

선박 유동제어계측 연구실 Marine Hydrodynamics Control Laboratory

이인원

부산대학교 조선해양공학과 · 조선해양플랜트 글로벌핵심연구센터

1. 서 론

유가 급등과 해상 교역량 급증에 따라 유조선, LNG 운반선, 컨테이너 선 등 주요 선종의 대형화 · 고속화는 이제 조선 산업에 있어서 피할 수 없는 대세로 굳어져 가고 있다. 또한 기후 변화에 대응하기 위한 온실가스 배출 저감이 전세계적, 전산업적인 주요 과제로 대두됨에 따라 해운업은 물론, 조선산업의 주요 당면 목표로 자리매김 되고 있다. 연료소모 및 온실가스 배출 저감을 달성하기 위해서는 선박 운항 저항의 저감이 필수 불가결하다. 예를 들어, 10,000TEU 급 초대형 컨테이너선은 매일 350ton의 연료를 소모하는데, 이는 연간 연료비 700억 원 및 연간 330천톤의 CO₂에 해당한다. 선박의 운항 저항은 크게 선체가 일으키는 파도에 의한 조파저항과 물속에 잠긴 선체와 물과의 마찰에 의한 마찰 저항으로 대별된다. 마찰 저항이 총 저항에서 차지하는 비중은 고속 세장선의 경우 70~80%, 저속 비대선의 경우 80~90%으로 알려져 있다. 수십 년에 걸친 선형 최적화 연구에 의하여 조파 저항 저감 기술은 이미 성숙기에 들어서 조선 산업 현장에서 폭넓게 응용되고 있다. 그러나 조파 저항의 3~4배나 되는 마찰 저항 저감 기술은 선진국에서도 초기 응용 단계에 머물러 있는 첨단 기술이다.

본 연구실에서는 난류유동제어를 이용한 선박의 마찰저항저감기술 개발 및 실용화를 목표로 다양한 내용의 연구를 수행하고 있다.

2. 연구 내용 소개

2.1 EEDI 인증을 위한 마찰저항 시험평가기법

선박의 에너지 효율 향상 및 온실가스 배출저감을 위한 전 세계적인 노력이 경주되고 있는 가운데 국제해사기구

(IMO, International Maritime Organization) 주도로 관련 규제가 본격적으로 발효되었다. IMO 규제는 크게 “기술적 조치”, “운항적 조치” 및 “시장기반조치”로 구분되는데, 기술적 조치는 에너지효율 설계지수 (EEDI; Energy Efficiency Design Index)로서, 운항적 조치는 에너지효율 운항지수 (EEOI; Energy Efficiency Operational Indicator)와 선박 에너지효율 관리계획 (SEEMP; Ship Energy Efficiency Management Plan)으로 구체화되었다. 시장기반조치는 탄소세 및 배출권거래제를 기반으로 논의 중에 있다.

EEDI는 MARPOL Annex VI에 규정된 기일 이후 건조되는 선박에 적용되는 강제 규정으로, 2025년 이후 현재 수준 대비 CO₂ 배출량 30% 저감, 에너지 효율 기준 42.9%의 향상을 요구하고 있다. 이를 만족하지 못하는 선박은 운항이 금지되기 때문에 선박의 에너지 효율을 개선하는 노력이 절실히 필요하다. 특히 선박의 에너지 소모 중 가장 큰 비중을 차지하는 주기관의 추진 동력을 절감해야 하는데, 이를 반영하여 최근 다양한 형식의 저마찰 선박 방오도료가 개발되어 시장에 소개되고 있다. 방오도료는 해생물의 선체 부착 · 생장 현상인 *fouling*을 막는 도료로서 선박의 수선 하부의 표면에 도장된다. 종래에는 *fouling*을 막아서 저항의 증가를 막는 데 사용되었지만 최근 들어와 다양한 방식의 기전에 의하여 깨끗한 표면 상태에서도 기존 도료에 비하여 작은 마찰저항을 보이는 제품들이 개발되어 큰 관심을 받고 있다.

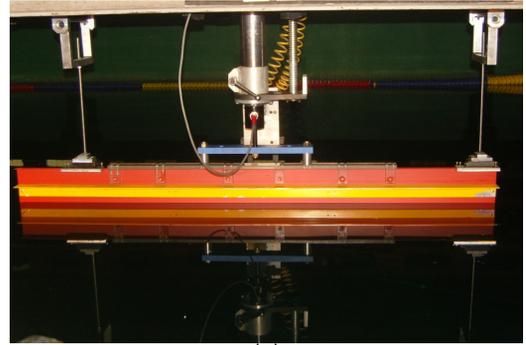
EEDI는 선박에 적용된 에너지 효율 향상 기술의 효과를 설계 단계에서부터 인증하는 제도이기 때문에 저마찰 방오도료의 저항저감성능에 대한 객관적인 평가방법이 필요하다. 국내외의 여러 시험기관에서 마찰저항을 측정하는 다양한 실험적 방법을 고안, 제시하였으나 표준화된 시험 절차 및 측정 오차에 대한 체계적인 분석이 결여되어 있어

표준화하기에는 미흡한 것이 사실이다. 이러한 제약 때문에 선박도료의 마찰저항 저감 성능 및 실선에서의 에너지 효율 향상 효과는 각 도료 제조사의 자체 연구 결과에 의존하고 있으며, 도료사, 조선소, 선급 및 해운선사를 망라하는 관련 업계의 전반적인 의견 일치가 부재한 실정이다.

마찰저항 시험평가 방법의 국내의 현황을 살펴보면, 국내 2-3 개소의 선형시험수조에서 독자적인 마찰저항 측정 기법을 개발하여 선박도료의 저항특성을 평가하는 데에 사용하고 있으나 보유시설의 사양이 상이하기 때문에 방법을 표준화하기는 어렵고, 시설 간의 일관성 역시 조사된 바 없다. 측정된 마찰저항 결과의 절대값에 대한 검증보다는 도료간 마찰저항의 상대적 대소 비교에 주력하고 있는 형편이다. 국외에서도 우수한 선형시험수조에서 독자적인 측정을 수행하고 있으나 표준화된 시험 방법이 부재한 상황은 국내와 동일하다. 수조 시험에서 공통적으로 따르고 있는 IITC 1957, 1978 등의 표준 시험법은 선박 모형을 중심으로 제정된 것으로서, 마찰저항은 선박 모형과 길이가 같고 표면적이 동일한 이상적인 평판의 저항값으로 치환된다. 수조 모형시험에 있어 마찰저항 측정은 큰 주목을 받지 못하였는데, 이는 그동안 관련 연구가 조파저항과 관련된 선형 개발 위주로 진행되었기 때문이다. 하지만 마찰저항은 선박 총 저항의 60~70%를 차지하는 주된 성분이고, 선형 최적화 기술이 성숙화 됨에 따라 21세기 들어 새로운 조명을 받기 시작했다. 따라서 아직까지는 국제적으로 표준화된 기법이 제정되지 못했는데 EEDI 시행에 발맞추어 시급히 정비되어야 할 것으로 지적되고 있다.



(a)



(b)

Fig. 1. 방오도료 마찰저항 평가를 위한 예인수조 시험; (a) 25mm 흘수, (b) 225mm 흘수

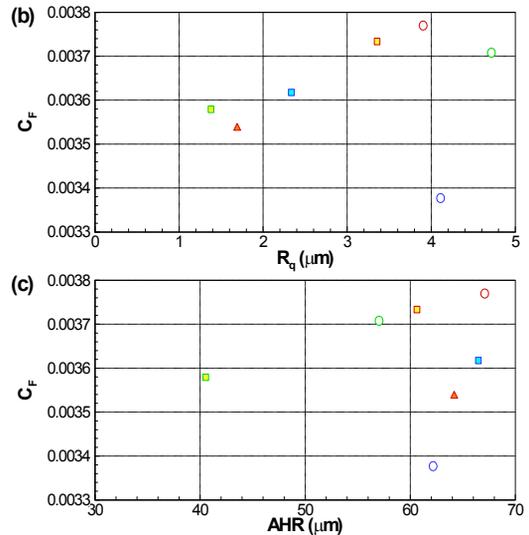


Fig. 2 마찰항력 계수와 표면거칠기의 관계

본 연구실에서는 이와 같은 중요성을 가지는 마찰저항 평가기법의 표준 기법을 개발하였다. Fig. 1은 선박예인수조에서의 평판 마찰저항 시험으로 마찰저항 측정에 특화 되도록 길이와 두께의 비가 1000:1인 강판에 평가대상 도료를 도장한 후 예인수조의 저항동력계로 저항을 측정하는 장면이다. 평판이 예인될 때 발생하는 조파저항성분을 상쇄하기 위하여 두 가지의 흘수(draft)로 저항을 측정한다. 예인수조에서의 마찰저항 측정결과를 뒷받침하기 위하여 표면거칠기 측정이 병행되는데 거칠기 값과 마찰항력 계수와의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 이미 알려진 것처럼, 마찰항력계수와 표면거칠기 사이에는 양의 상관관계가 발견되며 국부적인 표면거칠기가 보다 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타나고 있다.

2.2 고분자 저항저감제 혼합형 저마찰 방오도료

종래의 방오도료는 해생물 착생에 의한 마찰저항 증가를 억제하는 소극적인 개념이었으나 전술한 바와 같이 EEDI 규제 등에 대응하기 위하여 저마찰 방오도료가 개발되고 있다. 여기에서 저마찰 방오도료라 함은, 새롭게 도장된 상태에서 종래의 방오도료보다 작은 마찰저항 특성을 발휘하는 제품을 가리킨다. 본 연구실에서는 산업통상자원부의 지원으로 산업원천기술개발사업을 수행하면서 고분자 저항저감제에 의한 저마찰 방오도료를 개발하였는데, 본 절에서는 이의 주요한 작용 원리 및 성능에 대하여 살펴보고자 한다.

난류경계층의 마찰저항 저감은 선박의 연료효율에 있어 매우 중요하다. 선형최적화 기술의 발달로 인하여 조파저항은 총 저항의 20% 미만을 차지한다. 나머지를 차지하는 마찰저항의 저감으로부터 얻어지는 이득은 엄청나다. 마찰저항은 난류경계층의 조직구조와 밀접하게 연관되어 있으며 조직구조를 약화시켜 마찰저항을 감소시키는 다양한 기법들이 지난 수십 년간 제안되어 왔다. 그 중 가장 효율적인 마찰저항 저감기법은 고분자 분사(polymer injection) 방법으로 Toms[1]에 의하여 처음 제안되었다. 물 등의 액체가 흐르는 난류유동에 고분자 물질의 수용액을 수~수십 ppm 첨가하면 긴 사슬 형태의 분자구조가 난류 에너지를 흡수, 재방출하는 과정에서 모멘텀 교환이 교란되어 마찰저항이 수십 %나 줄어드는데 이를 Toms 효과라 한다. 이후 고분자 첨가방법은 파이프라인에서의 원유 수송에 널리 적용되고 있다.

최근 들어 파이프라인과 같은 내부유동 뿐만 아니라 선체 주위 경계층 유동과 같은 난류경계층 유동에서도 고분자 분사 방법이 마찰저항을 저감하는데 매우 유효한 것으로 밝혀졌다[2]. 그러나 실제 적용성 측면에서 고분자 분사 방법은 큰 문제가 있는데, 선체 표면에 분사공을 설치해야 하기 때문이다. 본 연구는 별개의 분사 기구 및 장치를 필요로 하지 않는 전혀 새로운 난류제어기법을 고안하였는데, 선박 방오도료가 저항저감 첨가제인 고분자물질을 함유했다가 수중으로 서서히 용출하는 방법이다.

본 연구에서는 자기마모형 수지 방오도료가 기본 소재로 사용되었다. 자기마모형 수지는 방오도료의 주성분으로 널리 사용되는 금속계 아크릴레이트 수지로서, 해수와 접촉하면 수지 속의 금속(보통 아연) 이온이 가수분해로 해리되면서 카르복실기를 남기는데, 이로 인해 수지 및 도료의 표면이 친수성이 되며 최종적으로는 비누와 같이 수용성으로 변해 표층이 박리되면서 내부의 표면에서 가수분해가 다시 시작된다. 이를 마모현상(erosion)이라 부르

는데, 보통은 수지 내부에 함유된 아산화동(Cu₂O, cuprous oxide) 및 유기방오제와 같은 방오안료(anti-fouling pigments) 들이 해수 중으로 일정하게 용출되게 한다. 본 연구에서 개발된 FDR-AF (Frictional Drag Reduction Anti-Fouling) 도료는 자기마모형 수지에 방오안료와 더불어 PEO와 같은 고분자 저항저감제를 배합한 것이다. Fig. 3과 같이, 본 개발 도료는 SPC 수지 matrix 내부에 방오안료와 고분자 저항저감 안료를 포함했다가 해수 중으로 방출한다. 이와 같이, 선박 방오도료의 마모기전을 고분자 저항저감제의 방출 기구로 활용하여 Toms 효과를 달성하고자 함이 본 연구의 중심적인 발상이라 할 수 있다. 이 방법을 통하여 저감기법을 선박 적용성 측면에서 획기적으로 개선할 수 있다.

시간에 따른 PEO의 용출률을 로터 시험장치에서 측정하였다. 로터 시험기는 동축의 원통으로 구성되며 회전하는 내측 원통에 본 개발도료가 도장된다. 원통이 회전하면서 용출되는 PEO의 농도를 TOC(Total Organic Carbon) 분석기로서 정량한다. Fig. 3은 시간이 지남에 따라 PEO가 일정한 농도로 존재함을 나타내고 있다.

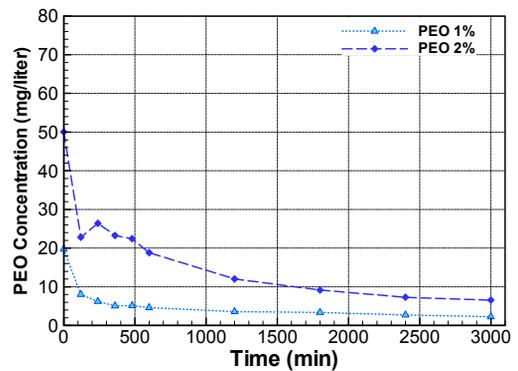


Fig. 3 PEO 용출 농도의 경시변화





Fig. 4 고속회류수조 및 매입형 마찰저항 검력계

Fig. 4는 선박의 운항조건에 최대한 근접한 고 Reynolds 수 난류경계층 유동을 재현할 목적으로 본 연구실에서 구축한 고속회류수조 (최대유속 24m/s) 및 난류유동측정용 레이저도플러 유속계, 마찰저항을 직접 측정하는 매입형 검력계 (slush-mounted floating plate balance)의 사진을 나타내고 있다.

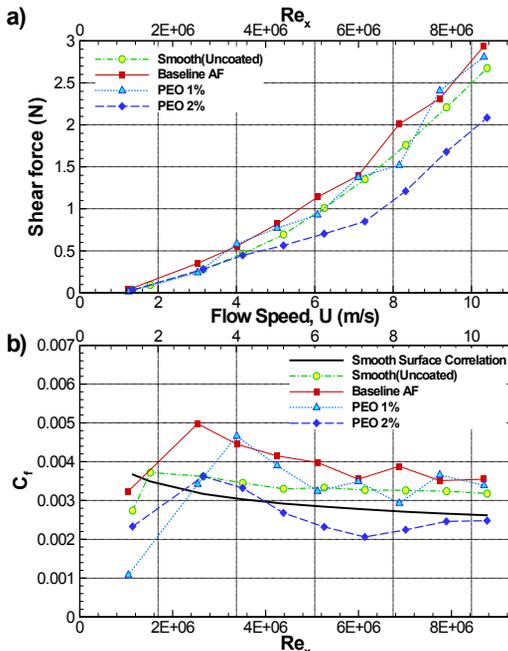


Fig. 5 FDR-AF의 마찰저항 저감효과

Fig. 5는 고속회류수조에서 본 개발도료의 마찰저항 특성을 기존도료와 비교한 결과를 나타내고 있다. PEO 2% 함유 도료의 경우, 기존 도료 대비 33%, 매끈한 평판 대비 20%의 마찰저항 저감효과가 확인되었다.

2.3 저항저감공중합수지(FDR-SPC) 개발

앞 절에서 언급한 저마찰도료는 고분자 저항저감제가 물리적으로 방오도료에 혼합된 것으로 마찰저항 저감 성능이 우수하나 장기 안정성 및 성능 발휘에 다소 미흡한 것으로 평가되었다. 이에, 본 필자는 방오도료의 기본 소재인 자기마모형 공중합수지 (SPC; Self-Polishing Copolymer)에 고분자 저항저감관능기를 공중합한 저항저감 공중합수지 (FDR-SPC; Frictional Drag Reduction SPC)의 합성기술을 개발, 저마찰 방오도료 개발에 응용하였다. FDR-SPC는 물과의 가수분해 반응을 통하여 전술한 마찰저항 저감 고분자 물질을 수중으로 방출하여 자체적으로 저마찰성을 발휘하는 신소재 고분자 물질이다. 별도의 마찰저항 저감제를 혼합하지 않아도 성능을 유지하기 때문에 방오도료 제조에 있어 매우 유리한 것으로 평가되고 있다.

IMO규정에 따라 Tin-free SPC 수지를 합성하기 위해 대안으로 떠오르는 여러 가지 물질 중에서 Cu, Zn, Si 등이 있다. 하지만 Cu 또한 환경적 문제로 인해 가까운 미래에 사용이 금지될 가능성을 고려하여 같은 금속 계열의 Zn을 이용하여 SPC수지를 합성하고자 한다. 이에 ZMA를 주 모노머로 선정하고 실험실 자체 합성을 실시하였다. 실험실에서 자체 합성한 ZMA(Zinc Methacrylate) 이외의 모든 모노머는 상용 시약을 사용하였으며, 마찰저항 저감 SPC 수지를 합성하기 위해 용액중합(Solution polymerization)법을 이용하였다. 용액중합은 단위체를 적당한 용제에 용해시켜 용액상태에서 중합하게 하는 방법으로 용제 없이 단량체와 개시제만으로 중합이 이루어지는 괴상중합(Bulk polymerization)법에 비해서 중합계의 점성도를 낮추어 중합 시 발생하는 열을 제어하기 쉽기 때문에 국부적인 발열이나 급격한 발열을 피할 수 있다. 또한 분자량의 조절이나 다리결집도의 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.

본 연구에서는 두 가지 종류의 SPC(SPC 1, SPC 2)를 합성하였으며, 각각의 SPC 수지에 저항저감형 모노머 (drag reduction monomer, DRM)의 mol%를 변화하여

DRM 1, DRM 2, DRM 3를 합성하였다. FDR-SPC의 마찰저항 저감효과를 회류수조에서 Fig. 6과 같은 입자영상 유속계 (PIV; Particle Image Velocimeter)를 이용하여 조사하였다. 측정은 평균유속 $u_m=0.53\text{m/s}$ 에서 이루어졌으며, PIV로 측정된 Reynolds 응력 분포를 Fig. 7에 나타내었다. PRD3-1의 경우 마찰저항의 주요 원인이 되는 Reynolds 응력이 뚜렷이 감소하였음을 알 수 있고 이로부터 FDR-SPC가 고분자 저항저감제를 용출하여 마찰저항이 감소하는 Toms 효과가 발현됨을 알 수 있다. PIV로 측정된 평균유속분포에 CPM 방법을 적용하여 마찰저항을 계산할 수 있는데 PRD3-1의 경우 15.94%의 괄목할 만한 저항감소 효과가 확인되었다. 본 FDR-SPC는 그 유례가 없는 신물질로서 부산대학교에서 개발되었으며 최근 국내 특허가 등록되었다.

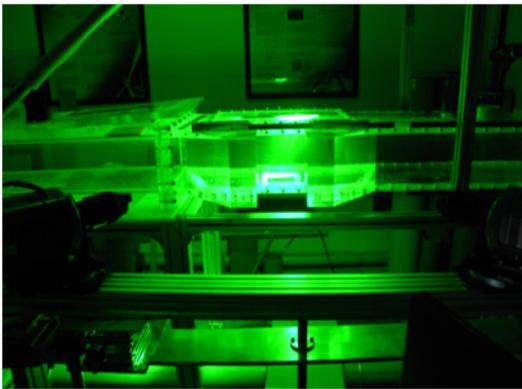


Fig. 6 입자영상 유속계 측정

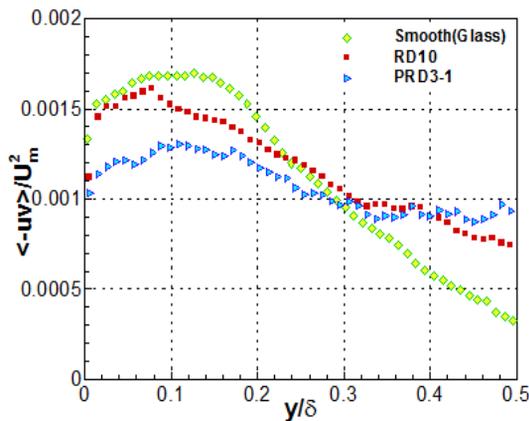


Fig. 7 FDR-SPC의 난류마찰저항 저감효과

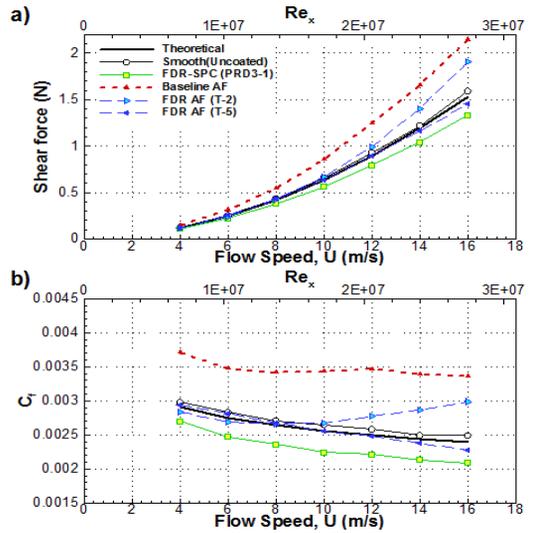


Fig. 8 FDR-SPC의 난류마찰저항 저감효과

FDR-SPC 및 FDR-SPC 기반의 저마찰 방오도로로 마찰저항 저감성능을 고속회류수조에서 측정된 결과가 Fig. 8에 도시되어 있다. FDR-SPC의 경우 매끈한 표면보다 마찰저항이 13.5% 감소하는 것으로 나타나는데 앞서 저속에서의 결과와 상응하는 효과이다. 기존의 상식으로는 매끈한 표면의 경우 거칠기가 더 이상 줄어들 수 없는데 FDR-SPC의 경우는 유일한 특성인 Toms 효과가 발현되기 때문에 마찰저항이 더 감소하는 것이다. 이를 기반으로 제작된 저마찰 방오도로 (FDR-AF)의 경우 기존 도료 대비 평균 20% 마찰저항이 감소하는 것으로 나타났다.

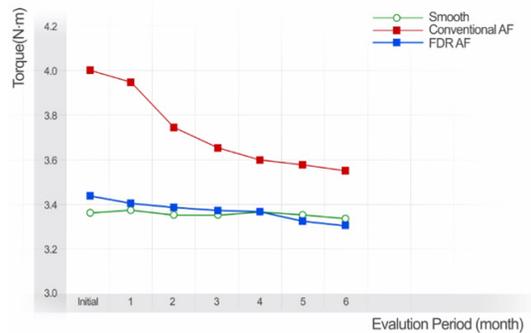


Fig. 9 저마찰 선박 방오도로의 장기 성능

지금까지 나타난 결과는 저마찰 고분자 소재 및 저마찰 선박 도료를 제작한 직후에 측정된 성능이나 선박용 방오도료는 신조 혹은 수리 이후 3~5년간 운항을 하면서 그 기

능을 발휘해야 하기 때문에 저마찰 선박 방오도료의 성능이 장기간 유지되는가는 응용성 측면에서 초기 성능보다도 더욱 중요한 문제이다. 앞서의 회류수조 계측 방법은 도료 표면에 유동을 장시간 접촉시키기에는 부적당하기 때문에 새로운 측정 절차가 필요하다. 이와 같은 필요성에서, 본 연구에서는 동일한 크기, 세 가지 표면상태 (매끈한 미도장 표면, 일반 방오 도료 도장 및 저마찰 방오도료 도장)의 아크릴 재질 원통을 제작하여 선박운항속도 약 16knots에 해당하는 일정한 회전수로 6개월간 회전시키면서 1개월마다 회전하는 데 요구되는 토크를 측정하였다. 원통들의 크기가 동일하기 때문에 마찰저항의 대소는 회전 토크의 대소와 직결된다. Fig. 9 에 도시된 것처럼 6개월 간 오히려 마찰저항이 저감 성능이 향상되며 매끈한 미도장 표면보다 감소한 마찰저항 성능을 나타낸다. 선박 방오도료는 방오 안료 및 체질 안료 등, 입자상의 고흡분 안료가 50% 이상을 점유하고 있으므로 표면에 도장하게 되면 안료 입자 크기에 의하여 일정 수준 이상의 표면거칠기가 반드시 생성되므로 일반적인 방오도료의 마찰저항은 매끈한 표면보다 증가할 수밖에 없다. 하지만 FDR-SPC 기반의 방오도료의 경우, 원재료인 수지의 마찰저항이 매끈한 표면보다 작기 때문에 표면거칠기의 증가로 인한 마찰저항 증가를 상쇄하여 매끈한 표면에 필적하는 성능을 초기뿐만 아니라 장기간 유지되는 놀라운 성능을 나타내는 것이다. 비유적으로 표현한다면, 본 저마찰 방오도료를 선박에 도장한 경우는 선박 표면이 마치 거울처럼 매끈한 표면으로 탈바꿈하는 정도의 효과를 나타낸다고 할 수 있다. 재론의 여지없이 이와 같은 효과는 선박의 연료비 절감은 물론, 온실가스 배출량 저감에도 큰 효과를 발휘할 것으로 기대된다.



Fig. 10 저마찰 선박 방오도료 개발과제 산학연 공동연구팀과 함께

3.2 액적 물성과 표면 습윤성 및 형상학적 특징에 따른 마이크로 액적 충돌 연구

앞서 언급한 도포 현상 연구는 액적이 최종적으로 도포되는 현상에 초점을 맞추는데 반해, 본 연구의 목표는 액적의 물성(점성, 표면장력 등)과 관성, 표면의 습윤성 및 형상학적 특징에 따라 충돌 후 나타나는 퍼짐, 수축, 점핑 등과 같은 일련적인 2차 현상들을 분석하고 이해하는데 있다. 이러한 충돌 연구는 자가세척, 응축 열전달, 빙결 방지 등 다양한 응용 분야에서 중요하게 이용되는 현상들이며, 그 응용 분야 및 조건이 점점 더 다양해지고 있기 때문에 이를 제어하기 위한 연구가 끊임없이 진행되고 있다. EHD 프린팅에서는 노즐로부터 대전된 액적이 토출되므로, 일반적인 경우에 비해 그 충돌 및 퍼짐 현상이 달라지며, 기관에 잔여 잔여 전하가 남아있을 시에는 그 현상이 더욱 더 달라지는 현상을 프린팅 공정을 통해 확인하였다. 그리하여 대전된 액적과 표면 전하가 액적 충돌과 그 일련적인 현상에 어떠한 영향을 주는지 이해하기 위해 초소수성 기판위의 대전된 입자 충돌 연구와 기관의 전하 유무에 따른 점핑 현상을 관찰하였다. 실험과 정량적인 분석을 통하여 대전된 액적이 전하가 존재하는 기판에 떨어졌을 시에, 그 반발력에 의해 점핑 높이가 더 높아짐을 확인하였다. 이러한 응용 분야에 외에도 자연에서 관찰할 수 있는 표면 습윤성 및 다양한 형상학적 특징에 따른 액적 충돌 연구를 진행하고 있으며, 이 또한 물리적인 현상을 이해하는 연구이지만 후에 다양한 액적을 제어하는데 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

4. 맺음말

현대 사회는 더 이상 거시적인 것만을 이해하고 분석하는 것만으로는 이를 제어할 수가 없다. 이제는 그 거시적인 것들 또한 미시적인 것들로 구성되기 때문에 작고 정교한 것을 이해함으로써 큰 것을 제어하고 이해할 수 있게 되었다. 또한 마이크로, 나노 크기의 미시적인 분야에서 나타나는 많은 물리적, 화학적 현상은 매크로 이상의 거시적 분야와는 다른 현상들을 보이는 것들이 많다. 이러한 이유로 다양한 분야에서 새롭고 많은 관심을 받고 있으며, 그와 동시에 새로운 미시적인 분야들이 지금 이 순간에도 개척되고 있다. 따라서 새로운 분야에 대한 현상을 이해하고 이를 응용하기 위해서는 다학제간 융합이 필요하며 보다 열린 시각으로 다양한 방향에서 접근하려는 연구가 필요하다. 그러므로 본 연구실은 열유체학적 지식을 기반으로 다양한 연구진들과 다학제적 접근을 통하여 나노 및 마이

크로 현상을 이해하고 그와 관련된 시스템 기술을 개발하고자 노력하고 있다.

참 고 문 헌

- 1) Si Bui Quang Tran, Doyoung Byun a, Vu Dat Nguyen, Hadi Teguh Yudistira, Myoung Jong Yu, Kyun Ho Lee and Jaek U. Kim, 2010, "Polymer-based electro spray device with multiple nozzles to minimize end effect phenomenon", *J. Electrostatics*, Vol. 68, pp.138-144
- 2) Trung Kien Nguyen, Vu Dat Nguyen, Baekhoon Seong, Nguyen Hoang, Jungkeun Park and Doyoung Byun, 2014, "Control and improvement of jet stability by monitoring liquid meniscus in electro spray and electrohydrodynamic jet", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 71, pp.29-39
- 3) Hyungdong Lee, Baekhoon Seong, Jihoon Kim, Yonghee Jang and Doyoung Byun, 2014, "Direct Alignment and Patterning of Silver Nanowires by Electrohydrodynamic Jet Printing", *Small*, Vol. 10, pp.3918-3922
- 4) Yonghee Jang, Indra Hartarto Tambunan, Hyowon Tak, Vu Dat Nguyen, TaeSam Kang and Doyoung Byun, 2013, "Non-contact printing of high aspect ratio Ag electrodes for polycrystalline silicone solar cell with electrohydrodynamic jet printing", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 102, Issue 123901
- 5) Baekhoon Seong, Ilkyeong Chae, Hyungdong Lee, Vu Dat Nguyen and Doyoung Byun, 2015, "Spontaneous self-welding of silver nanowire networks", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol. 2015, pp.7629-7633
- 6) Yonghee Jang, Jihoon Kim and Doyoung Byun, 2013, "Invisible metal-grid transparent electrode prepared by electrohydrodynamic (EHD) jet printing", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 46, Issue 1551063
- 7) Baekhoon Seong, Hyunwoong Yoo, Vu Dat Nguyen, Yonghee Jang, Changkook Ryu and Doyoung Byun, 2014, "Metal-mesh based transparent electrode on a 3-D curved surface by electrohydrodynamic jet printing", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 24, Issue 097002
- 8) Fariza Dian Prasetyo, Hadi Teguh Yudistira, Vu Dat Nguyen and Doyoung Byun, 2013, "Ag dot morphologies printed using electrohydrodynamic (EHD) jet printing based on a drop-on-demand (DOD) operation", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 23, Issue 095028
- 9) Hadi Teguh Yudistira, Ayodya Pradhita Tenggara, Vu Dat Nguyen, Teun Teun Kim, Fariza Dian Prasetyo, Choon-gi Choi, Muhan Choi, and Doyoung Byun, 2013, "Fabrication of terahertz metamaterial with high refractive index using high-resolution electrohydrodynamic jet printing", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 103, Issue 211106
- 10) Yong Jin Jeong, Hyungdong Lee, Byoung-Sun Lee, Seonuk Park, Hadi Teguh Yudistira, Chwee-Lin Choong, Jong-Jin Park, Chan Eon Park, and Doyoung Byun, 2014, "Directly Drawn Poly (3-hexylthiophene) Field-Effect Transistors by Electrohydrodynamic Jet Printing: Improving Performance with Surface Modification", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 6, pp. 10736-10743
- 11) Hyungdong Lee, Baekhoon Seong, Hyungpil Moon and Doyoung Byun, 2015, "Directly printed stretchable strain sensor based on ring and diamond shaped silver nanowire electrodes", *RSC Adv.*, Vol. 5, pp.28379-28384
- 12) Marten Darmawan and Doyoung Byun, 2015, "Focused surface acoustic wave induced jet formation on superhydrophobic surfaces", *Microfluid Nanofluid*, Vol. 18, pp. 1107-11