

품질공학을 이용한 트레드 패턴 인자의 최적설계*

전태준** · 김수동** · 박성호**

Optimal Design of Tire Tread Pattern Using Quality Engineering

Tae-Joon Jeon · Soo-Dong Kim · Sung-Ho Park

〈abstract〉

The tread pattern of tire is represented by a great number of design factors, such as groove breadth of circumference direction, breadth direction, rib breadth, block length, kerfs, tread breadth and tread radius, etc. It is not efficient in time and cost to analyze the rolling resistance for a great number of real tread pattern, because It requires lots of pattern forming handworks. In order to optimize tread pattern for rolling resistance, the experiment is planed and analyzed by Taguchi's robust design methods.

We identified the impotant design factors for Rolling Resistance, determined the optimal condition and calculated prediction value which is related. Using the experiment data and the analyzed data, we developed the program which could predict Rolling Resistance. It is expected that time and cost may be reduced in designing and developing new tire tread pattern.

1. 서론

자동차 타이어의 트레드 패턴은 원주방향 및 폭방향의 Groove 폭, Rib 폭, Block 길이, Kerfs, 트레드 폭, 트레드 반경 등 다수의 설계인자로 표현된다[4-9]. 다수의 트레드 패턴 인자에 대해서 Rolling Resistance를 분석하는 것은 많은 패턴 성형 수작업을 요구하므로 시간과 경비면에서 비효율적이다[4].

다구찌 기법을 사용하면 실험횟수를 극소화시킴으로써 실험경비가 절감되고 개발기간이 단축될 뿐 아니라 재현성이 높아 실험 분석결과와 신뢰도가 향상되고 제품화 과정에 적용이 용이하다[2, 3].

본 연구의 목적은 다구찌 로버스트 설계기법을 적용하여 타이어의 트레드 패턴을 최적화함으로써 Rolling Resistance를 향상시키는 것이다.

다구찌 기법을 적용하기 위해서는 설계인자들의 상호관계와 Rolling Resistance와의 관계를 분석하여, 인자간의 교호작용을 제거하여야 하며, 인자의 수를 최소화하여야 한다[3]. 다차원 설계인자의 최적수준을 분석하기 위해서 SN비와 직교배열표를 이용한 실험을 계획하였다. 잡음조건에 따른 Rolling Resistance의 민감도 분석을 위해 실험 타이어의 검사기준을 설정하여, 실험결과를 측정하고, ANOM 및 ANOVA 분석을 통하여 설계인자들의 효과를 분석하고 최적조건을 결

* 이 논문은 1995년도 전남대학교 자동차연구소의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었음.

** 전남대학교 산업공학과

정하였다. 설계인자들의 최적조건에서 확인실험을 실시하고, 실측치와 제시된 최적조건에서의 예측치에 대한 분석을 한다. 또한 실험 데이터와 분석자료를 이용하여 Rolling Resistance를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

2. 실험의 계획

트레드 패턴은 종방향과 횡방향의 Groove 폭, Block 의 폭과 길이, Kerfs, 트레드 폭, 트레드 반경 등 다수의 설계인자로 표현된다. 참고 문헌과 전문 연구원의 의견을 종합하여 트레드 패턴 인자와 고려할 성능특성을 결정하고, 이에 대한 측정 조건을 확정하였으며, 설계인자들의 수준을 조정하여 직교배열 실험을 계획하였다.

2.1 설계인자 및 수준 결정

ATT, BFG 등 트레드 패턴 관련 논문과 보고서를 분석하여 트레드 패턴 설계인자를 종합 정리하였다. 또한 담당 연구원들을 대상으로 설계인자에 대한 설문조사를 3차에 걸쳐 실시하여, 설계인자의 중요도를 분석하고, 중요한 설계인자에 대한 수준을 결정하였다. 이상의 분석결과를 종합하여 실험에서 고려할 설계인자를 <표 2-1>에 나타내었다.

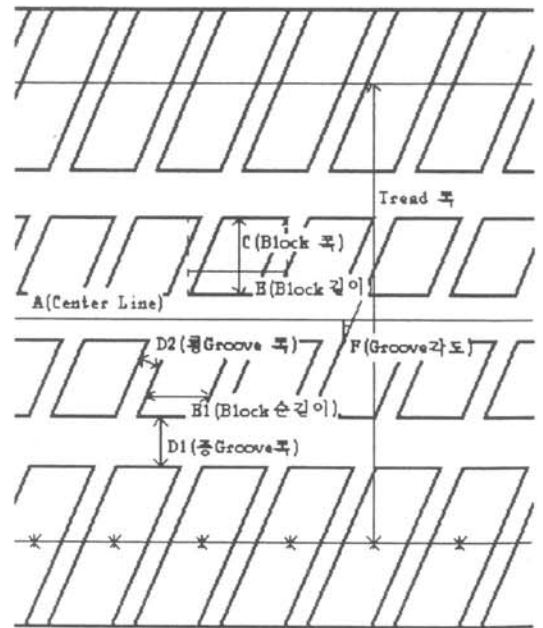
<표 2-1> 설계인자와 수준

설계인자 (단위)	수 준				수준수
	1	2	3	4	
A	Block	Groove			2
B(%)	B ₀	B ₀ +10			2
C(mm)	C ₀	C ₀ + 5	C ₀ +10	C ₀ +15	4
D(%)	D ₀	D ₀ +15	D ₀ +30	D ₀ +45	4
E(mm)	E ₀	E ₀ + 5	E ₀ + 10	E ₀ + 15	4
F(°)	F ₀	F ₀ +15			2

<표 2-1>의 설계인자를 도식화하면 <그림 2-1>과 같이 나타낼 수 있다. A(Center 배시) 인자는 Center line에 Block이나 Groove를 배치하는 것을 나타내며, 그림에서는 Groove를 배치한 것이다. B(NG 비) 인자는 트레드 폭내의 전체 면적에 대해서 Block이 차지하는

면적의 비율을 뜻한다. C(Block 폭) 인자는 Block의 횡방향 길이를 나타낸다. D(Groove 폭비) 인자는 D₂(횡방향 Groove 폭)와 D₁(종방향 Groove 폭)의 비율을 뜻한다. D인자를 이렇게 선정한 것은 D₁이 항상 D₂보다 커야한다는 조건을 반영하기 위한 것이다. E(Block 길이) 인자는 Block의 종방향 길이를 나타내며, F(Groove 각도) 인자는 횡방향 Groove가 Center line의 수직선에 대해 가지는 각도를 나타낸다.

각 설계인자의 수준수는 직교배열 실험계획과 관련하여 결정된 것이며, 각 수준의 값은 개발된 Tire에 적용된 최대값과 최소값을 고려하여 결정하였다. 최종적으로 설계인자는 2수준 인자 3개와 4수준 인자 3개로 결정하였다.



<그림 2-1> 트레드 패턴 설계인자

2.2 성능특성과 측정조건 결정

트레드 패턴에 관련된 성능특성으로는 크게 Traction (제동성), Noise(소음), Hydroplaning, Rolling Resistance로 구분할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 측정장비와 측정의 용이성을 고려하여 Rolling Resistance만을 고려하기로 한다. 측정조건은 공기압 28psi, 하중

380kgf로 하고 실내에서 측정하기로 한다. 이러한 조건은 Rolling Resistance 측정상의 국제기준이므로 이를 사용하였다.

각 성능특성에 대한 목적함수 형태는 측정 데이터가 클수록 좋은 망대형태와 작을수록 좋은 망소형태로 나눌 수 있는데, Rolling Resistance는 망소형태이다.

2.3 직교배열을 이용한 실험계획

2수준 인자 3개와 4수준 인자 3개에 대한 총자유도는 13이므로 여기에 대응할 수 있는 최소의 직교배열표는 총자유도가 16인 $L_{16}(2^{15})$ 이다. 열병합법을 사용하여 2수준 인자 3개에 4수준 인자 1개를 배치할 수 있으므로, 표준 직교배열 $L_{16}(2^{15})$ 은 $L_{16}(2^6 \times 4^3)$ 으로 나타낼 수 있다. 이는 2수준 인자 6개와 4수준 인자 3개를 배치할 수 있으므로, 결정한 설계인자는 2수준 인자 3개 열과 4수준 인자 3개 열에 배치하고, 남은 2수준 인자 3개 열에는 교호작용을 배치한다.

그러나 표준 직교배열표에 설계인자를 배치한 결과, 비현실적인 트레드 패턴이 나타났으므로 이를 제거하기 위해 직교배열표의 각 열에 대해서 설계인자의 수준을 변화시키는 시뮬레이션을 수행하였다. 64회의 시

뮬레이션 결과 <표 2-2>의 직교배열표가 완성되었는데, 이는 현실적으로 의미있는 트레드 패턴을 얻기 위해 표준 직교배열표를 변형한 것이다.

<표 2-2>의 직교배열표에 배치된 교호작용은 2수준 인자간의 교호작용이 배치된다. 여기서는 4수준 인자간의 교호작용을 배치하고자 하므로, 이를 해결하기 위해 그룹의 개념을 도입하였다. 4수준 인자에서 하위수준인 수준 1과 수준 2를 그룹I로 하고, 상위수준인 수준 3과 수준 4를 그룹II로 하여, 두 개의 그룹간의 교호작용을 배치한 것이다. 실험 타이어는 <표 2-1>을 <표 2-2>에 적용하여 제작하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과와 SN비

16개 실험 타이어에 대하여 측정 데이터를 수집하였다. 결과분석을 위하여 측정 데이터를 SN(Signal to Noise) 데이터 η_j 로 변환하는데, 변환식은 다음과 같다.

Y_{ij} 를 i 번째 실험 데이터에 대한 j 번째 측정 데이터라 할 때, $\eta_j = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2$ 이다.

Rolling Resistance에 대한 측정 데이터를 SN 데이터로 변환하면 <표 3-1>과 같다.

<표 2-2> 직교배열표와 설계인자 배치

열 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	2	2	4	2	2	1	1	1
2	1	2	4	3	3	2	2	1	2
3	1	2	3	1	4	2	2	2	1
4	1	2	1	2	1	2	1	2	2
5	1	1	2	2	4	1	2	1	2
6	1	1	4	1	1	1	1	1	1
7	1	1	3	3	2	1	1	2	2
8	1	1	1	4	3	1	2	2	1
9	2	2	2	1	3	1	1	2	2
10	2	2	4	2	2	1	2	2	1
11	2	2	3	4	1	1	2	1	2
12	2	2	1	3	4	1	1	1	1
13	2	1	2	3	1	2	2	2	1
14	2	1	4	4	4	2	1	2	2
15	2	1	3	2	3	2	1	1	1
16	2	1	1	1	2	2	2	1	2
수준수	2	2	4	4	4	2	2	2	2
인자 배치	A	B	C	D	E	F	[A×E][B×D][C×D]		
	설계인자					그룹교호작용			

<표 3-1> 측정 데이터 및 SN 데이터

No	A B C D E F	측정 데이터	SN 데이터
1	1 2 2 4 2 2	42.82	-32.63
2	1 2 4 3 3 2	41.88	-32.44
3	1 2 3 1 4 2	43.26	-32.72
4	1 2 1 2 1 2	42.37	-32.54
5	1 1 2 2 4 1	45.65	-33.19
6	1 1 4 1 1 1	42.98	-32.67
7	1 1 3 3 2 1	44.35	-32.94
8	1 1 1 4 3 1	44.15	-32.90
9	2 2 2 1 3 1	46.18	-33.29
10	2 2 4 2 2 1	43.09	-32.69
11	2 2 3 4 1 1	43.77	-32.82
12	2 2 1 3 4 1	43.95	-32.86
13	2 1 2 3 1 2	42.25	-32.52
14	2 1 4 4 4 2	42.21	-32.51
15	2 1 3 2 3 2	43.25	-32.72
16	2 1 1 1 2 2	43.23	-32.72

3.2 분석

먼저 Rolling Resistance의 측정치에 대해서 분산분석을 실시하였다. 분산분석에서는 설계인자의 수준별 효과를 계산하는데, 이는 인자의 수준에서의 평균과 전체평균(-32.759)과의 차이를 나타낸다. 총 9개의 요인 중에서 절반인 5개 요인을 풀링하여 오차 1로 하였으며, 기여도가 5% 이하인 교호작용을 추가로 풀링하여 오차 2로 하였다. 기여율은 인자의 제곱합이 총 제곱합에서 차지하는 비율이며, 이는 인자가 특성치에 주는 산포의 정도를 나타낸다.

측은 다음과 같이 계산된다.

$$f(A_i B_j C_k D_l E_m F_n) = \mu + a_i + b_j + c_k + d_l + e_m + f_n \quad (3.1)$$

여기서 μ 는 전체평균을 나타내고, $a_i, b_j, c_k, d_l, e_m, f_n$ 은 각 인자의 수준별 효과를 나타내며, 수준별 평균에서 전체평균을 뺀 것이다.

예측값에 대한 신뢰한계를 구하기 위해서 유효반복수 n_0 를 계산한다.

$$\frac{1}{n_0} = \frac{1}{n} + \left[\frac{1}{n_{A_i}} - \frac{1}{n} \right] + \left[\frac{1}{n_{B_j}} - \frac{1}{n} \right] + \dots + \left[\frac{1}{n_{F_n}} - \frac{1}{n} \right] \quad (3.2)$$

〈표 3-2〉 분산분석표

요인	요인수준에 따른 SN 비율의 효과				자유도	제곱합	제곱평균	F값	기여율1 (%)	기여율2 (%)
	1 (I, I)	2 (I, II)	3 (II, I)	4 (II, II)						
A	0.006	-0.006			1	0.001	0.001			
B	-0.010	0.010			1	0.002	0.002			
C	0.005	-0.148	-0.042	0.184	3	0.229	0.076	7.6	24	22
D	-0.089	-0.025	0.071	0.043	3	0.062	0.021			
E	0.122	0.015	-0.078	-0.061	3	0.100	0.033	3.3	8	7
F	-0.160	0.159			1	0.408	0.408	40.8	47	47
AXE	0.065	-0.053	0.073	-0.085	1	0.002	0.002			
BXD	-0.064	0.044	-0.051	0.070	1	0.001	0.001			
CXD	-0.175	0.032	0.060	0.082	1	0.035	0.035	3.5	3	
오차1					7	0.067	0.010		18	
오차2					8	0.102	0.013		23	24
전체	-32.759				15	0.837	0.056		100	100

최적조건 A₁ B₂ C₄ D₃ E₁ F₂

Rolling Resistance에 대한 분산분석표는 〈표 3-2〉와 같다. F 인자가 Rolling Resistance에 미치는 영향이 제일 크며, 수준 2가 최적이다. 다음으로는 C 인자로 수준 4가 최적이다. 교호작용의 영향은 적고, 풀링한 후의 최적조합은 C₄, E₁, F₂이다.

3.3 예측

직교배열실험 데이터를 이용한 예측은 주효과만 고려하였으며, 이 경우 조합 $A_i B_j C_k D_l E_m F_n$ 에 대한 예

여기서 n은 직교배열 실험의 수를 나타내고 n_{A_i} 는 A 수준의 반복수를 나타낸다. 본 실험에서는 $n_{A_i}, n_{B_j}, n_{F_n}$ 은 8이고, $n_{C_k}, n_{D_l}, n_{E_m}$ 은 4이므로

$$\frac{1}{n_0} = \frac{1}{16} + 3 \left[\frac{1}{8} - \frac{1}{16} \right] + 3 \left[\frac{1}{4} - \frac{1}{16} \right] = \frac{13}{16} \text{ 이 된다.}$$

오차의 제곱평균을 σ_e^2 라고 할 때, 예측값에 대한 2σ 신뢰한계(Confidence Limit, CL)는 다음과 같이 계산되며,

$$CL = \pm 2 \sqrt{\frac{\sigma_e^2}{n_0}} \quad (3.3)$$

Rolling Resistance에 대한 예측값과 편차는 <표 3-3>과 같다.

최적조합 $C_i E_j F_k$ 에 대한 예측은 다음과 같이 계산된다.

$$f(C_i E_j F_k) = \mu + c_i + e_j + f_k \quad (3.4)$$

예측값에 대한 신뢰한계를 구하기 위해서 유효반복수 n_i 를 계산한다.

$$\frac{1}{n_i} = \frac{1}{n} \left[\frac{1}{n_{C_i}} \cdot \frac{1}{n} \right] + \left[\frac{1}{n_{E_j}} \cdot \frac{1}{n} \right] + \left[\frac{1}{n_{F_k}} \cdot \frac{1}{n} \right] \quad (3.5)$$

따라서 최적조합에서의 예측값을 계산하면 -32.298 이고, 신뢰구간은 ± 0.161 이 된다.

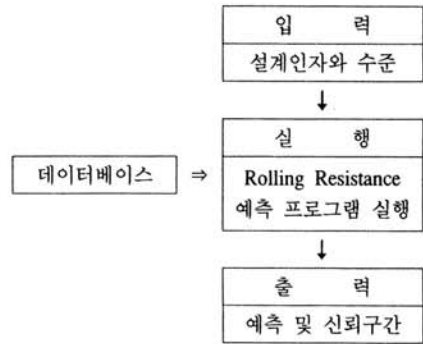
<표 3-3> 예측치와 편차(신뢰한계 : ± 0.206)

번호	직교배열 A B C D E F	실측치	예측치 (주효과)	편 차
1	1 2 2 4 2 2	-32.633	-32.673	0.040
2	1 2 4 3 3 2	-32.440	-32.406	-0.034
3	1 2 3 1 4 2	-32.722	-32.775	0.053
4	1 2 1 2 1 2	-32.541	-32.481	-0.060
5	1 1 2 2 4 1	-33.189	-33.156	-0.033
6	1 1 4 1 1 1	-32.665	-32.705	0.040
7	1 1 3 3 2 1	-32.938	-32.878	-0.060
8	1 1 1 4 3 1	-32.899	-32.952	0.053
9	2 2 2 1 3 1	-33.289	-33.229	-0.060
10	2 2 4 2 2 1	-32.688	-32.740	0.052
11	2 2 3 4 1 1	-32.824	-32.791	-0.033
12	2 2 1 3 4 1	-32.859	-32.899	0.040
13	2 1 2 3 1 2	-32.517	-32.570	0.053
14	2 1 4 4 4 2	-32.508	-32.449	-0.059
15	2 1 3 2 3 2	-32.720	-32.760	0.040
16	2 1 1 1 2 2	-32.716	-32.684	-0.032

4. Rolling Resistance 예측 프로그램 개발

4.1 주요기능

Rolling Resistance 예측 프로그램은 <그림 4-1>에서 보는 바와 같이 사용자로부터 설계인자와 수준을 입력받아 데이터베이스에 있는 기본정보를 이용하여 Rolling Resistance를 예측하는 계산을 하고, 그 결과를 화면에 출력한다.



<그림 4-1> Rolling Resistance 예측 프로그램

입력정보로서 시스템을 사용하는 사용자가 입력해야 할 정보는 다음과 같다.

- ① 설계인자의 선택 : A(Center 배치), B(NG 비), C(Block 폭), D(Groove 폭비), E(Block 길이), F(Groove 각도)
- ② 수준의 선택 : <표 2-1>에서 고려한 수준으로, 10가지 수준 조합을 선택할 수 있음.

데이터베이스에는 모든 설계인자의 수준별 효과에 대한 95% 신뢰한계 등이 저장되어 활용되고, 출력정보로서 선정된 설계인자 및 수준과 특성별 예측자료 및 신뢰한계를 사용자에게 제공한다.

4.2 사용설명

시스템의 주메뉴는 입력, 실행 그리고 완료로 구성되어 있다. 입력메뉴 중에서 New에서는 입출력 File 이름과 인자별 수준을 정하고, List에서는 기존에 입

출력된 파일목록을 알 수 있다. 실행메뉴는 예측작업을 수행한 후 출력되는 파일 이름과함께 결과값을 SN Data와 Raw Data 형태로 보여주며, 완료메뉴에서는 작업을 일시 중단하고 프로그램 밖으로 나가서 DOS 상의 작업을 할 수 있는 기능과 끝내기로 이루어져 있다.

5. 결론 및 제언

Rolling Resistance에 대해서 트레드 패턴을 최적화하기 위하여 다구찌 로버스트 설계기법을 적용하는 실험을 계획하고 분석하였다. 기여율이 높은 설계인자를 구분하였고, 최적조건을 결정하였으며, 관련 예측치를 계산하였다.

실험 데이터와 분석자료를 이용하여, Rolling Resistance를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 따라서 새로운 타이어 개발 및 설계에 있어서 시간과 비용을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

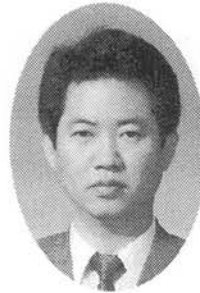
트레드 패턴을 최적화하기 위해서는 Traction, Hydroplaning, Noise 등에 대해서도 종합적인 연구가 필요하다. 앞으로 Traction, Hydroplaning, Noise 등에 대해서도 연구가 이루어진다면, 이러한 품질특성에 대한 데이터와 분석자료를 이용하여 각 품질특성에 대한 예측을 할 수 있을 것으로 기대된다.

【참 고 문 헌】

- [1] 박성현, 현대 실험계획법, 대영사, 1987.
- [2] 박성현, 다구찌 방법을 중심으로한 응용 실험계획법, 영지문화사, 1990.
- [3] 전태준 외 4인, 강건 설계를 이용한 품질공학, 민영사, 1992.
- [4] 문훈영, “Tread Pattern에 의한 Wet Traction 예측에 관한 연구”, 금호 기술 연구소, 1992.
- [5] Dorsch, L. T., “Predicting Tire Noise and Performance Interactions”, Society of Automotive Engineering, 762032, pp 251-262, 1992.
- [6] Hutz, J. A., “Tread Design Matrix for Dry Traction

Evaluation”, Report to Advanced Technology Team, 86-112(1)MISC24, 1986.

- [7] Pottinger, M. G., “Tire Design vs. Wet Traction”, BFG Technical Document, 75-21-004, 1980.
- [8] Schallanmach, A. and Grosch, K., “Tire Traction and Wear”, Chapter 6 in “Mechanics of Pneumatic Tires”, (Ed.) Clark, S. K., 1971.
- [9] Veith, A. G., “Tire Wet Traction Performance : The Influence of Tread Pattern”, Paper Presented to Second International Skid Prevention Conference : Trans. Res. Record 621, pp 113, 1977.



전태준

1979년 서울대학교 산업공학과 학사

1981년 한국과학기술원 산업공학과 석사

1987년 한국과학기술원 경영과학과 박사

현 재 전남대학교 산업공학과 교수
관심분야 생산 및 물류정보시스템, 품질정보시스템, 생산스케줄링, 시계열분석 및 예측



김수동

1989년 조선대학교 산업공학과 학사

1994년 전남대학교 산업공학과 석사

현 재 전남대학교 산업공학과 박사과정

관심분야 품질공학, 품질경영



박성호

1990년 조선대학교 산업공학과 학사

1994년 전남대학교 산업공학과 석사

현 재 전남대학교 산업공학과 박사과정

관심분야 스케줄링, 생산정보시스템