

# 수면파를 이용한 에어와이핑 시스템의 고속 유동장 가시화 방법 연구 A Study for High Speed Flow-Field Visualization of Air-Wiping system using Water-Wave

\*강요환<sup>1</sup>, #이민철<sup>2</sup>, 김지연<sup>1</sup>, 곽남수<sup>3</sup>, 강법성<sup>3</sup>, 백준영<sup>1</sup>, 유기호<sup>1</sup>

\*Y. H. Kang<sup>1</sup>, #M. C. Lee(mclee@pusan.ac.kr)<sup>2</sup>, C. Y. Kim<sup>1</sup>, N. S. Kwak<sup>3</sup>, B. S. Kang<sup>3</sup>, J. Y. Baek<sup>1</sup>, K. H. Yu<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 부산대학교 대학원, <sup>2</sup> 부산대학교 기계공학부, <sup>3</sup> 삼우 ECO 기술연구소

Key words : Air-Wiping System, Flow-Field Visualization, Water Wave Model

## 1. 서론

에어 와이핑 시스템은 고압의 공기를 끌이 가는 노즐을 통해 분출할 때 고속으로 분사되는 공기를 가공 대상물의 표면에 조사하여 표면에 용착된 이물질이나 과도한 잔류 코팅 성분등을 제거하는 장치로 산업 생산 전반에서 제품의 건조, 냉각, 세척 등의 공정에서 활용하고 있다. 가장 대표적인 적용 체계가 자동차용 아연도금 강관의 제조 공정에서 연속 아연용융도금 공정이다. 이는 아연 용융 욕조에 강관 물을 통과시켜 아연을 도금하는 공정으로 강관이 욕조에 담겨졌다 나옴으로써 철판 표면에 아연이 도금되도록 하는 메커니즘을 사용한다. 하지만, 강관 전부가 욕조를 통과하다 보니 아연의 점성 영향으로 도금 두께 이상의 잔류 아연이 도포되게 되며 이를 처리하기 위해 1960년대 이전까지는 롤러사이클을 통과시켜 롤러의 압을 이용해서 제거하는 방법을 사용하였지만 Gas wiping 기법의 개발로 롤러를 대체하고 있다.

이러한 연속적인 도금 작업등의 생산 효율을 위해 에어 와이핑 시스템에 대한 다양한 해석적 연구가 진행되었다. Tuck 은 1983년 도금작업에 관한 기초적인 메커니즘을 연구하였고, Ellen 은 해석적 기법을 이용하여 압력구배에 의해 코팅 두께를 제어됨을 증명하였다[1][2]. 이러한 효율성 증대 연구를 통해 최근에는 동일한 코팅 구현을 위한 노즐 연구 및 해석적 특성 평가가 이루어 졌다[3]. 해석적인 접근보다는 실험적 모델 해석과 평가가 HrBek 에 의해 행해지기도 하였는데 연구에서는 도금 강관의 이송 프로세스에서 강관의 액막 내의 속도분포를 가정해서 도금 부착량 추정식을 유도하고, 실제 실험 데이터를 비교하여 평가를 하였다[4]. 선행 연구를 통해 에어와이핑 시스템이 아연 도금 강관의 연속 생산시스템에 효과적인 과도금 와이핑 장치임을 이론 및 실험적 결과를 얻었고, 특히 에어 와이핑의 성능은 노즐을 통해 배출되는 고압의 공기 유동이 안정적이며 평탄하게 유동장을 형성할 때 이론적인 해석에 근접하게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 노즐 및 시스템의 물리적 설계 형상 변경에 따른 유동장의 변화와 그에 기인한 도금 성능은 이론적인 분석이 실제 결과와 상당한 차이가 있음을 Takeishi 의 연구를 통해 확인이 되었으며, 따라서 실제 생산 현장에서는 생산 데이터를 기초로 한 생산 조건의 영향에 따른 회귀식을 통계적으로 작성하여 사용되고 있다[5][6].

하지만 형상 변형 등 새로운 설계의 접목시에는 이러한 통계적 결과의 활용이 힘들다. 그래서 최근 연구들은 시스템 에어 유동을 FEM 유동해석 기법으로 해석을 하여 설계 변경에 적용하고 있지만 해석적 유동과 실제 시스템 유동과의 유사성의 확증은 쉽지 않다. 따라서 가장 유익한 방법은 실제 시스템을 제작하고 생산 현장에 투입하여 실험적 평가를 하는 방법이 최선일 수 있다. 하지만 이 또한 생산 차질이 발생 하기 때문에 그리 좋은 방법은 되지 못한다. 만약 에어와이핑 시스템의 노즐에서 나오는 유동장의 지점 속도를 피토 튜브 등으로 측정을 할 수 있고, 에어와이핑 노즐 전 영역의 유동 속도장을 가시화 시켜 실제 유동의 유동장을 파악 할 수 있다면 가장 현실적인 시스템

성능 평가 방법이라 할 수 있겠다. 하지만, 에어와이핑 시스템의 유속은 100m/s 이상의 고속 고압의 유동장이기 때문에 일반적인 스모그 가시화 방법은 사용할 수 없다. 또한, 액체 유동처럼 PVC 입자를 유동에 첨가하여 laser beam 을 조사하여 도플러 효과로 측정하는 PIV 계측 기법을 적용하려 하여도 공기 유동장이기 때문에 적용이 힘들다.[7]

따라서 본 연구에서는 분사노즐의 토출 방향과 평행하게 수면을 만들고 그 수면위에서 발생하는 파장을 통해 노즐 평면상의 유속 평면을 가시화 하는 방법을 제안한다. 이를 통해 에어와이핑 시스템의 개발시 와이핑 효과의 결정 요소인 유동장의 평활화를 가시적으로 확인 할 수 있는 방법을 제시하게 된다. 본 논문 2 장에서는 수면위의 수평 공기 유동이 수면파를 형성하는 모델을 통해 이론적 근거를 제시하고 3 장에서는 제안한 방법을 도식적으로 설명하고 실험을 통해 제안한 방법의 효용성을 평가하며 4 장에 결론을 통해 정리를 한다.

## 2. 수면파 생성 모델

Fig.1 과 같이 정적인 수면 위로 수평 방향의 공기 유동장이 일어나면 매질 변화가 일어나는 수면위로 공기에 의한 전단응력으로 물의 안쪽으로 속도 차가 발생하게 될 것이지만 만약 이러한 공기 유동이 클 경우는 공기 유동장의 난류 생성 및 물의 점성 이상의 전단응력에 의한 물방울 난입 등 해석이 힘든 복잡적 결과가 발생하게 된다. 이러한 문제를 거시적으로 해결하기 위해 바람에 의한 파랑 모델을 사용하여 유동장에 의해 나타나는 파동을 모델링 한다. 이는 공기 유동과 수면의 점성을 실험적으로 접목한 실험 모델로써 물리적 의미로는 공기 유동장이 수면에 특정 주파수의 파랑을 발생시키고 발생된 파랑 에너지로 공기의 유동이 에너지를 전달하는 메커니즘으로 이해 할 수 있다.

바람에 의한 수치 파도 모델은 Hasselmann 의 에너지 균형 방정식을 통해 파 스펙트럼의 변화율을 모델화 하는 방법이 있지만 이 또한 비선형 파 교란항 등의 미시 유동까지 모델하고 있다[8]. 하지만 본 연구에서는 유동장 가시화를 위한 거시 유동에 초점을 맞추고 있기 때문에 이러한 초기 수치 모델 보다는 해수면의 파랑 예보에 적용하는 경험적 모델을 적용해 보았다. 대표적인 것이 DSA-5 모델로써 바람에 의한 파의 에너지 증가를 실험적으로 구한 모델이며 식 (1)과 같이 모델이 된다[9].

$$I = \Pi(T, V)D(\theta - \phi) \quad (1)$$

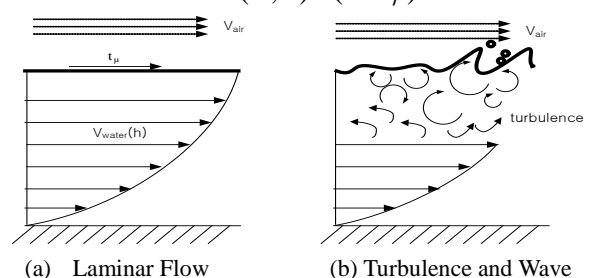


Fig. 1 Water Flow and Wave Phenomenon on Air velocity

이 식은 해상에서 일정한 풍속( $V$ )와 풍향( $\phi$ )가진 바람이 불고 있을 때 주기( $T$ )와 파향( $\theta$ )인 방향 스펙트럼 에너지 밀도의 단위 시간당 에너지 증가를 계산한 식으로 풍속과 상대방향을 통해 에너지 증가항  $I$  를 구함을 볼 수 있다.

여기서  $\Pi$  는 바람에 의한 순수 증가항이고 파의 방향별 에너지 분산항이  $D$  로 나타난다. 특히  $D$  는 파의 진행 방향 전방 180 도의 적분은 1 이 되는 특성을 가진다.

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} D(\theta - \phi) = 1 \quad (2)$$

$$\Pi(T, V) = \frac{C_{in} T^2 (V - 2T)^3}{V^3} \quad (3)$$

에너지 증가항 는 파랑 발달 과정의 통계조건을 만족하는 Gelci 와 Devillaz 식을 사용함이 타당하는 실험 연구가 있었으며 함수 계수인  $C_{in}$  는 6.76 으로 알려져 있다[9].

$$I \approx (\lambda f)^2 = (V_{propagation})^2 \quad (4)$$

$$V_{propagation} = \lambda f, \quad f = 1/T \quad (5)$$

파동에너지는 식 (4)와 같이 진폭과 진동수의 곱의 제곱에 비례한다. 만약 공진에 의해 수면파가 일어 난다고 가정하고 공진 주파수가 두드러진 하나의 대표 수라 가정 한다면 주파수  $f$  는 일정 할 것이고 따라서 파의 속도에 의해 전달되는 스펙트럼 에너지는 진폭  $\lambda$  의 값의 변화로 나타날 것이다. 따라서 파의 전달에너지  $I$  에 대해 파의 진폭이 제곱근 배로 늘어 나는 것을 예측 할 수 있다.

### 3. 가시화 시스템

본 연구에서는 Fig. 2 와 같이 에어와이프 노즐에 수평방향으로 수면을 배치하고 상단에 비스듬히 초고속 카메라를 설치하여 유속에 따라 발생하는 수면파의 모습을 고속으로 촬영하여 유속의 크기에 따라 파고의 높이가 달리 나타나는 것을 가시화 할 수 있는 시스템을 제안한다. 본 제안에 대한 실험을 위해 1Mpa 압축공기를 노즐로 분사하여 수면 위의 파를 생성하는 실험을 수행하였다. 초고속 카메라는 Kodak 사의 SR-Ultra-C 를 사용하여 초당 1000 프레임을 획득하였고 공기 유동장은 에어건 스프레이를 사용하여 수면 위 약 70 도 각도로 조사하여 중심점을 기준으로 한쪽 방향으로 치우친 유동장을 생성하였을 때 나타나는 파동을 관찰하였다. Fig.3 은 고속 카메라로 촬영한 파동의 결과영상이다. 결과 영상에서 보면 유속이 우측방향으로 조사 유속이 크도록 배치했을 때 파고의 높이가 조사 방향으로 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

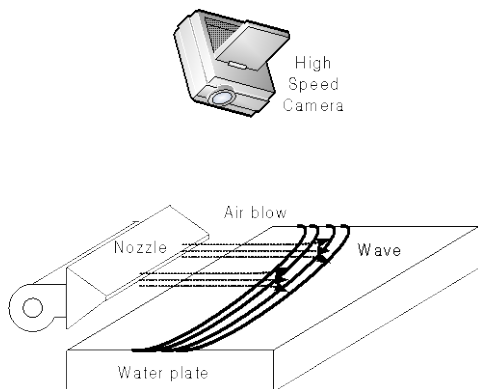


Fig. 2 Proposed High speed Flow-Field Visualization schematic

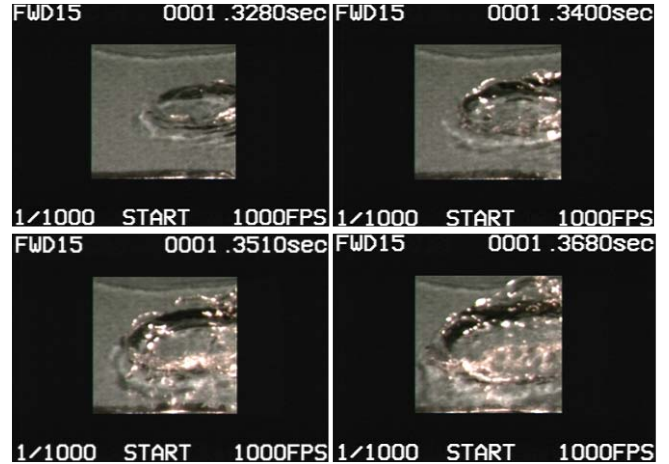


Fig. 3 Experimental Test Result

### 4. 결론

본 논문에서는 에어 와이핑 시스템의 설계시 내부 유동장에 대한 전산 유체적 해석이 아닌 실험적 유동장 분석시 공기의 고속 유동장을 가시화 하는 방법을 연구하였다. 수면위로 고속의 공기 유동이 발생할 때는 두 매질의 차이와 특히 공기 유속과의 상대 속도에 따른 수면위의 파동 발생에 대한 메커니즘을 이용하여 공기 유동장을 가시화 하는 방법으로 접근을 하여 보았다. 해풍과 해수면의 파도에 대한 거시적 수면파 발생 모델 실험식을 이용하여 공기 유동의 속도가 빠를 경우 특정 주파수의 수면파가 발생할 때 유동장 속도가 높으면 파의 스펙트럼 에너지가 증가하여 파의 파고가 높아짐을 유추할 수 있었고, 압축 공기 분사를 이용한 노즐 유동 실험을 통해 제안한 방법의 가능성을 확인하였다.

### 참고문헌

1. Tuck, E. O., "Continuous Coating with Gravity and Jet-Stripping," Phys. Fluids, Vol. 26, p. 2352, 1983.
2. Ellen, C. H. and Tu, C. V., "An Analysis of Jet Stripping of Liquid Coatings", Journal of Fluid Eng., Vol.106, pp. 399-404, 1984.
3. 이동원, 신승영, 조태석, 권영두, 권순범, "연속 아연 도금 두께에 관한 수치 해석적 연구", 한국전산유체공학회지, Vol. 14, No.1, p. 1-8, 2009.
4. Hrbek, A., "The Effect of Speed on the Thickness of the Coating Produced During Metalizing in Liquid Metals," Metal Finishing Journal, Vol. 7, No. 8, p. 298~302, 1961.
5. Takeishi, Y., Yamauchi, A. and Miyauchi, S., "Gas Wiping Mechanism in Hot-Dip Coating Process", Iron and Steel, Vol. 81, No. 6, p. 643-647, 1995
6. Adaniya, T., Abe, M., Shoji, M. and Yano, H., "Syudy on Gas Wiping Mechaniam for Continuous Galvanizing Line," Iron and Steel, Vol. 66, No. 7, p. 835-844, 1980.
7. 노기덕, 박지태, 변용수, "PIV 를 이용한 정렬 및 엇갈림 배열을 가진 관관을 지나는 유동장의 가시화", 한국마린엔지니어링학회지, Vol. 33, No. 1, p.44~51,2009.
8. Hasselmann, K., "Grungleichungen der Seegansveroussage", Schiffstechnik, Vol. 7, p.191, 1960.
9. 오임상, 김태림, 정종률, 봉중현, "천해 파랑 모델 개발에 관한 연구", Vol. 26, No. 3, p.139~155,1990.