화상 분석을 통한 선박 방오도료의 성능 평가

박 현* · 전호환* · 이인원*⁺

Image Analysis Method for the Performance Evaluation of Marine Antifouling Coatings

Hyun Park, Ho Hwan Chun and Inwon Lee

Abstract. An accurate and reliable performance evaluation technique is indispensable for the development of marine antifouling coatings. The existing standard practice is however, based on the visual observation of biofouling settlement area, which is prone to the subjective judgment of the inspector. In spite of the above mentioned importance, a systematic and objective fouling evaluation technique has not yet been introduced. In this study, a novel quantitative antifouling performance evaluation method for marine antifouling paints is devised based on the image analysis of panel immersion test results. The present image analysis method is to quantify settlement area for each fouling category by distinctive color. The fouling categories are set as unfouled, biofilm, green algae, brown algae, calcareous animal and spongy animal with specific HSL (Hue, Saturation, Lightness) color ranges. In order to assess the effectiveness of the proposed method, static immersion tests for three antifouling coatings were undertaken for two years.

Key Words: antifouling marine coating (선박 방오도료), antifouling performance (방오 성능), biofouling settlement analysis (해생물 착생 분석), image processing (화상 처리)

+ 부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터
E-mail : inwon@pusan.ac.kr

* 부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터

1. 서론

선박과 해양구조물은 항시 수많은 해양생명과 접촉하고 있다. 해생물부착 (marine biofouling)은 해수에 잠긴 인공구조물의 표면에 원치 않는 해생물이 착생, 성장하는 현상으로 해생물의 범주에는 미생물, 식물 및 동물이 있다. Almeida 등¹⁾은 표면이 해수에 침적된 후 조절막 (conditioning film), 미생물막, 유생 부착의 단계를 거쳐 2-3주가 내에 대형 부착생물이 성장할 수 있는 조건이 충족된다고 지적하였다. 해생물이 부착되면 표면의 거칠기

가 늘어나므로 선박의 마찰저항이 늘어나고 선속의 저하로 이어진다. 이를 만회하려면 연료를 더 소모해야 하는데 그만큼 온실가스 등의 배출이 늘어나게 된다. 해생물 부착에 의한 연료소모는 40%²⁾까지 증가하는 것으로 보고되고 있다. Townsin³⁾은 보다 체계적인 연구를 수행하여 해생물의 거칠기와 난류경계층의 매개변수 사이의 관계를 규명하고자 시도하였다. 이 방법은 Schultz⁴⁾에 의하여 확장되었는데, 그 결과 석회질 해생물 부착 정도가 심할 경우에 저항이 80% 까지 늘어나는 것으로 추산되었다. 따라서, 해생물부착 방지, 즉 방오 (antifouling)의 중요성은 의심의 여지가 없다.

전통적으로 방오를 위하여 선체나 해양구조물표면에 방오도료 (antifouling marine paint)를 도장하여 왔다. 방오도료는 박테리아나 해생물 유생을 사멸시키는 독성 방오제, 즉 TBT (Tri-Butyl Tin), Cu₂O 및 각종 유기방오제를 함유하여 도료 표면에서 방오제가 수중으로 방출된다.

여러 가지 방오제 중 TBT는 해수와 기수분해 반응에 의하여 도료의 외곽 층이 순차적으로 벗겨져나가는 자기마모수지 (SPC; Self-Polishing Copolymer)의 핵심적인 기전을 담당하면서 그 자체로서 우수한 성능의 방오제가

⁺ 부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터
E-mail: inwon@pusan.ac.kr

* 부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터

다. 자기마모수지로서 방오도료를 제조하면 시간의 경과에 관계 없이 표면이 매끄럽게 유지되므로 선박 저항 증가를 억제할 수 있다. 이러한 우수한 성능 때문에 TBT 기반 SPC 방오도료는 1970년대 이후 30여년 간 광범위하게 사용되어 왔다. 그러나 최근, TBT와 그 유도체는 환경 호르몬으로 작용, 복족류 및 이매패류와 같은 해양생물에 내분비계 교란을 일으켜 자웅동체화(imposex)를 일으키는 것으로 보고되었다⁵⁾. 이로 인하여 국제해사기구(IMO)에서는 2008년 이후 TBT 함유 방오도료의 사용을 전면적으로 금지하였다. 그 이후 선박방오도료는 TBT를 포함하지 않는 이른바 tin-free 방오도료가 주종을 이루고 있는데, Controlled Depletion Paint (CDP), tin-free SPC 및 foul release (FR) 도료가 그것이다. tin-free 방오도료의 가격은 TBT 방오도료의 최소 2배 이상⁶⁾인 반면 방오효능은 TBT 방오도료보다 열등한 것으로 나타나고 있다⁷⁾. Holland 등⁸⁾에 따르면 친환경성 실리콘 foul release 도료의 경우 물과의 마찰에 의하여 해생물이 씻겨져 나가는 방식에 의존하고 있으나 해생물 부착 초기에 형성되는 구조류 점액질과 같은 생물막(biofilm) 층은 고속의 유동에서도 잘 떨어져 나가지 않는 것으로 보고되고 있다. 이와 같이 친환경 방오도료의 경우 원래 계획되었던 방오능이 발휘되지 않는 경우가 종종 발생하므로 보다 정확하고 정량적이며 객관적인 방오성능 평가방법이 요망된다.

그러나, 그와 같은 평가방법은 아직도 고안된 적이 없다. 현존하는 유일한 공정 평가법인 ASTM D3623 및 D6990은 해생물의 착생 면적 및 비율을 육안으로 판단하도록 되어 있다. 따라서, 이는 관찰자의 주관에 의존한 정성적 방법이다. 특히 육안 관측법은 해조류, 담치, 따개비와 같이 명확한 형상을 가진 대형 착생생물을 판별하는데에는 큰 문제가 없으나 앞서 언급한 것과 같이 일정한 형태가 없는 점액질 막의 부착면적을 추산하는 데에는 큰 오차를 가져다 줄 수 있다.

본 연구에서는 이 같은 단점을 극복하기 위하여 화상분석에 의한 착생면적 분석 및 그에 기반한 방오도료 성능 분석법을 제안하고자 한다. 본 방법은 Cassé 등⁹⁾이 제안한 화상 기반 녹조류 부착 및 제거 연구의 기본적인 논리를 다양한 착생생물군에 적용하도록 확장한 것이다. 착생생물을 특징적인 HSL색상 범위에 따라 비착생, 생물막, 녹조류, 갈조류, 석회질(백색) 동물 및 해면상(황색) 동물의 범주로 구분하였다. 제안된 방법의 유효성을 평가하기 위하여 세 가지 타입의 방오도료의 정적 침지 시험편의 사진을 촬영, 본 화상분석기법을 적용하였다. 각 착생생물 범주의 정의를 변화하면서 침지시험편의 시간에 따른 착

생도를 분석하고 이를 사진 관측결과와 비교하였다.

2. 실험방법

2.1 방오도료의 정적 침지 시험

본 연구에서는 시중에서 구할 수 있는 세 가지 종류의 방오도료(Cu SPC, Cu-free SPC 및 foul release)가 사용되었다. 침지시험 패널은 길이 300mm, 폭 100mm인 PVC 판 양면에 각 도료를 두께 250~300mm의 두께로 도장하여 제작되었다. 제작된 침지 시험편을 부산 다대포, 부산 기장 및 말레이시아 Sandakan 해상에 설치된 raft에 설치하였다. 침지시험은 2005년 10월부터 2007년 12월 까지 대략 2년간 지속되었고 매월 1회 침지시험편의 사진을 촬영하였다.

2.2 화상처리기법

본 연구의 주제는 영상 데이터, 구체적으로는 색상 정보를 이용하여 해생물 착생 및 성장상태를 분석하는 것이다. Cassé 등¹⁰⁾은 착생 영역의 화상 분할(image segmentation)을 HSV (Hue, Saturation, Value) 색상공간을 기준으로 수행하였다. 본 연구에서는 이와 유사한 HSL (Hue, Saturation, Lightness) 색상공간에서의 화상 분할을 제안하고자 한다. 색채에 따른 화상 분할은 유사한 색채를 갖는 영역을 구분하여 나누는 것이다. 여기에서 유사한 색상 범위를 어떻게 정의하는가가 중요한데, 이는 어떤 색상공간을 사용했는가에 크게 좌우된다.

색상공간은 색상을 수치적으로 정량화하기 위한 좌표계로서, 보통 3가지 수치의 조합인 3차원 공간으로 나타낸다. 가장 기본적이고 널리 알려진 색상공간은 RGB (Red, Green, Blue) 색상공간으로 텔레비전이나 컴퓨터 모니터 시스템에서 사용된다. 이는 강도가 변화하는 적색, 녹색, 청색광을 조합하여 색상을 만들어내는 방식이다. 일상생활에서 가장 널리 쓰이는 RGB 색상공간은 하지만 같은 색채가 조명이 달라지면 RGB 값이 매우 복잡하게 변화한다는 단점이 있다. 이 방식으로는 유사한 색채 범위를 가려내기 위하여 RGB 좌표 값이 매우 복잡하게 정의되어야 하므로 색상공간 내에서 인접한 색상들이 반드시 유사한 색채라고 보기 어렵다. 따라서, 유사한 색채 범위를 지정하기 위하여 복잡한 관계식이 필요하다.

그 반면에 HSL 색상공간은 파장의 차이에 기반을 두고 있어서 주변 조도의 영향을 거의 받지 않는다. 또한 Karatzas와 Antonacopoulos¹¹⁾에 따르면, HSL 색상공간

은 인간이 색상을 인식하는 방식에 기반을 두고 있다. 즉, hue는 파장 사이의 차이, saturation은 색상의 순수한 정도를 나타낸다. 이와 같은 장점을 갖는 HSL 색상공간을 기반으로 본 연구에서는 방오도로 시험편에 부착하는 착생생물의 색상 범위를 정의하여 이후의 화상 분석에 사용한다.

본 연구에서는 AxioVision S/W (Carl Zeiss, Release 4.5)를 방오도로 침지시험편의 화상분석에 사용하였다. 첫번째 과정은 시험편 고정부 및 라벨을 포함하는 상하 여백 부위를 제외한 화상분석 영역 (200mm×100mm 내외)을 설정한다. 두번째 과정은 미리 설정된 색상 범위에 부합되는 영역을 분할하는 과정이다. Fig. 1의 예에서는 biofilm에 해당되는 영역이 분할되어 있다. 화상분할의 기준이 되는 착생생물군 별 색상범위는 다음 절에서 설명하도록 한다. Fig. 1에서 분할된 영역의 면적은 AxioVision S/W에서 자동적으로 계산된다.

Fig. 1. Segmentation

2.3 착생생물군 색상구획

앞서 언급한 대로 각 착생생물군에 대하여 고유한 색상 범위를 부여하여 이를 착생영역 분할에 사용하는 것이 본 연구의 핵심이다. 맨 처음 시도된 색상구획은 G4 scheme이라 불리는데, 착생생물군을 생물막(biofilm), 녹조류(green algae), 갈조류(brown algae) 및 석회질 동물(calcareous animal)의 4가지 범주로써 나눈 것이다. Fig. 2는 각각의 착생생물군에 해당하는 색상 범위를 막대기 형태로 표시한 것이다. 각 색상 막대기는 양단의 색상 사이를 연속적인 계조(gradation)로써 나타낸 것으로, 양단 및 몇 개의 중간점에서의 HSL 값을 수치로 나타내었다. 본 연구에서 HSL 값은 각각 0에서 255까지의 정수값을 갖는데, RGB 에서 HSL 로의 변환은 다음 공식에 의하여 수행된다.

$$H = \frac{255}{60} \times H', \quad H' = \begin{cases} 0 & \text{if } M = m \\ \text{Mod}\left(\frac{G-B}{C}, 6\right) & \text{if } M = R \\ \frac{B-R}{C} + 2 & \text{if } M = G \\ \frac{R-G}{C} + 4 & \text{if } M = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0 & \text{if } M = 0 \\ \frac{255 \times C}{1 - |2L - 1|} & \text{otherwise} \end{cases}, \quad L = \frac{1}{2}(M + m)$$

$$M = \text{Max}(R, G, B), \quad m = \text{Min}(R, G, B), \quad C = M - m$$

Table 1에 각 착생생물범주마다 색상 범위가 어떻게 도출되었는지를 정리하고 있다. 각 범주마다 사진 상으로 가장 밝은 색상과 어두운 색상을 식별한다. 예를 들어, 녹조류의 경우 가장 어두운 색상은 (R,G,B) = (34,67,2)이고 가장 밝은 색상은 (R,G,B) = (110,144,77)으로 조사되었다. 이를 HSL로 변환한 범위가 Table 1에 표시되어 있는데, 색채의 파장을 나타내는 Hue 값은 고정되어 있음을 알 수 있다. 이로부터, 각 착생군마다 일정한 색채가 고정되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 2. Overview of G4 scheme

Fig. 3에 이 방법에 의한 화상분석결과를 도시하였다. 시험편마다 원래 이미지와 분석결과를 함께 나타내었는데 육안판별과 차이를 찾을 수 있다. 예를 들어, 좌측의 Cu-SPC의 경우, 다갈색의 생물막이 전체적으로 분포해 있음이 명백한데도, 화상분석 결과에는 극히 일부만이 연두색으로 분류되어 있다. 또한 가운데의 Cu-free 시편에

서도 생물막이 회색조로 비쳐져 대부분 적색의 동물성 착생으로 잘못 구분되었다. 보통 생물막은 반투명 점액질로서 밑바탕의 방오도료 색채를 얼마간 띄게 된다. 따라서 경우에 따라 생물막의 색채는 달라지는데, 이에 획일적인 색상범위를 부여하여 구분해내는 것은 어려움을 알 수 있다.

이의 대안으로 G6 scheme을 새로이 고안하였다. 착생상태를 6가지로 세분화 비착생(unfouled), 생물막, 녹조류, 갈조류, 석회질(백색) 동물 및 해면상(황색) 동물의 범주로 구분하였다. 이 색상 구획의 가장 큰 특징은 기저부의 방오도료 색상과 유사한 부분을 비착생으로 하고 나머지 어느 착생군에도 속하지 않는 나머지 영역을 생물막으로 판별하는 것이다. 여기에 G4 scheme에서 다루지 않았던 황색의 해면상 동물군을 추가한 것으로서, 색상 범위는 Fig. 4 및 Table 2에 나타나 있다.

Fig. 3. Results of image analysis based on G4 scheme

Fig. 4. Overview of G6 scheme

3. 화상분석을 통한 착생상태의 경시변화

Fig. 6-8은 시험이 진행된 3종의 방오도료에 대한 착생면적 분석결과가 시간에 대하여 도시되어 있다. 전체적으로 사진을 육안으로 분석할 경우의 착생형태와 동일한 화상분석 결과를 얻을 수 있었으며, 각 착생군의 면적점유율 또한 일관된 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 일반적으로 알려진 착생경향 - Cu-free 방오도료가 전반적인 착생이 더 많고 silicone FR 방오도료의 경우 대체로 생물막 착생이 우세한 경향 - 이 본 화상분석 결과에서도 잘 나타나고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 선박 및 해양플랜트 표면에 부착, 생장하는 착생생물을 고유한 색채를 식별, HSL 색상공간에서의 고유한 범위를 지정함으로써 방오도료 침치시편의 착생영역을 분할할 수 있었다. 적용된 결과는 종래의 주관적 관능검사기법을 보완, 객관적이고 정량적인 기법으로 활용될 가능성이 충분한 것으로 평가된다.

후 기

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

참고문헌

- 1) Almeida, E., Diamantino, T. C. and de Sousa, O., 2007, "Marine paints: The particular case of anti-fouling paints", *Progress in Organic Coatings*, vol. 59, pp.2-20
- 2) Champ, M. A., 2000, "A review of organotin regulatory strategies, pending actions, related costs and benefits", *Science of the Total Environment*, vol. 258, no.1-2, pp.21-71
- 3) Townsin, R. L., 2003, "The ship hull fouling penalty", *Biofouling*, vol. 19 (supplement), pp.9-15
- 4) Schultz, M. P., 2007, "Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering", *Biofouling*, vol. 23, no. 5, pp. 331-341
- 5) Honda, Y., 1997, "Quantum Leap Technology after

- Ban of TBT in Japan", *Proceedings of the Emerging Nonmetallic Materials for the Marine Environment*, Honolulu, HI, USA
- 6) Chambers, L. D., Stokes, K. R., Walsh, F. C. and Wood, R. J. K., 2006, "Modern approaches to marine antifouling coatings", *Surface and Coating Technology*, vol. 201, pp.3642-3652
- 7) Schultz, M. P., 2004, "Frictional Resistance of Antifouling Coating Systems", *Journal of Fluids Engineering*, vol. 126, pp.1039-1047
- 8) Holland, R., Dugdale, T. M., Wetherbee, R., Brennan, A. B., Finlay, J. A., Callow, J. A. and Callow, M. A., 2004, "Adhesion and Motility of Fouling Diatoms on a Silicone Elastomer", *Biofouling*, vol. 20, no. 6, pp.323-329
- 9) Cassé, F., Ribeiro, E., Ekin, A., Webster, D. C., Callow, J. A. and Callow, M. E., 2007, "Laboratory screening of coating libraries for algal adhesion", *Biofouling*, vol. 23, no. 3/4, pp.267-276

Table 1. Extraction of color range for each fouling category in G4 method

Fouling Category	Control Point	Color	RGB Representation	HSL Representation
Biofilm	#1(Darkest)		(R,G,B) = (136,127,129)	(H,S,L) = (245,9,132)
	#2		(R,G,B) = (156,143,146)	(H,S,L) = (245,16,150)
	#3		(R,G,B) = (166,151,155)	(H,S,L) = (245,20,159)
	#4(Brightest)		(R,G,B) = (190,167,172)	(H,S,L) = (245,38,179)
Green Algae	#1(Darkest)		(R,G,B) = (34,67,2)	(H,S,L) = (64,240,35)
	#2		(R,G,B) = (64,96,32)	(H,S,L) = (64,128,64)
	#3		(R,G,B) = (78,110,47)	(H,S,L) = (64,102,79)
	#4(Brightest)		(R,G,B) = (110,144,77)	(H,S,L) = (64,77,111)
Brown Algae	#1(Darkest)		(R,G,B) = (41,12,13)	(H,S,L) = (254,140,27)
	#2		(R,G,B) = (71,34,35)	(H,S,L) = (254,90,53)
	#3		(R,G,B) = (86,44,45)	(H,S,L) = (254,82,65)
	#4(Brightest)		(R,G,B) = (115,63,64)	(H,S,L) = (254,74,89)
Calcareous Animal	#1(Darkest)		(R,G,B) = (149,141,101)	(H,S,L) = (35,49,125)
	#2		(R,G,B) = (157,151,121)	(H,S,L) = (35,40,139)
	#3		(R,G,B) = (161,156,134)	(H,S,L) = (35,32,148)
	#4(Brightest)		(R,G,B) = (171,168,154)	(H,S,L) = (35,23,163)

Table 2. Extraction of color range for each fouling category in G6 method

Fouling Category	Control Point	Color	RGB Representation	HSI Representation
Green Algae	#1(Darkest)		(R,G,B) = (26,50,2)	(H,S,L) = (64,235,26)
	#2		(R,G,B) = (49,82,17)	(H,S,L) = (64,167,50)
	#3		(R,G,B) = (64,96,32)	(H,S,L) = (64,128,64)
	#4		(R,G,B) = (78,110,47)	(H,S,L) = (64,102,79)
	#5		(R,G,B) = (94,126,62)	(H,S,L) = (64,87,94)
	#6(Brightest)		(R,G,B) = (110,144,77)	(H,S,L) = (64,77,111)
Brown Algae	#1(Darkest)		(R,G,B) = (41,12,13)	(H,S,L) = (254,140,27)
	#2		(R,G,B) = (56,23,24)	(H,S,L) = (254,107,40)
	#3		(R,G,B) = (71,34,35)	(H,S,L) = (254,90,53)
	#4		(R,G,B) = (86,45,46)	(H,S,L) = (254,80,66)
	#5		(R,G,B) = (101,55,56)	(H,S,L) = (254,75,78)
	#6(Brightest)		(R,G,B) = (115,76,77)	(H,S,L) = (254,52,96)
Calcareous Animal	#1(Darkest)		(R,G,B) = (128,87,74)	(H,S,L) = (10,68,101)
	#2		(R,G,B) = (136,95,82)	(H,S,L) = (10,63,109)
	#3		(R,G,B) = (144,103,90)	(H,S,L) = (10,59,117)
	#4		(R,G,B) = (152,111,98)	(H,S,L) = (10,65,125)
	#5		(R,G,B) = (160,119,106)	(H,S,L) = (10,56,133)
	#6(Brightest)		(R,G,B) = (168,130,118)	(H,S,L) = (10,57,143)
Sponge Animal	#1(Darkest)		(R,G,B) = (189,150,32)	(H,S,L) = (32,181,111)
	#2		(R,G,B) = (201,162,42)	(H,S,L) = (32,167,122)
	#3		(R,G,B) = (213,173,52)	(H,S,L) = (32,168,133)
	#4		(R,G,B) = (225,185,62)	(H,S,L) = (32,186,144)
	#5		(R,G,B) = (237,195,72)	(H,S,L) = (32,209,155)
	#6(Brightest)		(R,G,B) = (250,209,84)	(H,S,L) = (32,241,167)
Unfouled Cu-SPC	#1(Darkest)		(R,G,B) = (172,94,37)	(H,S,L) = (18,165,105)
	#2(Brightest)		(R,G,B) = (225,162,115)	(H,S,L) = (18,165,170)
Unfouled Cu-Free	#1(Darkest)		(R,G,B) = (230,133,133)	(H,S,L) = (0,168,182)
	#2(Brightest)		(R,G,B) = (246,214,214)	(H,S,L) = (0,168,230)
Unfouled Silicone FR	#1(Darkest)		(R,G,B) = (198,198,198)	(H,S,L) = (0,0,198)
	#2(Brightest)		(R,G,B) = (255,255,255)	(H,S,L) = (0,0,255)

Fig. 6. Image analysis results of fouling settlement variation for Cu SPC coating

Fig. 7. Image analysis results of fouling settlement variation for Cu-free SPC coating

Fig. 8. Image analysis results of fouling settlement variation for silicone FR coating