

<기술논문>

Shell Eco-marathon을 위한 자작 자동차 경량화 연구

조 병 관^{*1)} · 전 성 민²⁾ · 이 대 권¹⁾ · 이 선 호¹⁾

한국기술교육대학교 기계공학부¹⁾ · 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과²⁾

The Study on Weight Reduction of Vehicle for Shell Eco-marathon

Byung-kwan Cho^{*1)} · Seong-min Jeon²⁾ · Dae-kwon Lee¹⁾ · Sun-ho Lee¹⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea

(Received 19 April 2016 / Revised 29 June 2016 / Accepted 4 July 2016)

Abstract : This paper sought to find a way to improve the fuel consumption rate of a vehicle for the Shell Eco-marathon Asia 2014, with a special focus on the correlation between vehicle dynamics, aerodynamics and chassis weight reduction. In ‘KUTY-Eco 1’ designed for SEM Asia 2014, a chassis made with an aluminum alloy tube, semi-monocoque structure and a pivot steering system were adopted to reduce weight and to secure better performance. The goals were achieved using computer-aided engineering(CAE) and parameter study. Finally, ‘KUTY-Eco 1’ was created, the lightest car in the competition’s prototype petrol(gasoline) type category. ‘KUTY-Eco 1’ secured the official record of 142.7 km/liter during the competition.

Key words : Fuel consumption(연비), Weight reduction(경량화), Design(설계), Semi-monocoque structure(세미 모노코크 구조), Pivot steering(제자리 회전 조향)

Nomenclature

- ABS : acrylonitrile butadiene styrene copolymer
- ASTM : American society for testing and materials
- CAD : computer aided design
- CAE : computer aided engineering
- C_D : drag coefficient
- FRP : glass fiber reinforced plastic
- R_a : air resistance, N
- ρ : density of air, kg/m³
- S : frontal area, m²
- SEM : shell eco-marathon
- v : vehicle speed, m/s²

1. 서 론

차량의 우수성을 나타내는 여러 지표 중 연비(燃費)는 화석연료 취득 기술의 지속적인 발전에도 불구하고 점점 중요한 지표로 부각되고 있다. 이에 자동차 산업 현장에서는 여러 가지 방법으로 연비를 향상시키기 위한 노력^{1,2)}이 진행되고 있으며, 자동차공학을 공부하는 학생들도 한번쯤 고민해 보아야 할 인자이다. 차량의 연비에 주목하여 매년 전 세계 대학생들을 대상으로 개최되는 대회가 바로 Shell Eco-marathon(SEM)이다.

SEM은 1939년 미국, Shell oil company 직원 간의 친선을 위해 진행된 차량 연비 경기로부터 시작되었으며, 현재는 여러 종류의 에너지원으로 차량을 최대한 오래 달리게 하는 차세대 엔지니어들의 기

*Corresponding author, E-mail: chobk@koreatech.ac.kr

술경연의 장으로 발전되었다. SEM은 아시아, 아메리카, 유럽의 세 개 대륙에 걸쳐서 대회를 진행하고 있으며, 아시아 대회는 매년 약 18개 국가, 140여 팀, 1500여명의 학생들이 참가하고 있다.

본 논문은 한국기술교육대학교 자작자동차 동아리 자.연.인(自研人)의 Shell Eco-marathon Asia 2014, Prototype / gasoline 부문 참가를 위해 진행한 연구내용 중 일부이다.

2. 프레임 설계

SEM에서 추구하는 목표는 최소의 연료로 가능한 최대로 멀리 이동하는 것이다. 위 목표의 실현을 위하여 대회 출전 차량인 ‘KUTY-Eco 1’의 설계 목표를 연비 150 km/ℓ, 총 공차중량을 40 kg로 정하였다. 따라서 설계 주안점을 모든 부품의 경량화로 정하고 연구를 진행하였다. 프레임 역시 경량화를 달성할 수 있도록 설계하였다.

2.1 프레임 소재 선정

KUTY-Eco 1의 프레임은 Fig. 1에서 보인 것처럼 높이는 낮고 길이는 길며, 부재를 최소화하여 경량화를 이루고자 하였기에 프레임을 구성하는 재료는 가벼운 동시에 강성이 높아야하며, 용접 접합이 용이하여야 한다. 따라서 Table 1³⁾과 같이 일반적으로 사용되는 기계구조용 탄소강관과 알루미늄 관의 재료 물성치, 경제성 등을 비교하여 프레임 재료를 선정하였다.

Table 1에 나타난 바와 같이 알루미늄합금 관은 기계구조용 탄소강관에 비해 밀도는 약 1/4에 불과하고, 강도의 차이는 거의 없다. 경량화라는 목표에

Table 1 The comparison of general pipe material property

Material	Density (Mg/m ³)	Yield strength tensile (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Price rate
Steel ASTM-A36	7.86	250	200	1
Steel ASTM-A242	7.86	345	200	1.5
Aluminum alloy 6061-T6	2.71	260	70	4

따라 단위 면적당 질량에서 이득을 얻을 수 있는 알루미늄을 사용하는 것이 적당하다.

강성 측면에서 알루미늄을 선택하면서 가지게 되는 불이익은 CAE를 통해 프레임 강성이 충분한지 확인하였다.

2.2 프레임 해석

KUTY-Eco 1의 프레임 형상 및 재질을 결정한 후, 구매할 수 있는 파이프의 외경과 두께에 따른 여러 CAD모델을 CATIA V5에서 작성하고, 구조해석을 통해 강성이 충분한지 확인하였다. 파이프는 Table 2에서 나타난 바와 같이 외경은 25 mm, 30 mm의 두 가지를 고려하였으며, 두께는 각 파이프에서 2 mm, 3 mm로 하여 총 4가지 경우를 고려하였다. 또한 각각의 CAD모델에 대한 질량 예상치를 도출하였다.

해석조건은 주행에 따른 사항을 배제하고 운전자를 포함한 차량 중량에 의한 정하중 70 kgf의 상태로 가정하였다. 그 결과는 Fig. 2, Table 2와 같다. 해석에 의한 결과를 Table 3과 같이 비교하여 보면 파이프의 외경이 상대적으로 큰 것이 강성 측면에서는 유리하며 파이프의 두께가 상대적으로 얇은 것이

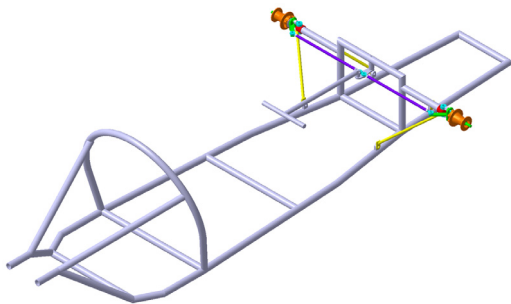


Fig. 1 SEM Asia 2014 : KUTY-Eco1 frame design

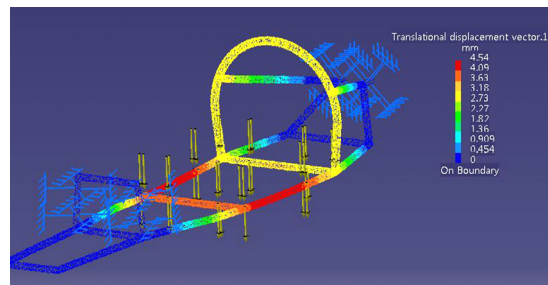


Fig. 2 KUTY-Eco1 frame analysis

Table 2 The results of finite element analysis and mass

Item	Diameter 25		Diameter 30	
	Thickness 2.0	Thickness 3.0	Thickness 2.0	Thickness 3.0
Deformation (mm)	4.54	3.77	2.89	2.26
Stress (MPa)	258.3	214.5	164.5	128.6
Mass (kg)	2.196	3.148	2.579	3.722

Table 3 Parameter study : deformation and mass evaluation

Item		Deformation	
		Advantage	Disadvantage
Mass	Advantage	Diameter 30 Thickness 2.0	Diameter 25 Thickness 2.0
	Disadvantage	Diameter 30 Thickness 3.0	Diameter 25 Thickness 3.0

질량이 가벼우므로 이 두 인자를 모두 만족한다 할 수 있는 외경 30 mm, 두께 2 mm의 파이프를 이용하여 프레임을 제작하였다.

또한 Table 1과 2를 비교하면 현재 프레임의 재료 항복강도에 대한 안전계수가 2로 충분히 안전하다고 할 수 없다. 따라서 해석 시 정하중 상태만을 고려한 것이 차량의 주행 중 동하중에 의한 처짐이나, 뒤틀림의 문제를 야기할 가능성이 있다는 점을 보완하기 위해 세미 모노코크 구조를 통한 하부 프레임 강성을 보강하고자 하였다.

3. 카울(Cowl) 설계

KUTY-Eco1 차량은 하부 사다리 형태 프레임을 설계하면서 앞서 언급한 동하중 등의 문제를 고려하지 않아 강성보강이 필요하였다. 하지만 차량의 경량화 및 운전자 공간 등의 사항을 고려하면 부재를 통한 강성보강은 한계가 있다. 이에 항공기에 사용되는 세미 모노코크 구조⁴⁾를 적용하여 여러 가지 문제를 동시에 해결하고자 하였다.

보통 모노코크(monocoque)는 바디(body)라는 단어와 함께 사용되어 차량의 외피와 몸체를 일체화한 구조를 뜻하며, 프레임리스 바디(frameless body) 등으로 부른다. 그러나 세미 모노코크는 트러스 구조와 모노코크 구조의 장점을 살려 내부 공간이 넓

을 뿐 아니라 큰 힘도 견딜 수 있으며 곡면처리도 가능하여 현대의 거의 모든 항공기는 세미 모노코크 구조로 이루어져있다.

이 구조의 단점은 제작에 있어 고가의 설비와 장비, 고도의 기술 등 부담이 되는 요소가 많다는 점이다. 따라서 카울은 재질 선정 및 외형 설계를 완료한 후 외주 제작 업체를 통해 제작하였다.

3.1 카울 소재 선정

카울의 소재를 선정함에 있어서도 2.1절의 프레임 소재 선정과 동일하게 상용되고 있는 소재를 고려하였다. 다만 다른 점은 카울 제작에 소요되는 최소비용이 프레임 제작의 약 100배인 점을 감안하여 제작비용 또한 주요한 설계인자가 되었다.

카울의 소재는 자동차 부품, 헬멧, 전기기기에 주로 사용되는 ABS 수지, 보트의 몸체나 가정용 욕조에 주로 사용되는 FRP, 이동통신장비의 외피, 스포츠용품에 주로 사용되는 폴리카보네이트를 고려하였다.

Table 4⁵⁾에서 알 수 있듯이 세미 모노코크 구조를 선택한 이유인 강성의 보강 측면에서 FRP를 선택하는 것이 유효함을 알 수 있다. 이는 밀도에서의 단점을 충분히 무시할 만한 값이라 할 수 있다. 또한 Table 5에서 나타내었듯이 제작비용면에서도 FRP가 상대적으로 우수하다.

Table 4 The comparison of general cowling material property

Material	Density (Mg/m ³)	Yield strength tensile (MPa)	Ultimate strength tensile (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
ABS (Impact grade)	1.00 ~ 3.50	28.0 ~ 93.1	24.0 ~ 138	1.40 ~ 2.80
FRP (C-glass fiber)	2.52 ~ 2.56	-	3310	68.9
Polycarbonate	1.14 ~ 1.41	61.0 ~ 74.0	57.0 ~ 117	2.14 ~ 2.45

Table 5 Parameter study : Manufacturing and cost evaluation

Item	ABS	FRP	Polycarbonate
Manufacturing level of difficulty	High	Medium	High
Price rate	3	1	1.5

3.2 형상 설계

SEM 참가차량은 Fig. 3에 명시된 대회 규정에 따라 4 m 반경의 반원 안에 30 도 간격으로 설치된 높이 60 cm에 위치한 물체를 확인할 수 있어야 한다. 따라서 카울의 형상도 이를 만족할 수 있도록 설계되어야 한다.

또한 공기에 의한 차량의 주행저항⁶⁾은 아래의 식 (1)과 같다. 이 중 설계에 의해 결정되는 인자는 C_D 와 S , 즉 항력계수와 전방 투영 면적이다.

$$R_a = C_D \frac{1}{2} \rho S v^2 \quad (1)$$

연비를 향상시키기 위해 위의 저항 또한 무시할 수 없다. 따라서 전방 투영 면적이 최소가 되도록 하는 것을 우선순위로 정하고 설계하였다. 그에 따른 카울 형상의 변화는 아래의 Fig. 4~6에 나타난 바와 같다. 형상 변화에는 앞서 말한 두 가지 요인 외에도 운전자 공간 확보 등의 인자도 함께 고려되었다.

카울의 형상이 변화함에 따라 그에 따른 항력계수 변화를 유동해석 프로그램을 통하여 도출하였다. 해석 경계조건은 차량이 대기($\rho = 1.185 \text{ kg/m}^3$) 중에서 $v = 45 \text{ km/h} (= 12.5 \text{ m/s})$ 로 주행하였을 때를 세 가지 형상에서 모두 동일하게 고려하였다. 이를 통해 전방 투영 면적 감소를 위해 진행된 형상 설계가 적절하였음을 확인하였다. Fig. 7은 유동 해석 결

과를 나타낸 것이다.

Table 6은 차량의 각 구상에 따른 설계 결과를 나타낸 것이다. 결과적으로 운전자 공간과 시야를 줄여 운전자 편의성은 떨어졌으나, 차량의 성능에 영

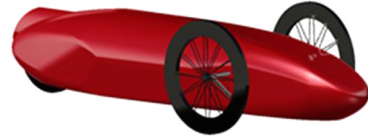


Fig. 4 The shape of cowl : First concept

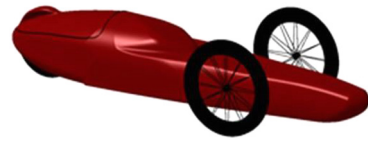


Fig. 5 The shape of cowl : Second concept

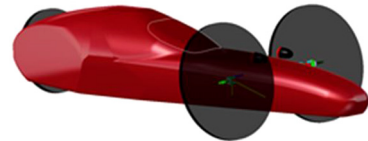


Fig. 6 The shape of cowl : Final concept

Table 6 Design result by each concept

Concept	Frontal area (m ²)	Inner volume (m ³)	Mass (kg)	Visibility (m)	C_D
First	4.705	0.551	7.05	5	0.178
Second	4.287	0.441	6.42	4.3	0.155
Final	3.647	0.356	5.47	4.1	0.134

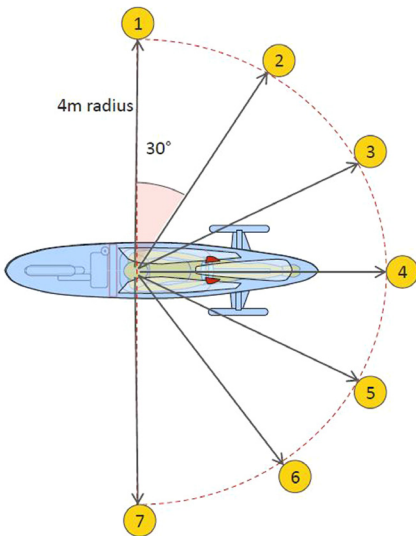


Fig. 3 SEM rule of visibility

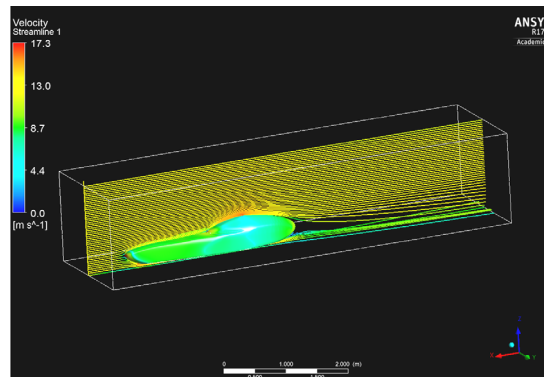


Fig. 7 The result of external flow analysis



Photo. 1 KUTY-Eco1 : Final cowl shape

향을 주는 전방 투영 면적과 무게, 항력계수의 측면에서 모두 이득을 얻을 수 있다고 판단하여 설계를 확정하였다. Photo. 1은 설계에 따라 제작된 최종 카울의 모습을 나타낸 사진이다.

4. 현가장치와 조향장치

4.1 현가장치

Fig. 1을 보면 KUTY-Eco 1 차량에는 현가장치가 장착될 어떠한 부재도 없다는 것을 알 수 있다. 이는 설계 목표인 11.2 km를 주어진 시간 내에 완주할 수 있는 속도인 45 km/h의 속도로 요철이 크지 않은 도로에서의 주행을 한다는 것을 고려하였을 때, 노면에서 오는 충격은 타이어를 통한 감쇠만으로도 충분하다고 판단하였기 때문이다. 또한 추가적인 감쇠장치를 장착할 경우 차량의 중량을 증가시키는 요인이 되기 때문에 이를 제거하였다. 또, 토우(toe) 각이나 캠버(camber)각 등을 구현할 경우 차량의 주행안정성을 확보할 수 있으나 각도에 따른 미끄러짐은 오히려 차량의 주행 저항으로 작용할 수도 있다. 또한 구동륜에 자전거용 휠과 타이어를 사용하였기에 횡방향의 힘에 매우 취약한 구조를 가지고 있다. 따라서 KUTY-Eco 1 차량의 타이어는 지면과 수직으로 접촉하며, 진행방향과 타이어는 평행하다. 조향 너클의 회전축 역시 지면과 수직이다. 다시 말하면 캐스터(caster)각 또한 0이다.

4.2 제자리 회전 조향장치⁷⁾

차량에서 가장 일반적으로 사용하는 조향장치는 Photo. 2에 나타난 랙-피니언 기어 열을 사용하는 기구이다.

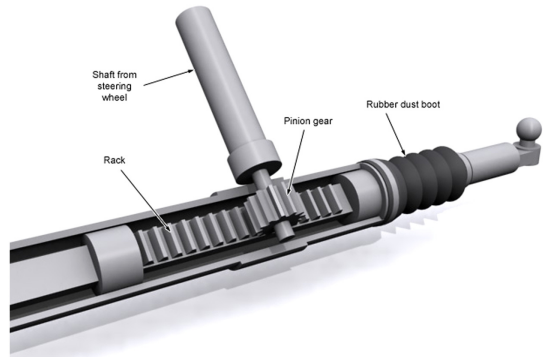


Photo. 2 Rack and pinion type steering system

랙- 피니언 조향장치는 운전자가 항상 사용하던 장치인 만큼 사용 친밀도가 높고 조작이 안정적이라는 장점이 있지만, 기어를 사용하는 장치이므로 무거우며, 랙이 움직일 공간이 필요하므로 부피를 차지한다는 단점이 있다. 따라서 차량의 경량화를 위해서는 가벼우면서도 부피를 크게 차지하지 않는 장치를 설계할 필요가 있었다.

이를 만족하는 장치가 제자리 회전 조향장치(pivot steering)이다. 이 장치의 구현을 위하여 최소 회전 반경과 윤거 등을 고려하였다.

이 부분에서도 SEM 규정에 요구하는 사항이 있었다.

1) 최소 회전 반경 8 m 이하

2) 타이어의 접지면 중심 간의 거리 50 cm 이상

따라서 위에 주어진 두 인자를 적용하여 설계를 진행하였다. 또한 차량이 저속 상태에서 주행할 것이라는 가정에서 애커먼 조향 기구를 구현하였다. 그 결과 최대 조향각 20°에서 최소 회전 반경은 4 m로, 윤거는 86 cm로 결정되었다. 3차원 상에서 이 CAD모델의 거동을 예측해본 결과 카울이나 기타 장치에 간섭 없이 차량 선회가 가능하였다. 이에 따라 조향장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 구성되었으며, 주요한 장치인 조향 너클과 피봇링크는 Fig. 8 ~ 9와 같다.

5. 결론

1) 차량 경량화에 따른 공차중량 목표 40 kg을 만족시켰으며, 이는 SEM Asia 2014 참가차량 중 최소였다.

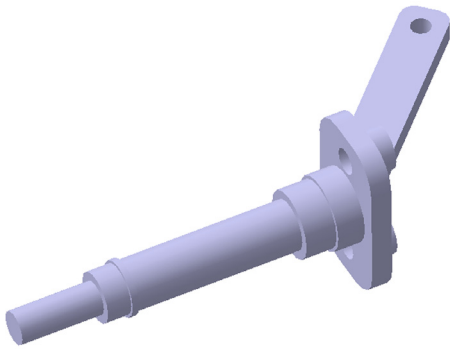


Fig. 8 Steering knuckle (bisymmetry)

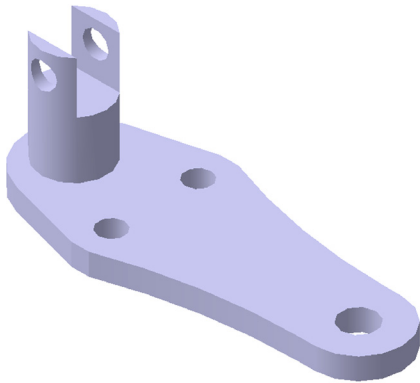


Fig. 9 Pivot link

2) 대회 중 규정에 따라 주행한 결과 11.2 km의 거리를 완주하여 142.7 km/ℓ의 공식기록을 얻었고, Shell Eco-marathon Asia 2014, prototype petrol (gasoline) 부문 참가 34팀 중 7위의 성적을 올렸다. 결론적으로 설계의 주안점인 경량화를 달성하기 위해 진행한 프레임 및 카울, 현가장치와 조향장치의 설계가 성공적으로 완료되어 목표로 한 공차중

량 40 kg을 달성하였으며, 목표 연비를 95 % 이상 달성하였다.

설정 목표에 따라 극단적인 경량화 설계를 했음에도 대회 중 차량 안전규정 검사를 통과하였으며, 여러 차례의 시험 주행과 대회 참가 이후에도 변형되거나 파손된 부분이 없음을 확인하였다.

References

- 1) S. Kwon, J. Lim, H. Lee and J. Lee, "Modification of Hybrid Vehicle and Its Effect on the Exhaust Emissions," Transactions of KSAE, Vol.23, No.5, pp.537-544, 2015.
- 2) J. Huh, J. Chung, Y. Jin, W. Kang and J. Chung, "Coordinated Control of EGR and VGT in the Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.16, No.4, pp.159-164, 2008.
- 3) A. C. Ugural, Mechanics of Materials 2nd Edn, John Wiley & Sons, New York, 2008.
- 4) C. Kim, "The Enhanced Bending and Torsional Rigidity Design of a Semi-Monocoque Structure with a Large Cut-Out," Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol.27, No.8, pp.50-56, 1999.
- 5) MatWeb, LLC. Material Property Data, <http://www.matweb.com>, 2016.
- 6) T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE International, Warrendale, p.97, 1992.
- 7) C. Kim, K. Lee and K. Woo, "A Study on the Pivot Steering Control of an In-Wheel Drive Vehicle with Trailing Arm Suspensions," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.29, No.7, pp.745-752, 2012.