대형요트의 내구성 향상을 위한 도장작업의 최적화 및 캐비테이션 침식 특성

박 일 초* · 한 민 수** · 김 성 종**,*

*목포해양대학교 LINC+ 사업단

**목포해양대학교 기관시스템공학부

Optimization of Painting Process to Improve Durability of Mega Yacht and Cavitation Erosion Characteristics

Il-Cho Park*, Min-Su Han**, and Seong-Jong Kim**,†

*LINC+, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 58628, Korea

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

†Corresponding author : ksj@mmu.ac.kr

(Received April 5, 2019 ; Revised May 5, 2019 ; Accepted May 30, 2019)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the correlation between roughness and adhesion force of each painting step to improve the durability of mega yacht hull painting and to analyze cavitation erosion characteristics according to the number of finish paintings. As a result, the adhesion force of the paint with each painting step was greatly influenced by the surface roughness according to the pretreatment work. However, in some painting steps, sandpaper work that forms the surface roughness was not performed by considering the work efficiency and economic efficiency. On the other hand, the cavitation erosion test presented that cavitation erosion resistance was improved by increasing the cohesion force of the urethane coating itself as the number of coatings increased. We also discussed the cavitation erosion mechanism for the optimized urethane coating.

Key Words : Roughness, Cavitation erosion, Adhesion force, Urethane coating

1. 서 론

대형요트의 고품질 도장작업은 도장 전처리부터 시작하며, 이 전처리 작업이 도장 품질을 좌우한다고 할 수 있다. 따라서 도장작업의 관리도 전처리의 관리부터 시작되며, 이것은 도장 관리에서 가장 중요한 요소 중 하나이다. 또한 최근 도료의 빠른 진보에 따라 그 성능도 복잡해져 자연환경 하에서 도장하는 것만으로는 충분한 도료의 성능을 발휘되지 않는 경우도 있다. 따라서 도장작업은 해당 도료에 적합한 종합적인 계획과 적합한 환경 하에서 수행되지 않으면 안 된다. 더불어 도장작업이 완료된 최종 도막은 요트 운항기간 동안 그 상태

를 유지할 수 있도록 적절한 내구성 역시 필요하다. 특히, 프로펠러와 근접한 선미부나 빠른 유속변화가 발생하는 선저부의 경우, 고속 유체의 흐름과 급격한 압력 변동에 의한 캐비테이션 침식 현상이 발생할 수 있다. 이는 상대적으로 유체가 고속으로 흐르고 있는 기기 표면에서는 유체 압력이 저하하게 되고 그 압력이 포화수증기압 보다 더 낮아지면 캐비테이션 기포(cavity)가 발생하기 때문이다. 이때 생성된 기포는 붕괴 시 충격파(shock wave)와 마이크로 제트(micro-jet)를 발생시켜 선체 표면의 도막을 공격하기 때문에 대형요트 선체 표면에 캐비테이션 침식 손상이 발생하게 된다. 게다가 대형요트의 경우 빠른 선속으로 인해 캐비테이션 침식 현상과 함께 해수 속에 포함된 염소이온에 의한

부식손상이 동반되기 때문에 선체 손상은 보다 가속화될 수 있다. 따라서 대형요트 선체 도장의 내구성과 밀접하게 관련되는 각 도장작업 단계별 표면 거칠기 및 부착력의 최적화 연구가 필요하며, 최종 도막에 대한 캐비테이션 침식 특성 연구도 필요하다. 먼저, 도장작업 공정의 최적화를 위한 관련 기존 문헌을 분석해 보면, Yoon 등¹⁾은 알루미늄 판재에 대하여 다양한 샌딩 조건에 따른 표면조도와 도장 특성을 조사하기 위해 도료 종류와 작업조건에 따른 도막 두께 및 표면조도를 분석하고, 스크래치 시험을 통한 도장성과 부착력을 조사하였다. 그 결과, 알루미늄 판재에 대하여 샌드페이퍼 값이 커져 표면 거칠기가 작아질수록 임계 스크래치 하중 값도 높아져 박리가 잘 발생하지 않았으며, 샌드페이퍼를 순차적으로 사용하고 최종적으로 #400으로 마무리할 때 가장 우수한 도장성을 나타낸다고 보고하였다. 한편 Bhalamurugan과 Prabhu²⁾은 Taguchi 실험계획법과 GRA(Gray Relational Analysis)를 활용하여 도장의 두께, 표면 조도 그리고 부착력을 모두 고려한 최적의 도장작업 조건을 규명한 바 있다. 다음으로 도장의 내침식성에 관한 연구사례의 경우 Correa 등³⁾은 에폭시계 복합 도장에 대하여 캐비테이션 침식실험을 실시한 결과 도막의 기공(pores), 도막과 도막에 포함된 보강재의 경계면(matrix-reinforcement interfaces) 그리고 크랙(cracks) 결함에서 캐비테이션 기포 핵(nucleation)이 발생하는 영역으로 보고하였다. 한편 Chi 등⁴⁾은 선박에 주로 적용되고 있는 5 종류의 도료(epoxy clear coat, commercial epoxy coating, glass-flake-reinforced epoxy coating, polyurethane coating 그리고 silicone coating)에 대하여 캐비테이션 침식 저항성을 상호 비교하였다. 그 결과, urethane과 silicone coating이 유리 전이 온도가 상대적으로 낮고 온도에 대한 기계적 안정성이 우수하여 캐비테이션 침식 저항성이 우수한 것으로 결론지었다.

본 연구에서는 실질적으로 대형요트의 고내구성 도장작업 관리를 위해 각 도장작업 단계별로 샌드페이퍼 작업에 따른 표면 거칠기와 도장 부착력을 상호 비교하여 도장작업 최적화 연구를 실시하였다. 더불어 도막의 내구성을 평가하기 위해 우레탄 도장 횟수에 따른 캐비테이션 침식 실험을 실시하여 그 표면 손상 특성을 파악하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 시험편은 대형요트 선체재료인 5083-H321 알루미늄 합금을 사용하였으며, 그 화학성분 조성(wt%)은 Mg 4.48, Si 0.0005, Fe 0.358, Mn

0.542, Cr 0.0652, Cu 0.2086 그리고 나머지는 Al이다. 알루미늄 합금 모재를 포함한 각 도장 공정 사이마다 적절한 표면 조도를 형성하기 위해 단계적으로 샌드페이퍼를 이용하여 연마작업 실시 후 표면 거칠기를 측정하였다. 그리고 각 도장 공정마다 dolly test를 실시함으로써 표면 거칠기에 따른 부착력을 정량화하여 상호 비교하고자 하였다. 도장작업의 각 단계별 최적화 연구 진행방법을 Table 1에 제시하였으며, 도료는 wash primer(R70001 워시프라이머, 강남 제시스코), primer(슈퍼폭시 130(HS), 삼화페인트), 퍼티(MPR-2000, 세풍 폴리머), 서페이스(스피프라스페 5400, 삼화페인트) 그리고 우레탄(Awlcraft 2000, AWLGRIP)을 사용하여 각 도료 사양서에 따라 도장작업을 실시하였다. 표면 거칠기 측정기는 KOSAKA사의 SE-600 모델을 활용하여 JIS94 국제규정에 따라 6개소 측정 후 그 평균값과 표준편차를 산출하였다. 부착력은 ELCOMETER사의 F506-20D 모델을 활용하여 10회 측정하고 그 평균값과 표준편차를 산출하였다. 도막 두께 측정은 ELCOMETER사의 ELCOMETER A456C 모델의 도막 두께 측정기를 활용하여 도장 표면 전반에 걸쳐 10개소를 측정하여 그 평균값과 표준편차를 산출하였다. 캐비테이션 침식실험은 우레탄 도장 횟수에 따라 준비된 시험편에 대하여 천연해수 환경 하에서 modified ASTM G32 규정에 준하여 실시하였다⁵⁾. 캐비테이션 침식실험은 압전(piezo electric) 효과를 이용한 진동발생 장치를 사용하였으며, 대향형 진동법으로 실험을 실시하였다. 60 Hz, 220 V의 전력을 전자회로를 거쳐 20 kHz의 정격진동 출력을 발생시켜 진동자에 공급하는 역할을 하며, 정진폭 자동제어 방식으로 진폭은 50 μ m로 일정하게 유지하였다. 압전소자에 의한 진동발생은 원추혼(horn)에 전기적인 교류를 인가함으로써 축 방향으

Table 1 Experimental method according to painting step

Step	Process	Method
1	Sandpaper work for Al alloy	#40 → primer
		#80 → primer
		#120 → primer
		#220 → primer
2	Application of wash primer	#80 → wash primer → primer
3	Sandpaper work for primer	primer → 1st putty
		primer → #120 → 1st putty
		primer → #180 → 1st putty
		primer → #220 → 1st putty
4	Sandpaper work for putty	1st putty → 2nd putty
		1st putty → #80 → 2nd putty

로 진동을 발생시켜 캐비티(cavity)를 생성시킨다. 시험편은 진동자의 흔에 대향하도록 거치대에 고정하고 1 mm의 간격을 일정하게 유지하도록 하였다. 온도에 따른 부식 손상 영향을 최소화하기 위해 캐비테이션 실험 중 1L 용량의 천연해수의 온도를 25℃로 일정하게 유지하였다. 무게 감소량 분석은 시험편을 실험시작 전과 종료 후 초음파 세척기로 세척하여 건조기에서 24시간 동안 건조시킨 뒤 무게를 측정하여 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 도장작업 공정의 최적화

알루미늄 합금 표면에 부식이 진행될 수 있는 이물질이 부착된 상태에서 도장작업을 실시하면 부피가 큰 부식 생성물이 형성되어 부풀음, 균열, 벗겨짐 등의 도장 결함을 유발시킬 수 있다. 또한 알루미늄 합금 모재의 표면이 너무 매끈하면 도막의 부착성이 저하하기 때문에 이물질의 제거와 적절한 표면 조도 형성을 위한 목적으로 샌드페이퍼나 샌드 블라스트 처리가 일반적으로 이용되고 있다. 한편 알루미늄 합금 표면을 화학적으로 처리해 부식 생성물을 제거하고 방식효과가 있는 피막을 만들어 부착성을 좋게 하는 방법도 이용되고 있다. 본 연구에서는 Table 1에서와 같이 샌드페이퍼와 화학처리(wash primer) 순으로 2단계에 걸쳐 알루미늄 합금 표면에 대한 최적의 전처리 조건을 결정하고자 하였다. Fig. 1 (a)는 샌드페이퍼 작업에 따른 표면 거칠기를 계측하여 그 평균값과 표준편차를 상호 비교한 막대 그래프이다. 샌드페이퍼 번호가 #40, #80, #120, #220으로 증가함에 따라 평균 표면 거칠기는 2.45 μm , 1.93 μm , 1.3 μm , 1.1 μm 로 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 특히, 샌드페이퍼 #40의 경우 2.45 μm 의

가장 큰 표면 거칠기를 나타낼 뿐만 아니라 그 표준편차가 약 0.2 μm 로 가장 크게 나타나 표면이 상대적으로 불균일한 것으로 확인되었다. 이렇게 준비된 시험편에 대하여 primer 도장 후 dolly test를 실시하여 알루미늄 합금 표면 거칠기에 따른 부착력을 Fig. 1 (b)에 상호 비교하였다. 부착력은 샌드페이퍼 #220 < #40 < #120 < #80 순으로 크게 나타났으며, 그 평균값은 각각 8.5 MPa, 9.8 MPa, 10.4 MPa, 11.0 MPa로 계측되었다. Fig. 1 (a)의 표면 거칠기와 비교해볼 때 샌드페이퍼 #40을 제외하고는 표면 거칠기가 클수록 부착력 역시 증가하는 경향이 확인되었다. 따라서 샌드페이퍼 #40과 같이 일정 이상의 불균일한 표면 거칠기는 오히려 부착력이 감소하는 요인으로 작용할 수 있음을 알 수 있다. 그래서 Fig. 1 (b)의 각 막대그래프 상단에 나타낸 dolly test 후 dolly의 접촉 표면을 관찰해보면 샌드페이퍼 #40의 경우 시험편에서 탈리된 primer가 dolly에 부착되어 어두운 색으로 나타났으며, primer가 부착되지 않은 dolly 본래의 밝은 회색 부분은 다른 시험편들에 비해 그 면적이 상대적으로 크게 확인되었다. 이는 너무 큰 표면 조도(스크래치)는 primer의 완전한 침투를 방해하기 때문에 오히려 부착 면적이 감소하여 부착력을 감소시키는 결과를 초래한 것으로 여겨진다. 한편 샌드페이퍼 #80의 경우에는 비록 평균 부착력이 가장 크게 계측되었다고는 하나 그 표준편차가 약 2.16 MPa로 역시 가장 크게 나타났기 때문에 최적 조건으로 판정하기에는 무리가 있다. 그래서 알루미늄 합금 표면에 대하여 샌드페이퍼 #80의 우수한 부착력을 유지하면서 그 표준편차를 줄이기 위해 샌드페이퍼 #80 후 wash primer(WP)를 적용하고 primer 도장을 실시하였다. 그 결과, 표면 거칠기는 페이퍼 #80 작업 후 WP 적용 시 에칭효과에 의해 표면 거칠기는 2.55 μm

Fig. 1 The results of adhesion test with surface roughness of Al alloy

로 샌드페이퍼 #80($1.9\ \mu\text{m}$)에 비해 약 75% 정도로 크게 증가하였다(Fig. 1 (a)). 이 계측 값은 샌드페이퍼 #40의 표면 거칠기보다도 크기 때문에 본 실험 변수 중에서 가장 큰 표면 거칠기 값을 나타낸 동시에 그 표준편차는 상대적으로 작게 계측되어 부착력 성능에 긍정적인 효과로 작용할 것으로 판단할 수 있다. 부착력은 샌드페이퍼 #80 작업 후 WP를 적용한 경우 샌드페이퍼 #80만 실시한 시험편과 거의 유사하게 나타났으나 그 표준편차는 WP 적용 시 1/4배 정도로 감소($2.2\ \mu\text{m} \rightarrow 0.5\ \mu\text{m}$)하였기 때문에 부착력이 크게 향상되었음을 알 수 있다(Fig. 1 (b)). 결과적으로 알루미늄 합금 소재에 대한 샌드페이퍼 작업은 샌드페이퍼 #80 + WP + primer로 최적화할 수 있었다.

요트의 고품질 표면처리 단계는 알루미늄 합금 선체의 primer 작업 후 페어링 작업을 위한 퍼티작업으로 진행된다. 페어링은 단순히 결합 부위를 충전하는 목적뿐만 아니라 표면에 새로운 선과 형상을 만드는 작업을 말한다. 따라서 고내구성 표면처리를 위해서는 primer와 퍼티 사이의 부착력 역시 중요한 요소이므로 primer의 표면 거칠기에 따른 부착력 역시 연구가 진행되어야 한다. 앞서 규명된 알루미늄 합금 소재의 샌드페이퍼 작업 최적화 조건에 따라 primer 도장까지 시공된 시험편에 대하여 샌드페이퍼 #120, #180, #220 작업 후 표면 거칠기를 계측하여 그 평균값과 표준편차를 Fig. 2 (a)에 나타내었다. 표면 거칠기는 $\text{None} < \#220 < \#180 < \#120$ 순으로 크게 나타났으며, 그 평균값은 각각 $0.56\ \mu\text{m}$, $1.45\ \mu\text{m}$, $1.58\ \mu\text{m}$, $2.48\ \mu\text{m}$ 로 계측되었다. 샌드페이퍼 작업을 실시하지 않은 연마 전(None)은 샌드페이퍼 작업을 시행한 시험편 대비 작은 표면 거칠기를 나타냈다. 특히, 표면 거칠기가 가장 큰 샌드페이퍼 #120에 비하여 무려 약 5배 정도 작게 나타났

으며, 상대적으로 작은 샌드페이퍼 #180과 #220에 비해서도 약 3배 정도 작은 값을 나타냈다. 따라서 일반적으로 표면 거칠기가 클수록 부착력이 증가하기 때문에 None에 비해 샌드페이퍼 작업을 시행한 시험편들의 부착력이 훨씬 더 클 것으로 예상할 수 있다. Fig. 2 (b)는 primer 도막에 대하여 샌드페이퍼 작업을 실시하고 퍼티 1회 도장 후 dolly test로 부착력을 계측하여 상호 비교한 막대그래프이다. 앞선 표면 거칠기 분석 결과와 달리 None과 샌드페이퍼 작업한 시험편들과의 부착력 차이는 거의 없었다. 특히, 표면 거칠기가 상대적으로 크게 작았던 None의 경우 부착력이 오히려 샌드페이퍼 #180 작업보다 더 크게 계측되었다. 그리고 None을 포함한 모든 시험편의 부착력 크기는 8.3~9.9 MPa의 범위 내로 그 차이가 크게 나타나지 않았다. 따라서 primer 도막과 퍼티 사이의 부착력은 primer 도막의 표면 거칠기에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 또한 각 막대그래프 상단부에 나타난 dolly test 후 dolly의 접착 표면을 관찰한 결과, primer 도막과 퍼티 사이에서 박리되어 모든 dolly의 접착 표면이 퍼티의 밝은 회색으로 확인되었기 때문에 dolly test도 적합하게 실시되었다. 결과적으로 도장작업에 있어서 작업 효율성과 경제적인 측면을 고려했을 때 primer 도막의 샌드페이퍼 작업은 None을 최적 조건으로 결정하였다.

퍼티는 안료분을 60~70% 함유하고 있어 다공질 도료가 되기 쉽다. 다공질 도막은 물의 투과율이 높아 상도도막의 핀홀(pinhole)이 발생할 우려가 있으므로 충분히 건조시켜야 한다. 이를 고려하여 본 연구에서는 퍼티작업을 1차와 2차로 구분하여 충분한 건조시간을 확보하였다. 따라서 고내구성 표면처리를 위해 1차와 2차 퍼티 사이의 부착력 검증이 필요하다. 그 일환으로

(a) Surface roughness

(b) Adhesion test after 1st putty work

Fig. 2 The results of adhesion test with surface roughness of primer coating

1차 퍼티에 대하여 샌드페이퍼 #80 작업 여부에 따른 부착력 비교 결과, 그 평균값이 각각 9.5 ± 0.8 MPa과 9.9 ± 0.6 MPa로 표준편차까지 고려한다면 차이가 거의 없는 것으로 판단된다. 따라서 1차와 2차 퍼티작업은 표면 거칠기의 영향을 거의 받지 않는 것으로 확인되었다. 이는 1차와 2차 퍼티가 동일한 성분조성을 가지기 때문에 부착력이 거의 동일하게 나타난 것으로 여겨진다. 결국 작업 효율성과 경제적인 측면을 고려했을 때 퍼티작업 역시 샌드페이퍼 작업을 실시하지 않는 것이 최적 조건으로 선정되었다.

지금까지 규명된 최적 조건으로 알루미늄 합금 모재에서부터 퍼티작업(알루미늄 합금 모재의 샌드페이퍼 #80 → wash primer → primer → 1차 퍼티 → 2차 퍼티)까지 마친 시험편에 대하여 페어링 작업과 서페이싱 작업을 통해 최대한 평활한 표면을 조성한 후 최종적으로 상도인 우레탄 도장작업을 실시하여 Fig. 3에 나타내었다. 여기에서 서페이싱 작업은 최종적으로 작은 요철부분을 조정하여 상도 끝맺음을 돕고, 소지를

Fig. 3 Painting specimens manufactured under optimum conditions

(a) Coating thickness

평활하게 하여 상도도료의 흡수방지, 밀착성 등을 양호하게 하는 역할을 한다.

Fig. 4는 우레탄 도장 횟수에 따른 도막 두께와 부착력 테스트 결과를 나타낸 것이다. 도막 두께의 경우 우레탄 상도 도장작업 전 primer와 퍼티의 두께는 약 $453 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 우레탄 상도 도장작업 횟수가 1회, 2회, 3회로 증가함에 따라 도막의 두께가 점진적으로 증가하여 그 두께는 각각 약 $554 \mu\text{m}$, $683 \mu\text{m}$, $810 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 우레탄 도장작업 횟수가 증가할 때 마다 도막의 두께는 평균적으로 약 $119 \pm 12.8 \mu\text{m}$ 정도씩 증가하였으며, 비교적 균일한 두께 변화로 도장되었다고 판단할 수 있다. 한편 부착력은 우레탄 도장 횟수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 파악할 수 있다. 도장 횟수 1회, 2회, 3회에 따른 부착력은 각각 9.2 ± 0.2 MPa, 10.3 ± 0.7 MPa, 11.3 ± 0.6 MPa로 측정되었다. 그리고 dolly test 후 dolly의 접착 표면을 관찰해보면 dolly test에 의해 상도인 우레탄은 dolly의 접착 표면의 해당 면적만큼 모두 탈리되었으며, 1회 도장의 경우 상도 우레탄 이외에 퍼티가 primer 도막과 분리되어 dolly 접착 표면의 약 50% 정도를 차지하였다. 도장 횟수가 증가함에 따라 dolly 접착 표면을 차지하는 퍼티의 점유율은 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 이로써 상도인 우레탄 도막의 두께가 증가함에 따라 우레탄과 퍼티 사이의 결합력 보다는 우레탄 자체 결합력이 부착력에 크게 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 결과적으로 우레탄 도장 횟수가 증가함에 따라 상도 도막의 내구성이 증가하는 경향을 나타냈다.

3.2 캐비테이션 침식 특성

우레탄 상도 도장작업에 있어 장기간 고품질의 표면 상태를 유지하기 위한 참고자료로서 우레탄 도장 횟수

(b) Adhesion test

Fig. 4 The results of coating thickness and adhesion test with the number of urethane coatings

(a) Surface morphology

(b) Weight loss

Fig. 5 Surface morphologies and weight loss of urethane coating according to the number of painting after cavitation erosion test

에 따른 캐비테이션 침식 실험을 통해 그 내구성을 평가하였다. Fig. 5는 최적화된 작업절차에 따라 표면처리 후 우레탄 도장 횟수에 따라 최종 표면처리된 도막에 대하여 캐비테이션 침식실험 시간 경과에 따른 표면형상과 무게 감소량 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5 (a)에서 표면 관찰 시 전반적으로 캐비테이션 침식실험 시간이 경과함에 따라 표면 손상 면적이 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 우레탄 도막의 표면 손상은 주로 캐비테이션 침식 실험의 중심부에서 개시되고 성장하여 점차 그 주변부로 손상이 퍼져나가는 양상을 보였다. 이러한 표면 손상 경향은 캐비테이션 침식실험 특성 상 캐비테이션 기포군(cavity cluster)이 혼(horn) 표면으로부터 나팔모양 기둥의 분무형상을 가지며, 혼

의 가장자리는 유체의 흐름이 거의 없고, 혼의 중앙부 쪽으로 갈수록 유속과 캐비테이션 침식 손상이 증가하기 때문이다^{6,7)}. 따라서 캐비테이션 침식실험이 지속될수록 시험편 중앙부의 침식 손상이 증가하여 우레탄 도막과 퍼티 순으로 박리되고 primer가 표면에 노출되었다. 그러나 primer의 경우 캐비테이션 실험시간 120 sec 이후에는 침식손상이 크게 진전되지 않아 박리와 같은 육안 손상은 관찰되지 않았다. 이는 상대적으로 두꺼운 우레탄 도막과 퍼티가 손상되어 박리됨에 따라 캐비테이션 기포가 발생하는 혼팁과 시험편 사이의 거리가 점차 멀어져 캐비테이션 침식 영향이 작아졌기 때문으로 사료된다. 또한 전반적으로 우레탄 도장 횟수가 증가함에 따라 상대적으로 캐비테이션 침식 손상 면적이 감소하는 경향이 파악되었다. 이는 앞선 Fig. 4 (b)에서와 같이 우레탄 도장 횟수가 증가함에 따라 도막 부착력이 증가하기 때문에 캐비테이션 저항성 역시 커진 것으로 여겨진다. 한편 Fig. 5 (b)에서 무게 감소량 변화는 캐비테이션 침식실험 시간 90 sec 경과 시점에서 도장 횟수에 관계없이 모두 실험시간 경과에 따라 무게 감소량 증가하는 유사한 경향을 나타냈다. 실험종료 시점인 180 sec에서의 무게 감소량은 1회 > 2회 > 3회 도장 순으로 작게 계측되어 앞선 Fig. 5 (a)의 표면 손상 경향과 잘 일치하는 결과임을 알 수 있다. 결과적으로 캐비테이션 침식 손상이 우레탄 도장 횟수에 무관하게 거의 유사한 시기에 개시되어 진전되었으나 이후 지속적인 캐비테이션 침식실험 진행 시 도장 횟수가 증가함에 따라 우레탄 도막의 부착력 역시 증가하여 캐비테이션 침식 손상 속도가 상대적으로 감소하는 것으로 판단된다.

3.3 캐비테이션 침식 메커니즘

앞선 Fig. 5 (a)에서 우레탄 도장 횟수 1회 시험편의 경우 캐비테이션 침식실험 경과 시간 90 sec 이전까지는 육안으로 표면 손상이 확인되지 않다가 실험시간 90 sec 경과 시 갑작스럽게 우레탄 도막 일부가 탈리되는 표면 손상이 발생하였다. 우레탄 도장 횟수 2회와 3회도 유사한 표면 손상 경향이 확인되었다. 따라서 우레탄 도막의 캐비테이션 침식 손상 경향을 더욱 상세하게 파악하기 위해 주사전자현미경을 활용하여 캐비테이션 침식실험 경과에 따른 그 미세구조를 관찰하였다. Fig. 6은 캐비테이션 침식 손상 경향을 파악하기 위해 Fig. 5 (a)에서 도장 횟수 1회 시험편에 대하여 캐비테이션 침식실험 90 sec 경과된 시험편 표면을 분석한 것이다. 시험편 중앙부에 위치한 손상 영역을 중심으로 그 주변부(Fig. 6 (a))를 관찰한 결과 저배율 사진에

(a) Area around damaged area

(b) Inside damage area

Fig. 6 Surface observation after cavitation erosion test for 90 seconds of 1 time urethane coated specimen

서 캐비테이션 침식 공격에 의해 국부적인 피트(pit) 손상들이 발생하여 하얀 점과 같이 관찰되었으며, 고배율 사진에서는 피트 손상은 지속적인 캐비테이션 침식 공격 시 크랙 손상이 동반되어 점진적으로 성장하는 경향을 나타냈다. 이렇게 성장한 피트 손상들은 이웃한 피트들과 결합하여 도막의 표면 손상은 급격히 진전되는 것으로 여겨진다. 결국 우레탄 도막 일부가 박리되어 Fig. 5 (a)와 같이 시험편 중앙부에 손상영역이 발생하게 된다. 한편 Fig. 6 (b)에서와 같이 손상영역 내부를 관찰한 결과 노출된 퍼티가 무수히 많은 구상입자로 형성되어 있음을 알 수 있다. 그리고 저배율 사진에서와 같이 상대적으로 어두운 부분은 국부적으로 침식되어 깊이방향으로 손상이 진전되는 양상을 보였다. 그리고 고배율 사진에서와 같이 국부 손상부의 퍼티 입자들이 구상의 원형 형상을 그대로 보존하고 있다는 점을 고려해보면 캐비테이션 침식 공격 시 퍼티 입자의 자체 손상 보다는 입자와 입자 사이의 결합이 절단되면서 탈리되어 손상이 진전되는 것으로 생각할 수 있다. 또한 일단 퍼티가 노출될 정도로 우레탄 도막의 탈리손상이 발생하면 이후에는 Fig. 7 (a)에서와 같이 우레탄 도막의 크랙 손상이 더욱 빠르게 진전되어 큰 덩어리 형태의 우레탄 도막 탈리 손상이 발생하기 때문에 표면 손상 속도가 급격히 진전되는 것으로 파악되었다. 이렇게 크랙 손상에 따른 도막의 빠른 캐비테이션 침식 손상 진전은 에폭시 도막에서도 동일한 경향으로 확인된

(a) Crack damaged area of urethane

(b) primer exposed area

Fig. 7 Surface observation after cavitation erosion test for 120 seconds of 1 time urethane coated specimen

바 있다⁸⁻¹⁰⁾. 그리고 동시에 시험편 중앙부에서는 퍼티가 지속적으로 깊이방향으로 손상이 진전되어 Fig. 7 (b)와 같이 primer까지 노출되는 손상이 관찰되었다. 종합적으로 본 연구에서 개발된 표면처리의 캐비테이션 침식 손상 메카니즘은 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다.

캐비테이션 침식 공격 → 우레탄 상도 표면의 피트 손상 개시 → 서로 이웃한 피트 손상의 결합 → 피트 손상 성장 → 우레탄 도막의 국부적인 탈리 손상 → 우레탄 도막의 크랙 진전에 따른 깊이방향의 표면 손상 가속화 → 퍼티의 국부적인 침식 손상 진전에 따른 깊이방향의 표면 손상 가속화 → primer의 국부적인 노출이 진행된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대형요트의 선체 표면에 대하여 최적의 고내구성 도장작업 관리를 위해 각 도장작업 단계별로 샌드페이퍼 작업에 따른 표면 거칠기와 도장 부착력을 상호 비교함으로써 도장작업 최적화 연구를 실시하였다. 또한 최종 마감인 우레탄 상도 도장작업에 있어 장기간 양호한 도장 상태를 유지하기 위한 참고자료로서 우레탄 도장 횟수에 따른 캐비테이션 침식 실험을 통해 그 내구성을 평가하였다.

먼저, 표면 거칠기에 따른 부착력에 관한 상관관계를

분석한 결과 알루미늄 합금 모재의 경우 적절한 샌드페이퍼 작업 후 wash primer를 적용했을 때 부착력이 가장 우수하게 나타났다. 반면 primer와 퍼티 작업의 경우에는 샌드페이퍼 작업을 실시하지 않아도 충분한 부착력이 확인되었기 때문에 작업 효율성과 경제적인 측면을 고려하여 샌드페이퍼 작업 없이 도장작업을 진행하는 것이 최적 조건으로 선정되었다. 다음으로 도장 횟수에 따른 캐비테이션 침식 특성을 분석한 결과 도장 횟수에 상관없이 캐비테이션 침식 손상은 거의 유사한 시기에 개시되었으나 도장 횟수 증가에 따라 우레탄 도막 자체의 결합력이 증가하기 때문에 캐비테이션 침식 손상 속도는 상대적으로 감소하였다. 따라서 실제 대형요트의 선체 도장작업 시 도장의 유지보수 작업 시점을 고려하여 우레탄 도장 횟수를 결정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(100ft급 대형요트 설계·건조 기술개발 및 시제선 건조)

ORCID: Il-Cho Park: <http://orcid.org/0000-0002-2738-4476>

ORCID: Min-Su Han: <http://orcid.org/0000-0002-7601-7605>

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

References

1. Han-Ki Yoon, Seok-In Choi and Jong-Ho Lee, The Characteristics of Painted Coating on Aluminum Sheet by Sending Conditions, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(1) (2011), 44-48
<https://doi.org/10.5574/KSOE.2011.25.1.044>
2. R. Bhalamurugan, and S. Prabhu, Performance Characteristic Analysis of Automated Robot Spray Painting using Taguchi Method and Gray Relational Analysis, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(6) (2015), 1657-1667
<https://doi.org/10.1007/s13369-015-1628-7>
3. C. E. Correa, G. L. García, A. N. García, W. Bejarano, A. A. Guzmán, A. Toro, Wear Mechanisms of Epoxy-ased Composite Coatings Submitted to Cavitation, *Wear*, 271(9-10) (2011), 2274-2279
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.088>
4. S. K. Chi, J. H. Park, M. Y. Shon, Study on Cavitation Erosion Resistance and Surface Topologies of Various Coating Materials Used in Shipbuilding Industry, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 26 (2015), 384-389
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.12.013>
5. B. G. Paik, K. S. Kim, K. Y. Kim, J. W. Ahn, T. G. Kim, K. R. Kim, S. U. Lee, Test Method of Cavitation Erosion for Marine Coatings with Low Hardness, *Ocean Engineering*, 38(13) (2011), 1495-1502
6. D. S. Won, K. S. Jeon, Y. T. Hho, J. H. Lee, Cavitation Behavior of A5083 Alloy by Vibratory Cavitation Tester, *Journal of the Corrosion Science Society of Korea*, 23(1) (1994), 215-225
7. I. Hansson and K. A. Morch, The Dynamics of Cavity Clusters in Ultrasonic(Vibratory) Cavitation Erosion, *Journal of Applied Physics*, 51(9) (1980), 4651-4658
8. K. J. Kim, and D. S. Kim, A Study on the Cavitation Erosion of Polymeric Materials, *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, 32(1) (1994), 72-78
9. L. A. Espitia, and A. Toro, Cavitation Resistance, Micro-structure and Surface Topography of Materials Used for Hydraulic Components, *Tribology International*, 43 (2010), 2037-2045
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.05.009>
10. P. Veerabhadra Rao, Evaluation of Epoxy Resins in Flow Cavitation Erosion, *Wear*, 122 (1988), 17-95