



반응 표면법을 이용한 버스 리어바디 공력 변수 최적화에 관한 연구

김민호* · 정영기 · 김지민

현대자동차 상용해석팀

Aerodynamic Optimization of Rear End Parameters in a Commercial Bus Utilizing Statistical Response Surface Method

Minho Kim* · Youngki Jeong · Jimin Kim

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

(Received 6 November 2017 / Revised 22 December 2017 / Accepted 10 January 2018)

Abstract : The need for upfront modeling, simulation, and design optimization has increased in the process of vehicle development. Detailed optimization studies that combined the transient CFD(Computational Fluid Dynamics) approach, based on the Lattice Boltzmann Method(LBM), and the Response Surface Method(RSM) were presented to improve exterior design and enhance performance. This paper investigated the optimization of the aerodynamic design of a commercial bus. The most influential parameters were identified to ensure significant aerodynamic drag reduction relative to a base configuration. The results clearly showed that improvement in the aerodynamic design of the rear end would be crucial in reducing fuel consumption. An optimized rear end design with an extension spoiler has 5% less drag. At the same time, wind tunnel tests with a fully detailed clay model confirmed the improvement in performance based on simulation results.

Key words : Optimization(최적화), Response surface method(반응표면법), Exterior design(외관형상), Aerodynamic drag(공기저항력), Spoiler(스포일러), Wind tunnel test(풍동시험)

1. 서론

대형 버스의 경우 차체 전방 좌우에 위치하는 대형 미러, 루프 상면의 공조 시스템과 환기를 위한 루프 벤트 그리고 스포일러 등이 차체에 부착된다. 이와 같이 여러 가지 부착물에 의해 발생하는 바디 주위의 와류, 역압력 구배, 고속 주행시 타이어 회전에 의한 휠 효과 등으로 인해 차체 주위의 공기 흐름은 복잡한 난류유동을 형성한다. 특히, 대형버스 외관 형상은 직육면체와 같은 무딘 형상이므로 바디 후방에서 형

성되는 후류(Rear wake flow) 또한 승용차에 비해 매우 크게 형성된다. 따라서 부착물에 의해 발생하는 공기저항 외에 후류에 의해 발생하는 유도저항(Induced drag)을 최소화 하는 것이 공력학적 버스 형상 설계의 관건이며 이러한 유도 저항을 감소시키기 위하여 스포일러를 부착하기도 한다. 최근 장거리 운송수단으로 자리 잡은 고속버스의 경우 연비 향상을 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 이 중에서도 고속 주행시 작용하는 공기저항은 연비 상품성에 매우 큰

*A Part of this paper was presented at the KSAE 2016 Fall Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: cfdkmh@hyundai.com

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.

영향을 미치며 유도저항을 최소화 할 수 있는 리어바디 형상 최적화에 대한 관심이 대두되고 있다.

대형버스 공기저항 개선에 대한 기존의 연구들을 살펴보면 Williams 등¹⁾은 버스바디와 유사한 단순바디에 대해 종횡비 변화에 따른 공력계수를 고찰하였고 Takemori 등²⁾은 단순화된 축소 모델의 후미에 가이드 베인 부착형태에 따른 항력계수와 효과적인 후류 제어(Wake control)에 관한 연구를 수행하였다. Patidar 등³⁾은 버스 프론트 바디 형상 변경에 따른 공력 효과를 제시하였고 Camara와 Girardi⁴⁾는 단순화된 버스 모델 외관 형상변화와 레이놀즈 수 변화에 따른 유동특성 및 압력분포 등을 고찰한 바 있다. 기존의 연구들은 과도하게 단순화된 차체형상을 사용하거나 주로 부착물 및 공력 설계요소의 기여도 분석에 국한되며 각 공력 설계 요소의 상호영향도를 고려한 형상 최적화 연구는 매우 미진한 실정이다.

본 연구에서는 대형버스 실차 정밀 모델을 대상으로 고정도 디지털 풍동 및 반응 표면법을 이용하여 공력 설계 요소의 상호 영향도 분석과 후방 유도저항을 최소화 할 수 있는 최적 형상 도출에 연구의 목적을 두고 있다. 1/4 스케일 모델을 이용한 지면 이동 재현 풍동시험 결과를 토대로 해석결과의 유효성을 검증한 후 최적화 단계에서 각 설계변수의 기여도 및 변수간의 상호 영향도 분석을 수행하였고 도출된 최적형상에 대한 풍동시험을 통해 공력 개선 효과를 입증하였다.

2. 정밀 디지털 풍동 구축

2.1 해석 모델

공력에 영향을 줄 수 있는 미세 단차, 하부 및 차체 내부 엔진룸 형상까지 고려한 실제 형상을 그대로 반영하였다. 이산화 과정 이후 생성된 복셀(Voxel)은 Fig. 1과 같다. 미세 단차와 공조시스템 그릴 개구부의 형상을 고려하기 위하여 이 영역에 1.25 mm 크기를 부여 하였고 미러 및 바디 곡률 부에는 2.5 mm 크기로 하였다.

2.2 디지털 풍동의 유효성 검증

디지털 풍동의 신뢰성을 검토하고자 먼저 Fig. 2



Fig. 1 Voxel resolution around vehicle



Fig. 2 Wind tunnel test of 1/4 scale model under moving ground condition

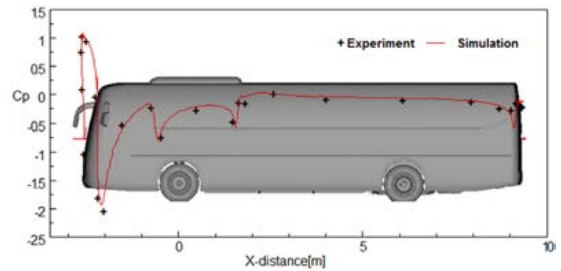


Fig. 3 Comparison of surface pressure coefficient at the y=0 section

와 같이 1/4 스케일 모델을 제작하여 표면 압력계수와 공기저항 값을 풍동시험 결과와 비교하였다. 풍동 시험시 타이어 회전 및 이동지면을 재현하여 실제 주행조건을 반영하였다. Fig. 3에 도시한 바와 같이 표면 압력계수는 해석과 시험결과가 매우 유사한 결과를 보였고 공기저항은 약 2.5 % 차이를 보여 매우 잘 일치하는 결과를 나타내었다.

3. 최적화 해석

3.1 개요

본 연구에서 사용된 코드는 디지털 물리학에 기초한 전산유체역학 코드로서 Lattice Boltzmann Method⁵⁾(이하 LBM)을 근간으로 한 유동 입자의 이송 및 충돌에 의한 상호 작용 관계를 구현한다. 상기 코드는 수치적 소산이 매우 적은 미시적인 유동구조를 모

사하기 위해서 질량과 운동량의 실제적인 이송을 다루는 이상 기체 방정식과 LBM을 연성하여 해를 구하는 방식을 채택하고 있다.

따라서 기존의 이산화된 편미분 방정식을 활용한 범용코드에 비해 시간변화에 따른 미시적인 유동구조를 잘 모사하는 장점이 있다.⁶⁾ 반응 표면법(Response surface method)은 설계변수와 반응 변수의 관계를 수학적으로 표현하기 위해서 실험이나 시뮬레이션으로부터 얻은 한정된 수치들로부터 근사적 반응 표면을 생성해내고 반응표면 분석을 통해 반응치를 예상하는 통계적 기법을 의미한다.⁷⁾ 대부분의 공학문제에서 설계변수와 반응변수와의 관계를 수학적 함수 형태로 도출하는 것은 매우 난해한 부분이며 반응함수가 부분적으로 알려져 있는 경우라도 복잡한 형태를 보인다.⁸⁾ 따라서 반응 표면 분석법은 복잡한 시스템을 가진 공학 문제의 오차를 제거하고 적은 계산 시간으로 시스템에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 찾아내어 설계 변수들 간의 상호작용을 고찰할 수 있다. 최근 Jiang 등⁹⁾은 세단형 승용차를 대상으로 A-필라, 언더 커버 리어 끝단의 형상 최적화 및 공력요소의 상호 영향성을 보고한 바 있다. 이와 같이 공기저항 최소화를 위한 최적화된 형상을 도출하기 위해서는 공력에 영향을 미치는 다수의 설계 변수를 고려해야 된다. 공력에 민감한 설계 변수가 많을 경우, 이들의 반복 해석을 최소화하고 설계 변수간의 복잡한 상호 작용을 평가하기 위한 방법으로 반응 표면법은 매우 유용한 최적화 방법이다.¹⁰⁾

최적화 단계에서 공력 설계요소에 따른 반응값 탐색과 설계 인자간의 상호영향을 파악하고 신뢰할 수 있는 근사적 반응표면 모델을 얻기 위해서는 많은 해석결과들이 필요하나 각 변수별 반응 값을 얻기 위해 정밀 모델을 활용하는 경우 많은 시간이 소요되므로 비효율적이다. 본 연구에서는 Fig. 4에 도시한 점선 영역과 같이 공조시스템 이후부터 후류 영역까지 BSD(Boundary Seeded Domain) 영역을 계산영역으로 설정하여 이 영역만을 계산함으로써 해석의 경제성을 고려하였다. BSD 계산 영역 입구 단면에는 공조 시스템 후미 및 차체 하부에서 발생하는 주기적인 와류 흐름을 모사하고자 TBS(Transient

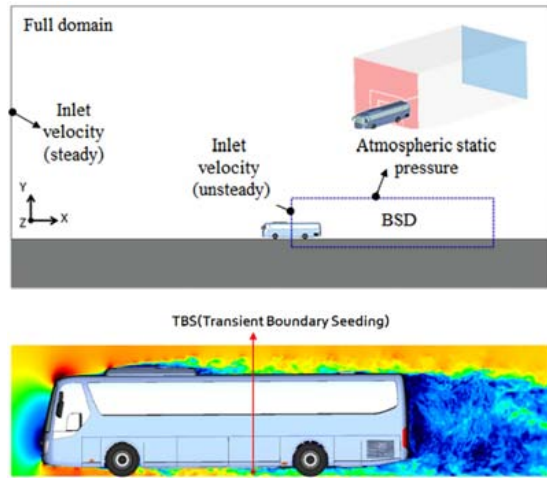
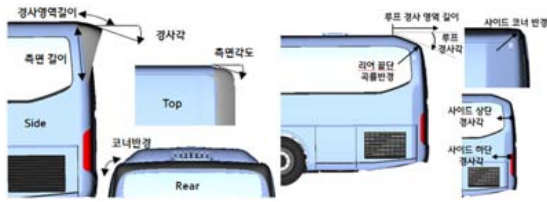


Fig. 4 Illustration of BSD(boundary seeded domain) and TBS(transient boundary seeding)

Boundary Seeding) 기법을 활용하여 시간에 따른 일정 주기를 갖는 속도 프로파일을 적용하였다. 이는 리어바디 후면 압력 회복에 큰 영향을 미치는 후류 그리고 이 후류에 영향을 미치는 공조시스템 상단 및 바디 하부의 주기적인 와류를 고려한 BSD 영역만을 계산하므로 적은 시간으로 예측 신뢰도를 확보할 수 있는 매우 효율적인 방법이다.

3.2 공력 설계 요소

공력 최적화를 위한 스포일러 공력설계 요소로는 경사영역 길이, 후미 경사각, 측면 길이, 측면각도, 코너 반경 인자를 선정하였다. 리어바디 공력설계 요소는 리어 끝단 곡률반경, 루프경사 영역의 길이, 루프 경사각, 사이드 상단 경사각, 사이드 하단 경사각, 사이드 코너 반경을 선정하였고 각 설계인자는 Fig. 5에 도시하였다. 근사적 반응표면 모델을 얻기 위한 최적화 과정은 다음과 같다. 각 설계변수의 기본 특성 정보를 얻기 위하여 최대, 최소 제한조건 내에서 각 설계변수를 조합한 모델에 대한 기본적인 해석을 수행한다. 이 단계에서는 각 설계변수가 시스템 전체적으로 미치는 영향 및 특성 분석이 가능하다. 이후 이를 토대로 선택적 설계 변수로 조합된 모델을 구성하고 국부적인 반응표면을 얻기 위한 해석을 재차 수행하고 각 설계변수의 반응 값을 보다 구체화한다.



(a) Extension spoiler (b) Rear end
Fig. 5 Design parameters of spoiler and rear end

4. 최적화 해석 결과

4.1 설계 인자 특성 및 기여도 분석

설계인자 특성화시 기준 모델 대비 각 모델의 공기저항 변화율을 Fig. 6에 도시하였다.

R1부터 R8까지는 설계인자 특성 분석(Design characterization)을 위한 것이며 R9부터 R16은 반응표면의 국부적인 정교화(Adaptive sampling)를 위해 추가적으로 수행된 모델이며 R22부터 R24는 공력설계 요소 최적 조합에 대한 확인해석 결과이다. 리어바디 변경을 통해 공기저항은 최대 8% 저감되었다. Fig. 7과 같이 설계 변수 기여도 분석 결과 스포일러의 경우에는 후미 경사영역 길이의 영향이 가장 크며 측면각도, 경사각, 측면 길이, 코너 반경 순으로 나타났다. 리어바디 사이드 경사각의 기여도는 하단 경사각에 비해 상단 경사각이 상대적으로 크며 루프 경사영역 길이, 루프 경사각, 사이드 하단 경사각의 순으로 나타났고 고려된 설계 변수 모두 설계 자유도 내에서 임의의 최적 값이 존재함을 알 수 있었다.

4.2 최적 개념 도출

최적화 단계를 통해 도출된 형상과 각 최적 개념 모델의 공력 개선 예측치를 Fig. 8에 도시하였다. 스포일러의 경우에는 후미 경사각, 측면 각도, 측면 영

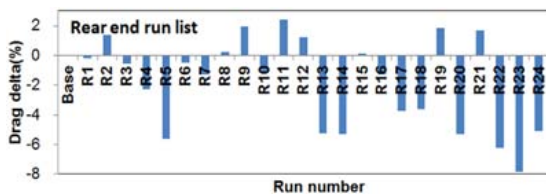
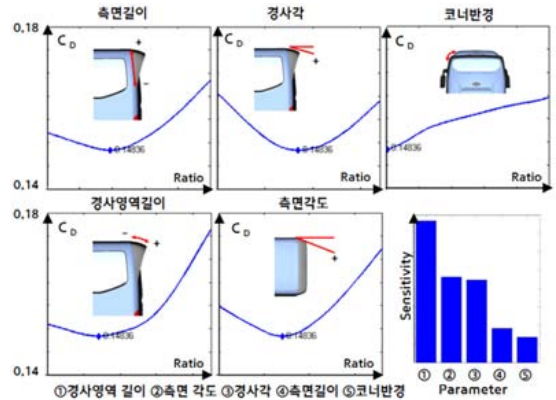
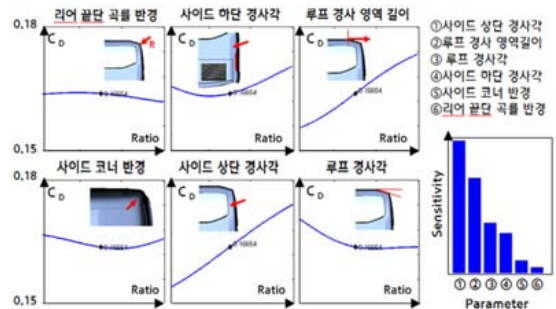


Fig. 6 Response delta result of initial characterization and adaptive sampling simulation(rear end case)



(a) Extension spoiler



(b) Rear end

Fig. 7 Global design sensitivity of spoiler and rear end

역의 길이 등이 반영되어 있다. 리어바디 형상은 다수의 최적개념을 도출하였다. 스포일러와 리어 바디 최적화시 각각 최대 5%, 6.5% 개선 가능성이 예측되었고 Fig. 8의 예측결과는 Fig. 4에 도시한 BSD 영역만이 고려된 결과이므로 차량 전체를 고려한 정밀모델에 대해 해석을 수행하였다. 이와 같이 근사 모델을 이용하기 때문에 필연적으로 오차를 갖게 되며 이를 최소화하기 위해 근사 모델을 효과적으로 모사해야만 최적화 결과의 신뢰성이 보장된다.

Table 1에는 반응표면 분석을 통해 얻어진 최적형상에 대하여 BSD 영역만을 고려한 TBS 모델과 차량 전체를 고려한 정밀모델의 결과를 비교하였다. 최적형상에 대해 TBS 모델과 차량전체를 고려한 정밀 모델 결과를 비교해 보면 전반적으로 1% 이내에 오차를 나타내었다. 따라서 최적화 과정시 해석의 경제성과 해석 신뢰도 두 가지 측면에서 차량모델을 부분적으로 고려한 TBS 모델이 매우 효과적임을 알 수 있었다.



Fig. 8 Optimized design concept of spoiler and rear end

Table 1 Drag reduction comparison

Model	Drag reduction (%)		Delta (%)
	TBS model	Full model	
Spoiler	-5.4	-4.5	0.9
Rear end	-6.2	-5.8	0.4
Spoiler+rear end	-8.1	-7.4	0.7

Fig. 9에는 최적화 개념형상에 대한 리어바디 후면의 압력 분포를 도시하였다. 리어바디 하단영역은 상단영역에 비해 상대적으로 압력 회복이 열세이다. 이는 Fig. 10에 도시한 바와 같이 대형버스 후류 하부 영역에서 전형적으로 발생하는 올려흐름(Upwash flow)에 의해 유동의 방향이 상단부를 향하게 되며 이 영역에 재부착되기 때문이다. 특히 최적



Fig. 9 Pressure distribution of rear end

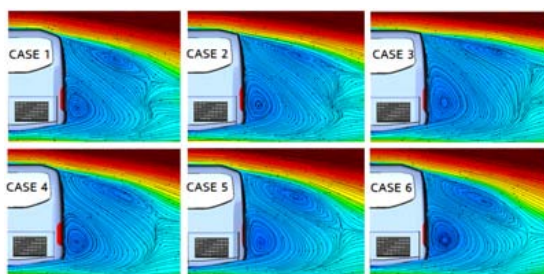


Fig. 10 Velocity distribution and rear wake structure

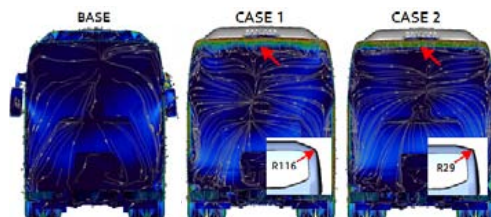


Fig. 11 Velocity and streamline of rear body surface

형상의 후류 유동은 리어바디 하단에서 전형적으로 발생하는 올려흐름 뿐만 아니라 전반적으로 상단 인접 영역에 뚜렷한 재순환 흐름이 형성되었다. 이로 인해 상방향 흐름이 보다 바디 후면을 향하게 되어 후면 압력증대를 야기하므로 스포일러 및 리어바디 최적형상은 상단부의 압력이 높게 형성되고 기준모델에 비해 전반적으로 압력 회복이 우위에 있음을 알 수 있다. Fig. 11에 도시한 리어바디 최적모델의 후면 스트림라인 분포를 고찰해 보면 기준모델 대비 전반적으로 재부착점이 하향하며 재부착점 또한 뚜렷하게 형성됨을 볼 수 있다. CASE 1 모델의 루프상단 경사각 끝단부의 곡률은 최적개념 모델 중 가장 크며 CASE 2 모델은 가장 작은 모델이

다. CASE 2와 같이 루프상단 경사각 끝단부의 곡률 반경이 감소하게 되면 박리라인이 일정하게 유지되었다. 반면 곡률 반경이 증가하게 되면 박리점이 불균일하게 형성되고 후류 유동의 불안정성을 야기함을 알 수 있었다.

4.3 상호 영향도 분석

사이드 코너 반경 변경에 따른 루프 경사각과 루프 끝단부 곡률 반경 반응 값을 Fig. 12에 도시하였다. 사이드 코너 반경 변화에 따라 반응값이 유사한 경향을 보이는 루프 끝단부 곡률 반경은 상호 영향이 없으며 다른 경향을 보이는 루프 경사각은 서로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. Fig. 13에서와 같이 루프 경사각은 루프 끝단부 곡률 반경 인자에 영향을 미치고 있으며 영향도는 작지만 사이드 코너 반경에도 영향을 미치고 있다. 루프 경사각의 길이는 Fig. 14에 도시한 바와 같이 사이드 상단 경사각과 하단 경사각 인자에 대해서는 영향이 없음을 알 수 있다. 전체적으로 변수간의 상호 영향성을 고

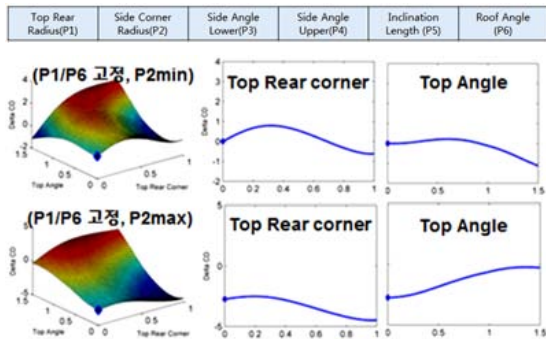


Fig. 12 Interaction of top inclination and side corner radius

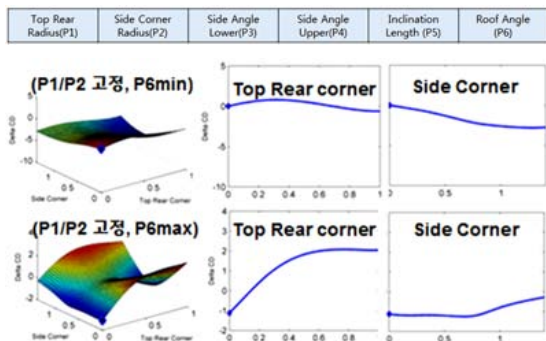


Fig. 13 Interaction of top rear radius and side corner radius

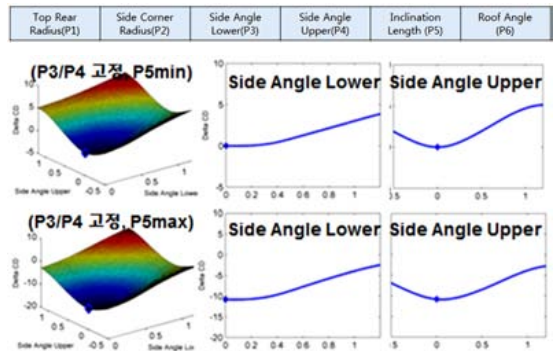


Fig. 14 Interaction of side angle upper and side angle lower

찰해보면 루프 경사각은 각 변수와 상호 큰 영향을 미치고 있으며 사이드 상단 및 하단 경사각 그리고 경사 영역의 길이는 전반적으로 각 변수에 대해 영향성이 거의 없음을 알 수 있다. 리어 끝단 곡률반경은 사이드 상단경사각, 사이드 하단 경사각, 루프 경사각과 상호 영향성이 있으며 나머지 변수에 미치는 영향은 미미하였다.

5. 적용성을 고려한 최적형상 도출

5.1 리어바디 형상 제안

Fig. 15와 Fig. 16에 도시한 바와 같이 리어바디 최적모델의 경우 기준모델 대비 루프 상단 경사각과 측면 경사각을 적용하였다. 최적모델의 경우 후류 영역이 축소되고 바디후면 재 부착점 또한 하향되었다. 리어바디 공력 설계요소 변경에 따라 최적화 단계에서 공기저항은 최대 6.5 % 감소하는 것으로

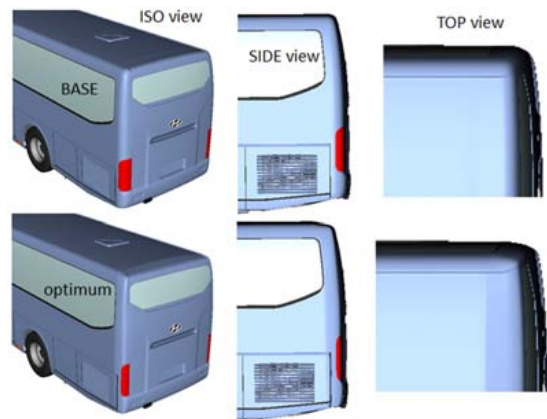


Fig. 15 Rear end comparison between base and optimum

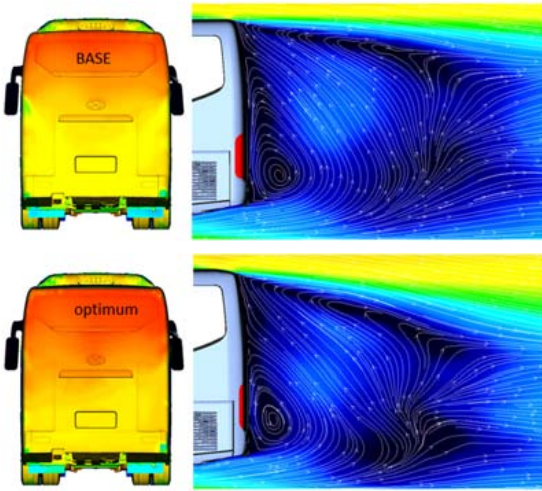


Fig. 16 Pressure distribution on the rear body surface and mean wake flow structure at the $y=0$ plane

예측되었으나 적용성을 고려한 형상 재현 시 약 4.5% 감소하였다.

5.2 리어바디 일체형 스포일러 형상 제안

최적화 단계에서 고려한 스포일러와 리어바디 최적 개념을 혼합하여 신 개념의 리어바디 일체형 스포일러 형상을 도출하였다. Fig. 17에 도시한 바와 같이 기여도 분석단계에서 중요한 변수로 파악된 사이드 상단 경사각, 경사영역 길이, 루프 상단 경사각을 적용하였고 스포일러 끝단부는 에지를 갖는 형상이다. 리어바디 일체형 스포일러 모델의 공기 저항은 기준모델 대비 5.4% 개선되었다.

이와 같이 리어바디 일체형 스포일러 적용시 리어바디 상단영역의 압력회복이 더 증대되며 박리 영역 또한 일체형 스포일러 끝단부에 일정하게 유지됨을 확인하였다. Fig. 18에는 후류 흐름을 도시하였다. 최적개념을 적용한 두 모델은 기준모델 대비 리어바디 상단 영역에 재순환 흐름이 명확히 관찰되며 이 흐름의 중심 또한 리어바디와 보다 근접해 있음을 볼 수 있다. 와류 중심점(Vortex core)을 연결한 와류 형태를 고찰해 보면 최적모델이 전반적으로 기준 모델 대비 축소되어 있고 환형 구조의 좌우형상이 보다 대칭적인 특징을 보인다. 이는 후류 밸런스 측면에서도 상대적으로 유리할 것으로 판단된다.

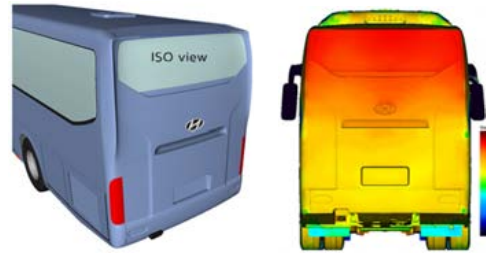


Fig. 17 Combined optimum shape and rear surface pressure

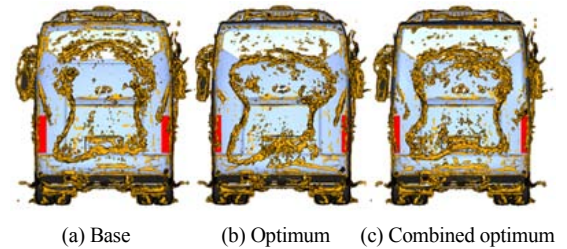
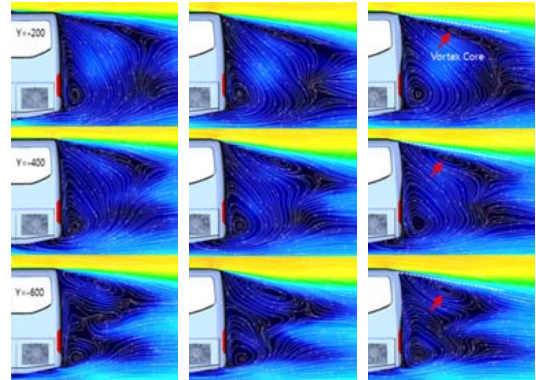


Fig. 18 Mean wake flow structure at the $y=0$ plane and vortex tube behind the bus

5.3 최적형상 공력효과 검증

최적형상에 대한 공력 개선 효과를 풍동시험을 통해 확인하였다. 최적형상에 대한 스케일 모델을 제작하여 풍동시험을 수행한 결과 Fig. 19에 도시한

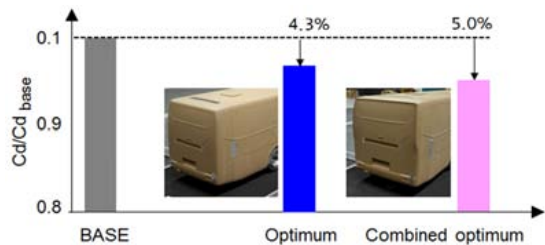


Fig. 19 Wind tunnel test results of rear body optimum and combined optimum

바와 같이 공기저항은 각각 4.3 %, 5.0 % 개선됨을 확인하였다. 최적화 단계에서 예측된 공기 저항 개선율은 각각 4.5 %, 5.4 %로 시험결과와 매우 유사함을 알 수 있었다.

6. 결 론

대형버스 실차 정밀 모델을 대상으로 고정도 디지털 풍동 및 반응 표면법을 이용하여 공력 설계 요소의 기여도 분석 및 후방 유도저항을 최소화 할 수 있는 최적 형상을 도출하였다. 최적형상에 대해 풍동시험을 수행하여 예측된 공력 효과를 검증하였고 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 1/4 스케일 모델을 활용한 지면 이동 재현 풍동 시험 결과와 해석 결과 비교시 공기저항은 약 2.5 % 차이를 보여 매우 잘 일치하는 결과를 나타내었다.
- 2) 최적화 단계에서 사용된 TBS모델은 정밀모델 해석결과와 전반적으로 1 % 이내의 오차를 나타내어 해석의 경제성과 신뢰도 두 측면에서 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- 3) 최적화 과정에서 공력설계 요소의 기여도 및 공력설계 변수간의 상호 영향성을 분석할 수 있었으며 최적 개념을 적용한 리어바디 일체형 스포일러 적용시 공기저항은 약 5.4 % 감소하였다.
- 4) 최적화된 리어바디 후류는 바디 상단 영역에 재순환 유동이 뚜렷하게 관찰되었다. 또한 이 와류의 중심은 리어바디에 보다 근접해 있으며 와류 중심점을 연결한 환형구조가 축소되고 대칭성이 보다 유지되고 있음을 알 수 있었다.

References

- 1) J. Williams, J. Barlow and R. Ranzenbach, "Experimental Study of CD Variation with Aspect Ratio," SAE 1991-01-0649, 1991.
- 2) Y. Takemori, S. Kato, Y. Masumitsu, Y. Kaya and T. Mizutani, "Drag Reduction of Bluff-

Based by Wake Control Vanes(Effective Utilization of Under Floor Flow)," FISITA World Automotive Congress, F2000G357, 2000.

- 3) A. Patidar, U. Gupta and A. Bansal, "Fuel Efficiency Improvement of Commercial Vehicle by Investigating Drag Resistance," SAE 2015-01-2893, 2015.
- 4) E. Camara and R. Girardi, "On the Aerodynamic Analysis of a Bus Model," SAE 952265, 1995.
- 5) C. Teixeira, Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics, Ph. D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1992.
- 6) R. Lietz, S. Mallick, S. Kandasamy and H. Chen, "Exterior Airflow Simulations Using a Lattice Boltzman Approach," SAE 2002-01-0596, 2002.
- 7) G. Wang, Z. Dong and P. Aitchison, "Adaptive Response Surface Method-A Global Optimization Scheme for Approximation-based Design Problems," Engineering Optimization Applied Optimal Design, Vol.33, pp.707-733, 2001.
- 8) J. Kim, I. Cho, J. Park, S. Seo and J. Park, "Shape Optimization of an Outer Tie Rod applied High Strength Aluminium," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.428-429, 2016.
- 9) Y. Jiang, J. Liu, Q. Chi, F. Lu, B. Li, A. Learned, R. Song and H. Friz, "Aerodynamic Characterization of the Design Changes for the Facelift of the VW Bora," SAE 2014-01-0601, 2014.
- 10) M. Kim, Y. Jeong and J. Kim, "Aerodynamic Vehicle Shape Optimization Using Statistical Response Surface Method of a Large-Sized Bus," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.402-412, 2016.