교통물류연구사업

별권 2. 화물차 운행 중 공기저항 최소화 기술 및 운행 안정성 향상 기술 상용화 기술 개발 (최종)

2018. 6. 29.

Infrastructure
R&D Report

협동연구기관 / 포항공과대학교
산학협력단
공동연구기관 / ㈜ 허즈앤티

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

보 고 서 요 약 서

과제고유번호	16TLRP-B07 7326-03	해 당 단 계 연 구 기 간	2014. 6. 30 ~2017. 5. 28	단계 구분	3차년도/ 3차년도
연 구 사 업 명	교통물류연구사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	도로화물운송 효율화를 위한 트레일러 경량화·공기저항 저감 및 운송용기 최적화 기술개발			
	단위과제명	화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술 개발			
연 구 책 임 자	이 상 준	참 여 연구원수	총 : 19명 내부 : 10명 외부 : 9명	총연구비	정부 : 1,361,681 천원 기업 : 464,561 천원 계 : 1,826,242 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	포항공과대학교		참여기업명	㈜허즈앤티	
국제공동연구	상대국명 : -		상대국연구기관명 : -		
요약				보고서면수	418

○ 화물운송용 연료소비 절감을 위한 핵심 기술개발 필요성이 대두되면서 운송장비의 연비 개선 및 운송 효율화 등을 통한 물류비용 절감방안에 관심이 집중

○ 국내에서는 관련 기술에 대한 전무한 실정이며 시중 국산 제품은 차량 최적화 검증 없이 모양만 흉내 낸 경우가 많아 실효성에 의문 제기

○ 본 과제의 연구대상은 사이드 스커트와 보트 테일로 각각의 경우에 대하여 풍동실험과 수치해석을 통해 최적의 시제품을 제작하는데 그 목적이 있음

- 사이드 스커트가 화물차 트레일러의 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석하고 형상 변화에 따른 성능 평가를 통해, 최적화된 형상을 도출하고, 설계된 내용을 기반으로 하여 국내 화물차와 실정에 특화된 사이드 스커트를 개발 및 방법론에 대하여 규격화하고 가이드 제시함

- 보트 테일이 화물차 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석하고, 보트 테일의 형상이 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석. 실험과 수치해석을 통해 최적화된 형상을 선정한 후, 화물의 상, 하역에 지장이 없도록 실용화 예정

○ 적용 대상이 화물차에만 국한된 것이 아닌, 기차나 비행기 등과 같은 운송체에 대한 기초연구에도 적용이 가능하여 타 산업으로의 연계가 용이하고, 수입대체효과는 물론, 국산 제품 해외수출과 경쟁력 제고 가능

색인어	한글	공기저항감소	주행 안정성	사이트 스커트	보트 테일	캡 루프 페어링
	영어	Aerodynamic Drag Reduction	Driving stability	Side skirt	Boat tail	Cab roof faring

목 차

제1장. 연구의 개요 ····· 1

제1절. 연구의 배경 및 필요성 ····· 1
제2절. 연구의 내용 및 범위 ····· 6

제2장. 사이드 스커트 조사 분석 및 설계 ····· 15

제1절. 국내외 기술현황/동향 분석 ····· 15
제2절. 시장성조사 및 실용화 전략 ····· 18
제3절. 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치 ····· 23
제4절. 축소형 사이드 스커트 설계 및 제작 ····· 27

제3장. 사이드 스커트 공기역학적 성능평가 ····· 33

제1절. 풍동실험을 이용한 공기역학적 성능평가 ····· 33
제2절. 수치해석을 통한 공기역학적 성능평가 ····· 44
제3절. 최적화 설계 ····· 61

제4장. 사이드 스커트를 통한 공기저항 저감 기술 개발 ····· 67

제1절. 주행안정성 ····· 67
제2절. 냉각성능분석 ····· 79
제3절. 수치해석을 통한 최적화 ····· 86
제4절. 다양한 조건에 대한 추가 실험을 통한 성능 개선 ····· 91
제5절. 내구성 분석 및 검증 ····· 94

제5장. 보트 테일 조사 분석 및 설계 ····· 105

제1절. 국내외 기술현황/동향 분석 ····· 105
제2절. 시장성조사 및 실용화 전략 ····· 108
제3절. 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치 ····· 112
제4절. 보트 테일 설계 및 제작 ····· 116

제6장. 보트 테일 공기역학적 성능평가 ····· 123

제1절. 풍동실험을 이용한 공기역학적 성능평가 ····· 123
제2절. 수치해석을 통한 공기역학적 성능평가 ····· 136
제3절. 최적화 설계 ····· 153

제7장. 보트 테일을 통한 운행안정성 향상 기술 개발 ····· 159
제1절. 풍동 실험을 통한 주행 안정성 분석 ····· 159
제2절. 수치해석을 통한 주행 안정성 평가 ····· 169
제3절. 보트테일에 대한 최적화 설계 ····· 174
제8장. Gap fairing을 통한 운행 안정성 향상 기술 ····· 183
제1절. Gap fairing의 국내외 기술현황과 동향 분석 ····· 183
제2절. 시장성조사 및 실용화 전략 ····· 186
제3절. 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치 ····· 190
제9장. Gap fairing을 통한 운행 안정성 향상 기술 개발 ····· 197
제1절. Gap fairing 설계 ····· 197
제2절. Gap fairing의 공기역학적 성능 평가 ····· 199
제10장. Vortex generator를 이용한 운행안정성 향상 기술 개발 227
제1절. Vortex generator 국내외 기술현황과 동향 분석 ····· 227
제2절. 시장성조사 및 실용화 전략 ····· 230
제3절. 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치 ····· 235
제4절. Vortex generator의 설계 ····· 238
제5절. Vortex generator의 공기역학적 성능 평가 ····· 241
제11장. Trailer full aero package를 통한 연비 향상 기술 개발 267
제1절. 15ton 화물차 모델 full aero. package의 설계 ····· 267
제2절. Full aero. package를 장착한 15ton 화물차의 공기역학적 성능 평가 ··· 270
제3절. 40ft 화물차 모델 trailer full aero package의 설계 ····· 279
제4절. 40ft 화물차 모델 trailer full aero. package의 공기역학적 성능 평가 ·· 282
제12장. 테스트베드 구축 및 실용화 ····· 303
제1절. 사이드스커트 최적 시제품 제작 ····· 303
제2절. 보트테일 최적 시제품 제작 ····· 305
제3절. Gap fairing 최적 시제품 제작 ····· 307
제4절. 풍동시험용 vortex modifier 시제품 ····· 309
제5절. Trailer full aero package 최적 시제품 제작 ····· 312
제6절. 1차년도 연비개선 성능 검증 ····· 318

제7절. 2차년도 연비개선 실차 성능 검증 ····· 321
제8절. 3차년도 연비개선 실차 성능 검증 ····· 339
제9절. 기대효과 분석 ····· 358
제10절. 법·제도 방안 검토 ····· 372
제11절. 개발기술의 실용화 및 기술이전 전략 수립 ····· 376
제12절. 개발기술의 실용화 및 기술이전을 위한 홍보 ····· 384
제13절. 가이드라인 제작 ····· 387
제14절. 사업화 계획 ····· 400

표 목차

<표 1-1> 연구개발 기술의 정의 ····· 6
<표 1-2> 화물차 운행 시 연료소모율 저감을 위한 공기저항감소 기술의 내용 범위 ·· 7
<표 1-3> Side skirt TRL 설정 ····· 8
<표 1-4> Boat tail TRL 설정 ····· 9

<표 2-1> 공기저항 저감기술 유사 연구 ····· 15
<표 2-2> 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발수준 ··· 17
<표 2-3> 종합물류인증기업의 물류사업 매출액 ····· 18
<표 2-4> 주요기업 차량 보유 현황 ····· 19
<표 2-5> 일반화물차량의 차종별 연비 및 운행속도 ····· 20
<표 2-6> 본 과제의 수요대상 및 활용방안 ····· 21
<표 2-7> Smartway Program과 본 과제의 연료저감 비교 ····· 23
<표 2-8> 사이드 스커트 기술개발 단계 ····· 24
<표 2-9> 세부기술별 핵심 요소 기술 및 성과물 ····· 25
<표 2-10> 기술의 정의와 핵심 요소기술 ····· 25
<표 2-11> 사이드 스커트 기술 개발의 정량적 연구목표 및 세부 연구목표 ····· 26

<표 3-1> 모델별 격자의 셀 개수 ····· 45
<표 3-2> 15톤 화물차의 사이드 스커트의 유무에 따른 항력계수 비교 ····· 50
<표 3-3> 40ft 화물차의 사이드 스커트의 유무에 따른 항력계수 비교 ····· 55
<표 3-4> 사이드 스커트의 유무에 따른 항력계수 비교 ····· 60
<표 3-5> 사이드 스커트를 부착한 15 톤 화물차 모델의 공기저항 계수 개선량 ··· 62
<표 3-6> 사이드 스커트를 부착한 40ft 화물차 모델의 공기저항 계수 개선량 ····· 63
<표 3-7> 사이드 스커트를 부착한 5 톤 화물차 모델의 공기저항 계수 개선량 ····· 64

<표 4-1> 모델별 격자의 셀 개수 ····· 75
<표 4-2> 열원이 공급된 상태에서 사이드 스커트 장착 유/무에 따른 화물차 하부 위치에서의 온도 변화표 ····· 85
<표 4-3> TEST BED 현황 ····· 99

<표 5-1> 공기저항 저감기술 유사 연구 ····· 105
<표 5-2> 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발수준 · 107

<표 5-3> 종합물류인증기업의 물류사업 매출액 ····· 108
<표 5-4> 주요기업 차량 보유 현황 ····· 109
<표 5-5> 일반화물차량의 차종별 연비 및 운행속도 ····· 110
<표 5-6> 공기저항 저감장치 수요대상 ····· 111
<표 5-7> Smartway Program과 연료 저감 비교 ····· 112
<표 5-8> 보트 테일 기술 개발 대상 및 범위 ····· 114
<표 5-9> 세부기술별 핵심 요소 기술 및 성과물 ····· 115
<표 5-10> 기술정의와 핵심요소기술 ····· 115
<표 5-11> 보트 테일 기술 개발의 정량적 연구 목표 및 세부 연구목표 ····· 116

<표 6-1> 모델별 격자의 셀 개수 ····· 137
<표 6-2> 보트 테일의 유무에 따른 항력계수 비교 ····· 142
<표 6-3> 보트 테일의 유무에 따른 항력계수 비교 ····· 147
<표 6-4> 보트 테일의 유무에 따른 항력계수 비교 ····· 152
<표 6-5> 화물차 종류별 최소 항력계수를 갖는 기존 보트 테일 모델 ····· 156
<표 6-6> G 보트 테일 모델을 장착한 15톤 화물차의 항력계수 및 항력계수 감소율 ····· 156
<표 6-7> G + B 보트 테일 모델을 장착한 15톤 화물차의 항력계수 및 항력계수 감소율 ··· 156

<표 7-1> 생체 모방형 보트 테일의 공기저항계수 및 횡풍 측력계수 감소율 비교 ····· 166
<표 7-2> 모델별 격자의 셀 개수 ····· 170

<표 8-1> 공기저항 저감기술 유사 연구 ····· 183
<표 8-2> 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발수준 · 185
<표 8-3> 종합물류인증기업의 물류사업 매출액 ····· 186
<표 8-4> 주요기업 차량 보유 현황 ····· 187
<표 8-5> 일반화물차량의 차종별 연비 및 운행속도 ····· 188
<표 8-6> 공기저항 저감장치 수요대상 ····· 189
<표 8-7> Smartway Program과 연료 저감 비교 ····· 190
<표 8-8> 보트 테일 기술 개발 대상 및 범위 ····· 192
<표 8-9> 세부기술별 핵심 요소 기술 및 성과물 ····· 193
<표 8-10> 기술정의와 핵심요소기술 ····· 193
<표 8-11> 보트 테일 기술 개발의 정량적 연구 목표 및 세부 연구목표 ····· 194

<표 9-1> 실험 대상 화물차 모델 및 제원 ····· 202
<표 9-2> 수치해석용 격자의 셀 개수 ····· 213

<표 10-1> 공기저항 저감기술 유사 연구 ····· 227
<표 10-2> 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발수준 ·· 229
<표 10-3> 종합물류인증기업의 물류사업 매출액 ····· 230
<표 10-4> 주요기업 차량 보유 현황 ····· 231
<표 10-5> 일반화물차량의 차종별 연비 및 운행속도 ····· 232
<표 10-6> 공기저항 저감장치 수요대상 ····· 233
<표 10-7> Smartway Program과 연료 저감 비교 ····· 235
<표 10-8> Vortex generator 기술 개발 대상 및 범위 ····· 236
<표 10-9> 세부기술별 핵심 요소 기술 및 성과물 ····· 237
<표 10-10> 기술정의와 핵심요소기술 ····· 237
<표 10-11> 보트 테일 기술 개발의 정량적 연구 목표 및 세부 연구목표 ····· 238
<표 10-12> 실험 대상 화물차 모델 및 제원 ····· 243
<표 10-13> Vortex generator 형상과 크기에 따른 항력계수(CD) 및 항력계수 저감 효과(%) ·· 245
<표 10-14> Vortex generator 형상 및 개수에 따른 항력계수(CD) 및 항력 저감 효과(%) ···· 246
<표 10-15> Vortex generator 형상 및 설치 위치변화에 따른 항력계수(CD) 및 항력계수 저감 효과(%) ···· 247
<표 10-16> 수치해석용 격자의 셀 개수 ····· 250

<표 11-1> 실험 대상 화물차 모델 및 제원 ····· 274
<표 11-2> 수치해석용 계산격자의 셀 개수 ····· 289

<표 12-1> 제작 시제품 ····· 304
<표 12-2> 제작 시제품 ····· 306
<표 12-3> 제작 시제품 ····· 308
<표 12-4> 실험대상 모형 ····· 310
<표 12-5> 인장시험 결과 ····· 313
<표 12-6> 인장시험 종합결과 ····· 313
<표 12-7> 파괴형태 ····· 314
<표 12-8> 제작 시제품 ····· 315
<표 12-9> 실차시험 시뮬레이션 결과 ····· 320
<표 12-10> 15 ton 화물차량 제원 ····· 322
<표 12-11> 42ft 트레일러 화물차량 제원 ····· 322

<표 12-12> Table 1 SAE J1321 실험 조건 및 조건 변경 사항 ····· 323
<표 12-13> Baseline Segment Driving ····· 325
<표 12-14> PG 실차시험 결과 ····· 328
<표 12-15> 사이드스커트 목표대비 성과 ····· 328
<표 12-16> 차대동력시험용 차량 제원 ····· 330
<표 12-17> Chassis Dyno. Test Cell Control ····· 331
<표 12-18> 차대동력계 장비제원 ····· 331
<표 12-19> 배기가스 분석장치 제원 ····· 334
<표 12-20> 희석 터널 제원 ····· 335
<표 12-21> 분석항목 ····· 336
<표 12-22> 차대동력계 속도별 시험결과 ····· 337
<표 12-23> 차대동력 시험을 통한 성능목표대비 시험결과 ····· 337
<표 12-24> 42ft 트레일러 화물차량 제원 ····· 340
<표 12-25> SAE J1321 및 규정 최적화 여부 ····· 341
<표 12-26> Baseline Segment Driving ····· 343
<표 12-27> PG 실차시험 연비결과 ····· 346
<표 12-28> PG실차시험 배출가스결과 ····· 346
<표 12-29> 사이드스커트 목표대비 성과 ····· 346
<표 12-30> 차대동력시험용 차량 제원 ····· 348
<표 12-31> Chassis Dyno. Test Cell Control ····· 349
<표 12-32> 차대동력계 장비제원 ····· 350
<표 12-33> 배기가스 분석장치 제원 ····· 353
<표 12-34> 희석 터널 제원 ····· 354
<표 12-35> 분석항목 ····· 355
<표 12-36> 목표주행 저항의 계산식 ····· 355
<표 12-37> 차대동력계 속도별 시험결과 ····· 356
<표 12-39> 차대동력 시험을 통한 15ton 트럭의 연비저감 목표대비 시험결과 ····· 356
<표 12-39> 시나리오별 대기오염물질별 한계피해비용 ····· 362
<표 12-40> 우리나라 편익이전 결과 ····· 362
<표 12-41> CO2 한계피해비용 편익이전 값 ····· 363
<표 12-42> 사회적 비용편익 분석 시나리오 ····· 371
<표 12-43> 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 ····· 372
<표 12-44> 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙(1) ····· 373
<표 12-45> 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙(2) ····· 374

<표 12-46> TEST BED 현황 ····· 378
<표 12-47> TEST BED 현황 ····· 379
<표 12-48> Vortex generator 장착위치에 따른 형상별 성능 ····· 397
<표 12-49> 사업 투자 계획 ····· 400
<표 12-50> 사업화 전략 ····· 400
<표 12-51> 물류산업의 업종별 업체수 및 종사자수 추이 ····· 401

그림 목차

<그림 1-1> 물류비용 절감기술 ····· 1
<그림 1-2> 온실가스 감축기술 ····· 2
<그림 1-3> SuperTruck 프로젝트 개발 개요도 ····· 5

<그림 2-1> 표준형 사이드 스커트 ····· 27
<그림 2-2> 15톤 화물차의 플랩형 사이드 스커트 ····· 28
<그림 2-3> 40ft 화물차의 플랩형 사이드 스커트 ····· 28
<그림 2-4> 5톤 화물차의 플랩형 사이드 스커트 ····· 29
<그림 2-5> 접이식 사이드 스커트의 각도에 대한 정의 ····· 29

<그림 3-1> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관 ····· 34
<그림 3-2> POSTECH 아음속 풍동도면 ····· 35
<그림 3-3> 실험 대상 화물차 모델 및 사양 ····· 36
<그림 3-4> 풍속에 따른 15톤 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右)의 변화 ····· 37
<그림 3-5> 표준형 및 플랩 사이드 스커트의 항력 감소 효과 ····· 38
<그림 3-6> 접이식 사이드 스커트의 항력저감 효과 비교 ····· 38
<그림 3-7> 풍속에 따른 40ft 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右) 변화 ····· 39
<그림 3-8> 표준형 및 플랩 사이드 스커트의 항력 감소 효과 ····· 40
<그림 3-9> 접이식 사이드 스커트의 항력 감소 효과 ····· 41
<그림 3-10> 풍속에 따른 5ton 모델에서의 항력 및 항력계수 변화 ····· 42
<그림 3-11> 표준형, 플랩 및 접이식 사이드 스커트의 항력 감소 효과 ····· 43
<그림 3-12> 수치해석 풍동과 경계조건의 예시 (15ton 화물차량) ····· 45
<그림 3-13> 기본 모델의 시간 평균 압력장 ····· 46
<그림 3-14> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 압력장 ··· 46
<그림 3-15> 기본 모델의 시간 평균 유속방향 속도장 ····· 47
<그림 3-16> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 유속방향 속도장 ····· 47
<그림 3-17> 기본 모델의 시간 평균 x방향 vorticity ····· 48
<그림 3-18> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 x방향 vorticity ····· 48
<그림 3-19> 기본 모델의 시간 평균 y방향 vorticity ····· 49
<그림 3-20> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 y방향 vorticity ····· 49
<그림 3-21> 기본 모델의 시간 평균 z방향 vorticity ····· 50

<그림 3-22> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 z방향 vorticity ····· 50
<그림 3-23> 기본 모델의 시간 평균 압력장 ····· 51
<그림 3-24> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 압력장 ··· 51
<그림 3-25> 기본 모델의 시간 평균 유속방향 속도장 ····· 52
<그림 3-26> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 유속방향 속도장 ····· 52
<그림 3-27> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 53
<그림 3-28> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 53
<그림 3-29> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 54
<그림 3-30> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 54
<그림 3-31> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity ····· 55
<그림 3-32> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour) ····· 55
<그림 3-33> 기본 모델의 시간 평균 압력장 ····· 56
<그림 3-34> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 압력장 ··· 56
<그림 3-35> 기본 모델의 시간 평균 유속방향 속도장 ····· 57
<그림 3-36> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 유속방향 속도장 ····· 57
<그림 3-37> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 58
<그림 3-38> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 58
<그림 3-39> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 59
<그림 3-40> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 59
<그림 3-41> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity ····· 60
<그림 3-42> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity ····· 60
<그림 3-43> 15톤 화물차의 플랩 사이드 스커트에 대한 각도의 정의 ····· 61
<그림 3-44> 40ft 화물차의 플랩 사이드 스커트에 대한 각도의 정의 ····· 61
<그림 3-45> 접이식 사이드 스커트의 각도에 대한 정의 ····· 61

<그림 4-1> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관 ····· 67
<그림 4-2> POSTECH 아음속 풍동도면 ····· 68
<그림 4-3> Yaw angle 조절을 위한 turn table 개략도 ····· 69
<그림 4-4> 실험 대상 화물차 모델 및 사양 ····· 70
<그림 4-5> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 작용하는 (a)항력 및 (b)항력계수의 변화 ····· 71
<그림 4-6> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 작용하는 (a)측력 및 (b)횡풍 측력계수의 변화 ····· 72
<그림 4-7> Yaw angle에 따른 40ft 트레일러에 작용하는 (a)항력 및 (b)항력계수의 변화 ····· 73
<그림 4-8> Yaw angle에 따른 40ft 트레일러에 작용하는 측력(左) 및 횡풍 측력계수 변화(右) ·· 73

<그림 4-9> 주행 안정성 평가를 위한 수치해석 격자 예시(15톤 화물차) ····· 75
<그림 4-10> Yaw angle Φ=10°조건에서 사이드 스커트 미부착 15톤 화물차의 와류구조(a) 및 사이드 스커트 부착한 15톤 화물차의 와류구조(b) 비교 ····· 76
<그림 4-11> Yaw angle Φ=10°조건에서 사이드 스커트 미부착 15톤 화물차의 와류구조(a) 및 사이드 스커트 부착한 15톤 화물차의 난류운동에너지(b) 비교 ····· 76
<그림 4-12> Yaw angle Φ=10°조건에서 사이드 스커트 미장착한 40ft 화물차의 와류구조(a) 및 사이드 스커트 장착한 40ft 화물차의 와류구조(b) 비교 · 77
<그림 4-13> Yaw angle Φ=10°조건에서 사이드 스커트 미장착한 40ft 화물차의 난류운동에너지(a) 및 사이드 스커트 장착한 40ft 화물차의 난류운동에너지(b) 비교 ····· 77
<그림 4-14> Yaw angle Φ=10°조건에서 사이드 스커트 장착 전 후 40ft 화물차에 작용하는 측력의 신호(a), 사이드 스커트 장착 전 후 40ft 화물차에 작용하는 측력의 평균값(b)과 실효값(c) 비교 ····· 78
<그림 4-15> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 특징 ····· 79
<그림 4-16> 1/15 스케일로 축소된 15ton 화물차 모형 및 PIV 실험 장치 개략도 80
<그림 4-17> 실험에 사용된 온도측정 장치와 heat source ····· 81
<그림 4-18> (a) 화물차 모형에 부착된 온도센서와 열원의 배치도 (b)화물차에 부착된 온도센서 및 열원의 위치 ····· 81
<그림 4-19> (a) 1/15 화물차 rendering 모델 및 모형사진 (b) 실험에 사용된 사이드 스커트 형상 ····· 81
<그림 4-20> 화물차 모형 하부의, 앞바퀴 후방 속도장 비교. (a) 사이드 스커트 미부착, (b) 사이드 스커트 부착 ····· 83
<그림 4-21> 화물차 앞바퀴 후방 속도장 비교. (a) 사이드 스커트 미부착, (b) 사이드 스커트 부착 ····· 83
<그림 4-22> 시간에 따른 열원(heat source) 표면의 온도 변화 ····· 84
<그림 4-23> 사이드 스커트 장착이 시간에 따른 하부 온도 변화에 미치는 영향 (a) 사이드스커트 미부착 (b)사이드 스커트 부착 ····· 85
<그림 4-24> Surrogate Management Framework의 알고리즘 ····· 86
<그림 4-25> 15톤 화물차에 장착한 사이드 스커트 각도에 대한 모식도(a) 및 15톤 화물차의 Surrogate Management Framework(SMF) 최적화 결과(b) 87
<그림 4-26> 사이드 스커트 미부착 15톤 화물차의 와류구조(a) 와 최적 사이드 스커트를 부착한 15톤 화물차의 와류구조(b) 비교 ····· 88
<그림 4-27> 사이드 스커트 미부착 15톤 화물차의 뒷바퀴 부근 압력장(a) 및 최적 사이드 스커트를 장착한 15톤 화물차의 뒷바퀴 부근 압력장(b)비교 ····· 88
<그림 4-28> 40ft 화물차에 장착한 사이드 스커트 각도에 대한 모식도(a) 와 40ft

화물차의 SMF 최적화 분석 결과(b) ····· 89
<그림 4-29> 사이드 스커트 미부착 40ft 화물차의 와류구조(a) 와 최적 사이드 스커트를 부착한 40ft 화물차의 와류구조(b)비교 ····· 90
<그림 4-30> 사이드 스커트 미부착 40ft 화물차의 뒷바퀴 부근 압력장(a) 및 최적 사이드 스커트를 장착한 40ft 화물차의 뒷바퀴 부근 압력장(b)비교 ···· 90
<그림 4-31> 풍속에 따른 15톤 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右)의 변화 ····· 91
<그림 4-32> 표준형 및 플랩형 사이드 스커트의 항력 감소 효과 ····· 92
<그림 4-33> 기본형 및 flap형 side skirt를 부착한 15톤 화물차량의 항력계수(左) 및 항력 저감율(右) 변화 ····· 93
<그림 4-34> 기본형 캡루프 페어링을 부착한 15톤 화물차량에 flap형 side skirt(0,30)가 항력 저감에 미치는 효과) ····· 93
<그림 4-35> 15톤 화물차량에 기본형 캡루프 페어링을 부착한 경우와 여기에 flap형 side skirt(0,30)와 AID boat tail을 부착한 경우 항력 저감율 비교) ····· 94
<그림 4-36> 유동에서 구한 압력 정보를 고체표면에 가하는 코드의 기본 알고리즘 ····· 95
<그림 4-37> 15톤 화물차 주위 유동에 의하여 전방 사이드 스커트에 작용하는 압력 분포 ····· 96
<그림 4-38> 유동에 의해 전방 사이드 스커트가 변형되는 양(a)과 전방 사이드 스커트에 가해지는 압력분포(b) ····· 96
<그림 4-39> 15톤 화물차를 주위 유동에 의하여 후방 사이드 스커트에 작용하는 압력 분포 ····· 97
<그림 4-40> 유동에 의해 후방 사이드 스커트가 변형되는 양(a)과 후방 사이드 스커트에 가해지는 압력분포(b) ····· 97
<그림 4-41> 40ft 컨테이너 트럭을 흘러 지나는 유동에 의해 사이드 스커트에 작용하는 압력분포 ····· 98
<그림 4-42> 차체 주위 유동에 기인하여 사이드 스커트가 변형되는 양(a)과 사이드 스커트에 가해지는 압력분포(b) ····· 98
<그림 4-43> 4.5톤 윙바디 장착 직후 ····· 99
<그림 4-44> 4.5톤 윙바디 장착 후 4개월 후 ····· 100
<그림 4-45> 4.5톤 윙바디 장착 후 8개월 후 ····· 100
<그림 4-46> 4.5톤 윙바디 장착 후 12개월 후 ····· 100
<그림 4-47> 14.5톤 윙바디 장착 직후 ····· 101
<그림 4-48> 14.5톤 윙바디 장착 후 4개월 후 ····· 101
<그림 4-49> 14.5톤 윙바디 장착 후 8개월 후 ····· 102

<그림 4-50> 14.5톤 윙바디 장착 후 12개월 후 ····· 102

<그림 5-1> 표준형 보트 테일의 길이 및 각도변화 ····· 117
<그림 5-2> 보트 테일 gap repair (G) 모델 ····· 118
<그림 5-3> 보트 테일 gap repair (G) + bottom (B) 모델 ····· 118
<그림 5-4> 보트 테일 AID 모델 (Alow inclined deflector) ····· 119
<그림 5-5> 슬라이드식 보트 테일 형상 ····· 120
<그림 5-6> 개폐식 보트 테일 형상 ····· 120

<그림 6-1> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관 ····· 124
<그림 6-2> POSTECH 아음속 풍동도면 ····· 125
<그림 6-3> 실험 대상 화물차 모델 및 사양 ····· 126
<그림 6-4> 풍속에 따른 15톤 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右)의 변화 ··· 127
<그림 6-5> 보트 테일의 항력 감소 효과 ····· 128
<그림 6-6> AID(Alow Inclined Deflector) 설치로 인한 항력감소 효과 ····· 129
<그림 6-7> 사이드 스커트와 보트 테일을 함께 적용한 경우의 항력감소 효과 ··· 130
<그림 6-8> 풍속에 따른 40ft 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右) 변화 ····· 131
<그림 6-9> 보트 테일의 항력 감소 효과 ····· 131
<그림 6-10> 사이드 스커트와 보트 테일을 함께 적용한 복합적인 항력저감 효과 ····· 132
<그림 6-11> 풍속에 따른 5ton 모델에서의 항력 및 항력계수 변화 ····· 133
<그림 6-12> 보트 테일의 항력 감소 효과 ····· 134
<그림 6-13> 사이드 스커트, 보트 테일의 복합적인 항력 감소 효과 ····· 135
<그림 6-14> 보트 테일 유무에 따른 5톤 화물차 모델 후방 영역 유동가시화 ··· 135
<그림 6-15> 수치해석 풍동과 경계조건의 예시 (15ton 화물차량) ····· 137
<그림 6-16> 기본 모델의 시간 평균 속도장 ····· 138
<그림 6-17> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 속도장 ····· 138
<그림 6-18> 기본 모델의 시간 평균 압력장 ····· 139
<그림 6-19> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 압력장 ····· 139
<그림 6-20> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 140
<그림 6-21> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 140
<그림 6-22> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 141
<그림 6-23> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 141
<그림 6-24> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity ····· 142
<그림 6-25> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity ····· 142

<그림 6-26> 기본 모델의 시간 평균 속도장 ····· 143
<그림 6-27> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 속도장 ····· 143
<그림 6-28> 기본 모델의 시간 평균 압력장 ····· 144
<그림 6-29> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 압력장 ····· 144
<그림 6-30> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 145
<그림 6-31> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 145
<그림 6-32> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 146
<그림 6-33> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 146
<그림 6-34> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity ····· 147
<그림 6-35> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity ····· 147
<그림 6-36> 기본 모델의 시간 평균 속도장 ····· 148
<그림 6-37> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 속도장 ····· 148
<그림 6-38> 기본 모델의 시간 평균 압력장 ····· 149
<그림 6-39> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 압력장 ····· 149
<그림 6-40> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 150
<그림 6-41> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity ····· 150
<그림 6-42> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 151
<그림 6-43> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity ····· 151
<그림 6-44> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity ····· 152
<그림 6-45> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity ····· 152
<그림 6-46> 보트 테일 기존 모델에 대한 길이와 각도의 정의 ····· 153
<그림 6-47> 보트 테일 G 모델에 대한 길이와 각도의 정의 ····· 154
<그림 6-48> 보트 테일 G + B 모델에 대한 길이와 각도의 정의 ····· 155

<그림 7-1> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관 ····· 159
<그림 7-2> POSTECH 아음속 풍동도면 ····· 160
<그림 7-3> Yaw angle 조절을 위한 turn table 개략도 ····· 161
<그림 7-4> 실험 대상 화물차 모델 및 사양 ····· 162
<그림 7-5> 보트 테일 모델. a)기존 모델, b)Gap repair가 추가된 보트 테일, c) LIAD(lower Inclined Air Deflector)가 추가된 보트 테일 ····· 163
<그림 7-6> 조류의 날개 끝 형상(左)과 및 이를 생체 모방한 파형의 끝단을 가지는 보트 테일의 개략도(右) ····· 164
<그림 7-7> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 작용하는 (a)항력 (FD)및 (b)항력 계수 (CD)의 변화 ····· 165

<그림 7-8> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 걸리는 (a)측력(Fs) 및 (b)횡풍 측력계수(CS) 변화 ····· 165
<그림 7-9> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 걸리는 (a)항력계수 (CD) 및 (b)횡풍 측력계수(CS) 변화 ····· 166
<그림 7-10> Yaw angle에 따른 40ft 트레일러에 작용하는 (a)항력(FD) 및 (b)항력계수(CD)의 변화 ····· 167
<그림 7-11> Yaw angle에 따른 40ft 트레일러에 작용하는 (a)측력(FD) 및 (b)횡풍 측력계수(CS)의 변화 ····· 167
<그림 7-12> displacement 변화량 ····· 168
<그림 7-13> FFT를 이용한 주파수 분석 ····· 168
<그림 7-14> 주행 안정성 평가를 위한 수치해석 격자 예시(15톤 화물차) ····· 170
<그림 7-15> Yaw angle Φ=10°조건에서 보트 테일 미부착 15톤 화물차의 와류구조(a) 및 최적 LIAD 보트 테일을 부착한 후의 15톤 화물차의 와류구조(b) 비교 ····· 171
<그림 7-16> Yaw angle Φ=10°조건에서 보트 테일 미부착 15톤 화물차의 난류운동에너지(a) 및 LIAD 보트 테일을 장착한 15톤 화물차 주위의 난류운동에너지(b) 비교 ····· 172
<그림 7-17> Yaw angle이 Φ=10°일 때, LIAD 보트 테일 미부착 40ft 화물차의 와류구조(a) 및 최적 LIAD 보트 테일을 장착한 40ft 화물차의 와류구조(b) 비교 ····· 172
<그림 7-18> Yaw angle 10°일 때 LIAD 보트 테일 부착 전의 40ft 화물차의 난류운동에너지(a) 및 보트 테일 부착 후의 40ft 화물차의 난류운동에너지(b) 비교 ····· 173
<그림 7-19> Yaw angle Φ=10°조건에서 보트 테일을 장착 전 후 40ft 화물차에 작용하는 측력의 신호(a), 보트 테일 장착 전 후 40ft 화물차에 작용하는 측력의 평균값(b)과 실효값(c)의 비교 ····· 174
<그림 7-20> 보트 테일의 항력 저감 효과 비교 ····· 175
<그림 7-21> LIAD 장치의 기울임 각도가 항력감소에 미치는 효과 ····· 175
<그림 7-22> corrugated 표면을 가진 1/8 scale의 40ft container 화물차량 모델 176
<그림 7-23> 40ft 화물차의 container의 corrugated 표면이 따른 보트 테일의 항력 저감에 미치는 효과 ····· 176
<그림 7-24> 1/15 스케일로 축소된 15ton 화물차 모형 및 PIV 실험 장치 개략도 ····· 177
<그림 7-25> 15ton 화물차 모델의 후류 유동 속도장 비교 a)보트 테일이 미장착된 경우, b)기존 보트 테일이 장착된 경우, c)Gap repair가 추가로 장착된 경우 ····· 178
<그림 7-26> 15ton 화물차 모델 후류의 vorticity 분포 비교 a)보트 테일이 미장착된 경우, b)기존 보트 테일이 장착된 경우, c)Gap repair가 추가로 장착된 경우 ····· 178
<그림 7-27> 보트테일 장착에 따른 15ton 화물차 모델 후류 유동의 속도장 비교 ····· 179

<그림 9-1> 40ft SCANIA 화물차에 부착된 gap fairing 장치 ····· 197
<그림 9-2> 40ft 현대 TRAGO 화물차에 부착된 gap fairing 장치 ····· 198
<그림 9-3> Gap fairing의 길이 및 각도 설계 ····· 198
<그림 9-4> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관 ····· 199
<그림 9-5> POSTECH 아음속 풍동 도면 ····· 200
<그림 9-6> Yaw angle Φ 조절을 위한 turn table 개략도 ····· 201
<그림 9-7> 풍속변화에 따른 두 40ft 화물차(SCANIA, TRAGO) 모델의 항력(FD) 및 항력계수(CD)값들의 변화 ····· 202
<그림 9-8> 40ft SCANIA 화물차 모델에 부착한 gap fairing의 길이와 각도변화에 따른 항력계수(CD)와 항력계수 저감 효과 ····· 203
<그림 9-9> 40ft TRAGO 화물차에 부착한 gap fairing의 길이와 각도변화에 따른 항력계수(CD)와 항력계수 저감 효과 ····· 204
<그림 9-10> (a) 40ft 화물차 운전석(cab) 상부에 장착하는 aero cab fairing (ACF) 도면, (b) 트랙터와 트레일러 사이 공간에 장착하는 gap extender 형상, (c) 40ft 화물차에 ACF 및 gap extender를 포함한 extended aero cab fairing (EACF)을 장착한 형상 ····· 205
<그림 9-11> 40ft TRAGO 화물차 모형에 (a) ACF와 (b) EACF를 장착한 경우의 형상 ····· 205
<그림 9-12> 각 부착물에 대한 항력계수 저감 효과 비교 ····· 206
<그림 9-13> Yaw angle에 따른 40ft TRAGO 화물차의 항력계수(CD) 및 항력 저감 효과 변화 ····· 207
<그림 9-14> Yaw angle에 따른 40ft TRAGO 화물차 모델의 횡풍 측력계수(CS) 및 측력계수 저감효과 ····· 208
<그림 9-15> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 특징 ····· 208
<그림 9-16> 40ft 화물차 1/17 스케일 축소 모델 및 PIV 실험 set-up의 개략도 209
<그림 9-17> 40ft 화물차 모형의 트랙터와 트레일러 사이 공간(gap)에 형성된 흐름의 속도장 비교. (a) gap fairing 미부착, (b) gap fairing 부착 ····· 210
<그림 9-18> 40ft 화물차 모델의 트랙터와 트레일러 사이 공간(gap)에 형성된 흐름의 와류(vorticity) 비교. (a) gap fairing 미부착, (b) gap fairing 부착 ····· 211
<그림 9-19> 40ft 화물차 모형의 트랙터와 트레일러 사이 공간(gap)에 형성된 유동의 난류 운동에너지(TKE) 비교. (a) gap fairing 미부착, (b) gap fairing 부착 ····· 211
<그림 9-20> 주행 안정성 평가에 사용된 수치해석 격자 (40ft 화물차) ····· 213
<그림 9-21> Surrogate Management Framework의 알고리즘 ····· 214
<그림 9-22> (a) 40ft 화물차에 장착한 gap fairing 길이와 각도에 대한 모식도 및 (b) Surrogate Management Framework(SMF) 최적화 결과 ····· 215

<그림 9-23> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 216
<그림 9-24> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 216
<그림 9-25> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 217
<그림 9-26> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 217
<그림 9-27> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 217
<그림 9-28> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 218
<그림 9-29> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 218
<그림 9-30> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 218
<그림 9-31> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 219
<그림 9-32> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 219
<그림 9-33> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 220
<그림 9-34> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 220
<그림 9-35> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 220
<그림 9-36> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 221
<그림 9-37> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 221
<그림 9-38> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 221
<그림 9-39> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 난류운동에너지 (z-평면, z=2.0) ····· 222

<그림 9-40> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 난류운동에너지 (z-평면, z=2.0) ····· 222
<그림 9-41> Gap fairing 부착 유무에 따른 40ft 화물차에 가해지는 시간에 따른 측력변화 ····· 223
<그림 9-42> Gap fairing 부착 여부에 따른 40ft 화물차에 가해지는 측력 fluctuation의 RMS 값 비교 ····· 223

<그림 10-1> Vortex generator의 형상. (좌측부터 하프델타, 위시본, 직사각형) · 239
<그림 10-2> 난류 경계층 두께 수치해석 결과 ····· 239
<그림 10-3> Vortex generator 설치 위치 ····· 240
<그림 10-4> Vortex modifier의 형상 및 설계 변수 ····· 240
<그림 10-5> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관 ····· 241
<그림 10-6> POSTECH 아음속 풍동 도면 ····· 242
<그림 10-7> Yaw angle 조절을 위한 turn table 개략도 ····· 242
<그림 10-8> 풍속변화에 따른 15ton Xcient 모델의 항력(FD) 및 항력계수(CD) 변화 ····· 244
<그림 10-9> Yaw angle 변화에 따른 15ton 화물차 모델의 항력계수(CD) 및 항력계수 저감효과 ····· 248
<그림 10-10> Yaw angle에 따른 15ton 모델의 측력계수(CS) 및 횡풍 측력계수 저감효과 ····· 248
<그림 10-11> 주행 안정성 평가에 사용된 수치해석 격자 (15ton 화물차) ····· 250
<그림 10-12> λ2로 나타낸 순간 와류장의 iso-surface (λ2 = -105)의 (위) 상부 view 및 (아래) 측면 view ····· 251
<그림 10-13> Two-point correlation 계산에 사용되어진 원점과 각 sampling line의 위치. (좌) 화물차 뒷면에서의 위치와 (우) 측면에서의 위치 ····· 252
<그림 10-14> Outer layer의 sampling line에서 계산된 3축 방향 속도성분의 correlation 값 변화 ····· 252
<그림 10-15> Log layer의 sampling line에서 계산된 3축 방향 속도 성분의 correlation 값 변화 ····· 253
<그림 10-16> Buffer layer의 sampling line에서 계산된 3축 방향 속도 성분의 correlation 값 변화 ····· 253
<그림 10-17> 직사각형 vortex generator의 설치 위치-1 ····· 253
<그림 10-18> 직사각형 vortex generator의 설치 위치-2 ····· 254
<그림 10-19> Surrogate Management Framework의 알고리즘 ····· 254
<그림 10-20> (a) 15ton 화물차에 장착한 vortex generator 개수와 높이에 대한 모

식도 및 (b) Surrogate Management Framework(SMF) 최적화 결과 255
<그림 10-21> Vortex modifier를 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 256
<그림 10-22> Vortex modifier를 부착하고 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 256
<그림 10-23> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 256
<그림 10-24> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 257
<그림 10-25> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 257
<그림 10-26> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 257
<그림 10-27> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 258
<그림 10-28> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 258
<그림 10-29> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 258
<그림 10-30> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 259
<그림 10-31> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 259
<그림 10-32> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 259
<그림 10-33> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 260
<그림 10-34> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 260
<그림 10-35> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 260
<그림 10-36> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 261
<그림 10-37> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는

유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 261
<그림 10-38>Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 261
<그림 10-39> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 262
<그림 10-40> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 262
<그림 10-41> Vortex modifier 부착하지 않은 (좌) 및 부착하고 (우) 15ton 화물차의 컨테이너 위쪽 평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=3.1) ····· 262
<그림 10-42> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 263
<그림 10-43> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 263

<그림 11-1> 표준형 및 플랩 사이드 스커트의 항력 감소 효과 ····· 267
<그림 11-2> Boat tail 설계. (a) 표준형 boat tail, (b) gap repair가 추가된 boat tail, (c) LIAD가 추가된 boat tail ····· 268
<그림 11-3> Bio-inspired CRF의 높이, 길이 및 각도 설계 ····· 269
<그림 11-4> Full aero. package를 부착한 15ton 화물차 모델 ····· 269
<그림 11-5> Yaw angle 조절을 위한 turn table 개략도 ····· 271
<그림 11-6> POSTECH 중형 아음속 풍동 시험부 및 특징 ····· 272
<그림 11-7> 15ton 화물차 1/15 스케일 축소 모델 및 PIV 실험 set-up의 개략도 ····· 273
<그림 11-9> CRF를 장착한 15ton 화물차의 yaw angle에 따른 항력계수(CD) 및 항력계수 저감 효과 ····· 275
<그림 11-10> CRF를 장착한 15ton 화물차의 yaw angle에 따른 횡풍측력계수(CS) 및 횡풍측력계수 저감 효과 ····· 276
<그림 11-11> Reynolds number(Re) 변화에 따른 15ton 화물차의 항력계수(CD)의 변화 ····· 277
<그림 11-12> 15ton 화물차에 부착된 CRF 측면부 주위에 형성된 유동의 속도장 비교. (a) CRF 미부착, (b) basic CRF 부착, (c) bio-inspired CRF 부착, (d) advanced bio-inspired CRF 부착 ····· 278
<그림 11-13> 15ton 화물차 모형에 부착된 CRF 측면부 주위에 형성된 유동의 난류운동에너지(TKE) 비교. (a) CRF 미부착, (b) basic CRF 부착, (c) bio-inspired CRF 부착, (d) advanced bio-inspired CRF 부착 ····· 279
<그림 11-14> Side skirt의 설계와 그에 따른 항력 저감 효과 비교 ····· 279

<그림 11-15> Boat tail 설계. (a) 표준형 boat tail, (b) gap repair가 추가된 boat tail, (c) LIAD가 추가된 boat tail ····· 280
<그림 11-16> Gap fairing의 높이, 길이 및 각도 설계 ····· 281
<그림 11-17> 40ft 화물차 모델에 trailer full aero. package를 부착한 모델 ····· 281
<그림 11-18> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관 ····· 282
<그림 11-19> POSTECH 아음속 풍동 도면 ····· 283
<그림 11-20> Yaw angle Φ 조절을 위한 턴 테이블 개략도 ····· 284
<그림 11-21> 실험 대상 화물차 모델 및 제원 ····· 285
<그림 11-22> 풍속 변화에 따른 40ft 화물차의 항력(FD) 및 항력계수(CD)의 변화 ····· 286
<그림 11-23> Trailer full aero. package를 장착한 40ft TRAGO 화물차의 yaw angle에 따른 항력계수(CD) 및 항력계수 저감 효과 ····· 287
<그림 11-24> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 yaw angle에 따른 횡풍 측력계수(CS) 및 횡풍 측력계수 저감 효과 ····· 287
<그림 11-25> 주행 안정성 평가에 사용되어진 수치해석 격자 (40ft 화물차) ····· 289
<그림 11-26> Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 290
<그림 11-27> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 290
<그림 11-28> Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 291
<그림 11-29> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 291
<그림 11-30> Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) 292
<그림 11-31> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 292
<그림 11-32>Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) 292
<그림 11-33> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 293
<그림 11-34>Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 하부유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=0.33) ····· 293
<그림 11-35> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 하부유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=0.33) ····· 293

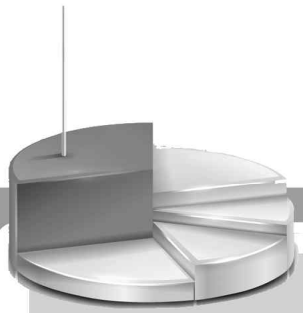
<그림 11-36> Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 하부유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=0.33) ····· 294
<그림 11-37> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 하부유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=0.33) ····· 294
<그림 11-38> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 295
<그림 11-39> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0) ····· 295
<그림 11-40> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 296
<그림 11-41> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0) ····· 296
<그림 11-42> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 297
<그림 11-43> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0) ····· 297
<그림 11-44> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 298
<그림 11-45> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0) ····· 298
<그림 11-46> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 난류 운동에너지 (z-평면, z=2.0) ····· 298
<그림 11-47> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 난류 운동에너지 (z-평면, z=2.0) ····· 299
<그림 11-48> Trailer full aero. package 부착 유무에 따른 40ft 화물차에 가해지는 시간에 따른 측력변화 ····· 299
<그림 11-49> Trailer full aero. package 부착 여부에 따른 40ft 화물차에 가해지는 측력 fluctuation의 RMS 값 비교 ····· 300

<그림 12-1> 선정소재 ····· 304
<그림 12-2> 경첩을 이용한 사이드 스커트 부착 ····· 305
<그림 12-3> 가스-스프링을 이용한 사이드 스커트 부착 ····· 305
<그림 12-4> LIAD ····· 307
<그림 12-5> Gap repair ····· 307

<그림 12-6> Gap fairing 적정 길이 제작 ····· 308
<그림 12-7> 최적 각도(5°)로 부착 ····· 309
<그림 12-8> 볼텍스 제너레이터 소재 ····· 309
<그림 12-9> Vortex modifier의 형상 및 설계 변수 ····· 311
<그림 12-10> 볼텍스 제너레이터 제작 ····· 311
<그림 12-11> 볼텍스 제너레이터 장착 ····· 312
<그림 12-12> 기존소재 S-S Curve ····· 314
<그림 12-13> 국산소재 S-S Curve ····· 314
<그림 12-14> Angled Flap type side skirt ····· 316
<그림 12-15> LIAD ····· 316
<그림 12-16> Gap repair ····· 317
<그림 12-17> Gap fairing 적정 길이 제작 ····· 317
<그림 12-18> 최적 각도(5°)로 부착 ····· 317
<그림 12-19> GEM 프로그램 Input data 화면 ····· 319
<그림 12-20> 미국의 중대형차 연비측정 모드 ····· 319
<그림 12-21> 자동차안전연구원 고속 주행로 ····· 321
<그림 12-22> SAE J1321의 실험 진행 순서 ····· 323
<그림 12-23> Test Preparation ····· 324
<그림 12-24> Driving Preparation ····· 325
<그림 12-25> Baseline Segment Driving ····· 326
<그림 12-26> Data Acquisition ····· 327
<그림 12-27> Fuel Efficiency Calculation ····· 327
<그림 12-28> PG실차시험결과보고서(전북자동차기술원) ····· 329
<그림 12-29> 차대동력계 관련 장비 ····· 332
<그림 12-30> 차대동력계 시험 ····· 333
<그림 12-31> 차대동력계 배기가스 배출측정시험 계략도 ····· 333
<그림 12-32> 배기가스 분석장치 ····· 334
<그림 12-33> 희석 터널 ····· 335
<그림 12-34> 온실가스 측정 ····· 335
<그림 12-35> 차대동력시험결과보고서(전북자동차기술원) ····· 338
<그림 12-36> 자동차안전연구원 고속 주행로 ····· 339
<그림 12-37> SAE J1321의 실험 진행 순서 ····· 342
<그림 12-38> Test Preparation ····· 342
<그림 12-39> Driving Preparation ····· 343

<그림 12-40> Baseline Segment Driving ····· 344
<그림 12-41> Data Acquisition ····· 344
<그림 12-42> Fuel Efficiency Calculation ····· 345
<그림 12-43> PG실차시험결과보고서(자동차융합기술원) ····· 347
<그림 12-44> 차대동력계 관련 장비 ····· 351
<그림 12-45> 차대동력계 시험 ····· 352
<그림 12-46> 차대동력계 배기가스 배출측정시험 계략도 ····· 352
<그림 12-47> 배기가스 분석장치 ····· 353
<그림 12-48> 희석 터널 ····· 354
<그림 12-49> 온실가스 측정 ····· 354
<그림 12-50> 차대동력시험결과보고서(전북자동차기술원) ····· 357
<그림 12-51> 경제성평가의 시행절차 ····· 359
<그림 12-52> 한국형스마트웨이 프로그램 개념도 ····· 375
<그림 12-53> 본 기술개발 과제에 대한 S.W.O.T.분석 결과 ····· 376
<그림 12-54> 비즈니스모델 흐름도 ····· 377
<그림 12-55> (주)명일 Test Bed 차량 ····· 380
<그림 12-56> DHL Test Bed 차량 ····· 380
<그림 12-57> 다코넷 Test Bed 차량 ····· 381
<그림 12-58> HDL Test Bed 차량 ····· 381
<그림 12-59> LOTS Test Bed 차량 ····· 381
<그림 12-60> 서울우유 Test Bed 차량 ····· 382
<그림 12-61> 부산화물연대 Test Bed 차량 ····· 382
<그림 12-62> 엑소후레쉬 Test Bed 차량 ····· 382
<그림 12-63> 대리점 운영 계획 ····· 383
<그림 12-64> 2015 대기환경학회 정기학술대회 발표자료 ····· 384
<그림 12-65> 홍보용 리플렛(안) ····· 385
<그림 12-66> 홍보용 리플렛 ····· 385
<그림 12-67> 국토교통기술대전 홍보관 현장 사진 ····· 386
<그림 12-68> 미국과 캐나다의 공기저항저감장치 메뉴얼 ····· 387
<그림 12-69> 국내 공기저항 저감장치에 대한 매뉴얼 목차 ····· 388
<그림 12-70> 국내 공기저항 저감장치에 대한 매뉴얼 목차 ····· 389
<그림 12-71> 보트테일 소재 ····· 390
<그림 12-72> 차량 기본제원 확인(후문) ····· 390
<그림 12-73> 보트테일 재단 ····· 391

<그림 12-74> 판넬 캐리지 볼트 체결 ····· 391
<그림 12-75> 프레임, 스윙암 가스스프링 연결 ····· 392
<그림 12-76> 프레임 로드 길이 조정 ····· 392
<그림 12-77> 최종 점검 ····· 393
<그림 12-78> 갭페어링 소재 ····· 394
<그림 12-79> 차량 기본제원 확인 ····· 394
<그림 12-80> 갭페어링 판넬 재단 ····· 395
<그림 12-81> 브라켓 작업 ····· 395
<그림 12-82> 판넬 부착 ····· 396
<그림 12-83> 최종 정검 ····· 396
<그림 12-84> 공기저항저감장치를 장착한 서울우유협동조합의 14.5톤 화물차량 397
<그림 12-85> 공기저항저감장치를 장착한 (주)다코넷의 42ft 트렉터-트레일러 ··· 398
<그림 12-86> 공기저항저감장치를 장착한 (주)HDL의 48ft 트렉터-트레일러 ····· 398
<그림 12-87> 공기저항저감장치를 장착한 (주)LOTS의 48ft 트렉터-트레일러 ···· 398
<그림 12-88> 공기저항저감장치를 장착한 부산화물연대 42ft 트렉터-트레일러 ·· 399
<그림 12-89> 공기저항저감장치를 엑소후레쉬물류 42ft 트렉터-트레일러 ····· 399
<그림 12-90> 기업의 물류비 중 운송비 비중과 운송비 중 유류비 비중 ····· 401
<그림 12-91> 단계별 사업화 모형의 목표 ····· 402
<그림 12-92> 2014년 미국 신차구매자의 연비개선기술 선택비율 ····· 403
<그림 12-93> 주요 고객군 및 고객군별 필요사항 ····· 404
<그림 12-94> 전국주요 특장차 제조사 현황 ····· 404
<그림 12-95> 사업화 모형 개요도 ····· 405



제1장 연구의 개요

제1절 연구의 배경 및 필요성

제2절 연구의 내용 및 범위

제1장. 연구의 개요

제1절. 연구의 배경 및 필요성

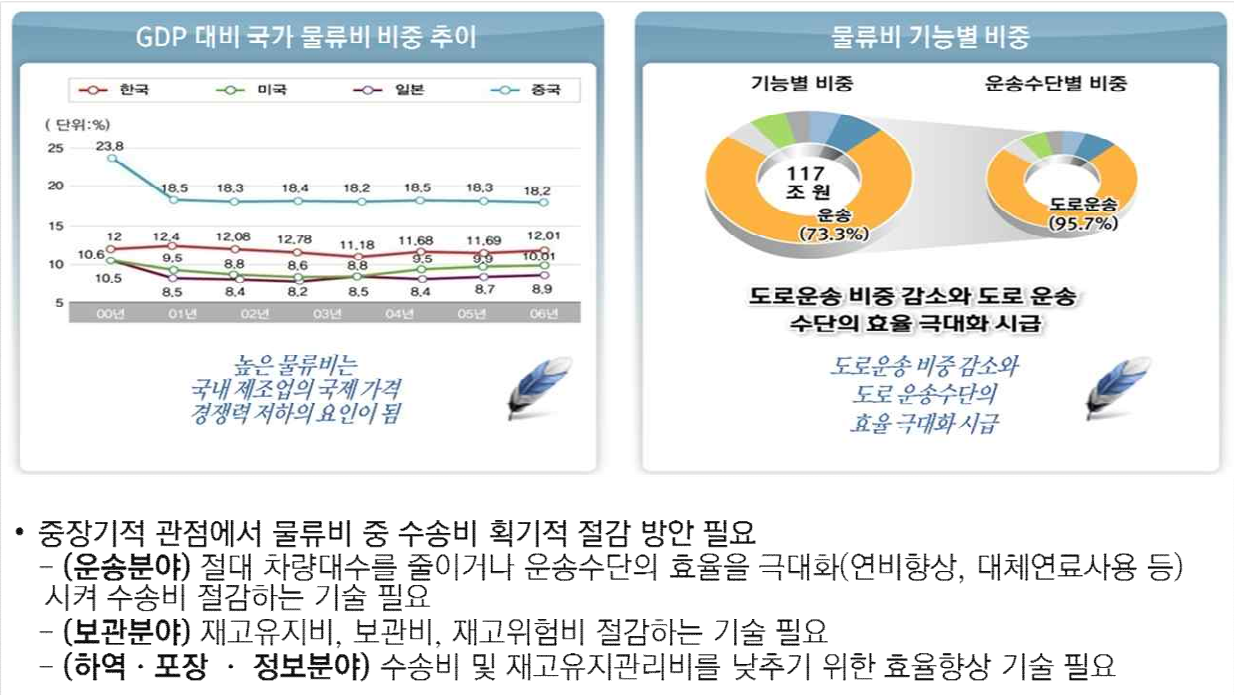
1. 연구의 배경

○ 최근 세계 각국은 운송 과정상 발생하는 물류비용 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 유류비 절감을 위한 각종 기술개발을 활발히 진행 중임

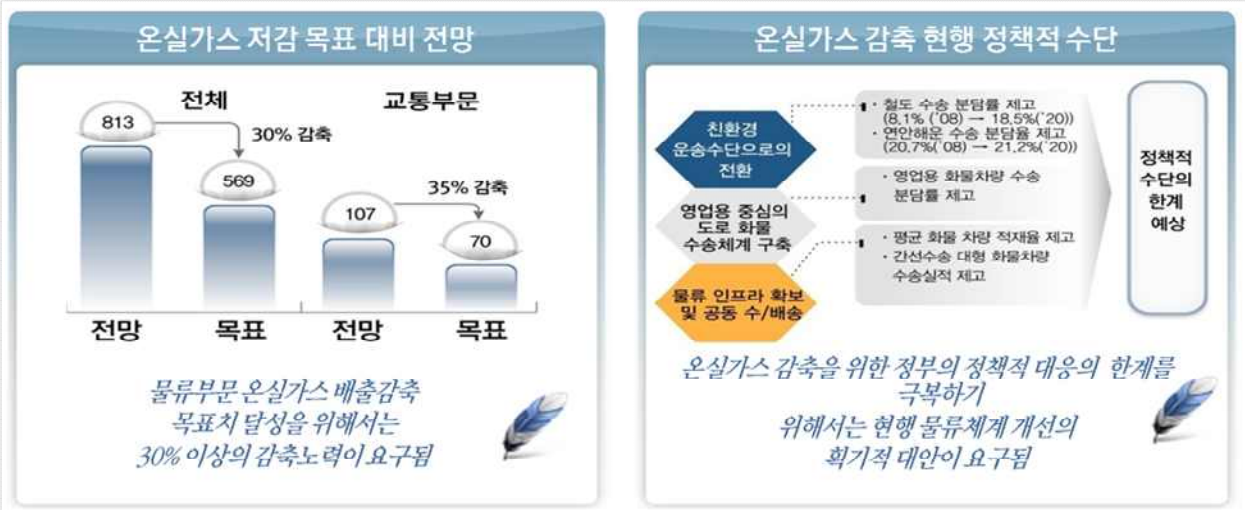
- 특히, 화물운송용 연료소비 절감을 위한 핵심 기술개발 필요성이 대두되면서 운송장비의 경량화, 연비 개선 및 운송 효율화, 공회전 방지를 위한 무동력(보조 동력) 사용 등을 통한 물류비용 절감방안에 관심이 집중되고 있음

○ 우리나라도 고유가시대에 대비하고 BAU 대비 16%로 확정된 물류부문 국가온실가스 감축목표의 달성을 위해서 국내 수송분담율의 74.1%(톤-km 기준)를 차지하고 있는 화물자동차의 운송 유류비를 감축하는 것이 가장 현실적 방안이라고 판단됨

- 중장기적으로는 신재생에너지나 수소 등 친환경에너지 사용이나 친환경 운송수단으로의 전환이 불가피할 것으로 사료되나 일시에 모든 화물자동차의 수송수단 전환이 불가능하므로 중단기적으로는 화물자동차 특성을 감안한 화물 운송 유류비를 절감하는 기술개발이 필요함



<그림 1-1> 물류비용 절감기술



• 온실가스와 에너지 절감을 동시에 고려하면서 유가상승으로 인한 기업물류비 증가에 대비한 비용 효과적 기술개발 필요
- 절대적 국내 수송분담율 74.1%의 도로운송부문의 효과적 에너지 소비량 저감기술개발 및 정책 필요

<그림 1-2> 온실가스 감축기술

□ **연구 추진 목적**

○ 도로화물 운송 시 연료사용량을 절감하기 위하여 친환경 운송장비에 대한 기술개발 타당성을 검토하고 국내 실정에 맞는 새로운 국산기술 개발과 해외 선진기술을 국산화하기 위한 기술개발을 목적으로 함

- 원가대비 높은 가격에 수입되는 도로운송 연비개선 장비 및 기술 국산화 기술을 확보하고, 5년 내 해외진출이 가능한 기술경쟁력 달성
- 화물차 운행 중 10% 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술을 통해 화물자동차의 차량운행 중 공기저항을 감소시켜 에너지소비를 감소시켜 온실가스 감축목표 달성에 기여하는 국산화 기술 확보

2. 연구의 필요성

가. 기술적인 측면

○ 국외의 경우 화물차 공기저항 감소장치에 대한 개발 및 인증, 홍보, 지원 등을 적극적으로 추진 중에 있지만 국내에서는 관련 기술에 대한 전무한 실정이며 시중에 판매되고 있는 국산 캡 루프 페어링, 사이드 스커트 등은 차량 최적화 검증 없이 모양만 흉내 낸 경우가 많아 실효성에 의문이 제기되고 있음

○ 미국 EPA는 Smartway기술 프로그램을 통해 화물차 공기저항 감소장치에 대한 실험을 통해 효과를 검증하고 해당 개발업체에 인증을 부여함으로써 제품의 개발 및 홍보, 판매에 직접적인 지원을 하고 있음[1)]

○ 현재도 화물차 운전석 상부에 공기저항을 줄이기 위해 캡 루프 페어링을 설치하거나 트레일러 옆면에 에어스포일러(사이드 스커트)를 부착한 차량을 쉽게 찾아볼 수 있으며 그 밖에도 트레일러와 트랙터 사이의 간극을 메워 공기저항을 줄여주는 갭 리듀서 기술, 트레일러 하부공간의 바퀴에 작용되는 공기저항을 줄여주는 트레일러 언더 사이드 스커트 기술, 트레일러 후면에 접이식 판을 달아 후면 공기와류를 줄여주는 트레일러 보트 테일 기술 등 화물차 운행 중 공기저항 감소를 위한 다양한 기술이 개발 중에 있음

○ 최근 미국의 캘리포니아주에서 대형화물차의 공기저항 저감장치 부착을 의무화하기 시작하는 등 세계 각국에서 대형화물차의 공기저항 저감정책이 점차 확산되는 추세이므로 개발된 기술의 단기적 시장성이 밝다고 할 수 있음

나. 경제·산업적 측면

○ 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술은 비교적 빠른 시간 안에 개발 및 국산화가 가능하며 개발 완료 후 시장적용도 곧장 가능 할 것으로 판단되고 투자대비 효과도 클 것으로 판단됨

○ 에너지 목표관리제 등 정부환경시책 추진으로 물류기업의 부담이 증가함에 따라 운송을 효율화 시키고 연비를 개선시킬 수 있는 기술이 개발 및 보급 될 경우 물류기업의 부담이 경감될 수 있을 것으로 기대됨

- 「저탄소 녹색성장 기본법」 제42조, 제43조, 제44조, 제45조, 제46조에서는 에너지 목표관리제에 대한 내용을 언급하고 있음
  · 기후변화대응 및 에너지 목표관리, 온실가스 감축 조기행동 촉진, 온실가스 배출량 및 에너지 사용량 등의 보고, 온실가스 종합정보관리 체계 구축, 총량제한 배출권 거래제 도입 등
- 국가 온실가스 배출량의 약 70%를 산업부문, 건물/교통, 폐기물 등에서 온실가스 및 에너지를 관리해야 하며, 교통부문에서는 운송업체 보유 이동 배출원(차량, 항공기, 선박 등)과 건물을 대상으로 하며, 이 중 온실가스 배출량 및 에너지 소비량이 기준 이상인 업체 또는 사업장은 관리업체로 지정되어 관리 받게 됨
  · 관리업체로 지정이 되면 감축목표 이행계획을 수립하여 관장기관(교통부문은 국토교통부)에 제출해야 하고 이행실적을 관장기관에 보고해야 함
  · 이행실적 보고 시 온실가스 및 에너지 소비량에 대한 명세서를 작성한 후 검증결과와 함께 관장기관에 제출해야하며 이는 공개를 원칙으로 함
  · 이행실적 미흡 시 개선명령을 받을 수 있으며 향후 이행계획 수립 시 반영해야 함

1) 미국 환경보호국 웹사이트, http://www.epa.gov/

다. 사회·문화적 측면

○ 화물자동차운전자의 운송거부 사태가 지속적으로 발생하고 있는 상황에서 도로화물 운송을 효율화하고 연비 향상을 목적으로 하는 본 과제의 대상기술이 성공적으로 개발되고 보급된다면 화물차주의 순수입 증대효과를 유발하여 화물차주 근로여건 개선에 도움이 될 수 있음

- 2002년 10월 '화물운송 특수고용직 노동자연대(화물연대)'가 출범한 이후 2003년 5월 총파업으로 물류대란이 발생하였고 이후 총파업, 부분파업 등의 형태로 지속적인 운송거부 사태가 발생하여 막대한 경제적, 사회적 피해가 발생하고 있음
- 2004년 화물자동차운송법 개정, 유류비 지원 등의 정책이 시행되었으나 세계적인 경기불황과 과잉공급 등의 문제로 인해 2006년, 2008년, 2009년, 2010년, 2012년, 2013년 지속적으로 운송거부사태가 발생하고 있음
  · 2009년 여수 국가 산업단지 컨테이너 화물연대의 운송거부로 광양항을 통한 중국항 수출에 차질이 발생함
  · 2010년 운송료 10% 인상, 교섭권 인정 등을 요구한 대산석유화학단지 화물연대 충남지부 서부지회의 운송거부가 30일 이상 지속되어 물류 차질이 발생함
  · 2012년 운임요금 30%인상과 산재보험 전면 적용등을 요구하며 부산항과 광양항 등에서 화물연대 조합원 1만2천여명이 운송거부함

라. 타산업 연계 및 국제협력 가능성

○ 자동차 산업(버스 제조)

- 오랜 시간 등속주행을 하는 고속버스의 경우, 그 형상이 대부분직육면체 형태로 설계되어 있음. 특히, 버스 후단부에 공기저항 감소를 위한 장치가 마련되어 있지 않아 버스 전면부와 후면부의 압력차이에 기인하여 공기저항이 크게 발생하기 때문에 본 과제에서 개발될 공기저항감소 기술을 적용하면 연료저감에 효과적일 것으로 예상됨[2)]

○ 조선 산업(선박, 잠수함)

- 작동 유체는 다르지만, 유체저항감소 기술을 개발하는 과정에서 도출된 실험 및 수치해석 결과들을 선박과 잠수함 등과 같이 해양에서 쓰이는 운송체의 항력을 감소시키는 원천적인 기술을 개발하는데 도움을 줄 수 있음

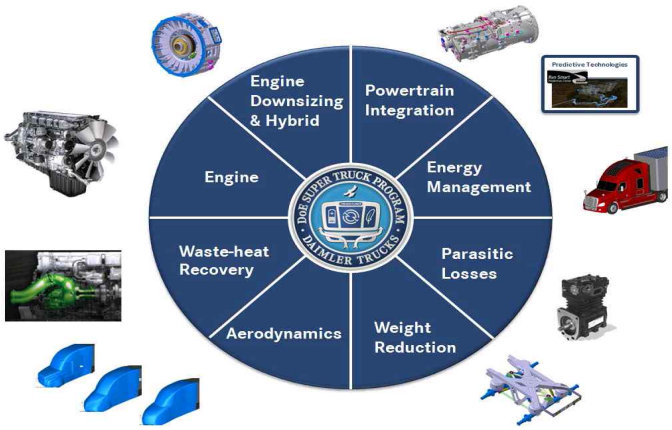
□ 국제협력 가능성

○ 해외 발전 상황에 비하여 국내의 연구개발 진행 정도가 미비하여 현재 시행중인 미국의 Smartway partnership기술 프로그램에서 제공된 화물차량 공기저항감소 장비의 국내 적용 여부에 대한 확인과 재설계를 위한 국제 협력이 필요함

○ 2020년까지 온실가스 배출을 15%감축시키기 위하여 에너지부(DOE)와 환경부(EPA)

2) 대형 상용차용 공기저항력 저감장치의 유동특성에 관한 수치 해석적 연구, 2000

에서 새로운 설계에 기반을 두어 트랙터와 트레일러를 개발하는 SuperTruck 프로젝트가 현재 진행 중이며, 국제협력을 통한 기술개발이 가능함[3)]



<그림 1-3> SuperTruck 프로젝트 개발 개요도

- 기존 대비 연료 효율 50% 향상을 목표로 하여, 새로운 엔진 설계, 차체의 경량화, 그리고 고속 주행 시 항력의 주요 원인인 형상 항력을 감소시키기 위한 공기역학적 설계 등과 같은 연구를 수행 중임
- 통합적인 접근 방법을 이용하여 각 계통별로 에너지 효율, 연료 소모 효율, 그리고 이산화탄소 배출 최소화를 위한 최적화 연구를 수행
  · 협력 가능 요소 : 새로운 소재를 이용한 차체의 경량화, 낮은 항력계수를 갖는 최적화 설계 기술 개발

○ 실차 풍동 실험은 캐나다 NRC의 대형풍동(9m×9m) 풍동에서 협력 연구가 가능함

- 선진국에서 이루어진 대부분의 기술 개발이 트랙터와 트레일러 위주로 진행되어 있어, 국내에서 많이 사용하고 있는 화물용 일반 탑차에서의 효과를 검증하고 범용적 기술을 개발 할 수 있다면 해외수출 가능성도 있을 것으로 판단됨

3) 미국 에너지성 SuperTruck 소개 자료 사이트

제2절. 연구의 내용 및 범위

1. 연구대상 및 내용

가. 기술 정의

<표 1-1> 연구개발 기술의 정의

중점분야		기술정의
Trailer side skirt (TRL 8)		트레일러의 바퀴 사이의 공간에 공기저항을 줄이는 스커트 형상의 구조물을 설치하여 차량 하부에서 발생하는 공기저항 손실을 줄이는 기술
Boat tail (TRL 8)		트레일러 후단부에 부착하는 구조물로써 유동박리(flow separation)에 기인하여 발생하는 와류와 공기저항을 감소시키는 기술
Gap fairing (TRL 8)		트렉터와 트레일러 사이의 gap을 조절함으로써 차량의 운행 안정성을 향상시키고 와류를 저감시키는 기술
Vortex generator (TRL 7)		트레일러 상부와 측면부에 와류 발생장치를 부착하여 와류 및 공력 소음을 저감하는 기술
Trailer aero. full package (TRL 8)		트레일러 전체에 side skirt, boat tail, gap fairing를 하부, 후단부, 전면부에 부착하여 공기저항 및 와류를 저감시키는 기술

나. 분야별 연구대상 및 내용범위

○ “화물차 운행 시 연료소모율 저감을 위한 공기저항 감소기술” 과제의 연구대상은 사이드 스커트, 보트 테일로 각각의 경우에 대하여 풍동실험과 수치해석을 통해 최적의 시제품을 제작하는데 그 목적이 있음

- 사이드 스커트가 화물차 트레일러의 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석하고 사이드 스커트의 형상 변화에 따른 성능 평가를 통해, 최적화된 형상을 도출 하고, 설계된 내용을 기반으로 하여 국내 화물차와 실정에 특화된 사이드 스커트를 개발 및 방법론에 대하여 규격화하고 가이드 제시 예정

- 보트 테일이 화물차 공기저항 감소에 미치는 정도를 분석하고, 보트 테일의 형상이 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석. 실험과 수치해석을 통해 최적화된 형상을 선정한 후, 화물의 상, 하역에 지장이 없도록 실용화 예정

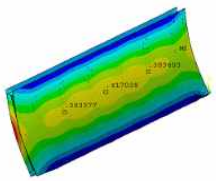
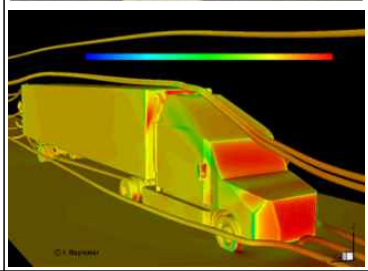
- Gap fairing이 화물차 공기저항 감소에 미치는 정도를 분석하고, Gap fairing의 형상이 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석. 실험과 수치해석을 통해 최적화된 형상을

선정. 트랙터와 트레일러 사이의 공간에 생성되는 와류를 저감시켜 연료 소모량과 에너지 소비를 저감하고 차주의 수익성을 높여 운송 효율성 및 운행 안전성 향상

- Vortex generator가 화물차 공기저항 감소에 미치는 정도를 분석하고, Vortex generator의 형상이 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석. 실험과 수치해석을 통해 최적화된 형상을 선정. 트레일러 상부와 측면부 와류와 공력 소음을 저감시켜 연료 소모량과 에너지 소비를 저감하고 운행 안전성 향상

- Trailer aero. full packag가 화물차 트레일러의 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석하고 사이드 Trailer aero. full packag의 형상 변화에 따른 성능 평가를 통해, 최적화된 형상을 도출 하고, 설계된 내용을 기반으로 하여 국내 화물차와 실정에 특화된 Trailer aero. full packag를 개발 및 방법론에 대하여 규격화하고 가이드 제시

<표 1-2> 화물차 운행 시 연료소모율 저감을 위한 공기저항감소 기술의 내용 범위

중점분야	연구범위	
	대상	내용 범위
화물차 운행시 연료소모율 저감을 위한 공기저항감소 기술	소재	 ▪ 소재 선정 및 적용 - 사이드 스커트에 적합한 소재 선정 및 적용 - 보트 테일에 적합한 소재 선정 및 적용 - 갭페어링에 적합한 소재 선정 및 적용 - Vorttex generator에 적합한 소재 선정 및 적용
	구조 설계	 ▪ 역설계를 통한 3D 모델링 ▪ 구조 설계 및 제작 - 사이드 스커트 설계 및 제작 - 보트 테일 설계 및 제작 - 갭페어링 설계 및 제작 - Vortex generator 설계 및 제작
	실험모형 검증	  ▪ 풍동실험을 통한 실험모델 검증 - 사이드 스커트 풍동실험 - 보트 테일 풍동실험 - 갭페어링 설계 및 제작 - Vortex generator 설계 및 제작 ▪ 수치해석을 통한 실험결과 검증 - 사이드 스커트 수치해석 - 보트 테일 수치해석 - 갭페어링 수치해석 - Vortex generator 수치해석 ▪ 국내 실정에 맞는 최적화 - 사이드 스커트 최적화 - 보트 테일 최적화 - 갭페어링 최적화 - Vortex generator 최적화
	시제품 제작 및 현장시험	 ▪ 맞춤형 시제품 제작 - 사이드 스커트 시제품 제작 - 보트 테일 시제품 제작 - 갭페어링 시제품 제작 - Vortex generator 시제품 제작 ▪ 설치 기술 개발 ▪ 실차 현장시험 - 적용 기업 및 대상, 규모, 일정 선정 - 테스트베드 운영 계획 수립 및 문제점 검토

2. 연구개발 단계(TRL)

가. 화물차 운행 시 연료소모율 저감을 위한 공기저항감소 기술 연구개발 단계

(1) Side skirt 기술 연구개발 단계

○ 미국의 기개발기술들은 Smartway partnership 인증[4]을 통하여 완제품의 제한된 실제현장 사용가능성 검증 완료되었으나 현재 국내 여건에 적합한 기술개발이 필요한 실정임

- 실제 상황에서의 시험평가를 SAE J 1321에 따라 완료하고, 구분별 연비개선율 기준 이상의 제품에 대하여 인증이 가능하므로 TRL 8단계까지 가능함
- 구분 항목으로는 갭 리듀서(1%), 보트 테일(1%), 사이드 스커트(4%), 트레일러 보트 테일(5%), 사이드 스커트(5%)로 구분[5]
- 트랙 또는 제한된 고속도로에서 시험하는 표준주행시험인 SAE J 1321을 통하여 모의 운용환경에서의 모든 성능 시연, 실제상황에서의 시험평가를 통한 품질검증 등 TRL 8단계의 모든 항목 평가 가능

<표 1-3> Side skirt TRL 설정

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	□	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	□	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	□	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	□	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	□	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	■	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	□	TRL 9 현장적용/사업화 단계

4) 미국 환경보호국, www.epa.gov

5) Smart way partnership 인증 :SAE J 1321

(2) Boat tail 기술 연구개발 단계

○ 풍동실험 등을 통하여 미국의 SmartWay partnership 기준을 충족하는 공기와류 저감기술을 개발하고 실제 현장에의 사용 가능성을 검증

- 운용 환경에 따른 가변적, 변칙적, 한계적 모의상황 시험평가를 SAE J 1252규격에 따라 통해 얻은 풍동 실험을 통해 구현
- 풍동시험을 통해 얻은 DATA는 수치해석 모델을 통한 성능 평가 및 공기 와류 저감장치 설계에 필요한 기초자료로 활용 가능
- 풍동시험을 통하여 개발된 기술은 시제품을 이용한 실차 시험단계로 TRL 7단계를 목표로 함
- Boat tail 등의 적용 여건과 시장성을 고려하여 성능 시연, 실제 상황에서의 시험평가를 통한 품질 검증 등 TRL 8단계 목표 달성 여부를 검증함

<표 1-4> Boat tail TRL 설정

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	□	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	□	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	□	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	□	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	□	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	■	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	□	TRL 9 현장적용/사업화 단계

(3) Gap fairing을 통한 공기저항 감소 및 주행 안정성 향상 기술

○ 본 연구는 기술적 개념정립 단계부터 (TRL 2)부터 성능 검증 및 연비저감 효과 입증(TRL 8)까지 수행하는 연구로 2차년도에 기초연구 단계를 수행함.

- 3차년도 연구 목표는 공기저항 저감장치 및 주행 안정성 효용성을 증명하는 실험적인 연구 수행(TRL 3), 풍동 실험 및 수치해석을 통한 공기저항 저감의 정량적인 결과 도출 및 비교 수행(TRL 4), Gap fairing이 공기저항 및 와류 저감에 미치는 영향을 유사 환경에서 시험(TRL 5), 풍동과 수치해석에서 유동제어 장치가 장착된 화물차 모형이 특정 속도로 주행하는 상황에 대해 기술적인 시범(TRL 6), 공기저항 저감 시작품 제작(TRL 7)실제 환경 또는 예상되는 조건 하에서의 성능을 입증하는 단계로 실차 주행을 통한 성능 검증 및 연비저감 효과 입증(TRL 8)까지로 정함

<표 1-5> Gab fairing TRL 설정

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	□	
	TRL 2	□	
실험 단계	TRL 3	□	
	TRL 4	□	
시작품 단계	TRL 5	□	
	TRL 6	□	
실용화 단계	TRL 7	□	
	TRL 8	■	
사업화 단계	TRL 9	□	

■ : 3차년도 및 최종 목표 TRL

(4) Vortex generator을 통한 주행 안정성 향상 기술

○ 본 연구는 실험적 연구(TRL 3)부터 성능 검증 및 연비저감 효과 입증(TRL 7)까지 수행하는 연구로 각 단계에 따른 연구 내용은 다음과 같음

- 공기저항 저감장치의 효용성을 증명하는 실험적 연구 수행(TRL 3)
- 풍동실험 및 수치해석을 통한 공기저항 저감에 대한 정량적인 결과 도출 및 비교 연구 수행(TRL 4)
- **Vortex generator 장치가 공기저항 및 와류 저감에 미치는 영향을 유사 환경에서 시험(TRL 5)**
- 풍동과 수치해석에서 유동제어 장치가 장착된 화물차 모형이 특정 속도로 주행하는 상황에 대해 기술적인 시범(TRL 6)
- 공기저항 저감 시작품 제작(TRL 7)

<표 1-6> Vortex generator TRL 설정

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	□	
	TRL 2	□	
실험 단계	TRL 3	□	
	TRL 4	□	
시작품 단계	TRL 5	□	
	TRL 6	□	
실용화 단계	TRL 7	■	
	TRL 8	□	
사업화 단계	TRL 9	□	

■ : 3차년도 및 최종 목표 TRL

(5) Trailer aero. full package을 통한 공기저항 감소 기술

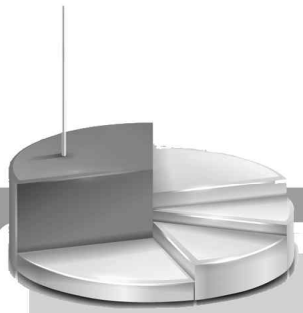
○ 본 연구는 실험적 연구(TRL 3)부터 성능 검증성능 검증 및 연비저감 효과 입증(TRL 8)까지 수행하는 연구로 각 단계에 따른 내용은 다음과 같음

- 3차년도 연구 목표는 Trailer aero. full package의 공기저항 저감 효과를 증명하는 실험적인 연구 수행(TRL 3), 풍동 실험 및 수치해석을 통한 공기저항 저감의 정량적인 결과 도출 및 비교 수행(TRL 4), Trailer aero. full package가 공기저항 저감에 미치는 영향을 유사 환경에서 시험(TRL 5), 풍동과 수치해석에서 유동제어 장치가 장착된 화물차 모형이 특정 속도로 주행하는 상황에 대해 기술적인 시범(TRL 6), 공기저항 저감 시작품 제작(TRL 7)실제 환경 또는 예상되는 조건 하에서의 성능을 입증하는 단계로 실차 주행을 통한 성능 검증 및 연비저감 효과 입증(TRL 8)까지로 정함

<표 1-7> Trailer aero. full package TRL 설정

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	□	TRL 1 이론적 연구단계 TRL 2 기술적 개념정립 단계 TRL 3 실험적 증명 단계 TRL 4 실험실 성능평가 단계 TRL 5 유사환경 시험 단계 TRL 6 유사환경 기술시범 단계 TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계 TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계 TRL 9 현장적용/사업화 단계
	TRL 2	□	
실험 단계	TRL 3	□	
	TRL 4	□	
시작품 단계	TRL 5	□	
	TRL 6	□	
실용화 단계	TRL 7	□	
	TRL 8	■	
사업화 단계	TRL 9	□	

■ : 3차년도 및 최종 목표 TRL



제2장 사이드 스커트 조사 분석 및 설계

제1절 국내외 기술현황/동향 분석

제2절 시장성조사 및 실용화 전략

제3절 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치

제4절 사이드 스커트 설계 및 제작

제2장. 사이드 스커트 조사 분석 및 설계

제1절. 국내외 기술현황/동향 분석

1. 국가 연구개발사업 동향

○ 현재, 중소기업청과 지식경제부에서 시행한 2개의 유사연구가 진행되고 있음

<표 2-1> 공기저항 저감기술 유사 연구

부처명	사업명	과제명	비 고
중소 기업청	산학연공동기술개발	최적화기법에 따른 탑차용 초저 공기저항계수를 갖는 Air Spoiler 개발	▪ 공기역학적 특성을 교려한 최적화된 air spoiler 개발 ▪ 가벼운 소재를 이용한 초경량의 air spoiler 개발
지식 경제부	그린카 등 수송시스템 산업원천 기술개발	능동형 VTMS 융합제어기술	▪ 능동형의 전방 air flap과 후류 제어 기술(synthetic jet, wake blowing) 개발 ▪ 저공력 차량용 차체 형상 설계 및 모델링 기술 개발

2. 관련 기술 현황 및 동향

가. 국내 기술 현황

○ 국내의 연구들을 종합 해 볼 때, 트럭의 공기 저항 저감을 위해 수치해석적으로 접근하고 있는 논문의 수가 매우 적고, 기 진행된 수치해석적 연구의 경우도 정량적인 결과들이 도출되어 있지만, 실제 실험결과와의 비교 분석 및 검증이 이루어지지 않은 경우가 대다수이기 때문에, 정성적인 분석 외에, 정확한 값을 도출하는데 난점이 있음

○ 임의로 선택된 형상을 통해 수치해석이 많이 진행되었지만, 해석 결과와 물리적인 접근에 의한 최적화된 형상에 대한 연구가 부족

○ 실험적 연구 관점에서 보았을 때, 국내에서는 실험적 연구가 거의 이루어지지 않았으며, 이루어진 실험 또한 유동 가시화 실험으로 정량적인 연구는 전무. 따라서 현재까지 이루어진 수치해석적 연구는 실험적으로 검증 되지 않은 연구 결과임

나. 국외 기술 현황

○ National Research Council of Canada(NRC)에서 진행한 사업으로 9m X 9m 풍동에서 실제 모델로 항력저감장치들의 효과를 실험을 통해 밝힘. 여러가지 항력저감장치들의 항력과 연간 연료소비 감소량에 대해 실제 운행을 기반으로 실험적 결과 도출

○ 국외의 트럭의 수치 해석에 관한 연구들을 종합해 보면, 거의 대부분 실험 결과가 있는 GTS, GCM 및 Ahmed body 형상을 이용하여 계산을 수행한 것을 알 수 있음

○ RANS의 여러 난류 모델을 이용해 트럭의 주위의 유동을 계산한 결과를 실험과 비교, 분석하는 경향이 있으며, 난류를 계산하는데 LES나 DES등을 도입하려는 시도가 많아지고 있는 추세임

○ 트럭에서의 공기 저항 감소 기구의 효과를 알아보기 위해 가장 구체적인 형상인 GCM을 정렬격자계로 구성하고, LES로 해석한 내용은 아직까지 없음. 이것은 그리드 작성의 난해함과 계산시간의 부담으로 인한 것으로 생각됨

○ 국외의 트럭의 실험적 연구들을 종합했을 때, NRC에서 진행한 프로그램이 가장 대표적이며, 실차 모델을 이용하여 공기저항 저감장치를 부착한 후 항력 및 연간 연료 소비 감소량에 대해 조사하여 실험적 데이터를 구축함

○ 갭 페어링, 보트 테일, 스커트, 언더바디 페어링 등 매우 다양한 항력 감소장치들의 효과를 실험적으로 확인하였으나, 차종 및 운행환경에 따른 영향을 많이 받기 때문에 이 실험결과를 그대로 고려하기엔 무리가 있음

다. 국내외 기술 동향

○ 본 주제와 관련이 있는 논문은 149개로 최종 집계됨. “Aerodynamics”로 검색된 관련 논문이 87건으로 가장 많았으며, 그 다음으로는 “Drag reduction”(52건)과 “Resistance reduction”(5건)으로 그 뒤를 잇는 추세임

○ 국내와 국외를 포함하여 공기저항 저감장치 기술 관련 연구 논문 발표가 1976년도부터 시작되어 현재까지 꾸준히 발행되어 왔고, 공기역학 관련 논문이 평균적으로 매년 30% 이상을 차지하고 있으며 항력감소 관련 논문이 그 다음으로 높은 비중을 차지하고 있음

- 국내의 경우 2000년대 이전까지 항력 감소 관련 논문이 주를 이루고 그 이후 공기저항 감소 관련 연구가 진행되어 오다가 2006년 이후 현재까지는 공기저항 저감장치 기술 관련 논문이 발행되지 않고 있음
- 국외는 국내와 다르게 현재까지 꾸준히 항력 감소 관련 논문이 발표되고 있으며, 그 다음으로 공기저항 관련 논문이 주를 이룸

○ 국내의 연구 주제로는 항력감소 기술과 공기역학 기술에 관한 논문이 가장 많으며 항력에 대한 연구는 최근 들어 주춤해지는 반면, 국외에서는 항력 감소에 관한 내용이 가장 많음. 전반적으로 화물차 공기역학 및 공기저항 저감장치 기술 개발은 국내보다 국외에서 연구가 더 활발히 진행되고 있음

○ 국내외 기간별 논문 발표는 국내의 경우 가장 최근 10년 기간인 2001년부터 2010년까지의 논문의 양이 가장 많음을 확인할 수 있으며, 국외도 2001년부터 2010년 사이의 기간에 가장 많은 연구가 이루어졌음

- 1980년대 이전부터 최근까지의 연구 동향을 보았을 때, 2000년대 이후로 공기저항 저감기술에 대한 관심이 높아지고 있음

○ 키워드별로 살펴보았을 때 항력 감소(52건)가 가장 관심이 많았던 연구 주제였고 다

음으로 공기저항(5건) 순임

- 국외와 국내의 경우에도 전체적인 논문 동향과 동일하게 연구가 진행되었으나, 국외와 국내의 논문 건수의 차이로 보아 국외 연구가 국내보다 더 활발한 것으로 파악됨

○ 2001년부터 최근까지 국외 연구가 가장 활발한 시기이나 이와 다르게 국내에서는 2000년도 이후 본 연구과 관련된 분야의 논문이 줄어들고 있는 추세임

3. 국내외 관련 기술 수준 및 특허 동향

가. 국내 기술개발 수준 분석

○ 화물차량의 공기저항 및 공기와류 저감장치의 기술은 최고수준 대비 21~40% 수준으로 분석되며, 해당기술의 최고수준은 미국이 보유

- 미국은 외부충격 및 온도변화에 강한 열가소성 합성플라스틱을 사용함

○ 국내 기술수준 및 기술 난이도를 고려할 때 이 분야 국내기술은 태동기(embryonic)로 평가되며 기술 실현은 2015년 이후에나 가능할 것으로 예측됨

<표 2-2> 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발수준

항목	기술개발수준						
국내기술수준	0%~20%	21%~40%	41%~60%	61%~80%	81%~100%		
		○					
최고기술보유국 및 최고기술수준	한국	미국	일본	영국	프랑스	독일	기타 (기입)
		○				○	
국내기술성숙도	태동(Embryonic)	성장(Pacing)	핵심(Key)	기반(Base)			
	○						
국내기술실현 예측시기	실현 예측시기 : 2015 년 이후						

나. 국외 기술개발 수준 분석

○ 세계적으로 해당 기술의 최고기술 보유국은 미국으로 파악됨

- 미국의 기술기준이 높게 나타난 것은 80년대부터 체계적인 개발과 지속적인 투자를 통해 완성도를 높이고, 고유가와 미국 정부의 온실가스 감축 의지 등과 같은 외부적인 요인으로 인하여 시장이 급속히 성장하였기 때문으로 파악됨

○ 해당 기술은 국내에서 연구된 사례가 거의 없으나, 국제적인 시류변화에 따라 조만간 핵심기술로 발전할 수 있는 장래성이 있는 것으로 판단됨

- 이 분야는 기술적 장벽이 비교적 높지 않을 것으로 판단되며, 단기적인 집중투자를 통해 핵심 기술의 개발이 가능한 분야로 판단됨

○ 해당기술은 본 연구 과제의 진행에 따라 빠르면 2015년부터 순차적으로 실현 가능할 것으로 판단됨

제2절. 시장성조사 및 실용화 전략

1. 국내외 시장 및 산업동향 조사

가. 물류기업 동향

○ 종합물류인증기업을 기준으로, 국내 물류기업의 매출액은 26조 1,066억 원('12년 결산 기준) 수준이며 34개 인증기업의 평균 매출액은 7,678억 원임

- 전년대비 매출액(원화기준)이 국내법인과 해외투자법인이 각각 11.08%, 1.87% 증가하였으며, 총 물류매출액은 전년대비 9.19% 증가하였음

<표 2-3> 종합물류인증기업의 물류사업 매출액

(단위 : 백만 원, %)

구 분	국내법인	해외투자법인[1]	합계	평균
2011년	19,005,693	4,902,614	23,908,306	703,185
2012년	21,112,335	4,994,240	26,106,575	767,840
전년대비 증가율(%)	11.08	1.87[2]	9.19	9.19

주 : 1) 해외투자법인의 물류사업 매출액은 국내 물류기업이 보유한 해외투자법인의 지분율을 곱하여 산정하였음

2) 해외투자법인 매출은 2011년 41.6억 달러에서 2012년 46.2억 달러로 11.1% 증가하였으나, 환율 하락(1180원/$ →1082원/$)에 따라 원화 기준 증가율은 1.87% 증가에 그침

자료 : 『종합물류기업 인증 동향』, 한국교통연구원, 2013.10, p.96

○ 종합물류인증기업의 총 종업원 수는 18,886명임

○ 물류매출액 규모가 1,000억 원 이상인 5개 종합물류인증기업 중 3개 기업은 총 6,754대의 차량을 활용하고 있음

- 자산대장에 등록된 차량(보유)과 위수탁/지입 차량(확보)의 비율은 각각 74%, 26%임
- 차량별로 구분했을 때, 1~3톤 미만 차량이 41.9%로 가장 많고, 12톤 이상 차량(24.7%), 트레일러 40ft(14.2%)가 그 다음으로 많음

<표 2-4> 주요기업 차량 보유 현황

(단위 : 대, %)

구분	보유	확보	합계	비율
1톤 미만	43	192	235	3.5%
1~3톤 미만	1741	1090	2,831	41.9%
3~5톤 미만	55	22	77	1.1%
5~8톤 미만	162	12	174	2.6%
8~10톤 미만	45	22	67	1.0%
10~12톤 미만	277	36	313	4.6%
12톤 이상	1318	347	1,665	24.7%
트레일러 20ft	311	4	315	4.7%
트레일러 40ft	959	0	959	14.2%
트레일러 평판	118	0	118	1.7%
합계	5,029	1,725	6,754	100%

주 : 트랙터와 트레일러의 경우 1:1로 매칭하여 12톤 이상 1대로 산정

자료 : 각 기업 내부자료 (해당기업 요청에 의해 기업명 미공개), 2013

나. 일반화물운송시장(차주) 동향

○ 다양한 형태의 화물자동차 중 본 기술 적용 대상이 되는 트레일러 차량, BCT 차량 등이 포함된 일반화물차량(5t이상 화물자동차)의 운송시장 현황을 분석함

- 분석 자료는『화물운송시장 동향(한국교통연구원 화물운송시장정보센터)』중 2013년 3/4분기 자료를 활용하였음

○ 일반화물차량의 일평균 차량운행여건을 살펴본 결과, 월평균 운행일수는 23.5일로 전년대비 0.7일 증가하였고 일평균 운행횟수는 1.6회로 전년과 동일하며 혼적운행 비율은 2.3으로 전년대비 0.1줄었음

○ 일평균 총 운행거리는 355.7km이고 적재운행 비율이 약 70%이고, 공차운행 비율은 약 30% 수준임

○ 일반화물차량은 월평균 11.4회 주유하고, 1회 주유 시 평균적으로 233ℓ를 주유하는 것으로 조사되어 전년대비 각각 0.4회, 2ℓ 줄었음

○ 일반화물차량의 평균 연비는 3.5km/ℓ이로 전년대비 0.2km/ℓ증가하였으며, 일평균 운행속도는 44.9km/h로 전년대비 1.0km/h 증가하였음

- 전반적으로 전년대비 연비가 증가한 것은 화물자동차 제조 기술의 발전과 함께 고유가 시대에 맞춰 화물자동차 차주들이 연비 절감을 위해 많은 노력을 기울이고 있는 것으로 판단됨

- 컨테이너 차량, 기타트레일러 차량의 연비가 각각 3.3km/ℓ, 3.1km/ℓ로 가장 낮은 수준임

- 운행속도는 BCT 차량(49.4km/h)과 컨테이너 차량(48.8km/h)이 가장 높은 수준임

<표 2-5> 일반화물차량의 차종별 연비 및 운행속도

(단위 : km/ℓ, km/h)

구 분	연도	컨테이너	BCT	탱크로리	카 고 형	기타트레일러	평 균
연 비	2012	3.2	3.6	2.8	3.6	2.9	3.3
	2013	3.3	3.6	3.2	3.8	3.1	3.5
일평균운행속도	2102	49.4	47.0	27.7	47.6	40.3	43.9
	2013	48.8	49.4	35.8	47.5	36.4	44.9

주 : 3/4분기 기준 수치임

자료 : 『화물운송시장 동향』, 제3호, 3/4분기, 통권 35호, 한국교통연구원 화물운송시장정보센터, 2013, p.76

○ 국내 운행 중인 트레일러는 40ft 트레일러가 90~95%를 차지하고 20ft 트레일러 비율은 5~10% 수준임

다. 주요 제조기업 동향

○ 화물운송 부문에서 발생하는 온실가스 및 에너지 소비절감이 핵심 기술개발의 성과로 제시되면서 연비 개선 및 운송 효율화를 통한 물류비용 절감에 힘쓰고 있음

○ 국내 대규모 기업 중 하나인 삼성TESCO(홈플러스)는 '06년 대비 '20년까지 이산화탄소(CO_2)발생량 50% 감축, 환경부의 중요 환경 정책에 적극적으로 동참, 그린스토어(친환경 점포) 확대, PB(자사 브랜드) 상품 '탄소성적표지' 인증 및 상품홍보와 구매 고객 인센티브 제공, '탄소성적표지'제도 등 주요 환경정책과 관련한 캠페인 진행, 환경부와 공동으로 어린이 환경운동 진행 등의 내용으로 '09년 환경부와 MOU(협약)을 체결하였음

○ 이외에 '09년 6월부터 홈플러스 실제 배송차량에도 리블릿코팅을 적용하여 운행거리, 축중량, 연료보출량, 연료단가, 공회전 시간 확인 등을 비교하여 여러 차례의 꾸준한 검증을 수행하고 있음

○ 또한 TESCO는 Eco-drive system을 도입하여 엔진제어장치(engine control unit, ECU)와 연동, 차량의 운행정보, 연료소모량정보를 통해 차량의 상태를 실시간 모니터 하고 저장된 모든 차량운행 정보를 통하여 연비/연료소모량 운전 습관 등을 비교분석함으로서 에코드라이브를 유도하고 있음

2. 연구결과의 실용화 전략

가. 현장적용 및 제품화 방안

○ 화물차량의 연비저감을 위한 공기저항저감장치와 주행안정성을 향상시키기 위한 와류저감장치의 기술적용 대상은 대형 화물운송 기업과 영세 개인 화물차주 등이며 기업과의 계약을 대형 계약을 추진하여 기업의 이윤을 향상시키고, 온실가스 저감효과를 얻을 수 있음

○ 국내물류기업들의 매출액 규모는 대표적인 기업인 대한통운이 11억 $, ㈜한진은 6억 $ 수준으로서 DPWN의 760억 $, UPS의 22조$ 수준에 비해 현격한 열세를 보임

○ 2008년 기준 중국에 진출한(주)한진 대한통운 동방 현대택배, 동부익스프레스 등 대다수 물류기업들은 한국제조업체의 중국현지물류서비스를 대행하면서 역량을 강화

○ 도로부문의 연평균 수송실적 증가량은 2001년 1,343백만 톤에서 2009년 1,498백만 톤으로 1.37%의 증가세

○ 카고형 트레일러, 트럭형 트레일러 등 약 11만7천 대로 전체 화물차 중 29.19 %가 잠재적 수요대상 차량임

○ 공기저항 저감장치 수요대상

<표 2-6> 본 과제의 수요대상 및 활용방안

수요대상	활용 방안 제시
▪ 택배업체 간선노선차량 - CJ 대한통운, DHL, 현대택배 등 ▪ 식품물류업체 간선노선차량 - 엑소후레쉬물류, 풀무원, KNL물류 등 ▪ 전자제품 및 부품운송업체 간선노선차량 - 명일, 삼성전자로지스틱스 등	

○ 영세 개인화물차주가 직접 설치하기에는 경제적 부담이 우려되므로 현재 정부차원에서 진행 중인 녹색물류전환사업의 일환으로 보조금을 수령하여 영세 개인화물차주의 유류비 지출을 감소시킬 수 있음

○ 25톤급 대형 화물차량 뿐만 아니라 5톤 이상 전화물차량 및 트레일러에 적용이 가능하므로 차종에 크게 상관없이 연비개선에 기여함

○ 화물차는 특성상 특장을 하거나 개조가 되어 제품을 통일하기에 어려움이 있으므로 현재 국외에서 수입되고 있는 제품을 국산화하고 보편화시켜서 차량별 설치의 제한요소를 극복

- 투자대비 효과가 우수한 기술부터 국산 상용차 규격과 도로여건에 맞도록 최적화를 구현하고 고가(620 만원 ~ 880 만원)의 수입장비를 60 %이상 저렴한 300만 원 수준에 보급하기 위한 기술개발

○ 수요자 중심의 R&D 연구와 사후조치를 통해 제품화 이후에도 사업을 확장 가능함

- 고속도로노선만을 주행하는 고속버스용으로 추가적인 R&D가능
- 현재 수입산 고가 소재에 대하여 추가적인 개발가능

○ 국내 실정에 맞는 최적화 설계구현과 정부차원의 표준매뉴얼 보급정책 병행이 바람직

- 미국, 영국, 캐나다 등은 국가차원에서 풍동실험 등 연비측정실험기술 (SAEJ1321) 결과를 통해 차종 및 규격별 공기저항기술 가이드라인을 제공
- 보급된 표준매뉴얼을 통하여 민간기업에는 개발단계의 수행오류를 줄여주어 개발비와 개발기간 절감

○ 배포된 표준매뉴얼을 통하여 개발되는 장비의 검인증 연구를 통하여 검증기관양성

- 국내최대 주행시험로를 갖춘 교통안전연구원과 같은 기관에서 공기저항저감장치에 대하여 검증 및 인증을 실시하도록 하고, 검증된 기술에 대하여 녹색물류전환사업 보조금 지급이 되도록 유도
- 현재 난립하는 연비개선장치들에 대하여 제도권으로 흡수하고, 검증된 기술에 대하여 대국민 홍보(홈페이지, 보도자료 등)를 통하여 실효성 있는 기술보급에 기여

나. 미래 원천기술 확보 및 신산업 창출

○ 기존의 국외 제품에만 의존하거나 인증되지 않은 모방제품을 국산화

○ 화물차량의 연비 효율을 향상시키기 위한 공기저항 저감장치 기술을 개발함으로써 기술에 대한 특허 출원 및 제품 생산으로 새로운 산업으로 발전 가능함

○ 지속적인 R&D 연구와 사후 조치를 취해 조속한 현장 적용 및 제품을 보수하여 사업을 확장 가능함

제3절. 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치

1. 개발방향 정립

○ 선진국에서 진행 중인 프로젝트와 성능 평가 방법, 그리고 국내의 도로 환경에 따라 저감 목표치를 설정

- 설정된 목표치는 미국 환경청(EPA)에서 수행중인 Smartway 파트너쉽 공기저항 저감기술 실차시험방법(SAE J 1321)을 통하여 목표치를 정량적으로 평가할 수 있음
- (미국) Smartway 프로그램과 연료 저감 비교

<표 2-7> Smartway Program과 본 과제의 연료저감 비교

장치	Smartway 프로그램	과제 목표
트레일러 사이드 스커트	7%	3%

- 국내에서 제한 속도가 90㎞/h임을 고려하여 차량의 주행 속도를 90㎞/h로 선정하였음
- 차량 속도가 빨라질수록 지수함수에 비례한 공기 저항증가로 연료 소모가 크므로, 미국에서 측정된 감소율 보다는 목표치를 낮게 설정함
- 국내 차량 하부의 구조적 문제(연료 탱크, 공기압축탱크 등)로 트레일러 사이드 스커트 설치 각도의 한계와 낮은 차량 주행 속도에 기인한 유동특성의 차이로 인해 트레일러 사이드 스커트 장치의 연료 저감 효율목표를 낮추어 설정함

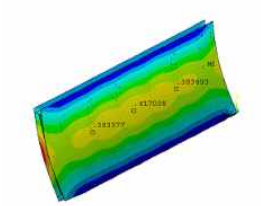
○ 개발에 필요한 관련 국내 기술과 방향성

- 국내의 장치들은, 대부분 공력에 대한 자세한 고려 없이 유선형 형상의 장치를 제작 판매하고 있음
  · 플라스틱 사출금형 기술을 이용하여 정형화된 형상 제작만 이루어질 뿐, 공기역학적 성능 테스트는 이루어지고 있지 않음
- 공력특성에 대한 고려가 미비할 경우, 설치물의 무게와 공기저항과 와류의 증가로 인한 연료 소비 증가로 이어질 수 있음. 공력 설계 디자인과 같은 핵심 기술 연구 및 개발이 요구됨
- 따라서 본 과제는 한국의 우수한 제조 산업과 공학적 설계에 기반을 둔 공기저항 및 공기와류 저감 장치의 개발과 정량적 성능 지표를 목표로 설정

○ 연구 내용범위

- 사이드 스커트가 화물차 트레일러의 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석하고 사이드 스커트의 형상 변화에 따른 성능 평가를 통해 최적화된 형상을 도출 하고, 설계된 내용을 기반으로 하여 국내 화물차와 실정에 특화된 사이드 스커트를 개발 및 방법론에 대하여 규격화하고 가이드 제시

<표 2-8> 사이드 스커트 기술개발 단계

사이드 스커트 기술 개발	
대상	**내용 범위**
소재	 ▪ 소재 선정 및 적용 – 사이드 스커트에 적합한 소재 선정 및 적용
구조 설계	 ▪ 역설계를 통한 3D 모델링 ▪ 구조 설계 및 제작 – 사이드 스커트 설계 및 제작
실험모형 검증	 ▪ 풍동실험을 통한 실험모델 검증 ▪ 수치해석을 통한 실험결과 검증 ▪ 국내 실정에 맞는 최적화
시제품 제작 및 현장시험	 ▪ 맞춤형 시제품 제작 ▪ 설치 기술 개발 ▪ 실차 현장시험 – 적용 기업 및 대상, 규모, 일정 선정 – 테스트베드 운영 계획 수립 및 문제점 검토

□ 세부기술별 핵심 요소 기술 및 성과물

<표 2-9> 세부기술별 핵심 요소 기술 및 성과물

사이드 스커트 기술 개발	
핵심 요소기술	**최종성과물**
▪ 고탄성·고강도 소재 선정 및 적용 기술 ▪ 3D 역설계 실험 모델 제작 ▪ 트레일러 사이드 스커트 최적화 설계 및 제작 기술 ▪ 수치해석용 격자 생성기술 ▪ 차량 편의부착시설 사용이 가능한 오픈형 skirt 설치 기술	▪ 기술개발 보고서 - 핵심개발 기술 개발 요구사항 문건 - 실험 및 수치해석을 이용한 유동해석 결과 문건 - 장비설계서 ▪ 최적화된 트레일러 사이드 스커트 시제품 ▪ 역설계 실험 모델 ▪ 기타 성과물 - 설치 및 유지보수 관련 매뉴얼 - 특허(공기역학, 시제품 관련) - 현황조사분석 - 시장성 분석 및 실용화 전략 보고서 - 유동가시화 영상물(수치해석 및 실험) - 외부기관 검증보고서 - 홍보물

□ 기술의 정의와 핵심 요소기술

<표 2-10> 기술의 정의와 핵심 요소기술

세부 기술정의	핵심 요소기술
트레일러 사이드 스커트를 화물자동차 트레일러의 옆면 하단에 부착함으로써 연료소모를 3% 저감할 수 있는 기술	▪ 고탄성·고강도 소재 선정 및 적용 기술 ▪ 실험모델 제작 및 공기역학적 성능 평가 실험 기술 - 역설계를 통한 3D 모델링 기술 - 실험 모델 제작 ▪ 수치해석 및 최적화 기술 - 격자생성 기술 - LES 상세유동해석 기술 ▪ 시제품 제작 및 설치기술 - 차량 편의부착시설 사용이 가능한 오픈형 skirt 설치기술

2. 성과 목표치

<표 2-11> 사이드 스커트 기술 개발의 정량적 연구목표 및 세부 연구목표

사이드 스커트 기술 개발	
정량적 연구목표	**세부 연구목표**
화물차 90㎞/h 운행시 연료 소모율 3% 이상 저감을 위한 공기저항 기술 개발 (SAE J 1321 시험 기준*)	▪ 공기저항을 감소시키고 온실가스 감축 효과를 얻기 위한 화물차량의 에너지 소비 저감 기술 개발 ▪ 트레일러의 측면, 하부, 후단 등에 부착물을 장착하거나 기존차량의 외부 장착물의 구조를 변경하여 최적의 공기저항 감소 기술 도출
시장성 분석 및 실용화 추진	▪ 시제품 제작 및 화물연료 저감 실증시험 시행 ▪ 수요기업 테스트베드 선정 및 배송에 투입 운영 ▪ 연구성과 및 기술 홍보, 기술 이전 추진

□ 화물차 운행시 연료소모율 저감을 위한 사이드 스커트 기술 개발

○ “연료소모율 저감을 위한 사이드 스커트 기술”은 화물차 90㎞/h 운행 시 연료 소모율 3% 이상 저감을 위한 기술개발을 목표로 함

- “연료소모율 저감을 위한 사이드 스커트 기술” 개발을 위하여 다음의 세부연구 목표를 설정하였음

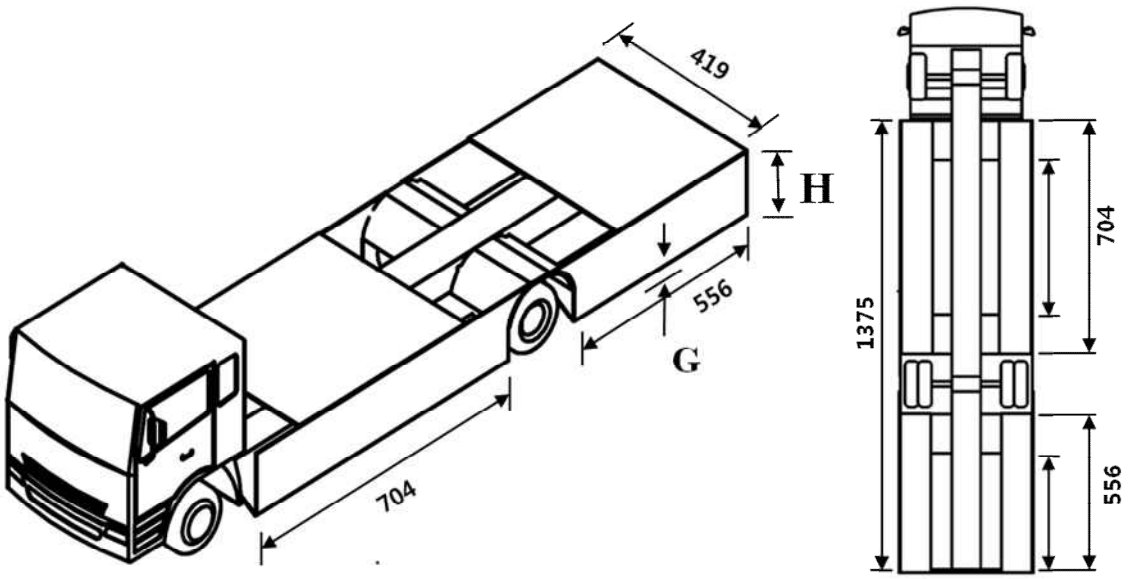
· 사이드 스커트는 미국 SAE J 1321 시험기준 3% 연료소모 저감

제4절. 축소형 사이드 스커트 설계 및 제작

1. 표준형 사이드 스커트

○ 트레일러의 바퀴 사이의 공간에 공기저항을 줄이는 스커트 형상의 구조물을 설치

- 바람에 변형 및 파손이 일어나지 않는 포맥스 재질
- 방지턱과 같은 도로 사정을 고려하여 지면과 사이드 스커트간의 거리(G)를 15cm와 20cm로 설정
- 5톤과 15톤 화물차의 플랩형 사이드 스커트는 전면부와 후면부로 구성이 되며 40ft 화물차는 한 개로 구성
- 바퀴사이의 공간을 최소화하기 위해 흙받이면과 곡선을 맞게 제작
- 기존 차량에 부착된 안전바의 경우 탈착 후 장착함
- 장착 차량에 따라 맞춤형 제작



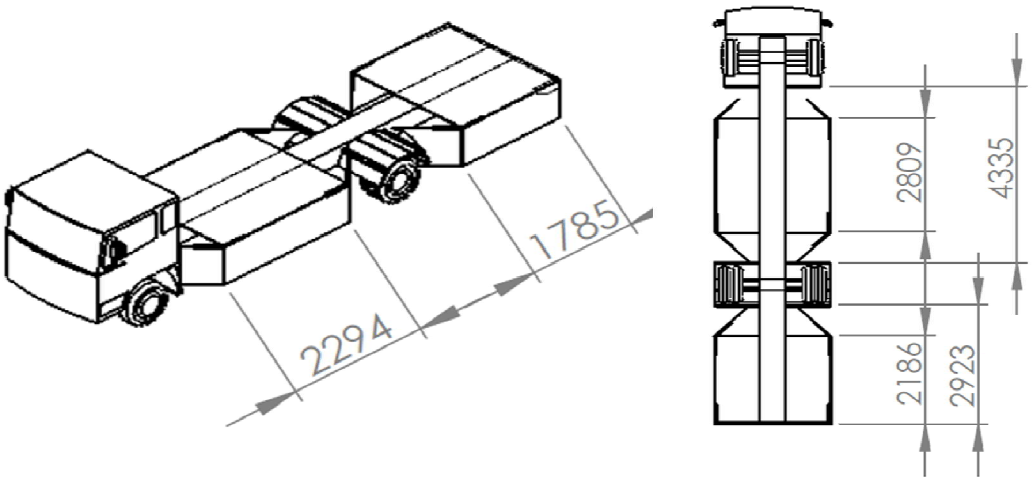
<그림 2-1> 표준형 사이드 스커트

2. 플랩형(angled flap) 사이드 스커트

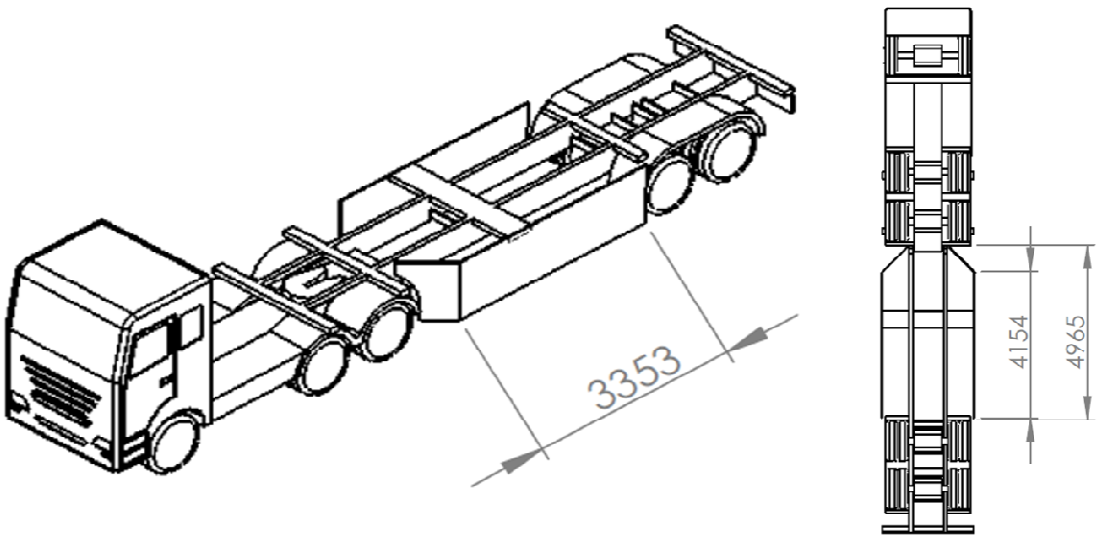
○ 바퀴 주위에서 발생하는 유동박리를 제어하기 위하여 바퀴 안쪽으로 일정한 각도의 들임각(δ) 설정

- 바람에 변형 및 파손이 일어나지 않는 포맥스 재질
- 표준형 사이드 스커트에서 바퀴 부분쪽으로 들임각을 줄 수 있도록 힌지를 이용하여 연결 후 특정 각(30°, 45°, 60°)으로 고정하여 장착
- 5톤과 15톤 화물차의 플랩형 사이드 스커트는 전면부와 후면부로 구성이 되며 40ft 화물차는 한 개로 구성

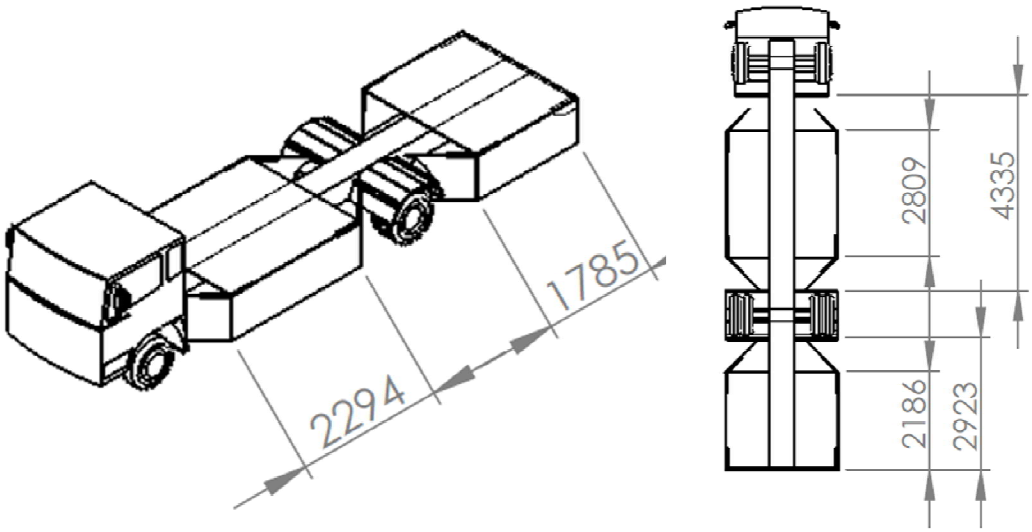
- 방지턱과 같은 도로 사정을 고려하여 지면과 사이드 스커트간의 거리(G)를 15cm와 20cm로 설정
- 기존 차량에 부착된 안전바의 경우 탈착 후 장착함
- 장착 차량에 따라 맞춤형 제작



<그림 2-2> 15톤 화물차의 플랩형 사이드 스커트



<그림 2-3> 40ft 화물차의 플랩형 사이드 스커트

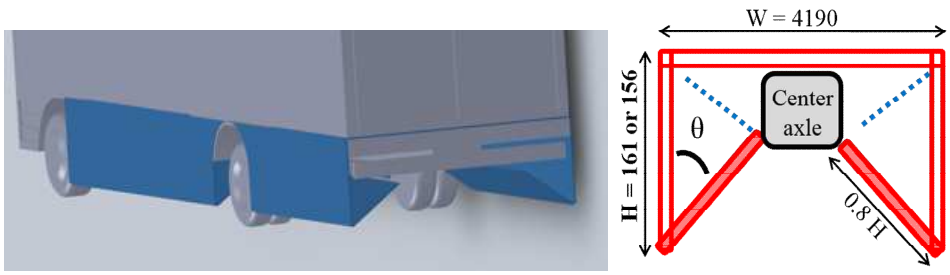


<그림 2-4> 5톤 화물차의 플랩형 사이드 스커트

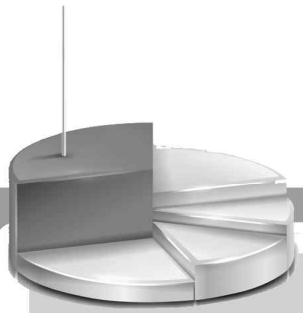
3. 접이식(folding) 사이드 스커트

○ 차량 하부 구조물들과 충돌하여 지나가는 공기흐름을 억제하기 위하여 사이드 스커트 안쪽으로 각도(Θ) 이루도록 빗면에 설치한 하부 플랩 구조물

- 바람에 변형 및 파손이 일어나지 않는 포맥스 재질
- 표준형 사이드 스커트에 추가적인 빗면 사이드 스커트를 힌지를 이용하여 연결 후 특정 각(30°, 45°, 60°, 62.5°)으로 고정하여 장착
- 방지턱과 같은 도로 사정을 고려하여 지면과 사이드 스커트간의 거리(G)를 15cm와 20cm로 설정
- 기존 차량에 부착된 안전바의 경우 탈착 후 장착함
- 장착 차량에 따라 맞춤형 제작



<그림 2-5> 접이식 사이드 스커트의 각도에 대한 정의



제3장 사이드 스커트 공기역학적 성능평가

제1절 풍동실험을 이용한 공기역학적 성능평가

제2절 수치해석을 통한 공기역학적 성능평가

제3절 최적화 설계

제3장. 사이드 스커트 공기역학적 성능평가

제1절. 풍동실험을 이용한 공기역학적 성능평가

1. 풍동실험 배경 및 필요성

가. 풍동실험의 배경

○ 풍동은 원형(proto-type)을 일정비율로 축소시킨 모형(model)을 적당한 유속으로 조절된 공기 흐름 속에 두어 실제 상황과 유사한 유동 조건을 인위적으로 만들어줌으로써 모형에서 얻어진 결과로 실제 현상을 예측하는 유체역학의 주요 연구수단

○ 난류유동 및 경계층 유동과 같은 유체역학의 기초 연구와 항공기, 자동차와 같은 운송체 주위의 유동해석 및 건축구조물에 미치는 공력해석, 오염물질의 대기 확산현상과 같은 환경공학 분야, 수력학 및 선박 그리고 해양구조물의 연구 등과 같은 많은 응용분야에 사용됨

○ 유체역학 연구자들은 19세기부터 풍동을 제작하여 사용하고 있으며, 현재는 군사용, 연구용, 산업용 등으로 그 용도에 따라 다양하게 풍동을 개발, 이용하고 있음

○ 일반적으로 소형풍동은 유동가시화 및 유동의 개략적인 특성파악에는 사용가능하나, 공력설계를 위한 세부실험을 수행하거나, 유동의 근본적 원리를 규명하는 연구에는 부적합

○ 보다 정확한 결과를 얻기 위해서 시험부의 크기가 큰 대형풍동이 필요

나. 풍동실험의 필요성

○ 풍동실험은 자동차의 공기역학적 설계 시 필요한 다양한 공력(aerodynamic force) 정보를 제공

○ 실차(full-scale vehicle)크기의 풍동을 사용하는 것이 이상적이나 이는 무척 많은 비용과 실험준비의 난이도 때문에 초기개발 단계에서는 축소모형을 이용하여 풍동실험을 하는 것이 일반적

○ 축소모델 풍동실험은 저저항 운송체 개발에 소요되는 비용을 크게 절감할 수 있고, 실차 실험에 비해 운용이 손쉬운 편이기 때문에 새로운 운송체 개발에 있어서 필수적

○ 축소모형 풍동실험에 있어서 기하학적 상사성과 동적 상사성(dynamic similarity)을 만족시켜야 함

○ 축소모델을 이용한 풍동실험을 통해 공력측정 및 유동장 분석이 가능

○ 수치해석방법과는 차별화된 실제와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있음

2. 실험장치 및 방법

가. POSTECH 아음속 풍동

○ 1995년 준공된 포스텍 아음속 풍동은 유체역학적 기본 현상에서 실생활에 일어나는 제반 유체역학 관련 현상을 연구할 수 있도록 설계된 풍동 <그림 3-1>

○ 자동차와 기차와 같은 운송체의 공력 실험에 적합

○ 폐쇄형(closed circuit)으로 전체크기 높이 6m, 폭 14m, 길이 37m를 가짐 <그림 3-2>

○ 시험부(test section)의 높이 1.5m, 폭 1.8m, 길이 4.3m

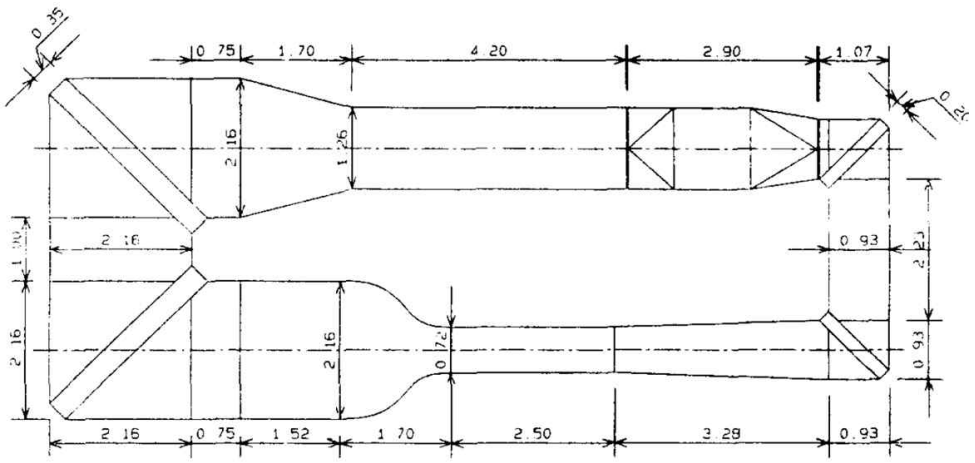
○ 최저풍속: 5m/s, 최대풍속: 75 m/s

○ 수축비: 9:1

○ 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%, 균일도 (flow uniformity)는 0.25%로 운송체 공력 실험에 적합한 풍동



<그림 3-1> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관



<그림 3-2> POSTECH 아음속 풍동도면

나. 공력 측정용 external balance

○ 자동차 차체에 걸리는 힘과 모멘트와 같은 공력을 측정하기 위해서는 차체에 작용하는 풍하중을 정밀하게 측정하여야 함

○ 포스텍 아음속풍동에 설치된 external balance는 독일항공우주연구청(DLR) Braunschweig 분소에서 자동차 공력측정용으로 제작한 7-component balance

○ 측정범위 및 분해능

- 측정범위: X=±500N, Mx=±500Nm, Y=±1000N, My=±600Nm, Z=±4000N Mz=±200Nm
- 정확도: 0.2% of full scale dX=1N, dY=2N, dZ=8N
- 분해능: 0.01N 이하

3. 실험 대상 및 모형

○ 국내에서 가장 많이 사용하는 화물자동차인 5톤, 15톤, 40ft 트럭을 대상으로, 차체에 사이드 스커트와 같은 유동제어용 부가장치를 차체에 설치

○ 화물차의 상부에 걸리는 형상저항(pressure form drag), 차체 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후미부에서 발생하는 유동박리에 기인한 공기저항을 제어함으로써 화물차의 공기저항 저감을 연구

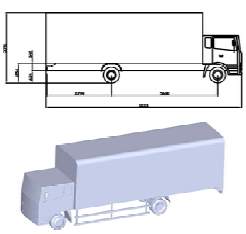
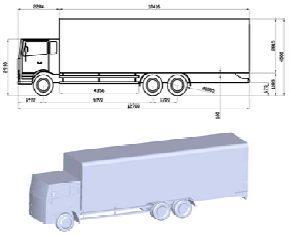
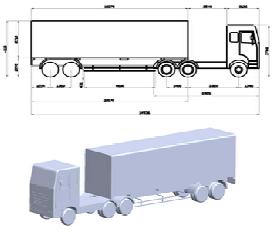
○ 공기역학적인 해석을 통해 화물차의 항력감소 메커니즘을 밝히고 저저항 운송체의 공력 설계기술을 개발

○ 본 연구에서는 사이드 스커트의 형상 및 각도등 다양한 실험변수를 변화시키면서 화물차에 걸리는 항력계수 (C_D)값을 측정

- 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 H사의 5톤, 15톤 트럭 및 S사의 40ft 트레일러 차량의 외형을 실제로 측정하여 다시 역설계하는 방식으로 3차원(3D) 모델을 얻은 후, 이를 바탕으로 풍동 시험부의 폐색율(blockage ratio, 풍동의 단면적에 대해 모

형의 단면적이 차지하는 비율)이 기준 이하가 되는 크기의 축소 모형을 제작

- 각각의 구체적인 형태 및 축소 비율, 폐색율은 <그림 3-3>에 나타냄

실험 대상 모형			
실험 대상	5ton :현대 Mega Truck	15ton : 현대 Trago Xcient	40ft : SCANIA G440
실제 크기(m)	10(L) X 2.5 (B) X 3.1(H)	12(L) X 2.5 (B) X 3.3(H)	18(L) X 2.5 (B) X 4(H)
실험 모형			
실험 모형 Scale	1/6	1/8	1/8
폐색율	7.9 %	4.7 %	5.7 %

<그림 3-3> 실험 대상 화물차 모델 및 사양

4. 15톤 화물차량 모델에 대한 실험 결과

가. 공력특성

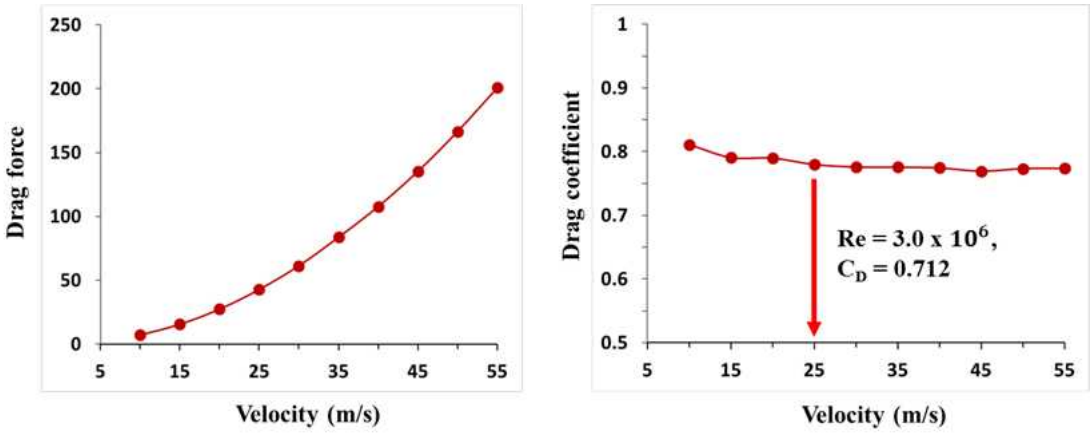
○ 공기 저항을 줄이기 위한 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 55m/s 영역에서 변화시켜 가면서 차체에 가해지는 공기저항력(Drag force)의 크기를 측정하고, 항력계수(C_D, 풍속에 따라 증가하는 공기저항력의 크기를 나타내는 지표)를 도출 <그림 3-4>

○ 측정 결과, 15톤 트럭에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함을 확인. 항력계수(C_D)는 0.712로 트럭형 차체 혹은 유사한 도형에 대해 기존에 연구된 결과들과 잘 일치함. 여기서 항력계수(C_D)는 다음과 같이 정의됨

$$C_D = \frac{Drag\,force}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

○ 25m/s (=90km/h) 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 이는 본 실험에서 측정된 풍속 영역의 레이놀즈수(Reynolds number)값이 1.1~6.3 X 10^6인데, 그 이상부터는 큰 변화가 나타나지 않는 임계 레이놀즈수 영역 (~10^5) 위에 있으므로 측정하는 풍속이 변하더라도 항력계수는 영향을 받지 않음을 알 수 있음

○ 이후 다른 실험변수들에 대한 실험에서는 풍속을 25m/s로 고정하고, 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용



<그림 3-4> 풍속에 따른 15톤 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右)의 변화

나. 표준형 및 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 효과

○ 기본 15톤 트럭 모델에서 안전바 (safety bar)를 제거한 후, 사이드 스커트를 장착한 경우에 대한 항력계수 변화를 <그림 3-5>에 나타냄

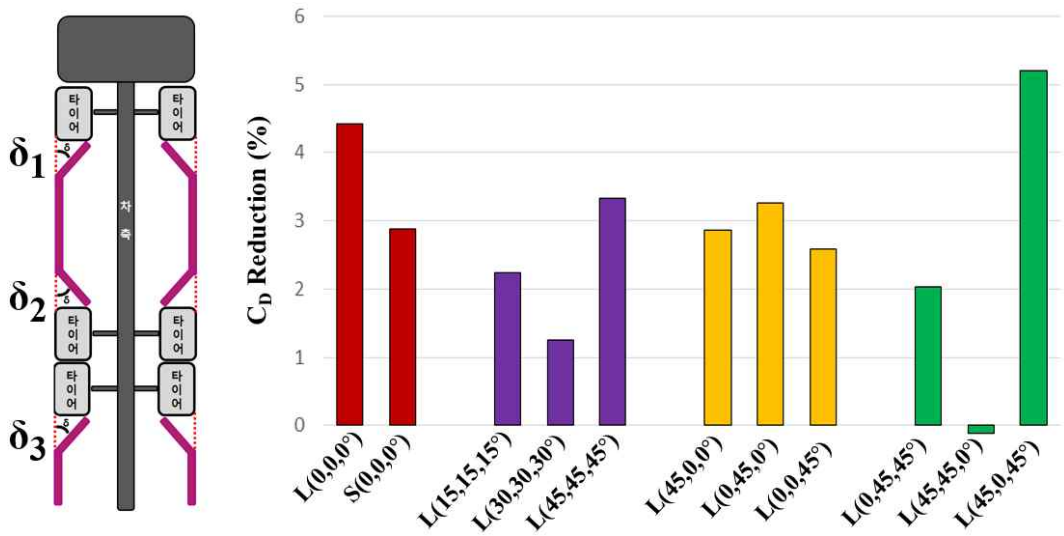
○ 표준형 사이드 스커트(지상고 20cm, 이하 S형으로 표기)의 경우, 현재 일반적으로 운행되는 것과 같이 안전바가 달린 기본 모델에 비해 항력계수가 2.88% 줄어듦. 스커트의 폭을 지상고 15cm까지 넓힌 경우(이하 L형으로 표기), 항력계수의 감소는 4.42%로 S형에 비해 공기저항이 크게 줄어듦

○ 사이드 스커트를 장착하게 되면 차량 하부에서 발생하는 와류(주된 흐름과 반대 방향으로 소용돌이치는 흐름)의 생성을 억제함. 특히 타이어와 스커트 사이의 유동을 막아 공기저항력이 줄어드는 것으로 보임

○ 타이어와 차체 안쪽으로 일정한 각도(δ)로 꺾여 들어온 플랩을 부착한 사이드 스커트의 경우, 들임각($\delta_1,\delta_2,\delta_3$)들의 조합에 따라 공기저항력이 줄어드는 효과가 다르게 관찰됨

- 실험 결과, 지상고 15cm에서 들임각 $\delta_1=45°,\delta_2=0°,\delta_3=45°$으로 조합한 경우 <그림 3-5>에서 L(45°,0°,45°)로 표기), 항력계수(C_D)값이 0.674로, 안전바가 장착된 기본 모델에 비해 5.2% 줄어듦

- 이러한 결과는 들임각이 없는 표준형 사이드 스커트 (S(0°,0°,0°))와 비교하여 항력계수가 줄어든 정도가 약 80.5% 향상되었음을 나타냄. 이것은 사이드 스커트의 꺾인 플랩이 타이어 후방에서 생성되는 와류를 억제하고, 사이드 스커트와 플랩 안쪽에서 생성되는 압력 차이에 기인하여 차량을 주행 방향으로 밀어주는 힘을 받기 때문으로 보임



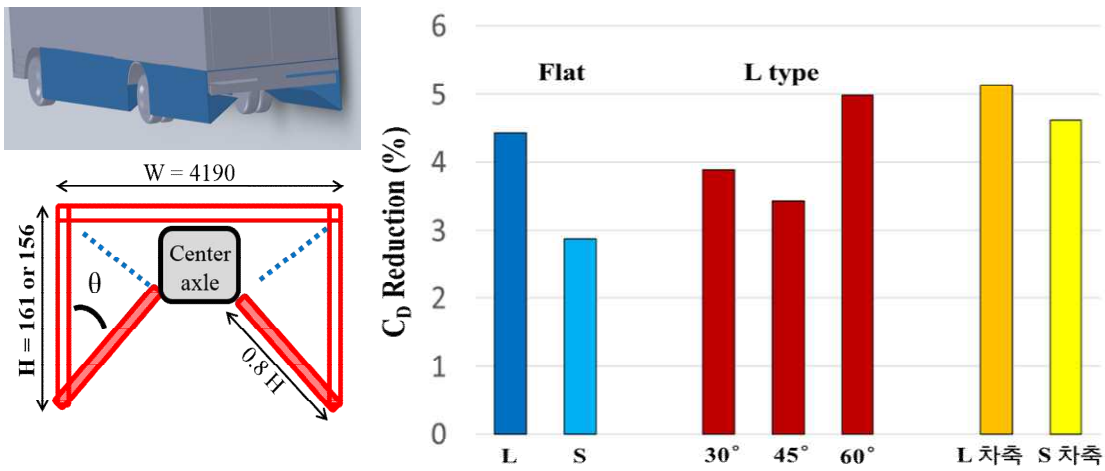
<그림 3-5> 표준형 및 플랩 사이드 스커트의 항력 감소 효과

다. 접이식(folding) 사이드 스커트 효과

○ 접이식(folding) 사이드 스커트의 경우, <그림 3-6>에 나타낸 바와 같이 접힌 각도(30°, 45°, 60°)에 따라 공기저항력이 줄어드는 효과가 다르게 나타남

○ 사이드 스커트의 폭이 상대적으로 넓은 L형(지상고 15cm)의 경우 현재 시판되고 있는 S형(지상고 20cm)에 비해 항력계수를 줄이는 효과가 크게 나타났으며, 접힌 각도(30°, 45°, 60°)를 변화시켜본 결과 60°에서 항력계수가 가장 낮았음

- 스커트를 중앙에 위치한 차축까지 연결한 경우(이때 각도는 62.5°)의 항력계수 0.674로 기본 모델 대비 항력계수가 5.14%까지 줄어듦
- 차축까지 연결한 스커트의 경우, 차체 하부에 위치한 복잡한 구조물들에 공기 흐름이 부딪히며 소용돌이치는 와류를 덜 발생시켜 차체 하부의 공기흐름을 원활해지기 때문으로 보이며, 시판 사이드 스커트 제품(S, Flat)에 의한 공기저항 저감 효과에 비해 약 78.5% 개선된 효과가 나타남



<그림 3-6> 접이식 사이드 스커트의 항력저감 효과 비교

5. 40ft 화물차량 모델에 대한 실험 결과

가. 공력특성

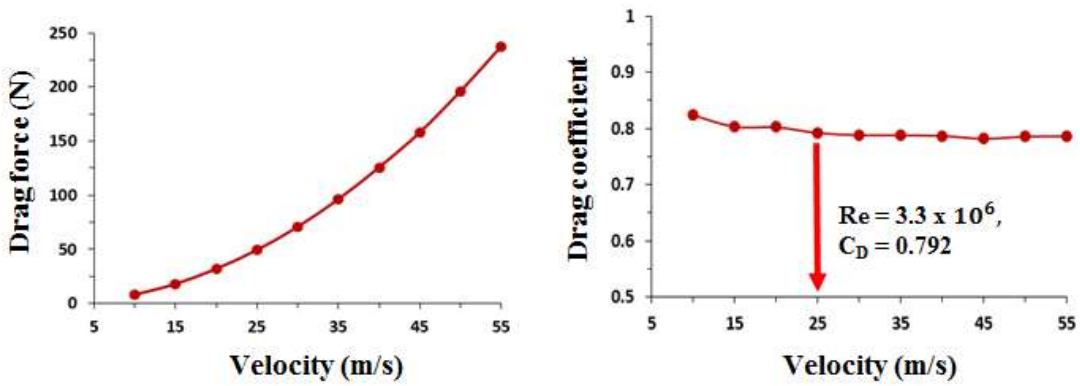
○ 공기 저항을 줄이기 위한 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 55m/s 영역에서 변화시켜 가면서 차체에 걸리는 항력(F_x)을 측정하고, 항력계수를 도출 <그림 3-7>

○ 측정 결과, 40ft 트레일러에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함을 확인. 항력계수(C_D)는 0.78로 트럭형 차체 혹은 유사한 형태에 대한 기존 연구결과와 잘 일치함. 여기서 항력계수(C_D)는 다음과 같이 정의됨

$$C_D = \frac{Drag\,force}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

○ 5m/s (=90km/h) 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 이는 본 실험에서 측정된 풍속 영역의 레이놀즈수(Reynolds number)값이 1.1~6.3 X 10^6인데, 그 이상부터는 큰 변화가 나타나지 않는 임계 레이놀즈수 영역 (~10^5) 위에 있으므로 측정하는 풍속이 변하더라도 항력계수는 영향을 받지 않음을 알 수 있음

○ 이후 다른 실험변수들에 대한 실험에서는 풍속을 25m/s로 고정하고, 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용



<그림 3-7> 풍속에 따른 40ft 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右) 변화

나. 표준형 및 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 효과

○ 기본 40ft 트레일러 모델에서 안전바 (safety bar)를 제거하고 사이드 스커트를 장착한 경우에 대한 항력계수 변화를 <그림 3-8>에 나타냄

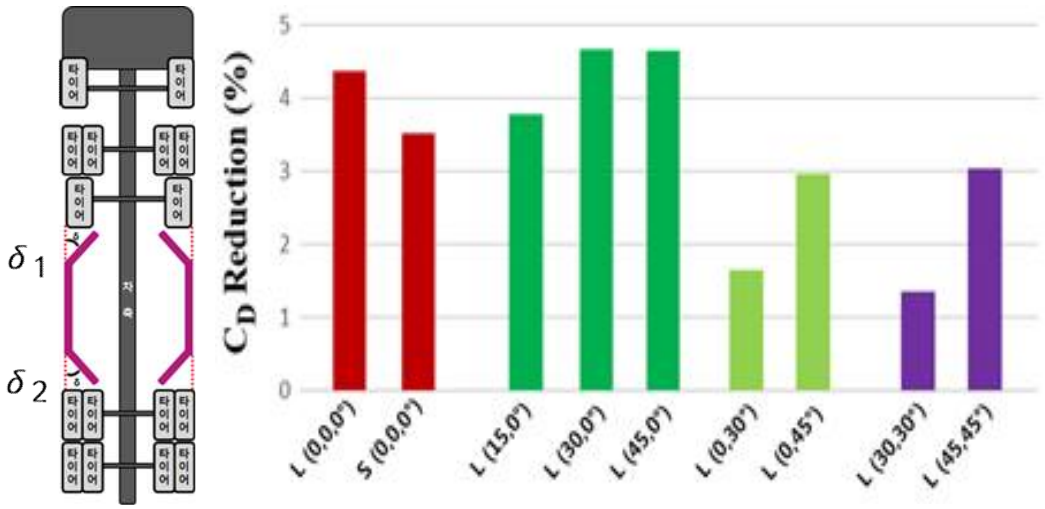
○ 표준형 사이드 스커트(지상고 20cm, 이하 S형으로 표기)의 경우, 현재 일반적으로 운행되는 것과 같이 안전바가 달린 기본 모델에 비해 항력계수가 3.51% 저감됨. 스커트의 폭을 지상고 15cm까지 넓힌 경우 (이하 L형으로 표기), 항력계수의 감소는 4.36%로 S형에 비해 공기저항 저감 효과가 크게 나타남

○ 사이드 스커트를 장착하게 되면 차량 하부에서 발생하는 와류(주된 흐름과 반대 방향으로 소용돌이치는 흐름)의 생성을 억제함. 특히 타이어와 스커트 사이의 유동을 막아 공기저항력이 줄어드는 것으로 보임

○ 타이어와 차체 안쪽으로 일정한 각도(δ)로 꺾여 들어온 플랩을 부착한 사이드 스커트의 경우, 들임각(δ_1,δ_2)들의 조합에 따라 공기저항력이 줄어드는 효과가 다르게 관찰됨

- 실험 결과, 상고 15cm에서 들임각 δ_1=45°, δ_2=0° 조합의 경우<그림 3-9>에서 L(45°,0°)로 표기), 항력계수(C_D)값이 0.743으로, 안전바가 장착된 기본 모델에 비해 4.65% 줄어듦

- 이러한 결과는 들임각이 없는 표준형 사이드 스커트 (S(0°,0°,0°))와 비교하여 항력계수가 줄어든 정도가 약 32.9% 향상되었음을 나타냄. 이것은 사이드 스커트의 꺾인 플랩이 타이어 후방에서 생성되는 와류를 억제하고, 사이드 스커트와 플랩 안쪽에서 생성되는 압력 차이에 기인하여 차량을 주행 방향으로 밀어주는 힘을 받기 때문으로 보임



<그림 3-8> 표준형 및 플랩 사이드 스커트의 항력 감소 효과

다. 접이식 (folding) 사이드 스커트 효과

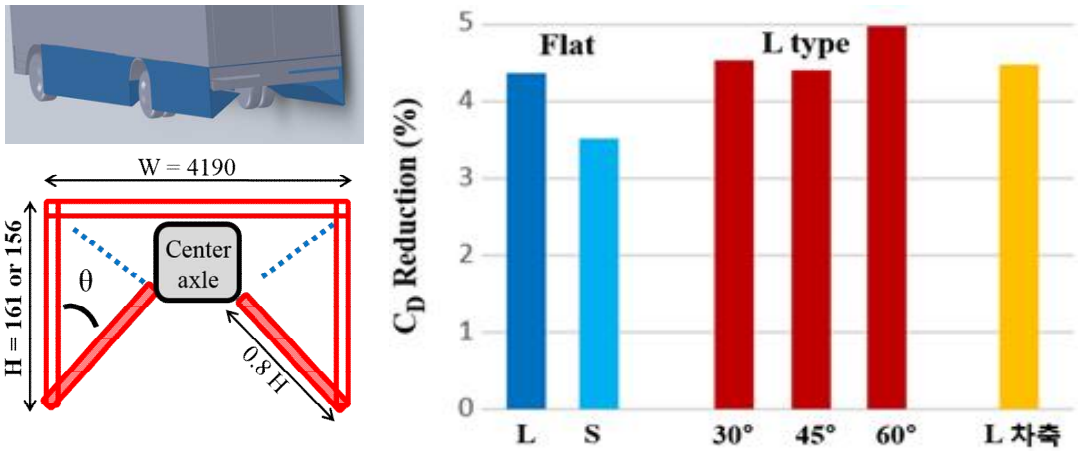
○ 접이식 사이드 스커트의 경우, 그림 9에 나타낸 바와 같이 접힌 각도(30°, 45°, 60°,62.5°)에 따라 공기저항력이 줄어드는 효과가 다르게 나타남

○ 사이드 스커트의 폭이 상대적으로 넓은 L형(지상고 15cm)의 경우 현재 시판되고 있는 S형(지상고 20cm)에 비해 항력계수를 줄이는 효과가 크게 나타났으며, 접힌 각도(Θ=30°,45°,60°,62.5°)를 변화시켜본 결과 60°에서 항력계수가 가장 낮았음

- 접힌 각도 Θ=60°로 설치한 경우, 항력계수는 0.741로 기본 모델 대비 항력계수가 4.98% 감소

- 접힌 각도 Θ=60°로 설치한 경우, 차체 하부에 위치한 복잡한 구조물들에 공기 흐름이 부딪히며 소용돌이치는 와류를 덜 발생시켜 차체 하부의 공기흐름을 원활해지기

때문으로 보이며, 시판 사이드 스커트 제품(S, Flat)이 공기저항력을 줄여주는 정도에 비해 약 41.8% 개선된 효과를 보임



<그림 3-9> 접이식 사이드 스커트의 항력 감소 효과

6. 5톤 화물차량 모델에 대한 실험 결과

가. 공력특성

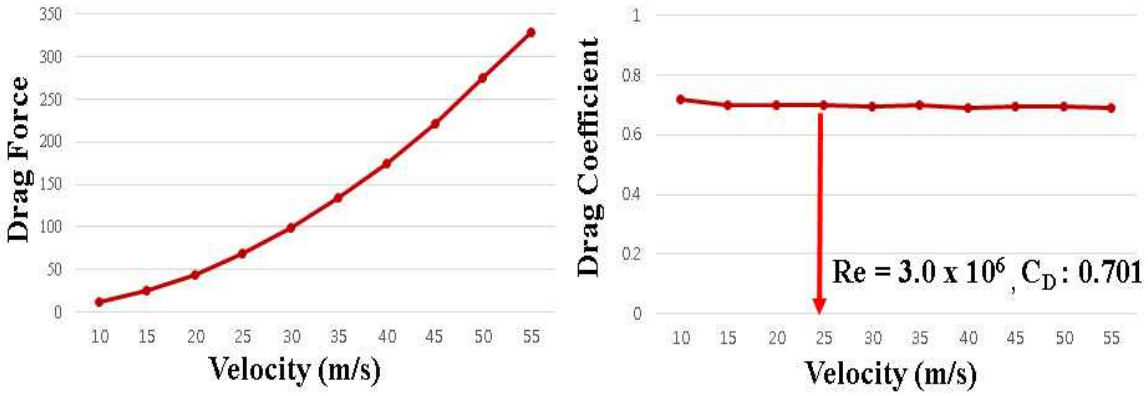
○ 공기 저항을 줄이기 위한 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 55m/s 영역에서 변화시켜 가면서 차체에 가해지는 공기저항력(Drag force)의 크기를 측정하고, 항력계수를 도출 <그림 3-10>

○ 측정 결과, 5톤 트럭에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함을 확인. 항력계수(C_D)는 0.701로 트럭형 차체 혹은 유사한 형태에 대해 기존에 연구된 결과들과 잘 일치함. 여기서 항력계수(C_D)는 다음과 같이 정의됨

$$C_D = \frac{Drag\,force}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

○ 25m/s (=90km/h) 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 이는 본 실험에서 측정된 풍속 영역의 레이놀즈수(Reynolds number)값이 1.1~6.3 X 10^6인데, 그 이상부터는 큰 변화가 나타나지 않는 임계 레이놀즈수 영역 (~10^5) 위에 있으므로 측정하는 풍속이 변하더라도 항력계수는 영향을 받지 않음을 알 수 있음

○ 이후 다른 실험변수들에 대한 실험에서는 풍속을 25m/s로 고정하고 3회 반복 측정한 데이터를 통계처리하여 평균값을 사용



<그림 3-10> 풍속에 따른 5ton 모델에서의 항력 및 항력계수 변화

나. 표준형 및 플랩 사이드 (angled flap) 스커트 효과

○ 기본 5톤 트럭 모델에서 안전바(safety bar)를 제거하고 사이드 스커트를 장착한 경우에 대한 항력계수 변화를 <그림 3-11>에 나타냄

○ 표준형 사이드 스커트(지상고 20cm, 이하 S형으로 표기)의 경우, 현재 일반적으로 운행되는 것과 같이 안전바가 달린 기본 모델에 비해 항력계수가 4.94% 저감됨. 스커트의 폭을 지상고 15cm까지 넓힌 경우(이하 L형으로 표기), 항력계수의 감소는 5.27%로 S형에 비해 공기저항이 크게 줄어듦

○ 사이드 스커트를 장착하게 되면 차량 하부에서 발생하는 와류(주된 흐름과 반대 방향으로 소용돌이치는 흐름)의 생성을 억제함. 특히 타이어와 스커트 사이의 유동을 막아 공기저항력이 줄어드는 것으로 보임

○ 타이어와 차체 안쪽으로 일정한 각도(δ)로 꺾여 들어온 플랩을 부착한 사이드 스커트의 경우, 들임각($\delta_1,\delta_2,\delta_3$)들의 조합에 따라 공기저항력이 줄어드는 효과가 다르게 관찰됨

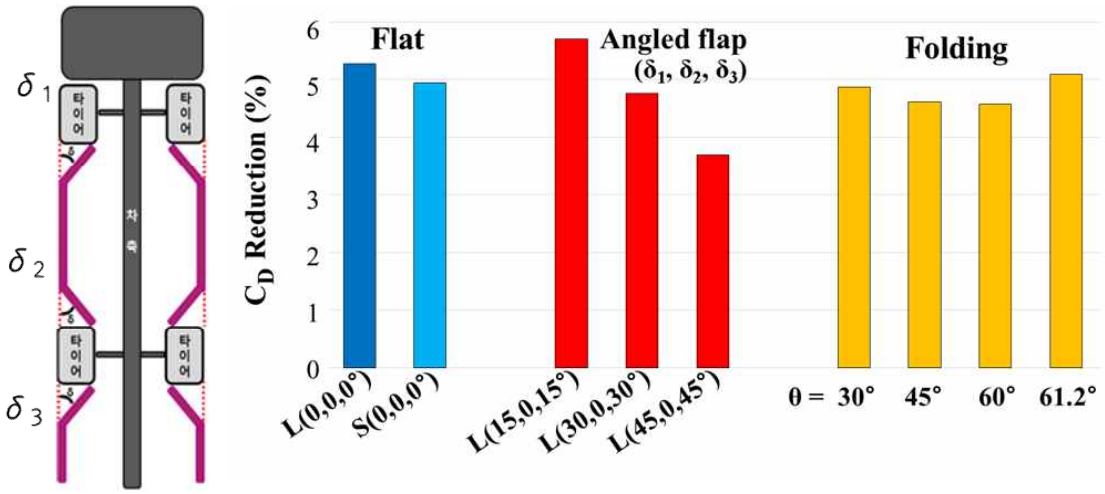
- 실험 결과, 지상고 15cm에서 들임각 δ_1=15°,δ_2=0°,δ_3=15°으로 조합한 경우 <그림 3-11>에서 L(45°,0°,45°)로 표기), 항력계수(C_D)값이 0.662로, 안전바가 장착된 기본 모델에 비해 5.7% 줄어듦
- 이러한 결과는 들임각이 없는 표준형 사이드 스커트 (S(0°,0°,0°))와 비교하여 항력계수가 줄어든 정도가 약 15.5% 향상되었음을 나타냄. 이것은 사이드 스커트의 꺾인 플랩이 타이어 후방에서 생성되는 와류를 억제하고, 사이드 스커트와 플랩 안쪽에서 생성되는 압력 차이에 기인하여 차량을 주행 방향으로 밀어주는 힘을 받기 때문으로 보임

다. 접이식 (folding) 사이드 스커트 효과

○ 접이식(folding) 사이드 스커트의 경우, 그림 17에 나타낸 바와 같이 접힌 각도(Θ =30°,45°,60°,61.2°)에 따라 공기저항력이 줄어드는 효과가 다르게 나타남

○ 사이드 스커트의 폭이 상대적으로 넓은 L형(지상고 15cm)의 경우 현재 시판되고 있는 S형(지상고 20cm)에 비해 항력계수를 줄이는 효과가 크게 나타났으며, 접힌 각도(30°, 45°, 60°,61.2°)를 변화시켜본 결과 차축부위까지 연결한 경우(Θ=61.2°)에서 항력계수가 가장 낮았음

- 스커트를 중앙에 위치한 차축부위까지 연결한 경우(Θ=61.2°)의 항력계수는 0.667로 기본 모델 대비 항력계수가 5.09%까지 줄어듦
- 차축까지 연결한 스커트의 경우, 차체 하부에 위치한 복잡한 구조물들에 공기 흐름이 부딪히며 소용돌이치는 와류를 덜 발생시켜 차체 하부의 공기흐름을 원활해지기 때문으로 보이며, 시판 사이드 스커트 제품(S, Flat)이 공기저항력을 줄여주는 정도에 비해 약 3.1% 개선된 효과가 나타남



<그림 3-11> 표준형, 플랩 및 접이식 사이드 스커트의 항력 감소 효과

제2절. 수치해석을 통한 공기역학적 성능평가

1. 수치해석 방법

□ 큰에디모사 (large-eddy simulation)

○ 지배방정식 및 수치해석 방법

- 유체의 운동량 및 질량 보존에는 Navier-Stokes equation을 이용하며, 식은 다음과 같음

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right)$$

○ 지배방정식

- 위의 Navier-Stokes equation을 필터링하여 큰에디(large-eddy)는 직접 계산하고, 작은 스케일의 에디는 모델링

- Filtered Navier-Stokes equation ($\bar{}$:필터 연산)

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i}\,\overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

$$(\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i}\,\overline{u_j})$$

○ 수치해석 기법

- Incompressible LES solver
- Unstructured solver
- Fully-implicit fractional method에 기반한 시간 전진
- Crank-Nicolson method를 이용한 시간 차분
- 2nd-order central difference를 이용한 공간 차분
- Dynamic Vreman global equlibrium subgrid-scale (SGS) model

□ 수치해석 도메인

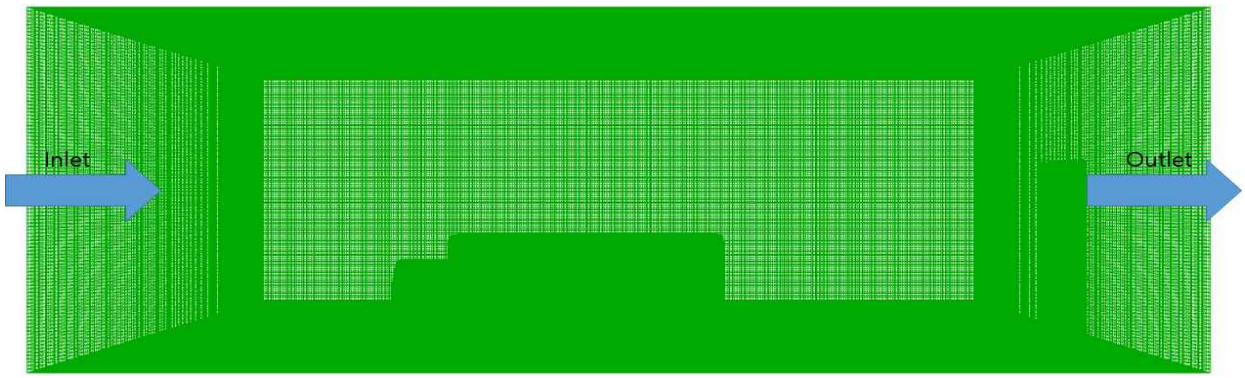
○ 수치해석 도메인 생성

- 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행

- Local refinement의 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1300~1600만개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

○ 경계조건 및 상수

- Inlet velocity: 90km/h (25m/s)
- Outlet: local acceleration + convection = 0
- Wall(풍동 외벽, 화물차 표면): no-slip condition
- Kinematic viscosity = 1.568×10^{-5}
- CFL(무차원 시간간격) = 5.0



<그림 3-12> 수치해석 풍동과 경계조건의 예시 (15ton 화물차량)

□ **격자 생성**

○ 표1과 같은 셀 개수를 가지는 계산 격자 생성

<표 3-1> 모델별 격자의 셀 개수

	15톤 모델	40ft 모델	5톤 모델
셀 개수	약 1500만	약 1600만	약 1300만

2. 15톤 화물차 모델에 대한 수치해석 실험 결과

가. 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 효과

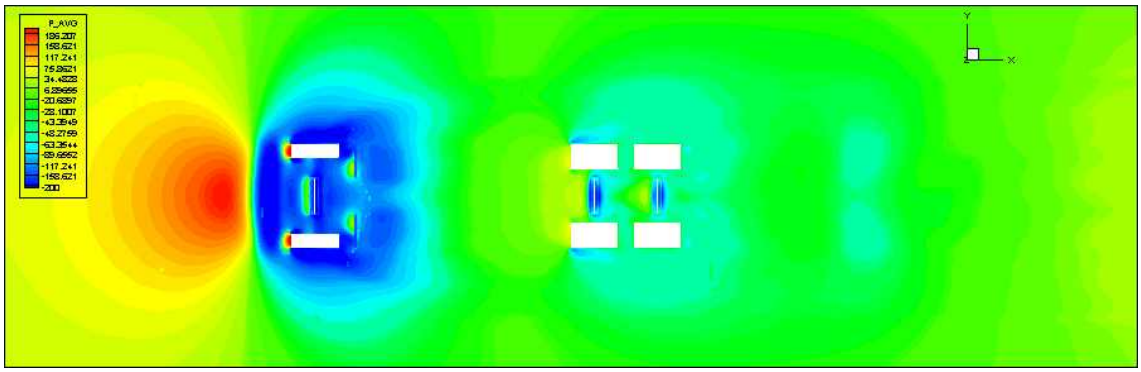
(1) 유동장 분석 결과

□ 시간 평균 압력장의 유동장 결과

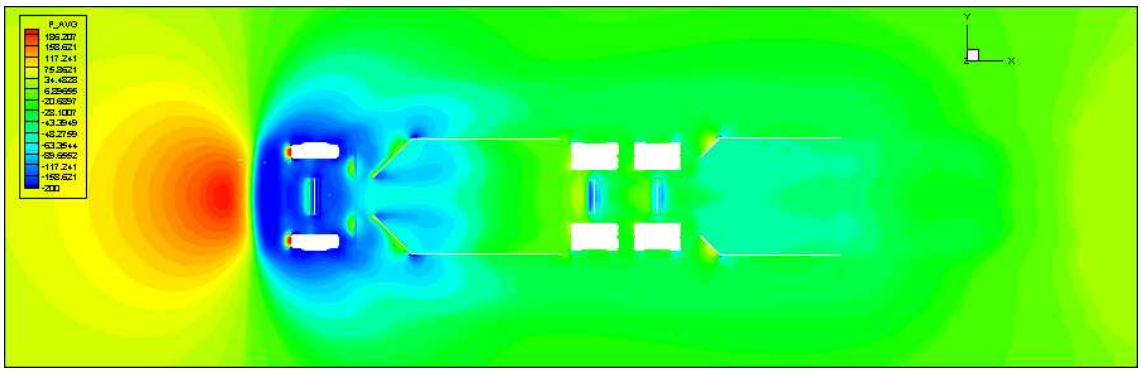
○ (45°, 0, 45°)로 꺾인 플랩형 사이드 스커트는 유동의 가이드 역할을 하여, 앞바퀴 부근에서 발생하는 박리 유동의 영향을 억제. 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 압력장을 도시화

○ 기본 모델에서는 유동의 상류와 하류 압력 차이가 극심했던 반면, 사이드 스커트를 부착한 모델에서는 상류와 하류의 압력 차이가 완화되어 형상 저항에 의한 항력을 감소시킨 것으로 판단됨

○ 특히, 바퀴 샤프트 부분의 전·후면 압력강하가 사이드 스커트 장착 모델의 경우 기본 모델에 비해 감소함을 확인할 수 있는데, 이 또한 항력계수를 저감시키는 요인이 됨을 확인



<그림 3-13> 기본 모델의 시간 평균 압력장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



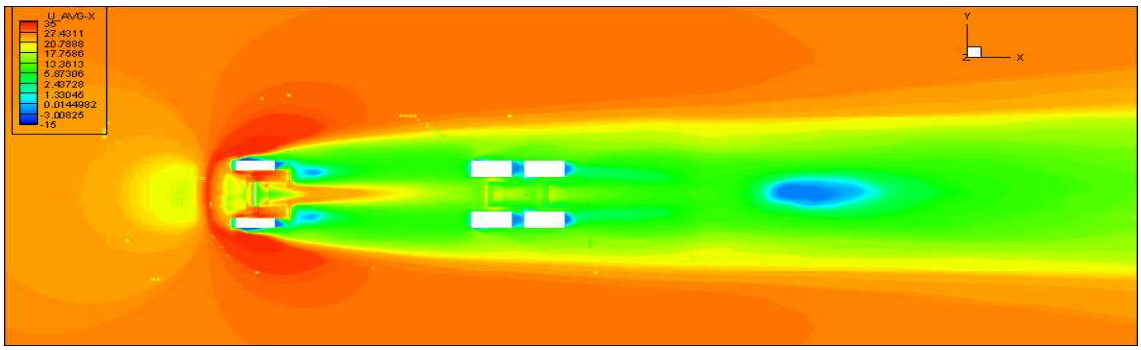
<그림 3-14> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 압력장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ 시간 평균 유속방향 속도장의 유동장 결과

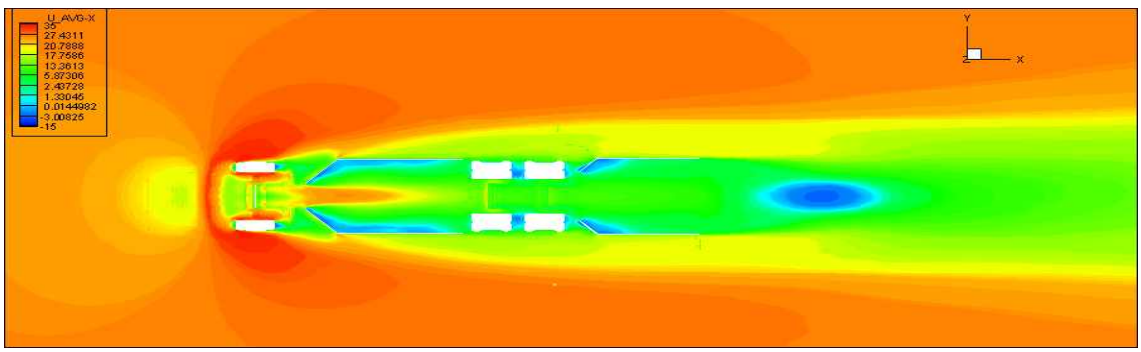
○ (45°, 0, 45°)로 꺾인 플랩형 사이드 스커트는 유동의 가이드 역할을 하여, 앞바퀴 부근에서 발생하는 박리 유동의 영향을 억제. 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 유속방향 속도장을 도시화

○ 사이드 스커트를 장착함에 따라 차체 하부와 사이드 스커트 근방에서의 유속방향 속도의 증가를 확인할 수 있음. 이는 사이드 스커트를 장착한 모델의 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-15> 기본 모델의 시간 평균 유속방향 속도장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-16> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 유속방향 속도장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ 시간 평균 x 방향 vorticity의 유동장 결과

○ 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 x 방향 vorticity를 도시화

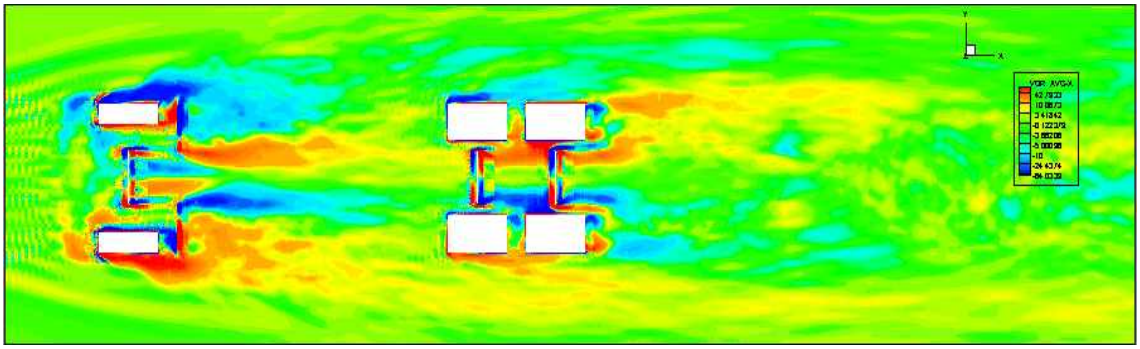
○ x 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

○ 기본 모델 차체 하부의 x 방향 vorticity에 비해 사이드 스커트를 부착한 모델 차체 하부의 x 방향 vorticity 가 더 크며 넓게 형성되어 있음. 즉 사이드 스커트를 부착

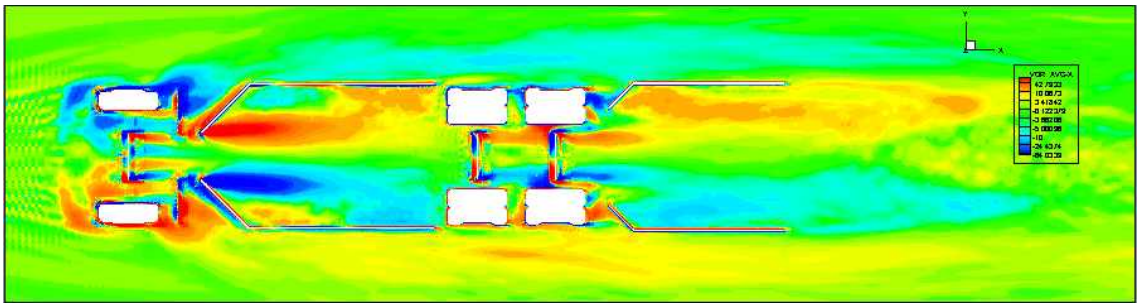
함으로 써 차체 하부 유동의 회전이 잘 일어남

○ 차체 하부에서 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측 할 수 있음. 즉 유동의 속도 회복이 더 빠름

○ 유동의 속도 회복은 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함. 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-17> 기본 모델의 시간 평균 x방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-18> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 x방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ **시간 평균 y 방향 vorticity의 유동장 결과**

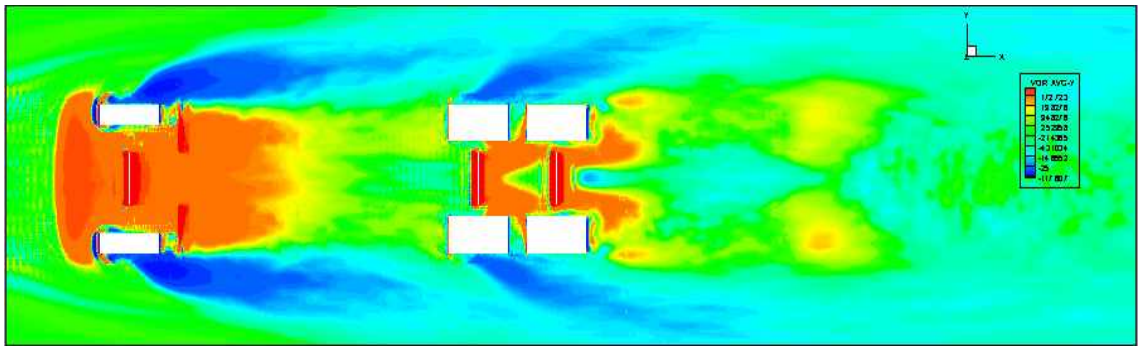
○ 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 y 방향 vorticity를 도시화

○ y 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 y 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

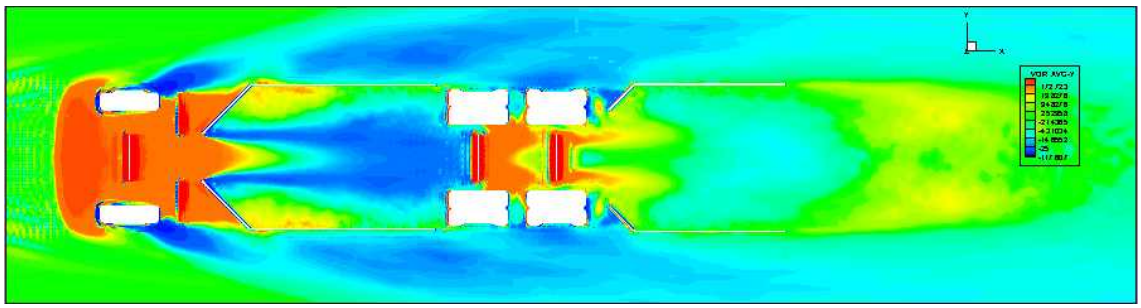
○ 기본 모델 차체 하부의 앞바퀴 부근에서만 y 방향 vorticity가 상당량 형성이 되어 있는 반면, 사이드 스커트를 부착한 모델 차체 하부의 경우에는 y 방향 vorticity 가 뒤까지 상당량 형성이 되어 있음

○ 차체 하부 전역에서 y 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측 할 수 있음. 즉 유동의 속도 회복이 더 빠름

○ 유동의 속도 회복은 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함. 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-19> 기본 모델의 시간 평균 y방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-20> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 y방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ **시간 평균 z 방향 vorticity의 유동장 결과**

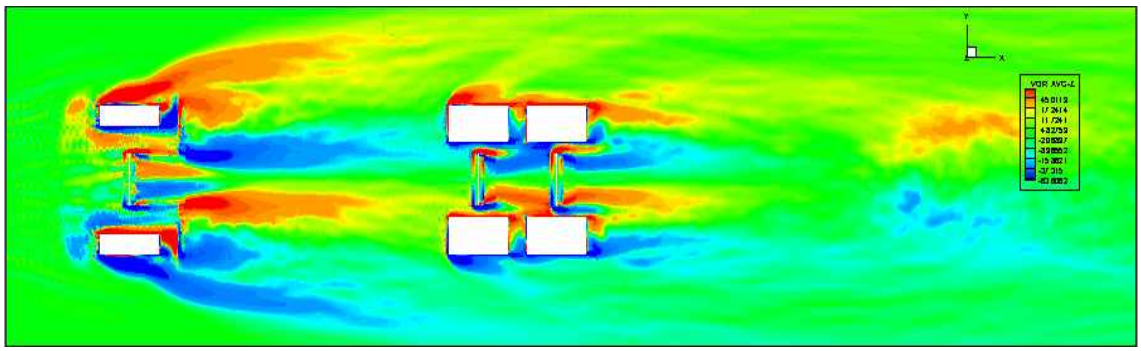
○ 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 z 방향 vorticity를 도시화.

○ z 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 z 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

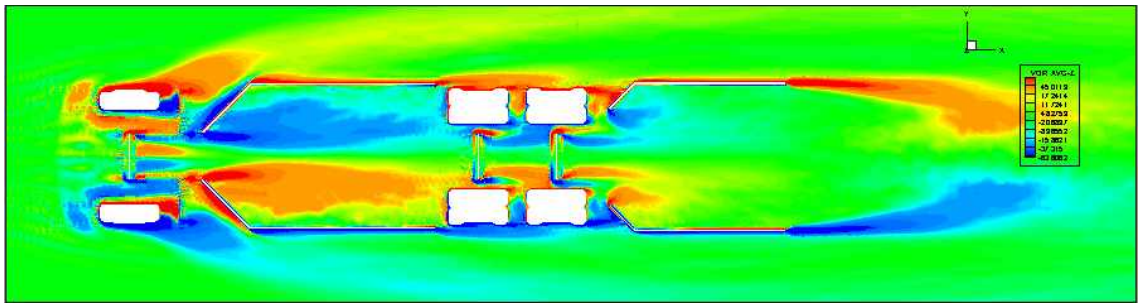
○ 기본 모델에 비해 사이드 스커트를 부착한 모델 차체 하부의 경우 앞바퀴 부근과 후미부의 후류에서 z 방향 vorticity가 상당량 형성이 되어있음

○ 차체 하부 전역과 후미부의 후류에서 z 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측 할 수 있음. 즉 유동의 속도 회복이 더 빠름

○ 유동의 속도 회복은 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함. 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-21> 기본 모델의 시간 평균 z방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-22> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 z방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

(2) 항력계수 비교

○ 90km/h 로 주행 시, 부착물이 없는 기본 모델과 사이드 스커트를 부착한 모델 주위 유동을 LES를 이용하여 항력계수 계산

○ 실제 시간으로 15초 동안의 수치해석 수행. 난류가 충분히 발달된 시간 범위를 평균하여 항력계수를 도출

○ 사이드 스커트를 부착함에 따라 항력계수가 감소하는 경향성 확인

<표 3-2> 15톤 화물차의 사이드 스커트의 유무에 따른 항력계수 비교

15톤 화물차	항력계수(실험)	항력계수(수치해석)	오차
기본 모델	0.712	0.710	0.3%
사이드 스커트 부착 모델	0.674	0.674	0.0%
항력계수 감소율	5.3%	5.1%	

3. 40ft 화물차 모델에 대한 수치해석 실험 결과

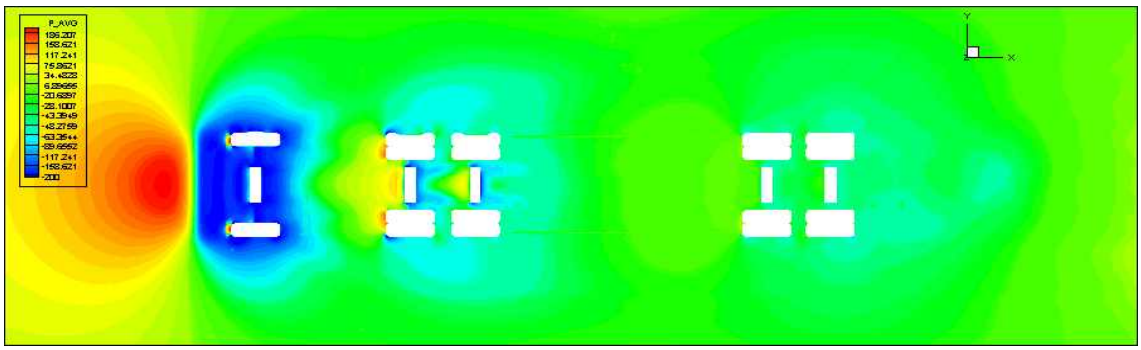
가. 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 효과

(1) 유동장 분석 결과

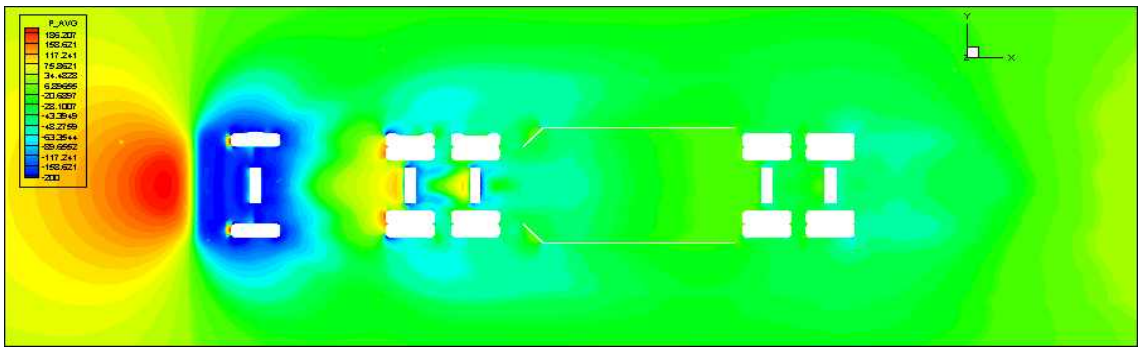
□ 시간 평균 압력장의 유동장 결과

○ (0, 45°)로 꺾인 플랩형 사이드 스커트는 유동의 가이드 역할을 하여, 앞바퀴 부근에서 발생하는 박리 유동의 영향을 억제. 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 압력장을 도시화

○ 기본 모델에서는 유동의 상류와 하류 압력 차이가 극심했던 반면, 사이드 스커트를 부착한 모델에서는 상류와 하류의 압력 차이가 소량 완화되어 형상 저항에 의한 항력을 감소시킨 것으로 판단됨



<그림 3-23> 기본 모델의 시간 평균 압력장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



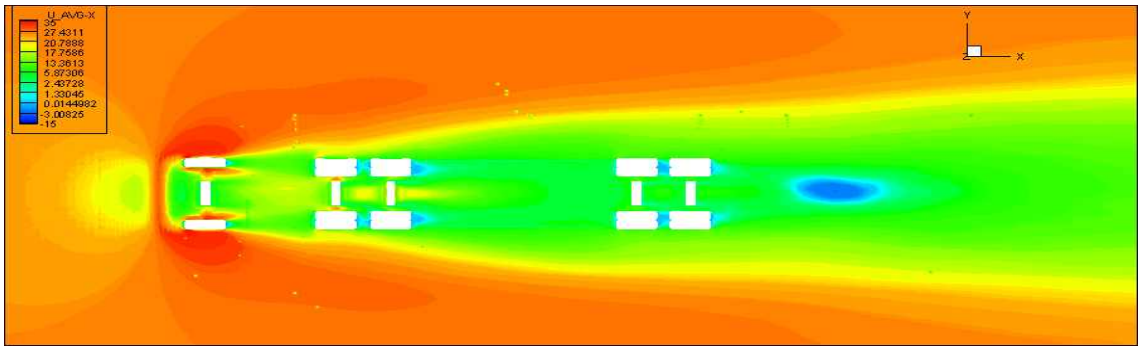
<그림 3-24> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 압력장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ 시간 평균 유속방향 속도장의 유동장 결과

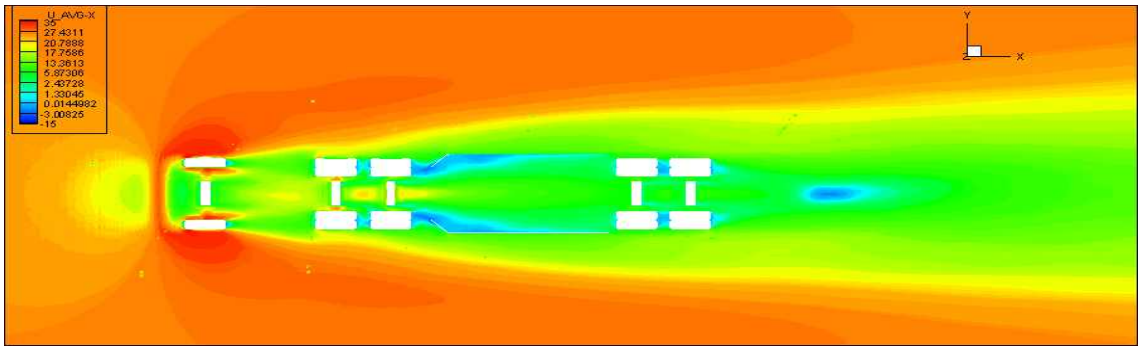
○ (0, 45°)로 꺾인 플랩형 사이드 스커트는 유동의 가이드 역할을 하여, 앞바퀴 부근에서 발생하는 박리 유동의 영향을 억제. 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 유속방향 속도장을 도시화

○ 사이드 스커트를 장착함에 따라 차체 하부와 사이드 스커트 근방에서의 유속방향 속도의 증가를 확인할 수 있음. 이는 사이드 스커트를 장착한 모델의 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-25> 기본 모델의 시간 평균 유속방향 속도장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-26> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 유속방향 속도장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ 시간 평균 x 방향 vorticity의 유동장 결과

○ 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 x 방향 vorticity를 도시화

○ x 방향 vorticity의 크기가 클수록 트레일러 하부의 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

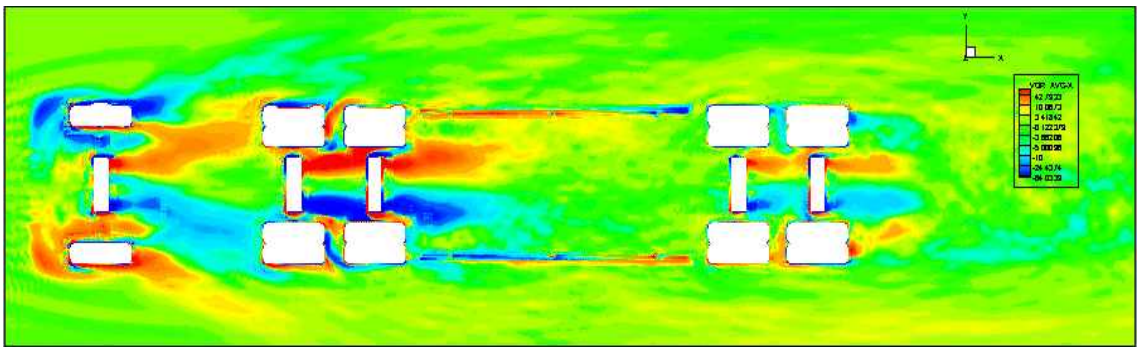
○ 사이드 스커트를 부착한 모델 트레일러 하부의 x 방향 vorticity 가 크고 넓게 형성되어 있음. 즉 사이드 스커트를 부착함으로써 트레일러 하부 유동의 회전이 잘 일어남

○ 트레일러 하부에서 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측 할 수 있음. 즉 유동의 속도 회복이 더 빠름

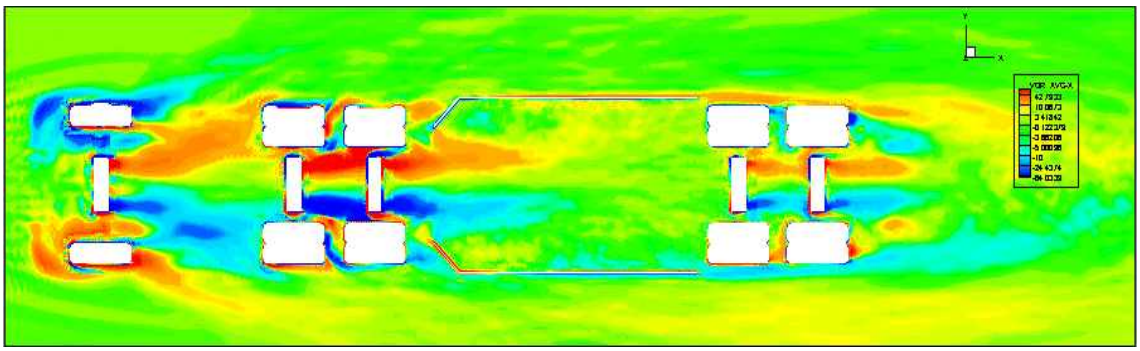
○ 유동의 속도 회복은 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함. 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음

○ 기본 모델 차체 하부의 사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에는 기본 모델의 안전 바가 위치해 있어, 안전 바를 지나는 유동의 박리에 의해 생성되는 x 방향 vorticity 가 많음을 확인 할 수 있음. 특히 안전 바는 길고 높이 방향으로 두께가 얇기 때문에 안전 바의 4개의 면이 유동 박리에 모두 영향을 주는 만큼 이 부분에서의 vorticity 가 큼을 확인 할 수 있음

○ 이로 인해 기본 모델 트레일러 하부에서도 역시 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측을 할 수 있지만, 안전 바가 길고 높이 방향으로 두께가 얇기 때문에 현재의 높이를 벗어난 다른 위치에서는 다른 유동특성을 가질 것으로 예상. 오히려 길고 얇은 안전 바로 인하여 유동의 박리가 많이 일어나게 되면서 운동량의 손실이 커져 화물차의 항력이 증가 할 것으로 예상



<그림 3-27> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-28> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ 시간 평균 y 방향 vorticity의 유동장 결과

○ 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 y 방향 vorticity를 도시화

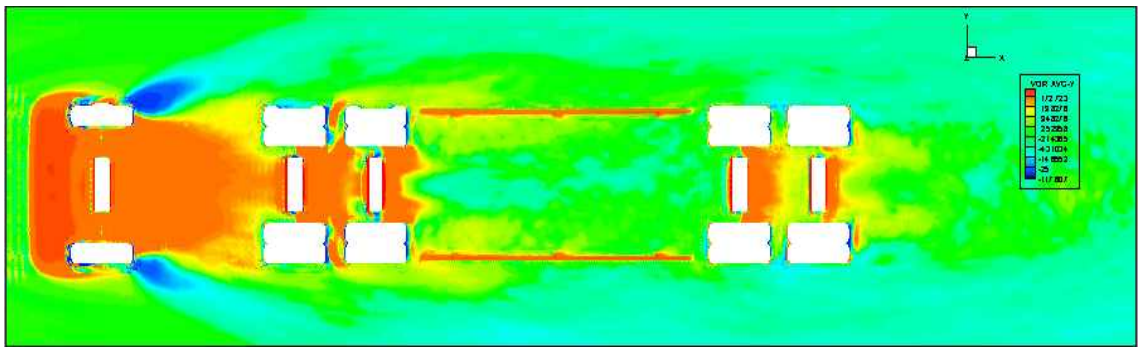
○ y 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 y 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

○ 기본 모델 트레일러 하부의 중간 부근에서만 y 방향 vorticity가 형성이 되어 있는 반면, 사이드 스커트를 부착한 모델 트레일러 하부의 경우에는 y 방향 vorticity 가

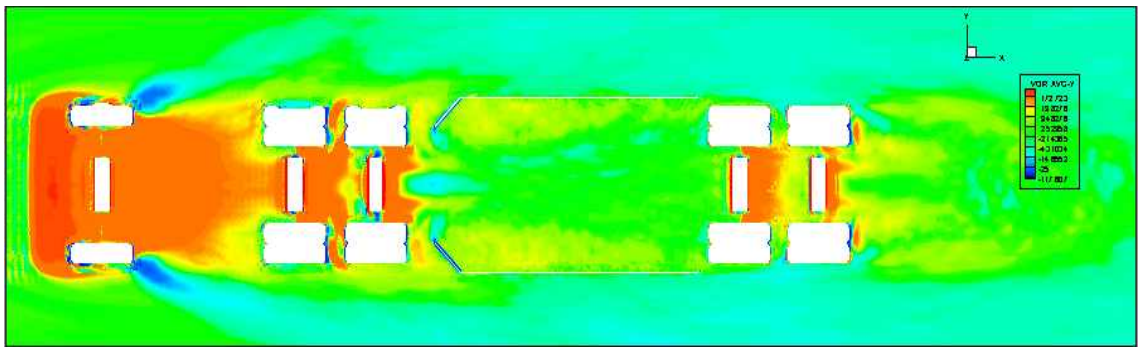
뒤까지 형성이 되어 있음

○ 트레일러 하부 전역에서 y 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측 할 수 있음. 즉 유동의 속도 회복이 더 빠름

○ 유동의 속도 회복은 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함. 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-29> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-30> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ **시간 평균 z 방향 vorticity의 유동장 결과**

○ 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 z 방향 vorticity를 도시화

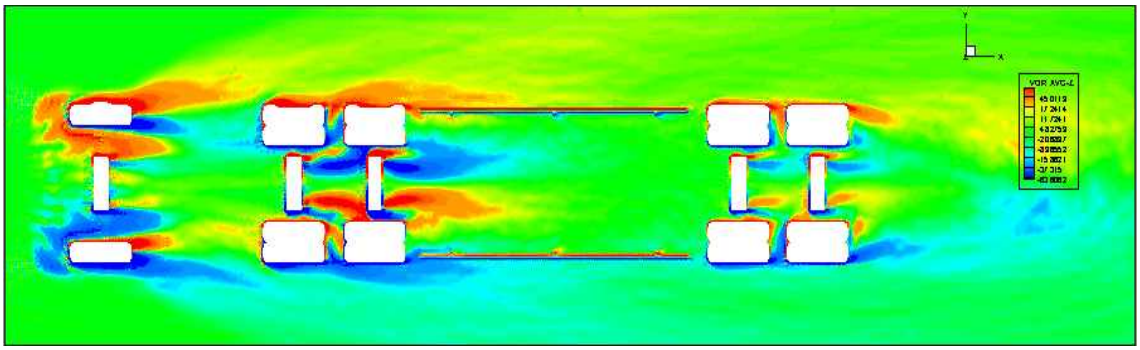
○ z 방향 vorticity의 크기가 클수록 트레일러 하부의 z 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

○ 기본 모델에 비해 사이드 스커트를 부착한 모델 트레일러 하부의 경우 트레일러의 앞바퀴 부근과 후미부의 후류에서 z 방향 vorticity가 상당량 형성이 되어있음

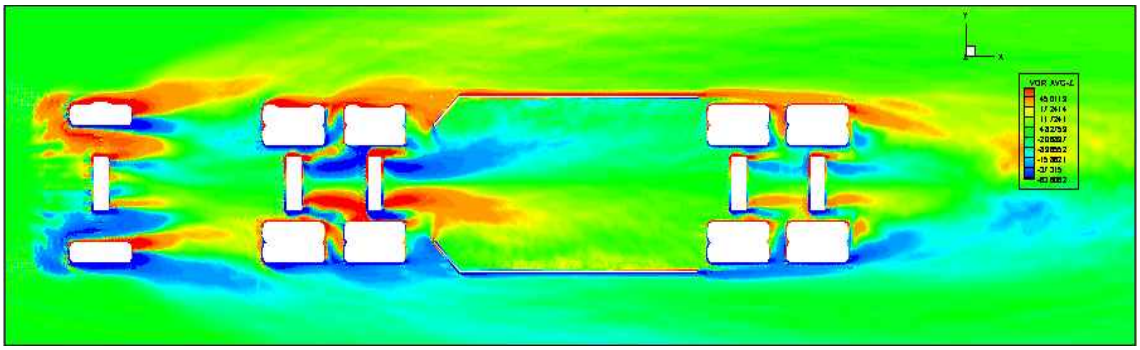
○ 트레일러 하부 전역과 후미부의 후류에서 z 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측 할 수 있음. 즉 유동의 속도 회복이 더 빠름

○ 유동의 속도 회복은 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함. 운동량 손실과 항력이 비

례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-31> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-32> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

(2) 항력계수 비교

○ 90km/h 로 주행 시, 부착물이 없는 기본 모델과 사이드 스커트를 부착한 모델 주위 유동을 LES를 이용하여 항력계수 계산

○ 실제 시간으로 15초 동안의 수치해석 수행. 난류가 충분히 발달된 시간 범위를 평균하여 항력계수를 도출

○ 사이드 스커트를 부착함에 따라 항력계수가 감소하는 경향성을 확인

<표 3-3> 40ft 화물차의 사이드 스커트의 유무에 따른 항력계수 비교

40ft 화물차	항력계수(실험)	항력계수(수치해석)	오차
기본 모델	0.779	0.881	13.0%
사이드 스커트 부착 모델	0.743	0.859	15.7%
항력계수 감소율	4.6%	2.4%	

4. 5톤 화물차 모델에 대한 수치해석 실험 결과

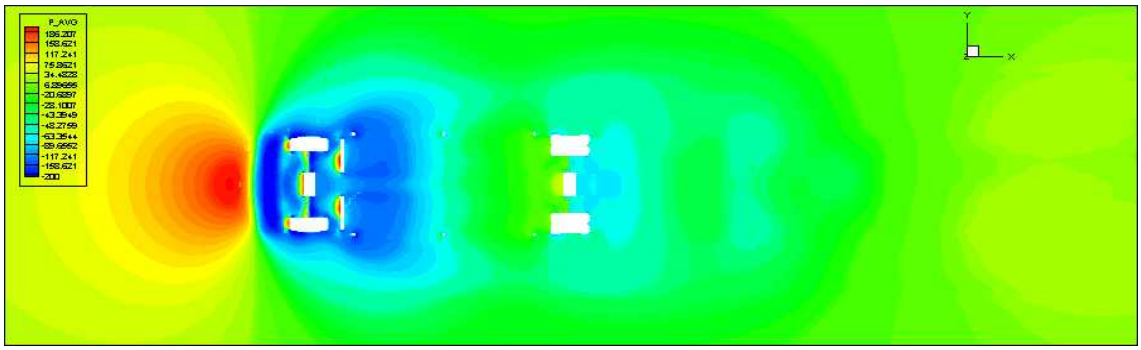
가. 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 효과

(1) 유동장 분석 결과

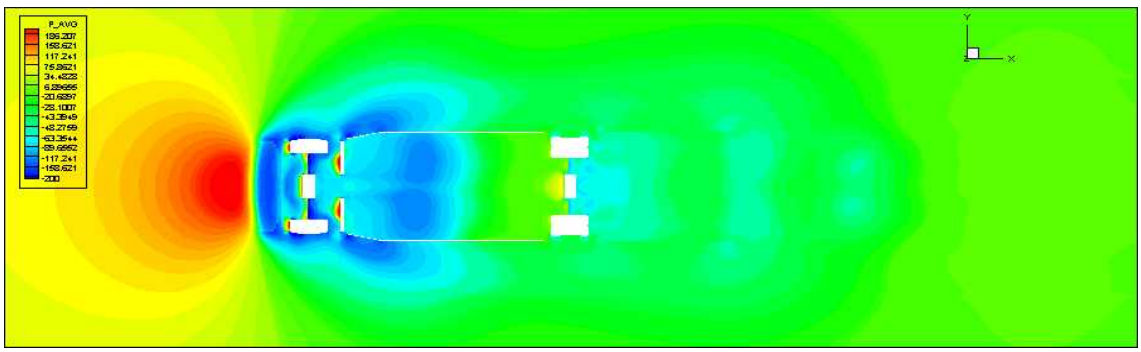
□ 시간 평균 압력장의 유동장 결과

○ (15°, 0, 15°)의 각도를 이루는 사이드 스커트를 화물차 앞·뒤 바퀴 사이의 공간에 배치함으로써 공기 흐름을 원활하게 함. 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 압력장을 도시화

○ 사이드 스커트의 15°로 꺾인 부분의 바깥쪽 압력이 안쪽 압력보다 낮아지는 현상이 발생하여 항력의 작용 방향과 반대 방향의 힘의 성분이 항력을 저감하는 효과를 초래



<그림 3-33> 기본 모델의 시간 평균 압력장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-34> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 압력장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

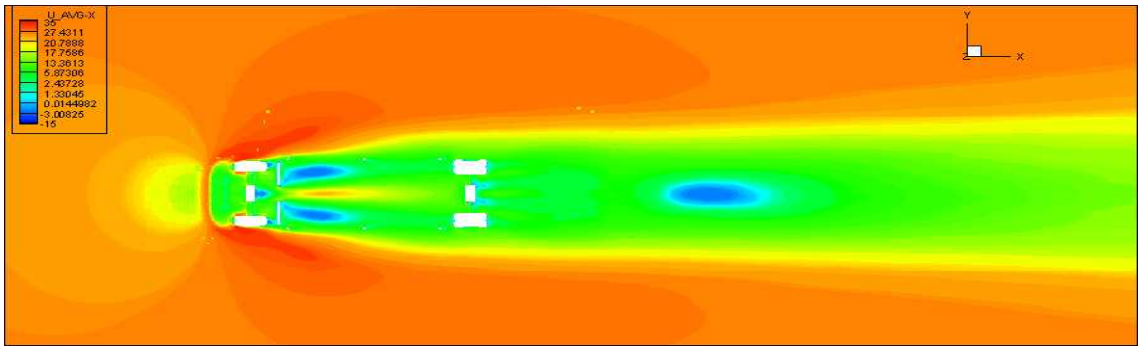
□ 시간 평균 유속방향 속도장의 유동장 결과

○ (45°, 0, 45°)로 꺾인 플랩형 사이드 스커트는 유동의 가이드 역할을 하여, 앞바퀴 부근에서 발생하는 박리 유동의 영향을 억제. 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 유속방향 속도장을 도시화

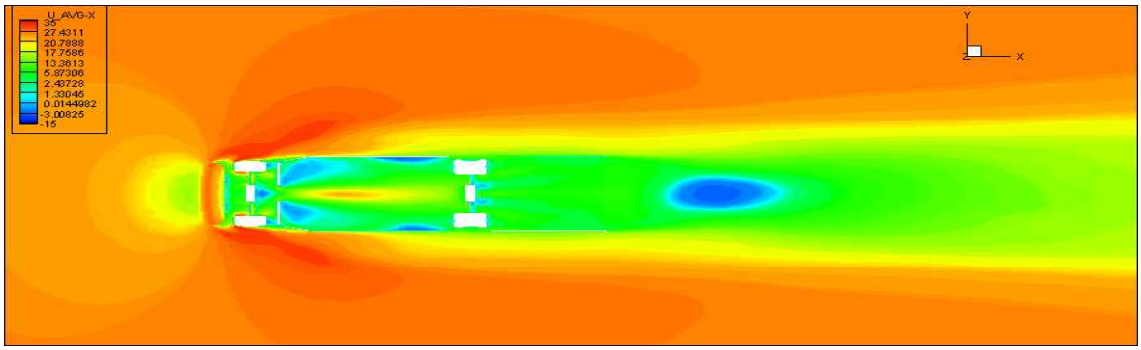
○ 사이드 스커트를 장착함에 따라 차체 하부와 사이드 스커트 근방에서의 유속방향 속

도의 증가를 확인할 수 있음. 이는 사이드 스커트를 장착한 모델의 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-35> 기본 모델의 시간 평균 유속방향 속도장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-36> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 유속방향 속도장
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ **시간 평균 x 방향 vorticity의 유동장 결과**

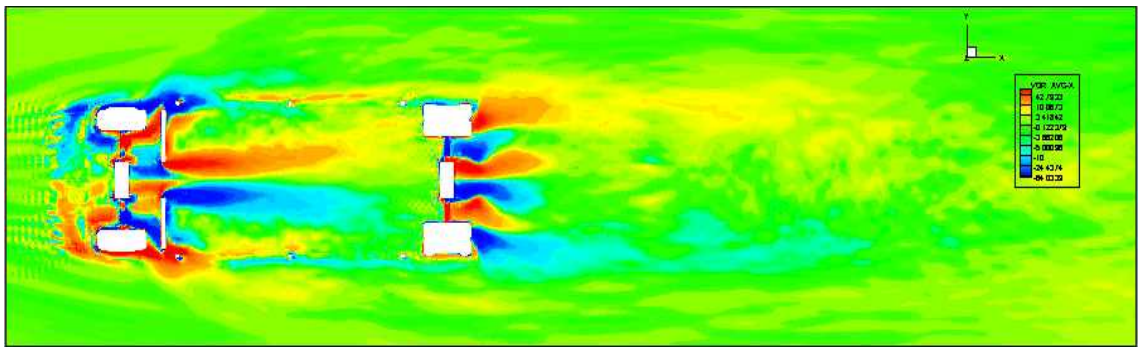
○ 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 x 방향 vorticity를 도시화

○ x 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

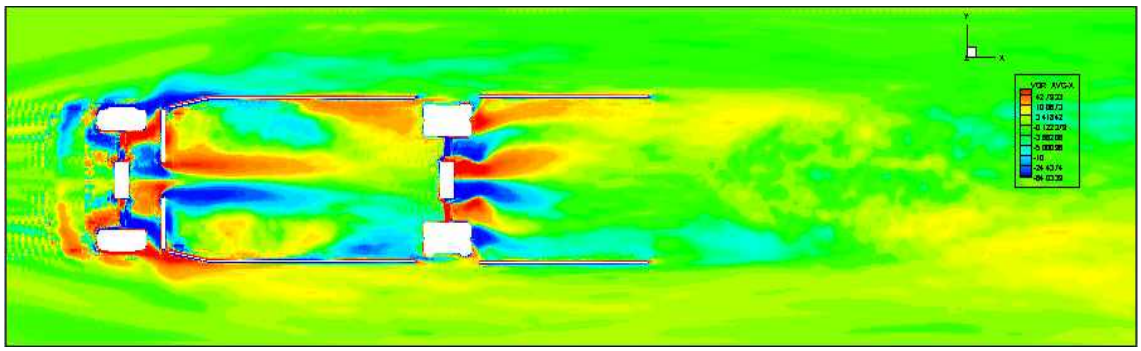
○ 기본 모델 차체 하부의 x 방향 vorticity에 비해 사이드 스커트를 부착한 모델 차체 하부의 x 방향 vorticity 가 더 크며 넓게 형성되어 있음. 즉 사이드 스커트를 부착함으로 써 차체 하부 유동의 회전이 잘 일어남

○ 차체 하부에서 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측 할 수 있음. 즉 유동의 속도 회복이 더 빠름

○ 유동의 속도 회복은 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함. 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-37> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-38> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ **시간 평균 y 방향 vorticity의 유동장 결과**

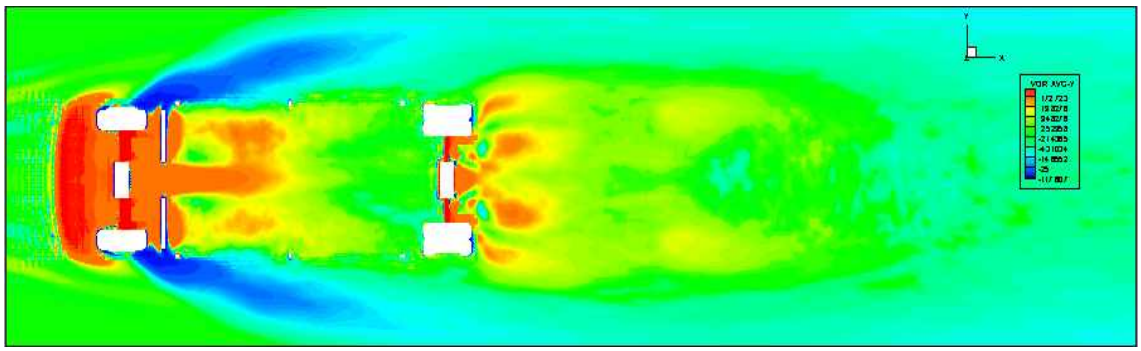
○ 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 y 방향 vorticity를 도시화

○ y 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 y 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

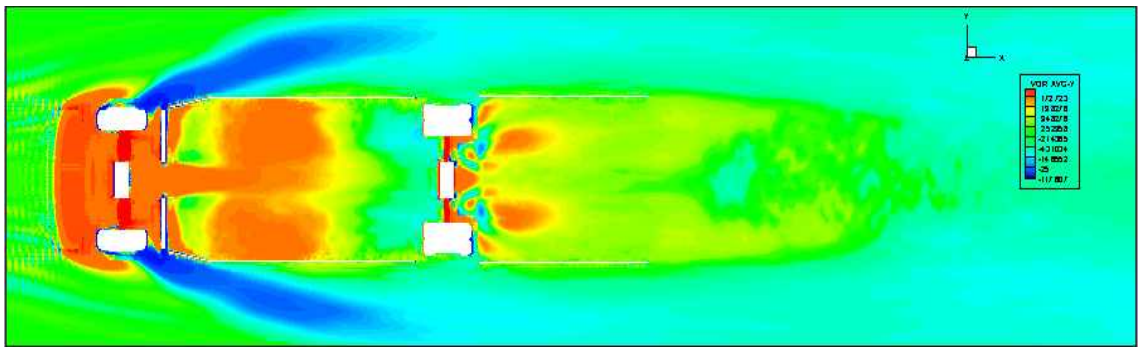
○ 기본 모델 차체 하부의 앞바퀴 부근에서만 y 방향 vorticity가 상당량 형성이 되어 있는 반면, 사이드 스커트를 부착한 모델 차체 하부의 경우에는 y 방향 vorticity 가 뒤까지 상당량 형성이 되어 있음

○ 차체 하부 전역에서 y 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측 할 수 있음. 즉 유동의 속도 회복이 더 빠름

○ 유동의 속도 회복은 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함. 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-39> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-40> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

□ **시간 평균 z 방향 vorticity의 유동장 결과**

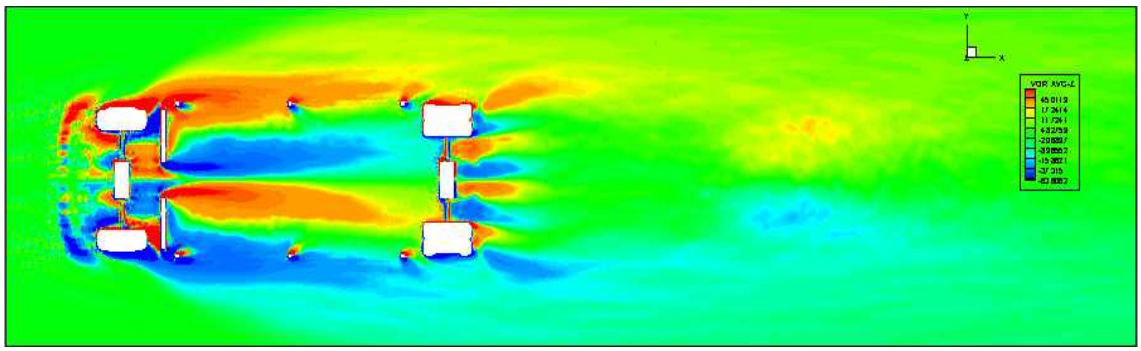
○ 사이드 스커트의 아래에서 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면에서의 z 방향 vorticity를 도시화

○ z 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 z 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

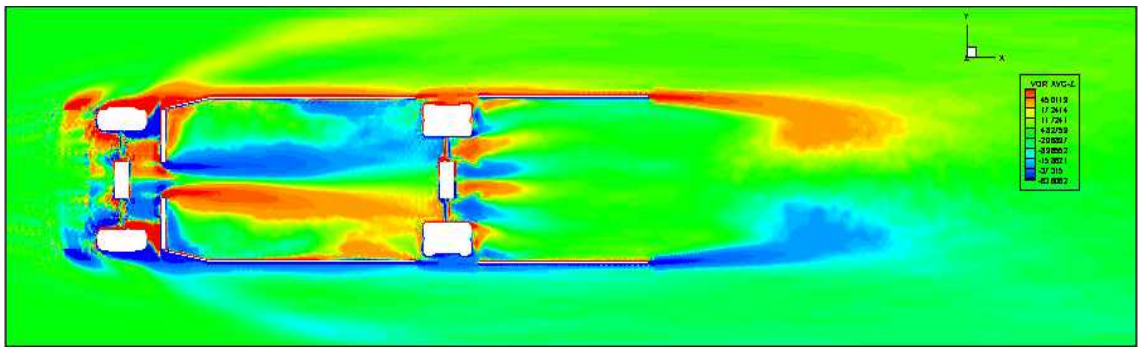
○ 기본 모델에 비해 사이드 스커트를 부착한 모델 차체 하부의 경우 앞바퀴 부근과 후미부의 후류에서 z 방향 vorticity가 상당량 형성이 되어있음

○ 차체 하부 전역과 후미부의 후류에서 z 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향 유동의 운동량 교환이 활발하게 일어남을 추측 할 수 있음. 즉 유동의 속도 회복이 더 빠름

○ 유동의 속도 회복은 유동의 운동량 손실이 감소함을 뜻함. 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 3-41> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)



<그림 3-42> 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity
(사이드 스커트 높이 20% 지점을 지나는 Z축에 수직한 평면의 contour)

(2) 항력계수 비교

○ 90km/h 로 주행 시, 부착물이 없는 기본 모델과 사이드 스커트를 부착한 모델 주위 유동을 LES를 이용하여 항력계수 계산

○ 실제 시간으로 15초 동안의 수치해석 수행. 난류가 충분히 발달된 시간 범위를 평균하여 항력계수를 도출

○ 사이드 스커트를 부착함에 따라 항력계수가 감소하는 경향성 확인

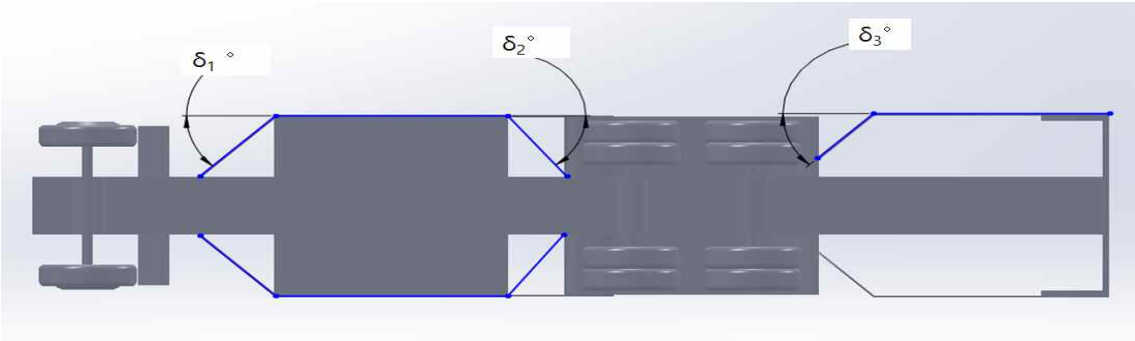
<표 3-4> 사이드 스커트의 유무에 따른 항력계수 비교

5톤 화물차	항력계수(실험)	항력계수(수치해석)	오차
기본 모델	0.701	0.688	1.9%
사이드 스커트 부착 모델	0.662	0.650	1.9%
항력계수 감소율	5.6%	5.6%	

제3절. 최적화 설계

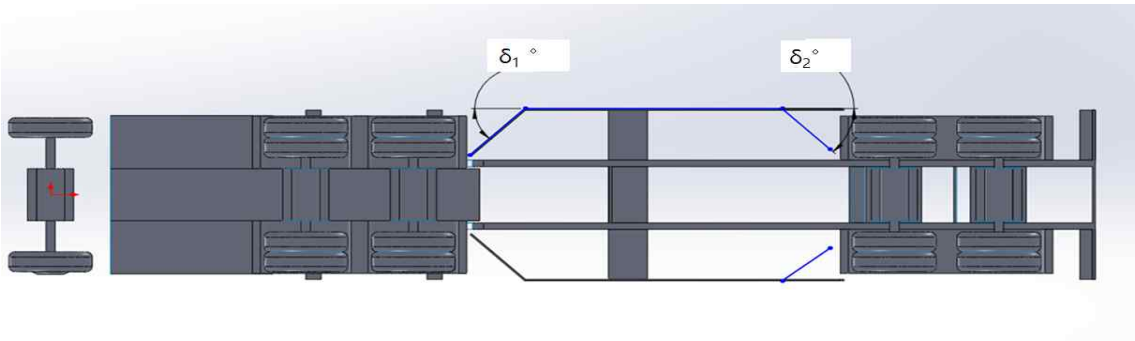
□ 플랩 사이드 스커트 모델 정의

○ 5톤, 15톤 화물차의 경우 아래 그림과 같이 사이드 스커트의 각도가 δ_1, δ_2, δ_3일 때, 사이드 스커트 부착 모델을 (δ_1, δ_2, δ_3)라 정의함

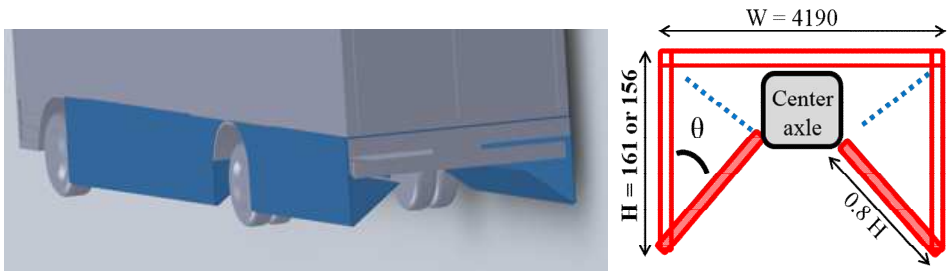


<그림 3-43> 15톤 화물차의 플랩 사이드 스커트에 대한 각도의 정의

○ 40ft 화물차의 경우 아래 그림과 같이 사이드 스커트의 각도가 δ_1, δ_2,일 때, 사이드 스커트 부착 모델을 (δ_1, δ_2)라 정의함



<그림 3-44> 40ft 화물차의 플랩 사이드 스커트에 대한 각도의 정의



<그림 3-45> 접이식 사이드 스커트의 각도에 대한 정의

○ 15톤 사이드 스커트의 최적화

- 사이드 스커트를 장착하게 되면 차량 하부에서 발생하는 와류(주된 흐름과 반대 방향으로 소용돌이치는 흐름)의 생성을 억제함. 특히 타이어와 스커트 사이의 유동을 막아 공기저항이 줄어드는 것으로 보임
- 타이어와 차체 안쪽으로 일정한 각도(δ)로 꺾여 들어온 플랩을 부착한 사이드 스커트

의 경우, 들임각($\delta_1,\delta_2,\delta_3$)들의 조합에 따라 공기저항이 줄어드는 효과가 다르게 관찰됨

- 실험 결과, 지상고 15cm에서 들임각 δ_1=45°,δ_2=0°,δ_3=45°으로 조합한 경우, 항력계수(C_D)값이 0.674로, 안전바가 장착된 기본 모델에 비해 5.2% 줄어듦
- 이러한 결과는 들임각이 없는 표준형 사이드 스커트 (S(0°,0°,0°))와 비교하여 항력계수가 줄어든 정도가 약 80.5% 향상되었음을 나타냄. 이것은 사이드 스커트의 꺾인 플랩이 타이어 후방에서 생성되는 와류를 억제하고, 사이드 스커트와 플랩 안쪽에서 생성되는 압력 차이에 기인하여 차량을 주행 방향으로 밀어주는 힘을 받기 때문으로 보임

<표 3-5> 사이드 스커트를 부착한 15 톤 화물차 모델의 공기저항 계수 개선량

사양		공기저항 계수 (C_D)	공기저항 계수 개선량 ($\triangle C_D/C_D$)
5톤 기본 모델		0.711	-
표준형 사이드 스커트	S 형	0.690	-2.88
	L 형	0.679	-4.42
풀랩 사이드 스커트 (L형,$\delta_1,\delta_2,\delta_3$)	(15°,0,15°)	0.693	-2.54
	(30°,0,30°)	0.698	-1.78
	(45°,0,45°)	0.674	-5.20
접이식 사이드 스커트 (L형, Θ)	30°	0.683	-3.88
	45°	0.686	-3.44
	60°	0.675	-4.99
	61.2°	0.674	-5.14

○ 40ft 사이드 스커트의 최적화

- 표준형 사이드 스커트(지상고 20cm, 이하 S형으로 표기)의 경우, 현재 일반적으로 운행되는 것과 같이 안전바가 달린 기본 모델에 비해 항력계수가 3.51% 저감됨. 스커트의 폭을 지상고 15cm까지 넓힌 경우 (이하 L형으로 표기), 항력계수의 감소는 4.36%로 S형에 비해 공기저항 저감 효과가 크게 나타남
- 사이드 스커트를 장착하게 되면 차량 하부에서 발생하는 와류(주된 흐름과 반대 방향으로 소용돌이치는 흐름)의 생성을 억제함. 특히 타이어와 스커트 사이의 유동을 막아 공기저항이 줄어드는 것으로 보임
- 타이어와 차체 안쪽으로 일정한 각도(δ)로 꺾여 들어온 플랩을 부착한 사이드 스커트의 경우, 들임각(δ_1,δ_2)들의 조합에 따라 공기저항이 줄어드는 효과가 다르게 관찰됨
- 실험 결과, 상고 15cm에서 들임각 δ_1=30°, δ_2=0° 조합의 경우, 항력계수(C_D)값이 0.743으로, 안전바가 장착된 기본 모델에 비해 4.66% 줄어듦
- 이러한 결과는 들임각이 없는 표준형 사이드 스커트 (S(0°,0°,0°))와 비교하여 항력계수가 줄어든 정도가 약 32.9% 향상되었음을 나타냄. 이것은 사이드 스커트의 꺾

인 플랩이 타이어 후방에서 생성되는 와류를 억제하고, 사이드 스커트와 플랩 안쪽에서 생성되는 압력 차이에 기인하여 차량을 주행 방향으로 밀어주는 힘을 받기 때문으로 보임

- 접이식 사이드 스커트의 경우, 접힌 각도(30°, 45°, 60°,62.5°)에 따라 공기저항력이 줄어드는 효과가 다르게 나타남
- 사이드 스커트의 폭이 상대적으로 넓은 L 형(지상고 15cm)의 경우 현재 시판되고 있는 S 형(지상고 20cm)에 비해 항력계수를 줄이는 효과가 크게 나타났으며, 접힌 각도 (Θ=30°,45°,60°,62.5°)를 변화시켜본 결과 60°에서 항력계수가 가장 낮았음
- 접힌 각도 Θ=60°로 설치한 경우, 항력계수는 0.741로 기본 모델 대비 항력계수가 4.98% 감소
- 접힌 각도 Θ=60°로 설치한 경우, 차체 하부에 위치한 복잡한 구조물들에 공기 흐름이 부딪히며 소용돌이치는 와류를 덜 발생시켜 차체 하부의 공기흐름을 원활해지기 때문으로 보이며, 시판 사이드 스커트 제품(S, Flat)이 공기저항력을 줄여주는 정도에 비해 약 41.8% 개선된 효과를 보임

<표 3-6> 사이드 스커트를 부착한 40ft 화물차 모델의 공기저항 계수 개선량

사양		공기저항 계수 (C_D)	공기저항 계수 개선량 ($\triangle C_D/C_D$)
40ft 기본 모델		0.779	-
표준형 사이드 스커트	S 형	0.752	-4.93
	L 형	0.745	-5.27
플랩 사이드 스커트 (L형,δ_1,δ_2)	(15°,0)	0.750	-3.78
	(30°,0)	0.743	-4.66
	(45°,0)	0.743	-4.65
	(45°,45°)	0.756	-3.04
	(0,45°)	0.756	-2.95
접이식 사이드 스커트 (L형, Θ)	30°	0.744	-4.54
	45°	0.745	-4.40
	60°	0.741	-4.97
	62.5°	0.744	-4.48

○ 5톤 사이드 스커트의 최적화

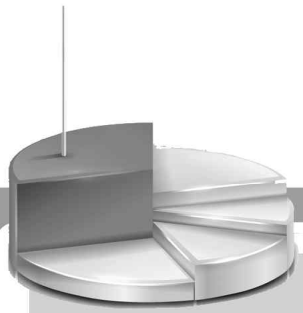
- 사이드 스커트를 장착하게 되면 차량 하부에서 발생하는 와류(주된 흐름과 반대 방향으로 소용돌이치는 흐름)의 생성을 억제함. 특히 타이어와 스커트 사이의 유동을 막아 공기저항이 줄어드는 것으로 보임
- 평판형 사이드 스커트의 경우는 사이드 스커트의 길이가 길수록 공기저항계수 저감 효과가 뛰어남
- 플랩형 사이드 스커트는 들임각(δ)에 따라서 공기 저항 계수 개선에 큰 차이를 보임. 특히, 15°의 각도를 갖는 5톤 화물차의 사이드 스커트는 화물차의 앞바퀴의 평

면과 거의 만나게 되어 옆면에서 보았을 때 상대적으로 연속적인 평면을 가짐. 이러한 형상으로 인해 꺾인 부분 바깥면의 압력이 안쪽 압력보다 낮아져 항력 저감에 긍정적인 영향을 끼치고 가장 좋은 공기저항 계수 저감 효과를 보임

- 사이드 스커트의 폭이 상대적으로 넓은 L 형(지상고 15cm)의 경우 현재 시판되고 있는 S 형(지상고 20cm)에 비해 항력계수를 줄이는 효과가 크게 나타났으며, 접힌 각도 (30°, 45°, 60°,61.2°)를 변화시켜본 결과 차축부위까지 연결한 경우(Θ=61.2°)에서 항력계수가 가장 낮았음
- 스커트를 중앙에 위치한 차축부위까지 연결한 경우(Θ=61.2°)의 항력계수는 0.667로 기본 모델 대비 항력계수가 5.09%까지 줄어듦

<표 3-7> 사이드 스커트를 부착한 5 톤 화물차 모델의 공기저항 계수 개선량

사양		공기저항 계수 (C_D)	공기저항 계수 개선량 ($\triangle C_D/C_D$)
5톤 기본 모델		0.702	-
표준형 사이드 스커트	S 형	0.667	-4.93
	L 형	0.665	-5.27
풀랩형 사이드 스커트 (L형,δ_1,δ_2,δ_3)	(15°,0,15°)	0.662	-5.70
	(30°,0,30°)	0.669	-4.75
	(45°,0,45°)	0.676	-3.68
접이식 사이드 스커트 (L형, Θ)	30°	0.668	-4.87
	45°	0.670	-4.61
	60°	0.670	-4.57
	61.2°	0.666	-5.08



제4장 사이드 스커트를 통한 공기저항 저감 기술 개발

제1절 주행안정성

제2절 냉각성능분석

제3절 수치해석을 통한 최적화

제4절 다양한 조건에 대한 추가 실험을 통한 성능 개선

제5절 내구성 분석 및 검증

제4장. 사이드 스커트를 통한 공기저항 저감 기술 개발

제1절. 주행안정성

1. 풍동 실험을 통한 주행 안정성 평가

가. 실험장치

□ POSTECH 아음속 풍동

○ 1995년 준공된 포스텍 아음속 풍동은 유체역학적 기본 현상에서 부터 제반 응용유체역학적 현상을 연구할 수 있도록 설계된 다목적 아음속 풍동 <그림 4-1>

○ 자동차와 기차와 같은 운송체의 공력 실험에 적합

○ 폐쇄형(closed circuit)으로 전체크기 높이 6m, 폭 14m, 길이 37m를 가짐 <그림 4-2>

○ 시험부(test section)의 높이 1.5m, 폭 1.8m, 길이 4.3m

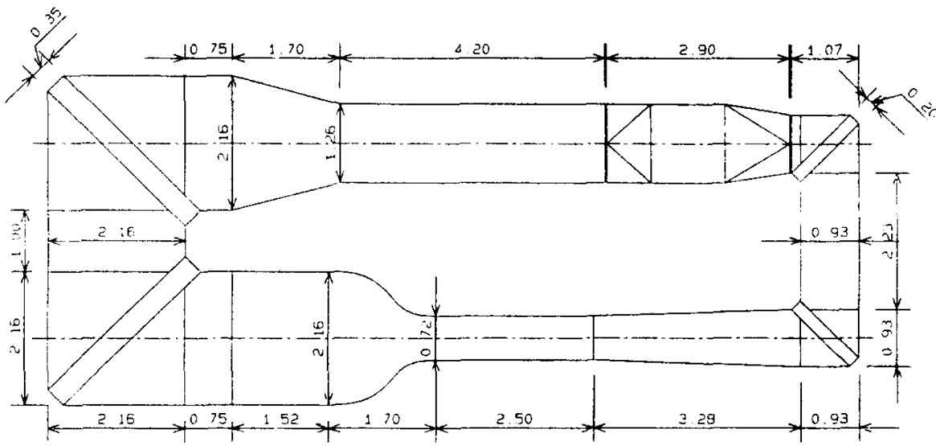
○ 최저풍속: 5m/s, 최대풍속: 75 m/s

○ 수축비: 9:1

○ 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%, 균일도 (flow uniformity)는 0.25%로 운송체의 공력 실험에 적합한 풍동임



<그림 4-1> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관



<그림 4-2> POSTECH 아음속 풍동도면

□ 공력 측정용 external balance

○ 자동차 차체에 걸리는 힘과 모멘트와 같은 공력을 측정하기 위해 차체에 작용하는 풍하중을 정밀하게 측정하여야 함

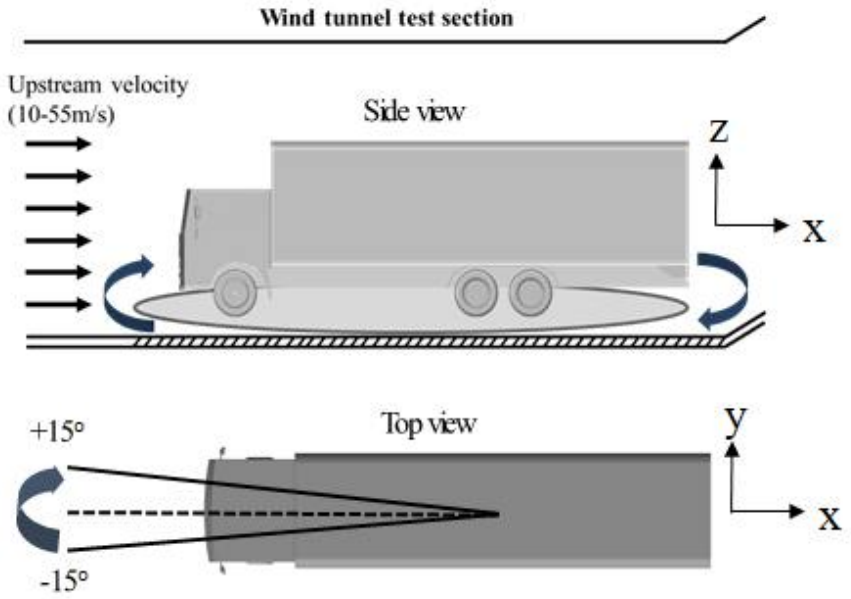
○ 포스텍 아음속풍동에 설치된 external balance는 독일항공우주연구청(DLR) Braunschweig 분소에서 자동차 공력측정용으로 제작한 7-component balance

○ 측정범위 및 분해능

- 측정범위: X=±500N, Mx=±500Nm, Y=±1000N, My=±600Nm, Z=±4000N Mz=±200Nm
- 정확도: 0.2% of full scale dX=1N, dY=2N, dZ=8N

○ 분해능: 0.01N 이하

○ External balance 아래에 turn table을 설치하여 측풍이 불어올 경우에 대한 풍동 실험이 가능함 <그림 4-3>



<그림 4-3> Yaw angle 조절을 위한 turn table 개략도

나. 실험 대상

□ 실험 모델

○ 국내에서 가장 많이 사용하는 화물차인 15톤 트럭 및 40ft 트레일러를 대상으로 사이드 스커트(side skirt), 보트 테일(boat tail)과 같은 유동제어용 부가장치를 차체에 장착하여 공력 성능을 시험함

○ 화물차에 걸리는 형상저항(pressure form drag), 차체 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후미부에서 발생하는 유동박리에 기인한 공기저항을 효과적으로 제어함으로써 화물차의 공기저항 저감 시키고자 함

○ 공기역학적인 해석을 통해 화물차의 항력 감소 메커니즘을 밝히고 저저항 운송체의 공력 설계기술을 개발

○ 본 연구에서는 사이드 스커트와 보트테일의 형상 및 각도 등과 같은 실험변수를 변화시키면서 화물차에 걸리는 항력과 측력을 측정하여 항력계수(C_D)값과 횡풍측력계수(C_S)을 도출함

- 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 H사의 15톤 트럭의 외형 및 S사의 40ft 트레일러의 외형을 실측한 후 이를 역설계하는 방식으로 3차원(3D) 모델을 얻은 후, 풍동 시험부의 폐색율(blockage ratio, 풍동의 단면적에 대해 모형의 단면적이 차지하는 비율)이 8% 이하가 되도록 축소비를 정하고 축소 모형을 제작

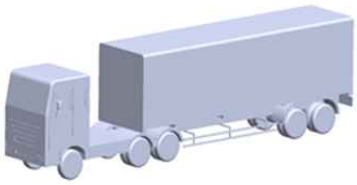
○ 각각의 구체적인 형태 및 축소 비율, 폐색율은 <그림 4-4>에 나타냄

다. 주행 안정성 평가

□ 주행안정성 평가 실험 방법 및 모형

○ 화물차는 차체 단면적에 비해 길이가 길어 측풍의 영향이 크고 유동에 기인한 진동(flow-induced vibration)이 발생하여 주행 안정성이 감소할 수 있음

○ 측풍이 화물차에 불어오는 경우를 모사하여 풍동 바닥면에 설치된 turn table을 이용하여 yaw angle(Φ)을 +15°~ -15°까지 변화시켜가면서 차량에 걸리는 공력특성 변화를 분석함

실험 대상 모형			
실험대상	15 ton 현대 Trago Xcient		40ft SCANIA G440
실제크기(m)	12(L) x 2.5(B) x 3.3(H)		18(L) x 2.5(B) x 4(H)
실험모형			
모형 scale	Force measurement	1/8	1/8
	PIV experiment	1/15	
폐색율 (Blockage ratio)	Force measurement	4.7%	5.7%
	PIV experiment	6.5%	

<그림 4-4> 실험 대상 화물차 모델 및 사양

○ 풍속은 임계 레이놀즈 수(Reynolds) 영역을 넘는 25m/s(=90km/h)로 고정하여, 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용하였음

○ 화물차에 미치는 항력(F_D), 항력계수(C_D), 측력(F_S), 횡풍측력계수(C_S)는 다음과 같이 정의하였음

$$F_D = F_x \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_y \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_D = \frac{Drag\,\text{force}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

$$F_s = F_y \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_x \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_s = \frac{|Side\,\text{force}|}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

□ Yaw angle(Φ) 변화에 따른 15톤 화물차의 공력특성 분석

○ Yaw angle 변화에 따른 항력(F_D)의 변화와 항력계수값(C_D)을 <그림 4-5>에 나타냄

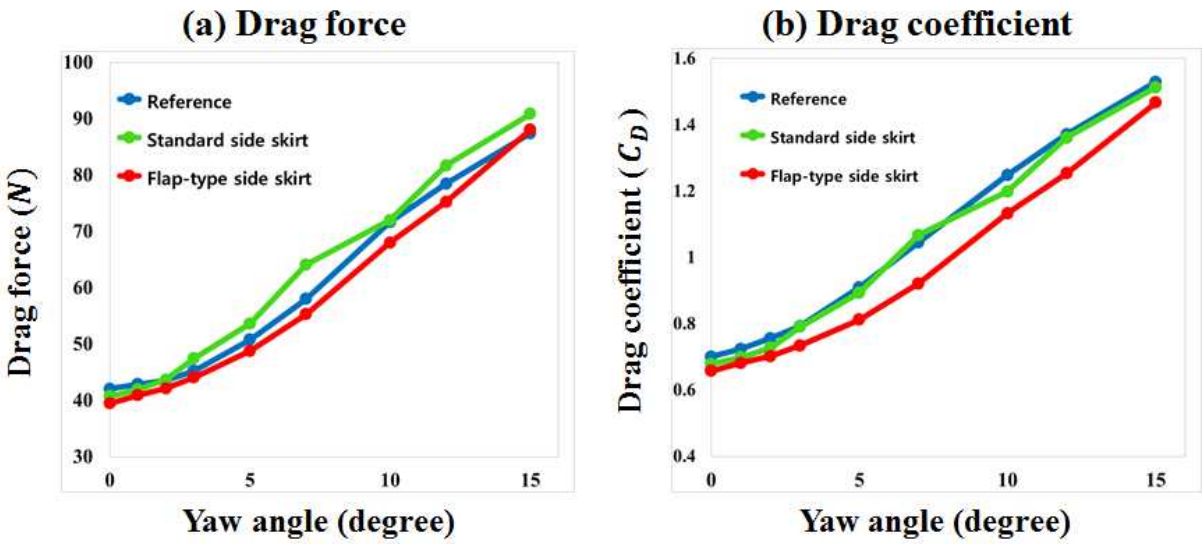
- Yaw angle이 증가함에 따라 차량이 받는 항력이 커지며, 기본형 사이드 스커트(standard side skirt) 및 flap-type side skirt (0,30) 장착 시 yaw angle +15°~ -15°

전 영역 에서 항력값이 줄어듦

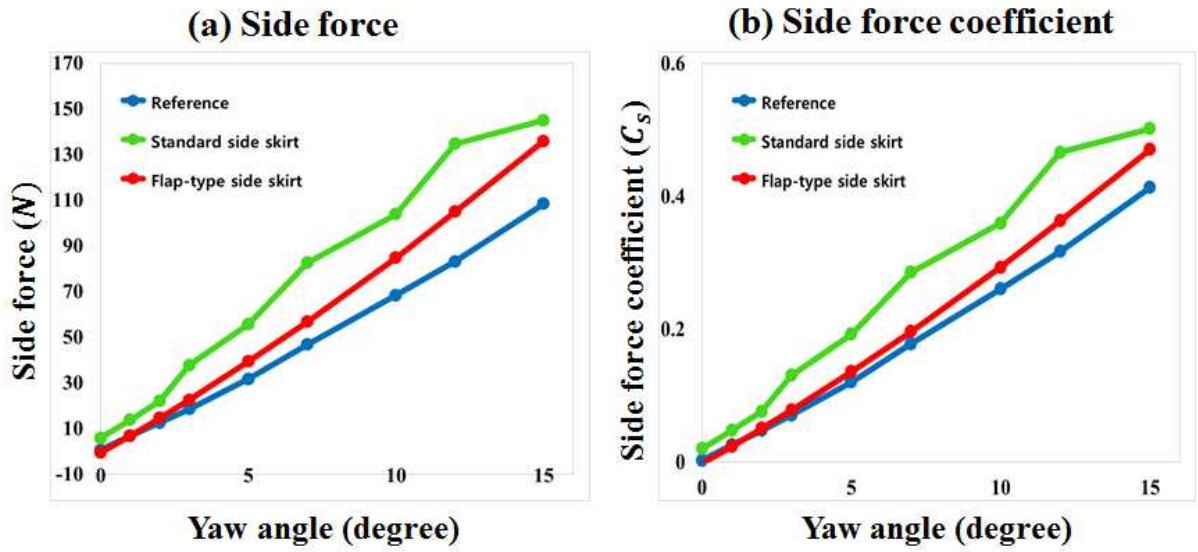
- 사이드 스커트 장착 시 화물차 앞바퀴 주변 유체흐름의 운동량 손실이 뒷바퀴가 받는 항력을 줄이고, 뒷바퀴에서 발생하는 유동박리가 저감하여 운동에너지 손실이 감소하여 항력값이 줄어듦
- Flap-type side skirt의 경우 Φ=0°조건에서 6.1%의 항력저감 효과를 보임. 이것은 기본형 사이드 스커트(3.05%)에 비해 항력저감효과가 약 100% 향상된 결과임
- Flap-type side skirt는 Φ=7°조건에서 11.9%의 항력 저감 효과를 보임
- 이를 통해 사이드 스커트 장착 시 측풍이 불어 올 때, 사이드 스커트를 미장착한 경우에 비해 차량의 연비를 크게 향상시킬 수 있음을 확인함

○ Yaw angle 변화에 따른 측력의 변화와 횡풍 측력계수값을 <그림 4-6>에 나타냄

- Yaw angle이 커짐에 따라, 측풍을 받는 차량 면적이 증가하고, 이에 따라 측력이 증가함
- 사이드 스커트 장착 시, 사이드 스커트 미장착 차량에 비해 측력이 증가하고 횡풍 측력계수도 증가함
- 사이드 스커트 장착에 기인하여 측면부 단면적이 늘어나게 되어 횡풍에 의한 영향을 크게 받게됨
- Flap-type side skirt 장착 시, 기본 사이드 스커트 장착에 비하여 횡풍측력계수가 전 구간에서 20% 이상 낮게 나타남
- 특히 Φ=7 조건에서 기본 사이드 스커트에 비해 횡풍 측력계수가 31.3% 감소하였음



<그림 4-5> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 작용하는 (a)항력(F_D) 및 (b)항력계수의(C_D) 변화



<그림 4-6> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 작용하는 (a)측력(F_S) 및 (b)횡풍 측력계수(C_S)의 변화

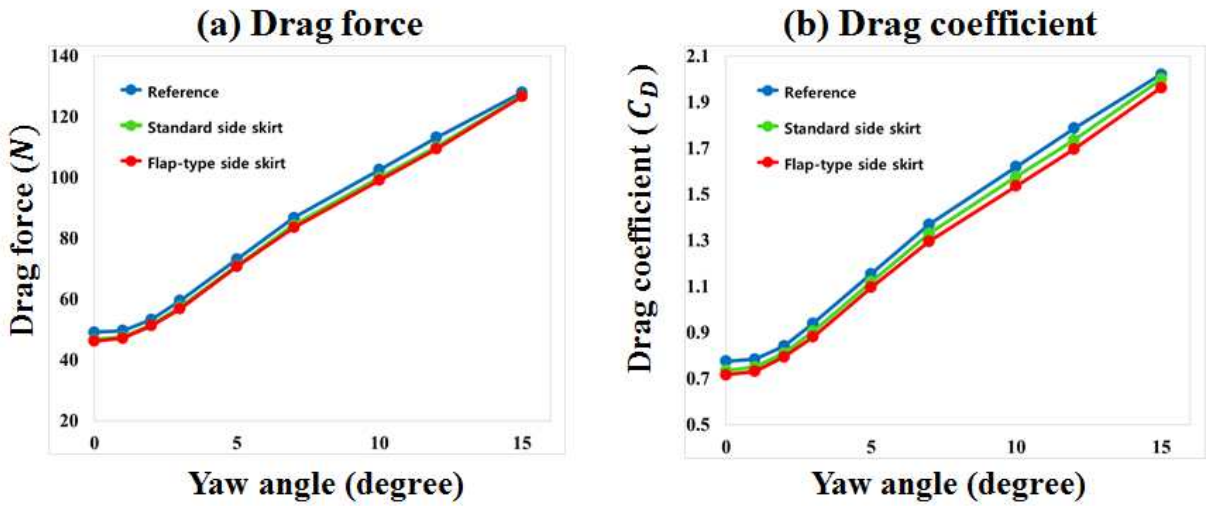
□ Yaw angle(Φ) 변화에 따른 40ft 트레일러의 공력특성 분석

○ Yaw angle 변화에 따른 항력(F_D)의 변화와 항력계수값(C_D)을 <그림 4-7>에 나타냄

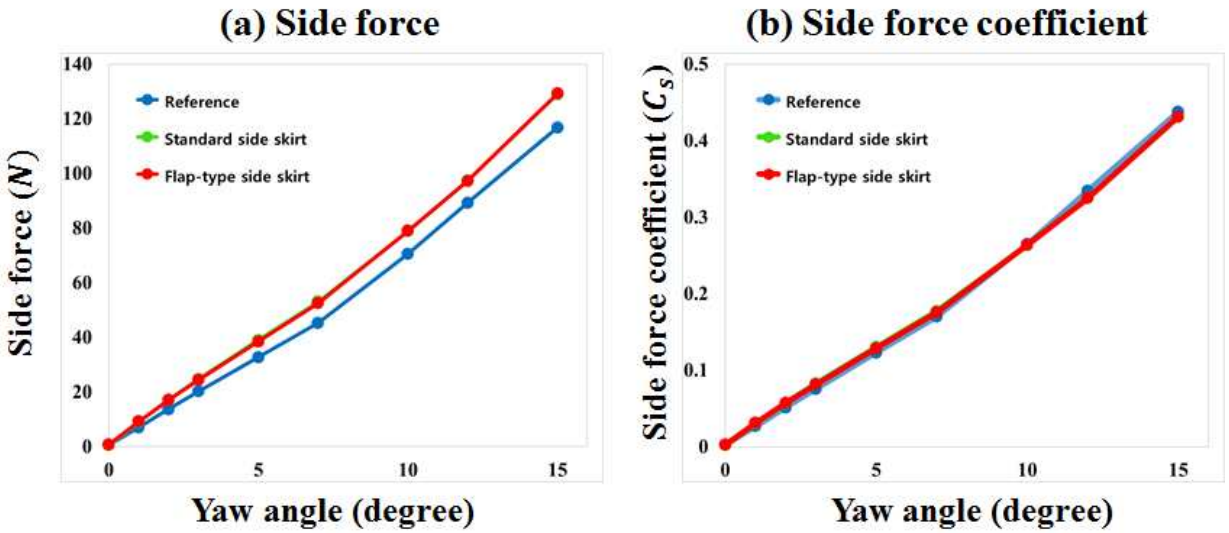
- Yaw angle이 증가함에 따라 차량이 받는 항력이 커지며, 기본형 사이드 스커트(standard side skirt) 및 flap-type side skirt 장착 시 yaw angle +15°~ -15°전 영역 에서 항력값이 줄어듦
- 사이드 스커트 장착 시 화물차 앞바퀴 주변 유체흐름의 운동량 손실이 뒷바퀴가 받는 항력을 줄이고, 뒷바퀴에서 발생하는 유동박리가 저감하여 운동에너지 손실이 감소하여 항력값이 줄어듦
- Flap-type side skirt의 경우 Φ=0°조건에서 7.6%의 항력저감 효과를 보인다. 이것은 기본형 사이드 스커트(5.1%)에 비해 약 50% 향상된 효과를 나타냄
- Flap-type side skirt는 Φ=7°조건에서 5.4%의 항력 저감 효과를 보임
- 이를 통해 사이드 스커트 장착 시 측풍이 불어 올 때, 사이드 스커트를 미장착한 경우에 비해 차량의 연비를 크게 향상시킬 수 있음을 확인함

○ Yaw angle 변화에 따른 측력의 변화와 횡풍 측력계수값을 <그림 4-8>에 나타냄

- Yaw angle이 커짐에 따라, 측풍을 받는 차량 면적이 증가하고, 이에 따라 측력이 증가함
- Side skirt 설치로 인해 늘어나는 wind-facing 면적에 작용하는 횡풍 측력을 횡풍 측력계수를 통해 비교하였음
- 기본형 사이드 스커트 장착시 Φ=12°조건에서, 사이드 스커트 미장착한 경우에 비해 2.8%의 횡풍측력계수 저감효과를 보임
- Flap-type side skirt를 장착 한 경우, Φ=12°조건에서 사이드 스커트 미장착한 경우에 비해 3%의 횡풍측력계수 저감효과를 보임



<그림 4-7> Yaw angle에 따른 40ft 트레일러에 작용하는 (a)항력(F_D) 및 (b)항력계수(C_D)의 변화



<그림 4-8> Yaw angle에 따른 40ft 트레일러에 작용하는 측력(F_S) (左) 및 횡풍 측력계수(C_S)변화(右)

2. 수치해석을 통한 주행 안정성 평가

가. 수치해석 방법

□ 큰에디모사 (large-eddy simulation)

○ 지배방정식 및 수치해석 방법

- 유체의 운동량 및 질량 보존에는 Navier-Stokes equation을 이용하며, 식은 다음과 같음

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right)$$

○ 지배방정식

- 위의 Navier-Stokes equation을 필터링하여 큰에디(large-eddy)는 직접 계산하고, 작은 스케일의 에디는 모델링

- Filtered Navier-Stokes equation ($\bar{}$:필터 연산)

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i}\,\overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

$$\left(\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i}\,\overline{u_j}\right)$$

○ 수치해석 기법

- Incompressible LES solver
- Unstructured solver
- Fully-implicit fractional method에 기반한 시간 전진
- Crank-Nicolson method를 이용한 시간 차분
- 2nd-order central difference를 이용한 공간 차분
- Dynamic Vreman global equlibrium subgrid-scale (SGS) model

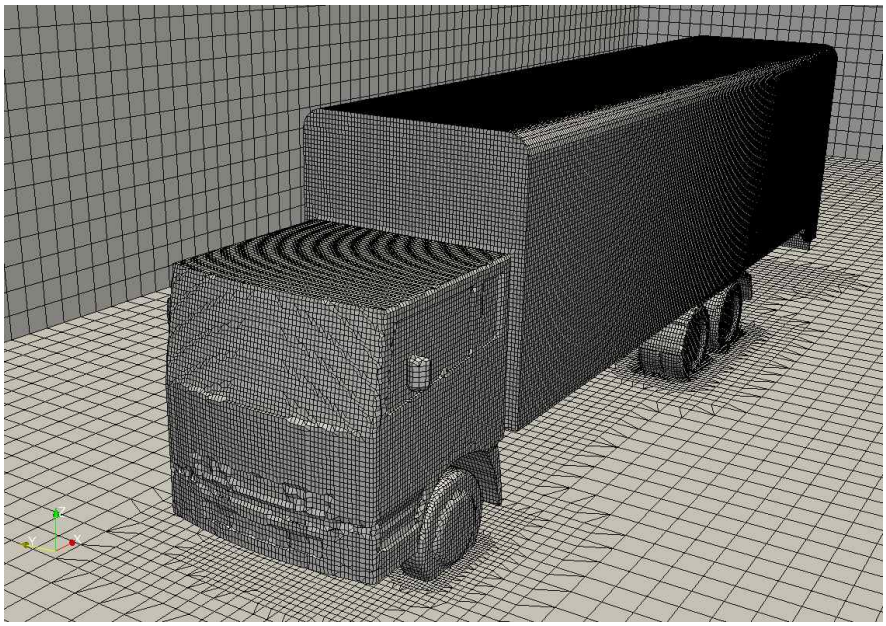
□ 수치해석 도메인

○ 수치해석 도메인 생성

- 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행
- Local refinement의 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1300~1600 만개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

○ 경계조건 및 상수

- Inlet velocity: 90km/h (25m/s)
- Outlet: local acceleration + convection = 0
- Wall(풍동 외벽, 화물차 표면): no-slip condition
- Kinematic viscosity = 1.568 x 10-5
- CFL(무차원 시간간격) = 5.0



<그림 4-9> 주행 안정성 평가를 위한 수치해석 격자 예시(15톤 화물차)

□ **격자 생성**

○ <표 4-1>과 같은 셀 개수를 가지는 계산 격자 생성

<표 4-1> 모델별 격자의 셀 개수

	15톤 모델	40ft 모델
셀 개수	약 1500만	약 1900만

○ 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행

- Local refinement의 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1500~1900만개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

나. 15톤 화물차량의 주행 안정성 평가

□ **Yaw angle이 10°일때 15ton 화물차 주위 유동**

○ 사이드 스커트(flap-type side skirt (0,30))를 부착한 15톤 화물차를 지나는 유동의 와류구조 (압력 $P/\rho U_\infty = -0.1$의 등위면을 이용하여 유동의 와류구조를 시각화)

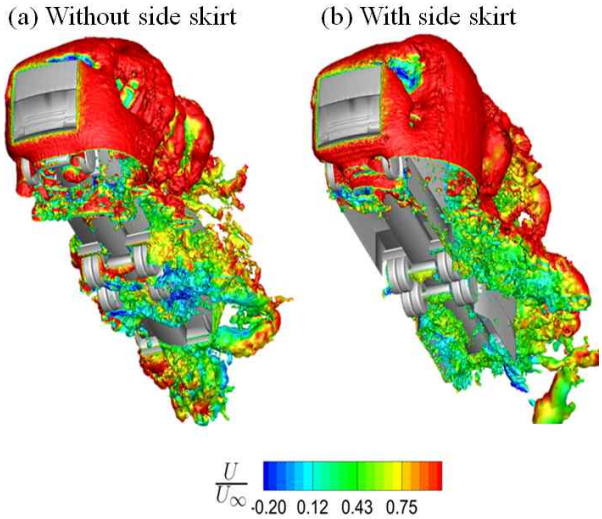
- <그림 4-10>사이드 스커트 장착 시, 화물차의 바퀴 부근에서 유동박리(flow separation)로 인한 작은에디(eddy) 와류구조가 상당량 감소함

- 사이드 스커트 장착 시, 작은 에디의 소멸로 인해 운동에너지 손실이 줄어듦

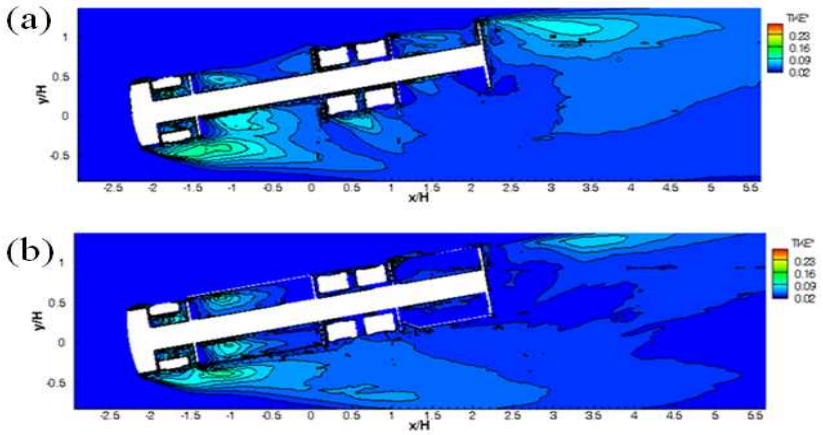
○ 사이드 스커트(flap-type side skirt (0,30))부착한 15톤 화물차를 지나는 유동의 난류 운동에너지

- 사이드 스커트 장착 시, 전부와 후부의 사이드 스커트 부근 및 화물차의 뒷바퀴 부근에서 난류운동에너지(turbulent kinetic energy)가 감소하여 화물차를 지나는 유동의 시간에 따른 변화가 작아지게 됨을 <그림 4-11>에서 확인 할 수 있음

- 난류운동에너지의 감소로 인해 화물차의 유동에 기인한 진동이 감소함



<그림 4-10> Yaw angle Φ=10°조건에서
사이드 스커트 미부착 15톤 화물차의
와류구조(a) 및 사이드 스커트 부착한 15톤
화물차의 와류구조(b) 비교



<그림 4-11> Yaw angle Φ=10°조건에서 사이드 스커트 미부착
15톤 화물차의 와류구조(a) 및 사이드 스커트 부착한 15톤
화물차의 난류운동에너지(b) 비교

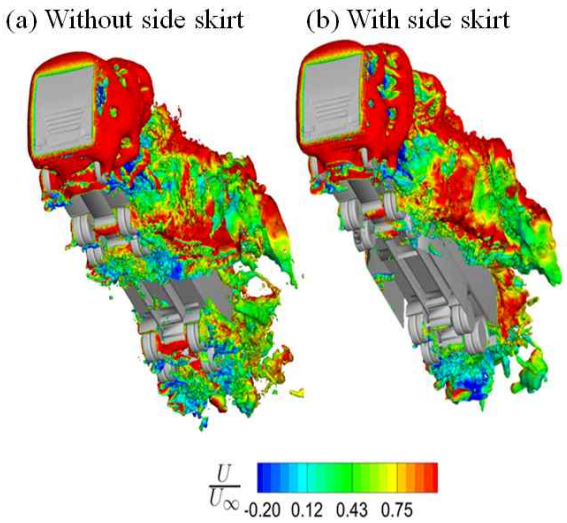
다. 40ft 컨테이너 화물차 모델의 주행 안정성 평가

□ **Yaw angle이 10°일때 40ft 화물차를 지나는 유동**

○ 사이드 스커트(flap-type side skirt (0,30))를 부착한 40ft 화물차를 지나는 유동의 와

류구조(압력 $P/\rho U_\infty = -0.1$의 등위면을 이용하여 유동의 와류구조를 시각화)

- 40ft 화물차의 경우도 사이드 스커트를 부착하게 되면, 화물차의 바퀴 부근에서 활발하게 생성되던 작은 에디의 와류구조가 상당량 감소함을 <그림 4-12>에서 확인할 수 있음. 이것은 사이드 스커트 부착에 따라 유동박리(flow separation)로 인한 작은에디들이 소멸하여 인한 운동에너지 손실이 감소함을 나타냄

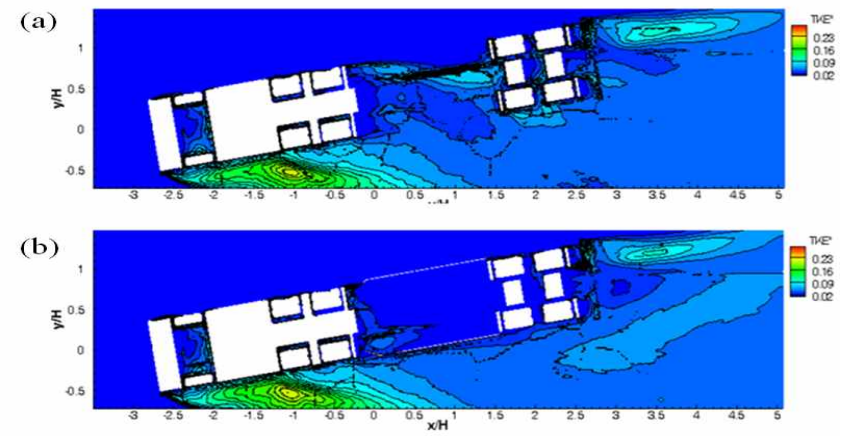


<그림 4-12> Yaw angle Φ=10°조건에서
사이드 스커트 미장착한 40ft 화물차의
와류구조(a) 및 사이드 스커트 장착한 40ft
화물차의 와류구조(b) 비교

○ 사이드 스커트(flap-type side skirt (0,30))를 장착한 40ft 화물차를 지나는 유동의 난류운동에너지

- 40ft 화물차의 경우도 15톤 화물차와 유사하게 사이드 스커트를 부착함에 따라, 사이드 스커트 부근과 뒷바퀴 부근에서 난류운동에너지(turbulent kinetic energy)가 <그림 4-13>에서 볼 수 있듯이 크게 감소함

- 난류에너지가 감소하여 시간에 따른 40ft 화물차를 지나는 유동의 변화가 작아짐. 즉, 유동에 기인한 진동이 크게 감소함



<그림 4-13> Yaw angle Φ=10°조건에서 사이드 스커트
미장착한 40ft 화물차의 난류운동에너지(a) 및 사이드 스커트
장착한 40ft 화물차의 난류운동에너지(b) 비교

라. 사이드 스커트 장착에 기인한 측력의 진동특성 변화

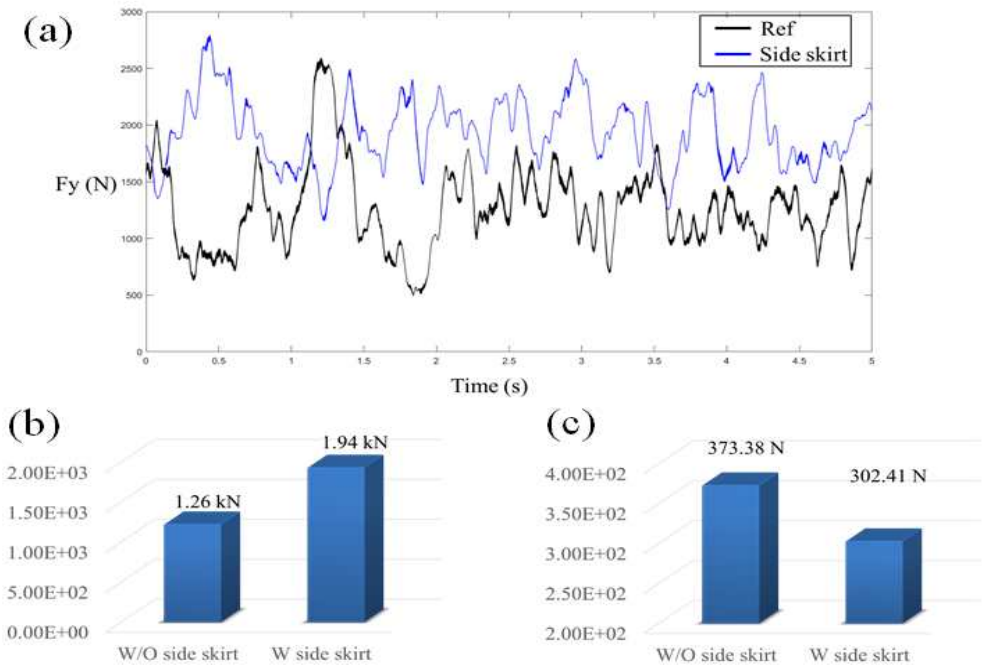
□ **측력의 시간에 대한 변화 분석**

○ 주행중인 화물차의 측면이 받는 형상저항과 전단응력의 합을 시간의 함수로 나타냄 <그림 4-14(a)>

○ 사이드 스커트 부착에 의한 단면적 증가로 인하여 평균 측력은 사이드 스커트 장착 전 1.26 kN에서 사이드 스커트 장착 후 1.94 kN으로 증가함 <그림 4-14(b)>

○ 측력의 실효값(root-mean-square)은 사이드 스커트 장착 전 373.38 N에서 사이드 스커트 장착 후 302.41 N으로 감소함 <그림 4-14(c)>

○ 화물차에 작용하는 측력의 전체적인 크기는 증가하지만, 측력에 기인한 화물차의 떨림(진동)은 감소함



<그림 4-14> Yaw angle Φ=10°조건에서 사이드 스커트 장착 전 후 40ft 화물차에 작용하는 측력의 신호(a), 사이드 스커트 장착 전 후 40ft 화물차에 작용하는 측력의 평균값(b)과 실효값(c) 비교

제2절. 냉각성능분석

1. 실험장치 및 방법

가. 실험 장치

(1) POSTECH 아음속 풍동

- 1995년 준공된 포스텍 아음속 풍동은 폐쇄형(closed circuit)으로 시험부(test section)의 크기는 높이 0.6m, 폭 0.72m, 길이 6.75m임 <그림 4-15>
- 최대풍속은 40 m/s 이며, 난류강도(turbulence intensity)는 0.08%로 운송체 주위 유동분석에 적합한 풍동임



<그림 4-15> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 특징

(2) 화물차 하부 유동 가시화 방법

○ 사이드 스커트 부착 전후의 차체 하부 유동 흐름을 관찰하고 이를 통해 항력저감에 영향을 미치는 유동구조를 정량적으로 파악하기 위하여 차체 하부 유동을 PIV(Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 분석함

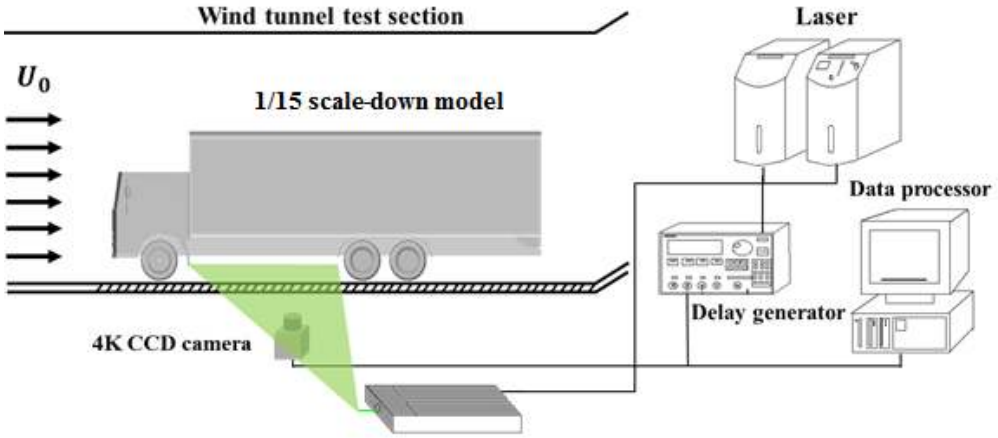
○ PIV system 구성은 다음과 같음 <그림 4-16>

- 200mJ Nd:YAG 레이저, 4Kx3K CCD 카메라, 영상처리장치, 동기장치(delay generator) 등으로 구성된 PIV 시스템이 사용됨
- 추적입자로는 올리브 오일을 사용 (입자 크기 1-3μm)
- 1mm 두께의 레이저 평면광(light sheet)을 풍동시험부 측면을 통해 수평방향으로 화물차 모델 하부를 조사함
- Two-frame cross-correlation PIV algorithm를 이용하여 속도장을 도출함
- 카메라 노출시간은 0.1ms
- Interrogation window크기는 64x64 pixel이며 50% over-lapping 하였음

○ 일정한 풍속 조건(U=10m/s)에서 실험 수행

- 풍속 조건에 상응하는 레이놀즈 수는(Re = 1.8×10^5)임

○ 사이드 스커트 부착 유/무에 따른 화물차 하부 유동을 가시화



<그림 4-16> 1/15 스케일로 축소된 15ton 화물차 모형 및 PIV 실험 장치 개략도

(3) 화물차 냉각성능 분석 실험 장치 및 실험 방법

○ 화물차 내부에서 발생하는 열은 엔진에서 발생하는 열을 대표적인 열원으로 볼 수 있음

- 화물차 엔진은 트랙터의 앞바퀴 사이에 위치하며, 동일한 위치에 열발생을 모사한 열원(heat source)을 설치하여 사이드 스커트 부착 장착에 따른 화물차 하부의 온도 변화를 측정 <그림 4-17>
- 열원(heat source)으로 사용된 heating pad는 실리콘 재질의 silicon rubber heater로 AC220V/90W 조건에서 작동함
- Thermo-swithch를 통해 heating pad 내부 온도를 150℃로 일정하게 유지하였음

○ 온도센서로는 k-type thermocouple을 사용함

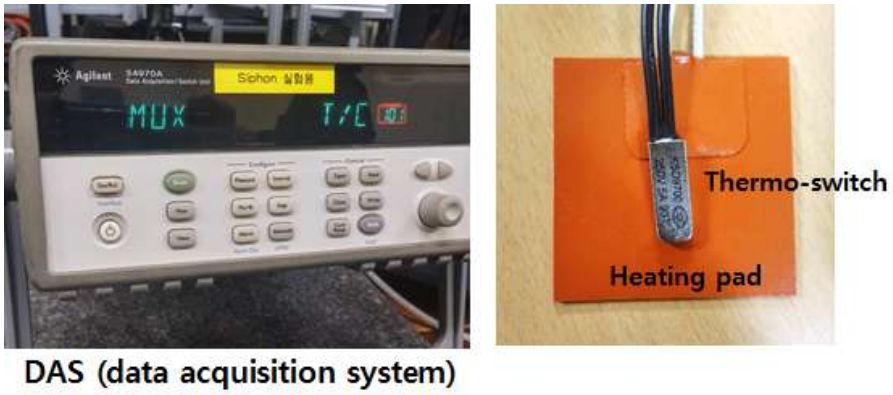
○ 화물차의 컨테이너 내부를 통해 고정된 온도센서(thermocouple)를 DAS (data acquisition system)와 연결 후, PC를 통해 온도 측정 및 데이터 수집

- 2초 당 1회 스캔(1 scan/2 sec) 방식으로 데이터 측정
- 1회 실험 당 10분, 총 5회의 반복실험을 진행. 먼저 열원에 전원을 가하지 않은 조건에서 측정한 후, 열원에 전원을 가하여 온도 변화를 확인하고 일정 시간이 경과한 후 정상상태의 온도를 측정함

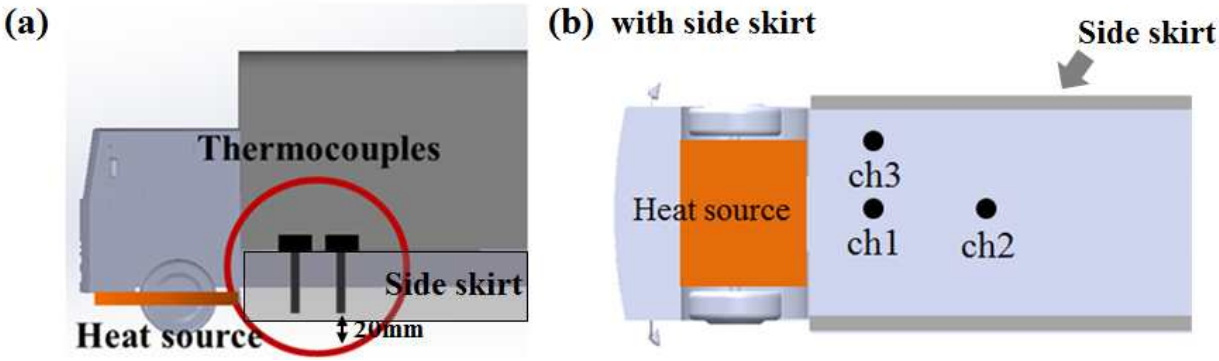
○ <그림 4-18>와 같이 ch1, ch2, ch3의 세 위치에서 온도센서(thermocouple)로 온도 측정

- Ch1, ch2는 화물차의 중심축을 따라 위치
- Ch3는 ch1과 수평선상에 위치. 각 온도센서 사이의 거리는 60mm임
- 각 온도센서는 차체 바닥면으로부터 20mm 떨어진 위치에 고정하였음

○ 일정한 풍속 조건(10m/s)에서 실험 진행



<그림 4-17> 실험에 사용된 온도측정 장치와 heat source

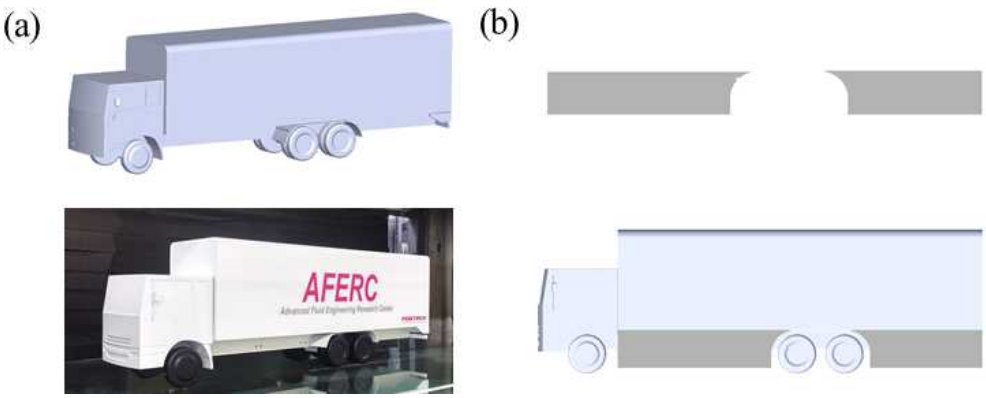


<그림 4-18> (a) 화물차 모형에 부착된 온도센서와 열원의 배치도 (b)화물차에 부착된 온도센서 및 열원의 위치

나. 실험 대상 화물차 모형

○ 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 H사의 15톤 트럭의 외형을 1/15 scale로 축소된 모형을 제작 <그림 4-19a>

○ 실험에 사용된 사이드 스커트는 레이저 평면광(light sheet)이 모형 하부로 조사될 수 있도록 투명한 아크릴로 제작 <그림 4-19b>



<그림 4-19> (a) 1/15 화물차 rendering 모델 및 모형사진 (b) 실험에 사용된 사이드 스커트 형상

2. 실험 결과

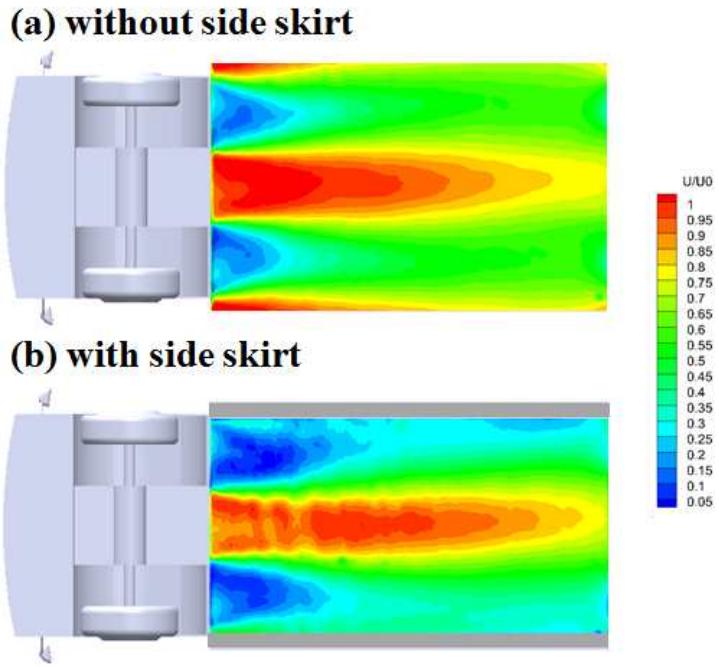
가. 하부 유동 가시화 실험 결과

○ 화물차의 하부에는 많은 구조물들이 설치되어 있으며, 화물차 하부를 지나는 유동은 이들 구조물에 의해 저항을 받으며 하부를 통과함

- 화물차 하부의 구조물 중 화물차의 바퀴가 대표적임
- 화물차의 앞바퀴에 의해 앞바퀴 주위에서 유동 박리가 일어나며 이에 기인하여 유동장 변화가 발생

○ 사이드 스커트 부착 유무에 따른 화물차 앞바퀴 주위의 속도장 U/U_0 변화를 비교 <그림 4-20>

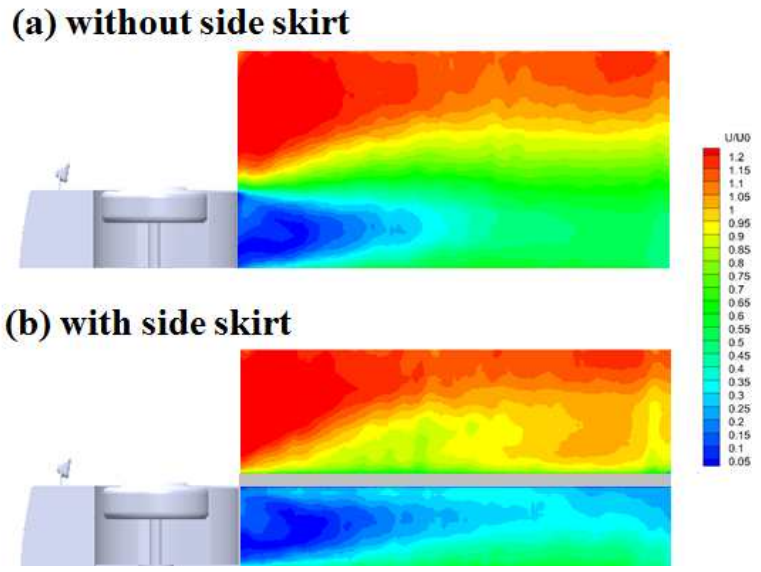
- 중심축(바퀴와 바퀴 사이 부분)의 속도장 비교
  · 중심축을 지나는 유동에서는 앞 쪽에 사이드스커트를 부착하지 않은 경우 큰 운동량을 가지고 있음
  · 유동이 하류로 나아감에 따라 운동량 손실이 상대적으로 커서 후방에 사이드 스커트가 부착된 경우 큰 운동량을 가지는 것으로 나타남
- 차체 하부 중심부를 흐르는 유동장을 비교할 때, 사이드 스커트를 부착한 경우가 상대적으로 운동량 손실이 적은 것으로 나타남
- 앞 바퀴 후방의 속도장 비교
  · 사이드 스커트를 부착하였을 때, 앞바퀴 후방에 상대적으로 낮은 속도 영역이 나타남
  · 유동이 하류로 나아감에 따라 사이드 스커트 벽면부 주변에 상대적으로 낮은 속도장 영역이 존재함
  · 전체 유동장을 비교해보면 사이드 스커트 존재로 인해 화물차 하부 유동의 운동량에 손실이 발생한다고 볼 수 있음
- 사이드 스커트를 부착한 경우, 화물차 하부에서 발생하는 운동량 손실이 커서 뒷바퀴에 걸리는 항력은 감소하는 것으로 유추할 수 있음



<그림 4-20> 화물차 모형 하부의, 앞바퀴 후방 속도장 비교. (a) 사이드 스커트 미부착, (b) 사이드 스커트 부착

○ 사이드 스커트를 부착한 경우, 사이드 스커트의 외곽에서 운동량 손실이 적게 발생함 <그림 4-21>

- 사이드 스커트는 앞바퀴 후방에서 발생하는 운동량 손실은 뒷바퀴에 가해지는 압력을 감소시켜 사이드 스커트의 외곽에서 발생하는 운동량 손실도 감소시켜 차체에 걸리는 항력을 감소시키는 역할을 하는 것으로 나타남

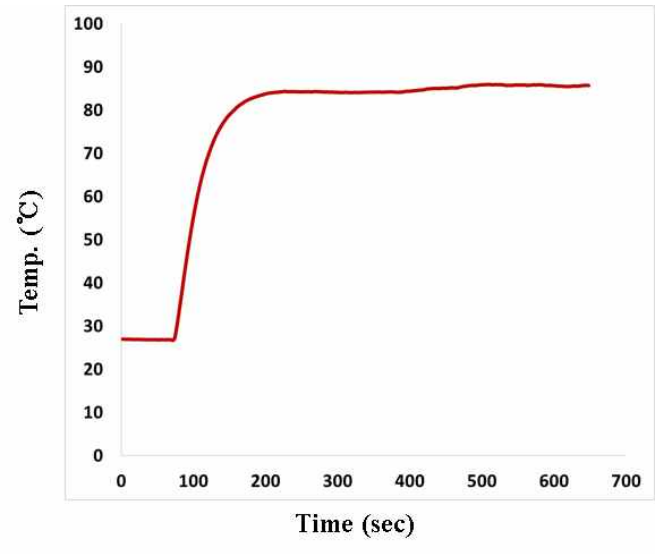


<그림 4-21> 화물차 앞바퀴 후방 속도장 비교. (a) 사이드 스커트 미부착, (b) 사이드 스커트 부착

나. 냉각성능 분석 실험 결과

○ 열원(heat source)과 온도 변화

- 열원(heating source) 내부 온도는 150℃로 일정하지만, 차체 표면 온도는 스쳐 지나가는 바람에 의한 냉각효과로 인해 낮아짐
- 열원에 전원을 공급하는 순간부터 차체의 표면 온도가 올라가기 시작하여 일정시간이 경과한 후 표면 온도가 일정하게 유지됨
- 온도가 정상상태(steady state)에 이른 후 평균 온도 측정
- 풍속 U=10m/s에서 열원(heat source)의 표면온도는 84.4±0.82℃로 일정하게 유지됨 <그림 4-22>



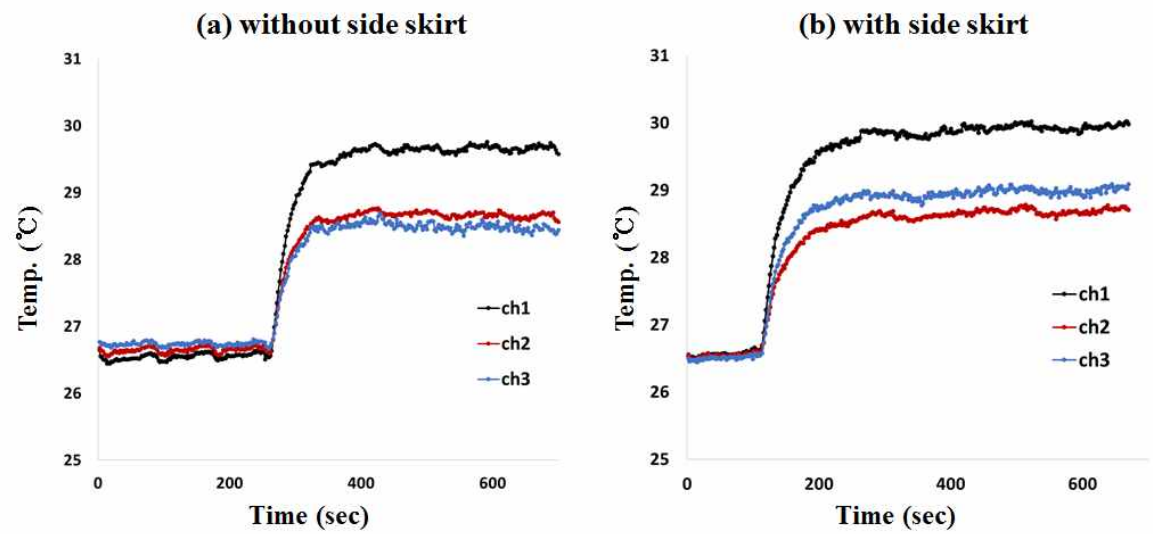
<그림 4-22> 시간에 따른 열원(heat source) 표면의 온도 변화

○ 사이드 스커트 장착 유/무에 따른 온도 변화

- 열원이 없을 때, 측정 위치(ch1,2,3)에서 일정한 온도를 유지하였으며, 열원에 전원을 공급하는 순간부터 온도가 증가하기 시작하여 온도가 정상상태에 이르는 것을 확인
- 사이드 스커트를 장착한 경우, 중심축을 따라 위치한 Ch1, Ch2에서 사이드 스커트를 장착하지 않은 경우에 비해 온도가 0.1℃ 높은 것을 확인 <표 4-2>
  · 온도 센서의 측정오차가 ±0.1℃이므로, 실질적으로 온도변화는 거의 발생하지 않는 것으로 보임
- 사이드 스커트를 장착한 경우 Ch3위치에서는 사이드 스커트를 장착하지 않은 경우와 비교하여 0.4℃ 낮음을 확인 <표 4-2>
- 하부 유동장 분석 결과에서 사이드 스커트를 부착한 경우, 앞바퀴 후방에서 유속이 느린 영역이 증가하며, 중심축을 따라 유속의 변화는 거의 없는 것으로 볼 때, 주로 중심축을 따라 열이 전도되며 중심축에 수직한 방향으로의 열 전달은 상대적으로

적게 일어난다고 볼 수 있음

- 이로 인해 사이드스커트를 부착하였을 때 사이드 스커트 주변의 온도가 상대적으로 보다 낮게 (0.4℃) 나타나는 것으로 보임
- 사이드 스커트를 부착하면 주로 중심축을 따라 열을 전달시켜 화물차 후방으로열을 방출시키게 되므로 엔진부 및 타이어의 냉각성능 저하에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보임



<그림 4-23> 사이드 스커트 장착이 시간에 따른 하부 온도 변화에 미치는 영향
(a)사이드스커트 미부착 (b)사이드 스커트 부착

<표 4-2> 열원이 공급된 상태에서 사이드 스커트 장착 유/무에 따른 화물차 하부 위치에서의 온도 변화표

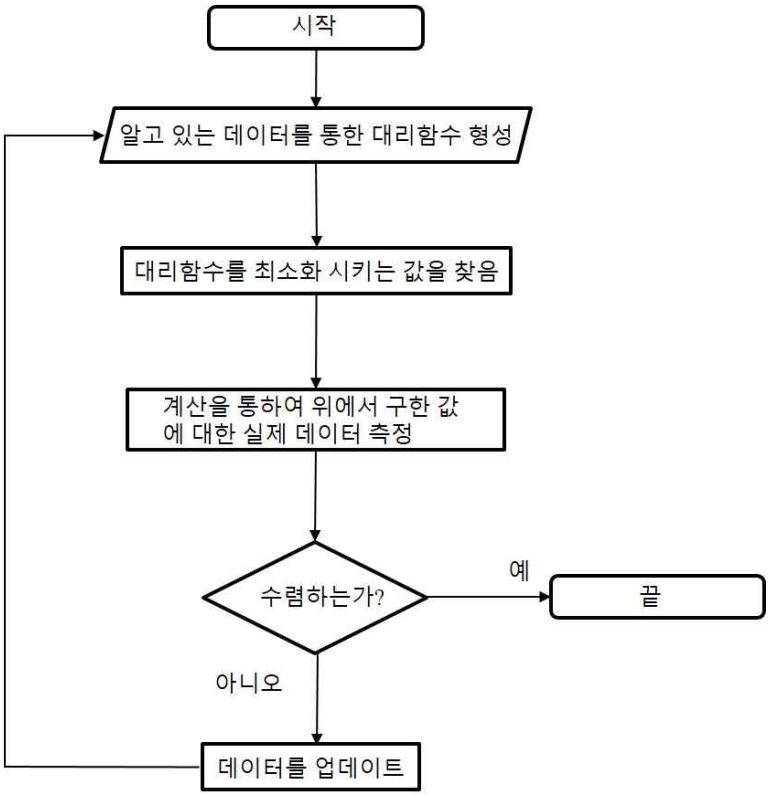
	Ch 1 (℃)	Ch 2 (℃)	Ch 3 (℃)
사이드 스커트 미부착	29.6 ± 0.1	28.4 ± 0.1	28.6 ± 0.1
사이드 스커트 부착	29.7 ± 0.1	28.5 ± 0.1	28.2 ± 0.1

제3절. 수치해석을 통한 최적화

1. 최적화 방법론

□ Surrogate Management Framework를 이용한 최적화 분석

○ 실제 연속적인 함수를 구하기 위한 계산 또는 실험 비용이 상당하므로, 실제 함수와 비슷한 형태를 가지는 대리 함수를 구하고, 구해진 대리 함수를 이용하여 최적의 값을 찾는 방법을 Surrogate Management Framework(SMF)이라고 함



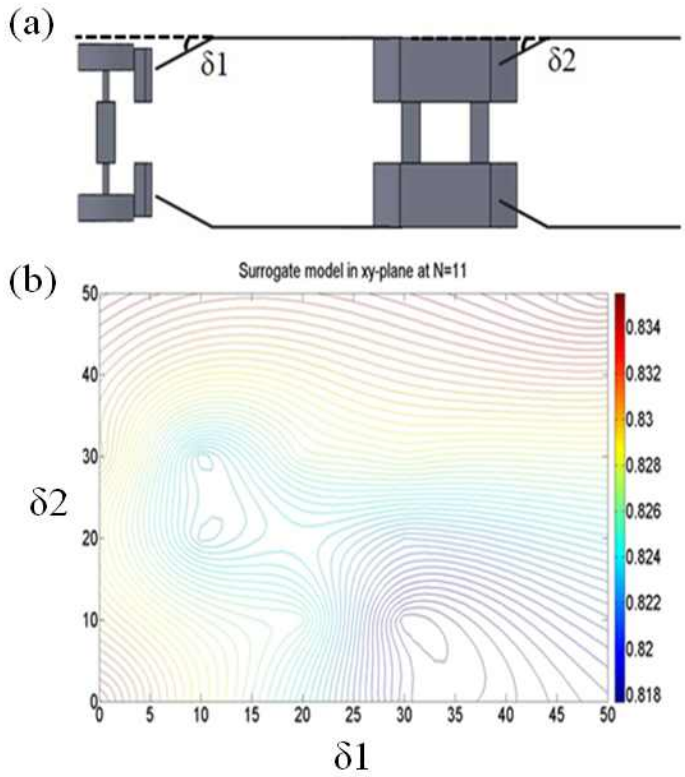
<그림 4-24> Surrogate Management Framework의 알고리즘

2. 15톤 화물차 사이드 스커트에 대한 최적화 분석

가. 사이드 스커트 각도 조절에 대한 SMF 최적화 분석 결과

○ 15톤 화물차의 사이드 스커트의 각도는 전후방의 사이드 스커트 모두에 적용 가능하도록 설계함

- 사이드 스커트의 각도가 약 δ_1=30, δ_2=10°일 때 최소 항력을 얻어낼 수 있지만 15톤 화물차의 경우, 사이드 바(bar)존재에 기인하여 전방 사이드 스커트의 각도는 δ_1=0°로 고정해야함
- 이에 따라 사이드 스커트의 각도δ_2가 약 20°에서 30°부근에서 최적의 항력 감소 결과를 얻어 낼 수 있음

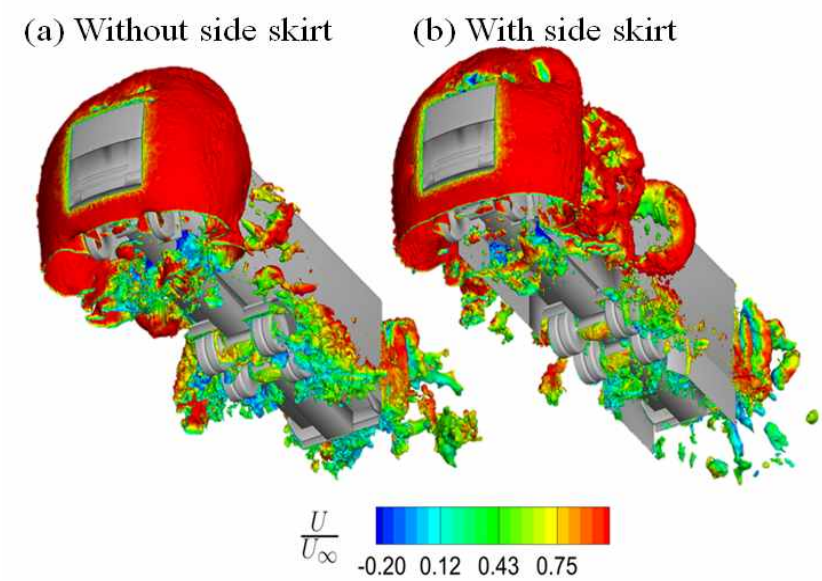


<그림 4-25> 15톤 화물차에 장착한 사이드 스커트 각도에 대한 모식도(a) 및 15톤 화물차의 Surrogate Management Framework(SMF) 최적화 결과(b)

나. δ1=0°, δ2=30° 최적 사이드 스커트의 효과에 대한 유동장 결과 (15톤 화물차)

○ 사이드 스커트를 부착한 15톤 화물차를 지나는 유동의 와류구조 (압력 $P/\rho U_\infty = -0.1$의 등위면을 이용하여 유동의 와류구조를 시각화)

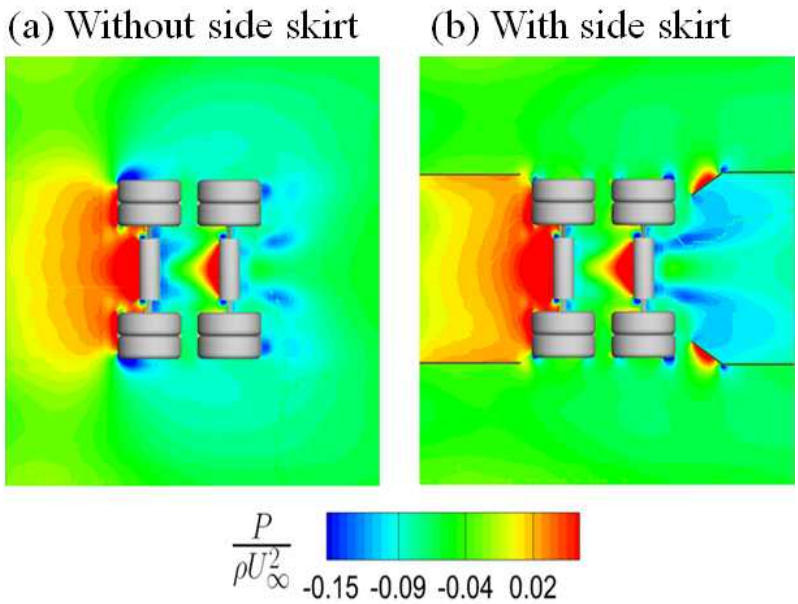
- <그림 4-26>에서 확인 할 수 있듯이 사이드 스커트를 장착한 경우, 화물차의 뒷 바퀴 부근에서 유동박리(flow separation)에 기인한 작은 에디 와류구조가 크게 감소함
- 뒷바퀴 부근의 작은 에디의 소멸로 인해 뒷바퀴 부근의 압력 강하가 감소함



<그림 4-26> 사이드 스커트 미부착 15톤 화물차의
와류구조(a) 와 최적 사이드 스커트를 부착한 15톤 화물차의
와류구조(b) 비교

○ 사이드 스커트를 장착한 15톤 화물차를 흘러지나는 유동의 뒷바퀴 부근의 평균 압력장

- 무차원 압력 $P/\rho U_\infty$분포를 -0.15에서 0.05사이의 총 30개 등고선을 이용하여 <그림 4-27>에 나타냄
- 최적화된 사이드 스커트(δ_1=0°, δ_2=30°)는 뒷바퀴의 상류 압력(upstream pressure)과 하류 압력(downstream pressure)의 차이를 완화시키며 바퀴에 작용하는 형상 저항(form drag)을 감소시킴
- 15톤 화물차의 뒷바퀴에 작용하는 형상 저항의 저감으로 인해 전체적인 항력이 감소함

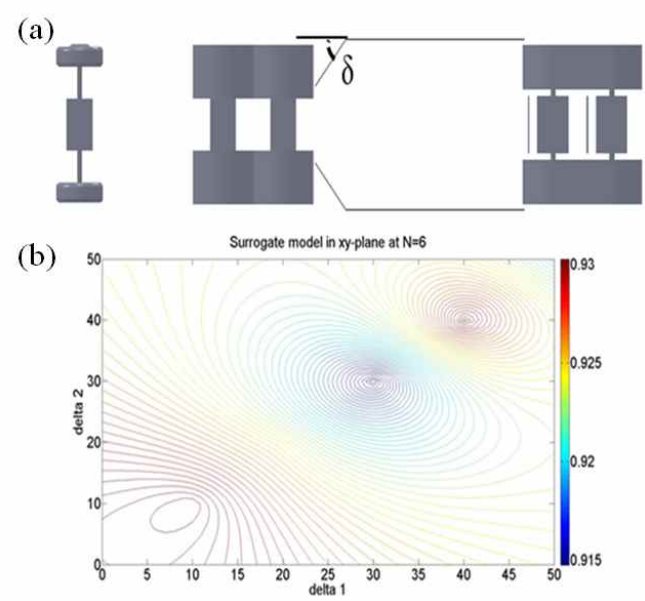


<그림 4-27> 사이드 스커트 미부착 15톤 화물차의 뒷바퀴
부근 압력장(a) 및 최적 사이드 스커트를 장착한 15톤
화물차의 뒷바퀴 부근 압력장(b)비교

3. 40ft 화물차 사이드 스커트에 대한 최적화 분석

가. 사이드 스커트 각도 조절 최적화 분석 결과

- SMF분석 결과로 부터 사이드 스커트의 각도가 약 δ=30°일 때 최소 항력을 얻어낼 수 있는 것으로 나타났음, 이에 따라 flap angle이 약 30°인 사이드 스커트 장착을 권장함

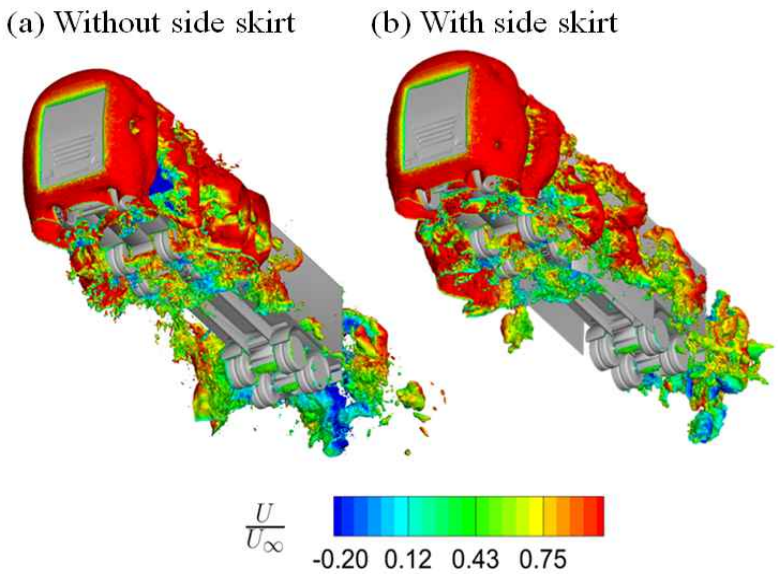


<그림 4-28> 40ft 화물차에 장착한 사이드 스커트 각도에 대한 모식도(a) 와 40ft 화물차의 SMF 최적화 분석 결과(b)

나. 40ft 화물차에 δ=30° 사이드 스커트를 장착한 경우의 유동장 결과

○ 사이드 스커트를 부착한 40ft 화물차를 지나는 유동의 와류구조(압력 $P/\rho U_\infty = -0.1$의 등위면을 이용하여 와류구조를 가시화)

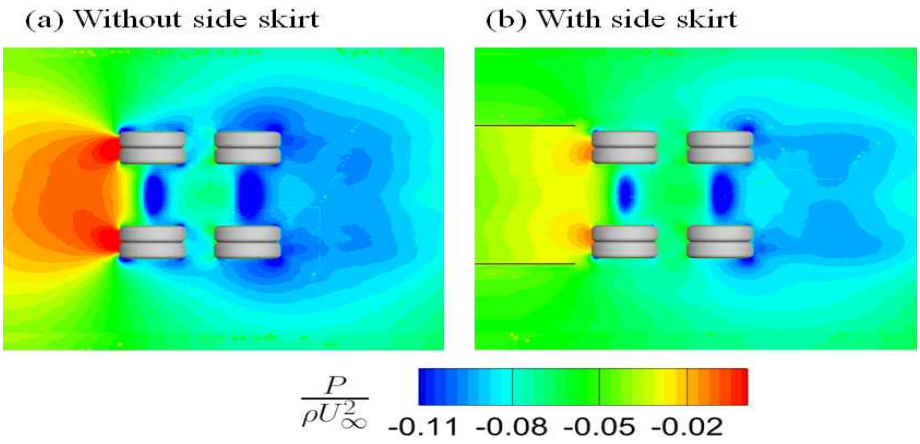
- <그림 4-29>를 보면 40ft 화물차에 사이드 스커트를 장착한 경우, 화물차의 뒷 바퀴 부방에서 유동박리로 인한 작은 에디의 와류구조 생성량이 크게 감소함
- 사이드 스커트 장착 시, 뒷바퀴 부근의 작은 에디들의 소멸로 인해 뒷바퀴 부근의 압력 강하가 감소함
- 15톤 화물차와 유사한 결과로, 사이드 스커트 부착으로 하부 유동박리의 제어를 통해 항력이 감소함을 확인하였음



<그림 4-29> 사이드 스커트 미부착 40ft 화물차의 와류구조(a) 와 최적 사이드 스커트를 부착한 40ft 화물차의 와류구조(b)비교

○ 사이드 스커트를 부착한 40ft 화물차를 흘러지나는 유동의 뒷바퀴 부근의 평균 압력장

- 무차원 압력 $P/\rho U_\infty^2$ 분포를 -0.15에서 0.05사이의 총 30개 등고선을 이용하여 <그림 4-30>에 나타냄
- 최적화된(δ=30°) 사이드 스커트는 뒷바퀴의 상류 압력(upstream pressure)과 하류 압력(downstream pressure)의 차이를 완화시키며 바퀴에 작용하는 형상 저항(form drag)을 감소 시킴
- 40ft 화물차의 뒷바퀴에 작용하는 형상 저항의 저감으로 인해 전체적인 항력이 감소함
- 15톤 화물차와 유사하게, 사이드 스커트가 40ft 화물차 뒷바퀴 부근의 상류 압력과 하류 압력의 차이를 완화시킴



<그림 4-30> 사이드 스커트 미부착 40ft 화물차의 뒷바퀴 부근 압력장(a) 및 최적 사이드 스커트를 장착한 40ft 화물차의 뒷바퀴 부근 압력장(b)비교

제4절. 다양한 조건에 대한 추가 실험을 통한 성능 개선

1. 공기역학적 성능 평가

가. 공력특성

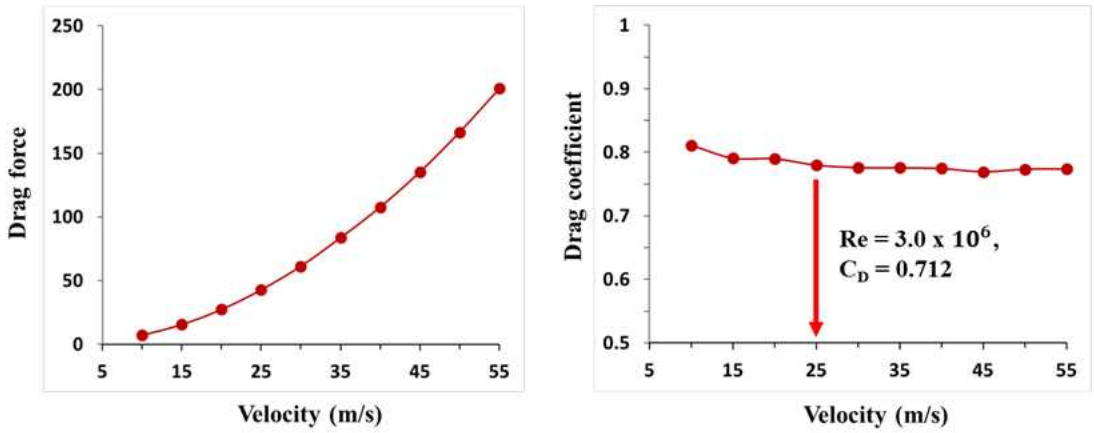
○ 공기저항을 줄이기 위한 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 55m/s 영역에서 변화시켜 가면서 차체에 가해지는 항력계수(C_D)를 측정한 결과 <그림 4-31>

○ 15톤 트럭에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함. 항력계수(C_D)는 0.712로 트럭형 차체에 대해 기존의 연구 결과들과 잘 일치함. 여기서 항력계수(C_D)는 다음과 같이 정의됨

$$C_D = \frac{Drag\,force}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

○ U_0=25m/s (=90km/h) 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 본 실험에 해당하는 레이놀즈수(Reynolds number)값은 1.1-6.3 X 10^6로 임계 레이놀즈수 (~10^5) 보다 커서 이보다 빠른 풍속에서는 항력계수가 변하지 않음

○ 이후 다른 실험변수들에 대한 실험에서는 풍속을 25m/s로 고정하고, 3회 반복 측정한 데이터를 통계처리하여 평균값을 사용하였음



<그림 4-31> 풍속에 따른 15톤 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右)의 변화

나. 표준형(standard side skirt) 및 플랩 (angled flap) 사이드 스커트 효과 비교

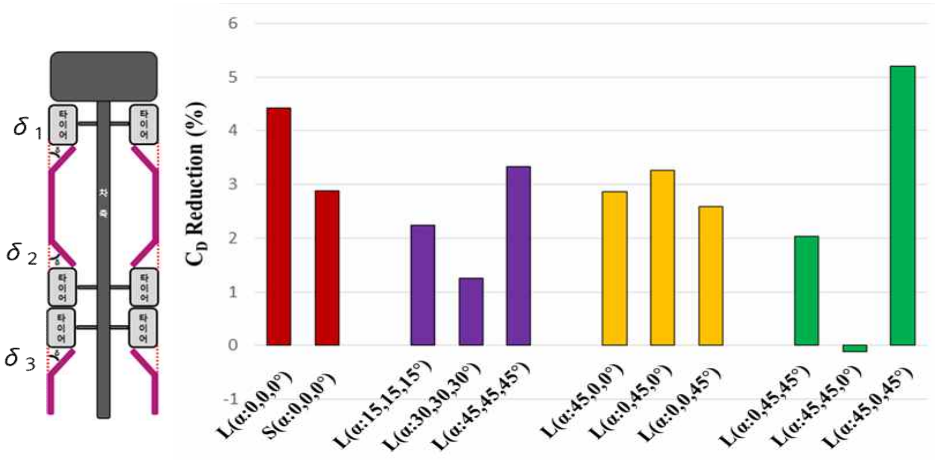
○ 기본 15톤 트럭 모델에서 안전바 (safety bar)를 제거한 후, 사이드 스커트를 장착한 경우에 대한 항력계수 변화를 <그림 4-32>에 나타냄

○ 표준형 사이드 스커트(지상고 20cm)의 경우, 현재 운행되는 안전바가 달린 기본 모

델에 비해 항력계수가 2.88% 줄어듦. 스커트의 폭을 지상고 15cm까지 넓힌 경우(이하 L형으로 표기), 항력계수는 4.42%로 감소하여 S형에 비해 공기저항이 줄어듦

○ 사이드 스커트를 장착하게 되면 차량 하부에서 발생하는 와류(주된 흐름과 반대 방향으로 소용돌이치는 흐름)의 생성을 억제함. 특히 타이어와 스커트 사이의 공기흐름을 막아 항력이 줄어드는 것으로 보임

○ 타이어와 차체 안쪽으로 일정한 각도(δ)로 꺾여 들어온 플랩이 부착된 사이드 스커트의 경우, 들임각($\delta_1,\delta_2,\delta_3$)들의 조합에 따라 항력이 줄어드는 효과가 다르게 나타남



<그림 4-32> 표준형 및 플랩형 사이드 스커트의 항력 감소 효과

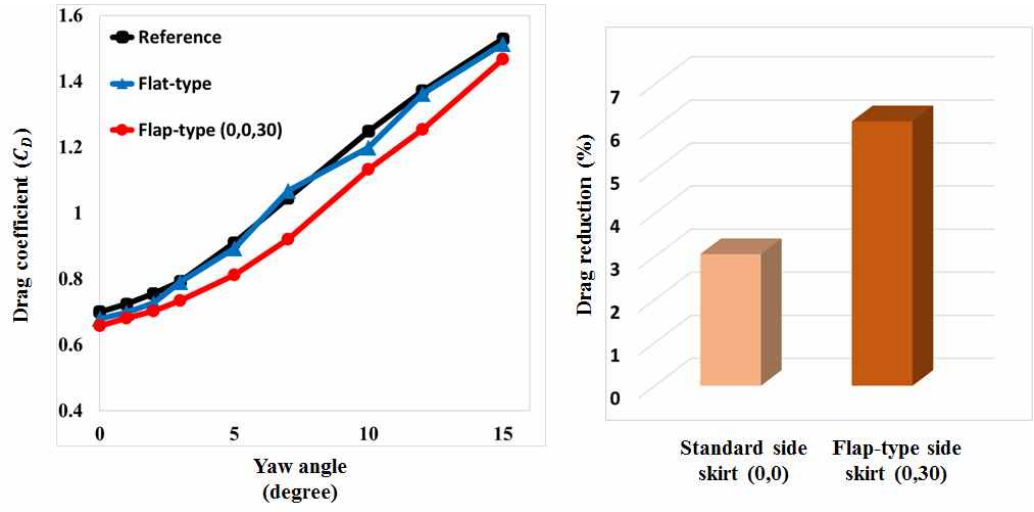
다. 최적화 결과 및 실제 적용가능성을 고려한 flap형 side skirt 적용 효과

○ SMF 최적화 분석 결과, 사이드 스커트의 각도가 δ_1=30, δ_2=10°인 조건에서 최소 항력을 얻을 수 있지만, 15톤 화물차의 경우, 차체에 고정되어 있는 안전바가 제약 조건으로 작용하여 전방 사이드 스커트의 각도는 δ_1은 0°로 고정하였음

○ 이에 따라, 사이드 스커트 들임각의 각도(δ_2)가 약 20°~30°부근에서 최적의 항력 감소를 얻을 수 있었음

○ Flap형 side skirt (0,30) 결과

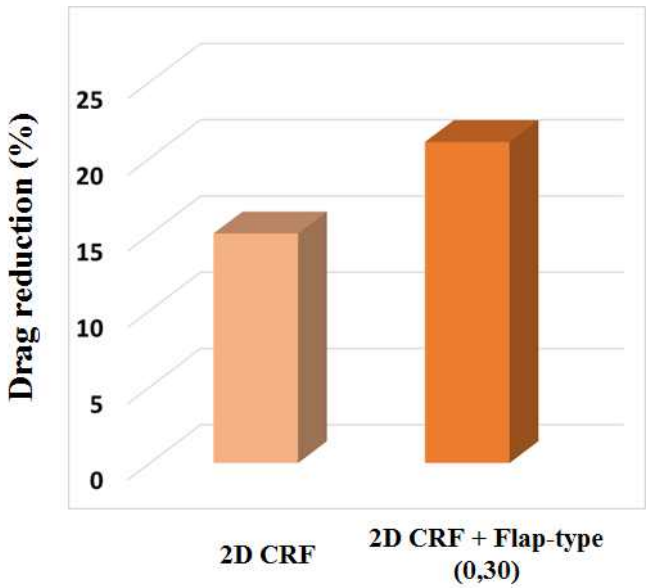
- SMF 최적화 분석 결과를 적용하여 flap형 side skirt의 들임각(δ_1,δ_2)을 (0,30)로 적용한 경우 항력계수(C_D)값이 0.658로, 기본 모델에 비해 6.1% 감소하였음 <그림 4-33>
- 이러한 결과는 들임각이 없는 표준형 사이드 스커트 (S(0°,0°,0°))의 경우와 비교하여 항력계수 감소가 2배 정도 향상되었음을 나타냄
- 이러한 항력감소 효과는 꺾인 플랩이 타이어 후방에서 생성되는 와류를 억제하고, 사이드 스커트와 플랩 안쪽에서 생성되는 압력 차이에 기인하여 주유동 방향으로 힘을 받게 되기 때문으로 보인다.



<그림 4-33> 기본형 및 flap형 side skirt를 부착한 15톤 화물차량의 항력계수(左) 및 항력 저감율(右) 변화

○ 기본형 캡루프 페어링(2D cab-roof fairing)이 적용된 기본 화물차 모델에 대한 flap형 side skirt (0,30)의 항력감소 효과 <그림 4-34>

- 국내에 운행 중인 대부분의 15톤 화물차량은 2차원 형상의 기본형 캡루프 페어링을 부착하고 운행을 하고 있기 때문에, 기본 캡루프 페어링 (2D CRF)을 부착한 상태에서 flap형 side skirt (0,30)의 항력감소효과를 확인하였음



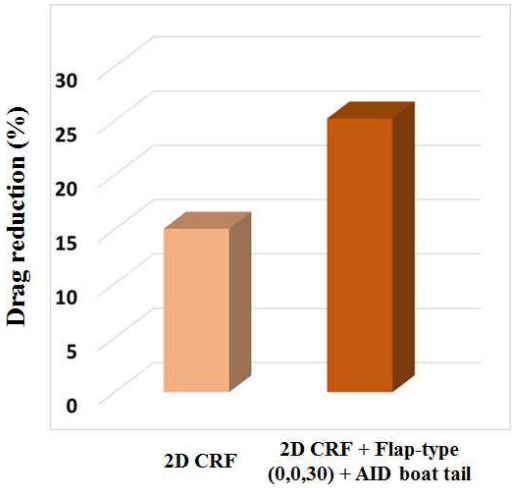
<그림 4-34> 기본형 캡루프 페어링을 부착한 15톤 화물차량에 flap형 side skirt(0,30)가 항력 저감에 미치는 효과)

- 15톤 화물차량 모델에 기본형 캡루프 페어링(2D cab-roof fairing)을 장착한 경우, 항력계수(C_D)값은 0.602로 15.1%의 항력 감소효과를 나타남
- 15톤 화물차량에 기본형 캡루프 페어링과 flap-type side skirt (0,30)을 함께 장착한 경우에는, 항력계수(C_D)값이 0.566로 21%의 항력 감소효과를 보임

- 이에 따라, 기본형 캡루프 페어링을 장착한 15톤 화물차량 모델을 기준으로 flap형 side skirt (0,30) 장치는 항력을 약 6% 감소시키는 것으로 나타남
- 이는 캡루프페어링이 장착되지 않은 기본 모델에서의 효과(6.1%)와 거의 유사한 결과로 캡루프 페어링과 사이드스커트의 항력감소효과는 서로 독립적인 것으로 나타남

○ 기본형 캡루프 페어링(2D cab-roof fairing) 및 AID boat tail이 적용된 기본 모델에 대한 flap형 side skirt (0,30) 효과 <그림 4-35>

- 기본형 캡루프 페어링(2D cab-roof fairing)과 1차년도 결과물인 AID boat tail, flap형 side skirt를 모두 부착한 경우, 이들 항력계수(C_D)값이 0.527로, 항력저감장치들이 부착되지 않은 기본 모델에 비해 총 25.6%의 항력감소 효과를 보임
- 화물차 차체의 전면부, 하부, 후단부에 작용하는 항력 감소효과는 거의 각각 독립적으로 작용하여, 이들 각각의 효과를 합한 결과가 전체 항력감소율로 나타났다. 이러한 결과로부터 개개의 유동제어들이 항력감소의 효과를 높이면 화물차의 전체 항력감소율도 따라서 줄일 수 있을 것으로 예상됨



<그림 4-35> 15톤 화물차량에 기본형 캡루프 페어링을 부착한 경우와 여기에 flap형 side skirt(0,30)와 AID boat tail을 부착한 경우 항력 저감율 비교)

제5절. 내구성 분석 및 검증

1. 수치해석을 통한 내구성 분석

가. 유동장 정보로부터 구한 압력값을 고체표면에 가하는 코드 개발

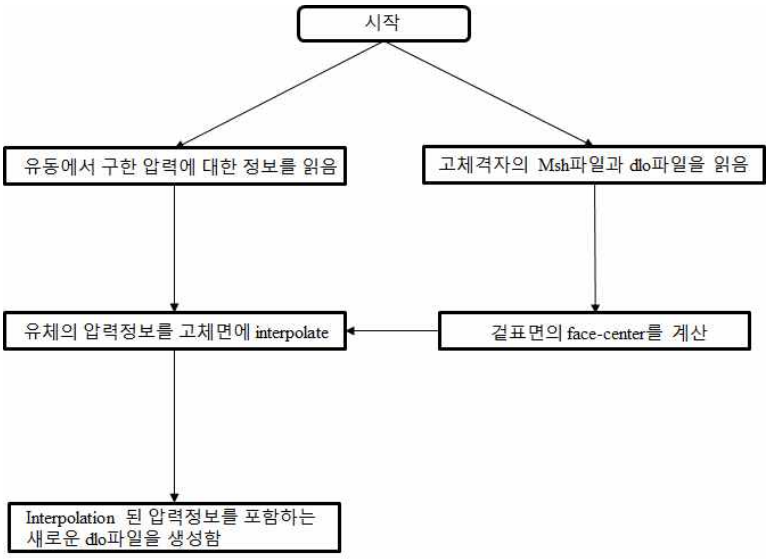
○ 유동해석에서 구한 face-center에서의 압력에 대한 정보를 얻어내기 위하여, face-center의 좌표와 압력을 (x, y, z, P)의 data로 출력함

○ 고체 표면에 압력을 부가하기 위하여, msh 형식의 고체 격자 정보와 dlo 형식의 고

체 바깥 표면에 대한 정보로부터 고체의 face-center 좌표와 고체의 외벽 표면에 해당하는 정보를 읽어냄

○ 유동해석에서 구한 유체격자의 face-center에서 압력값을 고체의 face-center에 근사시키는 코드 개발

○ 근사한 압력값을 고체의 겉 표면에 가함에 따라 유동에 기인한 압력 정보를 새로운 dlo 형식을 생성시켜 저장함



<그림 4-36> 유동에서 구한 압력 정보를 고체표면에 가하는 코드의 기본 알고리즘

나. 사이드 스커트 변형, 응력 분석 방법

○ 유한요소법을 이용한 고체 분석

- 유한요소법을 이용한 고체 분석은 Open source인 CalculiX를 이용하여 고체를 분석
- 사이드 스커트의 재료는 Carbon mat thermoplastic composites을 이용

○ 경계조건 및 상수

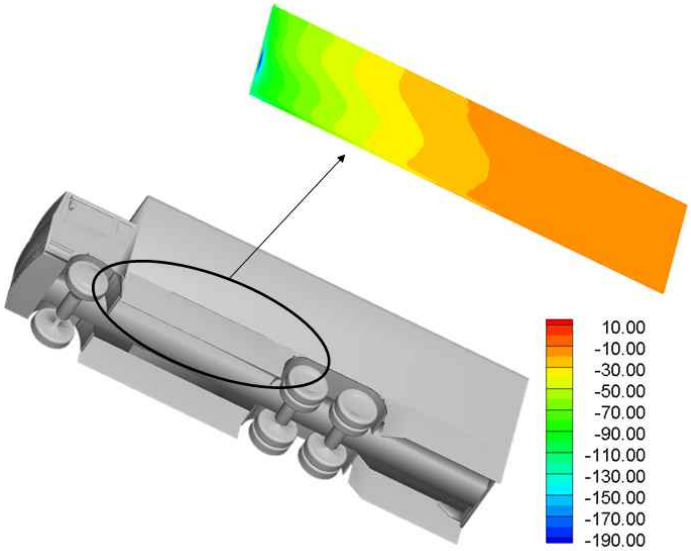
- Young's modulus: 15GPa, Poisson ratio = 0.3
- 사이드 바의 모양에 따라 사이드 스커트 고정

2. 15톤 화물차의 사이드 스커트에 대한 내구성 분석

가. 15톤 화물차의 사이드 스커트에 대한 내구성 분석

○ 15톤 화물차를 흘러 지나는 유동을 큰에디모사(large-eddy simulation)기법을 이용하여 전방 사이드 스커트에 작용하는 압력장 계산

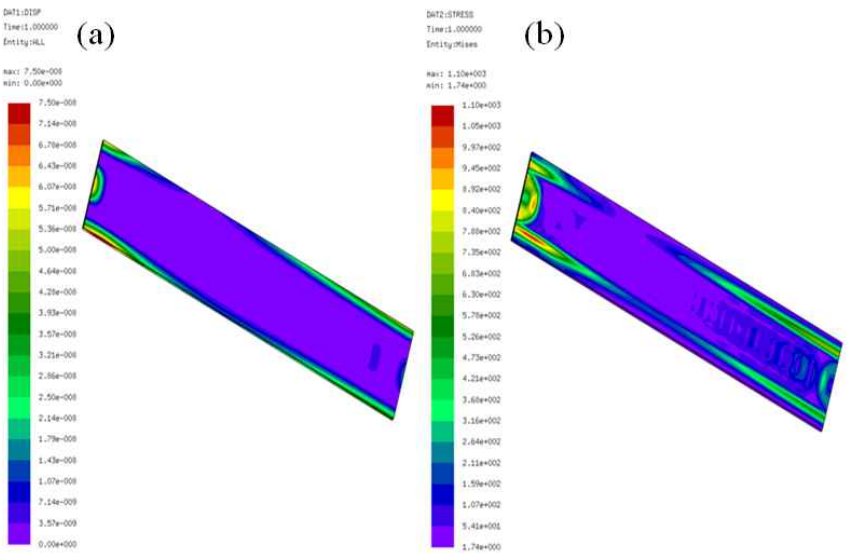
- 15톤 화물차에 부착되어있는 전방 사이드 스커트에 작용하는 최대 압력값 차이는 약 245Pa(0.0024기압)로 사이드 스커트 부근의 유속분포에 기인한 압력차가 작음



<그림 4-37> 15톤 화물차 주위 유동에 의하여
전방 사이드 스커트에 작용하는 압력 분포

○ 15톤 화물차의 전방 사이드 스커트의 변형과 von-Mises 압력장에 대한 결과

- 최대 변형 길이(Maximum displacement)는 약 7.5×10^{-8}m로 압력차에 기인한 변형은 무시할 수 있는 정도임
- 최대 von Mises 응력 (von Mises stress가 물질의 강도(strength)보다 작으면 파괴가 일어나지 않음)는 1100Pa임. 또한, Carbon mat thermoplastic composites가 견딜 수 있는 최대 압력(strength)값은 100MPa임
- 전방 사이드 스커트는 표면 작용하는 압력의 약 10^5배까지 견딜 수 있으므로 내구성에 전혀 문제가 없음

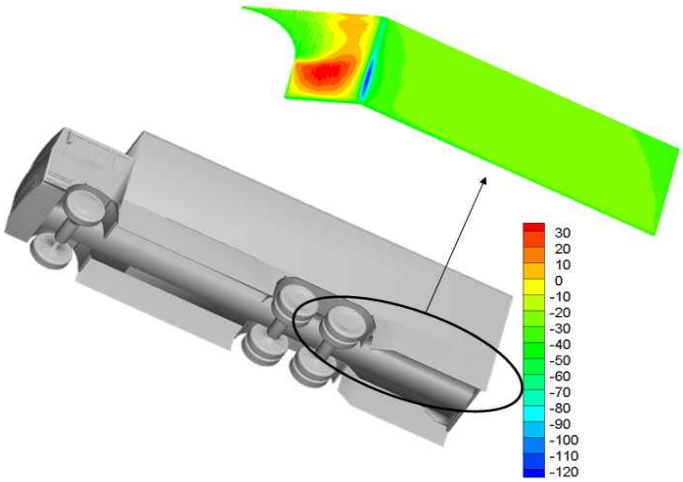


<그림 4-38> 유동에 의해 전방 사이드 스커트가 변형되는
양(a)과 전방 사이드 스커트에 가해지는 압력분포(b)

나. 15톤 화물차의 후방 사이드 스커트에 대한 내구성 분석

○ 15톤 화물차를 흘러 지나는 유동을 큰에디모사(large-eddy simulation)기법을 이용하여 후방 사이드 스커트에 작용하는 압력장 계산

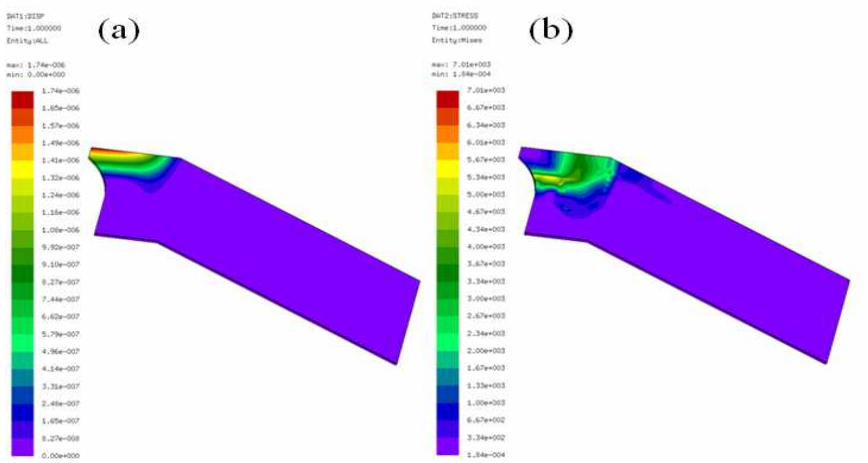
- 15톤 화물차에 부착되어있는 후방 사이드 스커트에 작용하는 최대 압력값 차이는 약 183Pa(0.0018기압)으로 사이드 스커트 부근의 유동에 기인한 압력차가 작음



<그림 4-39> 15톤 화물차를 주위 유동에 의하여
후방 사이드 스커트에 작용하는 압력 분포

○ 15톤 화물차의 후방 사이드 스커트의 고체 변형 장과 von-Mises 압력장에 대한 결과

- 최대로 변형되는 길이(maximum displacement)는 약 1.7×10^{-6}m로 유동의 압력차에 기인한 변형은 무시할 수 있는 정도임
- 최대 von Mises 응력은 7010Pa임. 또한, Carbon mat thermoplastic composites이 견딜 수 있는 최대 압력값은 100MPa임
- 후방 사이드 스커트는 표면에 작용하는 압력의 약 10^4배까지 견딜 수 있기 때문에 내구성에 전혀 문제가 없음



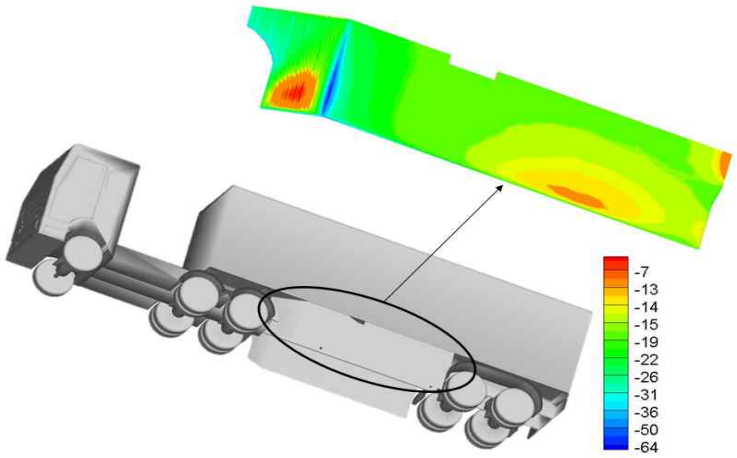
<그림 4-40> 유동에 의해 후방 사이드 스커트가 변형되는
양(a)과 후방 사이드 스커트에 가해지는 압력분포(b)

3. 40ft 화물차 사이드 스커트에 대한 내구성 분석

가. 40ft 화물차의 사이드 스커트에 대한 내구성 분석

○ 40ft 컨테이너 트럭을 흘러 지나는 유동을 큰에디모사(large-eddy simulation)기법을 이용하여사이드 스커트에 작용하는 압력장 계산

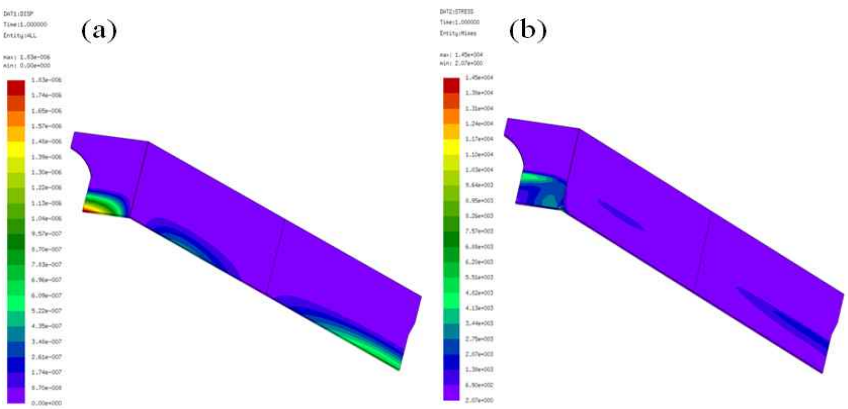
- 40ft 화물차에 부착되어 있는 후방 사이드 스커트에 작용하는 최대 압력값 차이는 약 87Pa(0.0086기압)으로, 사이드 스커트 부근 유동에 기인한 압력차가 작음



<그림 4-41> 40ft 컨테이너 트럭을 흘러 지나는
유동에 의해 사이드 스커트에 작용하는 압력분포

○ 40ft 컨테이너 트럭에 부착된 사이드 스커트의 고체 변형과 von-Mises 압력장

- 최대 변형 길이(maximum displacement)는 약 1.83×10^{-6}m로 유동에 기인한 압력차에 의한 변형은 무시할 수 있는 정도임
- 최대 von Mises 응력은 14500Pa임. 또한, Carbon mat thermoplastic composites가 견딜 수 있는 최대 압력은 100MPa임
- 사이드 스커트 표면에 작용하는 압력의 약 6000배까지도 견딜 수 있어 사이드 스커트의 내구성에 전혀 문제가 없음



<그림 4-42> 차체 주위 유동에 기인하여 사이드 스커트가
변형되는 양(a)과 사이드 스커트에 가해지는 압력분포(b)

4. 사이드스커트 내구성 검증

가. 실차운행 Test Bed 사이드 스커트에 대한 내구성 분석

○ 자재 및 부자재의 내구성 검증을 위해 테스트 배드 구축 차량 2종을 지속 운행

○ 각 차량의 자재 및 부자재의 파손은 1년간 발생하지 않음

<표 4-3> TEST BED 현황

	DHL	㈜명일
차종	4.5톤 윙바디	14.5톤 윙바디
운행구간	인천공항↔온양	전라도광주↔남양주
일평균 운행거리	260 km	640 km
연평균 운행일수	260일	300일
기존연비	약 4.8km/h	약 4.0km/h
부착사진		

○ 4.5톤 윙바디 차량의 시계열적 사진 비교를 통한 내구성 검증

- TestBed 차량 중 4.5톤 윙바디 차량의 장착 후와 1년간 4개월 단위로 내구성을 확인한 결과 어떠한 파손 또는 기능상 이상이 발견되지 않음
- 사이드스커트의 판넬 및 경첩·리벳·볼팅 등의 자재 및 부자재 상태 매우 양호

· 장착 직후



<그림 4-43> 4.5톤 윙바디 장착 직후

· 장착 후 4개월



<그림 4-44> 4.5톤 윙바디 장착 후 4개월 후

· 장착 후 8개월



<그림 4-45> 4.5톤 윙바디 장착 후 8개월 후

· 장착 후 12개월



<그림 4-46> 4.5톤 윙바디 장착 후 12개월 후

○ 14.5톤 윙바디 차량의 시계열적 사진 비교를 통한 내구성 검증

- TestBed 차량 중 14.5톤 윙바디 차량의 장착 후와 1년간 4개월 단위로 내구성을 확인한 결과 어떠한 파손 또는 기능상 이상이 발견되지 않음
- 사이드스커트의 판넬 및 경첩·리벳·볼팅 등의 자재 및 부자재 상태 매우 양호

· 장착 직후



<그림 4-47> 14.5톤 윙바디 장착 직후

· 장착 후 4개월



<그림 4-48> 14.5톤 윙바디 장착 후 4개월 후

· 장착 후 8개월

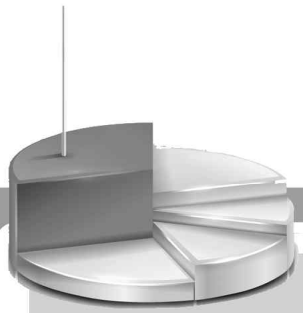


<그림 4-49> 14.5톤 윙바디 장착 후 8개월 후

· 장착 후 12개월



<그림 4-50> 14.5톤 윙바디 장착 후 12개월 후



제5장 보트 테일 조사 분석 및 설계

제1절 국내외 기술현황/동향 분석

제2절 시장성조사 및 실용화 전략

제3절 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치

제4절 보트 테일 설계 및 제작

제5장. 보트 테일 조사 분석 및 설계

제1절. 국내외 기술현황/동향 분석

1. 국가 연구개발사업 동향

○ 현재, 중소기업청과 지식경제부에서 시행한 2개의 유사연구가 진행되고 있음

<표 5-1> 공기저항 저감기술 유사 연구

부처명	사업명	과제명	비 고
중소 기업청	산학연공동기술 개발	최적화기법에 따른 탑차용 초저 공기저항계수를 갖는 Air Spoiler 개발	▪ 공기역학적 특성을 교려한 최적화된 air spoiler 개발 ▪ 가벼운 소재를 이용한 초경량의 air spoiler 개발
지식 경제부	그린카 등 수송시스템 산업원천 기술개발	능동형 VTMS 융합제어기술	▪ 능동형의 전방 air flap과 후류 제어 기술(synthetic jet, wake blowing) 개발 ▪ 저공력 차량용 차체 형상 설계 및 모델링 기술 개발

2. 관련 기술 현황 및 동향

가. 국내 기술 현황

- 국내의 연구들을 종합 해 볼 때, 트럭의 공기 저항 저감을 위해 수치해석적으로 접근하고 있는 논문의 수가 매우 적고, 기 진행된 수치해석 연구의 경우도 정량적인 결과들이 도출되어 있지만, 실제 실험결과와의 비교 분석 및 검증이 이루어지지 않은 경우가 대다수이기 때문에, 정성적인 분석 외에, 정확한 값을 도출하는데 난점이 있음
- 임의로 선택된 형상을 통해 수치해석이 많이 진행되었지만, 해석 결과와 물리적인 접근에 의한 최적화된 형상에 대한 연구가 부족
- 실험적 연구 관점에서 보았을 때, 국내에서는 실험적 연구가 거의 이루어지지 않았으며, 이루어진 실험 또한 유동 가시화 실험으로 정량적인 연구는 전무하다. 따라서 현재까지 이루어진 수치해석적 연구는 실험적으로 검증 되지 않은 연구 결과임

나. 국외 기술 현황

- National Research Council of Canada(NRC)에서 진행한 사업으로 9m X 9m 풍동에서 실제 모델로 항력저감장치들의 효과를 실험을 통해 밝힘. 여러가지 항력저감장치들의 항력과 연간 연료소비 감소량에 대해 실제 운행을 기반으로 실험적 결과 도출
- 국외의 트럭의 수치 해석에 관한 연구들을 종합해 보면, 거의 대부분 실험 결과가

있는 GTS, GCM 및 Ahmed body 형상을 이용하여 계산을 수행한 것을 알 수 있음

- RANS의 여러 난류 모델을 이용해 트럭의 주위의 유동을 계산한 결과를 실험과 비교, 분석하는 경향이 있으며, 난류를 계산하는데 LES나 DES등을 도입하려는 시도가 많아지고 있는 추세임
- 트럭에서의 공기 저항 감소 기구의 효과를 알아보기 위해 가장 구체적인 형상인 GCM을 정렬격자계로 구성하고, LES로 해석한 내용은 아직까지 없음. 이것은 그리드 작성의 난해함과 계산시간의 부담으로 인한 것으로 생각됨
- 국외의 트럭의 실험적 연구들을 종합했을 때, NRC에서 진행한 프로그램이 가장 대표적이며, 실차 모델을 이용하여 공기저항 저감장치를 부착한 후 항력 및 연간 연료 소비 감소량에 대해 조사하여 실험적 데이터를 구축하였음.
- 갭 페어링, 보트 테일, 스커트, 언더바디 페어링 등 매우 다양한 항력 감소장치들의 효과를 실험적으로 확인하였으나, 차종 및 운행환경에 따른 영향을 많이 받기 때문에 이 실험결과를 그대로 고려하기엔 무리가 있음

다. 국내외 기술 동향

○ 본 주제와 관련이 있는 논문은 149개로 최종 집계됨. “Aerodynamics”로 검색된 관련 논문이 87건으로 가장 많았으며, 그 다음으로는 “Drag reduction”(52건)과 “Resistance reduction”(5건)으로 그 뒤를 잇는 추세임

○ 국내와 국외를 포함하여 공기저항 저감장치 기술 관련 연구 논문 발표가 1976년도부터 시작되어 현재까지 꾸준히 발행되어 왔고, 공기역학 관련 논문이 평균적으로 매년 30% 이상을 차지하고 있으며 항력감소 관련 논문이 그 다음으로 높은 비중을 차지하고 있음

- 국내의 경우 2000년대 이전까지 항력 감소 관련 논문이 주를 이루고 그 이후 공기저항 감소 관련 연구가 진행되어 오다가 2006년 이후 현재까지는 공기저항 저감장치 기술 관련 논문이 발행되지 않고 있음
- 국외는 국내와 다르게 현재까지 꾸준히 항력 감소 관련 논문이 발표되고 있으며, 그 다음으로 공기저항 관련 논문이 주를 이룸

○ 국내의 연구 주제로는 항력감소 기술과 공기역학 기술에 관한 논문이 가장 많으며 항력에 대한 연구는 최근 들어 주춤해지는 반면, 국외에서는 항력 감소에 관한 내용이 가장 많음. 전반적으로 화물차 공기역학 및 공기저항 저감장치 기술 개발은 국내보다 국외에서 연구가 더 활발히 진행되고 있음

○ 국내외 기간별 논문 발표는 국내의 경우 가장 최근 10년 기간인 2001년부터 2010년까지의 논문의 양이 가장 많음을 확인할 수 있으며, 국외도 2001년부터 2010년 사이의 기간에 가장 많은 연구가 이루어졌음

- 1980년대 이전부터 최근까지의 연구 동향을 보았을 때, 2000년대 이후로 공기저항 저감기술에 대한 관심이 높아지고 있음

○ 키워드별로 살펴보았을 때 항력 감소(52건)가 가장 관심이 많았던 연구 주제였고 다음으로 공기저항(5건) 순임

- 국외와 국내의 경우에도 전체적인 논문 동향과 동일하게 연구가 진행되었으나, 국외와 국내의 논문 건수의 차이로 보아 국외 연구가 국내보다 더 활발한 것으로 파악됨

○ 2001년부터 최근까지 국외 연구가 가장 활발한 시기이나 이와 다르게 국내에서는 2000년도 이후 본 연구과 관련된 분야의 논문이 줄어들고 있는 추세임

3. 국내외 관련 기술 수준 및 특허 동향

가. 국내 기술개발 수준 분석

○ 화물차량의 공기저항 및 공기와류 저감장치의 기술은 최고수준 대비 21~40% 수준으로 분석되며, 해당기술의 최고수준은 미국이 보유

- 미국은 외부충격 및 온도변화에 강한 열가소성 합성플라스틱을 사용함

○ 국내 기술수준 및 기술 난이도를 고려할 때 이 분야 국내기술은 태동기(embryonic)로 평가되며 기술 실현은 2015년 이후에나 가능할 것으로 예측됨

<표 5-2> 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발수준

항목	기술개발수준						
국내기술수준	0%~20%	21%~40%	41%~60%	61%~80%	81%~100%		
		○					
최고기술보유국 및 최고기술수준	한국	미국	일본	영국	프랑스	독일	기타 (기입)
		○				○	
국내기술성숙도	태동(Embryonic)	성장(Pacing)	핵심(Key)	기반(Base)			
	○						
국내기술실현 예측시기	실현 예측시기 : 2015 년 이후						

나. 국외 기술개발 수준 분석

○ 세계적으로 해당 기술의 최고기술 보유국은 미국으로 파악됨

- 미국의 기술기준이 높게 나타난 것은 80년대부터 체계적인 개발과 지속적인 투자를 통해 완성도를 높이고, 고유가와 미국 정부의 온실가스 감축 의지 등과 같은 외부적인 요인으로 인하여 시장이 급속히 성장하였기 때문으로 파악됨

○ 해당 기술은 국내에서 연구된 사례가 거의 없으나, 국제적인 시류변화에 따라 조만간 핵심기술로 발전할 수 있는 장래성이 있는 것으로 판단됨

- 이 분야는 기술적 장벽이 비교적 높지 않을 것으로 판단되며, 단기적인 집중투자를

통해 핵심 기술의 개발이 가능한 분야로 판단됨

○ 해당기술은 본 연구 과제의 진행에 따라 빠르면 2015년부터 순차적으로 실현 가능할 것으로 판단됨

제2절. 시장성조사 및 실용화 전략

1. 국내외 시장 및 산업동향 조사

가. 물류기업 동향

○ 종합물류인증기업을 기준으로, 국내 물류기업의 매출액은 26조 1,066억 원('12년 결산 기준) 수준이며 34개 인증기업의 평균 매출액은 7,678억 원임

- 전년대비 매출액(원화기준)이 국내법인과 해외투자법인이 각각 11.08%, 1.87% 증가하였으며, 총 물류매출액은 전년대비 9.19% 증가하였음

<표 5-3> 종합물류인증기업의 물류사업 매출액

(단위 : 백만 원, %)

구 분	국내법인	해외투자법인[1]	합계	평균
2011년	19,005,693	4,902,614	23,908,306	703,185
2012년	21,112,335	4,994,240	26,106,575	767,840
전년대비 증가율(%)	11.08	1.87[2]	9.19	9.19

주 : 1) 해외투자법인의 물류사업 매출액은 국내 물류기업이 보유한 해외투자법인의 지분율을 곱하여 산정하였음

2) 해외투자법인 매출은 2011년 41.6억 달러에서 2012년 46.2억 달러로 11.1% 증가하였으나, 환율 하락(1180원/$ →1082원/$)에 따라 원화 기준 증가율은 1.87% 증가에 그침

자료 : 『종합물류기업 인증 동향』, 한국교통연구원, 2013.10, p.96

○ 종합물류인증기업의 총 종업원 수는 18,886명임

○ 물류매출액 규모가 1,000억 원 이상인 5개 종합물류인증기업 중 3개 기업은 총 6,754대의 차량을 활용하고 있음

- 자산대장에 등록된 차량(보유)과 위수탁/지입 차량(확보)의 비율은 각각 74%, 26%임

- 차량별로 구분했을 때, 1~3톤 미만 차량이 41.9%로 가장 많고, 12톤 이상 차량(24.7%), 트레일러 40FT(14.2%)가 그 다음으로 많음

<표 5-4> 주요기업 차량 보유 현황

(단위 : 대, %)

구분	보유	확보	합계	비율
1톤 미만	43	192	235	3.5%
1~3톤 미만	1741	1090	2,831	41.9%
3~5톤 미만	55	22	77	1.1%
5~8톤 미만	162	12	174	2.6%
8~10톤 미만	45	22	67	1.0%
10~12톤 미만	277	36	313	4.6%
12톤 이상	1318	347	1,665	24.7%
트레일러 20FT	311	4	315	4.7%
트레일러 40FT	959	0	959	14.2%
트레일러 평판	118	0	118	1.7%
합계	5,029	1,725	6,754	100%

주 : 트랙터와 트레일러의 경우 1:1로 매칭하여 12톤 이상 1대로 산정
자료 : 각 기업 내부자료 (해당기업 요청에 의해 기업명 미공개), 2013

나. 일반화물운송시장(차주) 동향

○ 다양한 형태의 화물자동차 중 본 기술 적용 대상이 되는 트레일러 차량, BCT 차량 등이 포함된 일반화물차량(5t이상 화물자동차)의 운송시장 현황을 분석함

- 분석 자료는 『화물운송시장 동향(한국교통연구원 화물운송시장정보센터)』 중 2013년 3/4분기 자료를 활용하였음

○ 일반화물차량의 일평균 차량운행여건을 살펴본 결과, 월평균 운행일수는 23.5일로 전년대비 0.7일 증가하였고 일평균 운행횟수는 1.6회로 전년과 동일하며 혼적운행 비율은 2.3으로 전년대비 0.1줄었음

○ 일평균 총 운행거리는 355.7km이고 적재운행 비율이 약 70%이고, 공차운행 비율은 약 30% 수준임

○ 일반화물차량은 월평균 11.4회 주유하고, 1회 주유 시 평균적으로 233ℓ를 주유하는 것으로 조사되어 전년대비 각각 0.4회, 2ℓ줄었음

○ 일반화물차량의 평균 연비는 3.5km/ℓ이로 전년대비 0.2km/ℓ증가하였으며, 일평균 운행속도는 44.9km/h로 전년대비 1.0km/h 증가하였음

- 전반적으로 전년대비 연비가 증가한 것은 화물자동차 제조 기술의 발전과 함께 고유가 시대에 맞춰 화물자동차 차주들이 연비 절감을 위해 많은 노력을 기울이고 있는 것으로 판단됨

- 컨테이너 차량, 기타트레일러 차량의 연비가 각각 3.3km/ℓ, 3.1km/ℓ로 가장 낮은 수준임

- 운행속도는 BCT 차량(49.4km/h)과 컨테이너 차량(48.8km/h)이 가장 높은 수준임

<표 5-5> 일반화물차량의 차종별 연비 및 운행속도

(단위 : km/ℓ, km/h)

구 분	연도	컨테이너	BCT	탱크로리	카 고 형	기타트레일러	평 균
연 비	2012	3.2	3.6	2.8	3.6	2.9	3.3
	2013	3.3	3.6	3.2	3.8	3.1	3.5
일평균운행속도	2102	49.4	47.0	27.7	47.6	40.3	43.9
	2013	48.8	49.4	35.8	47.5	36.4	44.9

주 : 3/4분기 기준 수치임

자료 : 『화물운송시장 동향』, 제3호, 3/4분기, 통권 35호, 한국교통연구원 화물운송시장정보센터, 2013, p.76

○ 국내 운행 중인 트레일러는 40ft 트레일러가 90~95%를 차지하고 20ft 트레일러 비율은 5~10% 수준임

다. 주요 제조기업 동향

○ 화물운송 부문에서 발생하는 온실가스 및 에너지 소비절감이 핵심 기술개발의 성과로 제시되면서 연비 개선 및 운송 효율화를 통한 물류비용 절감에 힘쓰고 있음

○ 국내 대규모 기업 중 하나인 삼성TESCO(홈플러스)는 '06년 대비 '20년까지 이산화탄소(CO_2)발생량 50% 감축, 환경부의 중요 환경 정책에 적극적으로 동참, 그린스토어(친환경 점포) 확대, PB(자사 브랜드) 상품 '탄소성적표지' 인증 및 상품홍보와 구매 고객 인센티브 제공, '탄소성적표지'제도 등 주요 환경정책과 관련한 캠페인 진행, 환경부와 공동으로 어린이 환경운동 진행 등의 내용으로 '09년 환경부와 MOU(협약)을 체결하였음

○ 이외에 '09년 6월부터 홈플러스 실제 배송차량에도 리블릿코팅을 적용하여 운행거리, 축중량, 연료보출량, 연료단가, 공회전 시간 확인 등을 비교하여 여러 차례의 꾸준한 검증을 수행하고 있음

○ 또한 TESCO는 Eco-drive system을 도입하여 엔진제어장치(engine control unit, ECU)와 연동, 차량의 운행정보, 연료소모량정보를 통해 차량의 상태를 실시간 모니터 하고 저장된 모든 차량운행 정보를 통하여 연비/연료소모량 운전 습관 등을 비교분석함으로서 에코드라이브를 유도하고 있음

2. 연구결과의 실용화 전략

가. 현장적용 및 제품화 방안

- 화물차량의 연비저감을 위한 공기저항저감장치와 주행안정성을 향상시키기위한 와류저감장치의 기술적용 대상은 대형 화물운송 기업과 영세 개인 화물차주 등이며

기업과의 계약을 대형 계약을 추진하여 기업의 이윤을 향상시키고, 온실가스 저감 효과를 얻을 수 있음

- 국내물류기업들의 매출액 규모는 대표적인 기업인 대한통운이 11억 $, ㈜한진은 6억 $ 수준으로서 DPWN의 760억 $, UPS의 22조$ 수준에 비해 현격한 열세를 보임
- 2008년 기준 중국에 진출한(주)한진 대한통운 동방 현대택배, 동부익스프레스 등 대다수 물류기업들은 한국제조업체의 중국현지물류서비스를 대행하면서 역량을 강화
- 도로부문의 연평균 수송실적 증가량은 2001년 1,343백만 톤에서 2009년 1,498백만 톤으로 1.37%의 증가세
- 카고형 트레일러, 트럭형 트레일러 등 약 11만7천 대로 전체 화물차 중 29.19 %가 잠재적 수요대상 차량임

<표 5-6> 공기저항 저감장치 수요대상

수요대상	활용 방안 제시
▪ 택배업체 간선노선차량 - CJ 대한통운, DHL, 현대택배 등 ▪ 식품물류업체 간선노선차량 - 엑소후레쉬물류, 풀무원, KNL물류 등 ▪ 전자제품 및 부품운송업체 간선노선차량 - 명일, 삼성전자로지스틱스 등	

○ 영세 개인화물차주가 직접 설치하기에는 경제적 부담이 우려되므로 현재 정부차원에서 진행 중인 녹색물류전환사업의 일환으로 보조금을 수령하여 영세 개인화물차주의 유류비 지출을 감소시킬 수 있음

○ 25톤급 대형 화물차량 뿐만 아니라 5톤 이상 전화물차량 및 트레일러에 적용이 가능하므로 차종에 크게 상관없이 연비개선에 기여함

○ 화물차는 특성상 특장을 하거나 개조가 되어 제품을 통일하기에 어려움이 있으므로 현재 국외에서 수입되고 있는 제품을 국산화하고 보편화시켜서 차량별 설치의 제한요소를 극복

- 투자대비 효과가 우수한 기술부터 국산 상용차 규격과 도로여건에 맞도록 최적화를 구현하고 고가(620 만원~880 만원)의 수입장비를 60 %이상 저렴한 300만 원 수준에 보급하기 위한 기술개발

○ 수요자 중심의 R&D 연구와 사후조치를 통해 제품화 이후에도 사업을 확장 가능함

- 고속도로노선만을 주행하는 고속버스용으로 추가적인 R&D가능

- 현재 수입산 고가 소재에 대하여 추가적인 개발가능

○ 국내 실정에 맞는 최적화 설계구현과 정부차원의 표준매뉴얼 보급정책 병행이 바람직

- 미국, 영국, 캐나다 등은 국가차원에서 풍동실험 등 연비측정실험기술 (SAEJ1321) 결과를 통해 차종 및 규격별 공기저항기술 가이드라인을 제공
- 보급된 표준매뉴얼을 통하여 민간기업에는 개발단계의 수행오류를 줄여주어 개발비와 개발기간 절감

○ 배포된 표준매뉴얼을 통하여 개발되는 장비의 검인증 연구를 통하여 검증기관양성

- 국내최대 주행시험로를 갖춘 교통안전연구원과 같은 기관에서 공기저항저감장치에 대하여 검증 및 인증을 실시하도록 하고, 검증된 기술에 대하여 녹색물류전환사업 보조금 지급이 되도록 유도
- 현재 난립하는 연비개선장치들에 대하여 제도권으로 흡수하고, 검증된 기술에 대하여 대국민 홍보(홈페이지, 보도자료 등)를 통하여 실효성 있는 기술보급에 기여

나. 미래 원천기술 확보 및 신산업 창출

○ 기존의 국외 제품에만 의존하거나 인증되지 않은 모방제품을 국산화

○ 화물차량의 연비 효율을 향상시키기 위한 공기저항 저감장치 기술을 개발함으로써 기술에 대한 특허 출원 및 제품 생산으로 새로운 산업으로 발전 가능함

○ 지속적인 R&D 연구와 사후 조치를 취해 조속한 현장 적용 및 제품을 보수하여 사업을 확장 가능함

제3절. 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치

1. 개발방향 정립

○ 선진국에서 진행 중인 프로젝트와 성능 평가 방법, 그리고 국내의 도로 환경에 따라 저감 목표치를 설정

- 설정된 목표치는 미국 환경청(EPA)에서 수행중인 Smartway 파트너쉽 공기저항 저감기술 실차시험방법(SAE J 1321)을 통하여 목표치를 정량적으로 평가할 수 있음
- (미국) Smartway 프로그램과 연료 저감 비교

<표 5-7> Smartway Program과 연료 저감 비교

장치	Smartway 프로그램	과제 목표
트레일러 보트 테일	5%	4%

- 국내에서 제한 속도가 90㎞/h임을 고려하여 차량의 주행 속도를 90㎞/h로 선정하였음
- 차량 속도가 빨라질수록 지수함수에 비례한 공기 저항증가로 연료 소모가 크므로, 미국에서 측정된 감소율 보다는 목표치를 낮게 설정함

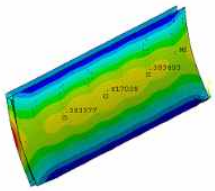
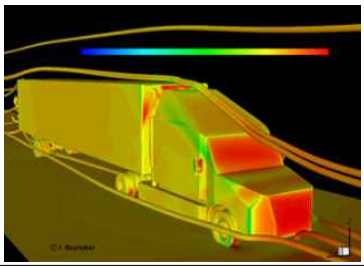
○ 개발에 필요한 관련 국내 기술과 편향성

- 국내의 장치들은, 대부분 공력에 대한 자세한 고려 없이 유선형 형상의 장치를 제작 판매하고 있음
  · 플라스틱 사출금형 기술을 이용하여 정형화된 형상 제작만 이루어질 뿐, 공기역학적 성능 테스트는 이루어지고 있지 않음
- 공력특성에 대한 고려가 미비할 경우, 설치물의 무게와 공기저항과 와류의 증가로 인한 연료 소비 증가로 이어질 수 있음. 공력 설계 디자인과 같은 핵심 기술 연구 및 개발이 요구됨
- 따라서 본 과제는 한국의 우수한 제조 산업과 공학적 설계에 기반을 둔 공기저항 및 공기와류 저감 장치의 개발과 정량적 성능 지표를 목표로 설정

○ 연구 내용범위

- 보트 테일이 화물차 트레일러의 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석하고 보트 테일의 형상 변화에 따른 성능 평가를 통해 최적화된 형상을 도출 하고, 설계된 내용을 기반으로 하여 국내 화물차와 실정에 특화된 보트 테일을 개발 및 방법론에 대하여 규격화하고 가이드 제시

<표 5-8> 보트 테일 기술 개발 대상 및 범위

보트 테일 기술 개발	
대상	**내용 범위**
소재	 ▪ 소재 선정 및 적용 – 보트 테일에 적합한 소재 선정 및 적용
구조 설계	 ▪ 역설계를 통한 3D 모델링 ▪ 구조 설계 및 제작 – 보트 테일 설계 및 제작
실험모형검증	  ▪ 풍동실험을 통한 실험모델 검증 ▪ 수치해석을 통한 실험결과 검증 ▪ 국내 실정에 맞는 최적화
시제품 제작 및 현장시험	 ▪ 맞춤형 시제품 제작 ▪ 설치 기술 개발 ▪ 실차 현장시험 – 적용 기업 및 대상, 규모, 일정 선정 – 테스트베드 운영 계획 수립 및 문제점 검토

○ 연구범위 및 성과물

<표 5-9> 세부기술별 핵심 요소 기술 및 성과물

보트 테일 기술 개발	
핵심 요소기술	**최종성과물**
▪ 고탄성·고강도 소재 선정 및 적용 기술 ▪ 3D 역설계 실험 모델 제작 ▪ 보트 테일 최적화 설계 및 제작 기술 ▪ 수치해석용 격자 생성기술 ▪ 보트 테일 설치 기술 ▪ 적재물 상하역에 지장이 없는 개폐식 보트 테일 설치기술	▪ 기술개발 보고서 - 핵심개발 기술 개발 요구사항 문건 - 실험 및 수치해석을 이용한 유동해석 결과 문건 - 장비설계서 ▪ 최적화된 보트 테일 시제품 ▪ 역설계 실험 모델 ▪ 기타 성과물 - 설치 및 유지보수 관련 매뉴얼 - 특허(공기역학, 시제품 관련) - 현황조사분석 - 시장성 분석 및 실용화 전략 보고서 - 유동가시화 영상물(수치해석 및 실험) - 외부기관 검증보고서 - 홍보물

<표 5-10> 기술정의와 핵심요소기술

세부 기술정의	**핵심 요소기술**
보트 테일을 화물차의 후면에 장착함으로써 횡풍 측력계수를 최대 12% 저감할 수 있는 기술	▪ 고탄성·고강도 소재 선정 및 적용 기술 ▪ 실험모델 제작 및 공기역학적 성능 평가 실험 기술 - 역설계를 통한 3D 모델링 기술 - 실험모델 제작 ▪ 수치해석 및 최적화 기술 - 격자 생성 기술 - LES 상세유동해석 기술 ▪ 시제품 제작 및 설치기술 - 보트 테일 설치 기술 - 적재물 상하역에 지장이 없는 개폐식 보트 테일 설치기술

2. 성과 목표치

<표 5-11> 보트 테일 기술 개발의 정량적 연구 목표 및 세부 연구목표

보트 테일 기술 개발	
정량적 연구목표	**세부 연구목표**
화물차 90㎞/h 운행시 연료 소모율 4% 이상 저감을 위한 공기저항 기술 개발 (SAE J 1321 시험 기준*)	▪ 공기저항을 감소시키고 온실가스 감축 효과를 얻기 위한 화물차량의 에너지 소비 저감 기술 개발 ▪ 트레일러의 후단에 부착물을 장착하거나 기존차량의 외부 장착물의 구조를 변경하여 최적의 공기저항 감소 기술 도출
시장성 분석 및 실용화 추진	▪ 시제품 제작 및 화물연료 저감 실증시험 시행 ▪ 수요기업 테스트베드 선정 및 배송에 투입 운영 ▪ 연구성과 및 기술 홍보, 기술 이전 추진

□ **화물차 운행시 연료소모율 저감을 위한 보트 테일 기술 개발**

○ “연료소모율 저감을 위한 사이드 스커트 기술”은 화물차 90㎞/h 운행 시 연료 소모율 4% 이상 저감을 위한 기술개발을 목표로 함

- “연료소모율 저감을 위한 사이드 스커트 기술” 개발을 위하여 다음의 세부연구 목표를 설정하였음

· 트레일러 사이드 스커트는 미국 SAE J 1321 시험기준 4% 연료소모 저감

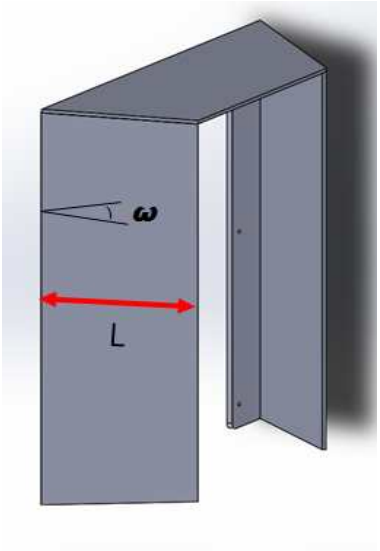
제4절. 보트 테일 설계 및 제작

1. 보트 테일의 길이 및 각도 조절

○ 화물차의 후면부의 공기저항을 줄이는 보트 테일 형상의 구조물을 설치

- 바람에 변형 및 파손이 일어나지 않는 포맥스 재질
- <그림 5-1>에서 L은 보트 테일 옆면의 길이, ω는 보트 테일의 옆면과 트럭의 옆면이 이루는 각도임
- 장착 길이의 한계 및 안정성 문제로 인하여 보트 테일 길이(L)를 실차 기준 900mm, 1100mm로 설정
- 각도(ω) 설정에서, 윗면의 각도는 약 10°로 고정, 양 옆면의 각도를 55°, 65°, 75°, 80°로 변화하면서 실험 진행
- Hinge구조를 통해 각도 가변형으로 설계하였으며, 안쪽에 각도에 맞는 고정물을 설치하여 원하는 각도로 고정하여 보트 테일 제작
- 5톤과 15톤 화물차, 40ft 화물차에 동일한 크기로 적용되며, 각 모델의 축소비율과 동일한 축소비율로 적용됨
- 5톤 모델의 축소비율은 1/6이므로, 보트 테일 또한 1/6 스케일로 적용

- 15톤, 40ft 모델의 축소비율 1/8이므로, 보트 테일 또한 1/8 스케일로 적용
- 실제 적용모델과 마찬가지로 윗면이 컨테이너부 보다 약간 아래쪽에 장착 (gap 발생)



<그림 5-1> 표준형 보트
테일의 길이 및 각도변화

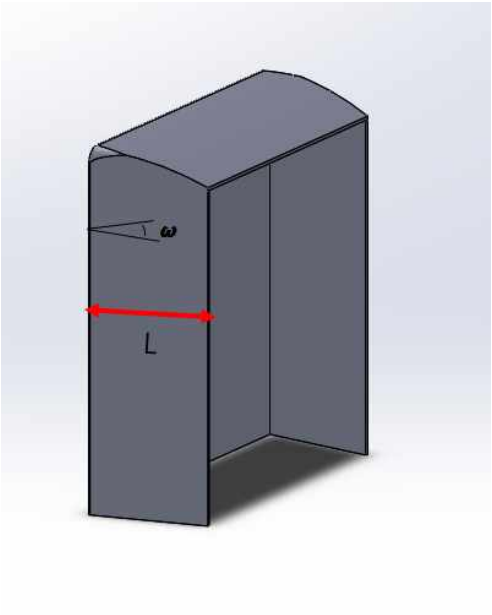
2. 보트 테일 모델 (gap repair, gap repair+bottom)

○ Gap repair 보트 테일 모델

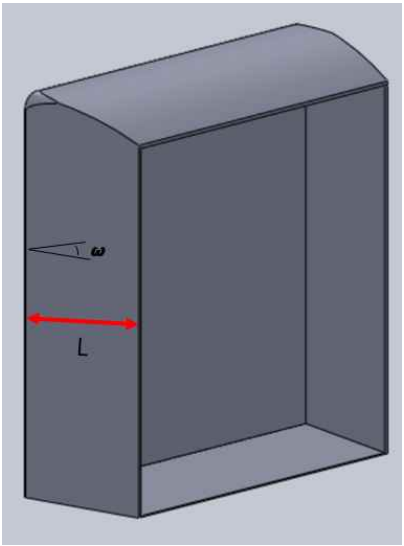
- 보트 테일 윗면과 컨테이너 상부와의 단차를 줄이기 위한 설계
- 유동박리를 최소화하기 위한 유선형 디자인
- <그림 5-2>에서 L은 보트 테일 옆면의 길이, ω는 보트 테일의 옆면과 트럭의 옆면이 이루는 각도
- 장착 차량에 따라 맞춤형 제작

○ Gap repair + bottom 보트 테일 모델

- 하부유동에서 발생하는 와류영향을 최소화하기 위한 설계
- <그림 5-3> 65에서 L은 보트 테일 옆면의 길이, ω 는 보트 테일의 옆면과 트럭의 옆면이 이루는 각도
- 차체 하부의 유동이 차체 후미부에 도달하게 되면서 급격한 압력강하가 발생하게 되며, 이러한 문제점을 개선하기 위해 보트 테일의 하부에 스포일러 형상의 구조물 (bottom, B) 설계
- Bottom의 장착으로 차체 후미부의 하부 부근에서의 급격한 압력변화를 막고, 압력 회복을 촉진하게 되어 유동 박리가 줄어들게 하는 효과 예상



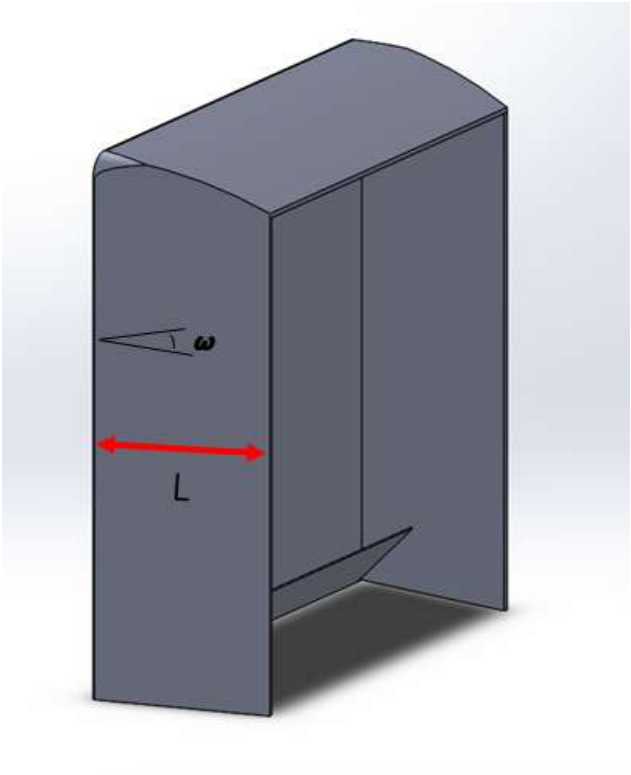
<그림 5-2> 보트 테일 gap repair (G) 모델



<그림 5-3> 보트 테일 gap repair (G) + bottom (B) 모델

3. 보트 테일 AID (Alow inclined deflector)

- 차체 하부에서 발달하는 와류의 영향을 감소시키고, 후미부에서 발생하는 낮은 압력 영역 (low pressure zone)의 압력을 높이기 위한 대책으로 후미부 아래쪽에 스포일러 형태의 AID를 추가로 부착하는 설계
- Bottom과 유사한 형태이지만, 길이와 각도가 다름
- AID의 길이는 45cm 이며, 화물차의 뒷면과 이루는 각도는 45°
- 바람에 변형 및 파손이 일어나지 않는 포맥스 재질



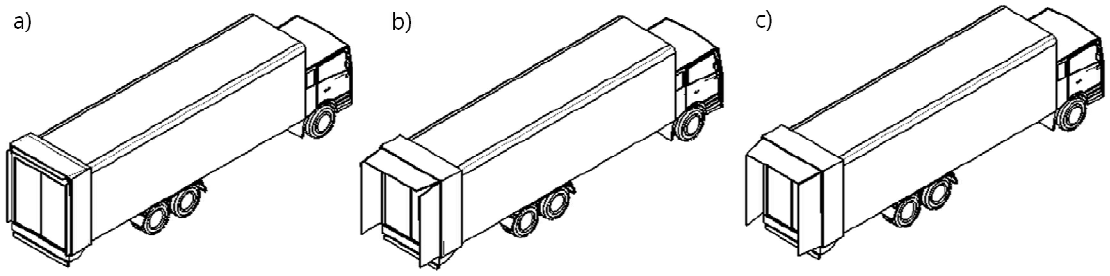
<그림 5-4> 보트 테일 AID 모델 (Alow inclined deflector)

4. 보트 테일 장착 방법

□ **보트 테일은 주행 시 공기 저항 저감 역할을 하지만 정차 중에는 화물 취급의 용이성을 고려해야함. 대표적으로 개폐식, 슬라이딩식이 있음**

○ 슬라이드식 보트 테일

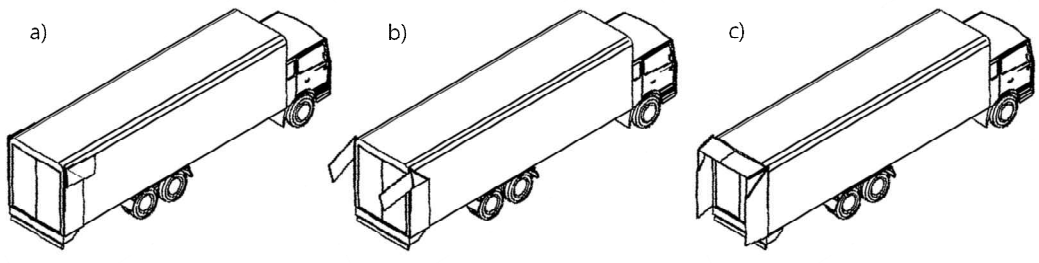
- 보트 테일의 길이와 각도 및 형상은 위에서 설계한 수치를 이용
- 트레일러 후미부에 보트 테일을 보관할 수 있는 하우징을 이용함
- 정차 중에는 보트 테일을 하우징 안에 넣고 주행 시 펼쳐 사용
- <그림 5-5> a)는 정차시 보트 테일 형상, b)각도 고정을 풀어 놓은 상태, c)는 주행 시 보트 테일 형상을 나타냄



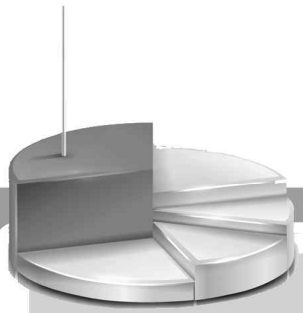
<그림 5-5> 슬라이드식 보트 테일 형상

□ **개폐식 보트 테일**

- 보트 테일의 길이와 각도 및 형상은 위에서 설계한 수치를 이용
- 정차 중에는 보트 테일을 접어서 화물의 상하차에 지장이 없도록 설계함
- <그림 5-6> a)는 정차시 보트 테일 형상, b)각도 고정을 풀어 놓은 상태, c)는 주행시 보트 테일 형상을 나타냄



<그림 5-6> 개폐식 보트 테일 형상



제6장 보트 테일 공기역학적 성능평가

제1절 풍동실험을 이용한 공기역학적 성능평가

제2절 수치해석을 통한 공기역학적 성능평가

제3절 최적화 설계

제6장. 보트 테일 공기역학적 성능평가

제1절. 풍동실험을 이용한 공기역학적 성능평가

1. 풍동실험 배경 및 필요성

가. 풍동실험의 배경

○ 풍동은 원형(proto-type)을 일정비율로 축소시킨 모형(model)을 적당한 유속으로 조절된 공기 흐름 속에 두어 실제 상황과 유사한 유동 조건을 인위적으로 만들어줌으로써 모형에서 얻어진 결과로 실제 현상을 예측하는 유체역학의 주요 연구수단

○ 난류유동 및 경계층 유동과 같은 유체역학의 기초 연구와 항공기, 자동차와 같은 운송체 주위의 유동해석 및 건축구조물에 미치는 공력해석, 오염물질의 대기 확산현상과 같은 환경공학 분야, 수력학 및 선박 그리고 해양구조물의 연구 등과 같은 많은 응용분야에 사용됨

○ 유체역학 연구자들은 19세기부터 풍동을 제작하여 사용하고 있으며, 현재는 군사용, 연구용, 산업용 등으로 그 용도에 따라 다양하게 풍동을 개발, 이용하고 있음

○ 일반적으로 소형풍동은 유동가시화 및 유동의 개략적인 특성파악에는 사용가능하나, 공력설계를 위한 세부실험을 수행하거나, 유동의 근본적 원리를 규명하는 연구에는 부적합

○ 보다 정확한 결과를 얻기 위해서 시험부의 크기가 큰 대형풍동이 필요

나. 풍동실험의 필요성

○ 풍동실험은 자동차의 공기역학적 설계 시 필요한 다양한 공력 (aerodynamic force) 정보를 제공

○ 실차(full-scale vehicle)크기의 풍동을 사용하는 것이 이상적이나 이는 무척 많은 비용과 실험준비의 난이도 때문에 초기개발 단계에서는 축소모형을 이용하여 풍동실험을 하는 것이 일반적

○ 축소모델 풍동실험은 저저항 운송체 개발에 소요되는 비용을 크게 절감할 수 있고, 실차 실험에 비해 운용이 손쉬운 편이기 때문에 새로운 운송체 개발에 있어서 필수적

○ 축소모형 풍동실험에 있어서 기하학적 상사성과 동적 상사성(dynamic similarity)을 만족시켜야 함

○ 축소모델을 이용한 풍동실험을 통해 공력측정 및 유동장 분석이 가능

○ 수치해석방법과는 차별화된 실제와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있음

2. 실험장치 및 방법

가. POSTECH 아음속 풍동

○ 1995년 준공된 포스텍 아음속 풍동은 유체역학적 기본 현상에서 실생활에 일어나는 제반 유체역학 관련 현상을 연구할 수 있도록 설계된 풍동 <그림 6-1>

○ 자동차와 기차와 같은 운송체의 공력 실험에 적합

○ 폐쇄형(closed circuit)으로 전체크기 높이 6m, 폭 14m, 길이 37m를 가짐 <그림6-2>

○ 시험부(test section)의 높이 1.5m, 폭 1.8m, 길이 4.3m

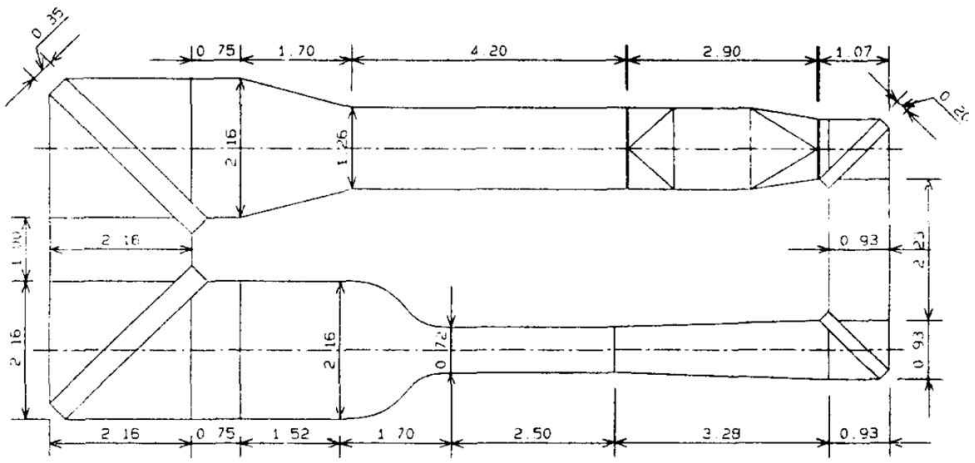
○ 최저풍속: 5m/s, 최대풍속: 75 m/s

○ 수축비: 9:1

○ 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%, 균일도 (flow uniformity)는 0.25%로 운송체 공력 실험에 적합한 풍동



<그림 6-1> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관



<그림 6-2> POSTECH 아음속 풍동도면

나. 공력 측정용 external balance

○ 자동차 차체에 걸리는 힘과 모멘트와 같은 공력을 측정하기 위해서는 차체에 작용하는 풍하중을 정밀하게 측정하여야 함

○ 포스텍 아음속풍동에 설치된 external balance는 독일항공우주연구청(DLR) Braunschweig 분소에서 자동차 공력측정용으로 제작한 7-component balance

○ 측정범위 및 분해능

- 측정범위: X=±500N, Mx=±500Nm, Y=±1000N, My=±600Nm, Z=±4000N Mz=±200Nm
- 정확도: 0.2% of full scale dX = 1N, dY=2N, dZ=8N
- 분해능: 0.01N 이하

3. 실험 대상 및 모형

○ 국내에서 가장 많이 사용하는 화물자동차인 5톤, 15톤, 40ft 트럭을 대상으로, 차체에 보트 테일와 같은 유동제어용 부가장치를 차체에 설치

○ 화물차의 상부에 걸리는 형상저항(pressure form drag), 차체 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후미부에서 발생하는 유동박리에 기인한 공기저항을 제어함으로써 화물차의 공기저항 저감을 연구

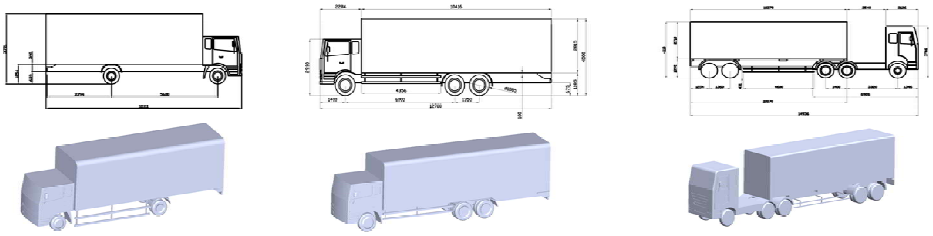
○ 공기역학적인 해석을 통해 화물차의 항력감소 메커니즘을 밝히고 저저항 운송체의 공력 설계기술을 개발

○ 본 연구에서는 사이드 스커트의 형상 및 각도등 다양한 실험변수를 변화시키면서 화물차에 걸리는 항력계수 (C_D)값을 측정

- 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 H사의 5톤, 15톤 트럭 및 S사의 40ft 트레일러 차량의 외형을 실제로 측정하여 다시 역설계하는 방식으로 3차원(3D) 모델을 얻은 후, 이를 바탕으로 풍동 시험부의 폐색율(blockage ratio, 풍동의 단면적에 대해 모

형의 단면적이 차지하는 비율)이 기준 이하가 되는 크기의 축소 모형을 제작

- 각각의 구체적인 형태 및 축소 비율, 폐색율은 <그림 8-3>에 나타냄

실험 대상 모형			
실험 대상	5ton :현대 Mega Truck	15ton : 현대 Trago Xcient	40ft : SCANIA G440
실제 크기(m)	10(L) X 2.5 (B) X 3.1(H)	12(L) X 2.5 (B) X 3.3(H)	18(L) X 2.5 (B) X 4(H)
실험 모형			
실험 모형 Scale	1/6	1/8	1/8
폐색율	7.9 %	4.7 %	5.7 %

<그림 6-3> 실험 대상 화물차 모델 및 사양

4. 15톤 화물차량 모델에 대한 실험

가. 공력특성

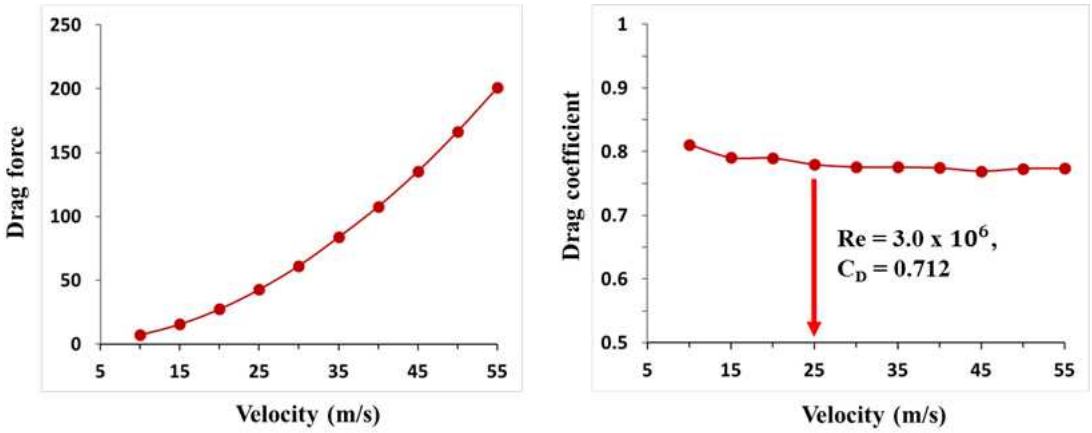
○ 공기 저항을 줄이기 위한 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 55m/s 영역에서 변화시켜 가면서 차체에 가해지는 공기저항력(Drag force)의 크기를 측정하고, 항력계수(C_D, 풍속에 따라 증가하는 공기저항력의 크기를 나타내는 지표)를 도출 <그림 8-4>

○ 측정 결과, 15톤 트럭에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함을 확인. 항력계수(C_D)는 0.712로 트럭형 차체 혹은 유사한 도형에 대해 기존에 연구된 결과들과 잘 일치함. 여기서 항력계수(C_D)는 다음과 같이 정의됨

$$C_D = \frac{Drag\,force}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

○ 25m/s (=90km/h) 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 이는 본 실험에서 측정된 풍속 영역의 레이놀즈수(Reynolds number)값이 1.1~6.3 X 10^6인데, 그 이상부터는 큰 변화가 나타나지 않는 임계 레이놀즈수 영역 (~10^5) 위에 있으므로 측정하는 풍속이 변하더라도 항력계수는 영향을 받지 않음을 알 수 있음

○ 이후 다른 실험변수들에 대한 실험에서는 풍속을 25m/s로 고정하고, 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용



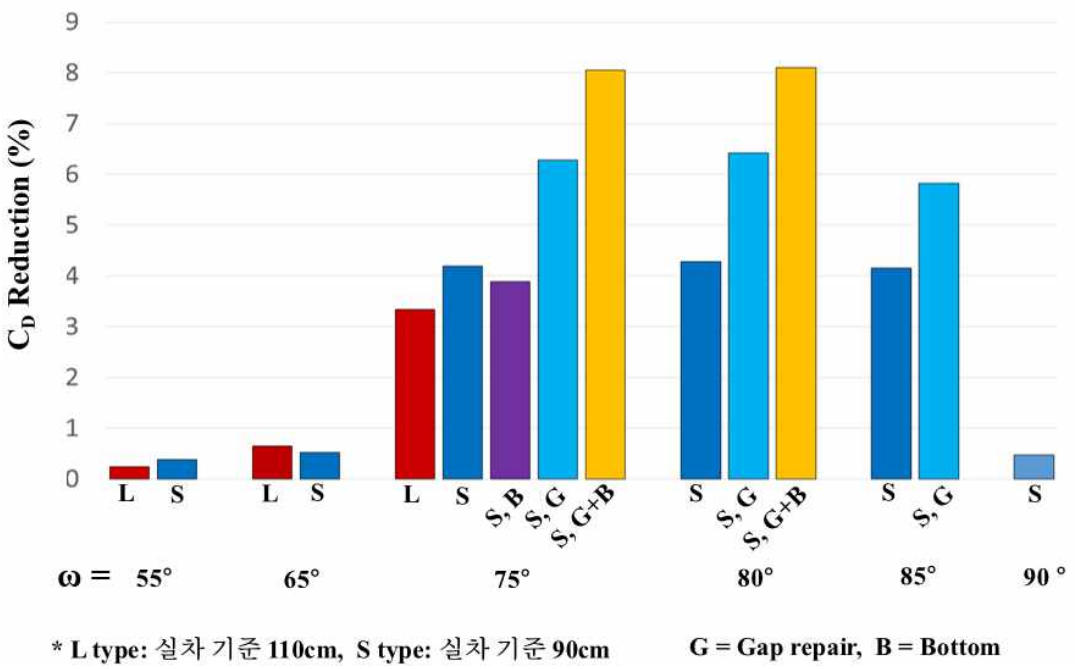
<그림 6-4> 풍속에 따른 15톤 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右)의 변화

나. 길이 및 각도 변화에 따른 보트 테일 효과

○ 차량 후미에 길이(S=실차 기준 90cm, L=실차 기준 110cm)와 각도(ω=55~90°)를 다양하게 변화시킨 보트 테일을 장착하고 이것으로 변하는 차체의 항력계수를 그림 8-5에 나타냄

○ 공기저항력을 줄이는 효과는 보트 테일의 길이보다는 각도 변화에 따라 큰 차이를 보임

- 다양한 각도에 대한 실험을 통해 ω=80°에서 항력계수가 최대인 4.27%까지 줄어드는 것을 확인함
- 시판되고 있는 기존 보트 테일의 경우, 차체 후미부와 약간의 높이차가 있어 유동박리(flow seperation, 유체가 표면을 따라 흐르지 못하고 표면을 이탈하는 현상)가 보트 테일의 끝단보다 앞쪽에서 이미 발생하기 때문에 효과적이지 못함. 이러한 문제점을 개선하기 위해 이 높이차를 보상하고 유동이 부드럽게 이어지도록 하는 구조물(gap repair, 이하 G로 표기)을 장착한 결과, 항력계수가 6.42%까지 줄어들었음
- 차체 하부에서 발달하는 와류의 영향을 줄이기 위해 차량 하부에서 후면부로 올라오는 유동을 제어하도록 스포일러 형상의 구조물(bottom, 이하 B로 표기)을 후미부 아래쪽에 추가된 바닥판처럼 설치한 결과 기본 모델에 비해 8.1%까지 항력계수가 줄어드는 효과를 얻음



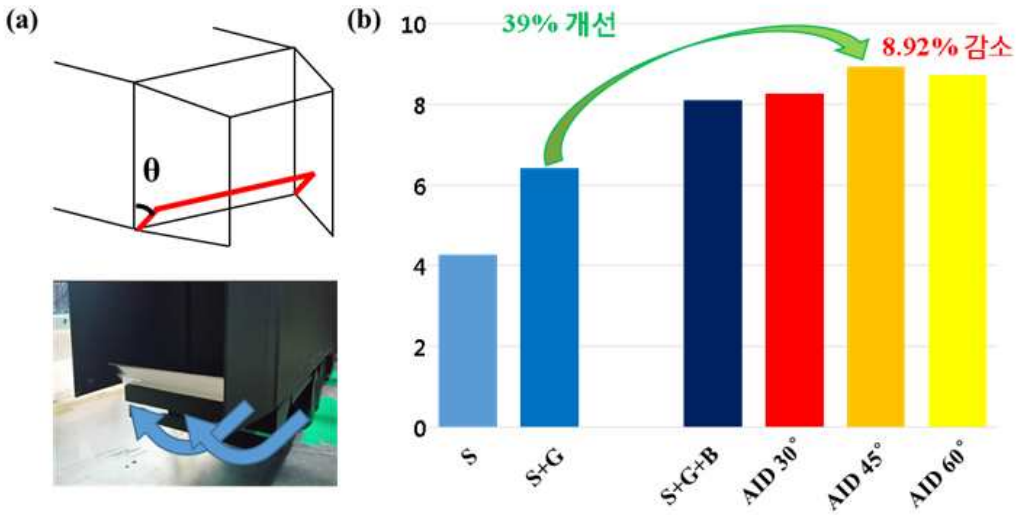
<그림 6-5> 보트 테일의 항력 감소 효과

다. AID (Alow Inclined Deflector) 보트 테일 효과

○ 화물차의 경우 후면부의 형상이 사각형으로 고정되어있기 때문에, 차량이 앞으로 주행함에 따라 후면부에 유동 박리(flow seperation, 유체가 표면을 따라 흐르지 못하고 표면을 이탈하는 현상)가 일어나, 낮은 압력 영역 (low pressure zone)이 후면부 전체적으로 생겨남. 이 영역에 하부 유동을 끌어 흘려줌으로써 압력을 높이는 효과를 주면 후면부에서 발생하는 항력이 감소하는 효과를 얻을 수 있음

○ 후미부 아래쪽에 스포일러 형태의 바닥판이면서 위로 살짝 들려올라온 각도를 가지는 AID(Alow Inclined Deflector)를 추가로 부착하여 하부 유동을 통해 후면부의 낮은 압력 영역 (low pressure zone)의 압력을 높혀주어 항력계수 변화를 확인 <그림 8-6>

○ AID의 각도 (하부 바닥면과 AID가 이루는 각도)가 45°일 때, 최대 8.92%의 항력계수저감 효과가 나타남



<그림 6-6> AID(Alow Inclined Deflector) 설치로 인한 항력감소 효과

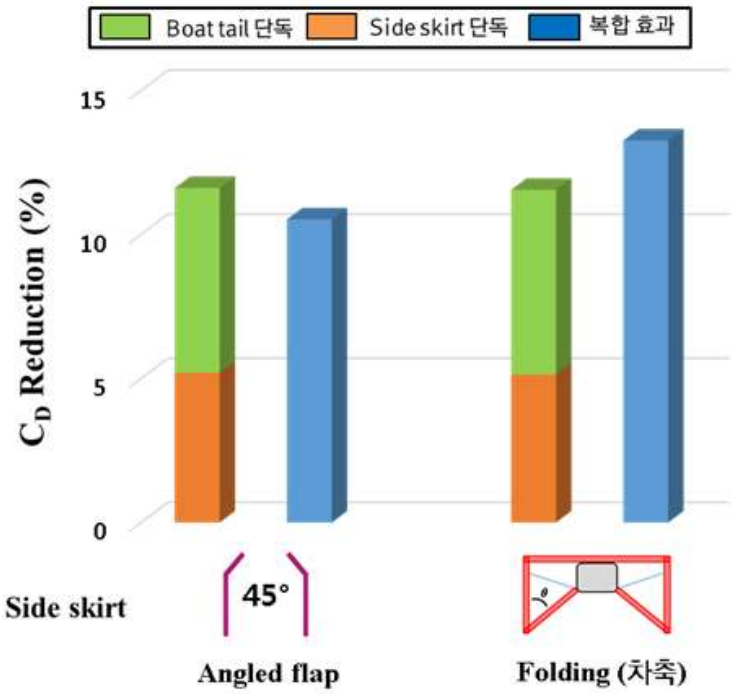
라. 복합효과

○ 사이드 스커트와 보트 테일의 종류, 각도, 길이 등의 다양한 변수를 변화시키면서 15톤 트럭의 공기저항력을 줄이는데 미치는 효과를 살펴봄. 독립적으로 부착하는 것이 가능한 이들 유동제어용 부가장치들을 함께 적용할 경우 그 효과가 어떻게 변화하는지에 대해 분석 <그림 8-7>

○ 플랩형 사이드 스커트에서 공기저항력을 줄이는데 가장 좋은 효과를 보인 경우 (L형, δ_1 = 45°, δ_2 = 0°, δ_3 = 45°)와 보트 테일에서 가장 좋은 효과를 보인 경우를 함께 적용시킨 결과, 각각의 실험 결과에서 항력계수를 감소시킨 정도를 합친 값(11.61%)보다 복합 적용했을 때의 저감 효과가 오히려 떨어지는 결과(10.52%)를 얻음

○ 반면 접이식 사이드 스커트(L 형, 차축 밀착하여 62.5°)와 보트 테일에서 가장 좋은 효과를 보인 경우를 함께 적용시킨 경우, 각각의 실험 결과를 합친 값인 11.55%는 위의 플랩형 사이드 스커트에 비해 낮았지만, 복합 적용한 경우 항력계수는 13.26%까지 줄어들어 각각의 실험 결과를 합친 값보다 약 1.7% 증가하였음

- 접이식 사이드 스커트의 경우, 바퀴와 바퀴 사이의 공기 저항뿐만 아니라 차체 하부 유동이 차체 후방으로 균일하게 흘러 지나가도록 제어하는 효과도 가지고 있기 때문에 차체 하부를 통과한 공기의 흐름이 차체 후미부에 설치된 보트 테일과 서로 영향을 미쳐 시너지 효과를 보이는 것으로 생각됨



<그림 6-7> 사이드 스커트와 보트 테일을 함께 적용한 경우의 항력감소 효과

5. 40ft 화물차량 모델에 대한 실험

가. 공력특성

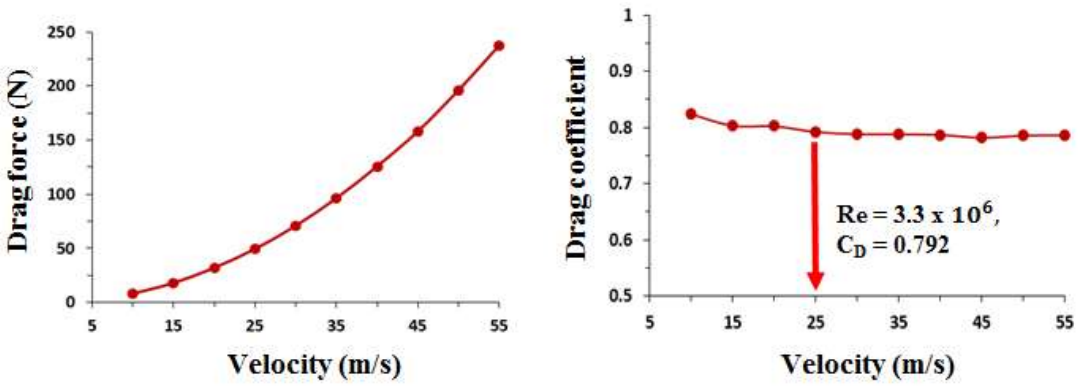
○ 공기 저항을 줄이기 위한 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 55m/s 영역에서 변화시켜 가면서 차체에 걸리는 항력(F_x)을 측정하고, 항력계수를 도출 <그림 8-8>

○ 측정 결과, 40ft 트레일러에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함을 확인. 항력계수(C_D)는 0.78로 트럭형 차체 혹은 유사한 형태에 대한 기존 연구결과와 잘 일치함. 여기서 항력계수(C_D)는 다음과 같이 정의됨

$$C_D = \frac{Drag\,force}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

○ 5m/s (=90km/h) 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 이는 본 실험에서 측정된 풍속 영역의 레이놀즈수(Reynolds number)값이 1.1~6.3 X 10^6인데, 그 이상부터는 큰 변화가 나타나지 않는 임계 레이놀즈수 영역 (~10^5) 위에 있으므로 측정하는 풍속이 변하더라도 항력계수는 영향을 받지 않음을 알 수 있음

○ 이후 다른 실험변수들에 대한 실험에서는 풍속을 25m/s로 고정하고, 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용



<그림 6-8> 풍속에 따른 40ft 화물차량 모델에서의 공기저항력(左) 및 항력계수(右) 변화

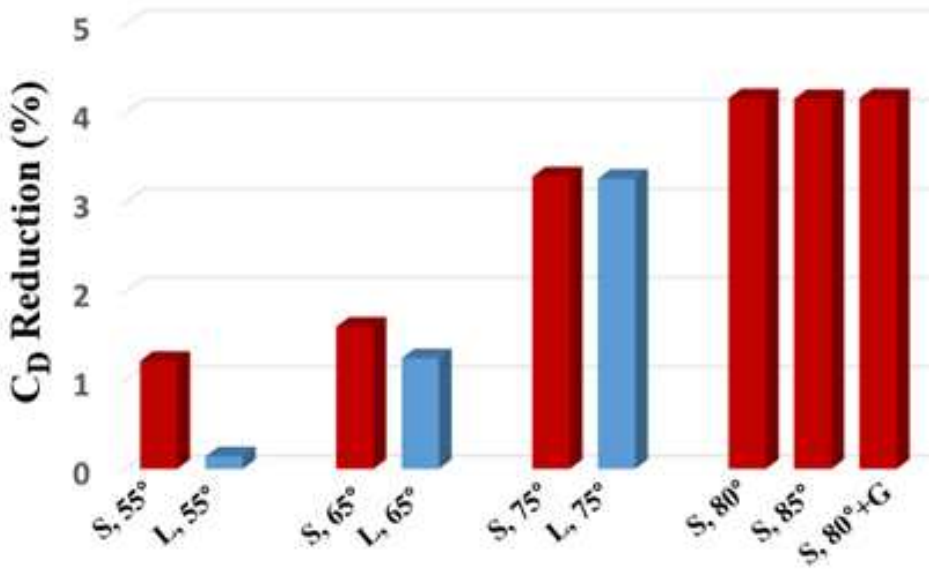
나. 길이 및 각도 변화에 따른 보트 테일 효과

○ 차량 후미에 길이와 각도를 다르게 변화시킨 보트 테일을 장착하고 이것이 차체에 걸리는 항력계수에 미치는 효과를 그림 8-9에 나타냄

○ 항력저감 효과는 보트 테일의 길이보다는 각도 변화에 큰 차이를 보임

○ 다양한 각도에 대한 실험을 통해 ω = 80°에서 항력계수가 0.747로 4.16% 저감됨

- 보트 테일 상면부와 차체 후미의 단차가 상대적으로 작아 그것을 메우는 구조물(gap repair, G)의 설치 효과는 크지 않음



<그림 6-9> 보트 테일의 항력 감소 효과

다. 복합효과 (combination effect)

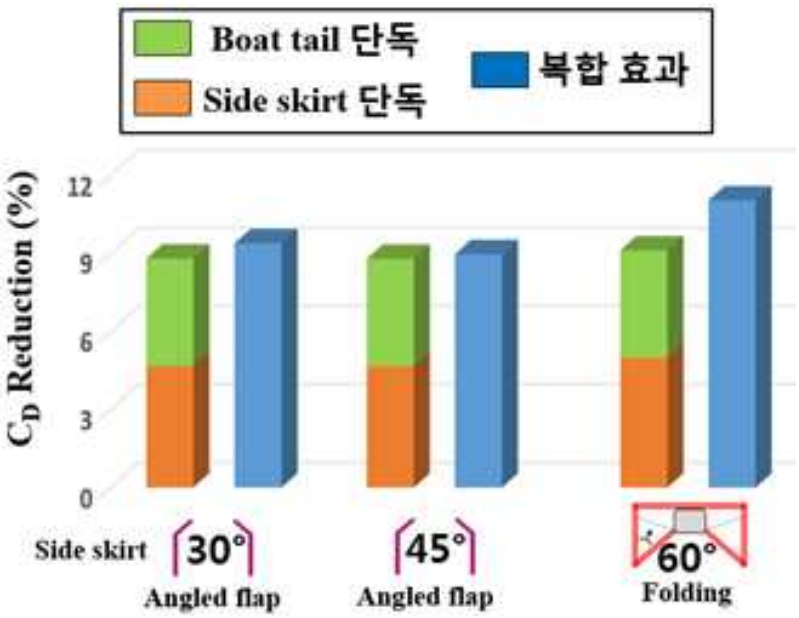
○ 사이드 스커트와 보트 테일의 형상, 각도, 길이 등의 변수를 변화시킴으로써, 40ft 화물차량의 항력저감에 미치는 효과에 대하여 살펴본 결과, 독립적으로 부착 가능한 이들을 함께 적용하면 항력계수 저감 효과가 어떻게 변화하는 지를 분석 <그림

8-10>

○ 플랩 사이드 스커트에서 가장 좋은 항력저감 효과를 보인 경우 (δ_1=30°, δ_2=0°)와 보트 테일을 함께 적용시킨 결과, 각각의 항력저감 효과를 합친 결과(8.79%)보다 항력계수 저감 효과가 약간 증가한 결과 (9.38%)를 얻음

○ 접이식 사이드 스커트와 보트 테일을 함께 적용시킨 경우, 각각의 실험결과를 합친 결과는 9.10%지만, 이 두가지를 함께 적용한 결과는 11.02%로 항력계수 저감 효과가 약 1.92% 추가적으로 증가함

- 이것은 접이식 사이드 스커트가 바퀴와 바퀴 사이의 공기 저항뿐만 아니라 차체 하부 유동을 제어하는 효과도 가지고 있기 때문에 차체 하부를 지나는 공기흐름이 컨테이너 후미부의 후류 유동에도 영향을 미쳐 시너지 효과를 보이는 것으로 생각됨



<그림 6-10> 사이드 스커트와 보트 테일을 함께 적용한 복합적인 항력저감 효과

6. 5톤 화물차량 모델에 대한 실험

가. 공력특성

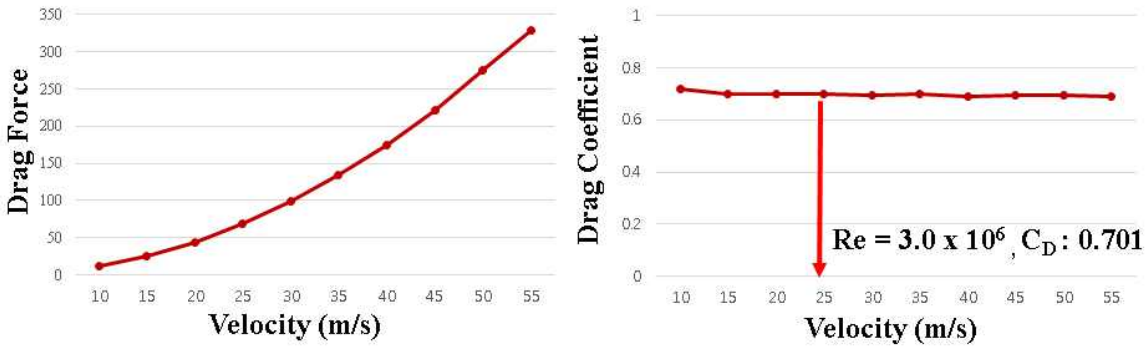
○ 공기 저항을 줄이기 위한 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 55m/s 영역에서 변화시켜 가면서 차체에 가해지는 공기저항력(Drag force)의 크기를 측정하고, 항력계수를 도출 <그림 8-11>

○ 측정 결과, 5톤 트럭에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함을 확인. 항력계수(C_D)는 0.701로 트럭형 차체 혹은 유사한 형태에 대해 기존에 연구된 결과들과 잘 일치함. 여기서 항력계수(C_D)는 다음과 같이 정의됨

$$C_D = \frac{Drag\,\mathrm{force}}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

○ 25m/s (=90km/h) 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 이는 본 실험에서 측정된 풍속 영역의 레이놀즈수(Reynolds number)값이 1.1~6.3 X 10^6인데, 그 이상부터는 큰 변화가 나타나지 않는 임계 레이놀즈수 영역 (~10^5) 위에 있으므로 측정하는 풍속이 변하더라도 항력계수는 영향을 받지 않음을 알 수 있음

○ 이후 다른 실험변수들에 대한 실험에서는 풍속을 25m/s로 고정하고 3회 반복 측정한 데이터를 통계처리하여 평균값을 사용



<그림 6-11> 풍속에 따른 5ton 모델에서의 항력 및 항력계수 변화

나. 길이 및 각도 변화에 따른 보트 테일 효과

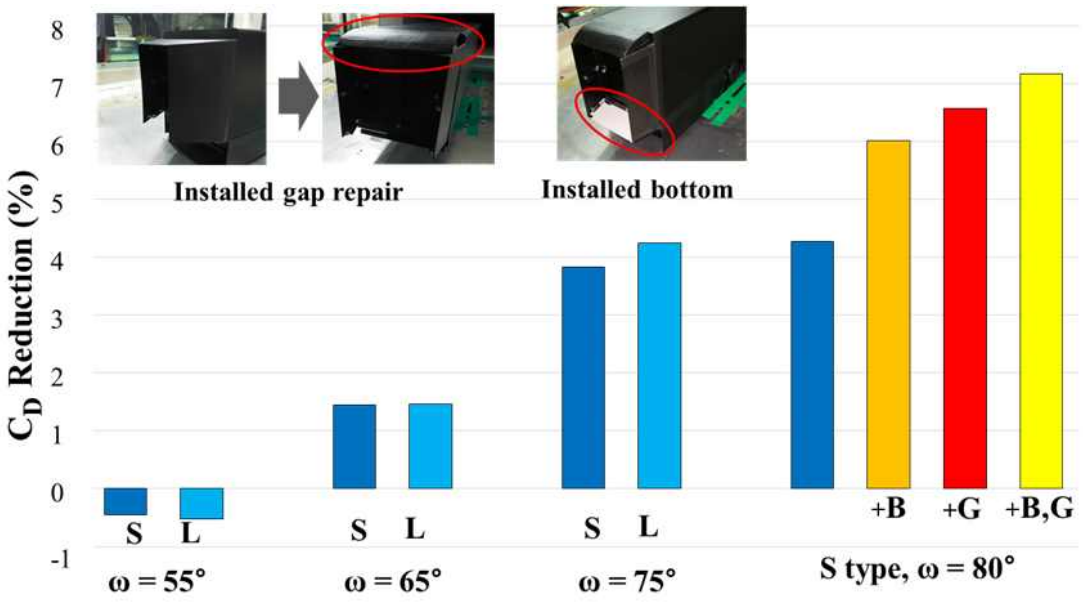
○ 차량 후미에 길이와 각도를 다르게 변화시킨 보트 테일을 장착하고 이것이 차체에 걸리는 항력계수에 미치는 효과를 그림 8-12에 나타냄

○ 항력저감효과는 보트 테일의 길이 보다는 각도 변화에 큰 차이를 보임

- 접힌 각도가 ω=55°인 경우에는 유동을 교란시켜 항력이 오히려 증가하였으며 각도(ω)가 증가함에 따라 항력저감 효과가 개선되었음. 다양한 각도에 대한 실험을 통해 ω = 80°에서 항력계수가 최대로 저감 되었는데, 보트 테일이 장착되지 않은 기본 모델에 비해 항력계수가 4.28% 감소하였음

○ 기존의 보트 테일의 경우 차체 후미부와 약간의 단차가 있어 유동박리가 보트 테일보다 앞쪽에서 형성되어 항력저감에 효과적이지 못함. 이러한 문제점을 개선하기 위해 이 단차를 메우는 구조물(gap repair, G)를 장착한 경우 항력계수가 6.6% 저감됨

○ 차체 하부에서 발달하는 와류의 영향을 줄이기 위해 하부 유동을 제어하는 스포일러 형상의 구조물(bottom, B)을 후미부 아래쪽에 설치하여 6.0%의 항력계수 저감 효과를 얻음. 이 두 가지 부가장치를 모두 장착한 경우, 항력계수는 0.652로 기본 모델에 비해 총 7.17%의 항력계수 저감 효과를 얻음



<그림 6-12> 보트 테일의 항력 감소 효과

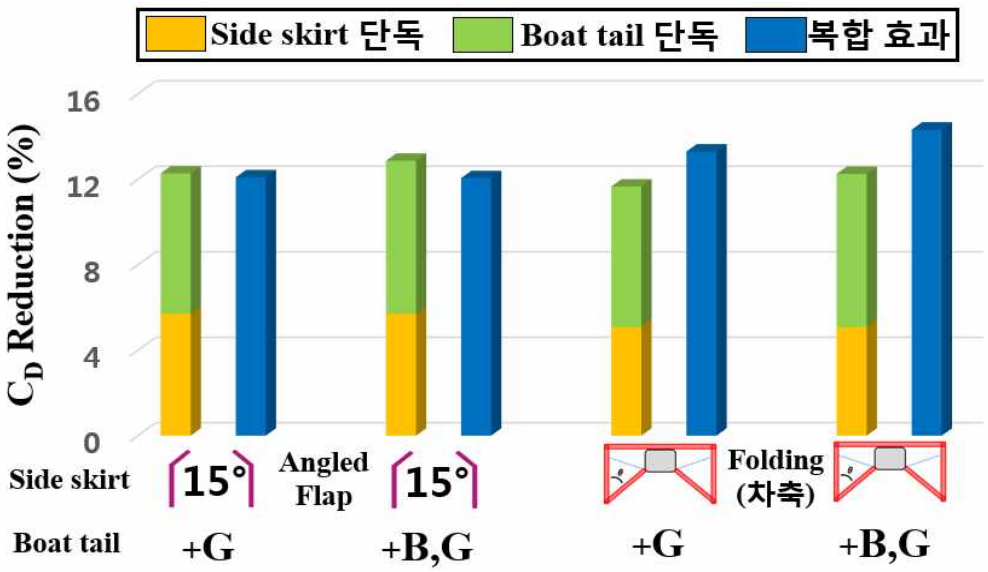
다. 복합효과

○ 사이드 스커트와 보트 테일의 형, 각도, 길이 등의 변수가 5톤 트럭에 걸리는 항력계수 저감에 효과를 확인함. 이 부착물들은 독립적으로 부착하는 것이 가능한 이들을 함께 적용할 경우, 그 효과가 어떻게 변화하는 지에 대해 분석 <그림 8-13>

○ 플랩형 사이드 스커트에서 가장 좋은 항력저감 효과를 보인 경우(δ1=15°, δ2=0°, δ3=15°)와 보트 테일을 함께 적용 시킨 결과, 각각의 실험결과를 합친 결과 (12.27%, 12.87%)보다 항력저감 효과가 오히려 약간 감소한 결과를 얻음(12.09, 12.05%)

○ 접이식 사이드 스커트와 보트 테일을 함께 적용시킨 경우, 각각의 실험결과를 합친 결과(11.66%, 12.25%)에 비해 항력저감 효과가 약 2.1%(13.29%, 14.32%) 증가하였음

- 이것은 바퀴와 바퀴 사이의 공기 저항뿐만 아니라 차체 하부의 공기흐름을 제어하는 효과도 가지고 있기 때문에 차체 하부를 지나는 유동이 컨테이너 후미부 유동에도 영향을 미쳐 시너지 효과를 보이는 것으로 생각됨



<그림 6-13> 사이드 스커트, 보트 테일의 복합적인 항력 감소 효과

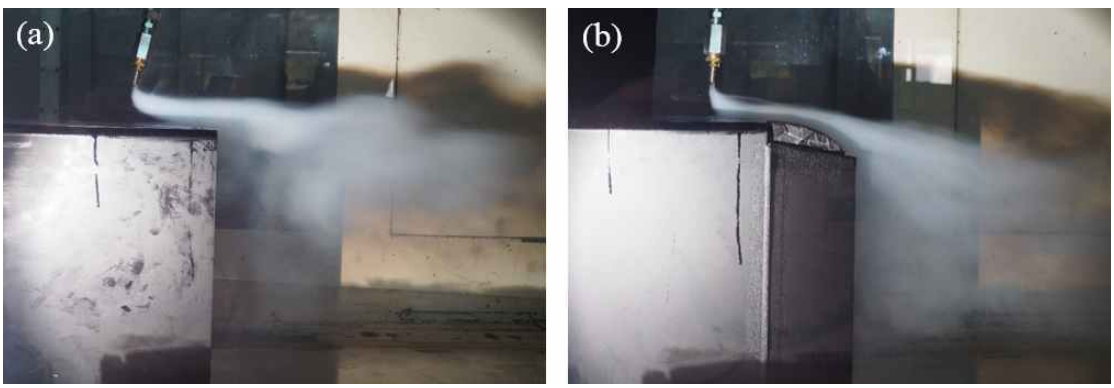
라. 유동가시화

○ 공기저항 저감 장치를 장착한 트럭 주위의 유체 흐름을 관찰하고 이를 통해 항력저감 효과와 관련 유동구조를 정성적으로 파악하기 위하여 차체 모형 주위 유동을 가시화 하였음

○ 5t 트럭 모형 주위의 유동구조를 관찰함으로써 공기저항의 발생 원인과 함께 부착물들 각각의 항력저감 효과를 정성적으로 분석하였음

○ 실험은 풍속 5m/s에서 수행하였고, 독일 SAFEX 사의 2010 Fog generator에 자체 제작한 노즐을 부착하여 사용하였으며, 제논(Xe) 램프를 광원으로 사용하여 Olympus사의 OM-D E M1 카메라로 촬영함

○ 보트 테일을 장착하지 않은 모델의 경우, 차량 후미부의 급격한 형상 변화로 인하여 차체 후방에 낮은 압력값을 가지는 큰 규모(large-scale)의 와류가 형성되어 공기 저항이 크게 발생되어짐을 확인. 보트 테일을 장착한 경우(b)에는 보트 테일을 따라 흐르는 유동이 유동박리를 늦추거나 후류 영역을 감소시켜 공기저항을 저감시키는 것을 가시적으로 확인하였음 <그림 8-14>



<그림 6-14> 보트 테일 유무에 따른 5톤 화물차 모델 후방 영역 유동가시화

제2절. 수치해석을 통한 공기역학적 성능평가

1. 수치해석 방법

□ 큰에디모사 (large-eddy simulation)

○ 지배방정식 및 수치해석 방법

- 유체의 운동량 및 질량 보존에는 Navier-Stokes equation을 이용하며, 식은 다음과 같음

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right)$$

○ 지배방정식

- 위의 Navier-Stokes equation을 필터링하여 큰에디는 직접 계산하고, 작은 스케일의 에디는 모델링

- Filtered Navier-Stokes equation ($\bar{}$:필터 연산)

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i}\,\overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

$$\left(\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i}\,\overline{u_j}\right)$$

○ 수치해석 기법

- Incompressible LES solver
- Unstructured solver
- Fully-implicit fractional method에 기반한 시간 전진
- Crank-Nicolson method를 이용한 시간 차분
- 2nd-order central difference를 이용한 공간 차분
- Dynamic Vreman global equlibrium subgrid-scale (SGS) model

□ 수치해석 도메인

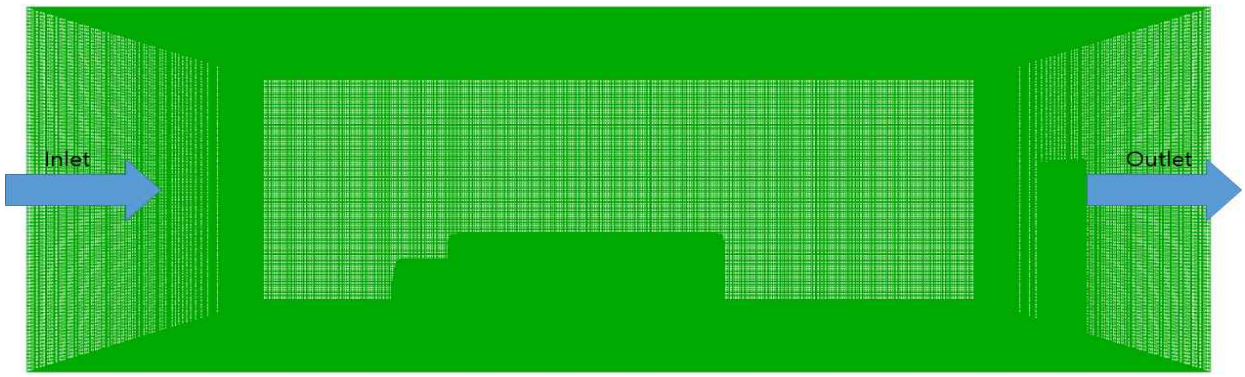
○ 수치해석 도메인 생성

- 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행

- Local refinement의 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1300~1600만개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

○ 경계조건 및 상수

- Inlet velocity: 90km/h (25m/s)
- Outlet: local acceleration + convection = 0
- Wall(풍동 외벽, 화물차 표면): no-slip condition
- Kinematic viscosity = 1.568 x 10-5
- CFL(무차원 시간간격) = 5.0



<그림 6-15> 수치해석 풍동과 경계조건의 예시 (15ton 화물차량)

□ **격자 생성**

○ 표1과 같은 셀 개수를 가지는 계산 격자 생성

<표 6-1> 모델별 격자의 셀 개수

	15톤 모델	40ft 모델	5톤 모델
셀 개수	약 1500만	약 1600만	약 1300만

2. 15톤 화물차 모델에 대한 수치해석 실험 결과

가. 보트 테일 효과

(1) 유동장 분석 결과

□ **시간 평균 유속방향 속도장의 유동장 결과**

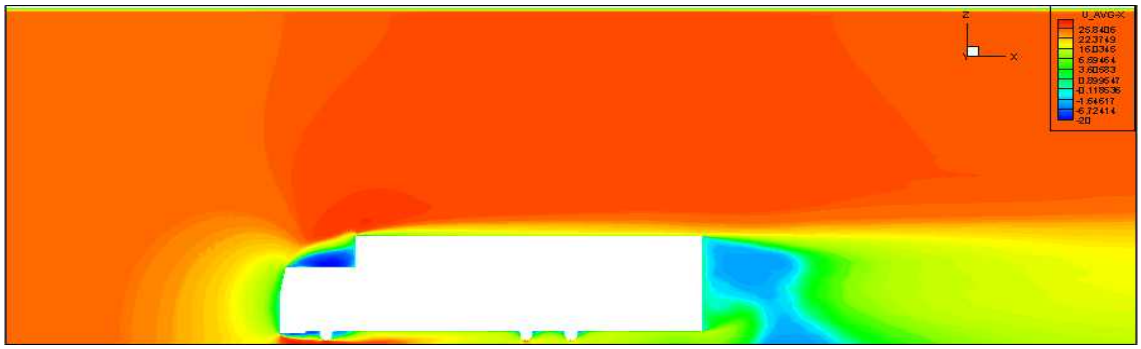
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 시간 평균 유속방향 속도장 도시화

○ 보트 테일을 장착한 화물차 후미부의 상단을 지나는 유동의 유속방향 속도가 크며, 후류 부분 유동의 역류가 감소. 이는 보트 테일이 화물차 후미부의 상단을 지나는

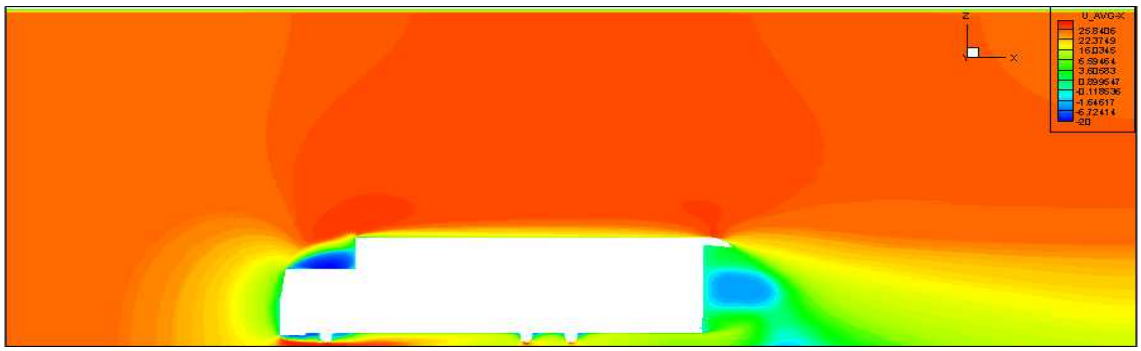
유동의 가이드 역할을 하여 화물차의 후류부분에서 발생하는 유동 박리가 감소하기 때문

○ 보트 테일을 장착한 후 유동 박리가 감소함에 따라 유동의 유속방향 속도 회복이 빨라졌으며, 이는 운동량의 손실이 감소함을 나타냄

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-16> 기본 모델의 시간 평균 속도장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



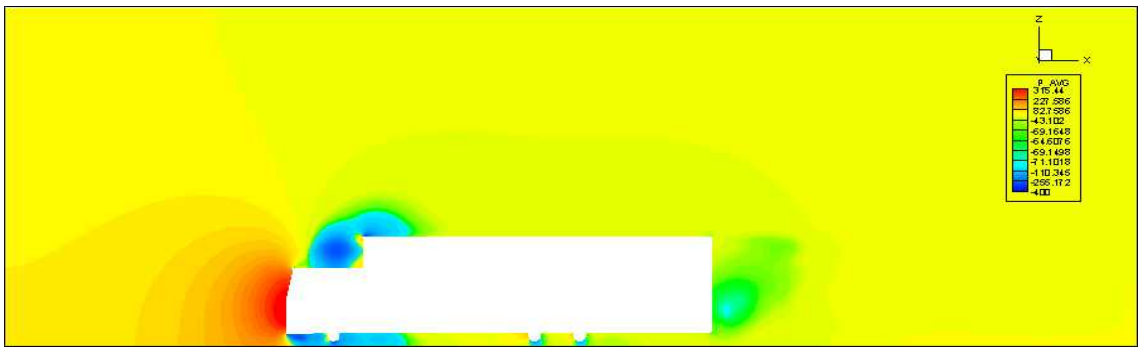
<그림 6-17> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 속도장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 압력장의 유동장 결과**

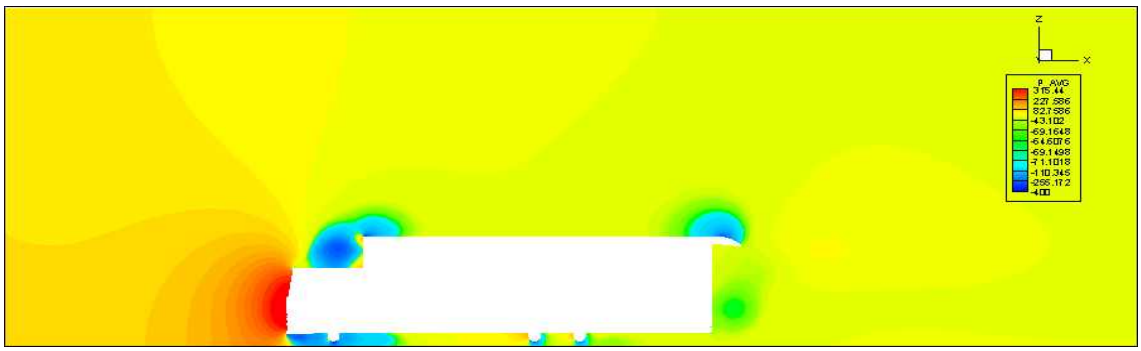
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 시간 평균 압력장 도시화

○ 보트 테일이 화물차 후미부의 상단을 지나는 유동의 가이드 역할을 하여 화물차 후류 발생하는 유동 박리가 감소

○ 기본 모델에서는 유동의 상류와 하류 압력 차이가 극심했던 반면, 보트 테일을 부착한 모델에서는 유동 박리가 감소하여 상류와 하류의 압력 차이가 완화됨. 그 결과 형상 저항에 의한 항력을 감소시킨 것으로 판단됨



<그림 6-18> 기본 모델의 시간 평균 압력장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-19> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 압력장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 x 방향 vorticity의 유동장 결과**

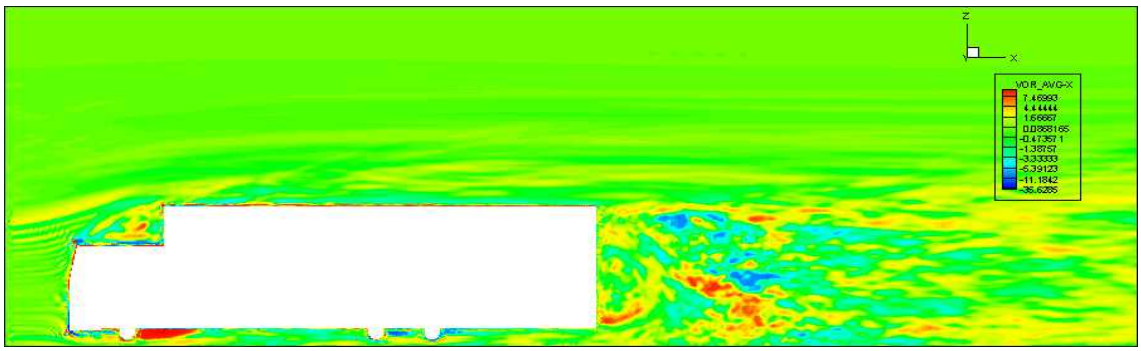
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 x 방향 vorticity를 도시화

○ x 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

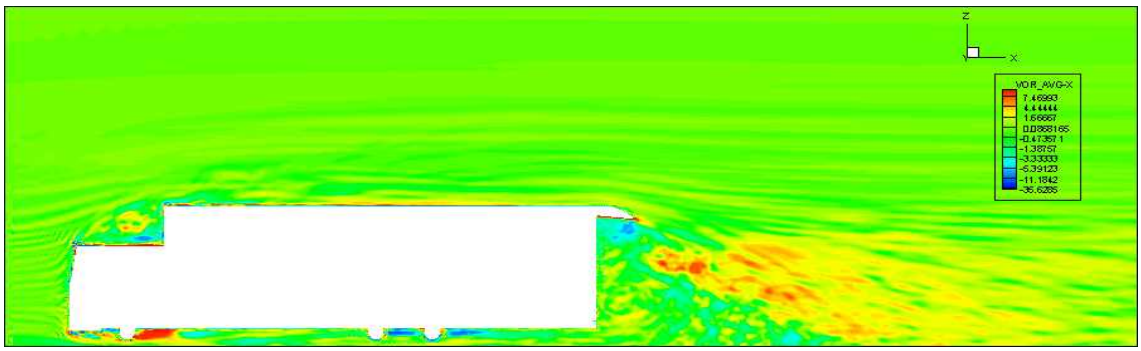
○ 기본 모델의 x 방향 vorticity은 차체 후미부와 인접한 영역에서도 형성이 되어있는 반면, 보트 테일을 부착한 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 x 방향 vorticity가 형성됨을 알 수 있음

○ 보트 테일을 장착함으로써 유동이 화물차의 형상을 공기역학적으로 따라가게 되면서 차체 후미부의 상단에서 발생하였던 유동 박리를 보트 테일의 뒷부분으로 미루는 효과가 있음을 확인 할 수 있음. 그 결과 손실 되는 운동량을 감소시킴

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-20> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-21> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 y 방향 vorticity의 유동장 결과**

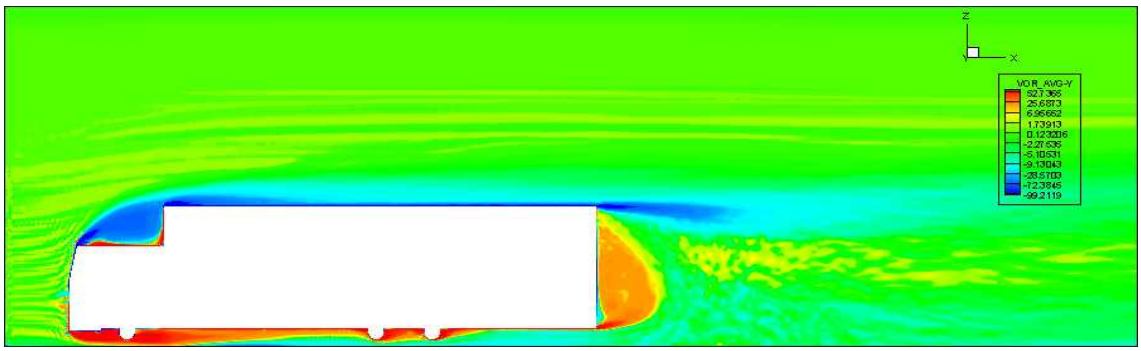
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 x 방향 vorticity를 도시화

○ y 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 y 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

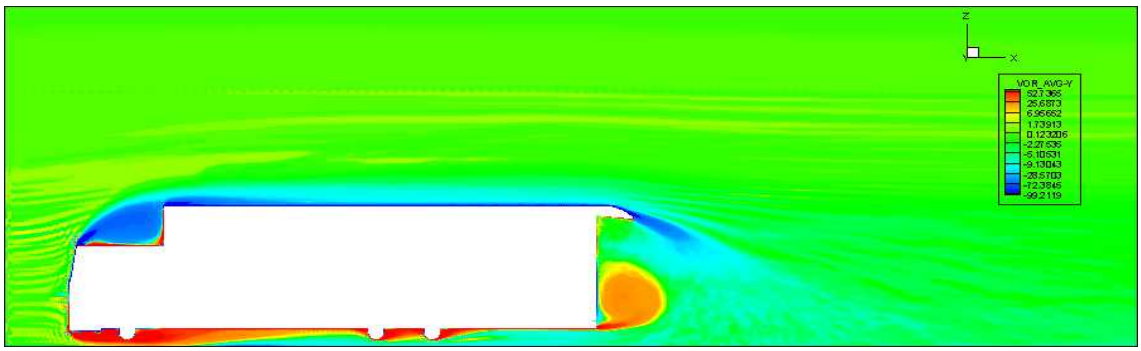
○ 기본 모델의 y 방향 vorticity은 차체 후미부와 인접한 영역에서도 형성이 되어있는 반면, 보트 테일을 부착한 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 y 방향 vorticity가 형성됨을 알 수 있음

○ 보트 테일을 장착함으로써 유동이 화물차의 형상을 공기역학적으로 따라가게 되면서 차체 후미부의 상단에서 발생하였던 유동 박리를 보트 테일의 뒷부분으로 미루는 효과가 있음을 확인 할 수 있음. 그 결과 손실 되는 운동량을 감소시킴

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-22> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-23> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 z 방향 vorticity의 유동장 결과**

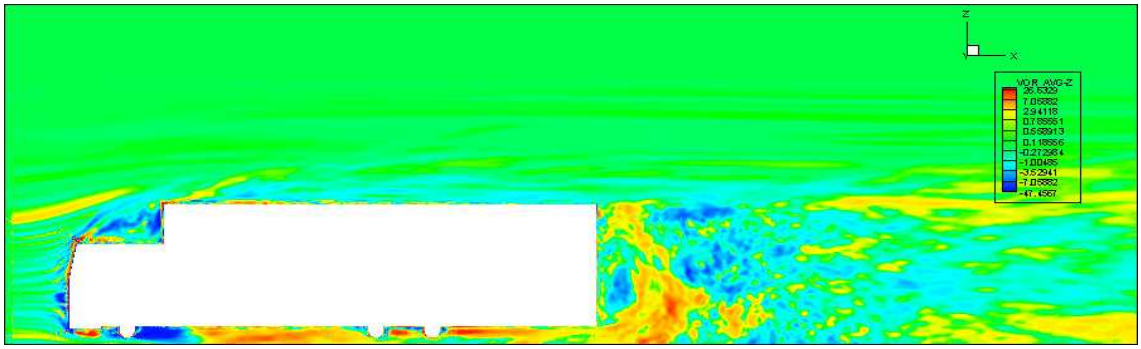
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 z 방향 vorticity를 도시화

○ z 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 z 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

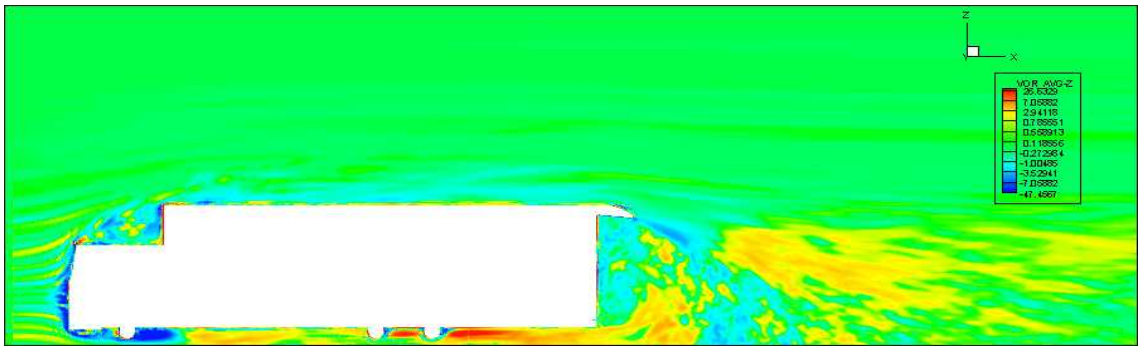
○ 기본 모델의 z 방향 vorticity은 차체 후미부와 인접한 영역에서도 형성이 되어있는 반면, 보트 테일을 부착한 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 z 방향 vorticity가 형성됨을 알 수 있음

○ 보트 테일을 장착함으로써 유동이 화물차의 형상을 공기역학적으로 따라가게 되면서 차체 후미부의 상단에서 발생하였던 유동 박리를 보트 테일의 뒷부분으로 미루는 효과가 있음을 확인 할 수 있음. 그 결과 손실 되는 운동량을 감소시킴

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-24> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-25> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

(2) 항력계수 비교

○ 90km/h 로 주행 시, 부착물이 없는 기본 모델과 사이드 스커트를 부착한 모델 주위 유동을 LES를 이용하여 항력계수 계산

○ 실제 시간으로 15초 동안의 수치해석 수행. 난류가 충분히 발달된 시간 범위를 평균하여 항력계수를 도출

○ 사이드 스커트를 부착함에 따라 항력계수가 감소하는 경향성 확인

<표 6-2> 보트 테일의 유무에 따른 항력계수 비교

15톤 화물차	항력계수(실험)	항력계수(수치해석)	오차
기본 모델	0.712	0.710	0.3%
보트 테일 모델	0.666	0.674	1.2%
항력계수 감소율	6.5%	5.01%	

3. 40ft 화물차 모델에 대한 수치해석 실험 결과

가. 보트 테일 효과

(1) 유동장 분석 결과

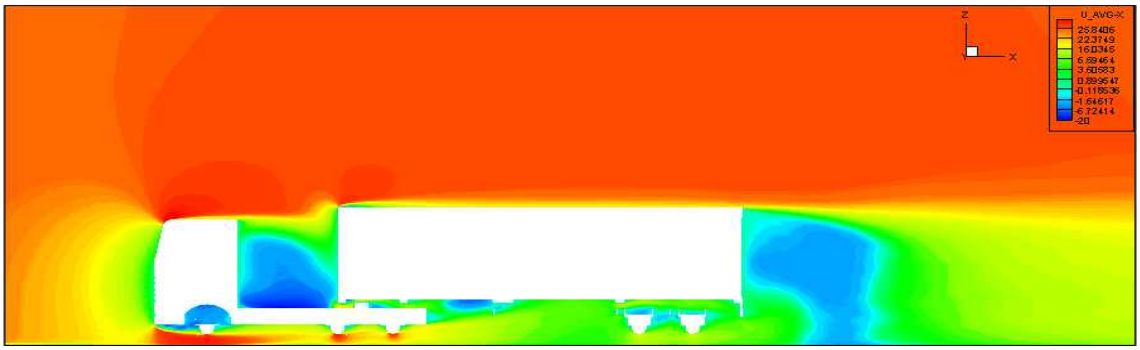
□ **시간 평균 유속방향 속도장의 유동장 결과**

○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 시간 평균 유속방향 속도장 도시화

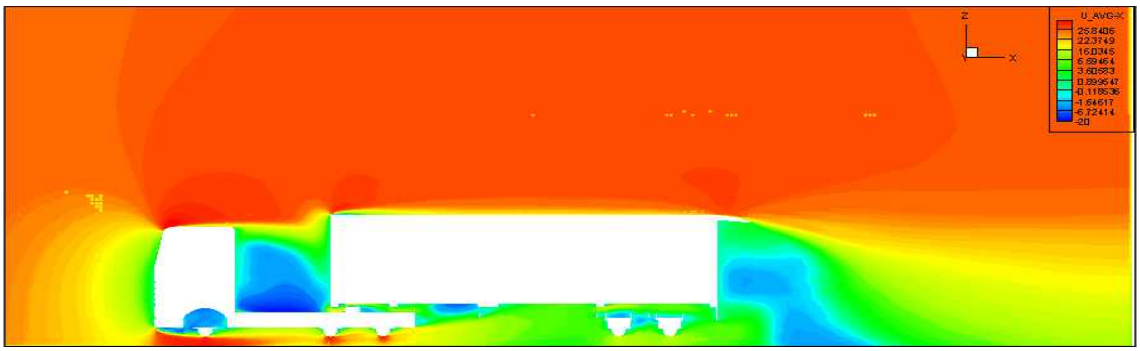
○ 보트 테일을 장착한 화물차 후미부의 상단을 지나는 유동의 유속방향 속도가 크며, 후류 부분 유동의 역류가 감소. 이는 보트 테일이 화물차 후미부의 상단을 지나는 유동의 가이드 역할을 하여 화물차의 후류부분에서 발생하는 유동 박리가 감소하기 때문

○ 보트 테일을 장착한 후 유동 박리가 감소함에 따라 유동의 유속방향 속도 회복이 빨라졌으며, 이는 운동량의 손실이 감소함을 나타냄

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-26> 기본 모델의 시간 평균 속도장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-27> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 속도장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 압력장의 유동장 결과**

○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 시간 평균 압력장 도시화

○ 보트 테일이 화물차 후미부의 상단을 지나는 유동의 가이드 역할을 하여 화물차 후류 발생하는 유동 박리가 감소

○ 기본 모델에서는 유동의 상류와 하류 압력 차이가 극심했던 반면, 보트 테일을 부착한 모델에서는 유동 박리가 감소하여 상류와 하류의 압력 차이가 완화됨. 그 결과 형상 저항에 의한 항력을 감소시킨 것으로 판단됨



<그림 6-28> 기본 모델의 시간 평균 압력장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-29> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 압력장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 x 방향 vorticity의 유동장 결과**

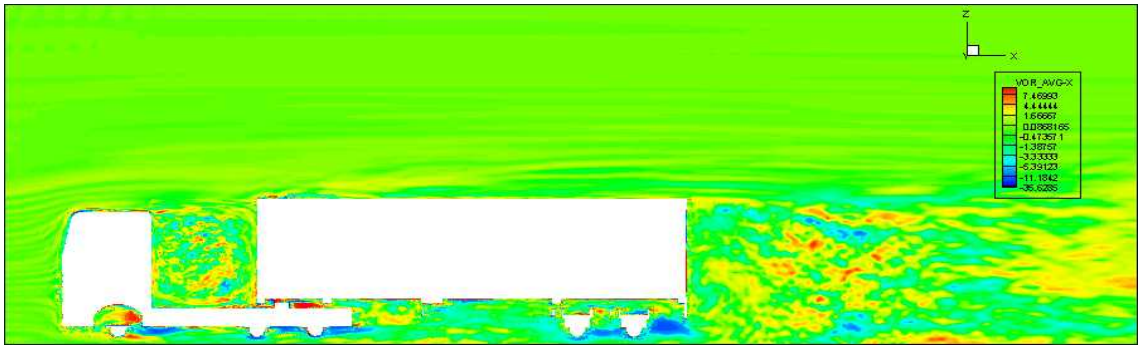
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 x 방향 vorticity를 도시화

○ x 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

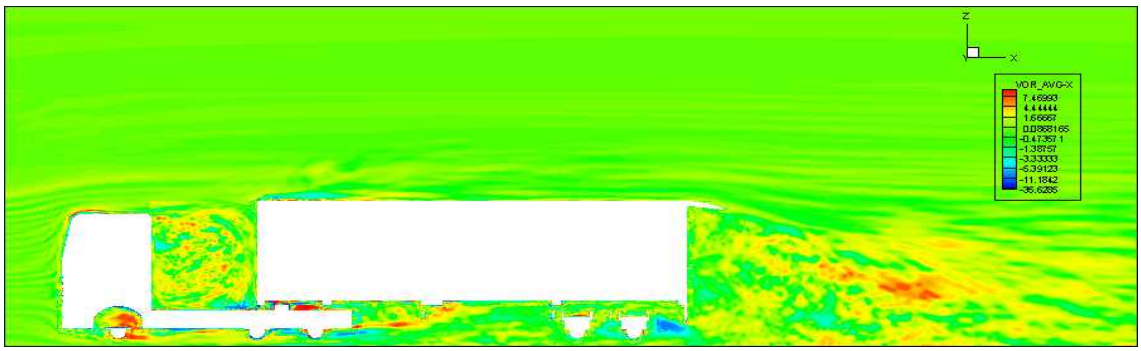
○ 기본 모델의 x 방향 vorticity은 차체 후미부와 인접한 영역에서도 형성이 되어있는 반면, 보트 테일을 부착한 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 x 방향 vorticity가 형성됨을 알 수 있음

○ 보트 테일을 장착함으로써 유동이 화물차의 형상을 공기역학적으로 따라가게 되면서 차체 후미부의 상단에서 발생하였던 유동 박리를 보트 테일의 뒷부분으로 미루는 효과가 있음을 확인 할 수 있음. 그 결과 손실 되는 운동량을 감소시킴

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-30> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-31> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 y 방향 vorticity의 유동장 결과**

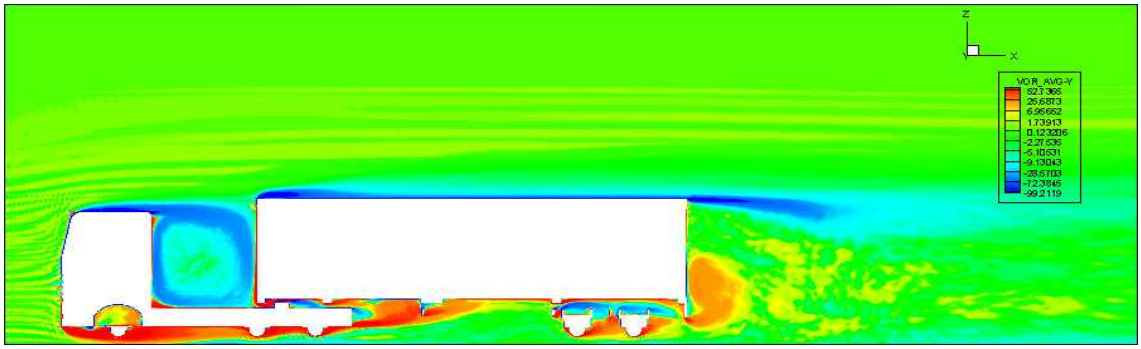
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 x 방향 vorticity를 도시화

○ y 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 y 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

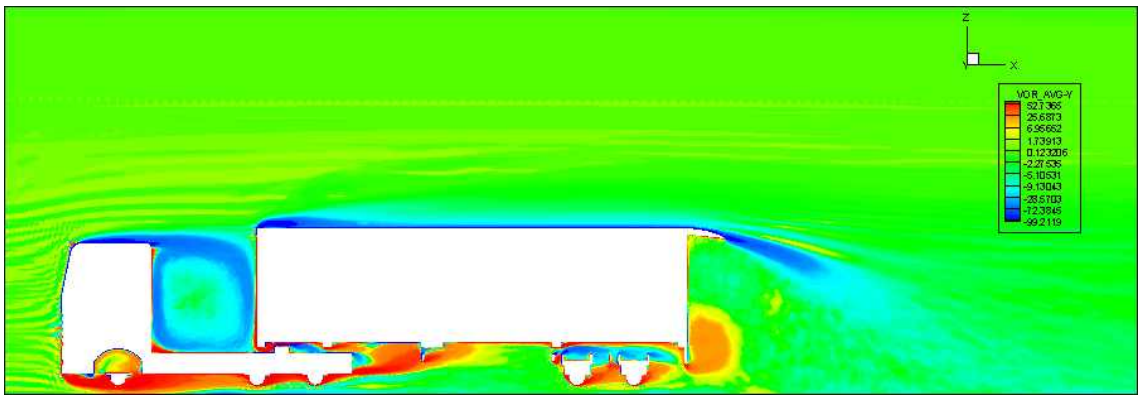
○ 기본 모델의 y 방향 vorticity은 차체 후미부와 인접한 영역에서도 형성이 되어있는 반면, 보트 테일을 부착한 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 y 방향 vorticity가 형성됨을 알 수 있음

○ 보트 테일을 장착함으로써 유동이 화물차의 형상을 공기역학적으로 따라가게 되면서 차체 후미부의 상단에서 발생하였던 유동 박리를 보트 테일의 뒷부분으로 미루는 효과가 있음을 확인 할 수 있음. 그 결과 손실 되는 운동량을 감소시킴

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-32> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-33> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 z 방향 vorticity의 유동장 결과**

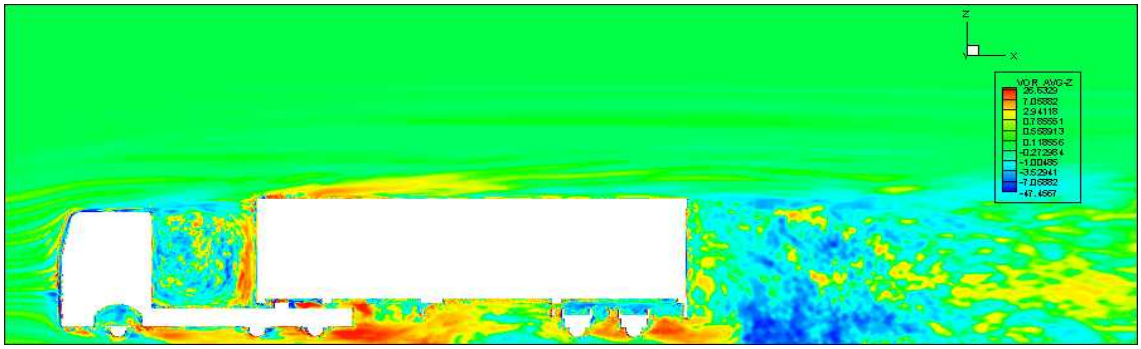
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 z 방향 vorticity를 도시화

○ z 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 z 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

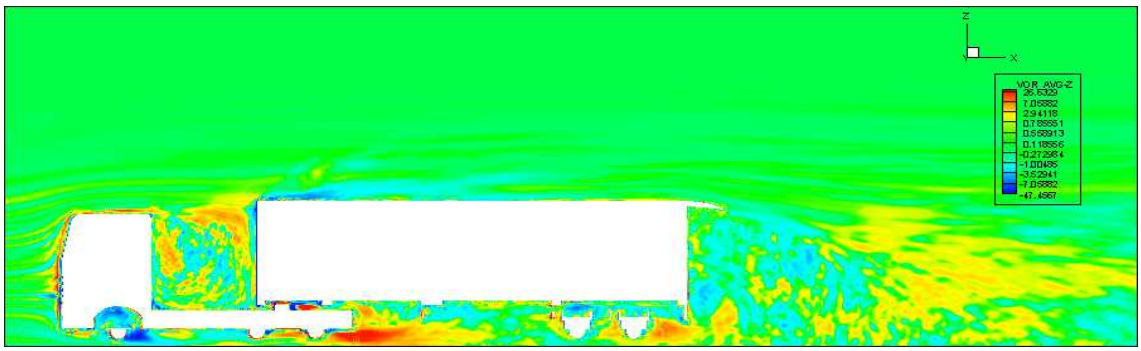
○ 기본 모델의 z 방향 vorticity은 차체 후미부와 인접한 영역에서도 형성이 되어있는 반면, 보트 테일을 부착한 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 z 방향 vorticity가 형성됨을 알 수 있음

○ 보트 테일을 장착함으로써 유동이 화물차의 형상을 공기역학적으로 따라가게 되면서 차체 후미부의 상단에서 발생하였던 유동 박리를 보트 테일의 뒷부분으로 미루는 효과가 있음을 확인 할 수 있음. 그 결과 손실 되는 운동량을 감소시킴

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-34> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-35> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

(2) 항력계수 비교

○ 90km/h 로 주행 시, 부착물이 없는 기본 모델과 사이드 스커트를 부착한 모델 주위 유동을 LES를 이용하여 항력계수 계산

○ 실제 시간으로 15초 동안의 수치해석 수행. 난류가 충분히 발달된 시간 범위를 평균하여 항력계수를 도출

○ 사이드 스커트를 부착함에 따라 항력계수가 감소하는 경향성을 확인

<표 6-3> 보트 테일의 유무에 따른 항력계수 비교

40ft 화물차	항력계수(실험)	항력계수(수치해석)	오차
기본 모델	0.779	0.881	13.0%
보트 테일 모델	0.747	0.855	14.5%
항력계수 감소율	4.2%	2.1%	

4. 5톤 화물차 모델에 대한 수치해석 실험 결과

가. 보트 테일 효과

(1) 유동장 분석 결과

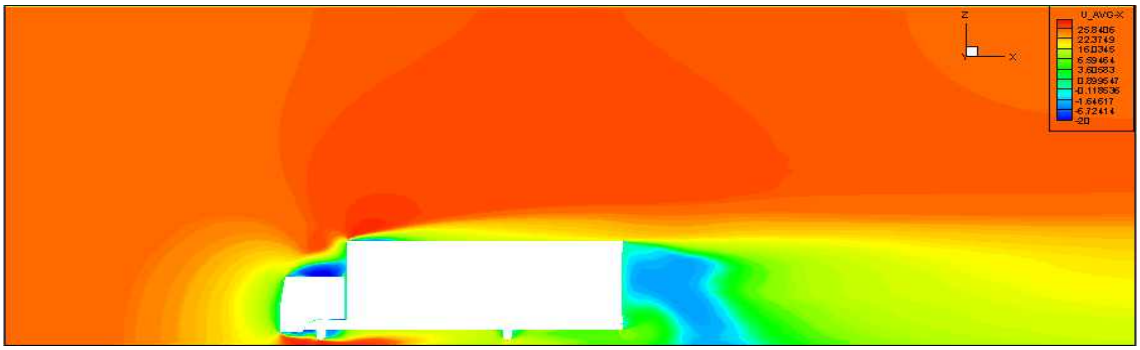
□ 시간 평균 유속방향 속도장의 유동장 결과

○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 시간 평균 유속방향 속도장 도시화

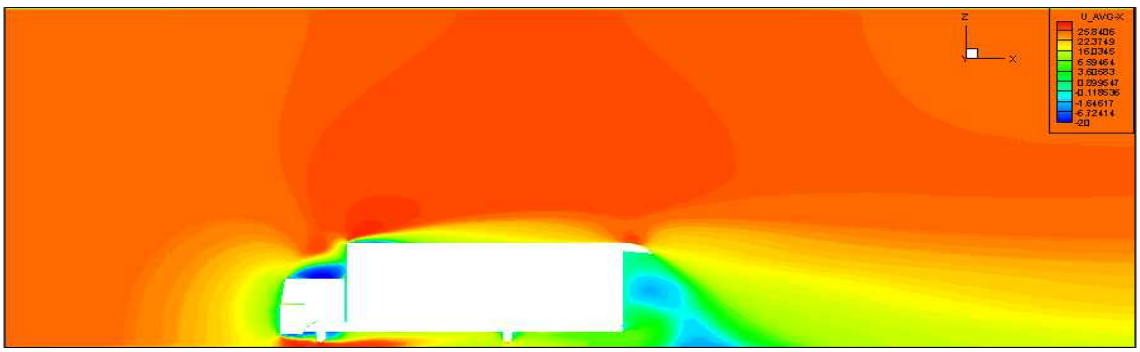
○ 보트 테일을 장착한 화물차 후미부의 상단을 지나는 유동의 유속방향 속도가 크며, 후류 부분 유동의 역류가 감소. 이는 보트 테일이 화물차 후미부의 상단을 지나는 유동의 가이드 역할을 하여 화물차의 후류부분에서 발생하는 유동 박리가 감소하기 때문

○ 보트 테일을 장착한 후 유동 박리가 감소함에 따라 유동의 유속방향 속도 회복이 빨라졌으며, 이는 운동량의 손실이 감소함을 나타냄

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-36> 기본 모델의 시간 평균 속도장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-37> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 속도장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

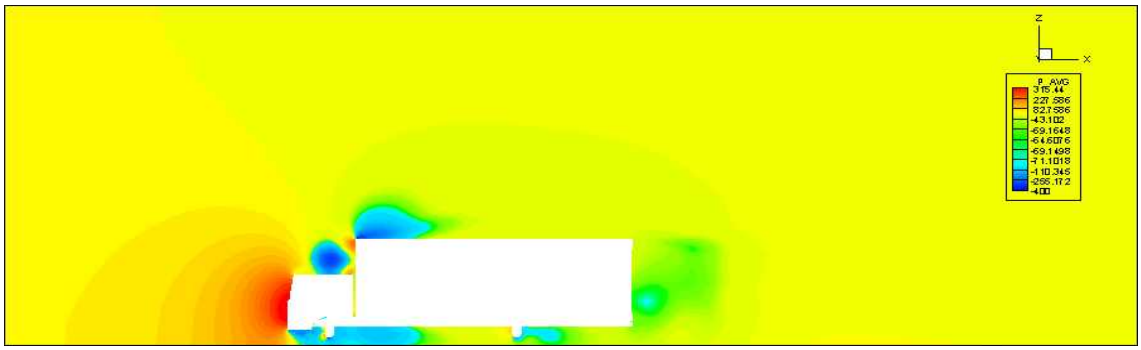
□ 시간 평균 압력장의 유동장 결과

○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 시간 평균 압력장 도시화

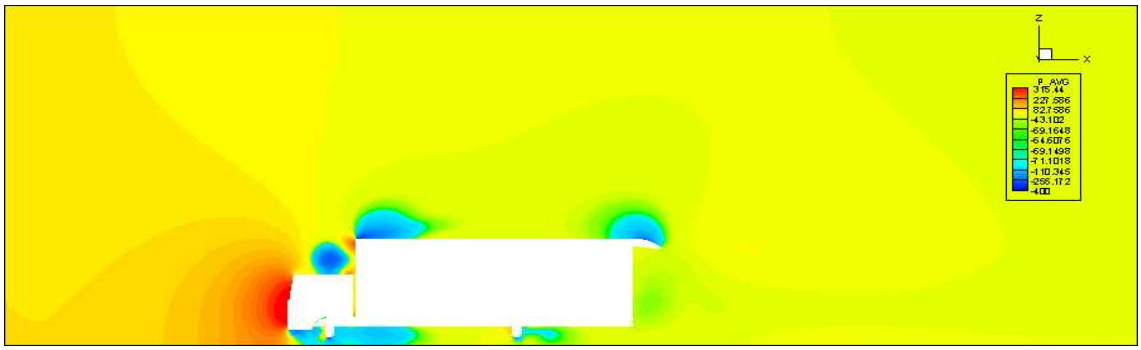
○ 보트 테일이 화물차 후미부의 상단을 지나는 유동의 가이드 역할을 하여 화물차 후류 발생하는 유동 박리가 감소

○ 기본 모델에서는 유동의 상류와 하류 압력 차이가 극심했던 반면, 보트 테일을 부착한 모델에서는 유동 박리가 감소하여 상류와 하류의 압력 차이가 완화됨. 그 결과

형상 저항에 의한 항력을 감소시킨 것으로 판단됨



<그림 6-38> 기본 모델의 시간 평균 압력장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-39> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 압력장
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 x 방향 vorticity의 유동장 결과**

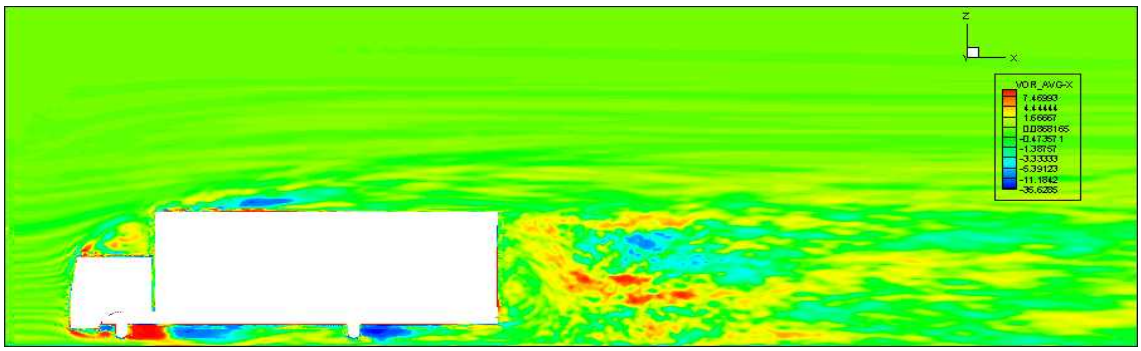
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 x 방향 vorticity를 도시화

○ x 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 x 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

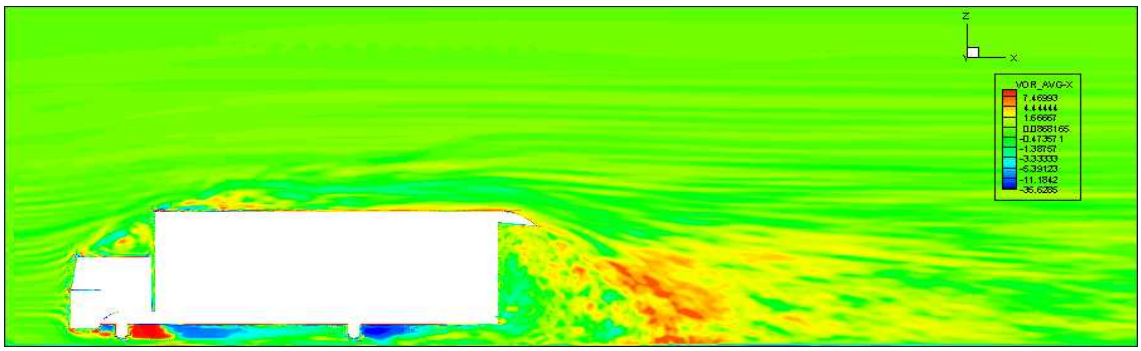
○ 기본 모델의 x 방향 vorticity은 차체 후미부와 인접한 영역에서도 형성이 되어있는 반면, 보트 테일을 부착한 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 x 방향 vorticity가 형성됨을 알 수 있음

○ 보트 테일을 장착함으로써 유동이 화물차의 형상을 공기역학적으로 따라가게 되면서 차체 후미부의 상단에서 발생하였던 유동 박리를 보트 테일의 뒷부분으로 미루는 효과가 있음을 확인 할 수 있음. 그 결과 손실 되는 운동량을 감소시킴

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-40> 기본 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-41> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 x 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 y 방향 vorticity의 유동장 결과**

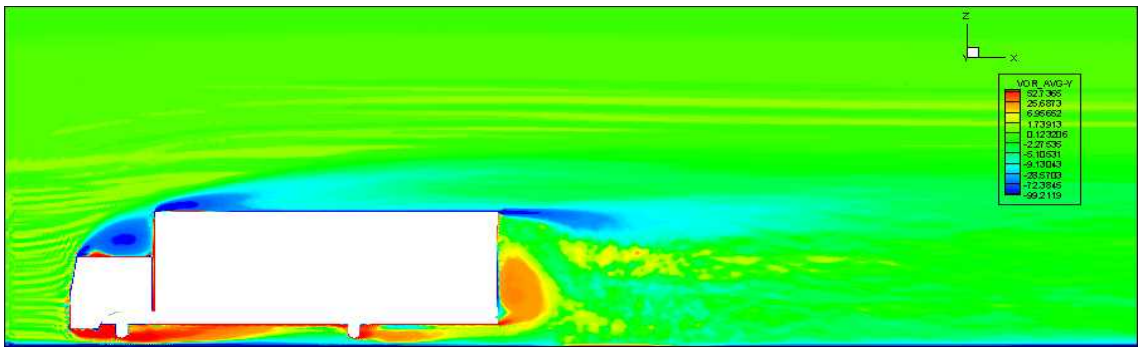
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 x 방향 vorticity를 도시화

○ y 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 y 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

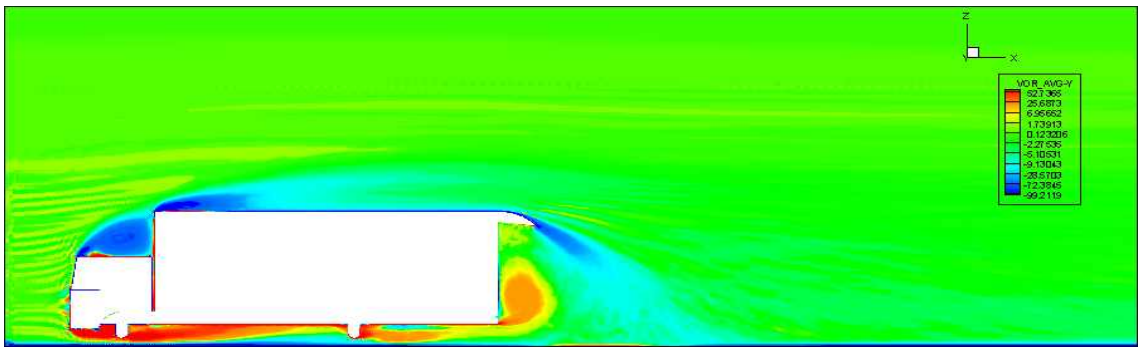
○ 기본 모델의 y 방향 vorticity은 차체 후미부와 인접한 영역에서도 형성이 되어있는 반면, 보트 테일을 부착한 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 y 방향 vorticity가 형성됨을 알 수 있음

○ 보트 테일을 장착함으로써 유동이 화물차의 형상을 공기역학적으로 따라가게 되면서 차체 후미부의 상단에서 발생하였던 유동 박리를 보트 테일의 뒷부분으로 미루는 효과가 있음을 확인 할 수 있음. 그 결과 손실 되는 운동량을 감소시킴

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-42> 기본 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-43> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 y 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

□ **시간 평균 z 방향 vorticity의 유동장 결과**

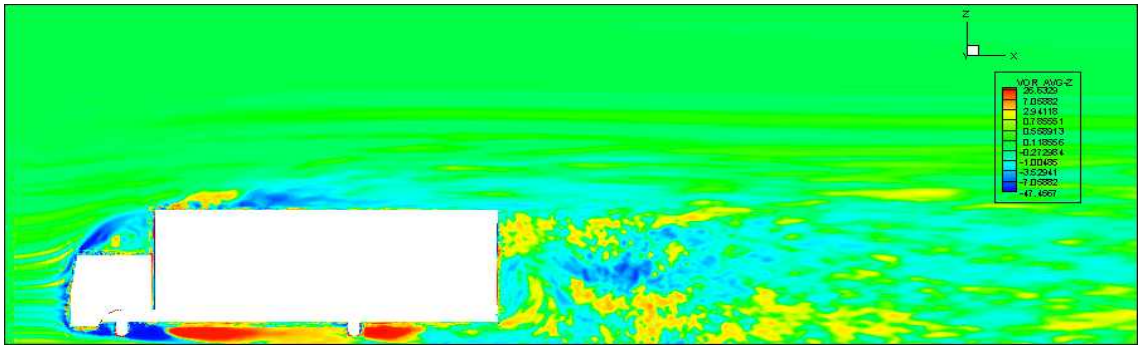
○ y 축에 수직한 중간 평면 평면에서의 z 방향 vorticity를 도시화

○ z 방향 vorticity의 크기가 클수록 차체 하부의 z 방향을 축으로 시계, 또는 반시계 방향으로 회전하는 유동이 많음을 뜻함

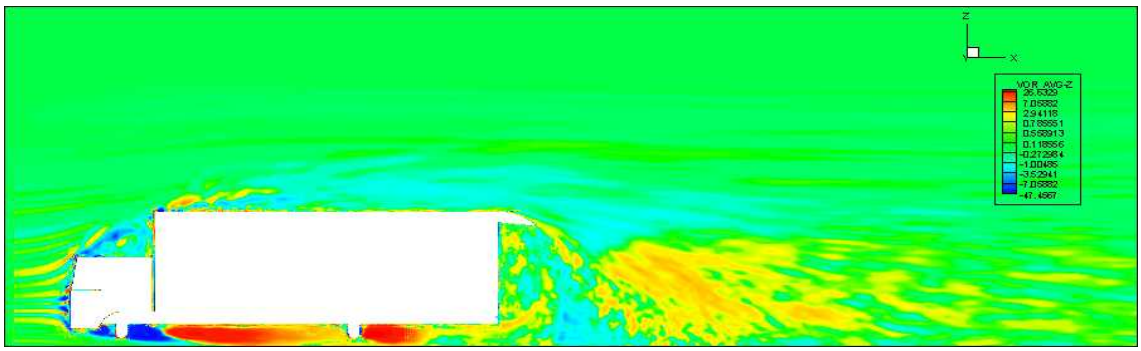
○ 기본 모델의 z 방향 vorticity은 차체 후미부와 인접한 영역에서도 형성이 되어있는 반면, 보트 테일을 부착한 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 z 방향 vorticity가 형성됨을 알 수 있음

○ 보트 테일을 장착함으로써 유동이 화물차의 형상을 공기역학적으로 따라가게 되면서 차체 후미부의 상단에서 발생하였던 유동 박리를 보트 테일의 뒷부분으로 미루는 효과가 있음을 확인 할 수 있음. 그 결과 손실 되는 운동량을 감소시킴

○ 운동량 손실과 항력이 비례하므로 결과적으로 화물차가 받는 항력이 감소함을 알 수 있음



<그림 6-44> 기본 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)



<그림 6-45> 보트 테일 부착 모델의 시간 평균 z 방향 vorticity
(Y축에 수직한 중간 평면에서의 contour)

(2) 항력계수 비교

○ 90km/h 로 주행 시, 부착물이 없는 기본 모델과 사이드 스커트를 부착한 모델 주위 유동을 LES를 이용하여 항력계수 계산

○ 실제 시간으로 15초 동안의 수치해석 수행. 난류가 충분히 발달된 시간 범위를 평균하여 항력계수를 도출

○ 사이드 스커트를 부착함에 따라 항력계수가 감소하는 경향성 확인

<표 6-4> 보트 테일의 유무에 따른 항력계수 비교

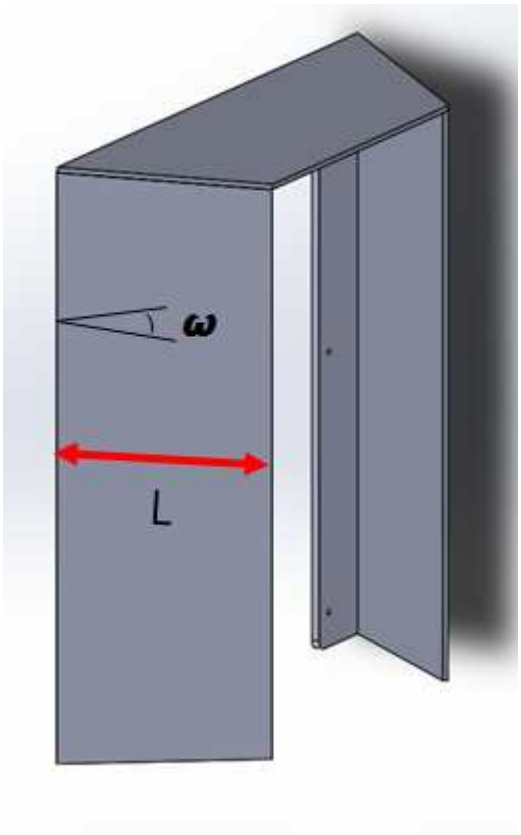
5톤 화물차	항력계수(실험)	항력계수(수치해석)	오차
기본 모델	0.701	0.688	1.9%
보트 테일 모델	0.656	0.668	2.4%
항력계수 감소율	6.4%	2.8%	

제3절. 최적화 설계

□ 보트 테일 최적화

○ 기존 보트 테일 모델의 정의

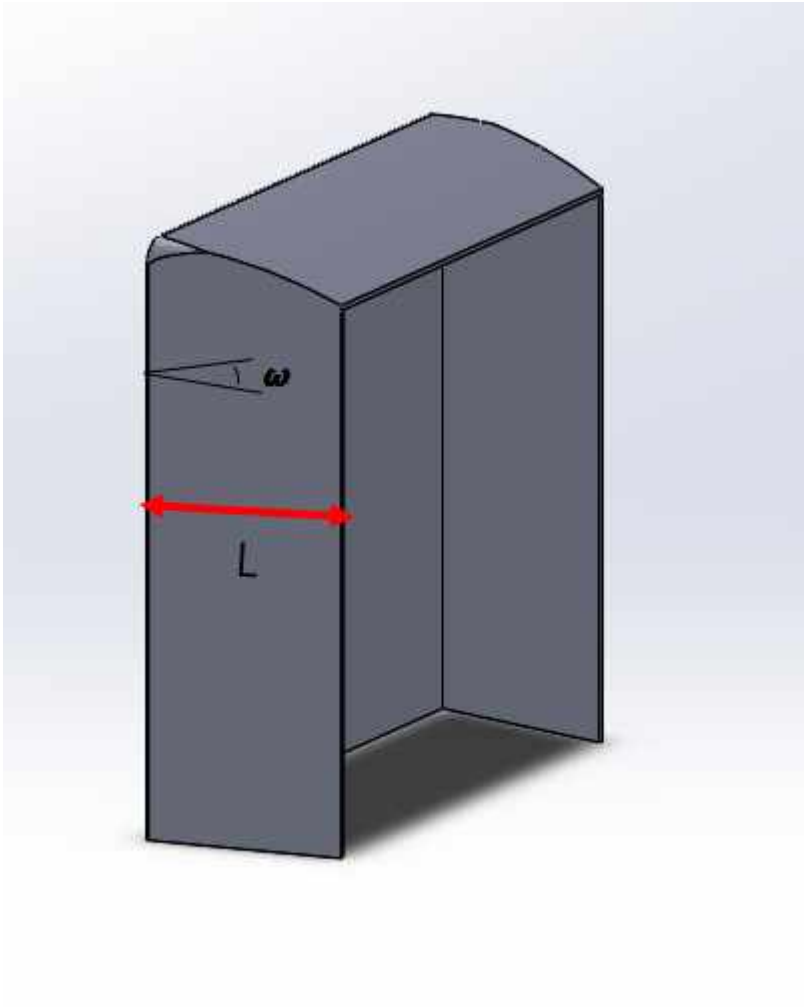
- 아래 그림에서 L은 보트 테일 옆면의 길이, ω는 보트 테일의 옆면과 트럭의 옆면이 이루는 각도임
- 기존 보트 테일의 모델을 Lcm (ω)로 정의



<그림 6-46> 보트 테일 기존 모델에
대한 길이와 각도의 정의

○ Gap repair 보트 테일 모델의 정의

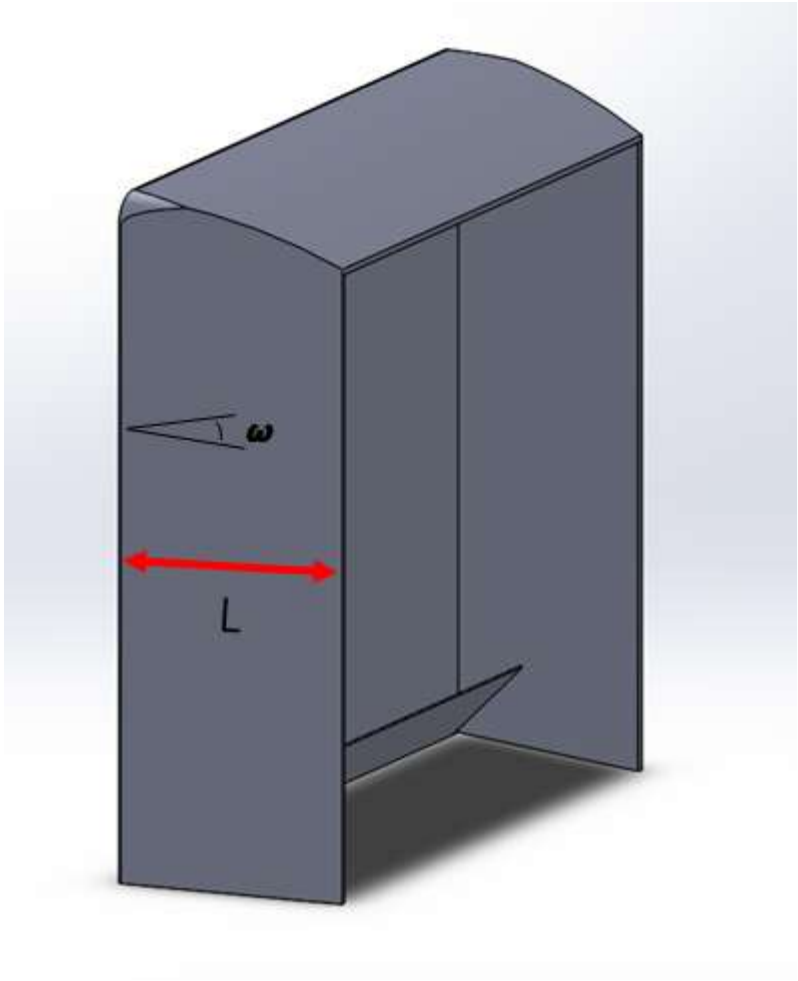
- 아래 그림에서 L은 보트 테일 옆면의 길이, ω는 보트 테일의 옆면과 트럭의 옆면이 이루는 각도임
- Gap repair 보트 테일의 모델을 Lcm (ω) + G 으로 정의



<그림 6-47> 보트 테일 G 모델에 대한 길이와 각도의 정의

○ Gap repair + bottom 보트 테일 모델의 정의

- 아래 그림에서 L은 보트 테일 옆면의 길이, ω 는 보트 테일의 옆면과 트럭의 옆면이 이루는 각도임
- Bottom 의 길이는 45 cm 이며, 화물차의 뒷면과 이루는 각도는 45°
- Gap repair + bottom 보트 테일의 모델을 Lcm (ω) + G + B 으로 정의



<그림 6-48> 보트 테일 G + B 모델에 대한 길이와 각도의 정의

○ 보트 테일 모델의 항력계수에 대한 고찰

- 수치해석 유동장 분석을 통하여 보트 테일을 부착함으로써 후류 부분의 유동 역류 속도의 크기와 유동 박리가 확연히 감소함을 확인을 했으며, 이로 인해 운동량의 손실이 줄어들어 결과적으로 항력계수가 감소함을 알 수 있음
- 기존 보트 테일 모델의 L의 길이에 따라 난류의 발생 정도가 달라지며 ω에 따라 압력 변화 정도가 달라지기 때문에 다양한 L과 ω에 대한 실험이 필요
- 기존 보트 테일 모델의 다양한 L과 ω 에 대한 항력계수 결과 값을 살펴보면, 모든 화물차에 대해서 90cm(80°)의 보트 테일 모델에서 최솟값을 가짐, 즉 90cm (80°) 보트 테일 모델이 화물차 종류에 상관없이 최적의 각도와 길이임을 유추해 볼 수 있음
- 기존의 보트 테일은 차체 후미부와 약간의 단차가 있어 이 부분에서 급격한 압력강하가 발생하게 됨 그 결과 유동박리가 일어나고 운동량의 손실이 커져 항력계수 감소에 부정적 영향을 미침. 이러한 문제점을 개선하기 위해 이 단차를 메우는 구조물(gap repair, G)를 장착함
- 보트 테일과 차체 후미부사이의 약간의 단차를 메우는 Gap repair로 인하여 차체 후미부에서 곡률 반지름이 커지게 됨. 압력변화는 곡률 반지름과 반비례하기 때문

에, gap repair를 장착한 차체 후미부에서 압력변화가 줄어들어 유동 박리가 줄어듦. 그 결과 운동량의 손실이 감소하여 항력계수 감소에 긍정적 영향을 미침

- 기존 보트 테일에 gap repair를 장착하였더니 15톤 화물차의 경우 항력계수 감소율이 4.3%에서 6.5%로 확연하게 증가
- 차체 하부의 유동이 차체 후미부에 도달하게 되면서 급격한 압력강하가 발생하게 됨 그 결과 유동박리가 일어나고 운동량의 손실이 커져 항력계수 감소에 부정적 영향을 미침. 이러한 문제점을 개선하기 위해 보트 테일의 하부에 스포일러 형상의 구조물(bottom, B)을 장착
- Bottom 장치의 장착으로 차체 후미부의 하부 부근에서의 급격한 압력변화를 막고, 압력 회복을 촉진하게 되어 유동 박리가 줄어듦. 그 결과 운동량의 손실이 감소하여 항력계수 감소에 긍정적 영향을 미침
- Gap repair를 장착한 보트 테일에 bottom 장치를 장착하였더니 15톤 화물차의 경우 항력계수 감소율이 6.5%에서 8.1%로 확연하게 증가

<표 6-5> 화물차 종류별 최소 항력계수를 갖는 기존 보트 테일 모델

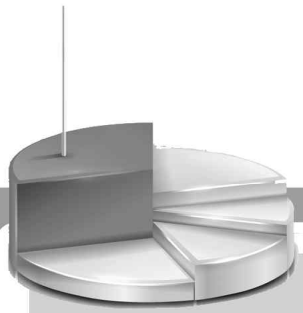
화물차 종류	보트 테일 모델	항력계수(실험)	항력계수 감소율(실험)
15톤	90cm (80°)	0.680	4.3%
5톤	90cm (80°)	0.672	4.3%
40ft	90cm (80°)	0.747	4.2%

<표 6-6> G 보트 테일 모델을 장착한 15톤 화물차의 항력계수 및 항력계수 감소율

화물차 종류	보트 테일 모델	항력계수(실험)	항력계수 감소율(실험)
15톤	90cm (80°) + G	0.666	6.5%

<표 6-7> G + B 보트 테일 모델을 장착한 15톤 화물차의 항력계수 및 항력계수 감소율

화물차 종류	보트 테일 모델	항력계수(실험)	항력계수 감소율(실험)
15톤 90cm (80°) + G + B	90cm (80°) + G + B	0.653	8.1%



제7장 보트 테일을 통한 운행안정성 향상 기술 개발

제1절 풍동 실험을 통한 주행 안정성 분석

제2절. 수치해석을 통한 주행 안정성 분석

제3절 보트테일에 대한 최적화 설계

제7장. 보트 테일을 통한 운행안정성 향상 기술 개발

제1절. 풍동 실험을 통한 주행 안정성 분석

1. 실험장치

□ POSTECH 아음속 풍동

○ 1995년 준공된 포스텍 아음속 풍동은 유체역학적 기본 현상에서 부터 제반 응용유체역학적 현상을 연구할 수 있도록 설계된 다목적 아음속 풍동 <그림 3-1>

○ 자동차와 기차와 같은 운송체의 공력 실험에 적합

○ 폐쇄형(closed circuit)으로 전체크기 높이 6m, 폭 14m, 길이 37m를 가짐 <그림 3-2>

○ 시험부(test section)의 높이 1.5m, 폭 1.8m, 길이 4.3m

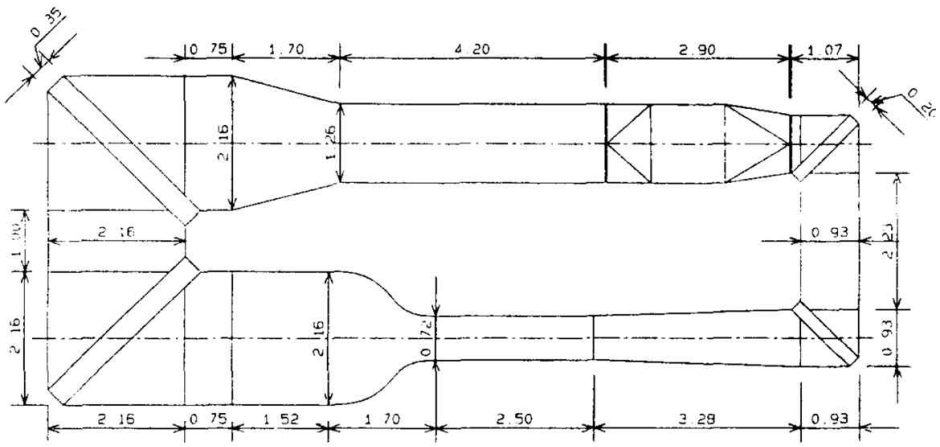
○ 최저풍속: 5m/s, 최대풍속: 75 m/s

○ 수축비: 9:1

○ 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%, 균일도 (flow uniformity)는 0.25%로 운송체의 공력 실험에 적합한 풍동임



<그림 7-1> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관



<그림 7-2> POSTECH 아음속 풍동도면

□ 공력 측정용 external balance

○ 자동차 차체에 걸리는 힘과 모멘트와 같은 공력을 측정하기 위해 차체에 작용하는 풍하중을 정밀하게 측정하여야 함

○ 포스텍 아음속풍동에 설치된 external balance는 독일항공우주연구청(DLR) Braunschweig 분소에서 자동차 공력측정용으로 제작한 7-component balance

○ 측정범위 및 분해능

- 측정범위: X=±500N, Mx=±500Nm, Y=±1000N, My=±600Nm, Z=±4000N Mz=±200Nm
- 정확도: 0.2% of full scale dX=1N, dY=2N, dZ=8N

○ 분해능: 0.01N 이하

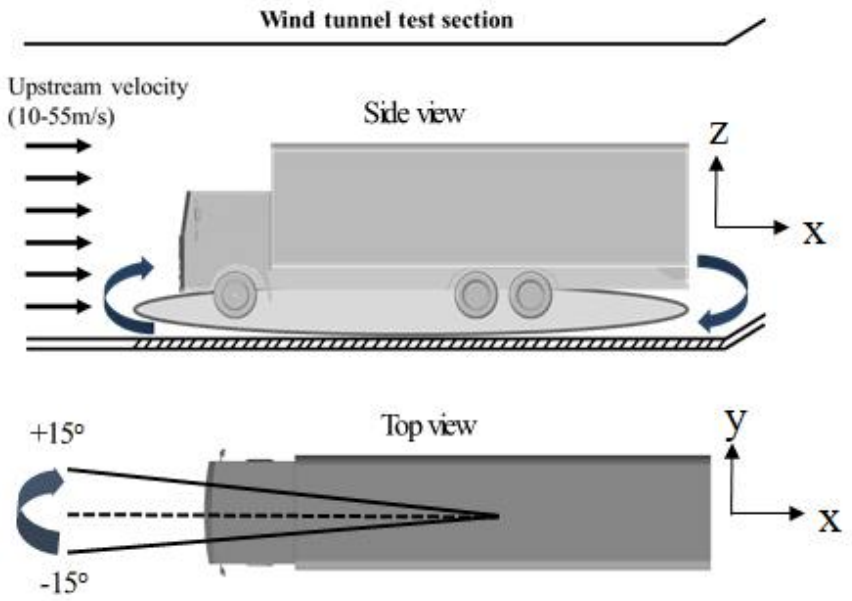
○ External balance 아래에 turn table을 설치하여 측풍이 불어올 경우에 대한 풍동 실험이 가능함 <그림 7-3>

□ 진동 측정

○ 유동에 기인한 진동(Flow induced vibration)을 측정하기 위하여 EXTACH 社 Vibration meter and laser combination tachometer을 이용하여 차량 하부의 진동을 측정함

○ 측정 범위 및 분해능

- Displacement(peak to peak) 0.005 ~ 1.999 mm (accuracy ± 5%)
- Frequency range 10Hz ~ 1000Hz meets ISO 2954



<그림 7-3> Yaw angle 조절을 위한 turn table 개략도

2. 실험 대상

□ 실험 모델

○ 국내에서 가장 많이 사용하는 화물차인 15톤 트럭 및 40ft 트레일러를 대상으로 사이드 스커트(side skirt), 보트 테일(boat tail)과 같은 유동제어용 부가장치를 차체에 장착하여 공력 성능을 시험함

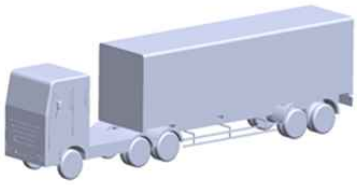
○ 화물차에 걸리는 형상저항(pressure form drag), 차체 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후미부에서 발생하는 유동박리에 기인한 공기저항을 효과적으로 제어함으로써 화물차의 공기저항 저감 시키고자 함

○ 공기역학적인 해석을 통해 화물차의 항력 감소 메커니즘을 밝히고 저저항 운송체의 공력 설계기술을 개발

○ 본 연구에서는 사이드 스커트와 보트테일의 형상 및 각도 등과 같은 실험변수를 변화시키면서 화물차에 걸리는 항력과 측력을 측정하여 항력계수(C_D)값과 횡풍측력계수(C_S)을 도출함

- 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 H사의 15톤 트럭의 외형 및 S사의 40ft 트레일러의 외형을 실측한 후 이를 역설계하는 방식으로 3차원(3D) 모델을 얻은 후, 풍동시험부의 폐색율(blockage ratio, 풍동의 단면적에 대해 모형의 단면적이 차지하는 비율)이 8% 이하가 되도록 축소비를 정하고 축소 모형을 제작

○ 각각의 구체적인 형태 및 축소 비율, 폐색율은 <그림 7-4>에 나타냄

실험 대상 모형			
실험대상	15 ton 현대 Trago Xcient		40ft SCANIA G440
실제크기(m)	12(L) x 2.5(B) x 3.3(H)		18(L) x 2.5(B) x 4(H)
실험모형			
모형 scale	Force measurement	1/8	1/8
	PIV experiment	1/15	
폐색율 (Blockage ratio)	Force measurement	4.7%	5.7%
	PIV experiment	6.5%	

<그림 7-4> 실험 대상 화물차 모델 및 사양

3. 주행 안정성 평가

□ 주행안정성 평가 실험 방법 및 모형

○ 화물차는 차체 단면적에 비해 길이가 길어 측풍의 영향이 크고 유동에 기인한 진동(flow-induced vibration)이 발생하여 주행 안정성이 감소할 수 있음

○ 측풍이 화물차에 불어오는 경우를 모사하여 풍동 바닥면에 설치된 turn table을 이용하여 yaw angle(Φ)을 +15°~ -15°까지 변화시켜가면서 차량에 걸리는 공력특성 변화를 분석함

○ 풍속은 임계 레이놀즈 수(Reynolds) 영역을 넘는 25m/s(=90km/h)로 고정하여, 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용하였음

○ 화물차에 미치는 항력(F_D), 항력계수(C_D), 측력(F_S), 횡풍측력계수(C_S)는 다음과 같이 정의하였음

$$F_D = F_x \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_y \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_D = \frac{Drag\,\mathrm{force}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

$$F_s = F_y \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_x \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_s = \frac{|Side\,\mathrm{force}|}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

□ 실험 모형

○ 보트테일에 대한 모델의 정의용어

- L은 보트 테일 옆면의 길이, ω는 보트 테일의 옆면과 트럭의 옆면이 이루는 각도

- 기존 보트 테일 모델을 Lcm (ω)로 정의함

○ Gap repair 보트 테일 모델의 정의

- 기존의 보트 테일의 상부면의 경우, 차체 후미부와 약간의 높이 차가 존재하여 유동 박리(flow separation)가 보트 테일의 끝단보다 전방위치에서 발생함. 이러한 문제점을 개선하기 위해 이 높이차효과를 없애고 유동이 후미부에서 부드럽게 이어지도록 하는 구조물(gap repair, 이하 G로 표기)

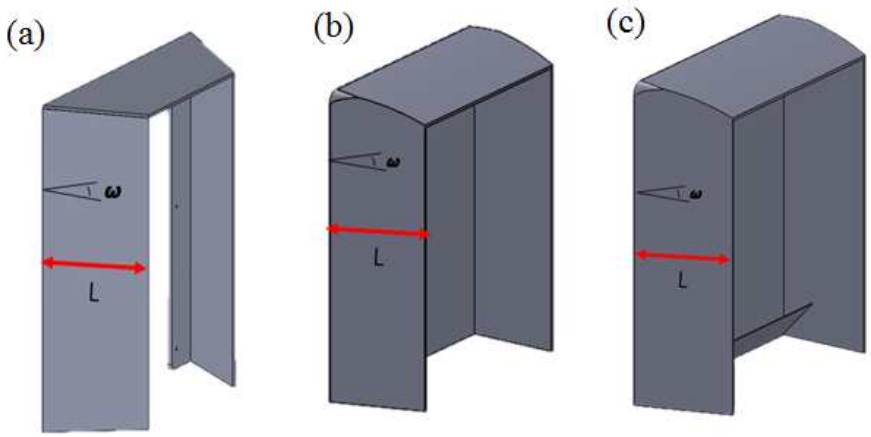
- Gap repair 보트 테일 모델을 Lcm (ω) + G 로 표시

○ LIAD (lower Inclined Air Deflector) 보트 테일

- 차체 하부에서 발달하는 와류의 영향을 감소시키고, 차체 후미부에 형성된 낮은 압력 영역 (low pressure zone)에서의 압력을 높이기 위한 대책의 일환으로 후미부 아래쪽에 스포일러 형태의 LIAD를 추가로 부착하였음

- 차량 후미부 아래쪽에 스포일러 형태로 위로 살짝 들려올린 LIAD (Lower Inclined Air Deflector)를 추가로 부착하여 차체 하부 유동을 효과적으로 제어하여 후면부의 낮은 압력을 높이고자 함

- LIAD의 길이는 보트테일이 길이의 1/2 이며, 화물차의 뒷면과 이루는 각도는 30~60°로 설정함



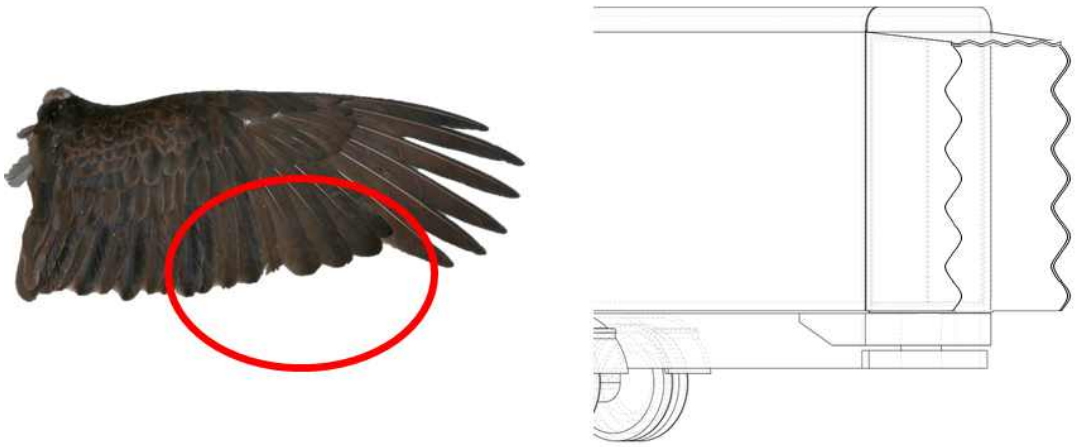
<그림 7-5> 보트 테일 모델. a)기존 모델, b)Gap repair가 추가된 보트 테일, c) LIAD(lower Inclined Air Deflector)가 추가된 보트 테일

○ 생체 모방형 보트 테일

- 조류는 비행 시 몸체 주위 유동을 효과적으로 제어하여 몸체에 걸리는 공기저항을 크게 감소시키고 유동에 기인한 진동을 줄임

- 조류의 날개 끝단의 형상을 자연 모사하여 보트 테일의 끝단에 적용하였음. 기존의 단조로운 평판형 보트 테일에 비해 차체 후방 유동을 효과적으로 제어하여 공기저항을 줄이고 주행안정성을 높이고자 함

- 특허 출원중 “화물차용 보트 테일 및 보트 테일을 구비한 화물차”



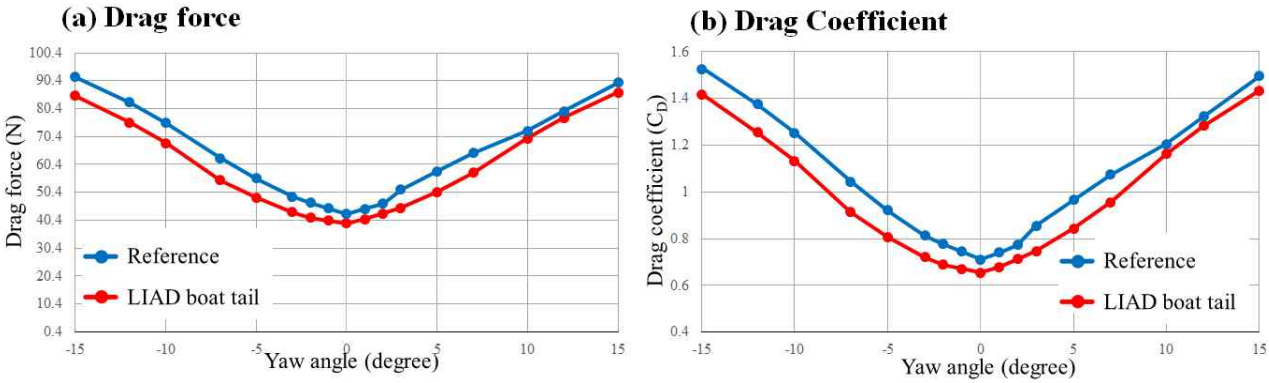
<그림 7-6> 조류의 날개 끝 형상(左)과 및 이를 생체 모방한 파형의 끝단을 가지는 보트 테일의 개략도(右)

□ **Yaw angle(Φ) 변화에 따른 15톤 화물차 모델의 공력특성 분석**

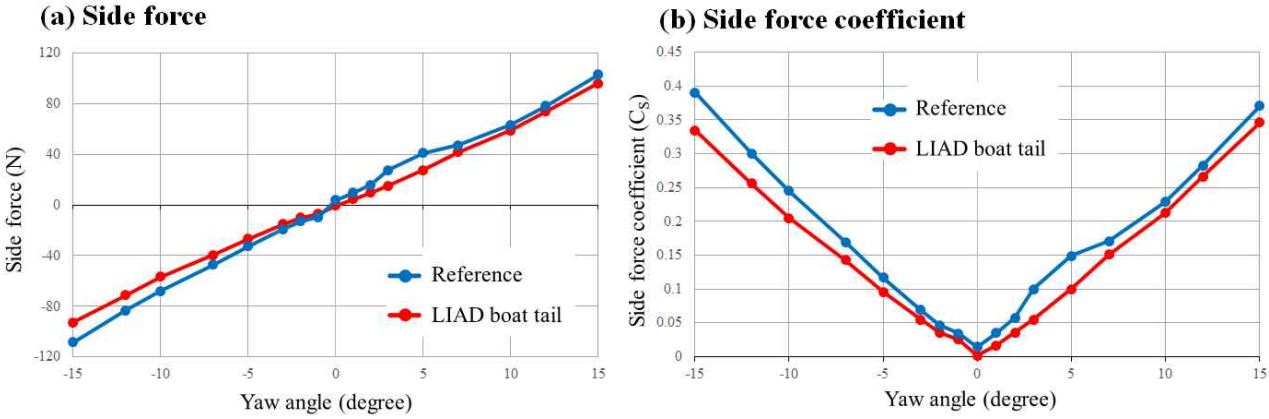
- Yaw angle이 증가함에 따라 차량이 받는 항력값이 증가하며, LIAD가 추가된 보트테일을 장착한 경우 테스트한 Yaw angle 전 영역에서 항력값이 줄어듦 <그림 7-7>
- 보트 테일 장착시 화물차 후미부에서의 유동박리가 줄고, 운동에너지 손실이 감소하여 항력계수가 줄어듦
- 특히 yaw angle이 Φ=-7°조건에서, 14.3%의 항력 저감효과를 보임
- 이러한 연구결과를 통해 LIAD가 추가된 보트테일을 장착시 측풍에 대해서, 차량의 연비를 크게 향상시킬 수 있음

○ Yaw angle에 따른 측력(F_s)과 횡풍 측력계수값(C_s)의 변화 <그림 7-8>

- Yaw angle이 커짐에 따라, 측풍을 받는 차량의 표면적이 늘어나, 이에 따라 차체에 걸리는 측력이 증가함
- LIAD 보트 테일 장착시, 보트 테일을 장착하지 않는 기본 차량에 비해 측력이 감소하고 횡풍 측력계수도 크게 낮아짐
- 횡풍 측력계수는 시험한 yaw angle 전 구간에서 20% 이상 줄어드는 효과를 보였다. 특히, yaw angle Φ=-7°조건에서 18.7%의 측력 저감효과를 보임. 이러한 결과는 본 과제의 성과 기준 목표치인 12%를 초과 달성하는 수치임



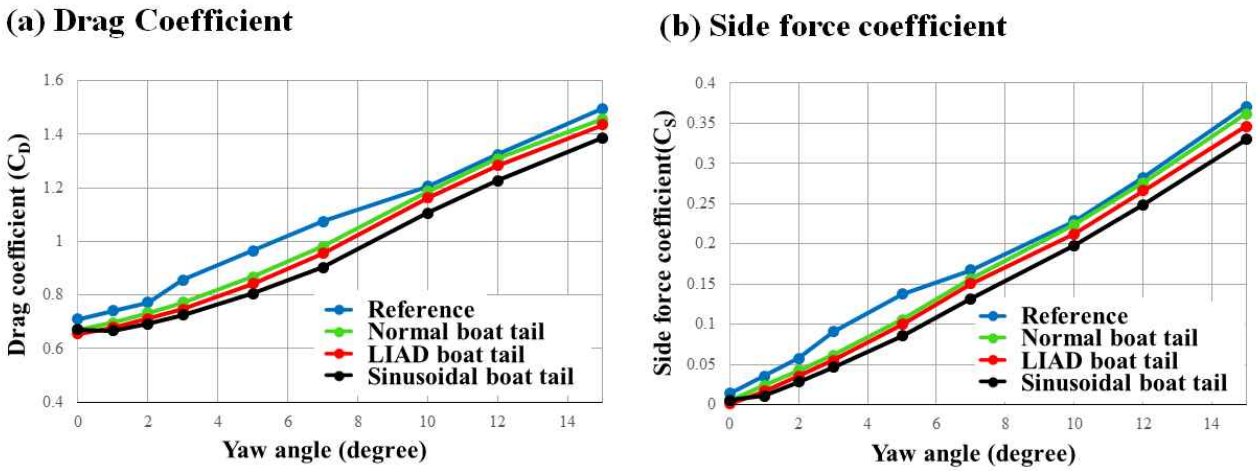
<그림 7-7> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 작용하는 (a)항력 (FD)및 (b)항력계수 (CD)의 변화



<그림 7-8> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 걸리는 (a)측력(Fs) 및 (b)횡풍 측력계수(CS) 변화

○ 생체 모방형 보트 테일

- 생체 모방형 보트 테일(Sinusiodal boat tail)의 경우, Φ=0°에서는 기존 보트 테일에 비하여 항력 저감 효과가 적으나 요각이 존재할 경우 항력 계수 저감 효과가 뛰어남
- 심험한 전 구간에서 미장착 차량에 비하여 횡풍 측력계수가 20% 이상 감소하는 효과를 보임
- 조류의 날개 끝 형상을 생체 모방하여 파형의 끝단을 가지는 보트 테일을 장착한 차량에 걸리는 저항력계수(C_D)와 (yaw angle) Φ=7°에서 측정한 측력계수 (C_S)에 대한 비교 분석 <그림 7-9>
- 파형의 끝단을 가지는 보트 테일을 장착한 경우, 보트테일의 장착하지 않은 차량에 비해 공기저항 계수를 4.64% 개선시키는 것으로 나타남. 즉, 기존 평판형 보트 테일의 공기저항력 개선정도와 비슷하나 횡풍 측력계수를 22.61% 감소시켜 측풍에 대한 효과가 뛰어난 것으로 나타남



<그림 7-9> Yaw angle에 따른 15톤 화물차량에 걸리는 (a)항력계수 (CD) 및 (b)횡풍 측력계수(CS) 변화

<표 7-1> 생체 모방형 보트 테일의 공기저항계수 및 횡풍 측력계수 감소율 비교

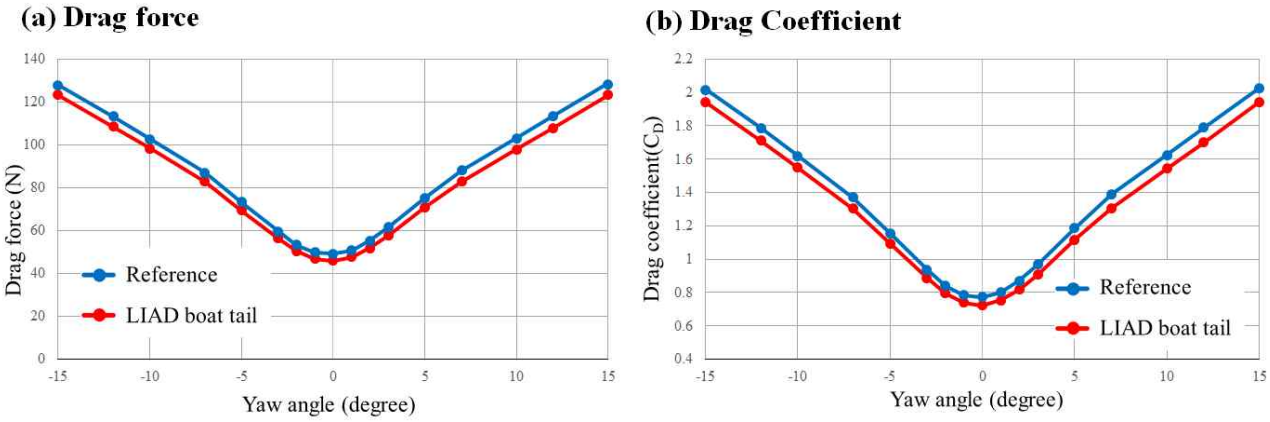
사양 (15 ton 화물차) 1/8 스케일 모델	공기 저항계수 (C_D)	공기저항 감소율 ($\Delta C_D/C_D$)	횡풍 측력계수 (C_S)	횡풍측력 감소율 ($\Delta C_S/C_S$)
Reference	0.711	-	0.167	-
기존 평판형 보트 테일	0.680	-4.36 %	0.156	-6.7%
생체 모방형 보트 테일	0.678	-4.64%	0.131	-22.61%

□ Yaw angle(Φ) 변화에 따른 40ft 트레일러 모델의 공력특성 분석

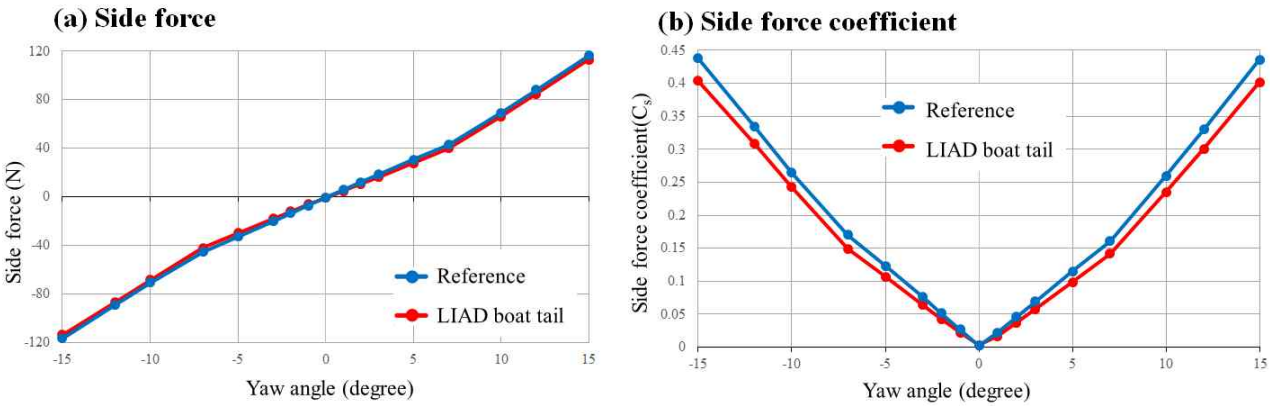
- Yaw angle이 증가함에 따라 차량이 받는 항력값이 증가하며, LIAD가 추가된 보트테일을 장착한 경우 테스트한 yaw angle 전 영역에서 항력값이 줄어듦 <그림 7-10>
- 보트 테일 장착시 화물차 후미부에서의 유동박리가 줄고, 운동에너지 손실이 감소하여 항력계수가 줄어듦
- 40ft 트레일러 모델은 15톤 화물차 모형에 비하여 운전석과 트레일러 사이에 존재하는 큰 gap 공간에 기인하여 보트 테일의 항력 저감 효과가 적게 나타남
- Yaw angle이 Φ=7°조건에서, 6.3%의 항력 저감효과를 보임
- 이러한 연구결과를 통해 LIAD가 추가된 보트테일을 장착한 경우 측풍에 대한 차량의 연비를 크게 개선시킬 수 있음

○ Yaw angle에 따른 측력(F_S)과 횡풍 측력계수값(C_S) 변화 <그림 7-11>

- Yaw angle이 커짐에 따라, 측풍을 받는 차량의 표면적이 늘어나, 이에 따라 차체에 걸리는 측력이 증가함
- LIAD 보트 테일 장착시, 보트 테일을 장착하지 않는 기본 차량에 비해 측력이 감소하고 횡풍 측력계수도 크게 낮아짐
- 횡풍 측력계수는 시험한 yaw angle 전 구간에서 줄어드는 효과를 보였다. 특히, yaw angle Φ=7°조건에서 13.4%의 측력계수 저감효과를 보임. 이러한 결과는 본 과제의 성과 기준 목표치인 12%를 초과 달성하는 수치임



<그림 7-10> Yaw angle에 따른 40ft 트레일러에 작용하는 (a)항력(FD) 및 (b)항력계수(CD)의 변화



<그림 7-11> Yaw angle에 따른 40ft 트레일러에 작용하는 (a)측력(FD) 및 (b)횡풍 측력계수(CS)의 변화

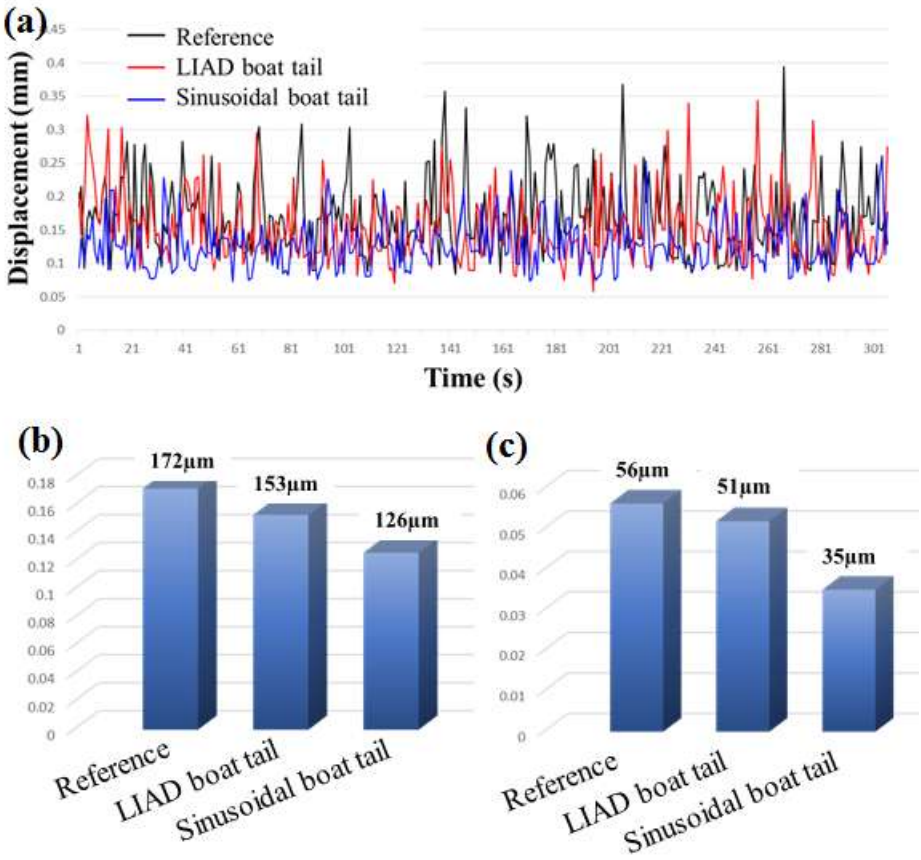
4. 진동 성능 평가

○ 차체 떨림(displacement) 변화량

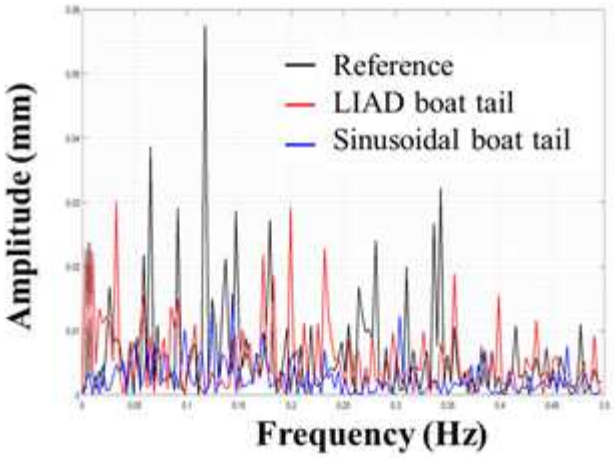
- EXTACH 社 Vibration tachometer를 이용하여 15톤 화물차 모형의 보트 테일 장착 유무에 따른 차량 하부의 떨림(displacement) 변화량 측정
- 실험 조건 : 속도 25m/s, yaw angle Φ=0°, data acquisition time 300sec
- LIAD 보트 테일, 생체 모방형 보트 테일을 장착 시 평균 displacement 변화량이 각각 11.1%, 26.7% 감소함 displacement RMS(root-mean-sqaure) 변화량이 각각

8.9%, 37.5% 감소함

- FFT(fast fourier transform)을 이용한 스펙트럼 분석 결과 생체 모방형 보트 테일을 장착시, 낮은 주파수 대역에서 amplitude가 크게 감소함을 확인함
- 이를 통해, 보트 테일을 장착함으로써 화물차량에 하부의 진동을 크게 감소 시킬 수 있음



<그림 7-12> displacement 변화량



<그림 7-13> FFT를 이용한 주파수 분석

제2절. 수치해석을 통한 주행 안정성 평가

1. 수치해석 방법

□ 큰에디모사 (large-eddy simulation)

○ 지배방정식 및 수치해석 방법

- 유체의 운동량 및 질량 보존에는 Navier-Stokes equation을 이용하며, 식은 다음과 같음

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right)$$

○ 지배방정식

- 위의 Navier-Stokes equation을 필터링하여 큰에디(large-eddy)는 직접 계산하고, 작은 스케일의 에디는 모델링

- Filtered Navier-Stokes equation ($\bar{}$:필터 연산)

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i}\,\overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

$$(\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i}\,\overline{u_j})$$

○ 수치해석 기법

- Incompressible LES solver
- Unstructured solver
- Fully-implicit fractional method에 기반한 시간 전진
- Crank-Nicolson method를 이용한 시간 차분
- 2nd-order central difference를 이용한 공간 차분
- Dynamic Vreman global equlibrium subgrid-scale (SGS) model

□ 수치해석 도메인

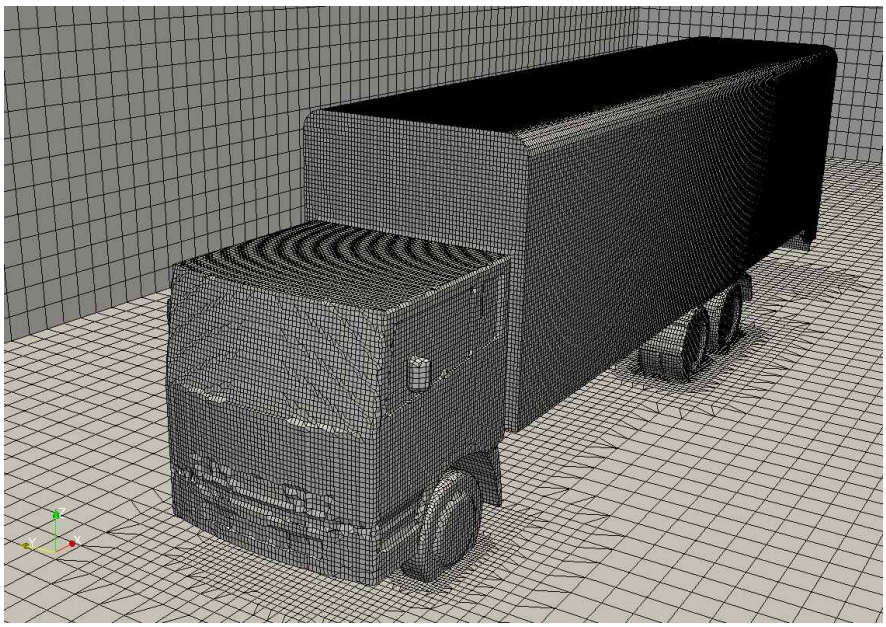
○ 수치해석 도메인 생성

- 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행
- Local refinement의 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약

1300~1600만개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

○ 경계조건 및 상수

- Inlet velocity: 90km/h (25m/s)
- Outlet: local acceleration + convection = 0
- Wall(풍동 외벽, 화물차 표면): no-slip condition
- Kinematic viscosity = 1.568 x 10-5
- CFL(무차원 시간간격) = 5.0



<그림 7-14> 주행 안정성 평가를 위한 수치해석 격자 예시(15톤 화물차)

□ **격자 생성**

○ <표 7-2>과 같은 셀 개수를 가지는 계산 격자 생성

<표 7-2> 모델별 격자의 셀 개수

	15톤 모델	40ft 모델
셀 개수	약 1500만	약 1900만

○ 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행

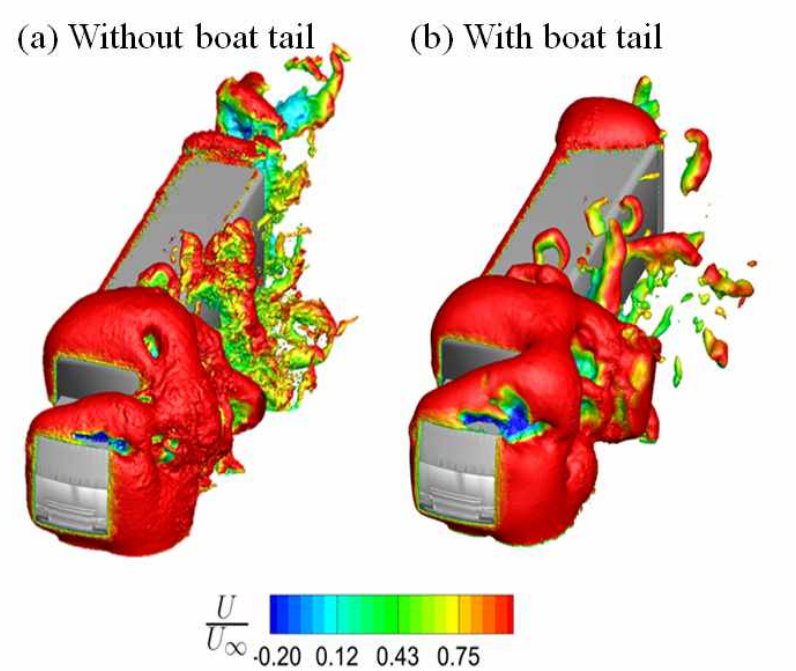
- Local refinement의 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1500~1900만개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

2. 15톤 화물차량의 주행 안정성 평가

□ **Yaw angle Φ=10°일때 15ton 화물차를 지나는 유동분석**

○ LIAD 보트 테일을 부착한 15톤 화물차를 지나는 유동의 와류구조 (압력 $P/\rho U_\infty = -0.1$의 등위면을 이용하여 와류구조를 시각화) 해석

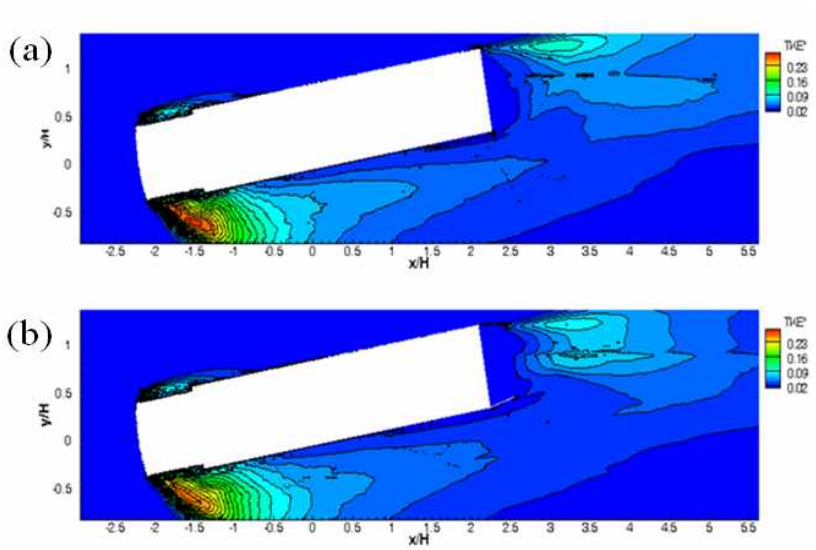
- LIAD 보트 테일 장착 시, 화물차의 후미부 끝단에서 발생하는 유동박리(flow separation)에 기인하여 작은 에디의 생성량이 크게 감소함
- LIAD 보트 테일을 장착하게 되면, 작은 에디의 소멸로 인해 운동에너지 손실이 줄어듦



<그림 7-15> Yaw angle Φ=10°조건에서 보트 테일 미부착 15톤 화물차의 와류구조(a) 및 최적 LIAD 보트 테일을 부착한 후의 15톤 화물차의 와류구조(b) 비교

○ LIAD 보트 테일을 부착한 15톤 화물차를 지나는 유동의 난류운동에너지 감소

- LIAD 보트 테일을 장착하면, 화물차의 후방 영역에서 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)가 감소하여 화물차를 흘러 지나가는 유동에 있어서 시간에 따른 변화가 감소함을 확인 할 수 있음
- 난류운동에너지가 감소하여 화물차에 작용하는 FIV(Flow Induced Vibration) 유동에 의한 진동이 감소함을 확인

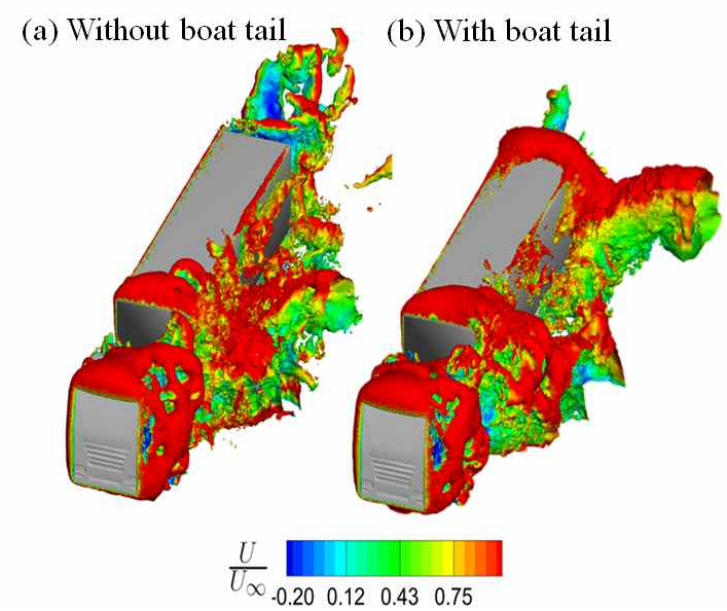


<그림 7-16> Yaw angle Φ=10°조건에서 보트 테일 미부착 15톤 화물차의 난류운동에너지(a) 및 LIAD 보트 테일을 장착한 15톤 화물차 주위의 난류운동에너지(b) 비교

3. 40ft 컨테이너 트럭의 주행 안정성 평가

□ Yaw angle이 Φ=10°조건에서 40ft 화물차를 지나는 유동분석

○ LIAD 보트 테일을 부착한 40ft 화물차를 지나는 유동의 와류구조 분석

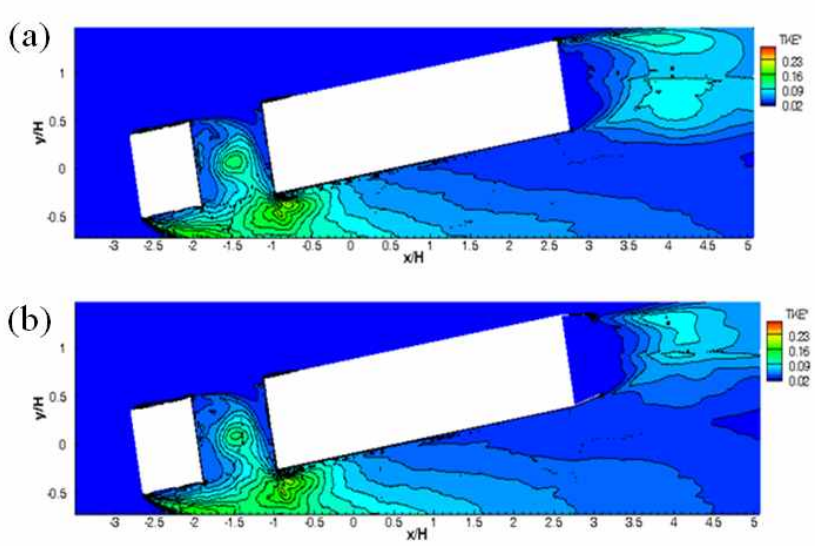


<그림 7-17> Yaw angle이 Φ=10°일 때, LIAD 보트 테일 미부착 40ft 화물차의 와류구조(a) 및 최적 LIAD 보트 테일을 장착한 40ft 화물차의 와류구조(b) 비교

- 보트 테일 장착 시, 화물차의 후미부 끝단에서 발생하는 유동박리에 기인하여 작은 에디의 와류구조가 크게 감소함
- LIAD 보트 테일 장착 시, 작은 에디의 소멸로 인해 운동에너지 손실이 크게 줄어듦

○ LIAD 보트 테일을 부착한 40ft 화물차 주위 유동의 난류운동에너지

- LIAD 보트 테일 장착 시, 화물차 주위 유동의 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)가 감소하여 화물차 주위 유동의 시간에 따른 변화가 작아지게 됨을 확인할 수 있음
- 난류 운동에너지의 감소로 인해 화물차의 FIV(유동에 의한 진동)이 감소함을 확인



<그림 7-18> Yaw angle 10°일 때 LIAD 보트 테일 부착 전의 40ft 화물차의 난류운동에너지(a) 및 보트 테일 부착 후의 40ft 화물차의 난류운동에너지(b) 비교

4. LIAD 보트 테일 장착에 대한 측력 진동변화 분석

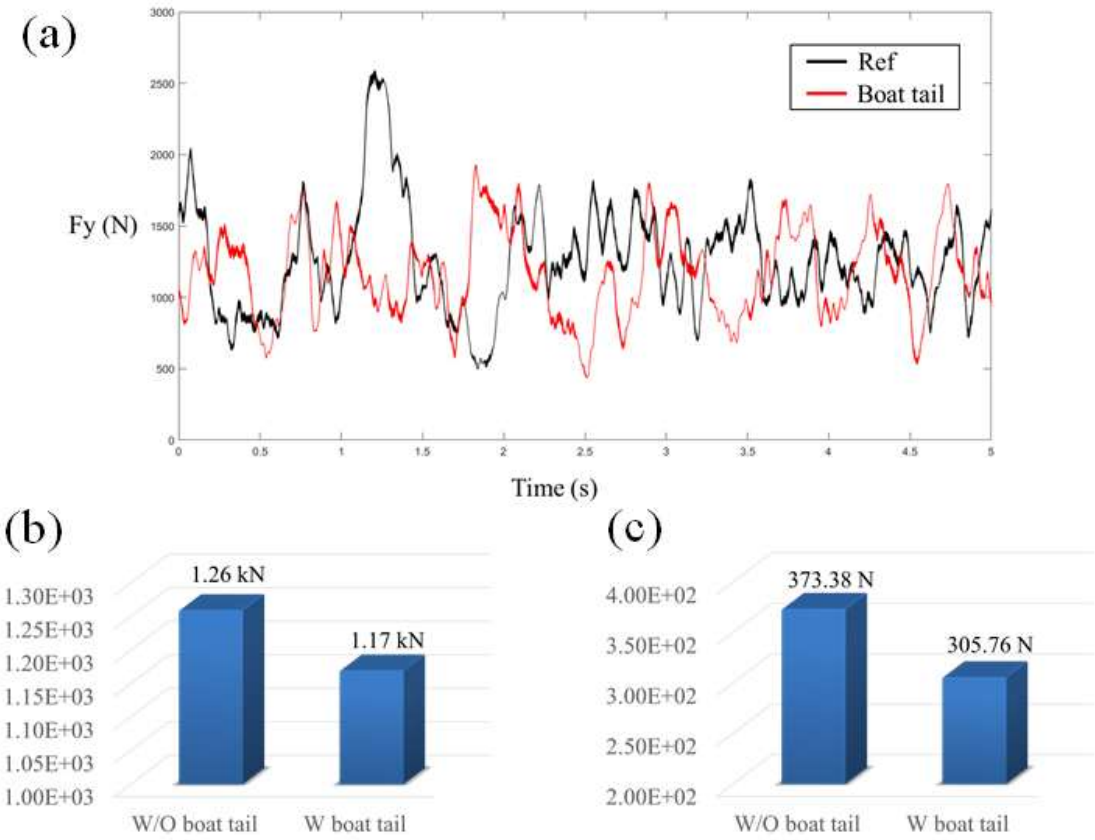
□ 측력의 시간에 대한 변화 분석

○ 화물차의 측면이 받는 형상저항과 전단응력의 합을 시간의 대한 함수로 나타냄

○ 평균 측력은 보트 테일을 부착하지 않은 경우 1.26 kN에서 사이드 스커트 장착 후 1.17 kN으로 감소함

○ 측력의 실효값(root-mean-square)은 사이드 스커트 장착 전 373.38 N에서 사이드 스커트 장착 후 305.76 N으로 감소함

○ 화물차에 작용하는 측력의 크기와 측력에 기인한 화물차의 떨림(진동)이 모두 감소함



<그림 7-19> Yaw angle Φ=10°조건에서 보트 테일을 장착 전 후 40ft 화물차에 작용하는 측력의 신호(a), 보트 테일 장착 전 후 40ft 화물차에 작용하는 측력의 평균값(b)과 실효값(c)의 비교

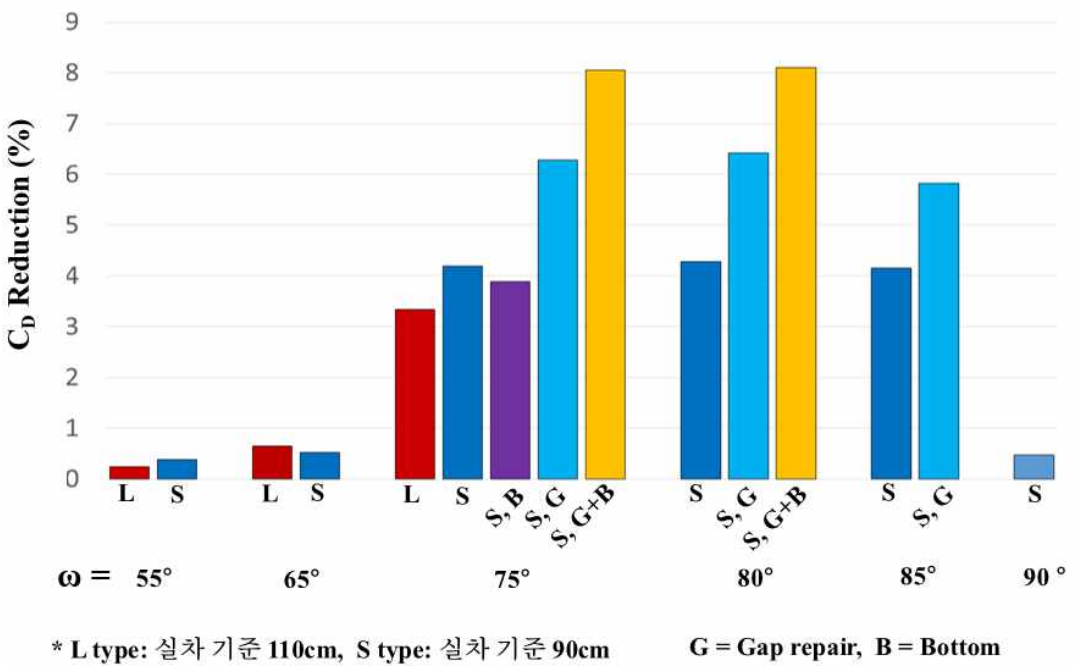
제3절. 보트테일에 대한 최적화 설계

1. 보트테일의 길이 및 각도 변화에 따른 항력 저감 효과

○ 차량 후미부에 길이(S=실차 기준 90cm, L=실차 기준 110cm)와 각도(ω=55~90)를 다양하게 변화시킨 보트 테일을 장착하고 이에 따른 항력계수를 계산함

○ 보트 테일의 길이보다는 각도 변화에 따라 큰 항력감소 효과에 큰 차이를 보임

- 다양한 각도에 대한 실험을 통해 각도 ω=80°에서 항력계수가 최대인 4.27%까지 줄어드는 것으로 나타남
- 시판되고 있는 기존 보트 테일의 경우, 차체 후미부와 보트테일의 높이차에 기인하여 유동박리가 발행한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 이 높이차를 없애 유동이 부드럽게 이어지도록 하는 구조물(gap repair, 이하 G로 표기)을 장착한 결과, 항력계수가 6.42%까지 감소하였음
- 차체 하부유동의 영향을 줄이기 위해, 차량 후미부에서 후면부로 올라오는 유동을 제어하기 위해 스포일러 형상의 구조물(bottom, 이하 B로 표기)을 후미부 아래쪽에 추가로 설치한 결과, 기본 모델에 비해 항력계수가 8.1%까지 줄어드는 효과를 얻었음



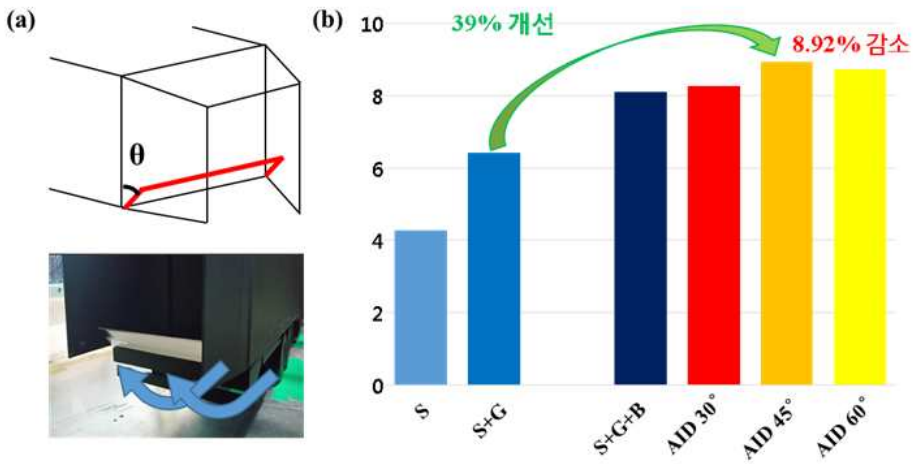
<그림 7-20> 보트 테일의 항력 저감 효과 비교

2. LIAD 보트 테일의 기울임 각도 최적화

○ 화물차의 경우 후면부의 형상이 사각형이어서, 차량이 주행함에 따라 후면부에 유동 박리가 차체 후방에 발생하여, 낮은 압력 영역(low pressure zone)이 생겨남. 이 낮은 압력 영역 내부로 큰 운동량을 가진 하부 유동을 끌어들여 압력을 상승시켜 차체 후면부에서 발생하는 항력을 감소시키는 효과를 얻을 수 있음

○ 화물차량 후미부 아래쪽에 LIAD를 추가로 부착하여 차체 후방에 형성된 낮은 압력 영역 (low pressure zone)의 압력을 상승시켜 항력계수 변화를 확인

○ LIAD deflector가 하부 바닥면과 이루는 기울임 각도)가 45°일 때, 최대 항력계수를 8.92% 저감시키는 효과가 나타남

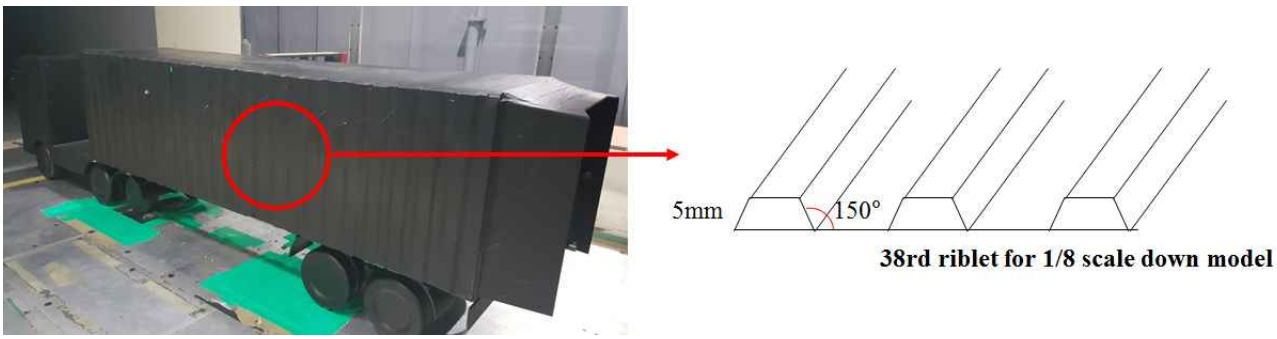


<그림 7-21> LIAD 장치의 기울임 각도가 항력감소에 미치는 효과

3. Corrugated surface 영향

○ 40ft 트레일러의 컨테이너는 높이 방향으로 여러 개를 중첩하여 적재하는 경우가 많아 큰 하중에도 견딜 수 있도록 대부분의 경우 옆면 corrugated surface로 구성되어 있음

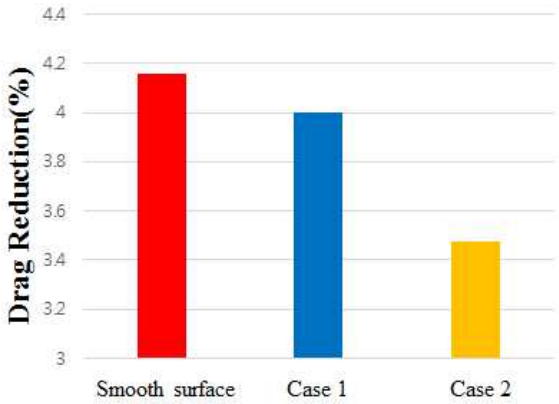
○ Corrugated surface를 가진 컨테이너를 견인하는 40ft 컨테이너 차량에서 corragated 표면이 차량의 공력 특성에 미치는 영향 분석을 위해 corrugated 표면을 부착한 40ft container 차량에 있어서 보트 테일의 항력감소 효과를 비교 분석함



<그림 7-22> corrugated 표면을 가진 1/8 scale의 40ft container 화물차량 모델

○ Corrugated 표면의 컨테이너가 보트 테일의 항력저감 효과에 미치는 영향을 분석함

- Case1 : 옆면이 corrugated된 컨테이너 . Case2: 윗면까지 corrugated 된 컨테이너
- 특히, 컨테이너의 윗면까지 corrugated 표면으로 구성된 경우(Case2), 컨테이너 상부 표면을 따라 발달한 유동이 교란되어 기존 smooth surface에 비해 보트 테일의 항력저감효과가 17% 이상 감소하였음



<그림 7-23> 40ft 화물차의 container의 corrugated 표면이 따른 보트 테일의 항력저감에 미치는 효과

4. 항력저항과 관련된 유동구조 분석

가. 실험장치

○ 보트 테일을 장착한 화물차 주위 유체 흐름을 관찰하고 이를 통해 항력 저감효과와 관련된 유동구조를 정량적으로 파악하기 위해 차체 후미부의 후류 유동을 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정 기법을 이용하여 분석하였음

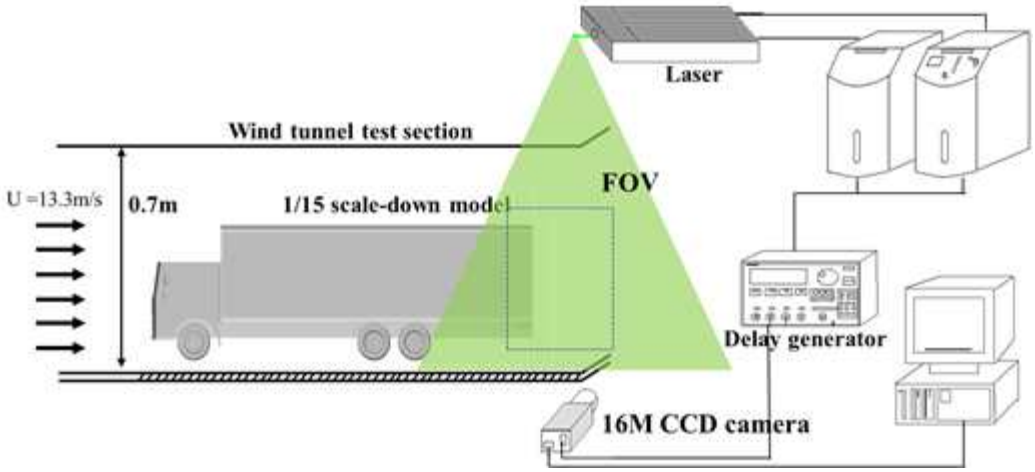
○ PIV system 구성은 아래 그림과 같음

- 200mJ Nd:YAG 레이저, 4Kx3K CCD 카메라, 영상처리장치, 동기장치(delay generator) 등으로 구성된 PIV 시스템이 사용됨
- 추적입자로는 올리브 오일을 사용 (입자 크기 1-3μm)
- 1mm 두께의 레이저 평면광(light sheet)을 풍동시험부 측면을 통해 수평방향으로 화물차 모델 하부를 조사함
- Two-frame cross-correlation PIV algorithm를 이용하여 속도장을 도출함
- 카메라 노출시간은 0.1ms
- Interrogation window크기는 64x64 pixel이며 50% over-lapping 하였음

○ 일정한 풍속 조건(U=10m/s)에서 실험 수행

- 풍속 조건에 상응하는 레이놀즈 수는(Re = 1.8×10^5)임

○ 보트 테일 부착 유/무에 따른 화물차 하부 유동을 가시화



<그림 7-24> 1/15 스케일로 축소된 15ton 화물차 모형 및 PIV 실험 장치 개략도

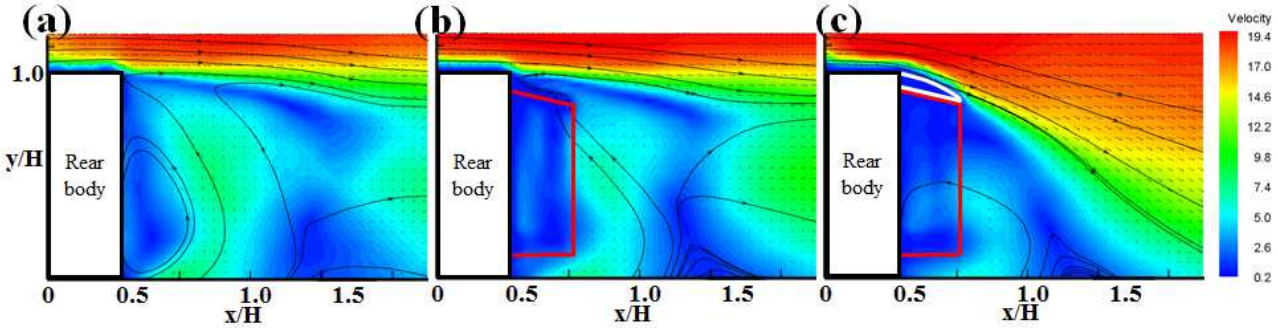
나. 보트 테일 주위 유동 분석

○ 보트 테일이 장착되지 않은 경우, 기존 보트테일이 장착된 경우와 gap repair가 추가적으로 장착된 경우의 화물차 후미부의 평균 속도장을 나타냄

- 보트 테일이 장착 되지 않은 경우, 차량 후미부 끝단에서 유동박리가 일어나 차량

후방에 낮은 속도의 큰 후류 영역이 생성됨

- 보트테일을 장착한 화물차 후미부의 상단을 지나는 유동의 주유동 방향 유속이 빠르며, 후류 유동에서 역류가 감소함. 특히 Gap repair을 추가적으로 장착한 차량의 경우 상부 유동을 효과적으로 guide하여 후류영역에서 발생하는 유동 박리를 효과적으로 감소시킴
- 보트 테일 장착에 따라 유동박이라 감소하고 주유동방향 속도의 회복이 빨라져, 이것은 운동량 손실이 감소함을 의미함

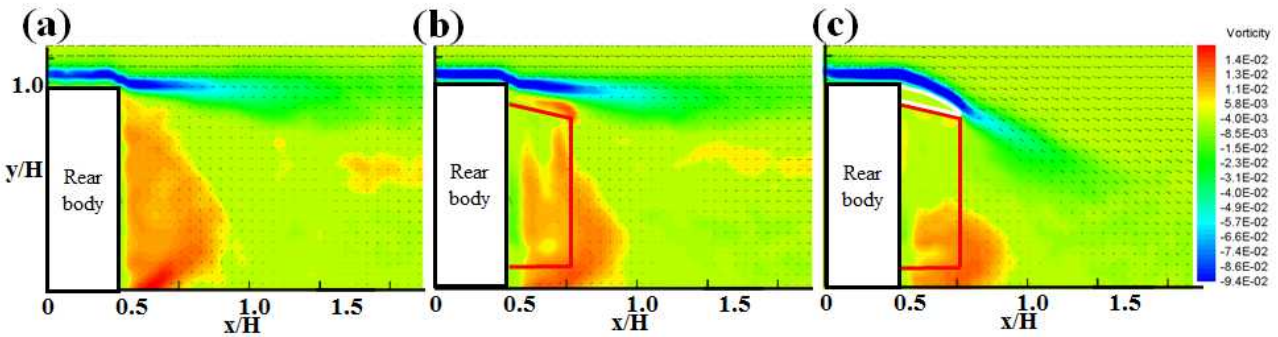


<그림 7-25> 15ton 화물차 모델의 후류 유동 속도장 비교 a)보트 테일이 미장착된 경우, b)기존 보트 테일이 장착된 경우, c)Gap repair가 추가로 장착된 경우

○ 보트 테일이 장착되지 않은 경우, 기존 보트테일이 장착된 경우, 그리고 gap repair이 추가적으로 장착된 화물차 후미부의 vorticity 분포를 나타냄

- Vorticity의 크기가 클수록 차체 하부를 지나 후류로 들어온 유동에 의해 회전하는 유동이 크게 형성됨을 뜻함
- 기본 모델의 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서도 vorticity가 형성된 반면, 보트테일을 장착한 경우 차체 후미부와 인접한 영역에서는 vorticity의 양이 확연히 감소하고 보트 테일의 끝 부분을 따라가면서 y 방향 vorticity가 형성되어짐

○ 보트 테일 장착에 따라 차체 후미부의 상단에서 발생하는 유동박리를 보트 테일의 끝부분으로 지연시키는 효과가 있음. 이에 따라 유동박리로 손실되는 운동량을 감소시켜 항력 감소 효과를 얻을 수 있음

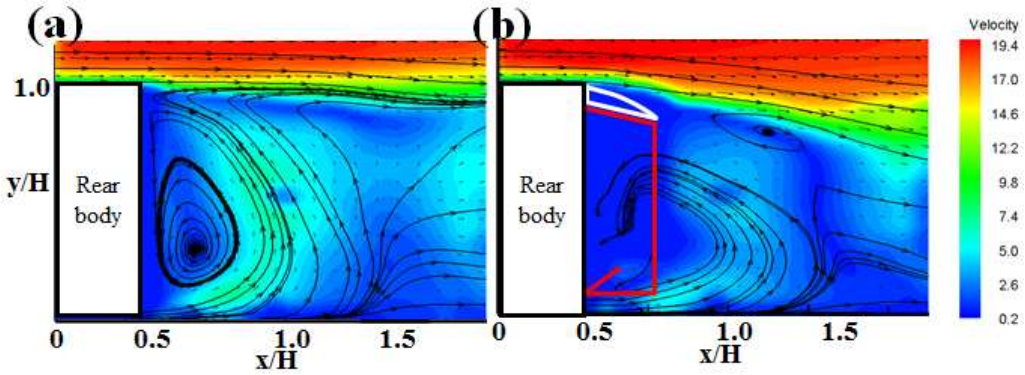


<그림 7-26> 15ton 화물차 모델 후류의 vorticity 분포 비교 a)보트 테일이 미장착된 경우, b)기존 보트 테일이 장착된 경우, c)Gap repair가 추가로 장착된 경우

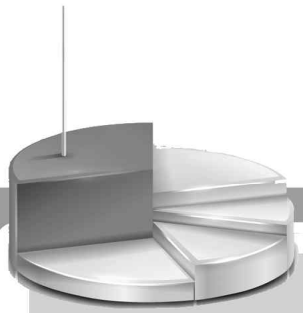
다. LIAD 주위 유동 분석

○ 보트 테일이 장착되지 않은 경우와 LIAD boat tail을 장착한 화물차의 후미부에서 측정한 속도장을 나타냄

- 보트 테일이 미장착된 경우, 차량 하부 유동에 기인하여 차체 후방에 반시계 방향의 재순환 유동영역이 형성되어 항력이 증가하게 됨
- LIAD 보트 테일을 장착한 경우, 하부 deflector가 큰 운동량을 가진 차체 하부 유동을 차체 후방의 후류 내부로 효과적으로 안내하여 재순환 유동영역의 크기를 감소시키고 차체에 걸리는 항력을 감소시키는 효과를 얻게 됨



<그림 7-27> 보트테일 장착에 따른 15ton 화물차 모델 후류 유동의 속도장 비교



제8장 Gap fairing을 통한 운행 안정성 향상 기술

제1절 Gap fairing의 국내외 기술현황과 동향 분석

제2절 시장성조사 및 실용화 전략

제3절 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치

제8장. Gap fairing을 통한 운행 안정성 향상 기술

제1절. Gap fairing의 국내외 기술현황과 동향 분석

1. 국가 연구개발사업 동향

○ 현재, 중소기업청과 지식경제부에서 시행한 2개의 유사연구가 진행되고 있음

<표 8-1> 공기저항 저감기술 유사 연구

부처명	사업명	과제명	비 고
중소 기업청	산학연공동기술 개발	최적화기법에 따른 탑차용 초저 공기저항계수를 갖는 Air Spoiler 개발	▪ 공기역학적 특성을 교려한 최적화된 air spoiler 개발 ▪ 가벼운 소재를 이용한 초경량의 air spoiler 개발
지식 경제부	그린카 등 수송시스템 산업원천 기술개발	능동형 VTMS 융합제어기술	▪ 능동형의 전방 air flap과 후류 제어 기술(synthetic jet, wake blowing) 개발 ▪ 저공력 차량용 차체 형상 설계 및 모델링 기술 개발

2. 관련 기술 현황 및 동향

가. 국내 기술 현황

- 국내의 연구들을 종합 해 볼 때, 트럭의 공기 저항 저감을 위해 수치해석적으로 접근하고 있는 논문의 수가 매우 적고, 기 진행된 수치해석 연구의 경우도 정량적인 결과들이 도출되어 있지만, 실제 실험결과와의 비교 분석 및 검증이 이루어지지 않은 경우가 대다수이기 때문에, 정성적인 분석 외에, 정확한 값을 도출하는데 난점이 있음
- 임의로 선택된 형상을 통해 수치해석이 많이 진행되었지만, 해석 결과와 물리적인 접근에 의한 최적화된 형상에 대한 연구가 부족
- 실험적 연구 관점에서 보았을 때, 국내에서는 실험적 연구가 거의 이루어지지 않았으며, 이루어진 실험 또한 유동 가시화 실험으로 정량적인 연구는 전무하다. 따라서 현재까지 이루어진 수치해석적 연구는 실험적으로 검증 되지 않은 연구 결과임

나. 국외 기술 현황

- National Research Council of Canada(NRC)에서 진행한 사업으로 9m X 9m 풍동에서 실제 모델로 항력저감장치들의 효과를 실험을 통해 밝힘. 여러가지 항력저감장치들의 항력과 연간 연료소비 감소량에 대해 실제 운행을 기반으로 실험적 결과 도출
- 국외의 트럭의 수치 해석에 관한 연구들을 종합해 보면, 거의 대부분 실험 결과가 있는 GTS, GCM 및 Ahmed body 형상을 이용하여 계산을 수행한 것을 알 수 있음
- RANS의 여러 난류 모델을 이용해 트럭의 주위의 유동을 계산한 결과를 실험과 비

교, 분석하는 경향이 있으며, 난류를 계산하는데 LES나 DES등을 도입하려는 시도가 많아지고 있는 추세임

- 트럭에서의 공기 저항 감소 기구의 효과를 알아보기 위해 가장 구체적인 형상인 GCM을 정렬격자계로 구성하고, LES로 해석한 내용은 아직까지 없음. 이것은 그리드 작성의 난해함과 계산시간의 부담으로 인한 것으로 생각됨
- 국외의 트럭의 실험적 연구들을 종합했을 때, NRC에서 진행한 프로그램이 가장 대표적이며, 실차 모델을 이용하여 공기저항 저감장치를 부착한 후 항력 및 연간 연료 소비 감소량에 대해 조사하여 실험적 데이터를 구축하였음.
- 갭 페어링, 보트 테일, 스커트, 언더바디 페어링 등 매우 다양한 항력 감소장치들의 효과를 실험적으로 확인하였으나, 차종 및 운행환경에 따른 영향을 많이 받기 때문에 이 실험결과를 그대로 고려하기엔 무리가 있음

다. 국내외 기술 동향

○ 본 주제와 관련이 있는 논문은 149개로 최종 집계됨. “Aerodynamics”로 검색된 관련 논문이 87건으로 가장 많았으며, 그 다음으로는 “Drag reduction”(52건)과 “Resistance reduction”(5건)으로 그 뒤를 잇는 추세임

○ 국내와 국외를 포함하여 공기저항 저감장치 기술 관련 연구 논문 발표가 1976년도부터 시작되어 현재까지 꾸준히 발행되어 왔고, 공기역학 관련 논문이 평균적으로 매년 30% 이상을 차지하고 있으며 항력감소 관련 논문이 그 다음으로 높은 비중을 차지하고 있음

- 국내의 경우 2000년대 이전까지 항력 감소 관련 논문이 주를 이루고 그 이후 공기저항 감소 관련 연구가 진행되어 오다가 2006년 이후 현재까지는 공기저항 저감장치 기술 관련 논문이 발행되지 않고 있음
- 국외는 국내와 다르게 현재까지 꾸준히 항력 감소 관련 논문이 발표되고 있으며, 그 다음으로 공기저항 관련 논문이 주를 이룸

○ 국내의 연구 주제로는 항력감소 기술과 공기역학 기술에 관한 논문이 가장 많으며 항력에 대한 연구는 최근 들어 주춤해지는 반면, 국외에서는 항력 감소에 관한 내용이 가장 많음. 전반적으로 화물차 공기역학 및 공기저항 저감장치 기술 개발은 국내보다 국외에서 연구가 더 활발히 진행되고 있음

○ 국내외 기간별 논문 발표는 국내의 경우 가장 최근 10년 기간인 2001년부터 2010년까지의 논문의 양이 가장 많음을 확인할 수 있으며, 국외도 2001년부터 2010년 사이의 기간에 가장 많은 연구가 이루어졌음

- 1980년대 이전부터 최근까지의 연구 동향을 보았을 때, 2000년대 이후로 공기저항 저감기술에 대한 관심이 높아지고 있음

○ 키워드별로 살펴보았을 때 항력 감소(52건)가 가장 관심이 많았던 연구 주제였고 다음으로 공기저항(5건) 순임

- 국외와 국내의 경우에도 전체적인 논문 동향과 동일하게 연구가 진행되었으나, 국외와 국내의 논문 건수의 차이로 보아 국외 연구가 국내보다 더 활발한 것으로 파악됨

○ 2001년부터 최근까지 국외 연구가 가장 활발한 시기이나 이와 다르게 국내에서는 2000년도 이후 본 연구과 관련된 분야의 논문이 줄어들고 있는 추세임

3. 국내외 관련 기술 수준 및 특허 동향

가. 국내 기술개발 수준 분석

○ 화물차량의 공기저항 및 공기와류 저감장치의 기술은 최고수준 대비 21~40% 수준으로 분석되며, 해당기술의 최고수준은 미국이 보유

- 미국은 외부충격 및 온도변화에 강한 열가소성 합성플라스틱을 사용함

○ 국내 기술수준 및 기술 난이도를 고려할 때 이 분야 국내기술은 태동기(embryonic)로 평가되며 기술 실현은 2015년 이후에나 가능할 것으로 예측됨

<표 8-2> 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발수준

항목	기술개발수준						
국내기술수준	0%~20%	21%~40%	41%~60%	61%~80%	81%~100%		
		○					
최고기술보유국 및 최고기술수준	한국	미국	일본	영국	프랑스	독일	기타 (기입)
		○				○	
국내기술성숙도	태동(Embryonic)	성장(Pacing)	핵심(Key)	기반(Base)			
	○						
국내기술실현 예측시기	실현 예측시기 : 2015 년 이후						

나. 국외 기술개발 수준 분석

○ 세계적으로 해당 기술의 최고기술 보유국은 미국으로 파악됨

- 미국의 기술기준이 높게 나타난 것은 80년대부터 체계적인 개발과 지속적인 투자를 통해 완성도를 높이고, 고유가와 미국 정부의 온실가스 감축 의지 등과 같은 외부적인 요인으로 인하여 시장이 급속히 성장하였기 때문으로 파악됨

○ 해당 기술은 국내에서 연구된 사례가 거의 없으나, 국제적인 시류변화에 따라 조만간 핵심기술로 발전할 수 있는 장래성이 있는 것으로 판단됨

- 이 분야는 기술적 장벽이 비교적 높지 않을 것으로 판단되며, 단기적인 집중투자를 통해 핵심 기술의 개발이 가능한 분야로 판단됨

○ 해당기술은 본 연구 과제의 진행에 따라 빠르면 2015년부터 순차적으로 실현 가능할 것으로 판단됨

제2절. 시장성조사 및 실용화 전략

1. 국내외 시장 및 산업동향 조사

가. 물류기업 동향

○ 종합물류인증기업을 기준으로, 국내 물류기업의 매출액은 26조 1,066억 원('12년 결산 기준) 수준이며 34개 인증기업의 평균 매출액은 7,678억 원임

- 전년대비 매출액(원화기준)이 국내법인과 해외투자법인이 각각 11.08%, 1.87% 증가하였으며, 총 물류매출액은 전년대비 9.19% 증가하였음

<표 8-3> 종합물류인증기업의 물류사업 매출액

(단위 : 백만 원, %)

구 분	국내법인	해외투자법인[1]	합계	평균
2011년	19,005,693	4,902,614	23,908,306	703,185
2012년	21,112,335	4,994,240	26,106,575	767,840
전년대비 증가율(%)	11.08	1.87[2]	9.19	9.19

주 : 1) 해외투자법인의 물류사업 매출액은 국내 물류기업이 보유한 해외투자법인의 지분율을 곱하여 산정하였음

2) 해외투자법인 매출은 2011년 41.6억 달러에서 2012년 46.2억 달러로 11.1% 증가하였으나, 환율 하락(1180원/$ →1082원/$)에 따라 원화 기준 증가율은 1.87% 증가에 그침

자료 : 『종합물류기업 인증 동향』, 한국교통연구원, 2013.10, p.96

○ 종합물류인증기업의 총 종업원 수는 18,886명임

○ 물류매출액 규모가 1,000억 원 이상인 5개 종합물류인증기업 중 3개 기업은 총 6,754대의 차량을 활용하고 있음

- 자산대장에 등록된 차량(보유)과 위수탁/지입 차량(확보)의 비율은 각각 74%, 26%임

- 차량별로 구분했을 때, 1~3톤 미만 차량이 41.9%로 가장 많고, 12톤 이상 차량(24.7%), 트레일러 40FT(14.2%)가 그 다음으로 많음

<표 8-4> 주요기업 차량 보유 현황

(단위 : 대, %)

구분	보유	확보	합계	비율
1톤 미만	43	192	235	3.5%
1~3톤 미만	1741	1090	2,831	41.9%
3~5톤 미만	55	22	77	1.1%
5~8톤 미만	162	12	174	2.6%
8~10톤 미만	45	22	67	1.0%
10~12톤 미만	277	36	313	4.6%
12톤 이상	1318	347	1,665	24.7%
트레일러 20FT	311	4	315	4.7%
트레일러 40FT	959	0	959	14.2%
트레일러 평판	118	0	118	1.7%
합계	5,029	1,725	6,754	100%

주 : 트랙터와 트레일러의 경우 1:1로 매칭하여 12톤 이상 1대로 산정
자료 : 각 기업 내부자료 (해당기업 요청에 의해 기업명 미공개), 2013

나. 일반화물운송시장(차주) 동향

○ 다양한 형태의 화물자동차 중 본 기술 적용 대상이 되는 트레일러 차량, BCT 차량 등이 포함된 일반화물차량(5t이상 화물자동차)의 운송시장 현황을 분석함

- 분석 자료는 『화물운송시장 동향(한국교통연구원 화물운송시장정보센터)』 중 2013년 3/4분기 자료를 활용하였음

○ 일반화물차량의 일평균 차량운행여건을 살펴본 결과, 월평균 운행일수는 23.5일로 전년대비 0.7일 증가하였고 일평균 운행횟수는 1.6회로 전년과 동일하며 혼적운행 비율은 2.3으로 전년대비 0.1줄었음

○ 일평균 총 운행거리는 355.7km이고 적재운행 비율이 약 70%이고, 공차운행 비율은 약 30% 수준임

○ 일반화물차량은 월평균 11.4회 주유하고, 1회 주유 시 평균적으로 233ℓ를 주유하는 것으로 조사되어 전년대비 각각 0.4회, 2ℓ줄었음

○ 일반화물차량의 평균 연비는 3.5km/ℓ이로 전년대비 0.2km/ℓ증가하였으며, 일평균 운행속도는 44.9km/h로 전년대비 1.0km/h 증가하였음

- 전반적으로 전년대비 연비가 증가한 것은 화물자동차 제조 기술의 발전과 함께 고유가 시대에 맞춰 화물자동차 차주들이 연비 절감을 위해 많은 노력을 기울이고 있는 것으로 판단됨

- 컨테이너 차량, 기타트레일러 차량의 연비가 각각 3.3km/ℓ, 3.1km/ℓ로 가장 낮은 수준임

- 운행속도는 BCT 차량(49.4km/h)과 컨테이너 차량(48.8km/h)이 가장 높은 수준임

<표 8-5> 일반화물차량의 차종별 연비 및 운행속도

(단위 : km/ℓ, km/h)

구 분	연도	컨테이너	BCT	탱크로리	카 고 형	기타트레일러	평 균
연 비	2012	3.2	3.6	2.8	3.6	2.9	3.3
	2013	3.3	3.6	3.2	3.8	3.1	3.5
일평균운행속도	2102	49.4	47.0	27.7	47.6	40.3	43.9
	2013	48.8	49.4	35.8	47.5	36.4	44.9

주 : 3/4분기 기준 수치임

자료 : 『화물운송시장 동향』, 제3호, 3/4분기, 통권 35호, 한국교통연구원 화물운송시장정보센터, 2013, p.76

○ 국내 운행 중인 트레일러는 40ft 트레일러가 90~95%를 차지하고 20ft 트레일러 비율은 5~10% 수준임

다. 주요 제조기업 동향

○ 화물운송 부문에서 발생하는 온실가스 및 에너지 소비절감이 핵심 기술개발의 성과로 제시되면서 연비 개선 및 운송 효율화를 통한 물류비용 절감에 힘쓰고 있음

○ 국내 대규모 기업 중 하나인 삼성TESCO(홈플러스)는 '06년 대비 '20년까지 이산화탄소(CO_2)발생량 50% 감축, 환경부의 중요 환경 정책에 적극적으로 동참, 그린스토어(친환경 점포) 확대, PB(자사 브랜드) 상품 '탄소성적표지' 인증 및 상품홍보와 구매 고객 인센티브 제공, '탄소성적표지'제도 등 주요 환경정책과 관련한 캠페인 진행, 환경부와 공동으로 어린이 환경운동 진행 등의 내용으로 '09년 환경부와 MOU(협약)을 체결하였음

○ 이외에 '09년 6월부터 홈플러스 실제 배송차량에도 리블릿코팅을 적용하여 운행거리, 축중량, 연료보출량, 연료단가, 공회전 시간 확인 등을 비교하여 여러 차례의 꾸준한 검증을 수행하고 있음

○ 또한 TESCO는 Eco-drive system을 도입하여 엔진제어장치(engine control unit, ECU)와 연동, 차량의 운행정보, 연료소모량정보를 통해 차량의 상태를 실시간 모니터 하고 저장된 모든 차량운행 정보를 통하여 연비/연료소모량 운전 습관 등을 비교분석함으로서 에코드라이브를 유도하고 있음

2. 연구결과의 실용화 전략

가. 현장적용 및 제품화 방안

- 화물차량의 연비저감을 위한 공기저항저감장치와 주행안정성을 향상시키기위한 와류저감장치의 기술적용 대상은 대형 화물운송 기업과 영세 개인 화물차주 등이며 기업과의 계약을 대형 계약을 추진하여 기업의 이윤을 향상시키고, 온실가스 저감 효과를 얻을 수 있음

- 국내물류기업들의 매출액 규모는 대표적인 기업인 대한통운이 11억 $, ㈜한진은 6억 $ 수준으로서 DPWN의 760억 $, UPS의 22조$ 수준에 비해 현격한 열세를 보임
- 2008년 기준 중국에 진출한(주)한진 대한통운 동방 현대택배, 동부익스프레스 등 대다수 물류기업들은 한국제조업체의 중국현지물류서비스를 대행하면서 역량을 강화
- 도로부문의 연평균 수송실적 증가량은 2001년 1,343백만 톤에서 2009년 1,498백만 톤으로 1.37%의 증가세
- 카고형 트레일러, 트럭형 트레일러 등 약 11만7천 대로 전체 화물차 중 29.19 %가 잠재적 수요대상 차량임

<표 8-6> 공기저항 저감장치 수요대상

수요대상	활용 방안 제시
▪ 택배업체 간선노선차량 - CJ 대한통운, DHL, 현대택배 등 ▪ 식품물류업체 간선노선차량 - 엑소후레쉬물류, 풀무원, KNL물류 등 ▪ 전자제품 및 부품운송업체 간선노선차량 - 명일, 삼성전자로지스틱스 등	

○ 영세 개인화물차주가 직접 설치하기에는 경제적 부담이 우려되므로 현재 정부차원에서 진행 중인 녹색물류전환사업의 일환으로 보조금을 수령하여 영세 개인화물차주의 유류비 지출을 감소시킬 수 있음

○ 25톤급 대형 화물차량 뿐만 아니라 5톤 이상 전화물차량 및 트레일러에 적용이 가능하므로 차종에 크게 상관없이 연비개선에 기여함

○ 화물차는 특성상 특장을 하거나 개조가 되어 제품을 통일하기에 어려움이 있으므로 현재 국외에서 수입되고 있는 제품을 국산화하고 보편화시켜서 차량별 설치의 제한요소를 극복

- 투자대비 효과가 우수한 기술부터 국산 상용차 규격과 도로여건에 맞도록 최적화를 구현하고 고가(620 만원~880 만원)의 수입장비를 60 %이상 저렴한 300만 원 수준에 보급하기 위한 기술개발

○ 수요자 중심의 R&D 연구와 사후조치를 통해 제품화 이후에도 사업을 확장 가능함

- 고속도로노선만을 주행하는 고속버스용으로 추가적인 R&D가능
- 현재 수입산 고가 소재에 대하여 추가적인 개발가능

○ 국내 실정에 맞는 최적화 설계구현과 정부차원의 표준매뉴얼 보급정책 병행이 바람직

- 미국, 영국, 캐나다 등은 국가차원에서 풍동실험 등 연비측정실험기술 (SAEJ1321)

결과를 통해 차종 및 규격별 공기저항기술 가이드라인을 제공

- 보급된 표준매뉴얼을 통하여 민간기업에는 개발단계의 수행오류를 줄여주어 개발비와 개발기간 절감

○ 배포된 표준매뉴얼을 통하여 개발되는 장비의 검인증 연구를 통하여 검증기관양성

- 국내최대 주행시험로를 갖춘 교통안전연구원과 같은 기관에서 공기저항저감장치에 대하여 검증 및 인증을 실시하도록 하고, 검증된 기술에 대하여 녹색물류전환사업 보조금 지급이 되도록 유도

- 현재 난립하는 연비개선장치들에 대하여 제도권으로 흡수하고, 검증된 기술에 대하여 대국민 홍보(홈페이지, 보도자료 등)를 통하여 실효성 있는 기술보급에 기여

나. 미래 원천기술 확보 및 신산업 창출

○ 기존의 국외 제품에만 의존하거나 인증되지 않은 모방제품을 국산화

○ 화물차량의 연비 효율을 향상시키기 위한 공기저항 저감장치 기술을 개발함으로써 기술에 대한 특허 출원 및 제품 생산으로 새로운 산업으로 발전 가능함

○ 지속적인 R&D 연구와 사후 조치를 취해 조속한 현장 적용 및 제품을 보수하여 사업을 확장 가능함

제3절. 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치

1. 개발방향 정립

○ 선진국에서 진행 중인 프로젝트와 성능 평가 방법, 그리고 국내의 도로 환경에 따라 저감 목표치를 설정

- 설정된 목표치는 미국 환경청(EPA)에서 수행중인 Smartway 파트너쉽 공기저항 저감기술 실차시험방법(SAE J 1321)을 통하여 목표치를 정량적으로 평가할 수 있음

- (미국) Smartway 프로그램과 연료 저감 비교

<표 8-7> Smartway Program과 연료 저감 비교

장치	Smartway 프로그램	과제 목표
gap fairing	2%	2%

- 국내에서 제한 속도가 90㎞/h임을 고려하여 차량의 주행 속도를 90㎞/h로 선정하였음

○ 개발에 필요한 관련 국내 기술과 편향성

- 국내의 장치들은, 대부분 공력에 대한 자세한 고려 없이 유선형 형상의 장치를 제

작 판매하고 있음

· 플라스틱 사출금형 기술을 이용하여 정형화된 형상 제작만 이루어질 뿐, 공기역학적 성능 테스트는 이루어지고 있지 않음

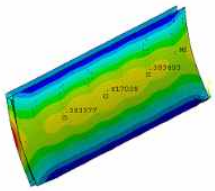
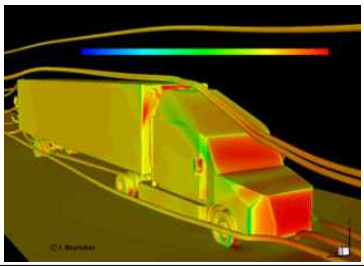
- 공력특성에 대한 고려가 미비할 경우, 설치물의 무게와 공기저항과 와류의 증가로 인한 연료 소비 증가로 이어질 수 있음. 공력 설계 디자인과 같은 핵심 기술 연구 및 개발이 요구됨

- 따라서 본 과제는 한국의 우수한 제조 산업과 공학적 설계에 기반을 둔 공기저항 및 공기와류 저감 장치의 개발과 정량적 성능 지표를 목표로 설정

○ 연구 내용범위

- Gap fairing이 화물차 트레일러의 공기저항 감소에 미치는 영향을 분석하고 Gap fairing의 형상 변화에 따른 성능 평가를 통해 최적화된 형상을 도출 하고, 설계된 내용을 기반으로 하여 국내 화물차와 실정에 특화된 Gap fairing을 개발 및 방법론에 대하여 규격화하고 가이드 제시

<표 8-8> 보트 테일 기술 개발 대상 및 범위

보트 테일 기술 개발	
대상	**내용 범위**
소재	 ▪ 소재 선정 및 적용 - Gap fairing에 적합한 소재 선정 및 적용
구조 설계	 ▪ 역설계를 통한 3D 모델링 ▪ 구조 설계 및 제작 - Gap fairing 설계 및 제작
실험모형검증	  ▪ 풍동실험을 통한 실험모델 검증 ▪ 수치해석을 통한 실험결과 검증 ▪ 국내 실정에 맞는 최적화
시제품 제작 및 현장시험	 ▪ 맞춤형 시제품 제작 ▪ 설치 기술 개발 ▪ 실차 현장시험 - 적용 기업 및 대상, 규모, 일정 선정 - 테스트베드 운영 계획 수립 및 문제점 검토

○ 연구범위 및 성과물

<표 8-9> 세부기술별 핵심 요소 기술 및 성과물

보트 테일 기술 개발	
핵심 요소기술	**최종성과물**
▪ 고탄성·고강도 소재 선정 및 적용 기술 ▪ 3D 역설계 실험 모델 제작 ▪ gap fairing 최적화 설계 및 제작 기술 ▪ 수치해석용 격자 생성기술 ▪ gap fairing 설치 기술	▪ 기술개발 보고서 - 핵심개발 기술 개발 요구사항 문건 - 실험 및 수치해석을 이용한 유동해석 결과 문건 - 장비설계서 ▪ 최적화된 gap fairing 시제품 ▪ 역설계 실험 모델 ▪ 기타 성과물 - 설치 및 유지보수 관련 매뉴얼 - 특허(공기역학, 시제품 관련) - 현황조사분석 - 시장성 분석 및 실용화 전략 보고서 - 유동가시화 영상물(수치해석 및 실험) - 외부기관 검증보고서 - 홍보물

<표 8-10> 기술정의와 핵심요소기술

세부 기술정의	**핵심 요소기술**
Gap fairing을 화물차의 전면부에 장착함으로써 항력계수를 2% 저감할 수 있는 기술	▪ 고탄성·고강도 소재 선정 및 적용 기술 ▪ 실험모델 제작 및 공기역학적 성능 평가 실험 기술 - 역설계를 통한 3D 모델링 기술 - 실험모델 제작 ▪ 수치해석 및 최적화 기술 - 격자 생성 기술 - LES 상세유동해석 기술 ▪ 시제품 제작 및 설치기술 - gap fairing 설치 기술 - 주행에 지장이 없는 gap fairing 설치기술

2. 성과 목표치

<표 8-11> 보트 테일 기술 개발의 정량적 연구 목표 및 세부 연구목표

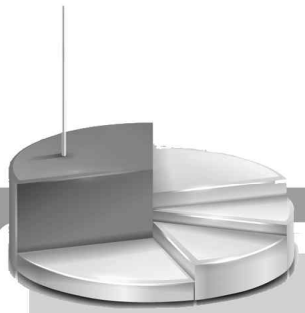
보트 테일 기술 개발	
정량적 연구목표	**세부 연구목표**
화물차 90㎞/h 운행시 연료 소모율 2% 이상 저감을 위한 공기저항 기술 개발 (SAE J 1321 시험 기준*)	▪ 공기저항을 감소시키고 온실가스 감축 효과를 얻기 위한 화물차량의 에너지 소비 저감 기술 개발 ▪ 트랙터와 트레일러 사이의 공간에 부착물을 장착하거나 기존차량의 외부 장착물의 구조를 변경하여 최적의 공기저항 감소 기술 도출
시장성 분석 및 실용화 추진	▪ 시제품 제작 및 화물연료 저감 실증시험 시행 ▪ 수요기업 테스트베드 선정 및 배송에 투입 운영 ▪ 연구성과 및 기술 홍보, 기술 이전 추진

□ **화물차 운행시 연료소모율 저감을 위한 gap fairing 기술 개발**

○ “연료소모율 저감을 위한 gap fairing 기술”은 화물차 90㎞/h 운행 시 연료 소모율 2% 이상 저감을 위한 기술개발을 목표로 함

- “연료소모율 저감을 위한 gap fairing 기술” 개발을 위하여 다음의 세부연구 목표를 설정하였음

· Gap fairing는 미국 SAE J 1321 시험기준 2% 연료소모 저감



제9장 Gap fairing을 통한 운행 안정성 향상 기술 개발

제1절 Gap fairing 설계 및 축소 스케일 모형 제작

제2절 풍동 실험을 통한 주행 안정성 분석

제3절 수치해석을 통한 주행 안정성 분석 및 최적화

제9장. Gap fairing을 통한 운행 안정성 향상 기술 개발

제1절. Gap fairing 설계

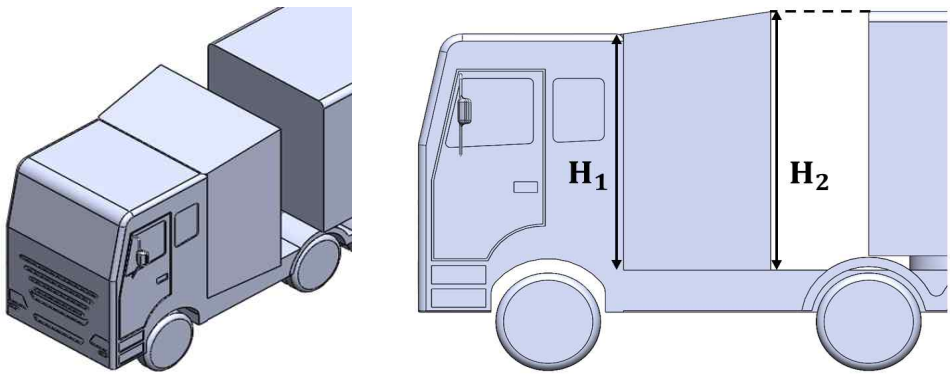
1. Gap fairing 형상 설계

□ SCANIA 40ft 화물차 모델의 gap fairing 설계

○ 국내에서 가장 많이 운행하는 40ft 화물차 모델 중 하나인 SCANIA 40ft 화물차를 역설계한 모델을 제작한 후 차량에 맞는 gap fairing 제작

- 트랙터의 높이를 H_1, 트레일러의 높이를 H_2로 정의하였을 때, gap fairing의 앞쪽 높이는 트랙터의 높이 H_1과 동일하게 설계하고, 뒤쪽 높이는 트레일러의 높이인 H_2와 동일하도록 설계하여 제작
- 트랙터와 트레일러의 높이 차(H_2 - H_1)가 크지 않기 때문에 트랙터 지붕에 부착하는 cab-roof fairing(CRF)의 효과는 미미함
- 바람에 의한 변형 및 파손이 일어나지 않는 포맥스 재질로 gap fairing 제작

○ Gap fairing의 높이 설계는 <그림 9-1>과 같음

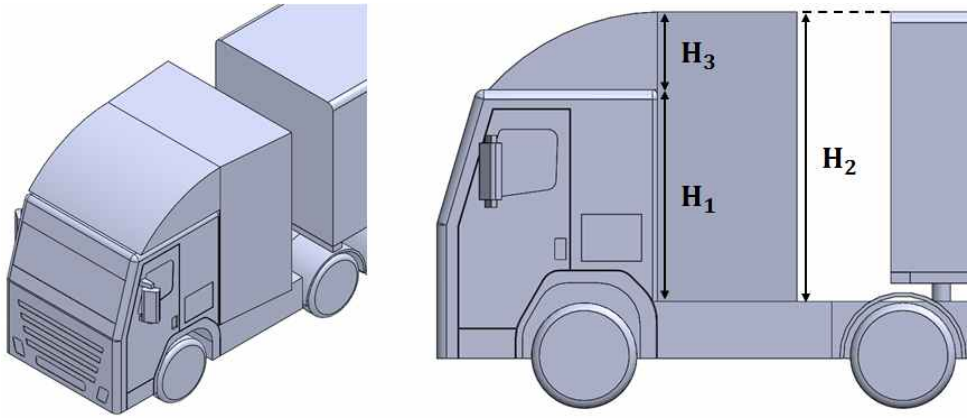


<그림 9-1> 40ft SCANIA 화물차에 부착된 gap fairing 장치

□ 현대 TRAGO 40ft 화물차 모델의 gap fairing

○ 국내에서 가장 많이 운행하는 40ft 화물차 모델 중 하나인 현대 TRAGO 40ft 화물차를 역설계한 차량모델을 제작 한 후 이에 맞는 gap fairing 제작

- 트랙터와 트레일러의 높이 차(H_2 - H_1)가 상대적으로 크기 때문에, 이에 기인한 공기저항을 저감시키기 위한 cab-roof fairing 구조가 포함된 형태의 gap fairing 설계 및 제작
- 트랙터의 높이를 H_1 트레일러의 높이를 H_2, cab-roof fairing의 높이를 H_3로 정의함, $H_2 = H_1 + H_3$ 조건을 만족하도록 gap fairing 설계 <그림 9-2>



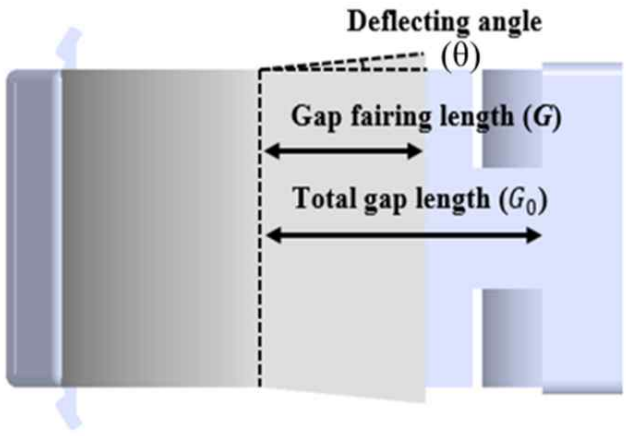
<그림 9-2> 40ft 현대 TRAGO 화물차에 부착된 gap fairing 장치

□ 40ft 화물차 모델의 gap fairing 길이 및 각도 설계

○ Gap fairing의 길이와 각도에 대한 설계는 SCANIA 및 TRAGO 40ft 화물차 모델 공통적으로 적용

○ 트랙터와 트레일러 사이 공간에 기인하여 발생하는 항력을 줄이는 gap fairing 구조물 설치

- 트랙터의 방향 전환에 문제가 발생하지 않는 범위내에서 gap fairing의 길이와 각도 선정
- 트랙터와 트레일러 사이 공간의 길이를 G_0이라 하였을 때, gap fairing의 길이G는 $0.17G_0$ ~ $0.7G_0$ 범위로 제작
- 운전자의 후방 시야 확보와 같은 주행 안정성에 영향을 미치지 않는 범위에서 gap fairing의 deflecting angleΘ을 0°, 5°로 제작 (화물차 폭 제한으로 인하여 deflecting angleΘ는 5° 초과 불가)



<그림 9-3> Gap fairing의 길이 및 각도 설계

제2절. Gap fairing의 공기역학적 성능 평가

1. 풍동 실험을 통한 주행 안정성 평가

가. 실험 장치

□ POSTECH 대형 아음속 풍동

○ 1995년 준공된 포스텍 대형 아음속 풍동은 유체역학적 기본 현상을 포함하여 제반 문제들을 연구할 수 있는 설계된 다목적 아음속 풍동 <그림 2-4>

○ 자동차와 기차와 같은 운송체의 공력 실험에 적합

○ 폐쇄형(closed circuit)구조로 전체 크기는 높이 6m, 폭 14m, 길이 37m임 <그림 2-5>

○ 시험부(test section)의 크기는 높이 1.5m, 폭 1.8m, 길이 4.3m임

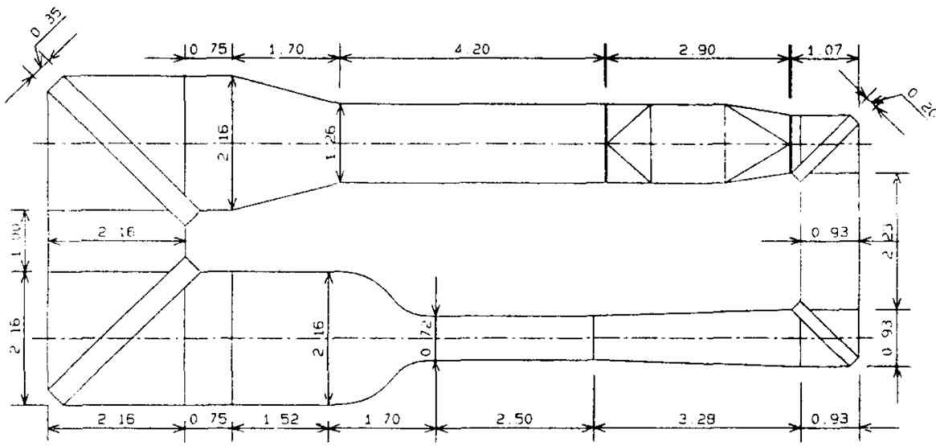
○ 최저풍속: 5m/s, 최대풍속: 75 m/s

○ 수축비: 9:1

○ 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%, 균일도 (flow uniformity)는 0.25%로 운송체의 공력 실험에 적합한 풍동임



<그림 9-4> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관



<그림 9-5> POSTECH 아음속 풍동 도면

□ 공력 측정용 external balance

○ 화물차 차체에 걸리는 힘과 모멘트와 같은 공력을 측정하기 위해 차체에 작용하는 풍하중(wind load)을 정밀하게 측정함

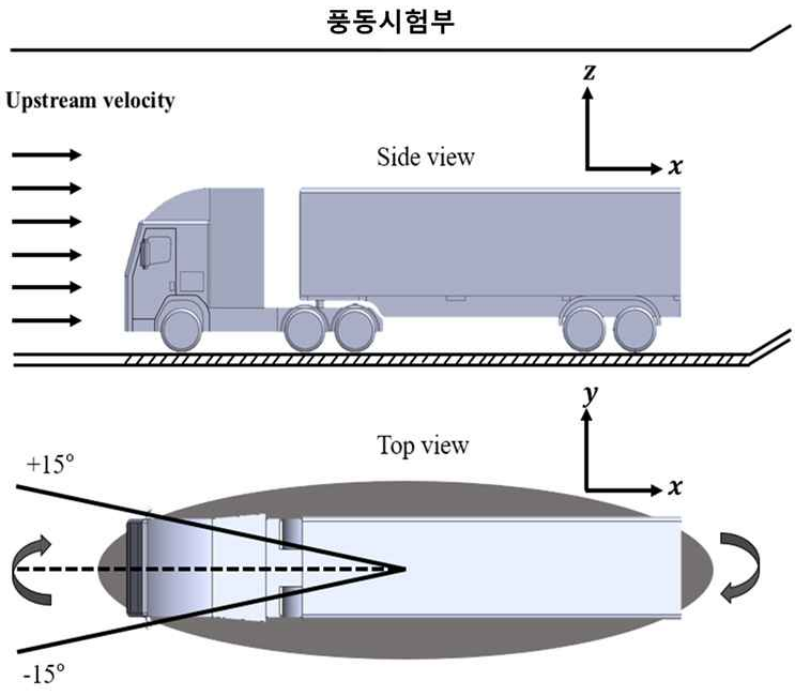
○ 포스텍 아음속풍동에 설치된 external balance는 독일항공우주연구청(DLR) Braunschweig 분소에서 자동차 공력 측정용으로 제작한 7-component balance임.

○ 측정범위 및 분해능

- 측정범위: X=±500N, Mx=±500Nm, Y=±1000N, My=±600Nm, Z=±4000N Mz=±200Nm
- 정확도: 0.2% of full scale dX=1N, dY=2N, dZ=8N

○ 분해능: 0.01N 이하

○ External balance 아래에 turn table을 설치하여 차체에 측풍이 불어올 경우에 대한 풍동 실험도 가능함 <그림 2-6>



<그림 9-6> Yaw angle Φ 조절을 위한 turn table 개략도

나. 실험 대상

□ **실험 모델**

○ 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 두 화물차 모델(SCANIA, TRAGO)을 대상으로 유동제어용 부착물을 차체에 장착하여 공력 성능을 시험함

○ 화물차에 걸리는 형상 저항(form drag), 차체 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후미부에서 발생하는 유동박리에 기인한 공기저항을 효과적으로 제어함으로써 화물차 차체에 걸리는 공기저항을 저감시키고자 함

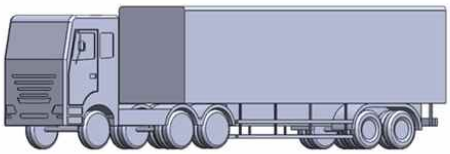
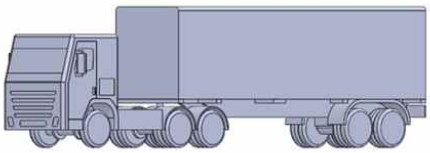
○ 공기역학적 해석을 통해 화물차의 항력 감소 메커니즘을 밝히고, 저저항 운송체의 공력 설계기술을 개발

○ 본 연구에서는 gap fairing의 형상 및 각도 등과 같은 실험변수를 변화시키면서 화물차에 걸리는 항력과 측력을 측정하여 항력계수(C_D)와 횡풍 측력계수(C_S)을 도출함

- 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 현대 TRAGO와 SCANIA의 40ft 화물차의 외형을 실측하여 이를 역설계하는 방식으로 화물차 형상을 정하고, 풍동시험부의 폐색률(blockage ratio, 풍동의 단면적에 대해 모형의 단면적이 차지하는 비율)이 8% 이하가 되도록 축소비를 결정하고 축소 모형을 제작

○ 화물차의 구체적인 형상 및 축소 비율, 폐색률은 <표 2-1>에 나타냄

<표 9-1> 실험 대상 화물차 모델 및 제원

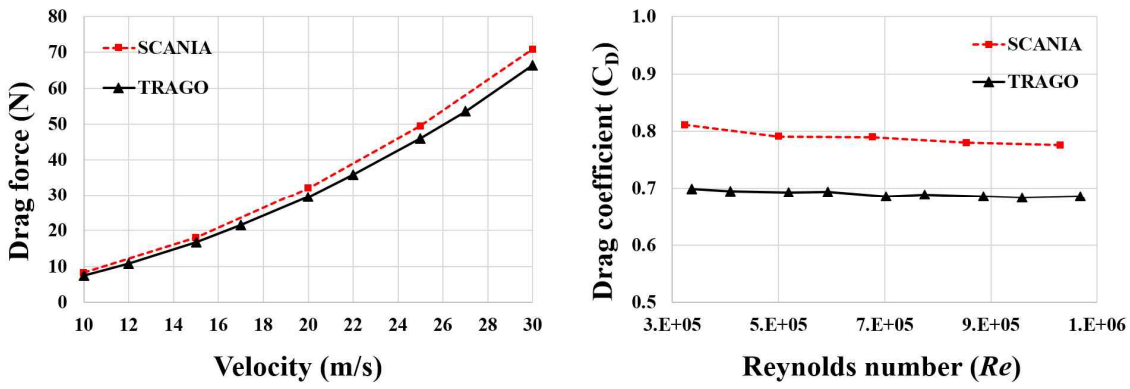
	실험 대상 모형			
실험대상	40ft Scania G440		40ft 현대 Trago Xcient	
실제크기 (m)	18(L) x 2.5(B) x 4(H)		15(L) x 2.6(B) x 4.2(H)	
실험모형				
모형 scale	힘 측정	1/8	힘 측정	1/8
			PIV 실험	1/17
폐색률 (Blockage ratio)	힘 측정	5.78%	힘 측정	6.32%
			PIV 실험	8.52%

다. 공력 특성

□ 40ft 화물차 모델의 공력특성

○ 공기저항을 줄이기 위한 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 30m/s 영역에서 변화시켜가며 차체에 가해지는 공기저항(drag)값을 측정하고, 항력계수(C_D) 값을 도출하여 <그림 2-7>에 나타냄

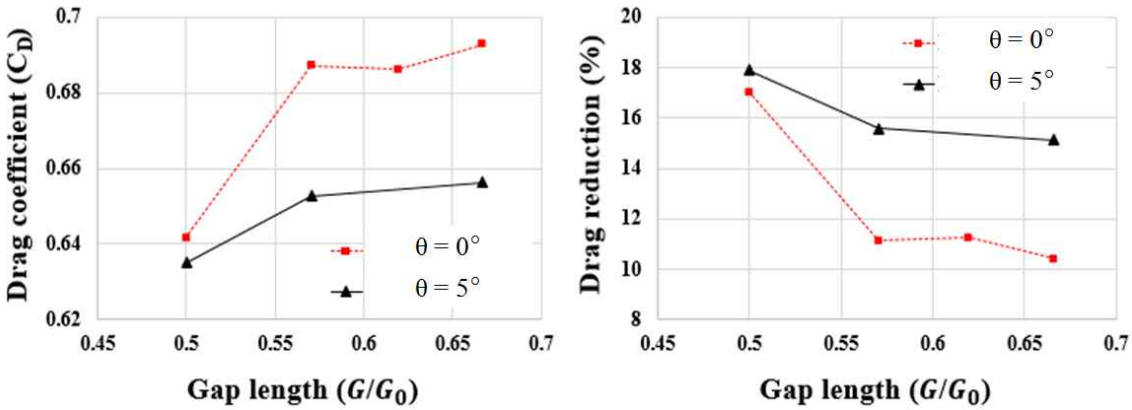
- 측정 결과, 실험 모델에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 풍속의 제곱에 비례하여 증가함을 확인
- 항력계수(C_D)는 0.776과 0.686로 트럭형 차체와 유사한 형상에 대해 기존에 연구 결과들과 잘 일치함
- 25m/s 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 25m/s 에서의 레이놀즈 수(Reynolds number) 값은 9.1×10^5이며, 이보다 큰 레이놀즈 수 조건에서는 항력계수가 거의 변하지 않음. $Re = 9.1 \times 10^5$이 임계 레이놀즈 수임을 알 수 있음



<그림 9-7> 풍속변화에 따른 두 40ft 화물차(SCANIA, TRAGO) 모델의 항력(FD) 및 항력계수(CD)값들의 변화

□ SCANIA 40ft 화물차 모델에 대한 gap fairing 효과

- *Re* =9.1 × 10^5, yaw angle (Φ)=0° 조건에서 SCANIA 40ft 화물차에 부착한 gap fairing의 gap length 및 deflecting angle변화에 따른 항력계수 및 항력계수 저감률 변화를 확인 <그림 2-8>
- Deflecting angle Θ=0° 일 때보다 Θ=5° 일 때, 전체적으로 항력계수 저감 효과가 높음
- Deflecting angle Θ=5°, gap length G/G_0=0.5 일 경우, 항력계수(C_D)가 최소값을 가지며, gap fairing을 부착하지 않은 기본 모델에 비해 약 18%의 항력계수 저감 효과를 보임

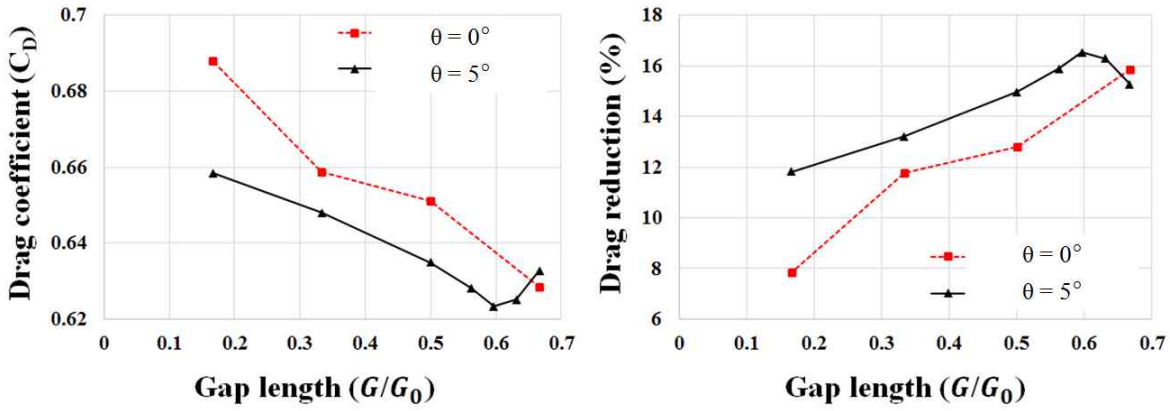


<그림 9-8> 40ft SCANIA 화물차 모델에 부착한 gap fairing의 길이와 각도변화에 따른 항력계수(CD)와 항력계수 저감 효과

□ TRAGO 40ft 화물차 모델에 대한 gap fairing 효과

- *Re* =9.1 × 10^5, yaw angle (Φ)=0° 조건에서 TRAGO 40ft 화물차 모델에 부착한 gap fairing의 gap length 및 deflecting angle변화에 따른 항력계수 및 항력계수 저감률 변화를 확인 <그림 2-9>
- Deflecting angle Θ=0° 일 때보다 Θ=5° 일 때, 전체적으로 항력계수 저감 효과가 높음
- Deflecting angle Θ=5°, gap length G/G_0=0.6 조건에서, 항력계수(C_D)가 최소값을 가지며, gap fairing을 부착하지 않은 기본 모델에 비해 16.5%의 항력계수 저감 효과를 보임
- 주행안정성 실험 및 수치해석은 가장 낮은 항력계수 값을 보이는 deflecting angle Θ=5°, gap length G/G_0=0.6 조건의 gap fairing을 장착한 경우에 대해 수행함

○ 실차시험(proving ground)에서 TRAGO 40ft 화물차량을 기본 모델로 선정하여 시험을 수행하였음. 이에 따라 이후의 주행안정성 평가, 유동가시화 실험, 수치해석연구는 TRAGO 40ft 화물차 모델에 대한 결과만 다루었음

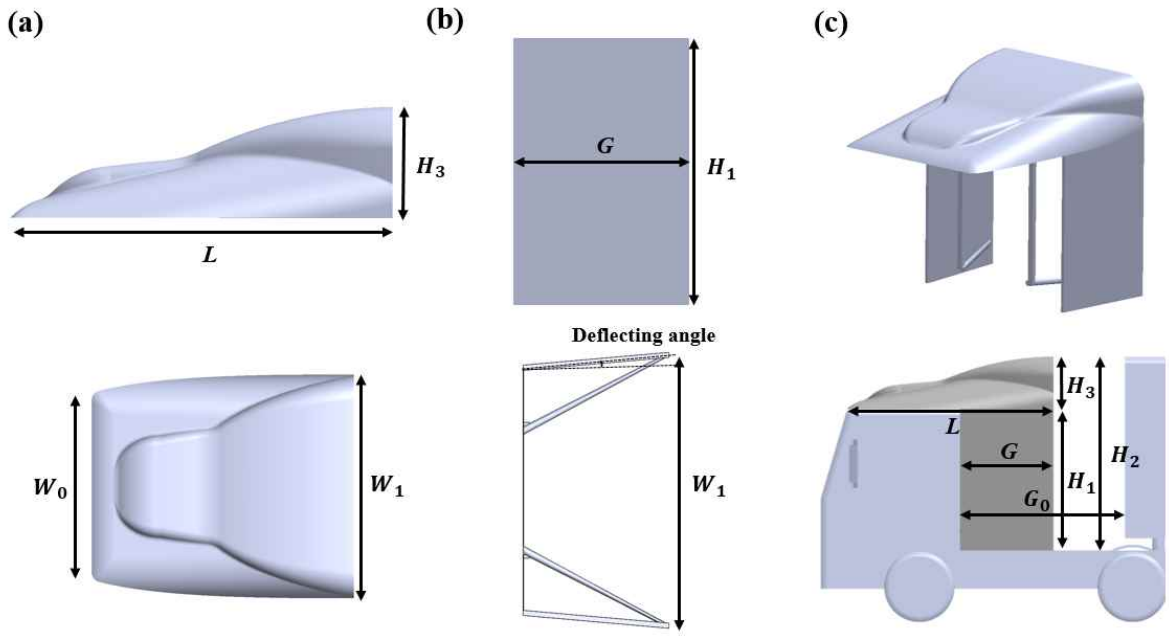


<그림 9-9> 40ft TRAGO 화물차에 부착한 gap fairing의 길이와 각도변화에 따른 항력계수(CD)와 항력계수 저감 효과

□ Extended aero cab fairing(EACF) 효과

○ Aero cab fairing(ACF) 및 extended aero cab fairing(EACF) 설계

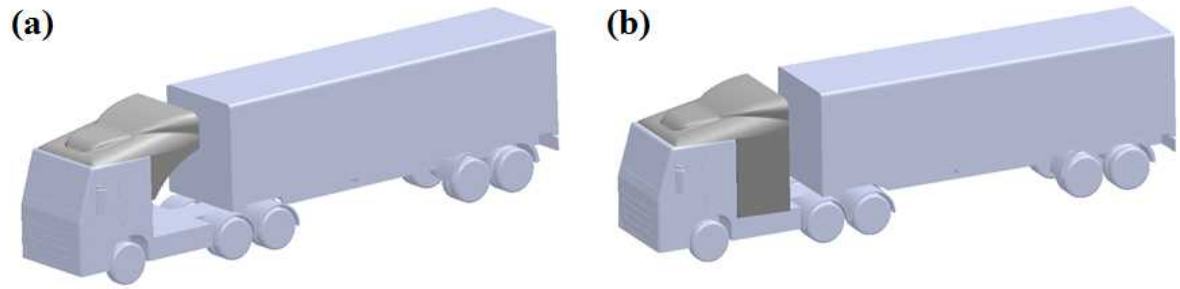
- Aero cab fairing(ACF)은 트랙터 상부에 부착되는 cab-roof fairing과 gap fairing을 합쳐 하나의 구조물로 생체모방형 형상을 가지도록하여 설계
- ACF의 3차원 형상은 바다사자의 머리 부분 형상을 모사하여 설계
- ACF의 길이(L)는 캡 상부 길이(L_C)에 트랙터와 트레일러 사이 공간으로 확장한 부분의 길이(G)만큼 추가된 길이로 정의
- Gap extender는 트랙터와 트레일러 사이 공간에 장착하며, 트랙터와 트레일러 사이의 공간으로 흘러들어오는 공기 흐름을 효과적으로 차단하는 역할을 함
- Gap extender의 길이(G)를 트랙터와 트레일러 사이 공간의 길이(G_0)의 60%로 설계. 앞쪽 폭은 트랙터의 폭과 동일하며, deflecting angle은 Θ=5°로 설계
- Extended aero cab fairing(EACF)는 ACF와 gap extender 모두를 장착한 공기저항 저감 장치를 나타냄
- EACF를 장착함으로써 트랙터 상부와 측면부, 트랙터-트레일러 사이의 공간으로 흐르는 공기흐름을 효과적으로 제어하여, 화물 차량에 걸리는 공기저항을 감소시키고, 측풍에 의한 영향을 저감시켜 주행 안정성을 증가
- EACF를 장착하면 트랙터 상부와 측면부, 트랙터-트레일러 사이의 gap 공간에서의 공기흐름을 효과적으로 제어하여 차체에 걸리는 공기저항을 크게 감소시키고, 측풍에 의한 영향을 저감시켜 주행 안정성도 증가시킴



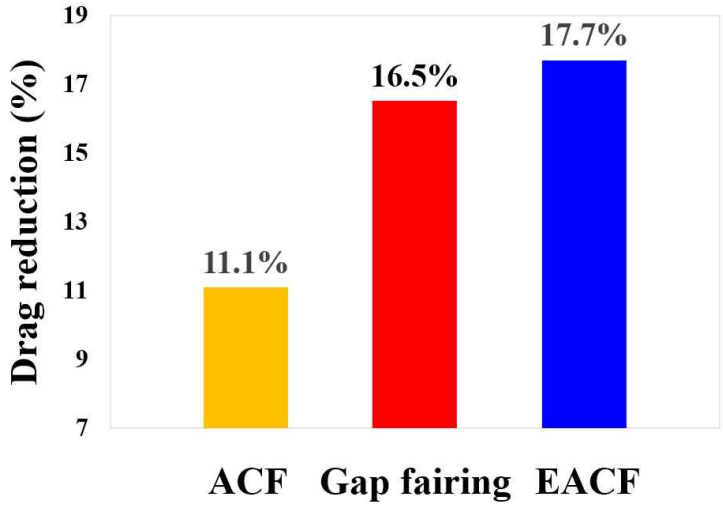
<그림 9-10> (a) 40ft 화물차 운전석(cab) 상부에 장착하는 aero cab fairing (ACF) 도면, (b) 트랙터와 트레일러 사이 공간에 장착하는 gap extender 형상, (c) 40ft 화물차에 ACF 및 gap extender를 포함한 extended aero cab fairing (EACF)을 장착한 형상

□ ACF 및 EACF의 효과

- Re =9.1 × 10^5, yaw angle (Φ) = 0° 조건에서 ACF 및 EACF를 40ft 화물차 모델 <그림 2-11>에 부착하고, 항력계수 저감률을 확인하였음
- ACF 부착 시, 트랙터 뒤쪽 공간에 ACF를 안정적으로 지지하기 위한 지지구조를 추가한 후 항력을 측정. ACF를 부착하지 않은 경우와 비교하여 항력계수가 11.1% 저감됨
- 최대 효과를 보인 기존 gap fairing (deflecting angle Θ = 5°, gap length G/G_0 = 0.6)을 부착한 모델의 경우 16.5%의 항력계수 저감 효과를 보였음. 반면에, EACF를 부착한 경우 17.7%의 항력계수 저감 효과를 보였음. 즉, 1.2% 추가적인 항력계수 저감 효과를 얻을 수 있음 <그림 2-12>
- Gap extender의 효과는 EACF의 효과(17.7%)와 ACF의 효과(11.1%)의 차이인 6.6% 정도로 추정할 수 있음



<그림 9-11> 40ft TRAGO 화물차 모형에 (a) ACF와 (b) EACF를 장착한 경우의 형상



<그림 9-12> 각 부착물에 대한 항력계수 저감 효과 비교

라. 주행 안정성 평가

□ **주행안정성 평가 실험 방법 및 모형**

○ 화물차는 차체 단면적에 비해 길이가 길어 측면적이 넓어 측풍의 영향을 크게 받고 유동에 기인한 진동(flow-induced vibration)이 발생하여 주행 안정성이 감소할 수 있음

○ 화물차에 측풍이 불어오는 경우를 모사하기 위해 풍동 바닥면에 설치된 turn table을 이용하여 yaw angle(Φ)을 0°~ 15° 사이로 변화시키면서 차량에 걸리는 공력특성 변화를 분석함

○ 풍속은 임계 레이놀즈 수(Reynolds number) 영역을 넘는 25m/s (=90km/h)로 고정시키고 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용함

○ 화물차에 걸리는 항력(F_D), 항력계수(C_D), 측력(F_S), 횡풍 측력계수(C_S)는 다음과 같이 정의함

$$F_D = F_x \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_y \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

$$F_S = F_y \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_x \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_s = \frac{|F_S|}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

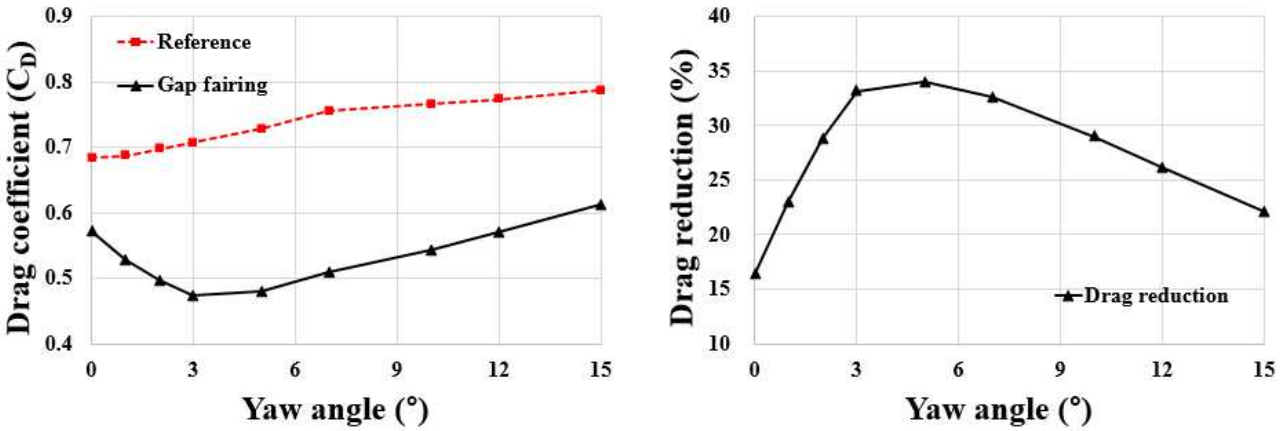
□ **Yaw angle (Φ) 변화에 따른 40ft 화물차 모델의 공력특성 분석**

○ Yaw angle 변화에 따른 항력계수(C_D)와 항력계수 저감률의 변화

- Yaw angle 변화 실험에 사용된 gap fairing은 최대 항력계수 저감 효과를 나타내는

deflecting angle Θ=5°, gap length G/G_0 =0.6 조건을 적용한 모델임

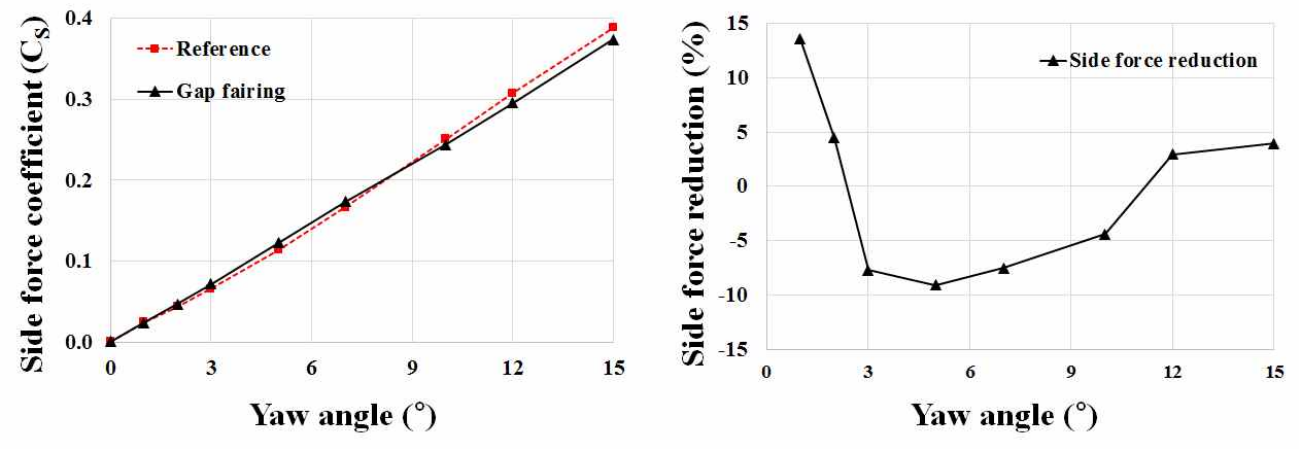
- Yaw angle 변화에 따른 항력계수(C_D)의 변화와 항력계수 저감률 변화를 나타냄 <그림 2-13>
- Yaw angle이 증가함에 따라 기본 화물차 차체가 받는 항력계수 값이 증가하며, gap fairing을 장착한 경우 yaw angle 전 영역에서 기본 reference 모델에 비하여 항력계수 값이 크게 감소함
- Yaw angle 전 영역에서 약 20-30%의 항력계수 저감 효과를 보이며, 특히 yaw angle Φ =5° 조건에서 34%의 항력 저감 효과를 보임
- Gap fairing 장착 시, 트랙터 상부에서 발생하는 유동박리 뿐만 아니라 트랙터와 트레일러 사이 gap 공간에서의 유체 저항이 감소하여 항력계수가 크게 줄어듦
- 이러한 연구결과를 통해 40ft 화물차에 gap fairing 장착 시, 차량의 연비를 크게 개선시킬 수 있음



<그림 9-13> Yaw angle에 따른 40ft TRAGO 화물차의 항력계수(CD) 및 항력 저감 효과 변화

○ Yaw angle에 따른 횡풍 측력계수(C_S)와 횡풍 측력계수 저감률의 변화

- Yaw angle Φ 변화에 따른 횡풍 측력계수와 횡풍 측력계수 저감률을 나타냄 <그림 2-14>
- Yaw angle이 커짐에 따라, 측풍을 받는 차량의 표면적이 늘어나고 이에 따라 차체에 걸리는 측력도 증가함
- Yaw angle Φ =1° 조건에서 횡풍 측력계수가 13.5% 줄어드는 효과를 보임. 이러한 결과는 본 과제의 성과 기준 목표치인 5%를 크게 초과 달성하는 수치임



<그림 9-14> Yaw angle에 따른 40ft TRAGO 화물차 모델의 횡풍 측력계수(CS) 및 측력계수 저감효과

2. 유동가시화 실험을 통한 공기역학적 성능 평가

가. 실험 장치

□ POSTECH 중형 아음속 풍동

- 1989년 준공한 후 91년 확장 이전한 포스텍 중형 아음속 풍동은 폐쇄형(closed circuit)으로 시험부(test section)의 크기는 높이 0.6m, 폭 0.72m, 길이 6.75m임 <그림 2-15>
- 최대풍속은 40 m/s 이며, 난류강도(turbulence intensity)는 0.08%로 운송체 주위 유동 분석에 적합한 풍동임



<그림 9-15> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 특징

□ 40ft 화물차량 모델 주위 유동 가시화 방법

○ Gap fairing 부착 전후의 차체 전면부 주위 흐름을 관찰하고 이를 통해 항력 저감에 영향을 미치는 유동구조를 정량적으로 파악하기 위해 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정 기법을 이용하여 차체 전면부 주위 유동 구조를 분석함

○ PIV 측정 system의 구성은 다음과 같음 <그림 2-16>

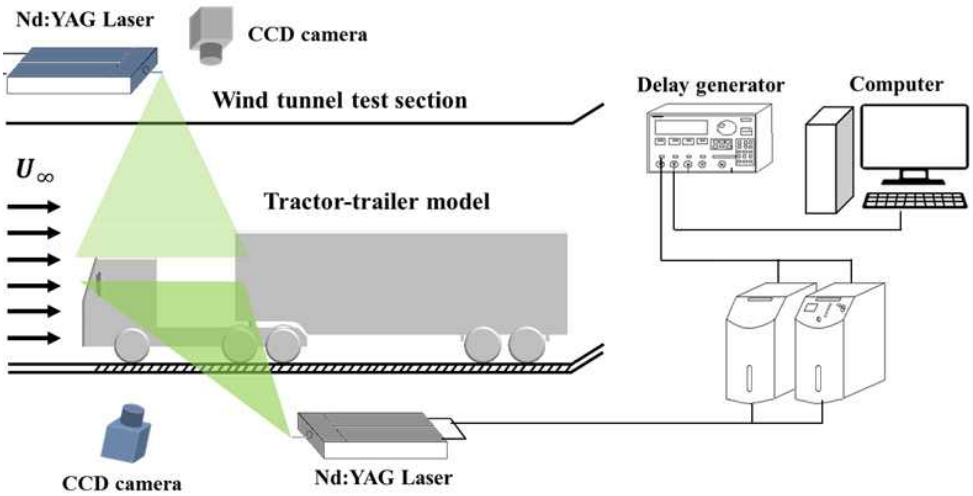
- 120mJ Nd:YAG 레이저, 4Kx3K CCD 카메라, 영상처리장치, 동기장치(delay generator) 등으로 구성된 PIV 시스템이 사용됨

- 추적입자로는 올리브 오일을 사용 (입자 직경 1-3μm)
- 1mm 두께의 레이저 평면광(light sheet)을 풍동시험부 측면을 통해 40ft 화물차 모델(1/17) 전면부 주변을 수평방향으로 조사함
- Two-frame cross-correlation PIV algorithm를 이용하여 차체 전면부 주위 흐름의 속도장 정보를 측정함
- 카메라 노출시간은 0.1ms
- Interrogation window 크기는 64x64 pixel이며 50% overlapping 하였음

○ 일정한 풍속 조건 (U_∞ =15m/s)에서 실험 수행

- 풍속 조건에 상응하는 레이놀즈 수는 Re =1.8 × 10^5 임

○ Gap fairing 부착 유/무에 따른 40ft 화물차 전면부 주위 유동을 정량적으로 가시화



<그림 9-16> 40ft 화물차 1/17 스케일 축소 모델 및 PIV 실험 set-up의 개략도

나. 공기역학적 성능 평가

○ 40ft TRAGO 화물차 모델에 작용하는 공기 저항

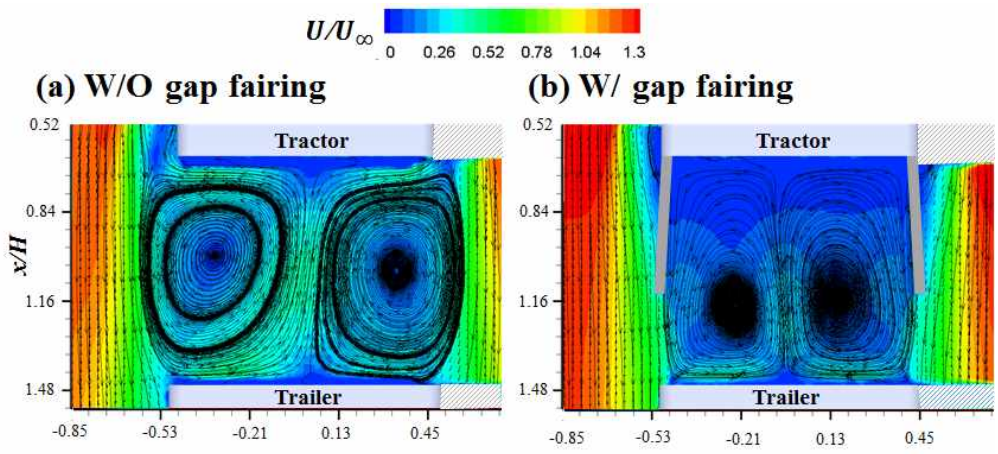
- 40ft 화물차 모델 전면부에서 발생하는 공기저항은 주로 트랙터 전면부와 트랙터와 트레일러 사이 gap 공간에서 발생
- 트랙터 전면부에서 발생하는 유동 박리로 인해 공기저항 발생
- 트랙터와 트레일러 사이 공간에서 생성되는 재순환 영역(recirculation region)에 기인한 압력강하로 항력 발생

○ Gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 속도장 비교 (z-plane, z=2.0)

- Gap fairing 장착 시, 트랙터와 트레일러 사이의 gap 공간에서 속도가 현저히 낮은

저속 영역(low-velocity region)이 형성됨

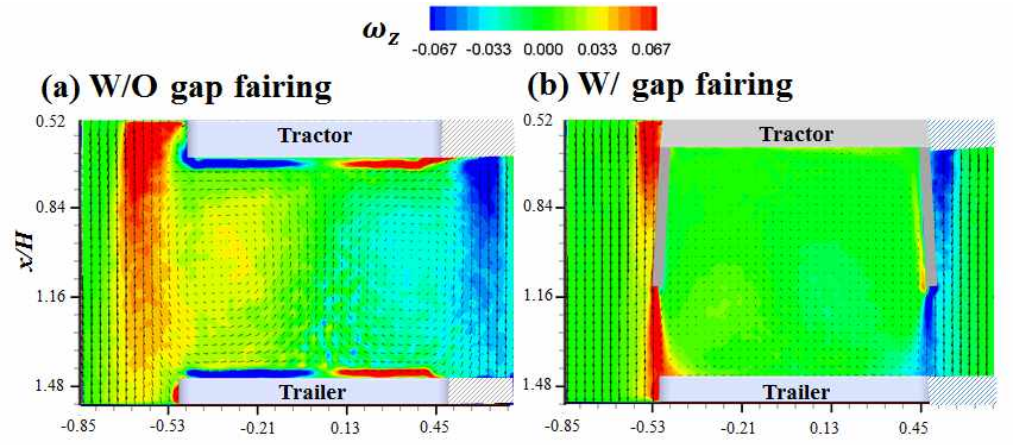
- Gap fairing이 gap 내부로 유입되는 빠른 유동을 차단함으로써 트레일러의 전면부에 작용하는 운동량(momentum)을 크게 감소시킴
- 트레일러 전면부에 작용하는 유동의 운동량 감소는 항력계수 저감 효과로 나타남
- Gap fairing 장착 시, 화물차 측면부에서 유동박리로 인한 운동량 손실(momentum deficit)도 현저하게 감소함



<그림 9-17> 40ft 화물차 모형의 트랙터와 트레일러 사이 공간(gap)에 형성된 흐름의 속도장 비교. (a) gap fairing 미부착, (b) gap fairing 부착

○ Gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 와류(vorticity) 비교 (z-plane, z=2.0)

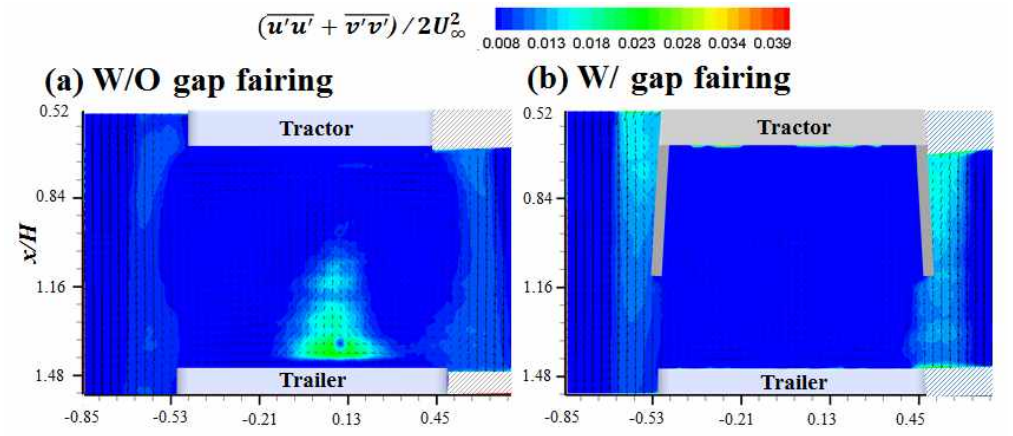
- Gap fairing 장착 시, 트랙터와 트레일러 사이의 공간에서 와류 강도가 현저하게 감소함
- Gap fairing이 gap 내부로 유입되는 빠른 유동을 차단함으로써 트레일러 전면부에 형성되는 와류를 감소시켜 트레일러에 작용하는 공기저항을 저감시킴
- Gap fairing 부착 시, 화물차 측면부에 상대적으로 낮은 강도의 와류가 형성됨. 이에 따라 화물차 측면부에서 와류 형성에 기인한 에너지 손실이 감소함



<그림 9-18> 40ft 화물차 모델의 트랙터와 트레일러 사이 공간(gap)에 형성된 흐름의 와류(vorticity) 비교. (a) gap fairing 미부착, (b) gap fairing 부착

○ Gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 난류 운동에너지(TKE) 비교 (z-plane, z=2.0)

- Gap fairing 장착 시, 트랙터와 트레일러 사이의 공간에서의 난류 운동에너지(TKE)가 현저하게 감소함
- 트레일러 전면부 영역에서의 난류운동에너지를 감소시켜 트레일러의 항력계수를 저감시킴
- Gap fairing이 내부로 유입되는 유동을 효과적으로 차단하는 반면, gap fairing 측면부에는 상대적으로 큰 난류운동에너지가 생성됨



<그림 9-19> 40ft 화물차 모형의 트랙터와 트레일러 사이 공간(gap)에 형성된 유동의 난류 운동에너지(TKE) 비교. (a) gap fairing 미부착, (b) gap fairing 부착

3. 수치해석을 통한 공기역학적 성능평가

가. 수치해석 방법

□ 큰 에디 모사 (large-eddy simulation)

○ 지배방정식 및 수치해석 방법

- 유체의 운동량 및 질량 보존에는 다음과 같은 Navier-Stokes equation을 이용하였음

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\nu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}))$$

○ 지배방정식

- 위의 Navier-Stokes equation을 필터링하여 큰에디(large-eddy)는 직접 계산하고, 작은 스케일의 에디는 모델링

- Filtered Navier-Stokes equation ($\bar{}$:필터 연산)

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i}\,\overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\nu(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i})) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

$$(\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i}\,\overline{u_j})$$

○ 수치해석 기법

- Incompressible LES solver
- Unstructured solver
- Fully-implicit fractional method에 기반한 시간 전진
- Crank-Nicolson method를 이용한 시간 차분
- 2nd-order central difference scheme을 이용한 공간 차분
- Dynamic Vreman global equlibrium subgrid-scale (SGS) model

□ 수치해석 도메인

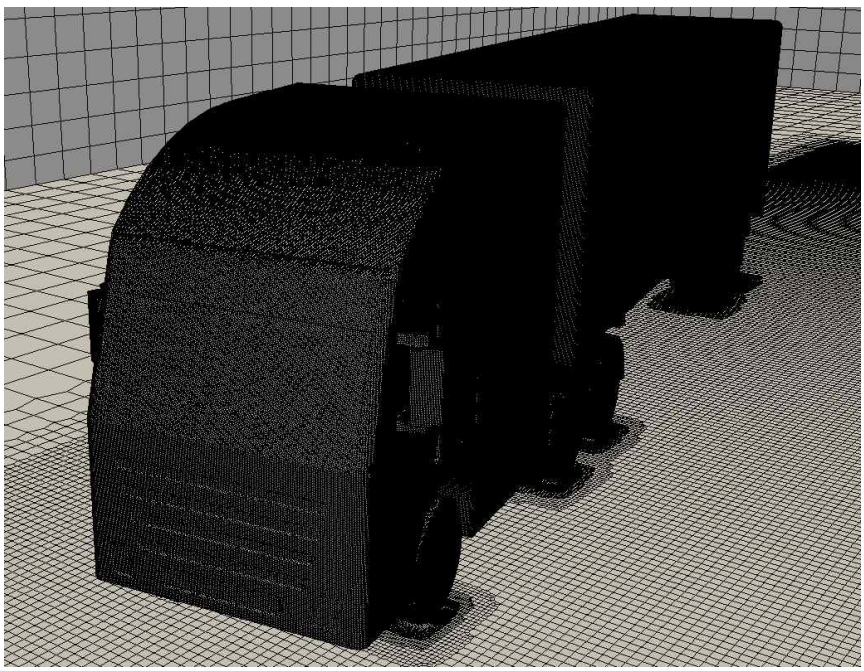
○ 수치해석 도메인 생성

- 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행
- Local refinement 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1300-1600

만 개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

○ 경계조건 및 상수

- Inlet velocity: 90km/h (=25m/s)
- Outlet: local acceleration + convection = 0
- Wall(풍동 외벽, 화물차 표면): no-slip condition
- Kinematic viscosity = 1.568 x $10^{-5}m^2/s$
- CFL(무차원 시간간격) = 3.0



<그림 9-20> 주행 안정성 평가에 사용된 수치해석 격자 (40ft 화물차)

□ **격자 생성**

○ <표 2-2>와 같은 셀 개수를 가지는 계산 격자 생성

<표 2-2> 수치해석용 격자의 셀 개수

	40ft 화물차 모델
셀 개수	약 1400만

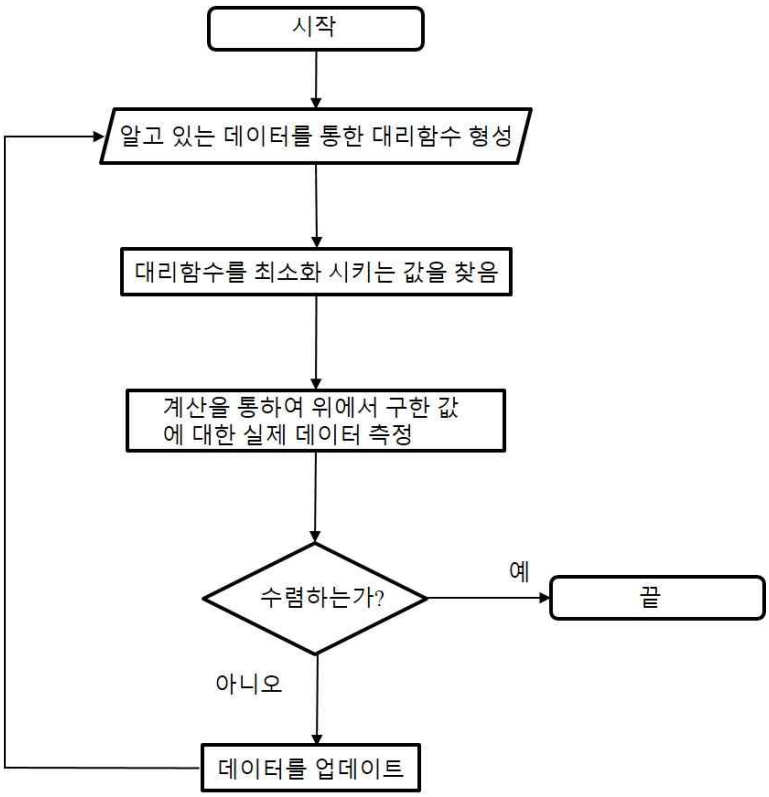
○ Local refinement 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1400만 개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

○ 풍동 실험에서 가장 낮은 C_D값을 보이는 deflection angle Θ=5°, gap length G/G_0 = 0.6 조건의 gap fairing이 부착된 Trago 40ft 화물차 모델에 대해 수치해석함

나. 수치해석을 통한 최적화

□ Surrogate Management Framework를 이용한 최적화 분석

○ 실제 연속적인 함수를 구하기 위한 계산 또는 실험 비용이 상당하므로, 실제 함수와 비슷한 형태를 가지는 대리 함수를 구하고, 구해진 대리 함수를 이용하여 최적의 값을 찾는 방법을 Surrogate Management Framework(SMF)이라고 함

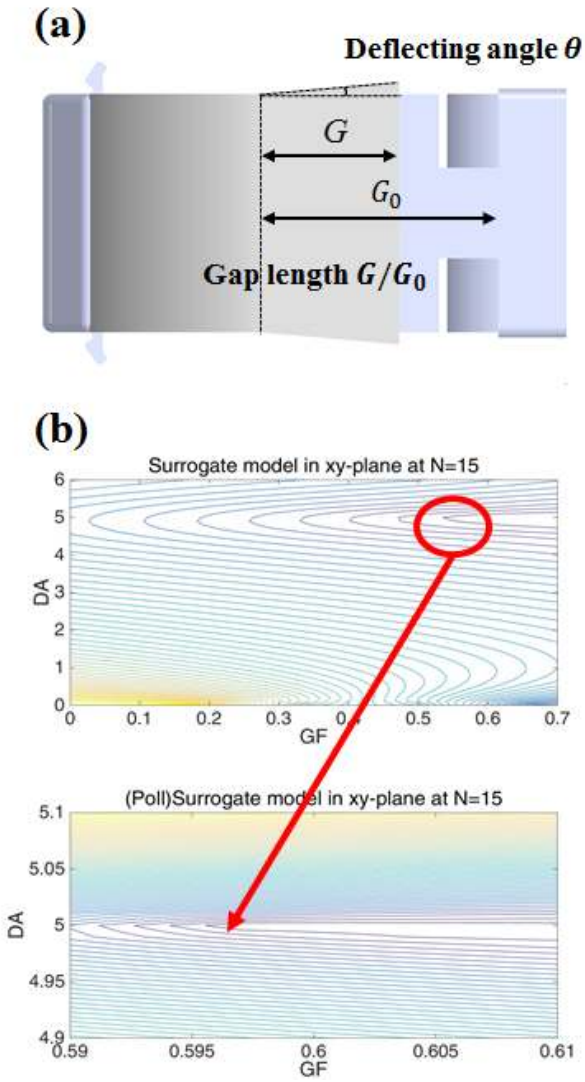


<그림 9-21> Surrogate Management Framework의 알고리즘

□ 40ft 화물차 Gap fairing에 대한 최적화 분석

○ Gap fairing 길이 및 각도 조절에 대한 SMF 최적화 분석 결과

- 40ft 화물차의 gap fairing 길이는 gap 길이가 다른 화물차량 모두에 적용 가능하도록 무차원수(gap length)로 설계함
- Gap length가 약 0.6, deflecting angle Θ = 5°의 gap fairing에서 최적의 항력 감소 결과를 얻어 낼 수 있음



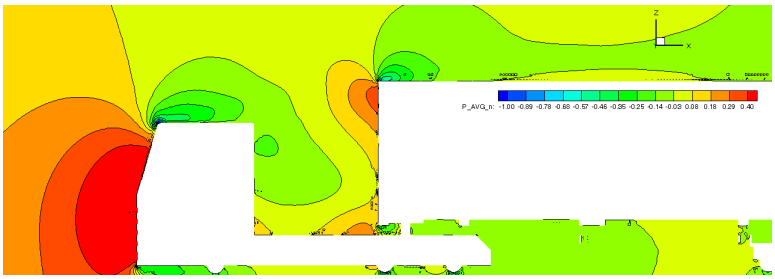
<그림 9-22> (a) 40ft 화물차에 장착한 gap fairing 길이와 각도에 대한 모식도 및 (b) Surrogate Management Framework(SMF) 최적화 결과

다. 유동장 분석

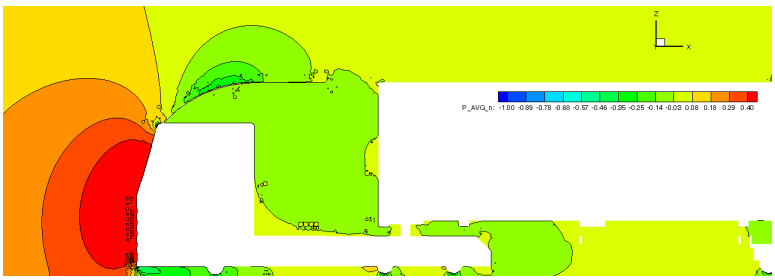
□ 40ft 화물차 주변 유동장 분석

○ Gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 압력장 비교 (y-plane, y=0.0)

- Gap fairing 장착 시, 트랙터와 트레일러 전면부 모서리 부근에서 발생하는 유동박리가 지연됨
- Gap fairing 장착 시, 트레일러 전면부에 작용하는 압력이 현저하게 줄어듦
- 트랙터의 전면부와 후면부, 트레일러의 전면부와 후면부의 압력차이가 감소하여 화물차에 가해지는 압력에 기인한 항력(form drag) 감소



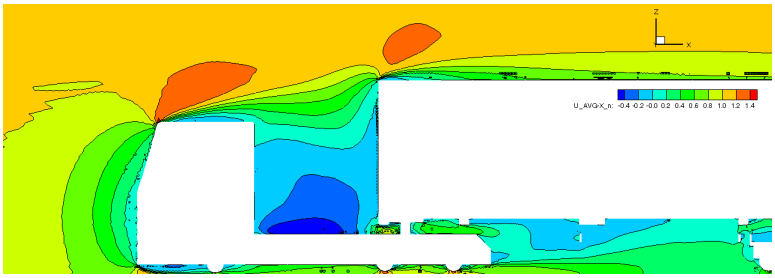
<그림 9-23> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)



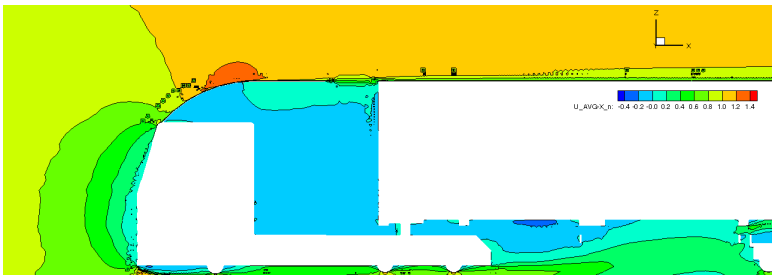
<그림 9-24> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)

○ Gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 속도장 비교 **(y-plane, y=0.0)**

- Gap fairing 부착 시, 트랙터와 트레일러 사이 공간(gap)에서의 재순환 영역(recirculation region)이 크게 줄어듦
- 트레일러 상부에서 유동박리로 인한 운동량 손실(momentum deficit)도 감소함
- 이는 40ft 화물차를 지나는 유동에 기인하여 화물차에 가해지는 항력이 감소함을 의미



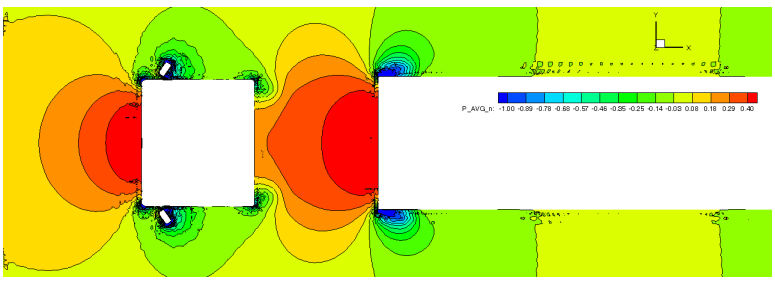
<그림 9-25> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)



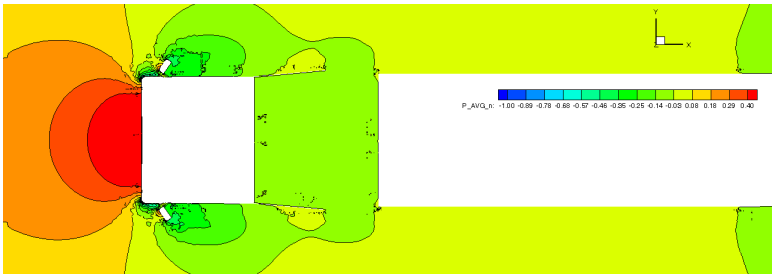
<그림 9-26> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)

○ Gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 압력장 비교 **(z-plane, z=2.0)**

- Gap fairing을 부착함에 따라, 트랙터와 트레일러 사이 공간에서 저압 영역(low-pressure region)이 형성됨
- 이에따라 gap fairing 부착 시, 트레일러 전면부에 작용하는 압력이 감소하여 항력을 감소시킴
- 트랙터의 전면부와 후면부, 트레일러의 전면부와 후면부에 작용하는 압력차이가 감소하여 화물차에 가해지는 압력에 기인한 항력 감소



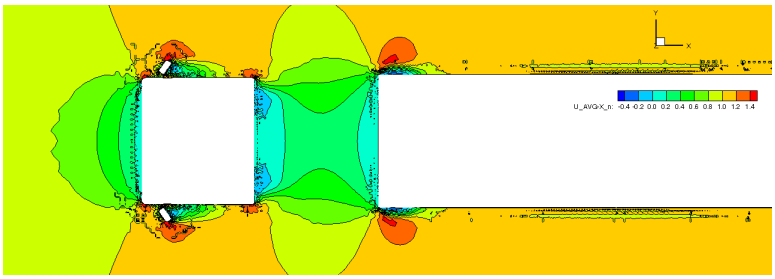
<그림 9-27> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0)



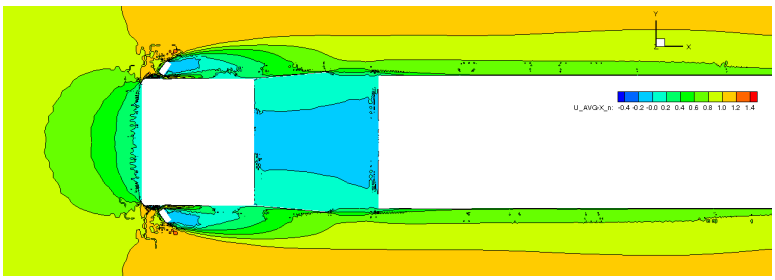
<그림 9-28> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의
컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장
(z-평면, z=2.0)

○ Gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 속도장 비교 (z-plane, z=2.0)

- Gap fairing 부착 시, 트랙터와 트레일러 사이 공간에서 저속 유동 영역(low velocity region)이 형성됨
- Gap fairing 부착 시, 트레일러 측면 모서리에서 발생하는 유동박리가 지연되어 운동량 손실(momentum deficit)이 감소함



<그림 9-29> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의
컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장
(z-평면, z=2.0)



<그림 9-30> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의
컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장
(z-평면, z=2.0)

라. 주행 안정성 평가

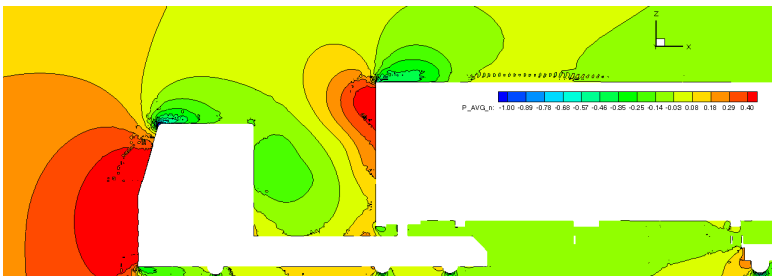
□ **40ft 화물차 주변 유동장 분석**

○ 측풍 조건에서, gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 압력장 비교 **(Φ =10°, y=0.0)**

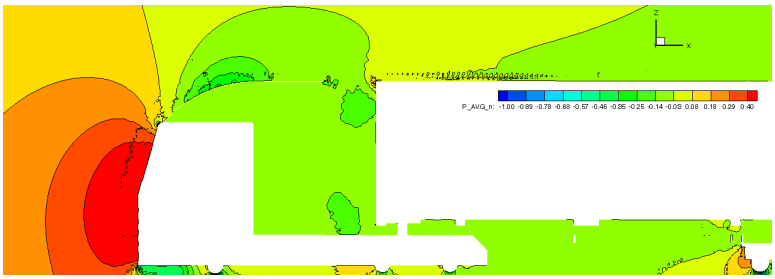
- Φ =0° 인 경우와 비교하여 gap fairing 장착된 경우, 장착되지 않은 경우에 비해

트레일러 전면부에 작용하는 압력이 보다 크게 감소함

- Gap fairing 장착 시, 트레일러 전면부에 작용하는 압력이 현저하게 줄어듦
- 트랙터의 전면부와 후면부, 트레일러의 전면부와 후면부의 압력차가이 감소하여 화물차에 가해지는 압력에 기인한 항력이 감소



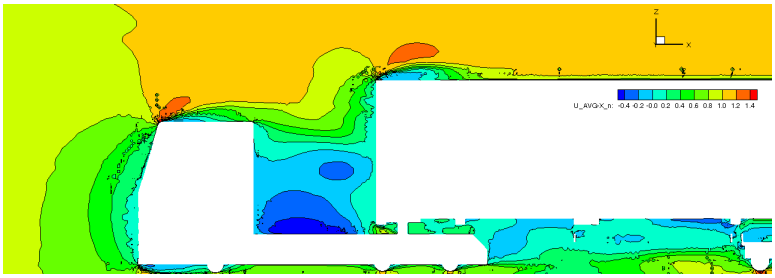
<그림 9-31> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)



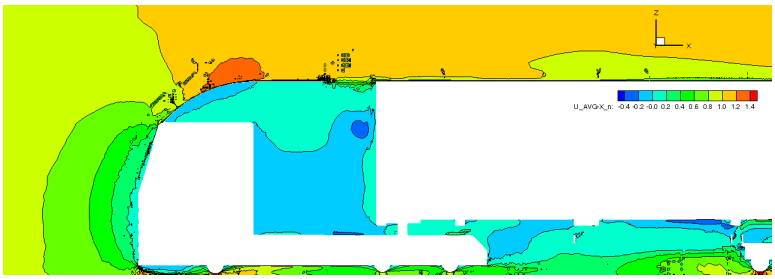
<그림 9-32> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)

○ 측풍 조건에서, gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 속도장 비교 **(Φ =10°, y=0.0)**

- Φ =0° 인 조건경우와 비교하였을 때, gap fairing이 장착되지 않은 경우 트랙터와 트레일러 전면부 모서리 부근에서 유동박리가 보다 크게 발생
- Gap fairing 장착 시, 트랙터와 트레일러 전면부 모서리에서 발생하는 유동박리가 지연됨
- Gap fairing 장착 시, 트랙터와 트레일러 사이 공간에서의 재순환 영역(recirculation region)이 줄어듦
- 트레일러 상부에서도 유동박리에 기인한 운동량 손실(momentum deficit)이 감소함
- 이는 40ft 화물차를 지나 흐르는 유동에 기인하여 화물차에 가해지는 항력이 감소함을 의미함.



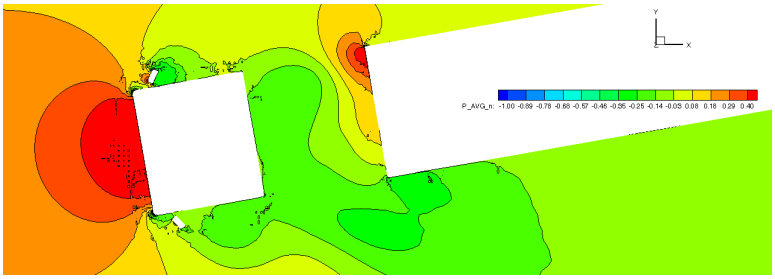
<그림 9-33> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)



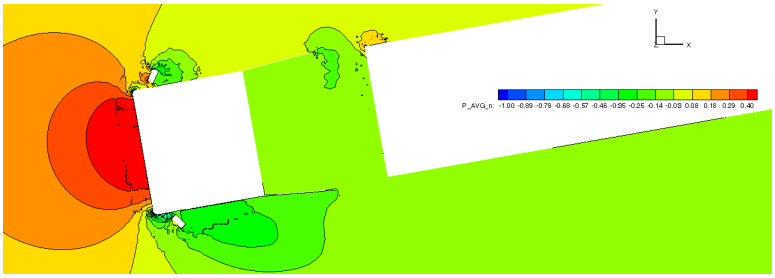
<그림 9-34> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)

○ 측풍 조건에서, gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 압력장 비교 (Φ=10°, z=2.0)

- Gap fairing이 장착되지 않은 경우, 측풍 영향에 의하여 트랙터-트레일러 사이의 flow symmetry가 깨짐. 이로 인해 트레일러 전면부에 작용하는 압력분포가 변화함
- Gap fairing 부착시, 트랙터와 트레일러 사이 공간에서의 압력이 현저하게 낮아져 저압 영역(low pressure region)이 형성됨
- 이에 따라 gap fairing 부착 시, 트레일러 전면부에 작용하는 압력이 감소하여 항력을 저감시킴
- 트레일러 전면부에 작용하는 압력 감소는 횡풍 측력계수도 저감 시킴



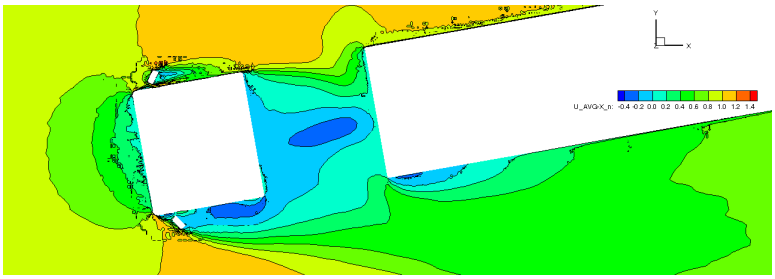
<그림 9-35> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0)



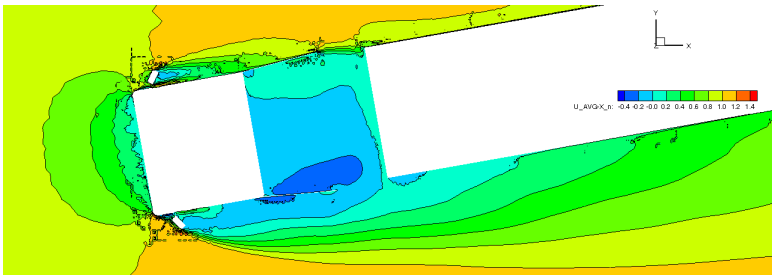
<그림 9-36> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의
컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장
(z-평면, z=2.0)

○ 측풍 조건에서, gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 속도장 비교 (Φ =10°, z=2.0)

- Gap fairing이 장착되지 않은 기본 차체의 경우, 측풍 영향에 의하여 트랙터-트레일러 사이의 flow symmetry가 깨짐. 이로 인하여 트레일러 전면부에 작용하는 속도 분포가 변화되어짐.
- Gap fairing 부착 시, 트랙터와 트레일러 사이 공간에서 저속유동 영역(low velocity region)이 형성됨
- Gap fairing 부착 시, 트레일러 측면 모서리에서 발생하는 유동박리가 지연되어 운동량 손실(momentum deficit)이 감소함
- Gap fairing 부착으로 인한 운동량 손실이 감소되어 횡풍 측력계수를 저감시킴



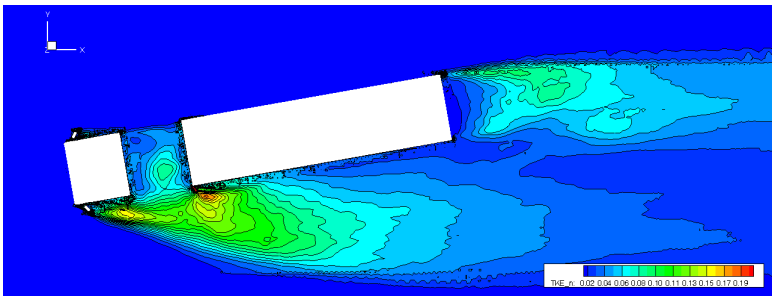
<그림 9-37> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의
컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장
(z-평면, z=2.0)



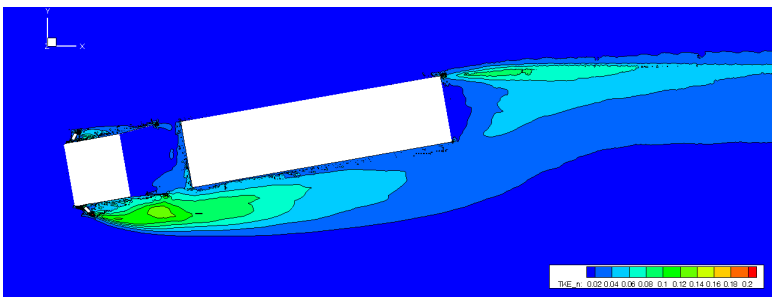
<그림 9-38> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의
컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장
(z-평면, z=2.0)

○ 측풍 조건에서, gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 난류 운동에너지(TKE) 비교 **(z-plane, z=2.0)**

- Gap fairing 장착 시, 트랙터-트레일러 사이의 공간과 함께 측면부 및 후방 영역에서 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)가 감소함. 그리고 시간 경과에 따른 화물차를 흘러 지나가는 유동의 변화가 감소함을 확인 할 수 있음
- 난류운동에너지가 감소하여 화물차에 작용하는 flow induced vibration 유동에 기인한 진동이 감소함을 확인



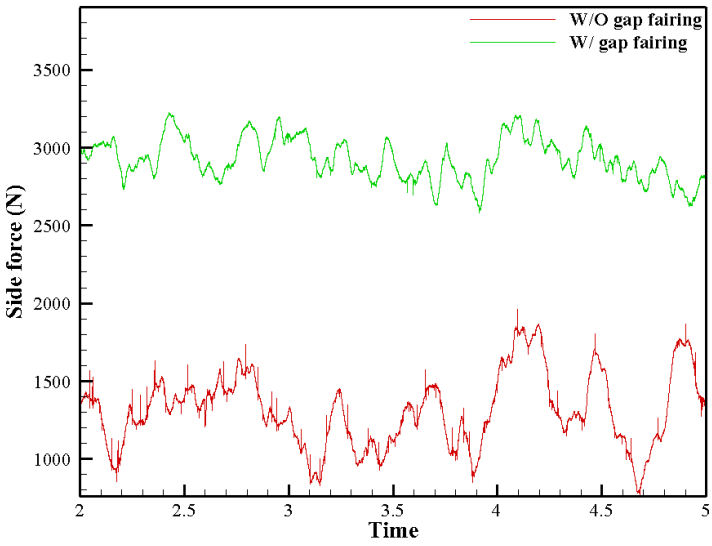
<그림 9-39> Gap fairing을 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 난류운동에너지 (z-평면, z=2.0)



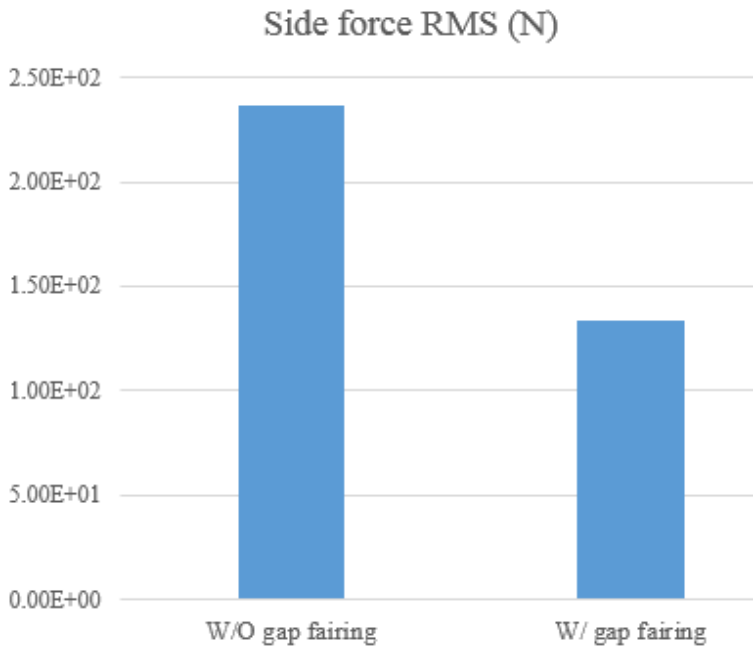
<그림 9-40> Gap fairing을 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 난류운동에너지 (z-평면, z=2.0)

○ Gap fairing 장착 유무에 따른 40ft 화물차의 측력 비교

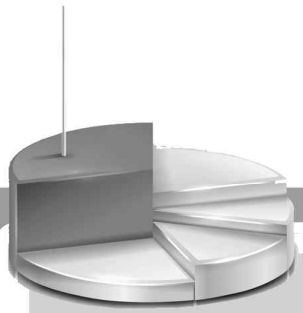
- Gap fairing 장착 시, 단면적 증가로 인하여 측력의 크기가 증가함
- Gap fairing 장착 시, 측력 변동성분의 RMS 값이 43.6% 저감되어, 차체에 가해지는 진동의 진폭이 대폭 감소함
- 이로 인하여 전체적인 주행 안정성은 강화됨



<그림 9-41> Gap fairing 부착 유무에 따른 40ft 화물차에 가해지는 시간에 따른 측력변화



<그림 9-42> Gap fairing 부착 여부에 따른 40ft 화물차에 가해지는 측력 fluctuation의 RMS 값 비교



제10장 Vortex generator를 통한 운행 안정성 향상 기술 개발

제1절 Vortex generator 설계 및 최적 시제품 제작

제2절 풍동 실험을 통한 주행 안정성 분석

제3절 수치해석을 통한 주행 안정성 분석

제10장. Vortex generator를 이용한 운행안정성 향상 기술 개발

제1절. Vortex generator 국내외 기술현황과 동향 분석

1. 국가 연구개발사업 동향

○ 현재, 중소기업청과 지식경제부에서 시행한 2개의 유사연구가 진행되고 있음

<표 10-1> 공기저항 저감기술 유사 연구

부처명	사업명	과제명	비 고
중소 기업청	산학연공동기술 개발	최적화기법에 따른 탑차용 초저 공기저항계수를 갖는 Air Spoiler 개발	▪ 공기역학적 특성을 교려한 최적화된 air spoiler 개발 ▪ 가벼운 소재를 이용한 초경량의 air spoiler 개발
지식 경제부	그린카 등 수송시스템 산업원천 기술개발	능동형 VTMS 융합제어기술	▪ 능동형의 전방 air flap과 후류 제어 기술(synthetic jet, wake blowing) 개발 ▪ 저공력 차량용 차체 형상 설계 및 모델링 기술 개발

2. 관련 기술 현황 및 동향

가. 국내 기술 현황

- 국내의 연구들을 종합 해 볼 때, 트럭의 공기 저항 저감을 위해 수치해석적으로 접근하고 있는 논문의 수가 매우 적고, 기 진행된 수치해석 연구의 경우도 정량적인 결과들이 도출되어 있지만, 실제 실험결과와의 비교 분석 및 검증이 이루어지지 않은 경우가 대다수이기 때문에, 정성적인 분석 외에, 정확한 값을 도출하는데 난점이 있음
- 임의로 선택된 형상을 통해 수치해석이 많이 진행되었지만, 해석 결과와 물리적인 접근에 의한 최적화된 형상에 대한 연구가 부족
- 실험적 연구 관점에서 보았을 때, 국내에서는 실험적 연구가 거의 이루어지지 않았으며, 이루어진 실험 또한 유동 가시화 실험으로 정량적인 연구는 전무하다. 따라서 현재까지 이루어진 수치해석적 연구는 실험적으로 검증 되지 않은 연구 결과임

나. 국외 기술 현황

- National Research Council of Canada(NRC)에서 진행한 사업으로 9m X 9m 풍동에서 실제 모델로 항력저감장치들의 효과를 실험을 통해 밝힘. 여러가지 항력저감장치들의 항력과 연간 연료소비 감소량에 대해 실제 운행을 기반으로 실험적 결과 도출
- 국외의 트럭의 수치 해석에 관한 연구들을 종합해 보면, 거의 대부분 실험 결과가 있는 GTS, GCM 및 Ahmed body 형상을 이용하여 계산을 수행한 것을 알 수 있음

- RANS의 여러 난류 모델을 이용해 트럭의 주위의 유동을 계산한 결과를 실험과 비교, 분석하는 경향이 있으며, 난류를 계산하는데 LES나 DES등을 도입하려는 시도가 많아지고 있는 추세임
- 트럭에서의 공기 저항 감소 기구의 효과를 알아보기 위해 가장 구체적인 형상인 GCM을 정렬격자계로 구성하고, LES로 해석한 내용은 아직까지 없음. 이것은 그리드 작성의 난해함과 계산시간의 부담으로 인한 것으로 생각됨
- 국외의 트럭의 실험적 연구들을 종합했을 때, NRC에서 진행한 프로그램이 가장 대표적이며, 실차 모델을 이용하여 공기저항 저감장치를 부착한 후 항력 및 연간 연료 소비 감소량에 대해 조사하여 실험적 데이터를 구축하였음.
- 갭 페어링, 보트 테일, 스커트, 언더바디 페어링 등 매우 다양한 항력 감소장치들의 효과를 실험적으로 확인하였으나, 차종 및 운행환경에 따른 영향을 많이 받기 때문에 이 실험결과를 그대로 고려하기엔 무리가 있음

다. 국내외 기술 동향

○ 본 주제와 관련이 있는 논문은 149개로 최종 집계됨. “Aerodynamics”로 검색된 관련 논문이 87건으로 가장 많았으며, 그 다음으로는 “Drag reduction”(52건)과 “Resistance reduction”(5건)으로 그 뒤를 잇는 추세임

○ 국내와 국외를 포함하여 공기저항 저감장치 기술 관련 연구 논문 발표가 1976년도부터 시작되어 현재까지 꾸준히 발행되어 왔고, 공기역학 관련 논문이 평균적으로 매년 30% 이상을 차지하고 있으며 항력감소 관련 논문이 그 다음으로 높은 비중을 차지하고 있음

- 국내의 경우 2000년대 이전까지 항력 감소 관련 논문이 주를 이루고 그 이후 공기저항 감소 관련 연구가 진행되어 오다가 2006년 이후 현재까지는 공기저항 저감장치 기술 관련 논문이 발행되지 않고 있음
- 국외는 국내와 다르게 현재까지 꾸준히 항력 감소 관련 논문이 발표되고 있으며, 그 다음으로 공기저항 관련 논문이 주를 이룸

○ 국내의 연구 주제로는 항력감소 기술과 공기역학 기술에 관한 논문이 가장 많으며 항력에 대한 연구는 최근 들어 주춤해지는 반면, 국외에서는 항력 감소에 관한 내용이 가장 많음. 전반적으로 화물차 공기역학 및 공기저항 저감장치 기술 개발은 국내보다 국외에서 연구가 더 활발히 진행되고 있음

○ 국내외 기간별 논문 발표는 국내의 경우 가장 최근 10년 기간인 2001년부터 2010년까지의 논문의 양이 가장 많음을 확인할 수 있으며, 국외도 2001년부터 2010년 사이의 기간에 가장 많은 연구가 이루어졌음

- 1980년대 이전부터 최근까지의 연구 동향을 보았을 때, 2000년대 이후로 공기저항 저감기술에 대한 관심이 높아지고 있음

○ 키워드별로 살펴보았을 때 항력 감소(52건)가 가장 관심이 많았던 연구 주제였고 다음으로 공기저항(5건) 순임

- 국외와 국내의 경우에도 전체적인 논문 동향과 동일하게 연구가 진행되었으나, 국외와 국내의 논문 건수의 차이로 보아 국외 연구가 국내보다 더 활발한 것으로 파악됨

○ 2001년부터 최근까지 국외 연구가 가장 활발한 시기이나 이와 다르게 국내에서는 2000년도 이후 본 연구과 관련된 분야의 논문이 줄어들고 있는 추세임

3. 국내외 관련 기술 수준 및 특허 동향

가. 국내 기술개발 수준 분석

○ 화물차량의 공기저항 및 공기와류 저감장치의 기술은 최고수준 대비 21~40% 수준으로 분석되며, 해당기술의 최고수준은 미국이 보유

- 미국은 외부충격 및 온도변화에 강한 열가소성 합성플라스틱을 사용함

○ 국내 기술수준 및 기술 난이도를 고려할 때 이 분야 국내기술은 태동기(embryonic)로 평가되며 기술 실현은 2015년 이후에나 가능할 것으로 예측됨

<표 10-2> 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발수준

항목	기술개발수준						
국내기술수준	0%~20%	21%~40%	41%~60%	61%~80%	81%~100%		
		○					
최고기술보유국 및 최고기술수준	한국	미국	일본	영국	프랑스	독일	기타 (기입)
		○				○	
국내기술성숙도	태동(Embryonic)	성장(Pacing)	핵심(Key)	기반(Base)			
	○						
국내기술실현 예측시기	실현 예측시기 : 2015 년 이후						

나. 국외 기술개발 수준 분석

○ 세계적으로 해당 기술의 최고기술 보유국은 미국으로 파악됨

- 미국의 기술기준이 높게 나타난 것은 80년대부터 체계적인 개발과 지속적인 투자를 통해 완성도를 높이고, 고유가와 미국 정부의 온실가스 감축 의지 등과 같은 외부적인 요인으로 인하여 시장이 급속히 성장하였기 때문으로 파악됨

○ 해당 기술은 국내에서 연구된 사례가 거의 없으나, 국제적인 시류변화에 따라 조만간 핵심기술로 발전할 수 있는 장래성이 있는 것으로 판단됨

- 이 분야는 기술적 장벽이 비교적 높지 않을 것으로 판단되며, 단기적인 집중투자를 통해 핵심 기술의 개발이 가능한 분야로 판단됨

○ 해당기술은 본 연구 과제의 진행에 따라 빠르면 2015년부터 순차적으로 실현 가능할 것으로 판단됨

제2절. 시장성조사 및 실용화 전략

1. 국내외 시장 및 산업동향 조사

가. 물류기업 동향

○ 종합물류인증기업을 기준으로, 국내 물류기업의 매출액은 26조 1,066억 원('12년 결산 기준) 수준이며 34개 인증기업의 평균 매출액은 7,678억 원임

- 전년대비 매출액(원화기준)이 국내법인과 해외투자법인이 각각 11.08%, 1.87% 증가하였으며, 총 물류매출액은 전년대비 9.19% 증가하였음

<표 10-3> 종합물류인증기업의 물류사업 매출액

(단위 : 백만 원, %)

구 분	국내법인	해외투자법인[1]	합계	평균
2011년	19,005,693	4,902,614	23,908,306	703,185
2012년	21,112,335	4,994,240	26,106,575	767,840
전년대비 증가율(%)	11.08	1.87[2]	9.19	9.19

주 : 1) 해외투자법인의 물류사업 매출액은 국내 물류기업이 보유한 해외투자법인의 지분율을 곱하여 산정하였음

2) 해외투자법인 매출은 2011년 41.6억 달러에서 2012년 46.2억 달러로 11.1% 증가하였으나, 환율 하락(1180원/$ →1082원/$)에 따라 원화 기준 증가율은 1.87% 증가에 그침

자료 : 『종합물류기업 인증 동향』, 한국교통연구원, 2013.10, p.96

○ 종합물류인증기업의 총 종업원 수는 18,886명임

○ 물류매출액 규모가 1,000억 원 이상인 5개 종합물류인증기업 중 3개 기업은 총 6,754대의 차량을 활용하고 있음

- 자산대장에 등록된 차량(보유)과 위수탁/지입 차량(확보)의 비율은 각각 74%, 26%임

- 차량별로 구분했을 때, 1~3톤 미만 차량이 41.9%로 가장 많고, 12톤 이상 차량(24.7%), 트레일러 40FT(14.2%)가 그 다음으로 많음

<표 10-4> 주요기업 차량 보유 현황

(단위 : 대, %)

구분	보유	확보	합계	비율
1톤 미만	43	192	235	3.5%
1~3톤 미만	1741	1090	2,831	41.9%
3~5톤 미만	55	22	77	1.1%
5~8톤 미만	162	12	174	2.6%
8~10톤 미만	45	22	67	1.0%
10~12톤 미만	277	36	313	4.6%
12톤 이상	1318	347	1,665	24.7%
트레일러 20FT	311	4	315	4.7%
트레일러 40FT	959	0	959	14.2%
트레일러 평판	118	0	118	1.7%
합계	5,029	1,725	6,754	100%

주 : 트랙터와 트레일러의 경우 1:1로 매칭하여 12톤 이상 1대로 산정
자료 : 각 기업 내부자료 (해당기업 요청에 의해 기업명 미공개), 2013

나. 일반화물운송시장(차주) 동향

○ 다양한 형태의 화물자동차 중 본 기술 적용 대상이 되는 트레일러 차량, BCT 차량 등이 포함된 일반화물차량(5t이상 화물자동차)의 운송시장 현황을 분석함

- 분석 자료는 『화물운송시장 동향(한국교통연구원 화물운송시장정보센터)』 중 2013년 3/4분기 자료를 활용하였음

○ 일반화물차량의 일평균 차량운행여건을 살펴본 결과, 월평균 운행일수는 23.5일로 전년대비 0.7일 증가하였고 일평균 운행횟수는 1.6회로 전년과 동일하며 혼적운행 비율은 2.3으로 전년대비 0.1줄었음

○ 일평균 총 운행거리는 355.7km이고 적재운행 비율이 약 70%이고, 공차운행 비율은 약 30% 수준임

○ 일반화물차량은 월평균 11.4회 주유하고, 1회 주유 시 평균적으로 233ℓ를 주유하는 것으로 조사되어 전년대비 각각 0.4회, 2ℓ줄었음

○ 일반화물차량의 평균 연비는 3.5km/ℓ이로 전년대비 0.2km/ℓ증가하였으며, 일평균 운행속도는 44.9km/h로 전년대비 1.0km/h 증가하였음

- 전반적으로 전년대비 연비가 증가한 것은 화물자동차 제조 기술의 발전과 함께 고유가 시대에 맞춰 화물자동차 차주들이 연비 절감을 위해 많은 노력을 기울이고 있는 것으로 판단됨

- 컨테이너 차량, 기타트레일러 차량의 연비가 각각 3.3km/ℓ, 3.1km/ℓ로 가장 낮은 수준임

- 운행속도는 BCT 차량(49.4km/h)과 컨테이너 차량(48.8km/h)이 가장 높은 수준임

<표 10-5> 일반화물차량의 차종별 연비 및 운행속도

(단위 : km/ℓ, km/h)

구 분	연도	컨테이너	BCT	탱크로리	카 고 형	기타트레일러	평 균
연 비	2012	3.2	3.6	2.8	3.6	2.9	3.3
	2013	3.3	3.6	3.2	3.8	3.1	3.5
일평균운행속도	2102	49.4	47.0	27.7	47.6	40.3	43.9
	2013	48.8	49.4	35.8	47.5	36.4	44.9

주 : 3/4분기 기준 수치임

자료 : 『화물운송시장 동향』, 제3호, 3/4분기, 통권 35호, 한국교통연구원 화물운송시장정보센터, 2013, p.76

○ 국내 운행 중인 트레일러는 40ft 트레일러가 90~95%를 차지하고 20ft 트레일러 비율은 5~10% 수준임

다. 주요 제조기업 동향

○ 화물운송 부문에서 발생하는 온실가스 및 에너지 소비절감이 핵심 기술개발의 성과로 제시되면서 연비 개선 및 운송 효율화를 통한 물류비용 절감에 힘쓰고 있음

○ 국내 대규모 기업 중 하나인 삼성TESCO(홈플러스)는 '06년 대비 '20년까지 이산화탄소(CO_2)발생량 50% 감축, 환경부의 중요 환경 정책에 적극적으로 동참, 그린스토어(친환경 점포) 확대, PB(자사 브랜드) 상품 '탄소성적표지' 인증 및 상품홍보와 구매 고객 인센티브 제공, '탄소성적표지'제도 등 주요 환경정책과 관련한 캠페인 진행, 환경부와 공동으로 어린이 환경운동 진행 등의 내용으로 '09년 환경부와 MOU(협약)을 체결하였음

○ 이외에 '09년 6월부터 홈플러스 실제 배송차량에도 리블릿코팅을 적용하여 운행거리, 축중량, 연료보출량, 연료단가, 공회전 시간 확인 등을 비교하여 여러 차례의 꾸준한 검증을 수행하고 있음

○ 또한 TESCO는 Eco-drive system을 도입하여 엔진제어장치(engine control unit, ECU)와 연동, 차량의 운행정보, 연료소모량정보를 통해 차량의 상태를 실시간 모니터 하고 저장된 모든 차량운행 정보를 통하여 연비/연료소모량 운전 습관 등을 비교분석함으로서 에코드라이브를 유도하고 있음

2. 연구결과의 실용화 전략

가. 현장적용 및 제품화 방안

- 화물차량의 연비저감을 위한 공기저항저감장치와 주행안정성을 향상시키기위한 와류저감장치의 기술적용 대상은 대형 화물운송 기업과 영세 개인 화물차주 등이며

기업과의 계약을 대형 계약을 추진하여 기업의 이윤을 향상시키고, 온실가스 저감 효과를 얻을 수 있음

- 국내물류기업들의 매출액 규모는 대표적인 기업인 대한통운이 11억 $, ㈜한진은 6억 $ 수준으로서 DPWN의 760억 $, UPS의 22조$ 수준에 비해 현격한 열세를 보임
- 2008년 기준 중국에 진출한(주)한진 대한통운 동방 현대택배, 동부익스프레스 등 대다수 물류기업들은 한국제조업체의 중국현지물류서비스를 대행하면서 역량을 강화
- 도로부문의 연평균 수송실적 증가량은 2001년 1,343백만 톤에서 2009년 1,498백만 톤으로 1.37%의 증가세
- 카고형 트레일러, 트럭형 트레일러 등 약 11만7천 대로 전체 화물차 중 29.19 %가 잠재적 수요대상 차량임

<표 10-6> 공기저항 저감장치 수요대상

수요대상	활용 방안 제시
▪ 택배업체 간선노선차량 - CJ 대한통운, DHL, 현대택배 등 ▪ 식품물류업체 간선노선차량 - 엑소후레쉬물류, 풀무원, KNL물류 등 ▪ 전자제품 및 부품운송업체 간선노선차량 - 명일, 삼성전자로지스틱스 등	

○ 영세 개인화물차주가 직접 설치하기에는 경제적 부담이 우려되므로 현재 정부차원에서 진행 중인 녹색물류전환사업의 일환으로 보조금을 수령하여 영세 개인화물차주의 유류비 지출을 감소시킬 수 있음

○ 25톤급 대형 화물차량 뿐만 아니라 5톤 이상 전화물차량 및 트레일러에 적용이 가능하므로 차종에 크게 상관없이 연비개선에 기여함

○ 화물차는 특성상 특장을 하거나 개조가 되어 제품을 통일하기에 어려움이 있으므로 현재 국외에서 수입되고 있는 제품을 국산화하고 보편화시켜서 차량별 설치의 제한요소를 극복

- 투자대비 효과가 우수한 기술부터 국산 상용차 규격과 도로여건에 맞도록 최적화를 구현하고 고가(620 만원~880 만원)의 수입장비를 60 %이상 저렴한 300만 원 수준에 보급하기 위한 기술개발

○ 수요자 중심의 R&D 연구와 사후조치를 통해 제품화 이후에도 사업을 확장 가능함

- 고속도로노선만을 주행하는 고속버스용으로 추가적인 R&D가능

- 현재 수입산 고가 소재에 대하여 추가적인 개발가능

○ 국내 실정에 맞는 최적화 설계구현과 정부차원의 표준매뉴얼 보급정책 병행이 바람직

- 미국, 영국, 캐나다 등은 국가차원에서 풍동실험 등 연비측정실험기술 (SAEJ1321) 결과를 통해 차종 및 규격별 공기저항기술 가이드라인을 제공
- 보급된 표준매뉴얼을 통하여 민간기업에는 개발단계의 수행오류를 줄여주어 개발비와 개발기간 절감

○ 배포된 표준매뉴얼을 통하여 개발되는 장비의 검인증 연구를 통하여 검증기관양성

- 국내최대 주행시험로를 갖춘 교통안전연구원과 같은 기관에서 공기저항저감장치에 대하여 검증 및 인증을 실시하도록 하고, 검증된 기술에 대하여 녹색물류전환사업 보조금 지급이 되도록 유도
- 현재 난립하는 연비개선장치들에 대하여 제도권으로 흡수하고, 검증된 기술에 대하여 대국민 홍보(홈페이지, 보도자료 등)를 통하여 실효성 있는 기술보급에 기여

나. 미래 원천기술 확보 및 신산업 창출

○ 기존의 국외 제품에만 의존하거나 인증되지 않은 모방제품을 국산화

○ 화물차량의 연비 효율을 향상시키기 위한 공기저항 저감장치 기술을 개발함으로써 기술에 대한 특허 출원 및 제품 생산으로 새로운 산업으로 발전 가능함

○ 지속적인 R&D 연구와 사후 조치를 취해 조속한 현장 적용 및 제품을 보수하여 사업을 확장 가능함

제3절. 핵심요소기술 개발방향 정립 및 성과 목표치

1. 개발방향 정립

○ 선진국에서 진행 중인 프로젝트와 성능 평가 방법, 그리고 국내의 도로 환경에 따라 저감 목표치를 설정

- 설정된 목표치는 미국 환경청(EPA)에서 수행중인 Smartway 파트너쉽 공기저항 저감기술 실차시험방법(SAE J 1321)을 통하여 목표치를 정량적으로 평가할 수 있음
- (미국) Smartway 프로그램과 연료 저감 비교

○ Vortex generator 관련하여 연료 저감율에 대한 목표치는 나타나지 않았으며, 이에 따라 풍동실험에서 측정가능한 횡풍측력계수를 목표치로 선정함

<표 10-7> Smartway Program과 연료 저감 비교

장치	Smartway 프로그램	과제 목표
Vortex generator	-	2% (횡풍측력계수)

- 국내에서 제한 속도가 90㎞/h임을 고려하여 차량의 주행 속도를 90㎞/h로 선정하였음

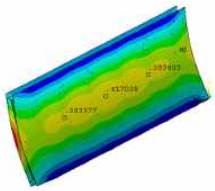
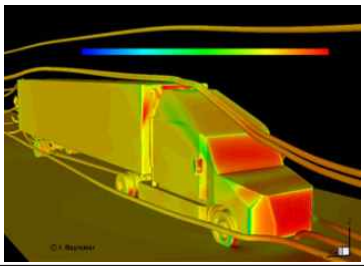
○ 개발에 필요한 관련 국내 기술과 편향성

- 국내의 장치들은, 대부분 공력에 대한 자세한 고려 없이 유선형 형상의 장치를 제작 판매하고 있음
  · 플라스틱 사출금형 기술을 이용하여 정형화된 형상 제작만 이루어질 뿐, 공기역학적 성능 테스트는 이루어지고 있지 않음
- 공력특성에 대한 고려가 미비할 경우, 설치물의 무게와 공기저항과 와류의 증가로 인한 연료 소비 증가로 이어질 수 있음. 공력 설계 디자인과 같은 핵심 기술 연구 및 개발이 요구됨
- 따라서 본 과제는 한국의 우수한 제조 산업과 공학적 설계에 기반을 둔 공기저항 및 공기와류 저감 장치의 개발과 정량적 성능 지표를 목표로 설정

○ 연구 내용범위

- Vortex generator이 화물차의 횡풍측력계수 감소에 미치는 영향을 분석하고 vortex generator의 형상 변화에 따른 성능 평가를 통해 최적화된 형상을 도출 하고, 설계된 내용을 기반으로 하여 국내 화물차와 실정에 특화된 vortex generator를 개발 및 방법론에 대하여 규격화하고 가이드 제시

<표 10-8> Vortex generator 기술 개발 대상 및 범위

Vortex generator 기술 개발	
대상	**내용 범위**
소재	 ▪ 소재 선정 및 적용 - Vortex generator에 적합한 소재 선정 및 적용
구조 설계	 ▪ 역설계를 통한 3D 모델링 ▪ 구조 설계 및 제작 - Vortex generator 설계 및 제작
실험모형검증	  ▪ 풍동실험을 통한 실험모델 검증 ▪ 수치해석을 통한 실험결과 검증 ▪ 국내 실정에 맞는 최적화
시제품 제작 및 현장시험	 ▪ 맞춤형 시제품 제작 ▪ 설치 기술 개발

○ 연구범위 및 성과물

<표 10-9> 세부기술별 핵심 요소 기술 및 성과물

Vortex generator 기술 개발	
핵심 요소기술	**최종성과물**
▪ 고탄성·고강도 소재 선정 및 적용 기술 ▪ 3D 역설계 실험 모델 제작 ▪ Vortex generator 최적화 설계 및 제작 기술 ▪ 수치해석용 격자 생성기술 ▪ Vortex generator 설치 기술	▪ 기술개발 보고서 - 핵심개발 기술 개발 요구사항 문건 - 실험 및 수치해석을 이용한 유동해석 결과 문건 - 장비설계서 ▪ 최적화된 vortex generator 풍동실험용 시제품 ▪ 역설계 실험 모델 ▪ 기타 성과물 - 설치 및 유지보수 관련 매뉴얼 - 특허(공기역학, 시제품 관련) - 현황조사분석 - 시장성 분석 및 실용화 전략 보고서 - 유동가시화 영상물(수치해석 및 실험) - 홍보물

<표 10-10> 기술정의와 핵심요소기술

세부 기술정의	**핵심 요소기술**
Vortex generator를 화물차의 후면부에 장착함으로써 횡풍측력계수를 2% 저감할 수 있는 기술	▪ 고탄성·고강도 소재 선정 및 적용 기술 ▪ 실험모델 제작 및 공기역학적 성능 평가 실험 기술 - 역설계를 통한 3D 모델링 기술 - 실험모델 제작 ▪ 수치해석 및 최적화 기술 - 격자 생성 기술 - LES 상세유동해석 기술

2. 성과 목표치

<표 10-11> 보트 테일 기술 개발의 정량적 연구 목표 및 세부 연구목표

Vortex generator 기술 개발	
정량적 연구목표	**세부 연구목표**
횡풍측력계수를 2% 저감할 수 있는 기술 개발	▪ 공기저항을 감소시키고 온실가스 감축 효과를 얻기 위한 화물차량의 에너지 소비 저감 기술 개발 ▪ 컨테이너 후면부에 부착물을 장착하거나 기존차량의 외부 장착물의 구조를 변경하여 최적의 공기저항 감소 기술 도출
시장성 분석 및 실용화 추진	▪ 수요기업 테스트베드 선정 및 배송에 투입 운영 ▪ 연구성과 및 기술 홍보

□ **화물차 운행시 연료소모율 저감을 위한 vortex generator 기술 개발**

○ “운행안정성 향상을 위한 vortex generator 기술”은 화물차 운행 시 주행안정성을 높이기 위해 횡풍측력계수 2% 이상 저감을 위한 기술개발을 목표로 함

- “운행안정성 향상을 위한 vortex generator 기술” 개발을 위하여 다음의 세부연구 목표를 설정하였음

· Vortex generator는 풍동실험을 통한 2% 횡풍측력계수 저감

제4절. Vortex generator의 설계

1. Vortex generator 형상 설계

□ **설계 대상**

○ 국내에서 가장 많이 운행하고 있는 15ton 현대 Trago Xceint 화물차에 적합한 모델을 역설계 한 후 VG(vortex generator)를 설계하여 장착

- Vortex generator의 형상, 높이, 설치 개수, 장착 위치를 변화시킨 다양한 형상의 vortex generator를 3D 프린터를 이용하여 제작

- 제작한 vortex generator를 실험대상 차량에 장착하고 이들이 항력과 측력에 미치는 영향을 측정하여 항력계수(C_D) 값과 횡풍 측력계수(C_S)를 도출하여 평가함

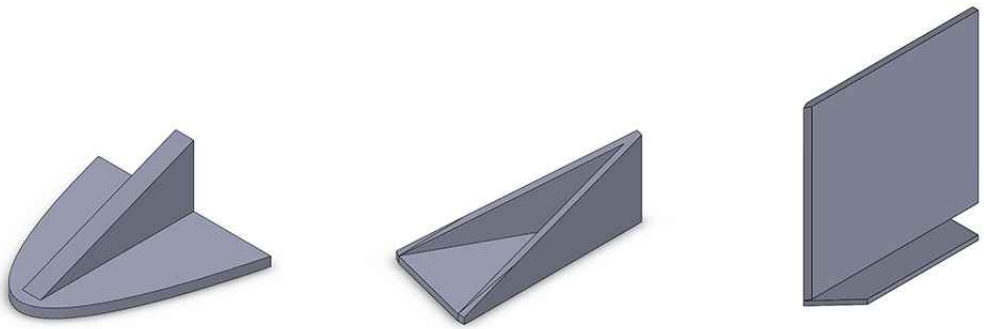
□ **다양한 형상 설계**

○ Vortex generator는 그 사용 목적과 용도에 따라 다양한 형상이 존재하며, 하프 델타(half-delta type), 위시본(wishbone type), 직사각형(rectangular type), 사다리꼴(trapezoid type) 등이 대표적인 형상임

○ 본 실험에서는 3가지 타입(하프델타, 위시본, 직사각형)의 vortex generator를 제작하

여 각 모델의 성능을 비교 평가함

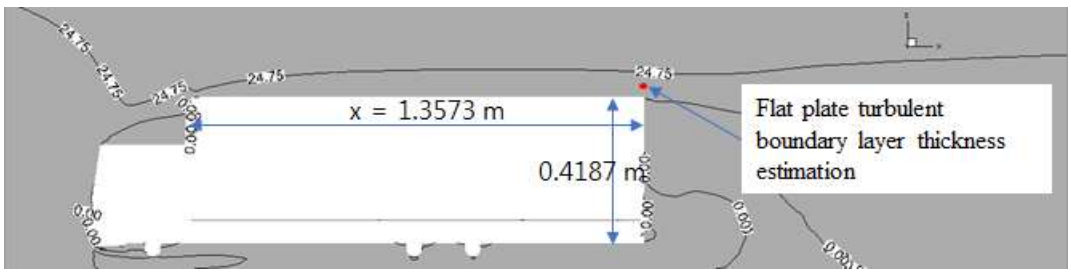
- vortex generator의 형상은 <그림 10-1>과 같음



<그림 10-1> Vortex generator의 형상. (좌측부터 하프델타, 위시본, 직사각형)

□ Vortex generator 높이 설정

- Vortex generator의 높이는 통상 생성되는 난류경계층 두께 δ의 10-60% 정도로 설정함 (John C. Lin et al, Progess in Aerospace Science)
- 15ton 화물차 끝단에서 생성되는 난류경계층의 두께를 수치해석을 통해 계산하여 적용 <그림 3-2>
- 난류경계층의 두께 δ의 0.2, 0.4, 0.6 배로 VG 높이를 설정하여 비교 평가함
  · δ = 0.072m, h = 0.0144, 0.0288, 0.0432m



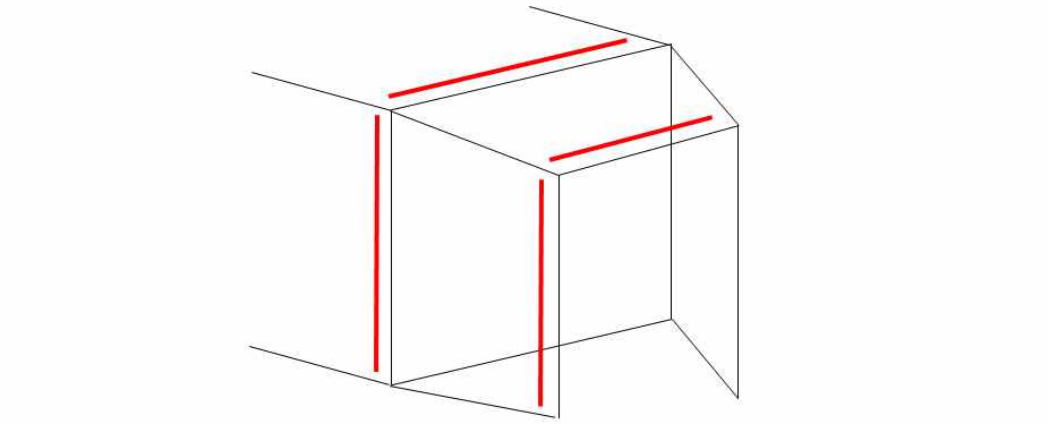
<그림 10-2> 난류 경계층 두께 수치해석 결과

□ Vortex generator의 설치 위치 및 개수

○ 통상의 vortex generator는 차량에 후미부에 장착하여 와류를 인위적으로 발생시켜 유동 박리점(flow separation point)을 지연시켜 공기저항을 저감시킴

- 본 실험에서는 화물차의 끝단 뿐만 아니라 앞서 연구한 boat tail과 연계를 위해 보트 테일의 끝단에 설치하여 그 효과를 비교 검토함
- 설치 위치는 <그림 3-3>과 같음

○ 화물차의 상판 및 옆면에도 3개에서 최대 19개의 vortex generator를 설치하고 비교 분석함



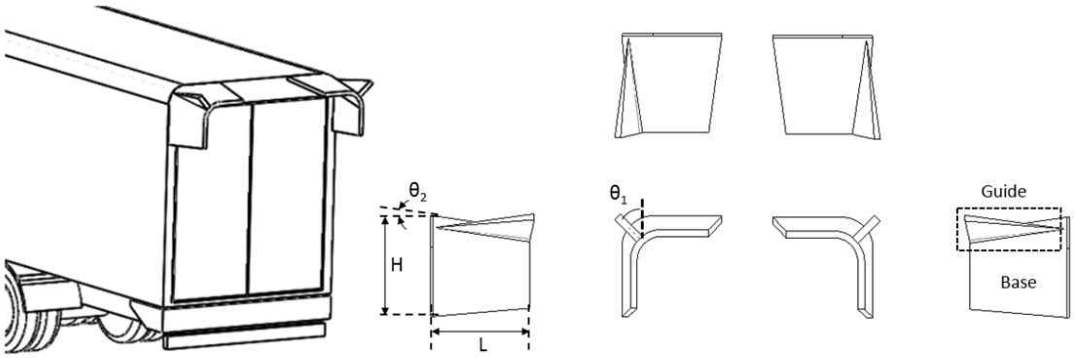
<그림 10-3> Vortex generator 설치 위치

2. Vortex modifier의 설계

○ 와류를 인위적으로 발생시켜 공기저항을 저감하는 기존 방식의 경우, 직각 모서리 형상인 트레일러 후단에서는 공기저항 저감 효과가 미비하고 횡풍 측력계수 저감에도 큰 효과가 없음

○ 공기저항 저감 및 횡풍 측력계수 저감에 효과적인 새로운 개념의 와류 제어장치를 제안함

- 화물차 후미부에 와류 제어장치를 부착함으로써 차량 끝단에 발생하는 유동방향 와류(longitudinal vortex)의 생성을 최대한 억제시켜 공기저항을 줄이는 방법
- 화물차의 직각 모서리(square back) 형상의 후단부에서 발생하는 강한 유동박리를 완화시켜 후류 유동을 이상적인 유선을 가지도록 유도함
- Vortex modifier의 형상 및 설계 변수는 <그림 3-4>과 같음



<그림 10-4> Vortex modifier의 형상 및 설계 변수

제5절. Vortex generator의 공기역학적 성능 평가

1. 풍동 실험을 통한 주행 안정성 평가

가. 실험 장치

□ POSTECH 대형 아음속 풍동

○ 1995년 준공된 포스텍 대형 아음속 풍동은 유체역학적 기본 현상을 포함하여 제반 문제들을 연구할 수 있는 설계된 다목적 아음속 풍동 <그림 3-5>

○ 자동차와 기차와 같은 운송체의 공력 실험에 적합

○ 폐쇄형(closed circuit)구조로 전체 크기는 높이 6m, 폭 14m, 길이 37m임 <그림 2-5>

○ 시험부(test section)의 크기는 높이 1.5m, 폭 1.8m, 길이 4.3m임

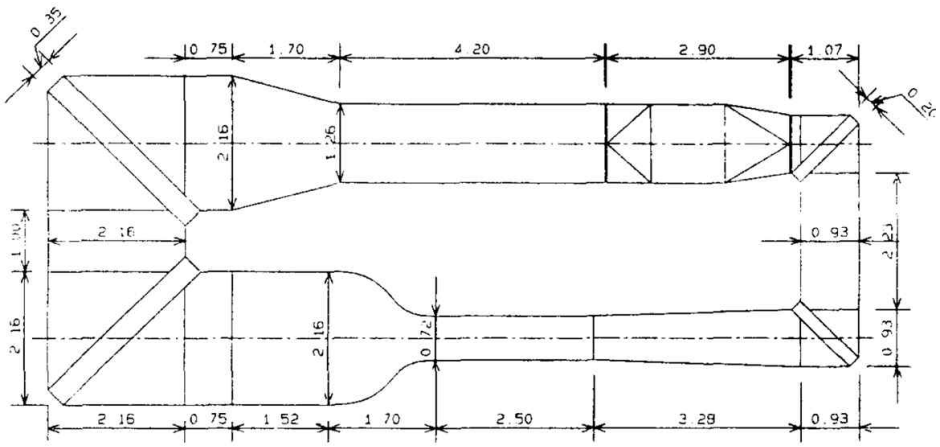
○ 최저풍속: 5m/s, 최대풍속: 75 m/s

○ 수축비: 9:1

○ 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%, 균일도 (flow uniformity)는 0.25%로 운송체의 공력 실험에 적합한 풍동임



<그림 10-5> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관



<그림 10-6> POSTECH 아음속 풍동 도면

□ 공력 측정용 external balance

○ 화물차 차체에 걸리는 힘과 모멘트와 같은 공력을 측정하기 위해 차체에 작용하는 풍하중(wind load)을 정밀하게 측정함

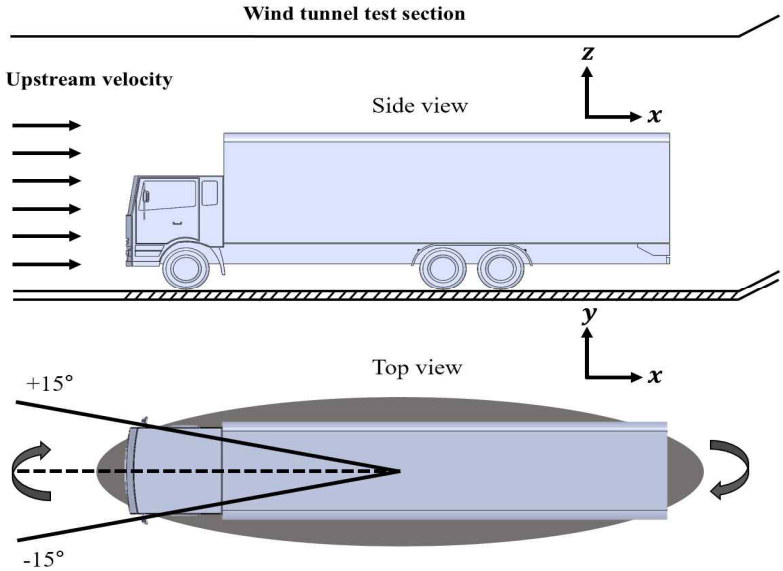
○ 포스텍 아음속풍동에 설치된 external balance는 독일항공우주연구청(DLR) Braunschweig 분소에서 자동차 공력 측정용으로 제작한 7-component balance임.

○ 측정범위 및 분해능

- 측정범위: X=±500N, Mx=±500Nm, Y=±1000N, My=±600Nm, Z=±4000N Mz=±200Nm
- 정확도: 0.2% of full scale dX=1N, dY=2N, dZ=8N

○ 분해능: 0.01N 이하

○ External balance 아래에 turn table을 설치하여 차체에 측풍이 불어올 경우에 대한 풍동 실험도 가능함 <그림 10-7>



<그림 10-7> Yaw angle 조절을 위한 turn table 개략도

나. 실험 대상

□ 실험 모델

○ 국내에서 가장 많이 사용하는 화물차인 15ton 트럭을 대상으로 유동제어용 부가장치를 차체에 장착하여 공력 성능을 개선하고자 함

- 40ft 화물차량 모델의 경우, 컨테이너 박스를 주로 운송하기에 일괄적으로 적용하기는 어려우나 고정방식의 트레일러의 경우 적용이 가능함

○ 화물차에 걸리는 형상 저항(pressure form drag), 차체 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후미부에서 발생하는 유동박리에 기인한 공기저항을 효과적으로 제어하여 화물차의 공기저항 저감시키고자 함

○ 공기역학적인 해석을 통해 화물차의 항력 감소 메커니즘을 밝히고, 저저항 운송체의 공력 설계기술을 개발

○ 본 연구에서는 다양한 형상의 vortex generator(VG)의 실험변수를 변화시키면서 화물차에 걸리는 항력과 측력을 측정하여 항력계수(C_D) 값과 횡풍 측력계수(C_S)을 도출함

- 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 15ton 트럭의 외형을 실측한 후, 이를 역설계하는 방식으로 3차원 차체 형상을 얻은 후, 풍동시험부의 폐색률(blockage ratio, 풍동의 단면적에 대해 모형의 단면적이 차지하는 비율)이 8% 이하가 되도록 축소비를 결정하고 축소 모형을 제작

○ 실험에 사용한 차량 모델의 구체적인 형상 및 축소 비율, 폐색률은 <표 3-1>에 나타냄

<표 10-12> 실험 대상 화물차 모델 및 제원

실험 대상 모형	
실험대상	15 ton 현대 Trago Xcient
실제크기(m)	12(L) x 2.5(B) x 3.3(H)
실험모형	
모형 scale	1/8
폐색률 (Blockage ratio)	6.5%

다. 공력 특성

□ Reference 모델의 공력특성

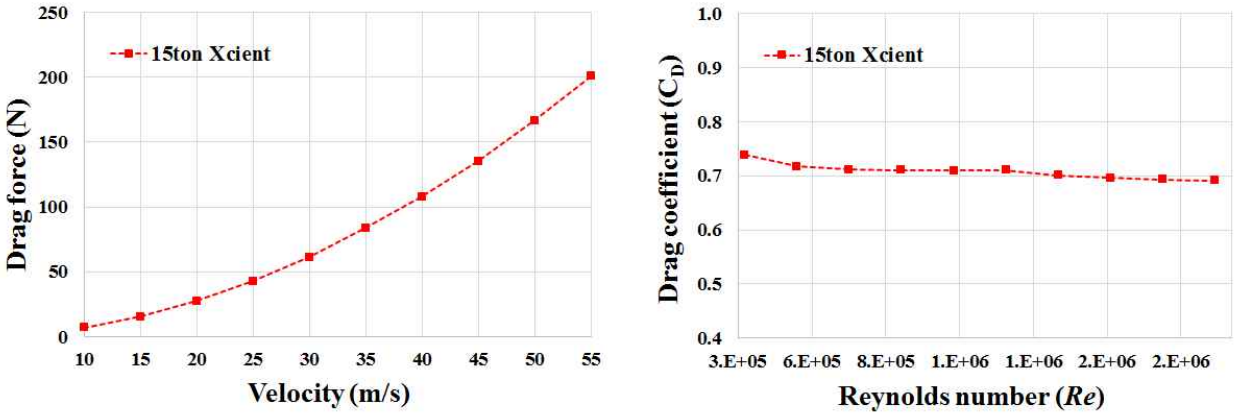
□ 15ton 화물차 모델의 공력특성

○ 공기저항을 줄이기 위한 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 30m/s 영역에서 변화시켜가며 차체에 가해지는 공기저항(drag)값을 측정하고, 항력계수(C_D) 값을 도출하여 <그림 2-7>에 나타냄

- 측정 결과, 실험 모델에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 풍속의 제곱에 비례하여 증가함을 확인

- 25m/s 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 25m/s 에서의 레이놀즈 수(Reynolds number) 값은 9.1×10^5이며, 이보다 큰 레이놀즈 수 조건에서는 항력계수가 거의 변하지 않음. $Re = 9.1 \times 10^5$이 임계 레이놀즈 수임을 알 수 있음

- 25m/s에서의 항력계수(C_D)는 0.711로 트럭형 차체 혹은 유사한 도형에 대해 기존에 연구된 결과들과 잘 일치함



<그림 10-8> 풍속변화에 따른 15ton Xcient 모델의 항력(FD) 및 항력계수(CD) 변화

□ Vortex generator 형상 및 높이에 따른 공력특성 변화

○ 본 실험에서는 3가지 타입(하프 델타, 위시본, 직사각형)의 vortex generator(VG)를 제작하여 각 VG모델의 높이변화에 따른 항력 저감 효과를 비교 평가함

- Re =8.8 × 10^5, yaw angle(Φ) =0° 조건에서 VG를 부착여부에 따른 항력계수 저감률을 확인

○ VG의 높이는 난류경계층의 두께 δ의 0.2, 0.4, 0.6 배로 설정하여 비교 평가함

- δ = 0.072m, h = 0.0144, 0.0288, 0.0432m

○ 각 5개의 VG를 일정 간격으로 컨테이너의 끝단에 설치

○ 화물차의 끝단에서 와류를 인위적으로 발생시켜 공기저항을 저감하는 방식의 VG의 경우, 유선형 끝단 형상(fast back)을 가지는 자동차에는 효과가 있으나, 직각 모서리

(square back)를 가진 직육면체 형상의 트레일러에는 공기저항 저감 효과가 미비한 것을 확인함

- 세 가지 VG중 에서는 위시본 타입이 공기저항 저감 효과가 가장 좋았으나, 실제 항력계수 저감 효과는 0.4%로 다른 항력저감 방식에 비해 효과가 미약함
- VG 높이 변화에 따른 효과는 일관적인 경향성을 찾기 어려우며, 정량적인 값 차이가 적어 단정하기 어려움
- VG 형상에 따른 항력계수 저감 효과를 정리하여 <표 3-2>에 나타냄

<표 10-13> Vortex generator 형상과 크기에 따른 항력계수(CD) 및 항력계수 저감 효과(%)

Type	size (h/δ)	C_D	Reduction rate (%)
Half delta	0.2	0.710	0.1435
	0.4	0.711	0.0084
	0.6	0.711	0.0054
Wishbone	0.2	0.709	0.3248
	0.4	0.708	0.4027
	0.6	0.710	0.1948
Rectangular	0.2	0.710	0.1141
	0.4	0.709	0.2581
	0.6	0.710	0.1601

□ Vortex generator 형상 및 개수에 따른 공력특성

○ 본 실험에서는 3가지 타입(하프 델타, 위시본, 직사각형)의 VG를 제작하여 각 모델의 설치 개수에 따른 항력계수 저감 효과를 비교 평가함

- Re = 8.8 × 10^5, yaw angle(Φ) = 0° 조건에서 VG를 부착하지 않은 경우에 대한 각 다른 형상의 VG를 장착한 경우의 항력계수 저감률을 확인

○ 컨테이너의 상판에 일정한 간격으로 설치하였으며, 각 모형의 효과가 가장 좋은 경우에 대하여 추가적으로 컨테이너 옆면에 같은 모형의 VG를 각 3개, 5개를 추가하여 비교 평가함

○ VG는 컨테이너의 끝단에 설치하였으며, 각 형상의 vortex generator 크기는 난류경계층 두께 δ의 0.4배로 높이를 설정하여 비교 평가함

○ VG의 형상과 개수를 변화시켜가며 실험한 결과, 항력감소 효과가 미미함을 확인함

- 위시본 타입 VG를 상판에 5개, 컨테이너 옆면에 5개를 부착한 경우, 0.47%의 저감 효과를 보여 다른 항력 저감장치들에 비교하여 효과가 상대적으로 매우 적음
- VG 개수에 따른 효과는 일관성 있는 경향을 찾아보기 어려우며, 그 효과 차이도 크지않아 정하기 힘듦

- 컨테이너의 옆면에 VG를 추가한 경우, 추가적인 항력계수 저감 효과를 보였으나, 그 차이는 크지 않음
- VG 형상 및 개수에 따른 항력계수 저감 효과를 <표 3-3>에 정리하여 나타냄

<표 10-14> Vortex generator 형상 및 개수에 따른 항력계수(CD) 및 항력 저감 효과(%)

Type	Number	Side	C_D	Reduction rate (%)
Half delta	2	-	0.712	-0.0865
	3	-	0.710	0.1665
		+3 pair	0.709	0.2649
		+5 pair	0.709	0.2790
	5	-	0.711	0.0084
Wishbone	3	-	0.709	0.3493
	5	-	0.708	0.4027
		+3 pair	0.708	0.4198
		+5 pair	0.708	0.4765
	9	-	0.709	0.2586
Rectangular	2	-	0.709	0.3071
	5	-	0.709	0.2581

□ **Vortex generator 형상 및 설치 위치에 따른 공력특성 변화**

○ 본 실험에서는 3가지 타입(하프 델타, 위시본, 직사각형)의 VG를 제작하여 각 모델의 설치 위치에 따른 항력계수 저감 효과를 비교 평가함

- Re = 8.8 × 10^5, yaw angle Φ = 0° 조건에서 VG를 부착하지 않은 경우에 대한 각 다른 형상의 VG를 장착한 경우의 항력계수 저감률을 확인
- Boat tail의 경우, 일반적으로 사용하는 3-way boat tail을 사용하였으며, boat tail만 부착한 경우와 boat tail에 추가적인 VG를 부착한 경우의 항력계수 저감 효과를 비교 평가함

○ VG의 크기는 난류경계층 두께(δ)의 0.4배 높이로 설정하고 5개의 VG를 일정한 간격으로 컨테이너의 끝단에 설치함

○ VG의 형상과 설치 위치를 변화시켜가며 실험한 결과, 컨테이너의 끝단에 부착하는 경우보다 boat tail의 끝단에 설치한 경우보다 항력저감 효과를 보임

- 이는 boat tail을 부착함으로써 직각 모서리 형상(square back)의 트럭 후단에서 유선형 끝단 형상(fast back)으로 유동구조를 변화 시켜 VG 효과가 발휘되는 것으로 생각되어짐

- Boat tail 상판에 5개의 위시본 타입 VG 부착한 경우, 가장 우수한 항력계수 저감 효과를 보였으나, 그 값이 0.84%로 다른 항력계수 저감용 장치들에 비해 항력저감 효과가 미흡함

- VG의 형상 및 개수변화에 따른 항력계수 저감 효과를 <표 3-4>에 정리하여 나타냄

<표 10-15> Vortex generator 형상 및 설치 위치변화에 따른 항력계수(CD) 및 항력계수 저감 효과(%)

Type	Position	C_D	Reduction rate (%)
Half delta	end of rear	0.711	0.00844
	end of boat tail	0.639	0.21641
Wishbone	end of rear	0.708	0.40274
	end of boat tail	0.635	0.84137
Rectangular	end of rear	0.709	0.25809
	end of boat tail	0.638	0.37266

라. 주행 안정성 평가

□ **주행안정성 평가 실험 방법 및 모형**

○ 화물차는 차체 단면적에 비해 측면적이 넓어 측풍의 영향을 크게 받고 유동에 기인한 진동(flow-induced vibration)이 발생하여 주행 안정성이 감소할 수 있음

○ 측풍이 불어오는 경우를 모사하기 위해 풍동 바닥면에 설치된 turn table을 이용하여 yaw angle(Φ)을 0°~ 15°까지 변화시키면서 차량에 걸리는 공력특성 변화를 분석함

○ 풍속은 임계 레이놀즈 수(Reynolds number) 영역을 넘는 25m/s (=90km/h)로 고정하여, 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용하였음

○ 화물차에 걸리는 항력(F_D), 항력계수(C_D), 측력(F_S), 횡풍 측력계수(C_S)는 다음과 같이 정의하였음

$$F_D = F_x \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_y \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

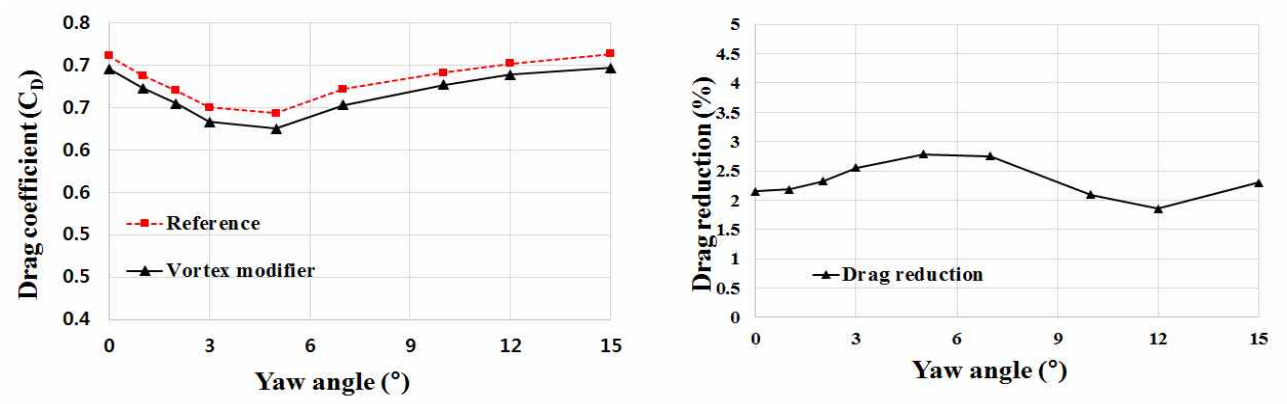
$$F_S = F_y \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_x \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_s = \frac{|F_S|}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

□ Yaw angle (Φ) 변화에 따른 15ton 화물차 모델의 공력특성 분석

○ Yaw angle에 따른 15ton 모델의 항력계수(C_D) 및 항력계수 저감 효과

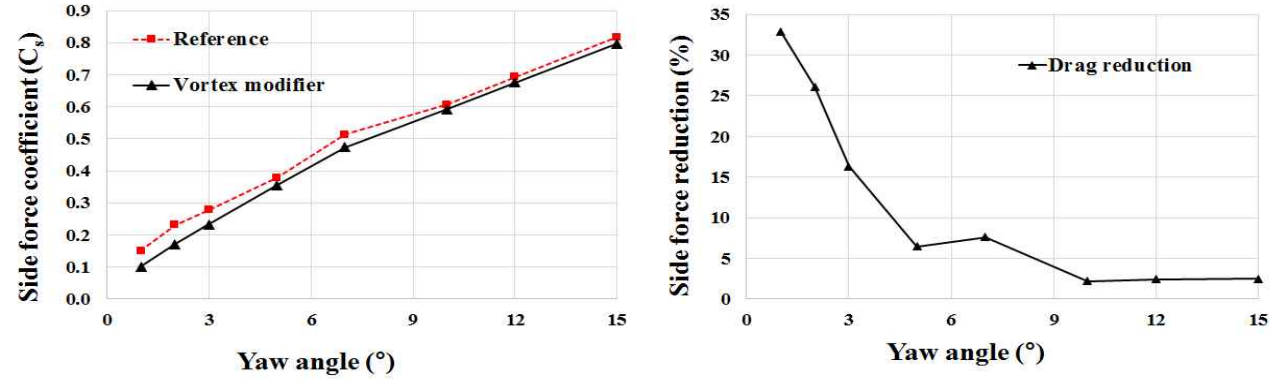
- Yaw angle이 증가함에 따라 차량이 받는 항력계수 값이 증가하며, vortex modifier가 추가로 장착된 경우 전 yaw angle 영역에서 항력계수 값이 줄어듦 <그림 3-9>
- Vortex modifier 장착 시 화물차 후미부에서의 유동박리가 줄고, 운동에너지 손실이 감소하여 항력계수가 줄어듦
- 특히 yaw angle이 Φ = 7°조건에서, 2.69%의 항력계수 저감 효과를 보임



<그림 10-9> Yaw angle 변화에 따른 15ton 화물차 모델의 항력계수(C_D) 및 항력계수 저감효과

○ Yaw angle 변화에 따른 측력(F_s)과 횡풍 측력계수값(C_s)의 변화 <그림 3-10>

- Yaw angle Φ가 커짐에 따라, 측풍을 받는 차량의 표면적이 늘어나, 차체에 걸리는 측력이 증가함
- Vortex modifier 장착 시, 기본 reference 차량에 비해 측력이 감소하고 횡풍 측력계수도 낮아짐
- 횡풍 측력계수는 시험한 yaw angle 전 구간에서 2% 이상 저감되어짐. 이러한 결과는 본 과제의 성과 기준 목표치인 2%를 초과 달성하는 수치임



<그림 10-10> Yaw angle에 따른 15ton 모델의 측력계수(C_S) 및 횡풍 측력계수 저감효과

2. 수치해석을 통한 공기역학적 성능 평가

가. 수치해석 방법

□ 큰 에디 모사 (large-eddy simulation)

○ 지배방정식 및 수치해석 방법

- 유체의 운동량 및 질량 보존에는 다음과 같은 Navier-Stokes equation을 이용하였음

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\nu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}))$$

○ 지배방정식

- 위의 Navier-Stokes equation을 필터링하여 큰에디(large-eddy)는 직접 계산하고, 작은 스케일의 에디는 모델링

- Filtered Navier-Stokes equation ($\bar{}$:필터 연산)

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i}\,\overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\nu(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i})) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

$$(\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i}\,\overline{u_j})$$

○ 수치해석 기법

- Incompressible LES solver
- Unstructured solver
- Fully-implicit fractional method에 기반한 시간 전진
- Crank-Nicolson method를 이용한 시간 차분
- 2nd-order central difference scheme을 이용한 공간 차분
- Dynamic Vreman global equlibrium subgrid-scale (SGS) model

□ 수치해석 도메인

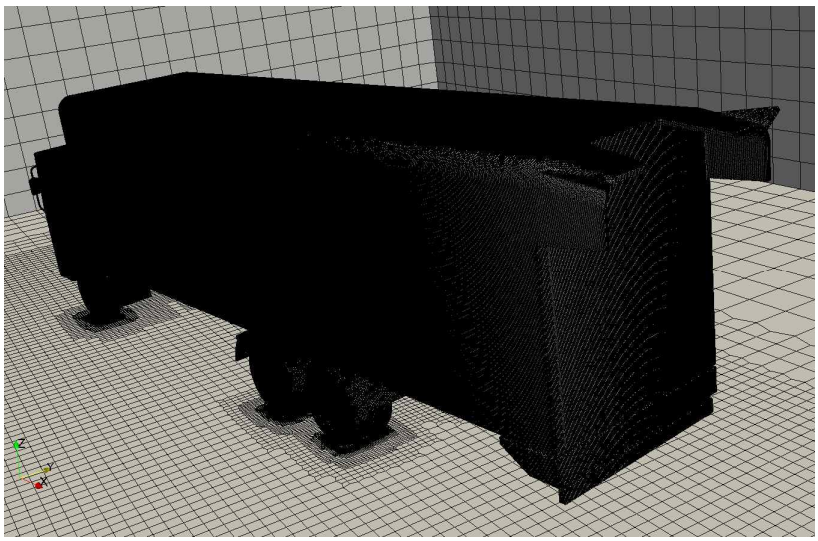
○ 수치해석 도메인 생성

- 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행
- Local refinement 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1300-1600

만 개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

○ 경계조건 및 상수

- Inlet velocity: 90km/h (=25m/s)
- Outlet: local acceleration + convection = 0
- Wall(풍동 외벽, 화물차 표면): no-slip condition
- Kinematic viscosity = 1.568 x $10^{-5}m^2/s$
- CFL(무차원 시간간격) = 3.0



<그림 10-11> 주행 안정성 평가에 사용된 수치해석 격자
(15ton 화물차)

□ **격자 생성**

○ <표 3-5>와 같은 셀 개수를 가지는 계산 격자 생성

<표 10-16> 수치해석용 격자의 셀 개수

	15ton 화물차 모델
셀 개수	약 1200만

○ Local refinement의 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1200만 개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

○ 풍동실험에서 가장 낮은 C_D 값을 보이는 vortex modifier를 부착한 15ton 화물차 모델에 대해 수치해석을 진행함

□ Two-point correlation

○ 화물차 주위의 λ_2 와류장 계산

- 수치해석을 통해 얻어진 유동장을 분석하여 λ_2를 계산하고, λ_2 와류장을 iso-surface로 가시화함
- Ahmed body의 15~30° 사이의 slant angle 조건에서 발생하는 주유동 방향 와류만큼 강하지는 않지만, 와류가 형성되어짐. 화물차 끝단에서는 그 와류형성이 크지 않으나 하류로 나아갈수록 와류 형성이 뚜렷해짐.

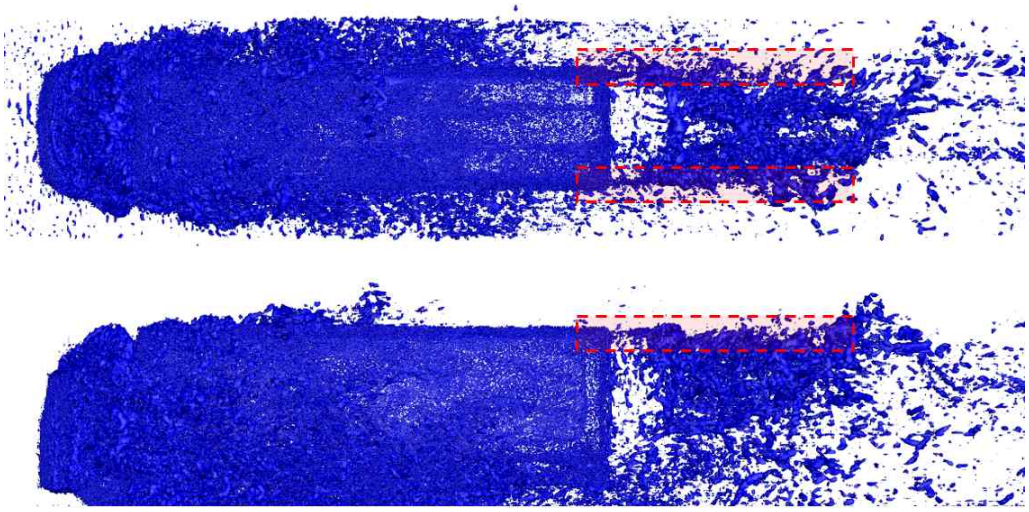


그림 <10-12> λ2로 나타낸 순간 와류장의 iso-surface (λ2 = -105)의 (위) 상부 view 및 (아래) 측면 view

○ Two-point correlation 계산

- 직각 끝단 모서리에서 발생하는 유동 방향 와류를 확인하여 vortex generator장착 위치를 알아보고자 two-point correlation을 수행함
- Two-point correlation 계산을 통해 특정한 한 점과 다른 한 점에서의 유속 fluctuation의 상관관계의 정도를 -1과 1사이의 값으로 표현함. 이러한 유동정보는 트럭 끝단에서 발생하는 vortex 크기를 가름할 수 있는 척도가 됨
- Two-point correlation은 총 9개의 sampling line을 따라 계산되었고, 각 line의 위치는 <그림 3-13>에 도시하였음. 경계층 내부의 buffer layer, log layer, 및 outer layer에 각각 3개의 sampling line이 위치시켰으며, 각각의 레이어에 대해 3개의 sampling line에서 계산된 값들을 평균하였음.
- 미리 계산된 속도장 결과로부터, 다음의 식을 이용하여 표면에서 수직방향으로 무차원 간격을 계산하고, 경계층 내부 영역을 구별함

$$\Delta z^+ = \frac{u_\tau \Delta z}{\nu},\ where\ u_\tau = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

- 각 라인에 대해 3방향의 속도성분의 변동(fluctuation) 값에 대해 two-point correlation을 계산함
- Two-point correlation을 계산하는데 쓰인 식은 다음과 같음

$$R(\boldsymbol{x},\boldsymbol{r}) = \frac{\overline{u'(\boldsymbol{x},t)u'(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{r},t)}}{\overline{u'(\boldsymbol{x},t)u'(\boldsymbol{x},t)}}$$

- 수치해석 내부에서는 다음곽 같은 식을 사용함. 속도변동성분을 계산하기 위한 난류 통계치는 유동이 트럭 길이의 10배 거리를 이동하는 시간 동안 집계된 값을 사용함

$$R(\boldsymbol{x},\boldsymbol{r}) = \frac{\overline{(u(\boldsymbol{x},t)-\overline{u(\boldsymbol{x},t)})(u(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{r},t)-\overline{u(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{r},t)})}}{\overline{(u(\boldsymbol{x},t)-\overline{u(\boldsymbol{x},t)})(u(\boldsymbol{x},t)-\overline{u(\boldsymbol{x},t)})}}$$

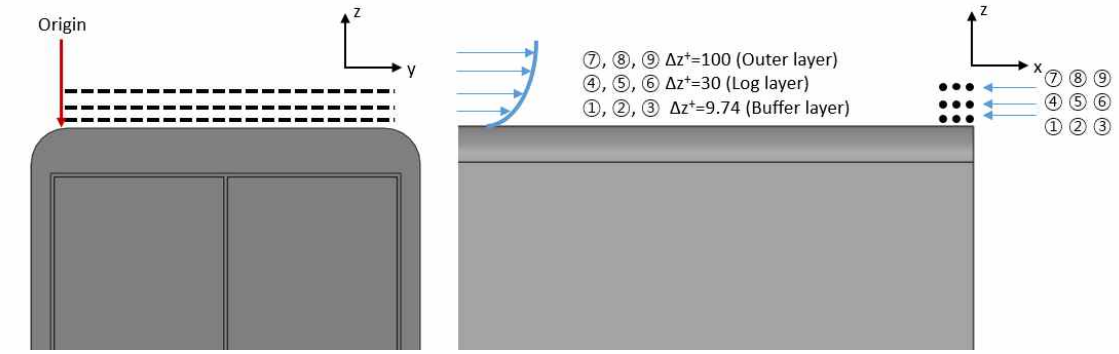


그림 <10-13> Two-point correlation 계산에 사용되어진 원점과 각 sampling line의 위치. (좌) 화물차 뒷면에서의 위치와 (우) 측면에서의 위치

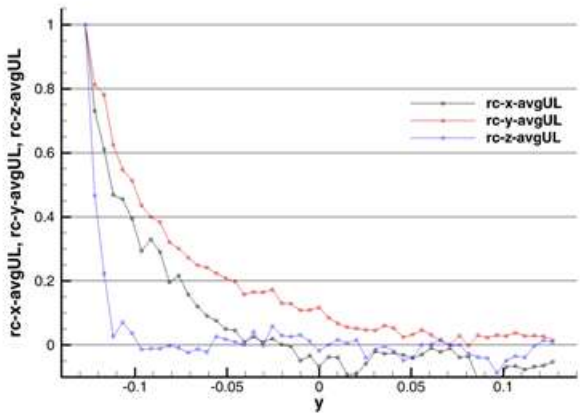


그림 <10-14> Outer layer의 sampling line에서 계산된 3축 방향 속도성분의 correlation 값 변화

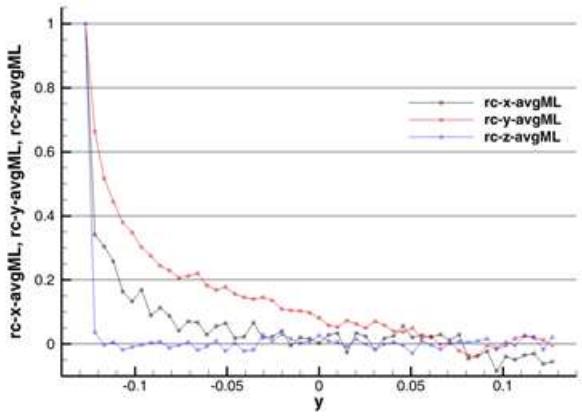


그림 <10-15> Log layer의 sampling line에서 계산된 3축 방향 속도 성분의 correlation 값 변화

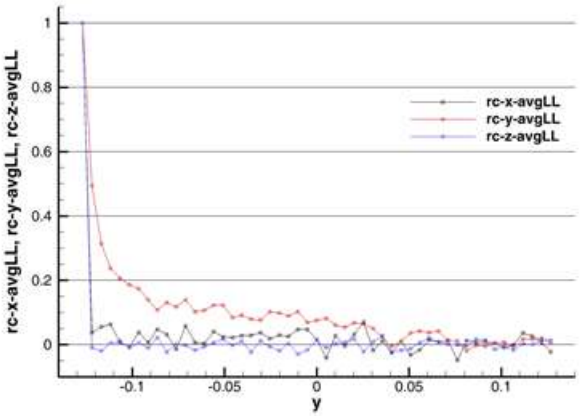


그림 <10-16> Buffer layer의 sampling line에서 계산된 3축 방향 속도 성분의 correlation 값 변화

- 계산된 two-point correlation 값을 바탕으로 직사각형 vortex generator(VG)를 장착할 위치 [1]과 [2]를 도출하고 VG 장착 후 실험함. 화물차 유동의 고유 구조인 유동방향 와류의 형성 억제 및 교란을 목적으로 함

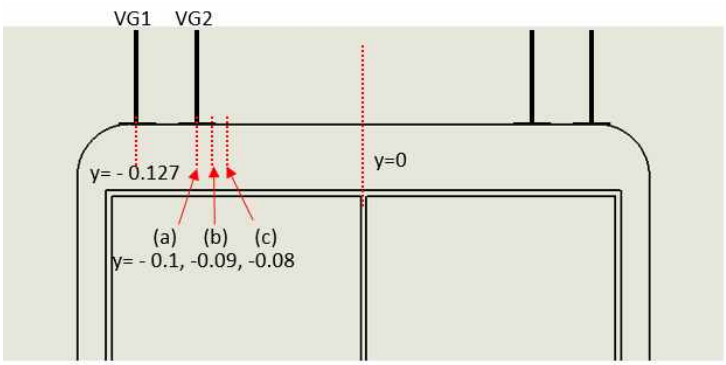


그림 <10-17> 직사각형 vortex generator의 설치 위치-1

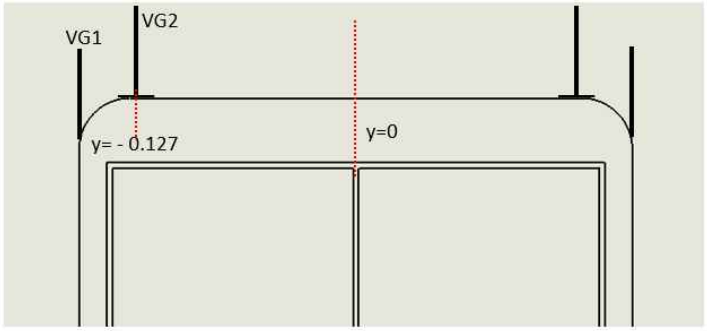


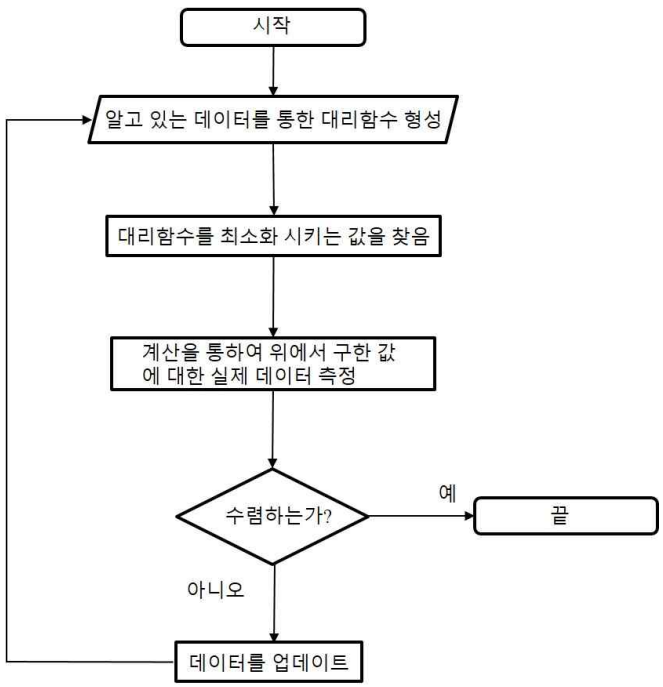
그림 <10-18> 직사각형 vortex generator의 설치 위치-2

- 위치 -1과 -2에 각각 직사각형 VG를 장착하고 풍동 실험을 수행한 결과, 항력계수가 거의 변하지 않음을 확인
- 이는 앞서서 도시된 λ_2 iso-surface 와류장에서 주유동방향 와류가 화물차 후단부에서 하류쪽으로 나아간 위치에서 심화되고 있기 때문으로 판단되어짐. 이를 효과적으로 제어하기 위해서는 VG장치를 보다 후방 위치에 설치하여야 함을 알수 있음.
- 따라서, 새로 설계된 vortex modifier는 하류 쪽으로 VG형상이 확장된 구조로 설계함.

나. 수치해석을 통한 최적화

□ Surrogate Management Framework를 이용한 최적화 분석

○ 실제 연속적인 함수를 구하기 위한 계산 또는 실험 비용이 상당하므로, 실제 함수와 비슷한 형태를 가지는 대리 함수를 구하고, 구해진 대리 함수를 이용하여 최적의 값을 찾는 방법을 Surrogate Management Framework(SMF)이라고 함

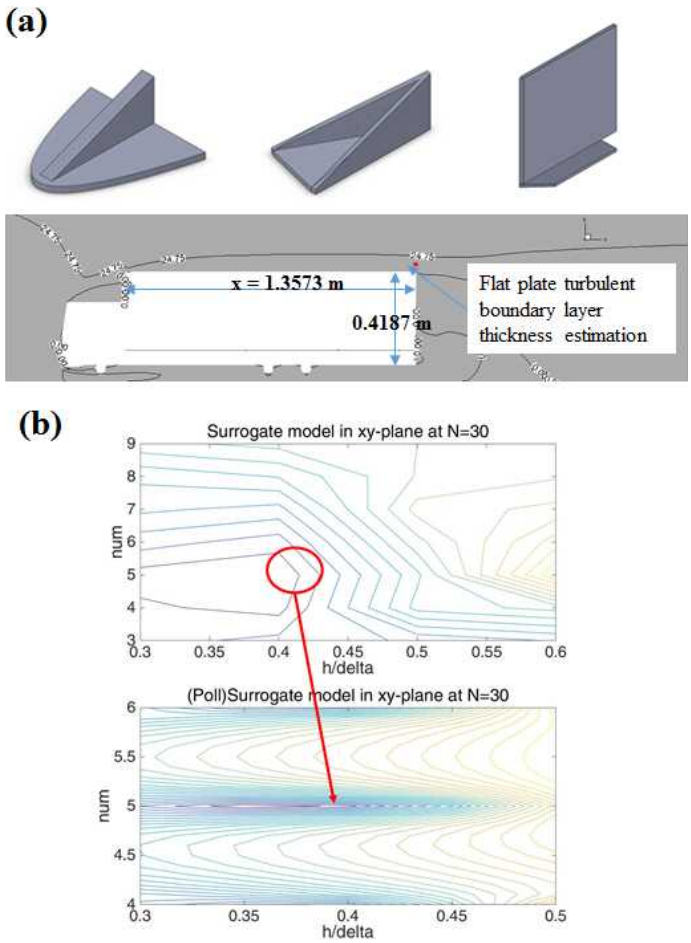


<그림 10-19> Surrogate Management Framework의 알고리즘

□ 15ton 화물차 vortex generator에 대한 최적화 분석

○ Vortex generator 개수 및 높이 조절에 대한 SMF 최적화 분석 결과

- 15ton 화물차 vortex generator 개수 및 높이(h/delta) 변화에 따른 SMF를 통한 최적화 분석 진행
- 개수 = 5, 높이 h/delta = 0.4의 vortex generator에서 최적의 항력 감소 결과를 얻어 낼 수 있음



<그림 10-20> (a) 15ton 화물차에 장착한 vortex generator 개수와 높이에 대한 모식도 및 (b) Surrogate Management Framework(SMF) 최적화 결과

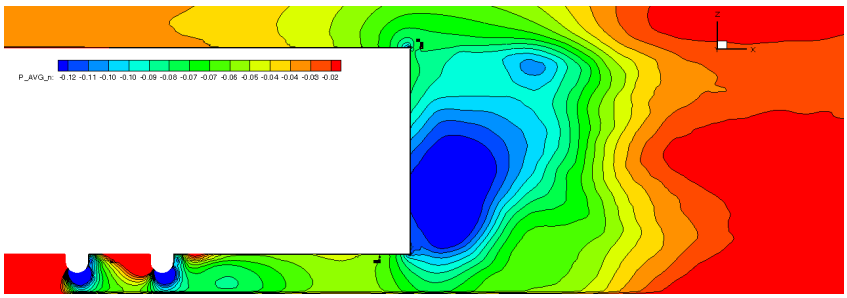
다. 유동장 분석

□ 15ton 화물차의 주변 유동장 분석

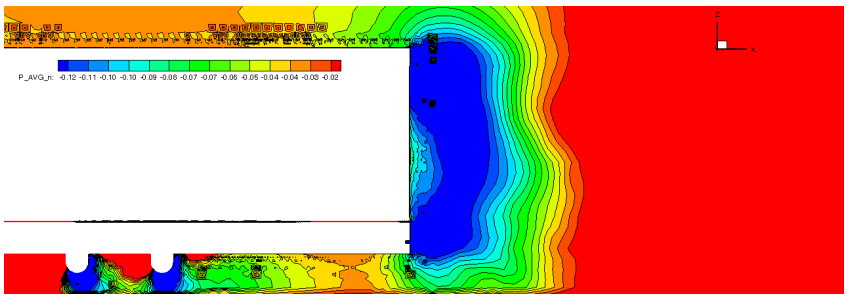
○ Vortex modifier를 장착한 15ton 화물차의 주변 압력장 (y-plane, y=0.0)

- Vortex modifier 장착 시, 트레일러 후방에 형성된 후류에서 저압 영역(low-pressure region)의 면적은 아래, 위쪽으로 증가함

- Vortex modifier 장착 시, 트레일러 후방에 형성된 후류에서 저압영역의 유동방향 길이는 줄어듦. 이것은 재순환영역의 크기가 줄어듦을 의미함



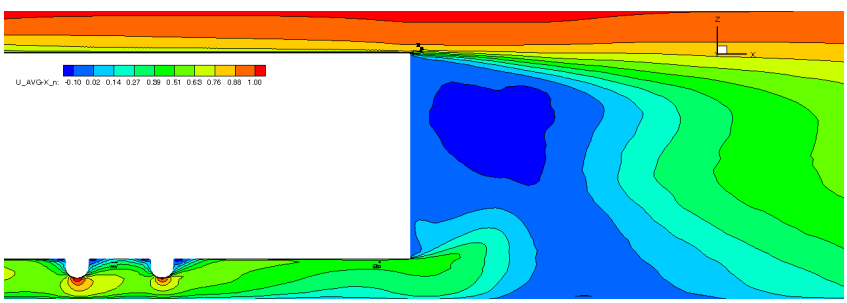
<그림 10-21> Vortex modifier를 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)



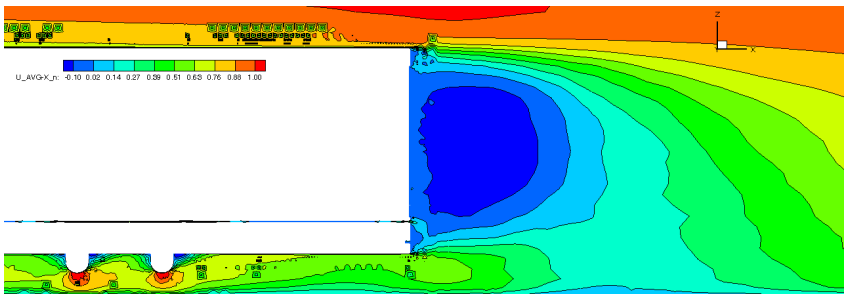
<그림 10-22> Vortex modifier를 부착하고 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)

○ Vortex modifier를 장착한 15ton 화물차의 주변 속도장 **(y-plane, y=0.0)**

- Vortex modifier를 부착함에 따라, 트레일러 후방에 형성되는 역류 구역이 현저하게 줄어듦
- 트레일러 후단부의 아래쪽 영역에서 역류 발생량이 크게 감소함
- Vortex modifier 부착 시, 재순환 영역의 전체 크기가 줄어들고, 주유동방향 길이가 짧아짐



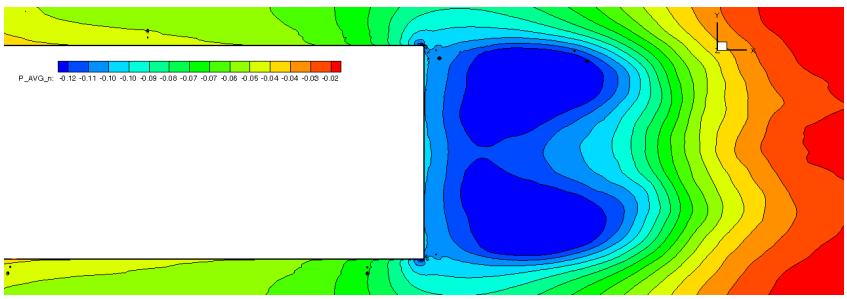
<그림 10-23> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)



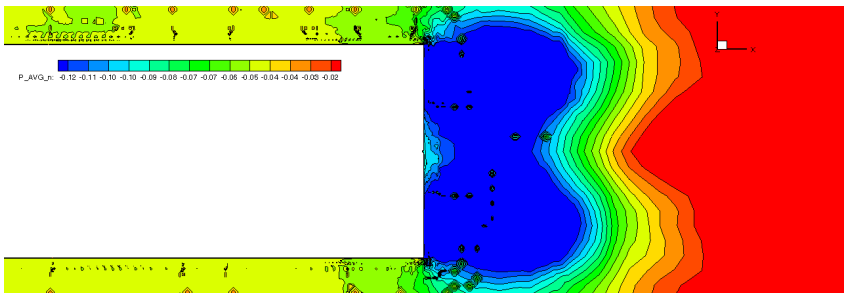
<그림 10-24> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의
대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)

○ Vortex modifier를 장착한 15ton 화물차의 주변 압력장 **(z-plane, z=2.0)**

- Vortex modifier를 부착함에 따라, 트레일러 후방에서 저압영역의 크기가 줄어들고, 주유동방향의 길이도 또한 줄어듦
- 따라서 vortex modifier 부착 시, 항력 저감하는 방향을 유동장을 변화시켜 항력이 저감되어짐을 유추할 수 있음



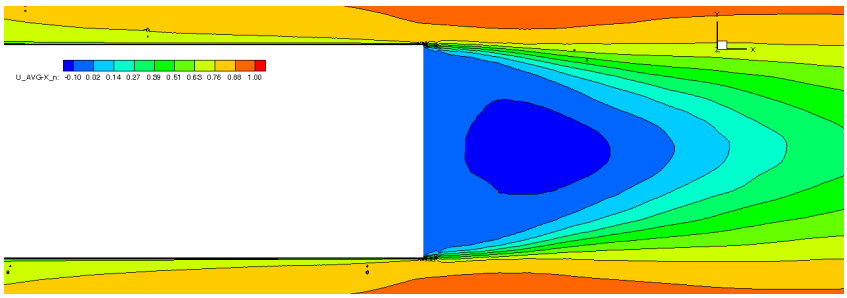
<그림 10-25> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의
컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면,
z=2.0)



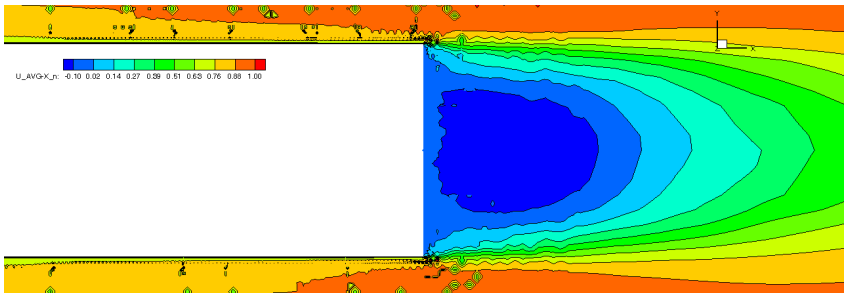
<그림 10-26> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의
컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면,
z=2.0)

○ Vortex modifier를 장착한 15ton의 화물차 주변 속도장 (z-plane, z=2.0)

- Vortex modifier를 부착함에 따라, 트레일러 후방에서 역류 영역이 현저하게 줄어듦
- Vortex modifier 부착 시, 재순환영역의 크기가 줄어들고, 주유동방향의 길이도 짧아짐



<그림 10-27> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)



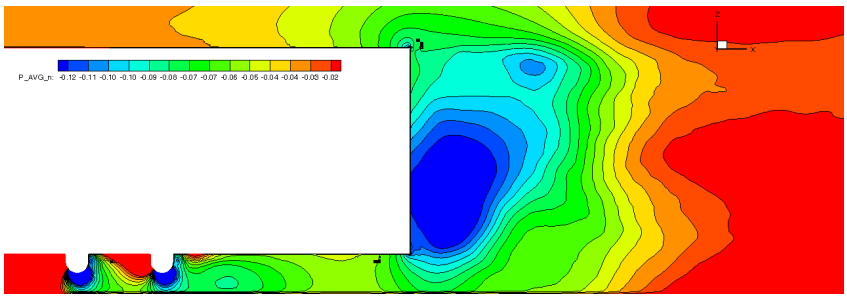
<그림 10-28> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)

라. 주행 안정성 평가

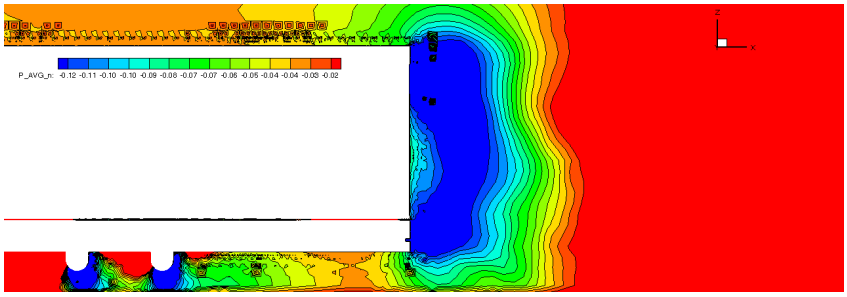
□ **15ton 화물차 주변의 유동장 분석**

○ Vortex modifier 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변 압력장 비교 **(y-plane, y=0.0)**

- Vortex modifier 장착 시, 트레일러 후방에 형성된 후류 저압 영역(low-pressure region)이 아래, 위쪽으로 늘어남
- Vortex modifier 장착 시, 트레일러 후류에서 저압부영역의 유동방향 길이는 줄어듦 이것은 재순환영역의 크기가 줄어듦을 의미함



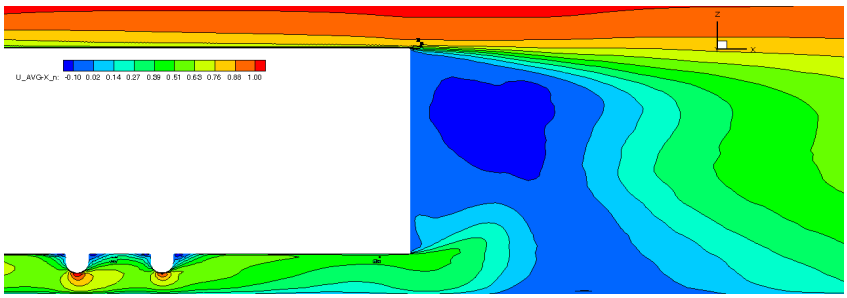
<그림 10-29> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)



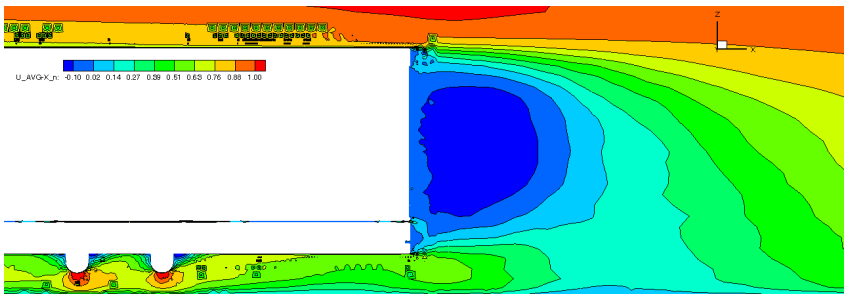
<그림 10-30> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의
대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)

○ Vortex modifier 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변의 속도장 비교 **(y-plane, y=0.0)**

- Vortex modifier 부착시 트레일러 후류의 영역이 현저히 줄어듦
- 트레일러 후단부의 아래쪽 부분에서 역류 발생량이 크게 감소
- Vortex modifier 부착 시 재순환 영역의 전체 크기가 줄어들고, 주유동방향의 길이가 짧아짐



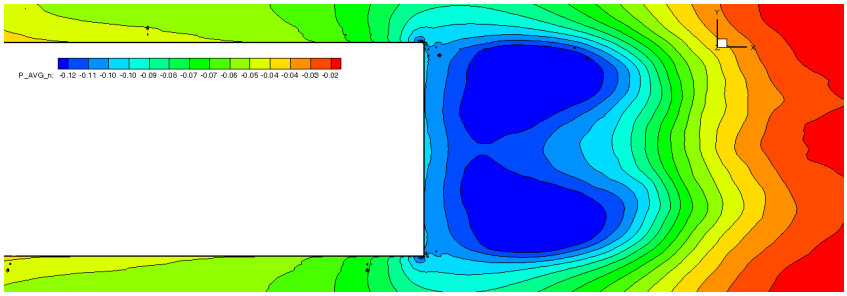
<그림 10-31> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의
대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)



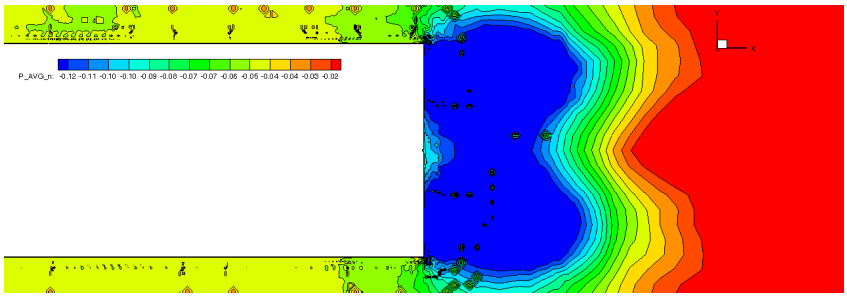
<그림 10-32> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의
대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)

○ Vortex modifier 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변의 압력장 비교 **(z-plane, z=2.0)**

- Vortex modifier를 부착시 트레일러 후류의 저압영역의 크기가 줄어들고, 주유동방향의 길이도 줄어듦
- 따라서 vortex modifier 부착 시, 압력에 기인한 항력을 저감하는 방향으로 유동장이 변화함



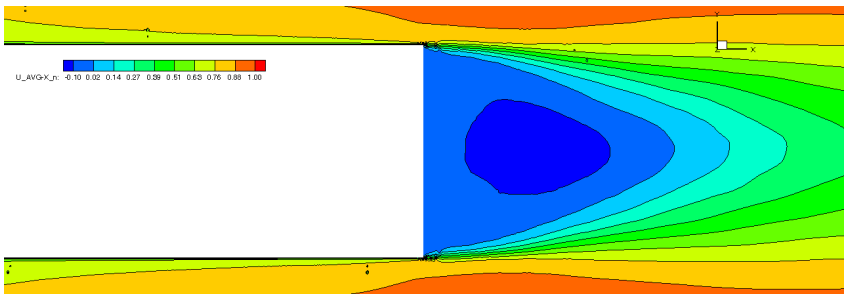
<그림 10-33> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0)



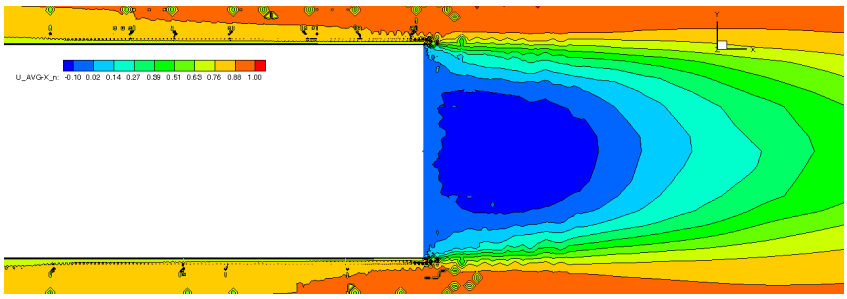
<그림 10-34> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0)

○ Vortex modifier 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변의 속도장 비교 (z-plane, z=2.0)

- Vortex modifier를 부착시, 트레일러 후류의 역류 영역이 현저하게 줄어듦
- Vortex modifier 부착 시, 재순환영역의 크기가 줄어들고 주유동방향의 길이가 짧아짐



<그림 10-35> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)



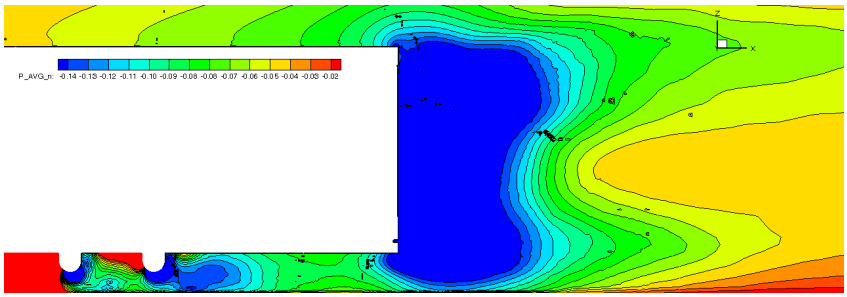
<그림 10-36> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)

마. 측풍조건에서의 주행 안정성 평가

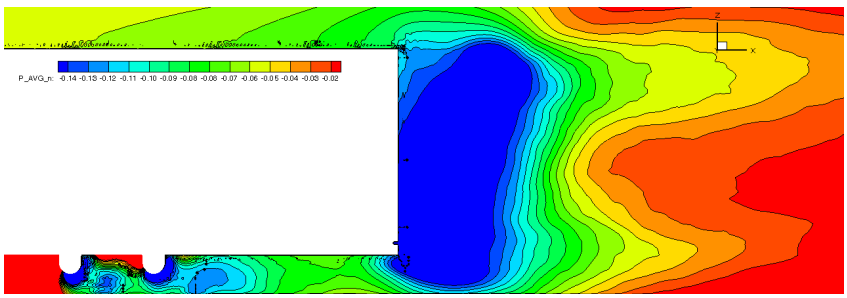
□ **15ton 화물차 주변의 유동장 분석**

○ Vortex modifier 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변의 압력장 비교 **(Φ =10°, y=0.0)**

- Vortex modifier가 장착되지 않은 경우, Φ = 0°인 경우에 비해 Φ =10° 조건에서 트레일러 후류의 저압영역 면적이 현저하게 감소함
- Yaw angle = 0°인 경우와 비교하여, Vortex modifier 장착 시 후단부 위쪽면에 걸리는 압력이 높아져 항력과 측력이 감소함
- Vortex modifier 장착 시, 트레일러 후방에 형성된 저압영역의 유동방향 길이가 줄어들어 항력과 측력이 감소함



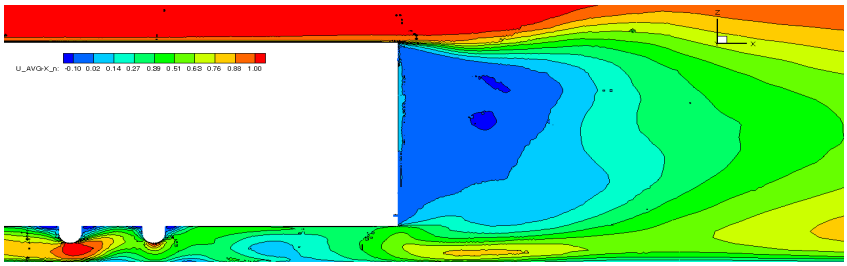
<그림 10-37> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)



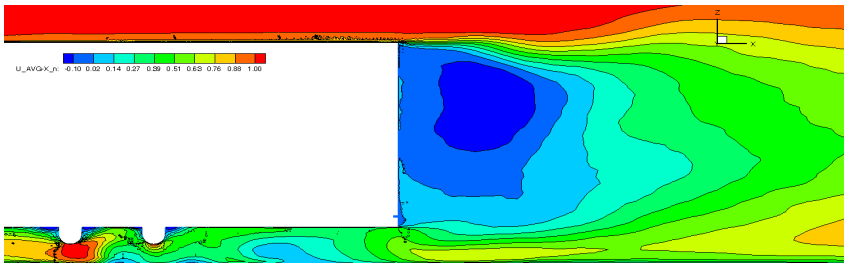
<그림 10-38>Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)

○ Vortex modifier 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변의 속도장 비교 (Φ =10°, y=0.0)

- Vortex modifier가 장착되지 않은 경우, Φ = 0° 조건에 비해 트레일러 후단부 아래에 생성되는 재순환 영역의 크기가 현저히 감소
- Φ = 0°인 경우와 비교하여 Vortex modifier 장착 시, 재순환 영역의 길이가 짧아져서 항력 및 측력 감소에 일조



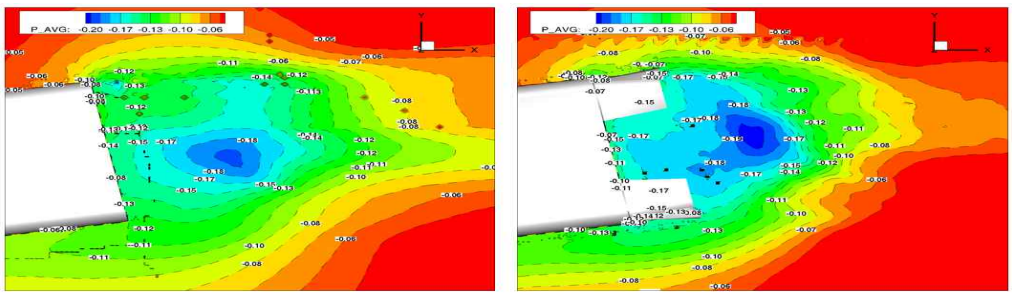
<그림 10-39> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)



<그림 10-40> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)

○ Vortex modifier 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변의 압력장 비교 (Φ = 10°, z=2.0)

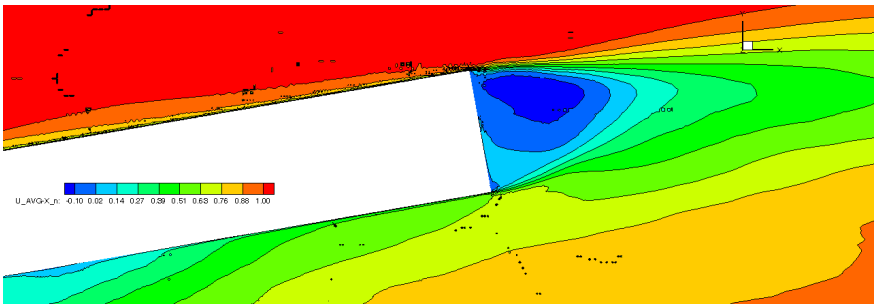
- Vortex modifier가 장착되지 않은 경우, Φ = 10° 조건에서 측풍 영향에 의해 후류의 flow symmetry가 깨짐
- Vortex modifier 부착시, 후류의 flow symmetry가 개선됨
- 이에따라 vortex modifier 부착 시, 차량 안정성에 긍정적인 효과가 유도됨



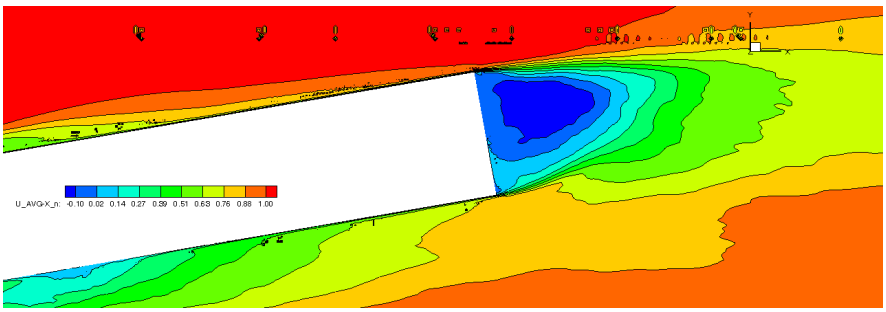
<그림 10-41> Vortex modifier 부착하지 않은 (좌) 및 부착하고 (우) 15ton 화물차의 컨테이너 위쪽 평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=3.1)

○ Vortex modifier 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변의 속도장 비교 (**Φ = 10°, z = 2.0**)

- Vortex modifier가 장착되지 않으면 Φ = 10° yaw angle 조건에서 측풍 영향에 의해 후류의 flow symmetry가 깨짐. 이로 인해 트레일러 후단부에 작용하는 속도 분포가 바뀜
- Vortex modifier 부착시 재순환 영역이 트럭의 중심축으로 이동함



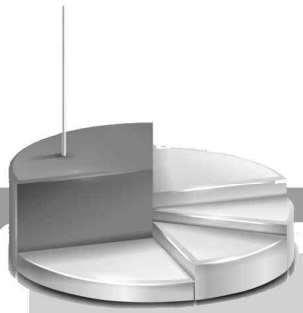
<그림 10-42> Vortex modifier 부착하지 않은 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)



<그림 10-43> Vortex modifier 부착하고 15ton 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)

○ Vortex modifier 장착 유무에 따른 15ton 화물차에 걸리는 측력 비교

- Vortex modifier 장착 시, 바람에 노출되는 단면적이 증가하여 측력이 증가함
- Vortex modifier 장착 시, 측력 fluctuation의 RMS 값이 17.3% 저감되어 차체에 가해지는 떨림 현상의 진폭이 감소함
- 이로 인해 전체적인 주행 안정성이 개선됨



제11장 Trailer full aero package를 통한 연비 향상 기술 개발

제1절 최적 시제품 제작

제2절 풍동 실험을 통한 주행 안정성 분석

제3절 수치해석을 통한 항력 개선 및 주행 안정성 효과 분석

제11장. Trailer full aero package를 통한 연비 향상 기술 개발

제1절. 15ton 화물차 모델 full aero. package의 설계

□ Flap-type side skirt

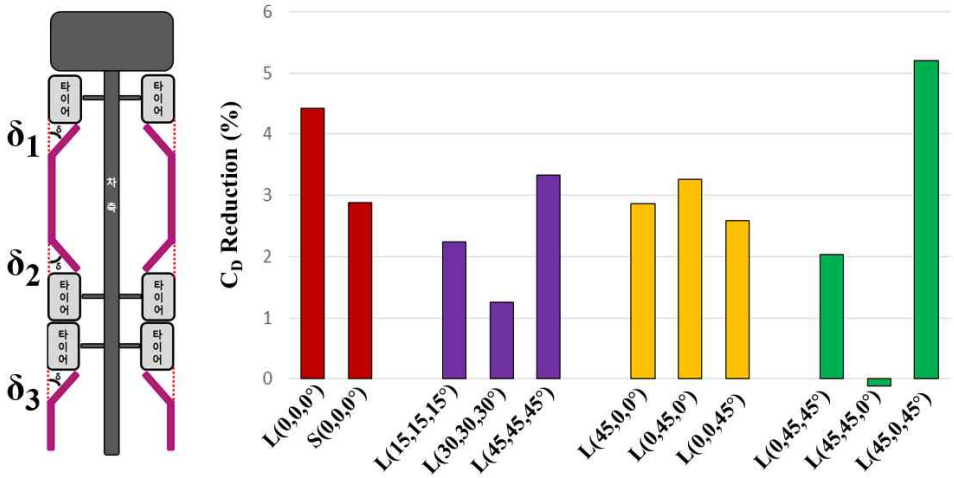
○ Side skirt는 차량 하부에서 발생하는 와류의 생성을 억제함. 특히, 타이어와 스커트 사이의 유동 흐름을 막아 공기저항이 효과적으로 줄어듦

○ Flap-type side skirt는 타이어 후방 유동을 보다 효과적으로 제어할 수 있는 최적의 형상으로 설계하였음. 차체 안쪽으로 일정한 각도(δ)로 꺾여 들어온 flap을 부착한 side skirt의 경우, 들임각($\delta_1,\delta_2,\delta_3$)의 조합에 따라 공기저항이 줄어드는 효과가 다르게 관찰됨을 확인 <그림 4-1>

○ Flap-type side skirt의 경우, Φ=0°조건에서 6.1%의 항력저감 효과를 보임. 이것은 기본형 side skirt(ΔC_D=3.05%)에 비해 항력 저감 효과가 약 100% 향상된 결과임

- Side skirt 장착 시 화물차 앞바퀴 주변 유체흐름에 기인한 운동량 손실이 뒷바퀴가 받는 항력을 줄이고, 뒷바퀴에서 발생하는 유동박리가 저감되어 운동에너지 손실이 감소하여 항력 값이 줄어듦

○ Full aero package를 구성하는 하부 부착물로 최대 공기저항 저감 효과를 유도하는 flap-type side skirt(δ_1=0°, δ_2=0°, δ_3=30°)를 선정하여 장착함



<그림 11-1> 표준형 및 플랩 사이드 스커트의 항력 감소 효과

□ LIAD (lower inclined air deflector) boat tail

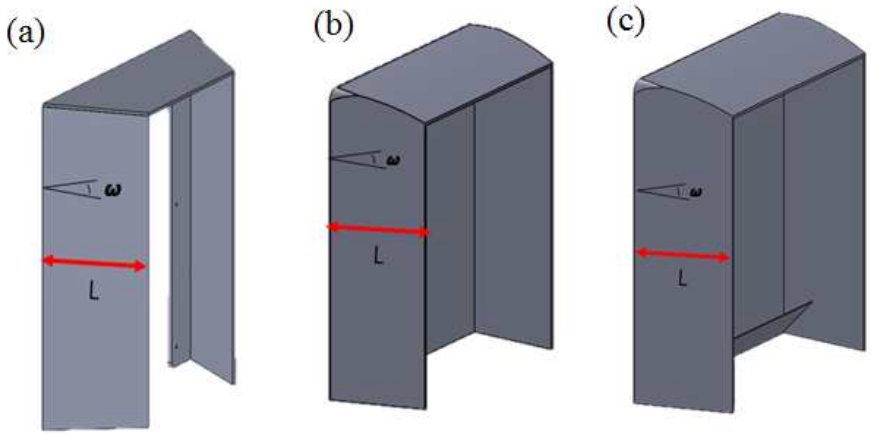
○ 차체 하부에서 발달하는 와류의 영향을 감소시키고, 차체 후미부에 형성된 저압 영역 (low-pressure zone)의 압력 값을 증가시키기 위한 대책의 일환으로 차체 후미부 하부에 스포일러 형태의 LIAD를 추가로 부착함

○ 차량 후미부 하부에 스포일러 형태로서 윗방향으로 살짝 기울어진 LIAD를 추가로 부착하여 차체 하부 유동을 효과적으로 제어하여 차체 후방에 형성된 낮은 압력 값

을 증가시키고자 함

○ LIAD의 길이는 boat tail 길이의 1/2, 화물차의 뒷면과 이루는 각도는 30~ 60°로 설정함

○ 기존 boat tail의 상부면에는 차체 후미부와 약간의 높이 차가 존재하여 유동 박리(flow separation)가 boat tail의 끝단보다 약간 전방 위치에서 발생함. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 이러한 높이 차이에 기인해 발생하는 공기저항 형성 가능성을 없애고 후미부에서 유동이 부드럽게 이어지도록 하는 gap repair 구조물을 설치함 <그림 4-2>



<그림 11-2> Boat tail 설계. (a) 표준형 boat tail, (b) gap repair가 추가된 boat tail, (c) LIAD가 추가된 boat tail

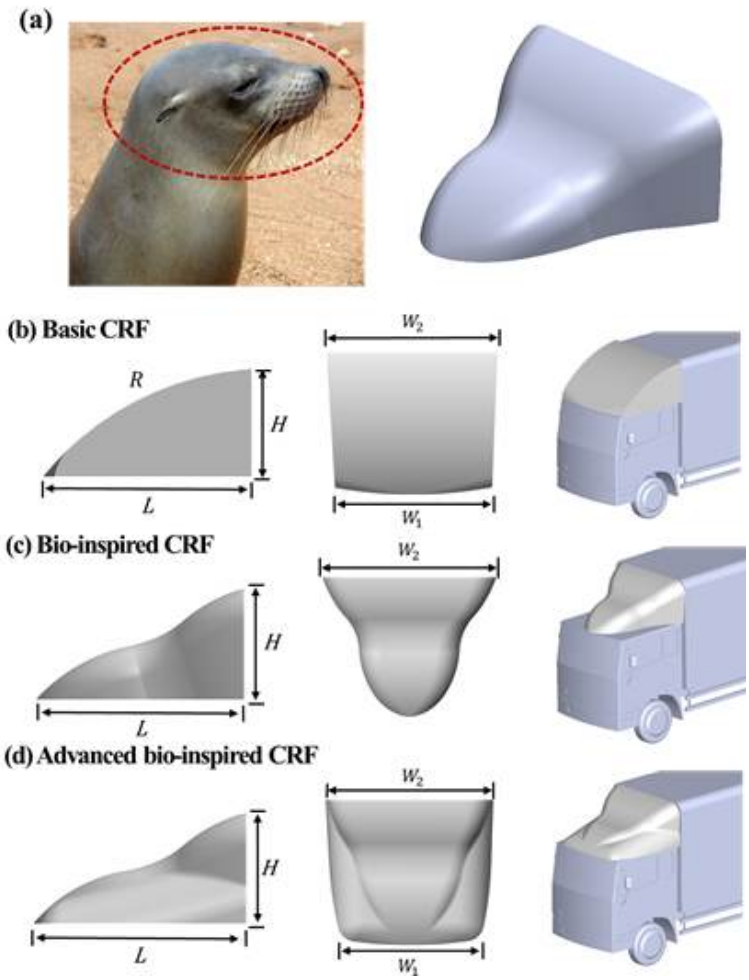
□ Bio-inspired cab-roof fairing (CRF)

○ 15ton 화물차 모델의 경우, 트랙터와 컨테이너의 높이 차이(단차)에 기인하여 공기저항이 크게 발생함. 따라서 화물차 차체 형상에 최적화된 cab-roof fairing(CRF)을 설치하고 효과적인 유동제어를 기술을 도입하여 공기저항을 줄이는 것이 중요함

○ 화물차 전면부 및 측면부에서 발생하는 유동박리 현상을 제어하기 위해 바다사자의 머리 부분 형상을 자연모사하여 bio-inspired CRF를 고안함 <그림 4-3>

○ 화물차 구조에 맞춰 항력 저감 효과를 개선시킨 advanced bio-inspired CRF를 설계 및 제작하여 화물차에 적용 <그림 4-3d>

○ Advanced bio-inspired CRF를 부착한 경우 항력계수(C_D)가 최솟값을 가지며, CRF를 부착하지 않은 기본 모델에 비해 20.1%의 항력 계수 저감 효과를 보임

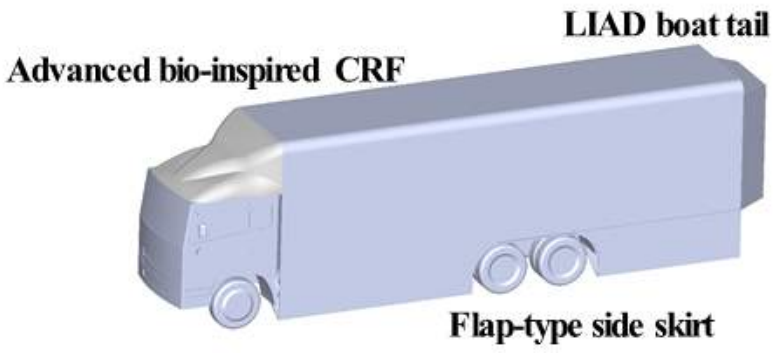


<그림 11-3> Bio-inspired CRF의 높이, 길이 및 각도 설계

□ Full aero. package

○ 개발한 항력저감 장치들(flap-type side skirt, LIAD boat tail, advanced bio-inspired CRF)을 부착하여 가장 우수한 공기저항 저감 효과를 얻고자 함 <그림 4-4>

○ 15ton 화물차 전면부에서 발생하는 공기저항, 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후면부에서 발생하는 공기저항을 효과적으로 제어하여 화물차 차체 전체에 작용하는 공기저항을 저감시키는 것을 목표로 함



<그림 11-4> Full aero. package를 부착한 15ton 화물차 모델

제2절. Full aero. package를 장착한 15ton 화물차의 공기역학적 성능 평가

1. 풍동 실험을 통한 항력 개선 및 주행 안정성 효과 분석

가. 항력 측정용 실험장치

□ POSTECH 대형 아음속 풍동

○ 1995년 준공된 포스텍 대형 아음속 풍동은 유체역학적 기본 현상을 포함하여 제반 응용유체 문제들을 연구할 수 있는 다목적 아음속 풍동

○ 자동차와 기차와 같은 운송체의 공력 실험에 적합

○ 폐쇄형(closed circuit) 구조로 전체 크기는 높이 6m, 폭 14m, 길이 37m임

○ 시험부(test section)의 크기는 높이 1.5m, 폭 1.8m, 길이 4.3m 임

○ 최저풍속: 5m/s, 최대풍속: 75m/s

○ 수축비: 9:1

○ 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%, 균일도 (flow uniformity)는 0.25%로 운송체의 공력 실험에 적합한 풍동임

□ 공력 측정용 external balance

○ 화물차 차체에 걸리는 힘과 모멘트와 같은 공력을 측정하기 위해 차체에 작용하는 풍하중(wind load)을 정밀하게 측정함

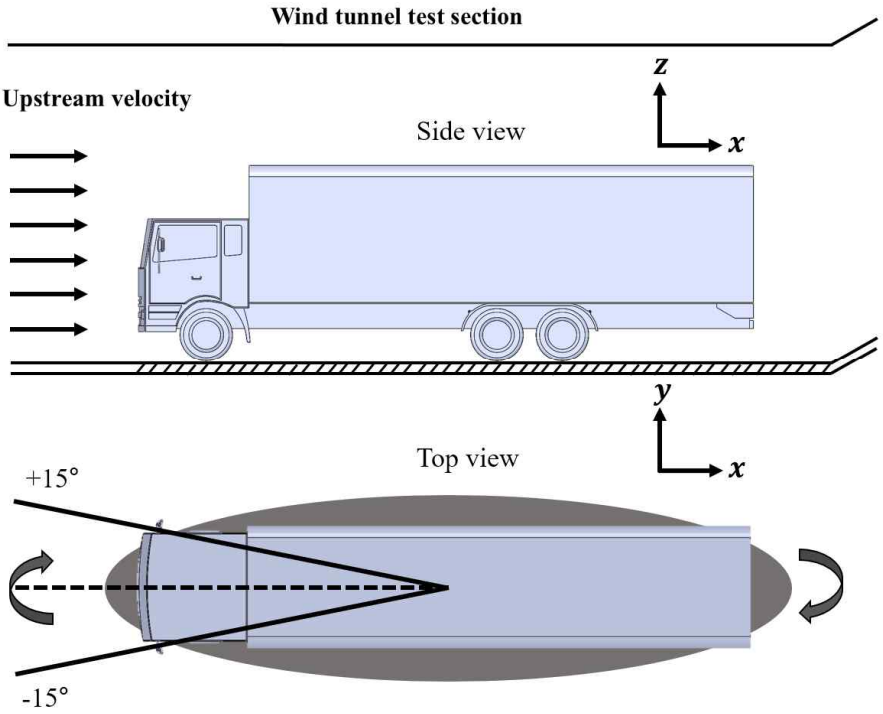
○ 포스텍 아음속 풍동에 설치된 external balance는 독일항공우주연구청(DLR) Braunschweig 분소에서 자동차 공력 측정용으로 제작한 7-component balance임.

○ 측정범위 및 분해능

- 측정범위: X=±500N, Mx=±500Nm, Y=±1000N, My=±600Nm, Z=±4000N Mz=±200Nm
- 정확도: 0.2% of full scale dX=1N, dY=2N, dZ=8N

○ 분해능: 0.01N 이하

○ External balance를 turn table과 연결하여 설치함으로써 차체에 측풍이 불어올 경우에 대한 풍동 실험도 가능함 <그림 4-5>



<그림 11-5> Yaw angle 조절을 위한 turn table 개략도

□ **주행안정성 평가 실험 방법**

○ 화물차는 차체 폭에 비해 길이가 길어 측풍의 영향이 크게 받고, 유동에 기인한 진동(flow-induced vibration) 때문에 주행 안정성이 떨어질 수 있음

○ 측풍이 불어오는 경우를 모사하기 위해 풍동 바닥면에 설치된 turn table을 이용하여 yaw angle(Φ)을 0°~ 15° 까지 변화시켜가면서 차체에 걸리는 공력특성 변화를 분석함

○ 풍속을 임계 레이놀즈 수(Reynolds number) 보다 큰 25m/s (= 90km/h)로 고정시키고, 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용하였음

○ 화물차에 걸리는 항력(F_D), 항력계수(C_D), 측력(F_S), 횡풍 측력계수(C_S)는 다음과 같이 정의하였음

$$F_D = F_x \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_y \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

$$F_S = F_y \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_x \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_s = \frac{|F_S|}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

나. 유동가시화 실험장치

□ POSTECH 중형 아음속 풍동

- 포스텍 중형 아음속 풍동은 폐쇄형(closed circuit)으로 시험부(test section)의 크기는 높이 0.6m, 폭 0.72m, 길이 6.75m임 <그림 4-6>
- 최대 풍속은 40m/s 이며, 난류강도(turbulence intensity)는 0.08%로 운송체 주위 유동 분석에 적합한 풍동임



<그림 11-6> POSTECH 중형 아음속 풍동 시험부 및 특징

□ 15ton 화물차 모델 주위 유동 가시화 방법

○ 세 종류의 CRF 부착 전후의 차체 전면부 주위 흐름을 관찰하고 이를 통해 항력 저감에 영향을 미치는 유동구조를 정량적으로 파악하기 위해 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하여 차체 전면부 주위 유동의 속도장을 측정함

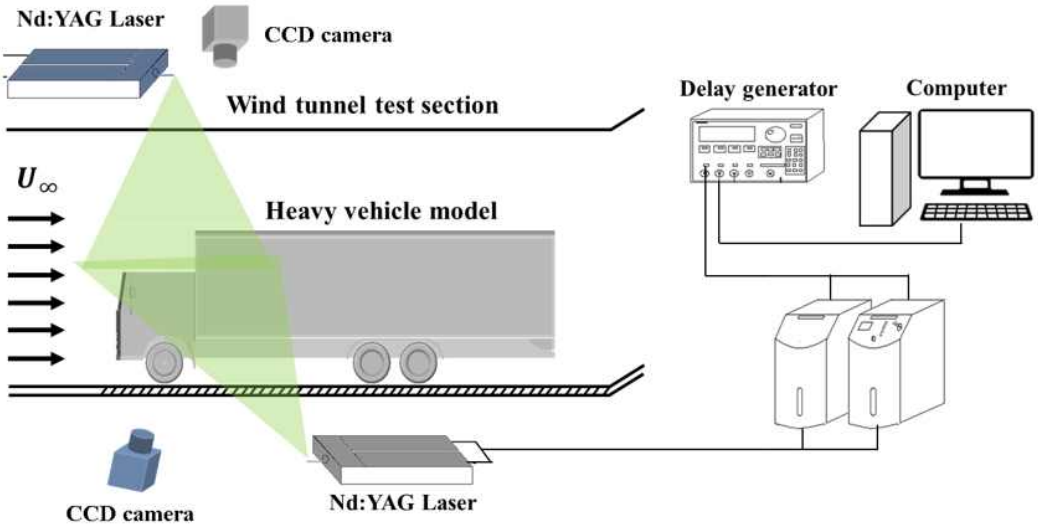
○ PIV 측정 system의 구성은 다음과 같음 <그림 4-7>

- 120mJ Nd:YAG 레이저, 4Kx3K CCD 카메라, 영상처리장치, 동기장치(delay generator), 컴퓨터
- 추적입자로는 올리브 오일 (입자 직경 1-3μm)
- 1mm 두께의 레이저 평면광(light sheet)을 형성시키고 풍동시험부 측면을 통해 화물차 모델(1/15) 전면부 주변을 수평방향으로 조사함
- Two-frame cross-correlation PIV algorithm를 이용하여 차체 전면부 주위 흐름의 속도장 정보를 측정함
- 카메라 노출시간은 0.1ms으로 설정함
- Interrogation window 크기는 64x64 pixels이며 50% overlapping 하였음

○ 일정한 풍속 조건 (U_∞ = 15m/s)에서 실험 수행

- 풍속 조건에 상응하는 레이놀즈 수는 $Re = 1.8 \times 10^5$ 임

○ 세 종류의 CRF 부착 유/무에 따른 15ton 화물차 전면부 주위 유동을 정량적으로 가시화하고 비교 분석함



<그림 11-7> 15ton 화물차 1/15 스케일 축소 모델 및 PIV 실험 set-up의 개략도

다. 실험 대상

□ **실험 모델**

○ 국내에서 가장 많이 사용하는 화물차인 15ton 화물차를 대상으로 공기저항 저감용 부가 장치를 차체에 장착하여 공력 성능을 개선하고자 함

○ 화물차에 걸리는 형상 저항(pressure form drag), 차체 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후미부에서 발생하는 유동박리에 기인한 공기저항을 효과적으로 제어하여 화물차의 공기저항을 크게 저감시키고자 함

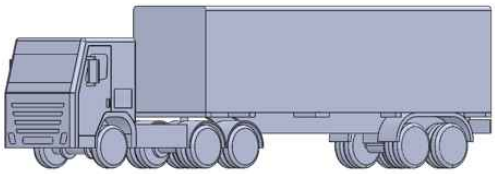
○ 공기역학적인 해석을 통해 화물차의 항력 감소 메커니즘을 밝히고, 저저항 운송체의 공력 설계기술을 개발함

○ 본 연구에서는 flap-type side skirt, LIAD boat tail, advanced bio-inpsired CRF로 구성된full aero. package를 부착하여 차체에 걸리는 항력과 측력을 측정하여 항력계수(C_D) 값과 횡풍측력계수(C_S)을 도출함

- 15ton 화물차의 외형을 실측한 후, 이를 역설계하는 방식으로 3차원 차체 형상을 얻은 후, 풍동시험부의 폐색률이 8% 이하가 되도록 축소비를 결정하고 축소 모형을 제작

○ 실험에 사용한 화물차 모델의 구체적인 형상 및 축소 비율, 폐색률은 <표 4-1>에 나타냄

<표 11-1> 실험 대상 화물차 모델 및 제원

실험 대상 모형	
실험대상	40ft 현대 Trago Xcient
실제크기 (m)	15(L) x 2.6(B) x 4.2(H)
실험모형	
모형 scale	1/8
폐색률 (Blockage ratio)	6.32%

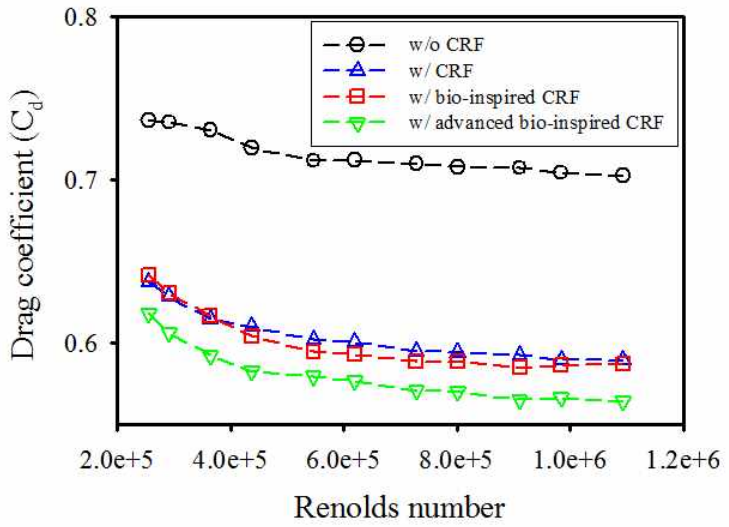
□ 15ton 화물차 모델의 공력특성

○ 공기저항 저감용 장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~ 30m/s 영역에서 변화시켜가면서 차체에 걸리는 공기저항(drag)을 측정하고, 항력계수(C_D) 값을 도출하여 <그림 4-8>에 나타냄

- 측정 결과, 실험 모델에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 풍속의 제곱에 비례하여 증가함
- 25m/s 이상의 풍속 조건에서는 거의 일정한 항력계수 값을 가짐. 풍속 25m/s 에서의 레이놀즈 수(Reynolds number) 값은 9.1×10^5 인데, 이는 임계 레이놀즈 수 보다 큰 값이므로 풍속이 이보다 증가하더라도 항력계수는 변하지 않음.

□ Bio-inspired CRF의 효과

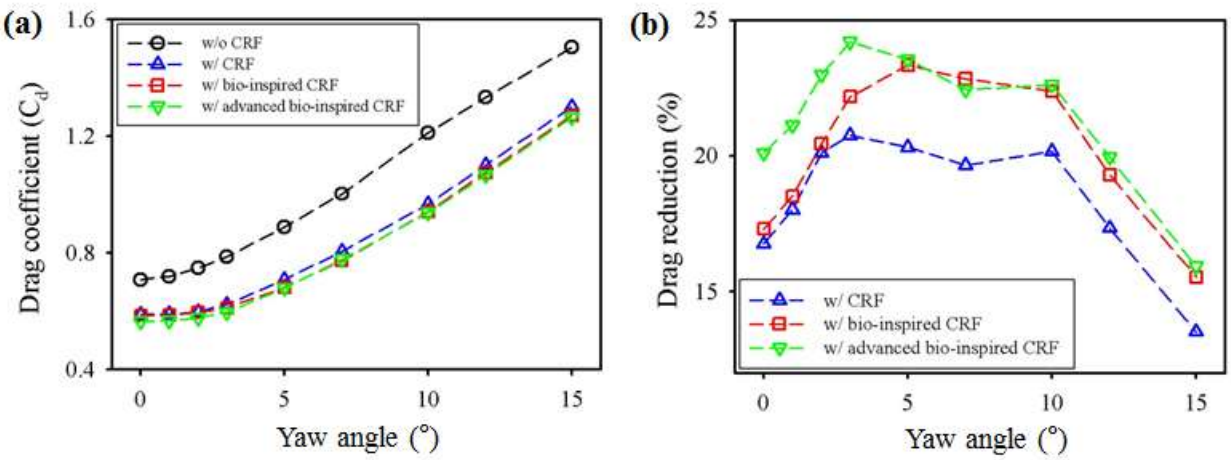
- $Re = 9.1\times10^5$, $\Phi = 0°$ 조건에서 CRFs 부착 유무에 따른 15ton 화물차 모델에 작용하는 항력 및 항력계수 변화를 확인 <그림 4-8>
- 기본형 CRF 장착 시, 기본 15ton 화물차에 비해 항력계수가 16.7%가 저감되어짐
- Bio-inspired CRF 및 advanced bio-inspired CRF 장착 시, 기본 15ton 화물차에 비해 항력계수가 각각 17.3%, 20.1% 저감되어짐



<그림 11-8> Reynolds 수(Re) 변화에 따른 15ton 화물차에 걸리는 항력계수(C_D)의 변화

□ **Yaw angle(Φ) 변화에 따른 15ton 화물차의 공력특성 분석**

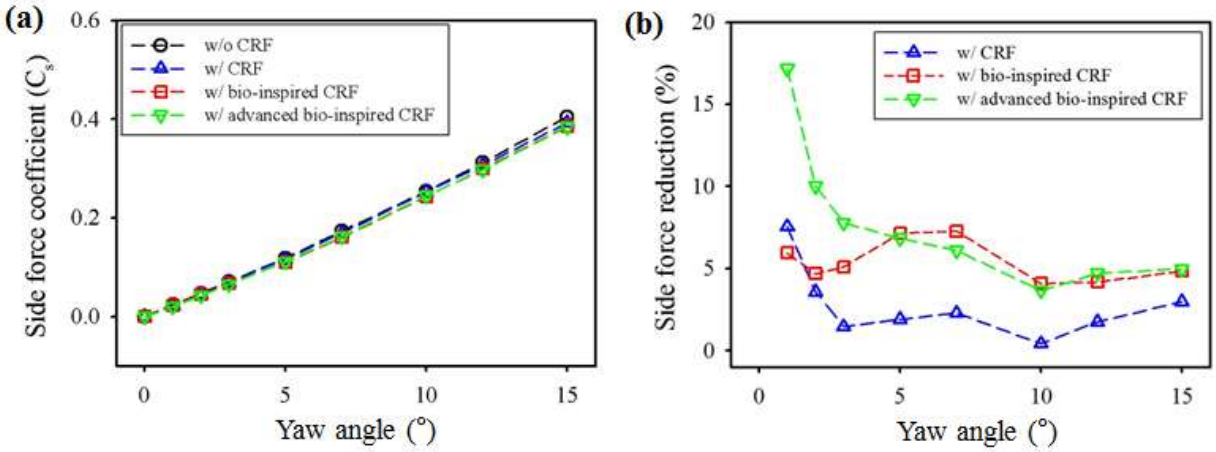
- Yaw angle 변화에 따른 항력계수(C_D)와 항력계수 저감 효과를 <그림 4-7>에 나타냄
- Yaw angle이 증가함에 따라, 차량이 받는 항력계수 값이 증가함. Bio-inspired CRF를 장착한 경우, yaw angle 전 영역에서 기본 모델에 비해 항력계수가 크게 감소함
- Advanced bio-inspired CRF 장착 시, yaw angle 전 영역에서 적어도 16.0% 이상의 항력계수 저감 효과를 보임 특히, Φ = 3° 조건에서 항력계수가 최대 24.2%의 저감되어짐
- Advanced bio-inspired CRF 장착 시, 트랙터 전면부 및 측면부에서 발생하는 유동저항을 감소시켜 15ton 화물차량이 받는 항력 및 항력계수가 현저하게 줄어듦
- 이러한 연구결과는 통해 15ton 화물차량에 advanced bio-inspired CRF 장착 시 연비를 크게 개선시킴을 알 수 있음



<그림 11-9> CRF를 장착한 15ton 화물차의 yaw angle에 따른 항력계수(CD) 및 항력계수 저감 효과

○ Yaw angle 변화에 따른 측력(F_s)과 횡풍측력계수(C_s) 값의 변화

- Yaw angle 변화에 따른 측력의 변화와 횡풍측력계수 값을 나타냄 <그림 2-14>
- Yaw angle이 커짐에 따라, 측풍을 받는 차량의 표면적이 늘어나고, 이에 따라 차체에 걸리는 측력이 증가
- Bio-inspired CRF 부착 시, Φ = 0°~ 3°에서 기본형 CRF와 횡풍측력계수 저감률은 큰 차이를 보이지 않음
- Advanced bio-inspired CRF 부착 시, 횡풍 측력계수는 시험한 yaw angle 전 구간에서 현저하게 줄어듦. 특히, Φ = 1° 조건에서 횡풍측력계수가 17.2% 저감됨

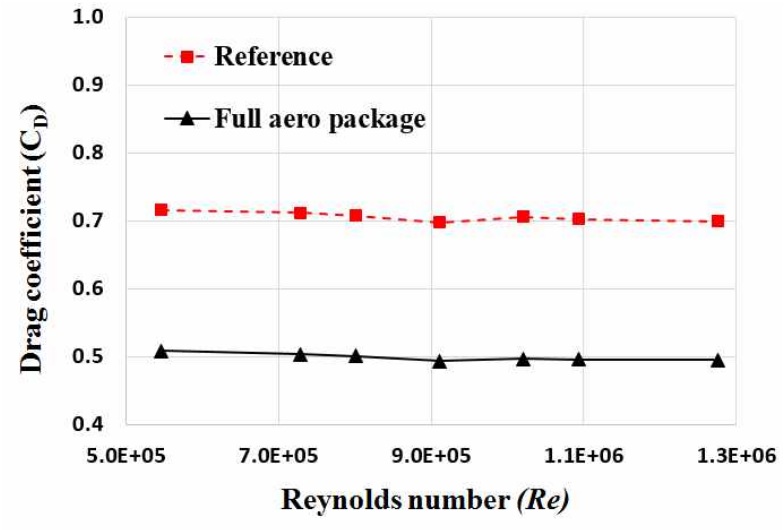


<그림 11-10> CRF를 장착한 15ton 화물차의 yaw angle에 따른 횡풍측력계수(CS) 및 횡풍측력계수 저감 효과

라. 공력 특성

□ **Full aero. package의 효과**

- 1, 2차년도 성과물인 flap-type side skirt, LIAD boat tail과 3차년도 성과물 Advanced bio-inspired CRF를 포함한 full aero. packge를 15ton 화물차 모델에 부착하여 풍동 실험을 수행함
- *Re* 변화에 따른 full aero. package 부착 유무에 따른 15ton 화물차 모델의 항력계수 변화를 확인 <그림 4-11>
- *Re* = 9.1 × 10^5, Φ = 0° 조건에서 full aero. package 부착 유무에 따른 15ton 화물차 모델의 항력 및 항력계수 변화를 확인 <그림 4-9>
- Full aero. package 장착 시, 기본 15ton 화물차에 비해 항력계수가 29.3%가 저감되어짐을 확인
- 이러한 연구결과는 통해 15ton 화물차량에 full aero. package 장착 시 차량의 연비를 크게 향상시킬 수 있음을 나타냄



<그림 11-11> Reynolds number(Re) 변화에 따른 15ton 화물차의 항력계수(CD)의 변화

마. 유동가시화 실험을 통한 공기역학적 성능 평가

□ 15ton 화물차 모델에 작용하는 공기 저항

- 15ton 화물차 모델 전면부에서 발생하는 공기저항은 주로 트랙터와 컨테이너의 높이 차(단차)에 기인한 유동박리로 인하여 발생
- 트랙터 전면부 모서리에서 유동박리로 인하여 트랙터 상부에 생성되는 재순환 영역(recirculation region)에 기인한 압력강하로 항력 발생
- 트랙터 측면부에서 발생하는 유동 박리로 인해 공기저항 발생

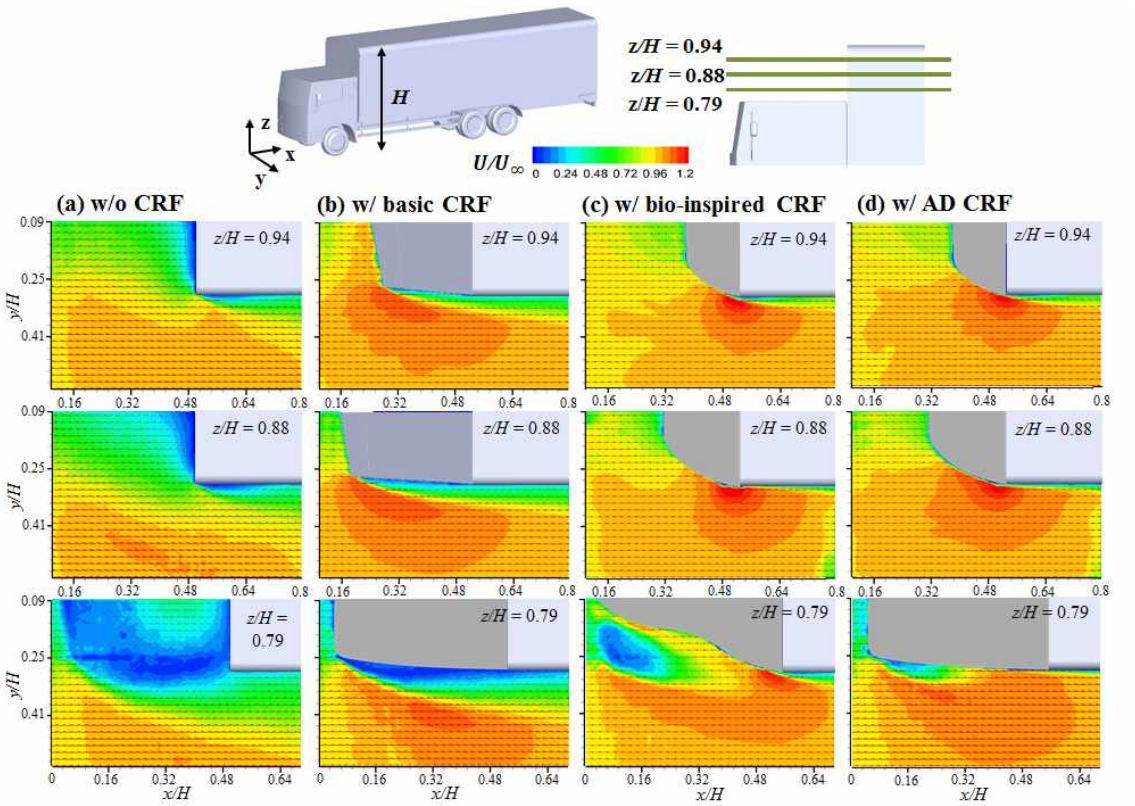
○ 이전 연구(1, 2차년도)에서 flap-type side skirt, LIAD boat tail 부착 유무에 따른 하부 및 후단부의 유동장을 항력저감 메커니즘과 연관하여 분석함

○ 따라서, 15ton 모델의 full aero. package를 구성하는 새로운 부착물인 advanced bio-inspired CRF 부착 유무에 따른 화물차 전면부의 항력저감 유동구조를 살펴보고자 함

○ CRF 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변 속도장 비교 (z-plane)

- CRF가 장착되지 않을 경우, 컨테이너 앞 쪽 영역에서 재순환유동(recirculation flow)이 형성됨
- 기본형 CRF 장착 시, CRF 측면부 모서리에서 유동박리가 발생하고 이에 기인한 운동량 손실(momentum deficit)이 발생함
- Bio-inspired CRF 장착 시, 위쪽 단면(z/H =0.94, 0.88)에서는 운동량 손실이 감소하는 반면, 아래쪽 단면(z/H =0.79)에서는 유동박리에 기인한 재순환영역이 형성되어 운동량 손실이 발생함
- Advanced bio-inspired CRF 장착 시, CRF 측면부에서 생성된 유동박리에 기인한 운동량 손실(momentum deficit)이 현저하게 감소함

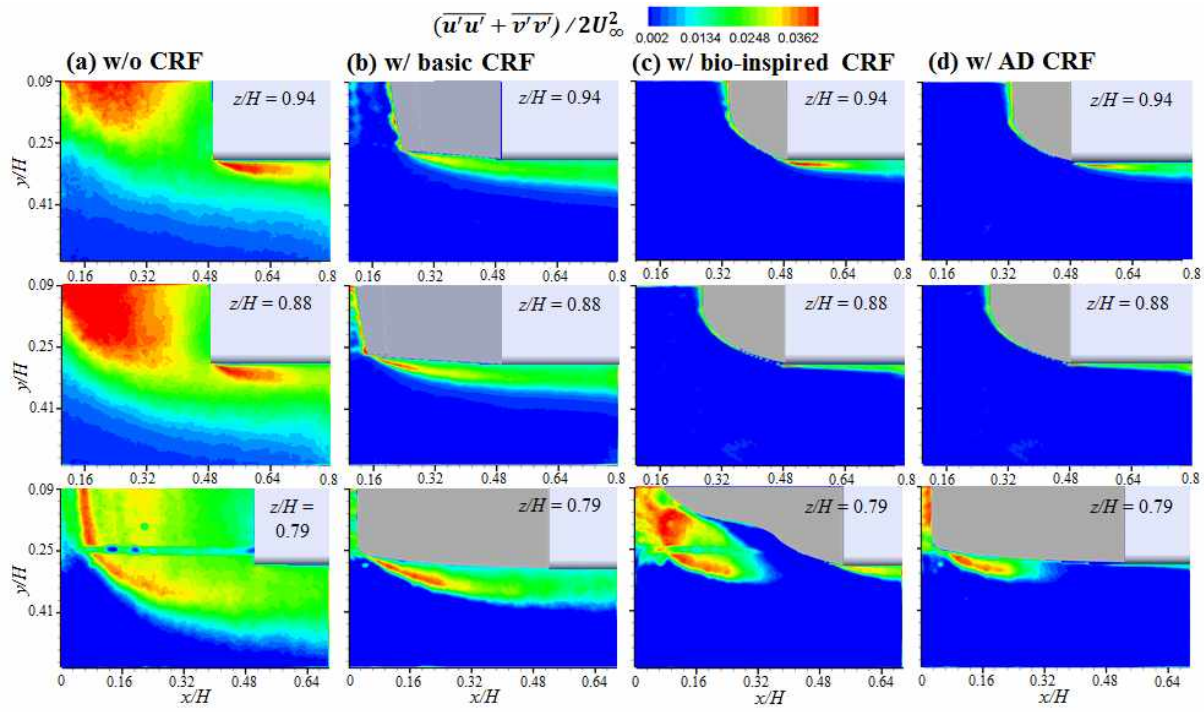
- 트랙터 및 CRF 측면부 주위 유동의 운동량 감소로 항력계수가 저감되는 효과로 나타남



<그림 11-12> 15ton 화물차에 부착된 CRF 측면부 주위에 형성된 유동의 속도장 비교. (a) CRF 미부착, (b) basic CRF 부착, (c) bio-inspired CRF 부착, (d) advanced bio-inspired CRF 부착

○ CRF 장착 유무에 따른 15ton 화물차 주변 난류 운동에너지(TKE) 비교 (z-plane)

- CRF가 장착되지 않은 경우, 컨테이너 전방의 넓은 영역에서 상대적으로 큰 난류 운동에너지값을 가짐
- 기본형 CRF 장착 시, CRF 측면부 모서리에서의 유동박리에 기인하여 넓은 영역에서 난류 운동에너지 값을 가짐.
- Bio-inspired CRF 장착 시, 위쪽 단면(z/H =0.94, 0.88)에서는 난류 운동에너지가 감소하는 반면 아래쪽 단면(z/H =0.79)에서는 유동박리에 기인한 재순환영역이 생성되어 큰 난류 운동에너지값을 가짐
- Advanced bio-inspired CRF 장착 시, CRF 측면부에서 발생하는 유동박리에 기인한 난류 운동에너지가 모든 단면에서 현저하게 감소함
- 트랙터 및 CRF 측면부위에서의 난류 운동에너지 감소는 항력계수 저감 효과로 나타남



<그림 11-13> 15ton 화물차 모형에 부착된 CRF 측면부 주위에 형성된 유동의 난류운동에너지(TKE) 비교. (a) CRF 미부착, (b) basic CRF 부착, (c) bio-inspired CRF 부착, (d) advanced bio-inspired CRF 부착

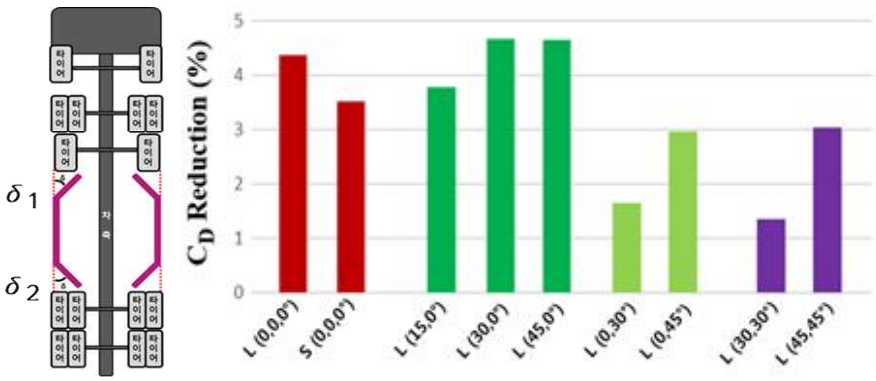
제3절. 40ft 화물차 모델 trailer full aero package의 설계

□ Flap-type side skirt

○ Side skirt는 차량 하부에서 발생하는 와류의 생성을 억제함. 특히, 타이어와 스커트 사이의 유동 흐름을 막아 공기저항이 효과적으로 줄어듦

○ Flap-type side skirt는 타이어 후방 유동을 보다 효과적으로 제어할 수 있는 최적의 형상으로 설계하였음. 차체 안쪽으로 일정한 각도(δ)로 꺾여 들어온 flap을 부착한 side skirt의 경우, 들임각(δ_1=30°, δ_2=0°)에 따라 공기저항 저감 효과가 표준형 side skirt보다 개선되었음을 확인 <그림 4-1>

○ Trailer full aero. package를 구성하는 하부 부착물로 최대 공기저항 저감 효과를 유도하는 flap-type side skirt(δ_1=30°, δ_2=0°)를 선정하여 장착함



<그림 11-14> Side skirt의 설계와 그에 따른 항력 저감 효과 비교

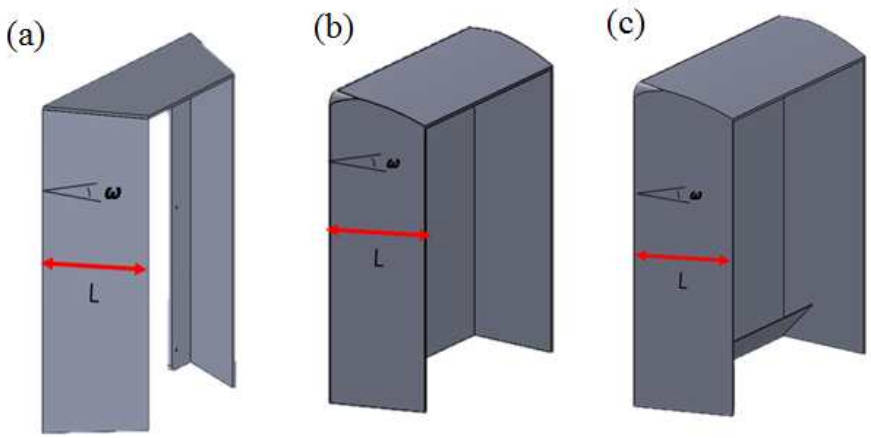
□ LIAD(lower inclined air deflector) boat tail

○ 차체 하부에서 발달하는 와류의 영향을 감소시키고, 차체 후미부에 형성된 저압 영역 (low-pressure zone)의 압력값을 높이기 위한 대책의 일환으로 후미부 아래쪽에 스포일러 형태의 LIAD를 추가로 부착함

○ 차량 후미부 아래쪽에 스포일러 형태로 위로 살짝 기울어진 LIAD(lower inclined air deflector)를 추가로 부착하여 차체 하부 유동을 효과적으로 제어하여 차체 후면부에 형성된 낮은 압력을 높이고자 함

○ LIAD의 길이는 boat tail 길이의 1/2, 화물차의 뒷면과 이루는 각도는 30~ 60°로 설정함

○ 기존 boat tail의 상부면에는 차체 후미부와 약간의 높이 차가 존재하여 유동 박리(flow separation)가 boat tail의 끝단보다 약간 전방 위치에서 발생함. 이러한 문제점을 개선하기 위해 이러한 높이 차이에 기인한 공기저항 형성 가능성을 없애고 후미부에서 유동이 부드럽게 이어지도록 하는 gap repair 구조물 설치 <그림 4-2>



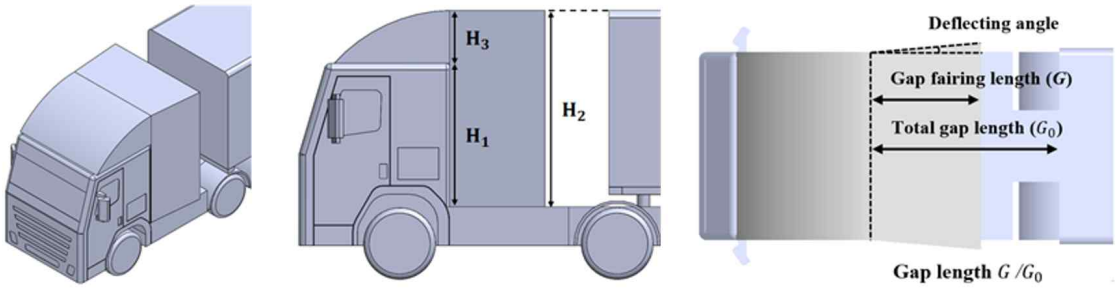
<그림 11-15> Boat tail 설계. (a) 표준형 boat tail, (b) gap repair가 추가된 boat tail, (c) LIAD가 추가된 boat tail

□ Gap fairing

○ 40ft 화물차 모델의 경우, 트랙터와 트레일러 사이의 공간에 기인하여 공기저항이 크게 발생. 따라서, 화물차 차체 형상에 최적화된 gap fairing을 설치하고 효과적인 유동제어를 기술을 도입하여 공기저항을 줄이는 것이 중요함

○ 화물차의 주행안정성과 시야 확보 등을 고려하여 gap fairing의 길이와 각도를 최적화하고, 트랙터와 트레일러의 높이 차에 기인하여 발생하는 항력을 저감시키기 위해 cab-roof fairing 구조를 포함한 gap fairing을 설계함

○ Deflecting angle Θ=5°, gap length G/G_0 =0.6 일 때, 항력계수(C_D)가 최소값을 가지며, gap fairing을 부착하지 않은 기본 모델에 비해 16.5%의 항력 계수 저감 효과를 보임

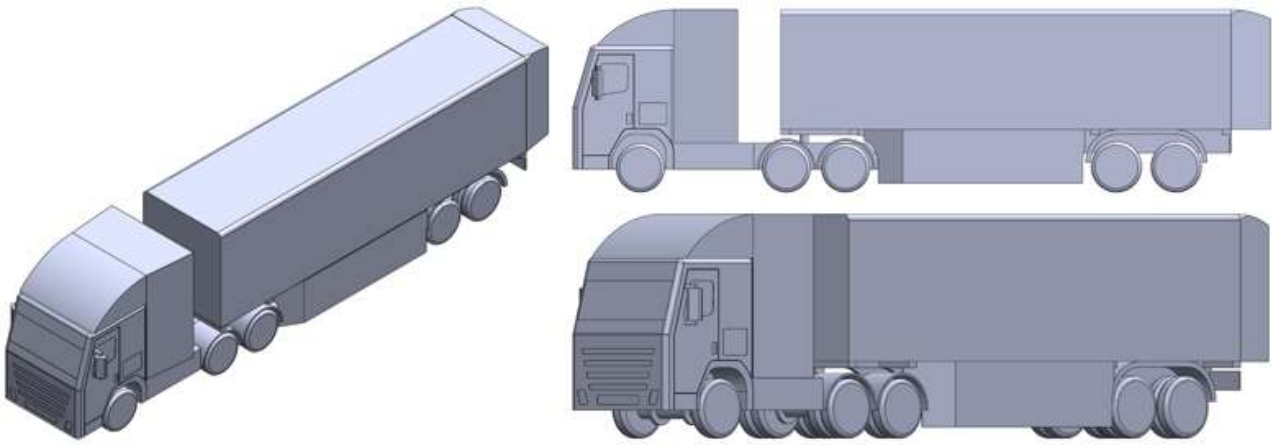


<그림 11-16> Gap fairing의 높이, 길이 및 각도 설계

□ Trailer full aero. package

○ 그 동안 개발되어진 항력저감 장치들(flap-type side skirt, LIAD boat tail, gap faring)을 부착하여 가장 우수한 공기저항 저감 효과를 얻고자 함 <그림 4-3>

○ 화물차 전면부와 함께 트랙터와 트레일러 사이 공간에서 발생하는 공기저항, 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후면부에서 발생하는 공기저항을 효과적으로 제어하여 화물차 차체에 전체적으로 작용하는 공기저항을 저감시키는 것을 목표로 함



<그림 11-17> 40ft 화물차 모델에 trailer full aero. package를 부착한 모델

제4절. 40ft 화물차 모델 trailer full aero. package의 공기역학적 성능 평가

1. 풍동 실험을 통한 항력 개선 및 주행 안정성 효과 분석

가. 실험 장치

□ POSTECH 대형 아음속 풍동

○ 1995년 준공된 포스텍 대형 아음속 풍동은 유체역학적 기본 현상을 포함하여 제반 응용유체 문제들을 연구할 수 있는 다목적 아음속 풍동 <그림 4-4>

○ 자동차와 기차와 같은 운송체의 공력 실험에 적합

○ 폐쇄형(closed circuit) 구조로 전체 크기는 높이 6m, 폭 14m, 길이 37m임 <그림 11-18>

○ 시험부(test section)의 크기는 높이 1.5m, 폭 1.8m, 길이 4.3m 임

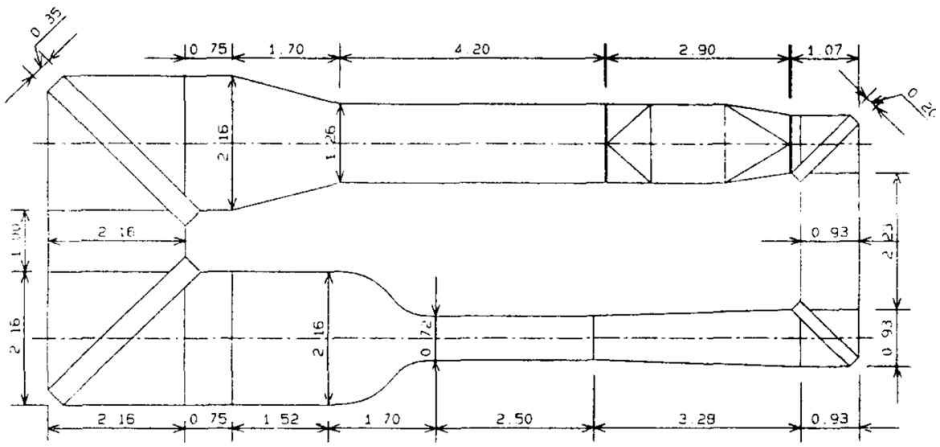
○ 최저풍속: 5m/s, 최대풍속: 75m/s

○ 수축비: 9:1

○ 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%, 균일도 (flow uniformity)는 0.25%로 운송체의 공력 실험에 적합한 풍동임



<그림 11-18> POSTECH 아음속 풍동 시험부 및 외관



<그림 11-19> POSTECH 아음속 풍동 도면

□ 공력 측정용 external balance

○ 화물차 차체에 걸리는 힘과 모멘트와 같은 공력을 측정하기 위해 차체에 작용하는 풍하중(wind load)을 정밀하게 측정함

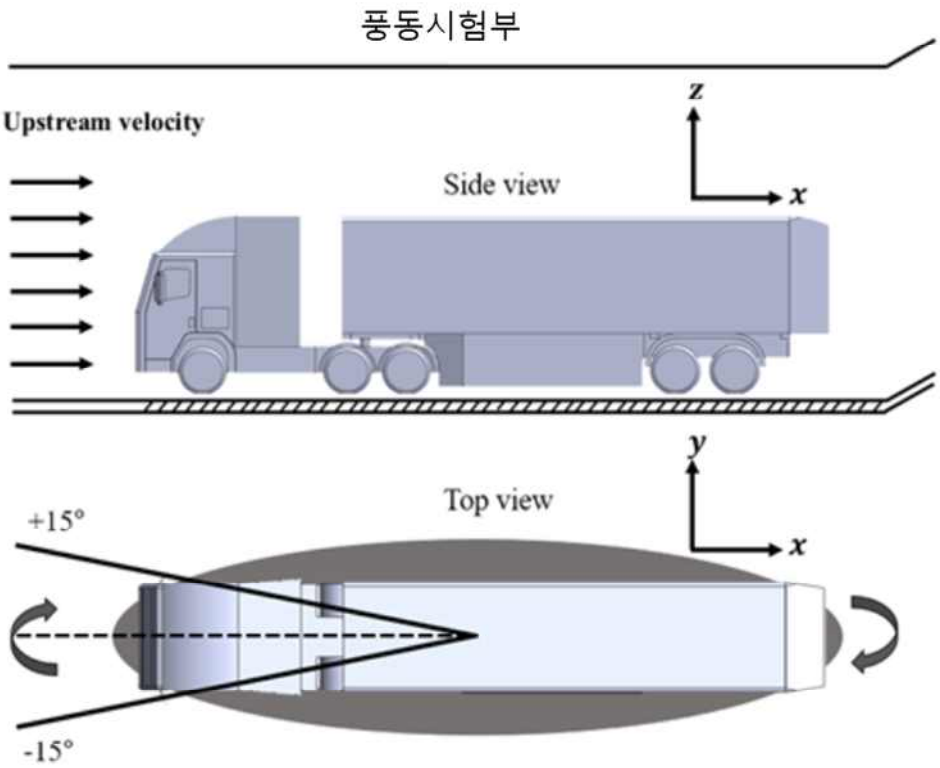
○ 포스텍 아음속 풍동에 설치된 external balance는 독일항공우주연구청(DLR) Braunschweig 분소에서 자동차 공력 측정용으로 제작한 7-component balance임

○ 측정범위 및 분해능

- 측정범위: X=±500N, Mx=±500Nm, Y=±1000N, My=±600Nm, Z=±4000N Mz=±200Nm
- 정확도: 0.2% of full scale dX=1N, dY=2N, dZ=8N

○ 분해능: 0.01N 이하

○ External balance 아래에 turn table을 설치하여 차체에 측풍이 불어올 경우에 대한 풍동 실험도 가능함 <그림 4-6>



<그림 11-20> Yaw angle Φ 조절을 위한 턴 테이블 개략도

나. 실험 대상

□ **실험 모델**

○ 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 화물차 중 하나인 현대 TRAGO 40ft 화물차 모델을 대상으로 trailer full aero. package를 차체에 장착하여 공력 성능을 시험함

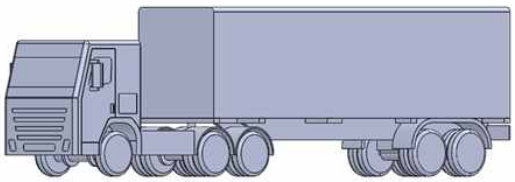
○ 화물차에 걸리는 형상저항(form drag), 차체 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 차체 후미부에서 발생하는 유동박리에 기인한 공기저항을 효과적으로 제어함으로써 화물차의 공기저항을 저감시키고자 함

○ 공기역학적인 해석을 통해 화물차의 항력 감소 메커니즘을 밝히고, 저저항 운송체의 공력 설계기술을 개발하고자 함

○ 본 연구에서는 trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차에 걸리는 항력(F_D)과 측력(F_S)을 측정하여 항력계수(C_D)와 횡풍 측력계수(C_S)를 도출함

- 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 현대 TRAGO 40ft 화물차의 외형을 실측하여 이를 역설계하는 방식으로 3차원 형상을 얻은 후, 풍동시험부의 폐색률(blockage ratio, 풍동의 단면적에 대해 모형의 단면적이 차지하는 비율)이 8% 이하가 되도록 축소비를 정한 후 축소 모형을 제작

○ 실험대상 차량의 구체적인 형상 및 축소 비율, 폐색률은 <그림 4-7>에 나타냄

실험 대상 모형	
실험대상	40ft 현대 Trago Xcient
실제크기(m)	15(L) x 2.6(B) x 4.2(H)
실험모형	
모형 축소 scale	1/8
폐색률 (Blockage ratio)	6.32%

<그림 11-21> 실험 대상 화물차 모델 및 제원

다. 공력 특성

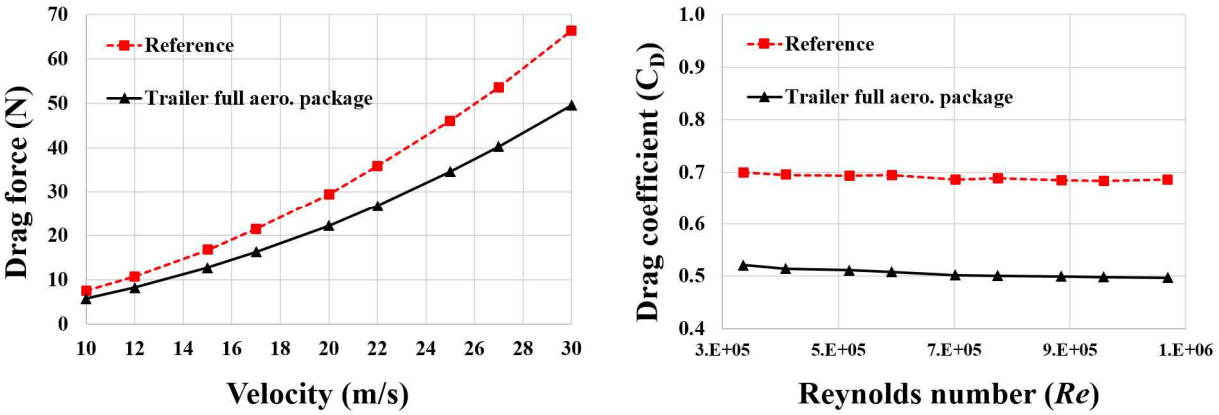
□ Trailer full aero package 모델의 공력특성

○ 공기저항저감용 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차체를 대상으로 풍속을 10~30m/s 영역에서 변화시켜가며 차체에 가해지는 공기 저항(drag)의 크기를 측정하고, 항력계수(C_D) 값을 도출하여 <그림 4-8>에 나타냄

- 측정 결과, 실험 모델에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 풍속의 제곱에 비례하여 증가함
- 25m/s 이상의 풍속 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인. 풍속 25m/s 에서의 레이놀즈 수(Reynolds number) 값은 9.1×10^5 인데, 이는 임계 레이놀즈 수 보다 큰 값이므로 풍속이 이보다 증가 하더라도 항력계수는 변하지 않음.

□ Trailer full aero package의 효과

- $Re = 9.1 \times 10^5$, $\Phi = 0°$ 조건에서 trailer full aero. package 부착 유무에 따른 40ft 화물차 모델의 항력 및 항력계수 변화를 확인 <그림 4-8>
- Trailer full aero. package 장착 시, 기본 40ft 화물차에 비해 항력계수가 27.0%가 되어짐을 확인



<그림 11-22> 풍속 변화에 따른 40ft 화물차의 항력(F_D) 및 항력계수(C_D)의 변화

라. 주행 안정성 평가

□ **주행안정성 평가 실험 방법 및 모형**

○ 화물차는 차체 폭에 비해 길이가 길어 측풍의 영향이 크게 받고, 유동에 기인한 진동(flow-induced vibration) 때문에 주행 안정성이 떨어질 수 있음

○ 측풍이 화물차를 불어오는 경우를 모사하기 위해 풍동 바닥면에 설치된 turn table을 이용하여 yaw angle(Φ)을 0°~ 15° 까지 변화시켜가면서 차체에 걸리는 공력특성 변화를 분석함

○ 풍속을 임계 레이놀즈 수(Reynolds number) 보다 큰 25m/s (=90km/h)로 고정시키고, 3회 반복 측정한 데이터를 통계 처리하여 평균값을 사용하였음

○ 화물차에 걸리는 항력(F_D), 항력계수(C_D), 측력(F_S), 횡풍 측력계수(C_S)는 다음과 같이 정의하였음

$$F_D = F_x \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_y \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

$$F_S = F_y \times \cos(\Phi\frac{\pi}{180}) + F_x \times \sin(\Phi\frac{\pi}{180})$$

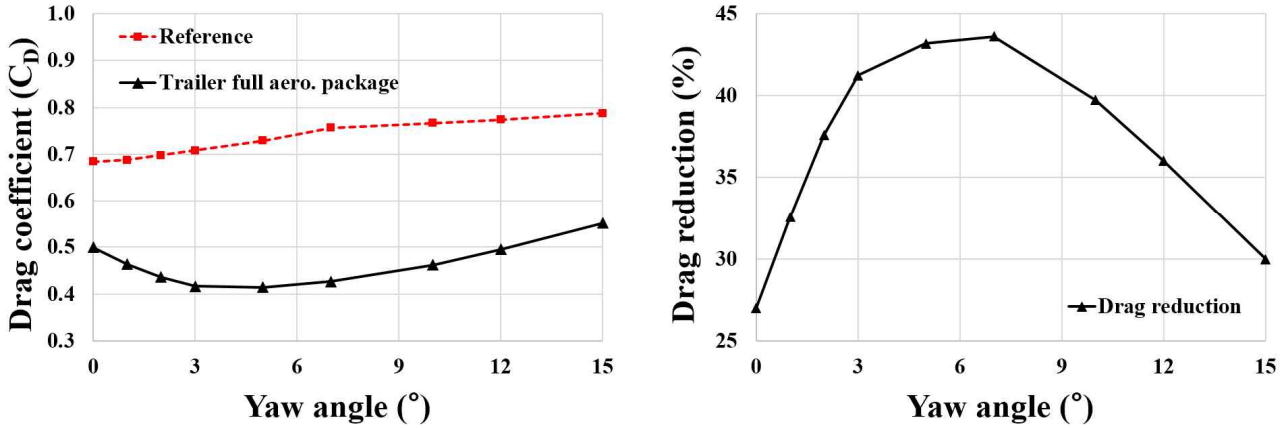
$$C_s = \frac{|F_S|}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

□ **Yaw angle(Φ) 변화에 따른 40ft 화물차의 공력특성 분석**

- Trailer full aero. package는 최대 항력 저감 효과를 가져오는 flap-type side skirts (0°, 30°), LIAD boat tail, gap fairing 세 가지 부착물을 화물차에 장착한 경우를 나타냄
- Yaw angle 변화에 따른 항력계수(C_D)와 항력계수 저감 효과를 나타냄 <그림 4-7>
- Yaw angle이 증가함에 따라, 차량이 받는 항력계수 값이 증가하며, trailer full aero. package를 장착한 경우 yaw angle 전 영역에서 reference 모델에 비하여 항

력계수가 감소함

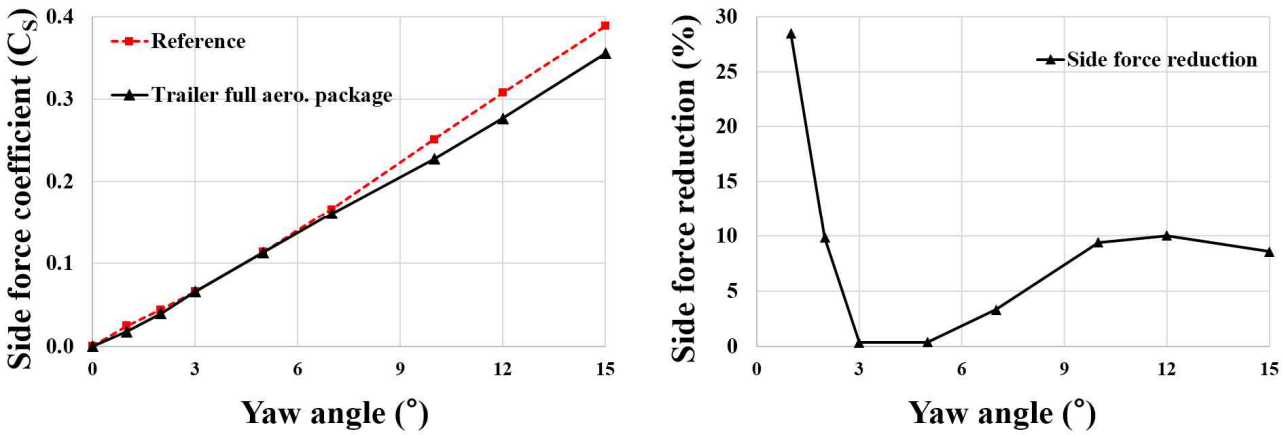
- Yaw angle 전 영역에서 최소 27.0%의 항력계수 저감 효과를 보임 특히, Φ = 7°조건에서 최대 43.2%의 항력계수 저감효과를 보임
- Trailer full aero. package 장착 시, 트랙터 상부, 하부, 후미부에서 발생하는 유동저항을 감소시켜 40ft 화물차량이 받는 항력 및 항력계수가 현저하게 줄어듦
- 이러한 연구결과는 통해 40ft 화물차량에 trailer full aero. package 장착 시 차량의 연비를 크게 향상시킬 수 있을 나타냄



<그림 11-23> Trailer full aero. package를 장착한 40ft TRAGO 화물차의 yaw angle에 따른 항력계수(CD) 및 항력계수 저감 효과

○ Yaw angle 변화에 따른 측력(F_s)과 횡풍 측력계수(C_s) 값의 변화

- Yaw angle 변화에 따른 측력의 변화와 횡풍 측력계수 값을 나타냄 <그림 2-14>
- Yaw angle이 커짐에 따라, 측풍을 받는 차량의 표면적이 늘어나고, 이에 따라 차체에 걸리는 측력이 증가
- Trailer full aero. package 장착 시, 기본 차량에 비해 바람에 바로 노출된 표면적이 증가하여 횡풍 측력은 증가하지만, 횡풍 측력계수는 감소함
- 횡풍 측력계수는 시험한 yaw angle 전 구간에서 현저하게 줄어듦. 특히, Φ =1° 조건에서 횡풍 측력계수가 28.5% 저감 되어짐



<그림 11-24> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 yaw angle에 따른 횡풍 측력계수(C_S) 및 횡풍 측력계수 저감 효과

2. 수치해석을 통한 항력 개선 및 주행 안정성 효과 분석

가. 수치해석 방법

□ 큰 에디 모사 (large-eddy simulation)

○ 지배방정식 및 수치해석 방법

- 유체의 운동량 및 질량 보존에는 다음과 같은 Navier-Stokes equation을 이용하였음

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\nu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}))$$

○ 지배방정식

- 위의 Navier-Stokes equation을 필터링하여 큰에디(large-eddy)는 직접 계산하고, 작은 스케일의 에디는 모델링

- Filtered Navier-Stokes equation ($\bar{}$:필터 연산)

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i}\,\overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\nu(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i})) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j},$$

$$(\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i}\,\overline{u_j})$$

○ 수치해석 기법

- Incompressible LES solver
- Unstructured solver
- Fully-implicit fractional method에 기반한 시간 전진
- Crank-Nicolson method를 이용한 시간 차분
- 2nd-order central difference scheme을 이용한 공간 차분
- Dynamic Vreman global equlibrium subgrid-scale (SGS) model

□ 수치해석 도메인

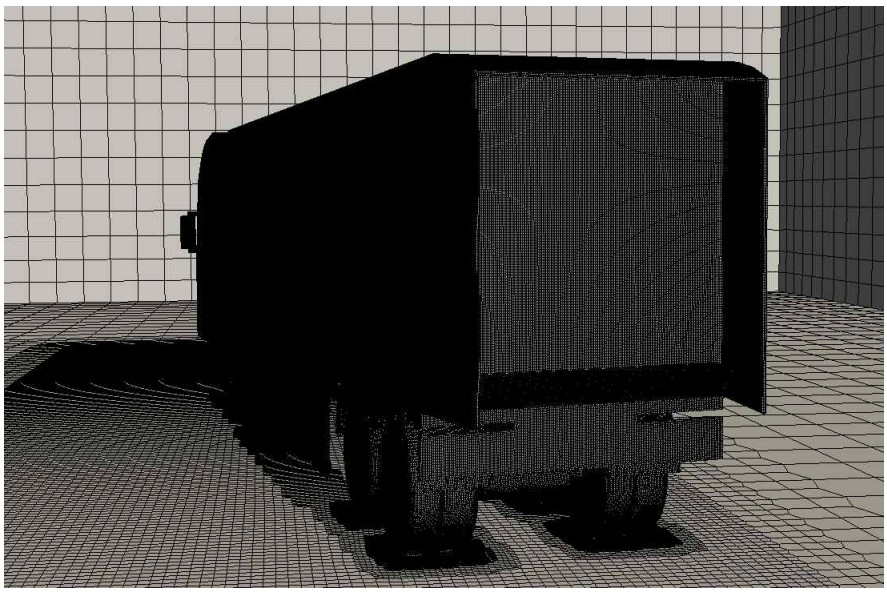
○ 수치해석 도메인 생성

- 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행
- Local refinement 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 1300-1600

만 개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

○ 경계조건 및 상수

- Inlet velocity: 90km/h (=25m/s)
- Outlet: local acceleration + convection = 0
- Wall(풍동 외벽, 화물차 표면): no-slip condition
- Kinematic viscosity = 1.568 x $10^{-5}m^2/s$
- CFL(무차원 시간간격) = 3.0



<그림 11-25> 주행 안정성 평가에 사용되어진 수치해석 격자
(40ft 화물차)

□ **격자 생성**

○ <표 4-1>과 같은 셀 개수를 가지는 계산 격자 생성

<표 11-2> 수치해석용 계산격자의 셀 개수

	40ft 화물차 모델
셀 개수	약 2000만

○ 길이 34.4m, 높이 12m, 폭 24.4m 인 실제 크기의 수치해석 풍동 생성 및 계산 수행

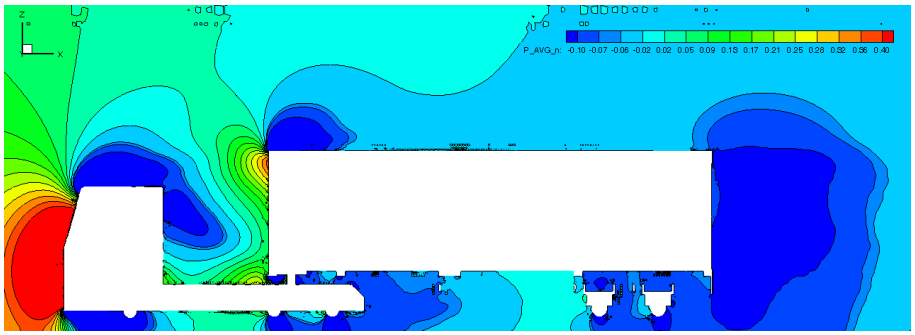
- Local refinement의 방법으로 화물차량 부근 격자(grid) 조밀도를 높임. 약 2000만 개 내외의 셀을 갖는 격자 생성

나. 유동장 분석

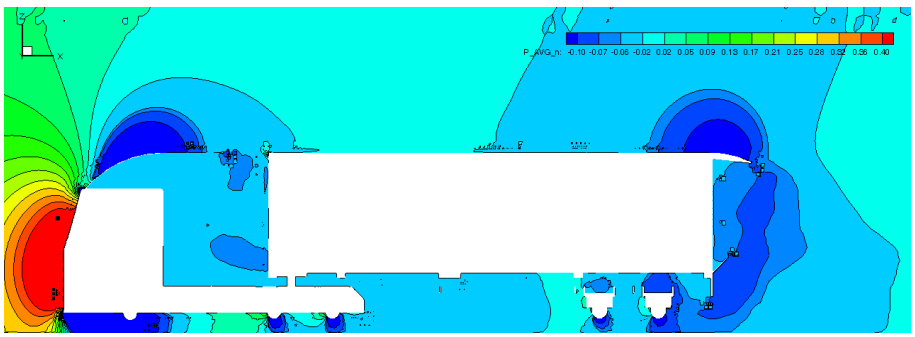
□ **Trailer full aero. package을 장착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동구조 변화 분석**

○ Trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 압력장 비교 **(y-plane, y=0.0)**

- Trailer full aero. package를 장착한 경우, 화물차 전면부의 gap fairing과 화물차 후면부의 boat tail에 기인하여 트레일러 전·후면부에서의 압력강하가 줄어듦
- Gap fairing의 설치로 인하여 트랙터와 트레일러사이의 gap에서 발생하는 압력강하가 줄어듦
- 40ft 화물차의 트랙터의 전면부와 후면부, 트레일러의 전면부와 후면부에 걸리는 압력차이가 감소하여 화물차에 가해지는 압력분포에 의한 항력(form drag)이 감소함



<그림 11-26> Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)



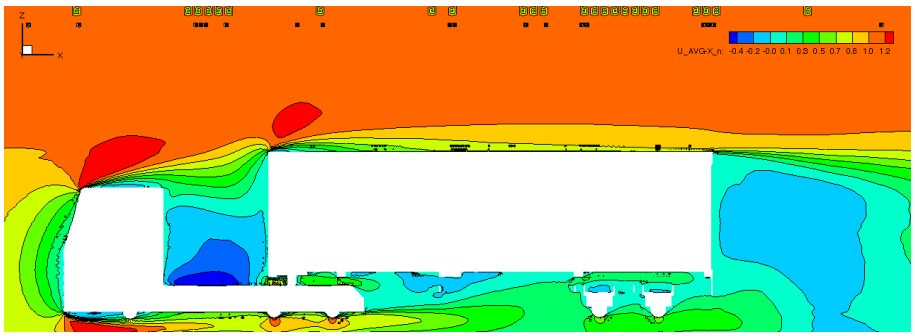
<그림 11-27> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)

○ Trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변의 속도장 비교 **(y-plane, y=0.0)**

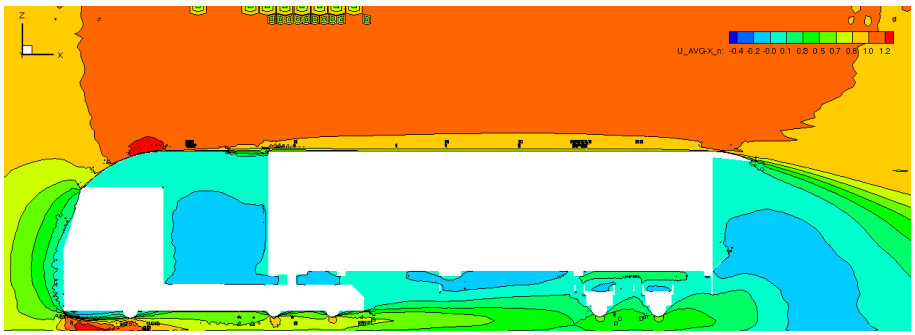
- Trailer full aero. package를 장착하면, 화물차의 후방 영역에 형성되는 재순환영역(recirculation region)이 크게 감소함을 확인할 수 있음
- 화물차를 지나는 유동이 gap 부근과 트레일러 후방 영역에서 유동의 유선이 smooth 하게 형성되어짐.
- 이에 따라 trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차 차체 주위에 형성되는 유선이 공기역학적으로 우수한 패턴을 가지게 되어 유동의 운동량 손실(momentum

deficit)이 크게 감소함

- 이는 40ft 화물차를 지나는 유동이 화물차에 가하는 항력이 현저하게 감소되어짐을 의미함



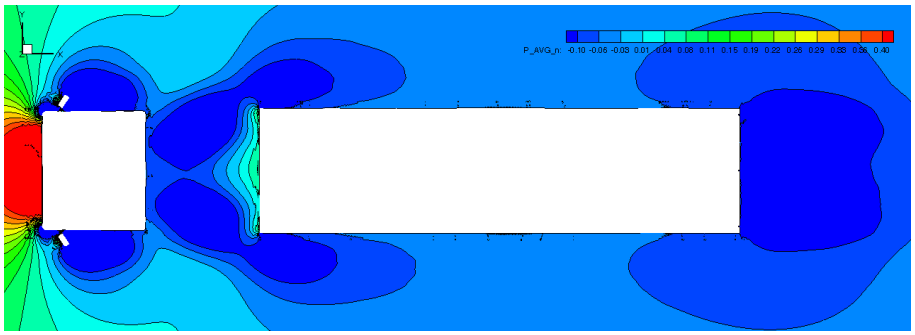
<그림 11-28> Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)



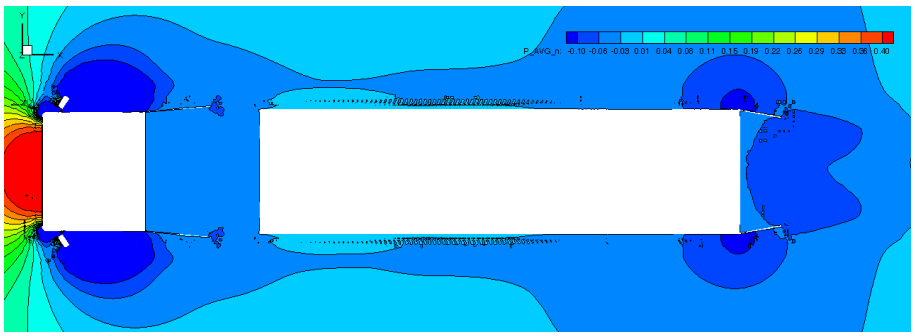
<그림 11-29> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)

○ Trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변의 압력장 비교 **(z-plane, z=2.0)**

- Trailer full aero. package 장착하면, 화물차 후면에서의 압력 강하가 줄어듦
- Trailer full aero. package를 장착함에 따라 트랙터와 트레일러 사이 공간(gap)에서 트레일러의 전면에 압력이 크게 낮아지고 트레일러 후면 압력이 현저하게 높아짐
- 화물차의 후면에 걸리는 압력 강하가 줄어들어, 차체 전면부와 후면부의 압력차이가 감소되어 압력분포에 기인한 형상저항(form drag)이 감소



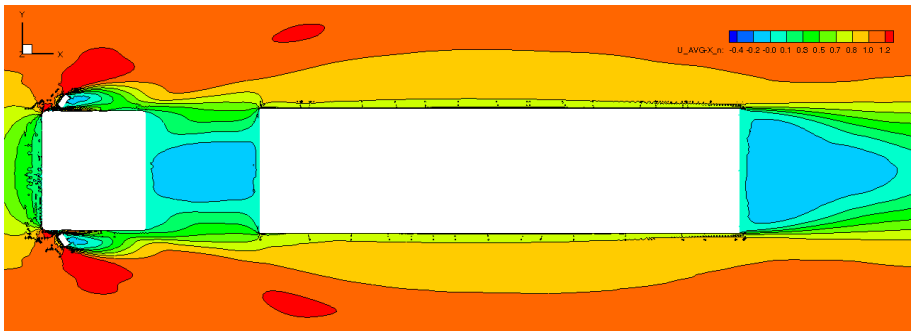
<그림 11-30> Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0)



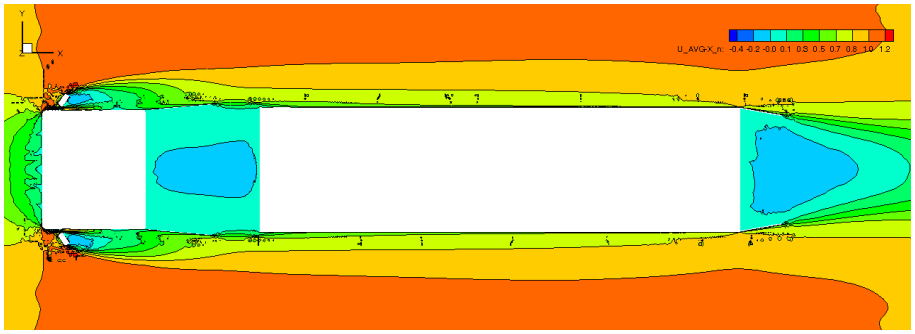
<그림 11-31> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0)

○ Trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 속도장 비교 **(z-plane, z=2.0)**

- Trailer full aero. package 장착하면, boat tail을 부착한 화물차의 후방 영역에서 유동 재순환 영역(recirculation region)이 감소
- 따라서 유동이 보유하고 있는 운동량 손실(momentum deficit)이 감소하며 이는 boat tail을 지나는 유동으로 인하여 화물차에 가해지는 항력이 감소함을 의미함



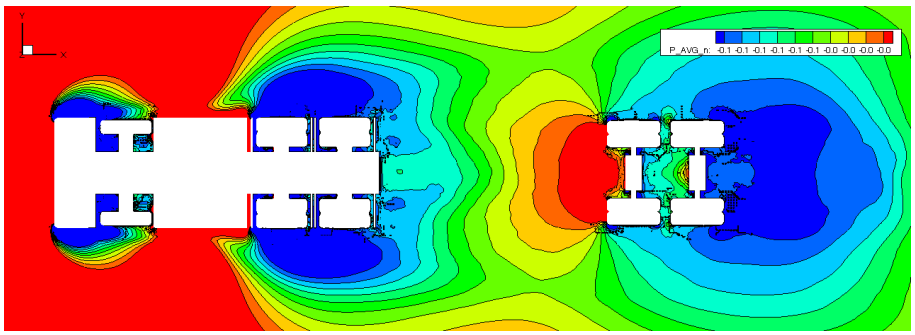
<그림 11-32>Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)



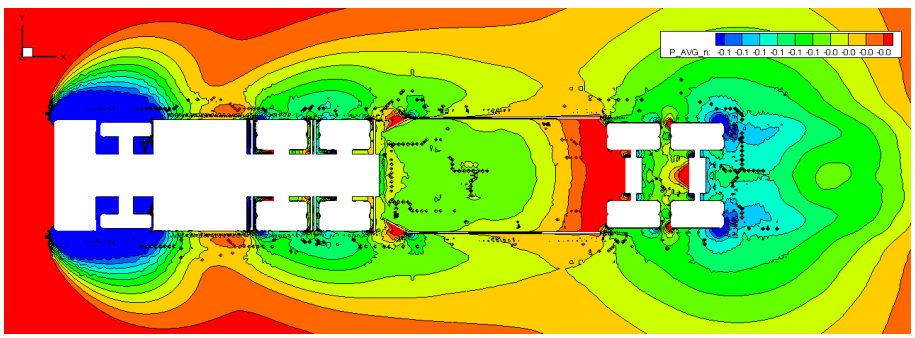
<그림 11-33> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)

○ Trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 압력장 비교 **(z-plane, z=0.33)**

- Trailer full aero. package 장착하면, side skirt를 부착한 영역의 근방인 화물차의 바퀴와 샤프트 주변부의 압력차가 감소
- 화물차의 하부 장치에 가해지는 압력차가 감소하여 화물차에 가해지는 압력으로 인한 항력(form drag)이 감소



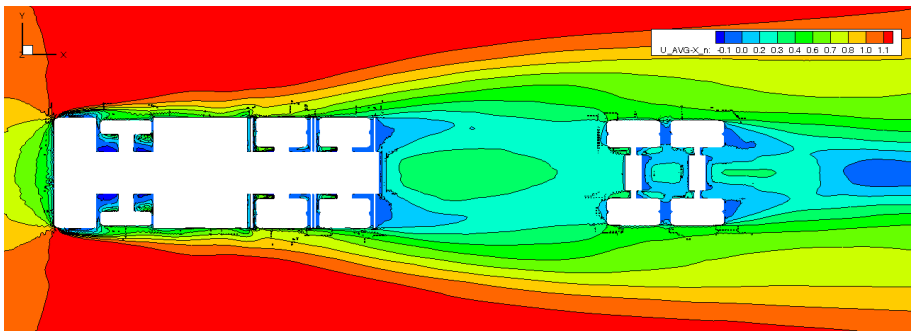
<그림 11-34>Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 하부유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=0.33)



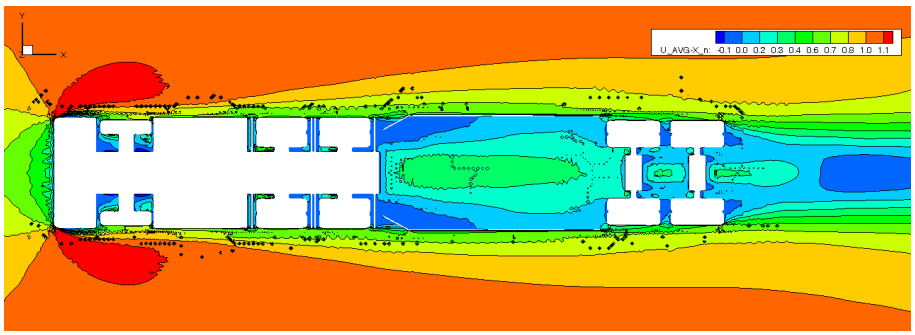
<그림 11-35> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 하부유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=0.33)

○ Trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변의 속도장 비교 **(z-plane, z=0.33)**

- Trailer full aero. package 장착하였을 때, 화물차 후방 영역에서 유동의 시간평균 유속이 증가함
- 이에따라 차체를 흘러지나는 유동의 운동량 손실(momentum deficit)이 감소하고, 화물차에 가해지는 항력이 감소함을 의미



<그림 11-36> Trailer full aero. package가 부착되지 않은 40ft 화물차 기본 모델의 하부유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=0.33)



<그림 11-37> Trailer full aero. package를 장착한 40ft 화물차의 하부유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=0.33)

다. 주행 안정성 평가

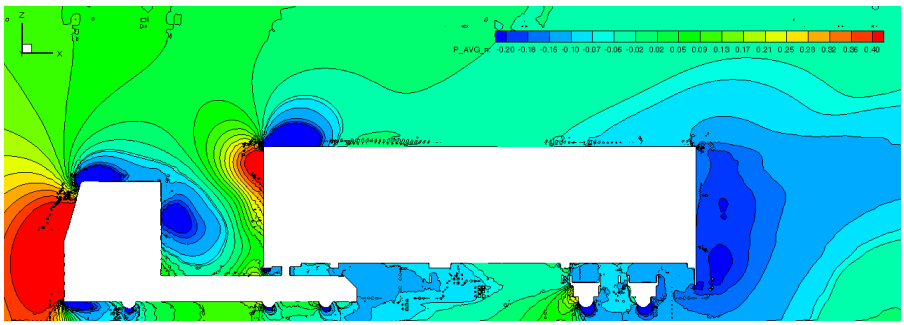
□ 40ft 화물차 주변 유동장 분석

○ 측풍 조건에서, trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 압력장 비교 **(Φ=10°, y=0.0)**

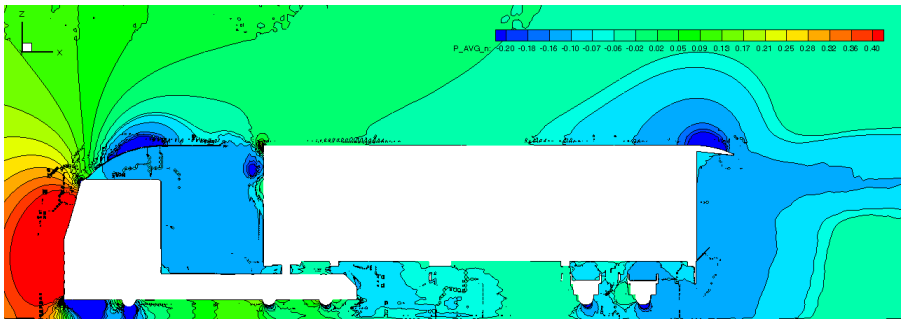
- Φ=0° 인 경우와 비교하여 trailer full aero. package가 장착된 경우, 장착되지 않은 경우에 비해 트레일러 전면부에 작용하는 압력이 보다 크게 감소함
- Trailer full aero. package 장착 시, 트레일러 전면부 전체에 작용하는 압력이 줄어들 뿐 아니라, 특별히 상단에 작용하는 압력이 현저하게 줄어듦
- Gap fairing으로 인해 트랙터 후면부 압력은 감소하고, 트레일러 전면부 압력은 증

가

- Boat tail로 인해 트레일러 후면부 압력이 증가함
- 결과적으로 트랙터의 전면부와 후면부, 트레일러의 전면부와 후면부의 압력차이가 감소함. 특별히 트레일러 전·후면부의 압력이 비슷해져 화물차에 가해지는 압력에 기인한 총 항력이 감소



<그림 11-38> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)

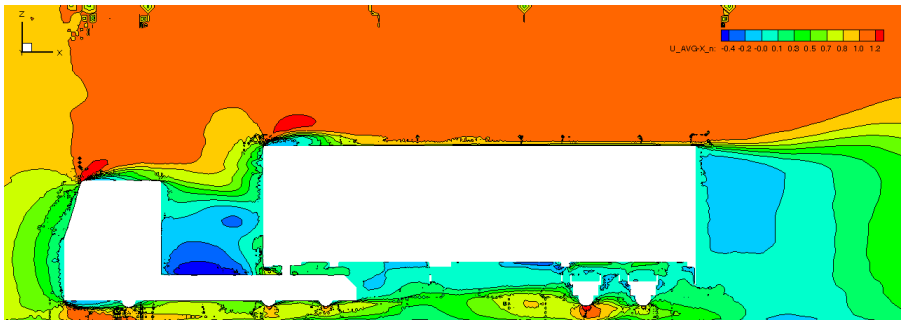


<그림 11-39> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (y-평면, y=0.0)

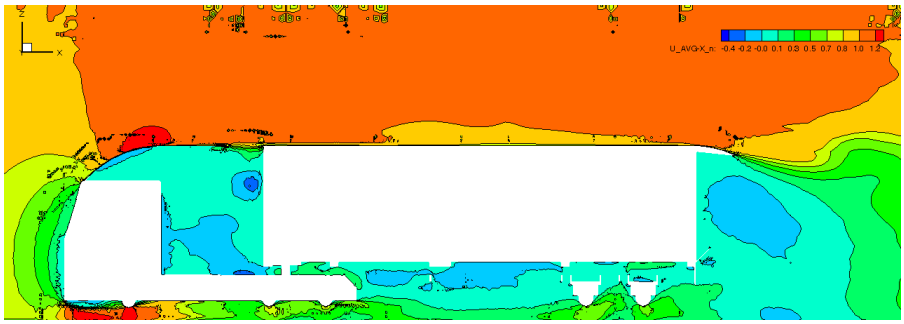
○ 측풍 조건에서, trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 속도장 비교 (Φ =10°, y=0.0)

- Φ=0° 인 조건과 비교하였을 때, trailer full aero. package가 장착되지 않은 경우 트랙터와 트레일러 전면부 모서리 부근에서 유동박리가 보다 크게 발생
- Trailer full aero. package 장착 시, 트랙터와 트레일러 전면부 모서리에서 발생하는 유동박리가 지연됨. 트레일러 후면부를 지나는 유선이 이상유동에 가깝게 변경됨. 이는 압력의 회복 효과가 기존보다 큼을 의미함
- Trailer full aero. package 장착 시, 트랙터와 트레일러 사이 공간에서의 재순환 영역 및 트레일러 후면부 재순환 영역이이 줄어듦
- 트레일러 상부에서도 유동박리에 기인한 운동량 손실(momentum deficit)이 감소함
- 결론적으로, 위의 물리 현상은 40ft 화물차를 지나 흐르는 유동에 기인하여 화물차

에 가해지는 항력이 감소함을 의미함



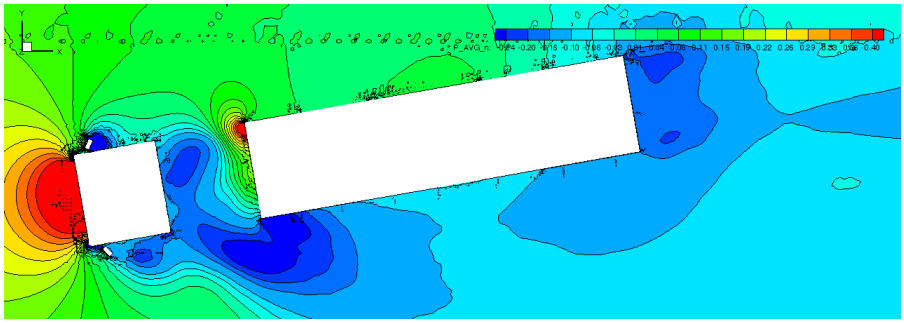
<그림 11-40> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)



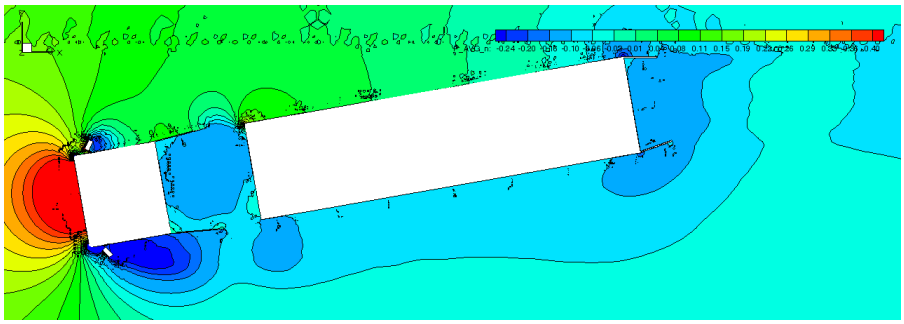
<그림 11-41> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 대칭평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (y-평면, y=0.0)

○ 측풍 조건에서, trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 압력장 비교 (Φ=10°, z=2.0)

- Trailer full aero. package가 장착되지 않은 경우, 측풍 영향에 의하여 트랙터-트레일러 사이의 압력장의 비대칭성이 커질 뿐 아니라 트랙터 후면부에 균일하지 않은 압력장이 형성됨
- Trailer full aero. package 부착시, 트랙터와 트레일러 사이 공간에서의 압력이 균일해지며, 압력장의 비대칭성이 현저하게 감소함
- 이에 따라 trailer full aero. package 부착 시, 트랙터 후면부의 압력은 증가하며 트레일러 전면부의 압력은 감소하여 트랙터 전·후면 및 트레일러 전·후면에 걸리는 압력 차이가 줄어들어 결과적으로 항력이 감소함
- 트랙터 및 트레일러의 전·후면에서의 압력 차이의 감소는 횡풍 측력계수도 저감시킴



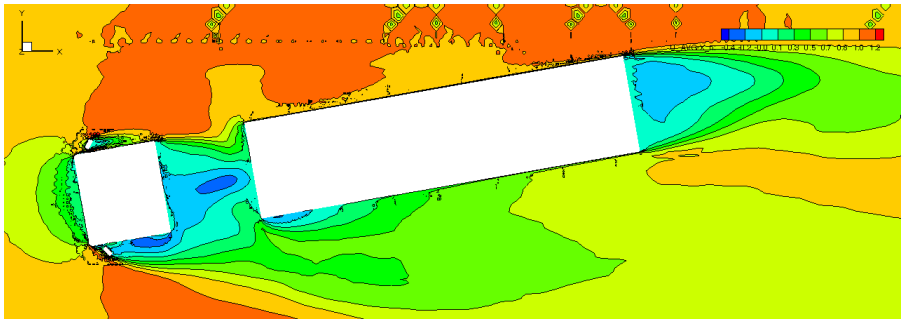
<그림 11-42> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0)



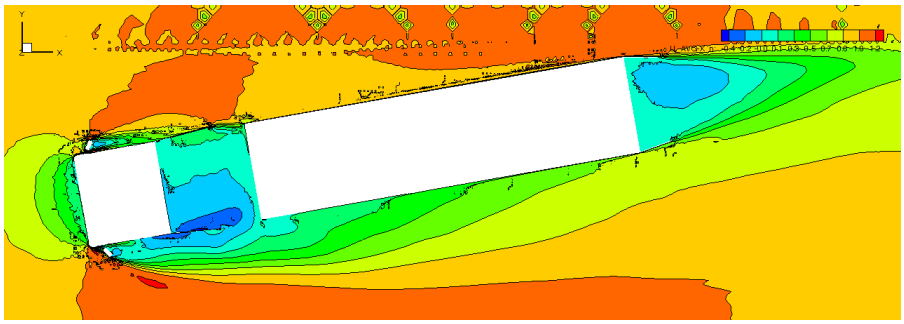
<그림 11-43> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 압력장 (z-평면, z=2.0)

○ 측풍 조건에서, trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 속도장 비교 (Φ=10°, z=2.0)

- Trailer full aero. package가 장착되지 않은 기본 차체의 경우, 측풍 영향에 의하여 트랙터-트레일러 사이의 유동 대칭성이 깨짐. 이로 인하여 트레일러 전면부에 작용하는 속도분포가 변화되며 재순환성이 감소함
- Trailer full aero. package 부착 시, 트랙터와 트레일러 사이 공간에서 저속유동 영역(low velocity region)의 크기가 증가함
- Trailer full aero. package 부착 시, 트레일러 측면 모서리에서 발생하는 유동박리가 지연되어 운동량 손실(momentum deficit)이 감소함
- Trailer full aero. package 부착으로 인한 운동량 손실이 감소되어 횡풍 측력계수를 저감시킴



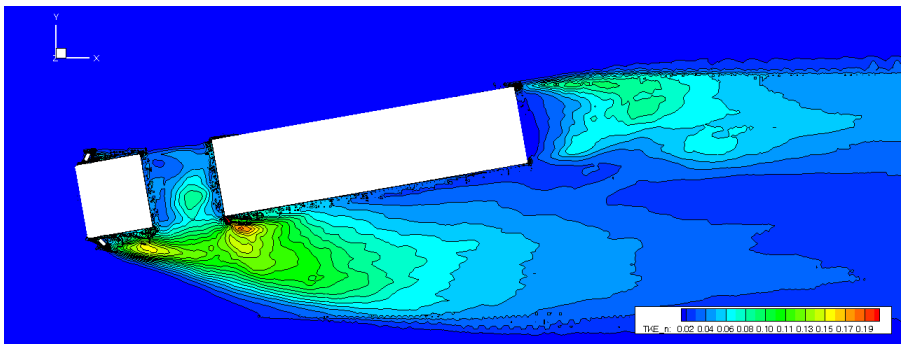
<그림 11-44> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)



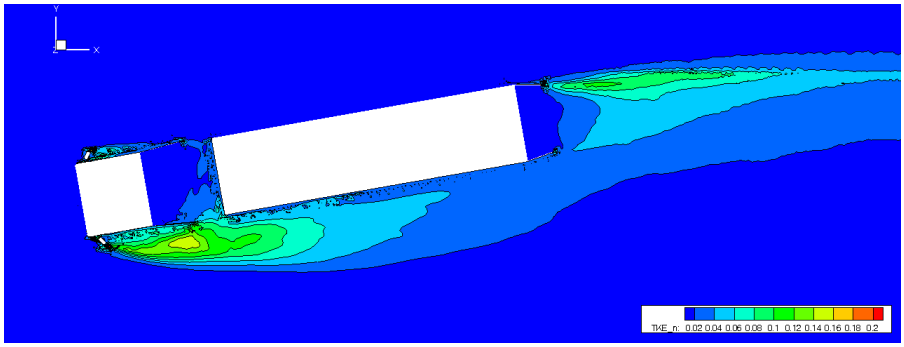
<그림 11-45> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 시간평균 속도장 (z-평면, z=2.0)

○ 측풍 조건에서, trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차 주변 난류 운동에너지(TKE) 비교 **(z-plane, z=2.0)**

- Trailer full aero. package 장착 시, 트랙터-트레일러 사이의 공간과 함께 측면부 및 후방 영역에서 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)가 현저히 감소함.
- 난류 운동에너지가 감소하여 화물차에 작용하는 flow induced vibration에 기인한 진동의 진폭이 감소함을 확인



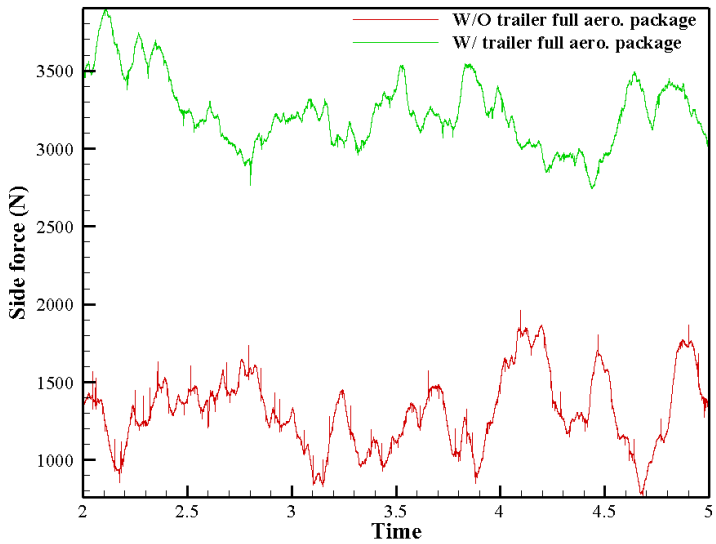
<그림 11-46> Trailer full aero. package를 부착하지 않은 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 난류 운동에너지 (z-평면, z=2.0)



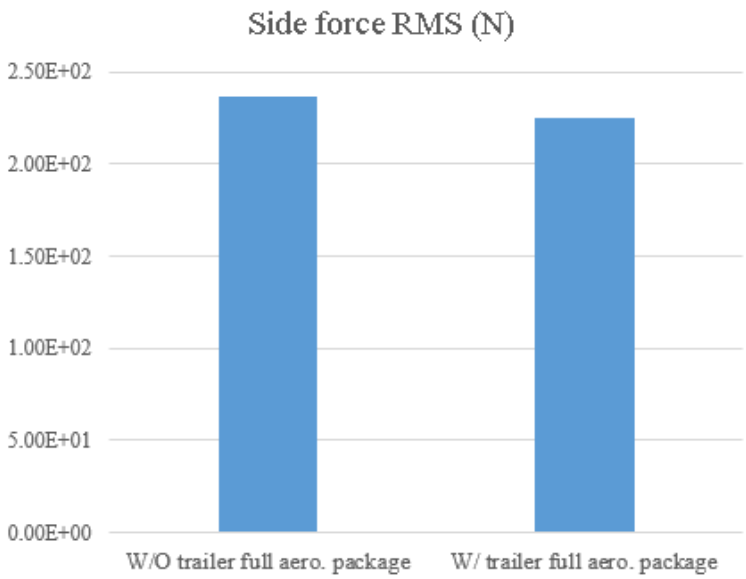
<그림 11-47> Trailer full aero. package를 부착한 40ft 화물차의 컨테이너 중간평면을 지나는 유동의 난류 운동에너지 (z-평면, z=2.0)

○ Trailer full aero. package 장착 유무에 따른 40ft 화물차의 측력 비교

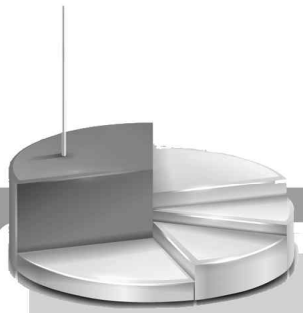
- Trailer full aero. package 장착 시, 단면적 증가로 인하여 측력의 크기가 증가함
- Trailer full aero. package 장착 시, 측력 변동성분의 RMS 값이 5.0% 저감되어, 차체에 가해지는 진동의 진폭이 감소함
- 이로 인하여 전체적인 주행 안정성은 증가함



<그림 11-48> Trailer full aero. package 부착 유무에 따른 40ft 화물차에 가해지는 시간에 따른 측력변화



<그림 11-49> Trailer full aero. package 부착 여부에 따른 40ft 화물차에 가해지는 측력 fluctuation의 RMS 값 비교



제12장 테스트베드 구축 및 실용화

제1절 최적 시제품 제작

제2절 연비 개선 실차 성능 검증

제3절 기대효과 분석

제4절 개발기술의 실용화 및 기술이전 전략 수립

제5절 개발기술의 실용화 및 기술이전을 위한 홍보

제6절 법, 제도 방안 검토

제7절 가이드라인 제작

제12장. 테스트베드 구축 및 실용화

제1절. 사이드스커트 최적 시제품 제작

1. 소재 선정

가. 소재의 조건

(1) 추력(推力)에 변형 및 파손이 없을 만큼의 연성 보유

○ 화물차의 측면부와 후면부는 차량의 상·하차, 주차 등의 경우에 충격이 많은 부위

○ 특히 측면부는 주행 중, 회전 시 도로상의 눈, 흙에 밀리는 충격량이 많으므로 이때 파손되지 않도록 연성이 필요

(2) 주행 중 변형이 발생하지 않을 만큼의 강성 보유

○ 연성과 반대개념으로 주행 중 공기저항에 의한 변형 발생 시 더 큰 공기저항을 유발하므로 강성 필요

○ 강성이 약하여 주행 중 펄럭임 현상 발생 시 심각한 주행안정성 문제 야기

(3) 가공의 용이성

○ 자동차 제조에서 제작하는 경우와 달리 특장 제조사의 경우 규격이 통일되지 않고, 대부분의 제조공정이 수작업이므로 동일 제조사의 동일 특장차라도 위치와 길이가 다름

○ 본 연구의 개발 장치는 특장제조 차대부분에 부착하는 장치로서 차량마다 맞춤 제작하여야 하나 이 경우 대량생산이 불가능하므로 원판을 차량에 맞게 가공필요

(4) 계절적 온도변화에 따른 변형, 변성이 없을 것

○ 국내의 경우 4계절이 뚜렷하고 온도변화가 높은 편으로 온도에 대한 변형 및 변성이 없어야 함

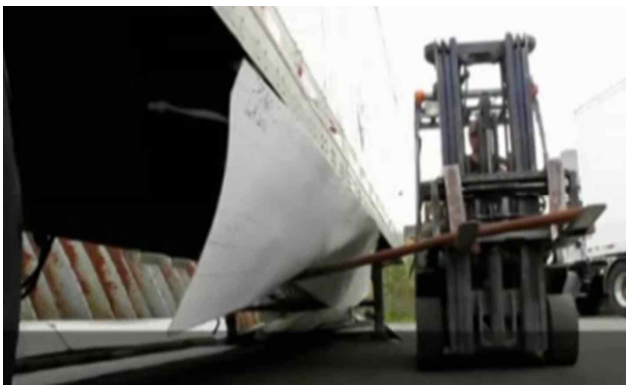
(5) 화재의 위험성이 없을 것

○ 차량의 하부는 엔진의 배기온도, 동력전달부의 마찰열 등으로 인한 고온에 노출되어 있으며, 연료탱크가 측면에 위치하여 난연성의 소재가 필요

나. 선정소재

○ 열가소성 폴리프로필렌 합성물과 유리섬유, UV필름 등 4Layer로 구성된 ATDynamics사의 판넬 선정

○ 상기 4개물질의 다층구조로 인하여 본 연구의 소재 조건에 부합하며, 미국 및 유럽에서 사이드 스커트의 원자재로 가장 많이 활용됨

<그림 12-1> 선정소재

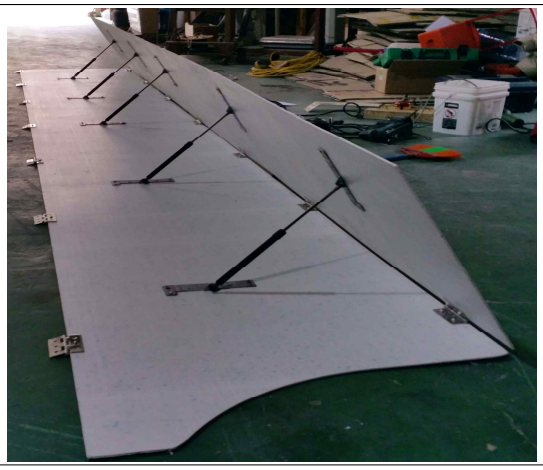
2. 시제품 제작 및 설치기술 개발

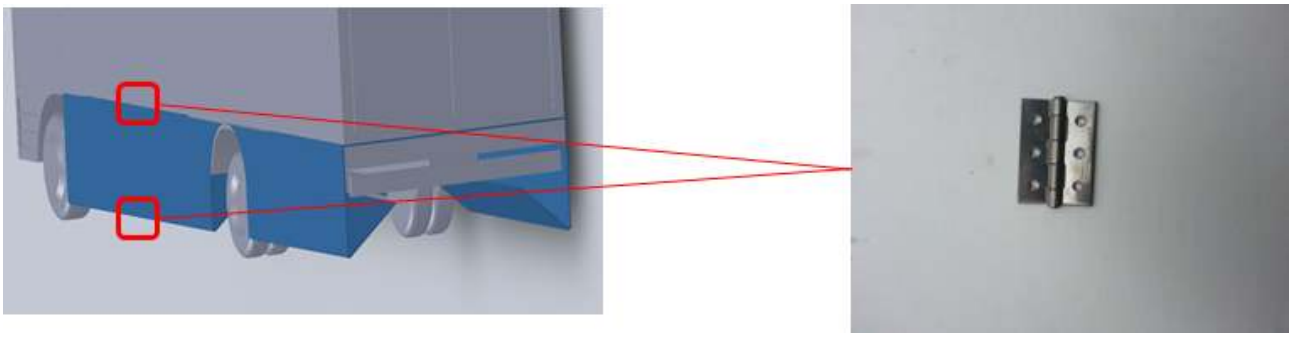
○ 열가소성 합성물의 판넬에 고온을 가하여 판넬형상으로 제작

○ 차체와의 연결부는 경첩과 리벳을 사용하여 열리도록 부착

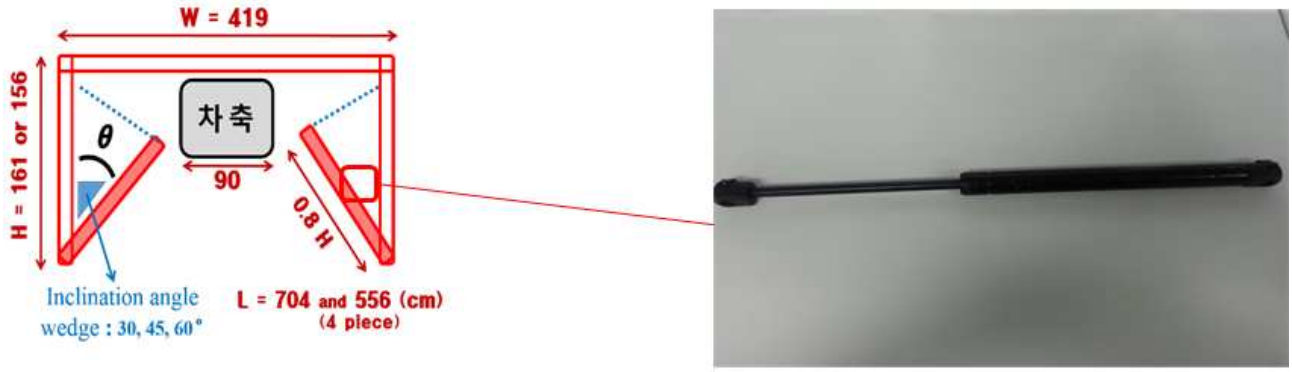
○ Folding 형의 경우 아래쪽 판넬의 주행진동을 흡수하고 형상의 각도를 유지하도록 80LB gas-spring을 사용하여 부착

<표 12-1> 제작 시제품

	
(a) Angled flap type	(b) Folding type



<그림 12-2> 경첩을 이용한 사이드 스커트 부착



<그림 12-3> 가스-스프링을 이용한 사이드 스커트 부착

제2절. 보트테일 최적 시제품 제작

1. 소재 선정

가. 소재의 조건

(1) 추력(推力)에 변형 및 파손이 없을 만큼의 연성 보유

○ 화물차의 후면부는 차량의 상·하차, 주차 등의 경우에 충격이 많은 부위

○ 특히 후면부는 시야가 확보되지 않은 공간에서의 충격이 우려되기 때문에 강한 내구성 및 원상태 보존성

(2) 주행 중 변형이 발생하지 않을 만큼의 강성 보유

○ 연성과 반대개념으로 주행 중 공기저항에 의한 변형 발생 시 더 큰 공기저항을 유발하므로 강성 필요

○ 강성이 약하여 주행 중 펄럭임 현상 발생 시 심각한 주행안정성 문제 야기

(3) 가공의 용이성

○ 자동차 제조에서 제작하는 경우와 달리 특장 제조사의 경우 규격이 통일되지 않고,

대부분의 제조공정이 수작업이므로 동일 제조사의 동일 특장차라도 위치와 길이가 다름

○ 본 연구의 개발 장치는 특장제조 차대부분에 부착하는 장치로서 차량마다 맞춤 제작하여야 하나 이 경우 대량생산이 불가능하므로 원판을 차량에 맞게 가공필요

(4) 계절적 온도변화에 따른 변형, 변성이 없을 것

○ 국내의 경우 4계절이 뚜렷하고 온도변화가 높은 편으로 온도에 대한 변형 및 변성이 없어야 함

(5) 화재의 위험성이 없을 것

○ 차량의 하부는 엔진의 배기온도, 동력전달부의 마찰열 등으로 인한 고온에 노출되어 있으며, 연료탱크가 측면에 위치하여 난연성의 소재가 필요

나. 선정소재

○ 열가소성 폴리프로필렌 합성물과 유리p섬유, UV필름 등 4Layer로 구성된 Stemco사의 소재 선정

○ 상기 4개물질의 다층구조로 인하여 본 연구의 소재 조건에 부합하며, 미국 및 유럽에서 보트테일의 원자재로 가장 많이 활용됨

2. 시제품 제작 및 설치기술 개발

○ 유동해석 및 풍동실험을 통해 분석된 최적 각도(80°)로 부착

○ 보트테일은 개폐가 가능한 구조로 제작

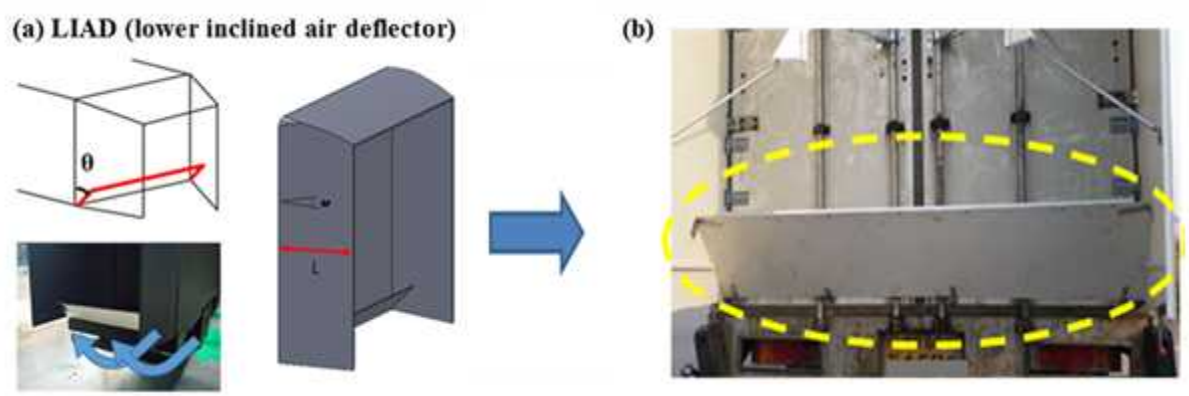
○ 하부에서 발생하는 와류를 제어하기 위한 AID(Alow Inclined Deflector) 부착

○ 보트테일과 적재함과의 공간을 최소화 시키는 Gap repair 부착

<표 12-2> 제작 시제품

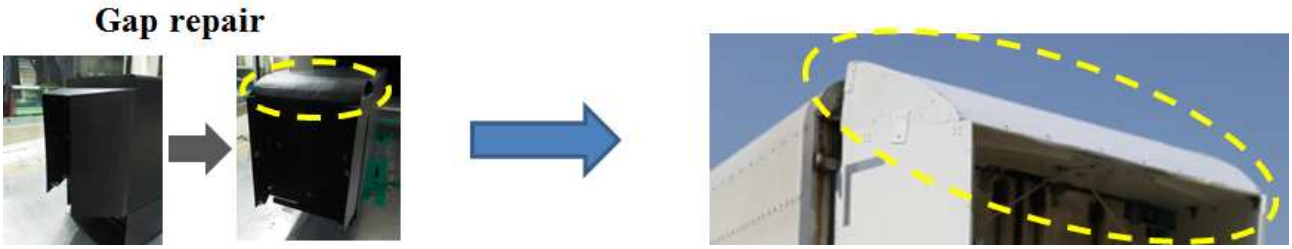
	
14.5톤 윙바디 트럭용 보트테일	트레일러용 보트테일

○ LIAD



<그림 12-4> LIAD

○ Gap repair



<그림 12-5> Gap repair

제3절. Gap fairing 최적 시제품 제작

1. 소재 선정

가. 소재의 조건

(1) 주행 중 변형이 발생하지 않을 만큼의 강성 보유

○ 연성과 반대개념으로 주행 중 공기저항에 의한 변형 발생 시 더 큰 공기저항을 유발하므로 강성 필요

○ 강성이 약하여 주행 중 철럭임 현상 발행 시 심각한 주행 안정성 문제야기

(2) 가공의 용이성

○ 자동차 제조사에 제작하나 제품군에 따라 크기 및 형상 규격이 상이함

○ 본 연구의 개발 장치는 트렉터 차대 후면 부분에 부착하는 장치로서 차량마다 맞춤 제작하여야 하나 이 경우 대량생산이 불가능하므로 원판을 차량에 맞게 가공필요

(3) 계절적 온도변화에 따른 변형, 변성이 없을 것

○ 국내의 경우 4계절이 뚜렷하고 온도변화가 높은 편으로 온도에 대한 변형 및 변성이 없어야 함

나. 선정소재

○ 열가소성 폴리프로필렌 합성물과 유리섬유, UV필름 등 4Layer로 구성된 Stemco(社)의 소재 선정

○ 상기 4개물질의 다층구조로 인하여 본 연구의 소재 조건에 부합하며, 미국 및 유럽에서 사이드 스커트의 원자재로 가장 많이 활용됨

2. 시제품 제작 및 설치기술 개발

○ 유동해석 및 풍동실험을 통해 분석된 최적 각도(5°)로 부착

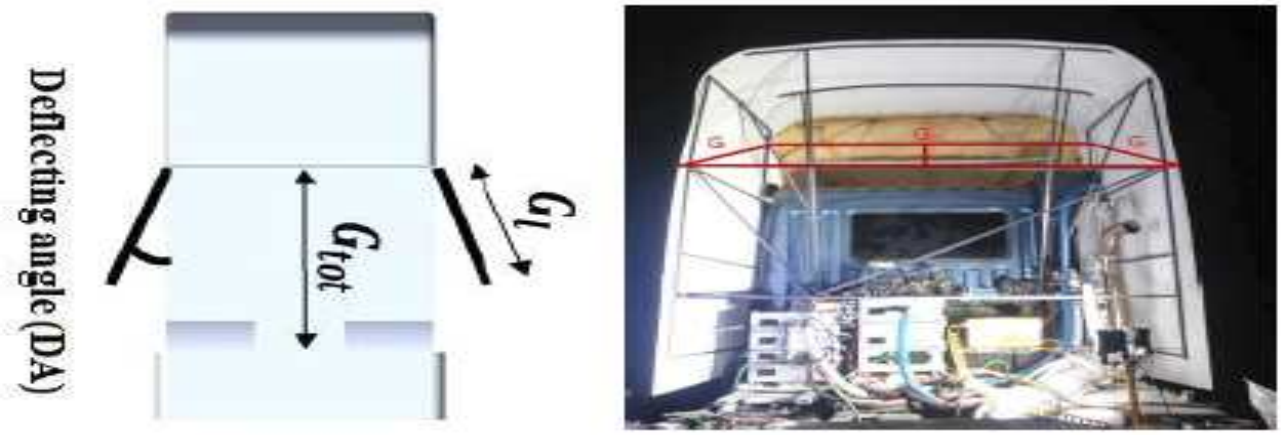
○ 차량 회전 시 트렉터와 적재함 회전반경을 고려하여 공간을 최소화 시키는 Gap fairing 적정 길이 제작

<표 12-3> 제작 시제품

	
(a) Gapfairing 후면	(a) Gapfairing 측면



<그림 12-6> Gap fairing 적정 길이 제작



<그림 12-7> 최적 각도(5°)로 부착

제4절. 풍동시험용 vortex modifier 시제품

1. 소재 선정

가. 소재의 조건

(1) 풍동실험 중 변형 및 파손이 발생하지 않을 만큼의 강성 보유

○ 연성과 반대 개념으로 주행 중 공기저항에 의한 변현 발생 시 더 큰 공기저항을 유발하므로 강성 필요

(2) 가공의 용이성

○ 제품의 성능이 형상에 따라 큰 차이가 나므로 형상을 구현하기 쉬워야함

(3) 온도변화에 따른 변형, 변성이 없을 것

○ 국내의 경우 4계절이 뚜렷하고 온도변화가 높은 편으로 온도에 대한 변형 및 변성이 없어야 함



<그림 12-8> 볼텍스 제너레이터 소재

나. 선정소재

○ 실험에 사용된 vortex modifier는 PLA소재로 제작되었으며, 3D printing이 용이하며 풍동실험 중 변형이나 변성이 일어나지 않는 재질이다. 가공온도는 270℃로 실험 온도에 의한 변형, 변성은 발생하지 않는다.

2. 대상 차종 선정

○ 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 15ton 트럭의 외형을 실측한 후, 이를 역설계하는 방식으로 3차원 차체 형상을 얻음

○ 풍동시험부의 폐색률(blockage ratio, 풍동의 단면적에 대해 모형의 단면적이 차지하는 비율)이 8% 이하가 되도록 축소비를 결정하고 축소 모형을 제작하였다. 실험에 사용한 차량 모델의 구체적인 형상 및 축소 비율, 폐색률은 <표 5-2>에 나타내었다.

<표 12-4> 실험대상 모형

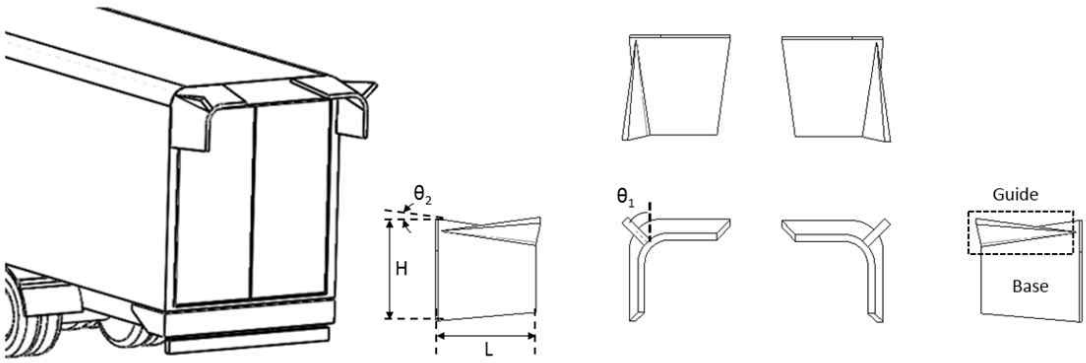
실험 대상 모형	
실험대상	15 ton 현대 Trago Xcient
실제크기(m)	12(L) x 2.5(B) x 3.3(H)
실험모형	
모형 scale	1/8
폐색률 (Blockage ratio)	6.5%

3. Vortex modifier 설계 및 제작

가. Vortex modifier 설계

○ 공기저항 저감 및 횡풍 측력계수 저감에 효과적인 새로운 개념의 와류 제어장치인 Vortex modifier를 제안하였다. Vortex modifier의 특징은 다음과 같다.

- 화물차 후미부에 와류 제어장치를 부착함으로써 차량 끝단에 발생하는 유동방향 와류(longitudinal vortex)의 생성을 최대한 억제시켜 공기저항을 줄이는 방법
- 화물차의 직각 모서리(square back) 형상의 후단부에서 발생하는 강한 유동박리를 완화시켜 후류 유동을 이상적인 유선을 가지도록 유도함
- Vortex modifier의 형상 및 설계 변수는 <그림 5-4>에 나타남



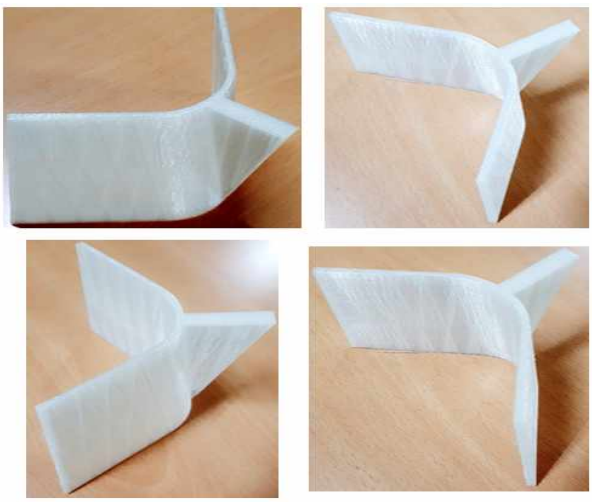
<그림 12-9> Vortex modifier의 형상 및 설계 변수

나. Vortex modifier 제작

○ 기본제원을 확인한 후 수치해석을 통해 난류경계층 두께를 계산한 것을 바탕으로 설계한 볼텍스 제너레이터를 3D 프린터를 이용하여 출력한다.

○ 사용목적과 용도에 따라 다양한 형상을 제작할 수 있고 높이는 통상 난류경계층 두께의 10-60%로 설정한다.

○ 베이스 부분과 트레일러가 이루는 각은 80°로 유동을 이상적인 유선 형상으로 유도할 수 있게 설계, 제작한다.



<그림 12-10> 볼텍스 제너레이터 제작

4. Vortex modifier 장착

○ 제작한 Vortex modifier를 아래 그림과 같이 화물차 모델 좌우 끝단에 설치한다.

○ 좌우 끝단에 고정부를 설치하여 Vortex modifier를 고정하여 실험 중 변형 또는 이탈이 발생하지 않도록 설치한다.

○ 이를 실차에 적용하기 위해서는 고정브라켓을 통해 컨테이너 후면부에 부착하며, 컨

테이너 문을 여닫을 때 간섭이 없도록 장착하여야 한다.

○ 이때, Vortex modifier가 컨테이너 상부 윗면 혹은 옆면으로 단차가 발생하지 않도록 장착에 유의하여야 한다.



<그림 12-11> 볼텍스 제너레이터 장착

제5절. Trailer full aero package 최적 시제품 제작

1. 소재 선정

가. 소재의 조건

(1) 추력(推力)에 변형 및 파손이 없을 만큼의 연성 보유

○ 화물차의 후면부는 차량의 상·하차, 주차 등의 경우에 충격이 많은 부위

○ 특히 후면부는 시야가 확보되지 않은 공간에서의 충격이 우려되기 때문에 강한 내구성 및 원상태 보존성

(2) 주행 중 변형이 발생하지 않을 만큼의 강성 보유

○ 연성과 반대개념으로 주행 중 공기저항에 의한 변형 발생 시 더 큰 공기저항을 유발하므로 강성 필요

○ 강성이 약하여 주행 중 펄럭임 현상 발생 시 심각한 주행안정성 문제 야기

(3) 가공의 용이성

○ 자동차 제조에서 제작하는 경우와 달리 특장 제조사의 경우 규격이 통일되지 않고, 대부분의 제조공정이 수작업이므로 동일 제조사의 동일 특장차라도 위치와 길이가 다름

○ 본 연구의 개발 장치는 특장제조 차대부분에 부착하는 장치로서 차량마다 맞춤 제작하여야 하나 이 경우 대량생산이 불가능하므로 원판을 차량에 맞게 가공필요

(4) 계절적 온도변화에 따른 변형, 변성이 없을 것

○ 국내의 경우 4계절이 뚜렷하고 온도변화가 높은 편으로 온도에 대한 변형 및 변성이 없어야 함

(5) 화재의 위험성이 없을 것

○ 차량의 하부는 엔진의 배기온도, 동력전달부의 마찰열 등으로 인한 고온에 노출되어 있으며, 연료탱크가 측면에 위치하여 난연성의 소재가 필요

나. 선정소재

○ 열경화성 폴리프로필렌 합성물과 유리p섬유, UV필름 등 3Layer로 구성된 국산소재 선정

○ 상기 3개물질의 다층구조로 인하여 본 연구의 소재 조건에 부합하며, 인발 사출하여 제작

○ 기존판넬과 국산화 판넬의 인장강도 특성 비교 결과 기존소재 대시 국산소재의 성능이 떨어지나 국내 사용상 충분한 강성 및 연성을 보유함

○ 강화고무 등의 대체 소재를 조사 중이나 화재 시 발화나 유해가스 발생 등의 이유로 안전 관점에서 배제 중. 차후 저렴한 대체소재가 개발되면 판매단가를 낮출 수 있을 것으로 사료됨.

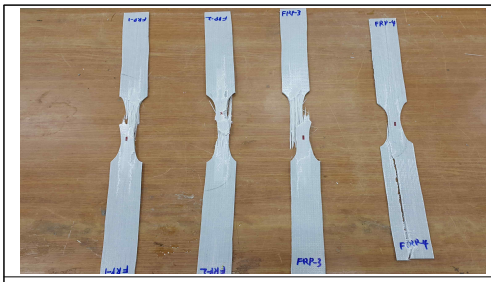
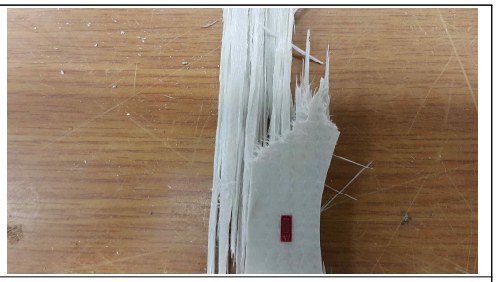
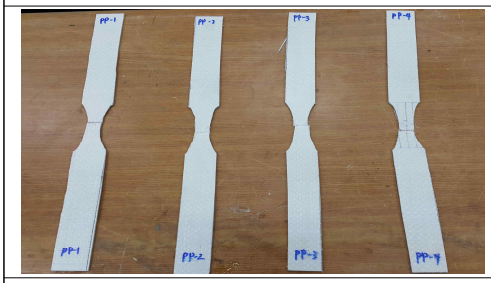
<표 12-5> 인장시험 결과

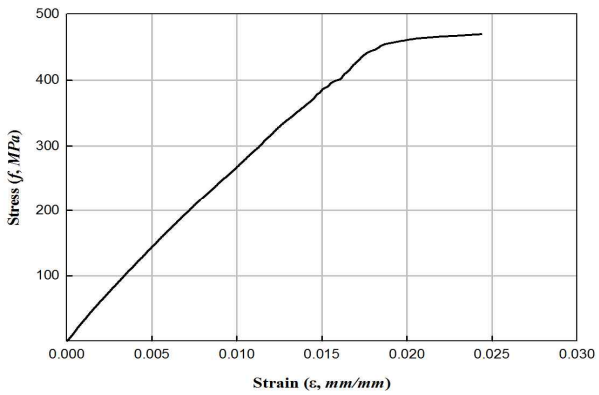
시편번호	기존소재			국산소재		
	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	비고	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	비고
1	486.08	29.98		210.25	12.83	
2	457.99	39.22		209.26	15.58	
3	459.45	40.73		165.62	16.78	
4	265.58	20.39	제외	163.33	12.54	제외
평균	467.84	36.65		195.05	15.06	

<표 12-6> 인장시험 종합결과

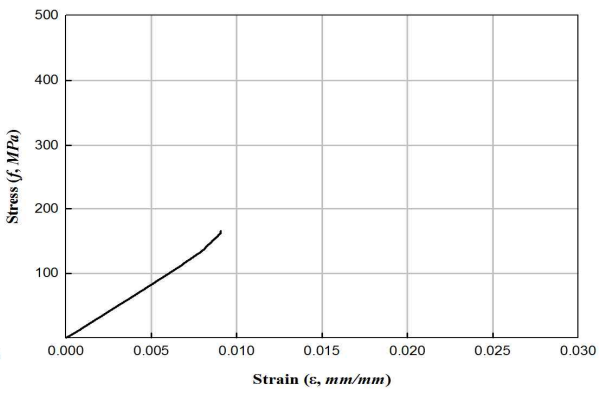
	기존소재(A)	국산소재(B)	A/B
인장강도 (MPa)	467.84	195.05	2.40
탄성계수 (GPa)	36.65	15.06	2.43

<표 12-7> 파괴형태

	
기존소재 시험 후	기존소재 시험 후 상세
	
국산소재 시험 후	국산소재 시험 후 상세



<그림 12-12> 기존소재 S-S Curve



<그림 12-13> 국산소재 S-S Curve

2. 시제품 제작 및 설치기술 개발

○ 유동해석 및 풍동실험을 통해 분석된 최적 각도(80°)로 부착

○ 보트테일은 개폐가 가능한 구조로 제작

○ 하부에서 발생하는 와류를 제어하기 위한 AID(Alow Inclined Deflector) 부착

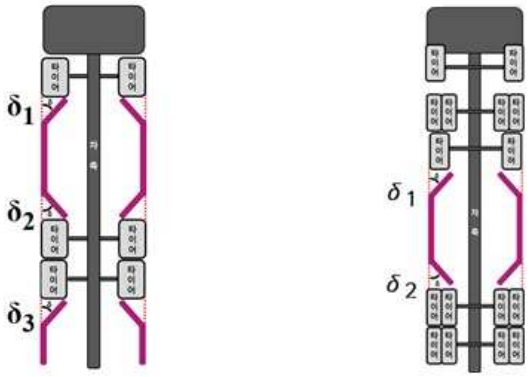
○ 보트테일과 적재함과의 공간을 최소화 시키는 Gap repair 부착

<표 12-8> 제작 시제품

	
국산화 소재 금형	국산화 소재
	
트레일러용 사이드스커트 상세	트레일러용 사이드스커트 측면
	
트레일러용 보트테일 상세	트레일러용 보트테일 측면

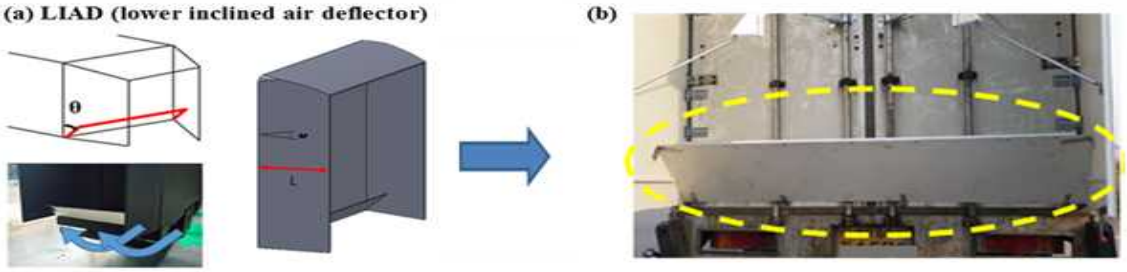
	
트레일러용 갭 페어링 상세	트레일러용 갭 페어링 측면
	
Trailer full aero package 상세	Trailer full aero package 측면

○ Angled Flap 형 사이드스커트



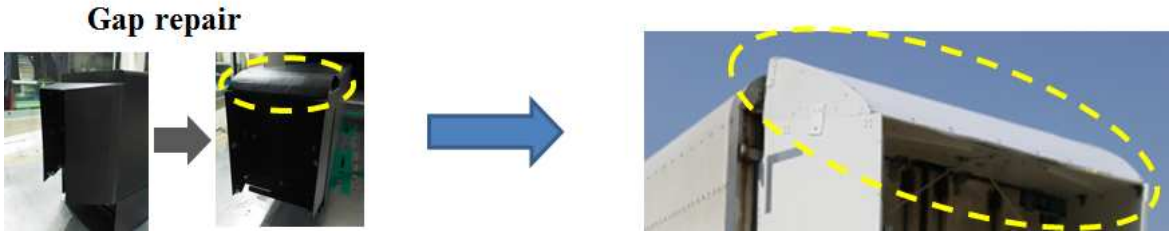
<그림 12-14> Angled Flap type side skirt

○ LIAD



<그림 12-15> LIAD

○ Gap repair

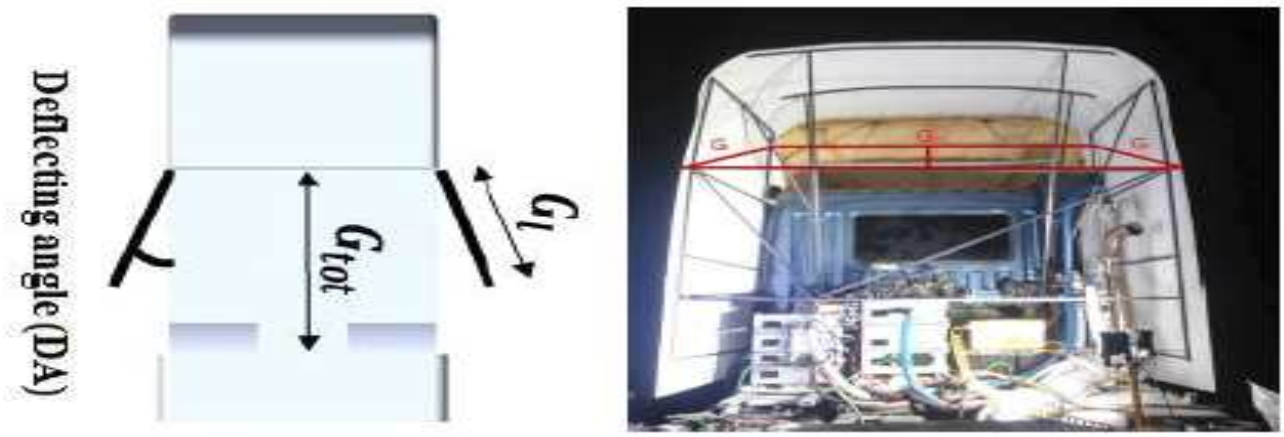


<그림 12-16> Gap repair

○ Gap fairing



<그림 12-17> Gap fairing 적정 길이 제작



<그림 12-18> 최적 각도(5°)로 부착

제6절. 1차년도 연비개선 성능 검증

1. GEM(Greenhouse Gas Emissions Model) 모델

○ 2014년부터 도입된 중대형 화물차량에 대한 연비제도를 위한 시뮬레이션 프로그램

○ EPA (Environmental Protection Agency)와 NHTSA (National HighwayTraffic Safety Administration)는 온실가스와 연료 소비를 저감하기 위하여 종합적인 중대형 차량 연비제도 도입

○ NHTSA의 연비규제와 EPA의 이산화탄소 (CO_2, carbon dioxide) 배출물 규제에서 중대형 자동차를 세 가지로 분류

- Combination tractors
- Heavy-duty pickup trucks and vans
- Vocational vehicles

○ NHTSA와 EPA는 combination tractor와 vocational vehicle 차량에 대한 제도와 별도로 엔진에 대한 제도 도입

○ EPA의 최종 온실가스 규제는 대기정화법 (CAA, Clean Air Act)에 따라 2014 MY (Model Year)와 함께 적용

○ NHTSA의 최종 연료소비 규제는 2007년 에너지 독립 및 안보 법 (Energy Independence and SecurityAct)에 따라서 2014와 2015 MY는 자발적 참여를 유도하고 2016 MY부터는 의무적으로 적용

○ 작업용 차량 및 여러 중대형 차량의 연료 소비율 및 온실가스 배출량에 대한 기준을 확립하기 위해 제안

○ 차량에 대한 기본적인 사양 및 연비 맵 (fuel map)이 내장

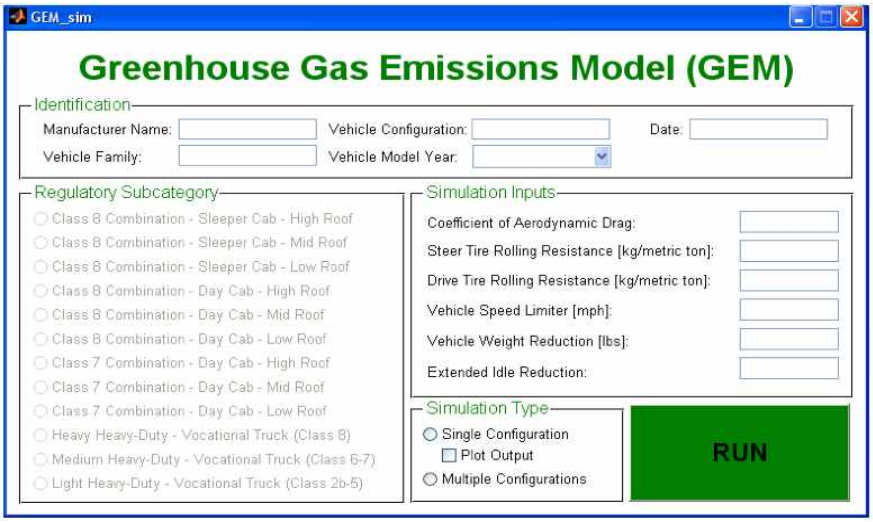
○ 공기저항계수, 타이어의 구름저항, 무게변화, 공회전 저감 등에 대한 변수를 입력하여 연비 및 온실가스 배출 개선량 평가 가능

○ EPA와 NHTSA는 제조업체가 GEM에 다음과 같은 입력 값을 넣어서 차량의 효율을 확인하는 방법론을 채택

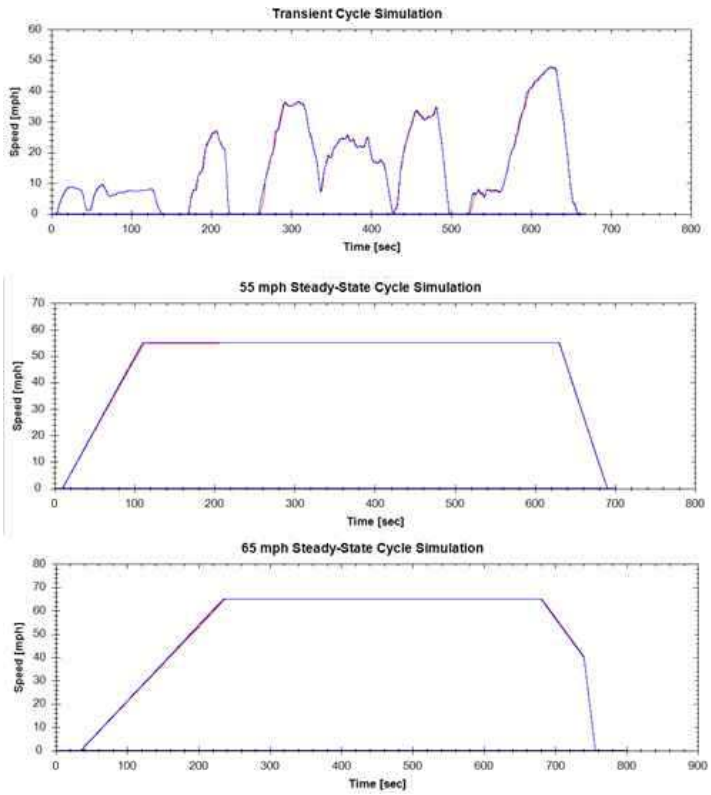
○ GEM의 입력 값은 coefficient of drag, tire rolling resistance coefficient, weight reduction, vehicle speed limiter, extended idle reduction technology, tractor-trailer combination curb weight, payload, engine characteristics, 그리고 drive train for each vehicle type 등

○ 모델에는 실제 차량의 주행모드가 반영되었으며 combination tractor와 vocational vehicle은 CARB의 transient mode과 65mph 및 55mph의 일정한 속도를 반영하는 고속모드를 사용

○ 실제 측정하는 시험모드를 사용하고 이를 모델 내 주행분율에 적용하여 반영



<그림 12-19> GEM 프로그램 Input data 화면



<그림 12-20> 미국의 중대형차 연비측정 모드

2. GEM 모델을 활용한 실차성능 검증

○ 실차시험에 대하여는 국내 14.5톤 트럭과 트랙터 트레일러의 실제 구름저항값 등을 반영하였으며 차량에 대한 정보는 day cab에 대한 default 값을 적용

○ 본 연구에서 개발된 angled type과 folding type 사이드 스커트에 대해 적용함. 공기저항 계수로는 포항공대 풍동시험 결과치를 입력하여 비교하였으며 그 결과는 아래의 표와 같음

○ 15톤 차량의 경우, 차량 하부 구조물과 편의 장비들로 인하여 folding type 사이드 스커트에 대한 적용이 불가하여 angled type 사이드 스커트를 대상으로 분석하였음

<표 12-9> 실차시험 시뮬레이션 결과

차종	장치	CO_2 배출량 g/km	연비km/L	연비 개선률
15톤 트럭	Non	775.1	3.47	-
	Angled type	754.0	3.57	약 2.9%
40ft 트레일러	Non	811.7	3.31	-
	Angled type	792.5	3.38	약 2.1%
	Folding type	792.5	3.39	약 2.2%

○ 15톤 트럭에 대한 모델링 결과 angled type 사이드 스커트는 약 2.9%의 연비 개선

○ Angled type, folding type은 40ft 트레일러에 적용 할 경우 각각 2.1%, 2.2% 개선

○ 그러나 상기결과는 주행거리 분율중 약 19%가 도심지 주행구간을 주행하는 결과를 반영한 것으로 실제 고속도로 주행에서는 모두 3%가 넘을 것으로 추정됨

제7절. 2차년도 연비개선 실차 성능 검증

1. Proving Ground 실차 시험

가. 개요

(1) 시제품의 연비개선 효과 측정을 위한 Proving Ground 검증

○ 시제품을 장착한 실차를 이용한 주행 성능 실험

○ US. EPA SAE J1321-TypeⅡ 실험방법을 통한 연비개선 효과 검증

○ Side skirt와 Boat tail 2종에 대한 연비개선 목표치 달성률 확인

(2) 고속 주행로 시설 및 제원(KATRI)

○ 규격 : 5,040m × 15.2~19.5 m (타원형)

○ 종방향 : 직선구간 967 m × 2, 완화구간 411 m × 4, 곡선구간 731 m × 2

○ 횡방향 : 직선구간 15.2 m, 곡선구간 19.5 m

○ 곡선반경 : 360m

○ 최대각도 42°

○ 최고속도 250 km/h(설계속도 180 km/h)



<그림 12-21> 자동차안전연구원 고속 주행로

(3) US. EPA SAE J1321-TypeⅡ

○ 2대의 동일한 트럭이 동시에 주행하여 Base test와 Treatment test 시행

○ 두차량의 연료소비량의 차이로 결과 확인

○ 국내 대형화물차량의 제한속도는 90 km/h

○ 1회 주행거리는 81 km 이상으로 각 실험당 3~5회 주행

○ 실험 차종

- 15 ton 화물차량 2대(Base용, Treatment용 각 1대)

<표 12-10> 15 ton 화물차량 제원

실험차량	대우14톤 장축카고 트럭	Control Vehicle	Test Vehicle			
		Base	Base	Side skirt	Boat tail	Side skirt + Boat tail
제작사	타타대우					
엔진	ISM					
배기량	10,800cc					
정격출력	410/1900Ps/RPM					

- 42ft 트레일러 화물차량 2대(Base용, Treatment용 각 1대)

<표 12-11> 42ft 트레일러 화물차량 제원

실험차량	현대트랙터	Control Vehicle	Test Vehicle			
		Base	Base	Side skirt	Boat tail	Side skirt + Boat tail
제작사	현대자동차					
엔진	D6CE					
배기량	12,742cc					
정격출력	520/1700Ps/RPM					

○ 실험기간 : 2015.10.03.-2015.10.13.

○ 실험장소 : 교통안전공단 자동차안전연구원 Proving Ground(고속주행로)

○ 실험장비 : 온습도계, 풍속계, 저울

○ 실험자 : 허즈앤티 김대욱 팀장, 허철행 주임연구원

○ 입회자 : 전북자동차기술원 윤병규 선임연구원, 김수형 연구원

나. 실험방법

○ 개발품의 연비개선률 평가를 위하여 US. EPA Smartway Program의 연비 평가 규정인 SAE J1321에 기반하여 실험을 진행하였으며, 국내 사정에 적합하지 않은 항목에 대해서는 협의를 통해 Modify하여 규정을 최적화 함

<표 12-12> Table 1 SAE J1321 실험 조건 및 조건 변경 사항

SAE J1321 실험 조건	국내 실험 조건	변경 사유
실험 시 평균 풍속이 19.32 km/h 이상일 경우 실험 실패	SAE J 1321과 동일	
실험 시 외부 온도 4.44 ℃~37.8℃ 유지	SAE J 1321과 동일	
외부 환경 데이터 샘플링 속도 최소 1Hz 유지	SAE J 1321과 동일	
중량법을 이용한 연료소비량 측정	SAE J 1321과 동일	
실험 시 운행거리 80.5 km 이상	SAE J 1321과 동일	
CV, TV 동시 출발	CV, TV 순차적 출발	Proving Ground 주행로 사정상 동시 출발 불가
차량간 최소거리 457.2 m 이상 유지	차량 간 최소거리 최대한 유지	Proving Ground 특성 상 다른 실험차량의 간섭으로 인하여 차량 간격 유지 불가
CV, TV 동일 차량 섭외	CV, TV 유사 차량 섭외(Cargo Truck)	섭외 여건의 한계로 차종이 같고 최대한 동일한 유사차량 섭외
0.16 km/h의 해상도를 지니는 GPS 적용	1 km/h의 해상도를 지니는 통합 단말기 적용	기 장착된 시스템 적용
차량 주행 Cruise 모드 이용	Cargo Truck은 Full Accel, Tractor는 Cruise 적용	Cargo Truck의 경우 Cuise 주행 불가 차량
운행 중 차속 차이가 1.61 km/h 이상 발생할 경우 실험 실패	운행 중 초당 차속 차이가 2 km/h 이상인 구간 10회 초과시 실패, 운행 중 초당 차속 차이가 2 km/h 이상인 구간 연속3초 초과시 실패	Proving Ground 특성 상 다른 실험차량의 간섭으로 인하여 차량 속도 유지 불가
운행 중 풍속 차이가 초당 8.05 km/h 이상일 경우 실험 실패	운행 중 풍속 차이가 초당 8.05 km/h 이상인 구간 30회까지 용인	Proving Ground 특성 상 돌풍이 잦아 기준조건 만족 불가
연료 소모량의 0.1% 해상도를 지닌 저울 사용	해상도 10g 단위의 전자식 저울 적용	구입 시기 및 가격 상 불합리
차량 Warm-up 1시간 이상	트랙 4바퀴 주행(20 km)	트랙 2바퀴 이상 주행할 경우 충분히 예열 가능

※ CV : Control Vehicle, Reference Data 취득을 위한 차량
TV : Test Vehicle, 개발품의 개선효과 Data 취득을 위한 차량

(1) SAE J1321의 실험 진행 순서



<그림 12-22> SAE J1321의 실험 진행 순서

(2) Test Preparation

○ 실험에 앞서 차종·연식·특장형태 등이 최대한 동일한 차량 준비

○ 각 차량에 물리적·기계적인 이상 유무 확인, 엔진오일·공기필터·연료필터 교체 및 오일 보충, 타이어압 확인 등의 차량 정비 실시

○ 중량법을 이용하여 연료소모량을 확인하기 위하여 탈부착이 용이한 휴대용 연료탱크 부착



<그림 12-23> Test Preparation

(3) Driving Preparation

○ Proving Ground 주행로의 노면상태나 주행장 조건이 실험에 영향이 없는지 미리 확인

○ 주행장의 Grade 3.5% 미만 여부를 사전에 확인

○ 중량법을 적용하기 위한 측정장소는 바람의 간섭을 최소화하기 위하여 먼저 텐트를 설치하고, 텐트 내부에 수평계를 활용하여 저울 설치

○ 풍속, 온도 등 외부 환경 인자 측정을 위하여 1Hz 이상의 Data Acquisition 속도를 지닌 센서 설치

○ 주행 전 운전자 교육과 사전 준비 실험을 통해 동일한 주행조건을 정립하고, 각 실험 전 4바퀴의 주행을 통해 CV, TV 차량 예열



<그림 12-24> Driving Preparation

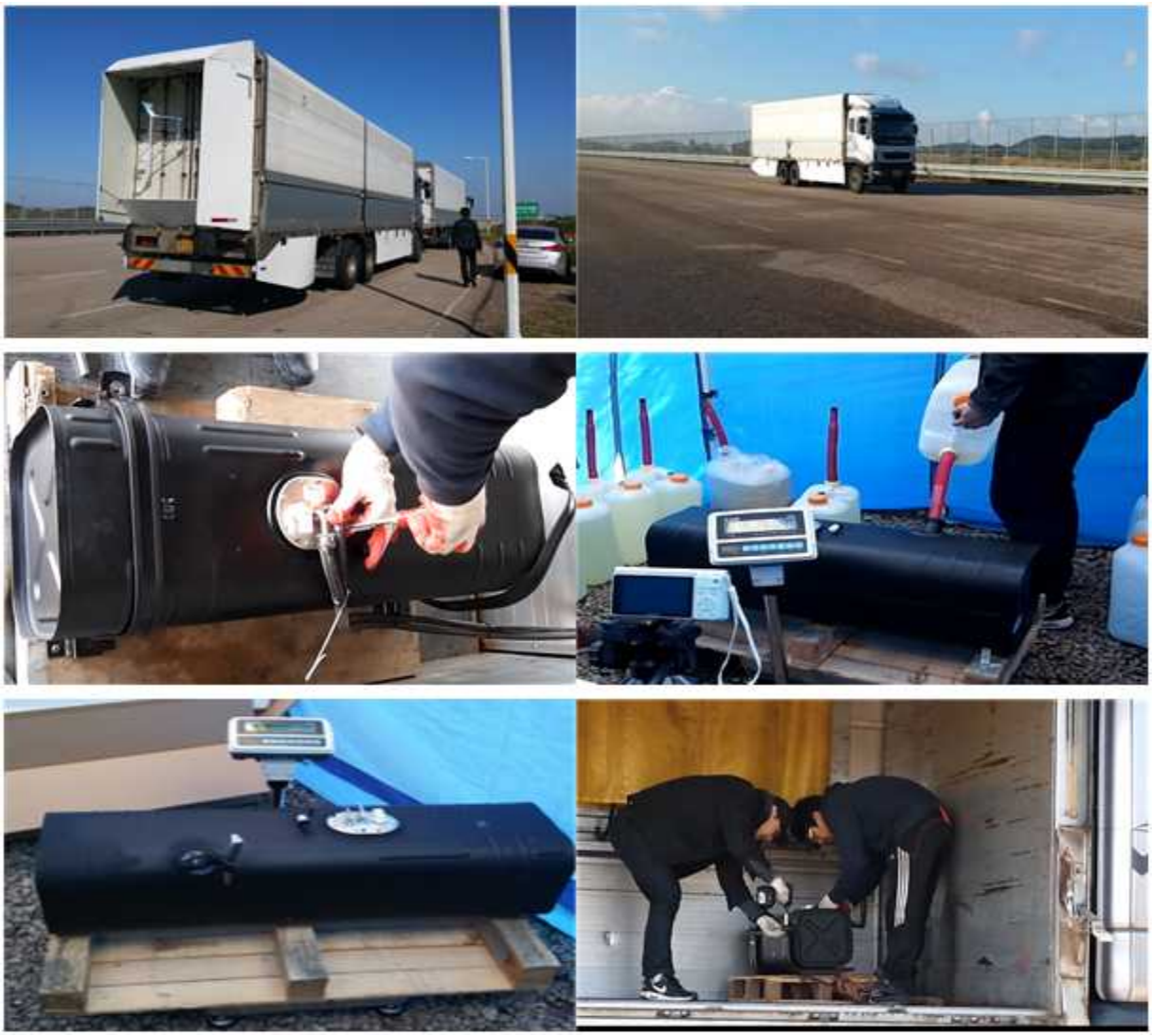
(4) Baseline Segment Driving

○ 개발품 장착을 하지 않은 실험 전 상태의 CV, TV 차량을 주행하여 장착 전 각 차량의 연료소모량 측정

○ 다음 실험 절차를 최소 3회 이상 반복하여 연료 소모량 측정

<표 12-13> Baseline Segment Driving

실험절차	세부내용
연료 주유	무게 측정 전 후 연료탱크 이상 여부(잔여물, 연료노유, etc.) 확인
실험 전 연료탱크 중량 측정	실험 전 동일한 중량족너을 확보하기 위하여 휴대용 연료탱크에 연료를 주입하고 연료탱크 중량 측정(40kg ± 1kg)
차량 주행	동일 시작점에서 순차적으로 차량 출발(500m)
	급가속으로 출발하여, 타겟 주행속도 도달 시 정속 주행(Cruise 모드가 가능할 경우 적용하고 적용 불가 시 Full Accel)
	Proving Ground 17바퀴(85km) 주행
차량 정차	주행시작점에 도착하기 일정거리 전부터 감속을 시작하여 주행시작점에 차량 정차
	공회전 상태를 1분간 유지 후 시동 끔
실험 후 연료탱크무게 측정	무게 측정 전 후 연료탱크 이상 여부(잔여물, 연료누유, etc.) 확인
연료소모량 측정	각 차량의 실험 전 후의 연료탱크 중량차를 이용하여 연료소모량 계산



<그림 12-25> Baseline Segment Driving

(5) Test Segment Driving

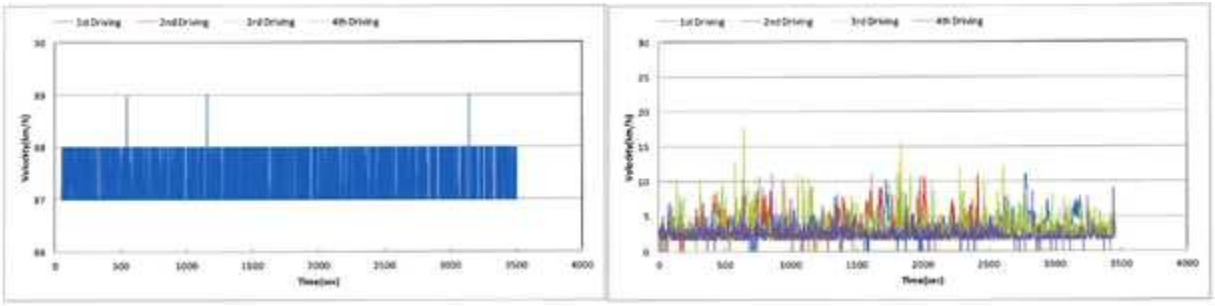
○ 실험 목적에 의거하여 TV차량에 개발품을 장착하고, CV 차량은 Baseline Segment와 동일하게 개발품을 장착하지 않은 상태에서 실험 진행

○ 개발품 장착 후 Baseline Segment Driving 실험 절차를 최소 3회 이상 반복하여 연료 소모량 측정

(6) Data Acquisition

○ 실험 전 설치한 센서들의 데이터를 취득하여 주행 중 풍속 데이터를 분석하고, 주행 중 온·습도 및 대기압 데이터 분석

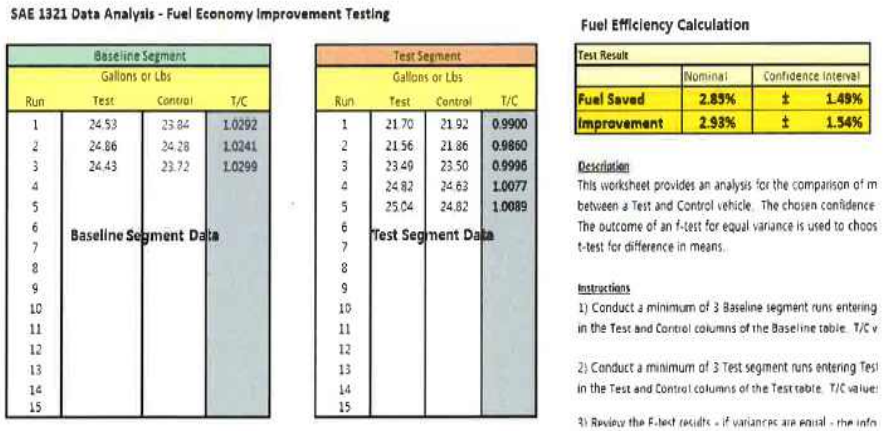
○ 차량에 설치한 통합단말기를 이용하여 차속을 취득하여 분석



<그림 12-26> Data Acquisition

(7) Fuel Efficiency Calculation

○ Baseline Segment, Test Segment 주행을 통해 도출된 연료 소모량 데이터를 이용하여 개발품 장착에 따른 연비 개선율 계산



SAE 1321 Data Analysis - Fuel Economy Improvement Testing

Baseline Segment			
Gallons or Lbs			
Run	Test	Control	T/C
1	24.53	23.84	1.0292
2	24.86	24.28	1.0241
3	24.43	23.72	1.0299
4			
5			
6	Baseline Segment Data		
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

Test Segment			
Gallons or Lbs			
Run	Test	Control	T/C
1	21.70	21.92	0.9900
2	21.56	21.86	0.9860
3	23.49	23.50	0.9996
4	24.82	24.63	1.0077
5	25.04	24.82	1.0089
6	Test Segment Data		
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

Fuel Efficiency Calculation

Test Result			
	Nominal	Confidence Interval	
Fuel Saved	2.85%	±	1.49%
Improvement	2.93%	±	1.54%

Description

This worksheet provides an analysis for the comparison of m
between a Test and Control vehicle. The chosen confidence
The outcome of an f-test for equal variance is used to choos
t-test for difference in means.

Instructions

1) Conduct a minimum of 3 Baseline segment runs entering
in the Test and Control columns of the Baseline table. T/C v

2) Conduct a minimum of 3 Test segment runs entering Test
in the Test and Control columns of the Test table. T/C value

3) Review the F-test results - if variances are equal - the info

<그림 12-27> Fuel Efficiency Calculation

(8) Test Pass/Fail Judgment

○ Data acquisition system을 통해 취득된 외부환경 데이터와 차속 데이터를 분석하여 외부환경요인이 본 실험 규정을 만족시킨 경우 실험 결과를 인정하고, 규정을 만족시키지 못한 경우 실험 실패로 간주하고 재실험 진행

다. 실험 결과

○ 실차 시험방법에 따라 10일간에 걸친 시험을 통해 아래와 같은 결과를 얻었음

○ 15톤 윙바디 트럭에 boat tail만 부착한 경우 시험 당시 순간풍속의 기준을 초과한 에러로 인하여 시험결과의 신뢰도는 떨어지나 연비가 개선되는 정성적인 효과는 확인

○ 15톤 윙바디 트럭에 side skirt와 boat tail을 같이 장착한 시험에서는 약 4.5±2.1%의 연료소비량 저감율을 나타내며, 약 4.7±2.1%의 연비 개선율을 나타냄

○ 40ft 트레일러 시험에서는 Angled-flap type의 Side skirt만 약 3.6±0.1%연비 개선을

나타내었으며 Boat tail의 효과는 미미한 것으로 나타남. 이것은 40ft 트레일러에 적재된 컨테이너의 corrugated surface에 기인한 유동박리에 의해 보트 테일의 효과가 제대로 나타나지 못한 것으로 사료됨

<표 12-14> PG 실차시험 결과

Test		Test Judgement	Nominal	Confidence interval
15ton cargo truck boat tail	Fuel saved	Fail	1.42 %	±1.35 %
	Improvement		1.44 %	±1.37 %
15ton cargo truck full assy. (Side skirt + Boat tail)	Fuel saved	Pass	4.51 %	±2.05 %
	Improvement		4.72 %	±2.14 %
40ft tractor-trailer side skirt	Fuel saved	Pass	3.44 %	±0.94 %
	Improvement		3.56 %	±0.97 %
40ft tractor-trailer full assy. (Side skirt + Boat tail)	Fuel saved	Pass	3.49 %	±1.19 %
	Improvement		3.62 %	±1.24 %

○ 실차시험 결과 사이드 스커트의 연비개선 성능 목표치인 3 %보다 높은 3.56 %로 성과목표를 달성하였음

<표 12-15> 사이드스커트 목표대비 성과

성과품	성능목표	연비시험 결과
사이드 스커트 (Tractor side skirt)	3 %	3.56 %

○ 상기 시험 외에도 40ft 트레일러에 대한 boat tail 단독시험, 15톤 윙바디 트럭에 대한 사이스커트 단독시험을 수행하였으나, 시험당시 먼 바다에 태풍 주의보가 내릴 정도로 평균풍속 및 순간풍속의 변화가 심하여 PG 테스트 심사기준 조건을 만족시키지 못하여 취득한 test 결과가 모두 Fail로 판정 처리됨

○ 연구 예산, PG 사용 여부 및 임차 일정 등에 기인하여 상대적으로 시험비용이 저렴하고, 외부 환경요인의 통제가 가능한 차대동력계를 이용하여 corrugated surface의 효과를 배제한 추가시험을 진행하기로 결정함

JIAT 전북자동차기술원 Jeonbuk Institute of Automotive Technology 573-879 전북 군산시 소룡동 동장산2길 6 Tel 063-472-2300 Fax 063-472-2398~9 E-mail jiat@jiat.re.kr http://www.jiat.re.kr

결과 보고서

제 목		‘화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발’ 개발품의 실차테스트		
의뢰인	회사명	(주)허즈앤티	의뢰일자	2015.09.10
	주 소	경기도 시흥시 경기과기대로 269	기 간	2015.10.03 ~ 2015.10.13
	담당자	김 대 욱 본부장	대 상 품	공기저항 및 공기와류 저감장치

1. 목적

- ‘화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발’ 과제 개발품의 연비 저감율 측정

2. 시험 개요

1) 시험기간 : 2015.10.03.~ 2015.10.13
2) 시험장소 : 교통안전공단 자동차안전연구원(KATRI) Proving Ground
3) 시 험 품 : 공기저항 및 공기와류 저감장치(Side Skirt, Boat Tail)
4) 시험규정 : SAE J1321에 기반한 정속주행연비평가
5) 비 고 : SAE J1321 국내 사정에 맞게 최적화

3. 시험결과

		Nominal	Confidence Interval
Cargo Truck Full Assy.	Fuel Saved	4.51%	2.05%
	Improvement	4.72%	2.14%
Tractor Side Skirt	Fuel Saved	3.44%	0.94%
	Improvement	3.56%	0.97%

- 상세설명 [붙임] 1. 참조

[붙임] 1. ‘화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발’ 개발품의 실차테스트

작 성 자	윤병규	2015.10.30	책 임 자	문남수	2015.10.30
보고서발행번호	JIAT-15-6760		의뢰서접수번호		

상기와 같이 결과 보고서를 제출합니다.

2015.10.30

전북자동차기술원장

본 결과보고서는 의뢰인이 제공한 시료·조건·방법 등에 대한 결과물이며, 기술원의 정식 승인 없이 수정 또는 일부를 복사하여 사용을 할 수 없음.
This report is limited of test results for samples, conditions and test procedures provided by the customer and shall not be revised and copied except in full, without the formal written approval of JIAT

<그림 12-28> PG실차시험결과보고서(전북자동차기술원)

2. 차대동력시험

가. 개요

□ **시제품의 연비개선효과 및 배출가스 개선효과, 비용대비 편익 등의 정량화를 위한 차대동력계 시험**

○ 기존차량 대비 공기저항저감장치 부착차량의 Coast down 측정 및 대형차대동력계 연비, 배출가스 성능 평가

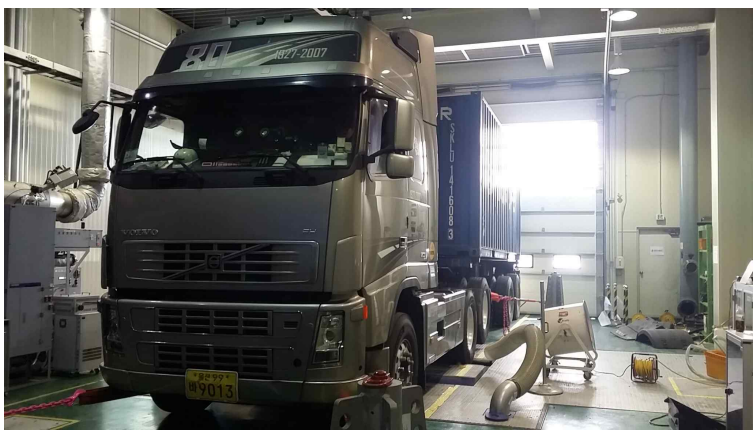
○ 시험기간 : 2016.03.18.

○ 시험장소 : (재)전북자동차기술원 동력성능평가동

○ 시험품 : 공기저항 및 공기와류 저감장치

○ 시험차량 : VOLVO FH 6x2 Tractor, 1대

<표 12-16> 차대동력시험용 차량 제원

항목	차량 제원
시험차량	FH 6x2 Tractor
제작사	Volvo
연 식	2008
변속기	AMT
배기량	13L
정격출력	500PS/1800RPM
연비	3.7km/L(차량등록증기준)
시험차량사진	

나. 시험장비

○ 차대동력계

- 자동차가 실제 도로상에서 주행할 때의 주행저항과 관성 등을 모사하여, 실제 도로가 아닌 차대동력계의 롤러위에서 시험차량이 도로상을 주행할 때와 비슷한 조건으로 운전되도록 재현하는 장치

- 차대동력계의 구성: 관성중량(Inertia weight), 동력흡수계(Power absorption unit), 제어기(Controller)
- 시험 셀 환경은 온도와 습도를 제어하며 온도는 산업통상자원부 고시 중 하나인“자동차의 에너지소비효율, 온실가스배출량 및 연료소비율 시험방법 등에 관한 고시(전문)(제2015 - 63호)에 의거하여 셀 온도를 25℃로 제어하며, 습도는 연비 측정의 정확성을 높이기 위하여 50%±1%로 시험 셀의 습도를 제어

<표 12-17> Chassis Dyno. Test Cell Control

	Setting Value	Measured Value
Test Cell Control Temp.	25℃	25±1℃
Test Cell Control Humidity	50%	50±1%

<표 12-18> 차대동력계 장비제원

장비명	모델	주요규격
Heavy Duty Chassis Dynamometer	2WD In-Line 540(AVL)	- Max. Power : 540 kW from 52.6 kph - Max. Tractive force : 36,985 N - Inertia Simulation range : 1,000~40,000 kg - Roller Diameter : 1,828.8 mm(72″) - Max. Test Speed : 150 kph - Max. Permissible axle load : 25,000 kg - Vehicle Cooling Fan : 144,000 m3/h - Max. Pull Down force 12,000 kg
Heavy Duty Vehicle Emission Measurement System	MEXA-7200D (HORIBA)	◉ Emission Analyzer ▸ CO low Analyzer - Range: 0-50-5,000 ppm or 0-100-5,000 ppm ▸ CO2 Analyzer - Range: 0-0.5-20% ▸ THC Analyzer - Range: 0-10-50,000 ppmC ▸ NOx / NO Analyzer - Range: 0-2-2,000ppm or 0-10-2,000 ppm ▸ NOx/NO Analyzer - Range: 0 -10/20/50/…5,000 ppm ▸ Methane Analyzer - Measuring Range: 9 ranges - Range: 0-5-2,500 ppmC or 0-10-2,500 ppm
	CVS-7400T (HORIBA)	◉ CVS System ▸ Primary Tunnel - Diameter: more than 18 Inch - Effective length: more than 10D - Calculation of the orifice Reynolds number. Re ≥ 4,000 ▸ 2nd Tunnel - 2sets - For EU Regulation - For CFR-1065 ▸ Particulate Filter Holder - Filter Size ϕ47 (Sample) x 3pcs ϕ47 (By-pass) x 1pc(with Cyclone) - Filter Size ϕ47 (Sample) x 1pc ϕ47 By-pass) x 1pc - The filter cassette for CFR 1065



<그림 12-29> 차대동력계 관련 장비

다. 시험방법

○ 차량 총중량 3.5 톤이상의 중·대형 자동차의 시험방법은 시험차에서 엔진만을 탈거하여 엔진동력계에서 출력 및 배출가스를 분석하는 시험방법이 전통적이나 본 연구에서는 최근 논의되고 있는 최신 시험방법인 대형자동차용 차대동력계를 이용하여 온실가스를 측정 및 분석함

○ 소형차대동력계와 같이 대형차대동력계, 보조 운전 장치, 시료채취장치, 희석터널, 입자상물질 측정 장치 및 배출가스 분석기 등으로 구성

○ 대형차대동력계는 자동차가 실제 도로를 주행할 때 정지, 가속, 정속, 감속 등을 반복하는 과정을 대표화한 실측 주행모드를 사용하여 모사 주행할 수 있도록 자동차에 부하를 걸어주는 관성중량, 동력흡수계, 제어기로 구성

○ 본 실험에서는 프루빙그라운드 실차시험과 유사한 조건의 주행모드로 시험

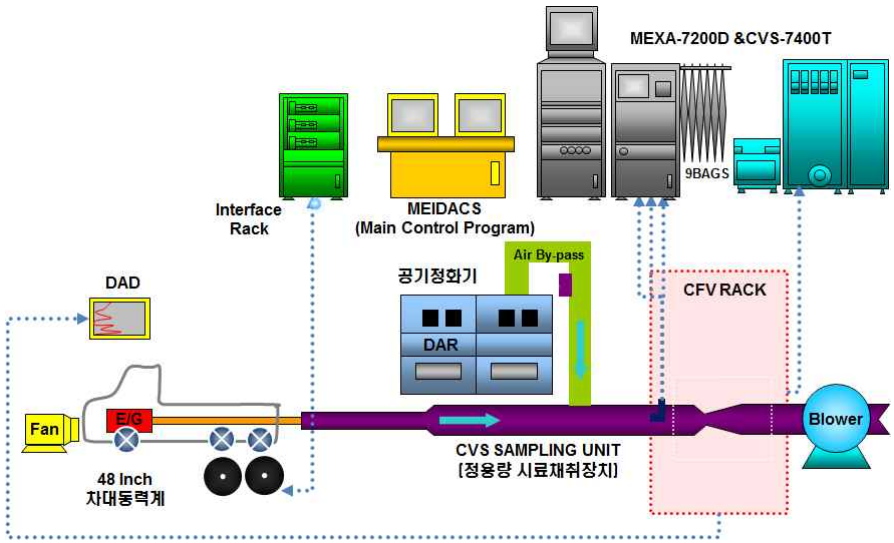


<그림 12-30> 차대동력계 시험

○ 자동차의 정상상태 여부판단을 위하여 측정하는 출력과 토크는 차량이 주행하는 롤러에 걸리는 부하와, 타이어 동하중반경 등의 data로 일본 시험방법에 따라 계산

○ 변속포인트는 JE05모드 시험방법 중 경유 등을 연료로 사용하는 중량차용 차속 변환프로그램 작성수순과 변환프로그램에 따라 계산

○ 계산된 변속포인트는 주행모드에 자동으로 입력되어지며, 운전자는 모니터링 되는 시간에 목표된 차속, 변속포인트에 따라 운전



<그림 12-31> 차대동력계 배기가스 배출측정시험 계략도

라. 분석방법

(1) 배출가스분석기

(가) 가스상 물질 분석기

○ 대형자동차의 배기관에서 발생되어 시료채집장치에 포집된 배출가스 및 온실가스를 분석하는 장치

○ 국내형식승인을 취득한 호리바사의 MEXA-7200D 사용

○ 국내 연구기관 및 제작사에서 활용하는 제품으로 희석된 배출가스를 150L규격의 Tedlar bag에 일정량을 채취하여 분석하게 되며, 실시간 분석 가능



<그림 12-32> 배기가스 분석장치

<표 12-19> 배기가스 분석장치 제원

MEXA-7200D(HORIBA)		
THC	HFID	0-50~2500ppmC
CO, CO_2	NDIR	0-50~5000ppm, 0-0.5~20vol%
NOx	CLD	0-1000~10000ppm
CH_4	GC/FID	0-5~2500ppm

(나) 대형희석터널

○ 자동차 배출가스를 공기와 희석하여 정용량으로 시료를 채취 할 수 있는 장치

○ 대형차에서 배출되는 배기가스가 배기관을 통해 희석터널에 유입되면 오리피스를 통해 외부공기와 혼합하며, 배기가스 중 입자상물질과 외부공기와의 혼합을 활성화하기위해 오리피스 직경의 10배 길이의 터널로 희석

○ 희석된 배출가스 중 PM은 희석터널에서 분취하게 되며, 높은 온도의 배출가스를 배출하는 트럭에서도 일정 온도 조건(52℃ 이하)에서 시료채취가 가능하도록 2차 터널 이용가능



<그림 12-33> 희석 터널

<표 12-20> 희석 터널 제원

DLS-7200, DLT-18120(HORIBA)	
대형터널본체 DLT-18120	대형터널 ø18inch 부피 120㎥/min
조작유닛	희석제어모드, 전유량방식
CVS-7400T	희석배기가스유량 40~120㎥/min
PM샘플필터 ø70mm 유리섬유여지	

(2) 배출가스분석방법

○ CO_2, CH_4 분석방법

- CO_2 및 CH_4의 측정은 차대동력계에서 시험차량이 실차주행과 같은 시험모드를 모사하여 주행시에 배기관으로 배출되는 가스를 정용량시료채취장치(CVS: Constant Volume Sampler)로 희석 후, 150L Tedlar bag에 분취되어 분석
- CO_2의 경우는 실시간 분석이 가능하나 CH_4의 경우 적산된 값만 분석



<그림 12-34> 온실가스 측정

<표 12-21> 분석항목

분 석 항 목	
온 실 가 스	CO_2
규 제 물 질	CO, HC, NOx, PM

(3) 주행 저항 설정방법(다이나모 타행법)

○ 목표 주행 저항값을 계산으로 구해, 이 목표 주행 저항값과 동등의 주행 저항을 샤시다이나모미터에 설치한 시험자동차에 더하는 부하 설정법

○ 목표 주행 저항값의 산출

○ 주행 저항값 산출을 실시하는 속도는, 10 km/h, 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h 및 90 km/h

○ 목표 주행 저항의 계산

$$F = \mu_r W + \mu_a A V^2$$

F:목표 주행 저항 (N)
μ_r:구름 저항 계수 (N/kg)
μ_a:공기 저항 계수 (N/(m²·(km/h)²))
A:시험 자동차의 전면 투영 면적 (m²)
w:시험 자동차 중량 (kg)
V:각 지정 속도 (km/h)

시험자동차의 전면 투영 면적 A

$A = B \times H$ B:시험자동차의 전체 폭 (m)
H:시험자동차의 전체 높이 (m)

구름저항계수 : $\mu_r = 9.8 \times (0.00513 + \frac{17.6}{W})$

공기저항 : $\mu_a A = 9.8 \times (0.00299 \times A - 0.000832)$

마. 시험결과

○ 연비시험결과

- 40ft 트레일러 차량에 사이드 스커트와 보트 테일을 부착하였을 때, PG test와 동일한 조건(평균차속 90km/h)에서 corrugated surface효과를 배제한 경우 6.6%의 연비 개선 효과를 나타냄
- Side skirt의 연비저감효과 3.5%를 제외할 경우, boat tail은 약 3.1% 연비 저감 효과를 가지는 것으로 유추할 수 있음
- 다른 주행 속도에서도 3.5% ~ 5.8%의 연비개선효과를 보여줌
- 대기오염물질의 배출량의 경우, 지속적인 반복실험 수행에 따른 과열로 NO_X배출양이 증가하였으나 PM의 배출양은 약 16.7% 저감하였음
- 차대동력계 시험결과, 최종 연비개선 성능 목표치인 5%보다 높은 6.6%로 성과목표를 달성하였음

<표 12-22> 차대동력계 속도별 시험결과

속도 (km/h)	Base 사양						개선사양					
	F.E (km/L)	CO_2 (g/km)	THC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	PM (mg/km)	F.E (km/L)	CO_2 (g/km)	THC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	PM (mg/km)
90 (개선효과)	3.8317	694.93	0.1444	0.4397	3.4723	19.037	4.0831	625.11	0.1367	0.4264	3.9048	15.85
							6.6%	-10.0%	-5.3%	-3.0%	12.5%	-16.7%
80 (개선효과)	3.7936	701.59	0.1923	0.5572	5.3503	-	4.0122	663.25	0.1911	0.5787	5.5487	-
							5.8%	-5.5%	-0.6%	3.9%	3.7%	
70 (개선효과)	4.5402	585.77	0.2022	0.6636	3.5951	-	4.7247	562.81	0.2038	0.6732	4.0315	-
							4.1%	-3.9%	0.8%	1.4%	12.1%	
60 (개선효과)	5.1268	518.28	0.2216	0.8035	3.3792	-	5.3068	500.64	0.22	0.8036	3.5681	-
							3.5%	-3.4%	-0.7%	0.0%	5.6%	

<표 12-23> 차대동력 시험을 통한 성능목표대비 시험결과

성과품	성능목표	연비시험 결과
보트테일 (Boat tail)	4 %	3.1 %
사이드스커트 + 보트테일 (Side skirt + Boat tail)	5 %	6.6 %

JIAT 전북자동차기술원 Jeonbuk Institute of Automotive Technology
573-879 전북 군산시 소룡동 동장산2길 6 Tel 063-472-2300
Fax 063-472-2398~9 E-mail jiat@jiat.re.kr http://www.jiat.re.kr

결과 보고서

제 목		대형차대동력계 기반 공기저항 및 공기와류 저감장치 연비평가		
의뢰인	회사명	허즈앤티	의뢰일자	2016.02.02
	주 소	경기도 시흥시 경기과기대로 269	기 간	2016.03.18
	담당자	김 대 욱 본부장	대 상 품	공기저항 및 공기와류 저감장치

1. 목적
 - '공기저항 및 공기와류 저감장치' 적용에 의한 대형상용차량의 연비, 배기가스 측정
2. 시험 개요
 1) 시험기간 : 2016.03.18.
 2) 시험장소 : 전북자동차기술원
 3) 시 험 품 : 공기저항 및 공기와류 저감장치
 4) 주행모드 : 의뢰처((주)허즈앤티) 제공
3. 연비시험결과

속도	Base 사양						개선 사양					
	F.E (km/L)	CO2 (g/km)	THC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	PM (mg/km)	F.E (km/L)	CO2 (g/km)	THC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	PM (mg/km)
90km/h	3.8317	694.93	0.1444	0.4397	3.4723	19.037	4.0831	652.11	0.1387	0.4284	3.9048	15.850
80km/h	3.7936	701.59	0.1923	0.5572	5.3503	-	4.0122	663.25	0.1911	0.5787	5.5497	-
70km/h	4.5402	585.77	0.2022	0.6636	3.5951	-	4.7247	562.81	0.2038	0.6732	4.0315	-
60km/h	5.1268	518.26	0.2216	0.8035	3.3792	-	5.3088	500.64	0.2200	0.8036	3.5681	-

4. 비고
 ※ 상기시험의 시험 관련 정보는 의뢰처((주)허즈앤티) 요청에 의거하여 상세 시험 결과 및 적용된 장비단 결과보고서에 표기

[붙임] 1. 대형차대동력계 기반 공기저항 및 공기와류 저감장치 연비평가
 2. 참고문(R16-0443)

작 성 자	윤병규	2016.04.08	책 임 자	문남수	2016.04.08
보고서발행번호	JIAT-16-2358		의뢰시점수번호		

상기와 같이 결과 보고서를 제출합니다.

2016.04.08

전북자동차기술원장

본 결과보고서는 의뢰인이 제공한 시료·조건·방법 등에 대한 결과물이며, 기술원의 정식 승인 없이 수정 또는 일부를 복사하여 사용할 수 없음.
This report is limited of test results for samples, conditions and test procedures provided by the customer and shall not be revised and copied except in full, without the formal written approval of JIAT

<그림 12-35> 차대동력시험결과보고서(전북자동차기술원)

제8절. 3차년도 연비개선 실차 성능 검증

1. Proving Ground 실차 시험

가. 개요

(1) 시제품의 연비개선 효과 측정을 위한 Proving Ground 검증

○ 시제품을 장착한 실차를 이용한 주행 성능 실험

○ US. EPA SAE J1321-TypeⅡ 실험방법을 통한 연비개선 효과 검증

○ 트렉터 - 42ft트레일러용 공기저항저감장치 시제품에 대한 연비개선 목표치 달성률 확인

(2) 고속 주행로 시설 및 제원(KATRI)

○ 규격 : 5,040m × 15.2~19.5 m (타원형)

○ 종방향 : 직선구간 967 m × 2, 완화구간 411 m × 4, 곡선구간 731 m × 2

○ 횡방향 : 직선구간 15.2 m, 곡선구간 19.5 m

○ 곡선반경 : 360m

○ 최대각도 42°

○ 최고속도 250 km/h(설계속도 180 km/h)



<그림 12-36> 자동차안전연구원 고속 주행로

(3) US. EPA SAE J1321-TypeⅡ

○ 2대의 동일한 트럭이 동시에 주행하여 Base test와 Treatment test 시행

○ 두 차량의 연료소비량의 차이로 결과 확인

○ 국내 대형화물차량의 제한속도는 90 km/h

○ 1회 주행거리는 81 km 이상으로 각 실험 당 3~5회 주행

(4) 실험 차종

○ 42ft 컨테이너 화물차량 2대(Base용, Treatment용 각 1대)

<표 12-24> 42ft 트레일러 화물차량 제원

실험차량	현대트랙터	Control Vehicle	Test Vehicle		
		Base	Base	Side skirt + Boat tail	Side skirt + Boat tail+Gap fairing
제작사	현대자동차				
엔진	D6CE				
배기량	12,742cc				
정격출력	520/1700Ps/RPM				

○ 실험기간 : 2016.09.28.-2016.10.05.

○ 실험장소 : 교통안전공단 자동차안전연구원 Proving Ground(고속주행로)

○ 실험장비 : 온습도계, 풍속계, 저울

○ 실험자 : 허즈앤티 김대욱 팀장, 안용현 부장, 오윤섭 대리, VCA 전상진 차장

○ 입회자 : 전북자동차기술원 윤병규 선임연구원

나. 실험방법

○ 개발품의 연비 개선율 평가를 위하여 연비 평가 규정 중 하나인 SAE J1321에 기반하여 시험을 진행하였으며, 국내 사정에 적합하지 않는 항목에 대해서는 협의를 통해 규정을 최적화 함.

<표 12-25> SAE J1321 및 규정 최적화 여부

SAE J1321	규정 최적화 여부	최적화 사유
중량법(혹은 유량계)을 이용한 연료 소비량 측정	PEMS를 이용한 연료 소모량 및 배출가스 성분(CO_2, NO_X, CO, PM)측정	
0.16km/h의 해상도를 지니는 GPS 적용	PEMS의 차속 데이터 이용	PEMS의 차속 데이터 이용
연료 소모량의 0.1% 상도를 지닌 저울 사용	PEMS 연비 데이터 이용	PEMS의 연비 데이터 이용
PM 측정 사항 없음	PM 측정	
CV, TV 동시 출발	CV, TV 1분 간격으로 순차적 출발	Proving Ground 특성 상 동시 출발 불가
차량 간 최소거리 457.2m 이상 유지	CV, TV 1분 간격으로 순차적 출발 타 회사와의 차량 간 거리 최대한 유지	Proving Ground 시험 시 타 회사 시험차량 간섭으로 인하여 차량 간 간격 유지 불가
차량 주행 Cruise 모드 이용	Full Accel.	시험차량 Cruise 주행 불가
운행 중 풍속 차이가 초당 8.05km/h 이상일 시 시험 Fail	운행 중 풍속 차이가 초당8.05km/h 이상인 구간 30회까지 용인	Proving Ground 특성 상 돌풍이 잦아 조건 만족 불가
차량 Warm-up 1시간 이상	트랙 4바퀴 주행	트랙 2바퀴 이상 주행할 경우 충분한 예열 가능(KATRI 조언)
스모크메타 사용하여 차량 체크	사용하지 않음	협의에 의한 항목 삭제
CV, TV 동일 차량 섭외	←	
시험 시 평균 풍속이 19.32km/h 이상일 경우 시험 Fail	←	
시험 시 외부 온도 4.44℃ ~ 37.8℃유지	←	
외부 환경 데이터 샘플링 속도 최소 1Hz 유지	←	
운행 중 차속 차이가 1.61km/h이상 발생할 경우 시험 Fail	←	←
시험 시 운행 거리 80.5km 이상	←	

※ CV : Control Vehicle, Reference Data 취득을 위한 차량
TV : Test Vehicle, 개발품의 개선효과 Data 취득을 위한 차량

(1) SAE J1321의 실험 진행 순서



<그림 12-37> SAE J1321의 실험 진행 순서

(2) Test Preparation

○ 실험에 앞서 차종·연식·특장형태 등이 최대한 동일한 차량 준비

○ 각 차량에 물리적·기계적인 이상 유무 확인, 엔진오일·공기필터·연료필터 교체 및 오일 보충, 타이어압 확인 등의 차량 정비 실시

○ PEMS 이용하여 연료소모량을 확인하기 위하여 차량에 PEMS 설치



<그림 12-38> Test Preparation

(3) Driving Preparation

○ Proving Ground 주행로의 노면상태나 주행장 조건이 실험에 영향이 없는지 미리 확인

○ 주행장의 Grade 3.5% 미만 여부를 사전에 확인

○ 풍속, 온도 등 외부 환경 인자 측정을 위하여 1Hz 이상의 Data Acquisition 속도를 지닌 센서 설치

○ 주행 전 운전자 교육과 사전 준비 실험을 통해 동일한 주행조건을 정립하고, 각 실험 전 4바퀴의 주행을 통해 CV, TV 차량 예열



<그림 12-39> Driving Preparation

(4) Baseline Segment Driving

○ 개발품 장착을 하지 않은 실험 전 상태의 CV, TV 차량을 주행하여 장착 전 각 차량의 연료소모량 측정

○ 다음 실험 절차를 최소 3회 이상 반복하여 연료 소모량 측정

<표 12-26> Baseline Segment Driving

실험절차	세부내용
PEMS Calibration	주행 시험 전 PEMS의 Calibration을 진행하여 연비 및 배출가스 측정을 위한 Zero/Span값을 확인
차량 예열	Proving Ground를 4바퀴 주행하여 CV, TV 차량 예열
차량 주행	동일 시작점에서 1분 간격으로 TV, CV 차량이 순차적으로 출발
	급가속으로 출발하여, 타겟 주행속도(최고속도) 도달 시 정속 주행(Curise 모드가 가능할 경우 적용)
	Proving Ground 17바퀴(85km) 주행
차량 정차	주행시작점에 차량 정차
	정차 후 Idle 상태를 유지하여 1 분후 시동 Off
연료소모량 및 배출가스배출 측정 결과 확인	PEMS에서 계산된 연료 소모량(Liter), 배출가스 배출량(CO2, NOX, CO, PM), 차속 등의 데이터를 추출



<그림 12-40> Baseline Segment Driving

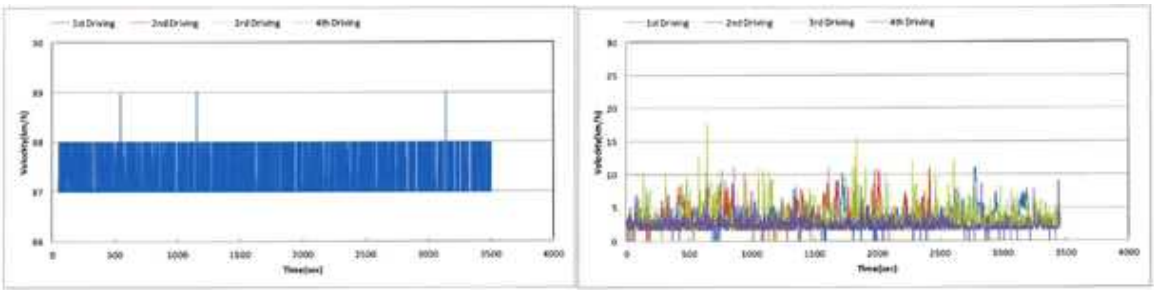
(5) Test Segment Driving

○ 실험 목적에 의거하여 TV차량에 개발품을 장착하고, CV 차량은 Baseline Segment와 동일하게 개발품을 장착하지 않은 상태에서 실험 진행

○ 개발품 장착 후 Baseline Segment Driving 실험 절차를 최소 3회 이상 반복하여 연료 소모량 측정

(6) Data Acquisition

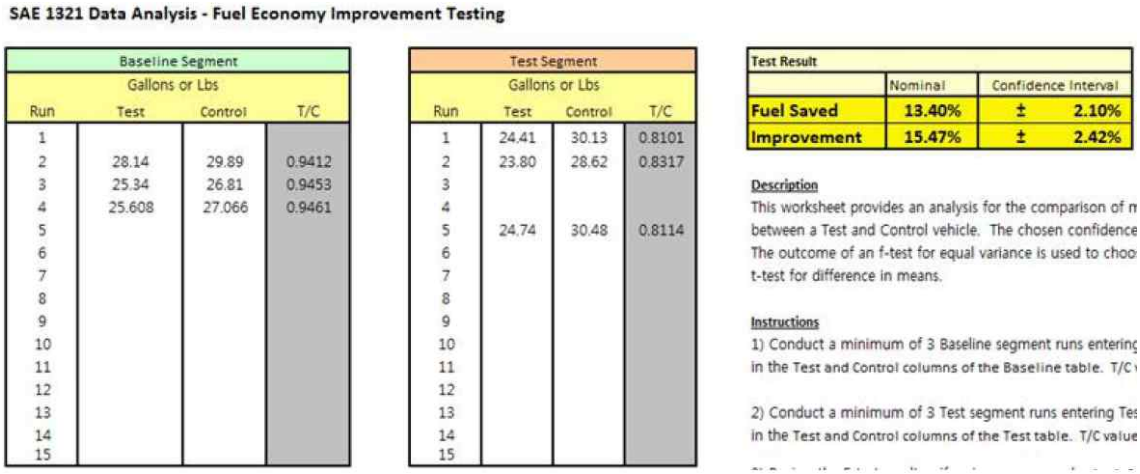
○ 실험 전 설치한 센서들의 데이터를 취득하여 주행 중 풍속 데이터를 분석하고, 주행 중 온·습도 및 대기압 데이터 분석



<그림 12-41> Data Acquisition

(7) Fuel Efficiency Calculation

○ Baseline Segment, Test Segment 주행을 통해 도출된 연료 소모량 데이터를 이용하여 개발품 장착에 따른 연비 개선율 계산



SAE 1321 Data Analysis - Fuel Economy Improvement Testing

Baseline Segment

Gallons or Lbs

Run	Test	Control	T/C
1			
2	28.14	29.89	0.9412
3	25.34	26.81	0.9453
4	25.608	27.066	0.9461
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

Test Segment

Gallons or Lbs

Run	Test	Control	T/C
1	24.41	30.13	0.8101
2	23.80	28.62	0.8317
3			
4			
5	24.74	30.48	0.8114
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

Test Result

	Nominal	Confidence Interval	
Fuel Saved	13.40%	±	2.10%
Improvement	15.47%	±	2.42%

Description

This worksheet provides an analysis for the comparison of m
between a Test and Control vehicle. The chosen confidence
The outcome of an f-test for equal variance is used to choo
t-test for difference in means.

Instructions

1) Conduct a minimum of 3 Baseline segment runs enterin
in the Test and Control columns of the Baseline table. T/C

2) Conduct a minimum of 3 Test segment runs entering Te
in the Test and Control columns of the Test table. T/C value

<그림 12-42> Fuel Efficiency Calculation

(8) Test Pass/Fail Judgment

Data acquisition system을 통해 취득된 외부환경 데이터와 차속 데이터를 분석하여 외부환경요인이 본 실험 규정을 만족시킨 경우 실험 결과를 인정하고, 규정을 만족시키지 못한 경우 실험 실패로 간주하고 재실험 진행

다. 실험 결과

□ **실차 시험방법에 따라 8일간에 걸친 시험을 통해 아래와 같은 결과를 얻었음**

(1) Gap fairing, Side skirt, Boat tail 부착

○ 연비 약 13.4±2.1%의 연료소비량 저감율을 나타내며 약 15.5±2.4%의 연비 개선율을 나타냄

○ CO_2 약 11.74±2.2%의 배출량 저감율을 나타내며 약 13.30±2.5%

○ NOx 약 8.75±20.34%의 배출량 저감율을 나타내며 약 9.59±22.29%

(2) Side skirt, Boat tail 부착

○ 연비 약 4.32±2.1%의 연료소비량 저감율을 나타내며, 약 4.5±2.2%의 연비 개선율을 나타냄

○ CO_2 약 2.45±2.1%의 배출량 저감율을 나타내며 약 2.5±2.2%

○ NOx 약 4.87±13.95%의 배출량 저감율을 나타내며 약 5.12±14.%

<표 12-27> PG 실차시험 연비결과

Test		Nominal	Confidence interval
Side Skirt + Boat Tail + Gap Fairing	Fuel saved	13.40%	± 2.10%
	Improvement	15.47%	± 2.42%
Side Skirt + Boat Tail	Fuel saved	4.32%	± 2.08%
	Improvement	4.51%	± 2.18%

<표 12-28> PG실차시험 배출가스결과

			Nominal	Confidence Interval
Side Skirt + Boat Tail + Gap Fairing	CO_2	Saved	11.74%	± 2.20%
		Improvement	13.30%	± 2.49%
	PM	Saved	-7.37%	± 5.77%
		Improvement	-6.86%	± 5.38%
	NO_X	Saved	8.75%	± 20.34%
		Improvement	9.59%	± 22.29%
	CO	Saved	18.80%	± 44.95%
		Improvement	23.15%	± 55.36%
Side Skirt + Boat Tail	CO_2	Saved	2.45%	± 2.14%
		Improvement	2.51%	± 2.19%
	PM	Saved	-2.93%	± 9.53%
		Improvement	-2.85%	± 9.26%
	NO_X	Saved	4.85%	± 13.95%
		Improvement	5.12%	± 14.66%
	CO	Saved	10.26%	± 40.66%
		Improvement	11.44%	± 45.23%

<표 12-29> 사이드스커트 목표대비 성과

성과품	성능목표	연비시험 결과
Trailer full aero. package (Side skirt + Boat tail+ Gap fairing)	5 %	15.47 %
Side skirt + Boat tail	3 %	4.51 %
Gap fairing	2 %	10.9 %

○ 연구 예산, PG 사용 여부 및 임차 일정 등에 기인하여 상대적으로 시험비용이 저렴하고, 외부 환경요인의 통제가 가능한 차대동력계를 이용하여 corrugated surface의 효과를 배제한 추가시험을 진행하기로 결정함

JIAT 자동차융합기술원 Jeonbuk Institute of Automotive convergence Technology
54158 전라북도 군산시 동장산2길 6 Tel. 063-472-2300
Fax. 063-472-2399 E-mail. jiat@jiat.re.kr http://www.jiat.re.kr

결과 보고서

제 목		'화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발' 개발품 실차테스트		
의뢰인	회사명	(주)허즈앤티	의뢰일자	2016.07.01
	주 소	경기도 시흥시 경기과기대로 269	기 간	2016.09.30 ~ 2016.10.05
	담당자	김 대 욱 본부장	대 상 품	공기저항 및 공기와류 저감장치

1. 목적

- '화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발' 과제 개발품의 연비 저감율 측정

2. 시험 개요

1) 시험기간 : 2016.09.30.-- 2016.09.05
2) 시험장소 : 교통안전공단 자동차안전연구원(KATRI) Proving Ground
3) 시 험 품 : 공기저항 및 공기와류 저감장치(Gap Fairing, Side Skirt, Boat Tail)
4) 시험규정 : SAE J1321에 기반한 정속주행연비평가
5) 비 고 : SAE J1321 국내 사정에 맞게 최적화
PEMS를 적용한 연비 및 배출가스 평가

3. 시험결과_연비

		Nominal	Confidence Interval
Gap Fairing + Side Skirt + Boat Tail	Fuel Saved	13.40%	2.10%
	Improvement	15.47%	2.42%
Side Skirt + Boat Tail	Fuel Saved	4.32%	2.08%
	Improvement	4.51%	2.18%

4. 시험결과_배출가스

			Nominal	Confidence Interval
CO2	Gap Fairing + Side Skirt + Boat Tail	Saved	11.74%	2.20%
		Improvement	13.30%	2.49%
	Side Skirt + Boat Tail	Saved	2.45%	2.14%
		Improvement	2.51%	2.19%
NOx	Gap Fairing + Side Skirt + Boat Tail	Saved	8.75%	20.34%
		Improvement	9.59%	22.29%
	Side Skirt + Boat Tail	Saved	4.87%	13.95%
		Improvement	5.12%	14.66%

- 상세설명 [붙임] 1. 참조

[붙임] 1. '화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발' 개발품 실차테스트

작 성 자	윤병규	2016.12.19	책 임 자
보고서발행번호		의뢰서접수번호	

상기와 같이 결과 보고서를 제출합니다.

자동차융합기술원장

본 결과보고서는 의뢰인이 제공한 시료·조건·방법 등에 대한 결과물이며, 기술원의 정식 승인 없이 수정 또는 일부를 복사하여 사용을 할 수 없음.
This report is limited of test results for samples, conditions and test procedures provided by the customer and shall not be revised and copied except in full, without the formal written approval of JIAT

<그림 12-43> PG실차시험결과보고서(자동차융합기술원)

2. 차대동력시험

가. 개요

□ **시제품의 연비개선효과 및 배출가스 개선효과, 비용대비 편익 등의 정량화를 위한 차대동력계 시험**

○ 기존차량 대비 공기저항저감장치 부착차량의 Coast down 측정 및 대형차대동력계 연비, 배출가스 성능 평가

○ 시험기간 : 2017. 02. 22. ~ 2017. 02. 23.

○ 시험장소 : (재)자동차융합기술원 동력성능평가동

○ 시험품 : 공기저항 및 공기와류 저감장치

○ 시험차량 : 트라고, 1대

<표 12-30> 차대동력시험용 차량 제원

항목	차량 제원
시험차량	트라고
제작사	현대자동차
연 식	2011
변속기	H420ZF
배기량	9960 cc
정격출력	400PS/1800RPM
연비	4.3km/L(차량등록증기준)
시험차량사진	

나. 시험장비

(1) 차대동력계

○ 자동차가 실제 도로상에서 주행할 때의 주행저항과 관성 등을 모사하여, 실제 도로

가 아닌 차대동력계의 롤러위에서 시험차량이 도로상을 주행할 때와 비슷한 조건으로 운전되도록 재현하는 장치

○ 차대동력계의 구성: 관성중량(Inertia weight), 동력흡수계(Power absorption unit), 제어기(Controller)

○ 시험 셀 환경은 온도와 습도를 제어하며 온도는 산업통상자원부 고시 중 하나인“자동차의 에너지소비효율, 온실가스배출량 및 연료소비율 시험방법 등에 관한 고시(전문)(제2015 - 63호)에 의거하여 셀 온도를 25℃로 제어하며, 습도는 연비 측정의 정확성을 높이기 위하여 50%±1%로 시험 셀의 습도를 제어

<표 12-31> Chassis Dyno. Test Cell Control

	Setting Value	Measured Value
Test Cell Control Temp.	25℃	25±1℃
Test Cell Control Humidity	50%	50±1%

<표 12-32> 차대동력계 장비제원

장비명	모델	주요규격
Heavy Duty Chassis Dynamometer	2WD In-Line 540(AVL)	- Max. Power : 540 kW from 52.6 kph - Max. Tractive force : 36,985 N - Inertia Simulation range : 1,000~40,000 kg - Roller Diameter : 1,828.8 mm(72″) - Max. Test Speed : 150 kph - Max. Permissible axle load : 25,000 kg - Vehicle Cooling Fan : 144,000 m^3/h - Max. Pull Down force 12,000 kg
Heavy Duty Vehicle Emission Measurement System	MEXA-7200D (HORIBA)	◉ Emission Analyzer ▸ CO low Analyzer - Range: 0-50-5,000 ppm or 0-100-5,000 ppm ▸ CO2 Analyzer - Range: 0-0.5-20% ▸ THC Analyzer - Range: 0-10-50,000 ppmC ▸ NOx / NO Analyzer - Range: 0-2-2,000ppm or 0-10-2,000 ppm ▸ NOx/NO Analyzer - Range: 0 -10/20/50/…5,000 ppm ▸ Methane Analyzer - Measuring Range: 9 ranges - Range: 0-5-2,500 ppmC or 0-10-2,500 ppm
	CVS-7400T (HORIBA)	◉ CVS System ▸ Primary Tunnel - Diameter: more than 18 Inch - Effective length: more than 10D - Calculation of the orifice Reynolds number. Re ≥ 4,000 ▸ 2nd Tunnel - 2sets - For EU Regulation - For CFR-1065 ▸ Particulate Filter Holder - Filter Size ϕ47 (Sample) x 3pcs ϕ47 (By-pass) x 1pc(with Cyclone) - Filter Size ϕ47 (Sample) x 1pc ϕ47 By-pass) x 1pc - The filter cassette for CFR 1065



<그림 12-44> 차대동력계 관련 장비

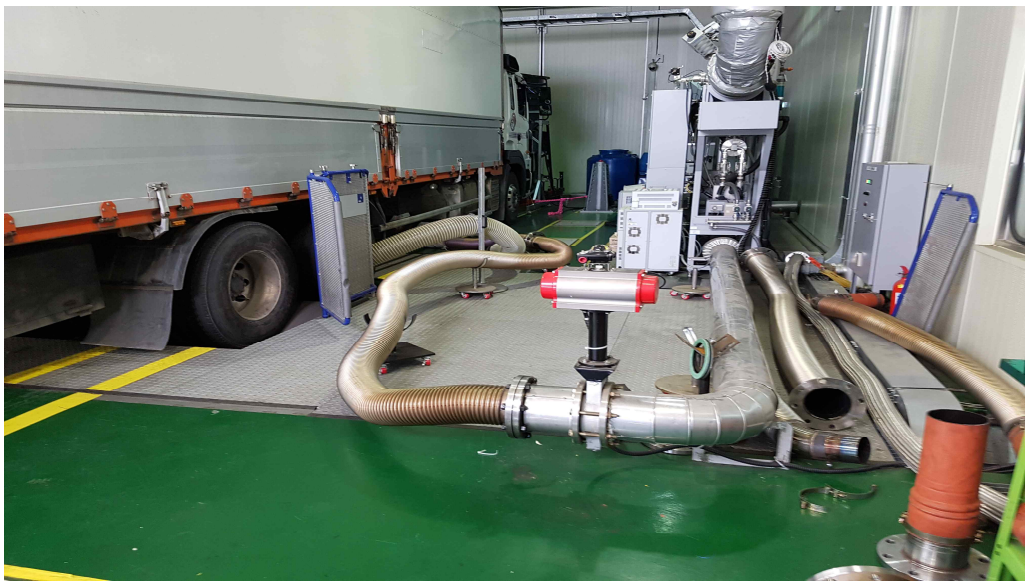
다. 시험방법

○ 차량 총중량 3.5 톤 이상의 중·대형 자동차의 시험방법은 시험차에서 엔진만을 탈거하여 엔진동력계에서 출력 및 배출가스를 분석하는 시험방법이 전통적이나 본 연구에서는 최근 논의되고 있는 최신 시험방법인 대형자동차용 차대동력계를 이용하여 온실가스를 측정 및 분석함

○ 소형차대동력계와 같이 대형차대동력계, 보조 운전 장치, 시료채취장치, 희석터널, 입자상물질 측정 장치 및 배출가스 분석기 등으로 구성

○ 대형차대동력계는 자동차가 실제 도로를 주행할 때 정지, 가속, 정속, 감속 등을 반복하는 과정을 대표화한 실측 주행모드를 사용하여 모사 주행할 수 있도록 자동차에 부하를 걸어주는 관성중량, 동력흡수계, 제어기로 구성

○ 본 실험에서는 프루빙그라운드 실차시험과 유사한 조건의 주행모드로 시험

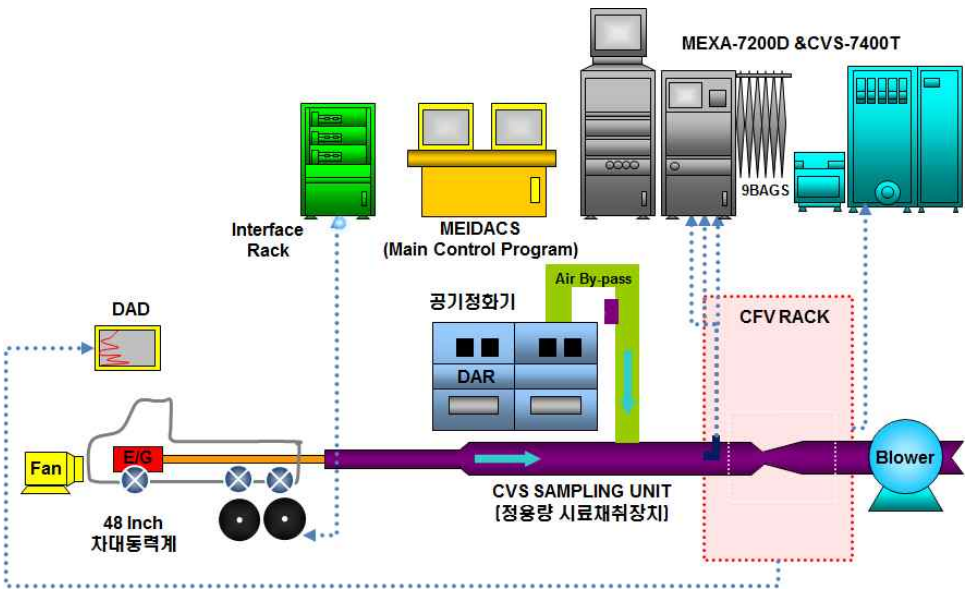


<그림 12-45> 차대동력계 시험

○ 자동차의 정상상태 여부판단을 위하여 측정하는 출력과 토크는 차량이 주행하는 롤러에 걸리는 부하와, 타이어 동하중반경 등의 data로 일본 시험방법에 따라 계산

○ 변속포인트는 JE05모드 시험방법 중 경유 등을 연료로 사용하는 중량차용 차속 변환프로그램 작성수순과 변환프로그램에 따라 계산

○ 계산된 변속포인트는 주행모드에 자동으로 입력되어지며, 운전자는 모니터링 되는 시간에 목표된 차속, 변속포인트에 따라 운전



<그림 12-46> 차대동력계 배기가스 배출측정시험 계략도

라. 분석방법

(1) 배출가스분석기

(가) 가스상 물질 분석기

○ 대형자동차의 배기관에서 발생되어 시료채집장치에 포집된 배출가스 및 온실가스를 분석하는 장치

○ 국내형식승인을 취득한 호리바사의 MEXA-7200D 사용

○ 국내 연구기관 및 제작사에서 활용하는 제품으로 희석된 배출가스를 150L규격의 Tedlar bag에 일정량을 채취하여 분석하게 되며, 실시간 분석 가능



<그림 12-47> 배기가스 분석장치

<표 12-33> 배기가스 분석장치 제원

MEXA-7200D(HORIBA)		
THC	HFID	0-50~2500ppmC
CO, CO_2	NDIR	0-50~5000ppm, 0-0.5~20vol%
NOx	CLD	0-1000~10000ppm
CH4	GC/FID	0-5~2500ppm

(2) 대형희석터널

○ 자동차 배출가스를 공기와 희석하여 정용량으로 시료를 채취 할 수 있는 장치

○ 대형차에서 배출되는 배기가스가 배기관을 통해 희석터널에 유입되면 오리피스를 통해 외부공기와 혼합하며, 배기가스 중 입자상물질과 외부공기와의 혼합을 활성화하기위해 오리피스 직경의 10배 길이의 터널로 희석

○ 희석된 배출가스 중 PM은 희석터널에서 분취하게 되며, 높은 온도의 배출가스를 배출하는 트럭에서도 일정 온도 조건(52℃ 이하)에서 시료채취가 가능하도록 2차 터널 이용가능



<그림 12-48> 희석 터널

<표 12-34> 희석 터널 제원

DLS-7200, DLT-18120(HORIBA)	
대형터널본체 DLT-18120	대형터널 ø18inch 부피 120㎥/min
조작유닛	희석제어모드, 전유량방식
CVS-7400T	희석배기가스유량 40~120㎥/min
PM샘플필터 ø70mm 유리섬유여지	

(3) 배출가스분석방법

○ CO_2, CH_4 분석방법

- CO_2 및 CH_4의 측정은 차대동력계에서 시험차량이 실차주행과 같은 시험모드를 모사하여 주행시에 배기관으로 배출되는 가스를 정용량시료채취장치(CVS: Constant Volume Sampler)로 희석 후, 150L Tedlar bag에 분취되어 분석
- CO_2의 경우는 실시간 분석이 가능하나 CH_4의 경우 적산된 값만 분석



<그림 12-49> 온실가스 측정

<표 12-35> 분석항목

분 석 항 목	
온 실 가 스	CO_2
규 제 물 질	CO, HC, NOx, PM

(4) 주행 저항 설정방법(JE05 Calculation)

○ 목표 주행 저항값을 계산으로 구해, 이 목표 주행 저항값과 동등의 주행 저항을 샤시다이나모미터에 설치한 시험자동차에 더하는 부하 설정법

○ 목표 주행 저항값의 산출

○ 주행 저항값 산출을 실시하는 속도는, 10 km/h, 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h 및 90 km/h

○ 목표 주행 저항의 계산

<표 12-36> 목표주행 저항의 계산식

<table>
<tr><td colspan="2">$F = \mu_r W + \mu_a A V^2$</td><td colspan="3">시험자동차의 전면투영면적 A</td></tr>
<tr><td>F : 목표주행저항
μ_r : 구름저항계수
μ_a : 공기저항계수
A : 시험자동차의 전면투영면적
W : 시험자동차중량
V : 각지정속도</td><td>(N)
(N/kg)
$(N/(m^2 \cdot (km/h)^2))$
(m^2)
(kg)
(km/h)</td><td>$A = B \times H$</td><td>B : 시험자동차의 전체폭
H : 시험자동차의 전체높이</td><td>(m)
(m)</td></tr>
<tr><td colspan="3">구름저항계수 : $\mu_r = 9.8 \times \left(0.00513 + \frac{17.6}{W}\right)$</td></tr>
<tr><td colspan="3">공기저항계수 : $\mu_a A = 9.8 \times (0.00299 \times A - 0.000832)$</td></tr>
</table>

마. 시험결과

(1) 연비시험결과

○ 15톤 트럭 차량에 사이드 스커트와 보트 테일을 부착하였을 때, PG test와 동일한 조건(평균차속 90km/h)에서 corrugated surface효과를 배제한 경우 1차 시험에서 10.9%, 2차 시험에서 15.1%의 연비 개선효과를 나타냄

○ 차대동력계 시험결과, 최종 연비개선 성능 목표치인 5%보다 높은 15.1%로 성과목표를 달성하였음

(2) 배출가스시험결과

○ 대기오염물질의 배출량의 경우, 지속적인 반복실험 수행에 따른 과열로 NO_X배출양이 1차 -2.28% 저감, 2차 31.44% 증가하였으나 PM의 배출양은 1차 -7.55% 저감, 2차 -0.52% 저감하였음

<표 12-37> 차대동력계 속도별 시험결과

차량구분	Fuel Efficiency (km/L)	NOx (g/km)	PM (mg/km)	CO_2 (g/km)	THC (g/km)	CO (g/km)
BASE	4.17310	4.50581	6.951	638.69213	0.08687	0.10649
TEST 1	4.62304	4.40587	6.426	576.20021	0.09241	0.11957
TEST 2	4.80319	5.92608	6.915	554.75603	0.10623	0.12674

<표 12-39> 차대동력 시험을 통한 15ton 트럭의 연비저감 목표대비 시험결과

성과품	목표	연비시험 결과
Advanced bio-inspired CRF + Side skirt + Boat tail	5 %	15.1 %
Side skirt + Boat tail	3 %	10.9 %

JIAT 자동차융합기술원 Jeonbuk Institute of Automotive convergence Technology
54158 전라북도 군산시 동장산2길 6 Tel. 063-472-2300
Fax. 063-472-2399 E-mail. jiat@jiat.re.kr http://www.jiat.re.kr

결과 보고서

제 목		대형차대동력계 상 15톤 탑차용 공기저항저감장치 시제품 연비평가		
의뢰인	회사명	㈜허즈앤티	의뢰일자	2017.01.26
	주 소	경기도 시흥시 경기과기대로 269	기 간	2017.02.22 ~ 2017.02.23
	담당자	오 윤 섭 대리	대 상 품	공기저항저감장치

1. 목적
   - 대형차대동력계 상 15톤 탑차용 공기저항저감장치 시제품의 연비평가

2. 시험개요
   1) 시험기간 2017.02.22 ~ 2017.02.23
   2) 시험장소 (재)자동차융합기술원 동력성능평가동
   3) 시 험 품 공기저항저감장치(Side Skirt, Boat Tail)
   4) 시험모드 SAE J1321 기반 정속 주행 모드

3. 시험결과

차량구분	Fuel Efficiency (km/L)	NOx Emission (g/km)	PM Emission (mg/km)	CO2 Emission (g/km)	THC Emission (g/km)	CO Emission (g/km)
BASE	4.17310	4.50581	6.951	638.69213	0.08687	0.10649
TEST 1	4.62504	4.40587	6.426	576.20021	0.09241	0.11957
TEST 2	4.80319	5.92608	6.915	554.75603	0.10623	0.12674

- 상세설명 [붙임]1. 참조

[붙임] 1. 대형차대동력계 기반 15Ton 탑차용 공기저항장치 시제품 연비평가 끝.

작 성 자	윤병규	2017.02.27	책 임 자	사정환	2017.02.27
보고서발행번호	JIAT-17-1153		의뢰서접수번호		

상기와 같이 결과 보고서를 제출합니다.

2017.02.27

자동차융합기술원장

본 결과보고서는 의뢰인이 제공한 시료·조건·방법 등에 대한 결과물이며, 기술원의 정식 승인 없이 수정 또는 일부를 복사하여 사용을 할 수 없음.
This report is limited of test results for samples, conditions and test procedures provided by the customer and shall not be revised and copied except in full, without the formal written approval of JIAT

<그림 12-50> 차대동력시험결과보고서(전북자동차기술원)

제9절. 기대효과 분석

1. 비용편익분석 방법 및 절차

가. 비용편익분석 방법

○ 일반적으로 정부의 정책목표를 달성하는 구체적인 사업이나 정책수단을 선택하기 위해 각 대안의 비용과 편익을 비교할 때는 다음과 같은 2가지 방법을 사용하고 있음

○ 트랙터-트레일러의 경우 Trailer full aero. package (side skirts + boat tail + gap fairing) 부착 PG 시험 결과인 13.4% 연비저감율 반영하여 계산

○ 탑차의 경우 side skirts + boat tail 조합을 기반으로 차대동력계 시험결과인 10.9% 연비저감율 반영하여 계산 (3차년도 차대동력계시험 결과)

(1) 순편익의 현재가치 비교

○ 현재가치기준(present value criterion)을 사용하여 비용과 편익을 비교할 경우에는 먼저 각 연도에 발생하는 편익에서 비용을 빼준 순편익을 구한 뒤, 이러한 순편익의 현재가치의 합을 극대화하는 공공사업이나 정책을 선택하도록 함

- 사업시작 후 t년에 발생하는 편익과 비용을 각각 B_t와 C_t라 하고, 사업의 효과가 완전히 종료되는 시점이 사업시작 후 T년이라 하면, 이 사업의 순편익의 현재가치의 합은 다음과 같음

$$PVNB = \sum_{t=0}^{T} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}$$

- 따라서, 현재가치기준을 따를 경우 개별 공공사업이나 정책의 $PVNB$가 0 이상이면 이를 수행할 가치가 있고, 반면 $PVNB$가 0보다 작은 사업이나 정책은 시행되지 말아야 함

- 또한, 서로 다른 여러 가지 공공사업이나 환경정책이 있을 경우 가장 큰 $PVNB$을 가지는 사업이나 정책이 우선적으로 시행되어야 함. 따라서 현재가치기준을 적용할 경우 개별 사업이나 정책이 시행되어야 할지를 결정할 수 있을 뿐만 아니라, 여러 가지 사업이나 정책이 시행되어야 할 순서를 효율성을 기준으로 하여 결정할 수 있음

(2) B/C비율의 비교

○ B/C비율(Benefit-Cost ratio)을 사용하여 각 사업이나 정책을 평가할 경우에는 편익의 현재가치의 합을 비용의 현재가치의 합으로 나누어 그 비율이 1이상이면 사업을 시행하고 반대로 1이하이면 사업을 시행하지 않음. 즉, B/C비율은 다음과 같이 정의됨

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^{T} \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{T} \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

○ B/C비율은 순편익의 현재가치의 합과는 다음과 같은 1:1대응관계를 가짐

$$\frac{B}{C} \geq 1 \rightarrow \sum_{t=0}^{T} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \geq 0$$

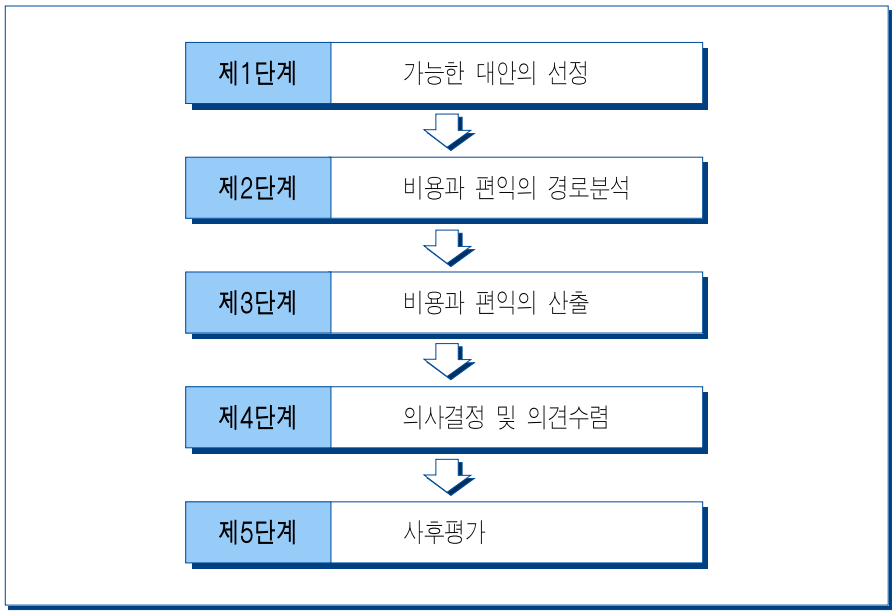
$$\frac{B}{C} < 1 \rightarrow \sum_{t=0}^{T} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} < 0$$

○ 이상과 같이 B/C비율을 사용하여 개별 사업이나 정책이 사회적 순편익을 증대시키는지의 여부를 파악할 수 있고, 따라서 이 사업이나 정책이 시행되어야 하는지를 파악할 수 있음

○ 그러나, B/C비율은 각 사업의 후생효과의 단위(scale)가 서로 다른 측면을 고려하지 못하기 때문에 내부수익률과 마찬가지로 서로 다른 대안간의 우선순위를 결정하는 데는 사용될 수가 없음

나. 비용편익분석의 시행 절차

○ 비용편익분석의 실제 시행은 <그림 5-27>에서 보는 바와 같이 가능한 대안의 선정, 비용 및 편익의 경로분석, 비용과 편익의 산출, 의사결정 및 의견수렴, 사후평가의 5단계를 거쳐 이루어지게 됨.



<그림 12-51> 경제성평가의 시행절차

2. 대기오염물질 단위당 환경피해비용 추정

○ 대기오염물질의 한계피해비용은 관련 선행 연구결과들을 활용하여 우리나라에 편익이전하여 추정함

가. EU의 대기오염물질별 한계피해비용 추정치

○ EU(2005, CAFE CBA)의 대기오염물질별 한계피해비용 추정치를 우리나라에 편익이전하여 에너지원별 대기오염물질별 한계피해비용을 추정[6]

6) EU(2005, CAFE CBA). 대기오염물질별 한계피해비용에 대한 기존 연구에서는 EU(2005, CAFE CBA)에서 수행한 연구가 가장 신뢰가 있으며, 이를 바탕으로 개별국가에 적용한 연구들이 다수 존재한다. 예를 들면, E(2014), CE DELFT(2007), 벨기에 정부(2010) 등이다.

○ 그 이유는 EU(2005, CAFE CBA)의 연구결과는 EU(2002)[7] 및 기존 연구결과들[8]에 비해 가장 광범위한 자료와 신뢰성 있는 분석방법론을 적용하였고 대기오염물질 배출로 인한 피해를 광범위하게 추정하고 있기 때문임

○ 이 연구는 EMEP 모형에 기반한 대기확산모형(dispersion modelling)을 이용하여 인체건강피해, 농작물 피해 및 material damage를 추정하였음[9]

○ 또한 EU(2005, CAFE CBA)의 연구는 EU차원 및 회원국들의 참여 결과로 나타난 것으로써 지금까지도 유럽국가들 뿐만 아니라 관련 연구계에서 수송, 가정, 상업 및 산업부문에서 광범위하게 적용되고 있으며 이를 대체할 만한 신뢰성 있는 연구는 아직까지 나오고 있지 않는 실정임

○ EU(2005) CAFE CBA의 추정결과를 기반으로 다음과 같은 대기오염물질로 인한 인체건강 피해비용 시나리오(high, central, low 시나리오)를 설정하였음

- S1(upper bound, VOLY median): 대기오염물질로 인한 인체건강피해 high 시나리오[10]
- S2(central, VOLY mean): 대기오염물질로 인한 인체건강피해 central 시나리오[11]
- S3(lower bound, VSL mean): 대기오염물질로 인한 인체건강피해 low 시나리오[12]

○ EU(2005)에서는 SO_2, NO_X, VOCs, NH_3에 대해서는 도시과 농촌의 차이가 거의 없는 것으로 제시하고 있음

○ 그러나 $PM_{2.5}$에 대해서는 현저한 차이가 있다고 함

○ EU(2005)에서 제시하고 있는 $PM_{2.5}$에 대한 피해비용은 도시와 농촌을 대표하지 않으며 이 둘 사이의 중간을 나타낸다고 볼 수 있음

○ 따라서 우리나라에 EU(2005)의 추정 값을 편익 이전할 경우 $PM_{2.5}$는 도시(특히 수도권)와 농촌에 대한 차이를 고려하여 추정할 필요가 있음

○ <표 5-24>은 앞에서 제시한 EU(2005) CAFE CBA의 시나리오별로 대기오염물질별 한계피해비용 값을 요약한 것임

---

7) EU(ExternE, 2002)

8) 기존 연구는 USEPA(2011), Yale University(2007), 영국 DEFRA(2006) 등이다.

9) The methodology used here has been developed through extensive discussion and consultation with stakeholders from the EU Member States, various Eropean Agencies, WHO, industry and NGOs from October 2003 to January 2005.

10) $PM_{2.5}$와 오존이 영향을 주는 chronic bronchitis(만성 기관지염)에 의한 사망율이 high인 경우(250,000유로/case)

11) $PM_{2.5}$와 오존이 영향을 주는 chronic bronchitis(만성 기관지염)에 의한 사망율이 central인 경우(190,000유로/case)

12) $PM_{2.5}$와 오존이 영향을 주는 chronic bronchitis(만성 기관지염)에 의한 사망율이 low인 경우(120,000유로/case)

<표 12-39> 시나리오별 대기오염물질별 한계피해비용

(단위: 유로/톤)

시나리오	PM	NOx
S1 (upper bound)	75,000	12,000
S2 (central)	51,000	8,200
S3 (lower bound)	26,000	4,400

주: PM_{10} = $PM_{2.5}$ x 0.6 (출처: HEATCO)
자료: EU(2005) CAFE CBA

나. 편익이전 방법 및 결과

○ 여기에서는 앞의 EU(2005) 추정결과에서 중간 값인 S2를 채택하여 다음과 같은 방법에 의해 우리나라로 편익 이전

- 편익이전 시에는 EU 회원국가 대비 우리나라의 인구밀도, 일인당 실질GDP(PPP 기준), 환율(2013년 기준)을 고려

○ 추정공식

$$A(Korea, 2013) = B(\text{상대국}, 2013) \times R_{adj}$$

여기에서,

$$R_{adj} = \left(\frac{PPP(2013)_{\text{상대국}}}{PPP(2013)_{Korea}}\right) \times \left(\frac{\text{일인당}GDP(2013)_{Korea}}{\text{일인당}GDP(2013)_{\text{상대국}}}\right) \times \left(\frac{\text{인구밀도}(2013)_{\text{상대국}}}{\text{인구밀도}(2013)_{Korea}}\right)$$

PPP: 구매력평가지수(purchasing power parity)

○ 우리나라에 대한 편익이전 결과는 <표 5-25>와 같음

<표 12-40> 우리나라 편익이전 결과

시나리오	PM	NO_X
S2 (central)	277,799	44,666

주: 2013년 연평균 환율: 1,453.56원/유로

3. CO_2 배출량 당 한계피해비용 추정

○ CO_2 배출량의 한계피해비용은 관련 선행 연구결과들을 활용하여 우리나라에 편익이전하여 추정함

○ 본 연구에서는 CO_2 배출량 단위당 한계피해비용[13]을 EPA 추정치(2013)를 적용

- EPA(2013)은 3% 할인율 적용하고 있으며 이 경우 2015년에 CO_2 배출량 단위당 한계피해비용은 37달러/ton임

13) 통상 CO_2에 의해 발생하는 사회적 비용(Social cost of carbon)은 기후변화로 인해 발생하는 인체 건강 피해, 농업 생산성 감소, 홍수 위험으로 인한 물리적 피해 등을 포함한다(미국 EPA, 2013).

- 미국은 화력발전 배출 억제부터 차량 연비 규제까지 다양한 배출 저감 정책을 평가할 때 주요 측정 방법으로써 CO_2 한계 피해비용을 $37/ton를 사용하고 있음[14)]

○ 본 연구에서는 앞에서 제시한 CO_2 한계피해비용에 2013년 기준 연평균 환율을 적용하여 우리나라에 편익이전 함

<표 12-41> CO_2 한계피해비용 편익이전 값

	편익이전 값
CO_2 한계피해비용 (원/톤, 2013년 기준)	40,516원/톤

주: 2013년 연평균 환율: 1 US 달러당 1,095.04원

4. 본 연구의 비용편익분석 결과

가. 편익(연비개선) 및 비용(부착물비 및 운영비) 고려 시 비용편익 분석

(1) 대상 시나리오

○ 시나리오 S1

- 적용 대상차: 트렉터-트레일러
- 적용 Device: Side skirts + Boat tail
- 보급대수: 1만대
- 사용연한: 10년

시나리오	적용대상차	적용 Device	보급대수	사용연한
S1	트랙터-트레일러	Side skirts + Boat tail	1만대	10년

(2) 비용추정

○ 시나리오 S1

- 소요비용은 부착물비 450,000만원 및 운영비(부착물비의 3%) 13,500만원의 합으로 연간 463,000만원으로 추정

부착물	대당가격 (원)	보급대수 (만대)	총비용 (만원)	사용연한 (년)	연간총비용 (만원)
side skirts + boat tail	4,500,000	1	4,500,000	10	450,000
운영비(연간)	부착물 가격의 3%로 책정	1	135,000	10	13,500
합 계					463,500

14) 관련 연구들은 EU(ExternE, 2005), Stanford University(2015), 영국 정부(2010), 벨기에 정부(2011), CE DELFT(2008)을 들 수 있다. 한편 Richard S.J. Tol(2009)의 연구로 기존논문 232개를 대상으로 메타회귀분석하여 CO_2 톤당 28.4$(Mean, unweighted sample)~40.8$(Mean, weighted fitted distribution)의 한계피해비용을 제시하고 있다.

(3) 편익추정

○ 시나리오 S1

- 연비개선 편익은 연간 2,480,500만원으로 추정

연비 (km/리터)	1일 평균 주행거리(km)	연간운행 일수(일)	경유가격[1] (원/리터)	보급대 수(만대)	연비 개선율	연비개선 편익 (만원/년)
3.87	600	300	1,183	1	0.0451	2,480,500

주: 1) 한국석유공사(2016년 평균가격)

(4) 비용편익 분석 결과

○ 시나리오 S1

- 부착물(side skirts + boat tail)의 설치연한을 10년으로 계상하고 다음 항목들을 고려하여 순편익(실질)의 현재가치를 추정하여 B/C비율을 추정

* 물가상승율(2014-2016년 평균): 0.43% (자료: 통계청 국가통계포털)
* 할인율: 5.5% (자료: KDI)

- 추정결과 순편익(실질)의 현재가치는 18,486천만원이며 B/C비율은 4.31로 나타나 본 사업은 경제성이 높은 것으로 평가됨

(단위: 천만원)

년도	t	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5	t+6	t+7	t+8	t+9	합계 (10년)
비용(명목) -부착물	4,500										4,500
비용(명목) -운영비	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	1350
총비용(명목)	4,635	135	135	135	135	135	135	135	135	135	5,850
총편익(명목)	2,480	2,480	2,480	2,480	2,480	2,480	2,480	2,480	2,480	2,480	24,805
총비용(실질)	4,654	135,581	136,163	136,749	137,337	137,928	138,521	139,116	139,714	140,315	5,896
총편익(실질)	2,491	2,501	2,512	2,523	2,534	2,545	2,556	2,567	2,578	2,589	25,399
총비용(실질) 현재가치	4,412	128	129	129	130	130	131	131	132	133	5,588
총편익(실질) 현재가치	2,361	2,371	2,381	2,391	2,402	2,412	2,422	2,433	2,443	2,454	24,075
순편익(실질)현재가치										**18,486**	
B/C비율										**4.31**	

나. 편익(연비개선 및 환경개선) 및 비용(부축물비) 고려시 비용편익분석

(1) 대상 시나리오

○ 시나리오 S1

- 적용 대상차: 트렉터-트레일러
- 적용 Device: Side skirts + Boat tail
- 보급대수: 1만대
- 사용연한: 10년

○ 시나리오 S2

- 적용 대상차: 탑차
- 적용 Device: Side skirts + Boat tail
- 보급대수: 3만대
- 사용연한: 10년

시나리오	적용대상차	적용 Device	보급대수	사용연한
S1	트랙터-트레일러	Side skirts + Boat tail	1만대	10년
S2	탑차	Side skirts + Boat tail	3만대	10년

(2) 비용 추정

○ 시나리오 S1

- 소요비용은 부착물비 연간 450,000만원으로 추정

부착물	대당가격 (원)	보급대수 (만대)	총비용 (만원)	사용연한 (년)	연간총비용 (만원)
side skirts + boat tail	4,500,000	1	4,500,000	10	450,000

○ 시나리오 S2

- 소요비용은 부착물비 연간 1,440,000만원으로 추정

부착물	대당가격 (원)	보급대수 (만대)	총비용 (만원)	사용연한 (년)	연간총비용 (만원)
side skirts + boat tail	4,800,000	3	14,400,000	10	1,440,000

(3) 편익추정

○ 시나리오 S1

- 연비개선 편익은 연간 2,480,500만원으로 추정

연비 (km/L)	1일 평균 주행거리(km)	연간운행 일수(일)	경유가격 (원/리터)	보급대수 (만대)	연비 개선율	연비개선편익 (만원/년)
3.87	600	300	1,183	1	0.0451	2,480,500

- CO_2 개선편익은 연간 127,202만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	톤당 가격[1](원)	CO_2개선편익(만원/년)
0.6949	600	300	1	0.0251	40,516	127,202

주 1) 앞 <표 12-40> 참조

- NO_X 개선 편익은 연간 1,428,397만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	Kg당 피해비용[1](원)	NO_X개선편익(만원/년)
3.47	600	300	1	0.0512	44,666	1,428,397

주 1) 앞 <표 12-39> 참조

- PM 개선편익은 연간 159,377만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	Kg당 피해비용[1](원)	PM개선편익(만원/년)
0.01904	600	300	1	0.1674	277,799	159,377

주 1) 앞 <표 12-39> 참조

- 이상의 연비개선편익 및 환경개선편익의 합계는 연간 4,195,477만원으로 추정됨

○ 시나리오 S2

- 연비개선 편익 연간 6,279,075만원으로 추정

연비(km/L)	1일 평균 주행거리(km)	연간운행일수(일)	경유가격(원/리터)	보급대수(만대)	연비개선율	연비개선편익(만원/년)
4.8	600	300	1,183	3	0.0472	6,279,075

- CO_2 개선편익은 연간 1,148,608만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	톤당 가격(원)	CO_2개선편익(만원/년)
0.5368	600	300	3	0.0978	40,516	1,148,608

- NO_X 개선 편익은 연간 2,318,766만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	Kg당 피해비용(원)	NO_X개선편익(만원/년)
3.94	600	300	3	0.0244	44,666	2,318,766

- PM 개선편익은 연간 35,640만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	Kg당 피해비용(원)	PM개선편익(만원/년)
0.00337	600	300	3	0.0705	277,799	35,640

- 이상의 연비개선편익 및 환경개선편익의 합계는 연간 9,782,089만원으로 추정됨

(4) 비용편익분석 결과

○ 시나리오 S1

- 부착물(side skirts + boat tail)의 설치연한을 10년으로 계상하고 다음 항목들을 고

려하여 순편익(실질)의 현재가치를 추정하여 B/C비율을 추정

* 물가상승율(2014-2016년 평균): 0.43%
* 할인율: 5.5%

- 추정결과 순편익(실질)의 현재가치는 28,358천만원이며 B/C비율은 9.32로 나타나 본 사업은 경제성이 높은 것으로 평가됨

(단위: 천만원)

년도	t	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5	t+6	t+7	t+8	t+9	합계 (10년)
비용(명목)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	4,500
편익(명목)	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	41,954
비용(실질)	451	453	455	457	459	461	463	465	467	469	4,607
편익(실질)	4,213	4,231	4,249	4,268	4,286	4,304	4,323	4,341	4,360	4,379	42,959
비용(실질) 현재가치	428	406	384	364	345	327	310	294	279	264	3,406
편익(실질) 현재가치	3,993	3,785	3,588	3,401	3,223	3,055	2,896	2,745	2,602	2,466	31,759
순편익(실질)현재가치										**28,353**	
B/C비율										**9.32**	

다. 편익(연비개선 및 환경개선) 및 비용(부착물비 및 운영비) 고려 시 비용편익분석

(1) 시나리오 설정

○ 대상 시나리오 S1

- 적용 대상차: 트렉터-트레일러
- 적용 Device: Side skirts + Boat tail
- 보급대수: 1만
- 사용연한: 10년

○ 대상 시나리오 S2

- 적용 대상차: 탑차
- 적용 Device: Side skirts + Boat tail
- 보급대수: 3만대
- 사용연한: 10년

시나리오	적용대상차	적용 Device	보급대수	사용연한
S1	트랙터-트레일러	Side skirts + Boat tail	1만대	10년
S2	탑차	Side skirts + Boat tail	3만대	10년

(2) 비용 추정

○ 시나리오 S1

- 소요비용은 부착물비 450,000만원 및 운영비(부착물비의 3%) 13,500만원의 합으로 연간 463,500만원으로 추정

부착물	대당가격 (원)	보급대수 (만대)	총비용 (만원)	사용연한 (년)	연간총비용 (만원)
side skirts + boat tail	4,500,000	1	4,500,000	10	450,000
운영비(연간)	부착물 가격의 3%로 책정	1	135,000	10	13,500
합계					463,500

○ 시나리오 S2

- 소요비용은 부착물비 1,440,000만원 및 운영비(부착물비의 3%) 129,600만원의 합으로 연간 1,569,600만원으로 추정

부착물	대당가격 (원)	보급대수 (만대)	총비용 (만원)	사용연한 (년)	연간총비용 (만원)
side skirts + boat tail	4,800,000	3	14,400,000	10	1,440,000
운영비(연간)	부착물 가격의 3%로 책정	3	1,296,000	10	129,600
합계					1,569,600

(3) 편익추정

○ 시나리오 S1

- 연비개선 편익은 연간 2,480,500만원으로 추정

연비 (km/L)	1일 평균주행 거리(km)	연간운행 일수(일)	경유가격 (원/리터)	보급대수 (만대)	연비개선율	연비개선편익 (만원/년)
3.87	600	300	1,183	1	0.0451	2,480,500

- CO_2 개선편익은 연간 127,202만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행 거리(km)	연간운행 일수(일)	보급대수 (만대)	개선율	톤당 가격(원)	CO_2개선편익 (만원/년)
0.6949	600	300	1	0.0251	40,516	127,202

- NO_X 개선 편익은 연간 1,428,397만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행 거리(km)	연간운행 일수(일)	보급대수 (만대)	개선율	Kg당 피해 비용(원)	NO_X개선편익 (만원/년)
3.47	600	300	1	0.0512	44,666	1,428,397

- PM 개선편익은 연간 159,377만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	Kg당 피해비용(원)	PM개선편익(만원/년)
0.01904	600	300	1	0.1674	27,7799	159,377

- 이상의 연비개선편익 및 환경개선편익의 합계는 연간 4,195,477만원으로 추정됨

○ 시나리오 S2

- 연비개선 편익은 연간 6,279,075만원으로 추정

연비(km/리터)	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	경유가격(원/리터)	보급대수(만대)	연비개선율	연비개선편익(만원/년)
4.8	600	300	1,183	3	0.0472	6,279,075

- CO_2 개선편익은 연간 1,148,608만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	톤당 가격(원)	CO_2개선편익(만원/년)
0.5368	600	300	3	0.0978	40,516	1,148,608

- NO_X 개선 편익은 연간 2,318,766만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	Kg당 피해비용(원)	NO_X개선편익(만원/년)
3.94	600	300	3	0.0244	44,666	2,318,766

- PM 개선편익은 연간 35,640만원으로 추정

배출계수	1일 평균주행거리(km)	연간운행일수(일)	보급대수(만대)	개선율	Kg당 피해비용(원)	PM개선편익(만원/년)
0.00337	600	300	3	0.0705	277,799	35,640

- 이상의 연비개선편익 및 환경개선편익의 합계는 연간 9,782,089만원으로 추정됨

(4) 비용편익분석 결과

○ 시나리오 S1

- 부착물(side skirts + boat tail)의 설치연한을 10년으로 계상하고 다음 항목들을 고려하여 순편익(실질)의 현재가치를 추정하여 B/C비율을 추정

* 물가상승율(2014-2016년 평균): 0.43%
* 할인율: 5.5%

- 추정결과 순편익(실질)의 현재가치는 28,251천만원이며 B/C비율은 9.05로 나타나 본 사업은 경제성이 높은 것으로 평가됨

(단위: 천만원)

년도	t	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5	t+6	t+7	t+8	t+9	합계 (10년)
비용(명목) -운영비추가	463	463	463	463	463	463	463	463	463	463	4,630
편익(명목)	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	4,195	41,950
비용(실질)	465	467	469	471	473	475	477	479	481	483	4,746
편익(실질)	4,213	4,231	4,249	4,268	4,286	4,304	4,323	4,341	4,360	4,379	42,959
비용(실질) 현재가치	441	418	396	375	356	337	319	303	287	272	3,508
편익(실질) 현재가치	3,993	3,785	3,588	3,401	3,223	3,055	2,896	2,745	2,602	2,466	31,759
순편익(실질)현재가치											**28,251**
B/C비율											**9.05**

○ 시나리오 S2

- 부착물(side skirts + boat tail)의 설치연한을 10년으로 계상하고 다음 항목들을 고려하여 순편익(실질)의 현재가치를 추정하여 B/C비율을 추정

* 물가상승율(2014-2016년 평균): 0.43%
* 할인율: 5.5%

- 추정결과 순편익(실질)의 현재가치는 62,168천만원이며 B/C비율은 6.23으로 나타나 본 사업은 경제성이 높은 것으로 평가됨

(단위: 천만원)

년도	t	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5	t+6	t+7	t+8	t+9	합계 (10년)
비용(명목) -운영비추가	1,569	1,569	1,569	1,569	1,569	1,569	1,569	1,569	1,569	1,569	15,690
편익(명목)	9,782	9,782	9,782	9,782	9,782	9,782	9,782	9,782	9,782	9,782	97,820
비용(실질)	1,576	1,583	1,589	1,596	1,603	1,610	1,617	1,624	1,631	1,638	16,072
편익(실질)	9,824	9,866	9,908	9,951	9,994	10,037	10,080	10,123	10,167	10,210	100,164
비용(실질) 현재가치	1,494	1,416	1,342	1,272	1,206	1,143	1,083	1,027	973	922	11,881
편익(실질) 현재가치	9,311	8,826	8,366	7,930	7,516	7,124	6,753	6,401	6,067	5,751	74,050
순편익(실질)현재가치											**62,168**
B/C비율											**6.23**

○ 시나리오 S1-1

- Trailer full aero package의 경우 S1시나리오에 별도 추가계산하였으며 설치연한을 10년으로 계상하고 다음 항목들을 고려하여 순편익(실질)의 현재가치를 추정하여 B/C비율을 추정
- 추정결과 순편익(실질)의 현재가치는 28,353천만원이며 B/C비율은 9.32로 나타나 본 사업은 경제성이 높은 것으로 평가됨

<표 12-42> 사회적 비용편익 분석 시나리오

구분		트렉터-트레일러
피해 비용 분석	1대당 CO_2감축량	14.15 톤
	1대당 발생되는 비용편익	4,287,442 원/년
	연비	2,480,500 만원/년
개선편익	CO_2	127,202 만원/년
	NO_X	1,428,397 만원/년
	PM	159,377 만원/년
	편익합계	9,782,089 만원/년
B/C Ratio	적용대수	10,000 대
	연간 총장착비용	450 억원
	정부투자 연구개발비용	3 억원
	장치 내구연한	10년
	비용(실질) 현재가치	3,406,517 만원
	편익(실질)현재가치	31,759,919 만원
	순편익(실질)현재가치	28,353,402 만원
	투자비에 대한 B/C ratio	9.32

제10절.법·제도 방안 검토

1. 관련 법령

○ 자동차 및 자동차 부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제 19조의 3에 트럭의 측면 보호대와 관련된 규정이 존재

○ 측면보호대는 그 취지와 특성상 사이드 스커트에 포함되는 내용

○ 그러나 제 19조의 ③ 1에는 측면보호대와 타이어 사이의 간격을 정의

- 기존 차량에 본 연구 개발품 중의 하나인 플랩형 사이드 스커트 설치 시 기존 설치된 측면 보호대의 앞쪽 부분을 절단할 필요가 있으나 현재의 규칙에 따르면 불법사항에 해당
- 그러나 '보행자 등이 뒷바퀴에 말려들 우려가 없는 구조의 자동차에 있어서는 그러하지 아니하다.'라는 조항에 있어 사이드 스커트가 측면 보호대 대체품으로 인정 시 이 문제는 해결될 가능성이 있을 것으로 사료됨

<표 12-43> 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙

제19조(차대 및 차체)

③차량총중량이 8톤 이상이거나 최대적재량이 5톤 이상인 화물자동차·특수자동차 및 연결자동차는 포장노면위의 공차상태에서 다음 각 호의 기준에 적합한 측면보호대를 설치하여야 한다. 다만, **보행자 등이 뒷바퀴에 말려들 우려가 없는 구조의 자동차에 있어서는 그러하지 아니하다.** <개정 2001.4.28., 2009.6.18.>

1. 측면보호대의 양쪽 끝과 앞·뒷바퀴와의 간격은 각각 400밀리미터 이내일 것. 다만, 측면보호대의 양쪽 끝과 **앞·뒷바퀴와의 간격을 400밀리미터 이내**로 설치하기가 곤란한 구조의 자동차의 경우 앞·뒷바퀴와 가장 가까운 위치에 설치한 때는 그러하지 아니하다.
2. 측면보호대의 가장 아랫 부분과 지상과의 간격은 500밀리미터 이하일 것
3. 측면보호대의 가장 윗부분과 지상과의 간격은 700밀리미터 이상일 것. 다만, 그 간격을 700밀리미터 이상으로 설치하기가 곤란한 구조의 자동차의 경우에는 그러하지 아니하다.
4. 측면보호대 가장 바깥쪽 면은 차체의 가장 바깥쪽 면보다 안쪽에 위치하여야 하며, 그 간격은 120밀리미터 이하일 것. 다만, 자동차의 길이방향으로 측면보호대의 뒷부분부터 최소한 250밀리미터에 해당하는 부분은 측면보호대의 가장 바깥쪽 면이 차체의 가장 바깥쪽 면부터 타이어의 가장 바깥쪽 면의 안쪽으로 30밀리미터까지에 해당하는 구간에 위치하도록 설치하여야 한다.

○ 자동차 및 자동차 부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제 2장 자동차 및 이륜자동차의 안전기준 제1절 4조에 트럭의 길이·너비 및 높이에 관련된 규정이 존재

- 차체 밖에 부착하는 후사경, 안테나, 밖으로 열리는 창, 긴급자동차의 경광등 및 환기장치등의 바깥 돌출부분은 이를 제거하거나 닫은 상태에서 측정하여야 한다고 명시

○ 도로교통법 시행규칙 제 29조에서는 안정행정부령으로 정하는 기준이란 자동차안전기준에 관련 규칙에서 정하지 아니한 것으로서 안전운전에 현저히 장애가 될 정도의

장치라 규정하고 있음

- 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제39조, 42조, 43조 44조에 후퇴등, 후미등, 제동등, 방향지시등에 관련된 시안성 확인가능에 관한 규정이 존재
- 그러나 보트테일은 설치된 후미등의 위치보다 높게 설치가 되기 때문에 시안성 확인 기준을 만족할 것으로 사료됨

<표 12-44> 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙(1)

제4조(길이·너비 및 높이) ①자동차의 길이·너비 및 높이는 다음의 기준을 초과하여서는 아니된다. <개정 1997.1.17.>

1. 길이 : 13미터(연결자동차의 경우에는 16.7미터를 말한다)
2. 너비 : 2.5미터(후사경·환기장치 또는 밖으로 열리는 창의 경우 이들 장치의 너비는 승용자동차에 있어서는 25센티미터, 기타의 자동차에 있어서는 30센티미터. 다만, 피견인자동차의 너비가 견인자동차의 너비보다 넓은 경우 그 견인자동차의 후사경에 한하여 피견인자동차의 가장 바깥쪽으로 10센티미터를 초과할 수 없다)
3. 높이 : 4미터

②제1항의 규정에 의한 자동차의 길이·너비 및 높이는 다음 각호의 상태에서 측정하여야 한다.

1. 공차상태
2. 직진상태에서 수평면에 있는 상태
3. **차체 밖에 부착하는 후사경, 안테나, 밖으로 열리는 창, 긴급자동차의 경광등 및 환기장치등의 바깥 돌출부분은 이를 제거하거나 닫은 상태**

제39조(후퇴등) 자동차의 뒷면에는 다음 각호의 기준에 적합한 후퇴등을 설치하여야 한다. <개정 1995.7.21., 2005.8.10.>

1. 2개 이하로 설치할 것
2. 등광색은 백색 또는 황색으로 하고, 등화의 중심점은 공차상태에서 지상 25센티미터 이상 120센티미터 이하의 높이에 설치할 것
3. 등화장치의 광원을 통과하는 지면에 수평인 면과 시험스크린과의 교차선(H선) 하부의 한 등당 광도가 300칸델라를 초과하는 경우 주광축은 하향으로 하고, 자동차뒤쪽 75미터이내의 지면을 비출 수 있도록 설치할 것

<표 12-45> 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙(2)

4. 자동차의 변속장치를 후퇴위치로 조작할 때에 점등되도록 할 것
5. 1등당 광도는 등화중심선의 위쪽에서는 80칸델라 이상 600칸델라 이하이고, 아랫쪽에서는 80칸델라 이상 5천칸델라이하일 것
6. 지름 2.5센티미터의 관측표를 광원의 중심점과 일치하게 렌즈에 붙인후 자동차뒤쪽 90센티미터 및 자동차 가장바깥쪽의 좌우 90센티미터를 포함하는 범위와 높이 60센티미터 이상 180센티미터 이하의 범위의 **어느 위치에서도 관측표의 전체를 확인할 수 있을 것**

제43조(제동등) ①자동차의 뒷면 양쪽에는 다음 각 호의 기준에 적합한 제동등을 설치하여야 한다. <개정 1995.7.21., 2008.1.14., 2008.12.8.>

1. 제15조제8항 및 제9항에 따라 작동될 것
2. 등광색은 적색으로 할 것
3. 1등당 광도는 40칸델라이상 420칸델라 이하일 것
4. 다른 등화와 겸용하는 제동등은 제동조작을 할 경우 그 광도가 3배 이상으로 증가할 것
5. 등화의 중심점은 공차상태에서 지상 35센티미터 이상 200센티미터 이하의 높이로 하고 차량중심선을 기준으로 좌우대칭이 되도록 설치할 것
6. 등화의 중심점을 기준으로 자동차외측의 **수평각 45도에서 볼 때에 투영면적이 1등당 12.5제곱센티미터(후부반사기와 겸용하는 경우에는 후부반사기의 면적을 제외한다)이상일 것**

제44조(방향지시등) 자동차에는 다음 각 호의 기준에 적합한 방향지시등을 설치하여야 하며, 보조방향지시등을 설치할 수 있다. <개정 1995.7.21., 2008.12.8., 2010.11.10.>

1. 자동차의 앞·뒷면(피견인자동차의 경우에는 앞면을 제외한다) 양쪽 또는 옆면에 차량중심선을 기준으로 좌우대칭이 되고, 등화의 중심점은 공차상태에서 지상 35센티미터이상 200센티미터 이하의 높이가 되게 할 것. 다만, 옆면에 보조방향지시등을 설치할 경우에는 길이가 600센티미터 미만의 자동차에 있어서는 자동차의 가장 앞에서 200센티미터이내, 길이가 600센티미터 이상의 자동차에 있어서는 자동차의 가장 앞에서 자동차 길이의 60퍼센트이내의 위치에 설치하여야 한다.
2. 차량중심선과 평행한 등화의 중심점을 기준으로 **자동차외측의 수평각 45도에서의 1등당 투영면적이 12.5제곱센티미터 이상일 것**
3. 등화의 유효조광면적은 다음 각목의 기준에 적합할 것
   가. 앞면 : 1등당 22제곱센티미터 이상
   나. 뒷면 : 1등당 37.5제곱센티미터 이상

제42조(후미등) 자동차의 뒷면 양쪽에는 다음 각호의 기준에 적합한 후미등을 설치하여야 한다. <개정 1995.7.21.>

1. 1등당 광도는 2칸델라 이상 25칸델라 이하일 것
2. 등광색은 적색으로 할 것
3. 차량중심선에 대하여 좌우대칭이 되고, 등화의 중심점은 공차상태에서 지상 35센티미터 이상 200센티미터 이하의 높이가 되게 설치할 것
4. 등화의 중심점을 기준으로 **자동차외측의 수평각 45도에서 볼 때에 투영면적이 12.5제곱센티미터(후부반사기와 겸용하는 경우에는 후부반사기의 면적을 제외한다)이상일 것**

2. 제도 제안

가. 한국형 Smartway Partnership 프로그램 제안

○ 미국의 Smartway Partnership프로그램은 온실가스 저감기술의 검증, 물류회사의 온실가스 배출량 보고, 감축량, 지원제도, 배출권 등을 아우르는 총체적 프로그램

나. 기술인증제도

○ 국내의 경우, 기술에 대한 정부의 공식적인 검증 또는 인증제도가 없어 효과가 적은 제품에 물류회사들이 이용 당하고 있는 상황

○ 이를 제도권으로 끌어들여 국제적으로 효과가 입증된 기술분류별로 검인 또는 인증하는 제도가 필요함

다. 보조금제도

○ 기존 녹색물류전환사업의 경우 차량에 적용되는 기술은 차주들이 부담하고, 물류회사가 보조금을 수령하여 지급함으로서 부담을 줄이는 방식임

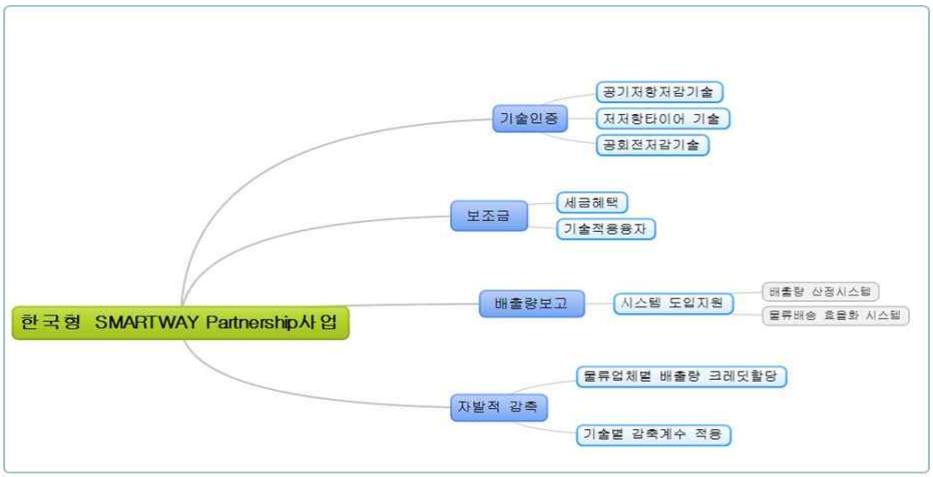
○ 지입 및 용차의 개인 차주,'배'번호판은 혜택을 보지 못하는 한계가 존재하며 보조금의 사후 관리에 한계가 있음

○ 녹색물류 전환사업에 따른 보조금 제도를 흡수하여 기술 융자, 차주보조금, 세제 혜택 등과 같은 실효성 있는 사업을 진행할 필요가 있음

라. 배출량 보고 및 자발적 감축

○ 현재 업체의 담당자들 또는 외부 컨설팅 업체에서 전체적인 온실가스 배출량을 계산하여 보고하는 시스템임

○ 기술 인증을 통하여 감축량의 감축계수 일괄 적용이 가능하고, 시스템화가 가능하여 기존 KOTEMS의 활용도를 높일 수 있음



<그림 12-52> 한국형스마트웨이 프로그램 개념도

제11절.개발기술의 실용화 및 기술이전 전략 수립

1. S.W.O.T분석

○ 도출사항

- 500만원대의 높은 가격과 손쉬운 복제, 지입제가 실용화의 가장 큰 걸림돌로 작용할 것으로 보임
- 확실한 연비 개선효과와 주행 안정성이 추가로 확보된다는 점이 가장 큰 강점으로 도출
- 높은 가격을 보완할 녹색물류 전환사업의 보조금 지급이 가장 큰 기회 요인임
- 기존의 효과가 적은 연비 절감기술에 대한 과도한 영업홍보로 인하여 물류회사들이 연비 절감기술의 파급효과를 의심하는 것이 가장 큰 위협요인임



<그림 12-53> 본 기술개발 과제에 대한 S.W.O.T.분석 결과

○ 전략수립

- 녹색물류 전환사업을 통하여 보조금사업으로 진행하여 높은 원가 보완
- Lease 및 카드사의 주유카드 포인트를 통한 초기 비용 저감
- 녹색물류 전환사업의 지정사업으로 지정받아 물류회사에 인식 재고
- 인증제도 정책 제안으로 복제물의 성능 검증을 통한 시장경쟁체재 확립
- 소재 국산화를 통하여 높은 원가 보완
- Lease 및 카드사의 주유카드 포인트를 통한 초기 비용 저감

2. 비즈니스 모델

○ 포항공대와 허즈앤티의 실시권 계약

○ 허즈앤티의 미국지사를 통하여 미국 ATDynamics사에 기술거래 시도

○ 녹색물류 전환사업의 보조금사업 진행

- 사업 초기 민간 제안사업으로 진행하며, 효과검증 후 지정사업으로 전환
- 현재 녹색물류 협의체에서 지정사업 검토가 진행되어질 예정임

○ 140여개 녹색물류 협약기업 대상 B2B 영업 및 홍보

- 사업 초기 잔금에 대해 연비개선 효과 확인 후 지불조건 등의 프로모션 등 진행

○ 차주들에게 50%의 보조금 지원과 리스융자를 통하여 초기부담금 지원



<그림 12-54> 비즈니스모델 흐름도

3. 기술이전 계약 체결

□ 기술명 : 화물차 운행 중 연료저감을 위한 공기저항 및 공기와류 저감장치 기술개발

○ 대상기술

- 차량용 하부 사이드 스커트 구조체 (출원번호:10-2015-0044334)
- 차륜 부근에서 절곡된 차량용 사이드 스커트 구조체 (출원번호:10-2015-0044335)

○ 실시범위(국가) : 국내

○ 계약 당사자

- 대학 : 포항공과대학교 산학협력단 단장 정완균
- 기업 : (주)허즈앤티 대표이사 김진열
- 중개자 : 포항공과대학교기술지주(주) 대표이사 박성진

4. TEST BED

○ 시험방법은 장치 부착전후 폐사의 통합단말기로 연비를 측정

○ 통합단말기의 성능은 연비 오차 5% 이내의 성능기준을 통과한 장치로서 ECU의 연료 분사량을 적산하여 측정

○ 장치 부착 전 1개월과 후 1개월의 연비 data를 비교

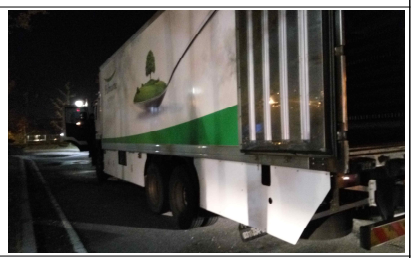
□ **본 연구에서 test bed 업체로 ㈜명일, DHL인천공항 지점, 다코넷, HDL, LOTS, 서울우유, 부산화물연대, 엑소후레쉬가 참여하였음**

가. TEST BED 현황

<표 12-46> TEST BED 현황

업체명	차종	운행구간	기존연비	부착사진
㈜명일	14.5톤 윙바디	전라도광주↔남양주	약 4.0km/h	
삼정전자 로지스틱스의 운송사인 ㈜명일은 약 700여대의 차량을 운행 중이며, 다수의 간선노선을 보유하고 남양주와 광주노선에 약 50여대의 정기운송차량을 운영하고 있음 ㈜명일의 전라도 광주-남양주 노선은 약 320km의 고속도로 구간을 주행하며 일일 주행거리가 700km 이상인 차량으로 연평균 약 180,000km 주행하고 있음				
DHL	5톤 윙바디	인천공항↔온양	약 4.8km/h	
DHL 차량은 인천공항에서 약 130km 떨어진 온양의 삼성전자 공장에 수입부품을 운송하며, 매일 약 260km 운행				
다코넷	42ft 컨테이너 트레일러	인천항↔일산	약 3.61km/h	
홈플러스의 운송사인 다코넷은 인천항-일산 노선은 연평균 약 2,952 km 주행하고있음				

<표 12-47> TEST BED 현황

HDL	42ft 컨테이너 트레일러	비정기노선		
HDL 차량은 현대모비스 운송사로 창원-포승 고정노선차량으로 678km의 고속도로 구간을 주행을 하며 연평균 약 247,470 km 주행하고 있음				
LOTS	42ft 컨테이너 트레일러	비정기노선	약 3.20km/h	
LOTS는 컨테이너화물 운송사로 의왕ICD에서 비정기 노선으로 고속도로 구간을 주행을 하고 있음				
서울우유	7.5톤 14.5톤	비정기노선	약 3.05km/h	
서울우유는 다수의 비정기노선을 보유하고 약 54여대의 정기운송차량을 운영하고 있음 일일 평균 주행거리 약 612 km 연평균 약 145,880 km 120여대의 차량을 운행 중임				
부산화물연대	42ft 컨테이너 트레일러	비정기노선	약 3.14km/h	
부산화물연대 개인 차주는 부산신항-김천 정기노선을 운행 중이며 일일 평균 주행거리 300 km 고속도로 구간을 주행하며 연평균 약 72,000 km 주행하고 있음				
엑소후레쉬물류	14.5톤	창원↔용인	약 3.40km/h	
풀무원의 운송사인 엑소후레쉬 물류는 냉장식품 운송차량을 운행 중이며 다수의 간선 노선을 보유하고 창원-용인 고정노선차량으로 일일 평균 주행거리 400 km의 고속도로 구간을 주행하며 연평균 약 115,200 km 주행하고 있음				

나. Test Bed 진행업체 결과

- ㈜명일의 14.5톤 차량의 경우, 공기저항 저감장치 부착 후 약 4.3km/L로 약 7%대의 연비개선효과를 나타내어 실제 고속도로 주행을 고려하면 이 보다 우수한 연비 개선효과를 보일 것으로 추정됨
- (주)명일의 경우, 현재 test bed 진행 중이며 연비개선 효과를 자체 검증하여 확대 보급함



<그림 12-55> (주)명일 Test Bed 차량

- DHL사에 부착한 공기저항 저감기술은 공기저항이 적은 5톤 차량임에도 공기저항저감 장치 부착 후 5km/L로 약 4%의 연비 개선효과를 나타냄
- DHL의 경우, 현재 test bed 진행 중이며 일정 효율이상의 효과를 자체 검증 시 확대 보급할 예정임



<그림 12-56> DHL Test Bed 차량

- 다코넷의 경우, 신규 test bed 진행 기업으로 트레일러 44대는 사이드스커트를 단독 장착하고, 1대는 사이드스커트와 보트테일을 함께 장착하여 연비개선효과를 자체검증 하였으며 향후 확대 보급 예정임



<그림 12-57> 다코넷 Test Bed 차량

- HDL의 경우, 신규 test bed 진행 기업으로 트레일러 1대는 사이드스커트를 단독 장착하고, 1대는 사이드스커트와 보트테일을 함께 장착하여 연비개선효과를 자체검증 하였으며 향후 확대 보급 예정임



<그림 12-58> HDL Test Bed 차량

- LOTS의 경우, 신규 test bed 진행 기업으로 트레일러에 사이드스커트를 장착하였으며 연비개선효과를 자체검증 하였으며 19대 확대 보급



<그림 12-59> LOTS Test Bed 차량

- 서울우유 협동조합의 경우, 평판형 사이드 스커트를 54대에 부착하여 운행 중이며 다른 운송사를 포함하여 현재 약 120여대의 차량에서 시범운행 중



<그림 12-60> 서울우유 Test Bed 차량

- 부산화물연대의 경우, 현재 test bed 진행 중이며 일정 효율이상의 효과를 자체 검증 시 확대 보급할 예정임



<그림 12-61> 부산화물연대 Test Bed 차량

- 엑소후레쉬물류의 경우, 현재 test bed 진행 중이며 일정 효율이상의 효과를 자체 검증 시 확대 보급할 예정임



<그림 12-62> 엑소후레쉬 Test Bed 차량

- CJ대한통운과 ㈜세창이 지정사업 지정조건으로 부착사업 검토 예정

5. 대리점 운영

- 미래하이텍, 한국탑, 하이탑 등의 특장제조업체에 부착기술 이전과 함께 제품을 납품하여 제작차의 출고 시 부착
- 유로오토(전라도), 오성 ENG, 제이원(수도권)과 같은 지역거점형태의 화물차 정비센터을 대리점으로 운영하여 운행차에 부착



<그림 12-63> 대리점 운영 계획

제12절.개발기술의 실용화 및 기술이전을 위한 홍보

□ **효과홍보**

○ ㈜명일, DHL에 부착하여 진행중인 test bed 중간결과를 현재 100여개 회원사를 보유한 녹색물류학회에서 발표

○ 녹색물류 전환사업 지정사업 추진으로 140여개 녹색물류 협약기업에 본 연구과제의 파급 효과 홍보

○ 화물차 제조사 OEM 특장회사에 홍보



<그림 12-64> 2015 대기환경학회 정기학술대회 발표자료

1. 홍보용 리플렛 제작

○ 1차년도 홍보용 리플렛



<그림 12-65> 홍보용 리플렛(안)

○ 2차년도 홍보용 리플렛



<그림 12-66> 홍보용 리플렛

2. 국토기술대전 참석

○ 행사명 : 2015 국토교통기술대전

○ 일시 : 2015년 6월 24일(수) - 26일(금), 10:00 - 17:30

○ 장소 : 코엑스 1F / 전시회(Hall B)

○ 주최/주관 : 국토교통부/국토교통과학기술진흥원



<그림 12-67> 국토교통기술대전 홍보관 현장 사진

제13절.가이드라인 제작

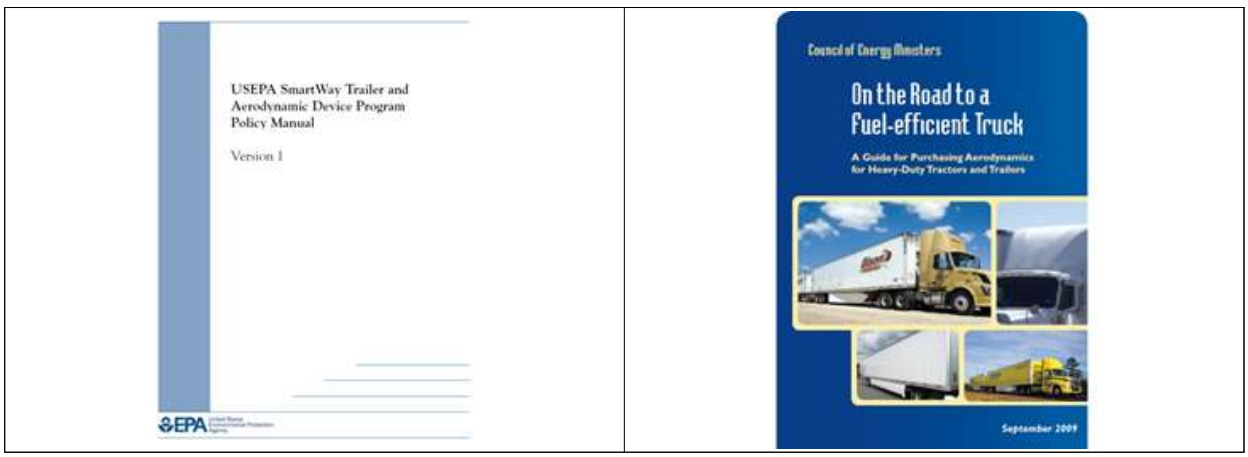
1. 국외 공기저항 저감장치의 가이드 라인

○ 미국 EPA 공기저항 역학장치사업의 정책 매뉴얼

- 구성
  - · 공기역학적 형상의 필요성
  - · 연비개선 기술 종류 소개
  - · EPA에서 검증하는 이유
  - · 검증된 장치, 검증 제품의 라벨과 트레이드 마크 소개
- 1%, 4%, 5%, 9% 이상 연비개선 기술에 대한 단계별 예시장치 구분 소개
- 풍동실험, cost다운 시험, 트랙시험, CFD모델 4가지 분류의 검증방법과 각 단계별 장치의 소개

○ 캐나다 트럭 공기저항 역학장치에 대한 구매 가이드라인

- 구성
  - · 공기역학적 장치의 소개
  - · 공기역학적 장치의 사용에 따른 연비개선 성능, 연비개선 확인 및 계산방법 안내
  - · 공기역학적 장치의 분류별 소개
  - · 공기역학적 장치의 선택방법 소개
  - · Case Study
- 공기역학장치의 구분별 대략적인 연비 개선효과와 연비개선 모니터링 방법소개
- FAQ 방식으로 상세 기술

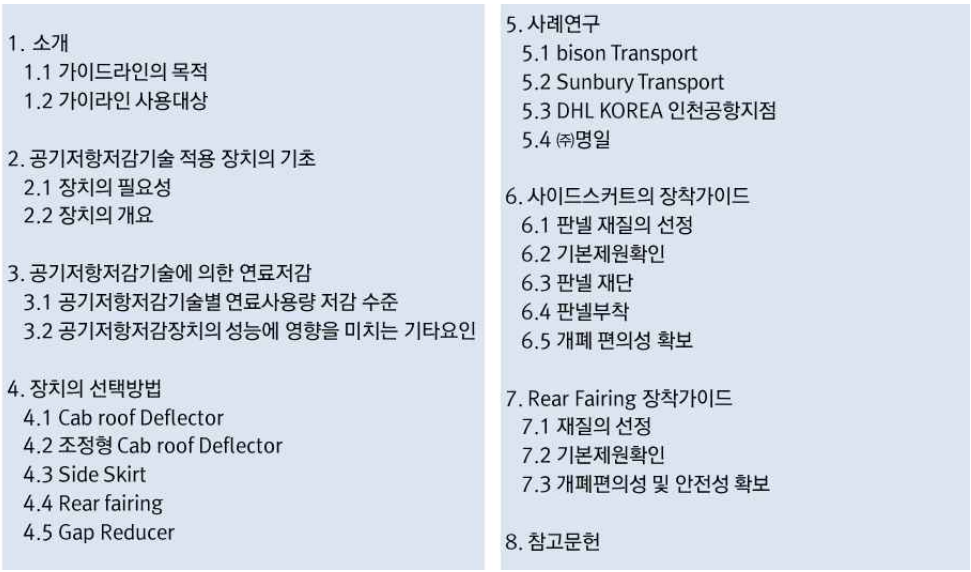


<그림 12-68> 미국과 캐나다의 공기저항저감장치 메뉴얼

2. 사이드 스커트 가이드라인 개발(부록참조)

○ 국내 특성에 맞는 공기저항 저감기술에 대한 가이드라인 개발

- 미국이나 유럽에 비해 국내의 경우 화물차의 형상과 주행패턴, 관련 법령이 상이하여 국내 특성에 맞는 가이드라인 개발이 필요
- 공기저항에 대한 기본개념 소개와 인지적 제품 선정이 가능하도록 쉽게 작성
- 2차, 3차년도 개발성과물을 쉽게 update하는 것이 가능하게 목차 구성
- 국내 사용자들을 위한 장착 가이드 수록
- 정부 배포용으로 특성에 맞게 작성

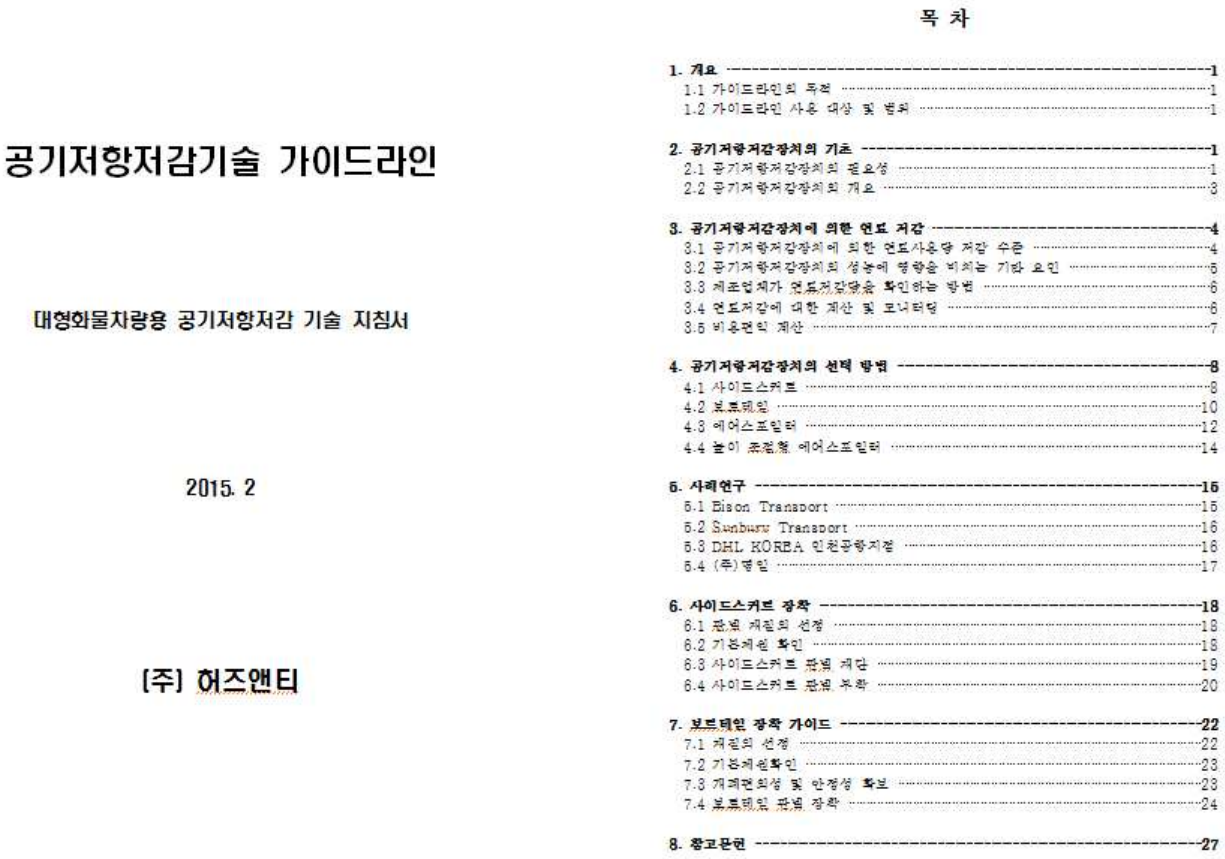


<그림 12-69> 국내 공기저항 저감장치에 대한 매뉴얼 목차

3. 보트테일 가이드라인 개발(부록참조)

○ 국내 특성에 맞는 공기저항 저감기술에 대한 가이드라인 개발

- 미국이나 유럽에 비해 국내의 경우 화물차의 형상과 주행패턴, 관련 법령이 상이하여 국내 특성에 맞는 가이드라인 개발이 필요
- 공기저항에 대한 기본개념 소개와 인지적 제품 선정이 가능하도록 쉽게 작성
- 연차별로 개발성과물을 쉽게 update하는 것이 가능하게 목차 구성
- 국내 사용자들을 위한 장착 가이드 수록
- 정부 배포용으로 특성에 맞게 작성



공기저항저감기술 가이드라인

대형화물차량용 공기저항저감 기술 지침서

2015. 2

[주] 허즈앤티

목 차

1. 개요 ----1
1.1 가이드라인의 목적 ····1
1.2 가이드라인 사용 대상 및 범위 ····1

2. 공기저항저감장치의 기초 ----1
2.1 공기저항저감장치의 필요성 ····1
2.2 공기저항저감장치의 개요 ····3

3. 공기저항저감장치에 의한 연료 저감 ----4
3.1 공기저항저감장치에 의한 연료사용량 저감 수준 ····4
3.2 공기저항저감장치의 성능에 영향을 미치는 기타 요인 ····5
3.3 제조업체가 연료저감량을 확인하는 방법 ····6
3.4 연료저감에 대한 계산 및 모니터링 ····6
3.5 비용편익 계산 ····7

4. 공기저항저감장치의 선택 방법 ----8
4.1 사이드스커트 ····8
4.2 보트테일 ····10
4.3 에어스포일러 ····12
4.4 높이 조절형 에어스포일러 ····14

5. 사례연구 ----15
5.1 Bison Transport ····15
5.2 Sunbury Transport ····16
5.3 DHL KOREA 인천공항지점 ····16
5.4 (주)명림 ····17

6. 사이드스커트 장착 ----18
6.1 판넬 재질의 선정 ····18
6.2 기본제원 확인 ····18
6.3 사이드스커트 판넬 제단 ····19
6.4 사이드스커트 판넬 부착 ····20

7. 보트테일 장착 가이드 ----22
7.1 재질의 선정 ····22
7.2 기본제원확인 ····23
7.3 개폐편의성 및 안정성 확보 ····23
7.4 보트테일 판넬 장착 ····24

8. 참고문헌 ----27

<그림 12-70> 국내 공기저항 저감장치에 대한 매뉴얼 목차

○ 보트테일 장착 가이드 제시

- 재질의 선정
  · 추력(推力)에 변형 및 파손이 없을 만큼의 연성 보유
  · 주행 중 변형이 발생하지 않을 만큼의 강성 보유
  · 가공의 용이성
  · 계절적 온도변화에 따른 변형, 변성이 없을 것

· 화재의 위험성이 없을 것



<그림 12-71> 보트테일 소재

- 기본제원확인

· 공기저항저감장치의 장착하기 전에 대상 차량의 기본 제원 확인부터 해야함

· 기본 제원확인에는 대상 차량의 최대 적재량, 특장 종류, 보관형태, 특장도어의 길이·폭, 힌지의 위치·개수, 힌지 가드 유무, 잠금고리·잠금손잡이 위치 확인 후방카메라 여부, 후미등 위치를 먼저 확인해야 함



<그림 12-72> 차량 기본제원 확인(후문)

- 보트테일 재단

· 기본제원을 확인하고 제원을 바탕으로 보트테일 판넬 재단

· 경첩부와 잠금장치에 영향을 주지 않되 특장도어 노출부와 재단면의 공간을 최소화해야하므로 장착 구간에 맞추어 적절한 길이로 판넬 재단

· 후미등의 가시성을 위해 고무범퍼 위로 보트테일의 높이를 재단하고 상부에 후방카메라가 있을 경우 카메라 위치 재단

· 전체적인 재단이 끝나면 후면고무범퍼, 힌지가드 등 개폐를 방해하는 기본 구조물을 사용할 수 있도록 재단



<그림 12-73> 보트테일 재단

- 보트테일 장착
  - · 특장도어 크기의 플라스틱 템플릿을 이용하여 측면판넬과 프레임을 고정할 위치를 특장도어에 마킹
  - · 마킹한 부분 중 판넬이 특장도어 힌지 중 간섭이 없는 가장 적합한 곳과 중앙 프레임 고정부, 가스스프링 연결부를 선정하여 드릴릴 뚫고 망치를 이용해 캐리지볼트를 특장도어 안쪽에서 바깥쪽으로 끼워 넣어 측면판넬의 힌지부를 특장도어 힌지쪽 캐리지 볼트에 체결



<그림 12-74> 판넬 캐리지 볼트 체결

· 프레임은 판넬을 열고 닫고 할 수 있도록 회전을 해야 하기 때문에 스윙암 브라켓을 특장도어 중앙부에 2개, 중앙부와 힌지부 사이 ½지점에 1개를 체결 후 중앙부 스윙암 브라켓에 프레임을 볼트로 체결

· 상부판넬은 옆면 판넬과 같이 특장도어에 볼트로 체결 후 상부 판넬의 힌지부와 측면 판넬의 힌지부를 볼트로 체결

· 프레임의 로드와 상부판넬은 우선 로드브라켓을 상부판넬에 리벳으로 체결 후 상부판넬과 로드를 볼트로 체결

· 프레임이 판넬을 지지할 수 있도록 프레임과 스윙암을 가스스프링으로 연결



<그림 12-75> 프레임, 스윙암 가스스프링 연결

· 고정력을 올리기 위해 와이어로 상부, 측면 판넬을 프레임에 고정

· 가스스프링의 미는 힘으로 인한 상부, 측면 판넬의 뒤틀림을 없애기 위해 프레임 로드의 길이를 조정



<그림 12-76> 프레임 로드 길이 조정

· 특장도어에 하부 중앙에 락커를 달고 측면판넬 하부 중앙에 고리를 달아 판넬을 접을 수 있도록 한다. 마지막으로 판넬을 접고 펴고를 반복하여 간섭이 있는지 후미등을 가리는지 등을 최종점검을 한다.



<그림 12-77> 최종 점검

4. Gap fairing 가이드라인 개발(부록참조)

○ 국내 특성에 맞는 공기저항 저감기술에 대한 가이드라인 개발

- 미국이나 유럽에 비해 국내의 경우 화물차의 형상과 주행패턴, 관련 법령이 상이하여 국내 특성에 맞는 가이드라인 개발이 필요
- 공기저항에 대한 기본개념 소개와 인지적 제품 선정이 가능하도록 쉽게 작성
- 연차별로 개발성과물을 쉽게 update하는 것이 가능하게 목차 구성
- 국내 사용자들을 위한 장착 가이드 수록
- 정부 배포용으로 특성에 맞게 작성

○ Gap fairing 장착 가이드 제시

- 재질의 선정
  · 주행 중 변형이 발생하지 않을 만큼의 강성 보유
  · 가공의 용이성
  · 계절적 온도변화에 따른 변형, 변성이 없을 것



<그림 12-78> 갭페어링 소재

- 기본제원확인

· 공기저항저감장치의 장착하기 전에 대상 차량의 기본 제원 확인부터 해야 한다. 기본 제원확인에는 대상 차량의 제조사, 차량명, 에어스포일러 유·무, 사이드 가드의 크기·형태, 장착 구간의 너비·높이, 측면 조명등 형태·개수, 등을 먼저 확인해야 한다.



<그림 12-79> 차량 기본제원 확인

- 갭페어링 재단

· 기본제원을 확인하고 제원을 바탕으로 갭페어링 판넬을 재단한다. 트렉터 측면 돌출부에 영향을 주지 않되 트렉터와 재단면의 공간을 최소화해야하므로 장착 구간에 맞추어 적절한 길이로 판넬을 재단한다. 후미등의 가시성을 위해 후미등 부분을 재단하고 기본 구조물을 사용할 수 있도록 재단한다.



<그림 12-80> 갭페어링 판넬 재단

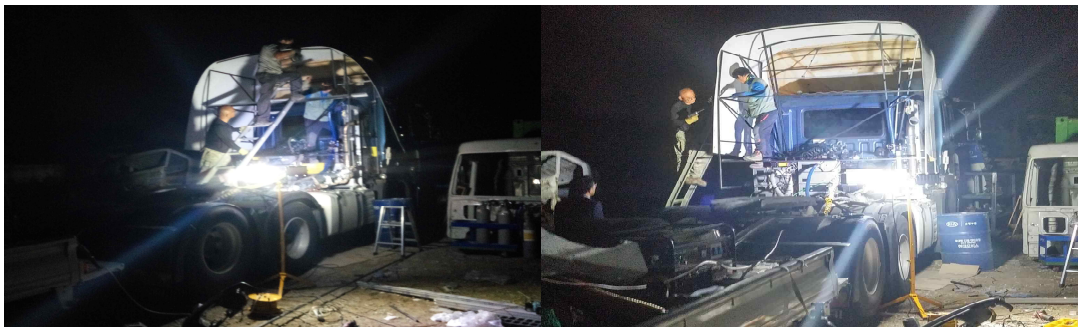
- 갭페어링 장착

· 트렉터에 갭페어링 브라켓을 고정할 볼트체결용 브라켓을 볼트로 장착한다. 재단된 갭페어링 판넬을 대어 장착할 브라켓 위치를 확인한다. 갭페어링 좌·우 브라켓을 차량 기고정된 브라켓에 볼트로 고정한 후 같은 재질의 브라켓 바로 좌·우 브라켓 중단과 하단에 용접하여 연결한다. 연결한 하단바의 양끝 ¼지점과 상부 고정 브라켓을 용접으로 연결한다.



<그림 12-81> 브라켓 작업

· 에어스포일러와 갭페어링 상부를 리벳으로 고정한 후 위에서 아랫방향으로 판넬을 브라켓에 볼트로 고정한다.



<그림 12-82> 판넬 부착

· 갭페어링 판넬과 고정브라켓의 연결상태 확인한다. 트렉터와 장착된 갭페어링 사이 이격이 있는지 확인 후 장착으로 생긴 간섭이 있는지 후미등을 가리는지 등을 최종 점검을 한다.



<그림 12-83> 최종 정검

5. Vortex generator 가이드라인 개발(부록참조)

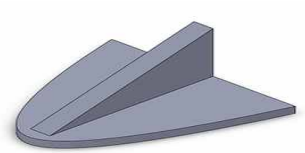
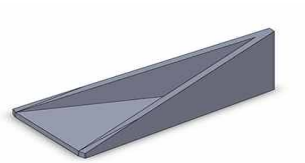
○ 국내 특성에 맞는 공기저항 저감기술에 대한 가이드라인 개발

- 미국이나 유럽에 비해 국내의 경우 화물차의 형상과 주행패턴, 관련 법령이 상이하여 국내 특성에 맞는 가이드라인 개발이 필요
- 공기저항에 대한 기본개념 소개와 인지적 제품 선정이 가능하도록 쉽게 작성
- 연차별로 개발성과물을 쉽게 update하는 것이 가능하게 목차 구성
- 정부 배포용으로 특성에 맞게 작성

○ Vortex generator 선택 방법 제시

- Vortex generator는 그 사용 목적과 용도에 따라 다양한 형상이 존재하며, 하프 델타(half-delta type), 위시본(wishbone type) 등이 대표적인 형상임

<표 12-48> Vortex generator 장착위치에 따른 형상별 성능

형상		장착위치	항력계수 값	공기저항 저감율(%)
하프델타		컨테이너 후미	0.711	0.00844
		보트테일 후미	0.639	0.21641
위시본		컨테이너 후미	0.708	0.40274
		보트테일 후미	0.635	0.84137

6. 국내 사례 추가

가. 서울우유협동조합

○ 2014년 서울우유협동조합의 7.5톤 이상 대형화물차량 54대에 사이드스커트를 장착하였다. 1년간 장착 전후 데이터를 비교한 결과, 사이드스커트 장착 후 기존 평균연비 3.09 km/L에서 3.19 km/L로 3.41 %의 연비개선효과를 확인했다.



<그림 12-84> 공기저항저감장치를 장착한 서울우유협동조합의 14.5톤 화물차량

나. (주)다코넷

○ 2015년 (주)다코넷의 42ft 트레일러 45대에 사이드스커트를 장착하였고, 일평균 320 km의 고정노선을 갖는 시범장착 차량의 연비 데이터분석 결과, 사이드스커트 장착 후 영차상태일 때 기존 평균연비 2.71 km/L에서 2.80 km/L로 3.42 %, 공차상태일 때 3.61 km/L에서 3.80 km/L로 5.36% 연비개선효과를 확인했다.



<그림 12-85> 공기저항저감장치를 장착한 (주)다코넷의 42ft 트렉터-트레일러

다. (주)HDL

○ 2015년 (주)HDL의 일평균 620 km의 고정노선을 갖는 48ft 트레일러 2대 중 1대에는 사이드스커트만 장착하고, 1대에는 사이드스커트와 보트테일을 함께 장착하였다.



<그림 12-86> 공기저항저감장치를 장착한 (주)HDL의 48ft 트렉터-트레일러

라. LOTS

○ 2016년 (주)LOTS의 일평균 760 km의 고정노선을 갖는 48ft 트레일러 1대에 사이드스커트를 장착하였고, 18대 추가 장착 예정이다.



<그림 12-87> 공기저항저감장치를 장착한 (주)LOTS의 48ft 트렉터-트레일러

마. 부산화물연대

○ 2016년 부산화물연대의 개인차주 일평균 420 km의 고정노선을 갖는 42ft 트레일러 1대에 사이드스커트를 장착하였고, 기존 평균연비 3.14km/h에서 3.35 km/L로 6.69 % 연비개선효과를 확인하였다.



<그림 12-88> 공기저항저감장치를 장착한 부산화물연대 42ft 트렉터-트레일러

바. 엑소후레쉬물류

○ 2016년 냉장차량으로 일평균 400 km의 고정노선을 갖는 42ft 트레일러 1대에 사이드스커트를 장착하였다.



<그림 12-89> 공기저항저감장치를 엑소후레쉬물류 42ft 트렉터-트레일러

제14절.사업화 계획

1. 투자 계획

<표 12-49> 사업 투자 계획

(단위: 백만원)

항목		(2018년) 개발 종료 후 1년	(2019년) 개발 종료 후 2년	(2020년) 개발 종료 후 3년
매출원가		1,296	4,860	12,960
판매관리비		120	450	1,200
자본적 지출	토지	-	-	-
	건물/구축물	400	-	-
	기계 장치 등	200	-	-
자본적 지출 합계		600	-	-

2. 사업화 전략

<표 12-50> 사업화 전략

구분	구체적인 내용
형태/규모	▪ 상용화 형태: OEM생산을 통한 직접영업 ▪ 수요처: 운송사, 물류회사, 특장차 제조사 ▪ 예상 단가: 4,950,000 ▪ 개발 투입 인력: 현재 과제인력 전부투입 ▪ 기간: 과제 종료 후 6개월 이내
상용화 능력 및 자원 보유	▪ 기존 물류 및 운송사 영업팀(3인) 운영 ▪ 3차년도 국산화 사출몰드 제작 ▪ 사출기기 보유 협력사 MOU 기체결 ▪ 기존 사업 이익분을 통한 상용화 자금 기확보
상용화 계획 및 일정	▪ 과제 종료 후 6개월 이내 생선기반 구축 ▪ 과제 종료 1~2개월 전 물류 및 운송사 영업개시

3. 사업화 모형 제시

가. 사업화 모형 수립배경

○ '09년 기준으로 국내에 등록 된 물류사업체는 총166,717개사로'05년 이후 연평균 0.2% 증가

○ 이중 화물운송업체가 155,534개로 전년 대비 0.7% 감소

○ 화물운송업체수가 전체의'05년 기준91.3%, '09년 93.3%로 절대적 비중을 차지

○ 2005년부터 2009년까지 물류산업전체의 매출액 및 부가가치는 모두연평균 증가추세를 보이고 있으며 업체수와 종사자수의 경우 물류서비스업을 제외하고 화물운송업과 물류시설운영업에서 최대2.0% 정도의 연평균 증가율로 성장

<표 12-51> 물류산업의 업종별 업체수 및 종사자수 추이

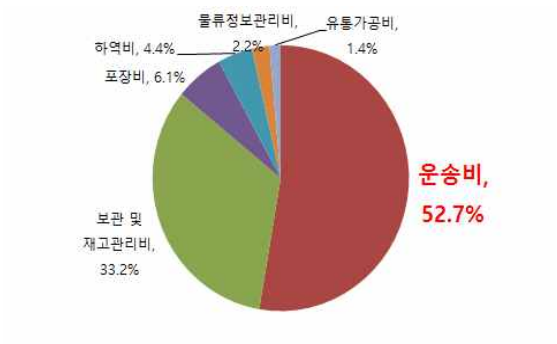
구분		2005	2006	2007	2008	2009	연평균 증가율(%)
업체수 (개)	전체	165,434	164,396	171,551	167,976	166,717	0.2
	화물운송업	151,019	150,164	157,280	156,689	155,534	0.7
	물류시설운영업	1,209	1,181	1,168	1,346	1,296	1.8
	물류서비스업	13,206	13,051	13,103	9,941	9,887	-7.0
종사자수 (명)	전체	493,502	487,993	530,096	523,232	518,825	1.3
	화물운송업	400,846	398,347	437,255	440,966	434,689	2.0
	물류시설운영업	12,838	11,412	12,648	13,298	13,322	0.9
	물류서비스업	79,818	78,234	80,193	68,968	70,814	-2.9

※ 통계청, 『2009년기준 운수업조사보고서』, 2010

○ 지속적 성장세와 물류산업내 절대적 비율을 차지하는 화물운송업의 직접경비 중 유류비의 지출액 비율은 47.9% ~ 54.6%

○ 따라서 유류비의 절감은 운송사업자의 직접적 이윤증대 및 화주의 운송비 절감으로 귀결

○ 운전자의 운전습관 등과 같이 차주의 노력 없이 차량 외부의 부착물로 연비 개선 효과를 나타내는 공기저항 저감장치는 최적의 사업성을 가질 수 있음



(단위 : 원, 만원, %)

구 분	2008년		2009년				2010년			
	9월	12월	3월	6월	9월	12월	3월	6월	9월	12월
유류비(국내유가)	1,663.89	1,303.12	1,303.85	1,389.39	1,452.68	1,441.25	1,469.17	1,508.69	1,499.16	1,570.14
차주의 총 지출액	863	718	521	580	563	563	652	642	694	717
총지출액대비 유류비 비율	54.6	52.4	49.9	47.9	50.4	52.0	52.8	51.2	53.2	50.4

* 자료 : 석유정보망(www.petronet.co.kr), 화물운송시장정보센터(http://roft.kotl.re.kr)

<그림 12-90> 기업의 물류비 중 운송비 비중과 운송비 중 유류비 비중

나. 사업화 모형의 목표 및 핵심경쟁요인

(1) 사업화 모형의 목표

○ 단계별 진행을 통한 수익창출 극대화

○ 현재 국토부의 녹색물류전환사업에 편승하여 시장진입장벽을 낮추어 시장진입을 최초단계로 진행

○ 시장진입 후 특장차 회사를 대리점으로 하는 제작차 시장 확보

○ 국내시장의 기반을 공고히 하는 동시 중국시장과 미국시장 진입



<그림 12-91> 단계별 사업화 모형의 목표

(2) 핵심경쟁요인

○ 가격

- 운송사업자의 대다수는 영세 사업자로 가격에 가장 민감

○ 성능

- 안정적인 연비개선 성능의 발현을 위하여 간선노선 차량 위주의 우선적용

○ 안전성

- 차량의 운행 안전성 확보

○ A/S

- 장치의 파손 및 수리, 불편사항 등에 대응하기위한 전국적 A/S망 확보

다. 목표시장구조

(1) 경쟁기업현황

○ 사이드 스커트, 보트테일, Gap reducer의 경우 시장이 형성되지 않은 상태로 현재는 경쟁기업이 전무한 상태이므로 해당없음

(2) 시장진입장벽

○ 앞서 기술한 내용대로 운송사업자의 대다수는 영세사업자로 금액에 민감

○ 본 사업화 모형에서 핵심은 초기 시장진입에 가장 큰 장벽으로 장치의 높은 가격대로 사료됨

- 이에 따른 대안으로 국토의 보조금 사업 편승과, 금융프로그램으로 돌파

○ 미국 ICCT의 분석결과 트럭 차주 및 운송사들의 연비개선 기술의 선호도는 저저항 타이어, 사이드스커트 순으로 나타남

- 보트테일과 Gap reducer의 선호도가 많이 떨어짐

- 보트테일의 경우 주행에 따라 여닫는 불편함, Gap reducer의 경우 뚜렷하지 않은 연비개선효과가 문제점으로 제기됨



<그림 12-92> 2014년 미국 신차구매자의 연비개선기술 선택비율

※ ICCT NACFE 2014년 조사결과

라. 수익확보전략

(1) 주요고객군

○ 주요 고객으로는 화주, 운송사업자, 차주로 구분

○ 화주의 직접투자를 통한 연비 개선 시 온실가스 배출량 감축분에 대하여 외부감축량으로 인정가능하나 정량과를 통한 방법론 개발이 필요

○ 운송사업자 및 차주의 경우 직접적인 경비의 절감에 따른 이윤 극대화가 가능하므로 주요 고객군으로 분류

○ 특장차 제조사의 경우 전국 142개 업체가 있으며 운송업을 시작하며 차주가 차량 구매 후 가장먼저 방문하게 되는 곳

- 장치들의 부착기술 및 인력의 확보가 용이
- 차주 직접영업이 가능하며, 기존의 운송사 정기거래선이 존재
- 특장사를 대리점으로 운영시 특장사 역시 주요 고객군으로 접근 가능



<그림 12-93> 주요 고객군 및 고객군별 필요사항



<그림 12-94> 전국주요 특장차 제조사 현황

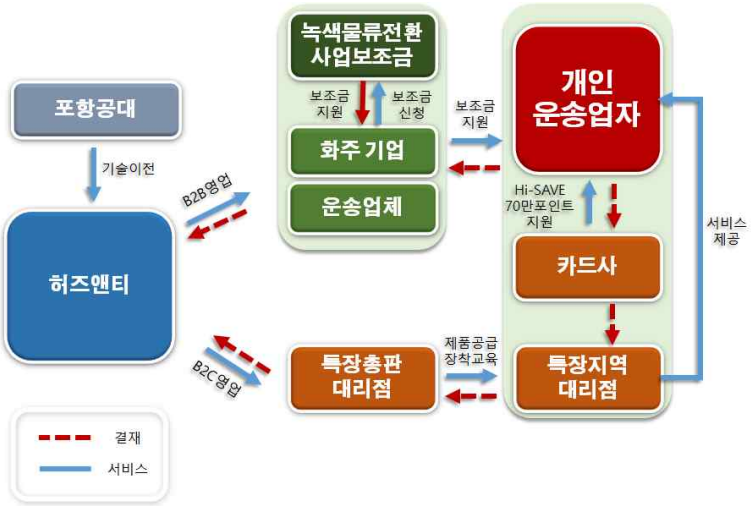
(2) 사업화 모형을 통한 수익창출 방안

○ 초기 시장진입 시 사업비의 최대 50%까지 정부지원금 지원이 되는 녹색물류전환사업에 편승

- 자발적 에너지목표 관리기업에 홍보 및 영업하여 차주 및 운송업자의 초기 부담금을 낮춤
- 또한 유가보조금 수령을 위한 유류비 결제카드사의 포인트 정책과 같은 금융프로그램 활용

○ 특장차 제조사의 대리점화를 통한 최초 특장제조 시 옵션형태의 부착

- 차량 출고 후 제작되어지는 윙바디, 트레일러 등에 옵션형태로 판매
- 특장제조 시 받는 융자 프로그램에 포함되어지므로 차주 부담금 최소화 가능



<그림 12-95> 사업화 모형 개요도

○ 운행차와 제작차 부분에 대한 영업을 통한 영업효과 극대화

- 기존 운행되는 운행차와 출고되는 신차에 동시영업
- 운행차는 운송사 및 화주 영업을 통하여 초기 대량 매출을 확보가능
- 제작차는 매년 출고되는 신차에 지속적으로 부착하게 되므로 꾸준한 매출확보 가능
- 운행차 시장의 확보는 꾸준한 홍보효과로 이어져 신차출고 시 옵션선택에 영향을 주어 시너지 발생

부록

<지식재산권>

부록 1. 차량용 공기 저항 감소 장치

부록 2. 차량용 하부 사이드 스커트 구조체

부록 3. 차륜부근에서 절곡된 차량용 사이드 스커트 구조체

부록 4. 화물차용 보트 테일 및 보트 테일을 구비한 화물차

부록 5. 차량의 공기저항 감소 장치

부록 6. 화물차용 생체모방형 공기저항 저감 장치

부록 7. 화물차량용 와류 제어장치

<국내외 논문 게재>

부록 8. 유동제어용 부착물을 이용한 5톤 화물차의 항력 감소에 관한 실험적 연구

부록 9. 화물차 주위 유동의 성긴 격자 큰에디모사

부록 10. 사이드스커트와 보트테일을 이용한 대형화물차량의 연비개선 효과 및 온실가스 감축량 추정

부록 11. Reduction of drag in heavy vehicles with two different types of advanced side skirts

부록 12. Aerodynamic performance of sinusoidal boat tail on heavy vehicles

부록 13. Drag-reducing underbody flow of a heavy vehicle with side skirts

부록 14. 공기저항 저감장치 패키지를 이용한 대형화물차량의 연비개선 및 온실가스 저감효과에 관한 실험적 연구

부록 15. Salient drag reduction of a heavy vehicle using modified cab-roof fairings

부록 16. Bio-inspired cab-roof fairing of heavy vehicles for enhancing drag reduction and driving stability

부록 17. Drag reduction of a heavy vehicle using a modified boat tail with lower inclined air deflector

부록 18. Substantial drag reduction of a tractor-trailer vehicle using gap fairings

부록 1. 차량용 공기 저항 감소 장치



특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특 허 Patent Number 제 10-1611535 호

출원번호 Application Number 제 10-2015-0095551 호

출원일 Filing Date 2015년 07월 03일

등록일 Registration Date 2016년 04월 05일

발명의 명칭 Title of the Invention
차량용 공기 저항 감소 장치

특허권자 Patentee
포항공과대학교 산학협력단(171771-*******)
경상북도 포항시 남구 청암로 77 (지곡동)

발명자 Inventor
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.

KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE · 대한민국 특허청 ·

2016년 04월 05일

특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE
최 등 규

부록 2. 차량용 하부 사이드 스커트 구조체



특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특 허 Patent Number 제 10-1647795 호

출원번호 Application Number 제 10-2015-0044334 호
출원일 Filing Date 2015년 03월 30일
등록일 Registration Date 2016년 08월 05일

발명의 명칭 Title of the Invention
차량용 하부 사이드 스커트 구조체

특허권자 Patentee
포항공과대학교 산학협력단(171771-*******)
경상북도 포항시 남구 청암로 77 (지곡동)

발명자 Inventor
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.

KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE · 대한민국 특허청 ·

2016년 08월 05일

특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE
최 동 규

부록 3. 차륜부근에서 절곡된 차량용 사이드 스커트 구조체

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2015.03.30
특 기 사 항	심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(7584)
출 원 번 호	10-2015-0044335 (접수번호 1-1-2015-0310042-66)
출원인 명칭	포항공과대학교 산학협력단(2-2004-043336-1)
대 리 인 성 명	유미특허법인(9-2001-100003-6)
발 명 자 성 명	이상준 황배근 이의재 김정재
발 명 의 명 칭	차륜 부근에서 절곡된 차량용 사이드 스커트 구조체

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

부록 4. 화물차용 보트 테일 및 보트 테일을 구비한 화물차

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2016.04.26
특 기 사 항	심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(1002)
출 원 번 호	10-2016-0050879 (접수번호 1-1-2016-0401349-13)
출원인 명칭	포항공과대학교 산학협력단(2-2004-043336-1)
대 리 인 성 명	유미특허법인(9-2001-100003-6)
발 명 자 성 명	이상준 이의재
발 명 의 명 칭	화물차용 보트 테일 및 보트 테일을 구비한 화물차

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.

부록 5. 차량의 공기저항 감소 장치

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2016.05.13
특 기 사 항	심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(0406)
출 원 번 호	10-2016-0058896 (접수번호 1-1-2016-0459274-80)
출원인 명칭	포항공과대학교 산학협력단(2-2004-043336-1)
대 리 인 성 명	유미특허법인(9-2001-100003-6)
발 명 자 성 명	이상준 김정재
발 명 의 명 칭	차량의 공기 저항 감소 장치

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.

부록 6. 화물차용 생체모방형 공기저항 저감 장치

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2017.03.03
특 기 사 항	심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(5548)
출 원 번 호	10-2017-0027769 (접수번호 1-1-2017-0217460-02)
출원인 명칭	포항공과대학교 산학협력단(2-2004-043336-1)
대 리 인 성 명	유미특허법인(9-2001-100003-6)
발 명 자 성 명	김정재 이상준
발 명 의 명 칭	화물차용 생체모방형 공기저항 저감 장치

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.

8.기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

부록 7. 화물차량용 와류 제어장치

관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2017.04.24
특 기 사 항	심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(1141)
출 원 번 호	10-2017-0052442 (접수번호 1-1-2017-0400727-35)
출원인 명칭	포항공과대학교 산학협력단(2-2004-043336-1)
대 리 인 성 명	유미특허법인(9-2001-100003-6)
발 명 자 성 명	김명균 유동현 이의재 이상준
발 명 의 명 칭	화물차량용 와류 제어장치

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.

8.기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

부록 8. 유동제어용 부착물을 이용한 5톤 화물차의 항력 감소에 관한 실험적 연구

<일반논문>
Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 13, No. 1 (9~14), 2015 ISSN 1598-8430 Print
(투고일 : 2015.03.04/수정일 : 2015.03.15/심사완료일 : 2015.03.16) ISSN 2093-808X Online
DOI:http://dx.doi.org/10.5407/jksv.2015.13.1.009

유동제어용 부착물을 이용한 5톤 화물차의 항력 감소에 관한 실험적 연구

이의재* · 황배근* · 김정재* · 이상준*†

Wind tunnel study on drag reduction of a 5 ton truck using additive devices

EuiJae Lee*, BaeGeun Hwang*, JeongJae Kim* and SangJoon Lee*†

Abstract. There have been many attempts to reduce the cost of transportation. Especially, drag reduction of heavy vehicles has enormous influence on energy saving by reducing the driving power of the vehicles. In this study, the effects of drag-reducing additive devices such as side skirt, boat tail and cab-roof fairing on the drag reduction of a 5 ton truck model were experimentally investigated. The aerodynamic performance of these flow-control devices attached to heavy vehicle was evaluated through wind tunnel test. In addition, flow patterns around the truck model were visualized by using smoke tube method. The drag coefficient is reduced by up to 5.7%, 7.16% and 22.2% by the side skirt, boat tail and cab-roof fairing, respectively. The interactive effect of the side skirt and boat tail was also investigated.

Key Words : Drag reduction(항력감소), Truck(화물차), Side skirt(사이드 스커트), Boat tail(보트 테일), Cab-roof fairing(캡루프 페어링)

• 기호설명

F_x : Drag force (N)
C_D : Drag coefficient
δ : Angle of flap side skirt
θ : Angle of folding side skirt
ω : Angle of boat tail

1. 서 론

세계 각국은 운송 과정에서 발생하는 물류 비용 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 화물차의 유류비를 절감시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있다[1,2]. 우리나라도 고유가 시대에 대비하고 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해 화물자동차의 연료 소비를 절감 시킬 수 있는 기술 개발이 시급하다.

최근 화물자동차의 연료 소비를 줄이기 위해 차체의 기계적인 구조를 개선하여 차량의 경량화를 꾀하거나 내연기관의 연비를 향상시켜 에너지 효율을 높이는 연구가 진행되고 있는데, 이런 방식은 혁신적 변화가 없으면 돌파구를 찾기가 힘들다. 그러나 화물자동차의 차체 외형 설계 혹은 차체 부착물을 이용하여 공기저항을 감소시키는 방법은 개선의 여지가 를 뿐만 아니라 투자 대비 효과가 우수하다고 할 수 있다[3]. 또한 주행속도가 증가하면 공기저항이 주행 연비에 차지하는 비중이 커지게 되므로, 공기저항을 저감시키고자 하는 노력은 더욱 중요하다[4,5].

공기저항 저감을 위해 화물차에 장착하는 대표적인 부착물로는 사이드 스커트(side skirt), 보트 테일(boat tail), 캡루프 페어링(cab-roof fairing) 등이 있다. 사이드 스커트는 트럭의 바퀴 사이의 측면 공간에 부착하는 스커트 형상의 구조물로 차량 하부에서 발생하는 공기저항 손실을 줄이는 역할을 한다. 캡루프 페어링은 트렉터의 지붕 위에 설치하는 구조물로써 트레일러와 컨테이너 사이의 높이 단차를 줄여 공기 저항을 저감시키는 부착물이다. 보트 테일은 적제 공간인 컨테이너 후단부에 부착하는 구조물로

*† POSTECH, 기계공학과, 첨단유체공학연구센터
E-mail : sjlee@postech.ac.kr
* POSTECH, 기계공학과

포항공과대학교 | IP: 141.223.93.*** | Accessed 2017/06/28 10:29(KST)

로 기존 연구결과와 유사하였다.

2) 표준형 사이드 스커트를 장착한 경우 항력 계수 저감 효과는 4.92%이며, 꺾인 플랩(angled flap)을 가진 경우 들임각(δ)에 따라 항력계수가 변화하였으며 $\delta_1 = 15°$, $\delta_2 = 0°$, $\delta_3 = 15°$인 조건에서 5.7%의 항력계수 저감 효과를 보였다. 접이식 사이드 스커트의 경우 접힘 각도θ의 효과는 크지 않았으며, 약 5%의 항력계수 저감효과를 보였다.
3) 보트 테일의 경우 길이 보다는 각도에 큰 영향을 받으며 $\omega = 80°$ 일 때 4.24%의 항력계수 저감효과를 보였다. 추가적으로 차체 후미 상단부 단차를 막아주는 장치와 하부 유동을 제어하는 스포일러 형상의 장치를 추가적으로 장착한 경우 총 7.16%의 항력계수 저감 효과를 얻었다.
4) 각각의 유동제어용 부착물들을 조합적으로 적용해본 결과 꺾인 플랩 사이드 스커트의 경우 다른 장치들이 서로 간섭하지 않고 독립적으로 항력저감 효과를 발휘하였다. 반면에 접이식 사이드 스커트의 경우 보트 테일과 함께 작용시 2.1%의 추가적인 항력감소효과가 있어 기본 모델 대비 최대 36.8%의 항력 저감 효과를 얻을 수 있었다.
5) 유동가시화 실험을 통해 차체 모형 주위의 유동구조을 관찰함으로써 공기저항의 발생 원인과 함께 부착물들의 항력저감 효과를 정성적으로 분석 하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업 중 국토교통과학기술진흥원 '도로화물 운송 효율화를 위한 트레일러 경량화, 공기저항저감 및 운송용기 최적화 기술개발 연구단'의 1차년도 연구의 일환으로 수행되었습니다.

Reference

1) Leuschen, J. and Kevin R. Cooper., 2006, “Full-scale wind tunnel tests of production and prototype, second-generation aerodynamic drag reducing devices for tractor-trailers”, SAE Technical Paper.
2) Ortega, J., Salari, K., Brown, A., Schoon, R., 2013, "Aerodynamic drag reduction of class 8 heavy vehicles: a full-scale wind tunnel study" LLNL-TR-628153.
3) Choi, H., Lee, Lee, J., Park H., 2014, "Aerodynamic of heavy vehicles" Annu. Rev. Fluid Mech., Vol 46, pp.441-68.
4) McCallen, R., Couch, R. et al., 1999, “Progress in reducing aerodynamic drag for higher efficiency of heavy duty trucks”, SAE Paper, Vol. 1, pp.3-14.
5) Choi, J.H and Lee, S.J, 1996, “Experimental study on drag reduction of ground vehicle using a rear-spoiler”, KSAE, Vol.4, No.3, pp.31~39.
6) Cooper, K. R., "Truck aerodynamics reborn-lessons from the past", 2003, SAE Technical Paper, No. 2003-01-3376.
7) Malviya, V., Mishra, R., and Fieldhouse J. D., 2009, "CFD investigation of a novel fuel-saving device for articulated tractor-trailer combinations", Eng. Appl. Comput. Fluid Mech., Vol. 3, pp.587-607.
8) Kim, C.H, 2006, “An effect of roof-fairing and deflector system on the reduction of aerodynamic drag of a heavy-duty truck”, Trans. KSAE, Vol.14. No.2, pp.194-201
9) West, G. S. and Apelt, C.J., 1982, “The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers”, J. Fluid Mech, Vol.114, pp.361-377.

포항공과대학교 | IP: 141.223.93.*** | Accessed 2017/06/28 10:29(KST)

부록 9. 화물차 주위 유동의 성긴 격자 큰에디모사

30 / J. Comput. Fluids Eng. Vol.21, No.1, pp.30-35, 2016. 3

화물차 주위 유동의 성긴 격자 큰에디모사

이 상 승,[1] 김 명 균,[1] 유 동 현,[*1] 김 정 재,[2] 이 상 준[2]
[1]포항공과대학교 기계공학과 유동물리 및 공학 연구실
[2]포항공과대학교 기계공학과 첨단유체공학 연구센터

COARSE GRID LARGE-EDDY SIMULATION OF FLOW OVER A HEAVY VEHICLE

S. Lee,[1] M. Kim,[1] D. You,[*1] J.J. Kim[2] and S.J. Lee[2]
[1]Flow Physics and Engineering Laboratory, Dept. of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology.
[2]Advanced Fluid Engineering Research Center, Dept. of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology.

In order to investigate effects of grid resolution on large-eddy simulation of flow over a heavy vehicle, large-eddy simulations over the vehicle with coarse grid and fine grid are conducted. In addition, comparison of drag coefficients with the experimental data obtained by a wind tunnel experiment is conducted. Both of the drag coefficients of coarse grid and fine grid large-eddy simulation show good agreement with the experimental data. Flow fields obtained by the coarse and the fine grid large-eddy simulation are compared in the vehicle frontal-face region, the vehicle rear wheel region, and the vehicle base region. Coarse grid large-eddy simulation shows good agreement with the fine grid large-eddy simulation in the vehicle front face region and the vehicle rear wheel region, since the flow over the present vehicle is dominated by flow separation which is geometrically pre-determined, not by the skin friction which is known to be sensitive to grid resolution.

Key Words : 큰에디모사(Large-eddy simulation), 박리유동(Separated Flow), 격자 해상도(Grid resolution)

1. 서 론

화물차 주위 유동은 높은 레이놀즈 수와 형상의 복잡성으로 인하여 박리가 강하게 형성된다. 유동의 박리는 화물차의 앞 부분, 바퀴, 그리고 화물차의 컨테이너를 지날 때 크게 형성된다. 이러한 박리유동은 화물차를 지나는 유동에 영향을 주게 됨으로써, 화물차에 항력을 가하게 된다. Wood[1]는 화물차에 작용하는 항력으로 인하여 손실 되는 에너지는 화물차의 에너지 손실의 30%임을 보고하였다. 따라서 화물차에 작용하는 항력에 대한 많은 실험[2-5]과 수치해석[5-7]이 수행되었다.

현재까지 수치해석적으로 화물차 주위의 유동을 분석한 연구는 대부분 시간평균해석방법(RANS)을 이용해 왔으며 항력값의 결과 또한 잘 맞는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만, Krajnovi[8]는 현재까지 40년의 시간동안 시간평균해석방법에 대한 난류모델의 발전이 있어왔지만, 화물차 주위의 유동과 같이 유동 박리가 활발히 일어나는 유동을 다룰 수 있는 난류 모델은 없으며, 시간평균해석방법으로 실험값과 잘 맞는 항력 값을 얻었다고 해도 유동의 특징 또한 잘 맞을 것이라는 보장은 없다고 주장한다. 따라서 화물차 주위를 지나는 유동에 대해서 비정상수치해석법으로 계산을 수행해야 할 필요성이 있다.

본 연구에서는 화물차 주위 유동을 정확히 예측하기 위하여 비정상수치해석법을 사용하였으며, 작은에디들을 필터링한 후 큰에디들에 대해서 Navier-Stokes equation을 푸는 큰에디모사(Large-eddy simulation)를 사용하였다. 큰에디모사는 비정상 유동을 정확하고 효과적으로 분석할 수 있는 장점을 가지지만, 격자가 조밀해야함에 따라 계산에 소요되는 시간이 긴 단점이 있다. 화물차 주위 유동에 대해서 모든 유동의 viscous sublayer($\Delta z^+ < 5$)를 완벽하게 잡는 큰에디모사를 위해서는 벽에서 부터의 첫 번째 격자의 거리에 대한 무차원 변수

Received: February 11, 2016, Revised: March 17, 2016, Accepted: March 18, 2016.
* Corresponding author, E-mail: dhyou@postech.ac.kr
DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.1.030
© KSCFE 2016

포항공과대학교 | IP: 141.223.93.*** | Accessed 2017/06/28 10:30(KST)

지나면서 안정화되며 경계층을 형성하게 된다. 경계층을 형성한 유동은 컨테이너의 끝단을 지나면서 박리가 일어난다.

조밀한 격자에 대한 큰에디 모사와 성긴격자에 대한 큰에디모사의 유동장 결과를 이용하여 화물차 뒷부분에서의 시간평균 압력 $P/\rho U_\infty^2$ (Fig. 5(a)), 시간 평균 속도 U/U_∞ (Fig. 5(b)), 그리고 난류운동에너지 $\frac{1}{2}\overline{u_i u_i}/U_\infty^2$ (Fig. 5(c))를 비교하였다.

화물차의 컨테이너 끝단을 떠나면서 유동의 박리가 강하게 일어난다. 유동 박리로 인하여 화물차 후류에 상당한 압력 강하가 생겨나며(Fig. 5(a)), 화물차 뒷부분에 낮은 압력의 유동이 형성된다. 그 결과, 화물차 앞부분 유동의 충돌로 인한 높은 압력을 가지는 유동의 형성과 화물차 뒷부분 낮은 압력을 가지는 유동의 압력 차이로 인하여 화물차에 항력이 작용한다.

끝단에서 박리된 유동이 Fig. 5(b) 같이 화물차 뒷부분에서 역류를 형성하게 되며, 이로 인하여 운동량의 손실이 발생한다. 박리된 유동이 후류에서 비정상(unsteady)적 특징을 강하게 가지고 있음에 따라 화물차 후류의 난류 운동에너지가 증가한다(Fig. 5(c)).

화물차 후류에서의 성긴 격자 큰에디모사와 조밀한 격자 큰에디모사는 Fig. 5에서 보이듯 압력, 속도, 난류 운동에너지의 유동장이 구조적으로 비슷하지만, 조금씩의 차이를 보인다. 이는 화물차의 끝단에서 유동의 경계층내의 유동의 물리적 특성의 스케일을 성긴 격자에서 잡아내지 못하여 박리에 대한 정확한 예측을 하지 못하기 때문이다. 그러므로 화물차 후류의 유동적 특성을 분석하기 위해서는 화물차 컨테이너에 형성되는 유동 경계층의 물리적 현상의 스케일을 해석할 수 있는 조밀한 격자를 사용하는 것이 좋다.

4. 결 론

본 연구에서는 화물차를 지나는 유동을 성긴 격자 큰에디모사를 이용하여 해석하는 것에 대한 적합성을 알아보기 위하여 화물차를 지나는 유동의 큰에디모사를 성긴 격자와 조밀한 격자 두 가지 격자에서 수행하였다. 큰에디모사를 통하여 계산한 항력값은 실험과 비교를 하였으며 성긴 격자와 조밀한 격자에서 얻어낸 유동장의 차이를 분석하였다.

성긴 격자와 조밀한 격자를 이용한 큰에디모사의 계산 결과 항력 값이 실험과 오차 5.0% 이내에서 일치하는 것을 알 수 있었다. 성긴 격자의 벽에서 부터의 첫 번째 격자의 무차원 거리 $30 < \Delta z^+ < 52$는 유동박리가 활발히 일어나며 유동 물리현상의 스케일이 큰, 화물차의 앞부분 또는 화물차의 뒷바퀴 근방 유동에서의 해석에 문제가 없음을 확인하였다. 하지만, 화물차 뒷부분의 유동의 경우 경계층의 유동이 정확하게 해석되어야 하므로 성긴 격자 큰에디모사를 통한 화물차의 뒷부분 유동 해석에는 어려움이 있는 것으로 보인다. 따라서 성긴 격자 큰에디모사가 화물차의 앞 부분 그리고 뒷바퀴 근방의 유동을 효율적으로 해석하는데 적합하다.

후 기

본 논문은 2015년도 국토교통과학기술진흥원의 교통물류연구사업 (No. NTIS-1615007940)의 과제로 수행된 연구임.

References

[1] 2006, Wood, R.M., "A discussion of a heavy truck advanced aerodynamic trailer system," *Int. Symp. Heavy Veh. Weights Dimens.*, 9th, University Park, PA.

[2] 1985, Ahmed, S.R., Gawthorpe, R.G. and Mackrodt, P.A., "Aerodynamics of road and rail vehicles," *Veh. Syst. Dyn.*, Vol.14, pp.319-392.

[3] 1981, Allan, J.W., "Aerodynamic drag and pressure measurements on a simplified tractor-trailer model," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.9, No.1, pp.125-136.

[4] 1993, Hucho, W.H. and Sovran, G., "Aerodynamics of road vehicles," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.25, No.1, pp.485-537.

[5] 2014, Choi, H.C., Lee, J.K. and Park, H.M., "Aerodynamics of heavy vehicles," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.46, pp.441-468.

[6] 2005, Yang, Z. and Bahram K., "CFD simulations for flow over pickup trucks," *SAE Technical Paper.*, No.2005-01-0547.

[7] 2003, Bettle, J., Holloway, A.G.L. and Venart, J.E.S., "A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.*, Vol.91 No.5, pp.573-592.

[8] 2016, Krajnovi, S., "What can les do in vehicle aerodynamics?," *The Aerodynamics of Heavy Vehicles III.*, Vol.79, pp.311-326.

[9] 2009, You, D. and Moin, P., "A dynamic global-coefficient subgrid-scale model for large-eddy simulation of turbulent scalar transport in complex geometries," *Physics of Fluids.*, Vol.21, No.4, p.045109.

포항공과대학교 | IP: 141.223.93.*** | Accessed 2017/06/28 10:30(KST)

부록 10. 사이드스커트와 보트테일을 이용한 대형화물차량의 연비개선 효과 및 온실가스 감축량 추정

Journal of Climate Change Research 2016, Vol. 7, No. 2, pp. 177~184
DOI: http://dx.doi.org/10.15531/KSCCR.2016.7.2.177

사이드스커트와 보트테일을 이용한 대형화물차량의 연비개선 효과 및 온실가스 감축량 추정

허철행*† · 윤병규** · 김대욱*
*㈜ 허즈앤티, **전북자동차기술원

Estimation of GHG Emissions Reduction and Fuel Economy Improvement of Heavy-Duty Trucks by Using Side Skirt and Boat Tail

Her, Chul haeng*†, Yun, Byoeng gyu and Kim, Dae wook***

*Hawesnt Co. Ltd.
**Jeonbuk Institute of Automotive Technology

ABSTRACT

Recently, the need for technology development of commercial vehicle fuel consumption has emerged. Fuel economy improvement of transport equipment and transportation efficiency, and increasing attention to the logistics cost reduction measures. Increasing attention to the logistics cost reduction measures by fuel economy improvement of transport equipment and transportation efficiency. In this study, we have installed aerodynamic reduction device (side skirt, boat tail) to 14.5 ton cargo trucks and 45 ft tractor-trailers. And the fuel consumption was compared installed before and after. Fuel economy assessment for the aerodynamic reduction value device was tested by modifying the SAE J1321 Joint TMC/SAE Fuel Consumption Test Procedure - Type Ⅱ test in according domestic situation. Greenhouse gas reductions were calculated in accordance with the scenario, including fuel consumption test results. When the 14.5 ton cargo trucks has been equipped with side skirts and boat tail, it confirmed the improvement in fuel efficiency of 4.72%. One Heavy-duty truck's the annual greenhouse gas reductions value are 6.86 ton CO_2 eq. And if applying the technology to more than 50% of registered 15 ton trucks, greenhouse gas reductions are calculated as 686,826 ton CO_2 eq./yr.

Key words : *Aerodynamic Resistance Reduction, Fuel Saving, GHG Emissions, Side Skirt, Boat Tail*

1. 서 론

정부는 '신기후체제(POST-2020)'를 앞두고 우리나라의 2030년 온실가스 감축목표를 BAU(Business As Usual) 대비 37%로 결정하였으며(ME, 2015), 수송부문의 감축목표는 34.3%로 전체 배출원 중 가장 높게 설정되었다. 국내 온실가스 배출량을 부문별로 살펴보면 에너지산업공정부문이 600.3 백만 톤 CO_2eq.로 전체 배출원 중 87.2%로 가장 높은 배출량을 보이며, 에너지산업공정부문 중 에너지산업부문이 44.6%, 제조업 및 건설업부문이 30.0%, 수송부문이 14.4%로 전체 배출원 중 3번째로 높은 배출량을 갖는다(Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, 2014). 수송부문에서 국내 화물수송 분담률 추이를 보면 2014년 기준 도로운송 비중이 90.7% (MOLIT, 2014)로 가장 높다. 이러한 수송부문의 온실가스 감축을 위해서는 운송 차량의 연비 개선 및 운송 효율화 등을 통한 물류비용 절감이 필요하다. 이에 따라 물류비용 중 가장 큰 비중을 차지하는 차량의 유류비를 절감하고, 온실가스 저감을 위한 기술개발 및 보급을 적극 지원하는 것이 국제적 추세이다.

차량의 연료소비량을 절감하는 대표적인 기술로는 엔진 개선 기술, 공기저항 저감기술, 타이어구름 저항기술, 공회전 저감기술 등이 있다. 이러한 기술이 트렌드가 되는 이유는 대형차량의 주행 시 연료 연소로 생성되는 에너지의 12.6~20.2%

† **Corresponding author:** chher@hawesnt.com
Received April 29, 2016 / Revised May 13, 2016 / Accepted May 23, 2016

포항공과대학교 | IP: 141.223.93.*** | Accessed 2017/05/30 22:45 (KST)

Table 5. Greenhouse gas reduction scenarios

Category	Value
Vehicle fuel economy	3.5 km/L
Mileage of day	600 km
Fuel consumption of day	171 L
Operation days	300 day
Fuel economy improvement	4.72%
Annual fuel consumption reductions	2,427 L
Annual greenhouse gas reductions	6.86 ton CO_2 eq.

1) 45 ft 트렉터-트레일러에 사이드스커트를 단독 장착했을 때 3.56±0.97%, 사이드스커트와 보트테일을 함께 장착했을 때, 3.62±1.24%의 연비개선효과를 확인하였다.
2) 14.5 ton 카고트럭에 보트테일을 단독 장착했을 때 1.44±1.37%, 사이드스커트와 보트테일을 함께 장착했을 때, 4.72±2.14%의 연비개선효과를 확인하였다.
3) 온실가스 감축 시나리오를 통해 산정한 온실가스 감축량은 1대당 6.86 ton CO_2 eq./yr이고, 등록된 15 ton 이상 대형화물차량에 기술 적용 시 686,826 ton CO_2 eq./yr의 온실가스 감축이 가능한 것으로 분석되었다.

45 ft 트렉터-트레일러의 경우, 보트테일의 효과가 미미한 것으로 나타났으며, 이것은 적재된 컨테이너의 corrugated surface에 기인한 유동박리에 의해 보트테일의 효과가 제대로 나타나지 못한 것으로 사료된다. 14.5 ton 카고트럭에 보트테일만 장착한 경우, 순간 풍속의 기준을 초과한 에러로 인하여 시험결과의 신뢰도는 다소 떨어지나, 연비개선에 대한 정성적인 효과는 확인되었다. 시험 당시 태풍의 영향으로 평균풍속 및 순간풍속의 변화가 심하여 본 시험의 Proving Ground 테스트 심사기준 조건을 만족시키지 못하여 기타 시험 결과가 모두 실패로 판정처리 되었기 때문에 향후 45 ft 트렉터-트레일러에 대한 보트테일 단독시험과 14.5 ton 카고트럭에 대한 사이드스커트 단독시험, 컨테이너의 corrugated surface 영향이 없는 조건에서의 시험 등의 추가 연구를 진행할 예정이다.

5. 사 사

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 교통물류연구사업 "도로화물 운송 효율화를 위한 트레일러 경량화, 공기저항저감 및 운송용기 최적화 기술개발"의 지원사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea. 2014. National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
Helmut HK, Robert AW, Daniel ML. 2007. Road evaluation of the aerodynamic characteristics of heavy trucks. SAE Technical Paper Series 2007-01-4297.
ME. 2015. Post-2020 greenhouse gas reduction target set action plans. Ministry of Environment.
MOLIT. 2014. Statistics of ministry of land, infrastructure and transport, ministry of land. Infrastructure and Transport.
MOLIT. 2016. Vehicle registration, ministry of land. Infrastructure and Transport.
MOTIE. 2014. Energy consumption survey, ministry of trade. Industry & Energy.
Roanld ES. 2007. On-road evaluation of devices to reduce heavy truck aerodynamic drag. SAE Technical Paper Series 2007-01-4294.
SAE. 2012. SAE J1321 Fuel consumption test procedure-type Ⅱ.
Surcel MD, Provencher Y, Michaelsen J. 2009. Fuel consumption track tests for tractor-trailer fuel saving technologies. SAE Technical Paper Series 2009-01-2891.
U.S Department of Energy. 2007. Roadmap and technical white papers. 21st Century Truck Partnership.

Table 6. Heavy duty vehicle registration (Unit : cars)

Category	5 tons or more	8 tons or more	10 tons or more	12 tons or more	15 tons or more	20 tons or more	Total
Non-commercial	65,300	5,954	5,721	4,755	4,279	10,614	96,623
Commercial	31,142	7,830	9,076	16,944	9,547	75,738	150,277
Total	96,442	13,784	14,797	21,699	13,826	86,352	246,900

Source : MOLIT, 2016.1 , Vehicle registration., Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

포항공과대학교 | IP: 141.223.93.*** | Accessed 2017/05/30 22:45 (KST)

부록 11. Reduction of drag in heavy vehicles with two different types of advanced side skirts

J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 155 (2016) 36–46

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jweia

Reduction of drag in heavy vehicles with two different types of advanced side skirts

Bae Geun Hwang [a], Sangseung Lee [b], Eui Jae Lee [a], Jeong Jae Kim [a], Myeongkyun Kim [b], Donghyun You [b,*], Sang Joon Lee [a,**]

[a] Advanced Fluid Engineering Research Center, Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), San 31, Hyoja-Dong, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk 37673, South Korea
[b] Flow Physics and Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), San 31, Hyoja-Dong, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk 37673, South Korea

ARTICLE INFO

Article history:
Received 28 August 2015
Accepted 30 April 2016
Available online 26 May 2016

Keywords:
Heavy vehicle
Tractor-trailer
Side skirt
Drag reduction
Underbody flow
Wind tunnel experiment
Large-eddy simulation

ABSTRACT

Investigating the aerodynamic reduction of drag in heavy vehicles, such as trucks or tractor-trailers, has considerable significance given the strong influence on related industries. The underbody flow that passes through the underside of heavy vehicles induces considerable drag while interacting with rolling wheels and other structures. Nonetheless, the reduction of drag caused by underbody flow has received less attention than that attributed to upper and forebody flows. Side skirts are common underbody drag-reduction devices that consist of straight panels curtaining the underspace between the front and rear wheels to control the underbody flow in the ground clearance. In this study, we propose two different types of side skirts with flaps or additional inclined inner panels to maximize drag reduction. Effects of these devices are quantitatively evaluated by wind tunnel tests and computational fluid dynamics analysis. In wind tunnel tests with 1/8 scaled-down vehicle models, drag coefficient is reduced by more than 5% for both side skirts. Effects of various physical dimensions or angle variations on drag reduction are determined. Large-eddy simulation (LES) estimated similar drag reduction with reduced vortical activities, loss of streamwise momentum, strength of turbulent kinetic energy and global pressure difference, compared to the case without side skirts.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The oncoming shortage of fossil fuels have encouraged research on energy saving, especially fuel saving with effective flow control methods. Among these issues, the aerodynamic reduction of drag in heavy vehicles, such as trucks or tractor-trailers, has considerable practical significance owing to the strong influence on the industry and logistics. Many studies have been conducted to reduce the aerodynamic drag in heavy vehicles (Allan, 1981; Ahmed et al., 1985; Hucho and Sovran, 1993; Cooper, 2003). The drag caused by underbody flow passing through the underside of heavy vehicles deserves as much attention as that attributed to upper and forebody flows. The flow passing through the underbody interacts with complicated undercarriage structures, such as rolling tires, axles, frames, and various mechanical devices. Hence, considerable aerodynamic drag is induced by the underbody flow. Wood (2006) reported that the underbody flow of a tractor-trailer contributes approximately 30% to the total aerodynamic drag. Wickern et al. (1997) found that rolling tires account for 25% of the total aerodynamic drag in a passenger car. Drag is significantly increased when tires of multiple truck or tractor-trailer are exposed to large ground clearance. Choi et al. (2014) recently mentioned that large-scale flow structures existing in the relatively high ground clearance of heavy vehicles actively interact with the vehicle underbody, working as a non-negligible source of aerodynamic drag. Therefore, the underbody flow passing through the ground clearance between the vehicle underbody and the ground needs to be controlled effectively to substantially reduce the drag of heavy vehicles. Cooper and Leuschen (2005) demonstrated effective fuel savings of drag-reducing add-on devices including trailer skirts. The resultant drag coefficient was reduced about 9.5% with the attachment of long side skirts at a wind speed of 24.6 m/s and zero yaw angle. Landman et al. (2009) specified practical limitations in achieving drag reduction of a modern tractor-trailer by adopting add-on devices, including side skirts, a full gap seal, and tapered rear panels. Drag coefficient of the tested side skirts was reduced in the range from 15.7% to 19.9%. Ortega

* Corresponding author. Tel.: +82 054 279 2191; fax: +82 054 279 3199.
** Corresponding author. Tel.: +82 054 279 2169; fax: +82 054 279 3199.
E-mail addresses: dhyou@postech.ac.kr (D. You), sjlee@postech.ac.kr (S.J. Lee).

http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2016.04.009
0167-6105/© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Underbody flow reaches the region where the rear side skirts are installed, after passing the front side skirt region and suffering obstructions such as rear wheels (flow contour in the rear wheel region is provided in Fig. 15). Installation of side skirts at the rear of the vehicle influences flow structures in the underbody downstream region behind rear wheels. The adverse pressure gradient shown in the streamwise direction of the underbody flow inside the downstream region behind rear wheels of the vehicle without side skirts (left column of Fig. 14a) is reduced when the side skirts are installed. In addition, favorable pressure gradients are developed inside the rear side skirt region and the outer side of the side skirts (right column of Fig. 14a). Thus, the side skirts on the vehicle rear and front function similarly, as both side skirts relieve the adverse pressure gradient in the streamwise direction and reduce flow deceleration.

Consequently, the streamwise velocity on the symmetry line and on the outer side of skirts in the right column of Fig. 14b shows higher velocity magnitudes compared to those of the vehicle without side skirts in the left column of Fig. 14b. Thus, flow with higher inertia in downstream is developed by the installation of side skirts. The turbulent kinetic energy is reduced inside the downstream region of rear wheels and near the side skirts (Fig. 14c). Similarly to the reduction of the turbulent kinetic energy in the upstream of the rear wheels (right column of Fig. 13c), the reduction of the turbulent kinetic energy in the downstream of the rear wheels (right column of Fig. 14c) implies that the underbody flow has experienced a weakened obstruction by the rear wheels of the vehicle with side skirts.

Inside the rear wheel region, flow over the outer side of the vehicle with side skirts has higher streamwise velocity (right column of Fig. 15b), compared to that without side skirts (left column of Fig. 15a). This results from favorable pressure gradient formed in the upstream region of the folded rear side skirts (right column of Fig. 15a), leading to enhanced streamwise velocity. The turbulent kinetic energy is reduced in the regions near the side skirts and the rear wheels, as shown in Figs. 13–15c. The front and rear side skirts reduce the blockage effect of rear wheels and prevent the increment of turbulent kinetic energy. Therefore, the dissipative vortical activities are reduced in the region near the rear wheels, and the momentum and pressure losses of the underbody flow are also reduced. Therefore, these results imply that the obstruction effect of rear wheels a weakened.

In results, the side skirts installed at the front and rear parts of the heavy vehicle reduce the influence of rear wheels on the underbody flow, which leads to drag reduction. The underbody flow modified by the installation of the proposed side skirts on the front and rear parts of the vehicle has direct influence on the flow in the rear wheel region, where 6.2% of drag reduction occurs as shown in Table 2. The reduced upstream pressure and the increased downstream pressure over the heavy vehicle with side skirts (right column of Fig. 15a), compared to the pressure over the vehicle without side skirts (left column of Fig. 15a), give rise to significant reduction in the pressure difference across rear wheels.

4. Conclusions

The effects of the two different types of side skirts proposed in this study on the reduction of drag in heavy vehicles are quantitatively evaluated through a wind tunnel experiment conducted with a 1/8 scale-down model. The maximum reduction rates in drag coefficient relative to the vehicles without the side skirts are 5.3% and 4.7% for the 15-ton truck and 40-foot trailer vehicle models installed with the tested flap-type side skirts, respectively. The drag reduction effects are maximized when the flaps are face forward at $\delta=45°$. The maximum drag coefficient reduction rates relative to the vehicles without side skirt are 5.1% and 5.0% for the 15-ton truck and 40-foot trailer vehicle models containing side skirt with additional inclined folding panels, respectively. The drag reduction effects are maximized when folding angle θ is approximately 60°. Meanwhile, the reduction of gap clearance between the bottom of the skirt and the ground surface by extending skirt height substantially improved aerodynamic drag reduction. In LES, the predicted drag reduction of the flap-type side skirt is 5.4%, which is close to the experimental result. Flow structures revealed in LES suggest that flap-type side skirts reduce drag through the combined effects of reduced vortical activities, streamwise momentum loss, turbulent kinetic energy, and pressure difference between the upstream and downstream of rear wheels.

Acknowledgments

This study was conducted for the 2nd year research requirements of Development of aerodynamic technologies for efficient road freight transport, which is supported by the KAIA in the, South Korea. (NTIS 1615007940).

References

Ahmed, S.R., Gawthorpe, R.G., Mackrodt, P.A., 1985. Aerodynamics of road and rail vehicles. Veh. Syst. Dyn. 14, 319–392.
Allan, J.W., 1981. Aerodynamic drag and pressure measurements on a simplified tractor-trailer model. J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. 9 (1), 125–136.
Choi, H.C., Lee, J.K., Park, H.M., 2014. Aerodynamics of heavy vehicles. Ann. Rev. Fluid Mech. 46, 441–468.
Cooper, K.R., Leuschen, J., 2005. Model and full-scale wind tunnel tests of second-generation aerodynamic fuel saving devices for tractor-trailers. SAE Technical Paper, No. 2005-01-3512.
Cooper, K.R., 2003. Truck aerodynamics reborn-lessons from the past. SAE Technical Paper, No. 2003-01-3376.
Hucho, W.H., Sovran, G., 1993. Aerodynamics of road vehicles. Annu. Rev. Fluid Mech. 25 (1), 485–537.
Landman, D., Wood, R., Seay, W., Bledsoe, J., 2009. Understanding practical limits to heavy truck drag reduction. SAE Technical Paper, No. 2009-01-28900.
Leuschen, J., 2013. Considerations for the wind tunnel simulation of tractor-trailer combinations: correlation of full- and half-scale measurements. SAE Int. J. Commer. Veh. 6 (2), 529–538.
Leuschen, J., Mêbarki, Y., 2012. Examination of the maskell iii blockage correction technique for full scale testing in the NRC 9-meter wind tunnel. SAE Int. J. Commer. Veh. 5 (2), 640–649.
McAuliffe, B.R., 2015. Improving the aerodynamic efficiency of heavy duty vehicles: wind tunnel test results of trailer-based drag-reduction technologies. NRC Report, LTR-AI-2015-0272.
Ortega, J., Salari, K., Brown, A., Schoon, R., 2013. Aerodynamic drag reduction of class 8 heavy vehicles: a full-scale wind tunnel study, Lawrence Livermore National Laboratory. LLNL-TR-628153.
SAE international surface vehicle recommended practice, 2012. SAE wind tunnel test procedure for trucks and buses, SAE Stand J1252.
Storms, B.L., Satran, D.R., Heineck, J.T., Walker, S., 2004. A study of reynolds number effects and drag-reduction concepts on a generic tractor-trailer. AIAA, 2251.
West, G.S., Apelt, C.J., 1982. The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers. J. Fluid Mech. 114, 361–377.
Wickern, G., Zwicker, K., Pfadenhauer, M. 1997. Rotating wheels-their impact on wind tunnel test techniques and on vehicle drag results. SAE Technical Paper, No. 970133.
Wood, R.M., 2006. A discussion of a heavy truck advanced aerodynamic trailer system. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, University Park, PA.
You, D., Moin, P., 2009. A dynamic global-coefficient subgrid-scale model for large-eddy simulation of turbulent scalar transport in complex geometries. Phys. Fluids 21, 045109.

부록 12. Aerodynamic performance of sinusoidal boat tail on heavy vehicles

Manuscript Details

Manuscript number	INDAER_2016_503
Title	Aerodynamic performance of sinusoidal boat tail on heavy vehicles
Article type	Full Length Article

Abstract

In this study, a boat tail with a sinusoidal tail is proposed for the reduction of drag and side forces exerting on a real-shaped heavy vehicle model. The sinusoidal boat tail is bio-inspired by the tail shape of bird wings. The bio-inspired sinusoidal boat tail (SBT) has a significant influence on the reduction of drag and side forces and on the yaw moment under crosswind conditions. At a yaw angle of 7°, the drag and side forces have a maximum reduction of 15.9% and 22.6%, respectively, compared with those without SBT. The yaw moment coefficient is evidently decreased by the attached SBT. As a result, the bio-inspired SBT can greatly contribute to the improvement of aerodynamic performance and driving stability of a vehicle. Velocity field results show that the SBT effectively demonstrates the formation of longitudinal vortices by enhancing the streamwise velocity of the wake behind the boat tail. In addition, because of the development of a secondary swirling flow zone, the streamwise momentum deficit is also reduced in the wake region.

Keywords	Heavy vehicle, Boat tail, Sinusoidal, Drag reduction, Wind tunnel experiment, PIV measurement
Corresponding Author	Sang Joon Lee
Corresponding Author's Institution	POSTECH
Order of Authors	Eui Jae Lee, Sang Joon Lee
Suggested reviewers	Haecheon Choi

Submission Files Included in this PDF

File Name [File Type]

Cover Letter.pdf [Cover Letter]

manuscript.pdf [Manuscript]

Figures and table.pdf [Figure]

To view all the submission files, including those not included in the PDF, click on the manuscript title on your EVISE Homepage, then click 'Download zip file'.

improve driving stability. It could also be used to improve the aerodynamic performance of high-speed rail vehicles.

Acknowledgements

This study was supported by the KAIA in the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. Through the research project entitled ***Development of aerodynamic technologies for efficient road freight transport***.

References

Ahmed, S., Gawthorpe, R., Mackrodt, P.-A., 1985. Aerodynamics of road-and rail vehicles. Vehicle System Dynamics 14, 319-392.

Ahmed, S., Ramm, G., Faitin, G., 1984. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA.

Allan, J., 1981. Aerodynamic drag and pressure measurements on a simplified tractor-trailer model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 9, 125-136.

Bearman, P.W., Owen, J.C., 1998. Reduction of bluff-body drag and suppression of vortex shedding by the introduction of wavy separation lines. Journal of Fluids and Structures 12, 123-130.

Beaudoin, J.-F., Aider, J.-L., 2008. Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps. Experiments in fluids 44, 491-501.

Cheli, F., Corradi, R., Sabbioni, E., Tomasini, G., 2011. Wind tunnel tests on heavy road vehicles: cross wind induced loads—part 1. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 99, 1000-1010.

Choi, H., Lee, J., Park, H., 2014. Aerodynamics of heavy vehicles. Annual Review of Fluid Mechanics 46, 441-468.

Choi, H., Park, H., Sagong, W., 2012. Biomimetic flow control based on morphological features of living creaturesa. Physics of Fluids 24, 121302.

Cooper, K.R., 1982. The wind tunnel testing of heavy trucks to reduce fuel consumption. SAE Technical Paper, No. 821285.

Cooper, K.R., 2003. Truck aerodynamics reborn: lessons from the past. SAE Transactions 112, 132-142.

Fourrié, G., Keirsbulck, L., Labraga, L., Gilliéron, P., 2011. Bluff-body drag reduction using a deflector. Experiments in Fluids 50, 385-395.

부록 13. Drag-reducing underbody flow of a heavy vehicle with side skirts

J Vis (2017) 20:369–378
DOI 10.1007/s12650-016-0401-7

REGULAR PAPER

Jeong Jae Kim · Sang Joon Lee

Drag-reducing underbody flow of a heavy vehicle with side skirts

Received: 21 June 2016 / Revised: 14 September 2016 / Accepted: 1 October 2016 / Published online: 13 October 2016
© The Visualization Society of Japan 2016

Abstract Aerodynamic drag reduction in heavy vehicles is a very interesting research topic that is relevant for both the industries and the environment. The underbody flow induces considerable drag as it passes through the underside of heavy vehicles and interacts with rolling wheels and other underbody structures. Nonetheless, the drag caused by such an underbody flow has received less research attention, compared with those attributed to forebody and base body flows. Side skirts are one of the most effective drag-reduction devices to control the underbody flow. They consist of straight panels curtaining the space between the front and rear wheels. However, the mechanisms of underbody flow modified by side skirts have yet to be fully understood. In this study, the drag reduction underbody flow of a scaled-down 15-ton truck model attached with two different types of side skirts was quantitatively visualized through wind tunnel tests. Results show that the straight-type side skirt and the flap-type side skirt significantly change the flow structures under the vehicle model, reducing drag coefficient by 3.1 and 6.1 %, respectively. Furthermore, flow characteristics in the underbody of the vehicle model with and without side skirts are investigated using a PIV technique to understand the associated drag-reduction mechanism.

Keywords Drag reduction · Heavy vehicle · Side skirt · Flow visualization · PIV · Underbody flow

1 Introduction

Finding ways to reduce fuel consumption and greenhouse gas emissions of heavy vehicles is an important global issue with major environmental significance. Particularly, the drag reduction of heavy vehicles is of great importance, because it is directly associated with this issue. Many experimental and numerical studies in reducing the drag of heavy vehicles have been conducted over the past decades (Ahmed et al. 1985; Choi et al. 2014; Cooper 2003; Cooper and Leuschen 2005; Hucho and Sovran 1993; Verzicco et al. 2002).

The underbody flow passing through the gap between the bottom and ground surface of the vehicle has to be effectively controlled, because approximately 30 % of the aerodynamic drag is induced by the underbody structures of heavy vehicles running on a highway (Wood 2006). The ground effect of the vehicle needs to be examined in consideration of real driving condition. Krajnovic and Davidson (2005) numerically simulated the ground effect of the Ahmed model using large-eddy simulation (LES) at $Re = 2 \times 10^5$. Drag of the vehicle with moving ground is 8 % smaller than stationary ground. Strachan et al. (2007) observed that the moving ground forms secondary vortices between the ground and underbody, which was not observed in the case of stationary ground at $Re = 4.7 \times 10^5$. However, most previous experimental studies on the drag-

J. J. Kim · S. J. Lee (✉)
Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), 77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk 37673, South Korea
E-mail: sjlee@postech.ac.kr
Tel.: +82 054 279 2169

(Fig. 9c). By contrast, the attached flap-type side skirt not only decreases the strength of vorticity in the region behind the rear wheel, but also effectively reduces vortices in the region along the side skirt panel. Therefore, the maximum 6.1 % of drag reduction of a 15-ton heavy vehicle attached with the flap-type side skirt can be mainly attributed to the combined effects of reduced momentum deficit, the large reduction of vorticity, and TKE in the region behind the rear wheels.

4 Conclusions

In this study, the effects of side skirts on the drag reduction and modification in the underbody flow of the scale-down truck model were quantitatively investigated through wind tunnel tests under stationary ground condition. The straight-type and flap-type (0°, 0°, and 30°) side skirt attached to the vehicle model reduce drag coefficient by 3.1 and 6.1 %, respectively, compared with the reference model without side skirts. The modified flow structures (e.g., mean velocity, vorticity, and TKE distributions) under the vehicle model attached with two different types of side skirts were analyzed using a PIV technique. The attachment of the straight-type side skirt reduces the streamwise momentum deficit in the underbody flow and the TKE level behind the rear wheel. In addition, the regions of strong vorticity formed behind the wheels are reduced. The maximum drag reduction by 6.1 % is obtained by attaching the flap-type side skirt to the vehicle model, with further reduction of momentum deficit, vorticity, and TKE level in the region behind the rear wheel, compared with the vehicle model attached with the straight-type side skirt. The changes in underbody flow structures of a heavy vehicle model have not been experimentally observed in previous studies, although they were numerically simulated in a previous computational study (Hwang et al. 2016).

In real operating condition, the various changes in weather, such as rainy condition, would affect the drag-reduction effect of additive device. However, the effect of splash and spray of water on the drag coefficient of a heavy vehicle was not investigated yet, because it is not easy to control the rainy conditions, including the quantity of water, droplet size, and water film thickness. Thus, the experiments are conducted under controlled condition, including temperature and moisture for comparison of drag-reduction devices. The present results are useful in the design of the underbody drag-reduction devices for heavy vehicles.

Acknowledgments This study was conducted as the second year research of the development of aerodynamic technologies for efficient road freight transport, supported by the KAIA in the Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (NTIS 1615007940).

References

Ahmed S, Ramm G, Faltin G (1984) Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE technical paper, no. 840300
Ahmed S, Gawthorpe R, Mackrodt PA (1985) Aerodynamics of road-and rail vehicles. Veh Syst Dyn 14:319–392
Choi H, Lee J, Park H (2014) Aerodynamics of heavy vehicles. Annu Rev Fluid Mech 46:441–468
Cooper KR (2003) Truck aerodynamics reborn-lessons from the past. SAE Trans 112:132–142
Cooper KR, Leuschen J (2005) Model and full-scale wind tunnel tests of second-generation aerodynamic fuel saving devices for tractor-trailers. SAE technical paper, no. 2005-01-3512
Gerrard J (1966) The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies. J Fluid Mech 25:401–413
Han T, Sumantran V, Harris C, Kuzmanov T, Huebler M, Zak T (1996) Flow-field simulations of three simplified vehicle shapes and comparisons with experimental measurements. SAE Trans 106:820–835
Hucho WH, Sovran G (1993) Aerodynamics of road vehicles. Annu Rev Fluid Mech 25:485–537
Hwang BG, Lee S, Lee EJ, Kim JJ, Kim M, You D, Lee SJ (2016) Reduction of drag in heavy vehicles with two different types of advanced side skirts. J Wind Eng Ind Aerodyn 155:36–46
Kapadia S, Roy S, Vallero M, Wurtzler K, Forsythe J (2004) Detached-eddy simulation over a reference Ahmed car model. In: Direct and large-eddy simulation V, pp 481–488
Krajnović S, Davidson L (2005) Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles. J Wind Eng Ind Aerodyn 93:677–696
Ortega JM, Salari K (2004) An experimental study of drag reduction devices for a trailer underbody and base. AIAA paper, no. 2004-2252
Storms BL, Satran DR, Heineck JT, Walker S (2004) A study of reynolds number effects and drag-reduction concepts on a generic tractor-trailer. AIAA paper, no. 2004-2251
Strachan R, Knowles K, Lawson N (2007) The vortex structure behind an Ahmed reference model in the presence of a moving ground plane. Exp Fluids 42:659–669
Verzicco R, Fatica M, Iaccarino G, Moin P, Khalighi B (2002) Large eddy simulation of a road vehicle with drag-reduction devices. AIAA J. 40:2447–2455

부록 14. 공기저항 저감장치 패키지를 이용한 대형화물차량의 연비개선 및 온실가스 저감효과에 관한 실험적 연구

Transactions of KSAE, Vol. 25, No. 2, pp.207-218 (2017)

Copyright © 2017 KSAE / 147-09
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.2.207

공기저항 저감장치 패키지를 이용한 대형화물차량의 연비개선 및 온실가스 저감효과에 관한 실험적 연구

박 승 원[*1] · 랑 동[2] · 허 철 행[3] · 윤 병 규[4] · 김 대 욱[1]

허즈앤티 기술연구소[1] · 국민대학교 자동차공학전문대학원[2] ·
수원대학교 환경에너지공학과[3] · 전북자동차기술원 파워트레인 연구그룹[4]

An Experimental Study on GHG Emissions Reduction and Fuel Economy Improvement of Heavy-Duty Trucks by Using Aerodynamics Device Package

Seungwon Park[*1] • Lang Dong[2] • Chulhaeng Her[3] • Byoeunggyu Yun[4] • Daewook Kim[1]

[1]*Green Technology, Hawesnt Co. Ltd, 195 Baengma-ro, Ilsandong-gu, Goyang-si, Gyeonggi 10403, Korea*
[2]*Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 02707, Korea*
[3]*Department of Environmental Energy, Suwon University, Gyeonggi 18323, Korea*
[4]*Research Group of Powertrain, Jeonbuk Institute of Automotive Technolog, 6 Dongjangsan 2-gil, Gunsan-si, Jeonbuk 54158, Korea*

(Received 12 January 2017 / Revised 31 January 2017 / Accepted 31 January 2017)

Abstract : Improving fuel consumption, particularly that of commercial vehicles, has become a global concern. The reduction in logistics cost has been a key issue in efforts to improve fuel economy and efficiency of transportation equipment. Typical technologies for reducing reduce fuel usage include air resistance reduction technologies, tire rolling resistance technologies, and idle technologies among others. Air resistance technology is a highly effective method that can be easily applied in a short period. As with air resistance technology, several devices involving side skirt, boat tail and gap fairing have been developed based on an analytical 3-D modeling technique for reducing air resistance attributed to the vehicle configuration. The devices were on a 45 feet tractor-trailer and the emission test was done using PEMS equipment. Fuel economy was evaluated by introducing several devices to reduce outer air resistance. The test was conducted by changing the experimental method of SAE J1321 Joint TMC/SAE Fuel Consumption Test Procedure - Type II test. As a result, air resistance decreased by at least 15 % and fuel economy improved by at least 13 %. This study sought to reduce greenhouse gas and improve fuel economy by applying several devices to a test vehicle to lower air resistance.

Key words : Fuel economy(연비), GHG(Green House Gas, 온실가스), Heavy-Duty truck(대형 상용차), Emission (배기가스), Aerodynamics(공기역학), Air resistance(공기저항)

1. 서 론

정부는 '신기후체제(POST-2020)'를 앞두고 우리나라의 2030년 온실가스 감축목표를 BAU(Business As Usual) 대비 37 %로 결정하였으며,[1] 수송부문의 감축목표는 34.3 %로 전체 배출원 중 가장 높게 설정되었다. 국내 온실가스 배출량을 부문별로 살펴보면 에너지산업공정부문이 600.3 백만톤 CO_2 eq.로 전체 배출원 중 87.2 %로 가장 높은 배출량을 보이며, 에너지산업공정부문 중 에너지산업부문이 44.6 %, 제조업 및 건설업부문이 30.0 %, 수송부문이 14.4 %로 전체 배출원 중 3번째로 높은 배출량을 갖는다.[2] 수송부문에서 국내 화물 수송 분담률 추이

*Corresponding author, E-mail: swpark@hawesnt.com

포항공과대학교 | IP: 141.223.93.*** | Accessed 2017/06/28 10:43(KST)

Table 6 The data analysis result of experiment in acceleration

	Base segment T/C ratio	Test segment T/C ratio	Fuel saved (%)	Improvement (%)
Test 1 [Side skirt + Boat tail + Gap fairing]	0.9956	0.9973	3.68	3.82
	1.0006	0.9547		
	0.9978	0.9321		
Test 2 [Side skirt + Boat tail]	0.9956	0.9973	2.60	2.67
	1.0006	0.9547		
	0.9978	0.9643		

Table 7 The data analysis result of total experiment

	Base segment T/C ratio	Test segment T/C ratio	Fuel saved (%)	Improvement (%)
Test 1 [Side skirt + Boat tail + Gap fairing]	0.9412	0.8101	13.40	15.47
	0.9453	0.8317		
	0.9461	0.8114		
Test 2 [Side skirt + Boat tail]	0.9412	0.8899	4.32	4.51
	0.9453	0.9078		
	0.9461	0.9127		

규정인 SAE J1321 Joint TMC/SAE Fuel Consumption Test Procedure - Type II에 의거하여 계산하였으며, 계산 방법은 아래에 표기하였다.

$$Fuel\ Saved(\%) = \frac{(T/C)_b - (T/C)_t}{(T/C)_b}$$

$$Improvement(\%) = \frac{(T/C)_b - (T/C)_t}{(T/C)_t}$$

$(T/C)_b$ = (TV fuel consumption/CV fuel consumption) in baseline segment

$(T/C)_t$ = (TV fuel consumption/CV fuel consumption) in test segment

위의 표는 연비개선률 계산식으로부터 산출된 결과를 표로 정리한 것이며 실험 Data analysis page는 다음 장에 Fig. 22부터 Fig. 25로 첨부하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 실제 차량에 공기저항 저감장치를 설치하여 진행한 차량 비교실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 그래프를 통해 공기저항 저감장치를 부착하여 주행 시 주행저항의 감소로 인해 상대적으로 적은 토크 및 출력으로 주행이 가능하여 전체적인 연료소비율이 감소하는 것을 확인하였으며, 분석결과 Test 1에서는 최대 15.47 %의 개선률을 보이며 Test 2에서는 최대 4.51 %를 보이는 것을 확인하였다.
2) 가속주행 시 공기저항 저감으로 인해 차량의 주행저항으로 인한 출력손실이 줄어 연료소비율을 Test 1에서는 최대 3.68 %, Test 2에서는 최대 2.60 % 절감할 수 있었으며, 온실가스 또한 저감할 수 있음을 확인하였다.
3) 배기가스 결과 또한, 전반적으로 감소하였으며 온실가스인 CO, CO_2의 결과 또한 감소한 것으로 나타나 연료소비율이 감소하고 온실가스가 감소한 것을 확인하였다.
4) 결과적으로 공기저항 저감장치를 통해 주행 저항을 저감하여 단기간 내에 효과적으로 차량의 연비를 개선시키고, 온실가스를 저감 할 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 교통물류연구사업“도로화물 운송 효율화를 위한 트레일러 경량화, 공기저항저감 및 운송용기 최적화 기술개발”의 지원 사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

포항공과대학교 | IP: 141.223.93.*** | Accessed 2017/06/28 10:43(KST)

부록 15. Salient drag reduction of a heavy vehicle using modified cab-roof fairings

Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 164 (2017) 138–151

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jweia

Salient drag reduction of a heavy vehicle using modified cab-roof fairings

Jeong Jae Kim[a], Sangseung Lee[b], Myeongkyun Kim[b], Donghyun You[b,*], Sang Joon Lee[a,*]

[a] Advanced Fluid Engineering Research Center, Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), 77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk 37673, South Korea

[b] Flow Physics and Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), 77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk 37673, South Korea

ARTICLE INFO

Keywords:
Heavy vehicle
Cab-roof fairing
Drag reduction
Forebody flow
Wind tunnel
Large-eddy simulation

ABSTRACT

Aerodynamic drag reduction is directly related to fuel consumption and CO_2 emission and is thus a main research interest in heavy vehicles. Approximately half of the total aerodynamic drag is attributed to the flow at the forebody of a vehicle and the gap between the tractor and trailer. Therefore, flow control devices that can reduce aerodynamic drag on the forebodies of heavy vehicles offer a considerably practical significance. Cab-roof fairing (CRF) is one of the most widely used drag reduction devices installed at the roofs of trucks or tractor-trailers. However, the drag-reducing effect and the three-dimensional flow characteristics around forebodies as a function of the external shape of CRFs have yet to be fully investigated. In this study, the drag reduction effects of typical and modified CRF models are quantitatively examined through wind tunnel tests and numerical simulation (coarse large eddy simulation (LES)). The wind tunnel experiment at a Reynolds number of $> 5.5\times10^5$ is conducted for a scaled-down model of a 15-tonne truck. The modified CRF significantly changes the flow structure, leading to approximately 19% drag reduction. PIV flow field measurement was conducted to figure out the differences in flow characteristics around the forebody of the vehicle with and without CRFs.

Flow characteristics, including vortical structures, turbulent kinetic energy, mean pressure field, and mean velocity field around the forebody of the vehicle model (1/8 scale) with and without CRFs are numerically investigated using coarse LES for further understanding of the mechanism associated with drag reduction. The present results are expected to provide useful information for the design of new CRF models and the improvement of the aerodynamic performance of heavy vehicles, including trucks and tractor-trailers.

1. Introduction

Economical and eco-friendly vehicles have recently received significant attention along with the increased importance of fuel saving and the strengthening of environmental regulations. Therefore, aerodynamic drag reduction in heavy vehicles, such as trucks and tractor-trailers, is of great practical significance because it is directly related to energy saving. Sovran (1983) reported that a 3% reduction in fuel consumption can be obtained by reducing aerodynamic drag by 10%. Thus, numerous studies have attempted to reduce aerodynamic drag in heavy vehicles (Allan, 1981; Ahmed et al., 1984; Hucho and Sovran, 1993; Cooper, 2003; McCallen et al., 2004).

Various attempts have also been made to reduce forebody drag because approximately 45% of aerodynamic drag is induced by the front face of a tractor (25%) and by the gap (20%) between the tractor and trailer of a typical tractor-trailer when driven on a highway (Wood, 2006). Gilhaus (1981) experimentally investigated the effect of cab shape on forebody drag. Numerous forebody drag-reducing devices, such as forebody convex molding (Garry, 1981), front spoilers (Hyams et al., 2011), vertical fences (Allan, 1981), cab side extenders (Martini et al., 2011), and front spoilers (Choi et al., 2014), have been developed to control forebody flow in heavy vehicles. Cab-roof fairing (CRF) affixed to the cab of a truck or tractor is the most commonly used drag-reducing device to control forebody flow. CRF streamlines the step between the top part of a cab and the front part of a container. A CRF and a side extender attached on a 40 ft tractor-trailer model reduced drag by 12% at 65 mph (Cooper and Leuschen, 2005).

However, previous studies mostly dealt with the effect of drag-reducing devices without acquiring sufficient information on flow characteristics around the forebodies of heavy vehicles. Numerical and experimental studies were conducted using simplified vehicle models, such as the Ahmed model (Ahmed et al., 1984) and GM model (Han et al., 1996). The flow around a simplified tractor-trailer model (Östh and Krajnović, 2012) and a square-back vehicle (Verzicco et al., 2002) attached with drag-reducing devices were analyzed using large eddy simulation (LES). Detached eddy simulation was also conducted

* Corresponding authors.
E-mail addresses: dhyou@postech.ac.kr (D. You), sjlee@postech.ac.kr (S.J. Lee).

http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2017.02.015
Received 12 March 2016; Received in revised form 28 October 2016; Accepted 15 February 2017
Available online 23 February 2017
0167-6105/ © 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

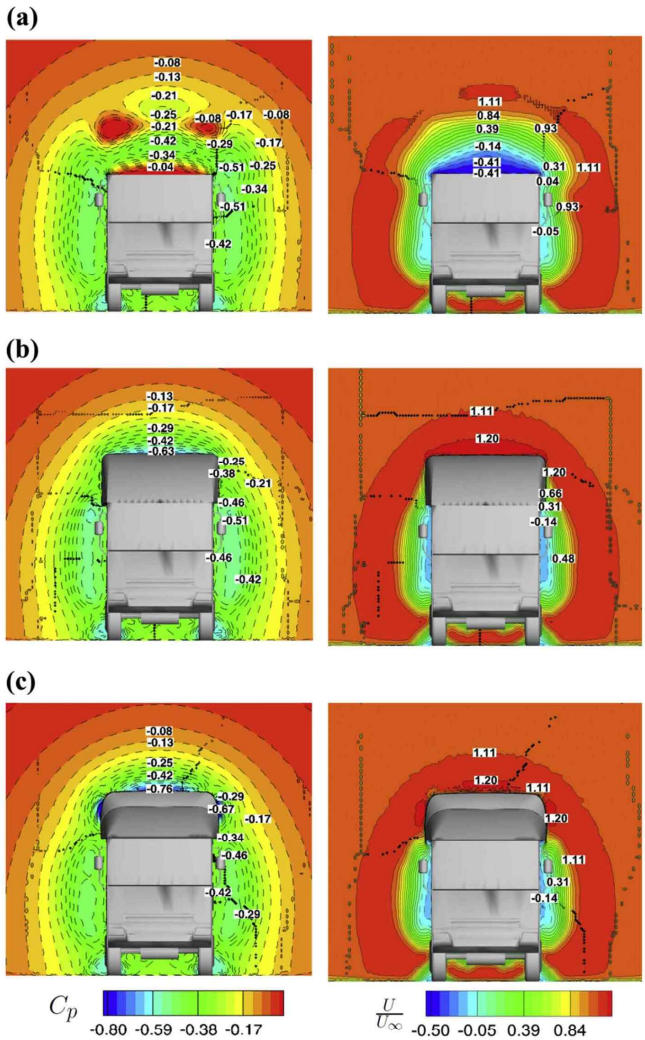


Fig. 16. Contour plots of the pressure coefficient (C_p, left column) and mean streamwise velocity (U/U_∞, right column) in the y-z plane at x=0.1/H for the vehicle (a) without a CRF, (b) with a 3D CRF, and (c) with a modified CRF.

aerodynamic performance in drag reduction. The present results will be useful in designing new CRFs and flow control devices for heavy vehicles.

Acknowledgements

This study was conducted as the 2nd year research of the ***Development of aerodynamic technologies for efficient road freight transport***, supported by the KAIA in Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (NTIS 1615007940).

References

Ahmed, S., Ramm, G., Faltin, G., 1984. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE Technical Paper, No. 840300.
Allan, J., 1981. Aerodynamic drag and pressure measurements on a simplified tractor-trailer model. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 9, 125–136.
Choi, H., Lee, J., Park, H., 2014. Aerodynamics of heavy vehicles. Annu. Rev. Fluid Mech. 46, 441–468.
Cooper, K.R., 2003. Truck aerodynamics reborn-lessons from the past. SAE Trans. 112, 132–142.
Cooper, K.R., Campbell, W., 1981. An examination of the effects of wind turbulence on the aerodynamic drag of vehicles. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 9, 167–180.
Cooper, K.R., Leuschen, J., 2005. Model and full-scale wind tunnel tests of second-

부록 16. Bio-inspired cab-roof fairing of heavy vehicles for enhancing drag reduction and driving stability

Bio-inspired cab-roof fairing of heavy vehicles for enhancing drag reduction and driving stability

Jeong Jae Kim, Jiwoo Hong, and Sang Joon Lee*

Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), 77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk, 37673, South Korea

*Corresponding authors.
Tel: +82 054 279 2169, Fax: +82 054 279 3199, E-mail address: sjlee@postech.ac.kr

Keywords: bio-inspired design, sea lion, drag reduction; flow control; heavy vehicle; cab-roof fairing; flow visualization;

Abstract

A major challenge hindering the advancement of the automotive industry is finding a way to reduce the aerodynamic drag of transport vehicles, thereby promoting fuel saving and environmental pollution control. Given that nearly half of the aerodynamic drag of heavy vehicles arises from the forebody, several flow-control devices, such as cab-roof fairing (CRF), have been established to reduce the aerodynamic drag exerted on the forebody. Majority of conventional CRFs with a 2D streamlined curvature have limitations in enhancing the driving stability with respect to side winds and in reducing the aerodynamic drag at the forebody. In this study, new CRFs were designed with 2D profile and flow-guiding structures, which have superior drag reduction, inspired by the external forebody shape of sea lions. To evaluate the drag reduction effects of the proposed bio-inspired CRFs, three different types of CRFs (i.e., basic, bio-inspired, and advanced bio-inspired) were installed at scaled-down vehicle models of 15-ton and 5-ton heavy vehicles. Wind tunnel tests were conducted to measure the aerodynamic drag forces (e.g., drag and side-force coefficients) at a varying yaw angle (ϕ = 0°−15°). The advanced bio-inspired CRF considerably reduced the drag coefficient of the 15-ton and 5-ton models by approximately 20% and 22.4%, respectively. The side force was also reduced by up to 8% and 9% for the 15-ton and 5-ton models equipped with the advanced bio-inspired CRF at a yaw angle of ☒ = 3°, repectively. The flow characteristics (e.g., mean

without CRF and with the basic CRF. Furthermore, the bio-inspired CRFs more remarkably reduced the drag and side force coefficient under the crosswind condition than that under the front-wind condition (☒ = 0°). The proposed bio-inspired CRFs offer additional advantages, such as cost-effective production and easy mounting on heavy vehicles. The salient drag reduction effect of the proposed CRFs was achieved by modulating the external shape of the commercial CRF model. The findings of this study provide useful information for designing a new forebody flow-control device with reduced aerodynamic drag and enhanced driving stability in heavy vehicles. To further improve drag reduction and driving stability, we intend to optimize the design of the proposed bio-inspired CRF through a systematic study with varying morphological parameters in the near future.

Acknowledgements

This study was conducted as the 3rd year research of the ***development of aerodynamic technologies for efficient road freight transport***, supported by the KAIA in Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (NTIS 1615007940).

부록 17. Drag reduction of a heavy vehicle using a modified boat tail with lower inclined air deflector

J Vis
DOI 10.1007/s12650-017-0426-6

REGULAR PAPER

Eui Jae Lee · Sang Joon Lee

Drag reduction of a heavy vehicle using a modified boat tail with lower inclined air deflector

Received: 29 November 2016 / Revised: 17 February 2017 / Accepted: 6 March 2017
© The Visualization Society of Japan 2017

Abstract The improvement of the fuel efficiency of heavy vehicles has received considerable attention. Thus, various flow-control devices have been implemented to reduce aerodynamic drag exerting on heavy vehicles. In this study, we proposed noble boat tail with lower inclined air deflector (LIAD), as a passive flow-control device on attached at the rear end of heavy vehicles. The aerodynamic performance of the modified boat tail with LIAD is experimentally examined by measuring the drag force, side force exerting on a real-shaped heavy vehicle model at various yawing angles. As a result, the maximum drag reduction effect of the boat tail with LIAD ($\theta = 45°$) is about 9.02% compared to the result without the boat tail, although the length of the bottom tail is half of that of four-way boat tail. Furthermore, particle image velocimetry velocity field measurements were conducted to investigate the modified flow structure are by the attachment of various boat tails. Consequently, the LIAD effectively suppresses the formation of large-scale recirculating zone in the wake behind the rear body of the vehicle, as an effective guide of the underbody flow.

Keywords Heavy vehicle · Boat tail · Deflector · Drag reduction · Wind tunnel experiment · PIV measurement

1 Introduction

Many attempts have been made to reduce the cost of transportation. Drag reduction of heavy vehicles, such as trucks or tractor-trailers, has significant influence on the reduction of fuel consumption and CO_2 emission, because the transport of freight using heavy vehicles largely accounts for the cost of transport (McCallen et al. 2013). One of the primary means to reduce aerodynamic drag exerting on vehicles is to adapt flow-control devices (Gad-el-Hak 2000). A heavy vehicle cruising at 100 km/h consumes approximately 52% of the total fuel to overcome the aerodynamic drag. Bradley (2000) achieved approximately 4% fuel savings by reducing 20% of the aerodynamic drag of a 36 ton tractor-trailer at a cruise speed of 105 km/h. For a tractor-trailer driving on a highway, the front part of the vehicle causes approximately 45% of the total drag. Other contributing factors include the trailer base (25%) and underbody flow (30%) (Cooper 2003). To reduce the aerodynamic drag of the rear part, several boat tails have been introduced as an aerodynamic flow-control device of heavy vehicles (Hucho and Sovran 1993; Leuschen and Cooper 2006; McCallen et al. 1999).

Most previous studies about boat tails have been conducted by experiments or numerical simulation for simplified vehicle geometries, such as GM and Ahmed body models (Han et al. 1996; Malviya et al. 2009;

E. J. Lee · S. J. Lee (✉)
Department of Mechanical Engineering, Advanced Fluid Engineering Research Center, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), San 31, Hyoja-Dong, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk 790–784, South Korea
E-mail: sjlee@postech.ac.kr
Tel.: +82 054 279 2169

Published online: 06 April 2017

drag and side force coefficients is 10.93 and 21.92% at a yaw angle of $\varphi = 5°$, respectively. The effects of the length and angle (ω) of side tail are also examined in this study. Among the tested experimental conditions for the three boat tails, the maximum drag coefficient reduction is approximately 6.48% for the boat tail with a small length of the side tail angle of $\omega = 80°$.

The flow structures of the wake behind the rear body of the 3D scale-down heavy vehicle model are quantitatively analyzed using PIV velocity field measurements. The reference vehicle without boat tail has a large-scale wake region with counter-clockwise rotating recirculation flow attached to the back side of the rear body. Behind the vehicle attached to boat tails, the flow separation is delayed toward the downstream of the upper side of the boat tail. Especially, when the modified boat tail with LIAD is attached to the vehicle model, the inclined deflector suppresses the formation of a recirculating flow zone behind the rear body by effectively guiding the underbody flow into the wake. These results demonstrate that the large reduction of aerodynamic drag can be achieved by a simple attachment of the modified boat tail with LIAD.

Acknowledgements This study was supported by the KAIA in the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport through the research project entitled *Development of aerodynamic technologies for efficient road freight transport.*

References

Ahmed S, Ramm G, Faitin G (1984) Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. Society of Automotive Engineers Inc, Warrendale

Ahmed S, Gawthorpe R, Mackrodt P-A (1985) Aerodynamics of road-and rail vehicles. Vehicle Syst Dyn 14:319–392

Allan J (1981) Aerodynamic drag and pressure measurements on a simplified tractor-trailer model. J Wind Eng Ind Aerodyn 9:125–136

Beaudoin J-F, Aider J-L (2008) Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps. Exp Fluids 44:491–501

Beaudoin J, Cadot O, Aider J, Gosse K, Paranthoën P, Hamelin B, Tissier M, Allano D, Mutabazi I, Gonzales M (2004) Cavitation as a complementary tool for automotive aerodynamics. Exp Fluids 37:763–768

Bradley R (2000) Technology roadmap for the 21st century truck program. Energy efficiency and renewable energy. US Department of Energy, Washington, DC, p 32

Choi H, Lee J, Park H (2014) Aerodynamics of heavy vehicles. Annu Rev Fluid Mech 46:441–468

Cooper KR (2003) Truck aerodynamics reborn: lessons from the past. SAE Trans 112:132–142

Fourrié G, Keirsbulck L, Labraga L, Gilliéron P (2011) Bluff-body drag reduction using a deflector. Exp Fluids 50:385–395

Gad-el-Hak M (2000) Flow control: passive, active and reactive flow management. Cambridge University Press, Cambridge

Han T, Sumantran V, Harris C, Kuzmanov T, Huebler M, Zak T (1996) Flow-field simulations of three simplified vehicle shapes and comparisons with experimental measurements. SAE Technical Paper, No. 960678

Hucho W-H, Sovran G (1993) Aerodynamics of road vehicles. Annu Rev Fluid Mech 25:485–537

Khalighi B, Zhang S, Koromilas C, Balkanyi S, Bernal LP, Iaccarino G, Moin P (2001) Experimental and computational study of unsteady wake flow behind a bluff body with a drag reduction device. SAE paper, No. 1042

Leuschen J, Cooper KR (2006) Full-scale wind tunnel tests of production and prototype, second-generation aerodynamic drag-reducing devices for tractor-trailers. SAE Technical Paper, No. 3456

Malviya V, Mishra R, Fieldhouse J (2009) CFD investigation of a novel fuel-saving device for articulated tractor-trailer combinations. Eng Appl Comput Fluid Mech 3:587–607

McCallen R, Couch R, Hsu J, Browand F, Hammache M, Leonard A, Brady M, Salari K, Rutledge W, Ross J (1999) Progress in reducing aerodynamic drag for higher efficiency of heavy duty trucks (class 7–8). Society of Automotive Engineers, Incorporated

McCallen R, Browand F, Ross J (2013) The aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains. Springer Science & Business Media, Berlin

Minguez M, Pasquetti R, Serre E (2008) High-order large-eddy simulation of flow over the "Ahmed body" car model. Phys Fluids 20:095101

Ortega J, Salari K, Brown A, Schoon R (2013) Aerodynamic drag reduction of class 8 heavy vehicles: a full-scale wind tunnel study. Lawrence Livermore National Laboratory technical report, LLNL-TR-628153

Roumeas M, Gilliéron P, Kourta A (2009) Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry. Comput Fluids 38:60–70

SAE (2012) SAE wind tunnel test procedure for trucks and buses. SAE Recommended Practice J 1252

Verzicco R, Fatica M, Iaccarino G, Moin P, Khalighi B (2002) Large eddy simulation of a road vehicle with drag-reduction devices. AIAA J 40:2447–2455

West G, Apelt C (1982) The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between 10^4 and 10^5. J Fluid Mech 114:361–377

부록 18. Substantial drag reduction of a tractor-trailer vehicle using gap fairings

Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics

Substantial drag reduction of a tractor-trailer vehicle using gap fairings

Jeong Jae Kim, Jeong Ju Kim, and Sang Joon Lee*

Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), 77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk, 37673, South Korea

*Corresponding author.

Tel: +82 054 279 2169, Fax: +82 054 279 3199, E-mail address: sjlee@postech.ac.kr

Keywords

gap fairing; drag reduction; flow control; passive device

Abstract

Reduction of aerodynamic drag of heavy vehicles is the one of main issues for solving fuel saving and environmental gas emission. In general, 50% of the total aerodynamic drag is induced from the region in front surface of the vehicle and the gap between tractor and trailer. Although various forebody drag-reducing devices were introduced for tractor-trailer vehicles, conventional gap fairings or side extenders have technical limitations in effectively reducing the aerodynamic drag exerting on the cab-roof space and gap between tractor and trailer. In this study, wind tunnel tests were conducted to investigate the drag reduction effects of newly devised gap fairings. The gap fairing devised in this study exhibits 16.4% drag reduction at maximum with changing gap length and deflecting angle. The aero cab fairing (ACF) which

Acknowledgements

This study was conducted as the 3rd year research of the ***development of aerodynamic technologies for efficient road freight transport***, supported by the KAIA in Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (NTIS 1615007940).

References

Allan, J., 1981. Aerodynamic drag and pressure measurements on a simplified tractor-trailer model. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 9, 125-136.

Castellucci, P.J., Salari, K., 2005. Computational simulation of tractor-trailer gap flow with drag-reducing aerodynamic devices. SAE Tech. Pap. No. 2005-01-3625

Choi, II., Lee, J., Park, II., 2014. Aerodynamics of heavy vehicles. Annu. Rev. Fluid Mech. 46, 441-468.

Cooper, K.R., 2003. Truck aerodynamics reborn-lessons from the past. SAE Trans. 112, 132-142.

Cooper, K.R., 2004. Commercial vehicle aerodynamic drag reduction: historical perspective as a guide, The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains. Springer, pp. 9-28.

Cooper, K.R., Leuschen, J., 2005. Model and full-scale wind tunnel tests of second-generation aerodynamic fuel saving devices for tractor-trailers. SAE Tech. Pap. No. 2005-01-3512.

Gerrard, J., 1966. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies. J. Fluid Mech. 25, 401-13.

Hammache, M., Browand, F., 2004. On the aerodynamics of tractor-trailers, The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains. Springer, pp. 185-205.