

경험적 최적화 기법을 이용한 자동차 공력저항 예측 프로그램 개발 Development of a Prediction Program of Automotive Aerodynamic Drag Coefficient Using Empirical Optimization Method

한석영(한양대학교 기계공학부), 맹주성(한양대학교 기계공학부),
박재용(한양대학교 대학원 자동차공학과)

ABSTRACT

At present, wind tunnel test or CFD is used for predicting aerodynamic drag coefficient in motor company. But, wind tunnel test requires much cost and time, and CFD has about 30% error. In this study a predicting program of the aerodynamic drag coefficient based on empirical techniques was developed. Also a mathematical optimization method using GRG method was added to the program. The program was applied to six cars. Aerodynamic drag coefficient values of six cars were predicted with 4.857% average error. The optimization method was also applied to six cars. Three parameters selected from sensitivity analysis were determined to reduce the afterbody drag coefficient to the value established by a designer and when some parameters were changed for a developing automotive, optimal modifiable parameters were determined to preserve the same drag coefficient as the original automotive. It was verified that this program could predict the aerodynamic drag coefficient effectively and accurately, and this program with GRG method could determine optimal values of parameters.

1. 서론

자동차의 공력저항은 자동차의 주행성능에 막대한 영향을 미친다. 따라서, 공력적으로 저항이 적은 차량일수록 연비, 속도, 주행소음 등 여러 면에서 유리하다.

현재 국내 자동차 회사에서는 자동차의 공력저항을 예측하는데 풍동실험이나 CFD를 이용하고 있다. 풍동실험은 공력저항을 예측하는데 많은 시간과 비용이 들며, CFD는 공력저항을 예측하는데 시간과 비용 면에서는 풍동실험에 비해 경제적이거나 그 결과값에서는 큰 오차를 가진다. 그러므로, 설계초기 단계에서 풍동실험의 비용과 시간을 줄이고, CFD의 오차율을 줄이는 공력저항 예측 도구의 개발이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 Carr⁽¹⁾와 Rose⁽²⁾의 경험적 기법과 Guan⁽³⁾의 측정기준을 바탕으로 공력저항계수를 예측할 수 있는 프로그램을 Window 환경에서 사용할 수 있도록 Visual C++⁽⁴⁾로 개발하였다. 이 프로그램을 이용하여 스타일링 단계의 차량 형상에 대한 공력저항계수를 예측한다. 또한, 스타일링 완료 후 설계상 차량의 형상을 불가피하게 수정할 필요가 생겼을 경우, 설계자가 목표하는 공력저항계수를 갖기 위한 형상인자를 설정하기 위해 GRG법을 이용한 수학적 최적화 기법을 이 프로그램에 추가하였다.

2. 경험적 기법 및 최적화 기법

2.1 경험적 기법

Carr⁽¹⁾의 경험적 예측기법은 1980년대 초에 개발되었다. Carr는 자동차의 전 공력저항계수를 Fig. 1과 같이 13개의 요소로 나누었고, 전 공력저항계수는 식 (1)과 같이 각각의 요소공력저항계수의 합으로 구해진다.

$$C_{dtotal} = \sum_{i=1}^{13} C_{di} \quad (1)$$

1984년에 개발된 Rose⁽²⁾의 경험적 기법은 Carr의 13개 경험식을 이용하지만, C_{d7}(Wheel), C_{d9}(Ext-

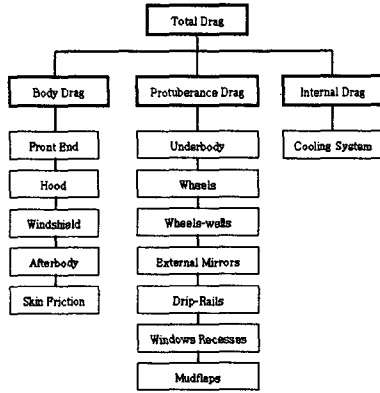


Fig. 1 CARRS breakdown of total aerodynamic drag

ernal Mirror), C_{d13} (Cooling System)의 3 부분 요소의 형상인자 측정방법이 다르다. 만약 C_{d13} (Cooling System)을 예를 들면 C_{d13} 에서는 형상인자 A_r 의 측정기준이 Carr와 Rose가 서로 다르다. Carr는 A_r 을 단지 라디에이터 그릴의 전체 표면적만을 측정하였으나, Rose의 경우는 라디에이터 그릴의 전체 표면적과 범퍼 아래에 있는 공기 흡입구까지 포함하여 측정하였다.

Guan⁽³⁾의 경험적 기법은 Carr의 경험식과 Rose의 경험식을 함께 이용한다. Guan은 C_{d7} , C_{d9} , C_{d13} 의 요소공력저항에서 Carr와 Rose의 경험식을 차량의 형상에 따라서 다르게 적용하였다. 본 논문에서는 전체 공력저항계수 예측을 위하여 Carr와 Rose의 경험식과 Guan의 측정기준을 적용하여 공력저항 예측 프로그램을 개발하였다.

2.2 최적화 기법 : 일반화된 환산경사도법

일반화된 환산경사도법⁽⁴⁾(GRG법: Generalized Reduced Gradient method)은 등호제약조건을 가진 문제를 풀기 위해 제안된 환산경사도법의 확장형이다.

GRG법을 간단히 설명하면 다음과 같다.

1. 설계변수 및 상태변수를 정하고, 초기 벡터 X 를 설정하여 시작한다. 초기 벡터 X 는 설계변수 Y 와 상태변수 Z 로 구성된다.

$$X = \begin{Bmatrix} Y \\ Z \end{Bmatrix}, \quad Y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_{n-1} \end{Bmatrix}, \quad Z = \begin{Bmatrix} z_1 \\ \dots \\ z_{m+1} \end{Bmatrix}$$

2. 일반화된 환산경사도를 계산한다. 환산경사도 G_R 은 다음과 같이 주어진다. 다음 식에서 f 는 목적함수, g 는 제약조건함수를 나타낸다.

$$G_R = \nabla_Y f - ([D]^{-1}[C])^T \nabla_Z f \quad (2)$$

여기서,

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial y_1} & & & \\ & \dots & & \\ & & \frac{\partial g_{m+1}}{\partial y_{m-1}} & \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial z_1} & & & \\ & \dots & & \\ & & \frac{\partial g_{m+1}}{\partial z_{m+1}} & \end{bmatrix}$$

$$\nabla_Y f = \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial y_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial y_{n-1}} \end{Bmatrix}, \quad \nabla_Z f = \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial z_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial z_{m+1}} \end{Bmatrix}$$

3. 수렴여부를 검토한다. G_R 의 모든 성분이 0에 접근하면, 현 벡터 X 를 최적해로 취한다. 수렴조건으로는 다음과 같은 식을 사용할 수 있다.

$$|G_R| \leq \epsilon \quad (3)$$

여기서, ϵ 은 작은 수이며, 이 식이 만족되지 않으면 다음 단계로 넘어간다.

4. 탐색방향 S 를 결정한다. 예를 들어, 최속강하법(steepest descent method)을 사용하면, 벡터 S 는 다음과 같이 결정된다.

$$S = -G_R \quad (4)$$

5. 탐색방향 S 를 따라 최소값을 갖는 λ^* 를 찾는다.

6. 새로운 벡터 X_{new} 를 찾는다.

$$X_{new} = \begin{Bmatrix} Y_{old} + dY \\ Z_{old} + dZ \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Y_{old} + \lambda * S \\ Z_{old} + \lambda * T \end{Bmatrix}$$

7. X_{new} 를 새로운 벡터 X 로 하여 제1단계로 되돌아간다.

3. 자동차 공력저항 예측 프로그램

본 연구의 공력저항 예측 프로그램은 비쥬얼 C++(Ver. 6.0)를 이용하여 개발되어 윈도우 환경에서 사용할 수 있다. Fig. 2는 주 창(main window)을 나타내었고, 본 연구에서 개발한 공력저항 예측 프로그램을 검증하기 위하여 Rose와 Guan의 예측결과와 비교하였다.

먼저 Table 1에 나타난 Rose의 비교에서는 풍동 실험 예측값과 본 논문 프로그램 예측값의 평균 오차율은 4.87%이었고, Rose 예측값의 평균 오차율은 2.46%였다. 따라서, 본 논문 프로그램의 예측값이 Rose의 예측값보다 평균 오차율에서 2.41% 크게 예측됨을 알 수 있었다. 그러나, 본 논문의 프로그램으로 예측한 공력저항계수들 중에서 2, 8, 10, 12, 15, 16차량은 오차가 5% 이상이었다. 그 이유는 2, 8, 10, 16차량의 경우는 해치백 스타일의 차량이었고, 15번 차량의 경우는 SUV(4×4 Jeep형)차량이었다. 그리고, 12번 차량의 경우는 세단형이었지만 8.756%의 오차율로 예측하였으나 Rose의 예측값에서도 6.912%의 큰 오차로 예측되었다.

Rose의 예측값과 비교할 때, 본 논문의 프로그램이 1970년대와 1980년대 초반의 차량 중 해치백 스타일의 차량이나 SUV 차량을 예측하기에는 큰 오차율이 있다는 것을 알 수 있었다.

다음은 Guan의 예측값과 본 논문의 공력저항계수 예측 프로그램의 예측값을 비교하였다.

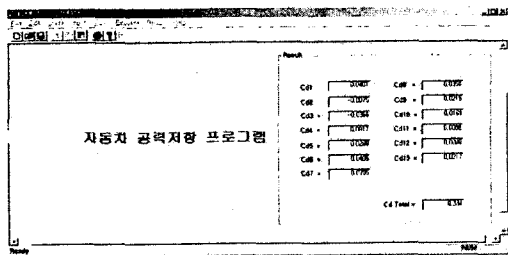


Fig. 2 Main window of C_d predicting program

Guan의 예측값과 비교하였을 때 평균 오차율 0.78%로 예측되었다. 그리고, 풍동실험 예측값과 본 논문 프로그램을 이용한 예측값과의 평균 오차율은 5.5%로 Guan의 평균 오차율 5.56%보다 0.06% 작게 예측되었다. Guan의 경우에는 2, 3, 4번 차량의 경우는 해치백 스타일의 스포츠카였고, 1, 5번의 경우는 세단 스타일의 차량이었다.

Guan의 예측 차량 중 1, 2번의 경우가 오차율 7% 이상을 보였는데, 이는 51개의 형상인자 측정 시 측정기준 적용의 모호성으로 인해 예측된 오차라고 생각된다. Table 2에 Guan의 예측 결과를 나타내었다.

따라서, Guan의 측정 데이터와 Rose의 측정 데이터를 이용해 예측한 결과, 본 연구의 공력저항 예측 프로그램이 세단형 차량의 적용에는 7%이내의 오차율로 예측할 수 있지만, 세단 이외의 해치백 스타일의 차량과 SUV의 차량에 적용할 때 큰 오차가 생길 가능성이 있고, 51개 형상인자 측정 시 측정기준 적용이 어려운 차량 형상의 경우에 큰 오차가 나타날 수 있으므로 측정기준의 수정이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

Table 1 Comparison of the prediction of C_d among Roses method, experimental results and this study

Exp. No.	Exp. C_d	Pred. C_d (Rose)	Pred. C_d (Guan)	Ave. Error (%)		
1	0.427	0.428	0.291	0.430	0.485	0.698
2	0.365	0.400	8.773	0.405	1.235	3.989
3	0.490	0.481	0.211	0.480	3.958	4.163
4	0.451	0.415	5.252	0.488	1.701	3.832
5	0.418	0.425	2.827	0.438	1.838	4.610
6	0.412	0.435	5.395	0.425	2.831	2.712
7	0.491	0.490	0.289	0.487	1.488	1.133
8	0.440	0.488	5.853	0.484	3.306	9.062
9	0.419	0.418	0.127	0.413	1.211	1.389
10	0.425	0.432	5.982	0.448	0.953	5.143
11	0.393	0.428	3.154	0.412	3.883	4.587
12	0.396	0.404	7.980	0.454	5.912	8.756
13	0.433	0.433	0.009	0.433	0.000	0.000
14	0.403	0.404	0.235	0.418	3.580	3.807
15	0.491	0.526	6.648	0.559	5.933	12.589
16	0.373	0.400	8.868	0.415	3.614	10.214
17	0.380	0.379	0.232	0.385	1.588	1.300
18	0.431	0.432	0.211	0.422	2.370	2.154
19	0.415	0.433	4.201	0.433	0.000	4.201
Ave. error			3.345		2.427	4.716

Table 2 Comparison of the prediction of C_d among Guans method, experimental results and this study

Exp. No.	Exp. C_d	Pred. C_d (Rose)	Pred. C_d (Guan)	Ave. Error (%)		
1	0.334	0.334	0.000	0.280	15.172	15.172
2	0.274	0.274	0.000	0.300	8.667	8.667
3	0.310	0.311	0.323	0.310	0.223	0.000
4	0.334	0.345	3.593	0.340	1.755	1.755
5	0.326	0.326	0.000	0.320	1.875	1.875
Ave. error			0.783		5.590	5.496

4. 자동차 공력저항 예측 프로그램의 적용

본 연구의 공력저항계수 예측 프로그램을 이용하여 국내 자동차 회사에서 양산중인 6대 차량에 대해 공력저항계수를 평균 오차를 4.857%로 예측하였다. 그리고, A, D, E 차량의 경우에는 각각 10.69%, 7.958%, 7.085%의 오차율로 5%보다 크게 예측되었다. 모든 차량의 경우에 있어서 C_{d1} , C_{d4} , C_{d6} , C_{d7} 이 전체 공력저항계수에 크게 작용을 하였고, C_{d4} , C_{d7} , C_{d13} 의 형상인자 중 몇 개의 인자로 인해 풍동실험 예측값과 비교했을 경우 큰 오차를 가졌다. Table 3과 Fig. 3은 6대 차량의 예측값과 오차율을 나타낸다. Table 3에서 C_{d1} 은 C_{d1} 으로, C_{d2} 는 C_{d2} 와 같이 나타내었다.

A 차량의 차량의 경우는 10.69%의 가장 큰 오차를 보였다. 이 오차는 형상인자의 측정기준을 적용함에 있어 측정의 모호성에 기인하는 것으로 생각된다. A 차량의 경우는 크게 4개의 형상인자 A_r (radiator face area), c (mean ground clearance under sills), h_a (depth of drip rail on A-pillar), β (front end rake angle)에 대한 측정기준을 적용할 때 그 형상이 B, C, F 차량과는 차이점이 있었다.

Table 3 Results of aerodynamic drag coefficients for 6 cars

0.041	0.037	0.038	0.040	0.037	0.041	front end
-0.006	-0.004	-0.005	-0.004	-0.002	-0.005	hood
-0.039	-0.044	-0.042	-0.040	-0.042	-0.038	windshield
0.108	0.117	0.103	0.135	0.104	0.072	afterbody
0.023	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027	skin friction
0.065	0.065	0.063	0.059	0.063	0.066	underbody
0.082	0.084	0.077	0.065	0.092	0.110	wheels
0.036	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	wheel wells
0.018	0.020	0.018	0.017	0.020	0.015	external mirrors
0.013	0.009	0.009	0.014	0.013	0.009	drip-rails
0.038	0.035	0.035	0.031	0.031	0.035	window recesses
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	mudguard
0.023	0.016	0.011	0.014	0.013	0.017	cooling system
0.383	0.370	0.340	0.374	0.384	0.355	
0.348	0.365	0.334	0.348	0.340	0.355	평균오차율
10.690	1.413	1.938	7.958	7.085	0.080	4.857

Table 4 Comparison of different wheel drag prediction

0.356	0.335	0.334	0.318	242.42	0.355
223.19	227.15	248.77	219.3	0.35409	223.21
0.383	0.370	0.340	0.373	0.384	0.355
10.69	1.41	1.93	7.93	7.09	0
		4.84			
187.75	162.74	204.58	180.52	226	225.73
0.36973	0.35694	0.32672	0.36487	0.35799	0.35688
6.93	2.21	-2.19	5.45	5.29	0
		3.67			

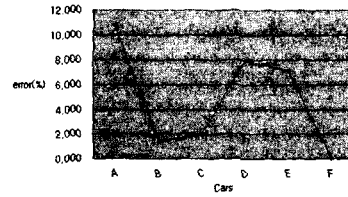


Fig. 3 Errors of 6 cars

A 차량의 A_r 은 다른 차종에 비해 라디에이터 면적과 범퍼 밑 공기 흡입구(Air intake)가 큰 면적을 가졌고, 형상인자 c 의 경우는 Table 4처럼 모든 차종이 평균 타이어 높이를 사용했을 경우와 그라운드 클리어런스를 사용했을 경우가 약 13 카운트 작게 예측되었다.

h_a 의 경우는 앞 유리창 위 부분의 빗물 흘림방지 홈의 사이즈를 측정하였는데 다른 차종에 비해 그 길이가 큰 값을 가졌다. 그리고, β 의 측정에 있어서 측면에서 본 라디에이터 그릴의 형태가 아래에서 위 방향으로 굴곡이 있는 형상인데 중간 부분이 앞으로 돌출한 형상이기 때문에 라디에이터 그릴의 아래부분에서 β 의 기준점을 지정하기가 어려웠다. 그래서, 측면도에서 라디에이터 끝부분에 수직선을 그었을 때, 만나는 점과 라디에이터 위 부분의 끝 점과 연결하여 측정할 값을 입력하였다.

D차량의 경우는 차량의 트렁크 끝부분 형상이 측정기준을 적용하기에 불가능한 형상이었다. 트렁크 끝부분 15° 되는 접선과 만나는 점에서 폭 방향으로 단면을 만들었을 때, 트렁크 끝 부분이 뒤로 튀어나온 형상이기 때문에 A_b 의 측정값이 아주 작게 측정되었다. 따라서, 측정기준을 수정하였다. 처음의 측정기준인 트렁크 끝부분 15° 되는 접선과 만나는 점을 택하지 않고, 평면도에서 후미등에서 15° 되는 접선과 만나는 점을 지정하여 그 점에서 폭방향으로 단면을 지정하였다.

그 결과 단면적이 처음 측정할 때보다 큰 값으로 측정되었으며 C_{d4} 가 크게 예측되었다. 그리고, A 차량과 마찬가지로 c 의 값을 두 가지 방법으로 나눠서 측정하였을 경우 약 10 카운트 정도 작은 값으로 예측되었다.

E 차량의 경우도 h_a 와 c 의 형상인자에 의해 전체 공력저항계수가 크게 예측되었다. A 차량처럼 h_a

의 형상인자 측정시 앞 유리창 위 부분과 차체와의 흡이 크게 예측되었다. 그리고, c 의 경우에도 약 6카운트 정도 작게 예측되었다.

따라서, 본 논문 프로그램을 이용하여 예측한 결과, 평균 오차율 5%로 예측되었다. 그러나, 차체형상이 측정기준을 적용하기 어려운 형상은 측정기준을 새로 정의해야 할 필요가 있음을 알 수 있었다.

5. 경험적 최적화 기법의 적용

5.1 특정값 예측

현실적으로 아주 작은 공력저항계수를 갖는 차량을 제작하는 것은 불가능하다. 따라서, 실제 풍동실험에서 측정된 공력저항 계수값보다 10에서 30 카운트를 줄이기 위해 필요한 인자의 수정이 더욱 필요하다. 여기서, 10 카운트란 공력저항계수의 소수 둘째 자리를 의미한다. 공력저항계수를 10 또는 30 카운트를 줄이기 위해, 본 논문에서 측정된 6 차량에 대해 가장 민감도가 큰 형상인자인 r_b (mean radius of roof trailing edge), θ (backlight slope angle), ϕ (rear end step angle)를 최적화 기법을 이용하여 구해 보았다.

Table 5에 10 카운트와 30 카운트를 감소시키기 위한 r_b, θ, ϕ 의 값들을 최적화하였다.

A~E차량 계산결과에 의해 뒷 유리창(θ)과 뒷 유리창 천장과 트렁크 끝부분의 연결각(ϕ)이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 공력저항 측면에서 유리한 차량일수록 뒷 유리창의 경사각과 뒷 유리창 천장과 트렁크 끝부분의 연결각이 일치해가는 것을 알 수 있다.

현재 양산되고 있는 차량 중에서 공력저항계수값이 0.26이나 0.29가 되는 세단형 차량을 살펴보면, 2도어 쿠페나 스포츠카 스타일처럼 뒤 유리창의 경사각과 뒷 유리창과 트렁크 끝 부분의 연결각이 거의 일치하면서 연결되고, 트렁크 끝부분을 위쪽으로 약간 올리거나 혹은 끝부분을 뒤쪽으로 더 빼는 것도 뒤 유리창과 트렁크 끝부분의 연결각을 줄여서 공력적으로 유리하게 한 것임을 알 수 있다.

Table 5에서 F 차량의 경우는 측정된 C_{da} 의 값이 0.072였으나, 최소화시킨 값이 0.069이므로 10~30 카운트를 줄이기가 불가능하다. 즉, C_{da} 를 최대로 감소시킨 설계가 이루어진 차량이라고 할 수 있다.

Table 5 Optimization of special values

22.27	22.13	0.108	22.155	0.108	22.056	0.108
25.2	24.056	1	22.882	1	21.822	1
19.5	18.057	0.088	16.577	0.088	15.064	0.078
86.05	86.05	0.117	86.05	0.117	86.05	0.117
25.3	24.044	1	22.837	1	21.817	1
20.62	18.934	0.107	17.432	0.097	15.954	0.087
5	5	0.103	5	0.103	5	0.103
25.43	24.264	1	23.111	1	21.913	1
19.36	17.902	0.093	16.461	0.083	15	0.073
85	84.951	0.135	84.902	0.135	84.852	0.135
28.79	27.907	1	27.012	1	26.118	1
20.75	19.512	0.125	18.259	0.115	17.005	0.105
9.33	9.259	0.104	9.173	0.104	9.015	0.104
24.83	23.444	1	21.897	1	18.222	1
18.17	16.46	0.094	15	0.084	15	0.074
7.17	*	0.072	*	0.072	*	0.072
15.76	*	1	*	1	*	1
19.22	*	*	*	*	*	*

Table 6 Optimal values of r_b, θ and ϕ for maintaining constant C_{da} When A, A_i and A_b are changed

2.17	2.149	2.148	2.176	2.178	2.202	2.202	2.222	2.222
1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090
1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090
0.816	0.7499	0.7499	0.753	0.753	0.785	0.785	0.88	0.88
0.974	1.084	1.084	1.084	1.084	1.023	1.023	0.96	0.96
1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469
1038.3779	1038.3779	1038.3779	1038.3779	1038.3779	1038.3779	1038.3779	1038.3779	1038.3779
66.05	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05
25.3	25.3	24.623	25.3	24.798	25.3	25.435	25.3	25.235
20.62	20.62	19.744	20.62	19.971	20.62	20.796	20.62	20.536
0.117		0.117		0.117		0.117		0.117

5.2 동일한 공력저항계수를 유지하기 위한 형상인자 예측

설계자가 개발한 차량을 풍동실험하여 요구하는 공력저항계수값을 예측했으나, 특정 형상인자들이 설계상의 이유로 변경되어야 하는 경우가 있다. 이 경우에는 요구하는 공력저항계수값을 만족하기 위해 변화된 형상인자를 제외한 다른 형상인자를 바꿀 필요가 있다.

Table 6은 B 차량의 모델에서 면적 형상인자 A (total projected frontal area of car), A_i (projected inclined rear surface area), A_b (projected 'base' area)가 변경되었을 때, r_b, θ, ϕ 의 예측한 결과를 나타내었다. 초기값에서 크게 벗어나지 않았으며, r_b 의 값은 초기값을 유지하였고, θ 와 ϕ 는 조금씩 줄어든 값으로 수렴하였다. Table 6에서 W_b (width of trunk trailing edge), W_o (width of trunk trailing edge), H (overall body height), rr (mean radius of roof trailing edge)를 각각 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 자동차의 공력저항계수를 예측할 수 있는 경험적 기법을 이용한 공력저항 예측 프로그램을 개발하였으며, 여러 실차 모델에 대해 공력저항 계수를 예측하였고, 최적화 기법을 부가하여 최적의 공력저항 계수값들을 예측하였다. 따라서 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 개발한 공력저항계수 예측 프로그램을 사용하여 기존 차종에 대하여 검증하였다. 그 결과 Rose의 실험값과 평균 오차율은 4.87%였으며, Guan의 실험값과 평균 오차율은 5.5%로 예측하였다. 즉, 개발된 프로그램이 공력저항계수값을 적절히 예측한다는 것을 확인하였다.

2) 국내 자동차회사의 양산중인 6개 차종에 대해 차량 공력저항계수를 실험값과의 평균 오차율 4.857%로 예측하였다.

3) 국내 자동차 6대 중 3개 모델에서는 5% 이상의 큰 오차를 가졌다. 이것은 형상인자 측정에서 같은 측정기준을 적용함으로 인한 오차로 판단되어 특이한 차량 형상에 대한 적절한 측정기준의 연구가 요구된다.

4) 최적화 기법을 적용시킨 결과, 공력저항계수 저감 목표값을 선정하여 형상인자의 값을 결정할 수 있었으며, 개발하려는 차종의 형상인자를 변화시켰을 때, 동일한 공력저항계수를 유지하기 위한 수정 가능한 형상인자의 값을 결정할 수 있었다.

참고문헌

- (1) G. W. Carr, W. R. Stapleford, "A Proposed Empirical Method for Predicting the Aerodynamic Drag of Cars", MIRA, Report No. 1981/1.
- (2) M. J. Rose, "Appraisal and Modification of an Empirical Method for Predicting the Aerodynamic Drag of Cars", MIRA Research Report, 1984/1.
- (3) L. Guan, "Feature Based Aerodynamic Drag Coefficient Metamodel", Master's Thesis, University of Washington, Depart. of M.E.,

1995.

(4) S. S. RAO, "Engineering Optimization Theory and Practice", Third ed., John Wiley & Sons, 1996.

(5) S. Y. Lee, "Visual C++ 6.0 Programming Bible", youngjin, 1998.

(6) D. E. Calkins, W. T. Chan, "CDAero-A Parametric Aerodynamics Drag Prediction Tool", SAE 980398, pp.249-258, 1998.

(7) W. Hucho, "Aerodynamics of Road Vehicles", 4th Edition, SAE, 1998.