

마찰저항 저감을 위한 고분자 수지 합성 및 PIV 유동장 계측

정성우* · 김은영* · 전호환** · 박 현** · 이인원**†

Synthesis of FDR-SPC Resin and PIV Measurement for Frictional Drag-reduction

Sungwoo Chung, Eunyoung Kim, Ho Hwan Chun, Hyun Park and Inwon Lee

Abstract. In this study, a novel FDR-SPC is first synthesized in this study. The drag reducing functional radical such as PEGMA (Poly(ethylene) glycol methacrylate) has been utilized to participate in the synthesis process of the SPC. The types of the baseline SPC monomers, the molecular weight and the mole fraction of PEGMA were varied in the synthesis process. The resulting SPCs were coated to the substrate plates for the subsequent hydrodynamic test for skin friction measurement. In a low-Reynolds number flow measurement using PIV (Particle Image Velocimeter), a significant reduction in Reynolds stress was observed in a range of specimen, with the maximum drag reduction being 15.9% relative to the smooth surface.

Key Words: PIV(입자영상유속계), FDR(Frictional Drag-Reduction, 마찰저항 저감)

1. 서 론

선박의 총 저항에서 조파저항이 차지하는 비율에 비해 마찰저항이 차지하는 부분이 더 크다는 것은 잘 알려져 있다. 이에 마찰저항의 저감으로부터 얻어지는 이득은 엄청나다. 통계에 따르면, 마찰저항을 10%만 저감해도 연간 8억 배럴 이상의 연료비 절감이 가능하다.

또한 최근 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 선박의 온실가스 배출규제를 위한 에너지효율설계지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index)가 2013년부터 건조되는 선박에 대하여 적용된다. 2025년까지 CO₂ 30% 감축을 목표로 단계적으로 적용되는 규제에 의해 선박의 에너지효율 증대, 연료소모율을 줄이려

는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

저마찰 선박 방오도료는 이러한 현 국제적 추세에 따른 선박의 에너지 효율 향상 및 온실가스 배출저감을 위한 대안으로 떠오르고 있다. 최근 Yang 등¹⁾은 PEO (PolyEthylene Oxide) 고분자 저항저감제가 분산된 방오도료를 다양한 기기에서 평가하여 10% 이상의 마찰저항 저감을 실험적으로 확인한 바 있다. 이 저마찰 방오도료는 방오도료 속에 함유된 고분자 저항저감제가 용출되어 나오는 기전으로 Toms 효과를 발현하는 제품으로 고분자 저항저감제 분사에 의한 기존의 기계적인 마찰저항 저감 기법⁽²⁻⁵⁾을 소재를 응용하여 실제 선박에서의 적용성을 대폭 향상시킨 연구라 할 수 있다. Yang 등¹⁾의 저마찰도료는 저항저감제인 PEO의 물에 대한 용해도가 크기 때

Corresponding Author: Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University, 2 Busandaehakro 63 Beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Korea, E-mail: inwon@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2764

* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, 2 Busandaehakro 63 Beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Korea, E-mail: newould@naver.com, Tel: 051-510-2756

* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, 2 Busandaehakro 63 Beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Korea, E-mail: ey1986@nate.com, Tel: 051-510-7367

** Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University, 2 Busandaehakro 63 Beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Korea, E-mail: chunahh@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2341

** Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University, 2 Busandaehakro 63 Beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 609-735, Korea, E-mail: hyunpark@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2730

문에 초기에 다량 용해되어 장기적인 저마찰 성능이 떨어지는 단점이 우려되고 있다. 이에 대한 개선책으로, 본 연구에서는 마찰저항 저감을 위한 방오도료의 수지인 고분자 저항저감제가 화학적으로 공중합된 신소재 고분자 수지를 개발하고, 합성된 수지를 시편에 도장하여 회류수조에서의 PIV 유동장을 계측하여 합성된 수지의 마찰저항 저감효과를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 저항저감 수지의 제조

본 연구에서는 아크릴레이트 자기마모형 공중합수지 기반 기술을 통하여 마찰저항저감 자기마모형(FDR-SPC) 수지를 개발하였다. 이 수지를 개발하기 위해 주요 Monomer를 선정이 우선시 되어야 한다. 현재 방오도료에 사용되고 있는 SPC 수지는 Zn-acrylate, Cu-acrylate, Si-acrylate 등이 적용되고 있다. 본 연구에서는 중금속으로 향후 규제가 예상되는 Cu 함유 화합물을 제외하고자 하였으며 기존의 금속화합물을 적용하였던 SPC 특성을 활용하고자 Zn-acrylate계 수지를 합성하였다. 이에 ZMA를 주요 모노머로 선정하여 하였으며 ZMA는 본 연구실에서 합성하여 사용하였다.

마찰저항 저감 SPC 수지를 합성하기 위해 용액중합 (Solution polymerization)법을 이용하였다. 용액중합은 단위체를 적당한 용제에 용해시켜 용액상태에서 중합하게 하는 방법으로 중합계의 점성도를 낮추어 중합 시 발생하는 열을 제어하기 쉽기 때문에 국부적인 발열이나 급격한 발열을 피할 수 있다. 또한 분자량의 조절이나 다리 걸침도의 조절이 용이하다. 용액중합에도 반응기 중에 Monomer, Initiator, Solvent를 처음부터 전량 투입하여 반응시키는 전량 투입법과 반응기 중에 Solvent 등을 넣고 Monomer와 Initiator를 서서히 적하하는 적하법이 있다. 본 실험에서는 적하법을 이용하여 SPC를 합성하였다. SPC 수지 합성 과정을 Fig.1에 나타내었다.

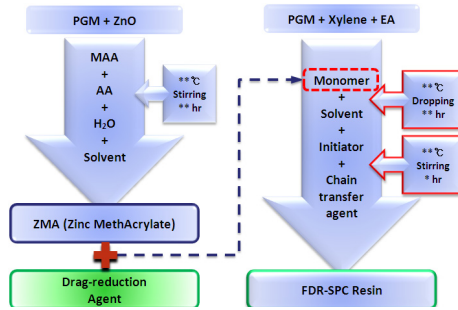


Fig. 1. Synthesis of FDR-SPC resin

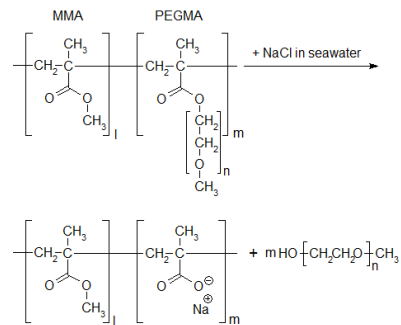


Fig. 2. Synthesis of FDR-SPC resin

Table 1. Application SPCresins

Substrate 종류	SPC Type	분자량	mol %
SPC 1	I	-	O
PRD 1-1	I	A	X
PRD 1-2	I	A	Y
PRD 1-3	I	A	Z
SPC 2	II	-	O
PRD 2-1	II	A	X
PRD 2-2	II	A	Y
PRD 2-3	II	A	Z
PRD 3-1	II	B	X
PRD 3-2	II	B	Y
PRD 3-3	II	B	Z

2.2 수지합성 조성 변화

본 실험에서는 두가지 Type의 SPC를 합성하였다. 각각 분자량이 다른 고분자 저항저감제를 각각의 mol %에 따라 합성하였다. 그 배합은 Table. 1에 나타내었다. 합성된 FDR-SPC resin은 Fig. 2와 같은 고분자 구조식으로 표현되며 해수와의 반응에 따라 PEO 관능기를 수증기로 용출할 것으로 기대된다.

2.3 PIV 유동장 계측

시편에 도장된 수지 주위의 유동구조 관측을 위하여 Fig. 3과 같이 2차원 회류수조를 사용하였다. 본 회류수조의 제원은 길이 9m, 높이 1.5m, 폭 0.6m이다. 시편의 크기와 유동영역 관측단면은 Fig. 4와 같다. 시편의 가로 길이 100mm, 세로 길이 75mm이며, 관측단면은 길이 100mm, 높이 75mm이다. 채널 유동은 원심 펌프에 의하여 구동되며, 유속은 모터의 회전수를 인버터로써 조절한다.

본 연구에서는 Dantec Dynamics사의 시간분해 입자영상유속계(Time-Resolved PIV)를 사용하였는데, 입자를 조명하는 레이저는 Lee사의 다이오드 펌프형 Nd:YAG 레이저(LDP-100MQG)로서 파장과 펄스당 에너지가 각각 532nm, 11mJ이며 10~20kHz의 주파수를 주사할 수 있다. 영상 획득에 사용된 고속 CMOS 카메라(NanoSense MK.III)는 10bit 해상도 및 1,280,024픽셀 해상도를 가지며, 최대 초당 1,040의 영상처리가 가능하다. 또한, 평균 직경이 10 μ m인 중공 유리 입자(hollow glass particle)를 사용하였다.



Fig. 3. Circulating water channel

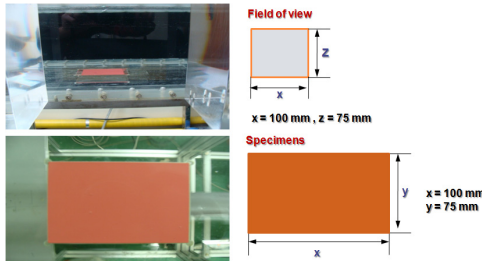


Fig. 4. Specimen installed in the test section

모든 PIV측정에서는 4000쌍의 입자영상을 취득하였는데, 프레임율(trigger rate)는 100Hz, 입자영상 쌍 사이의 시간 간격(time between pulses)은 700 μ s로 유지되었다. 탐색영역 크기는 32 \times 32 픽셀과 50% 중첩이 허용되었

고, 입자 변위의 시계열은 상호상관(cross correlation) 알고리즘으로 계산되었다.

본 실험에서 설정된 유량 평균유속 um 은 전체 실험과정에서 0.53m/s로 일정하게 유지되었고, 동일한 유속에서 제조된 9가지 수지를 도장한 시편의 유동을 측정하였다.

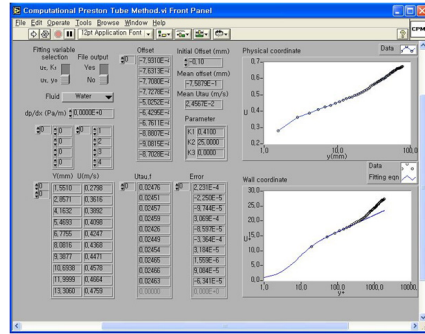


Fig. 5. CPM(Computational Preston tube Method) Program

2.4 국소마찰응력계수 Cf 계산방법

입자영상으로부터 해석된 각 순간 유동장을 시간 평균하여 시간평균 유속분포 (mean velocity profile)를 구하여 국소마찰응력계수 Cf를 계산하였는데, Fig. 4와 같은 CPM (Computational Preston tube Method) 프로그램을 사용하였다. 벽면으로부터의 거리 y의 함수로 측정된 평균유속의 분포로부터 마찰속도 ur 및 국소마찰응력계수 Cf 가 계산된다.

3. 실험결과

3.1 저항저감 수지의 마찰저항 저감효과

CPM(Computational Preston Tube Method) 방법으로 계산된 국소마찰응력계수 Cf 를 유속(Reynolds 수 $Rem=umh/\nu$, um 은 유량을 시험부 단면적으로 나눈 평균유속, h 는 시험부 단면 높이의 절반)의 함수로서 나타내었다. 측정은 평균유속 $um = 0.53m/s$ 에서 이루어졌다. 각 경우에 있어서 마찰속도 ur 및 국소마찰응력계수 Cf 및 마찰저항 저감율을 Table 2 에 정리하였다. PRD 1은 아주 작은 마찰저감효과를 보였다. PRD 2는 저항저감제 함유량이 많을수록 저항 저감율이 높았고 반대로 PRD 3은 저항저감제 함유량이 많을수록 저항 저감율이 낮았다. 이상의 결과를 종합해 본다면, SPC 2 type에 고분자 저항저감제가 포함된 수지의 경우 저항 저감효과가 발견되고 그 중 PRD3-1의 경우 15.94%의 큰 감소 효과를 얻었다.

Table 2. Comparison of Skin Friction Reduction

Substrate 종류	uT	Cf×10 ³	저항저감율
Bare (Glass)	0.02527	4.469	-
SPC1	0.02512	4.411	1.29%
PRD1-1	0.02505	4.391	1.74%
PRD1-2	0.02496	4.355	2.56%
PRD1-3	0.02526	4.463	0.12%
SPC2	0.02462	4.224	5.49%
PRD2-1	0.02419	4.088	8.54%
PRD2-2	0.02366	3.896	12.82%
PRD2-3	0.02328	3.780	15.42%
PRD3-1	0.02323	3.757	15.94%
PRD3-2	0.02342	3.824	14.44%
PRD3-3	0.02403	4.020	10.06%

Fig. 6, 7은 본 연구에서 개발된 수지에 대하여 저속회류수조에서 측정된 Reynolds 응력의 분포를 비교하고 있다. 특히 Fig. 6에 도시된 PRD3-1의 경우는 Reynolds 응력이 기준시편 (Bare 및 SPC2)에 비하여 현저하게 낮아진다. 이를 통해 고분자 저항저감제가 수지 표면으로부터 용출되어 난류유동장을 억제하는 Toms 효과가 발현됨을 알 수 있다.

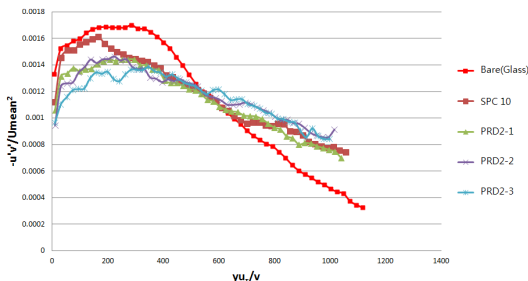


Fig. 6. Performance comparison graph of resistance reduction (PRD2)

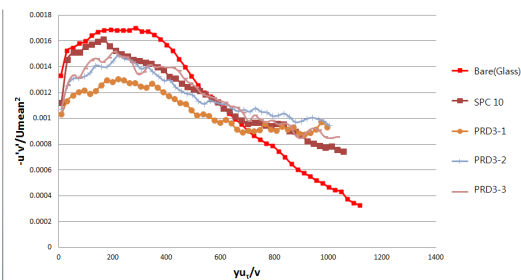


Fig. 7. Performance comparison graph of resistance reduction (PRD3)

4. 결론

저속회류수조에서 유동가시화 기법 (PIV, Particle Image Velocimetry)을 이용하여 고분자 저항저감 효과인 Toms 효과를 발현하는 신소재 개발수지에 대한 저항저감 성능평가를 수행하였다. 특히 도막 표면에서의 레이놀즈 스트레스 분포를 분석함으로써, 시험편 표면의 레이놀즈 스트레스의 감소 효과를 관찰하였다. PIV test에서 저항저감제 공중합 수지는 최대 15.9%의 저항저감 효과를 보였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

참고문헌

- (1) Yang, J. W., Park, H., Chun, H. H., Ceccio, S. L., Perlin, M. and Lee, I., 2014, Development and performance at high Reynolds number of a skin-friction reducing marine paint using polymer additives, *Ocean Engineering*, vol. 84, pp.183-193.
- (2) Brasseur, J. G., Robert, A., Collins, L. R. and Vaithianathan, T., 2005, "Fundamental Physics Underlying Polymer Drag Reduction, from Homogeneous DNS Turbulence with the FENE-P Model," *2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction*, Busan, Korea, 23-26 May 2005, pp.477-487
- (3) Elbing, B. R., Solomon, M. J., Perlin, M., Dowling, D. R., Ceccio, S. L. 2011, "Flow-induced degradation of drag-reducing polymer solutions within a high-Reynolds-number turbulent boundary layer," *Journal of Fluid Mechanics*, vol.670, pp337-364
- (4) Somandepalli, V. S. R., Hou, Y. X. and Mungal, M. G., 2010, "Concentration flux measurements in a polymer drag-reduced turbulent boundary layer," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 644, pp.281-319
- (5) Winkel, E. S., Oweis, G. F., Vanapalli, S. A.,

Dowling, D. R., Perlin, M., Solomon, M. J., Ceccio, S. L., 2009, "High-Reynolds-number turbulent boundary layer friction drag reduction from wall-injected polymer solutions," 621, pp 259 - 288.