

저가 입문용 1인승 레이스카 Tubular Space Frame의 비틀림 강성 최적설계

장운근^{1*}

¹영남이공대학교 기계계열

Optimal Design for Torsional Stiffness of the Tubular Space Frame of a Low-Cost Single Seat Race Car

Woongeun Jang^{1*}

¹Division of Mechanical Engineering Technology, Yeungnam University College

요약 일반적으로 고성능의 레이스카나 스포츠카 시장에서 차량의 프레임 설계는 매우 중요한 기술적 요소로 작용하고 있다. 차량의 비틀림 강성은 차량의 코너링 성능에 많은 영향을 주기 때문에 레이스 차량에 있어 우수한 성능의 프레임이라는 것은 높은 비틀림 강성을 가진다는 것을 뜻한다. 본 연구에서는 입문용 포뮬러 레이스카 프레임의 최적 비틀림 강성 설계를 위하여 다구찌 직교배열표를 가진 실험계획법과 유한요소 해석 기술을 이용하였다. 이러한 기법을 통해서 얻은 결과가 초기설계단계에서 보다 14.5%의 무게를 감량함과 동시에 무게 대비 비틀림 강성 10.7%의 개선 효과를 볼 수가 있었다. 따라서 본 연구에서는 직교배열표를 가지는 실험계획법을 이용한 구조해석이 설계 초기단계에서 저가형 레이스 차량에 사용되는 Tubular space frame 설계에 매우 유용함을 나타내고 있다.

Abstract Generally, the frame design of a vehicle is a critical technology that plays an important role in the racing and high performance sports car market. The high performance of race car frame means that it requires high torsional stiffness because it directly affects the cornering behavior of the race car. The optimal design for the frame of a low-cost single seat race car was carried out using the DOE (Design Of Experiments) with Taguchi's orthogonal array and FEM (Finite Element Method) analysis to secure sufficient torsional stiffness in this paper. According to the results by DOE and FEM analysis, the optimal design case produced improved 10.7% and 14.5% improvement in each stiffness-to-weight ratio and frame weight than in the early design step. Therefore, this paper shows that the optimal design with Taguchi's orthogonal array is very useful and effective for designing a tubular space frame of a low-cost single seat race car in the early design step.

Key Words : DOE(Design Of Experiments), Optimal design, Race car, Tubular space frame

1. 서론

1.1 연구의 배경과 목적

자동차 레이스(Car Racing)의 역사는 자동차기술의 역사와 함께 시작되었다고 해도 과언이 아니다. 20세기 초 부터 급속도로 진전된 자동차기술의 발전은 자동차

레이스라는 독특한 스포츠경기를 낳았고 이는 자동차 기술 발전의 견인차 역할을 하였다. 자동차의 여러 가지의 실험적이며 기술적인 도전들이 이를 통해 이루어지고 오늘날까지도 각 자동차 메이커들은 F1(Formula 1), 르망 24(Le mans 24), WRC(World Rally Championship)와 같은 세계적인 대회를 통해서 그들의 자동차 기술력과 브

*Corresponding Author : Woongeun Jang(Yeungnam University College.)

Tel: +82-53-650-9229 email: baja2000@ync.ac.kr

Received September 1, 2014

Revised September 24, 2014

Accepted October 10, 2014

랜드 인지도를 높이고 있다. 국내 자동차 경기도 최근 F1 개최를 하는 등 많은 진전을 보이고 있으나 여전히 상업적 성공과 기술적 진보성에 있어서는 여러 가지 한계점을 내포하고 있다. 최근 국내에서도 점차로 일반인과 아마추어 레이서들이 많이 생겨나고 있지만 이에 반해 경기용 차량에 대한 기술적 접근은 선진 자동차 기술강국들에 비해 매우 부족한 실정이며 자동차 기술과 문화에 대한 저변의 확대가 필요하다고 할 수가 있다. 이로 인해 프로레이스가 아닌 아마추어 레이스단계에서부터 차량을 직접 세팅하고 차량의 성능을 튜닝 할 수가 있는 입문용 레이스 차량의 필요성이 대두되고 있으며 외국의 경우처럼 F600, F1000급과 같은 레벌의 저가 입문용 레이스카 샤시(Race car chassis)의 개발이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 저가 입문용 포뮬러 레이스(Formula race car) 차량의 Tubular space frame을 개발하기 위해 양산 차량 등에 보편적으로 활용이 되고 있는 유한요소법을 활용하여 레이스 차량의 Tubular space frame을 최적화하기 위하여 다구찌 직교배열표(Taguchi's orthogonal array)를 이용한 실험계획법을 통해 차량의 코너링 성능에 영향을 미치는 프레임(Frame)의 비틀림강성(Torsional Stiffness)을 최적화 하고자 한다.

1.2 레이스 차량의 프레임

일반적으로 레이스 차량은 경기라는 특수한 목적을 달성하기 위해 설계된 차량으로써 일반 차량과는 달리 운전자의 승차감이나 운전 편의성 보다는 경기에서 우위를 점하기 위한 차량의 가속성능, 제동성능, 코너링성능 등과 같은 동적성능을 우선시 한다. 또한 경기 중 빈번하게 발생하는 충돌, 전복 등과 같은 안전사고 발생 시 운전자를 충분히 보호 할 수 있도록 프레임의 안전설계에 주안점을 두고 있다. 따라서 레이스 차량의 기술분야 중 프레임 설계 기술은 차량설계의 기초가 되는 것으로 레이스 차량의 안전, 차량의 주행 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다.

1900년대 초기 레이스 차량은 일반 차량과 큰 구분이 없었으며 대부분의 차량은 Ladder frame type을 사용했으며 레이스 차량의 큰 특징이라고 할 수 있는 프레임의 비틀림강성에는 매우 불리한 조건으로 인해 레이스 차량에는 적합하지 않았다. 1930년대에 일반화되기 시작한 독립현가식 시스템을 효과적으로 적용하기 위해서는 비틀림강성이 더욱 더 요구되면서 Ladder frame type의 프

레이스에 크로스 멤버를 설치하여 비틀림 강성을 보장하는 Twin tube frame이 등장하게 되었다. 그러나 굽힘강성과 비틀림 강성의 증대 대비 과도한 크로스 멤버의 무게로 인한 불리한 점이 더 많았으므로 이러한 약점을 보완할 필요가 있었다. 2차 대전 후 차량 기술의 비약적인 발전은 자동차 레이스 시장의 활력을 불리일으키면서 점점 차량프레임의 기술경쟁이 가속화되었고 50, 60년대 레이스 차량 설계자들이 차량의 비틀림 강성의 중요성을 점차로 더 인식을 하게 되면서 Tubular space frame이 등장하게 되었다. 이는 초기 항공기 기체에서 시작되었으나 급속히 레이스 차량 프레임 기술에 적용이 되었다. 여러 개의 파이프 부재들이 트러스 형태로 결합되어보다 높은 강성을 가지게 되었으며 이로 인하여 레이스 차량들은 더 가벼워지고 더 빨라졌으며 코너링 성능 또한 한층 향상되었다. 오늘날에는 Tubular space frame이 중저가 레이스 차량에 널리 사용이 되면서 레이스 차량 프레임에 주도적인 역할을 하고 있다. 이후로 더욱 더 비약적인 발전을 하게 된 레이스 차량의 프레임 기술은 1967년 알루미늄 모노코크를 사용한 MK 4 Ford GT40가 르망에서 우승을 하면서 알루미늄 모노코크가 1970년대 F1 등에서 주종을 이루기도 하였으며 1981년 John Bernard가 MP4 McLaren에 최초로 F1차량에 풀카본 파이버 프레임을 적용하여 오늘날 F1, Indy car와 같은 상급의 프로레이스 차량에는 이러한 복합소재 모노코크 형태가 주종을 이루게 되었다[1].

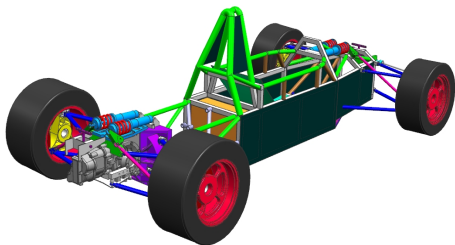
일반적으로 차량의 프레임은 굽힘강성과 비틀림강성 그리고 충돌강성이 중요한데 특히 레이스 차량의 경우는 코너링 성능의 극대화를 위해 프레임의 비틀림 강성이 매우 중요한 설계 요소로 작용을 하고 있다. 충분한 강성을 지닌 차량이 더 민첩한 기동이 가능하고 코너에 진입할 시에 횡방향 하중 이동이 증가하면서 운전자는 차량이 하중이동과 같은 비율로 차량이 롤링 한다는 것을 예측 할 수가 있지만 충분한 강성이 없으면 예측이 불가능하여 운전자는 조종안정성을 상실 할 수도 있다[2]. 이러한 관점에서 레이스 차량의 설계분야에서 연구가 진행이 되었는데 Lonny L. Thompson 등은 미국의 대표적인 NASCAR(National Association for Stock Car Auto Racing) Winston cup 차량 프레임의 비틀림강성 설계를 위해 유한요소법을 활용하였고[3], Andrew Deakin 등은 레이스 차량의 핸들링 특성과 프레임의 강성에 대한 연구를 통해서 프레임의 비틀림 강성이 코너링 특성에 미

치는 영향에 대한 연구를 통하여 차량의 Tubular space frame의 비틀림 강성의 중요성을 언급하였다[4]. 오늘날 중저가 레이스 차량에 사용되고 있는 Tubular space frame은 복합소재 모노코크, 알루미늄 모노코크 프레임에 비하여 제작이 용이하며 가격이 저렴할 뿐 더러 여러 가지 경기단체의 규정을 만족시키기 위해서 개조가 상대적으로 쉽고 경기 중 사고로 인한 수리가 부분적으로 이루어 질수가 있는 장점을 가지고 있다[1]. 그러나 이러한 장점을 극대화 하여 경쟁력 있는 프레임을 개발하기 위해서는 여러 개의 부재들이 최적의 기하학적 위치와 물리적 물성치를 만족 할 수 있는 방안이 강구되어야만 하는데 즉 차량의 가속성능을 고려하여 무게대비 비틀림 강성비 인 S/W ratio (Stiffness-to-weight ratio)의 최적화가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법과 실험계획법을 활용하여 S/W ratio를 극대화 하고자 한다.

2. 실험계획법의 적용과 해석

2.1 프레임 설계와 해석

우선 대상 차량은 NX6.0 3D CAD를 이용하여 설계하였고 프레임의 기본구조는 SCCA(Sports Car Club of America), MSA(Motor Sports Association)의 프레임설계 규정에 준용하여 설계되었다. 프레임은 구조용 인발 강관으로 설계되었도 프레임의 상하 좌우의 플레이트는 강관에 용접 및 리벳팅으로 결합되어 고정되어 있다. 프레임은 일반적으로 3차원 벤딩 및 3차원 파이프 면취 가공의 3차원가공을 가능한 배제하고 제작기간을 대폭 단축하여 프레임의 제작비용을 줄이고자 하였다. Fig. 1은 차량의 전체 Chassis의 3D modeling이며 Fig. 2는 초기 프레임의 3D modeling을 각각 나타내고 있다.

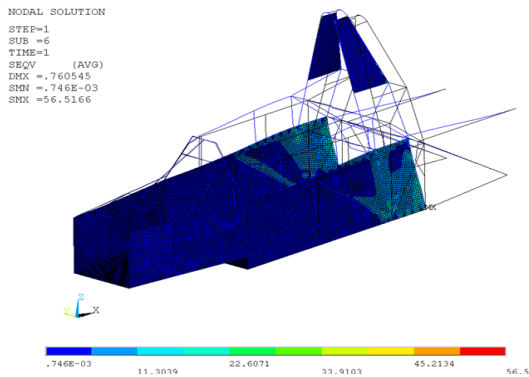


[Fig. 1] Chassis modeling of Single seat race car



[Fig. 2] Initial 3D Modeling Feature of Frame Design

특히 입문용 차량이라 할지라도 아마추어 스포츠클럽이나 지역에 따라 차이는 있으나 레이스의 특성 상 차량의 안전과 차량 제원에 대한 규정은 매우 중요한 사항이다. 우선 차량의 프레임은 제품이 운용 될 레이스 경기의 주관처에서 제시하는 설계기준을 만족하는 기본 설계가 진행이 되는데, 본 연구 차량은 국내에서는 차체 제작을 위한 구체적인 규정안이 마련되어있지 않아 해외관련 규정들을 준용하여 차량프레임의 초기 설계가 진행이 되었다. 따라서 차량 설계를 위한 기본적인 프레임에 대한 규정은 SCCA규정과 중급 레이스 차량에 대한 규정인 영국의 MSA의 Formula Ford Championship Technical 규정을 참고하여 기본 설계가 이루어졌다[9]. 규정에 따르면 차량의 프레임은 Tubular steel construction 만을 허용하고 복합소재의 사용은 금지하고 있다. Roll cage의 규정은 안전과 직결되므로 프레임의 재질은 Cold drawn seamless pipe로 제작이 되어야하며 Roll Cage Dimension는 42.4mm diameter에 2.6mm의 wall thickness를 가져야 하며 Roll Cage는 차량무게 600kg 기준에 1.5g Lateral, 5.5g Fore and aft, 7.5g Vertical 하중에 각각 견뎌야 한다고 규정하고 있다[10]. 따라서 Roll cage에 대한 기본적인 규정을 만족시키기 위하여 각각의 해석을 실시하였고 그 중 가장 극악조건인 Vertical 하중에 대한 해석 결과에서 최대응력값이 56.5Mpa로 규정을 만족시키고 있는 것을 확인 할 수가 있다. 그 결과는 Fig. 3에 나타나고 있으며 기본 Roll cage 부재에 대한 차량의 기본 설계가 되면 차량 프레임의 구조를 최적화하기 위한 최적 설계가 이루어져야 한다.

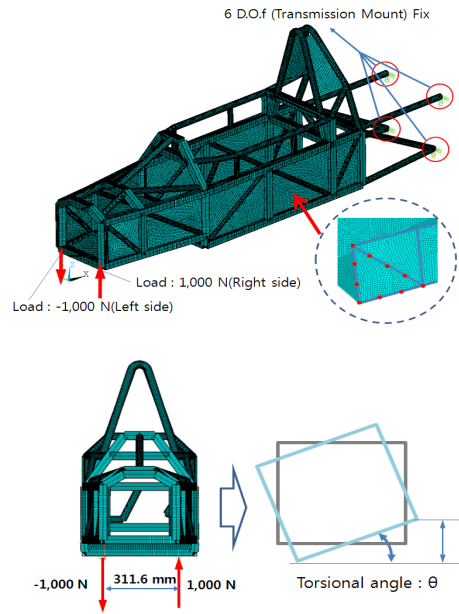


[Fig. 3] FEM Analysis Result of Roll Cage : Stress of Lateral force case

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 프레임의 비틀림 강성을 해석하였다. 유한요소 모델링에서 프레임을 구성하는 각각의 파이프 부재들은 Beam요소(Beam 181 : 3D-2Node Structural beam element)로 차량 좌우 하면의 Plate는 Shell 요소(Shell 181:Structural shell element)로 모델링 하였다. Beam 요소와 Shell 요소의 연결은 실차에서의 리벳 체결을 고려하여 체결부위에서만 Node를 공유하여 구현하였다. 비틀림강성을 구하기 위하여 경계조건은 프레임의 후미 부의 엔진과 변속기가 장착되는 마운트 지점을 고정하고 프레임의 전방 끝 지점에 일정한 하중을 주어 이 하중으로 계산된 Moment값과 해석으로 구한 비틀림각도를 기준으로 단위각도 당 비틀림 모멘트를 계산하여 비틀림강성을 산출하였다. Fig. 4는 프레임의 유한요소모델링과 비틀림강성을 구하기 위한 경계조건을 나타내고 있으며 ANSYS를 이용하여 유한요소해석을 실시하였다. 각 부재에 대한 물성치는 Table 1에 각각 나타내고 있다.

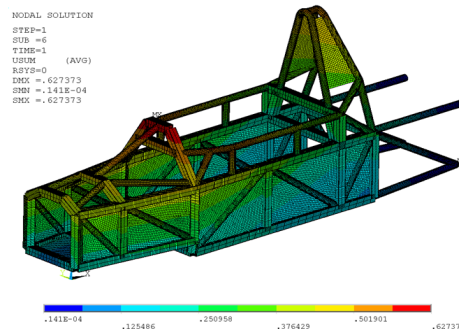
[Table 1] Material Properties of Frame pipes

Mechanical Properties	Frame	Plate
Density	7.87 g/cc	7.872 g/cc
Tensile Strength, Ultimate	440 MPa	358 MPa
Tensile Strength, Yield	370 MPa	240 MPa
Modulus of Elasticity	205 GPa	200 GPa
Poisson's Ratio	0.29	0.29



[Fig. 4] FEM Boundary Condition

해석을 통해 산출된 비틀림강성은 프레임의 무게로 나누어 무게 대비 비틀림 강성 즉 S/W ratio (Stiffness-to-weight ratio)를 실험계획법의 특성치로 정하였다. 우선 프레임의 초기모델을 동일한 경계조건으로 해석한 결과 비틀림각도(Torsional Angle)는 0.076deg가 나왔으며 계산된 비틀림강성(Torsional Stiffness)은 4097.242 Nmm/deg이며 프레임 무게 당 비틀림강성비인 S/W ratio로 환산해보면 38.436의 특성치를 나타낸다. Fig. 5은 초기모델의 해석결과이다.



[Fig. 5] Torsional stiffness analysis result of initial model

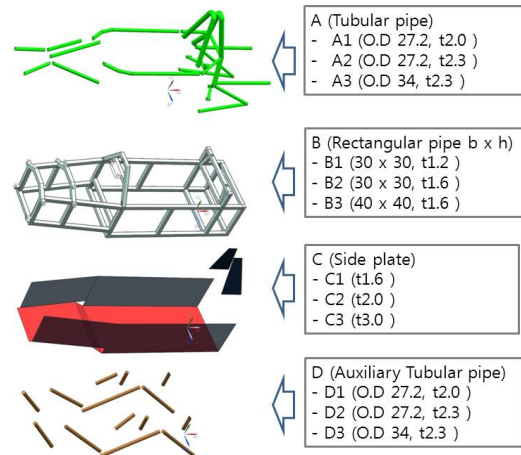
2.2 실험계획법의 적용

본 연구에서는 저가 입문용 레이스 차량에 주로 사용되는 Tubular space frame의 비틀림 강성을 최적화 하기 위하여 실험계획법을 사용하고자 한다. Tubular space frame과 같이 여러 개의 부재가 입체적인 형태로 결합된 프레임은 수학모델을 이용하여 최적화를 할 경우에는 복잡한 구조로 인해 수학적인 모델을 구축하는 것이 시간과 비용 측면에서 매우 불리 할 뿐만 아니라 설계자의 전문성이 많이 요구 된다. 따라서 이러한 저가의 입문용 차량프레임을 개발하고자 할 때에는 차량설계기간 및 제작비용에 따른 많은 제약들이 있으므로 설계자가 설계초기에 설계변수에 대한 민감도를 쉽게 파악하기 위해서는 실험계획법과 유한요소법을 이용한 전산실험이 시간과 비용 면에서 훨씬 유리 하다고 할 수가 있다. 이러한 실험계획법은 일반적인 실험분야뿐만 아니라 다양한 설계분야에서도 Trial&Error의 반복적인 방법보다는 최적해를 찾아가는 데에 보다 더 효과적으로 이용 될 수가 있어 개발모델단계에서 매우 널리 활용이 되고 있다[5]. 특히 각 열이 직교가 되게 미리 만들어 놓은 직교배열표 (Table of orthogonal arrays)는 어떤 수준에 대해서나 다른 열의 전체 수준이 같은 횟수씩 나타나도록 구성되어 있어 최적조건에 대한 평가와 함께 실험의 크기를 줄일 수 있는 장점으로 인하여 인자가 많은 시에도 일반요인배치법에 비해서 적은 수의 실험으로 많은 효과를 찾을 수가 있어 널리 활용되고 있으며[6], 직교배열표를 이용한 실험계획법을 통해 일반차량 및 레이스 차량의 부품들에 대한 최적화에도 효율적으로 이용 되었다[7,8]. 본 연구에 적용된 Tubular space frame의 복잡한 부재들을 4인자 3수준으로 실험설계에 적용을 할 경우 기존의 완전요인실험배치법(Full factorial design)으로는 전체 실험 조합수가 3⁴개로 81번의 구조해석을 수행해야 하지만 L₉(3⁴)직교배열표를 사용하면 총 9번의 구조해석실험으로 실험 횟수를 대폭적으로 줄일 수가 있는 이점이 있어 개발 비용과 납기에 매우 유리하다고 할 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 직교배열법을 이용하여 기존의 설계자가 초기 설계한 레이스 차량의 프레임을 기준으로 각 부재들을 각각의 수준에 따라 나누고 민감도를 분석하여 비틀림강성을 최적화 하고자 한다. 최적화를 위한 실험 계획법을 적용하기 위하여 설계여건과 제조여건을 고려하여 프레임 설계의 인자와 수준을 Table 2와 같이 선정하여 다구찌 직교배열표를 구성하였고 Fig. 6은 선정된

각각의 인자들과 수준들을 나타내고 있다.

[Table 2] Levels of Factors for L9(34)

Factor \ level	A	B	C	D
1	A1	B1	C1	D1
2	A2	B2	C2	D2
3	A3	B3	C3	D3



[Fig. 6] Selection of Design Factors

본 실험에서 사용된 인자들과 그 수준에 따라 프레임의 특성치인 S/W ratio에 대한 인자들의 최적조합을 구하고자 하였다. 본 실험에서는 다구찌 직교배열법의 신호대 잡음비인 S/N비를 이용하여 각각의 설계인자의 특성치인 S/W ratio 값에 미치는 영향을 분석하였는데, 이 차식으로 주어지는 품질손실함수로부터 구해진 값인 이 S/N비는 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도이므로 본 연구에서는 프레임의 중량대비 비틀림강성이 클수록 좋은 망대특성(larger-the-better type)을 사용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 비틀림강성과 프레임의 중량비 인 S/W ratio(Stiffness-to-weight ratio)가 높을수록 좋은 것이므로 망대특성으로 신호대 잡음비 인 S/N비를 계산하였고 각 수준별 평균을 구하여 인자들의 최적수준 조

합을 구하였다. Table 3은 직교배열표에 따른 구조해석 실험의 특성치 결과이다,

[Table 3] Result of Analysis Using FEM and Taguchi Orthogonal Array $L_9(3^4)$

Exp.	A	B	C	D	S/W ratio
1	1	1	1	1	26.323
2	1	2	2	2	25.724
3	1	3	3	3	28.981
4	2	1	2	3	25.957
5	2	2	3	1	24.688
6	2	3	1	2	34.076
7	3	1	3	2	30.281
8	3	2	1	3	35.270
9	3	3	2	1	41.781

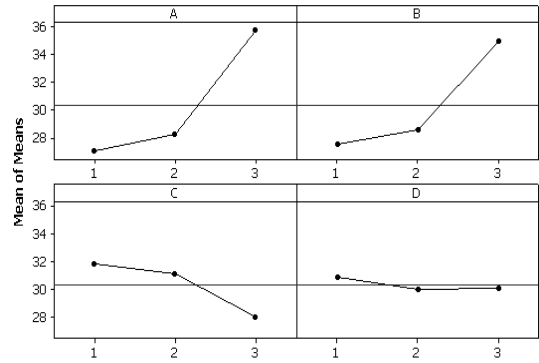
직교배열표에 의해 구해진 특성치가 프레임 설계변수의 수준수에 대한 해석실험치의 영향을 분석하기 위해서 평균분석(Analysis of mean, ANOM)과 S/N비를 각각 계산하였다. 그 각각의 중량대비 비틀림강성 특성치에 대한 분석의 결과를 Table 4와 Table 5에 각각 나타내고 있다. Fig. 7, Fig. 8은 각각의 실험결과와 특성치로부터 평균분석값과 설계인자들의 각 수준별 S/N비를 나타내고 있다.

[Table 4] S/N(Signal to Noise)ratio

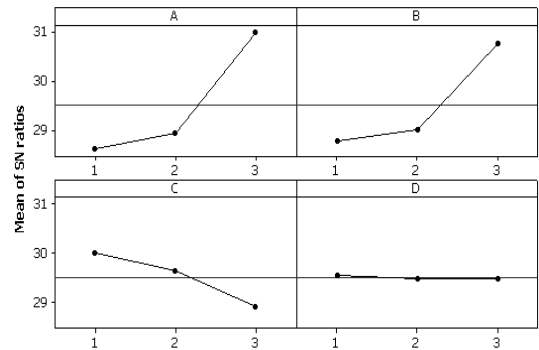
Level	A	B	C	D
1	28.62	28.77	30.00	29.56
2	28.93	29.00	29.64	29.49
3	31.00	30.77	28.91	29.49
Delta	2.38	2.00	1.10	0.07
Rank	1	2	3	4

[Table 5] ANOM of S/W ratio(Stiffness-to-weight ratio)

Level	A	B	C	D
1	27.01	27.52	31.89	0.93
2	28.24	28.56	31.15	30.03
3	35.78	34.95	27.98	30.07
Delta	8.77	7.43	3.91	0.90
Rank	1	2	3	4



[Fig. 7] Main Effect for S/W ratio Means



[Fig. 8] S/N ratio for S/W ratio

본 실험에서 Fig. 7에서 처럼 신호대 잡음비인 S/N비를 기준으로 각각의 인자들에 대한 민감도를 분석한 결과 A3, B3, C1, D1의 수준들이 가장 민감도가 높았으며 이 조합을 최적조합으로 선정하여 실제 그래프를 통한 확인 이외에 정량적인 유의차를 확인하기 위해서 S/N비에 대한 분산분석을 실시하였다. 비틀림 강성 특성치인 S/W ratio 특성치의 신호 대 잡음비인 S/N비에 대한 1차 분산분석을 실시한 결과 효과를 무시할 수 있을 정도로 변동이 작은 인자인 D인자를 오차항으로 풀링하여 2차 분산분석을 실시하였고 그 결과 A, B, C, 인자 각각 0.001, 0.001, 0.005로 모두 0.05보다 작은 P값을 나타내므로 유의한 인자로 파악 할 수 가 있었다. 그 분석 결과를 Table 6에 나타내고 있다.

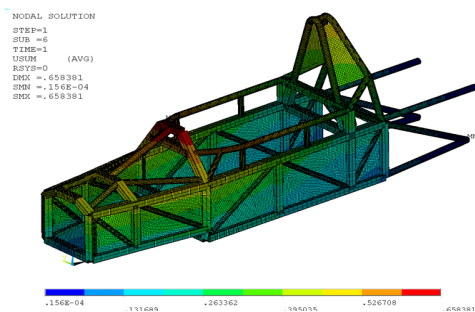
[Table 6] 2nd ANOVA Table

	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
A	2	10.0339	5.0169	1143.38	0.001
B	2	7.1754	3.5877	817.65	0.001
C	2	1.8669	0.9350	213.08	0.005
Error	2	0.0088	0.0044		
Total	8	19.088			

따라서 A3,B3,C1,D1로 최적수준 조합으로 선정을 하였다. 여기에서 D인자는 실제 무게 감량을 고려한 현실적인 상황에서 판단하여 D1수준으로 결정하였다. 이 조합으로 유한요소해석을 수행한 결과 비틀림강성은 3921.91Nmm/deg이며 프레임 무게 당 비틀림강성비 인 S/W ratio로 환산해보면 43.04의 특성치를 나타내므로 기존 초기모델의 S/W ratio 인 38.43과 비교해보면 약 10.7%의 개선 효과가 있었다. 또한 프레임의 무게로만 비교해 볼 때에도 초기 모델 프레임 무게인 106.6kg는 가속성능에 불리한 조건이거나 개선된 프레임의 무게는 91.1kg으로 비틀림강성을 크게 손해 보지 않는 범위에서 초기 프레임 무게 보다 14.5% 경량화의 효과를 볼 수가 있었다. Fig. 9는 최적수준 조합모델의 해석결과이다.

[Table 7] Comparison of Results

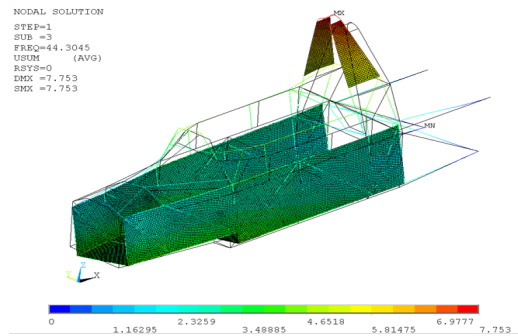
Result	Initial Design	Optimal Design
Factors	A3,B3,C3,D3	A3,B3,C1,D1
Torsional Stiffness(Nmm/deg)	4097.24	3921.91
Frame Weight(kg)	106.6	91.10
S/W ratio	38.43	43.04



[Fig. 9] Result of Optimal case analysis

또한 초기모델에 대한 해석 결과와 다구찌모델에서 얻은 예측 결과를 비교해보면 특성치값 인 S/W ratio가 37.749이 나오며 이는 해석값과 약 1.78%의 근사한 오차를 가지고 있으므로 이 실험계획모델이 타당하다고 볼 수가 있다. 또한 이를 근거로 최적의 조합인 A3,B3,C1,D1의 최적수준 조합을 통한 유한요소해석 결과치인 43.04와 다구찌모델 예측치로 얻은 결과값 42.516와 비교해보면 1.24%의 오차수준을 가지고 있어 본 실험계획모델이 타당성을 가진다고 할 수가 있다.

두 가지의 모델을 모달해석(Modal analysis)을 통해서 강성을 검증해본 결과 초기모델의 3rd mode (Torsional mode)값인 41.25Hz 대비 최적화 모델의 3rd Mode (Torsional mode)값은 44.3 Hz로 초기 대비 7%의 개선을 나타내고 있어 초기모델과 최적모델 간의 개선이 비틀림 강성과 동일한 개선 경향성을 나타내고 있어 비틀림 강성에 대해 타당한 최적설계가 이루어졌음을 뒷받침하고 있다. Fig. 10은 최적조건외의 모달해석 결과를 나타내고 있다.



[Fig. 10] Optimal case result

4. 결론

본 연구에서는 저가 입문용 1인승 레이스카(Single seat formula race car)의 Tubular space frame의 비틀림 강성을 확보하기 위하여 실험계획법 중의 하나인 직교배열법과 유한요소법을 이용하여 최적화를 수행 한 후 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

- (1) 유한요소법과 직교배열법을 이용하여 프레임의 S/W ratio(Stiffness-to-weight ratio)의 최적화를

수행하여 초기설계 프레임의 S/W ratio 값인 38.43대비 최적화 값은 43.04로 약 10.7%의 개선 효과가 있었으며 프레임의 무게로만 비교해 볼 때에도 강성이 크게 떨어지지 않으면서 초기 프레임 모델 무게 보다 14.5% 경량화 할 수 가 있어 가속 성능에 유리한 조건을 확보 할 수가 있었다.

- (2) 레이스차량의 코너링 성능에 영향을 미치는 프레임의 비틀림 강성을 확보하기 위하여 직교배열법을 이용하여 프레임의 무게대비 비틀림 강성의 특성치인 S/W ratio를 최적화 할 수가 있었다. 특히 직교배열법을 이용하여 실험횟수를 줄일 수가 있었으며 이로 인해 개발 비용과 시간을 최소화함과 동시에 경제적 효율성이 요구되는 입문자용 레이스 차량의 Tubular space frame의 최적화에 직교배열표를 이용한 실험계획기법이 효과적으로 활용 될 수가 있었다.
- (3) 이러한 직교배열표를 이용한 실험계획법은 CAE(Computer Aided Engineering)기법은 향후 레이스 차량의 현가장치 설계, 코너링, 제동성능 등을 최적화하기 위해서 많은 변수를 고려해야 하는 레이스차량의 주행성능 최적화에도 다물체 동역학 해석모델과 함께 효과적으로 활용이 될 수가 있으리라 사료된다.

References

- [1] Simin Mcbeath, *Competition Car preparation a Practical Handbook*. p.41-58, Hynes Publishing, 1999.
- [2] Forbes Aird, *Race car Chassis Design and Construction*. p.47-50, Motorbooks international, 1997.
- [3] Lonny L. Thompson, Srikanth Raju and E. Harry Law, "Design of a Winston Cup Chassis for Torsional Stiffness", *Motorsports Engineering Conference Proc., Vol.1:Vehicle Design and Safety Issues*, pp.125-140, 1998.
- [4] Andrew Deakin, David Crolla, Juan Pablo and Ray Hanley, "The Effect of Chassis Stiffness on Race Car Handling Balance", *Racing Chassis and Suspension Design, PT-90*, pp.107-113, SAE International 2000.
- [5] Jun-Yeol Oh and Yong-Jeong Huh, "A Study on Optimization of Injection-molded System Using CAE and Design of Experiment", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 7, No. 3 pp. 271-277, 2006.

- [6] Sangbok Ree, *Taguchi Method Using Minitab*. p.37, Eretec, 2006.
- [7] Wookang Cho, Jaesung Lee, Mungho Sin, Dongjea Lee, "Optimal Design for Variable Roll Rate Torsion Beam Using Design of Experiment", *Proc. of KSME Annual Spring conference*, Vol. II, pp.1169-1174, April, 2006.
- [8] Woon Geun Jang, "Optimal Design of the Front Upright of Formula Race Car Using Taguchi's Orthogonal Array", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* Vol.22, No.1, pp.112-118, February, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.1.112>
- [9] General Competition Rules 9.1.1., Formula Category, 2013 Edition, p.245-356, SCCA, 2013.
- [10] Ford Motor Company, 2012 Technical Regulations, Formula Ford 1800 Zetec Version:01, p.3, Ford Motor Company, 1st January 2012.

장운근(Woongeun Jang)

[정회원]



- 2001년 2월 : 영남대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 8월 : 경북대학교 교육대학원 기술교육과 (교육학석사)
- 2013년 2월 : 영남대학교 일반대학원 기계공학과 (박사수료)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계계열

<관심분야>

최적설계, 차량동역학, 공학교육