Shop Primer의 다중 노즐 분사 스프레이 패턴 인자와 도막두께의 상관관계에 관한 연구

윤원준^{1,†} · 최민규¹ · 노영식²

현대중공업 산업기술연구소¹

울산대학교 전기전자정보시스템공학부²

A Study on Correlation of Dry Film Thickness with Multi-Nozzle Spray Pattern of Shop Primer

Won-Jun Yun^{1,†} · Min-Kyu Choi¹ · Young-Shic Ro²

Hyundai Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.¹

Electrical Engineering, University of Ulsan²

Abstract

Multi-nozzle spray painting procedure of the inorganic zinc shop primer was established in order to obtain uniform film thickness. The shop primer paint prevents the corrosion of steel block during shipbuilding. When the dry film thickness of shop primer is insufficient, rust will be generated on the steel block. Otherwise, thick coating of shop primer may be a problem of weld defect. So, it is important to obtain the uniform film thickness of shop primer. The uniformity of dry film thickness is affected by spray speed, distance from spray gun to target surface and overlapping span of spray path. In order to uniformly maintain coating thickness of shop primer, the coating procedure was established based on the correlation of shop primer spray variables.

Keywords : Spray pattern(도장 패턴), Dry film thickness(건도막 두께), Shop primer(숍 프라이머)

1. 서 론

조선에서 블록 건조용 강판은 쇼트 블라스팅(Shot Blasting) 장치에 의해 밀 스케일, 녹, 유분, 수분, 먼지 및 이물질 등을 제거한 후 임시 방청용 도료인 숓 프라이머(Shop primer)가 도장된다.

숍 프라이머(Shop primer)는 도장된 후 블록 제작 후 야드에 적치 중, 소지 표면의 녹 발생을 방지시켜 줌으로써 2차 블라스팅 공정의 공수 절감 효과를 볼 수 있다. 그러나 도막두께가 과도할 경우에는 도료 낭비를 발생시킬 뿐만 아니라 필렛 용접부에 기공성 용접 결함을 발생시키며 저도막일 경우에는 녹을 발생시키기도 한다. 따라서 용접 결함을 방지하기 위해 지속적으로 숓 프라이머(Shop primer)의 물성을 개선하고 있으며 현재는 용접성 및 방청성이 우수한 무기징크 프라이머(Inorganic zinc primer)가 가장 널리 사용되고 있다. 이 도료의 주성분은 실리케이트(silicate)형의 무기질 바인더에 금속분인 징크 더스트(Zinc dust)를 많이 함유하는 도료 형태로서 도막의 갈바닉 작용(Galvanic action)에 의해 소지를 부식으로부터 보호하는 시스템을 이용하고 있다. 숓 프

라이머에 의한 용접결함에 대한 연구가 보고되어 있으며 용접 결함 발생 원인으로는 고상-액상간의 가스(N_2 , H_2 Gas 등) 용해도 차이, 용융 금속내의 화학 반응에 의해 가스(CO , CH_4 가스 등), 분위기 가스의 물리적 혼입(Sealed gas), 숓 프라이머(Shop primer) 열분해 가스의 탈출(방출) 불량, 도막 두께 과다(편차) 등으로 나타난다. 따라서 도료의 물성 조성 조절을 통한 용접 결함 저감에 관한 연구는 다수 진행되었으나 Hyundai Industrial Research Institute(HIRI)(2010)에서 진행된 도막 균일화를 위한 도장 시공 기법에 대한 연구 외의 연구 실적은 미미한 실정이었다. 또한 도막두께 예측을 위해 각 인자에 따른 상호 관계에 관한 연구 진행은 산업계에서 일부 AC(Anti-Corrosive)와 AF(Anti-Fouling)에 대한 연구 결과는 있으나(Kim, et al., 2008) 점도가 낮은 숓 프라이머(Shop primer)에 대한 연구는 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 도막 두께를 결정하는 다양한 스프레이 패턴 인자들을 고려하여 상호 연관 관계를 정립하고 이를 토대로 숓 프라이머(Shop primer)의 다중 노즐 분사를 위한 스프레이 패턴 및 도막 두께의 상관관계와 도막두께를 예측할 수 있는 관계식을 도출하여 검증하였다.

2. 실험 조건

2.1 실험 장치

Fig. 1은 도장 기기부, 도장 로봇부, 실시간 데이터 모니터링 장치부 등의 실험장치 주요 구성 요소를 보여준다. 도장 기기부는 숏 프라이머(Shop primer)를 일정한 유량과 압력으로 공급하기 위해 도장기기(Airless pump)와 고형성분의 침전을 방지하고 균일한 혼합을 위한 교반기(Agitator), 펌프에 의해 가압된 유체의 압력을 원하는 압력으로 조절하여 주는 고압 레귤레이터(Air-operated high pressure regulator)로 구성되어 있다. 도장 로봇부는 균일한 속도 및 도장 간격을 조절할 수 있는 6축으로 구성된 도장 로봇(Paint robot)과 로봇 끝단부에 여러 개의 노즐을 동시에 장착하여 사용할 수 있는 노즐 장착대, 도료 분사의 On/Off를 제어할 수 있는 오토건(Auto gun), 일정한 기준면 위에 시편을 올려 놓을 수 있는 시편대로 구성하였다. 모니터링 장치부는 도료의 비중을 측정할 수 있는 비중계와 도장기기의 입력단과 도료 호스의 끝에 위치하여 토출단의 도료 압력과 유량을 실시간으로 모니터링할 수 있도록 구성된 압력, 유량 모니터링 장치부로 구성하였다.

Fig. 1 Paint robot system for zinc primer

2.2 실험 조건

숏 프라이머(Shop primer) 도료의 경우 비중과 점도가 낮기 때문에 상온(5~35℃) 조건에서 비중을 측정 하였으며, 도료가 미립화 상태로 분사되어 도료의 분사폭과 도장 두께를 측정하기 위해서 Table 1과 같이 도료 분사 특성 실험의 인자 범위를 설정하고 이에 따른 스프레이 패턴 인자들의 상관관계를 찾고자 하였다. 도막 형성용 시편은 철판으로 앵커패턴이 없고 표면 이물질을 제거한 1m×1m×1.6t 크기로 준비하였으며 도료의 분사압을 측정하기 위해 도장기 토출단과 도료호스 끝단의 도료 토출단에 압력센서를 장착하였다.

분사의 미립화 상태와 스프레이 패턴의 크기를 얻기 위해서 팁

은 그라코(Graco) 821, 921, 823, 923으로 선정하여 실험을 진행하였으며 안료, 바인더, 첨가제로 구성되어 있는 무기징크 프라이머(Inorganic zinc primer)에 신나의 양을 1.12~1.26 비중 범위에서 실험하였다.

도장기기는 45:1 에어리스 펌프와 내경 3/8inch 200m 길이 도로호스로 분사노즐을 연결하였으며 도장 기기에 따른 특성 및 호스 길이에 따른 압력 저하 실험을 하였다. 또한 자동 도장 장비의 상부에서 하부로 분사되는 전처리 도장 조건을 유지하기 위해 도장 로봇 끝단에 3개의 멀티 오토건을 설치하여 노즐에 따른 도막 분사폭 및 도막 두께에 대한 상관관계 실험을 진행하였다.

2.3 실험 방법 및 계측

전처리용 숏 프라이머(Shop primer)의 도장을 위해 Table 1과 같은 실험 조건에서 Fig. 2와 같이 아래보기 방향으로 도료 분사를 진행하였다.

Table 1 Coating variables of shop primer spray

실험 변수	실험 범위
분사압	20 ~ 150 kgf/cm ²
분사 거리	200 ~ 350 mm
분사 이동 속도	500 ~ 1200 mm/sec
팁 종류	Graco 821, 823, 921, 923
도료 호스 길이	10 ~ 200 m
호스 내경	3/8 inch
도료 비중	1.12 ~ 1.26
온도	3 ~ 35 ℃

Fig. 2 Downward spray with an automatic gun employed in the experiment

도료 분사 시 도장 속도와 시편과의 간격을 일정하게 유지하여 분사하고 실험의 재현 및 신뢰성을 높이기 위해 Fig. 3과 같이 도료 분사를 위한 패턴 및 인자 설정을 하고 도장 로봇을 제어할 수 있는 프로그램을 개발하여 사용하였다.

도장 패턴 프로그램에는 도장 패턴 설정, 시편과의 간격, 도장 속도, 도료 분사 반복 횟수 등을 입력하여 제어할 수 있도록 구성하였다.

도료 분사를 시작하는 시점의 분사 압력은 도료 호스내의 압력으로 인해 초기 압력이 높게 나와 과도막의 원인이 되는데 실험

에서는 이러한 초기 조건을 제거하기 위해 시편에 도료를 분사하기 전에 약 1초간 사전 분사를 실시하여 초기 높은 분사압을 제거한 후 아래보기 방향으로 시편에 도장을 실시하여 균일한 도막 두께가 형성되도록 설정하였다.

도장된 시편의 도장 두께를 측정하기 위해서는 Fig. 4와 같이 Elcometer 456을 이용하여 도장된 유효면적을 대상으로 분사 진행 방향으로 10cm 간격, 팁의 패턴방향으로 2cm 간격으로 시편 전면적의 도막 두께를 측정하고 측정 포인트 당 5회 반복 측정하여 평균 도막두께를 이용하였다.

Fig. 3 The Spray pattern program of paint robot

Fig. 4 A measurement of coating thickness

3. 실험 결과 및 토론

3.1 도장인자에 따른 분사폭의 변화

1) 분사압력에 따른 분사특성

도장 스프레이 인자에 따른 분사폭과 도막 두께를 측정하기 위해서는 인자 별 상관관계 분석이 필요하며 전처리용 숓 프라이머 (Shop primer)는 점도가 매우 낮고 도막 두께가 12~18 μ m의 얇은 도막으로 도장 되기 때문에 일반적으로 낮은 분사압력에서 도장을 해야 한다.

테스트 결과 도료의 분사량은 분사압력, 숓 프라이머(Shop primer)의 비중, 팁 종류에 의해 커다란 영향을 받았다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 분사량은 팁(921)과 도료의 비중 (1.19)이 일정할 때 분사압력의 제곱근에 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 The correlation of spray pressure and spray volume

2) 분사 거리에 따른 분사특성

숓 프라이머(Shop primer) 도장 시 시편과의 분사거리는 분사 패턴과 도착효율 등을 고려하여 설정해야 한다. 분사거리가 가까우면 분사압력에 의해 도막이 밀리는 결함과 도료의 분사폭이 너무 작아 도장의 중첩이 되지 않는 문제가 발생한다. 분사거리가 길어지면 도착효율을 감소시킬 뿐 아니라 분사폭이 너무 넓어져 전체의 도막 두께가 감소하게 됨으로 최적 분사거리 설정이 필요하다. 실험결과 분사폭을 결정하는 주요 인자는 팁종류, 도료 비중, 분사압력, 시편과의 도장 거리이다. 따라서 도장 기기의 압력을 고정하고 부재와의 분사 거리를 변화시키면서 실험을 진행한 결과 Fig. 6과 같이 분사거리와 분사폭의 관계는 선형적으로 비례하다가 노즐에서 약 300mm 근처에서부터 비선형적으로 비례함을 알 수 있다. 원인은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 이러한 비선형성은 분사거리가 증가함에 따라 분사되는 입자의 힘이 작아져 도료 입

Fig. 6 The correlation of spray width with spray distance (Specific gravity: 1.19)

Fig. 7 Appearance of spray pattern of shop primer

자가 날리는 현상이 발생하기 때문이다. 또한 도료의 도착효율의 경우는 도료 절감에 있어 중요한 인자로 분사거리와 분사압력이 증가하면 낮아진다. Fig. 8은 분사거리에 따른 도착효율 실험결과를 나타낸 것으로 거리가 증가함에 따라 도착효율은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이런 경향은 거리가 멀어짐에 따라 분사된 도료 입자가 가진 힘이 약해져 공기흐름에 의해 영향을 받기 때문이다.

Fig. 8 The correlation of painting transfer efficiency with spray distance(Tip: 921, Specific gravity: 1.19, Spray pressure: 80kgf/cm²)

3) 팁 노즐 형상에 따른 분사특성

팁 노즐의 형상은 타원형이고 구경이 작아 현미경으로 확대하여도 정확하게 치수를 측정하기가 어려우나 팁의 노즐 구멍 크기와 분사폭은 팁 명칭에서 알거나 실험으로 도출된 식 (1)을 이용하여 분사압력에 따른 분사량 실험으로 노즐 단면적을 구할 수 있다. Tip921의 경우를 살펴보면, 첫 번째 숫자를 2배 하면 30cm 떨어진 분사거리에서 분사되는 대략적인 분사폭을 알 수 있으며 실제 분사폭은 도료의 특성인 점도, 비중, 표면장력, 분사압 등에 따라 다소 차이가 존재한다. 마지막 두 개의 숫자 21은 0.021인치 직경의 구멍과 같은 분사량을 가짐을 의미한다. 실제 팁의 열린 구멍은 Fig. 9와 같이 생긴 타원형 모양으로 구멍의 크기는 팁을 통해 흐르는 도료의 양과 직결된다. 실제 도료의 분사량은 팁 노즐의 단면적과 분사압력에 비례함을 알 수 있다.

Fig. 9 Shape of spray tip and nozzle

일반적으로 노즐에서 분사되는 도료의 분사량은 실험을 통해 분사압력과 노즐 단면적(팁크기)에 비례함을 알 수 있으며 식 (1)과 같이 관계식을 도출하였다.

$$Sv = (Sp^{k1} \times Ts^{k2}) / (10^{k3} \times Sg^{k4}) \quad (1)$$

Sv : 분사량(ml/min), Sp : 분사압력(kgf/cm²)

Sg : 비중, Ts : 팁 사이즈(inch)

K1 ~ K4 : 상수

그러나 장시간 팁을 사용함에 따라 팁이 마모되면서 분사폭이 감소하고 분사량이 증가함을 실험을 통해 알 수 있었다. 팁의 마모는 팁을 통과하는 도료에 포함된 입자가 거칠수록, 팁을 통해 유체를 밀어내는 압력이 크면 클수록 마모는 심해진다. 또한 고형분이 많을수록 마모는 심하게 일어나게 된다. 따라서 도료의 분사량 및 분사폭은 팁의 크기 및 폭의 마모에 의해 오차가 유발되고 있음을 알 수 있으며 특히 분사량은 팁과 도료의 비중에 연관되어 변동되므로 팁의 마모 정도와 도료의 비중에 따라 달라지게 되며 도막 두께에 영향을 미치게 된다. 따라서 팁의 마모도 관리가 중요하며 정기적으로 팁 교체가 필요하다는 것을 알 수 있다.

4) 도장 인자에 따른 분사폭 변화

Fig. 10에서는 분사압력 변화에 따른 분사폭에 대한 결과를 나타내었으며, 팁, 도료의 비중, 분사거리가 일정할 때 분사압력이 증가함에 따라 분사폭이 감소하는 경향이 나타났다. 이런 경향의 이유는 슈 프라이머(Shop primer) 도료의 물리적 특성인 점도 및 표면 장력 때문이다.

Fig. 10 The correlation of spray width and spray pressure (Specific gravity: 1.19)

스 프라이머(Shop primer)는 주제와 경화제를 혼합한 후 용제를 첨가하여 사용하고 있으며 용제의 첨가량에 따라 도료의 비중이 바뀌게 되므로 분사폭도 달라지게 된다.

Fig. 11은 용제 첨가에 따른 분사폭을 도시한 것으로 용제의 첨가 함량이 증가함에 따라 비중이 감소하게 되고 따라서 분사폭이 감소하였다.

Fig. 12는 경화시간에 따른 분사폭 측정 결과를 나타낸 것으로 24시간 이상 경화시간이 증가하여도 분사폭은 거의 변화가 없었다. 슈 프라이머(Shop primer)는 수분과 반응하여 경화되는 수분 경화형 도료이기 때문에 대기와 밀폐되어 있는 상황에서는 더 이상 경화반응이 진행되지 않아 도료의 물성이 변화하지 않기 때문이다.

따라서 위의 실험결과에 따라 도료 분사 패턴의 분사폭은 팁 폭과 팁 사이즈, 비중, 분사압력, 분사 거리에 따라 결정되었으며 다음 식 (2)를 도출하였다.

Fig. 11 The correlation of spray width with solvent content (Tip: 921, Spray pressure: 68kgf/cm²)

Fig. 12 The correlation of spray width and hardening time

$$Sw = (Sg^{k1} \times Tw^{k2} \times Ts^{k3} \times D^{k4}) / (10^{k5} \times Sp^{k6}) \quad (2)$$

Sw : 분사폭(mm), Sp : 분사압력(kgf/cm²)

Sg : 비중, Tw : 팁 폭

Ts : 팁 사이즈(inch), D : 분사거리(mm)

K1 ~ K6 : 상수

3.2 도장 인자에 따른 도막두께 변화

1) 도막 두께 예측식 정립

도장기 압력실험 결과를 토대로 슝 프라이머(Shop primer)의 중앙부위의 도막두께는 도장속도, 분사거리, 분사압력, 도료의 비중, 팁 사이즈, 팁 폭 등으로 결정되며 개발된 예측식은 식 (3)과 같다.

$$T = (10^{4.48} \times Sg^{3.5} \times TS^{2.0} \times Sp^{0.43}) / (Tw^{2.12} \times D^{1.06} \times V^{0.89}) \quad (3)$$

T : 도막 두께(μm), Sg : 비중

Tw : 팁 폭, Ts : 팁 사이즈(inch)

Sp : 분사압력(kgf/cm²), D : 분사거리(mm)

V : 도장 속도(mm/sec)

특히, 식 (3)은 도료 호스의 끝단에서 측정된 분사압력을 사용했기 때문에 도장기나 도료호스의 압력저하로 인한 특성은 고려하지 않아도 된다.

2) 멀티 노즐에 따른 도막두께 영향

Fig. 13과 같이 2개 이상의 노즐을 동시에 분사 시킬 경우 시편의 도막 두께를 균일하게 하기 위해서는 식 (2)에 의해 노즐에 따른 분사량과 도막 두께의 중요 인자들을 고려하여 분사폭을 결정하고 중첩 비율을 계산해야 한다.

Fig. 13은 노즐 간격에 따른 중첩비를 나타낸 것으로 도막두께 15μm를 기준으로 도장 조건을 세팅하여 노즐의 간격을 조절하여 중첩비율을 변화시켰을 경우 중첩비가 50% 이상에서는 도막 두께 편차가 3 μm 이내의 결과를 나타냈지만 중첩비가 50% 이하에서는 도막 두께 편차가 증가함을 알 수 있었으며 Fig. 14에서와 같이 중첩비가 증가하게 되면 도막은 균일해지지만 용접결함을 유발할 수 있는 도막두께가 두껍게 도장되었으며 중첩비를 줄일 경우는 도막 두께의 편차가 심해지는 것을 알 수 있다. 따라서 중첩 비율 50%일 경우에 기준에 맞는 도막두께 유지하여 균일한 도막 두께를 얻을 수 있었으며 도막 두께 균일화를 위한 중첩 비율의 중요 인자가 노즐 간의 간격임을 알 수 있다.

Fig. 13 Painting thickness distribution according to nozzle distance

Fig. 14 The result of painting thickness according to nozzle distance

3) 분사패턴에 따른 도막 두께 영향

50%의 중첩 비율로 설정된 멀티 노즐을 이용하여 넓은 면적의 시편을 도장 할 때 도장의 분사 패턴에 따라 시편의 위치 별 도막두께는 달라질 수 있다. Fig. 15는 도장 장치의 분사 노즐 배치와 양방향 이동 분사의 도장 기법을 나타낸 것이며 Fig. 16은 도장을 했을 경우 실제 도막 두께 측정 분포도를 나타낸 것으로 도막두께가 8~26 μ m 범위로 분포하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 1 개 이상의 도장 노즐을 이용하여 50% 중첩 비율로 왕복 이동 도장을 할 경우, 시편에 형성되는 도장 횟수는 시편의 부위에 따라 중첩 횟수가 달라지므로 도막 두께가 불균일하게 형성된다. 따라서 단방향 도장 패턴으로 도장을 해야 넓은 면적에 균일한 도막 두께를 형성할 수 있다.

Fig. 15 Coating path and nozzle arrangement

Fig. 16 Distribution of coating thickness (reciprocation)

4) 도막두께 예측식 및 도막 균일화 검증

도장기기의 불규칙한 맥동에 의한 토출 압력 변화, 도로 호스 길이 에 의한 압력 저하, 도막 두께 측정 오차 및 슝 프라이머(Shop primer)의 징크(Zinc) 입자에 의한 팁의 마모 등은 도막 두께 예측에 있어 오차를 유발시킬 수 있는 인자들이다. 따라서 Table 2 와 같은 도장 조건 실험을 이용하여 테스트를 진행하였으며 식 (2)

Table 2 Coating condition of shop primer spray

항목	설정 치
분사압	45 kgf/cm ²
분사 거리	220 mm
분사 이동 속도	1000 mm/sec
팁 종류	Graco 821
노즐 수량	3EA
노즐간 간격	190mm
도로 비중	1.26
호스 내경/길이	3/8 inch(200m)

Fig. 17 Spray width with spray standoff distance between measurement value and simulation value (Specific gravity: 1.19, Spray pressure: 60kgf/cm²)

Fig. 18 Distribution of spray pattern by multi-nozzle (3ea)

Fig. 19 Application of spray machine and uniform film thickness of shop primer

의 분사폭과 식 (3)에 의한 도막두께 예측값이 측정된 도막두께 값과 일치하는지에 대해 예측식을 검증하였다. 실험 결과, Fig. 17

과 같이 도장 조건 중 분사거리를 변화시켜 분사를 할 경우 식 (2)에 의한 분사폭 예측식과 실제 측정된 분사폭의 값은 95% 이상 일치하는 결과를 보였으며 Table 2와 같은 도장 조건으로 식 (2), (3)에 의한 도막 두께 시뮬레이션 값과 실제 측정된 도막두께 값을 비교 실험한 결과 Fig. 18과 같이 90% 이상의 근사 값을 나타내었다.

따라서 검증된 도장 조건을 기준으로 3개의 멀티 노즐로 구성된 자동화 장비를 개발하여 생산에 적용함으로써 Fig. 19와 같이 넓은 면적에 균일한 도막 두께를 형성할 수 있었다.

4. 결론

숍 프라이머(Shop primer)의 도장 인자들에 따른 도막두께와의 상관 관계에 대한 연구 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

도막 두께는숍 프라이머(Shop primer)의 비중, 팁 폭, 팁 사이즈, 분사거리, 분사압력, 도장 속도 등의 도장인자에 의해 결정된다.

멀티 노즐을 사용하여 도장을 하였을 경우 도장 두께에 가장 큰 영향을 주는 인자는 도장 기법과 중첩비율을 결정하는 노즐간 간격임을 알 수 있다.

본 연구를 통해 각 도장인자 별에 따른 도막 두께의 예측식을 도출하고 유효성을 검증하였으며 정립한 분사폭 및 도막두께 예측식을 생산현장에 적용함으로써 균일한 도막 두께 확보에 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

Kim, D.K. Lee, D.H. & Kim, H.K., 2008. A Study on Development and Verification of Prediction Formula for Realization of Standard Process for Hull Block Coating Method. *Journal of the Society of Naval of Korea*, 45(6), pp.637-645.

Hyundai Industrial Research Institute(HIRI), 2010. *A Study on Coating Procedure establishment and Performance Improvement of Automatic Spray Machine for a Uniform Dry film Thickness of Shop Primer*, Ulsan.

윤 원 준

- 울산대학교(박사과정 중)
- 현대중공업(주) 산업기술연구소 선임연구원

최 만 규

- 인하대학교(공학석사)
- 현대중공업(주) 산업기술연구소 연구원

노 영 식

- 울산대학교 교수