creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000241162

2011년 2월
석사학위논문

모형시험결과의 통계적 해석방법에 의한 Bulk Carrier저항성능 추정에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

선박해양공학과

김 만 기

모형시험결과의 통계적 해석방법에 의한 Bulk Carrier 저항성능 추정에 관한 연구

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

선박해양공학과

김 만 기

모형시험결과의 통계적 해석방법에 의한 Bulk Carrier 저항성능 추정에 관한 연구

지도교수 이 귀 주

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

선박해양공학과

김 만 기

김만기의 석사학위논문을 인준함

위원장 박제웅 (인)

위 원 이귀주 (인)

위 원 슈 건(인)

2010년 12월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

List Of Tables .....
List Of Figures .....
Nomenclatures .....
Abstract .....
제 1장 서론 .....
1.1 연구배경 .....
1.2연구 목적 및 내용 .....
제 2장 통계해석 이론 .....
2.1 상관분석 .....
2.2 회귀분석 .....
제 3장 저항시험결과의 통계해석 .....
3.1 표본자료의 범위 .....
3.2 회귀모델의 변수 선정 .....
3.3 모형시험자료의 상관분석 .....
3.4 유효마력추정을 위한 회귀모델 .....
제 4장 결과 분석 .....
4.1 회귀추정식 평가 .....
4.3 회귀식을 이용한 유효마력 추정검토 .....
제 5장 결론 .....
참고문헌 .....
부록 .....

List Of Tables

Table.1 DWT에 따른 모형시험 자료 척수	.....	
Table.2 선형변수데이터	.....	
Table.3 각 변수별 상관계수	.....	
Table.4 선정된 변수들 상호간의 상관계수	.....	
Table.5 선정된 변수들에 대한 상관계수	.....	
Table.6 EHP/▽에서 각 속도별 변수에 대한 상관계수	.....	
Table.7 각 속도별 회귀계수, 중상관계수, 표준오차추정	.....	
Table.8 속도에 따른 중상관계수와 표준오차	.....	
Table.9 실험값과 예측값의 비교	.....	

List Of Figures

Fig.1 선형요소와의 성관계수	.....	
Fig.2 EHP/▽와 선형변수에 대한 산점도	.....	
Fig.3실험값과 예측값의 비교	.....	
Fig.4 모형실험값과 예측값의 비교	.....	

Nomenclatures

Lpp Length between perpendiculars (m)
Lwl Length of designed load waterline (m)
B Breadth moulded (m)
D Depth moulded (m)
d Draught moulded (m), suffix a : aft, m : midsection, f : fore
C_B , Cb Block coefficient C_B ,Cb =▽/(Lpp · B · d)
Cp Prismatic coefficient $Cp=C_B/C_M$
C_M , Cm Midship section coefficient $C_M=A_M/(B.d)$
A_M Area of midship section
C_W Waterplane coefficient $C_W=A_W/(Lpp.B)$
A_W Area of waterplane
Lcb Longitudinal center of buoyancy from midship in persent of Lpp
(for fore from midship (－) and for aft (＋))
▽ Displacement volume of hull only (m^3)
▽cs Displacement volume of center skeg (m^3)
▽sp Displacement volume of strut & pod (m^3)
▽tot Displacement volume of total volume (m^3)
Δ Displacement weight of total volume (ton)
S Wetted surface with all appendages (m^2)
S_0 Naked wetted surface (m^2)
Sr Rudder wetted surface (m^2)
Sb Bilge Keel wetted surface (m^2)
Scs Center keel wetted surface (m^2)
Ssp Strut & pod wetted surface (m^2)

I Immersion of shaft center line at propeller plane (m)
Hs Shaft center height at propeller plane (m)

Abstract

A study on the resistance performance estimation method of Bulk Carrier by statical analysis of result of model test

Advisor : Prof, Lee, Kwi-joo, PH.D.
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Graduate School of Chosun University

This Paper was performed to develop a Bulk Carriers From the results of model tests, statistical regression equation for hull form parameters which influence resistance was adopted in this study. The statistical methods of predicting the resistance and propulsion characteristics of the ship were studied. For similar class Bulk Carrier development, the method was developed to determine hull form parameters with low resistance at the initial design stage.
It was described statistical analysis method of the model test results, and the prediction method of hull scale performance using regression formulas and effective horsepower estimation calculation was developed to predict resistance and propulsive performance by Excel. In this procedure, example hull form was calculated by estimation Calculation experimentally, and that results compared with predictive values.

Abstract

A study on the resistance performance estimation method of Bulk Carrier by statical analysis of result of model test

Advisor : Prof, Lee, Kwi-joo, PH.D.
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Graduate School of Chosun University

This Paper was performed to develop a Bulk Carriers From the results of model tests, statistical regression equation for hull form parameters which influence resistance was adopted in this study. The statistical methods of predicting the resistance and propulsion characteristics of the ship were studied. For similar class Bulk Carrier development, the method was developed to determine hull form parameters with low resistance at the initial design stage.

It was described statistical analysis method of the model test results, and the prediction method of hull scale performance using regression formulas and effective horsepower estimation calculation was developed to predict resistance and propulsive performance by Excel. In this procedure, example hull form was calculated by estimation Calculation experimentally, and that results compared with predictive vals.

제 1장 서 론

1.1 연구 배경

선박은 다른 제품들과 달리 시제품을 만들어 대량생산하는 산업과 달리 시제품을 만들어 볼 수 없기 때문에 선박의 성능을 미리 추정하는 것이 매우 중요하다. 선박의 저항성분을 정확히 추정하는 것은 선박의 속도와 경쟁력과 큰 영향을 가지고 있다. 선박의 저항성분을 분류하면 크게 마찰저항과 조파저항, 형상저항으로 나누어진다. 그러나 마찰저항은 ITTC곡선으로 구하게 되므로 조파저항과 형상저항이 저항성능 추정의 목표가 된다. 저항 추정을 하기 위해서는 모형실험에 의한 방법, 이론계산에 의한 방법, 통계해석에 의한 방법이 있다. 모형 시험 방법은 저항추정방법 중 가장 정확하나 시간과 비용이 많이 들며, 이론계산방법은 계산기법의 한계로 인해 실험값과 많은 차이점이 보이는 단점을 가지고 있다. 통계적 회귀분석에 의한 방법은 추진성능에 영향을 크게 미치는 선형 파라메타(parameter)를 선정하고, 모형시험으로부터 얻어지는 추진성능자료를 통계적으로 분석함으로써 선형 파라메타를 독립변수로 하는 추진성능추정식을 도출하는 방법이다. 이 방법은 양질의 실적 데이터가 충분히 축적되어 있을 경우 초기 선형 계획 단계에서 신속하게 저항성능을 추정할 수 있기 때문에 선박 설계에 널리 이용되고 있다.

회귀분석에 의한 방법은 조직적인 모형선 계열에 대한 저항성능 자료 이외에도 서로 연관이 없는 많은 임의의 선형에 대한 수조시험자료를 함께 이용할 수 있으며, 논리적으로 성능을 추정할 수 있으며, 나아가 선형개량을 위한 자료도출도 꾀할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 사용되는 회귀방정식이 저항추진계수와 선형치수들 사이에서 단순한 통계해석에 의해 얻어지는 것이므로 각 항의 물리적 의미가 명확하지 않은 단점이 있다.

1.2 연구 목적 및 내용

본 논문에서는 회귀분석을 이용한 성능 추정 법을 고찰하였으며 Bulk

Carrier의 선형들에 대한 모형시험 자료를 토대로 엑셀 범용 프로그램을 이용하여 유효마력을 추정할 수 있는 회귀방정식을 만든데 목적이 있다.

Bulk Carrier의 초기 개발단계에서 통계적 해석방법을 통하여 경제적이고 신속하게 배의 저항을 추정하고, 주요선형요소 결정에 이용할 수 있는 방법을 정립하기 위해 연구를 수행하였다. 회귀방정식이 Bulk Carrier의 기본 설계시 이용될 수 있음을 입증하고자 한다.

통계 해석을 위해 사용된 자료는 조선대학교 수행한 Bulk Carrier 모형시험 자료와 모형시험자료가 공개된 Bulk Carrier 62척의 선형이다. 자료의 범위는 방형비척 계수 Cb = 0.75 ~ 0.85이며 속도범위는 12 ~ 15knots이다.

제 2장 통계해석 이론

2.1 상관분석

상관분석은 일반적으로 변수들 간의 선형관계의 정도를 분석하는 방법으로 목적은 보다 정확한 회귀분석결과를 도출하기 위해 적절한 변수를 선정하는 것이다. 두 개의 변수 X와 Y사이에 한쪽의 변화가 다른 쪽의 변화에 영향을 주는 경향이 있을 때 X와 Y사이에는 상관관계가 있다고 한다. 예를 들어 X와 Y 두변수 사이의 상관관계를 알고자 할 때 우선 두 변수에 대한 신뢰할 수 있는 확률표본을 취하고 이 자료를 바탕으로 두 변수간의 선형관계를 통계적으로 규명하는 것을 상관분석이라고 한다. 함수관계의 경우 어떤 변량 y가 다른 변량 x에 의하여 정확하고 일정하게 결정되나, 상관관계라 함은 그 관계가 일정하게 정하여 지는 것이 아니고 어떤 범위 내에서 평균적으로 정해지게 된다. 두 변수간의 상관관계의 정도를 표본으로부터 수량적으로 표현한 상관계수라 하며 다음과 같이 정의한다.

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2 \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \overline{Y})^2}}$$

$$= \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2 \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \overline{Y})^2}}$$

$$= \frac{S_{XY}}{S_X S_Y}$$

여기서, S_{XY}는 표본 공분산이며 S_X, S_Y는 각각 X와 Y의 표준편차이다.

상관계수의 성질은 다음과 같다.

(1) r_{XY}의 값의 범위는 항상 $-1 \le r_{XY} \le 1$에 있다.

(2) $r_{XY}=0$이면 X와 Y사이에 상관이 없으며, $r_{XY}=\pm 1$이면 완전상관이라 한다.

(3) ${r_{XY}}^2$은 Y의 변동 $\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \overline{Y})^2$중에서 최소자승법에 의해 얻어지는 직선회귀의 변동이 차지하는 비율을 의미한다.

(4) 상관계수는 두 변수간의 선형관계를 나타내는 척도이지 함수관계를 알아보는 척도는 아니다.

2.2 회귀분석

회귀분석이란 독립변수와 종속변수들 간의 관련성을 수학적 모형을 이용하여 측정된 변수들의 자료로부터 추정하고 분석하는 통계적 방법을 말한다. 다시 말해 하나 이상의 독립변수의 값을 알면 종속변수의 값을 예측할 수 있게 된다. 여기서 예측 값의 신뢰도는 변수간의 상관정도에 달려 있으므로 변수선정이 중요하게 된다.

일반적인 함수관계식은 다음과 같이 표시한다.

$$Y = f(X_1, X_2, \cdot\cdot\cdot, X_n)$$

회귀모형을 분석하는 경우에 일반적으로 연속분포인 정규분포를 따른다고 가정하며 여기서 다루게 될 선형회귀분석은 변수간의 관계에 따라 다음과 같이 구분한다.

◎ 회귀분석에서의 가정

- 오차 ϵ은 정규분포를 따른다.

- 오차 ϵ의 평균값은 0이다.
- 서로 다른 두 개의 오차는 서로 독립적이다.
- 오차 ϵ은 모든 X_i, i=1,2,⋯,n의 값에서 동일한 분산을 갖는다.

(1) 단순회귀

하나의 독립변수를 가지며 독립변수의 차수가 1차인 선형함수로써 직선적인 비례관계가 있다고 가정한다.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i$$

여기서

Y_i : i번째 측정된 Y값

β_0, β_1 : 모집단 회귀계수이며 β_0는 절편이 되고 β_1은 기울기가 된다.

X_i : i번째 주어진 고정된 값

ϵ_i : i번째 측정된 Y_i의 오차 항으로 서로 독립이며 정규분포로 가정

(2) 중회귀

독립변수가 2개 이상이고, 종속변수와의 관계를 1차함수로 가정한다. 하나의 종속변수(Y)와 두 개의 독립변수(X_1, X_2)사이에 다음과 같은 관계식이 성립한다고 하자.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_2 + \epsilon$$

여기서 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$는 모집단의 회귀계수이고, ϵ은 Y를 추정할 때 발생되는 오차이다.

이제 n개의 관찰점을 (X_{11}, X_{21}, Y_1), (X_{12}, X_{22}, Y_2),⋯,(X_{1n}, X_{2n}, Y_n)이라 표시

하면

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \epsilon_j \qquad \text{j=1,2,}\cdots\text{,n}$$

여기서,

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$: 모집단 회귀계수로서 모수(parameter)
X_{1i}, X_{2i} : i번째 주어진 독립변수 X_1와 X_2의 고정된 값
ϵ_i : i번째 측정된 Y_i의 오차 항으로 서로 독립이며 정규분포로 가정

(2-5)식을 0으로 만드는 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$의 추정치를 b_0, b_1, b_2라고 하면 $\widehat{Y}_i$의 추정치는 다음과 같다.

$$\widehat{Y}_i = b_0 + b_1 X_{1j} + b_2 X_{2j}$$

따라서 b_0, b_1, b_2를 최소자승법에 의해 구하려면 다음의 오차자승합

$$S = \sum_{j=1}^{n} \epsilon_j^2 = \sum_{j=1}^{n} (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_{1j} - \beta_2 X_{2j})^2$$

을 최소로 하는 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$의 값을 구하면 된다. (2-7)식을 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$에 대하여 각각 편미분하여 영으로 놓으면

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_0} = 2\sum_{j=1}^{n} (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_{1j} - \beta_2 X_{2j})(-1) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_1} = 2\sum_{j=1}^{n} (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_{1j} - \beta_2 X_{2j})(-X_{1j}) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_2} = 2\sum_{j=1}^{n}(Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_{1j} - \beta_2 X_{2j})(-X_{2j}) = 0$$

(2-8)식을 서로 만족하는 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$의 값을 b_0, b_1, b_2라 놓으면 다음과 같은 정규방정식이 얻어진다.

$$\sum_{j=1}^{n} Y_j = nb_0 + b_1\sum_{j=1}^{n} X_1^2 + b_2\sum_{j=1}^{n} X_{2j}$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_{1j}Y_j = b_0\sum_{j=1}^{n} X_{1j} + b_1\sum_{j=1}^{n} X_{1j}^2 + b_2\sum_{j=1}^{n} X_{1j}X_{2j}$$

$$\sum_{j=1}^{n} X_{2j}Y_j = b_0\sum_{j=1}^{n} X_{2j} + b_1\sum_{j=1}^{n} X_{1j}X_{2j} + b_2\sum_{j=1}^{n} X_{2j}^2$$

여기서 b_0, b_1, b_2는 최소자승법에 의한 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$의 추정치이다. 이 정규방정식은 세 개의 미지수(b_0, b_1, b_2)를 포함하고 있는 연립방정식으로서 이를 풀면 b_0, b_1, b_2를 얻을 수 있다.

$$b_1 = \frac{(\sum_{i=1}^{n} X_{1i}Y_i)(\sum_{i=1}^{n} X_{2i}^2) - (\sum_{i=1}^{n} X_{2i}Y_i)(\sum_{i=1}^{n} X_{1i}X_{2i})}{(\sum_{i=1}^{n} X_{1i}^2)(\sum_{i=1}^{n} X_{2i}^2) - (\sum_{i=1}^{n} X_{1i}X_{2i})^2}$$

$$b_2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n} X_{2i}Y_i)(\sum_{i=1}^{n} X_{1i}^2) - (\sum_{i=1}^{n} X_{1i}Y_i)(\sum_{i=1}^{n} X_{1i}X_{2i})}{(\sum_{i=1}^{n} X_{1i}^2)(\sum_{i=1}^{n} X_{2i}^2) - (\sum_{i=1}^{n} X_{1i}X_{2i})^2}$$

$$b_0 = \overline{Y} - b_1\overline{X_1} - b_2\overline{X_2}$$

이와 같은 방법은 독립변수가 많아지면 연립방정식은 더욱 복잡한 모양이 되어 풀이가 어렵게 되므로 중회귀 분석에서는 거의 대부분 행렬식을 사용하여

계산하게 된다. 중회귀모형에 대해 회귀방정식, 분산분석표, 잔차를 구하고 또한, 잔차를 그래프로 나타낼 수 있도록 하였다. 또한 중회귀 모형에 대한 기본적인 통계량으로써 변수들의 평균, X와 Y간의 상관계수, 중회귀 모형의 중상관계수, 추정치의 평균오차 등이 얻어진다.

(3) 다항회귀

독립변수가 1개 이상이고, 종속변수와의 관계를 1차 이상의 함수로 가정한다. 일반적으로 k차 다항회귀모형은 측정치 Y_i에 대하여

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_j + \beta_2 X_j^2 + \cdot\cdot\cdot + \beta_k X_j^2 \qquad j=1,2,\cdots,n$$

이며

$X_{1j} = X_j,\ X_{2j} = X_j^2,\ \cdots\ ,\ X_{kj} = X_j^k$ 라고 놓으면

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \cdot\cdot\cdot + \beta_k X_{kj} + \epsilon_j \qquad j=1,2,\cdots,n$$

로 되어 독립변수가 k개가 있는 중회귀모형이 된다. 따라서 중회귀분석방법을 그대로 이용하면 되고, 하나의 독립변수를 갖는 다항회귀모형은 중회귀모형의 특별한 경우로 생각할 수 있다.

본 논문에서는 변수의 성격과 계산의 효율성을 고려하여 중회귀 모형을 선정하였다.

제 3장 저항시험 결과의 통계해석

통계해석은 모집단에서 추출한 표본자료가 곧 결과의 신뢰도와 직결되므로 가능한 신빙성 있는 많은 양의 자료가 요구되어진다. 일반 상선이나 어선의 경우, 통계해석 방법에 의한 선형개발에서는 오랜 경험으로 많은 양의 자료들이 축적되어 사용되어지고 있다. 본 논문에서는 Bulk Carrier의 선종을 중점으로 통계해석을 함으로서, 기존 통계해석에 의한 방법보다 더 정확하고 신뢰성 있는 방법을 제시하고 기존선박과 개발선박에 적용함으로써 그 결과를 비교 분석하여 타당성을 검토하였다.

3.1 표본자료의 범위

본 논문에서는 조선대학교 수행한 Bulk Carrier 모형시험 자료와 모형시험 자료가 공개된 Bulk Carrier 62척의 자료를 이용하였다. 모든 자료는 만재상태의 것만을 사용하였으며, 속도범위는 12Knots ~ 15Knots에서의 값들을 사용하게 되었다. 상관분석을 통해 선정된 7개의 변수에 대한 자료는 Table.2에 나타냈다

DWT	척수
40000이하	5
40000~100000	12
100000~300000	45
합계	62

Table.1 DWT에 따른 모형시험 자료 척수

NO	K	BL	BA	BI	EA	RA	TAV
1	0.223	3.100	9.630	62.900	0.533	20.000	0.380
2	0.223	3.100	9.630	62.900	0.533	20.000	0.380
3	0.206	6.200	11.200	72.220	0.427	24.000	0.508
4	0.243	6.200	12.100	72.200	0.594	22.000	0.466
5	0.243	6.200	12.100	72.200	0.594	22.000	0.466
6	0.273	3.000	12.100	72.200	0.594	22.000	0.466
7	0.254	4.800	8.900	33.300	1.134	26.800	0.631
8	0.254	4.800	8.900	33.300	1.134	26.800	0.631
9	0.254	4.800	8.900	33.300	1.134	26.800	0.631
10	0.254	4.800	8.900	33.300	1.134	26.800	0.631
11	0.226	5.500	12.600	68.800	0.440	24.000	0.413
12	0.234	4.900	11.700	75.930	0.439	22.600	0.321
13	0.137	5.900	11.360	31.970	0.708	28.000	0.580
14	0.149	5.900	12.250	31.970	0.727	27.500	0.777
15	0.184	4.500	9.320	76.230	0.522	27.500	0.777
16	0.186	4.500	9.320	76.230	0.522	27.500	0.777
17	0.184	4.500	9.320	76.230	0.522	27.500	0.777
18	0.186	4.500	9.320	76.230	0.522	27.500	0.777
19	0.195	5.800	10.100	29.770	1.032	24.500	0.386
20	0.195	5.800	10.100	29.770	1.032	24.500	0.386
21	0.195	5.800	10.100	29.770	1.032	24.500	0.386
22	0.250	0.000	0.000	0.000	0.343	24.000	0.381
23	0.250	0.000	0.000	0.000	0.343	24.000	0.381
24	0.248	5.000	11.920	76.200	0.316	24.000	0.439
25	0.242	0.000	0.000	0.000	0.282	24.000	0.439
26	0.242	0.000	0.000	0.000	0.282	24.000	0.439
27	0.248	5.000	11.920	76.200	0.316	24.000	0.439
28	0.215	5.000	11.800	75.300	0.623	24.000	0.509
29	0.215	5.000	11.800	75.300	0.623	24.000	0.509
30	0.215	5.000	11.800	75.300	0.623	24.000	0.509
31	0.215	5.000	11.800	75.300	0.623	24.000	0.509
32	0.215	5.000	11.800	75.300	0.623	24.000	0.509

33	0.215	5.000	11.800	75.300	0.623	24.000	0.509
34	0.213	5.000	11.800	75.300	0.623	24.000	0.509
35	0.196	4.500	9.320	76.230	0.522	27.000	0.460
36	0.196	4.500	9.320	76.230	0.522	27.000	0.460
37	0.200	4.500	9.320	76.230	0.522	27.000	0.460
38	0.228	5.500	12.700	45.500	0.826	25.000	0.466
39	0.262	5.500	12.700	45.500	0.826	25.000	0.466
40	0.228	5.500	12.700	45.500	0.826	25.000	0.466
41	0.262	5.500	12.700	45.500	0.826	25.000	0.466
42	0.208	5.500	12.700	45.500	0.826	25.000	0.466
43	0.228	5.500	12.700	45.500	0.826	25.000	0.466
44	0.228	5.500	12.700	45.500	0.826	25.000	0.466
45	0.228	5.500	12.700	45.500	0.826	25.000	0.466
46	0.181	5.000	12.800	47.900	0.716	24.000	0.449
47	0.181	5.000	12.800	47.900	0.716	24.000	0.449
48	0.209	5.000	12.800	47.900	0.716	24.000	0.449
49	0.212	5.000	12.800	47.900	0.716	24.000	0.449
50	0.209	5.000	12.800	47.900	0.716	24.000	0.449
51	0.209	5.000	12.800	47.900	0.716	24.000	0.449
52	0.223	5.000	12.800	47.900	0.716	24.000	0.449
53	0.245	4.400	8.980	41.400	0.919	26.000	0.684
54	0.212	5.000	12.210	46.990	0.858	22.600	0.447
55	0.212	5.000	12.210	46.990	0.858	22.600	0.447
56	0.191	5.500	12.850	44.100	0.914	23.000	0.389
57	0.191	5.500	12.850	44.100	0.914	23.000	0.389
58	0.196	5.500	12.850	44.100	0.914	23.000	0.389
59	0.190	5.500	12.850	44.100	0.914	23.000	0.389
60	0.119	5.500	12.850	44.100	0.914	23.000	0.389
61	0.187	5.500	12.850	44.100	0.914	23.000	0.389
62	0.213	5.100	8.380	67.540	1.014	23.660	0.452

NO	EAR	PRO70	CLEA	DP/TA	L	T	L/T
1	0.500	0.745	2.400	0.482	282.4	17.000	16.610
2	0.420	0.715	2.400	0.482	282.4	17.000	16.610
3	0.420	0.711	2.300	0.521	280.0	16.500	16.970
4	0.461	0.748	2.500	0.484	280.0	18.000	15.560
5	0.461	0.759	2.500	0.484	280.0	18.000	15.560
6	0.461	0.759	2.500	0.484	280.0	18.000	15.560
7	0.560	0.748	2.600	0.533	175.0	11.100	15.770
8	0.560	0.748	2.600	0.534	175.0	11.100	15.770
9	0.560	0.781	2.600	0.534	175.0	11.100	15.770
10	0.560	0.783	2.600	0.534	175.0	11.100	15.770
11	0.524	0.731	4.000	0.482	282.4	17.000	16.610
12	0.445	0.723	3.900	0.498	259.0	16.620	15.580
13	0.445	0.723	2.350	0.582	215.0	12.200	17.620
14	0.445	0.723	2.400	0.582	215.0	12.200	17.620
15	0.524	0.731	2.400	0.532	215.0	12.20	17.620
16	0.530	0.779	2.400	0.597	215.0	12.200	17.620
17	0.538	0.728	2.400	0.533	215.0	12.200	17.620
18	0.538	0.838	2.400	0.594	215.0	12.200	17.620
19	0.560	0.781	2.450	0.515	215.6	13.100	16.460
20	0.538	0.782	2.450	0.515	215.6	13.100	16.460
21	0.538	0.782	2.450	0.515	215.6	13.100	16.460
22	0.456	0.720	3.000	0.483	300.0	18.000	16.670
23	0.455	0.737	3.000	0.483	300.0	18.000	16.670
24	0.455	0.737	2.500	0.541	256.0	14.500	17.660
25	0.455	0.737	2.500	0.541	256.0	14.500	17.660
26	0.490	0.708	2.500	0.541	256.0	14.500	17.660
27	0.490	0.708	2.500	0.539	256.0	14.500	17.660
28	0.455	0.737	2.650	0.460	259.0	17.400	14.890
29	0.455	0.737	2.650	0.460	259.0	17.400	14.890
30	0.467	0.733	2.650	0.454	259.0	17.400	14.890
31	0.455	0.737	2.650	0.460	259.0	17.400	14.890
32	0.467	0.733	2.650	0.454	259.0	17.400	14.890

33	0.459	0.750	2.650	0.460	259.0	17.400	14.890
34	0.467	0.733	2.650	0.454	259.0	17.400	14.890
35	0.518	0.839	2.400	0.594	215.0	12.200	17.620
36	0.458	0.843	2.400	0.594	215.0	12.200	17.620
37	0.458	0.843	2.400	0.594	215.0	12.200	17.620
38	0.458	0.729	3.000	0.462	264.0	16.900	15.620
39	0.480	0.754	3.000	0.485	264.0	16.900	15.620
40	0.476	0.704	3.000	0.463	264.0	16.900	15.620
41	0.480	0.754	3.000	0.485	264.0	16.900	15.620
42	0.480	0.754	3.000	0.485	264.0	16.900	15.620
43	0.451	0.774	3.000	0.485	264.0	16.900	15.620
44	0.458	0.729	3.000	0.462	264.0	16.900	15.620
45	0.458	0.729	3.000	0.462	264.0	16.900	15.620
46	0.398	0.795	2.800	0.521	259.0	16.300	15.890
47	0.398	0.795	2.800	0.521	259.0	16.300	15.890
48	0.454	0.782	2.800	0.517	259.0	16.300	15.890
49	0.398	0.795	2.800	0.521	259.0	16.300	15.890
50	0.480	0.701	2.800	0.521	259.0	16.300	15.890
51	0.480	0.701	2.800	0.521	259.0	16.300	15.890
52	0.454	0.782	2.800	0.517	259.0	16.300	15.890
53	0.608	0.766	2.000	0.518	178.0	11.000	16.180
54	0.459	0.750	2.900	0.488	259.0	16.600	15.600
55	0.431	0.745	2.900	0.494	259.0	16.600	15.600
56	0.461	0.748	3.200	0.470	275.0	17.000	16.180
57	0.480	0.771	3.200	0.476	275.0	17.000	16.180
58	0.461	0.748	3.200	0.470	275.0	17.000	16.180
59	0.480	0.771	3.200	0.506	275.0	17.000	16.180
60	0.480	0.771	3.200	0.426	275.0	17.000	16.180
61	0.480	0.771	3.200	0.450	275.0	17.000	16.180
62	0.474	0.722	2.390	0.573	250.0	13.710	18.230

NO	L/B	B/T	S	▽2/3	100▽/L3	CB
1	6.376	2.547	19371	3178	0.796	0.829
2	6.376	2.547	19371	3178	0.796	0.829
3	5.933	2.809	19839	3246	0.843	0.836
4	5.933	2.567	20676	3447	0.922	0.836
5	5.933	2.567	20676	3447	0.922	0.836
6	5.933	2.567	20676	3447	0.922	0.836
7	6.350	2.423	7486.5	1242	0.817	0.804
8	6.350	2.423	7486.5	1242	0.817	0.804
9	6.350	2.423	7486.5	1242	0.817	0.804
10	6.350	2.423	7486.5	1242	0.817	0.804
11	6.76	2.547	19490	3177	0.795	0.829
12	6.123	2.487	17204	2857	0.879	0.825
13	6.777	2.539	10796	1710	0.712	0.837
14	6.777	2.539	10734	1706	0.709	0.834
15	6.777	2.539	10661	1704	0.708	0.833
16	6.777	2.539	10661	1704	0.708	0.833
17	6.777	2.539	10661	1704	0.708	0.833
18	6.777	2.539	10661	1704	0.708	0.833
19	6.797	2.358	10831	1754	0.733	0.808
20	6.797	2.358	10831	1754	0.733	0.808
21	6.797	2.358	10831	1754	0.733	0.808
22	6.100	2.678	22499	3719	0.840	0.840
23	6.100	2.678	22499	3719	0.840	0.840
24	6.433	2.688	15745.6	2530	0.759	0.848
25	6.433	2.688	15593	2530	0.759	0.848
26	6.433	2.688	15593	2530	0.759	0.848
27	6.433	2.688	15745	2530	0.759	0.848
28	6.123	2.371	17901	2982	0.938	0.840
29	6.123	2.371	17901	2982	0.938	0.840
30	6.123	2.371	17901	2982	0.938	0.840
31	6.123	2.371	17901	2982	0.938	0.840
32	6.123	2.371	17901	2982	0.938	0.840

33	6.123	2.371	17091	2982	0.938	0.840
34	6.123	2.371	17901	2982	0.938	0.840
35	6.777	2.539	10653	1698	0.704	0.828
36	6.777	2.539	10653	1698	0.704	0.828
37	6.777	2.539	10661	1694	0.702	0.828
38	5.967	2.563	18027	3012	0.899	0.825
39	5.967	2.563	18027	3012	0.899	0.825
40	5.967	2.563	18027	3012	0.899	0.825
41	5.967	2.563	18027	3012	0.899	0.825
42	5.967	2.563	18027	3012	0.899	0.825
43	5.967	2.563	18027	3012	0.899	0.825
44	5.967	2.563	18027	3012	0.899	0.825
45	5.967	2.563	18027	3012	0.899	0.825
46	6.123	2.538	17001	2828	0.866	0.828
47	6.123	2.538	17001	2828	0.866	0.828
48	6.123	2.538	17001	2828	0.866	0.828
49	6.123	2.538	17001	2828	0.866	0.828
50	6.123	2.538	17001	2828	0.866	0.828
51	6.123	2.538	17001	2828	0.866	0.828
52	6.123	2.538	17001	2828	0.866	0.828
53	6.368	2.582	7661	1269	0.802	0.813
54	6.123	2.490	17068	2848	0.875	0.822
55	6.123	2.490	17068	2848	0.875	0.822
56	6.211	2.547	18649	3078	0.821	0.811
57	6.211	2.547	18649	3078	0.821	0.811
58	6.211	2.547	18650	3078	0.821	0.811
59	6.211	2.547	18649	3078	0.821	0.811
60	6.211	2.547	18649	3078	0.821	0.811
61	6.211	2.547	18649	3078	0.821	0.811
62	5.795	3.102	15099	2438	0.771	0.799

NO	CP	CM	LCB	LWL/▽^(1/3)	ehp/▽
1	0.84	0.99	2.91	5.089	0.06209
2	0.84	0.99	2.91	5.089	0.06173
3	0.84	0.99	2.898	5.002	0.06464
4	0.84	0.99	3.216	4.854	0.06365
5	0.84	0.99	3.216	4.854	0.06365
6	0.84	0.99	3.216	4.854	0.06153
7	0.81	0.99	1.878	5.065	0.11442
8	0.81	0.99	1.878	5.065	0.11441
9	0.81	0.99	1.878	5.065	0.11441
10	0.81	0.99	1.878	5.065	0.11442
11	0.84	0.99	3.09	5.089	0.06292
12	0.83	0.99	3.588	4.939	0.07283
13	0.84	0.99	2.767	5.296	0.10355
14	0.84	0.99	0.727	5.302	0.09979
15	0.84	0.99	2.743	5.305	0.09197
16	0.84	0.99	2.743	5.305	0.09372
17	0.84	0.99	2.743	5.305	0.09197
18	0.84	0.99	2.743	5.305	0.09372
19	0.82	0.99	2.431	5.235	0.08662
20	0.82	0.99	2.431	5.235	0.08662
21	0.82	0.99	2.431	5.235	0.08665
22	0.85	0.99	3.65	5.004	0.06272
23	0.85	0.99	3.65	5.004	0.06252
24	0.86	0.99	3.357	5.179	0.07574
25	0.86	0.99	3.34	5.179	0.08381
26	0.86	0.99	3.34	5.179	0.08381
27	0.86	0.99	3.357	5.179	0.07574
28	0.85	0.99	3.239	4.834	0.07017
29	0.85	0.99	3.239	4.834	0.06874
30	0.85	0.99	3.239	4.834	0.06874

31	0.85	0.99	3.239	4.834	0.06874
32	0.85	0.99	3.239	4.834	0.06874
33	0.85	0.99	3.239	4.834	0.06549
34	0.85	0.99	3.239	4.834	0.06626
35	0.84	0.99	2.988	5.315	0.09508
36	0.84	0.99	2.988	5.315	0.09533
37	0.84	0.99	2.988	5.319	0.09509
38	0.83	0.99	3.372	4.892	0.06589
39	0.83	0.99	3.372	4.892	0.06558
40	0.83	0.99	3.372	4.892	0.065842
41	0.83	0.99	3.372	4.892	0.06553
42	0.83	0.99	3.372	4.892	0.06851
43	0.83	0.99	3.372	4.892	0.06580
44	0.83	0.99	3.372	4.892	0.06589
45	0.83	0.99	3.372	4.892	0.06581
46	0.84	0.99	3.43	4.964	0.07072
47	0.84	0.99	3.43	4.964	0.07088
48	0.844	0.99	3.43	4.964	0.06844
49	0.84	0.99	3.43	4.964	0.06856
50	0.84	0.99	3.43	4.964	0.06929
51	0.84	0.99	3.43	4.964	0.06929
52	0.84	0.99	3.43	4.964	0.08430
53	0.82	0.99	2	5.096	0.11655
54	0.83	0.99	3.15	4.947	0.06540
55	0.83	0.99	3.15	4.947	0.06561
56	0.82	0.99	3.45	5.036	0.06180
57	0.82	0.99	3.45	5.036	0.06180
58	0.82	0.99	3.45	5.036	0.06222
59	0.82	0.99	3.45	5.040	0.06183
60	0.82	0.99	3.45	5.072	0.06681
61	0.82	0.99	3.45	5.041	0.06177
62	0.81	0.99	3.36	5.306	0.07512

Table.2 선형변수 데이터

3.2 회귀모델의 변수 선정

회귀모델의 변수 선정은 상관분석을 실시하였으며 자료들에 대한 상관분석의 결과를 Fig.1에 나타내었다. 상관분석을 통해 EHP/▽와 상관이 강한 변수들($r > \pm 0.8$)을 선택하였으며, 특별히 LCB를 추가하였다. 선정된 7개의 변수들은 다음과 같다.

$$L,\ S,\ \nabla^{2/3},\ T,\ B,\ Cm,\ LCB$$

선정된 7개의 변수들에 대한 범위는 다음과 같다.

175	≤	L	≤	300
7486.5	≤	S	≤	22499
1242.121	≤	$\nabla^{2/3}$	≤	3719.426
11	≤	T	≤	18
28	≤	B	≤	50
0.9945	≤	Cm	≤	0.9984
-0.727	≤	LCB	≤	-3.65

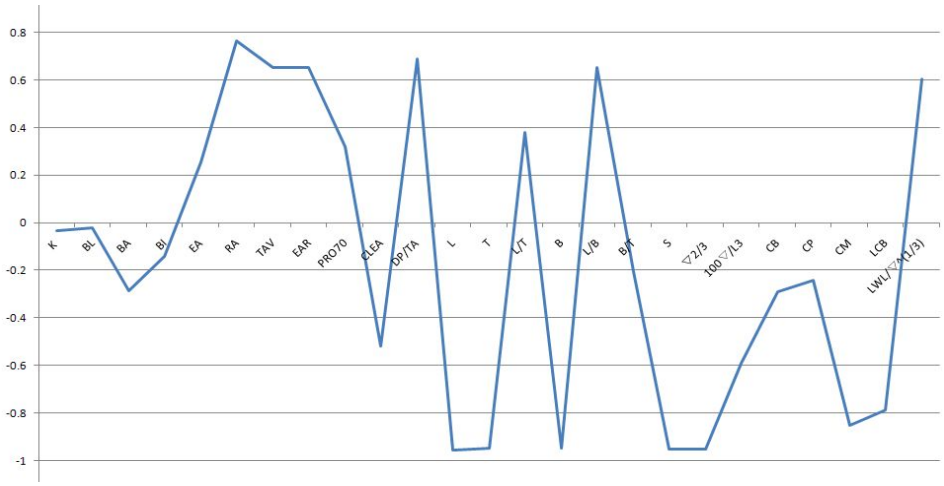


Fig.1 선형요소와의 상관계수

	K	BL	BA	BI	EA	RA
K	1.0000	-0.3432	-0.2801	-0.1076	-0.0972	-0.1839
BL	-0.3432	1.0000	0.8848	0.4576	0.5215	0.1027
BA	-0.2801	0.8848	1.0000	0.5313	0.3758	-0.1436
BI	-0.1076	0.4576	0.5313	1.0000	-0.2666	-0.0416
EA	-0.0972	0.5215	0.3758	-0.2666	1.0000	0.1269
RA	-0.1839	0.1027	-0.1436	-0.0416	0.1269	1.0000
TAV	-0.1262	0.0947	-0.0542	0.1938	0.0478	0.7333
EAR	0.1483	0.0291	-0.2073	-0.1074	0.3732	0.4472
PRO70	-0.2210	0.1330	0.0670	0.1127	0.1939	0.2918
CLEA	0.0250	0.1170	0.2708	-0.1280	0.0908	-0.3157
DP/TA	-0.1679	-0.1049	-0.2936	0.0138	-0.1467	0.6152
L	0.0631	-0.1535	0.1176	0.0414	-0.4038	-0.7633
T	0.1375	-0.0150	0.2721	0.0893	-0.2263	-0.7639
L/T	-0.2764	-0.2897	-0.4471	-0.0751	-0.3551	0.3601
B	0.1644	-0.0945	0.1691	0.0381	-0.2937	-0.7545
L/B	-0.4194	-0.0774	-0.2641	-0.0042	-0.1028	0.5460
B/T	0.0906	-0.2684	-0.2835	-0.0946	-0.3107	-0.1227
S	0.1463	-0.1261	0.1481	0.0489	-0.3470	-0.7668

▽2/3	0.1609	-0.1132	0.1638	0.0475	-0.3209	-0.7664
100▽/L3	0.3801	0.1579	0.3693	0.1228	0.1016	-0.4804
CB	0.1161	-0.3738	-0.1962	0.2645	-0.8839	-0.0862
CP	0.1210	-0.3766	-0.2055	0.2674	-0.8760	-0.0510
CM	-0.0453	-0.1141	0.0638	0.0818	-0.5069	-0.5798
LCB	0.0754	-0.1558	0.0915	0.1209	-0.3704	-0.5334
LWL/▽^(1/3)	-0.3941	-0.1392	-0.3659	-0.0748	-0.0893	0.4987
ehp/▽	-0.0312	-0.0211	-0.2886	-0.1427	0.2535	0.7669

	TAV	EAR	PRO70	CLEA	DP/TA	L
K	-0.1262	0.1483	-0.2210	0.0250	-0.1679	0.0631
BL	0.0947	0.0291	0.1330	0.1170	-0.1049	-0.1535
BA	-0.0542	-0.2073	0.0670	0.2708	-0.2936	0.1176
BI	0.1938	-0.1074	0.1127	-0.1280	0.0138	0.0414
EA	0.0478	0.3732	0.1939	0.0908	-0.1467	-0.4038
RA	0.7333	0.4472	0.2918	-0.3157	0.6152	-0.7633
TAV	1.0000	0.4381	0.0598	-0.4913	0.4469	-0.6571
EAR	0.4381	1.0000	0.1593	-0.2450	0.2381	-0.6889
PRO70	0.0598	0.1593	1.0000	-0.1557	0.3874	-0.3624
CLEA	-0.4913	-0.2450	-0.1557	1.0000	-0.5169	0.5009
DP/TA	0.4469	0.2381	0.3874	-0.5169	1.0000	-0.6123
L	-0.6571	-0.6889	-0.3624	0.5009	-0.6123	1.0000
T	-0.6208	-0.6525	-0.3493	0.5446	-0.7891	0.9356
L/T	0.2211	0.1672	0.1334	-0.3659	0.7641	-0.2512
B	-0.6317	-0.6844	-0.3912	0.5139	-0.6672	0.9756
L/B	0.3993	0.4724	0.3807	-0.4308	0.6539	-0.6296
B/T	-0.1484	-0.2742	-0.2297	-0.0149	0.2762	0.3373
S	-0.6328	-0.6755	-0.3825	0.5110	-0.6872	0.9860
▽2/3	-0.6279	-0.6715	-0.3802	0.5173	-0.7095	0.9783
100▽/L3	-0.2974	-0.4138	-0.3101	0.3790	-0.7716	0.5178
CB	0.0553	-0.4651	-0.2921	-0.1702	-0.0156	0.3977
CP	0.0946	-0.4394	-0.2808	-0.1993	0.0107	0.3506
CM	-0.5826	-0.5950	-0.2904	0.3686	-0.4087	0.8909

LCB	-0.6429	-0.5814	-0.1384	0.4857	-0.4446	0.7972
LWL/▽^(1/3)	0.3254	0.4065	0.3068	-0.4168	0.7963	-0.5359
ehp/▽	0.6537	0.6507	0.3198	-0.5220	0.6869	-0.9577

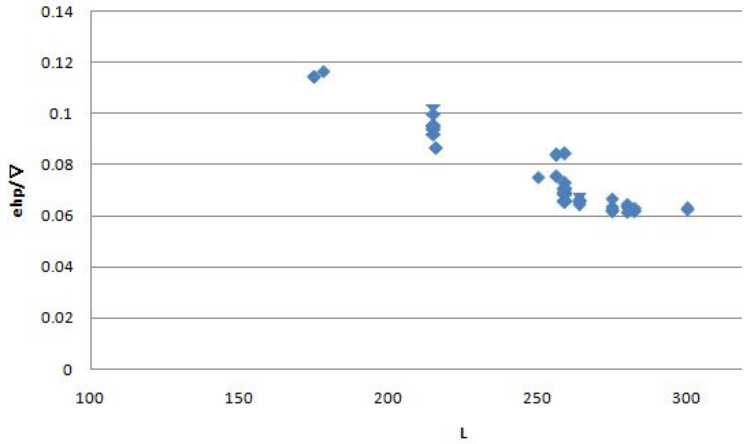
	T	L/T	B	L/B	B/T	S
K	0.1375	-0.2764	0.1644	-0.4194	0.0906	0.1463
BL	-0.0150	-0.2897	-0.0945	-0.0774	-0.2684	-0.1261
BA	0.2721	-0.4471	0.1691	-0.2641	-0.2835	0.1481
BI	0.0893	-0.0751	0.0381	-0.0042	-0.0946	0.0489
EA	-0.2263	-0.3551	-0.2937	-0.1028	-0.3107	-0.3470
RA	-0.7639	0.3601	-0.7545	0.5460	-0.1227	-0.7668
TAV	-0.6208	0.2211	-0.6317	0.3993	-0.1484	-0.6328
EAR	-0.6525	0.1672	-0.6844	0.4724	-0.2742	-0.6755
PRO70	-0.3493	0.1334	-0.3912	0.3807	-0.2297	-0.3825
CLEA	0.5446	-0.3659	0.5139	-0.4308	-0.0149	0.5110
DP/TA	-0.7891	0.7641	-0.6672	0.6539	0.2762	-0.6872
L	0.9356	-0.2512	0.9756	-0.6296	0.3373	0.9860
T	1.0000	-0.5739	0.9590	-0.7576	0.0664	0.9710
L/T	-0.5739	1.0000	-0.3767	0.6432	0.5829	-0.3833
B	0.9590	-0.3767	1.0000	-0.7833	0.3443	0.9908
L/B	-0.7576	0.6432	-0.7833	1.0000	-0.2460	-0.7232
B/T	0.0664	0.5829	0.3443	-0.2460	1.0000	0.2697
S	0.9710	-0.3833	0.9908	-0.7232	0.2697	1.0000
▽2/3	0.9798	-0.4257	0.9910	-0.7464	0.2409	0.9985
100▽/L3	0.7665	-0.9028	0.6569	-0.8734	-0.2213	0.6409
CB	0.3332	0.0658	0.3309	-0.0449	0.0987	0.3833
CP	0.2935	0.0662	0.2865	-0.0224	0.0750	0.3395
CM	0.7507	0.0259	0.8157	-0.3454	0.3892	0.8329
LCB	0.7539	-0.2084	0.7917	-0.5558	0.3121	0.7778
LWL/▽^(1/3)	-0.7822	0.9123	-0.6637	0.8505	0.2611	-0.6571
ehp/▽	-0.9488	0.3781	-0.9483	0.6502	-0.2042	-0.9523

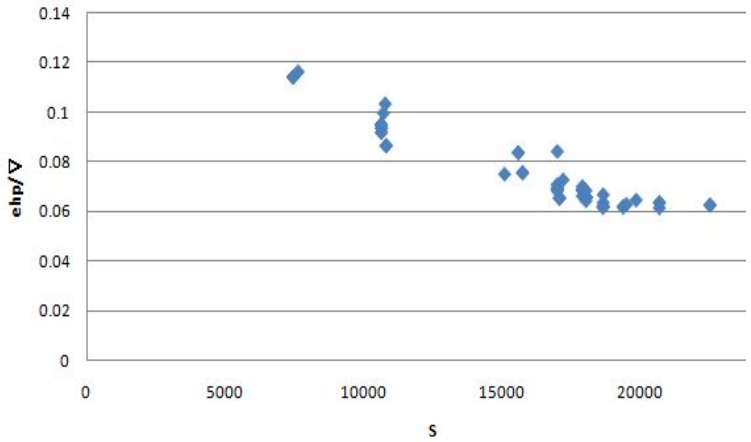
	▽2/3	100▽/L3	CB	CP	CM
K	0.1609	0.3801	0.1161	0.1210	-0.0453
BL	-0.1132	0.1579	-0.3738	-0.3766	-0.1141
BA	0.1638	0.3693	-0.1962	-0.2055	0.0638
BI	0.0475	0.1228	0.2645	0.2674	0.0818
EA	-0.3209	0.1016	-0.8839	-0.8760	-0.5069
RA	-0.7664	-0.4804	-0.0862	-0.0510	-0.5798
TAV	-0.6279	-0.2974	0.0553	0.0946	-0.5826
EAR	-0.6715	-0.4138	-0.4651	-0.4394	-0.5950
PRO70	-0.3802	-0.3101	-0.2921	-0.2808	-0.2904
CLEA	0.5173	0.3790	-0.1702	-0.1993	0.3686
DP/TA	-0.7095	-0.7716	-0.0156	0.0107	-0.4087
L	0.9783	0.5178	0.3977	0.3506	0.8909
T	0.9798	0.7665	0.3332	0.2935	0.7507
L/T	-0.4257	-0.9028	0.0658	0.0662	0.0259
B	0.9910	0.6569	0.3309	0.2865	0.8157
L/B	-0.7464	-0.8734	-0.0449	-0.0224	-0.3454
B/T	0.2409	-0.2213	0.0987	0.0750	0.3892
S	0.9985	0.6409	0.3833	0.3395	0.8329
▽2/3	1.0000	0.6759	0.3719	0.3290	0.8128
100▽/L3	0.6759	1.0000	0.1730	0.1620	0.2326
CB	0.3719	0.1730	1.0000	0.9983	0.4598
CP	0.3290	0.1620	0.9983	1.0000	0.4076
CM	0.8128	0.2326	0.4598	0.4076	1.0000
LCB	0.7748	0.4514	0.3388	0.3023	0.7039
LWL/▽^(1/3)	-0.6916	-0.9908	-0.1795	-0.1674	-0.2534
ehp/▽	-0.9516	-0.5895	-0.2894	-0.2421	-0.8517

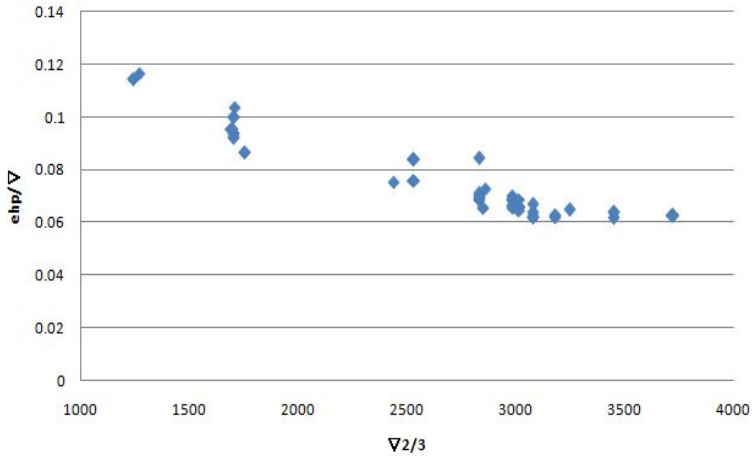
	LCB	LWL/▽^(1/3)	ehp/▽
K	0.0754	-0.3941	-0.0312
BL	-0.1558	-0.1392	-0.0211
BA	0.0915	-0.3659	-0.2886
BI	0.1209	-0.0748	-0.1427
EA	-0.3704	-0.0893	0.2535
RA	-0.5334	0.4987	0.7669
TAV	-0.6429	0.3254	0.6537
EAR	-0.5814	0.4065	0.6507
PRO70	-0.1384	0.3068	0.3198
CLEA	0.4857	-0.4168	-0.5220
DP/TA	-0.4446	0.7963	0.6869
L	0.7972	-0.5359	-0.9577
T	0.7539	-0.7822	-0.9488
L/T	-0.2084	0.9123	0.3781
B	0.7917	-0.6637	-0.9483
L/B	-0.5558	0.8505	0.6502
B/T	0.3121	0.2611	-0.2042
S	0.7778	-0.6571	-0.9523
▽2/3	0.7748	-0.6916	-0.9516
100▽/L3	0.4514	-0.9908	-0.5895
CB	0.3388	-0.1795	-0.2894
CP	0.3023	-0.1674	-0.2421
CM	0.7039	-0.2534	-0.8517
LCB	1.0000	-0.4501	-0.7888
LWL/▽^(1/3)	-0.4501	1.0000	0.6018
ehp/▽	-0.7888	0.6018	1.0000

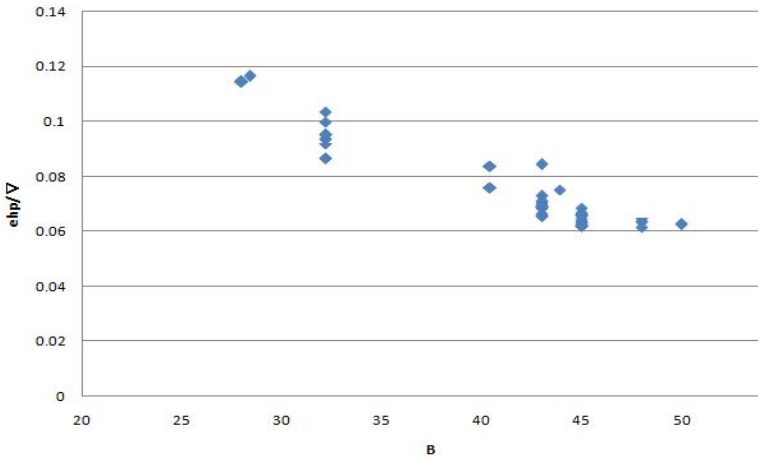
Table.3 각 변수별 상관분석

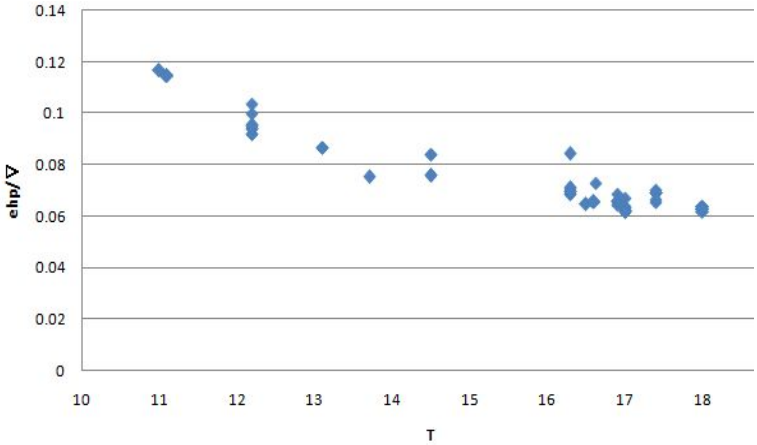
EHP/▽와 상관분석으로 선정된 변수들간의 관계를 알아보기 위한 산점도를 Fig.2에 나타냈다. 각각의 변수들과 EHP/▽사이에는 음의 상관관계가 있다는 것을 알 수 있었고, 직선의 관계에 의해서 표현할 수 있다는 것을 알았다.






0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
ehp/∇
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
∇2/3


0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
ehp/∇
20
25
30
35
40
45
50
B


0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
ehp/∇
10
11
12
13
14
15
16
17
18
T

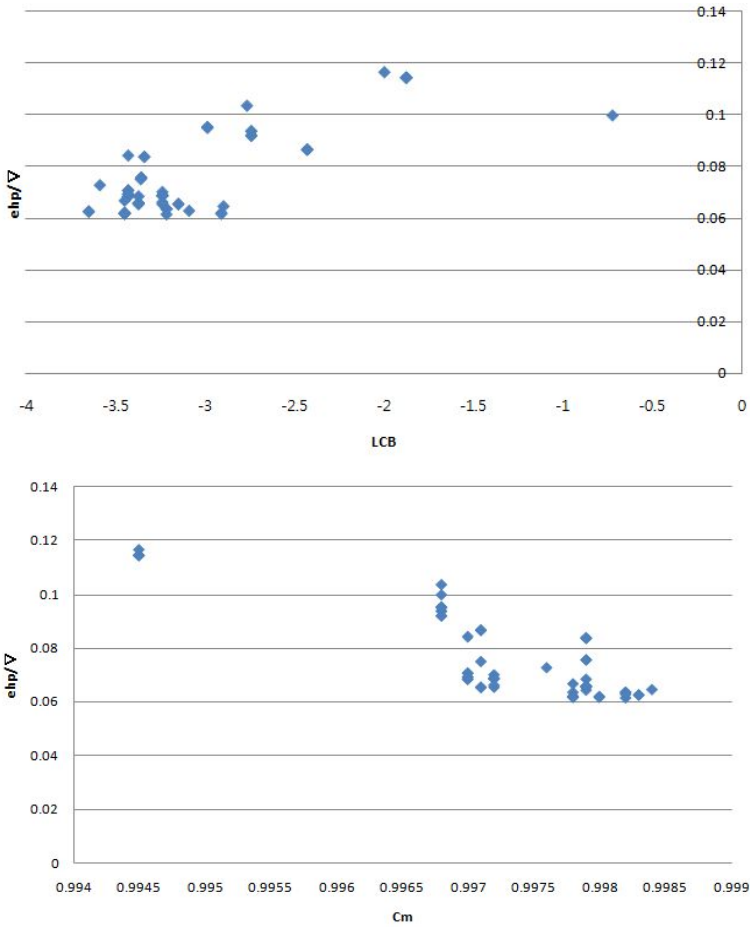


Fig.2 EHP/▽와 선형변수에 대한 산점도

3.3 모형시험자료의 상관분석

통계의 일반이론에서는 두 변수관계의 강약을 다음과 같은 기준으로 판단한다.

0.8	≤	$\lvert r \rvert$			강한 상관관계
0.6	≤	$\lvert r \rvert$	<	0.8	보통 상관관계
0.4	≤	$\lvert r \rvert$	<	0.6	약한 상관관계
		$\lvert r \rvert$		0.4	거의 상관관계 없음

그러나 위와 같은 분류는 일반적인 경우일 뿐이고 모든 경우에 다 적용되는 절대적인 것은 아니다. 각 분야별로 통계를 이용함에 있어서 변수의 성격을 달리 규명하므로 상관계수의 값은 단지 변수별 관계를 수치로 나타냈을 뿐 물리적 성격을 명확히 설명하는 것은 아니므로 우선 모든 변수를 선택하기로 하고, 도출된 회귀식에 대한 검정을 통해 각 변수별로 선정여부를 결정하기로 하였다.

	L	S	▽2/3	T	B	CM	LCB
L	1	0.986	0.978	0.936	0.976	0.891	-0.797
S	0.986	1	0.999	0.971	0.991	0.833	-0.778
▽2/3	0.978	0.999	1	0.980	0.991	0.813	-0.775
T	0.936	0.971	0.980	1	0.959	0.751	-0.754
B	0.976	0.991	0.991	0.959	1	0.816	-0.792
CM	0.891	0.833	0.813	0.751	0.816	1	-0.704
LCB	-0.797	-0.778	-0.775	-0.754	-0.792	-0.704	1

Table.4 선정된 변수들 상호간의 상관계수

	Mean	Standard Deviation	Correlation Coefficient
L	249.4535	31.57624	-0.9577
S	15807.82	4051.765	-0.95232
▽2/3	2608.958	689.1726	-0.9516
T	15.42952	2.295685	-0.94884
B	40.65129	6.355914	-0.94829
CM	0.997237	0.000954	-0.85172
LCB	-3.06439	0.547387	-0.78882

Table.5 선정된 변수들에 대한 상관계수

	12	13	14	15
L	-0.96367	-0.96458	-0.96219	-0.9577
S	-0.96228	-0.96117	-0.95706	-0.95232
▽2/3	-0.96259	-0.96099	-0.95658	-0.9516
T	-0.95856	-0.95552	-0.95263	-0.94884
B	-0.95998	-0.95867	-0.95333	-0.94829
CM	-0.84634	-0.8474	-0.84772	-0.85172
LCB	0.800057	0.795677	0.790983	0.788819

Table.6 EHP/▽에서 각 속도별 변수에 대한 상관계수

3.4 유효마력 추정을 위한 회귀모델

3.3.1 회귀모델 개념

통계해석 이론에 관하여 간단히 살펴보면 목적함수 Y가 n개의 독립변수 $X_1, X_2, \cdots, X_n$의 함수로

$$Y = f(X_1, X_2, \cdots, X_n) \qquad ①$$

과 같이 표시되고 함수 $f(X_1, X_2, \cdots, X_n)$는 각 독립변수들의 임의의 영역에서 M개의 데이터를 이용한 임의의 k차의 다항식이라고 하자. 이와 같은 다항식은 다음과 같이 일반적인 형태로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} Y = {} & a_0 X_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \cdots + a_n X_n \qquad ② \\ & + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + \cdots + a_{nn} X_n^2 \\ & + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_2 + \cdots + a_{1n} X_1 X_n \\ & + a_{23} X_2 X_3 + \cdots \end{aligned}$$

여기에서 X_n은 X_n의 평균치 $\overline{X_n}$를 기준으로 다음과 같이 정규화(Normalization)한 것으로써, i번째 데이터의 경우

$$X_{ni} = \frac{(X_{ni} - \overline{X_n})}{S_n} \times k \qquad ③$$

여기서, S_n은 X_n의 표준편차로

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M} (X_{ni} - \overline{X_n})^2}{M}} \qquad ④$$

따라서, M개의 데이터가 주어져 있을 때 데이터의 잔차(residual)가 최소가 되도록 식②와 같은 Y의 계산식을 구하는 것이 가능하다. 또한 ③식에서 k는 수정계수로서 ②식 중의 고차항이 선형요소의 사용가능범위 주변 부근에서 저항추정에 크게 작용하여 식의 정도를 떨어뜨리는 것을 막기 위함이다.

통계해석에 있어 데이터의 양, 즉 M이 매우 클 경우 Y의 차수 k를 높일수록 더욱 정도가 높은 추정식을 얻을 수 있으며, 추정식을 결정하는 경우 정도를 높이기 위해서는 데이터들의 양이나 특성을 잘 파악하여 독립변수의 개수 N이나 차수k를 조심스럽게 결정하여야 할 것이다.

②식에 각 선형요소와 그때의 실험결과를 대입하면 일반적으로 다음과 같이 된다.

$$Y_i = (a_0 X_0 + a_1 X_1 + \cdots etc)_i + e_i$$
$$= [X]_i + e_i \qquad ⑤$$

여기서 $i = i$번째의 데이터

Y_i = 실험결과

$[X]_i$ = 선형요소

e_i= 잔차(계산결과와 실험결과와의 차)

만약 실험개수가 M개가 되면 ⑤식을 M개 만들 수 있을 것이다. 이들 M개의 식으로부터 미지수 $a_0, a_1, a_2, \cdots$들을 구할 수 있는데, 이때 실험치와 계산치가 잘 일치하기 위해서는 각각의 미지수들이 $\sum_{i=1}^{M} e_i^2$을 최소로 하여야 할 것이다.

즉,

$$\frac{\partial}{\partial a_j}\left(\sum_{i=1}^{M} e_i^2\right) = 0 \qquad ⑥$$

⑤식을 ⑥식에 대입하여 정리하면,

$$\sum_{i=1}^{M}(Y_i - [X]_i)X_j = 0 \qquad ⑦$$

또는

$$\sum_{i=1}^{M} Y_i X_j = \sum_{i=1}^{M} [X]_i X_j \qquad ⑧$$

따라서, 다항식의 함수와 같은 개수의 ⑧식의 연립방정식을 풀면 ⑤식의 각 회귀계수를 얻을 수 있고, 결국에는 ②식과 같은 회귀방정식을 얻게 된다.

3.3.2 유효마력추정을 위한 회귀방정식 도출

통계해석 방법으로 Bulk Carrier의 저항성능을 구하기 위해 도출된 ②식과 같은 일반식은 고차항이 존재하는 다항회귀로서 회귀계수 추정을 위해 사용되이질 충분한 양의 데이터가 축적되어 있는 경우에는 정확한 예측값을 추정하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 자료가 불충분하여 ②식을 사용하는데 다소 무리가 있을 것으로 판단되어 부득이하게 고차항을 제외한 중회귀식을 사용하기로 하였다.

계산은 엑셀 범용 프로그램을 이용하여 회귀분석을 수행하였으며 구해진 회귀계수는 Table.7과 같고 이를 도입한 유효마력 추정식은 ⑨식과 같다.

$$EHP/\nabla = a_0 + a_1 L + a_2 S + a_3 \nabla^{2/3} + a_4 T + a_5 B + a_6 CM + a_7 LCB \qquad ⑨$$

	12	13	14	15
a_0	8.6737E-01	8.7152E-01	1.0232E+00	2.2633E+00
a_1	-2.2509E-04	-3.3467E-04	-4.7856E-04	-5.6620E-04
a_2	1.7634E-06	2.4522E-06	2.9433E-06	2.6256E-06
a_3	9.7140E-06	1.3304E-05	2.2017E-05	3.7706E-05
a_4	-3.4729E-03	-4.5110E-03	-6.3953E-03	-9.1216E-03
a_5	-8.5777E-04	-1.1268E-03	-1.4454E-03	-2.0325E-03
a_6	-7.4016E-01	-7.0074E-01	-7.9366E-01	-1.9697E+00
a_7	-3.7375E-06	-3.0348E-04	-6.4862E-04	-7.3861E-04
R	9.8754E-01	9.8692E-01	9.8591E-01	9.8334E-01
STD.ERR	1.2007E-03	1.5879E-03	2.1433E-03	3.1293E-03

Table.7 각 속도별 회귀계수, 중상관계수, 표준오차추정

제 4장 결과 분석

4.1 추정회귀식 평가

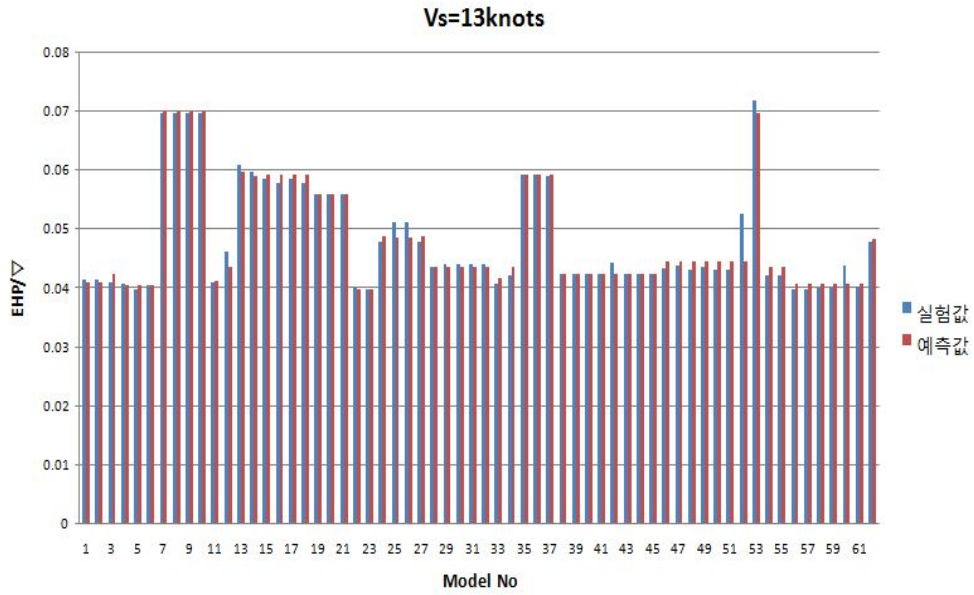
유효마력추정을 위한 회귀방정식은 제 3장 ⑨식과 같고 회귀계수 및 중상관계수(목적변수의 실제 관측치와 중회귀식에 의해 구한 예측지의 상관계수), 그리고 표준오차를 Table.8에 나타내었다.

Vs(속도)	R(중상관계수)	ε(표준오차)
12	9.8754E-01	0.00120066
13	9.8692E-01	0.00158788
14	9.8591E-01	0.00214334
15	9.8334E-01	0.00312925

Table.8 속도에 따른 중상관계수와 표준오차

위에서 보여지는 바와 같이 중상관계수는 상당히 높은 상관관계를 보여주고 있으며 표준오차 역시 0.001~0.003의 오차를 보이고 있다. 실험값과 예측값을 비교한 Fig.3에서 보여지는 거와 같이 추정값이 거의 일치하였다.

Vs=12knots
EHP/▽
Model No
실험값
예측값


Vs=13knots
EHP/▽
Model No
실험값
예측값

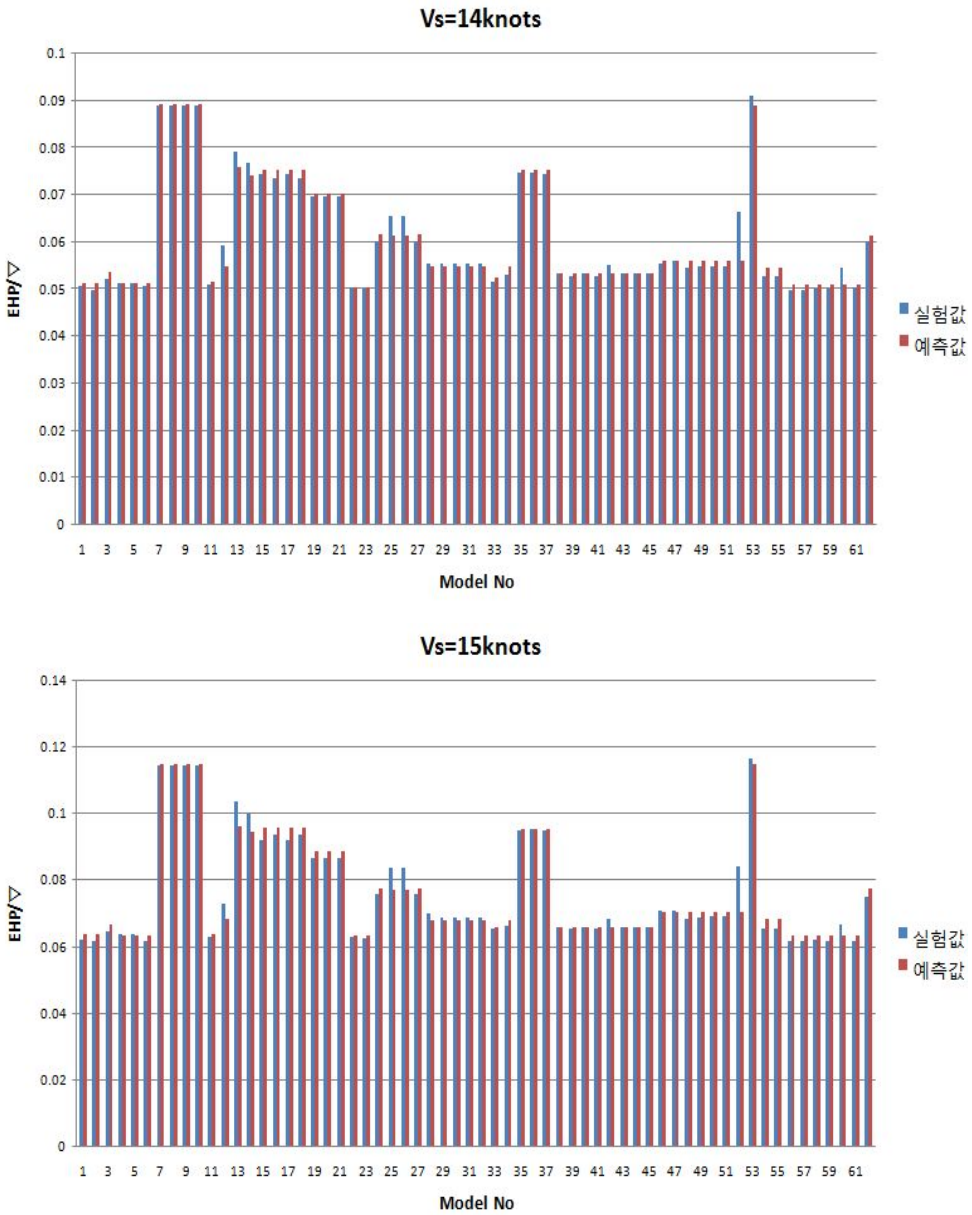


Fig.3 실험값과 예측값의 비교

표본자료나 회귀모델의 우수성을 파악하기 위해서는 중상관계수를 사용하여야 할 것으로 판단된다. 도출된 회귀식의 평가는 먼저 분산분석을 통해 상용된 변수의 타당성을 검정하고, 잔차분석을 통해 회귀모델에 대한 가정인

회귀함수 선형성, 오차항의 등분산성, 독립성, 정규성을 검정하게 된다. 분산분석은 F-검정 및 t-검정을 통해 “0”이 포함된 변수를 찾아내고 걸러내는 과정이고, 잔차분석은 잔차의 산점도를 관찰함으로서 이루어진다.

4.2 회귀식을 이용한 유효마력추정 검토

엑셀 범용 프로그램에서 도출된 유효마력 회귀식을 이용한 실질적인 적용을 검증하기 위해 조선대학교에서 수행완료한 186k Bulk Carrier 선박을 채택하여 본 연구결과를 적용하여 보았다. 모형시험에 의한 유효마력과 회귀식을 이용해 추정된 유효마력을 Table.9과 Fig.4에 비교하였다.

EHP/▽	실험값	예측값	비교
12	0.035854	0.036312	0.98738
13	0.044488	0.045637	0.974822
14	0.0564	0.058012	0.972201
15	0.079952	0.074763	1.069404

Table.9 실험값과 예측값의 비교

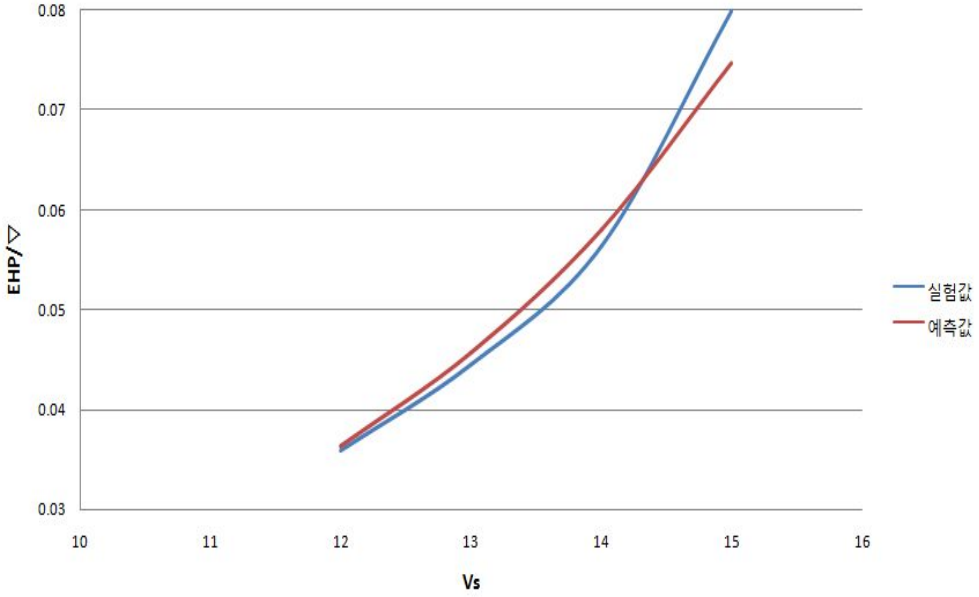


Fig.4 모형실험값과 예측값의 비교

제 5장 결론

본 논문에서는 저항성능 추정을 위한 통계해석 이론을 조사하고, 엑셀 범용 프로그램을 이용한 회귀식을 통해 유효마력추정 방법을 제시하였으며 그 활용성을 검토하였다.

1) 유효마력 추정을 위한 통계해석 기법을 정립하고 엑셀 범용 프로그램을 이용한 상관분석, 회귀분석의 이론을 적용하였다.

2) 표준오차범위가 0.2~0.4%로 매우 작게 나왔으며 중상관계수가 $0.983 \leq R \leq 0.987$의 범위로 상당히 높은 상관관계를 보이며 유효마력의 추정값 또한 97%이상의 좋은 적중률을 보여 본 연구결과의 타당성을 입증하였다.

3) 유효마력의 추정값이 높게 적중한 이유는 표본선형에 신뢰할만한 유사 선형자료가 많이 포함되어 추정값이 더욱 정밀했던 것으로 판단된다.

4) 제안된 방법을 Bulk Carrier설계에 적용할 경우, 기존 통계해석에 의한 방법에 의한 저항추정성능이 신뢰성이 증가하며 설계시간 단축, 인력 및 소요경비절감 등의 효과가 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] Tagano. H, " The Estimation Method of Ship Resistanse". Dectoral Thesis, Osaka University, 1975

[2] Wen-Cheng Lin, "Bare Hull Resistance Prediction for Naval Auxiliary Ships", DTBSRDC, TM 116-83, 1983

[3] 홍성완 외 : : “통계해석에 의한 저항 추정 및 선형 개량”, 대한조선학회 Vol. 25, 1988.12

[4] 윤도수 : “통계해석에 의한 잉여저항 추정 및 선형개량에 관한 연구”, 인하대학교 석사학위논문, 1988.2

[5] 김은찬 외 : “선박의 저항성능 추정성능에 대하여”, 대하조선학회 하계 강습회, 1993.7

[6] 김은찬, 강국진 : “데이터뱅크를 이용한 선박 저항추진성능 추정 기법 연구”, 대한조선학회 춘계학술대회, 2000.4

[7] 이근무 : “어선의 저항성능 개선을 위한 선형연구”, 인하대학교 박사학위논문, 1993.8

[8] 김은찬 외 : “통계해석과 이론식을 이용한 저항추진성능 추정”, 대한조선학회 Vol. 26, 1989.12

[9] 이조원 : “모형시험 결과의 통계적 해석에 의한 활주형선박의 저항성능 추정법 개발에 관한 연구”, 조선대학교 석사학위논문, 2001.2

[10] 노형진 : “Excel에 의한 조사방법 및 통계분석”, 한올출판사, 2010.4

[11] 이원우 : “개정판 알기쉽게 풀어쓴 통계학 ”, 박영사, 2009.8

[12] 강금식, 정우석 : “제 3판 Excle 활용 현대 통계학”, 박영사, 2008.9

부록 A

엑셀에서의 회귀 분석

일반적인 중회귀분석 예

"최소자승법"으로 관찰 값을 포함하는 적절한 선을 나타내려면 선형 회귀 분석을 사용한다. 여러 개의 독립변수가 한 종속 변수에 영향을 미치는 정도를 분석할 수 있다.

(1) 상관분석

중회귀분석을 실시하기 전에 각 설명변수와 목적변수간의 상관계수를 구하여 상관관계의 정도를 파악한다.

(2) 산포도 관찰

중회귀분석을 실시하기 전에 또한 각 설명변수와 목적변수간의 산포도를 작성하여 이상치의 유무나 상관관계를 시각적으로 살펴본다.

(3) 회귀분석

엑셀의 경우 대화상자의 지시에 따라 쉽게 회귀분석을 수행할 수 있으며 데이터 -> 데이터 분석도구를 이용하면 쉽게 회귀분석을 수행할 수 있다.

(4) 결과해석

결정계수

결정계수란 선형회귀분석에 있어서 표본으로부터 추정된 회귀선이 표본관측치에 얼마나 적합한가를 나타내는 척도로서 회귀식의 유효성을 보는 지표를 말한다. 중회귀분석의 경우에 결정계수는 설명변수의 수가 늘어날수록 그 변수가 유용한 것이든 아니든 높아져 간다.

그래서 회귀식에 무의미한 변수가 설명변수로서 사용되었을 때에는 계수의 값이 오히려 내려가도록 조정한 결정계수를 사용한다. 이것을 조정된 결정계수라

고 한다.

$$\text{조정된 결정계수}(R^2)=1-\frac{n-1}{n-p-1}(1-R^2)$$

여기서 n : 표본의 크기

p : 설명변수의 수

R^2 : 결정계수$=\frac{\text{회귀의 변동}(SSR)}{\text{총 변동}(SST)}=1-\frac{\text{잔차의 변동}(SSR)}{\text{총 변동}(SST)}$

통계적 가설검정

회귀식이 얻어지면 그 식이 통계적으로 의미가 있는지를 검토할 필요가 있다. 모집단의 모수의 값이나 확률분포에 관하여 사전에 설정된 가설이 옳은지를 표본의 자료를 통하여 주어진 확률의 범위안에서 통계적 결정을 내리는 것을 통계적 가설검정이라 한다.

(5) 회귀식 도출

결과분석에 의해 회귀식을 얻는다.

(6) 잔차분석

관측치(실제값)와 추정치(예측값)의 차를 잔차라고 한다. 잔차는 회귀모형에 의하여 설명되지 않은 변동의 크기를 나타내기도 하며 오차 $\varepsilon_i(=y_iE(y_i))$의 관측치이기도 하다.
최소자승 추정량 등에 의해서 얻어진 예측치와 관측치의 잔차를 분석해서, 오차항이 독립이고 또한 등분산을 갖는다고 하는 가정이 관측치의 데이터에 적합한지 어떤지를 검토하는 것을 잔차분석이라고 한다.

LINEST함수

데이터에 가장 적합한 직선을 구하는 '최소 자승법'을 사용하여 선의 통계를 계산하고 선에 대한 배열을 구한다. 직선의 방정식은 다음과 같다.

$y = ax + b$ or $y = a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + b$

여기서 종속변수 y는 독립변수 x의 함수이다. a값은 x의 계수이고 b는 상수이다. LINEST함수는 $(a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, b)$를 구하여 또한 추가의 회귀 통계를 구할 수 있다.
다음함수를 사용하여 회귀분석을 통해 회귀계수 및 Y절편, 중상관계수, 표준오차값을 자동으로 산출해 준다.

LINEST(y의 범위, x의 범위, 논리값, 조정)
(1) y의 범위 : 이미 알고 있는 y값의 집합이다.
- 종속변수의 데이터의 범위로서 하나의 같은 열이나 행에 있으면 각 열 또는 행은 개별변수로 해석된다.
(2) x의 범위 : 이미 알고 있는 x의 값의 집합으로서 생략할 수 있다.
- 독립변수의 데이터의 범위로서 하나 이상의 변수집합을 포함할 수 있다. 둘 이상의 변수를 사용하고 y의 범위와 x의 범위가 같은 차원이면 어떤 형태의 영역도 될 수 있지만, 둘 이상의 변수를 사용할 때 y의 범위는 벡터(한 행의 높이 또는 한 셀의 너비를 가진 영역)이어야 한다.
-x의 범위를 생략하면 y의 범위와 같은 크기의 배열 $\{1,2,3,\cdots\}$로 간주한다.
(3) 논리값 : 상수 b를 0으로 할 것인지 결정하는 논리값이다.
- TRUE거나 생략되면 b는 값대로 계산된다
  -> 상수항이 있는 회귀식
- FALSE이면 b는 0으로 지정되고 a값은 y=ax에 맞게 조정된다.
  -> 상수항이 없는 회귀식
(4) 조정 : 추가의 회귀 통계량을 구할지의 여부를 정의한는 논리값이다.
- TRUE이면 LINEST함수는 추가 회귀통계량을 구하여 나타낸다.
- 조정이 FALSE이거나 생략되면 a 계수값과 상수 b만을 구한다.

회귀 통계량 표는 다음과 같다.

	1	2	…	n-2	n-1	n
1	①회귀계수 a_n	회귀계수 a_{n-1}	…	회귀계수 a_2	회귀계수 a_1	상수항 b
2	②a_n의 표준오차	a_{n-1}의 표준오차	…	a_2의 표준오차	a_1의 표준오차	b의 표주오차
3	③결정계수 R^2	④예측치의 표준오차				
4	⑤회귀식의 F값	⑥자유도 df				
5	회귀식의 제곱합	잔차의 제곱합				

① $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_2, a_1$는 각 회귀계수이며 b는 Y절편을 의미한다.

② 각 회귀계수에 대한 표준 오차값이다.

③ R^2는 결정계수로서 y값의 추정값과 실제값을 비교하며 범위는 0과 1사이다. 계수가 1이면 표본은 완전한 상관 관계가 성립하고 추정값과 실제값은 아무런 차이가 없다. 결정계수가 0이면 그 회귀 방정식은 y값을 예상하는데 아무런 도움이 되지 못한다.

④ y 추정값에 대한 표준 오차이다.

⑤ F는 통계량 또는 F-관측값으로서 F 통계량을 사용하여 종속변수와 독립변수 사이에서 관측된 관계가 우연히 발생된 것인지를 판닿랄 수 있다.

⑥ df는 자유도로서 통계표에서 F 임계값 찾기를 쉽게 해 준다. 모델에 대한 신뢰도를 판단하기 위해 LINEST 함수로 구한 F 통계량과 표에서 찾은 값들을 비교한다.