

## 유체기기의 표면 금속코팅 적용에 따른 구조건전성 평가

이한섭<sup>1</sup>, 임병철<sup>1</sup>, 김민태<sup>1</sup>, 이범순<sup>1</sup>, 박상흠<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 기계공학과

<sup>2</sup>공주대학교 기계자동차공학부

### A Study on the Flow Analysis for KP505 Propeller Open Water Test

Han-Seop Lee<sup>1</sup>, Byung-Chul Lim<sup>1</sup>, Min-Tae Kim<sup>1</sup>, Beom-Soon Lee<sup>1</sup>, Sang-Heup Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Kongju University

<sup>2</sup>Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

**요약** 본 연구에서는 선박 및 해양플랜트에 사용되어지는 유체기기에 관하여 공동에 의한 손상을 줄이기 위해 표면 금속코팅을 적용할 경우 구조건전성을 평가하고 효율개선을 위한 수치해석적 결과에 대해 기술하였다. 소재 경량화 및 표면 코팅을 통해 날개 두께 등이 얇아지더라도 구조 강도와 성능이 확보됨을 간접적으로 입증하기 위해 코팅 하지 않은 경우, 코팅 후 동일 두께, 코팅 후 두께 3% 경량화 그리고, 코팅 후 두께 5% 경량화 것의 4 가지 모델에 대해 코팅의 유효성을 해석적 방법으로 평가하였다. 코팅 전후 및 두께를 3% 줄여 무게를 경량화한 경우에 대해 구조해석을 수행한 결과, 응력은 7% 증가하였고 안전율은 2.7%로 나타났으며 기준 안전율인 1보다 큰 값이 도출되었다. 코팅 전후 및 두께를 5% 줄여 무게를 경량화한 경우에 대해 구조해석을 수행한 결과, 응력은 12%까지 증가하였고 안전율은 0.99%로 나타났으며 0.1% 정도 차이로 안전율이 확보되지 않음에 따라 구조건전성이 부족한 것으로 나타났다. 하지만 부족한 안전율은 좀 더 좋은 소재를 선정하거나 코팅두께를 현재보다 두껍게 한다면 충분한 안전율을 확보할 수 있다고 판단된다. 최종적으로 코팅을 함으로 인해 구조건전성이 개선되는 것을 확인하였고, 5% 경량화한 경우에도 코팅의 효과로 인해 충분히 구조건전성이 확보될 수 있음을 확인하였다.

**Abstract** The structural integrity of a surface metal coating was evaluated through numerical results to improve the efficiency and reduce the damage caused by cavitation in ships and marine plants. The goal was to ensure structural strength and performance, even if the thickness of the wing is reduced to reduce the weight of the material and surface coating. Analytical methods were used for four models: a non-coating model, one with the same thickness after coating, one with a thickness reduction of 3% after coating, and one with thickness reduction of 5% after coating. With a thickness reduction of 5% after coating, the stress was increased to 12%, and the safety factor was 0.99%, so the structural integrity was insufficient. However, a better material or a thicker coating could allow a sufficient safety factor to be secured. The structural integrity was improved by the coating, and even when the weight was reduced up to 5%, the structural integrity could be sufficiently secured due to the coating effect.

**Keywords** : Fluid Machinery, Surface Metal Coating, Cavitation, Structural Integrity, Amorphous Alloy

\*Corresponding Author : Sang-Heup Park(Kongju National Univ.)  
email: weldpark@kongju.ac.kr

Received June 10, 2019  
Accepted August 2, 2019

Revised July 8, 2019  
Published August 31, 2019

## 1. 서론

최근 국내 조선업의 재도약을 위한 선박 및 해양플랜트 부품산업 관련 업체들은 적극적인 기술 개발과 다양한 소재 분야로의 진출을 시도하고 있고, 정부에서도 관련 연구 등을 통해 많은 지원을 아끼지 않고 있다. 기존의 조선업뿐만 아니라 해양플랜트 소재 및 부품 분야의 사업을 강화함에 따라 핵심 요소 기술의 개발과 확보를 위해 연구 개발을 적극 지원하고 있다[1-2].

조선 및 해양플랜트 분야에서 해수에 따른 부식, 마모 등 많은 문제점이 발생되고 있지만 본 연구에서는 가장 널리 알려져 있으면서도 극복하기 어려운 문제인 공동(Cavitation)현상에 대해 연구하고자 한다. 공동현상은 프로펠러 및 임펠러 등 유체기에서 유체 흡입 시 압력 손실 등의 원인에 의해 액체의 압력이 낮아져 액체의 온도에 해당하는 증기압력보다 액체의 압력이 낮아지면서 액체에 증발현상이 발생되어 액중에 작은 기포가 깨지며, 소재에 침식을 일으키고 소음, 진동 등을 야기 시켜서 토출량, 양정, 효율 등의 시스템 효율을 감소시키는 단점을 가지고 있다[3].

현재까지 여러 가지 방법으로 공동에 의한 손상을 최소화하기 위한 연구가 계속되고 있다. 유체기기의 형상 및 재질에 대한 연구[4], 표면처리에 대한 연구[5] 등 여러 가지 연구들이 수행되고 있다.

국내의 공동현상에 대한 저항성 도료는 세계적으로 2개사 정도 제품이 주도하고 있고, 국내 조선소에서는 전량 수입품으로 영국 A사, 미국 B사 제품이 주로 사용되고 있다. 컨테이너선, LNG선, 크루즈 여객선 등 규모가 큰 선박을 위주로 키(Rudder) 부위에 시공되고 있고, 전체 선박의 약 40%가 LNG선, 컨테이너선, 크루즈여객선이며 대상 선박 35%가 공동현상에 대한 내구성을 가진 도료가 적용되고 있다. 전체 선박기준 약 14%에 공동 저항성 도료가 적용되고 있지만 도료의 경우 폴리머 형태로 기계적 특성이 금속에 비하여 매우 낮아서 공동현상에 대한 저항성이 크게 향상되지 않는다.

현재까지 개발된 금속 표면처리 방법의 유체기기 적용은 미비한 실정이고, 기존소재와 달리 혁신적인 소재를 활용하여 유체기기의 내구성을 크게 향상시킬 수 있는 새로운 기술개발이 필요하다[6].

본 연구에서는 유체기기에 표면 금속코팅을 적용했을 때 구조 해석을 통한 건전성을 평가하고, 기술 및 산업적 관점에서의 효율 개선을 위한 수치해석적 연구결과에 대해 기술하였다.

## 2. 표면코팅의 효율 검토

Fig. 1은 고속 화염용사 코팅의 기본 모식도를 나타내고 있다. 유체기기의 표면 개질을 위해 금속 화염용사 코팅을 실시할 경우, 구조 강도의 개선은 충분히 예상 가능하다. 더 나아가 코팅으로 인해 공동에 의한 표면 침식 등이 억제되어 효율 저하가 방지되는 효과도 기대할 수 있다[7].

이와 같이, 코팅에 의해 유체기기의 구조 강성이 향상된다면, 효율이 크게 손상되지 않는 범위 내에서 코팅 전과 코팅 후의 구조 강성이 유사한 범위 내로 모재의 두께를 얇게 하는 경량화를 실시할 수 있다. 이 경우, 코팅 전과 후의 침식 전 초기 구조 강성이 유사하더라도 공동 발생하여 침식이 시작되면, 코팅된 경우가 표면의 구조 강성이 우수하여 침식이 억제되고, 결국 침식으로 인한 효율 저하도 억제되어 유지 보수기간 연장 및 효율 유지 또는 증가 효과가 발생할 것이라 예측할 수 있다. 부수적으로는 자원절약에 따른 원가절감 효과도 기대된다.

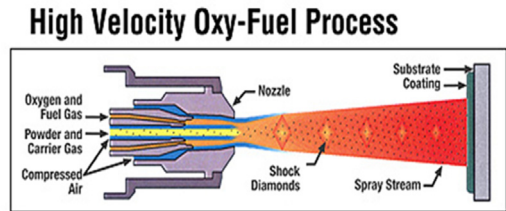


Fig. 1. Schematic of HVOF spray coating

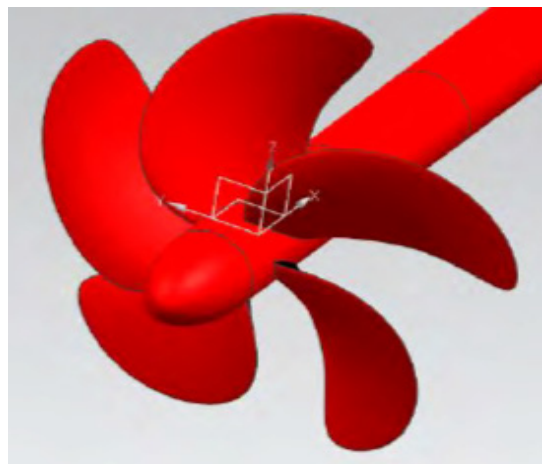


Fig. 2. Coordinate system of KP505

Table 1. Principal particulars of structural analysis for KP505 Propeller

Parameter	Principal
Scale ratio	31.6
Diameter(m)	0.25
Pitch/Diameter mean	0.95
Blade area ratio(Ae/A0)	0.8
Hub ratio	0.18
No. of Blades	5
Section	NACA66
Atmospheric pressure[Pa]	101,325
Operating pressure[Pa]	32242.81
Vapor pressure[Pa]	3540
Speed[rpm]	720
Angular velocity $\omega$ [rad/s]	75.40
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	998.2
Kinematic viscosity[ $\nu$ ]	$1.004 \times 10^{-6}$

### 3. 구조건전성 평가

프로펠러의 소재 경량화를 통해 날개 두께 등이 얇아 지더라도 표면 코팅을 통해 구조 강도와 성능이 확보됨을 간접적으로 입증하기 위해 동일한 소재에 대해 코팅 전, 코팅 후, 코팅 후 3% 경량화 그리고, 코팅 후 5% 경량화 것의 4 가지 모델에 대해 코팅의 유효성을 해석적 방법으로 평가하였다. 임의의 모델에 대해 코팅 전·후의 구조건전성 비교 및 경량화한 경우의 코팅의 영향을 해석적으로 연구하였다. 프로펠러의 모델링 및 구조해석은 상용해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하였다.

Fig. 2는 본 연구의 해석대상 프로펠러인 MOERI에서 설계한 3,600TEU급 컨테이너선용 프로펠러(KP505, 이

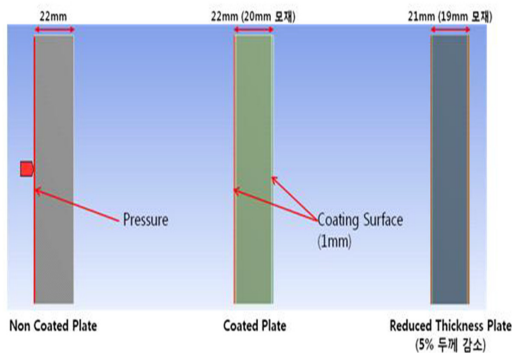


Fig. 3. Analysis conditions for reviewing coating impact and lightenableity possibility

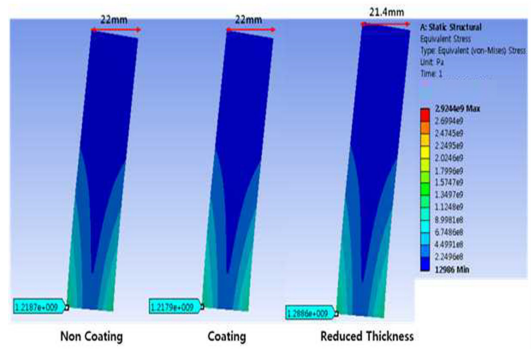


Fig. 4. Structural analysis for non coating, coating, 3% reduced thickness

하 표준 프로펠러)의 기본 좌표계를 나타내고 있으며, Table 1은 기본 제원과 해석에 적용되는 기본 경계 및 공동 조건을 나타낸 것이다[8]. 동일한 경계조건과 동일한 하중(압력)을 부여하였으며, 코팅된 경우의 인장 강도를 평가하여 유효성을 간접적으로 입증하고, 제품의 경량화 가능성을 검토하였다.

Fig. 3은 해석 대상 모델을 간략히 표현한 것으로서, 실제로 총 4가지 모델이다. 세부적으로 각각 모재 두께 22mm의 코팅되지 않은 것, 모재 두께 20mm에 양면으로 1mm씩 코팅된 것, 3% 경량화한 모재 두께 19.4mm에 양면으로 1mm씩 코팅된 것 그리고, 5% 경량화한 모재 두께 19.0mm에 양면으로 1mm씩 코팅된 것이다.

먼저 Fig. 4와 같이, 코팅 전·후 및 3% 경량화한 경우에 대해 구조해석을 수행하고 응력 변화를 분석하였다. 일반적으로 대형 선박의 프로펠러등에 많이 적용되고 있는 알루미늄 청동(ALBC3)을 고려하여 유사한 강도를 갖는 구조강(E=211Pa)으로 적용하였고 코팅재료로써Liquid metal

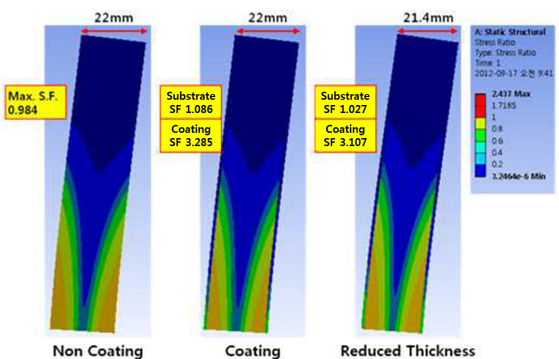


Fig. 5. Comparison of safety factors for non coating, coating, 3% reduced thickness

Table 2. Result of analysis according to condition

Condition	Substrate thickness	Coated thickness	Increased Stress	Safety factor
Non Coating	22.0 mm	2 mm	-	0.984
Coating	20.0 mm	2 mm	-	1.086
3% reduced thickness	19.4 mm	2 mm	7 %	1.027
5% reduced thickness	19.0 mm	2 mm	12 %	0.990

(Fe68.5Cr2.3Mo2.5Al2Si3.3P8.7B5.5C7.1)과 유사한 강도 값을 갖는 Fe-based amorphous alloy ( $E=211\text{Pa}$ )를 두께 변화에 의해 구조에 나타나는 응력 변화로의 영향을 검토하였다. 그 결과, 동일한 탄성계수로 인해 두께의 변화가 없을 경우, 발생하는 응력의 크기가 거의 유사하였고, 두께를 3 % 정도 줄인 경우, 응력이 7% 증가하였다.

또한, 동일한 경우에 대해 Fig. 5 와 같이 안전율을 비교하였다. 재료의 인장강도에 따른 안전율(Safety Factor, SF)을 검토한 결과, 구조강( $\sigma_u=1.2\text{GPa}$ )과 Fe-based amorphous alloy ( $\sigma_u=4\text{GPa}$ ) 코팅을 한 경우에 있어서, 코팅을 수행한 경우의 안전율이 모두 1보다 큰 값이 도출되었고, 이로부터 코팅으로 인해 구조건전성의 상승을 확인할 수 있었다. 코팅 적용 전과 후 및 3% 경량화한 경우 코팅을 하지 않은 모재의 안전율이 1보다 작은 것은 코팅의 성능을 강조하기 위해 과도한 하중을 적용하였기 때문이다.

한편, 3% 경량화한 경우에 대해서도, 코팅으로 인한 인장강도의 유지를 통해 구조건전성이 확보되는 것을 확인하였다. SF가 1보다 작으면, 파손의 위험이 있다는 의

미이다. 아울러, 정량적으로 안전율에 대해 2.7%의 여유가 있기 때문에 해당하는 비율만큼 코팅 두께를 감소하는 것이 가능함을 의미한다. 따라서, 이러한 해석을 통해 적절한 코팅 두께의 범위를 산출할 수 있었다.

Fig. 6과 같이, 코팅 전·후 및 5% 경량화한 경우에 대해서도 구조해석을 수행하고 응력 변화를 분석하였다. 모재(구조강:  $E=211\text{Pa}$ )와 코팅재(Fe-based amorphous alloy:  $E=211\text{Pa}$ )와 두께 변화에 의한 구조에 나타나는 응력 변화로의 영향을 검토한 결과, 동일한 탄성계수로 인해 두께의 변화가 없을 경우, 발생하는 응력의 크기가 동일하였고, 두께를 5% 정도 줄인 경우, 응력이 12%까지 증가하였다.

Fig. 7에서와 같이 재료의 인장강도에 따른 안전율(SF)을 검토한 결과, 구조강( $\sigma_u=1.2\text{GPa}$ )과 Fe-based amorphous alloy ( $\sigma_u=4\text{GPa}$ ) 코팅에 있어서, 상기 해석 결과와 같은 경향을 나타내었지만, 5% 경량화한 경우, 0.1% 정도의 차이로 구조 건전성이 취약한 것으로 나타났다. 이는 코팅의 성능에 문제가 있는 것보다 모재의 구조건전성 부족을 보완하기에는 현재의 코팅 두께로는 부족하다는 의미를 나타내는 것이므로, 가능한 범위

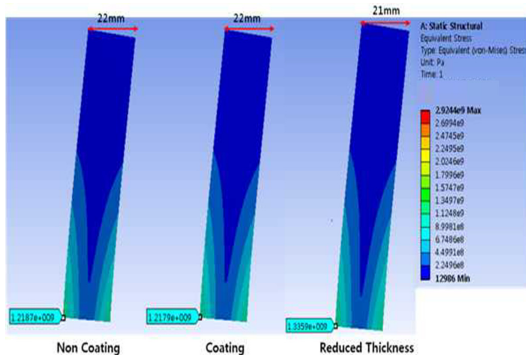


Fig. 6. Structural analysis for non coating, coating, 5% reduced thickness

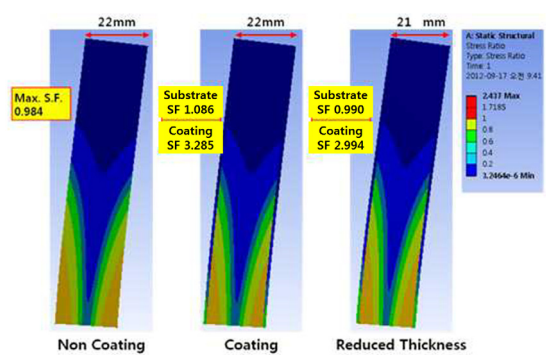


Fig. 7. Comparison of safety factors for non coating, coating, 5% reduced thickness

내에서 코팅 두께를 현재보다 두껍게 한다면, 충분한 안전율을 확보할 수 있음을 의미한다. 또한 0.1% 차이이기 때문에, 두께 변화뿐만 아니라 두께 변화 없는 코팅의 품질 개선을 통해서도 극복할 수 있는 범위로 판단된다.

#### 4. 결론

선박 및 해양플랜트에 사용되어지는 유체기기에 관하여 공동에 의한 손상을 줄이기 위해 표면 금속코팅을 적용할 경우 구조건전성을 평가하고 효율개선을 위한 수치 해석적 결과에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

해석 결과상으로 두께를 3% 경량화한 경우에 대해 코팅으로 인한 인장강도의 유지를 통해 구조건전성이 확보되는 것을 확인하였다. 안전율은 2.7%의 여유가 있기 때문에 해당하는 비올만큼 코팅 두께를 감소하는 것이 가능함을 확인 하였다. 또한, 5% 경량화 하는 경우가 안전율에 있어서 0.1% 차이로 부적합한 것으로 나타났지만, 이는 첫째는 임의로 적용한 모재 및 코팅 두께 등의 영향일 수 있고, 둘째로는 정량적으로 매우 작은 값이기 때문에 본 연구를 통해 더 좋은 소재를 선정하거나 코팅 기술을 개발하여 적용하거나, 셋째로 현재 적용한 경우보다 두꺼운 코팅을 적용하면 되기 때문에 모두 충분히 목표를 달성할 수 있을 것으로 판단한다.

결론적으로 코팅을 함으로 인해 구조건전성이 개선되는 것을 확인하였고, 경량화한 경우에도 코팅의 효과로 인해 충분히 구조건전성이 확보될 수 있음을 확인하였다. 향후 공동에 의한 침식 발생시 효율의 감소확인을 위한 CFD 유동해석을 진행할 예정이며 침식효과는 프로펠러 벽면에 거칠기를 반영하여 해석을 진행할 계획이다. 또한 전진비에 따른침식의 영향이 단독 성능에 미치는 영향을 효율 선도로 비교해볼 예정이다.

#### References

[1] N. J. Brown, "Lapping : Polishing and Shear Mode Grinding", *JSPPE*, Japan, Vol. 56, No. 05, pp. 24-29, 1990  
DOI: <https://doi.org/10.2493/jispe.56.800>

[2] H. Ohmori and T. Nakagawa, "Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic Inprocess Dressing", *Annals of the CIRP*, Vol. 39, pp. 329-332, 1990  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61065-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61065-8)

[3] Stephanis. C. G., Hatiris. J. G., Mourmouras. D. E., "The

process(mechanism) of erosion of soluble brittle materials caused by cavitation", *Ultrason Sonochem*, Jul 1997

DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(96\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(96)00040-5)

[4] Chen. H, Li. J, Chen. D, Wang. J, "Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in Water", *Wear* 265, pp. 692-698, 2008  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.12.011>

[5] Oerlikon balzers, "Catalogue", 2005

[6] J. E. Cho, S. Y. Hwang, K. Y. Kim, *Korean Journal of Metals and Materials* 42, pp. 1005-1013, 2004

[7] I. C. Park and S. J. Kim, "Cavitation Damage Characteristics of Al and Zn Arc Thermal Spray Coating Layers for Hull Structural Steel", *JKISE*, Vol. 49, No. 1, pp. 32-39, 2016  
DOI: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.1.32>

[8] I. R. Park, "RANS ANALYSES OF THE TIP VORTEX FLOW OF A MARINE PROPELLER", *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol. 21, No. 2, pp. 62-69, 2016  
DOI: <https://doi.org/10.6112/ksce.2016.21.2.062>

이 한 섭(Han-Seop Lee)

[준(학생)회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 기계설계공학전공 (공학사)
- 2013년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (석사)

<관심분야>

육성용접, 공정 최적화, 용접품질검사

임 병 철(Byung-Chul Lim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학과 (공학사)
- 2012년 8월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2019년 2월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (박사)

<관심분야>

육성용접, 레이저용접



김민태(Min-Tae Kim)

[준(학생)회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학과 (공학사)
- 2015년 2월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (석사)

<관심분야>

육성용접, 용사코팅, 표면처리

---

이범순(Beom-Soon Lee)

[정회원]



- 2019년 8월 : 공주대학교 기계공학과 (박사수료)

<관심분야>

프레스금형설계 및 제품개발, 공정자동화

---

박상흠(Sang-Heup Park)

[정회원]



- 1984년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 단국대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 홍익대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

용접시공 및 용접 자동화, 비파괴 검사