

자동차 공력저항 예측 프로그램 개발 및 형상인자의 최적화

Development of a Predicting Program of Vehicle Aerodynamic Drag and Optimization of Shape Parameters

한석영*, 맹주성*, 김무상**, 박재용***
Seog Young Han, Joo Sung Maeng, Moo Sang Kim, Jae Yong Park

ABSTRACT

Wind tunnel test or CFD is used for predicting aerodynamic drag coefficient in domestic motor companies. But, wind tunnel test requires much cost and time, and CFD has a relatively large error. In this study a predicting program of the aerodynamic drag coefficient based on empirical techniques was developed. Also GRG method was added to the program in order to decide optimal values of some parameters. The program was applied to 24 cars and the aerodynamic drag coefficients were predicted with 4.82% average error. Optimization was also accomplished to 6 cars. Some parameters to be modified were determined (1) to reduce the afterbody drag coefficient to the value established by a designer and (2) to preserve the same drag coefficient as the original automotive when some parameters have to be changed in the viewpoint of design. It was verified that the developed program can predict the aerodynamic drag coefficient appropriately and determine optimal values of some parameters.

1. 서론

자동차의 공력저항은 차량의 주행성능을 결정하는 중요한 요인이 되며, 공력저항이 적은 차량일수록 연비, 속도 및 주행소음 등 여러 면에서 유리하다. 현재, 국내 자동차 회사에서는 공력저항을 예측하는데 풍동실험이나 CFD를 이용하고 있다. 풍동실험에 의한 측정방법은 정확한 예측이 가능하다는 장점이 있으나 많은 시간과 비용이 필요로 하며, CFD를 이용한 예측방법도 실험에 비해 비용은 적게 들지만 계산 시 많은 시간이

소요된다. 또한, 이 방법은 차체 주위의 난류유동을 적절히 모사할 수 있는 난류 모델의 선정문제 등으로 그 정확성이 의문시된다.

지난 30년간, 풍동실험과 CFD의 단점을 보완할 수 있는 경험적 기법을 사용하여 자동차의 공력저항을 예측하려는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 1981년에 Carr¹⁾가 Motor Industry Research Association(MIRA) 에서 경험적 기법을 이용한 공력저항계수 예측식을 개발하였고, 1984년에 Rose²⁾가 Carr의 예측식에 사용된 형상인자의 측정방법을 개선하였으며, 1995년에 Guan³⁾이 Carr와 Rose의 예측식에 사용된 형상인자의 측정방법을 차량의 형상에 따라 다르게 적용하였다.

본 연구에서는 Carr의 공력저항계수 예측식과

* 회원, 한양대학교 기계공학부

** 회원, 현대자동차 연구소

*** 회원, 한양대학교 자동차공학과

Guan의 측정방법을 이용하여 윈도우 상에서 운용할 수 있는 공력저항 예측 프로그램을 개발하였고, 기존의 24개 차종에 대한 공력저항을 예측하여 실험값과 비교함으로써 타당성을 검증하였다. 또한, 차량의 공력저항을 감소하고자 하는 경우나 설계상 차량의 형상을 불가피하게 수정해야 할 경우, 설계자가 목표로 하는 공력저항 값을 갖도록 형상인자의 수정을 위해 최적화 기법을 부가하였다.

2. 경험적 기법 및 최적화 기법

2.1 경험적 기법

Carr는 자동차의 전 공력저항계수를 구하기 위해 Fig. 1과 같이 먼저 크게 3부분으로 나누고, 그 3부분을 다시 13개의 요소로 나누었다. 3부분은 차체 공력저항(body drag), 외부 공력저항(protuberance drag), 내부 공력저항(internal drag)으로 이루어진다. 그 중에서 차체 공력저항은 5개 요소, 외부 공력저항은 7개 요소, 내부 공력저항은 1개 요소로 이루어진다. Fig. 1에서 C_{di} 는 i 번째의 공력저항계수를 나타낸다.

전 공력저항계수는 식 (1)과 같이 각각의 요소 공력저항계수의 합으로 구해진다.

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

1984년에 개발된 Rose의 경험적 기법은 Carr의 13개 경험식과 동일하지만, C_{d7} (바퀴), C_{d9} (외부 후사경), C_{d13} (냉각계)의 3부분 요소의 형상인자의 측정방법이 다르다. 예를 들면, C_{d7} 예측식의 형상인자 α (mean ground clearance under sills)를 Carr는 차량 측면도에서 차량 앞바퀴를 감싸고 있는 부분(앞휀다 아래부분)의 아래부터 평균 지면 높이로 측정하였지만, Rose는 차량 정면에서 보았을 때 범퍼에 가려진 부분을 제외하고 보이는 부분의 타이어 평균높이로 측정하였다.

Guan의 경험적 기법은 C_{d7} , C_{d9} , C_{d13} 의 요소공력저항에서 Carr와 Rose의 측정방법을 차량의 형상에 따라 다르게 적용하였다. 본 논문에서는

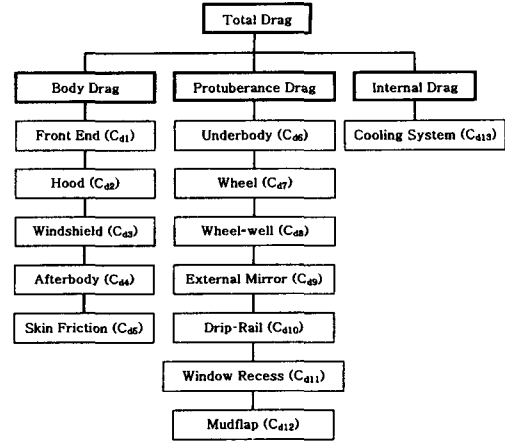


Fig. 1 Carr's classification of total aerodynamic drag

전 공력저항계수의 예측을 위해 Carr와 Rose의 예측식에 Guan의 측정기준을 적용한 공력저항 예측 프로그램을 개발하였다.

2.2 최적화 기법

차량의 공력저항을 감소하고자 하는 경우나 설계상 차량의 형상을 불가피하게 수정해야 할 경우, 설계자가 목표로 하는 공력저항 값을 갖도록 형상인자의 수정을 위해 최적화 기법인 일반화된 환산경사법⁴⁾(GRG법: Generalized Reduced Gradient method)을 부가하였다. GRG법은 등호 제약조건을 가진 문제를 풀기 위해 제안된 환산경사법의 확장형이다.

GRG법의 정의를 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. 공력저항 예측 프로그램

본 연구의 공력저항계수 예측 프로그램은 비

주얼 C++(Ver. 6.0)를 이용하여 개발되었으며, 윈도우 95~XP까지의 모든 버전에서 사용할 수 있다. Fig. 2는 주 창(main window)을 나타낸다.

본 연구에서 개발된 공력저항계수 예측 프로그램을 검증하기 위하여 Rose²⁾와 Guan³⁾의 참고 문헌에 있는 24대의 자동차 형상에 대한 풍동실험값과 비교하여 Table 1에 나타내었고, 그 오차를 Fig. 3에 나타내었다.

비교한 결과 평균 오차율 4.82%로 비교적 정확하게 예측됨을 확인할 수 있었다. 또한, 13개 부분의 공력저항계수의 크기도 거의 유사하게 나타났으며, C_{d4} , C_{d6} , C_{d7} , C_{d1} , C_{d8} 의 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다.

24대의 차량 중에서 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 13,

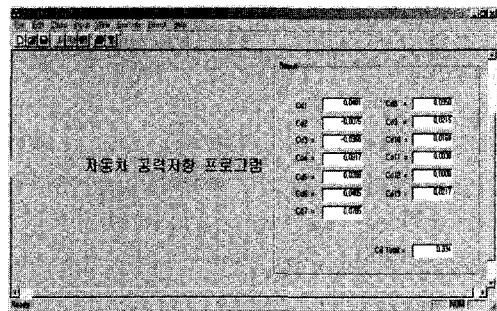


Fig. 2 Main window of Cd predicting program

Table 1 Comparison of the prediction of Cd between experimental results and this study

Car No.	pre. Cd	exp. Cd	Car No.	pre. Cd	exp. Cd
1	0.427	0.43	13	0.43304	0.433
2	0.36491	0.405	14	0.40305	0.419
3	0.46	0.48	15	0.49103	0.559
4	0.451	0.468	16	0.37261	0.415
5	0.4159	0.436	17	0.37988	0.385
6	0.41153	0.423	18	0.43109	0.422
7	0.49137	0.497	19	0.41481	0.433
8	0.44014	0.484	20	0.27443	0.3
9	0.41853	0.413	21	0.31021	0.31
10	0.42496	0.448	22	0.3339	0.29
11	0.3931	0.412	23	0.33433	0.346
12	0.38329	0.434	24	0.32575	0.326

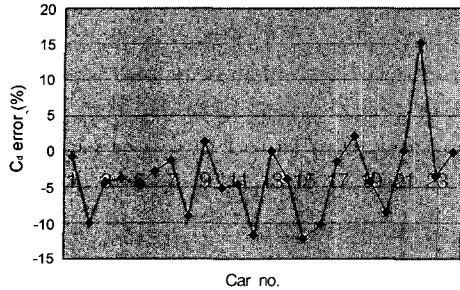


Fig. 3 Comparison of the prediction of Cd between experimental results and this study

16, 17, 20번은 해치백(Hatchback) 스타일, 5, 7번은 웨건(Wagon) 스타일, 9, 12, 14, 18, 24번은 중형세단(Midsize) 스타일, 15번은 스포츠유틸리티(SUV, 4×4형 포함) 스타일, 19, 22번은 대형세단(Fullsize, Luxury car) 스타일, 21, 23번은 스포츠카(Sportscar) 스타일이다.

24대의 비교 차량 중 22번은 약 15%의 큰 오차를 보였는데, 이는 형상인자 측정 시 다른 차량과 동일한 측정기준 적용의 모호성에 기인한 오차³⁾라고 생각된다.

4. 최적화 기법의 적용

4.1 특정값 예측

설계자는 풍동실험에서 측정된 공력저항계수보다 10 또는 30 카운트를 줄이기 위해 형상인자를 수정해야 할 경우가 있다. 여기서, 10 카운트란 공력저항계수의 소수 둘째 자리를 의미한다.

한 예로서, 본 연구에서는 공력저항계수를 10 또는 30 카운트를 줄이기 위해, 공력저항계수에 가장 영향이 큰 C_{d4} 에 대하여 적용하였다. 국내에서 제작 중인 6대 차량에 대해 민감도가 가장 큰 형상인자인 r_b (트렁크 상단 끝부분의 반경), θ (뒷 유리창의 경사각), ϕ (뒷 유리창 천장과 트렁크 끝부분의 연결각)를 GRG법을 이용하여 최적화하였다.

Table 2에 10 카운트와 30 카운트를 감소시키기 위한 r_b , θ , ϕ 의 최적값들을 나타내었다.

Table 2 Optimization for a specified values of C_{d4}

		Input	Optimum	Reduce 10 counts	Optimum	Reduce 20 counts	Optimum	Reduce 30 count
A	rb	22.27	22.13	0.108	22.155	0.108	22.096	0.108
	theta	25.2	24.056	↓	22.882	↓	21.682	↓
	phi	19.5	18.057	0.098	16.577	0.088	15.064	0.078
B	rb	66.05	66.05	0.117	66.05	0.117	66.05	0.117
	theta	25.3	24.044	↓	22.837	↓	21.617	↓
	phi	20.62	18.994	0.107	17.432	0.097	15.854	0.087
C	rb	5	6	0.103	5	0.103	5	0.103
	theta	25.43	24.264	↓	23.111	↓	21.913	↓
	phi	19.36	17.802	0.093	16.461	0.083	15	0.073
D	rb	65	64.851	0.135	64.902	0.135	64.852	0.135
	theta	28.79	27.907	↓	27.0112	↓	26.118	↓
	phi	20.75	19.512	0.125	18.259	0.115	17.005	0.105
E	rb	9.33	9.259	0.104	9.173	0.104	9.015	0.104
	theta	24.83	23.444	↓	21.697	↓	18.222	↓
	phi	18.17	16.48	0.094	15	0.084	15	0.074
F	rb	7.17	*	0.072	*	0.072	*	0.072
	theta	15.76	*	↓	*	↓	*	↓
	phi	15.22	*	*	*	*	*	*

A~E 차량의 최적화 결과로부터 θ 와 ϕ 가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 공력저항 측면에서 유리한 차량일수록 뒷 유리창의 경사각과 뒷 유리창 천장 및 트렁크 끝부분의 연결각이 감소해야 한다는 것을 의미한다.

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

Table 2에서 F차량의 경우는 측정된 C_{d4} 의 값이 0.072였으나, 최소화시킨 값이 0.069이므로 10~30 카운트를 줄이기가 불가능하다. 즉, 이 차량의 경우는 C_{d4} 를 최대 0.069까지 감소시킬 수 있음을 나타낸다.

4.2 동일한 공력저항을 유지하기 위한 형상인자 예측

스타일링이 완료된 차량의 특정 형상인자들이 설계상의 이유로 변경되어야 하는 경우가 있다. 이 경우에는 요구하는 공력저항을 유지하기 위해 불가피하게 변경한 형상인자를 제외한 다른 형상인자를 수정할 필요가 있다.

Fig. 4는 설계변수 A, A_i, A_b, r_b, theta, phi, W_b, W_o, H, r_r의 측정방법을 나타낸다. Table 3은 Table 2의 B 차량 모델에서 면적 형상인자 A, A_i, A_b를 불가피하게 수정하는 4가지 경우에 대하여, W_b, W_o, H, r_r를 고정된 상태에서 나머지 형상인자 r_b, theta, phi의 최적화한 결과를 나타내었다. 4가지 경우 모두 r_b의 값은 초기값을 그대로 유지하였고, theta와 phi는 조금씩 감소된 값으로 수렴하였다.

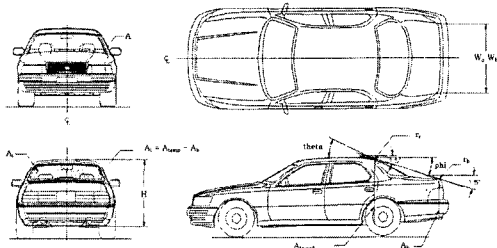


Fig. 4 Design variables for C_{d4}³⁾

Table 3 Optimal values of r_b, theta and phi for maintaining a constant Cd₄ when A, A_i and A_b are changed

C _{d4}	B model	1	Optimum	2	Optimum	3	Optimum	4	Optimum
A	2.17	2.148	2.148	2.176	2.176	2.202	2.202	2.222	2.222
W _o	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090
W _b	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090
A _i	0.818	0.7499	0.7499	0.753	0.753	0.765	0.88	0.88	0.88
A _b	0.974	1.084	1.084	1.084	1.084	1.023	1.0223	0.96	0.96
H	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469	1248.469
r _r	1038.377	1038.377	1038.377	1038.377	1038.377	1038.377	1038.377	1038.377	1038.377
r _b	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05	66.05
theta	25.3	25.3	24.623	25.3	24.798	25.3	25.435	25.3	25.235
phi	20.62	20.62	19.744	20.62	19.971	20.62	20.795	20.62	20.536
C _{d4}	0.117		0.117		0.117		0.117		0.117

5. 결론

본 연구에서는 자동차의 공력저항을 예측하기 위해 경험적 기법을 이용한 공력저항계수 예측프로그램을 개발하였으며, 설계자가 목표로 하는 공력저항 값을 갖도록 형상인자의 수정이 가능하도록 최적화 기법을 부가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 개발된 공력저항 예측 프로그램을 사용하여 기존의 24 차종에 대하여 풍동실험값과 비교한 결과 평균 오차율은 4.82%이었다. 즉, 개발된 프로그램이 공력저항계수를 적절히 예측함을 검증하였다.

2) 최적화 기법에 의해 공력저항계수 저감 목표값에 맞는 최적의 형상인자의 값을 결정할 수 있었다.

3) 스타일링 완료 후에 불가피하게 차량의 형상인자를 변화시켜야 하는 경우, 최적화 기법에 의해 동일한 공력저항계수를 유지하기 위한 최적의 형상인자의 값을 결정할 수 있었다.

참고 문헌

- 1) G. W. Carr, W. R. Stapleford, "A Proposed Empirical Method for Predicting the Aerodynamic Drag of Cars," MIRA, Report No. 1981.
- 2) M. J. Rose, "Appraisal and Modification of an Empirical Method for Predicting the Aerodynamic Drag of Cars," MIRA Research Report, 1984.
- 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 Publication Ltd., 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.