

상사축척법에 기반한 저마찰 선박 방오도료의 실선 마찰저항 저감성능 추정

양정우¹·박현²·이인원^{3,†}

한진중공업 설계팀 기본설계파트¹

부산대학교 조선해양플랜트 글로벌핵심연구센터²

부산대학교 조선해양공학과³

Full Scale Frictional Resistance Reduction Effect of a Low Frictional Marine Anti-fouling Paint based on a Similarity Scaling Method

Jeong Woo Yang¹·Hyun Park²·Inwon Lee^{3,†}

Basic Design Part, Design Team, Hanjin Heavy Industry and Construction Co. Inc.¹

Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University²

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, a series of full-scale extrapolation procedures based on the Granville's similarity scaling method, which was employed by Schultz (2007), is modified and then applied to compare the resistance performance between two different anti-fouling coatings. As an analysis example, the low frictional AF coating based on a novel skin-friction reducing polymer named FDR-SPC (Frictional Drag Reduction Self-Polishing Copolymer), which had been invented by the present author, is employed. The low frictional coating, which gives 25.4% skin frictional reduction in lab test, is estimated to give 18.2% total resistance reduction for a 176k DWT bulk carrier.

Keywords : Marine anti-fouling paint(선박 방오도료), Low frictional AF paint(저마찰 방오도료), Similarity scaling(상사축척), Turbulent boundary layer(난류경계층), Frictional drag reduction(마찰저항 저감)

1. 서론

방오도료(AF Paint)의 주된 역할은 선체 표면의 열화 및 해생물의 표면 부착으로부터 마찰저항의 증가를 막는 것이다. 이 목표를 달성하지 못할 경우 선속을 유지하기 위한 축 동력이 증가하거나 정해진 동력에서 선속이 감소되는 결과를 초래한다. Fouling이 일어나지 않은 매끄러운 선체 표면의 경우에도 마찰저항은 선박 총 저항의 80%까지 차지하므로 도료 표면이 선박의 성능에 미치는 영향은 지대하다. 그 때문에 도료 표면 거칠기나 fouling에 의한 저항증가는 오랫동안 관심의 대상이 되어 왔는데, Schultz (2004)는 다양한 도료 표면거칠기 및 fouling이 진행된 방오도료 침지 시험의 저항 특성 및 특성거칠기를 연구하였다. 그 결과, fouling의 유형 및 점유면적비율에 따라 마찰저항 증가폭 및 특성 거칠기 척도가 달라짐을 나타내고 있다. 이

후속 연구에서 Schultz (2007)는 Granville (1987) 상사 축척법(similarity scaling method)에 기반하여 실선의 총 저항계수 증가량을 추정할 수 있는 저항계산 절차를 제시하였다.

한편, 마찰저항을 저감함으로써 선박의 에너지 효율을 향상하고자 하는 다양한 시도가 수행되어 왔다. 난류유동으로 인한 마찰저항은 머리핀 와류와 같은 조직 구조(coherent structure)와 밀접한 관련이 있다. 마찰저항 저감기법은 유동제어기법을 사용하여 저항의 주 발생요인인 난류구조를 제거 혹은 약화시키는 전략을 사용하는데 공기공동 형성(Jang & Kim 1999), 리블렛(Koo, et al., 2004), 미소기포 주입(Kim, et al., 2003), 폴리머 수용액 주입(Kim, et al., 2003), 국부냉각기열(Yoon & Chun 2005), 외부경계층 수직날(An, et al., 2008) 등의 기법이 시도된 바 있다. 특히 선박 방오도료로부터 고분자 저항저감제가 용출되어 난류 유동의 활동을 억제하는 Toms 효과를 발휘하는 새로운 저마찰 방오도료가 개발되었는데, 고속회류수조에서의 실험

실 규모 측정에서 통상형 방오도료 대비 20% 이상의 마찰저항 저감효과가 관측되었다 (Yang, et al., 2014; Lee, et al., 2015). 저마찰 선박 방오도료는 공기유히기법과 같은 능동제어기법과는 달리 별도의 에너지 투입이 필요치 않으며, 기존의 선박 건조 공정과 호환성이 높다. 또한 종래의 고분자 분사(polymer injection) 기법에서는 선체에 분사공을 설치하기 때문에 선체 구조강도에 악영향을 미치거나 분사공으로부터 멀어질수록 저항저감 효과가 감소되지만, 저마찰도료의 경우 선박 수선 하부의 모든 표면에 도장되어 있으므로 이들 단점을 근본적으로 해결할 수 있다. 본 연구에서는 Granville (1987) 상사 축척법을 활용하여 고속회류 수조에서 측정된 저마찰 방오도료의 저항저감성능을 실선으로 확장하고자 한다.

2. 상사축척방법의 기초이론

2.1 난류경계층 속도분포 상사법칙 및 표면거칠기 특성화 방법

난류전단유동에 대한 상사법칙을 알게 되면 형상이 기술된 임의의 규칙적/불규칙적인 거친 표면의 저항특성을 기술할 수 있고, 그로부터 경계층 방법 (Granville, 1987)를 이용하여 선체와 같은 3차원 임의 형상의 마찰저항을 추정하는 데에 이용할 수 있다. 그러한 저항 특성화 방법 중 하나는 형상이 기술된 거친 표면 근방에서의 로그 상사법칙(logarithmic similarity law)에 해당되는 유속분포를 실험적으로 계측함으로써 구할 수 있는데, 이를 직접법이라 칭할 수 있다.

난류경계층은 크게 두 가지 구역으로 나뉠 수 있는데, 벽면에 의하여 좌우되며 경계층 두께와는 무관한 내부층(inner layer)에 해당하는 벽법칙(law of the wall) 및 벽면으로부터 멀리 떨어져 있어서 벽면으로부터의 거리와 무관한 외부층(outer layer)에 적용되는 속도결함법칙(velocity defect law)으로 구분된다. 거칠기가 있는 표면에 대한 벽법칙은 다음과 같이 기술된다.

$$\frac{U}{u_\tau} = f[y^+, k^+, T] \quad (1)$$

여기에서 $y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}$, $k^+ = \frac{ku_\tau}{\nu}$ (거칠기 Reynolds 수), $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ (마찰속도), $T = k/k_1, k_1/k_2, \dots$ (거칠기 조직변수)로 정의된다. 또한 U 는 경계층 두께 δ 에서의 흐름방향 유속, τ_w 는 벽면전단응력, ρ 는 유체의 밀도, ν 는 유체의 동점성계수이다.

한편, 난류전단층의 바깥쪽 부분에 대한 상사법칙은 속도결손법칙(velocity defect law)이라 불리는데 다음 식과 같이 속도결함은 경계층 내의 상대위치에만 좌우됨을 나타낸다.

$$\frac{U_0 - U}{u_\tau} = f\left[\frac{y}{\delta}\right] \quad (2)$$

외부층법칙은 거칠기에 관계없이 성립하는 것으로 실험적으로 입증되었다. 그러나 마찰속도 u_τ 를 통하여 거칠기가 간접적으로는 영향을 미치게 된다. 내부층법칙 및 외부층법칙이 공통으로 성립하는 중복층에서는 속도분포가 로그법칙을 따른다는 것을 쉽게 입증할 수 있다. Reynolds 수 방식의 내부층 법칙으로부터 다음 관계식이 성립한다.

$$\frac{U}{u_\tau} = A \ln y^+ + B_1[k_1^+, T] \quad (3)$$

혹은 상대거칠기 방식으로는 다음과 같다.

$$\frac{U}{u_\tau} = A \ln \frac{y}{k} + B_r[k^+, T] \quad (4)$$

위 식에서 y 절편 B_1 과 B_r 사이에 다음 식이 성립한다.

$$B_r = B_1 + A \ln k^+ \quad (5)$$

여기에서 $B_1[k_1^+, T]$ 혹은 $B_r[k^+, T]$ 를 상사법칙에 의한 거칠기 저항 특성이라 할 수 있다. B_1 의 또 다른 표현식은 다음과 같이 매끈한 평판에서의 $B_{1,s}$ 값을 뺀 형태로도 나타낼 수 있으며 이는 표면거칠기에 의한 속도지연(velocity retardation)으로 이해할 수 있다.

$$\Delta U^+[k^+, T] = B_{1,s} - B_1[k_1^+, T] \quad (6)$$

마찰저항이 증가하는 경우 ΔU^+ 는 양수가 된다. 한편 외부층 법칙으로부터는 중복층에서 다음 로그 관계식이 성립한다.

$$\frac{U_0 - U}{u_\tau} = -A \ln \frac{y}{\delta} + B_2 \quad (7)$$

B_2 는 속도결함 인자(velocity defect factor)라고 불리는데 표면거칠기에 따라 변하지는 않지만 흐름방향 압력구배에는 영향을 받는다. B_2/A 를 때때로 Coles 후류계수(wake factor)라 부르며 별도의 기호를 붙이기도 한다. B_2 역시 낮은 Reynolds 수에서는 층류-난류 천이로 인하여 매끄러운 표면과 거친 표면에서 서로 달라짐을 명심해야 한다.

거칠기 조직변수 T 가 주어질 때 거칠기 저항의 직접특성화 법은 식 (4) 혹은 (5)가 성립하는 벽 근방의 영역에서 측정된 속도 U 및 벽면 전단응력 τ_w 로부터 B_1 , B_r 및 ΔB 를 거칠기

Reynolds 수 k^+ 및 거칠기 조직번호 T 의 함수로 나타내는 것을 의미한다. 경계층 두께가 얇은 경우 측정의 어려움 때문에 쉽지 않은 일이기 때문에 간접특성화법이 보다 실질적이다.

앞서 언급한대로 종복층에서는 내부층법칙 및 외부층법칙이 공통으로 성립하므로 두 식을 각각 더할 수 있다. Reynolds 수 방식 내부층 법칙인 식 (3)과 외부층 법칙인 식 (7)을 더하여 Reynolds 수 방식의 로그미찰법칙을 얻는다.

$$\sqrt{\frac{2}{c_f}} = \sqrt{\frac{\rho U_0^2}{\tau_w}} = \frac{U_0}{u_\tau} = A \ln \frac{u_\tau \delta}{\nu} + B_1 [k^+, T] + B_2 \quad (8)$$

여기에서 $c_f = \frac{2\tau_w}{\rho U_0^2}$ 로 정의되는 국소미찰응력계수인데, 위의 로그미찰법칙은 거칠기 저항특성화법의 기반이 된다. 본 연구에서는 Granville (1987)에 제안된 두 가지 간접법을 사용한다. 이 방법을 도출하기 위해서는 다음과 같은 외부층 법칙의 적분을 계산해야 한다.

$$I_1 = \int_0^1 \left(\frac{U_0 - U}{u_\tau} \right) d\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (9)$$

$$I_2 = \int_0^1 \left(\frac{U_0 - U}{u_\tau} \right)^2 d\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (10)$$

I_1, I_2 는 외부층 법칙이 경계층의 전 영역 ($0 \leq y/\delta \leq 1$) 에서 y/δ 만의 함수로서 유지된다고 가정하면 상수가 된다. 만일 식 (7)의 외부층 로그 관계식이 벽에서도 적용된다고 하면 전체 경계층에 대하여 외부층 법칙은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{U_0 - U}{u_\tau} = -A \ln \frac{y}{\delta} + B_2 - B_2 \frac{w}{2} - Aq \quad (11)$$

여기에서 w 는 Coles 의 후류함수 (wake function) 이고 q 는 후류수정함수(wake modification function) 로서, y/δ 의 다항식으로 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{w}{2} = 3\left(\frac{y}{\delta}\right)^2 - 2\left(\frac{y}{\delta}\right)^3 \quad (12)$$

$$q = \left(\frac{y}{\delta}\right)^2 - \left(\frac{y}{\delta}\right)^3 \quad (13)$$

식 (11), (12), (13) 을 식 (9) 및 (10)에 대입하여 적분하면 외부층 법칙의 적분은 다음과 같이 된다.

$$I_1 = \frac{11}{12}A + \frac{1}{2}B_2 \quad (13)$$

$$I_2 = \frac{4819}{2520}A^2 + \frac{639}{420}AB_2 + \frac{13}{35}B_2^2 \quad (14)$$

평판에 대해서는 $A = 2.5$, $B_2 = 2.4$ 로 알려져 있으므로 식 (13) 및 (14) 에 의하여 $I_1 = 3.49$, $I_2 = 23.2$ 가 된다.

2.2 간접특성화 방법 1 : 미찰항력 계측방법

첫 번째 방법은 미찰항력 계측방법(overall method) 이라 불리는데, 특정한 거칠기로 균일하게 덮여 있는 평판을 예인수조에서 이송하거나 균일 유동 중에 담가 놓고 총 저항을 측정한다. 측정된 저항을 평판 끝날(trailing edge) 에서의 저항특성화로 전환할 수 있다. 이 방법은 Schultz (2004) 가 수행한 fouling 에 의한 표면거칠기 증가 및 거칠기 Reynolds 수, 거칠기함수 ΔU^+ 의 조사연구의 근거가 된다.

압력구배가 0 인 평판경계층에 대한 von Kármán 모멘텀 적분 공식은 다음과 같다.

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho U_0^2} = \frac{c_f}{2} = \frac{1}{\sigma^2} \quad (15)$$

여기에서 $\sigma = \sqrt{2/c_f}$ 이며 θ 는 모멘텀 두께로서 $\theta = \int_0^1 \left(1 - \frac{U}{U_0}\right) \frac{U}{U_0} d\left(\frac{y}{\delta}\right)$ 이다. 위 식을 $x=0$ 에서 $x=L$ 까지 적분, 정리하면 아래 식 (16)과 같이 모멘텀 두께 Reynolds 수 $Re_\theta = U_0\theta/\nu$ 및 평판 길이 Reynolds 수 $Re_L = U_0L/\nu$ 로써 표현된다. 첨자 L 은 평판 끝날에서의 조건을 가리킨다.

$$C_F = \frac{2\theta_L}{L} = \frac{2Re_{\theta,L}}{Re_L} \quad (16)$$

식 (15)를 적분하면 다음과 같이진다.

$$Re_L = \int_0^{Re_{\theta,L}} \sigma^2 d(Re_\theta) = \sigma_L^2 Re_{\theta,L} - 2 \int_0^{\sigma_L} Re_\theta \sigma d\sigma \quad (17)$$

이는 $x=0$ 에서 $Re_\theta = 0$ 이기 때문에 성립한다. 모멘텀 두께의 정의로부터 다음 식이 성립한다.

$$Re_\theta = \frac{u_\tau \delta}{\nu} \left(I_1 - \frac{I_2}{\sigma} \right) = \eta \left(I_1 - \frac{I_2}{\sigma} \right) \quad (18)$$

여기에서 $\eta = u_\tau \delta / \nu$ 로 놓은 것이다. 식 (8) 로부터 다음 식이 성립한다.

$$\eta = \exp\left(\frac{\sigma - B_1 - B_2}{A}\right) \quad (19)$$

식 (18)과 (19)를 식 (17) 의 우변 두 번째 항의 적분에 대입 하고 부분적분을 두 번 적용하여 정리하면 다음을 얻는다.

$$\int_0^{\sigma_L} Re_{\theta} \sigma d\sigma = AI_1 \eta_L \sigma_L \left[1 - \left(A + \frac{I_2}{I_1} + B_1' \right) \frac{1}{\sigma_L} + \dots \right] \quad (20)$$

여기서 $B_1' = \frac{dB_1}{d(\ln k^+)} = \frac{d\Delta B}{d(\ln k^+)} \text{ at } x = L$ 이다. 매끄러운 표면에서는 $B_1' = 0$ 이고 완전발달된 거칠기에서는 식(5)로부터 $B_1' = -A$ 가 된다. 식 (20)을 식 (17) 에 대입, 다음을 얻는다.

$$Re_L = I_1 \sigma_L^2 \eta_L \times \left[1 - \frac{2A + (I_2/I_1)}{\sigma_L} + \frac{2A(A + (I_2/I_1) + B_1')}{\sigma_L^2} + \dots \right] \quad (21)$$

평판 끝날($x = L$)에서 얻은 식 (19) $\eta_L = \exp\left(\frac{\sigma_L - B_1 - B_2}{A}\right)$ 을 대입하고 식 (21)의 양변에 로그 를 취하면 다음과 같아진다.

$$\ln Re_L = \ln I_1 + \ln \sigma_L^2 + \frac{\sigma_L}{A} - \frac{B_1}{A} - \frac{B_2}{A} - \frac{2A + (I_2/I_1)}{\sigma_L} + \dots \quad (22)$$

$\sigma_L = \sqrt{2/C_F}$ 를 대입, 국소미찰유력계수 $c_{f,L}$ 를 미찰항력 계수 C_F 로 대체하고 식 (22)를 σ_L 에 대하여 재배치하면 거칠 기가 있는 평판 경계층에 대하여 다음 식을 얻는다.

$$\left(\sqrt{\frac{2}{C_F}} \right)_R = A \ln(Re_L C_F) + [B_1 + B_2 - A - A \ln(2I_1)] + A \left(\frac{A}{2} + \frac{I_2}{I_1} + B_1' \right) \left(\sqrt{\frac{2}{C_F}} \right)_R \quad (23)$$

한편 매끄러운 표면에 대해서는 다음과 같다.

$$\left(\sqrt{\frac{2}{C_F}} \right)_S = A \ln(Re_L C_F) + [B_{1,s} + B_2 - A - A \ln(2I_1)] + A \left(\frac{A}{2} + \frac{I_2}{I_1} \right) \left(\sqrt{\frac{2}{C_F}} \right)_S \quad (24)$$

위의 식은 평판의 미찰저항에 대한 Kármán-Schoenherr 공식 과 같은 형태이다. 평판 끝날에서의 저항특성화는 $Re_L C_F$ 의 값 이 같을 때 매끄러운 표면에서의 식 (24)를 거친 표면에서의 식 (23)에서 뺄으로써 얻어진다.

$$\Delta U^+ = \left(\sqrt{\frac{2}{C_F}} \right)_S - \left(\sqrt{\frac{2}{C_F}} \right)_R - 19.7 \left[\left(\sqrt{\frac{C_F}{2}} \right)_S - \left(\sqrt{\frac{C_F}{2}} \right)_R \right] + 2.5 B_1' \left(\sqrt{\frac{C_F}{2}} \right)_R \quad (25)$$

$$k^+ = \left(\frac{Re_L C_F}{2} \right) \left(\frac{k}{L} \right) \left(\sqrt{\frac{2}{C_F}} \right) \times \left[1 - 2.5 \left(\frac{C_F}{2} \right)_R^{1/2} + 2.5(3.75 + B_1') \left(\frac{C_F}{2} \right)_R \right] \quad (26)$$

완전히 거친 경우 식 (5)에서 B_r 은 상수가 되고 $B_1' = -A = -2.5$ 이 된다. 그렇지 않은 경우 B_1' 을 반복해법 으로 구한다.

2.3 간접특성화 방법 2 : 국소계측방법

Karlsson (1978) 은 특정한 거칠기를 가진 평판을 균일 유동 에 놓고 한 위치에서의 벽면전단응력을 부유식 검력계(floating element)로 측정하였다. 대부분의 경우에 있어서 부유식 검력계 측정면 위의 경계층 유동정보는 조사되지 않았고 자유흐름속도 와 벽면전단응력만이 측정되므로 다음 과정을 이용하면 자유흐 름 속도 및 전단응력만으로 저항특성화가 가능하다.

경계층은 어떤 원점에서 시작되어 floating element 위치 x 까지 발달한다. 식 (22)를 x 에 맞게 고쳐쓰면 다음과 같다.

$$\ln Re_x = \frac{\sigma}{A} + \ln \sigma^2 - \frac{B_1}{A} - \frac{B_2}{A} + \ln I_1 - \frac{2A + (I_2/I_1)}{\sigma_L} + \dots \quad (27)$$

$Re_x = U_0 x / \nu$ 이다. $\sigma = \sqrt{2/c_f}$ 를 이용하여 고쳐쓰면

$$\left(\sqrt{\frac{2}{c_f}} \right)_R = A \ln(Re_x c_f) + B_1 + B_2 - A \ln(2I_1) + A \left(A + \frac{I_2}{I_1} \right) \left(\sqrt{\frac{c_f}{2}} \right)_R + \dots \quad (28)$$

이 되고, 매끈한 표면에 대해서는 다음과 같아진다.

$$\left(\sqrt{\frac{2}{c_f}}\right)_S = A \ln(Re_x c_f) + B_1 + B_2 - A \ln(2I_1) \quad (29)$$

$$+ A \left(A + \frac{I_2}{I_1}\right) \left(\sqrt{\frac{c_f}{2}}\right)_S + \dots$$

위 식들은 잘 알려진 다음의 von Kármán 공식 $\sqrt{2/c_f} = a \ln(Re_x c_f) + b$ 과 같은 형태이다. 여기에서 계수 a, b 는 고차항을 무시함에 의한 오차를 감안하여 조정된 것이다. $Re_x c_f$ 의 값이 같을 때 매끄러운 표면에서의 식 (29)를 거친 표면에서의 식 (28)에서 빼고 평판에 대하여 알려진 값 $A = 2.5, B_2 = 2.4$ 및 $I_1 = 3.49, I_2 = 23.2$ 를 대입하여 정리하면 저항특성화값 ΔB 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta U^+ = \left(\sqrt{\frac{2}{c_f}}\right)_S - \left(\sqrt{\frac{2}{c_f}}\right)_R \quad (30)$$

$$- 19.7 \left[\left(\sqrt{\frac{c_f}{2}}\right)_S - \left(\sqrt{\frac{c_f}{2}}\right)_R \right]$$

이와 관련된 거칠기 Reynolds 수는 아래와 같다.

$$k^+ = (Re_x c_f) \left(\sqrt{\frac{2}{c_f}}\right)_R \left(\frac{k}{2x}\right) \quad (31)$$

2.4 마찰저항의 실선확장방법

앞 절에서 소개된 Granville 상사축척법을 기반으로 상이한 거칠기 특성의 표면에 대하여 측정된 모형선 마찰저항계수의 차이를 실선 마찰저항계수의 차이 (ΔC_{FS}) 로 확장하는 방법을 살펴보기로 한다. 이 방법은 Schultz (2007)에 상세히 기술되어 있다.

실선의 3차원 형상으로 인한 압력구배가 항력에 미치는 영향인 형상항력은 모형선-실선 상관계수 C_A 에 반영되어 있고, 형상항력은 표면거칠기에 크게 영향을 받지 않기 때문에 실선 길이의 평판으로부터 실선의 마찰저항계수를 예측함이 합리적이다.

Fig. 1은 Granville 의 상사축척방법을 도식적으로 나타내고 있다. 첫 번째로 매끄러운 평판에 대한 마찰저항계수를 $\log Re$ 의 함수로 표시하는데, Kármán-Schoenherr curve $\frac{0.242}{\sqrt{C_F}} = \log_{10}(Re_L C_F)$ 을 사용한다. 실험실에서 측정된 거친 평판의 마찰저항계수가 Fig. 1에 점으로 찍히게 되는데, 이 점은 다음 두 가지 곡선의 교점이 된다.

- Kármán-Schoenherr curve 를 수평방향으로 $\frac{\kappa \Delta U^+}{\ln(10)}$ 만큼 이동시킨 곡선, 통상적으로 Colebrook 형태 거칠기함수 $\Delta U^+ = (1/\kappa) \ln(1+k^+)$ 를 사용하기 때문에 이는 다음 식에 따라 Kármán-Schoenherr curve에서 Re_L 대신 $Re_L(1+k^+)$ 를 대입한 것과 같다.

- 다음 식을 만족하는 $L_{plate}^+ = L_{plate} u_\tau / \nu$ 의 꺾적

$$Re_L = \frac{L_{plate}^+}{\sqrt{\frac{C_F}{2} \left(1 - \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{C_F}{2}}\right)}} \quad (32)$$

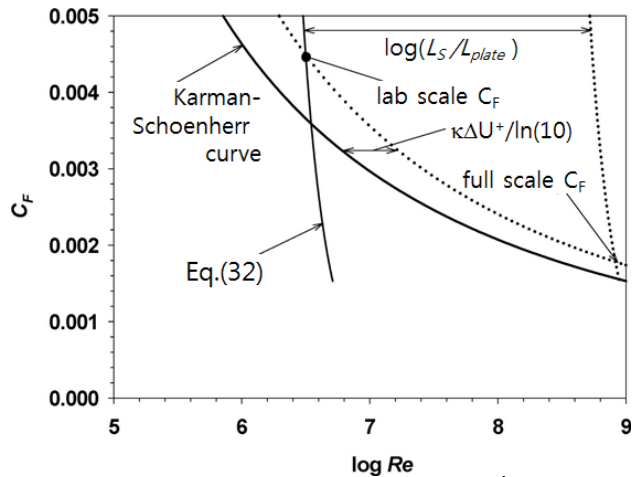


Fig. 1 Graphical representation of Granville's similarity law scaling (Granville 1987). The graph illustrates how the roughness function, ΔU^+ , determined from the laboratory hydrodynamic tests is related to the increase in the frictional resistance coefficient at ship scale, ΔC_{FS} (Schultz 2007).

위의 두 곡선을 정의하는 데에 있어 공통적으로 필요한 양이 점성크기척도인 ν/u_τ 이다. 다시 말하면 어떤 정해진 거칠기척도 k 에 대하여 측정된 실험데이터가 위의 두 곡선의 교점과 일치하려면 거칠기척도 k 와 거칠기 Reynolds 수 k^+ 사이의 축척 변수인 점성척도 $(\nu/u_\tau)_M$ 의 값이 올바르게 선정되어야 한다. 그렇지 않을 경우는 두 곡선의 교점의 x 좌표가 $\log Re_L$ 과 달라지는데 교점의 x 좌표가 주어진 $\log Re_L$ 보다 작을 때에는 $(\nu/u_\tau)_M$ 를 작게 하여 거칠기 Reynolds 수 k^+ 를 증가시키고, 교점의 x 좌표가 너무 클 때에는 $(\nu/u_\tau)_M$ 를 증가시켜 거칠기 Reynolds 수 k^+ 를 작아지게 하는 방법으로 반복해를 구하여 정확한 $\log Re_L$ 에서 두 곡선이 교차하도록 한다.

이제 동일한 거칠기척도 k 가 실선에서 야기하는 저항에 대하여 고찰하도록 하자. 실선마찰저항계수 C_{FS} 는 모형시험 결과와 동일한 방식으로 결정된다. 즉, Kármán-Schoenherr curve 를 수평방향으로 $\kappa \Delta U^+ [\ln(10)]^{-1}$ 만큼 이동시킨 곡선과 식 (32)를 $\log(L_S/L_{plate})$ 만큼 수평방향으로 이동시킨 곡선이다.

여기에서 언급된 두 번째 곡선은 $\log Re_L + \log\left(\frac{L_S}{L_{plate}}\right) = \log Re_S$
 $= L_{plate}^+ \left[\sqrt{\frac{C_F}{2} \left(1 - \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{C_F}{2}}\right)} \right]^{-1}$ 로 해석될 수 있다. 모형척도

에서와 마찬가지로, 실선척도에서도 위의 두 가지 곡선이 올바르게 정의되려면 실선점성길이척도 $(\nu/u_\tau)_s$ 가 정확히 예측되어야 한다. 만약 그렇지 않을 경우는 두 곡선의 교점의 x 좌표가 $\log Re_s$ 와 달라지므로, 위에서와 유사한 반복 해법을 사용하여 정확한 실선점성길이척도 $(\nu/u_\tau)_s$ 를 구한다.

이와 같이 결정된 실선마찰저항계수 C_{FS} 와 동일한 Re_s 에서 Kármán-Schoenherr 곡선으로 주어지는 매끈한 평판의 저항 계수와의 차이인 ΔC_{FS} 가 거칠기에 의한 저항계수증가량으로 주어진다.

3. 저마찰도료 성능측정 결과

본 연구팀에서 개발, 특허 등록된 FDR-SPC Frictional Drag Reduction Self-Polishing Copolymer) 기반 저마찰 선박방오도료는 Lee, et al. (2015)에 상세히 서술되어 있다. 본 저마찰 도료는 고분자 저항저감제가 용출되어 난류 유동의 활동을 억제하는 Toms 효과를 발휘한다. PEO(PolyEthyleneOxide) 고분자용출제를 일반 방오도료에 혼합한 이전의 저마찰도료 (Yang, et al., 2014)가 1~2%의 저항저감첨가제를 포함하는 데 비하여 본 도료는 질량비의 40% 이상을 차지하는 SPC 수지가 저항저감 성능을 발휘하는 저마찰 고분자 신소재인 FDR-SPC이다. 도막의 주 성분인 FDR-SPC 가 지속적으로 Toms 효과를 유발하기 때문에 본 저마찰도료는 도막이 존재하는 한 장기간의 마찰저항 저감성능을 유지할 수 있다. 실제로 6개월간 인공해수 속에서 로터를 회전시키면서 수행한 장기성능시험의 결과, 매끈한 표면과 동등한 초기성능이 계속 유지되는 것으로 나타났다.

고속회류수조에서 측정된 실험실 규모의 마찰저항 특성에 대하여 살펴보기로 한다. 마찰저항 저감성능을 지닌 FDR-SPC 수지에 아산화동과 같은 방오안료 및 기타 첨가제를 혼합, 저마찰 선박 방오도료를 제조한다. Fig. 2은 본 연구에서 사용된 고속회류수조와 시험부에 설치된 매입형 검력계, LDV 유속측정 및 실험에 사용된 시편을 나타낸다. 하단 시편 사진 맨 좌측이 FDR-SPC 도장 시편이고, 좌측 두 번째가 기존 방오도료 (Baseline AF), 세 번째 및 네번째 시편이 저마찰 방오도료(Low Frictional AF) 시편이다. FDR-SPC는 투명한 겔 상의 고분자로서, 용제가 휘발되면 Fig. 2의 시편사진과 같이 거칠기가 0인 매끈한 표면을 형성한다. 여기에 방오안료 및 첨가제를 배합한 저마찰 방오도료는 표면거칠기가 나타나고 외관상으로는 일반 방오도료와 유사하다.

Fig. 2에 도시된 시편 크기는 100 mm × 50 mm 로서, 매입형 검력계의 상부에 장착되어 경계층 유동의 벽면 전단력을 측정할 수 있다. 이 시편은 시험부 입구로부터 1.6m 지점에 설치되며, 측정된 전단력을 시편 면적으로 나누면 마찰응력을 구할 수 있다. 시편 표면과 시험부 벽면 사이의 평행도와 간극을 잘 유지해야만 마찰저항 측정결과의 신뢰성을 제고할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 2에 도시된 것처럼, 시편과 시험부 벽면 사이의 간극을 30 μ m 로 유지하였고 높낮이 차를 $\pm 5 \mu$ m 이내로 유지하였다.



Fig. 2 Photos of the high-speed water tunnel, flush-mounted balance and the samples of FDR-SPC and FDR-AF coatings

Table 1 과 2 에 고속회류수조에서 측정된 저마찰 도료의 마찰저항 특성을 나타내고 있다. 먼저 FDR-SPC 는 표면거칠기가 유사한 매끈한 표면과 비교시 평균 13.5% 의 마찰저항 저감율을 나타낸다. 표면거칠기를 줄여 마찰저항을 감소시키는 여타의 도료와는 달리, 수지로부터 Toms 효과가 발현됨을 강하게 시사하고 있다. Lee, et al. (2015)에 발표된 결과로부터 FDR-SPC 가 매끈한 표면보다 난류강도의 분포가 감소함을 알 수 있는데, 이 또한 Toms 효과의 유력한 근거라고 할 수 있다. 한편, 기존 방오도료와 저마찰 방오도료의 국소 마찰응력계수를 비교한 Table 2 로부터 평균적으로 25.4%의 마찰저항 저감율을 산출할 수 있다. 이들 마찰응력계수를 Reynolds 수의 함수로써 Fig. 3 에 도시하였다. 매끈한 표면에 대한 이론적 예측치로서 다음의 두 가지 식을 사용하였다.

Table 1 Comparison of skin frictional drag between uncoated (smooth) surface and FDR-SPC

U(m/s)	Re _x (×10 ⁻⁶)	Uncoated (smooth)	FDR-SPC	
		C _f (×10 ³)	C _f (×10 ³)	DR(%)
4.0	6.85	2.977	2.700	9.30
6.0	10.28	2.829	2.471	12.65
8.0	13.71	2.708	2.363	12.74
10.0	17.14	2.646	2.246	15.12
12.0	20.56	2.580	2.212	14.26
14.0	23.99	2.491	2.132	14.41
16.0	27.42	2.490	2.087	16.18

Table 2 Comparison of skin frictional drag between baseline AF and Low Frictional AF

U(m/s)	Re _x (×10 ⁻⁶)	Baseline AF	Low Frictional AF	
		C _f (×10 ³)	C _f (×10 ³)	DR(%)
4.0	6.85	3.708	2.935	20.85
6.0	10.28	3.472	2.813	18.98
8.0	13.71	3.415	2.677	21.61
10.0	17.14	3.431	2.551	25.65
12.0	20.56	3.467	2.485	28.32
14.0	23.99	3.392	2.374	30.01
16.0	27.42	3.362	2.279	32.21

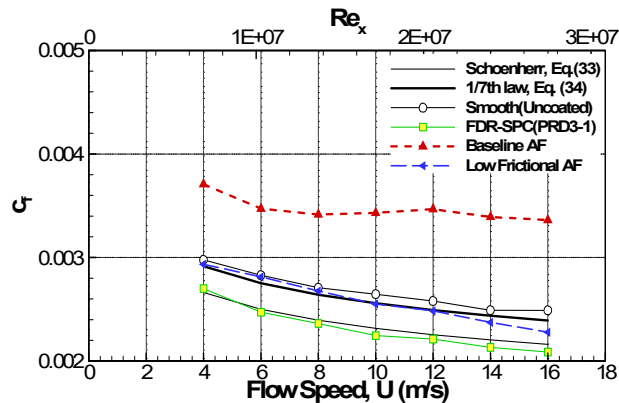


Fig. 3 Comparison of frictional drag in high Reynolds number flow for FDR-SPC and FDR AF coatings

$$\text{Schoenherr 경험식 } \frac{1}{\sqrt{c_f}} = 4.15 \ln(Re_x c_f) + 1.7 \quad (33)$$

$$\text{1/7승 멱법칙 } c_f = \frac{0.027}{Re_x^{1/7}} \quad (34)$$

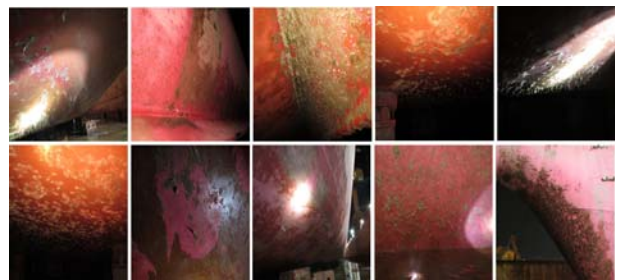
우선 매끈한 표면의 국소 마찰계수는 식 (34)의 1/7승 멱법칙에 보다 근접한 것으로 나타났다. 그리고 FDR-SPC의 경우, 매끈한 표면 대비 거의 일정한 마찰저항 저감효과가 나타나고 있다. 또다른 주목할 만한 점은 저마찰 도료의 경우 매끈한

표면과 거의 동등한 정도의 마찰저항 특성이 나타난다는 것이다. 앞서 언급한 것처럼, 방오도료를 제조하기 위하여 분말 형태의 방오안료나 첨가제가 수지와 배합되기 때문에 어느 정도의 표면 거칠기가 나타나는 것이 불가피하다. 하지만 본 저마찰 방오도료의 경우 기본 수지가 매끈한 표면보다 마찰저항이 작기 때문에 표면거칠기가 있음에도 불구하고 매끈한 표면 정도의 마찰저항 특성이 나타나는 것으로 풀이된다.

본 연구팀에서 개발된 저마찰 방오도료는 마찰저항 성능 이외에 패널 해수침적시험 및 실선 패치 테스트 등을 거쳐 방오성능에 있어서도 성공적인 평가를 받았다. 이후 실선에서의 성능검증을 위하여 Capesize 벌크선인 DWT 176k Pan Bona 호 (Fig. 4)의 입거 수리시 수선 하부면적 전체에 본 저마찰 방오도료가 시공되었다. Fig. 4의 (b) 및 (c)는 각각 입거 수리 전후의 선체 표면 상태를 보이고 있다. 사진에서 볼 수 있는 것처럼, 입거 전 상태는 선체 표면 곳곳에 오손(fouling)이 진행된 반면, 입거 후는 방오도료가 신규 도장되어 전체적으로 깨끗한 표면 상태를 보이고 있다. Table 3은 Pan Bona 호의 주요 제원을 나타낸다.



(a) Photo of M/V Pan Bona



(b) Hull Condition before Redocking



(c) Hull Condition after Redocking

Fig. 4 Comparison of frictional drag in high Reynolds number flow for FDR-SPC and FDR AF coatings

Table 3 Principal particulars of M/V pan bona for design load condition

Item	Symbol	Unit	Value
Length between Perpendiculars	L _{PP}	[m]	282.20
Waterline length	L _{WL}	[m]	286.75
Moulded Beam	B	[m]	45.00
Draft, fore	T _F	[m]	16.50
Draft, aft	T _A	[m]	16.50
Displacement	∇	[m ³]	176,682
Wetted Surface Area	WSA	[m ²]	19,235
Bilge Keel Area	S _{BK}	[m ²]	147.2
Projected Area above Waterline	A _T	[m ²]	830.0
Block Coefficient	C _B		0.8432
Prismatic Coefficient	C _P		0.8450

4. 실선 마찰저항 성능확장 결과

4.1 국소측정결과 기반 저항특성화

본 연구에서는 2.4절에 서술된 Schultz (2007) 방법에 의하여 저마찰 방오도료의 실선 성능을 예측하였다. 원래 이 방법은 도장된 평판의 마찰항력계수에 기반을 둔 방법이므로 3장에서 서술된 국소계측 결과로는 직접 적용이 어렵다. Fig. 3 에 나타난 기준도료(Baseline AF)와 저마찰도료(Low Frictional AF)의 국소 마찰응력계수들이 매끈한 표면의 국소응력에 대한 Schoenherr 경험식 (식 (33))과 거의 평행한 거동을 보임에 주목하여 다음과 같은 절차에 의하여 저항특성화를 수행하였다.

1. Fig. 2에 도시된 도장 시편의 표면거칠기를 측정한다. Diavite DH-8 Stylus Gauge를 사용하여 측정된 평균거칠기 R_a 값은 Baseline AF의 경우 2.52 μm , Low Frictional AF의 경우 1.64 μm 가 측정되었다.

2. 측정된 국소마찰응력계수를 $(c_f)_R$ 로 놓고 식 (33)에 의하여 동일한 Reynolds 수에서 계산되는 매끈한 표면의 국소마찰응력계수 $(c_f)_S$ 와의 비율을 계산한다.

3. 위에서 계산된 응력비율에 Schoenherr 마찰항력계수 $\frac{0.242}{\sqrt{C_F}} = \log_{10}(Re_L C_F)$ 를 곱하여 길이가 국소응력측정점까지의 거리와 같은 평판의 마찰항력계수 $(C_F)_R$ 을 계산한다.

4. 식 (25)와 (26)을 이용하여 마찰항력 계측방법 방법에 의한 ΔU^+ 와 k^+ 를 계산한다. k^+ 를 계산하기 위해서는 측정된 표

면거칠기값 R_a 를 등가거칠기 k 로 변환해야 하는데, ΔU^+ 가 Colebrook 거칠기함수 $\Delta U^+ = (1/\kappa)\ln(1+k^+)$ 를 따르도록 R_a 에 일정한 비율을 곱하여 얻는다.

5. 식 (30)과 (31)을 이용해서도 측정된 국소마찰응력계수에 기반을 둔 ΔU^+ 와 k^+ 를 계산할 수 있다. 앞서 4항에서 계산된 마찰항력 계측방법에 의한 값들과 비교 가능하다.

위와 같은 절차에 따라서 도출된 등가거칠기 k 는 Baseline AF의 경우 18.6 μm , Low Frictional AF의 경우 1.50 μm 가 추정되었다. 거칠기 측정값은 보통 측정구간의 길이에 좌우되는데, 본 연구의 시편의 길이가 150mm 이라서 거칠기 측정구간도 15 mm 로 짧기 때문에 R_a 이 통상적인 경우보다 작게 나와서 기준도료의 경우 등가거칠기 $k = 7.4R_a$ 를 사용하였다.

하지만 Low Frictional AF의 경우는 표면거칠기에 의한 마찰저항 증가를 상쇄하는 Toms 효과가 작용하여 마찰저항이 감소하므로 Colebrook 거칠기함수 $\Delta U^+ = (1/\kappa)\ln(1+k^+)$ 를 만족시키기 위해서 등가거칠기 $k = 0.92R_a$ 를 사용하였다.

Table 4 와 5 는 각각 Baseline AF와 Low Frictional AF의 저항특성화 과정을 나타내고 있다. 저항특성화 계산은 굵게 표시된 자유흐름속도 14 m/s 에 대하여 주로 수행되었으며 두 가지 방법에 기반을 둔 ΔU^+ 와 k^+ 가 Colebrook 거칠기함수와 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 4 Resistance characterization results for baseline AF

U(m/s)	Re _x ($\times 10^{-6}$)	$(c_f)_R$ ($\times 10^3$)	$(c_f)_S$ ($\times 10^3$)	$(C_F)_S$ ($\times 10^3$)	$(C_F)_R$ ($\times 10^3$)
4.0	6.85	3.708	2.663	3.123	4.350
6.0	10.28	3.472	2.500	2.921	4.056
8.0	13.71	3.415	2.394	2.789	3.979
10.0	17.14	3.431	2.316	2.692	3.989
12.0	20.56	3.467	2.254	2.617	4.024
14.0	23.99	3.392	2.204	2.555	3.932
16.0	27.42	3.362	2.162	2.504	3.892

Re _x ($\times 10^{-6}$)	Overall Method, Section 2.2		Local Method, Section 2.3		Colebrook Correlation ΔU^+
	k^+ Eq.(25)	ΔU^+ Eq.(26)	k^+ Eq.(31)	ΔU^+ Eq.(31)	
6.85	3.431	4.313	2.966	4.294	3.360
10.28	4.983	4.405	4.333	4.377	4.083
13.71	6.591	4.837	5.745	4.780	4.656
17.14	8.259	5.391	7.206	5.301	5.134
20.56	9.959	5.925	8.692	5.804	5.540
23.99	11.494	5.996	10.052	5.869	5.860
27.42	13.079	6.182	11.452	6.044	6.151

Table 5 Resistance characterization results for low frictional AF

U(m/s)	Re _x (×10 ⁻⁶)	(c _f) _R (×10 ³)	(c _f) _S (×10 ³)	(C _F) _S (×10 ³)	(C _F) _R (×10 ³)
4.0	6.85	2.935	2.663	3.123	3.443
6.0	10.28	2.813	2.500	2.921	3.286
8.0	13.71	2.677	2.394	2.789	3.119
10.0	17.14	2.551	2.316	2.692	2.966
12.0	20.56	2.485	2.254	2.617	2.884
14.0	23.99	2.374	2.204	2.555	2.752
16.0	27.42	2.279	2.162	2.504	2.638

Re _x (×10 ⁻⁶)	Overall Method, Section 2.2		Local Method, Section 2.3		Colebrook Correlation ΔU^+
	k ⁺ Eq.(25)	ΔU^+ Eq.(26)	k ⁺ Eq.(31)	ΔU^+ Eq.(31)	
6.85	0.247	1.339	0.216	1.501	0.477
10.28	0.362	1.660	0.319	1.796	0.675
13.71	0.472	1.611	0.416	1.745	0.849
17.14	0.575	1.422	0.510	1.565	1.005
20.56	0.681	1.448	0.605	1.586	1.154
23.99	0.777	1.120	0.692	1.276	1.283
27.42	0.870	0.805	0.777	0.978	1.402

4.2 실선저항성능 추정

앞서 2.4절에 설명된 Granville 실선확장방법을 수행하는 프로그램의 실행화면을 Fig. 5에 도시하였다. 프로그램 창 좌측 상단에는 실험실 계측 조건, 즉 고속회류수조 측정시의 유속, 평판의 길이, 수온, 앞 절에서 추정된 평판의 마찰항력계수 (C_F)_R 및 등가거칠기 k가 입력된다. 여기에서 평판의 길이는 고속회류수조 시험부 내에서 경계층이 성장하는 거리, 즉 시험부 입구에서 매입형 마찰저항 검류계 시험편까지의 거리인 1.6 m가 사용된다.

프로그램 창 중앙 상단에는 실선의 조건이 입력되며, 여기에서는 MV Pan Bona의 제원인 선속 14.8 knots, LWL = 287 m이 입력된다. Fig. 5는 기존도로 (Baseline AF)에 대한 프로그램 실행화면으로서, 실선의 마찰항력계수 C_{FS} = 1.842×10⁻³이 계산되는데 실선 스케일에서 매끈한 표면과의 마찰항력계수의 차이 ΔC_{FS} = 4.197×10⁻⁴로 주어진다. 한편, 저마찰도로 (Low Frictional AF)의 경우 C_{FS} = 1.493×10⁻³, ΔC_{FS} = 7.061×10⁻⁵가 얻어진다.

Fig. 6 및 7은 각각 기존도로 (Baseline AF) 및 저마찰도로 (Low Frictional AF) 적용시의 Granville 실선확장 결과를 도시하고 있다. 실험실 규모의 마찰저항계수의 차이가 어떻게 실선으로 확장되는지를 잘 나타내고 있다.

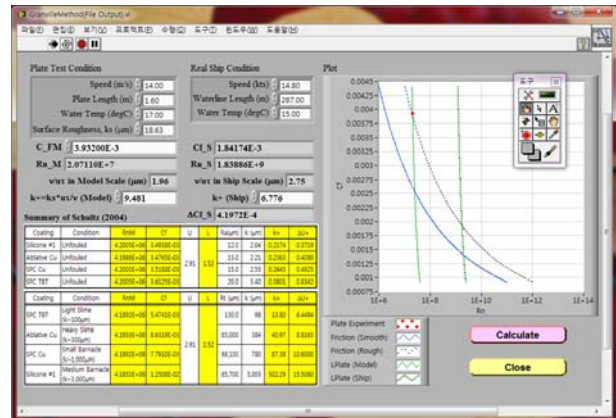


Fig. 5 Program for granville's similarity scaling

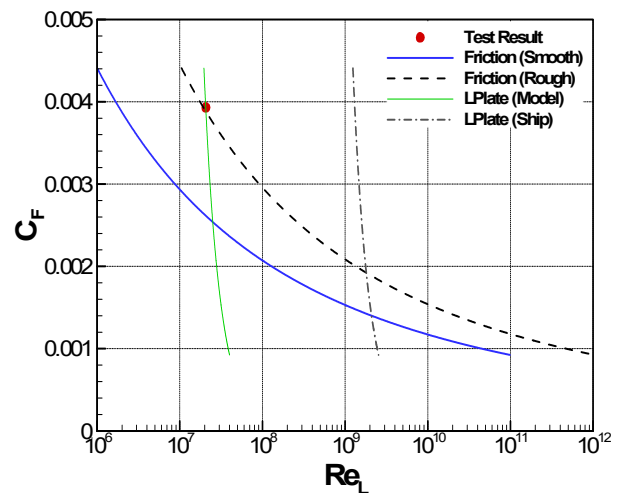


Fig. 6 Granville's similarity scaling result for baseline AF

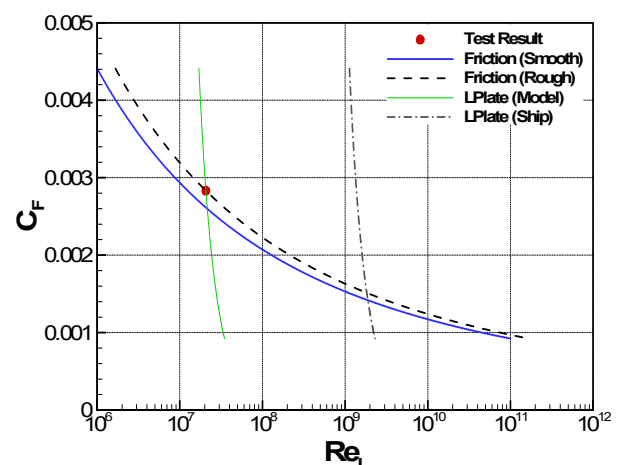


Fig. 7 Granville's similarity scaling result for low frictional AF

Table 6은 본선의 선속인 14.8 knots에서 예상되는 실선 총저항계수의 차이를 추정한 것이다. 축척비 λ = 37.045로 수행된 모형시험 결과 예상 운항선속 14.8 knots에서 잉여저항계수

$C_{RM} = 3.580 \times 10^{-5}$ 가 얻어졌다. 여기에 공기저항계수 $C_{AA} = 0.001 \frac{A_T}{S}$ 를 적용하고 실선총저항계수 C_{TS} 를 다음과 같이 2차원 방법에 의하여 추정하였다.

Table 6 Comparison of resistance coefficients with different coatings at 14.8 knots

Item	Baseline AF	Low Frictional AF
C_{RM} (Model Test)	3.580×10^{-5}	3.580×10^{-5}
C_{FS}	1.842×10^{-3}	1.493×10^{-3}
C_{AA}	4.282×10^{-5}	4.282×10^{-5}
C_{TS}	1.921×10^{-3}	1.572×10^{-3}
ΔC_{TS} (%)	-	18.2%

$$C_{TS} = C_{FS} + C + C_{AA} \quad (35)$$

여기에서, 모형선과 실선 사이의 상관 수정계수는 따로 고려되지 않았다. 축척효과에 의한 보정계수는 본 논문의 범위를 벗어나고, 실선의 표면거칠기 효과는 앞에 언급된 Granville 실선확장방법으로 C_{FS} 에 이미 고려되어 있기 때문이다.

Table 6 에 나타난 것처럼, 기존도료(Baseline AF)와 저마찰도료 (Low Frictional AF)의 실선 총저항계수는 각각 1.921×10^{-3} 와 1.572×10^{-3} 로 나타났으며 저마찰도료는 기존도료 대비 18.2%의 저항저감효과를 나타낼 것으로 추정된다.

한편, 본선의 입거 수리 전후의 실험역 운항 데이터가 해당 선박 운항팀에 의하여 수집되고 있었으며, 선체 도장의 실험역 성능 분석을 위하여 국제 표준으로 새로이 제안된 ISO19030 기반으로 해석된 바 있다. Kim, et al. (2016)의 발표에 따르면, 본선의 입거 전후 8개월 간 운항데이터를 분석한 결과 민재 흡수 조건에서 선속은 10.2% 증가했으며 연료소모량은 48.1% 감소한 것으로 나타났다. 이와 같은 연비 개선에는 입거 수리시 새로이 장착된 PBCF(Propeller Boss Cap Fin) 및 선체 표면 청소와 같은 입거수리 효과가 포함되어 있는 것이 명백하지만, 본 저마찰 방오도료의 기여도 또한 무시하기 어려운 것으로 판단된다. 향후 본선의 실험역 운항 데이터에서 나타난 연비 개선 효과에서 있어서 다른 요인의 효과를 제거하고 저마찰 선박도료의 기여도에 대한 보다 면밀한 분석이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 Schultz (2007) 가 고안한 Granville (1987) 상사축척법(similarity scaling method)를 기반으로 고속회류수조에서 측정된 저마찰 방오도료의 저항저감성능을 실선으로 확장하는 방법을 활용하여, 상이한 표면거칠기 및 마찰저항특성을 지니는 선박 방오도료가 특정한 선박에 시공되었을 때의 성능 차이를 예측하는 절차를 제시하였다. 본 연구팀에 의하여 개발된 저항저

감 고분자 신소재 FDR-SPC 기반 저마찰 방오도료는 실험실 환경에서 기존 방오도료 대비 25.4%의 마찰저항 저감율을 보이는 데, 상사축척법을 적용한 결과 176k DWT Bulk 선의 경우 18.2%의 총저항 저감율이 추정되었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

References

- An, N.H. CHun, H.H. & Lee, I., 2008. Experimental assessment of the drag reduction efficiency of the outer-layer vertical blades. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.487-494.
- Granville, P.S., 1987. Three indirect methods for the drag characterization of arbitrarily rough surfaces on flat plates. *Journal of Ship Research*, 31, pp.70-77.
- Jang, J. & Kim, H., 1999. On the reduction of a ship resistance by attaching an air cavity to its flat bottom. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 36(2), pp.1-8.
- Karlsson, R.I., 1978. The effect of irregular surface roughness on the frictional resistance of ships. *Proceedings of International Symposium on Ship Viscous Resistance (Ed. L. Larsson)*, SSPA, Goteborg, Sweden, 31 August - 1 September 1978, pp.9:1-9:20.
- Kim, D. Chun, K.H. & Lee, Y.C., 2016. Ship operating efficiency improvement of 176k bulk carrier with ship's energy management solution, iSEMS. *Proceedings of the Annual Autumn Conference of SNAK*, Changwon, Republic of Korea, 3-4 November 2016, p.31.
- Kim, D.S. Kim, H.T. & Kim, W.J., 2003. Experimental study of friction drag reduction in turbulent flow with microbubble injection. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(3), pp.1-8.
- Koo, B.G. Yoon, H.S. & Chun, H.H., 2004. Turbulent flow analysis and drag reduction by riblet surfaces. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(4), pp.59-67.
- Lee, I. Park, H. & Chun, H.H., 2015. Drag reduction performance of FDR-SPC(Frictional Drag Reduction Self-Polishing Copolymer). *9th International*

Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-9), 5A-1, Melbourne, Australia, 30 June – 3 July 2015, paper# 5A-1.

Schultz, M.P., 2004. Frictional resistance of antifouling coating systems. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 126, pp.1039-1047.

Schultz, M.P., 2007. Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 23(5), pp.331-341.

Yang, J.W. Park, H. Chun, H.H. Ceccio, S.L. Perlin, M. & Lee, I., 2014. Development and performance at high Reynolds number of a skin-friction reducing marine paint using polymer additives. *Ocean Engineering*, 84, pp.183-193.

Yoon, H.S. & Chun, H.H., 2005. Drag reduction in turbulent channel flow with periodically arrayed heating and cooling strips. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(6), pp.608-618.

