

PACE 경주용 차량의 조종안정성 개선에 대한 연구

김 관 주^{*1)} · 김 현 준²⁾ · 이 준 현²⁾

홍익대학교 기계시스템디자인공학과¹⁾ · 홍익대학교 대학원 기계공학과²⁾

Study on Vehicle Stability Enhancement for the PACE Formula Vehicle

Kwanju Kim^{*1)} · Hyunjun Kim²⁾ · Junheon Lee²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering and System Design, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received 28 December 2009 / Accepted 30 August 2010)

Abstract : The purpose of the study is to enhance the vehicle handling stability of the PACE formula vehicle. Required data for the dynamic analysis of the vehicle are as follows: Mass, moment of inertia, and tire's dynamic properties. Mass and moment of inertia data were calculated using Siemens NX 5.0 which results were verified with VIMF measurements of GMDAT. Dynamic data for the tire were supplied by Kumho Tire. Aerodynamic forces play an important role in the formula vehicle which forces were calculated by using Fluent. Full vehicle dynamic analysis using Carsim software has been carried out to find out the improvement of the vehicle stability by changing the shapes of the rear wing.

Key words : Vehicle stability(차량 안정성), Kinematics testing(기구학적 실험), Compliance testing(컴플라이언스 실험), Aerodynamic force(공기역학), Steady state circular test(정상 원 선회 시험), Double lane change(이중 차선 변경 거동)

1. 서 론

PACE(Partners for the Advancement of Collaborative Engineering Education)과제로 2007년 9월부터 세계 20여개 PACE대학 학생들이 참여하여 2년간 formula1 경주용 자동차를 디자인, 설계, 제작 및 주행실험을 수행하였다.¹⁾ 2008년 9월에 시 제작 차량(이후 “08년도 차량”)을 제작하였고, 이 차량의 주행 실험을 수행하여 발생한 문제점들을 해결하기위해서 2차 시제작 차량(이후 “09년도 차량”)을 수정 보완하여 제작하였다. 일반적으로 경주용 자동차는 300 km/h의 속도에서도 주행안정성을 확보해야한다. 이를 위해서는 차량의 엔진 구동력, 타이어 현가 장치의 특성 뿐 아니라, 전후 날개의 다운포스

(Down Force)의 배분이 중요한 인자가 된다.²⁾ 본 논문에서는 정상상태 선회에서 차량의 한계속도가 180km/h인 “08년도 차량”의 주행안정성을 향상시킬 수 있는 방안에 대해서 연구를 수행하였다.

차량동역학 해석을 수행하기 위해 필요한 입력 값의 첫 번째 항목인 해당경주용 자동차의 질량, 질량 중심 및 관성모멘트를 NX 5.0을 이용하여 계산하였으며, 관련 예측치를 지엠대우의 VIMF(Vehicle Inertia Measurement Facility) 장비를 이용하여 검증하였다. 두 번째 항목으로 차량 주행 시 차량에 작용하는 양력, 항력, 피치모멘트 계수 값을 “08년도 차량”과 “09년도 차량”을 대상으로 Fluent 6.2.16을 이용하여 예측했으며, “08년도 차량”의 축소모델에 대해서 공군사관학교의 풍동을 이용하여 실험을 수행하였다. 세 번째로 타이어의 동특성 자료는

*Corresponding author, E-mail: kwanju@hongik.ac.kr

PACE 차량에 장착한 Ecsta 타이어에 대해서 금호타이어에서 제공한 실험값을 적용하였다.

해석 항목으로는 첫 번째로 현가장치의 기구학적, 준정적 특성은 ADAMS CAR 프로그램을 이용하여 산출하였으며, 지엠대우의 Kinematic and Compliance 측정 장비를 이용하여 검증하였다. 두 번째로는 전체 차량 주행 해석을 “08년도 차량”, “09년도 차량”을 대상으로 Carsim을 이용하여 정상상태 선회, 이중 차선변경 해석을 수행하였다. 다음 Fig. 1은 본 논문에서 수행한 전반적인 항목과 해당 프로그램 혹은 측정 장비를 정리해서 나타내었다.

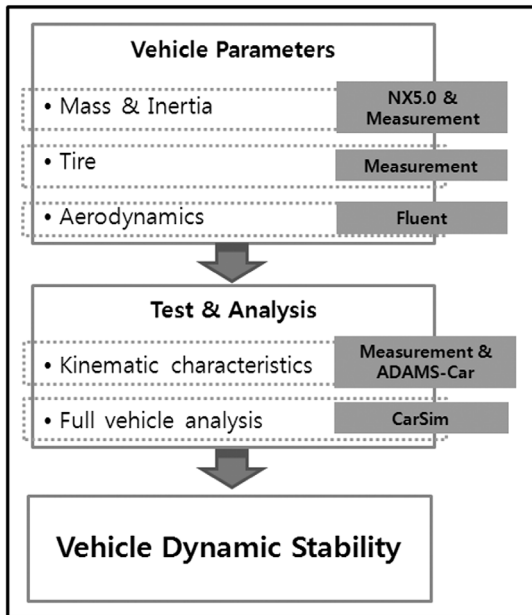


Fig. 1 Flow chart of the vehicle dynamics analysis for improving vehicle stability

2. 차량 모델의 제원

2.1 질량 및 관성모멘트

2.1.1 질량의 계산 및 실측

차량의 질량 및 관성모멘트를 상용프로그램 NX 5.0을 이용하여 계산하였다. Fig. 2에는 PACE 차량의 CAD 모델을 표시하였으며, Table 1에 나타난 재료의 밀도 값을 이용하여, 해당 차량의 질량 값을 계산하였다.

Table 2는 차량의 질량 실측치를 계산 값과 비교

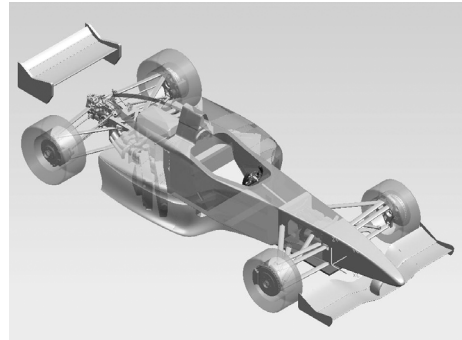


Fig. 2 The NX 5.0 model of the PACE F-1 vehicle

Table 1 Input data for the PACE F-1 vehicle

	Density (kg/m ³)
Steel	7800
Glass fiber	1800
Aluminum alloy	2700
Driver	50% male, 77.7kg

Table 2 Weight Distribution of the PACE F-1 vehicle (Gross vehicle weight assumption)

	Front	Rear	Total
Calculation (kg)	389.8	547.8	937.6
Measurement (kg)	335.6	527.1	862.7
Error (%)	13.9	3.78	7.99

한 결과 값으로, 오차를 14% 미만으로 유사한 계산 값을 도출하였으며 전, 후의 배분이 37:63으로 실제 차량의 4:6에 근접함을 확인하였다. 전륜에서 오차가 많이 발생하는 이유는 Fig. 2에서 보듯이 차량 앞 노즈 부분의 실제 형상이 복잡하여 CAD 도면과의 차이가 많은 것으로 사료된다.

2.1.2 관성모멘트의 계산 및 실험

좌표의 원점은 앞 차축의 중심점으로 설정하였으며, 전체 차량의 피치, 롤, 요 3방향의 관성 모멘트 값을 NX5.0을 이용하여 계산하였다. 해당 계산 값을 검증하기 위하여 지엠대우의 VIMF 장비를 이용하였다. Table 3에는 관성모멘트 값의 계산 값과 실측치를 표시하였으며, Pitch inertia를 제외한 두 가지 경우 30% 이내의 오차를 보였다. Pitch inertia의 오차가 상대적으로 크게 나타난 원인은 계산시 적용한 glass fiber 재료의 밀도 적용에 의해 전, 후방 날개의 질량 값의 오차가 있었기 때문이라고 사료된다.

Table 3 The Moments of Inertia of the PACE F-1 vehicle

	Pitch	Roll	Yaw
Calculation (kgm ²)	78	933.9	960.5
Measurement (kgm ²)	211.9	1158.5	1312.7
Error (%)	63.2	19.3	26.8

2.2 공기역학 전산해석

2.2.1 공기역학 해석 모델 설명

공기역학적 특성 값을 구하기 위해서, Fluent 6.2.16을 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 3은 Hyper mesh와 T-grid를 사용하여 생성된 차량 외부 유체의 prism, tetrahedral element를 보여준다.³⁾ 해석에 사용한 mesh의 개수는 약 700-800만개 정도이며, 차량의 주행 속도는 300km/h로 가정하였으며, 해석에 사용된 난류모델은 Realizable k-ε 2 equation model이며 유체 경계 조건, 해석 수렴의 판정 조건은 C. Lee et. al.의 조건을 적용하여 해석을 수행하였다.⁴⁾

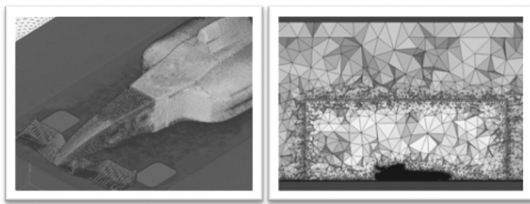


Fig. 3 Volume meshes of the outside fluid of the vehicle for aerodynamic analysis

2.2.2 공기역학 해석 결과

“08년 차량”에 대해서 조종안정성에 영향을 미치는 Drag, Lift, Pitching 방향의 계수 값과 전, 후 down force의 배분을 Table 4, Table 5의 “Model year 08”에 나타내었다. 이 형상을 갖는 “08년 차량”이 정상상태 선회를 하는 경우 차량의 한계속도는 180 km/h로 (3.2절 “정상 상태 선회” 참조) 일반적인 경주용 차량의 운행 속도에 미치지 못하는 것을 알 수 있었다. 한계 속도를 올리기 위해서 뒷날개의 Down force를 증가시킬 수 있는 개선안을 모색하여 “09년 차량” 뒷 날개에 적용하였다. Fig. 4에서 보듯이 뒷 날개가 3개 부품에서 2개 부품으로 감소하였으며, 각 날개의 공격각이 다소 증가함을 볼 수 있다. 이 형상 변

Table 4 Aerodynamic coefficients of the baseline vehicle (model year 08) and the modified vehicle(model year 09)

	Drag coefficient	Lift coefficient	Pitch moment coefficient
Model year 08	0.726	-0.817	-0.149
Model year 09	0.808	-1.004	-0.287

Table 5 Aerodynamic force distributions of the baseline vehicle (model year 08) and the modified vehicle (model year 09)

	Front wing	Diffuser	Rear wing	Total
Model year 08	-2976(N)	-4010(N)	-3516(N)	-10502(N)
	28.33%	38.18%	33.47%	100%
Model year 09	-2940(N)	-4392(N)	-4112(N)	-11444(N)
	25.69%	38.38%	35.93%	100%

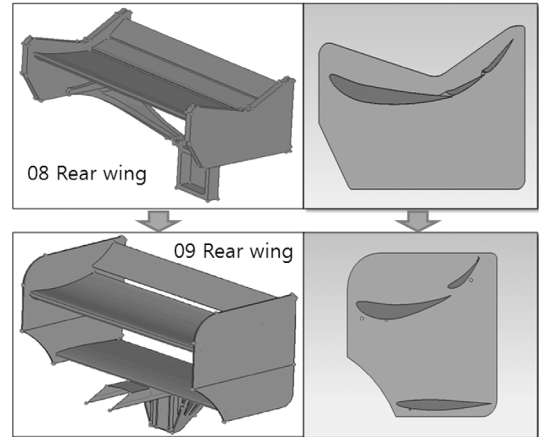


Fig. 4 Depicted figure of the rear wing sections of the baseline vehicle (model year 08) and the modified vehicle (model year 09)

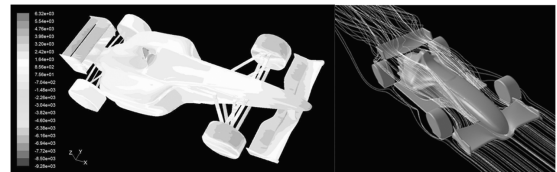


Fig. 5 Pressure distribution (left) and path lines around the vehicle (right)

화로 인한 다운포스가 900N 가량 증가한 것을 확인하였고, 노즈 업 방향의 모멘트가 90% 더 작용하는 것을 알 수 있다. 공기 저항은 약 11.2% 증가하였다. 경주용 차량 경우 downforce의 증가가 공기저항의

증가 보다 중요하다. 즉, 뒷날개에서의 Down force의 증대로 인한 조종 안정성 관점에서의 한계속도의 증가를 달성할 수 있었다. Fig. 5는 유동 해석 결과 나타난 표면의 압력 분포와 유동의 형상을 보여 준다.

2.3 타이어

PACE 차량은 전륜은 금호 Ecsta V710 285/30 R18, 후륜은 금호 Ecsta V710 315/35 R18을 사용하였다. 즉 전륜에서의 타이어의 편평비가 더 적은 것을 알 수 있다. 금호타이어가 제공한 타이어 슬립각대 횡방향의 타이어 힘의 실험 자료를 MATLAB의 locally weighted scatter smooth 루틴을 이용해서 보간하였다(Fig. 6 참조). 일반적 타이어의 횡방향 힘은 슬립각이 2~3° 정도일 때 최대값을 가지며 slip angle이 더 증가할 경우 선형으로 약간씩 감소하는

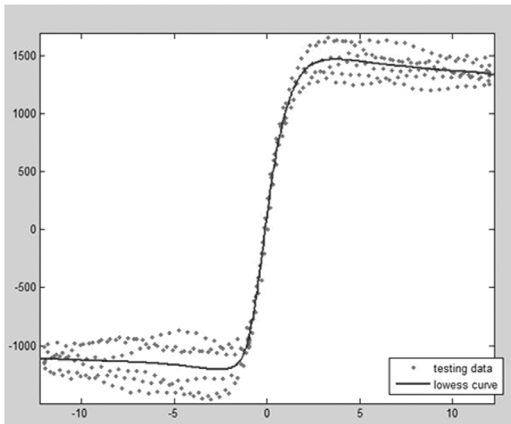


Fig. 6 Kumho Ecsta V710 285/30's lateral forces curve with respect to slip angle (0° camber, 100kg applied load)

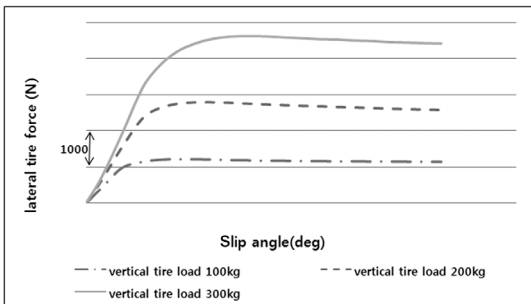


Fig. 7 Kumho Ecsta V710 285/30 R18: lateral force vs. slip angle

경향을 보이며 Fig. 6의 보정한 값도 유사한 경향을 보였다.⁵⁾ Fig. 7는 Carsim에 적용한 전륜에 장착된 금호 Ecsta V710 285/30 R18의 slip angle에 따른 lateral force을 한 예로써 나타내었다.

3. 기구학 특성 실험 및 전체차량 전산해석

3.1 현가장치 특성

지엠 대우의 Kinematic and Compliance 측정 기구를 이용하여 PACE 차량의 기구학적 특성을 파악하였다. Photo 1은 실제 차량이 Kinematic and Compliance 실험하는 모습이다.

Table 6는 Kinematic and Compliance 측정 실험을 통해 얻어진 값들을 나타내었다.



Photo 1 The kinematic test of the PACE vehicle

Table 6 Kinematic and Compliance characteristics of the PACE Vehicle

	Front	Rear
Ride rate (N/mm)	54.1	62.7
Toe (deg/m)	5.83	0.98
Camber (deg/m)	-5.69	-15.4
Roll center height (mm)	113	201
Tire rate (N/mm)	253	239

3.2 정상 상태 선회

3.2.1 해석 조건

반경이 일정한 원을 정상선회 하는데 필요한 조향각과 발생하는 차량의 횡가속도를 계산하여 PACE 차량의 부족조향 정도를 파악하였다. 선회반

경은 200m, 차량의 주행 속도는 10~190km/h (10km/h 간격으로 일정 속도주행)로 설정하여 Carsim 해석을 수행하였다.

3.2.2 해석 결과

“08년 차량”의 주행 안정의 한계속도는 180km/h로 나타났으며, 이 경우 발생한 횡가속도는 1.27G이다(Fig. 8 참조). 뒷날개의 단면 형상을 수정한 “09년 차량”의 경우 한계속도는 190km/h로 횡가속도는 1.41G로 증가하였다. 차량 후방에 다운 포스가 상대적으로 크게 작용하는 “09년 차량”의 부족조향 구배가 “08년 차량”에 비해 0.32 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

실제 Formula 1의 경우 200km/h 이상의 속도로 선회하면서 3G의 횡가속도에서 안전하게 선회를 할 수 있다. “PACE 09 차량”의 경우 일반 Formula 차량의 성능에 미치지 못 하여서, Carsim 내에서 차량의 전, 후 중량 배분을 4:6에서 5:5로 변경하는 경우 (Case 2) 전륜 타이어의 Conering Stiffness를 10% 증가시키는 경우(Case 3)를 제안하여 기존의 “09년 차량”의 성능(Case 1)과 비교하였다. Fig. 9에서 보듯이 차량이 반시계방향으로 선회하는 경우, 차량의 중량 배분을 기존의 40:60에서 50:50으로 변경하는 경우 왼쪽 타이어에서 발생하는 횡력이 증가하며, 이로 인한 차량의 한계속도가 기존의 190 km/h에서 200 km/h로 증가함을 확인하였다(Table 7 Case 1, Case 2 참조). 전륜 타이어의 Cornering Stiffness를 10% 증가시킨 경우는 Case1과 마찬가지로 임계속도가 190 km/h이었으며, 따라서 발생 횡력의 크기

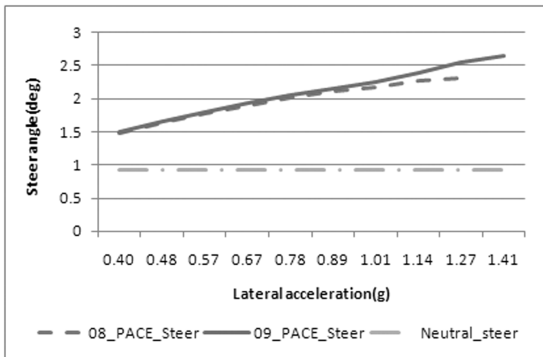


Fig. 8 Change of steering angle vs. lateral acceleration in case of a constant radius test

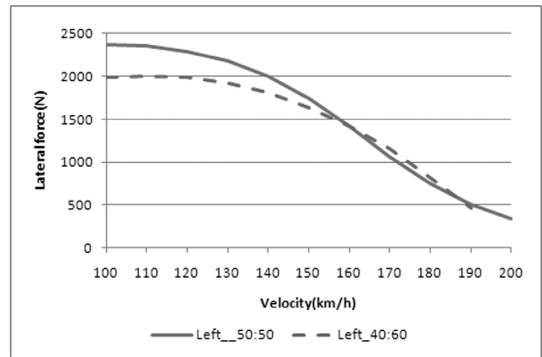


Fig. 9 Comparison of the lateral forces of the left side for 40:60 and 50:50 weight distribution cases

Table 7 Turning capability of three cases

	Critical speed (km/h)	Lateral acceleration (G)	Lateral force of the tires (N)
CASE1	190	1.41	11,876
CASE2	200	1.58	13,244
CASE3	190	1.41	11,876

기존의 09년 차량(Case 1)과 별다른 차이를 보이지 않았다.

3.3 이중 차선 변경

차량의 조종안정성을 검증하기 위한 또 다른 항목으로 “08년 차량”과 “09년 차량”에 대해서 이중 차선 변경 해석을 수행하였다. 이중 차선의 주어진 조건은 Cho 논문에서⁶⁾ 제안한 조건을 택하였으며 Fig. 10과 같은 형태의 트랙을 이용하였으며, 180km/h의 속도로 주행하는 경우 대상차량의 요율과 요구되는 스티어링 휠의 조향각을 비교하였다. Fig. 11에서 보듯이 요율의 경우 “09년 차량”이 “08년 차량”에 비해 평균적으로 10.12% 적게 발생하며, 두 번째 차선 변경에서도 서서히 반응함을 알 수 있다. Fig. 12와 같이 조향각의 경우 09년 차량의 평균 조향각이 5% 높게 관찰된다. 원인을 분석해 보면 일정한 선회 테스트에서 09년 차량이 08년 차량보다 부족조향 구배가 크기 때문에 선회에서 속도가 증가함에 따라 조향각은 횡가속도와 속도의 제곱에 비례적으로 증가한다. 부족조향의 경우 무게중심점에서의 횡가속도에 의해 후륜에서 보다 전륜으로 횡방향으로 미끄럼이 크게 발생한다. 따라서 선회반경을 유지

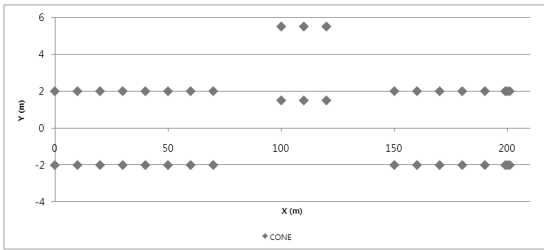


Fig. 10 The double lane change test track

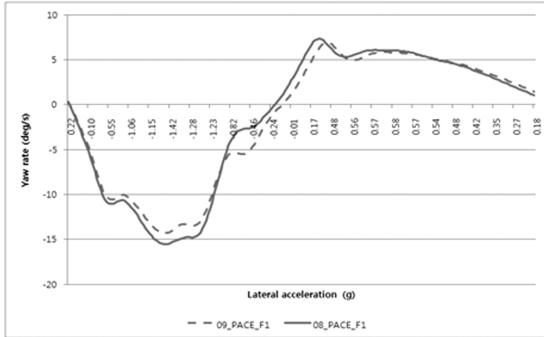


Fig. 11 Yaw rates of two vehicles by double lane change test

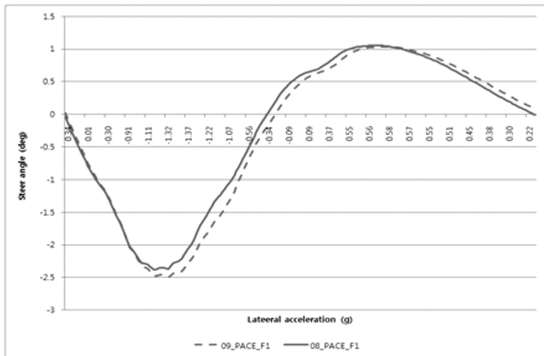


Fig. 12 Required steer angles of the two vehicles by double lane change test

하기 위해 전륜이 더 큰 각으로 조향되어야한다. 그러므로 부족조향 구배가 상대적으로 큰 09년 차량 경우에 조향각이 더 크게 나타난다.

3.4 실제 F1차량과 성능 비교

3.4.1 해석 조건

2009년 이탈리아 산탄데르에서 열린 F1 그랑프리트 트랙 정보를 CarSim에 적용하여 경기 당시 실제 차량 기록과 PACE F1 차량의 기록을 비교, 분석하

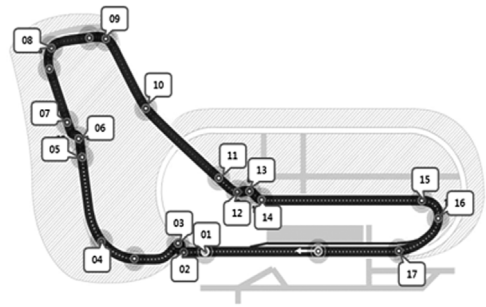


Fig. 13 Track shape & data acquisition point

였다. 두 차량의 랩타임과 Fig. 13의 트랙 형상에 표시된 특정 17개 지점에서의 속도와 횡가속도를 비교하였다.⁷⁾

3.4.2 결과

Fig. 14는 각 지점에서 실제차량과 09년 PACE 차량의 랩타임, 속도와 횡가속도를 비교한 결과이다. 실제경기에서 1위를 차지한 Rubens Barrichello의 기록은 트랙을 한 바퀴 완주하는데 86.45초가 소요되었고 09년 PACE 차량의 경우 154.88초가 소요되었다. 09년 PACE 차량은 횡가속도의 경우 실제 Rubens Barrichello의 기록에 평균 81.73%에 해당하는 횡가속도가 발생하였으며, 차량의 속도의 경우 평균 58.02%에 해당하는 속도를 유지하였으며 차량 속도가 이를 초과할 경우 코스를 벗어나는 불안정한 거동을 보였다.

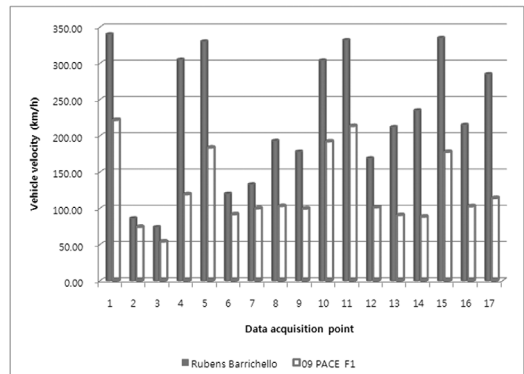


Fig. 14 Comparison of vehicle velocities

4. 결론

본 논문에서는 PACE 차량을 설계, 제작하면서

차량의 조종안정성을 증가시키기 위한 일련의 해석을 수행하였다. PACE F1 차량에 장착된 후방 날개와 바디의 형상에 따라 작용하는 공기역학 힘의 배분의 차이가 차량의 선회 안정성에 미치는 영향에 대해 예측하였다. Carsim을 이용한 정상상태 선회 전산 해석을 통해 전체 다운포스의 크기가 증가하며, 차량의 전방에 비해 후방에 공기역학 힘의 작용이 큰 “09년도 차량”의 경우 부족조향 특성이 크게 나타남을 계산하였고 이중 차선변경 해석을 수행하여 “09년도 차량”이 “08년 차량”에 비해 동일한 주행시 요율을 덜 받음으로써 차량의 조향안정성이 향상됨을 확인 하였다. 그러나 실제 F1 경기의 속도 기록을 기준으로 실제 F1 차량 대비 PACE 차량의 성능은 58% 정도임을 예측하였다.

후 기

본 연구는 GM대우 자동차의 협조와 2009년도 ‘대형 AWD용 더블카단구동축 및 휠허브모듈 개발’ 연구비의 지원, 2008년도 “홍익대학교 학술연구진흥비” 지원에 의하여 진행되었습니다. 도와주신 관계자에게 감사함을 표합니다.

References

- 1) http://www.pacepartners.org/files_pub/news_2009_issue.pdf
- 2) J. Katz and D. Garcia, “Aerodynamics Effects of Indy Car Components,” SAE 2002-01-3311, 2002.
- 3) S. Shin, “Wind Tunnel Test Report of the PACE Formula Vehicle,” PACE Interim Reports No. 2008-02, 2008.
- 4) C. Lee, Y. Kim and J. Ha, “Influence of CRFM Baffle on Front End Airflow and Aerodynamic Drag,” Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.744-750, 2009.
- 5) W. Milliken and D. Milliken, “Race Car Vehicle Dynamics,” SAE International, pp.473-487, 1995.
- 6) B. Cho and S. Song, “An Analysis of Vehicle Handling Characteristics with ADAMS,” Transactions of KSAE, Vol.4, No.5, pp.109-118, 1996.
- 7) http://www.formula1.com/races/in_detail/italy_818/circuit_diagram.html