임과 동일한 형상의 지그에 글라스 런을 장착한 후 글라스 런 사이에 글라스를 위치시킨 후 위치를 변화시키면서 발생하는 하중을 측정하였다. 설계상의 글라스 위치를 D0 로 명칭 할 때, 실내 쪽으로 1mm(D-1), 실외 방향으로 1~3mm (D+1~D+3)에 대한 결과를 측정하였다.

검증 해석 역시 시험과 동일한 경계조건을 사용하여 해당되는 지점에서의 반력을 확인해 보았다. 글라스 런의 유한요소 모델은 각 변의 길이가 모두 1mm 이하의 크기를 가진 6 면체 솔리드 요소를 사용하였고, 모든 프레임과 글라스는 셸(shell) 요소를 사용하였다. 또한 프레임과 글라스는 강체(rigid body) 조건을 사용하였고, 프레임과 글라스 런의 마찰계수는 0.31 을 사용하였다.

MARC 를 사용한 해석 모델에서 글라스 런은 Plane strain full & Herrmann formulation 요소를 사용하였고, PAM CRASH 의 경우 Hyperelastic Mooney-Rivlin with hysteresis option 모델을 사용하여 모델링하여 Table 3 과 같은 조건에서 해석하였다. 또한 Time scale 은 0.001msec, 댐핑(nodal damping) 계수는 0.2 를 사용하였고, 25 mm/msec 이하로 글라스 런이 변형되도록 하였다.⁽¹¹⁻¹⁴⁾

시험 및 해석 결과는 Fig. 5 와 같다. MARC 를 사용한 변형 형상과 PAM CRASH 를 사용한 변형 형상이 서로 유사함을 확인 할 수 있었다. 또한 D-1 ~ D+1 의 범위에서는 두 해석 결과 모두 시험 결과와 비교해 약 ± 0.1Kgf 내의 오차를 확인할 수 있었다. 하지만 D+2 위치에서는 ± 0.25kgf, D+3 의 위치에서는 +0.78 Kgf (MARC), +0.36Kgf (PAM CRASH)의 오차가 발생하였다. 그러나 승강거동 시 글라스 런은 주로 D-1 ~ D+2 사이에서 눌림이 발생되며, 시험에서 발생할 수 있는 오차를 감안 할 때 충분한 신뢰성이 있다고 판단 할 수 있다.

5. 레귤레이터 모델링

레귤레이터 모델은 Fig. 6 과 같이 구성하였다. 가이드 레일(guide rail) 및 클램프(clamp), 슬라이더(slides)와 같은 부품은 중간 면(mid-surface)을 기준으로 한 셸 요소(shell element)를 사용하였고, 글라스의 경우 외각 면을 기준으로 한 셸 요소를 사용하였다. 또한, 케이블(cable)은 비선형 바 요소(non-

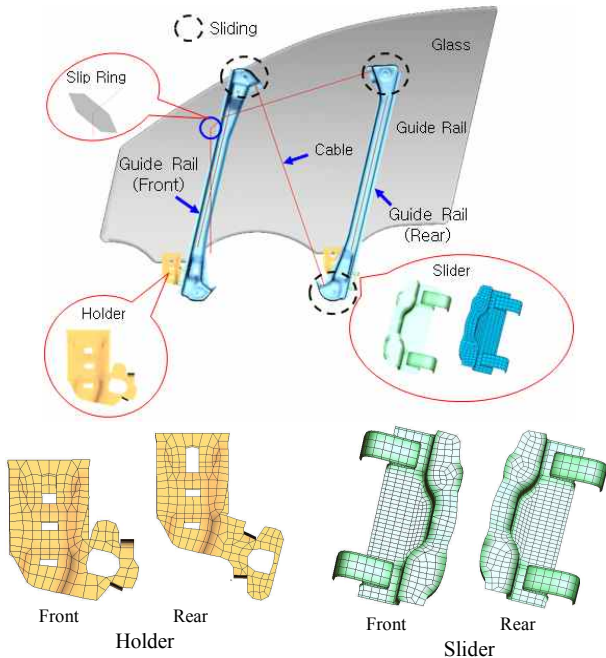


Fig. 6 Finite element model of door window regulator

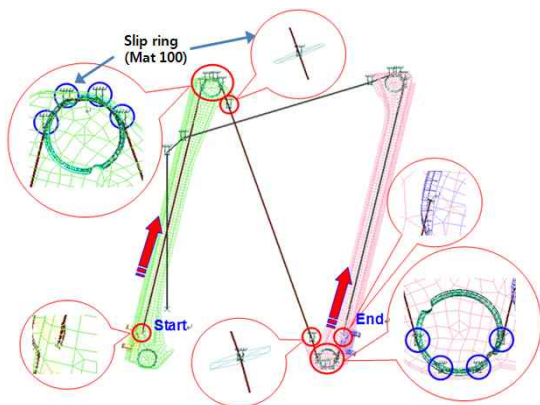


Fig. 7 Finite element model of cable using slip ring and fast belt system

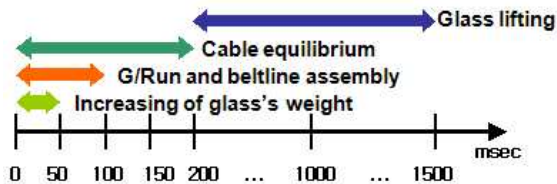


Fig. 8 The procedure of door glass lifting analyses

linear bar element)를 사용하여 모델링 하였다. 이때, 케이블의 강성은 50KN/mm, 질량은 1mm 당 약 1.0E-6Kg 을 사용하였다.

또한, PAM CRASH 의 페스트 벨트 시스템(Fast belt system)에 사용되는 가이드 링(guide ring)은 슬립 링(slip ring)요소를 사용하여 Fig. 7 과 같이 구성하여 실제 레귤레이터와 동일한 방향으로 동력 전달이 가능하게 하였다. 가이드 레일, 슬라이더, 홀

더, 글라스는 강체(무게 중심점에 모든 노드를 구속) 조건을 사용하였다. 가이드 레일과 슬라이더 간의 마찰계수는 충분한 윤활 조건이라 가정하여 0 을 사용하였다. 마지막으로 가이드와 슬라이더간의 접촉 조건은 Node to segment 을 사용했다.⁽¹⁴⁾

6. 글라스 승강 해석 및 신뢰성 평가

6.1 글라스 승강 해석

글라스 승강 해석은 Fig. 8 과 같은 순서로 총 1500msec 동안 해석하였다. 먼저 0~50msec 동안 글라스의 무게 중심에 가속도(9.8m/s²)를 선형적으로 증가시켰고, 동시에, 0~100msec 동안 글라스 런과 벨트라인(belt line)을 해당위치로 장착하였다.

벨트라인의 장착해석의 경우 장착면과 레귤레이터 모델간의 접촉조건을 주고 고정되어있는 레귤레이터 모델에 벨트라인을 수평하게 이동하는 방식을 사용하였다. 글라스 런의 경우 고정된 윈도우 프레임에 글라스 런이 삽입되는 방식을 사용해야 한다. 하지만 이러한 체결 방식은 해석적으로 구현하는데 많은 어려움이 발생된다. 본 연구에서는 Fig. 9 와 같은 방식으로 글라스 런을 체결하였다. 글라스 런의 압출 상태(체결 전 상태)에서 일부 노드들을 구속하고, 윈도우 프레임을 강제로 열었다가 닫으면서 장착되는 방식이다. 장착된 후, 구속된 노드들의 구속 조건을 제거하여 탄성력에 의해 자연스럽게 위치 될 수 있도록 하였다.¹¹⁻¹²⁾

그 후, 케이블의 정적 평형 상태 구현하기 위해 200msec 동안 일정한 곡선을 따라서 0mm/msec 에서 0.005mm/msec 로 케이블 끝 노드 속도를 증가시키고, 200msec 이후부터는 일정한 0.05mm/msec 의 속도를 일정하게 유지하였다.

글라스 승강해석 결과 Fig. 10 과 같은, 글라스 이동에 따라 변하는 케이블 끝단에서의 장력(cable force)를 구할 수 있었다. 또한 Fig. 11 과 같이 글라스와 글라스 런(또는 벨트라인)과의 접촉력의 분포 역시 확인 할 수 있었다.

6.2 신뢰성 평가

해석결과의 신뢰성 평가는 시험을 통해 측정된 글라스 상승력과 해석 결과로부터 얻어진 상승력을 비교하여 평가하였다. 먼저 글라스 상승력 측정 시험은 글라스 승강 시 발생하는 모터의 전류 변화를 측정할 수 있도록 제작된 시험기를 사용하여 등속운동 구간에서의 전류 변화를 측정하였다. 윈도우 글라스에 1~8 kgf 의 하중을 장착시켜 측정된 전류의 변화를 확인해 본 결과 Fig. 12 와

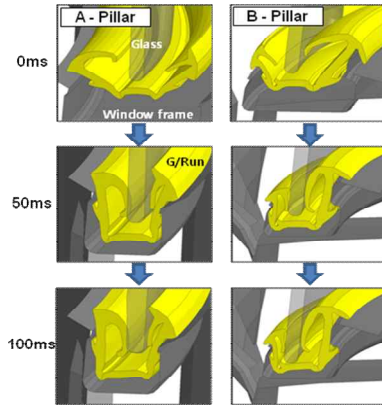


Fig. 9 Assembly analysis of glass runs

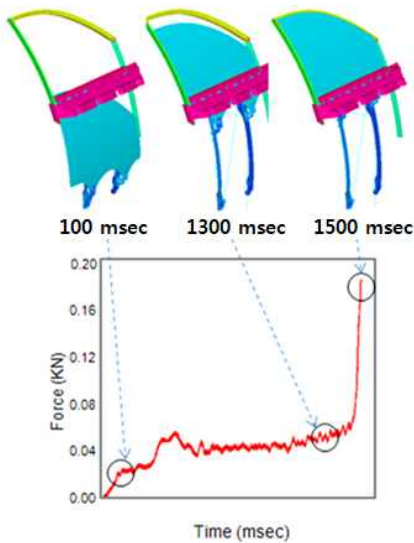


Fig. 10 Tension variation of cable due to glass movement

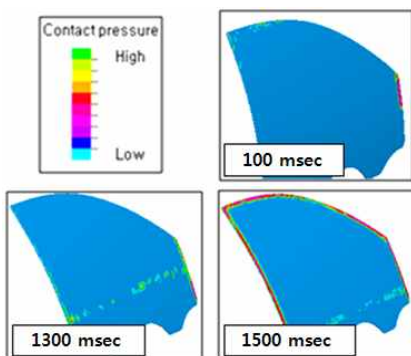


Fig. 11 Contact force analyses with glass lifting

같이 1kg 당 약 0.263A 씩 전류량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 하여 3 가지 조건으로 상승 전류량을 측정해 보았다. 오직 레귤레이터에 의해 측정된 전류량(Case 1), 여기에

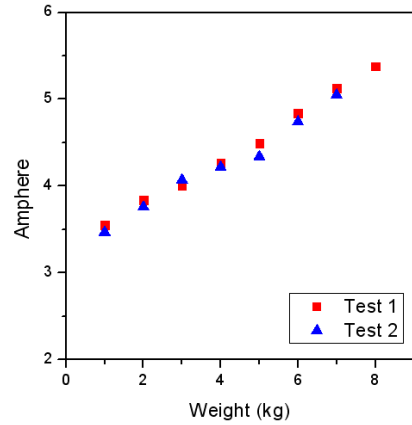


Fig. 12 Relation of load and current for lifting glass

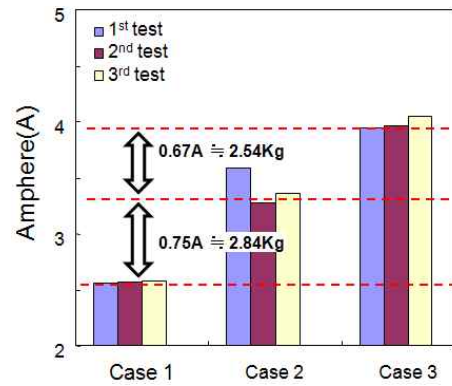


Fig. 13 Current variation on three test cases

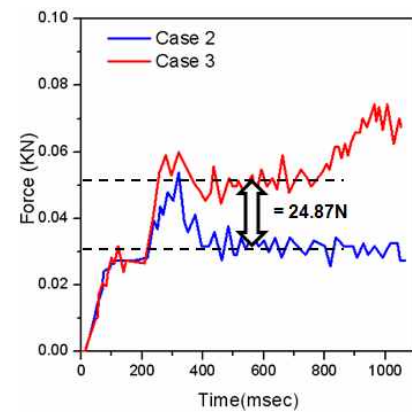


Fig. 13 Predict of lifting force increment by analysis

글라스를 장착하고 측정된 전류량(Case 2), 마지막으로 글라스 런의 영향까지 고려하여 측정된 전류량(Case 3)을 비교해 본 결과, 평균적으로 글라스 장착으로 인해 27.83N(0.75A)의 상승력 증가가 발생하였고, 글라스 런 장착으로 인해 약 24.89N(0.67A)의 상승력이 증가하는 것을 확인하였다.

Case 2 와 Case 3 의 시험과 동일한 조건에서 해석한 결과, Fig. 14 와 같이 등속운동 구간에서 Case 2 와 Case 3 에 발생된 케이블 장력의 차이가 약 24.87N 임을 확인하였고, 시험 결과와 상당히 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

6.3 상승시간 예측

글라스 상승 시간 예측 과정은 다음과 같다. 먼저 해석을 통해 글라스 상승 시 발생하는 케이블의 장력을 예측한다. 이를 식 (5)을 사용하여 토크(Torque, T_L)로 환산하여 레귤레이터의 회전 수를 계산한다.

$$T_L = (1/G) \times F_c(D/2) \quad (5)$$

식 (5)에서 G 는 모터의 감속비, D 는 모터 풀리(pulley)의 지름, F_c 는 케이블에 발생하는 힘을 의미한다.

그 후 레귤레이터에 사용된 전기모터(DC motor)의 T_L 과 표준 회전수의 관계를 통해 케이블이 감기는 속도를 구한 뒤 글라스의 상승 속도를 예측하였다. 예측된 상승속도 및 상승시간은 각각 10.01cm/sec, 3.8sec 였다. 시험을 통해 얻어진 글라스의 상승 시간인 약 3.4sec 와 비교하여 0.4sec 의 오차를 갖는 결과를 얻을 수 있었다.

7. 결 론

본 논문은 비선형 유한요소 해석을 통한 자동차용 글라스의 승강성능 예측 방안을 제시하였고, 시험 결과와 비교하여 신뢰성을 평가하였다. 본 논문은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

(1) 다양한 조건에서의 마찰시험을 통해 우레탄 코팅과 플로킹 코팅의 마찰계수를 구하였다.

(2) 익스플리시트 코드를 사용한 글라스 런의 유한요소 모델링 방안을 제시하였고 신뢰성을 평가하였다.

(3) PAM CRASH 의 Fast belt system 을 사용하여 듀얼 채널 와이어케이블 방식의 레귤레이터모델링 방안을 제시하였다. 또한 상승 전류의 변화와 하중간의 관계를 통해 제시된 모델의 신뢰성을 평가하였다.

(4) 글라스 승강해석을 통해 글라스 상승 시 발

생하는 케이블 장력의 변화 및 글라스 런의 접촉면적 변화 등을 확인하였고, 계산된 케이블 장력과 모터의 특성을 이용하여 글라스 상승시간을 예측하였다.

참고문헌

- (1) Shin, D.M. and Lim, S.H., 2002, *Car Design*, Hyungseul-Sa, Seoul, pp. 189~190.
- (2) Lee, K.W., Park, S.C. and Jung, W.W., 2009, "An Experimental Tension Study of the Window Regulator Motor Wire," *Fall conference of KSME*, pp. 1397~1400
- (3) Kanamori, M., Isomura, Y. and Suzuki, K., 1998, "Dynamic Finite Element Analysis of Window Regulator Linkage System Using LS-DYNA," *Trans. of SAE Special Publication*, pp. 47~53.
- (4) Kim, K.H. and Jeon, S.Y., 2000, "Low-Temperature Drive Characteristics of Automotive Power Window Systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D*, Vo. 214, pp.843~849.
- (5) Sameer, M. P. and Pieter, J. M., 2003, "Modeling, Simulating, and Validating a Power Window System Using a Model-Based Design Approach," *The MathWorks, Inc.*, Miami
- (6) Kim, H.W., Jeong, B.H., So, H.C. and Kim, S.T., 2007, "Comparisons of Window Regulator analysis with ADMAS and SimDesigner," *Korea Users Conference of MSC software*, Seoul
- (7) Jeon, S.G., Hwang, J.H., Na, J.G. and Kim, J.H., 2006, "A Study on Vehicle Window Regulator Motion," *Fall Conference of KSME*, pp1~6.
- (8) Lee, H. J., 2003, "Window Regulator," *Report of Korea Institute of Patent Information*, Seoul
- (9) Rivlin, R. S., 1948, "Large Elastic Deformations of Isotropic IV, Further Developments of the General Theory," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.*, Vol. 241, A, pp. 379~397.
- (10) Bathe, K. J., 1996, "Finite Element Procedures," *Prentice-Hall, Inc.*, New Jersey, pp. 485~641.
- (11) Kim, S.B., Kim, D.H., and Kim, H.Y., 2005, "Closing Analysis of Automotive Door Seal Using Explicit Code," *Spring conf. of KSAE*, pp.613~618.
- (12) Moon, H.I., Min, B.K., Oh, J.S., Park, J.C., Lee, S.H. and Kim, H.Y., 2008, "Prediction of Door Closing Performance," *Conf. of KSAE*, pp. 1678~1683.
- (13) MARC theory manual
- (14) PAM-CRASH theory manual