

# 고속 버스 카메라 모니터링 시스템의 공력 및 우적 개선에 관한 연구

김민호\*

현대자동차 상용해석팀

## A Numerical Simulation on the Aerodynamic Characteristics and Rain Water Accumulation Management in an Express Bus Camera Monitor System

Minho Kim\*

Commercial Vehicle CAE Team, R&D Division, Hyundai Motor Company, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Korea

(Received 12 June 2019 / Revised 25 October 2019 / Accepted 29 October 2019)

**Abstract** : The current trend in the ground transportation industry indicates an increased interest in replacing mirrors with camera monitor systems(CMS) to increase fuel efficiency and to improve visibility of the surrounding environment. The main purpose of CMS is to improve driver visibility in future vehicles with a more aerodynamic profile, especially during the night or under adverse weather conditions. Having a clear, unobstructed view of the vehicles and the road around you under these conditions is crucial. Heavy rain conditions can, however, result in rivulets of water flowing onto the camera lens. Once these rivulets and the pooling of water feed on the camera lens, they can significantly impair visual acuity. Having the ability to detect water management issues earlier in the design cycle is desirable to minimize the negative impact of water management features. A numerical simulation of CMS water management is highly desirable for this reason. This paper presents the application of a multiphase lattice Boltzmann CFD solver in addressing rain water management issues on a CMS of a large bus. The result of this study confirmed that the application of CMS showed a noticeable improvement in drag, and it had 8.4 % less drag at the angle of zero yaw. The key mechanism was the convergence of two rainwater streams from the bottom and outer surfaces, which generated rain water deposition at the camera lens. The parameter study showed that modified geometry resulted in different rivulet trajectories and significantly depleted rainwater deposition over the camera lens.

**Key words** : Mirror(미러), Camera monitor system(카메라 모니터 시스템), Visibility(시계성), Rivulet(세류), Drag(항력), Rain water management(빗물 관리)

### 1. 서론

미래형 고속버스에 적용 예정인 카메라 모니터 시스템(Camera Monitor System, 이하 CMS)은 운전자 시계성을 확보하기 위해 복수개의 카메라와 모니터를 이용하며 대형 미러를 대체할 수 있고 소형화가 가능하다. 따라서 미러 진동에 의한 떨림 방지와 대형 미러하우징 및 스테이에서 발생하는 미러 후류를 줄일 수 있어 주행 중 공기 저항의 향상을 기대할 수 있다. 반면에 복수개의 카메라 렌즈가 외부에 노출되어 있기 때문에 우천시 카메라 렌즈에 빗물이 맺히게 되는 경우 운전자의 시계성을 악화시킬 수 있으므로 항력개선 외에 우적 현상을 최소화 할

수 있는 최적형상 설계가 매우 중요하다. 지금까지 빗물 거동 및 오염현상에 관한 연구들은 주로 승용차의 A 필라 빗물 넘침 현상과 레인거더 형상에 따른 흐름 영향도, 사이드 윈도우에서의 빗물 거동, 그리고 후류에 의한 리어 오염에 관한 연구들이 수행되었다. Hoffmann<sup>1)</sup>은 단순한 평판에서의 다양한 경사각 변화에 따른 액막 형성과 액막의 거동에 대한 연구를 진행하였고 Ataki와 Bart<sup>2)</sup>는 경사진 평판을 대상으로 글리세린과 물이 혼합된 액체의 세류(Rivulet) 특성을 분석하였다. Campos 등<sup>3)</sup>은 경사진 평판에서 중력이 고려된 액막 형성 및 퇴적에 대한 해석 방법을 제시하였고 Anderson과 Coughlan<sup>4)</sup>은 빗물

\*Corresponding author, E-mail: [cfdkmh@hyundai.com](mailto:cfdkmh@hyundai.com)

<sup>1)</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

유동 고체 표면의 액막 형성 모델을 제안하였다. Jilesen 등<sup>5,6)</sup>은 A 필라 물 넘침 현상과 레인거터 형상 변경에 따른 세류 거동 모델링에 대한 연구를 수행하였고 Borg와 Vevang<sup>7)</sup>은 사이드 글라스의 빗물 오염 현상 재현을 위한 액막 모델링에 대한 연구를 수행하였다.

Kabanovs 등<sup>8)</sup>은 단순화된 차량 모델 후류에서 물방울의 오염 현상을 모사하였고 김민호<sup>9)</sup>는 자연풍을 고려한 대형트럭 캡 측면 오염도와 측면 오염을 유발하는 유동 특성을 고찰하였다. Jilesen 등<sup>10)</sup>은 승용차를 대상으로 휠 스프레이 해석을 통해 보다 실제적인 리어 바디 오염 현상을 예측하였고 후방 차량 카메라의 성능에 영향을 미칠 수 있음을 보고한 바 있다. Gaylard 등<sup>11,12)</sup>은 도로에서 빗물 튀김 흐름을 재현 스프레이나 우천 조건을 재현한 풍동시험을 수행하여 상류 스프레이 조건이 따른 영향을 분석하였다. Jilesen 등<sup>13)</sup>은 필름 모델을 사용한 LBM (lattice Boltzmann method) 해석을 통해 A 필라를 넘쳐흐르는 세류의 진진 현상과 차량 속도 변화에 따른 표면 전단력 변화가 세류 흐름 궤적에 민감하게 영향을 미침을 고찰하였고 세류 궤적의 전반적인 경향을 잘 모사함을 확인하였다.

Dasarathan 등<sup>14)</sup>은 대형버스 사이드 글라스의 액막 흐름, 미러에 의한 빗물 튀김 흐름, 빗물이 고이는 풀링 (Pooling) 현상 등을 예측하였다. 우천시 도로 주행 시험 결과와 비교하여 예측 결과가 잘 재현됨을 확인하였고 풀링 현상의 원인 분석을 수행하여 레인 커터의 형상을 제안하였다. 최근 Jilesen 등<sup>15)</sup>에 의하면 유동장 변화를 보다 잘 추종하는 액막 모델을 이용한 비정상 상태 LBM 해석을 통해 A 필라의 특정위치에서 물 넘침 현상과 그 이후에 발생하는 사이드글라스 세류 분포 및 궤적까지도 실제 시험결과를 잘 모사하고 있음을 보고한 바 있다.

지금까지의 연구들은 사이드 윈도우 액막 거동과 후류에 의한 리어 오염 현상 모사에 대한 연구가 주를 이루며 대형버스 CMS 렌즈 오염 현상에 대한 연구는 미진한 실정이다. 본 연구에서는 Jilesen 등이 사용한 필름 모델과 연계된 비정상 상태 LBM 해석을 통해 종래의 대형 미러와 CMS 모델에 대한 항력 특성과 우적현상을 모사하였고 카메라 렌즈 우적 현상을 최소화할 수 있는 개선 형상을 제시하였다.

## 2. 해 석

### 2.1 격자 볼츠만법

격자 볼츠만법은 연속체 가정의 방정식을 이산화하는 전통적인 범용 코드와는 달리 유동 입자의 이송 및 충돌에 의한 운동학 이론을 기반으로 한다. 볼츠만 방정식을

이용하여 유체입자의 확률 분포 변화를 통해 유동을 모사하는 수치해석 기법이다. 유체의 미시적 운동에서 거시적인 입자 운동 방정식을 유도해 내며 Chanpmann-Enskog 방법을 이용하여 연속적인 유체의 운동방정식을 도출할 수 있으며 식 (1)과 같이 정의된다.<sup>16)</sup>

$$f_i(\vec{x} + \vec{c}_i \delta t, t + \delta t) = f_i(\vec{x}, t) + \Omega_i(\vec{x}, t) \quad (1)$$

입자 운동은 이동과 충돌로 나눌 수 있으며 식 (1)의  $f_i(\vec{x} + \vec{c}_i \delta t, t + \delta t) = f_i(\vec{x}, t)$ 는 입자 분포를 이웃하는 격자로 이동시키는 Streaming 과정을 나타낸다. 여기서  $f_i$ 는 격자 내에서의 이산화된 속도벡터를 따라  $i$  방향으로 움직이는 입자 분포 함수(Particle distribution function)이다.  $\delta t$ 와  $c$ 는 각각 시간 간격과 입자속도를 의미한다.

식 (1) 우변의  $\Omega_i(\vec{x}, t)$  항은 입자간의 충돌(Collision)과정을 나타낸다.  $\Omega_i$ 는 충돌에 의한 입자분포의 변화를 나타내며 충돌시에 질량, 운동량을 보존시켜주는 충돌 연산자이다. 충돌 과정은 매우 복잡한 연산이 요구되나 BGK(Bhatnagar Gross Krook)<sup>17)</sup> 방정식을 활용하여 충돌 항을 간략화하면 식 (2)와 같다.

$$\Omega_i(\vec{x}, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)] \quad (2)$$

여기서  $f_i^{eq}$ 는 국소적인 평형상태에서 분포함수이고  $\tau$ 는 단일 시간 완화 계수를 나타내며 완화시간은 유체의 점성계수에 의해 결정된다. 각 단계마다 경계조건이 적용된 연산이 이루어지면 각 격자점에서 새로운 분포함수 값이 산출되며 아래의 식 (3)-(5)와 같이 각각의 격자점에서의 국소 밀도( $\rho$ ), 속도( $v$ ), 압력( $p$ )값을 구할 수 있다. 여기서  $f_i$ 와  $c_s$ 는 각각 격자 내에서의 입자 함수와 음속을 의미한다.

$$\rho(\vec{x}, t) = \sum_i f_i(\vec{x}, t) \quad (3)$$

$$v(\vec{x}, t) = \frac{1}{\rho(\vec{x}, t)} \sum_i c_i f_i(\vec{x}, t) \quad (4)$$

$$p = c_s^2 \rho \quad (5)$$

### 2.2 우적 모사

우적 현상을 모사하기 위해서는 표면에 고착된 빗물 액적의 움직임, 액적의 분열과 깨짐, 표면에 형성된 액막이 공기 흐름내로 재 유입되는 현상, 와이퍼 무빙시 와이퍼에 의해 집중되는 액막 거동, 그리고 무엇보다도 시간 변화에 따른 정확한 난류 유동장의 모사가 관건이다. 특히 A 필라 주위의 빗물 입자들이 유동을 따라 가속화되거나 빗물 입자들이 매우 빠른 공기 흐름내로 유입될 때

작은 입자로 쪼개지는 액적 분열(Droplet breakup)과 바다 표면과 미러 등에 충돌할 때 발생하는 액적의 깨짐(Droplet splash)의 모사는 매우 중요하다.

본 연구에서는 액적의 분열과 깨짐 현상 모사를 위해 O'Rourke and Amsden에 의해 제안된 TAB(Taylor Analogy Breakup)모델<sup>18-20)</sup>을 사용하였다. 액적의 분열과 깨짐 여부는 입자의 충돌에너지에 의해 좌우되며 액적 깨짐의 발생은 충돌에너지가 임의의 값을 초과할 때 발생한다. 또한 액적의 비산은 특정 액막 두께 이상이 되면 비산되도록 하였으며 본 연구에서는 이를 0.3 mm로 하였다. 액막 거동은 중력( $F_g$ ), 벽면에서의 반력( $F_r$ ), 액막과 고체 계면에 작용하는 마찰력( $\tau_f$ ), 공기와 액막 계면과의 전단력( $\tau_a$ )등에 의해 결정된다. 표면에 부착된 액적은 얇은 막을 형성한다고 가정하며 액막에 작용하는 모멘텀 방정식은 식 (6)과 같다.

$$\rho_f h \frac{dU}{dt} = \tau_a + \tau_f + F_g + F_r \quad (6)$$

여기서  $\rho_f$ 는 액막의 밀도이고  $h$ 는 액막의 높이이며  $U$ 는 액막의 속도를 의미한다. 또한 식 (6)의 우측항은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_g = \rho_f h g \quad (7)$$

$$F_r = -\rho_f h (g \cdot \hat{n}) \hat{n} \quad (8)$$

$$\tau_f = -2\mu \frac{U}{h} \quad (9)$$

$$\tau_a = \tau_a(U_s, \hat{n}) \quad (10)$$

여기서  $\mu$ 는 액막의 점도이고  $\hat{n}$ 과  $U_s$ 는 각각 벽면에 수직인 벡터와 벽면 근처의 공기속도를 의미한다. 공기 중에 움직이는 빗물입자의 궤적은 항력과 중력, 압력 구배의 영향을 받으며 이로 인한 빗물 입자의 가속도는 다음과 같이 정의된다.

$$m \frac{dU_p}{dt} = \frac{1}{2} \rho C_d A (U_p - U_s) |U_p - U_s| + mg \quad (11)$$

여기서  $m$ 은 입자의 질량,  $U_p$ 는 입자의 속도이며  $C_d$ 와  $A$ 는 각각 입자의 항력계수와 단면적을 나타낸다.

### 2.3 해석 모델

Fig. 1에는 종래의 미러와 CMS 형상과 카메라 배치를 도시하였다. RH CMS는 후방(C1) 및 측방(C2) 시계를 위한 카메라와 하방(C3) 시계를 위한 3개의 카메라가 장착되고 LH CMS는 후방과 측방 시계를 위한 2개의 카메라로 구성되어 총 5개의 카메라 렌즈가 외부에 노출되어 있다.

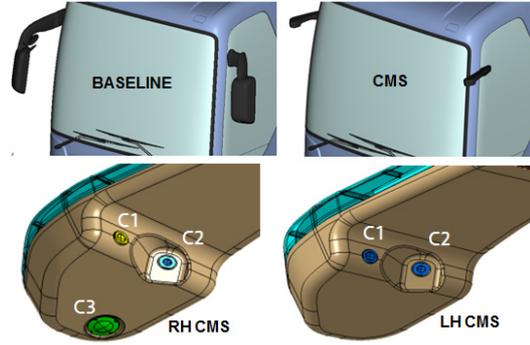


Fig. 1 CMS configuration and lens location

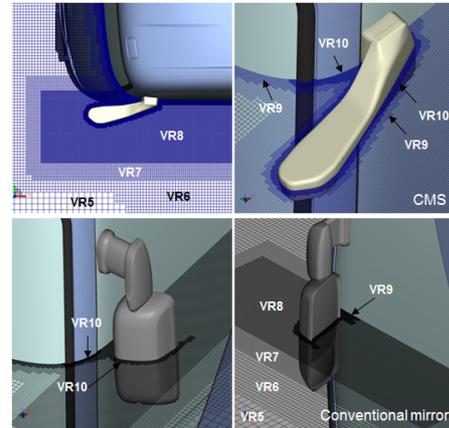


Fig. 2 Volume mesh resolution

Table 1 Voxel size of each variable region

VR	Region	Size (mm)
VR10	CMS, A-pillar	1.25
VR9	Windshield	2.5
VR8	Front body, CMS wake	5
VR7	All vehicle	10

CMS 및 A 필라 주위의 VR(Variable region) 영역을 Fig. 2에 도시하였다. 세류 거동에 영향을 줄 수 있는 미세 단차까지도 고려하여 실제형상을 그대로 반영하였다. 수치모사를 통해 액막 형성 및 세류 거동을 재현하기 위해서는 일반적인 공력해석 모델에 비해 보다 조밀한 복셀(Voxel)이 요구된다. 최소 복셀을 갖는 VR10 영역은 1.25 mm이며 본 연구의 관찰 대상인 CMS와 이에 인접한 A 필라에 적용하였다. 윈드실드 전체영역은 VR9 영역을 적용하였고 프론트 바디 전체 영역과 CMS 후류를 포함하여 CMS를 감싸는 영역에 VR8을 적용하였다. Table 1에는 VR 영역과 각 영역에 부여된 복셀 크기를 나타내었다. 최소 복셀 영역 대비 각 인접 영역의 복셀은 두배의 크기로 증가하며 VR6부터 VR1까지는 20 mm에서부터 640 mm 크기의 복셀을 갖는다.

### 2.4 해석 조건

표면의 액막 형성 및 세류 거동을 재현하기 위한 수치 모사는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 기본적으로 액막이 형성되는 영역에 매우 조밀한 격자가 필요하다. 시간에 따른 빗물 거동을 고찰하기 위해서는 고성능 슈퍼컴퓨터를 활용하더라도 상당히 많은 해석시간이 소요되므로 차량 전체 모델을 고려하는 것은 매우 비효율적이다. 본 연구에서는 해석의 경제성을 도모하기 위해 BSD(Boundary Seeded Domain) 영역을 설정하였다. Fig. 3에 도시한 바와 같이 BSD 영역만을 계산함으로써 해석의 효율성을 향상시키고자 하였다. BSD 계산 영역 입구 단면에는 Rain emitter 조건을 부여하고 전체 차량모델에서 얻은 압력과 속도 값을 경계조건으로 적용하였다. BSD 출구 단면에서는 압력 경계조건을 적용하였고 이외의 단면에서는 입구 영역과 동일하게 전체 차량모델에서 얻은 압력과 속도 값을 경계조건으로 적용하였다. 이는 액막이 형성되는 주요 영역만을 BSD 영역으로 설정하므로 적은 시간으로 예측 신뢰도를 확보할 수 있는 매우 효율적인 방법이다. 우적 수치 해석 수행시 정풍과 횡풍 5°조건을 고려하였고 고속(100 km/h)과 중속(60 km/h) 조건을 적용하였으며 차량 전방으로 부터 2 m 떨어진 Rain emitter에서 빗물 방울이 분출되도록 하였다. 액막 거동을 정확히 표현하기 위해서는 액막이 형성되는 표면에서의 매우 작은 볼륨 격자가 필요하며 비정상 상태 액막 발달 흐름을 관찰하기 위해서는 해석 소요 시간이 관건이다. 액막 발달 도모와 해석 경제성을 동시에 고려한 예비 해석을 통해 소나기 조건시의 적절한 강우량을 17 mm/hr로 선정하

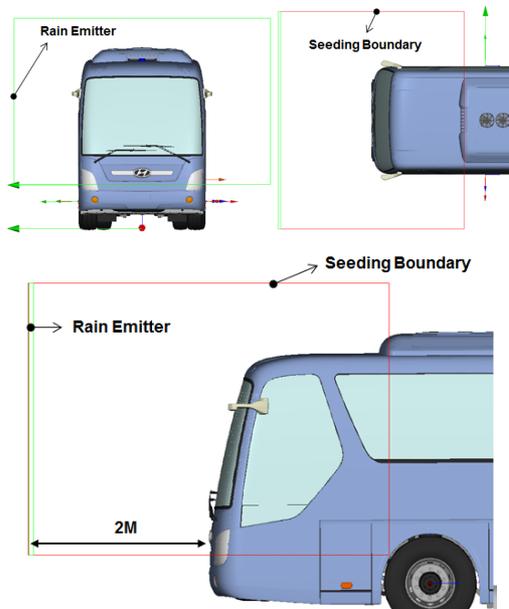


Fig. 3 Illustration of BSD (boundary seeded domain)

였다. 빗물 방울의 평균직경은 0.3 mm이며 편차 0.1 mm를 갖는 정규분포 형태로 가정하여 시간에 따라 임의로 분출되도록 하였다. 전체 볼륨 격자는 약 5200만개이며 세류 거동 및 액막 발달을 충분히 관찰하기 위하여 11초 동안의 비정상 상태 해석을 수행하였다.

## 3. 항력 해석 결과

### 3.1 항력 특성

Fig. 1에 도시한 일반 미러와 CMS 모델의 정풍 및 횡풍 조건의 항력을 Fig. 4에 비교하였다. CMS 모델을 적용한 경우 항력은 정풍 조건시 약 8.4% 개선되었고 횡풍 조건에서도 전반적으로 약 7% 이상 개선되었다. Fig. 5에 도시한 항력 발달 선도에서 볼 수 있듯이 CMS 장착 위치에서부터 항력이 급격하게 감소하였다. 이는 미러 자체 저항 감소와 Fig. 6의 등압력 표면 결과에서 알 수 있듯이 CMS 후미에서 발생하는 후류 영역이 크게 축소되어 에너지 손실 영역이 감소하였기 때문이다.

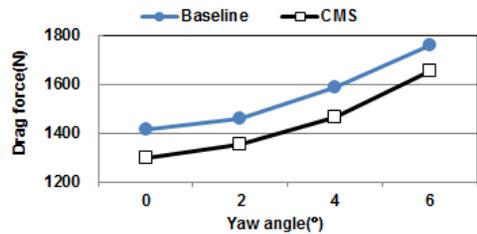


Fig. 4 Drag force comparison corresponding to the variation of yaw angle

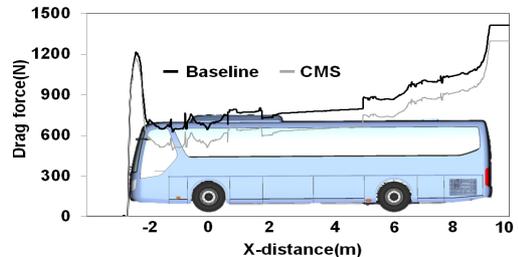


Fig. 5 Comparison of drag force development between baseline mirror and camera monitor system

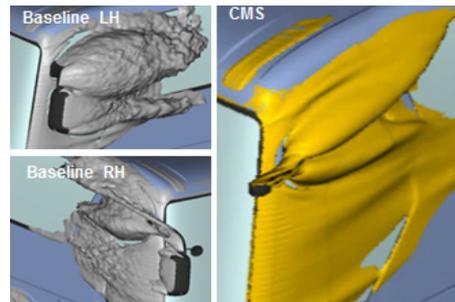


Fig. 6 Isosurface at a zero yaw angle (Cpt=0, time averaged)

## 4. 우적 해석 결과

### 4.1 액막 거동 특성

바디 표면의 시간변화에 따른 빗물 입자의 액막형성 및 거동 특성을 Fig. 7과 Fig. 8에 도시하였다. 시간이 증가함에 따라 액막이 발달되며 점차 액막 두께가 증가함을 볼 수 있다. 3 sec 이후부터 A 필라에서 넘쳐흐름(Overflow)이 형성되고 있으며 5 sec 이후부터는 A 필라 하단 영역에서 후방으로 밀려나고 A 필라를 타고 넘어오는 세류들이 균집되어 액막 두께 또한 증가한다.

Fig. 8에 도시한 바와 같이 CMS를 적용한 경우 전반적으로 유리창 영역에서 일반 미러 대비 액막 형성과 발달 양상이 큰 차이를 보이고 있다. 일반 미러는 하우징과 하우징 후류에 의해 영향을 받는 ④영역(점선영역)으로 유

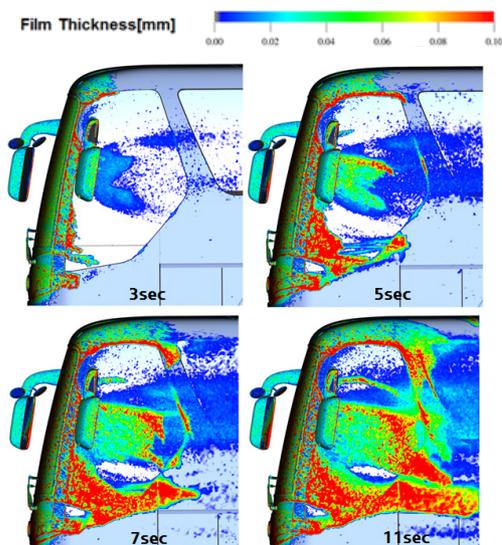


Fig. 7 Time transient film thickness of baseline mirror

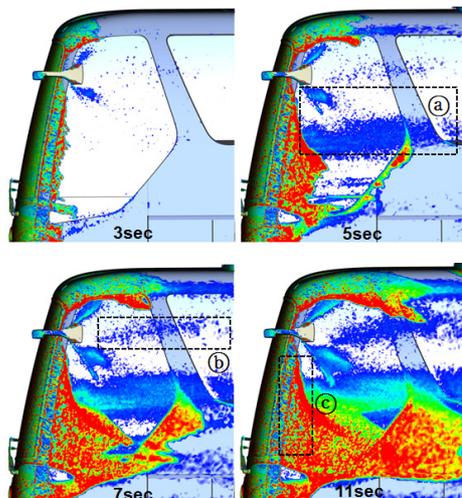


Fig. 8 Time transient film thickness of CMS LH side

입되는 빗물 흐름이 상대적으로 많고 액막이 넓게 형성되나 CMS는 ④영역과 스테이 후류 영역인 ⑥영역에서 스프레이 된 입자의 액막 형성이 증가하였다. ③영역에서는 A필라를 지난 빗물 흐름이 가속화 되지 못하고 바로 하향하는 특성을 보인다.

### 4.2 카메라 렌즈 우적 흐름 고찰

LH CMS 모델의 11 sec 이후의 우적 및 유선 분포를 Fig. 9에 도시하였다. 헤드 하부 면을 타고 흐르는 흐름은 C1 카메라로 직접적으로 향하는 흐름(①)과 C1 카메라 주위에서 감기는 흐름(②)이 형성되고 있다. 외측 면을 타고 흐르는 흐름(③)은 C2 카메라로 향하는 흐름(④)과 반대편 내측 끝단까지 이르러 재순환 되는 흐름(⑤) 그리고 후방으로 향하는 흐름(⑥)으로 분지되고 있고 내측 면에서도 후방으로 빗물을 밀어내는 흐름(⑦)이 형성되고 있다. 이러한 흐름은 Fig. 10에 도시한 바와 같이 액막이 형성 되는 초기 시점부터 전반적으로 카메라 렌즈 주위의 우적 현상 발생과 렌즈의 오염을 야기하고 있으며 RH의 흐름특성은 LH 흐름 특성과 매우 유사 하였다. RH CMS 헤드부 하면에 장착되는 C3 카메라 렌즈는 해석 초기부터 오염 현상이 발생하였다. 차속이 감소하게 되면 Fig. 11과 같이 전반적으로 헤드부 전면, 측면, 하부면 액막의 두께는 증가하였다. 헤드부 외측의 액막은 하향 성

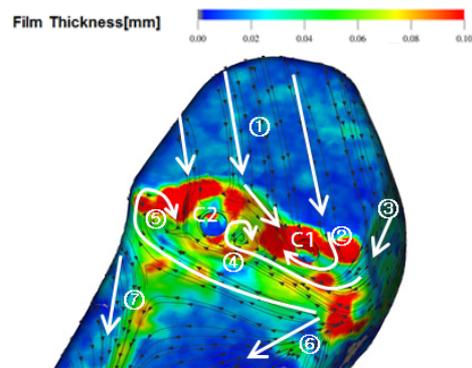


Fig. 9 Streamline and film thickness results of LH CMS base model simulation after 11 sec at 100 km/h

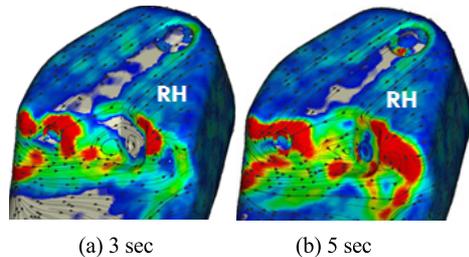


Fig. 10 Time transient film thickness with flow streamline of RH CMS baseline model at 100 km/h

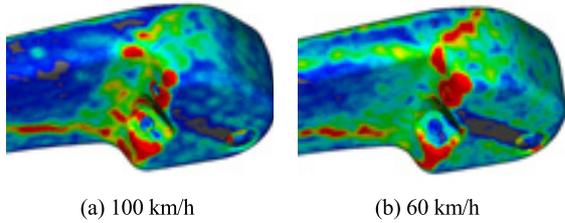


Fig. 11 Film thickness simulation results of RH CMS after 11sec corresponding to the flow velocity variation

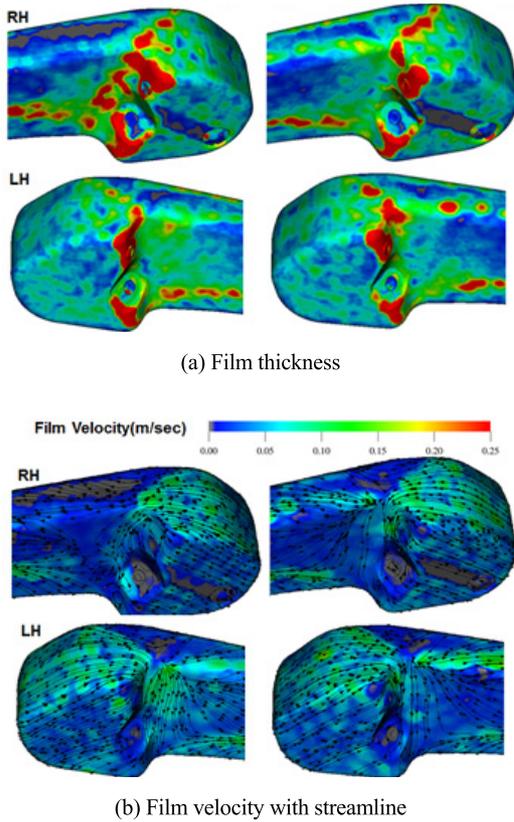


Fig. 12 Film thickness and velocity simulation results after 11 sec at 60 km/h corresponding to the variation of yaw angle (left: yaw=5°, right: yaw=0°, RH: windward, LH: leeward)

분이 증가하게 되어 카메라 렌즈 영역으로 유입되는 빗물이 증가한다.

따라서 C1 카메라 렌즈의 오염이 보다 빠른 시간에 발생하고 카메라 렌즈 주변에 모이는 빗물 양 또한 증가하였다. Fig. 12와 같이 횡풍 조건의 경우 바람을 맞는 RH CMS의 유선분포는 정풍조건에 비해 C1 카메라로 집중되는 흐름이 완화되며 C1 카메라 렌즈의 오염 발생이 보다 지연되었다. 바람을 등지는 LH CMS는 외측에서 내측으로 향하는 카메라 렌즈 주위의 액막 이동 속도는 증가하였고 C2 카메라를 향하는 흐름이 증가하여 C2 카메라 렌즈의 오염은 다소 악화되었고 C1 카메라 렌즈의 오염 정도는 유사하였다.

### 4.3 설계 요소 변경에 따른 우적 특성

Fig. 13과 Table 2에는 우적 현상 개선을 위한 형상과 설계 요소들을 도시하였다. A안은 외측에 패널을 추가하여 Fig. 9에 나타낸 ④, ⑤흐름을 방지하고자 하였다. B안과 C안은 각각 하부 면에 5 mm 단차 적용과 곡률부에 에지를 적용한 형상으로 ①, ②와 ④, ⑤의 흐름을 줄이고자 하였다. D안은 C안에 헤드부 상부에 추가적인 함몰 영역을 적용하였다. 이 영역에 빗물을 포집하여 굳어진 빗물 방울이 자중에 의해 공기 흐름을 따라 공간상으로 분리되도록 하였다. E와 F안은 D안의 하부 면에 립을 추가한 형상이다. Fig. 14에 A, B, C 모델의 우적 결과를 도시하였다. A안은 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 적용된 가이드 후방으로 흐름 ③을 유도함으로써 C1 주위의 흐름 ②가 소멸되었고 흐름 ④는 완화되었으나 C2 카메라 렌즈 오염에 영향을 미치는 흐름 ⑤는 여전히 형성되고 있다. C1 카메라 렌즈의 오염도는 개선되나 C2 카메라 렌즈의 오염은 발생하고 있다. B안은 하부 곡률부의 단차로 인해 헤드부 하부 면을 타고 흐르는 흐름은 매우 개선되나 후방 및 측방 카메라 모두 오염이 되고 있다. 곡률부에 에지를 적용한 C안은 헤드 하부 면을 타고 흐르는 빗물 거동은 거의 소멸되었으나 하부 면에 빗물 방울이 튀기는 유동(Splatter)이 발생하고 있음을 볼 수 있고 우측 끝단의 빗물을 C1, C2 카메라 렌즈 주위로 유입되게 하는 흐름이 형성되고 있다. C1, C2 카메라 렌즈 모두 미소하지만 오염 현상이 발생하고 있으며 C1 카메라 렌즈 주위의 우적 현상을 뚜렷이 관찰할 수 있다. 이와 같이 에지를 적용한

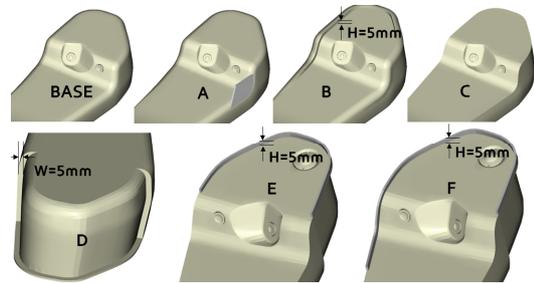


Fig. 13 Design parameters

Table 2 Model description

Item	Description
Base	Initial design
A	A+outer side guide
B	Modification of bottom shape
C	Edge application to the rounded area
D	C+modification in head region
E	D+lip
F	E+lip extension

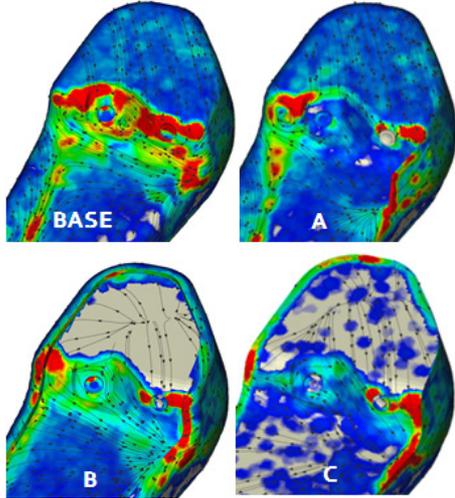


Fig. 14 Streamline and film thickness results for the modified model simulation after 11 sec at 100 km/h

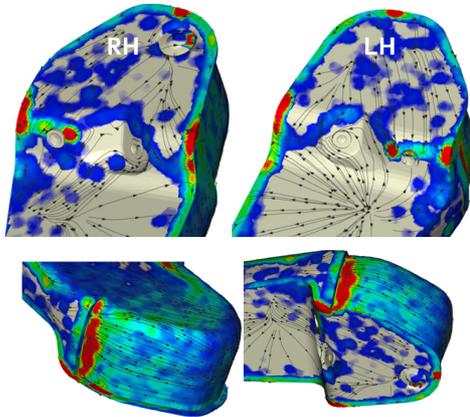


Fig. 15 Streamline and film thickness results for D model simulation after 11 sec at 100 km/h

경우 각 곡률 부를 타고 흐르며 발달되는 액막 거동이 크게 감소하나 빗물이 하부 면에 튀기는 현상이 관찰되었고 카메라 렌즈 주위의 거시적인 흐름은 기본 모델과 유사하였다.

Fig. 15에 도시한 바와 같이 D 안은 헤드부 상부에 단차를 갖는 함몰형 헤드부 적용으로 이 영역에 고인 빗물의 대부분은 공간상으로 스플래시 되어 분리되며 일부는 하부 면에 재 부착됨을 유추에 볼 수 있다. 또한 바깥쪽 측면에서 유입되는 흐름 ③은 소멸되었고 카메라 렌즈 주위로 유입되는 빗물 양이 대폭 축소되었다. 함몰형 헤드부 적용은 Fig. 16에서와 같이 외측 면에 재 부착점이 형성되어 빗물을 전방으로 밀어낼 뿐만 아니라 하부면 중앙부에 재 부착점이 형성되고 재 부착점을 기준으로 좌우 에지 쪽으로 빗물을 밀어내는 흐름이 생성된다. 따라서 C안에서 발생하는 C1 렌즈 우측의 우적 영역이 크게 감소되었고 렌즈 주위를 향하는 빗물 흐름 발달을 억

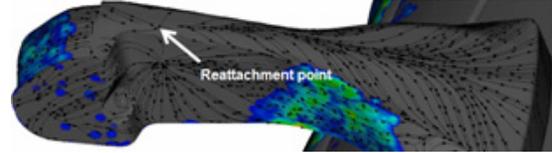


Fig. 16 Streamline and film velocity result of D model

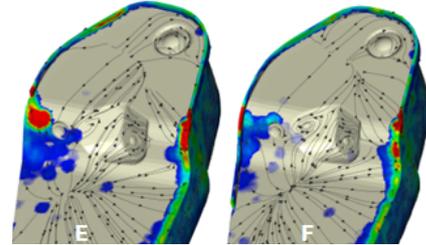


Fig. 17 Streamline and film thickness results for E and F RH model simulation after 11 sec at 100 km/h

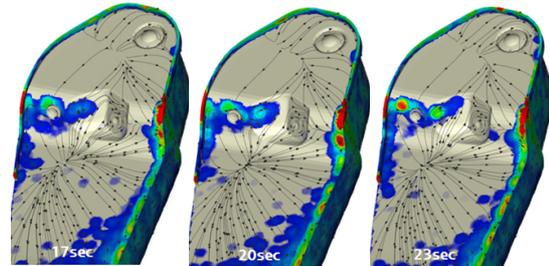


Fig. 18 Time transient film thickness for RH side of F model at 100 km/h

제해주고 있다. Fig. 17의 E안과 같이 헤드부 하부 전면부에 립을 추가한 경우 에지를 적용한 C와 D안과 같이 빗물 방울이 재차 헤드부 하부 면으로 튀기어 재 부착되는 현상이 거의 사라짐을 볼 수 있다. 이와 같은 립의 적용은 RH에 위치한 C3 카메라 렌즈 오염을 방지할 수 있으며 립을 측면 부까지 연장한 F안은 C1 카메라 렌즈 주위에서 발생하는 우적현상을 상당히 억제시키고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 18에는 23 sec 동안의 시간 변화에 따른 F 모델의 우적 결과를 도시하였다. 특히 C2와 C3 카메라 렌즈의 오염은 전혀 발생하지 않으며 주변 영역의 액막 생성 또한 진전되지 않았다. C1 카메라 렌즈 주위 영역은 시간 변화에 따라 액막이 점차 발달되나 초기 설계안 대비 매우 느리게 진행됨을 볼 수 있다.

## 5. 결론

디지털 풍동을 활용하여 CMS의 항력 저감 효과 및 우적현상 모사를 통해 우천 주행시 액막의 거동 특성을 고찰하였다. CMS 카메라 렌즈의 오염 최소화를 위한 설계 인자 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CMS를 적용한 경우 정풍조건에서 항력은 약 8.4% 감소하였고 횡풍 조건에서도 약 7% 이상 개선됨을 확인하였다.
- 2) 헤드부 하면을 타고 흐르는 액막 흐름은 하방 카메라 렌즈 오염의 주요인이며 외측 측면에서 반대편 내측 끝단까지 유입되어 재순환 유동을 형성하는 흐름은 후방과 측방 카메라 렌즈의 우적을 야기한다.
- 3) CMS 하부에 에지를 갖는 형상은 빗물이 에지를 따라 흐르는 흐름 특성이 강해지며 공간상으로 분리된 빗물이 헤드부 하면에 재 부착되는 흐름이 증가하였다.
- 4) 함몰형 헤드부를 갖는 경우 함몰 영역에 쌓인 빗물은 주로 공간상으로 분리되며 외측 측면에 형성된 재부착 유동은 카메라 렌즈 주위로 유입되는 빗물 흐름의 발달 및 진전 억제에 매우 효과적이다.
- 5) 함몰형 헤드부와 립이 조합된 F 모델은 기본 모델 대비 카메라 오염 방지 및 카메라 주변 액막 발달 억제 측면에서 가장 우수한 성능을 나타내었다.

### References

- 1) A. Hoffmann, I. Ausner, J. U. Repke and G. Wozny, "Detailed Investigation of Multiphase (gas-liquid and gas-liquid-liquid) Flow Behavior on Inclined Plates," *Chemical Engineering and Design*, Vol.84, Issue 2, pp.147-154, 2006.
- 2) A. Ataki and H. J. Bart, "Experimental Study of Rivulet Liquid Flow on an Inclined Plate," *International Conference on Adsorption and Distillation*, 634th Event of the European Federation of Chemical Engineering, 2002.
- 3) F. Campos, F. Mendonca, S. Weston and M. Islam, "Vehicle Soiling Simulations," 6th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference, 2006.
- 4) A. Anderson and B. Coughlan, "Liquid Film Flows Over Solid Surfaces," 6th MIRA International Aerodynamics Conference, 2006.
- 5) J. Jilesen, I. Spruss, T. Kuthada, J. Wiedemann and A. Gaylard, "Advances in Modelling A-Pillar Water Overflow," SAE 2015-01-1549, 2015.
- 6) J. Jilesen A. Gaylard and J. Escobar, "Numerical Investigation of Features Affecting Rear and Side Body Soiling," SAE 2017-01-1543, 2017.
- 7) A. Borg and R. Vevang, "On The Prediction of Exterior Contamination with Numerical Simulations (Simple Lagrangian Particle Tracking Methods with and without Wall Film Model)," MIRA International Conference on Vehicle Aerodynamics, 2006.
- 8) A. Kabanovs, M. Varney, A. Garmory, M. Passmore and A. Gaylard, "Experimental and Computational Study of Vehicle Surface Contamination on a Generic Bluff Body," SAE 2016-01-1604, 2016.
- 9) M. H. Kim, "Unsteady State Particle Flow Simulation on a Cab Side Soiling with Natural Wind Effect in a Heavy-Duty Truck," *Transactions of KSAE*, Vol.26, No.3, pp.360-367, 2018.
- 10) J. Jilesen, A. Gaylard, B. Duncan, A. Konstantinov and J. Wanderer, "Simulation of Rear and Body Side Vehicle Soiling by Road Sprays Using Transient Particle Tracking," SAE 2013-01-1256, 2013.
- 11) A. P. Gaylard, K. Kirwan and D. A. Lockerby, "Surface Contamination of Cars: A Review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol.231, Issue 9, pp.1160-1176, 2017.
- 12) A. P. Gaylard, M. Fagg, M. Bannister, B. Duncan, J. I. Gargoloff and J. Jilesen "Modelling A-Pillar Water Overflow: Developing CFD and Experimental Methods," SAE 2012-01-0588, 2012.
- 13) J. Jilesen, A. Gaylard, I. Spruss, T. Kuthada and J. Wiedemann, "Advances in Modelling A-Pillar Water Overflow," SAE 2015-01-1549, 2015.
- 14) D. Dasarathan, J. Jilesen, D. Croteau and R. Ayala, "CFD Water Management Design for a Passenger Coach with Correlation," SAE 2016-01-8155, 2016.
- 15) J. Jilesen, A. Gaylard, T. Linden and A. Alajbegovic, "Update on A-Pillar Overflow Simulation," SAE 2018-01-0717, 2018.
- 16) R. Lietz, S. Mallick, S. Kandasamy and H. Chen, "Exterior Airflow Simulations Using a Lattice Boltzman Approach," SAE 2002-01-0596, 2002.
- 17) P. L. Bhatnagar, E. P. Gross and M. Krook, "A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-component Systems," *Physical Review*, Vol.94, No.3, pp.551-525, 1954.
- 18) P. O'Rourke and A. Amsden, "A Spray/Wall Interaction Submodel for the KIVA-3 Wall Film Model," SAE 2000-01-0271, 2000.
- 19) P. O'Rourke and A. Amsden, "The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE 872089, 1987.
- 20) C. Mondo, M. Sommerfeld and C. Tropea, "Droplet-wall Collisions: Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.21, No.2, pp.151-173.1995.