해수 내 초음파 진동 캐비테이션에 의한 폴리우레탄 수지 도막의 내캐비테이션 성능 평가

이정형* · 김재학** · 김용표** · 김성종*,†

*목포해양대학교 기관시스템공학부

** (주)노루페인트 연구소

Evaluation of Anti-Cavitation Performance of Polyurethane Coatings in Seawater using Ultrasonic Vibratory Method

Jung-Hyung Lee*, Jae-Hak Kim**, Yong-Pyo Kim** and Seong-Jong Kim*,†

*Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 58628, Korea

**R&D center, Noroo Paint, Anyang, 13977, Korea

†Corresponding author : ksja@mmu.ac.kr

(Received August 26, 2019 ; Revised September 24, 2019 ; Accepted September 26, 2019)

Abstract

The anti-cavitation performance and damage characteristics of polyurethane coatings containing carbon nano-fibers (CNF) as reinforcement were investigated using the ultrasonic vibratory method in seawater (ASTM G32-10). Two commercial anti-cavitation coatings, glass flake-reinforced vinyl ester and urethane-modified epoxy, were used for comparison. During the cavitation tests, the cumulative mean depth of erosion (CMDE) was determined, and damage development against exposure time was evaluated for each coating using optical microscopy. A significant difference was found in the performance of the four polyurethane coatings. The polyurethane coating without CNF provided the least protection against cavitation attack, suggesting the added CNF improved and reinforced the resilience of the coating against impact pressure produced by cavitation bubble collapse. Excellent cavitation resistance was also exhibited by the polyurethane coating composition when fluorine was added, an improvement that may be attributed to the synergistic effect of CNF and fluorine on the polyurethane structure.

Key Words : Cavitation, Polyurethane, Coating, Carbon nanofibers(CNF)

1. 서 론

캐비테이션(Cavitation) 현상은 액체를 작동유체로 하는 펌프, 터빈과 같은 유체기계 내에서 액체가 빠른 속도로 가속될 때 액체의 압력이 포화증기압 이하로 감소하면서 액체 내 기포를 발생시키는 현상이다. 캐비테이션에 의해 발생한 기포 붕괴 시 발생하는 온도와 압력은 순간적으로 수천도¹⁾와 수천기압²⁾에 이르며, 그로 인한 충격과 에너지가 표면에 전달되어 침식 손상을 일으킴으로써 수동력기계장치에서 작동 상의 장애를 일으킨다.

캐비테이션 현상은 어떠한 유체기계장치에서도 발생할 가능성이 있으며 선박의 경우 프로펠러 인근과 타(rudder) 주변부에서 캐비테이션 침식 위험에 상시 노출되어 있다. 캐비테이션에 기인한 선체의 손상 방지를 위해 다양한 연구가 진행되어 왔다. 캐비테이션 방지를 위한 직접적인 방법으로 기하학적 형상 개선을 통해 표면을 따라 발생하는 압력강하를 최소화하여 기포 형성 자체를 억제시키는 방법이 있다. 이는 밀폐형 유체 계통에서는 효과적이거나 선체와 같은 개방형 수력구조물에는 적용이 용이하지 않다.

선체의 캐비테이션 침식 방지를 위한 또 다른 방법으

로 캐비테이션 침식 저항성을 갖는 피복재를 프로펠러와 타 주변부에 시공하는 방법이 있다. 피복법으로는 용사, 도장, 도금 등을 고려할 수 있으나, 표면처리조건, 시공 상의 경제성, 용이성 측면에서 도장에 의한 캐비테이션 침식 방지법이 가장 효과적이다³⁾.

선체의 캐비테이션 침식 방지 도료는 방식성능과 캐비테이션에 의한 내침식성 뿐만 아니라 해양생물 부착 방지를 위한 방오 성능을 동시에 만족해야 하므로 기술 개발에 어려움이 있어 왔다. 또한 도료 선정에 있어서는 강도, 경도, 탄성 등의 기계적 성질 뿐만 아니라 시공의 용이성 등이 고려되어야 한다.

선박용 도료는 사용되는 수지의 종류에 따라 에폭시, 폴리우레탄, 알키드 계열 도료 등으로 구분된다. 이중 폴리우레탄은 기계적 강도와 내후성이 우수한 폴리머로 연질부(soft segment)를 이루는 폴리올(polyol)과 경질부(hard segment)를 이루는 이소시아네이트(isocyanate)의 종류와 특성이 다양하고 이들 함량 조절에 의해 탄성 등의 물성 제어가 가능하기 때문에 선박용 도료로 각광을 받고 있다⁴⁾. 폴리우레탄 계열 도료가 캐비테이션 기포 붕괴에 따른 충격에너지를 견딜 수 있도록 하기 위해서는 추가적인 강화기구가 필요하며, 폴리머 기지에 강화제(필러)를 도입함으로써 내구성을 확보할 수 있다⁵⁾. 최근에는 무기 필러(inorganic filler)를 첨가하여 내캐비테이션 특성이 개선된 도료가 개발되었으며⁶⁾, 그래핀, 탄소나노튜브와 같은 나노 사이즈의 필러를 첨가하여 물성 개선을 시도하는 연구가 진행되고 있다⁷⁾.

본 연구에서는 폴리우레탄계 도료의 내캐비테이션 성능 개선을 위해 탄소나노섬유(Carbon nanofibers, CNF)를 필러로 첨가한 개발제품에 대하여 해수환경에서의 내캐비테이션 특성 평가 및 손상 특성 분석을 실시하였으며, 외산의 상용 내캐비테이션 도료와 비교 분석하였다. 본 연구 결과는 일부 기술 선진국의 도료 제조사에 의해 독점화된 선박용 내캐비테이션 도료 시장에서 국산화된 내캐비테이션 도료의 성능을 확보하고 외산 상용 도료제품의 성능 수준을 파악함과 동시에 이를 비교 분석함으로써 향후 내캐비테이션 도료 개발에 기초적 자료를 제공하는데 의의가 있다.

2. 실험방법

캐비테이션 침식 성능 평가 대상 시험편은 20 mm × 20 mm 크기의 스테인리스강(STS 304) 판재 위에 한 면을 도료로 도장한 것을 시험에 사용하였다. 연구에 사용된 도료는 내캐비테이션용 상용도료 2종과 개발품 4종으로 총 6종이며, 시험편에 대한 상세 정보를 Table 1에 나타냈다.

본 시험에 사용된 캐비테이션 시험장비는 ASTM-G32 규정에 의거하여 제작된 것이며 압전효과를 이용하여 진동을 발생시키는 장치이다. 60 Hz, 220 V의 전력을 전자회로를 거쳐 20 kHz의 정격 출력을 발생시키며 진동자에 공급하는 역할을 하며 진폭은 정진폭 자동제어 방식으로 50 μ m로 일정하게 유지하였다. 압전소자에 의한 진동발생은 원추흔에 전기적인 교류를 인가함으로써 축 방향으로 진동을 일으키는 현상을 이용하였다. 사용 용액은 천연해수용액으로 자동 온도 제어기에 의해 시험 구역에서 규정한 시험온도인 22 $\pm$ 1 $^{\circ}$ C로 일정하게 유지하였으며, 진동자(흔팁)가 용액에 잠기는 깊이는 12 mm로 일정하게 유지하였다. 시편은 진동자의 흔에 대향하도록 거치대에 고정하여 흔으로부터 발생한 캐비티(cavity)가 시편에 영향을 받도록 하는 Stationary Specimen Method를 이용하였다. 그리고 시험편은 흔팁으로부터 0.5 mm만큼 이격하여 설치하였다.

평가 대상 도료 시험편에 대하여 캐비테이션 시험을 실시하고, 시험 시작 후 50분, 100분, 200분, 300분, 400분, 600분, 800분 및 1000분이 경과된 시점에서 무게를 측정하여 1000분에 걸친 누적 무게 감소량의 변화를 측정하였다. 그리고 무게 감소량 측정 후 ASTM G-32에서 규정한 식에 의해 평균누적침식깊이(Cumulative Mean Depth of Erosion, CMDE)를 산출하였다. 여기서 캐비테이션 침식에 대한 저항성은 평균누적침식깊이가 50 μ m에 도달하는 데 소요되는 시간(이하 t_{50})을 측정하여 비교함으로써 판단할 수 있다. 즉, t_{50} 값이 클수록 우수한 캐비테이션 저항성능을 나타낸다고 볼 수 있다.

본 시험에서는 동일 종류의 시험편에 대하여 3회 시험을 실시하였고, 시험 도중이라도 CMDE 값이 50 μ m에 도달하면 시험을 중단하였다. 시험 후 시편은 25 $^{\circ}$ C의 증류수에서 초음파 세척 후 60 $^{\circ}$ C의 건조기에서 1120분 동안 건조시켰다. 무게 측정은 정밀도 0.1 mg의 정밀 전자저울을 이용하였으며, 시편을 건조기에서 꺼내어

Table 1 Compositions of anti-cavitation paints

Sample	Composition		Density (g/cm ³)	Application method
A	Glass reinforced vinyl ester		1.324	Brush
B	2-packaged urethane modified epoxy		1.129	Brush
T1	Polyurethane	Resin: MDI prepolymer Hardener: polyol Filler : CNF	1.084	Airless spray
T2		T1 + Silica	1.072	Brush
T3		T1 excluding CNF	1.129	Airless spray
T4		T1 + Fluorine additive	1.066	Airless spray

60분 동안 데시게이터 내에 보관 후 상온에서 무게를 측정하였다. 무게 측정을 마친 시험편은 3D 현미경을 이용하여 손상부위에 대한 최대손상깊이를 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 외관 관찰 결과

Fig. 1은 시험 대상 도료 시험편 6종에 대한 캐비테이션 시험 시간 600분까지의 시험편 외관을 종합 비교한 사진이다. 외산품 A는 시험 시간 50분 이내에 캐비테이션의 영향을 받은 부위를 중심으로 도장이 박리되었으며, T3 또한 시험 초기에 도막 내부로부터 용출되어 시험을 초기에 종료하였다. 계속된 시험에서 외산 B제품, T1, T2, T4 시험편은 각기 상이한 손상 형상을 나타냈다. B제품은 캐비테이션 시간 경과에 따라 캐비테이션 영향부의 광택이 사라지고 침식이 발생하였으며, 이 침식부위는 계속된 캐비테이션 충격에 의해 덩어리 형태로 탈락 후 비교적 큰 크레이터 형 손상흔이 식별되었다. T1 시험편은 시험시간 200분부터 원형의 캐비테이션 혼탁 형상이 관찰되기 시작하여 시간 경과에 따라 균열과 미세한 침식이 관찰되었다. T2 시험편은 중앙 부위에서 큰 균열이 발생하였으며 균열 부위

하부에서 들뜸 현상이 일어났다. T4 시험편은 외관 관찰 결과 7종의 도료 중 가장 건전한 표면을 나타낸 시험편이며, 시험 후반부에 캐비테이션 영향부의 일부 부위에서 침식이 확인되었다.

3.2 무게감소량 및 평균누적침식 깊이 측정 결과

Fig. 2는 외산 B제품, T1, T2 및 T4 시험편에 대하여 해수용액에서 실시한 캐비테이션 시험 시간에 따른 누적무게감소량과 CMDE 측정치의 평균을 종합 비교한 것이다. 그래프 상의 점은 측정치의 평균값을 나타내며, 시험 중단으로 측정치가 없는 경우 평균값 계산에서 제외하였다. 도료 시험편의 경우 금속 시험편에서 나타나는 잠복구간(incubation period)은 확인되지 않았다. 합성수지의 경우에도 캐비테이션 시험에서 잠복구간이 존재하는 것으로 보고되고 있으므로, 시험 도료의 경우 잠복 구간은 50분 내에 존재할 것으로 판단된다. 시간 경과에 따른 무게감소량은 T2 시험편이 가장 급격한 증가를 보여주고 있으며, 이에 반해 T4가 가장 완만한 증가율을 나타냈다. T1과 B제품의 그래프는 T2와 T4의 그래프 중간에 분포하고 있다. T1 시험편의 경우 시험 종료 시까지 B제품에 비해 낮은 무게

Sample \ Time	Before test	50min	100min	200min	300min	400min	600min
A
B
T1
T2
T3
T4

Fig. 1 Photographs of paint samples with cavitation time.

Fig. 2 Weightloss of paint samples with cavitation exposure time

Fig. 3 CMDE of paint samples with cavitation exposure time

Table 2 Comparison of time-to-reach CMDE 50μm(t₅₀) (unit: min)

Sample \ No	No. 1	No. 2	No. 3
A	< 50	< 50	< 50
B	900	445	760
T1	579	654	> 1000
T2	147	200	120
T3	< 5	< 5	< 5
T4	> 1000	> 1000	> 1000

감소량을 유지하였다. 무게감소량에 대응한 CMDE 값의 시간에 따른 변화 양상은 무게감소량과 동일하였다. Table 2는 시험대상 모든 시험편의 t₅₀ 값을 비교하여 나타낸 것이다. t₅₀ 값은 T2 시험편이 가장 짧은 값(평균 155.6분)을 나타냈으며, T4 시험편이 가장 긴 값(평균 1000분 이상)을 나타냈다. B제품과 T1 모두 시험편별 t₅₀의 편차를 보이고 있고, T1의 No.3 시험편의 t₅₀ 측정치가 1000분 이상을 나타내고 있어 이들 두 도료의 평균치의 직접 비교는 어려웠다. 도막이 조기에 손상된 외산품 A 및 T3 도료를 제외하고 무게감소량과 CMDE 측정값을 바탕으로 캐비테이션 저항성을 비교하면 T4, T1, B제품, T2 순으로 우수한 성능을 나타낼 것으로 예상된다.

3.3 현미경 관찰에 의한 초기 손상 특성 비교

Fig. 4는 B제품, T1, T2 및 T4 시험편에 대하여

Fig. 4 Optical micrographs showing damage development in the early stage for paint samples

해수용액에서 실시한 캐비테이션 시험에서 캐비테이션 손상 초기의 표면 손상부위를 현미경으로 관찰하여 비교한 것이다. T4를 제외한 모든 도막에서 캐비테이션 충격에너지에 의한 피팅 손상과 균열이 확인되었다. 이러한 피팅과 균열 부위는 반복되는 충격압에 의해 확장 연결되어 손상량이 증가되는 경향이 나타났다. 특히 B제품의 경우 손상량이 상대적으로 많으며, T4의 경우 200분에서 일부 부위에서 피팅이 확인되었다.

3.4 3D 현미경 분석 결과

Fig. 5는 외산 B제품 및 개발품 T1, T4에 대한 캐비테이션 시간에 따른 손상 표면을 3D 현미경으로 촬영한 3D 표면 모폴로지를 나타내었다. 전반적으로 시험시간 증가에 따라 표면의 거칠기가 증가하고 있으며 피팅의 수 또한 증가하고 있음을 알 수 있다. 시험편 모두 시험시간 증가에 따라 피팅의 직경이 증가하는 경

Fig. 5 3D surface morphology of paint samples with cavitation exposure time

Fig. 6 Damage depth of paint samples with cavitation exposure time

향이 확인되었으며, B제품의 경우 직경이 $1000\mu\text{m}$ 에 달하는 큰 크레이터 형 손상이 확인되었다.

Fig. 6은 T1, T2, T4 및 B 도료 시험편의 캐비테이션 시험 시간에 따른 손상깊이 추이를 종합 비교한 것이다. 시험편 별 손상깊이의 변화 추이는 무게감소량 및 CMDE 측정 변화 경향과 다소 차이를 보이고 있다. 시험구간 별 손상깊이를 비교하면 100분까지는 T2 시험편이 가장 큰 손상깊이를 나타내었으며, 200분 이후부터 시험 종료 시까지 가장 큰 손상깊이를 나타낸 시험편은 B제품이었다. 또한, 전 시험시간에 걸쳐 가장 낮은 손상깊이를 나타낸 시험편은 T4로 확인되었다. 시험 종료 시 손상깊이 값은 B제품, T2, T1, T4 순으로 높게 나타났다.

3D 현미경을 이용하여 손상부위에 대해 측정한 최대 손상깊이를 시험구간별로 구분하여 비교하면, 시험 초기 100분까지의 손상깊이는 T2 시험편이 가장 큰 손상깊이와 증가율을 나타내었으며, 200분 이후부터 시험 종료 시까지 가장 큰 손상깊이를 나타낸 시험편은 B제품이었다. 시험종료 시의 손상깊이 값은 B제품($708\mu\text{m}$) > T2($500\mu\text{m}$) > T1($217.1\mu\text{m}$) > T4($122.4\mu\text{m}$) 순으로 높게 나타났다. 전 시험시간에 걸쳐 가장 낮은 손상깊이를 나타낸 시험편 T4였다.

3.5 고찰

캐비테이션 침식은 금속과 비금속을 막론하고 재료 내의 결함부로의 충격압 전달로부터 시작되어 국부적 탈리(detachment)를 일으키며, 이로 인한 공식 형성과 균열 발생에 따라 물질 제거가 가속화된다고^{8,9)} 한다. 따라서 캐비테이션 방지 도료는 기포 붕괴 시 발생하는 충격에너지를 흡수 또는 반발하는 이른바 cushioning 효과

에 의해 캐비테이션에 의한 핏트 생성을 최소화하는 것이 관건이라 할 수 있다.

기존 외산제품 중 A 도료는 비닐 에스터(Vinyl ester) 기지에 glass flake가 강화제로 사용된 것으로서 실제 선박 환경에서는 우수한 내캐비테이션 성능이 입증된 제품이다. 그러나 본 연구에서는 캐비테이션 시험 50분 만에 도막이 박리되어 소지가 노출되어 가장 열악한 성능을 나타냈다. 이러한 손상은 수지와 glass flake 간 계면에서 파단으로부터 시작되어 반복되는 충격압력에 의해 가속화 된 것으로 보인다¹⁰⁾.

B제품의 경우 우레탄 변성 에폭시를 수지로 한 도료로서 강도, 내구성, 접착성 등이 우수하여 내캐비테이션 도료로서 현업에서 가장 널리 적용되고 있는 제품이다. 본 연구 결과를 살펴보면 CNF 필러를 첨가한 폴리우레탄 기지의 개발품은 조건에 따라 B제품에 필적하거나 상회하는 캐비테이션 저항 성능을 나타냄을 알 수 있다. 현미경 관찰 결과를 보면, 개발품과 B제품 모두 캐비테이션 공격에 의한 핏트와 균열 형성이 물질 제거의 직접 원인이지만 B제품의 경우 덩어리 형태로 제거됨에 따라 크레이터형 손상을 남기며 무게 손실량이 많은 것으로 나타났다. 이에 비해 개발품의 경우 폴리머 사슬과 CNF 간의 강한 상호작용에 의해 도료의 강도가 증가하여^{7,11)}, 이로 인해 캐비테이션 저항 성능이 향상된 것으로 판단된다.

한편 개발제품은 첨가제 조건에 따라 캐비테이션 성능 차이가 확연히 나타남을 알 수 있다. 개발도료 조성에서 CNF를 제외한 경우(시험편 T3) 캐비테이션 시험 시간 50분 만에 도막이 파괴됨을 알 수 있다. 손상 형상으로 볼 때 캐비티 충격압에 의해 누적된 피로 파괴라기보다는 도막의 내부의 온도 증가에 따른 용융(melting)으로 보는 것이 합리적으로 판단된다¹²⁾. 이는 폴리머의 낮은 열전도율 또는 캐비테이션 붕괴에 따른 충격에너지가 열의 형태로 변환되어 일어난 현상으로 볼 수 있다. 탄소나노섬유는 강도뿐만 아니라 전기 전도도 및 열전도도가 우수하다. 따라서 CNF를 첨가하는 경우 폴리머의 열전도도 향상에 어느 정도 기여하여 캐비테이션에 의해 발생한 열이 금속 소지로 전달되어 열 방출이 이루어진 것으로 판단된다.

CNF 첨가 폴리우레탄 수지에 Silica를 첨가한 경우(T3)는 200분까지 시험이 진행되어 상용품인 A제품보다는 우수한 내캐비테이션 성능을 나타냈지만, 예상만큼 높은 성능을 보여주지는 못했다. 폴리우레탄-실리카 복합재에서 실리카 함량 증가에 따라 점도는 증가하며 실리카 입자의 응집(aggregation)을 초래하게 된다¹³⁾.

Silica는 개발도료의 점도 향상을 목적으로 도입하여 작업성 개선 등의 소기의 목적을 이룰 수 있었으나, 캐비테이션 성능은 오히려 저하되는 것으로 확인되었다. 따라서 추가적인 연구를 통해 작업성과 내캐비테이션 성능을 절충할 수 있는 실리카 함량 최적화가 요구된다.

개발제품에서 가장 우수한 캐비테이션 저항 성능을 보인 조건은 불소첨가제를 도입한 경우(T4)이며 외산 B제품의 성능을 훨씬 상회하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 폴리우레탄에 존재하는 CH₂OH기의 친수성으로 인해 수분 흡수가 용이하여 폴리우레탄 수지의 내수성을 약화시키며 나아가 내캐비테이션 성능을 약화시키는 요인이 된다¹³⁾. 따라서 폴리우레탄의 내수성 향상을 위해 소수성 구조를 도입하는 것이 바람직하며, 이는 불소 또는 실리온 첨가를 통해 가능하다. 실리온 첨가의 경우 폴리우레탄 도료와 금속 소지간의 접착력을 저하시키는 것으로 보고되고 있어¹³⁾, 상대적으로 고가인 불소를 최소량으로 사용하여 내캐비테이션 성능을 제어한 도료 개발이 중요하다. 결론적으로 개발품 T4의 경우 CNF 첨가에 의한 강도 증가와 불소첨가제 도입에 의한 소수성 향상에 따른 상승효과로 인해 우수한 캐비테이션 저항 성능을 나타낸 것으로 판단된다.

4. 결 론

내캐비테이션 도료인 상용제품 2종과 개발품 4종에 대하여 ASTM G-32 규정에 의거한 캐비테이션 침식 시험을 실시하였고 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) glass flake로 강화된 에폭시 수지 도료인 외산 A제품은 시험 도료 중 가장 열악한 내캐비테이션 성능을 나타냈다.

2) 외산 B제품은 CMDE 측정결과 비교적 우수한 성능을 나타지만 무게 손실량이 개발제품에 비해 크고 크레이터 형 손상 특성이 확인되었다.

3) 탄소나노섬유를 첨가하지 않은 조건의 개발제품은 가장 열악한 내캐비테이션 성능을 나타냈다. 따라서 탄소나노섬유 도입은 폴리우레탄계 도료의 내캐비테이션 성능 향상에 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

4) 불소첨가제를 함유한 개발제품이 가장 우수한 내캐비테이션 성능을 나타냈다. 이는 CNF 첨가에 의한 강도 향상과 불소첨가제 도입에 의한 내수성 향상에 의한 상승효과로 판단된다.

후 기

본 연구는 '17/'18년도 민군기술적용연구사업(과제

명: 캐비테이션 저항성능 도료UM17409RD4)의 지원을 받아 수행한 "선박용 도료의 캐비테이션 시험에 의한 내구성 평가 연구 용역"의 결과임.

ORCID: Jung-hyung Lee: <https://orcid.org/0000-0002-3446-0019>

ORCID: Jae-Hak Kim: <https://orcid.org/0000-0003-1520-8640>

ORCID: Yong-Pyo Kim: <https://orcid.org/0000-0003-4762-9917>

ORCID: Seong-Jong Kim: <http://orcid.org/0000-0002-6356-3818>

References

1. E. B. Flint and K. S. Suslick, The temperature of cavitation, *Sci.* 253(5026) (1991) 1397-1399. <https://doi.org/10.1126/science.253.5026.1397>
2. E. Herbert, S. Balibar and F. Caupin, Cavitation pressure in water, *Phys. Rev. E.* 74(4) (2006) 041603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.041603>
3. N. Qiu, L. Wang, S. Wu and D. S. Likhachev, Research on cavitation erosion and wear resistance performance of coatings, *Eng. Fail. Anal.* 55 (2015) 208-223. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.06.003>
4. R. Zhou, D. H. Lu, Y. H. Jiang and Q. N. Li, Mechanical properties and erosion wear resistance of polyurethane matrix composites, *Wear*, 259(1-6) (2005) 676-683. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.118>
5. R. C. R. Nunes, J. L. C. Fonseca and M. R. Pereira, Polymer-filler interactions and mechanical properties of a polyurethane elastomer, *Polym. Test.* 19(1) (2000) 93-103. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(98\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(98)00075-0)
6. H. Y. Park, S. G. Kim, S. S. Kim, I. C. Choi, B. W. Kim and S. J. Kim, Development and Performance Evaluation of Anti-cavitation Paint with a Lamella Glass-flake, *Korean Chem. Eng. Res.* 54(2) (2016) 145-151. <https://doi.org/10.9713/kcer.2016.54.2.145>
7. R. Sattar, A. Kausar and M. Siddiq, Advances in thermoplastic polyurethane composites reinforced with carbon nanotubes and carbon nanofibers: A review, *J. Plast. Film Sheeting*. 31(2) (2015) 186-224. <https://doi.org/10.1177/8756087914535126>
8. C. E. Correa, G. L. García, A. N. García, W. Bejarano, A. A. Guzmán and A. Toro, Wear mechanisms of epoxy-based composite coatings submitted to cavitation, *Wear*, 271(9-10) (2011) 2274-2279. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.088>
9. A. Karimi and J. L. Martin, Cavitation erosion of materials, *Int. Mater. Rev.* 31(1) (1986) 1-26. <https://doi.org/10.1179/imtr.1986.31.1.1>
10. J. Leng and A. K. T. Lau (Eds.), Multifunctional polymer nanocomposites, *CRC press*, (2010) 338-379.
11. S. Yang, J. T. Tijerina, V. S. Diaz, K. Hernandez and K. Lozano, Dynamic mechanical and thermal analysis of aligned vapor grown carbon nanofiber reinforced polyethylene, *Compos. Part B: Eng.* 38(2) (2007) 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.04.003>
12. T. Deplancke, O. Lame, J. Y. Cavaille, M. Fivel, M.

Riondet and J. P. Franc, Outstanding cavitation erosion resistance of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) coatings, *Wear*, 328 (2015) 301-308.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.077>

13. C. H. Yang, F. J. Liu, Y. P. Liu and W. T. Liao, Hybrids of colloidal silica and waterborne polyurethane, *J. Colloid Interface Sci.* 302(1) (2006) 123-132.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.06.001>