

나노입자 첨가를 통한 우레탄수지의 캐비테이션 저항 향상

이익수 · 김낙주[†] · 박대원

서울과학기술대학교, 에너지환경대학원
(2014년 11월 19일 접수; 2014년 12월 17일 수정; 2014년 12월 26일 채택)

Addition of nano particle to increase the cavitation resistance of urethane

Iksoo Lee · Nackjoo Kim[†] · Daewon Pak

*Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea
(Received November 19, 2014; Revised December 17, 2014; Accepted December 26, 2014)*

요약 : 본 연구에서는 캐비테이션에 의한 부식에 강한 도료를 개발하기 위하여 고탄성의 우레탄 수지에 내마모 성능을 향상시키기 위한 첨가제로서 Multi wall과 Single wall type의 Carbon nano tube(CNT)와 Spherical과 Fiber type의 Graphite 나노 입자를 첨가하여 물성과 캐비테이션에 대한 저항성, 작업성 등을 비교 평가하였다. 나노 입자로서 Graphite에서는 캐비테이션 저항성(t_{50})이 Spherical type(t_{50} 182min)보다는 Fiber type(t_{50} 292min)이 높은 캐비테이션 저항성을 갖는 것으로 관찰되었다. 또한 CNT에서는 Single wall type의 캐비테이션 저항성(t_{50} 286min)이 Multi wall보다는 더 높은 것으로 관찰되었다. 나노 입자중에서 가격 및 캐비테이션 저항성을 감안하면 가장 최적의 나노 입자는 Fiber type의 Graphite로 관찰되었다. 도료의 작업성 평가에서 수동 작업에 의해 제작된 표면은 매끈한 표면을 가지고 있으나 Spray 작업에 의해 제작된 표면은 표면이 균일하지 않으며 Spray시 발생된 Dust가 표면에 고착된 형태로 관찰되었다.

Abstract : In this study, a new paint which is able to resist the cavitation erosion is tried to be developed by using urethane added with nano particles such as multi-wall and single-wall carbon nano tube and spherical and fiber type graphite. The new paint synthesized was characterized with physical properties and resistivity to cavitation erosion(t_{50}). Among nano particles, fiber type graphite(t_{50} 292min) showed high hardness and wear resistance compared with spherical type(t_{50} 182min). For carbon nano tube, single-wall type(t_{50} 286min) was higher than multi-wall type in wear resistance. Fiber-type graphite was the best nano-particle for paint with resistivity to cavitation erosion. In the application test of paint, the manually painted sample showed surface with smooth but the surface of sample prepared with spray was not smooth. During spray, dust was fixed on the surface.

Keywords : Nano particle, Cavitation, urethane, wear resistance, surface analysis

[†]Corresponding author
(E-mail: nackjoo@seoultech.ac.kr)

1. 서론

최근 선박도료에서 캐비테이션에 의한 피도막의 손상을 최소화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 캐비테이션에 의한 피도막의 손상은 유체의 흐름에 의한 부분적인 진공현상이 발생하여 기체를 포함한 액체가 표면에 계속적인 충격을 가하여 도료표면이 손상되는 현상을 말한다.^{1,2} 주로 선박의 경우 빠른 운항속도, 선박의 초대형화, 프로펠러 최대화에 따라 현재 LNG선, 컨테이너선 등 주요 선박에서 대부분 발생되고 있다. 캐비테이션에 의한 충격은 피도막의 손상이외에도 프로펠러 Edge 부분의 마모³, 부식⁴⁻⁶으로 이어지며 방향타 역할을 하는 Rudder 부분에 대한 손상을 유발한다.^{7,8} 이러한 현상은 선박 운행 중 소음 발생, 방향조정 기능 상실, 최악의 경우 운행 불가한 상황을 연출할 수 있다.⁹

캐비테이션에 의한 피도막의 손상을 줄이기 위하여 프로펠러 형태에 대한 연구, Rudder 구조에 대한 연구, 프로펠러와 Rudder 재질, 구조물에 따른 형태, 부착물에 의한 연구 등에 대해 논문과 학회지를 통해 발표되고 있다.¹⁰⁻¹⁴ 캐비테이션에 의한 피도막의 손상을 줄이기 위한 캐비테이션 저항 코팅 도료는 선박의 스크류, 펌프, 등 유체가 흐름에 의해 캐비테이션 현상에 의해 침식이 심한 장비¹⁵ 혹은 소재에 사용되는 도료로 양은 미미하나 매우 고가일 뿐 아니라 기술적인 난이도가 매우 높아 외국의 주요 제품이 장악하고 있는 시장으로 국산화가 매우 시급히 요구되고 있다.

캐비테이션용 도료는 세계적으로 3개사 정도의 제품이 주도하고 있고, 국내 조선소에서는 전량 수입에 의존하고 있으며 미국의 Enecon사와 영국의 Belzona사 제품이 주로 사용되고 있다. 캐비테이션 도료는 현재 컨테이너선, LNG선, 크루즈 여객선 등 규모가 큰 선박을 위주로 Rudder 부위에 시공되고 있고, 전체 선박의 약 40%가 컨테이너선, LNG선, 크루즈여객선이며 대상 선박의 35%가 캐비테이션 내구성을 가진 도료를 적용하고 있는 상황이다. 따라서 전체 선박의 약 14%에 적용이 되고 있으나, 해외제품은 모두 수작업용으로 선박에 사용되는 도료 중 비용측면에서 매우 높은 가격부담을 갖고 있는 실정이다. 도료 적용의 고비용은 도료 적용의 도장부위를 좁게 가져갈 수밖에 없고, 이에 따른 캐비테이션으로부터의 선박보호 성능을 약화시킬 수 있다.

따라서 신속히 국산화를 통해 외국제품보다 효율적으로 작업이 가능하고, 제품의 경제성을 부여할 수 있는 스프레이작업용의 고내마모 캐비테이션 도료를 개발하여 선박 특수 도료시장의 기술력을 확보하여야 한다.

본 연구에서는 캐비테이션에 의한 응력 부식 한계성능을 향상시키기 위하여 고탄성의 우레탄 수지에 내마모 성능을 향상시키기 위한 Graphite, Carbon nanotube 등 나노 입자를 첨가하여 물성의 변화를 측정하고, 혼합비율 이상에 의한 캐비테이션 저항성을 확인하기 위해 FT-IR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)¹⁶ 및 DSC(Differential Scanning Calorimetry)¹⁷를 분석해서 고기능성과 고성능의 특성을 가진 특수 선박용 도료를 개발하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 우레탄 Prepolymer 합성

우레탄 Prepolymer 합성 방법은 준비된 플라스크에 Polyol을 정량 투입하고 수분 함량을 측정하여 0.05%이하인 경우 실험을 계속 진행하며 0.05% 이상인 경우 120°C로 승온하여 수분을 제거한 후 실험을 진행한다. 실험 시 플라스크 상부에서 계속적으로 질소를 불어 넣어준다. 이는 공기와의 접촉을 차단하여 이소시아네이트가 공기 중 수분과의 반응을 최소화하는데 목적이 있다. 상온에서 이소시아네이트를 정량 투입하여 1시간에 걸쳐 설정한 반응온도(60~80°C)까지 승온한다. 승온 과정에서 갑작스런 발열현상이 관찰되면 공기를 이용하여 발열을 제어한다. 급발열 현상은 Polyol의 분자량과 반응기수, Polyol 제조시 사용된 촉매에 따라 발생할 수 있다. 목표하는 NCO%까지 일정 온도로 유지하며 NCO%와 점도를 측정하여 목표 NCO%에 도달하면 40°C 이하로 냉각하여 밀봉용기에 보관하였다.

2.2. 고기능성 도료의 제조

수지인 주제와 도료인 경화제는 Table 1와 같이 일정 당량비 (NCO/OH : 1.05) 으로 설계하였다. 일반적으로 가장 좋은 우레탄 설계는 당량비 1.0 ~ 1.1 정도로 설계하는 것이 일반적이라고 할 수 있다. 주제 수지는 Methylene Diphenyl Diisocyanate(MDI)와 Polycaprolactone Polyol (PCL, Mw 2,000)을 주성분으로 합성한

Prepolymer(NCO 16.2%)를 사용하였다. 경화제 도료 제조는 고속 분산기를 사용하여 30분 분산을 실시하였으며 주인자인 Polyol을 먼저 준비된 배합조에 정량 계량하여 넣고 첨가제인 소포제, Colorant, 체질 순으로 정량 배합하였다. 고속분산 후 진공 탈포 장치를 사용하여 도료 내면에 잔존하는 기포를 제거하였다. 체질부분은 내마모성 증진을 위한 Slip성이 우수하며 표면 저항을 감소시키며 우수한 내열성 특징으로 가지고 있는 BN(Boron Nitride, 6 μ m)을 사용하였다. 내마모성, 내충격성 및 탄성 등을 보강하고자 Carbon Nano Tube(multi wall), Carbon Nano Tube(single wall), Graphite(spherical) 및 Graphite(fiber) 등 4종류의 나노 입자를 동일 함량 첨가하여 제조하였다.

Table 1. Composition of paint hardener

Composition	Hardener (wt%)
PCL-2	90
Colorant	2
Absorbent	2
Nano carbon particle	1
Boron Nitride	2
Liquid lubricant	1
Defoamer	2
Total	100
Equivalent	281

PCL-2: Polycaprolactone-tetramethyleneglycoether Polyol, Mw 2,000, Functionality 2

2.3 캐비테이션 저항성 성능 시험

캐비테이션 저항성 성능시험은 ASTM G32(Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus)에 따라 수행하였다. 이 시험 방법은 반복된 Cavity 적용 시 항상 동일한 위치에 적용하기 어렵다거나 수조내 유체 온도가 상승해서 시험 규정 온도(25°C \pm 2°C)를 유지 하기 어려운 단점이 있어서 정확한 시험을 실시하는데 한계를 갖고 있다. 이를 극복하기 위하여 수조 고정 및 수평 조절 Unit을 설치하고 시편 위치 Guide를 추가적으로 설치해서 동일한 위치에 Cavity를 적용할 수 있도록 보완하였다. 그리고 2중 온도 유지 장치 및 온도 Monitoring Unit을 추가로 설치해서 항상 규정 온도를 유지할 수 있도록 보완하였다.

보완된 ASTM G32 캐비테이션 저항성 성능시험은 Cavity 적용 전과 후의 시편 무게를 소수점 4째 자리까지 측정하여 무게의 감량에 의해 결과를 확인하는 방법으로 정밀한 무게의 측정 및 무게에 영향을 주는 요인을 최소화하여 정확한 결과를 획득하는 것이 중요하다. 따라서 무게에 영향을 주는 인자에 대해 사전평가를 실시하여, 시험 시편을 초음파 세정(상온 10분), 수분 제거, 시편 건조, 진공 데시케이터 보관(-0.4bar, 상온 1시간) 등의 시험 절차로 무게 측정에 미치는 외적 요인을 가능한 최소화 하였다. 또 다른 중요한 요인으로 상대 습도로 시편의 무게 측정에 큰 영향을 미친다. 상대습도가 높아지면, 공기 중의 수분에 의해 무게 증가의 가능성이 높다. 따라서 무게 측정시의 상대 습도를 60%이하로 유지하며, 시편의 무게 측정 전 외기 노출을 최소화 하여야 한다.

Table 2. Composition of prepolymer and nano particle sample

Sample #	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4
Prepolymer Composition	MDI/PCL-1	MDI/PCL-1	MDI/PCL-1	MDI/PCL-1
Carbon structure	CNT (Multi wall)	CNT (Single wall)	Graphite (Spherical)	Graphite (Fiber)

MDI: Methylene Diphenyl Diisocyanate

PCL-1: Polycaprolactone Polyol, Mw 2,000, Functionality 2

CNT: Carbon Nanotube

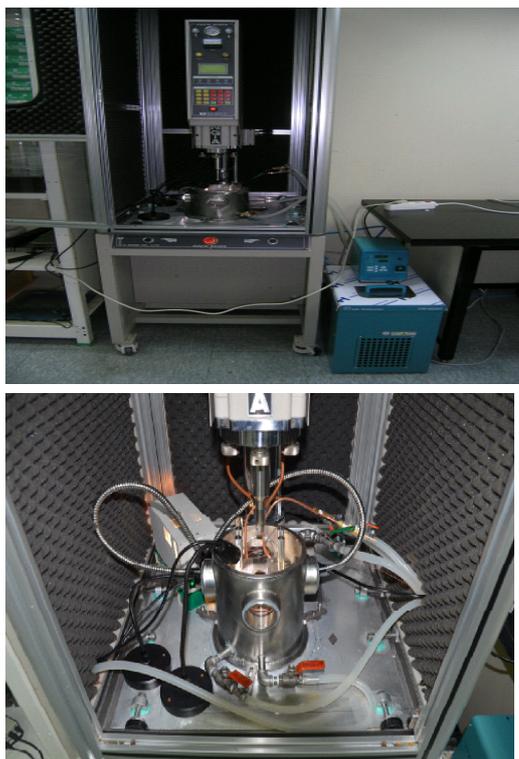


Fig. 1. Photograph of cavitation erosion test equipment

2.4. FT-IR 및 DSC 측정 시험

합성 고분자 구조의 작용기들은 ARIAN 社 (美) Varian 670-IR 제품 FT-IR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)로 관찰하였다. 합성 고분자 시료는 순도 99% Acetone solvent에 균일하게 녹여 사용하였다. 측정 전 원형 KBr pellet으로 공기 중 수분과 CO₂ gas를 고려하여 Background를 측정한다. 이 후 KBr pellet에 Acetone solvent로 용해된 고분자 시료를 떨어뜨린 후 Heat gun으로 Acetone 용제가 완전히 제거 될 때까지 건조한 후 측정하였다. 그리고 합성 고분자의 유리전이온도(Glass transition temperature: T_g)를 측정하기 위해 TA Instrument 社의 DSC 2920 장비를 사용하였다. 측정 전 고분자 시료 약 1g을 유리판에 Application 후 150°C에서 1시간 건조하였다. 건조된 고분자 시료 약 10mg을 DSC pan에 담은 후 N₂ 분위기 하에서 10°C/min 속도로 250°C까지 승온 하면서 측정하였다.

3. 실험결과

3.1. 나노입자의 종류에 따른 도료의 물성 비교

나노입자의 첨가에 따른 도료의 물성을 비교하기 하기 위하여 Table 1과 같은 조성으로 도료를 제작한 후 Table 2와 같이 다양한 탄소 나노 입자를 첨가한 후 평가된 물성이 Table 3에 요약되어 있다. Prepolymer의 점도는 나노입자의 종류에 관계없이 2,270 mPa.s로 일정하였다. 경화제의 점도는 Single wall CNT를 포함하는 경화제의 점도가 4,260 mPa.s로 가장 높게 관찰되었고 비중은 서로 유사하였다. 도료의 인장 강도(Tensile strength)는 Graphite를 첨가한 도료가 13.5 N/mm² 정도로 CNT를 첨가한 도료보다 높게 관찰되었다. 신율(Elongation)은 Fiber segment type의 Graphite를 첨가한 도료가 191%로 가장 높게 관찰되었다. 수분 흡수율은 Single wall CNT와 Spherical type Graphite가 높게 관찰되었다. 내마모성(Wear resistance)는 Spherical type Graphite가 다른 나노입자들에 비해 월등히 높게 관찰되었다.

3.2. 도료의 캐비테이션 저항성 평가

첨가된 나노 입자 종류에 따른 시료의 캐비테이션 저항성 평가를 실시하였다. Table 4에 정리된 자료와 같이 캐비테이션 저항성 성능 시험 결과에서 누적 침식 깊이가 50 μm까지 도달하는데 소요되는 시간을 비교해 보면 Fiber type의 Graphite가 t₅₀ 292min으로 가장 우수한 것으로 관찰되었고 Single wall CNT를 첨가한 도료도 t₅₀ 286min 그 다음으로 우수한 것으로 관찰되었다. 따라서 Graphite에서는 Spherical type 보다는 Fiber type이 상대적으로 높은 캐비테이션 저항성을 나타내고 있다. 또한 CNT에서는 multi wall 보다는 single wall이 더 높은 캐비테이션 저항성을 보이고 있다. Single wall CNT의 경우 제품의 가격이 상당히 고가라서 가격 경쟁력을 감안하면 실제 적용하기 어렵다고 판단된다. 나노 입자중에서 가격 및 캐비테이션 저항성 등을 감안하면 가장 최적의 나노 입자는 Fiber type의 Graphite로 관찰되었다. 이외에도 Drying time, SVR, Adhesive property, Sag resistance 등 다른 응용 물성은 나노 입자들의 종류에 관계없이 동일하게 또는 서로 유사하게 관찰되었다.

Table 3. Physical properties(viscosity, specific gravity) and mechanical properties(tensile strength, elongation, water absorption, wear resistance) of paint sample

Physical property	Test method	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4
Prepolymer viscosity (mPa.s, 25°C)	ASTM 2196	2270	2270	2270	2270
Hardener viscosity (mPa.s, 25°C)	ASTM 2196	3720	4260	3530	3810
Prepolymer Specific gravity (g/cm ³ , 20°C)	ASTM D1479	1.17	1.17	1.17	1.17
Hardener Specific gravity (g/cm ³ , 20°C)	ASTM D1479	1.11	1.06	1.12	1.10
Tensile strength (N/mm ²)	KSM 6518	7.7	9.4	13.5	13.4
Elongation (%)	KSM 6518	134	164	163	191
Hardness	ASTM D2240	74	79	77	80
Water absorption ratio (%)	ASTM D570	0.39	0.61	0.62	0.47
Wear resistance	ASTM D4060	4.1	2.8	8.5	4.7

Table 4. Applied physical properties of paint sample

Physical property	Test method	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4
Erosion time, t ₅₀ (min, 50 μm)	ASTM D32	230	286	182	292
Drying time (25°C, hrs)	ASTM D5895	8	8	8	8
SVR (%)	ISO 3233	97	97	97	97
Adhesive property (MPa)	ISO 4624	8.9	9.3	9.0	9.1
Sag resistance (μm)	ASTM D4400	800	800	800	800
Pot life (min)	ISO 9514	25	25	25	25

t₅₀: time taken to reach 50μm of CMDE (Cumulative Mean Depth of Erosion)

3.3. 나노입자 첨가 도료의 spray 작업성 평가

최적의 나노입자로 선정된 Fiber type 의 Graphite 를 첨가한 도료 (sample 4)에 대한 Spray 작업성을 평가하기 위하여 수동 작업에 의해 제작된 시편과 Spray 작업에 의해 제작된 시편을 비교한 사진이 Figure 1에 나타나있다. 수동

작업에 의해 제작된 표면은 매끈한 표면을 가지고 있으나 Spray 작업에 의해 제작된 표면은 표면이 균일하지 않으며 Spray할 때 발생된 Dust가 표면에 고착된 형태로 관찰되었다.

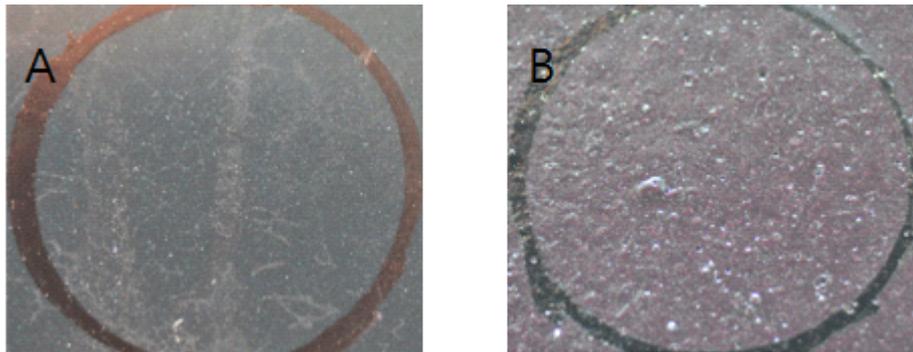


Fig. 1. Scanning electron microscope of sample surface (A: sample painted by manual, B: sample painted by spray)

이와 같은 표면의 불균일은 Spray 작업할 때 도료의 퍼짐성 즉 무화도(Atomization) 저하에 따른 표면의 평활도 저하가 주요 원인으로 추정된다. 또한 경화 속도가 너무 빠르면 도막이 건조되고 있는 도중에 후속으로 무화된 도료가 Dust로 표면에 존재 할 수 있다. 즉, 도막 자체가 평활성을 유지하기 전에 경화가 이루어져서 표면에 적용된 도료들이 무화된 형태로 경화가 이루어짐으로써 불균일한 표면을 형성할 수 있다.

표면 불균일 및 기공과 함께 고려되어야 할 내부 기공에 대한 관찰도 실시하였으며, 결과는 Table 5에 잘 나타나 있다. Spray 작업 시편에서 발견된 기공이 57.5개로 Manual 작업 시편보다 약 2.0배 정도 증가하였으며, 기공 면적비율도 6.69%로 Manual 작업 시편보다 약 3.6배 증가된

것을 확인할 수 있다. 이와 같은 내부 기공의 증가는 표면의 불균일과 유사하게 무화도 저하에 의해 내부 기공 형성과 함께 빠른 경화 속도에 의해 내부 기공들이 외부로 빠져나오지 못하고 내부에 갇힌 것으로 판단된다. 따라서, 표면 균일성 향상과 내부 기공 감소를 통한 침식 저항성 향상을 위해 물성과 장비 개선을 통한 무화도 향상 및 적절한 경화속도의 조절이 필요하다고 판단된다

캐비테이션 저항성이 저하된 원인파악을 위해 시편의 표면 및 단면 관찰과 함께 화학 분석도 실시되었다. 수동 작업의 경우 주재와 경화제의 무게를 측정하여 시편을 제작하여 주재와 경화제가 정확한 비율로 혼합되었는지 확인이 가능하나, Spray 작업의 경우는 장비를 사용

Table 5. Comparison of sample surface(pore area, pore area ratio) between manual and spray painting

	point	Area (mm ² , [A])	Pore		Pore area ratio (%, [B]/[A]X100)
			Number	Area(mm ² , [B])	
Manually painting surface	1	5.08	27	0.09	1.77
	2	5.23	29	0.11	2.14
	3	5.16	32	0.10	1.90
	4	5.20	27	0.08	1.54
	Avg.	-	28.8	-	1.84
Spray painting surface	1	4.51	32	0.21	4.65
	2	5.22	72	0.36	6.90
	3	5.20	65	0.36	6.88
	4	5.20	61	0.43	8.31
	평균	-	57.5	-	6.69

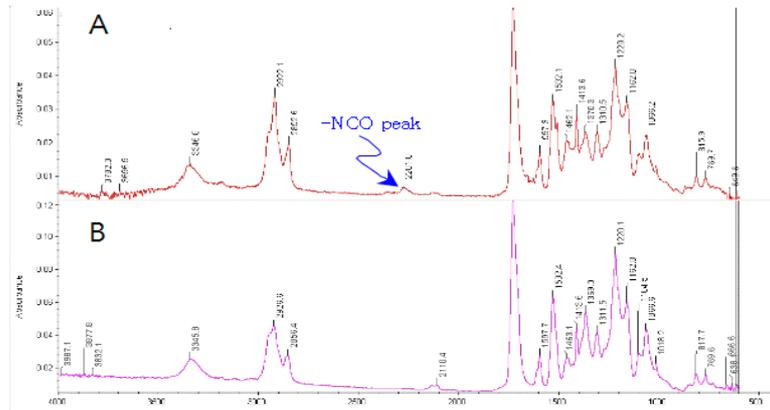


Fig. 2. FT-IR analysis of samples (A: sample painted by manual, B: sample painted by spray)

하여 펌프에 의해 주재와 경화제가 일정 혼합비율로 토출하지만, 주재와 경화제의 점도, 장비의 상태 및 운용조건에 의해 실제 토출되는 양은 달라져 주재와 경화제의 혼합비율이 틀어질 가능성이 있다. 혼합비율 이상에 의한 캐비테이션 저항성 확인을 위해 FT-IR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 및 DSC(Differential Scanning Calorimetry) 분석을 실시하였다. FT-IR은 고분자 분자사슬의 결합종류에 따라 서로 다른 흡수파장(peak)을 나타내어 측정 물질의 조성을 확인할 수 있다.

Figure 2는 수동 작업 및 Spray 작업으로 제작된 시편에 대한 FT-IR 분석 결과이다. Spray에 의해 제작된 Sample에서는 주재의 반응기인 '-NCO' peak가 확인되지만, 수동으로 제작된 Sample에서는 확인되지 않는다. 즉, 주재가 과량으로 혼합되어 미경화되고 잔존하는 '-NCO' 반응기가 남아있을 가능성이 있다.

FT-IR분석과 함께 실시된 DSC분석은 시차 주사 열량측정법으로 고분자 물질의 T_g (Glass Transition Temperature: 유리전이 온도)를 확인할 수 있다. T_g는 고분자 재료가 갖고 있는 고유한 특성으로 경화 정도 및 물질 열적 특성을 확인할 수 있으며 분석 결과는 Figure 3과 같다. DSC분석을 통해 수동 작업과 Spray 작업 시편의 T_g가 다른 것을 확인할 수 있다. 이것은 FT-IR 분석에서 확인된 '-NCO' peak의 강도에 부합된다. 일반적으로는 주재, 경화제의 당량이 1일 경우에 경화도가 높으면 높은 T_g를 나타내는데

'-NCO' 성분이 과량으로 함유되어 있을 경우에도 수분과의 부반응(Side reaction)에 의해 재료 자체가 Brittle해지면서 T_g가 높아질 수 있다.

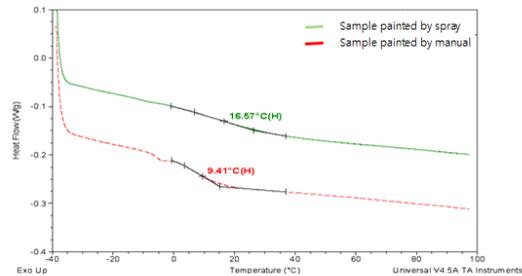


Fig. 3. DSC analysis of samples(upper: sample painted by spray, lower: sample painted by manual)

4. 결론

캐비테이션에 의한 응력 부식에 강한 도료를 개발하기 위하여 우레탄 수지에 내마모 성능을 향상시키기 위한 목적으로 Multi wall과 Single wall type의 Carbon nano tube (CNT)와 Spherical과 Fiber type의 Graphite 등의 나노 입자를 첨가하여 물성과 캐비테이션에 대한 저항성 및 작업성 등을 비교 평가하였다.

나노 입자로서 Graphite에서는 캐비테이션 저항성(t₅₀)이 Spherical type(t₅₀ 182min)보다는

Fiber type(t_{50} 292min)이 높은 캐비테이션 저항성을 갖는 것으로 관찰되었다. 또한 CNT에서는 Single wall type의 캐비테이션 저항성(t_{50} 286min)이 Multi wall보다는 더 높은 것으로 관찰되었다. Single wall CNT의 경우 제품의 가격이 상당히 고가라서 가격 경쟁력을 감안하면 적용이 어렵다고 판단되어 나노 입자중에서 가격 및 캐비테이션 저항성을 감안하면 가장 최적의 나노 입자는 Fiber type의 Graphite로 판단된다. 도료의 작업성 평가에서 수동 작업에 의해 제작된 표면은 매끈한 표면을 가지고 있으나 Spray 작업에 의해 제작된 표면은 표면이 균일하지 않으며 Spray시 발생된 Dust가 표면에 고착된 형태로 관찰되었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Bu-Geun Paik, Kyung-Youl Kim, Jong-Woo Ahn, Sunho Park, Jaekyung Heo and Byeong-Seok, Cavitation Observation and Visualization of the Gap Flows on a Rudder Influenced by Propeller Slipstream and Hull Wakes, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, **Vol. 45**, No. 3, 2008
2. Bu-Geun Paik, Kyung-Youl Kim, Ki-Sup Kim, Tae-Gyu Kim, Kyung-Rae Kim, Young-Hun Jang and Sang-Uk Lee, Development of New Cavitation Erosion Test Method for Analyzing the Durability of Erosion Resistance Paint, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, **Vol. 47**, No. 2, 2010
3. Shaoshi Dai, Bassam A. Younis, Liping Sun, Large-Eddy Simulations of cavitation in a square surface cavity, *Applied Mathematical Modelling*, 2014
4. G.L. Garcia, V. Lopez-Rios, A. Espinosa, J. Abenojar, F. Velasco, A.Toro, Cavitation resistance of epoxy-based multilayer coatings: Surface damage and crack growth kinetics during the incubation stage, *Wear*, **Vol. 316**, 2014
5. Shuji Hattori, Norihiro Mikami, Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays, *Wear*, **Vol. 267**, 2009
6. J.T.Chang, C.H.Yeh, J.L.He, K.C.Chen, Cavitation erosion and corrosion behavior of Ni-Al intermetallic coatings, *Wear*, **Vol. 255**, 2003
7. Bin Liu, Jun Cai, Xiulan Huai, Heat transfer with the growth and collapse of cavitation bubble between two parallel heated walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **Vol. 78**, 2014
8. Matevz Dular, Bernd Bachert, Bernd Stoffel, Brane Sirok, Relationship between cavitation structures and cavitation damage, *Wear*, **Vol. 257**, 2004
9. ZHAO Wei-guo, ZHANG Ling-xin, NUMERICAL SIMULATION OF CAVITATION FLOW UNDER HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE, *Journal of Hydrodynamics*, **Vol. 23(3)**, 2011
10. Bu-Geun Paik, Kyung-Youl Kim, Ki-Sup Kim, Sunho Park, JaeKyung Heo, Byeong-Seok Yu, Influence of propeller wake sheet on rubber gap flow and gap cavitation, *Ocean Engineering*, **Vol. 37**, 2010
11. Bu-Geun Paik, Gun-Do Kim, Kyung-Youl Kim, Han-Shin Seol, Beom-Soo Hyun, Sang-Gab Lee, Young-Rae Jung, Investigation on the performance characteristics of the flexible propellers, *Ocean Engineering*, **Vol. 73**, 2013
12. Polymer impellers set to beat cavitation wear, *WORLD PUMPS*, October 2013
13. Gil-Hwan Choi, Bong-Jun Chang and Dae-Seung Cho, Cavitation Test at High Reynolds Number Using a Partial Propeller Blade Model, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, **Vol. 46**, No. 6, 2009
14. C.P. Qin, Y.G. Zheng, R. Wei, Cavitation

- erosion behavior of nanocomposite Ti-Si-C-N and Ti/Ti-Si-C-N coatings deposited on 2Cr13 stainless steel using a Plasma Enhanced Magnetron Sputtering process, *Surface & Coatings Technology*, **Vol. 201**, 2010
15. Changmin Lee, Junkeun Oh and Shin Hyun Rhee, Two-dimensional Model Tests for Rubber Gap Cavitation and Suppression Devices, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, **Vol. 47**, No. 2, 2010
 16. David W. Hatchett, Gayani Kodippili, John M. Kinyanjui, Flocerfida Benincasa, Linda Sapochak, FTIR analysis of thermally processed PU foam, *Polymer Degradation and Stability*, **Vol. 87**, 2005
 17. Jin Liu, Dezhu Ma, Zhen Li, FTIR studies on the compatibility of hard-soft segments for polyurethane-imide copolymers with different soft segments, *European Polymer Journal*, **Vol. 38**, 2002