

방오 도료가 도장된 평판에 대한 항력 성능 연구

백부근^{1,†}·김경열¹·조성락¹·안중우¹·조상래²·김경래²·정용욱²
한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소¹
대우조선해양주²

Study on the Drag Performance of the Flat Plates Treated by Antifouling Paints

Bu-Geun Paik^{1,†}·Kyung-Youl Kim¹·Seong-Rak Cho¹·Jong-Woo Ahn¹·Sang-Rae Cho²·Kyung-Rae Kim²·Young-Uok Chung²
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering/KIOST¹
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.²

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 the present study, the flat plate model test method is developed to evaluate the skin friction of the marine coating in the cavitation tunnel. Six-component force balance is used to measure the profile drag of the flat plate and strut. LDV(laser Doppler velocimetry) technique is also employed to evaluate the drag and to figure out the reason of the drag reduction. The flow velocities above the surface can be used to assess the skin friction, combined with direct force measurement. Since the vortical structure in the coherent turbulence structure influences on the skin friction in the high Reynolds number regime, the interaction between the turbulence structure and the surface wall is paying more attention. This sort of thing is important in the passive control of the turbulent boundary layer because the skin friction can't be determined only by wall condition. As complicated flow phenomena exist around a paint film, systematic measurement and analysis are necessary to evaluate the skin friction appropriately.

Keywords : Anti-fouling paint(방오도료), Skin friction(마찰 항력), Profile drag(단면 항력), Turbulent boundary layer(난류경계층), LDV(Laser Doppler Velocimetry, 레이저 속도계)

1. 서론

선박이 해양을 항행하기 위해서는 일반적으로 선체 표면에 방청(anti-corrosion)과 방오(anti-fouling) 도료를 도장해야 한다. 특히 방오 도료의 경우 선박이 항구에 정박해 있는 동안에 선체에 부착될 수 있는 여러 가지 수중생물-점질(slime), 조류(algae), 따개비(barnacle)의 부착 방지를 위해 매우 중요하게 다루어지고 있다 (Atlar, 2008). 무엇보다도 부착된 수중생물은 선체의 거칠기 증가와 함께 중량 증가 효과를 발생시키므로 선박의 저항 증가에 큰 영향을 미친다. 따라서 방오 도료의 방오 성능은 선박의 부가적인 저항 감소에 매우 중요하다.

방오 도료는 수중생물에게 독성(toxicity)을 나타내는 유기주석 화합물(organotin compound), 수은/구리화합물 등이 도료에 함유되어 있어 선체 표면으로부터 서서히 수중으로 방출됨으로써 수중생물에게 악영향을 미치는 오염물질로 분류되기 때문에 세계적으로 재래식 독성 방오 도료의 사용이 제한되고 있다. 최근에는 해양환경 피해가 비교적 적은 이산화 구리(아산화동:Cu₂O) 등이 포함된 방오 도료가 널리 사용되고 있다. 이렇게 도료의 특정

성분이 가수분해(hydrolysis)에 의해 선체 외부로 유출되는 형태의 도료를 자기마모(self-polishing)형 도료라고 하는데 도막이 해수와 접촉하면 SPC(self-polishing co-polymer) 수지(resin)의 표면으로부터 가수분해를 일으켜 방오제(antifoulant)인 아산화동과 수지와 결합이 끊어져서 해수 중에 방오제를 용출한다. 동시에 수지분도 수가용성(water soluble)으로 되어 도막표면이 물 흐름에 따라 깎여 나간다 (Sung, 1998).

근래 들어와 이러한 SPC 방오 도막이 방오 기능뿐 만 아니라 마찰 항력(skin friction) 감소 기능도 함께 발휘될 수 있도록 도료의 수지 및 방오제에 대한 연구 개발이 지속되고 있다. SPC 방오 도막은 해수와의 가수분해에 의하여 방오제가 용출되고 용출된 후의 도막 표면은 마이크로 단위의 거칠기를 갖는 표면 구조를 가지게 된다. 이러한 거칠기의 표면 구조가 해수 중 항력 감소 기능과 밀접한 관련이 있다고 알려져 있다 (Meseguer, et al., 2004). 또한 실리콘(Si) 계열의 물질이 첨가된 폴리머(polymer)를 사용하는 실릴(silyl)계 무주석(Tin Free) SPC 방오도막이 기존의 금속(metal)계 Tin Free SPC 방오도막에 비해 실제로 마찰 항력이 낮게 나타나는지에 대한 검증 작업이 필요해졌다. 본 연구에서는 방오 도막이 도장된 평판에 대한 항력을 계속하여 마찰 항

력 성분에 대한 분석을 수행하기 위해 중형 캐비테이션 터널 (MCT:medium-size cavitation tunnel)에서 9m/s까지 유속을 높여 dynamic 상사를 얻었고 신뢰할 수 있는 기초 자료를 마련하였다. 또한 마찰 항력 감소의 원인을 평가하기 위하여 1차원 레이저 유속계(LDV:laser Doppler velocimetry)를 이용하여 평판 위 난류경계층의 특성을 조사하였다. Ahn, et al.(1991)은 레이저 유속계를 이용하여 2차원 날개 단면 주위의 난류경계층을 연구한 바 있어 해당 계측 방법을 참조하여 계측을 수행하였다.



(a) Slime on the hull



(b) Barnacle on the hull

Fig. 1 Marine fouling on the hull

2. 실험 장치 및 실험 방법

2차원 평판에 대한 항력 계측과 LDV 계측은 한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소의 중형 캐비테이션 터널에서 수행되었다. 터널의 시험부 제원은 $0.6^W \times 0.6^H \times 2.6^L$ m³이다. 시험부에서 최대 유속은 12 m/s이며 시험부에서 정압을 10.1 kPa에서 202 kPa까지 가변할 수 있다.

본 연구에서 사용된 평판 모형은 마찰 항력 계측을 위해 설계 제작되었다. 선박용 방오도막 Tin Free SPC에 대한 시험을 위하여 평판 모형을 제작하였고 SPC 도막이 아닌 기준(bare) 표면에 대한 자료 획득을 위해 1개의 평판을 더 제작하였다. 모형 평판

의 길이는 950.0mm이고 폭은 340mm, 두께는 10mm이다. 평판 모형은 NACA0024 스트럿(strut)을 이용하여 6분력계인 R37과 연결된다. 평판 가공 시 발생할 수 있는 비틀림 등을 최소화하기 위하여 평판의 재질로써 연강을 사용하였으며 열처리를 수행하여 평판의 편평도(flatness)를 극대화 하였다.

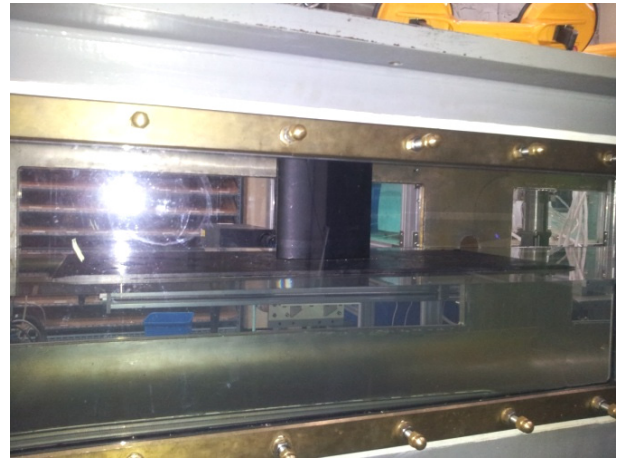


Fig. 2 Photo of flat plate model in cavitation tunnel



Fig. 3 Side view sketch of the flat plate

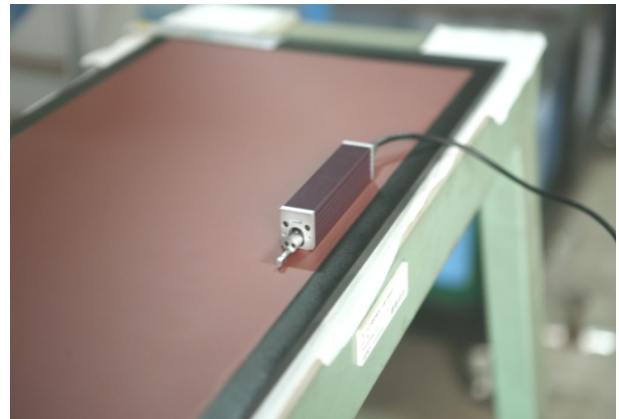


Fig. 4 Portable surface roughness tester SJ-210 for roughness measurements

Fig. 2에 캐비테이션 터널 시험부에 설치된 실제 평판 모형의 사진을 나타내었다. 평판에 효율적인 도료의 도장을 위해 바닥에 500 μ m 깊이의 공간을 Fig. 3과 같이 만들었다. 본 연구에 사용된 방오도료는 총 2종이다. 방오도막의 두께는 대략 100 ~ 250 μ m 정도이나 평판 바닥의 500 μ m의 깊이를 채우기 위해 2 ~ 3층의 도막이 형성되도록 도장 작업을 수행하였다. 본 연구에서는 2 종류의 Tin Free SPC 방오도막을 사용하였는데 각각 방오도막 1(AF 1), 방오도막 2(AF 2)라고 칭하였다. 해당 도막들의 두께는

서로 동일하나 각 도료사의 제작 공법이나 도장법 등에 의해 표면 구조나 가수분해 기능 등이 다를 수 있다. 본 연구에서 설계 제작된 평판들의 표면-도장될 영역을 제외-에는 추후 해수(sea water) 침적(deposition) 시 발생할 수 있는 해수 부식(corrosion)을 최소화하기 위해 폴리아미드(polyamide) 코팅을 100 μm 두께로 시공하였다. 이렇게 폴리아미드 코팅된 평판들의 평판 바닥에 준비된 500 μm 의 공간으로 선별된 방오도료를 도장하였다.

도막의 표면 조도(roughness)가 유속 변화에 따른 항력에 영향을 줄 수 있기 때문에 도장평판의 표면 조도를 미리 계측하였다. 조도 계측에는 일본의 Mitutoyo사에서 제작된 휴대용 조도 계측기(SJ-210)를 사용하였으며 해당 계측기의 계측범위(range)/공간분해능(resolution)은 360 $\mu\text{m}/0.02 \mu\text{m}$, 100 $\mu\text{m}/0.006 \mu\text{m}$ 이었다. 즉, 계측기 탐침의 계측범위가 100 μm 일 때 조도의 분해능은 0.006 μm 를 의미한다.



Fig. 5 Sea water deposition of painted plate



Fig. 6 Six-component force balance for drag measurements

Fig. 4에서 조도 계측기(SJ-210)를 이용하여 도막의 조도를 계측하는 모습을 확인할 수 있다. 해수 침적 하기 전 건조된 도막에 대해 조도계측을 수행하였으며 항력 계측 시험을 수행하고 나서 도막을 건조 시킨 후 다시 조도를 계측하였다. 도막 위 조도 계측 지점은 총 6점으로써 계측 값의 신뢰성을 높였다.

평판에 도장된 방오 도막이 원활하게 자기마모(self-polishing)

기능을 발휘하기 위해서는 해수와의 접촉이 필수적이다. 본 연구에서는 방오 도막과 해수와의 접촉에 의한 충분한 가수분해(hydrolysis)를 발생시키기 위하여 Fig. 5와 같이 해수탱크 및 도막평판 거치대를 제작하였고 서해안 해수를 사용하였다. 해수 침적 시 해수는 움직이지 않는 정적(static) 상태를 1달 간 유지하였다. 또한 방오 도막으로부터 용출된 방오제 등으로 인하여 도막 표면의 착색 또는 오염 등을 방지하기 위하여 해수탱크의 해수를 새로운 해수로 침적 기간 중간에 교환하여 주었다.

본 연구에서는 도장평판에 미치는 주유동(main flow) 방향 항력을 측정하기 위하여 Fig. 6에서 보는 것과 같이 6분력계를 사용하였다. 편의상 유동 방향을 X 방향, 유동 방향에 수직이면서 수조의 우측 옆 면을 향하는 방향이 Y 방향, 유동 방향에 수직이면서 수조의 천정을 향하는 방향을 Z 방향이라고 정의하였다. 본 연구에 사용된 평판 고정용 스트럿(strut)과 지그(zig)는 공동 수조의 관측부 및 6분력계와 강하게 고정되어 있다. X와 Y 방향은 $\pm 500\text{N}$, Z 방향은 $\pm 800\text{N}$ 범위에서 측정이 가능하고 측정 시 최대 0.4%의 오차가 존재할 수 있다. 본 시험에서는 주유동 방향인 X 방향의 힘에 대해서 측정하고 그 결과를 평가하였다.

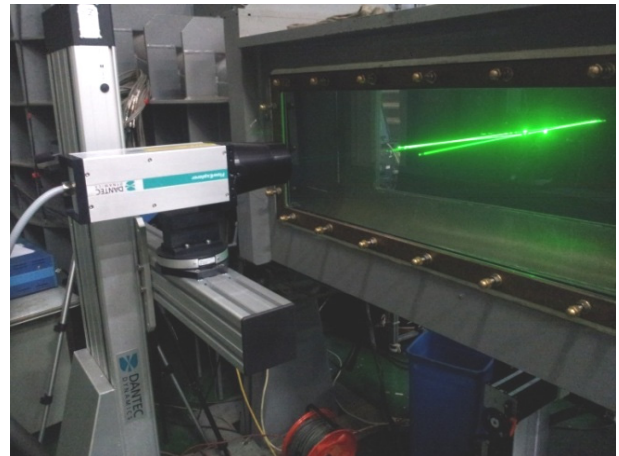


Fig. 7 Laser Doppler velocimetry for flow velocity measurements

평판 표면 위에 형성되는 경계층을 계측하기 위해서 단텍 다이내믹스(Dantec Dynamics)사에서 제공하는 1차원 LDV(laser Doppler velocimetry, FlowExplorer 300)를 사용하였다. 난류 경계층 내 작은 범위(0.5mm 이내)의 경계층(boundary layer)을 계측하기 위해서는 매우 정교하게 계측 프로브(probe)를 이동할 수 있는 3차원 트래버스(traverse)가 필요하다. 본 연구에서는 10 μm 간격으로 프로브를 이송 가능한 자동 이송장치를 이용하였다. 레이저 도플러 속도계는 532nm의 파장을 갖는 2개의 레이저 빔을 프로브로부터 계측지점으로 발생시키는데 이 두 빔이 유체 중 계측 위치에서 교차하여 간섭무늬(interference fringes)를 형성하게 된다. 유체를 따라 이동하는 미세 입자(TiO_2 , 3 μm 평균직경)가 간섭무늬를 지나갈 때 산란광을 발생시킨다. 이 산란광의 파장(또는 주파수)은 유체 속도에 따라 미세하게 변화하는 도플러

(Doppler) 효과가 나타나며 두 개의 레이저 빔을 발생시킨 프로브에서 다시 감지된다. 이렇게 감지한 도플러 신호에 대한 주파수 분석을 통해 유체의 속도를 0.04%(기준 속도 대비)의 불확실성을 가지고 계속하게 된다. 본 연구에서는 각 공간 위치에서 초당 2000개의 도플러 신호를 샘플링(sampling)하여 평균 값을 얻었다. Fig. 7은 레이저 도플러 속도계 시스템과 실제 계측을 수행하고 있는 모습을 보여준다.

본 연구에서는 아래와 같은 시험 조건으로 도장 평판에 대한 항력 계측을 수행하였다.

Table 1 The experimental conditions

Plate type	Painted : 2, Polyamide : 1
Main flow speed	$U_0=1 \sim 9$ m/s
Reynolds number	$0.5 \times 10^6 \sim 4.5 \times 10^6$
LDV measurement case	3, 5, 7 m/s
Drag measurement case	1 ~ 9 m/s, 1 m/s interval
tunnel pressure	atmospheric
density of water	1000 kg/m ³
roughness measurement	2

조도 계측에는 조도를 평가하기 위한 여러 가지 거칠기 값들을 계측하였으나 유사한 경향을 보이고 있어 본 연구에서는 방오 도막의 거칠기를 R_t (최대 거칠기:거칠기 곡선에서 최고점과 최저점 사이의 거리를 의미하며 mm단위로 나타낸 것임) 값을 위주로 하여 기술하였다.

3. 결과 및 고찰

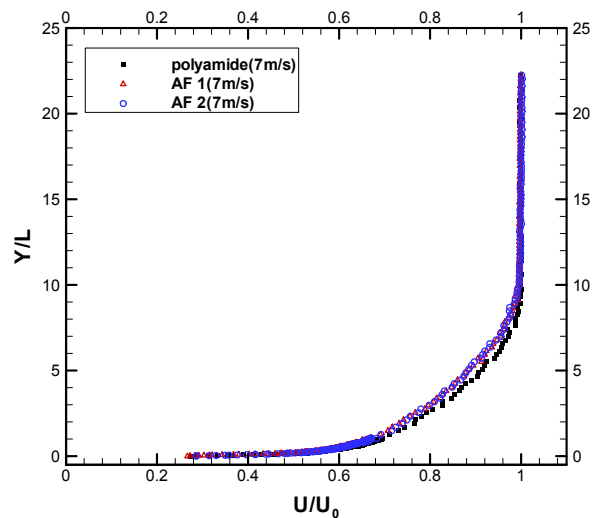
Table 2는 도막 평판에 대한 캐비테이션 터널 실험 전 후에 계측한 조도 결과를 나타낸다.

Table 2 Roughness measurement results

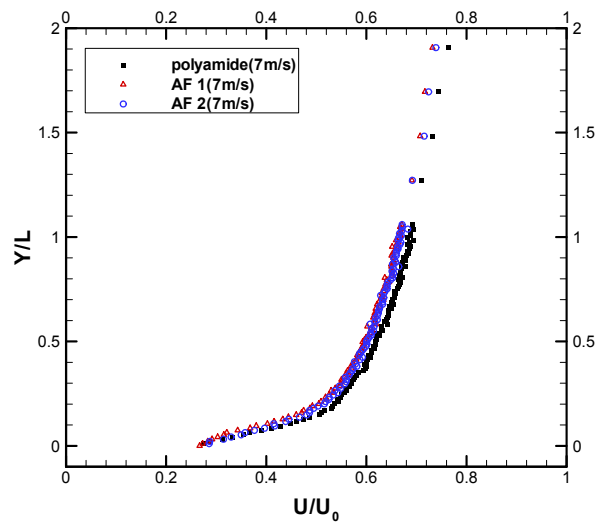
type		R_t (mm)
AF 1	before	33.13
	after	35.84
AF 2	before	15.28
	after	19.28

각 방오도막의 결과를 보면 캐비테이션 터널 실험 전 후의 조도 값에는 큰 변화가 없으나 AF 1의 경우 조도 값이 AF 2에 비해서 2배 정도 큼을 알 수 있다.

Fig. 8은 1차원 레이저 도플러 속도계를 이용하여 계측한 경계층 속도 분포(profile)이다. X축은 유속 U 를 자유흐름속도 U_0 로 무차원화한 것이며 Y축은 벽면으로부터 떨어진 거리를 평판의 길이 L 로 무차원화 한 값을 나타낸다. 도막 표면에 가까운 곳에서는 유속계의 트래버스를 10 μ m 간격으로 이동시켜 정밀한 경계층 계측이 되도록 하였다. 각 그림에서 (a)는 전체 경계층을 plot한 것이며 (b)는 경계층의 $Y/L < 2$ 이하의 영역을 확대하여 plot한 것이다.



(a) Wide view



(b) Narrow view

Fig. 8 Velocity profiles of boundary layer measured at $U_0 = 7$ m/s

경계층 내에서 속도 분포를 보면 AF 1과 AF 2가 서로 유사한 경향을 보이고 있으나 Fig. 8(b)에서 AF 1, AF 2의 속도분포가 폴리아미드 보다 다소 낮게 형성되었음을 알 수 있어 폴리아미드 보다 AF 1과 AF 2의 항력이 다소 클 것을 예상할 수 있다. 레이저 도플러 속도계를 이용하여 계측한 경계층의 속도 분포로부터

Table 3과 같이 경계층의 특성을 파악할 수 있다. 여기서 δ^* 은 배제두께(displacement thickness)이며 식 (1)로부터 얻을 수 있다.

$$\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{U}{U_0}\right) dy \quad (1)$$

여기서 U는 계측된 유속, U_0 는 경계층의 영향을 받지 않는 자유흐름속도(free stream velocity)를 의미한다.

Table 3 Properties of the boundary layer

U(m/s)	item	AF 1	AF 2
3 m/s	δ^*	1.712	1.662
	θ	1.213	1.175
	H	1.427	1.436
	Re_θ	3618	3494
5 m/s	δ^*	1.511	1.575
	θ	1.086	1.136
	H	1.398	1.393
	Re_θ	5385	5647
7 m/s	δ^*	1.492	1.462
	θ	1.096	1.083
	H	1.373	1.372
	Re_θ	7597	7497

또한 모멘텀 두께(momentum thickness) θ 는 아래의 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\theta = \int_0^\infty \frac{U}{U_0} \left(1 - \frac{U}{U_0}\right) dy \quad (2)$$

H값은 형상인자(shape factor)라고 하며 경계층 유동의 성질을 결정하는 중요한 인자이다.

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad (3)$$

H 값이 1.3 - 1.4 정도가 되면 난류 경계층(turbulent boundary layer)이 형성된 것을 의미하며 H = 2.4 - 2.6가 되면 층류 경계층(laminar boundary layer)이 형성되었다고 말할 수 있다. 본 연구에서 얻은 경계층 특성을 H를 통하여 살펴 보면 전체 속도 구간에서 난류 경계층이 잘 형성되었음을 알 수 있다.

난류 경계층의 속도 분포 형상이 실제 난류 경계층의 그것과 유사(asymptotically)한지 살펴 보기 위해 모멘텀 두께에 근거한 레이놀즈 수를 검토하기도 한다. 이 레이놀즈 수의 정의는 다음과 같다.

$$Re_\theta = \frac{U_0 \theta}{\nu} \quad (4)$$

여기서 ν 는 동점성계수(kinematic viscosity)이다. 실제 난류 경계층의 속도 분포 형상을 점근적으로 묘사하기 위해서는 Re_θ 값이 6000 이상 되어야 한다고 알려져 있으나 (David, et al., 1999) 대체로 3000 정도 이상이면 난류 경계층의 속도 분포를 잘 근사하게 된다.

난류 경계층의 특성은 앞에서 소개한 바와 같이 속도 분포의 형상이나 모멘텀 두께에 근거한 레이놀즈 수로부터 확인 가능하다. 그러나 난류 경계층은 이러한 속도 분포뿐 만 아니라 일관된 난류 구조(coherent turbulence structure)의 특징을 가지고 있다. 일관된 난류 구조는 $y+ < 200$ 정도의 영역에서 유동방향의 보오텍스(longitudinal vortex) 구조를 보이며 이러한 보오텍스 구조는 전체적으로 머리핀(hairpin)의 형태를 띄며 벽면과 상호작용을 일으킨다 (Smith, 1984).

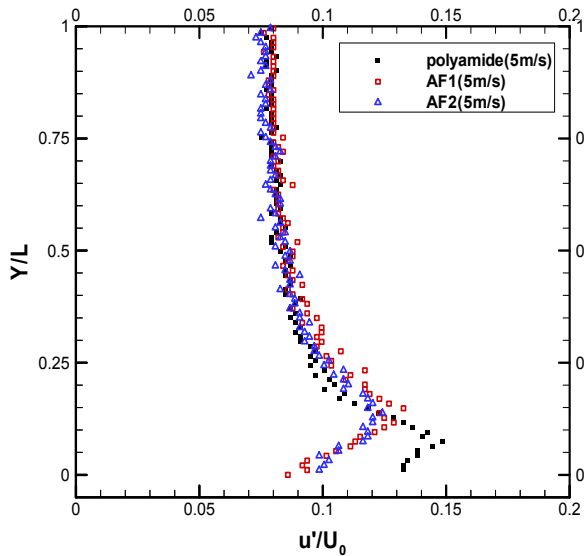
유동방향의 보오텍스가 벽면과 가까이 접근하여 벽면과 강한 상호작용을 일으키면 마찰 항력이 증가하고, 유동방향의 보오텍스가 벽면과 멀어져 벽면과 상호작용이 약해지면 마찰 항력이 감소하게 된다. 이러한 메커니즘을 이용한 것이 리블렛(riblet) 패턴 이 새겨진 수영복이다. 리블렛의 팁(tip)이 보오텍스가 벽면과 닿지 못하게 하거나 보오텍스를 왜해시켜 벽면과의 상호작용을 감소시키는 것이다 (Koo, et al., 2004). 결국 경계층 내 유동의 벽면 조건(slip 또는 no slip)뿐만 아니라 유동방향의 보오텍스에 의한 벽면과의 상호작용 유무를 파악하여 방오도막에 의한 난류 구조가 마찰 항력에 영향을 미치는지 살펴 보는 것이 매우 중요하다고 말할 수 있다. 보오텍스는 말 그대로 회전하는 유동이며 유동 안에 보오텍스가 존재하게 되면 주위 유동을 불안정(instability)하게 하거나 변동(fluctuation) 성분을 증가시켜 난류 강도(turbulence intensity) 값을 크게 한다. 난류 강도에 대한 정의는 아래와 같다.

$$Tu = \frac{u}{U_0} = \frac{\sqrt{(U - U_0)^2}}{U_0} \quad (5)$$

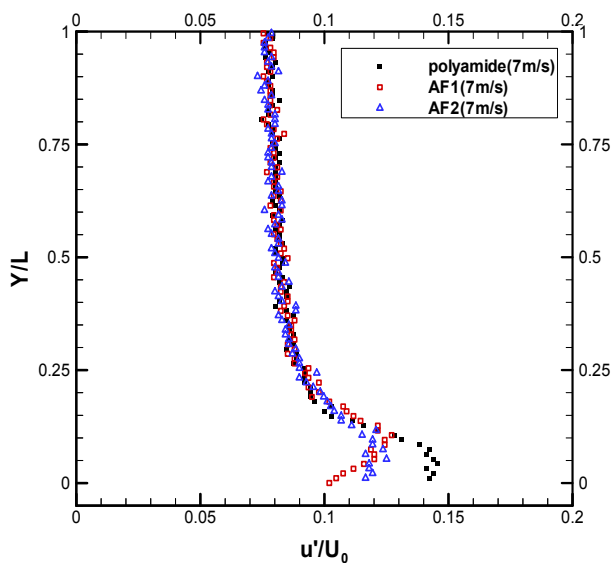
유동방향 보오텍스가 벽면과 가까이 위치하게 되면 벽면 가까이에서 큰 난류 강도 값이 분포하게 되고 보오텍스의 강도가 증가하면 난류 강도 값이 증가하게 된다 (Paik & Lee, 2003).

Fig. 9는 각 도막평판에 대한 난류 강도 계측 값이다. 그림들을 보게 되면 유속에 따라, 표면의 도막 상태에 따라 난류 강도의 최고치(peak) 값의 크기와 위치가 변화함을 확인할 수 있다. 유속 5 m/s에서는 2개 도막 위 경계층에 대한 난류강도 최고치 위치가 벽면 $Y/D = 0$ 로부터 멀리 떨어져 있으며 AF 1과 AF 2에서 서로 유사한 위치에 난류 보오텍스 구조가 형성되고 있음을 알 수 있다. 그러나 유속이 7m/s로 증가함에 따라 AF 1의 최고치 위치는 5m/s의 그것과 유사하나 AF 2의 경우 최고치 위치가 $Y/L = 0$ 에 가깝게 이동한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 AF 2의 난류 경계층 내 난류 보오텍스 구조가 유속이 증가함에 따라 벽면과의 상호작용이 점차 증가하여 마찰 항력을 증가시키게 됨을 의미한다. 비록 도막 표면의 상태나 기하학적 형태를 직접 파악할 수는 없지만 난류 경계층 내 난류 강도를 계측하여 난

류 보오텍스 구조의 존재와 역할에 대해서 간접적으로나마 평가할 수 있다. 이러한 방법을 통하여 도료 구성물들의 선정, 배합, 도장법 등이 마찰 항력에 유체역학적으로 어떠한 영향을 주는지 체계적으로 조사할 수 있을 것으로 사료된다.



(a) Flow velocity 5m/s



(b) Flow velocity 7m/s

Fig. 9 Comparison of turbulence intensity distributions in turbulent boundary layers

단면(profile) 항력은 본 연구의 주 관심사인 마찰 항력에 평판 두께에 의한 형상 항력(form drag), 스트럿(strut)에 의한 압력 항력(pressure drag)의 합으로 나타낼 수 있다. 본 시험에서는 동일한 실험 조건에서 각 도막평판의 항력을 측정하였으므로 형상 및 압력 항력은 각 속도에서 동일하다. 따라서 AF 1 도막평판과 AF 2 도막평판의 항력 차이가 마찰 항력의 차이가 된다. 이러한 평가 방안에 기초하여 마찰 항력을 검토하였다.

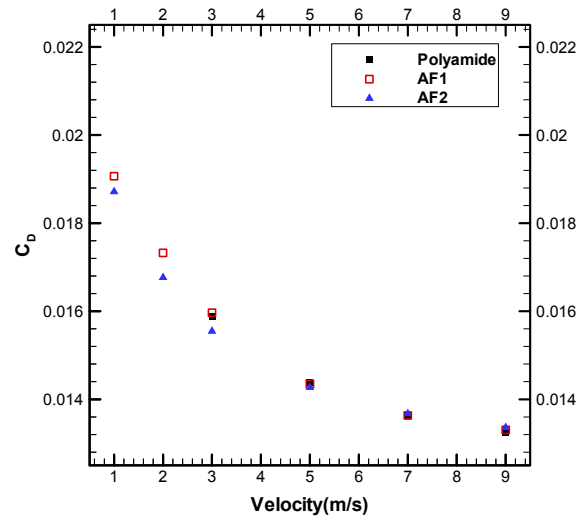


Fig. 10 Drag measurement results on three turbulent boundary layers

Fig. 10은 폴리아미드 평판과 도막평판들에 대한 항력 측정 결과를 나타낸 그림이다. 유속(레이놀즈 수) 증가에 따라 항력 계수 값이 감소됨을 알 수 있다. 여기서 항력 계수 C_D 에 대한 정의는 아래의 식과 같다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A U_0^2} \quad (6)$$

여기서 D 값은 6분력계를 이용하여 측정한 항력 값이고 ρ 는 청수의 밀도, A 는 평판의 도막 면적이다. 항력계수의 측정 오차(bias error)는 6분력계로 측정된 항력값, 청수의 밀도, 도장된 도막면적, 유속의 변동 등에 기인하며 항력 측정 시간이 1~2시간 이내로서 터널 용수의 온도에 의한 영향이 없다고 가정할 때 측정된 항력 D 의 측정 불확실성은 $\pm 0.2\%$, 도장면적의 불확실성은 $\pm 0.5\%$, 유속(9m/s)의 불확실성은 $\pm 0.25\%$ 이었으며 이에 따른 전체 측정 오차는 Table 4와 같다. 이 때 측정 값의 99.7%는 측정된 평균 값의 $\pm 3\sigma$ (σ 는 표준편차) 안에 존재한다.

Table 4 Result of uncertainty analysis

1 m/s	3 m/s	5 m/s	7 m/s	9 m/s
2.24 %	1.98 %	1.65 %	1.32 %	1.43 %

3m/s 유속에서는 AF 2의 항력 계수가 AF 1 보다 더 작게 검출되었으나 속도가 증가함에 따라 그 차이가 점차 작아져 9m/s의 유속에서는 AF 1의 항력계수가 AF 2 보다 작아지고 폴리아미드의 그것과 유사해 짐을 확인할 수 있다. 유속에 대한 항력 측정 결과를 더 정량적으로 살펴 보기 위하여 각 값들을 Table 5와 같이 정리하였다. 1, 3 m/s의 유속은 저속이고 상대적으로 측정오차가 크기 때문에 5, 7, 9m/s에서 측정한 항력 감소율을 표시하였다.

Table 5 Results of skin friction reduction rate

U ₀	5 m/s		7 m/s		9 m/s	
type	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
C _D (x10 ⁻²)	1.423	1.442	1.351	1.360	1.325	1.340
DR(%)	-0.65	-2.52	0.03	0.98	1.71	3.21

항력 감소율 ΔR은 폴리아미드 평판에 대한 각 도장평판의 마찰 항력 감소율을 평가한 것이다. 그 정의는 아래와 같다.

$$\Delta R(\%) = \frac{C_{D_coating} - C_{D_poly}}{C_{f_poly}} \times 100 \quad (7)$$

위의 식에서 C_D는 6분력계를 이용하여 측정한 값을 이용하여 구할 수 있다. 특히 C_{D,coating}-C_{D,poly}값은 도막평판과 폴리아미드 평판에 미치는 모든 항력 값들의 차이를 의미하는데 동일 유속에서 평판 자체에 의한 형상 항력과 스트럿 등에 의한 압력 항력 값은 서로 동일하므로 결국 마찰 항력의 차이를 의미하게 된다. 마찰 항력 계수 C_f에 대해서는 경우 난류 경계층의 수축과 경계층 내 난류 변동성분의 증가로 인하여 벽면 바로 위 유속을 측정하여 마찰 항력 계수를 얻는 것이 매우 힘들다. 따라서 본 연구에서는 이미 잘 알려진 경험식(empirical formula)을 이용하여 마찰 항력 계수들을 얻고자 하였다. Prandtl은 경계층 높이에 따른 마찰 항력 계수의 산출을 위해 실험에 근거하여 경험식을 제안하였고 그 제안식을 power-law 근사를 통하여 마찰 항력 계수를 구할 수 있게 되었다(White, 1994). 경계층 두께를 δ라고 할 때 경계층 두께에 기초한 레이놀즈(Reynolds) 수는

$$Re_\delta = \frac{U_o \delta}{\nu} \quad (8)$$

와 같이 표현할 수 있다. 그리고 마찰 항력 계수는 아래의 식을 통해 얻을 수 있다.

$$C_{f_poly} \approx 0.02 \times Re_\delta^{-1.6} \quad (9)$$

레이저 도플러 속도계를 이용하여 경계층의 두께를 정확히 측정하였으므로 위의 두 식을 이용하여 마찰 항력 계수 값을 계산할 수 있다. 위의 마찰 항력 계수에 대한 경험식에 의하면 국소적인 마찰 항력 계수는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 점차 감소하게 된다. 경계층 두께에 기초한 레이놀즈 수는 유속에 따라 3x10⁴ ~ 6x10⁴ 정도이었다. 이렇게 얻은 레이놀즈 수와 마찰 항력 계수 값으로부터 Table 5에 보인 항력 감소율 DR을 구하였다. AF 1 방오 도막은 5m/s에서 폴리아미드에 비해 0.65% 정도의 마찰 항력 감소율을 보였으나 유속의 증가에 따라 마찰 항력 감소율은 점차 증가하여 9m/s에서는 폴리아미드에 비해 약 1.7%의 마찰 항력 증가 효과를 보였다. 그러나 AF 2 방오 도막의 경우 5m/s 유속에서는 2.5% 정도 폴리아미드 보다 마찰 항력이 감소하였으

나 유속 증가에 따라 마찰 항력이 많이 증가하여 9m/s에서는 약 3.2% 증가하였다. 저속(5m/s)에서는 AF 2의 마찰 항력 감소 효과가 두드러졌으나 고속(9m/s)에서는 AF 1의 마찰 항력 감소 효과가 뚜렷하였다. 실선으로 확장하여 살펴 보면 약 10Knots에서 AF 2 도막이 항력 감소율이 높고, 약 18Knots에서 AF 1의 항력 증가율이 AF 2에 비해 낮다는 것을 유추할 수 있으나 본 실험이 매우 이상적인 환경에서 수행되었으므로 실선으로 확장하여 해석하는 데 있어서 세심한 고려가 필요하다. 또한 Table 2를 고려하면 도막 표면의 거칠기가 5m/s 이하의 유속에서 지배적인 역할을 하여 표면 거칠기가 작은 도막에서 마찰 항력 감소 효과가 나타났다. 그러나 이러한 표면 거칠기 효과는 도막 위를 지나가는 유속이 증가됨에 따라 낮아지고 난류 보오텍스 구조에 의한 영향력이 지배적인 인자가 될 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 9m/s 유속에서는 표면 거칠기나 표면 구조 등에 의해 난류 보오텍스 구조가 영향을 받아 벽면과의 상호작용이 AF 2에 비해 약화되었음을 Fig. 9를 통해 예상할 수 있다.

본 연구의 결과를 살펴 볼 때, 마찰 항력 감소를 위해 도막의 표면 거칠기 완화뿐 만 아니라 난류 구조 제어 관점에서도 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다. 또한 도장된 평판의 항력을 6분력계 등을 이용하여 측정하는 방법만으로는 도막 표면이 유체와 어떠한 상호작용을 하고 있는지 확인하기 어렵기 때문에 경계층을 세밀히 관찰하는 유체역학적 접근 방법이 필요하다고 판단 된다.

4. 결론

본 연구에서는 방오도막의 마찰 항력 감소 성능을 살펴 보기 위해 유체역학적인 측면에서 실험 방법을 정립하고자 하였다. 6분력계를 이용하여 도막평판에 걸리는 항력을 직접 측정하는 기본적인 방법 외에 레이저 도플러 속도계를 이용하여 도막 표면 위 난류 경계층을 측정하였으며 그 특성을 분석하였다. 또한 유속 측정 결과와 항력 측정 결과를 이용하여 마찰 항력 감소율을 평가하였다. 비교적 저속 구간에서는 도막 표면의 낮은 거칠기가 마찰 항력 감소에 도움을 줄 수 있으나 7m/s 이상의 고속 구간에서는 표면 거칠기뿐 만 아니라 난류 보오텍스 구조와 벽면 간의 상호작용이 마찰 항력에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 난류 경계층을 자세히 측정하여 그 난류 보오텍스 구조의 특성을 분석할 수 있는 유체역학적 접근 방법이 필요하다.

후 기

본 연구는 PIS7080 및 PNS183B 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

References

Ahn, J.W. Lee, J.T. Kim, K.S. & Lee, C.Y., 1991. A

Study on Turbulent Boundary Layer around a Two-Dimensional Hydrofoil using LDV System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 28(2), pp.146-158.

Atlar, Mehmet, 2008. An update on marine antifoulings. *25th ITTC Group Discussions 3 - Global Warming and Impact on ITTC Activities*, Fukuoka, Japan, 14-20 September 2008, pp.563-603.

David, B.D. Donald, R.W. & John, K.E., 1999. The Effect of Reynolds Number on Boundary Layer Turbulence. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 18, pp.341-346.

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.

Paik, B.G. & Lee, S.J., 2003. PIV Velocity Field Measurements of Flow around a Ship with Rotating Propeller. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(5), pp.17-25.

Smith, C.R., 1984. A synthesized model of the near-wall behavior in turbulent boundary layers. In: Zakin J, Patterson G (eds), *Proceedings of 8th Symposium on Turbulence*, University Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, pp.299-325.

Sung, H.J., 1998. About Tin and Tin-Free Anti-Fouling Paints. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 35(4), pp.24-32.

White, F.M., 1994. *Fluid Mechanics*. 3rd Ed. McGRAW-HILL: Singapore.

Yeber, D.M. Kiiil, S. & Kim, D.J., 2004. Antifouling Technology-Past, present and Future Steps Towards Efficient and Environmentally Friendly Antifouling Coatings. *Progress in Organic Coatings*, 50, pp.75-104.

