

선체 블록 도장방법 표준프로세스 구현을 위한 예측식 개발 및 검증에 관한 연구

김동균^{†*}, 이동훈*, 김호경*

STX 조선해양연구소 생산기술연구팀*

A Study on Development and Verification of Prediction Formula for
Realization of Standard Process for Hull Block Coating Method

Dong Kyun Kim^{†*}, Dong Hoon Lee* and Ho Kyeong Kim*

STX Shipbuilding & Ocean Research Institute
Production Technology Research Team*

Abstract

It is very hard to control the quality of coating work in shipbuilding process, because it is highly affected by several parameters such as space between object and nozzle tip, spray velocity, pressure, tip size, etc.. Even so a coating work in shipbuilding is done by workers' experience and skill as yet. It causes not only an excessive use of paints but also a decrease of productivity. In order to solve this problem, we developed a formula that predicts the film thickness and determined the proper coating pattern. Also we had done a series of experiments to verify the results of this study.

※Keywords: Film thickness prediction formula(도막두께예측식), Coating pattern(도장 패턴), Overlap area(중첩영역)

1. 서론

선박 건조에서 도장 공정은 협소한 공간에서 이루어지며 바람, 습도, 온도 등의 외부인자, 피도물과의 거리, 분사압력 등의 도장 조건, 숙련자의 경험이 복합적으로 작용해 이루어지는

작업이다.

이처럼 다양한 변수들은 도막품질 및 도료 사용량에 큰 영향을 미치기 때문에 사용 도료별 우수한 스프레이 패턴, 적은 도료 분진량, 설정된 펌프압력에서 안정적인 미립화를 이루면서 도장 작업을 실시해야 하며, 도장된 도막의 미관은 우수해야 한다.

따라서 본 연구는 5 축 레시프로케이터를 제작하고, 운영 소프트웨어를 개발하여 도장 품질에

접수일: 2008년 7월 9일, 승인일: 2008년 10월 14일

†교신저자: karisma@onestx.com, 055-548-3214

영향을 미치는 조건 즉, Tip Size, 피도물과의 거리, 스프레이 속도, 노즐의 분사압력, 고품분용적비 (SVR : Solid Volume Ratio) 등에 따른 도료특성을 파악하기 위해 도장실험을 수행하였다.

실험데이터를 이용하여 D/B 화를 실현하기 위해 점도예측식 및 도막두께예측식을 개발하고 검증하였다.

2. 점도조건 실험

2.1 점도 측정 및 예측식 개발

실제 도장 작업에 사용하는 도료의 점도 즉, 무화가 잘 일어날 수 있는 최적의 점도 조건을 알기 위해 도료별 점도를 측정하였다. Fig. 1 은 점도를 측정하기 위한 시스템을 보여주고 있다. 이 시스템은 점도 측정을 위한 점도계, 온도변화를 위한 항온수조, 실시간으로 데이터 저장을 위한 프로그램으로 구성된다.

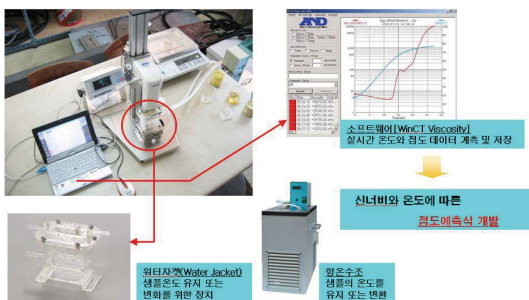


Fig. 1 A system of viscosity measurement system

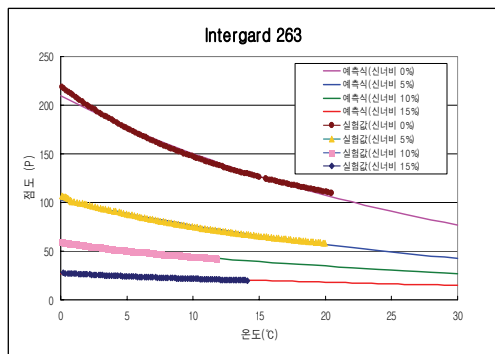


Fig. 2 A chart of regression analysis for viscosity

측정은 도료마다 추천하는 신너비를 참고로 신너비를 0~15%까지, 온도를 0~30℃까지 변화시키며 실시간으로 각 도료마다 점도값을 측정, 저장하였다. Fig. 2 는 대표적인 에폭시계 방오도료 (A/F)의 실제 측정, 저장된 데이터를 차트화한 그래프이고, 회귀분석을 거쳐 점도예측식(1)을 수립하였다.

$$\text{점도} = (-0.0601r^3 + 2.1253r^2 - 30.536r + 209.76) \times e^{-(0.000002r^3 + 0.00005r^2 + 0.0006r - 0.0334)t} \quad (1)$$

Notes ;

r : 신너비(%),
t : 온도(℃)

※ 점도 단위(1Poise=100cP=0.1kg/m·s)

그리고, 그래프에서 보듯이 실제 데이터 값과 점도예측식 데이터 값이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한, 각 사 도료 중 현장에 많이 사용되는 도료를 중심으로 점도예측식을 수립하였다.

현장에 사용되는 최적의 점도를 이 식을 역이용함으로써 온도에 따른 신너비를 알 수 있었다. 이는 도막두께예측식을 세우는 데 기초 자료로 활용된다.

3. 도장조건 실험

3.1 레시프로케이터 제작 및 제어

도장 시 규정 도막두께를 확보할 수 있도록 최적의 도장 조건 데이터를 얻기 위한 도장 조건별 실험장치, 즉, 5 축 레시프로케이터를 제작하였다.

실험장비인 Fig. 3 은 레시프로케이터로 위치 이동을 위한 x, y, z-axis 의 3 축과 Fig. 4 에서 보듯 도장건의 자세 변화를 위한 yawing 의 t-axis, pitching 의 θ -axis 의 2 축, 총 5 축으로 구성되어 있다. 그리고 각 축 제어 구성품이 탑재된 제어박스과 테스트를 위한 지지대가 설치되고, 도료 분진을 제거할 수 있는 건조부스로 구성된다.

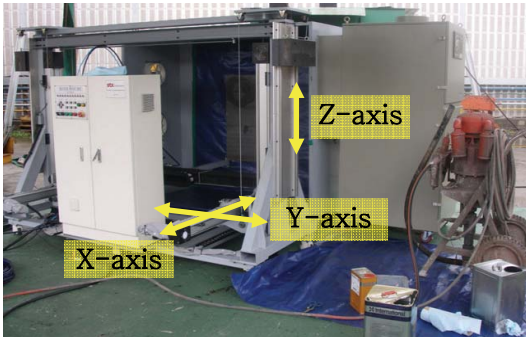


Fig. 3 5-Axis reciprocator

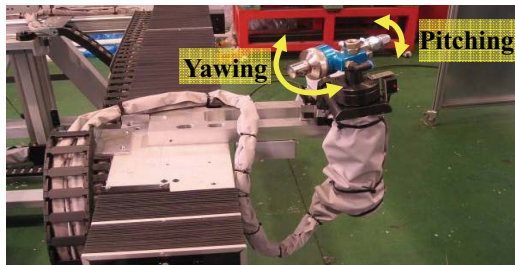
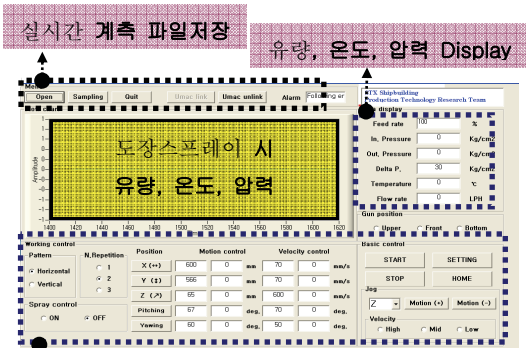


Fig. 4 Paint-module with installed paint gun



5축 모션 제어 및 Display

Fig. 5 Equipment operation & Control GUI

Fig. 5 는 장비의 제어 및 운영할 수 있는 GUI (graphical user inter-face)로 실시간 모션 및 각종 계측 데이터를 실시간 모니터링함으로써 사용자에게 편의성을 제공하고, 구동 동작 이상이나 입력된 값과 다른 값이 계측되는 등의 문제 발생 시 쉽게 대처할 수 있도록 하였다.

3.2 도장조건 TEST

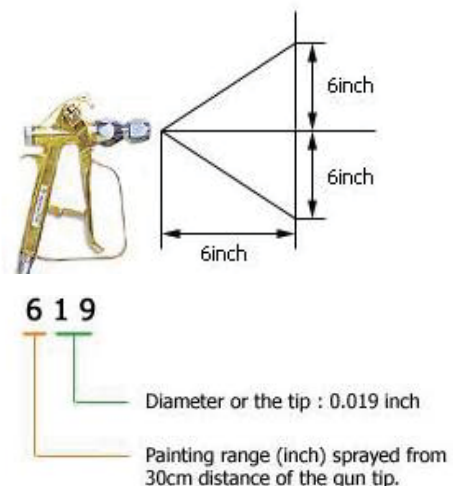
Table 1 은 실험에 사용된 인자로, 범위는 사전에 현장 작업자와의 미팅을 통해 얻은 정보를 바탕으로 최대한 에어리스 도장 시 무화조건을 염두하여 선정하였다. 기 수행한 점도예측을 위한 실험 데이터를 바탕으로 최적의 실험 인자를 선정하기 위해 수 많은 사전테스트를 수행하였다. 실험 인자 중 특이할 점은 도료별 도막두께의 경향을 알아보기 위해 SVR 을 실험인자로 채택하였다는 것이다. 이는 도료종류와 무관하게 최종 예측식만으로도 다양한 도료에 대해서 최상의 도장조건을 제시할 수 있다는 장점이 있다.

본 실험에 사용된 시편은 1000 x 800 x 4(mm)의 크기로 전처리를 통해 조도가 확보된 철판을 사용하였고, 호스 내경은 1/4inch, 호스길이는

Table 1 A factor of an experiment

항목	범위
Tip Size	523, 527, 531
피도물과의 거리(mm)	350~550
스프레이 속도(mm/s)	500~700
압력(bar)	4~6
SVR[Solid Volume Ratio](%)	57~68
도료 제작회사	CHUGOKU, IPK

Explanation of Tip Number



50m 로 고정시켰다. 그리고, 현장에서 광범위하게 사용되고 있는 IPK(사), CHUGOKU(사) 의 에폭시계 방청도료(A/C), 에폭시계 방오도료(A/F) 도료를 선택하여 실험을 수행하였다.

3.3 도장방법 및 계측

도장실험은 설정한 인자를 바탕으로 기 제작된 5축 레시프로케이터를 이용하여 다양한 도장조건에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 6 은 건조부스의 시편지지대에 시편을 올려놓고 설정된 도장조건에 따라 1회 왕복 도장하는 모습을 보여주고 있다.

Fig. 7 처럼 도장된 시편은 현장에서 많이 사용되고 있는 도막계측기 elcometer A456 으로 계측을 실시하였다. 계측 데이터의 신뢰도를 높이기 위해 스프레이 유효영역을 대상으로 Fig. 7 에 표시된 것처럼 길이방향은 센터를 기준으로 100mm 간격에, 도장 폭 방향으로 30mm 마다 도막두께를 2회 계측하였다.

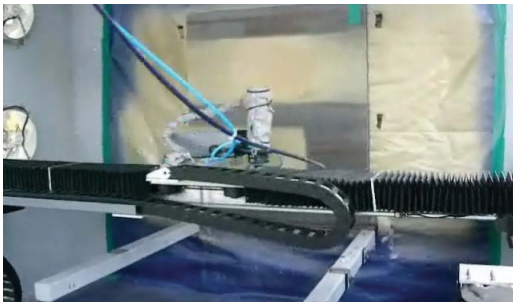


Fig. 6 A experimental scene for coating condition

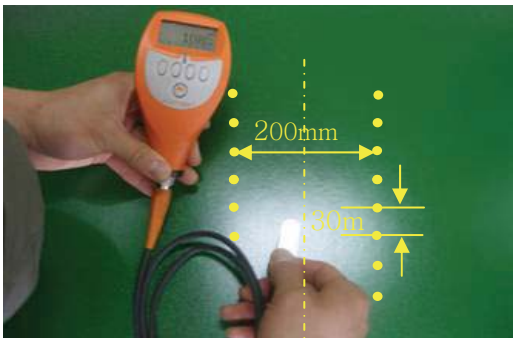


Fig. 7 A measurement of coating thickness

3.4 실험 결과

Fig. 8 은 대표적인 에폭시계 방오도료(A/F)가 도장된 후 도장상태 및 도막두께 값을 보여주고 있다. 피도물과의 거리가 가깝거나 tip size 가 큰 경우에 때때로 sagging 이나 orange peel 현상이 발생되었지만, 사전 테스트를 거쳐 정해진 실험인자기 때문에 대체적으로 도장이 도포된 판의 미관상태는 우수하였다. 도장조건에 따른 도막두께의 차이는 있으나, 대체적으로 150~300 μm 사이가 주를 이루었다.

3.5 도막두께예측식 개발

실험조건들을 변화시켜가며 도장테스트를 수행하여 얻은 실제 도막두께데이터 결과물을 바탕으로 도막두께에 가장 큰 영향을 미치는 중요인자는 tip size, 피도물과의 거리, 스프레이 속도, 도장압력, 고형분 용적비(SVR)순으로 나타나는 것을 확인했다.

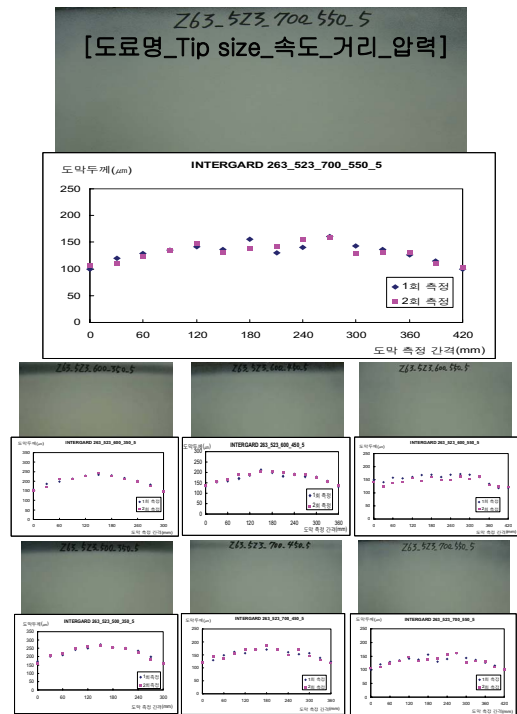


Fig. 8 Film thickness and profile dependent on experiment condition

Fig. 9~12 의 그래프에서 나타나듯이 tip size 가 커질수록, 피도물과의 거리가 가까울수록, 스프레이 속도가 작을수록, 도장압력이 커질수록, 도막두께가 증가함을 알 수 있다.

그리고, Fig. 13 에서 보듯 희석 SVR 이 높아질수록 도장두께가 증가함을 알 수 있다.

또한, 희석 SVR 에 따른 영향을 고려하기 위해서 일반적인 SVR 의 개념을 적용해서는 도료종류에 따른 영향을 고려할 수가 없다. 그래서 Fig. 14 는 각 사 도료(Table 2 참조)마다 실험한 데이터, 즉 희석 SVR 에 대한 도막두께 데이터를 예측식에 반영하기 위해 기준값으로 나누어 비교하였고, 선형적으로 변함을 보여주고 있다.

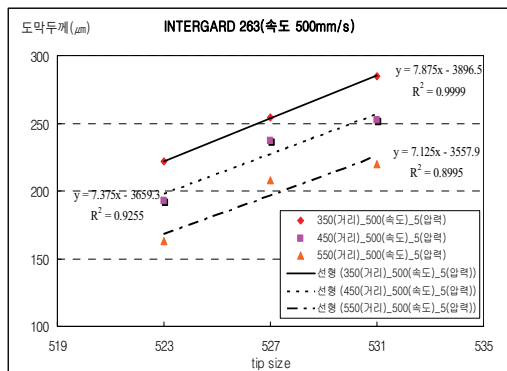


Fig. 9 The effect for tip size and distance of object(coating velocity : 500mm/s)

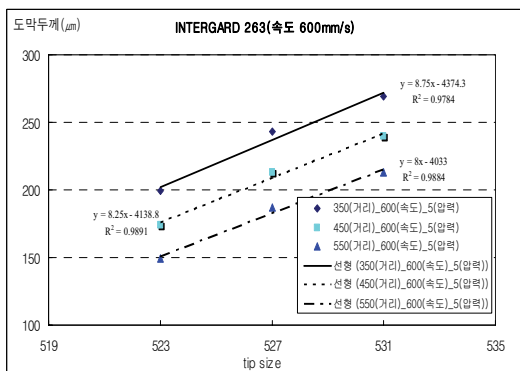


Fig. 10 The effect for tip size and distance of object(coating velocity : 600mm/s)

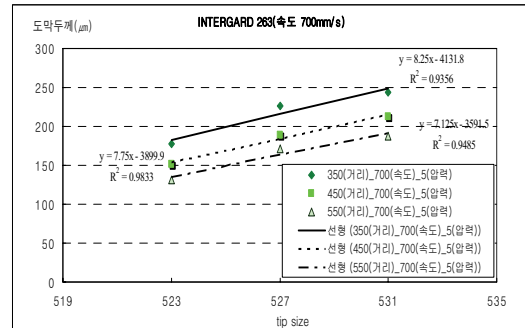


Fig. 11 The effect for tip size and distance of object(coating velocity : 700mm/s)

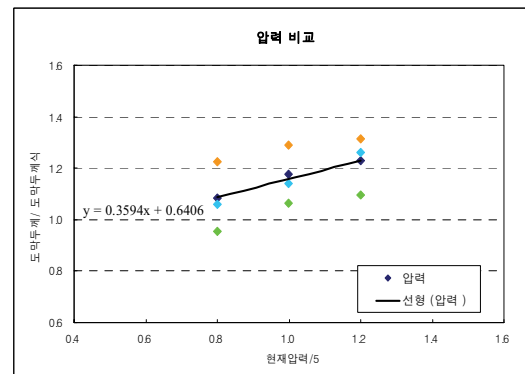


Fig. 12 The effect for coating pressure(pump)

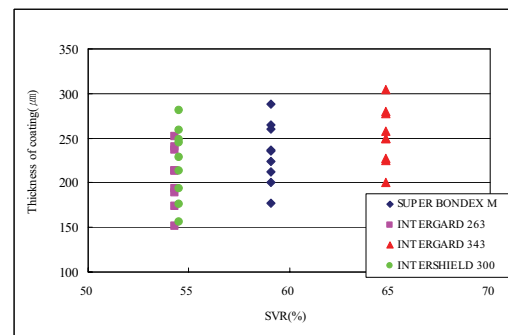


Fig. 13 A film thickness by dilution SVR

따라서 본 연구에서는 신너 희석비에 따라 SVR 의 비율이 달라진다는 점을 착안하여 현 도장작업에서 희석비율을 고려한 희석 SVR 의 개념을 도입하였다.

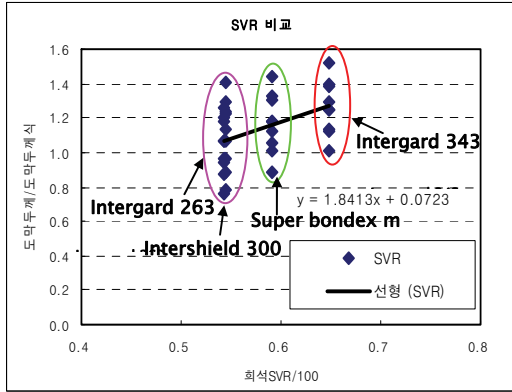


Fig. 14 The effect for dilution SVR

Table 2 A feature of used paints at the experiment

도료명(특징)	SVR (%)	점도(cP) 25℃기준
IPK(사)-Intergard263 (에폭시계 A/F)	57±2	91
IPK(사)-Intergard343 (에폭시계 A/C)	57±2	39
IPK(사)-Intershield300 (에폭시계 A/C)	57±2	27
CHUGOKU(사)-Super bondex M (에폭시계 A/C)	57±2	29

$$SVR (\%) = \frac{\text{도료 고형분 부피}}{\text{도료의 부피(주제+경화제)}} \quad (1)$$

식 (1)은 SVR 의 일반적인 개념이다. 여기서 도료의 부피는 주제와 경화제를 합한 양이다. 하지만, 실질적으로 조선소에서 사용되는 도료는 고정도의 도료를 사용하다 보니 우수한 도장상태를 확보하기 위해서 도장종류별로 실제온도에 따라 신너량을 달리 사용하고 있다. 이는 초기 SVR 의 비율이 신너량에 따라 달라진다는 것을 의미한다. 따라서 식 (2)와 같이 희석 SVR 의 개념을 도입하였다. 이는 최종 개발된 도막두께예측식에 도료의 공통인자인 희석 SVR 인자를 포함시킴으로써 도

료 종류와 무관하게 예측식을 사용할 수 있는 장점이 있다.

$$\text{희석SVR} = \frac{\text{도료 고형분 부피}}{\text{도료의 부피(주제+경화제)} + \text{신너량}} \quad (2)$$

실험 결과를 바탕으로 tip size 와 피도물과의 거리에 따른 도막두께의 영향, 도장압력에 따른 영향, 스프레이 속도에 따른 영향, 희석 SVR 비에 따른 영향을 조사하여 회귀 분석한 자료를 바탕으로 최종 도장두께예측식을 개발하였다. 식 (3)은 다양한 도장조건을 인자로 하는 최종 개발된 예측식을 나타내고 있다.

$$Pt = \{1.8413*(S/100)+0.0723\} * \{0.3594*(P/5) + 0.6406\} * \{(-0.000009*V+0.001)*D*N\} + \{(0.0055*V+6.5197)*N\} + \{(0.005*V-0.9918)*D\} + \{-3.1185*V-2964.4\} \quad (3)$$

Notes :

- Pt : 도막두께(μm),
- S : 희석 SVR(%),
- P : 도장압력(bar),
- V : 속도(mm/s),
- D : 피도물과의 거리(mm),
- N : Tip size

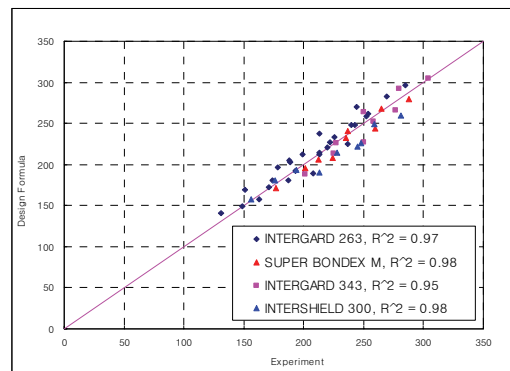


Fig. 15 The comparison of experimental data and film thickness prediction formula

Fig. 15 는 예측식과 실험값과의 상관관계를 보여주는 그래프로 실험 데이터와 예측식이 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 도장패턴과 중첩영역 설정 및 계측

4.1 도막패턴 및 중첩영역 설정

균일한 도막두께를 얻기 위해서 도장의 패턴과 중첩영역의 설정이 중요하다. 2 회 도장 시 규정 도막두께를 만족할 수 있는 패턴은 크게 수평과 수직으로 나눌 수 있다. 도장 조건에 따라 도장되는 영역이 다르기 때문에 기 실험한 데이터를 기반으로 도장 패턴과 중첩영역을 Fig. 16 과 같이 수직과 수평에 대해 도장 패턴을 설정하였다.

4.2 도막 계측 및 결과

계측은 기 실험과 동일한 방법으로 Fig. 17 과 같이 스프레이 유효영역을 대상으로 길이방향은 센터를 중심으로 100mm 간격을 기준으로, 도장 폭 방향으로는 40mm 단위로 전체 2 회를 계측하였다.

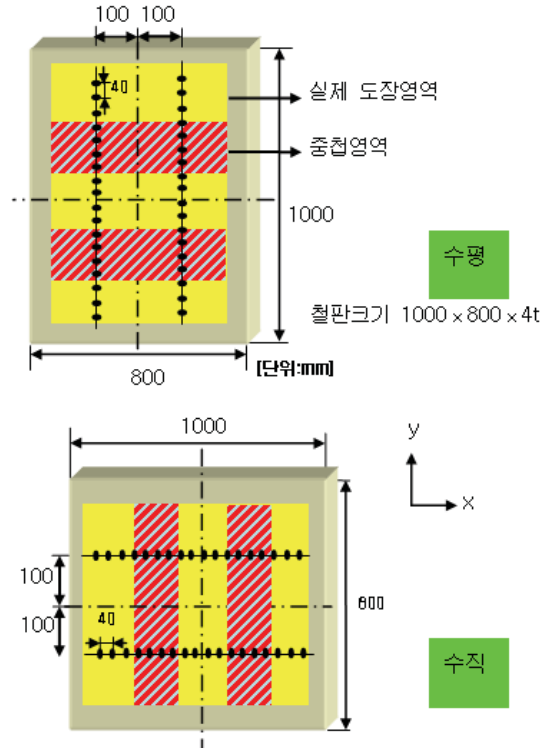


Fig. 17 A measurement of film thickness

	도장패턴	특징	중첩영역
1		1회도장	40%, 50%
2		2회도장	20%, 30%
3		사선도장	40%, 50%
4		1회도장	40%, 50%
5		2회도장	20%, 30%
6		사선도장	40%, 50%

Fig. 16 Set up the coating pattern overlap area

Fig. 18 에서 1 회 도장에서 50% 중첩일 때 균일한 도막을 얻은 반면, 40% 중첩일 때는 중첩이 되지 않는 영역이 발생했으며, 사선 도장에서는 중첩영역에 상관없이 도막이 1~3 회까지 중첩되는 영역이 일정하지 않게 분포함으로써 좋지 못한 결과를 얻었다. 2 회 도장의 경우는 일부 중첩 구간에서 두꺼운 도막이 계측되었지만 중첩영역의 비율을 줄인다면 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 수직과 수평의 경우 동일한 결과값을 나타내었다.

5. 도막두께예측식의 검증

도장 조건 실험(3 절)에 사용된 도료가 아닌 새로운 도료를 사용하여 도막두께예측식의 값과 실제 측정된 도막두께 값이 일치하는지를 비교함으로써 예측식을 검증하였다.

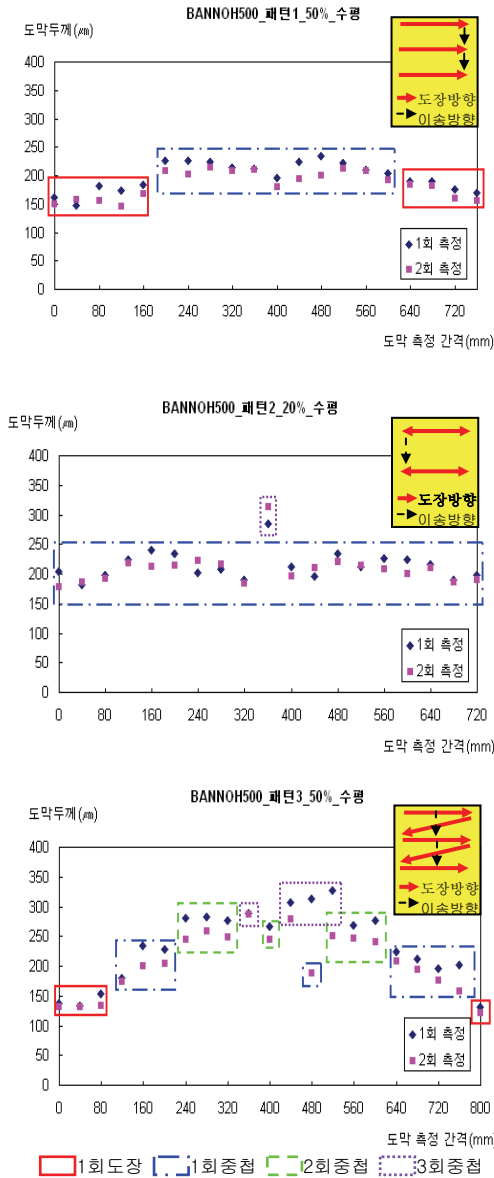


Fig. 18 A experimental result

Table 3 와 같이 패턴별, 중첩영역별 실험 인자의 조건에 따라 개발된 도막두께예측식에 대입한 값과 실험을 통해 계측된 결과를 비교해 보았을 때 약간의 차이는 있지만 비슷한 결과값을 보임을 알았다.

Table 3 An experimental condition table and a comparing result table

실험 조건 (도료명:BANNOH 500)	
S : 희석 SVR	54.5 (%)
P : 압력	5 (bar)
V : 속도	600 (mm/s)
D : 피도물과의 거리	500 (mm)
T : Tip Size	527

결과 비교 (검증)	
도막두께예측식 이용	198 μm
도장 실험 결과	204 μm

6. 결론

현장 도장 작업에 맞는 최적 점도 조건을 알고 점도예측식을 통해 역으로 신너비를 제공함으로써 작업자에게 정보를 제공한다. 피도물과의 거리, 스프레이 속도, 노즐의 분사압력, SVR 등의 도장조건에 따른 도료특성을 5 축 레시프로케이터로 실험하였고, 실험 데이터를 기반으로 도막두께예측식을 개발, 검증하였다. 개발된 예측식은 선체 블록의 내·외부 도장방법 표준프로세스를 수립하고, 균일한 도막두께를 얻기 위한 정보를 작업자에게 제공함으로써 도장품질 향상이 기대된다.

- 1) 도장 작업 시 최적 조건의 점도를 작업자에게 점도예측식을 통해 신너비를 제공하였다.
- 2) 다양한 도장 조건을 테스트할 수 있는 5 축 레시프로케이터를 제작하였다.
- 3) 규정 도막두께를 만족하는 최상의 도장프로파일 상태를 나타낼 수 있는 기준 도장 조건을 제시하였다. 그 조건으로, 도장속도 500~600mm/s, 피도물과의 거리 500~550mm, tip size 는 527, 도장압력은 5~6bar 임을 알 수 있었다.
- 4) 1 회 도장 패턴에 중첩영역 50%와 2 회 도장

패턴에 중첩영역이 5~10%일 때 균일한 도막두께가 나타남을 알 수 있었다.

5) 개발된 도막두께예측식 및 도장 조건들은 도장 실무 가이드로써 활용되어 생산성 증가가 예상된다.

6) 실험을 통해 확보한 자료들은 도장 자동화 장비 개발에 중요한 데이터로 활용이 예상된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점개발사업인 “선체블록 내부도장 및 전처리 시스템 개발”의 일환으로 수행되고 있으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- Back, J.J., Chung, M.K., Shin, C.S. and Back, K.K., 2003, “ A Study on Pressure Drop and Flow Rare of High Viscosity Paint,” The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 786-791.
- Hwang, S.S., Kim, J.C., Ha, O.N. and Chun, U.H., 1997, “ Experimental Study for the Optimum Conditions of Painting Using Phase Doppler Particle Analyzer,” The Korean Society Of Automotive Engineers, Vol. 5 No. 4, pp. 1-20.

- Jang, S.I., 1989, Paint Administrative Work Guide, Chapter 2, Sehwa, Seoul.
- Ji, S.I., 2007, “ Coating Optimum Condition and Method Research of Antifouling agents for Ship Considering Field Condition” , The Corrosion Science Society of Korea, 2007 Fall Meeting Abstracts and Symposium on Protective Coating, pp. 110-122.
- Jeon, Y.C., Jeon, Y.S., Han, M.S. and Han, J.M., 1997, “ A Study on Properties of Painting Materials for Ballast Tank of Ship,” Proceedings of the KWS Conference, Vol. 1, pp. 39-40.
- Ministry of Commerce, 2005, Industry and Energy, A Report about Technical Development of inside Coating at the Hull and pre-treatment Automation System.
- Park, J.S., 2003, Paint Theory and Practice, Chapter 7, Iljinsa, Seoul.



< 김 동 균 > < 이 동 훈 > < 김 호 경 >