차량 도장 건조 성능 향상을 위한 수치해석 연구

이 승 재,[1] 이 상 혁,[1] 허 남 건,[*2] 김 희 수[3]

A NUMERICAL STUDY FOR IMPROVING PERFORMANCE ON PAINT DRYING SYSTEM OF A VEHICLE

Seung Jae Lee,[1] Sang Hyuk Lee,[1] Nahmkeon Hur[*2] and Heesoo Kim[3]

In the present study, a three-dimensional numerical simulation was performed in a paint drying system of vehicle assembly line. In the drying system, hot air and cool air are blown in turn from the nozzles to dry the trim of vehicle. Inlet boundary condition using user subroutine code is adopted to consider the moving motion of the vehicle. The present paper aims to improve the performance of the drying system. The transient distribution of temperature and velocity at the surface of the vehicle were predicted numerically. From these results, optimal operating condition of the drying system are to be suggested.

Key Words : 도장 건조 시스템(Paint Drying System), 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics), 비정상상태 해석(Transient Analysis)

1. 서 론

최근 양산 차량은 대량·고품질 균일 생산을 위한 생산 라인을 구축하여 생산이 이루어지고 있다. 이중에서 차량 도장 공정은 제품의 미관을 높이고 기계적·화학적 성질을 개선시키는 매우 중요한 공정이다. 특히 도료 건조 작업은 액체 상태의 도료를 차량 외관에 정착시키기 위한 단계로서, 건조가 제대로 이루어지지 않아 불량으로 차량이 도장될 경우, 후속 공정에 문제를 야기하거나 그 자체로 결함이 되어 불량률을 높이게 되므로 생산비용에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 차량 외관에 도료를 균일하게 정착시키기 위해 열풍 및 냉풍 공정을 진행하여 도료가 적절히 건조되어 차체에 정착할 수 있는 단계를 진행시킨다. 이와 같은 열풍 및 냉풍 단계의 구성에 따른 복잡한 열유동 특성의 고려가 요구된다.

도료 건조 연구와 관련하여 신경효 등[1]은 열풍 건조 시스템의 특성을 파악하기 위하여 가호사 건조 공정에 대한 적절한 건조 모델링을 통하여 수치해석적인 연구를 수행하여 다양한 설계조건에 따른 건조 성능 해석을 수행하였다. 또한, 홍승찬 등[2]은 전도성 도료에 대하여 Oven형 방식과 열풍형 방식에 대한 건조 특성을 도출하기 위하여 실험적인 연구를 수행하여 각각의 건조 방식이 갖는 특성을 파악하였다. 한편, Avci 와 Can[3]은 고속 제트의 분사를 사용한 도료의 건조에 대한 수치적인 연구를 수행하여, 고속 제트 사용시 도료의 건조 특성에 대한 연구를 수행함으로써 건조 공정에 대한 설계 조건을 예측하였다.

이러한 기존 연구들은 차량과 같은 복잡한 형상에 따른 건조특성을 고려하지 않아 실제 차량의 도료 건조 성능을 파악하는데 어려움이 있고, 전체 건조 시스템을 고려한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구실의 차량 수성 도료 건조 특성에 대한 열·유동 해석의 근간이 될 수 있는 선행 연구로써 허남건 등[4]은 차량 후드 내에 장착되어 엔진에서 발생하는 열을 대기로 배출하는 장치인 루버핀 라디에이터에 대해 준미시적 방법을 적용한 수치해석적 연구를 통해 유동 및 열전달 특성을 분석하였다. 또한, 이승호 등[5]은 자동차 고속 주행시 와이퍼 부상현상에 대한 수치해석 연구수행을 통해, 차량의 공력 특성을 해석하였다. 그에 따라 본 연구에서는 기존 선행 연구를 바탕으로 실제 차량이

1 정회원, 서강대학교 대학원
2 종신회원, 서강대학교 기계공학과
3 기아자동차 도장생기팀
* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

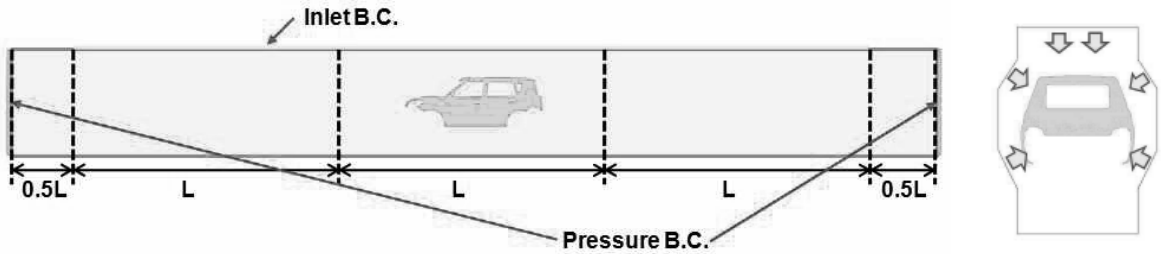


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

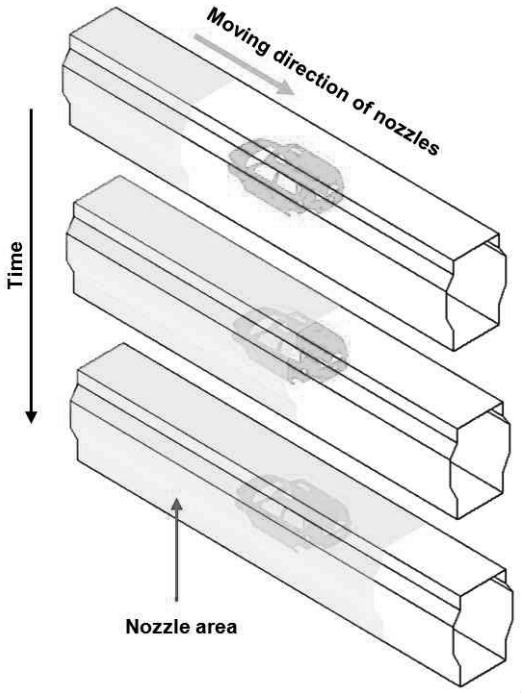


Fig. 2 Time dependent location of the nozzle

도장 건조 시스템을 통과할 때 시간에 따른 차량 주변의 유동 및 차량 표면의 온도 분포를 연구하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델 및 해석조건

본 연구에서는 건조 설비내에서의 차량 도장 건조 해석을 위해 Fig. 1과 같이 해석 모델을 만들었다. 해석 대상의 특성을 고려하여 설비를 따라 차량이 Fig. 1의 오른쪽에서 왼쪽으로 진행하며, 건조공정이 진행되는 과정을 역으로 차량이 고정된 상태에서 노즐이 차량방향으로 이동하도록 Fig. 2와 같이해석 모델을 구성하였다. 전체 해석 모델의 길이는 차량의 길이(L)에 대해 4L의 길이를 주었고, 실제 열풍 및 냉풍 조건이 적용되는 위치는 양쪽 경계면으로부터 0.5L 가량 간격을 두고 설정하였다.

노즐에서 나오는 열풍 및 냉풍을 고려하기 위하여 inlet 경계 조건을 주었으며, 이는 설비내의 노즐 위치와 풍향, 풍속, 온도 등을 고려하여 적용하였다. 시간에 따른 차량과 노즐의 상대적인 위치를 user subroutine을 적용하여 Fig. 1과 같이 왼쪽에서 오른쪽으로 inlet 경계조건이 이동하도록 설정하였다. 해석 시간은 노즐이 진입하면서부터 마지막 노즐이 경계조건을 벗어나는 시간인 약 7분 가량으로 설정하였으며, time step은 약 0.3초로 설정하여 해석을 수행하였다. 또한, 차량 주변 유체영역에 다중 회전 구조 음해법(Implicit multiple rotating frame)을 사용하여 유체의 운동량 보존식에 생성항을 더해줌으로써 실제 건조 공정에서 차량이 이동하는 효과를 나타내었다. 차량 표면은 no-slip wall로 설정하였으며, 양쪽 경계면은 대기환경을 고려하여 압력 경계 조건을 설정하였다.

본 연구는 상용코드인 STAR-CD V.4.08[6]을 이용하여 해석하였으며, 난류 모델로써 k-ε 모델을 사용하였다. 작성된 해석 모델은 약 600만개의 해석격자가 사용되었다.

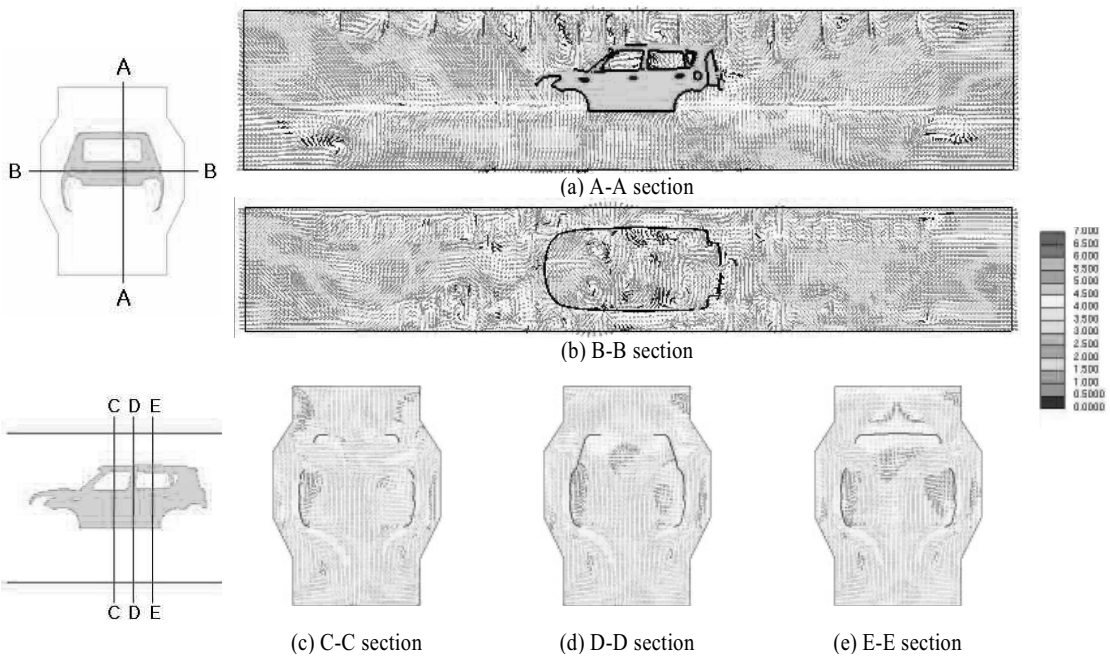
2.2 지배방정식

해석 영역 내 유동에 대한 질량 보존 방정식(Continuity equation)과 운동량 방정식(Momentum equation)은 다음과 같다[6].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j)=0 \tag{4}$$

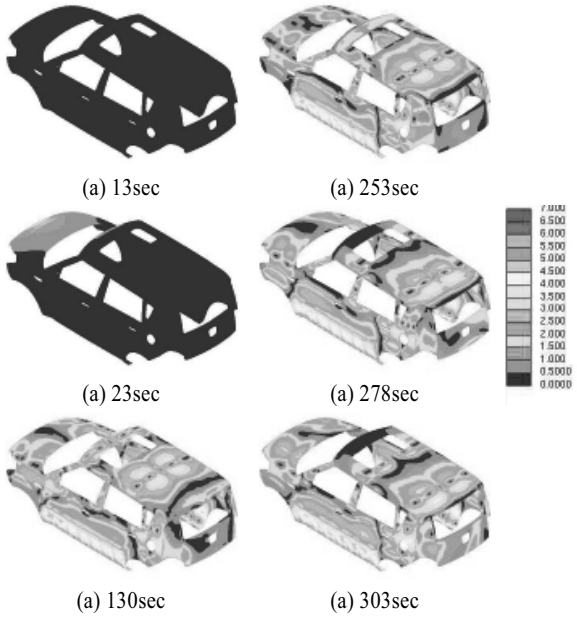
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j u_i-\tau_{ij}\right]=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+g_i(\rho-\rho_0) \tag{5}$$

여기서, t는 시간, u_j는 유속, ρ는 밀도, τ_{ij}는 응력 텐서, P는 압력을 나타내며, 우변의 마지막 항은 기체 간 밀도 차에 의한 부력으로 g_i는 x_i방향의 중력을, ρ_0는 기준 밀도를 의미한다.



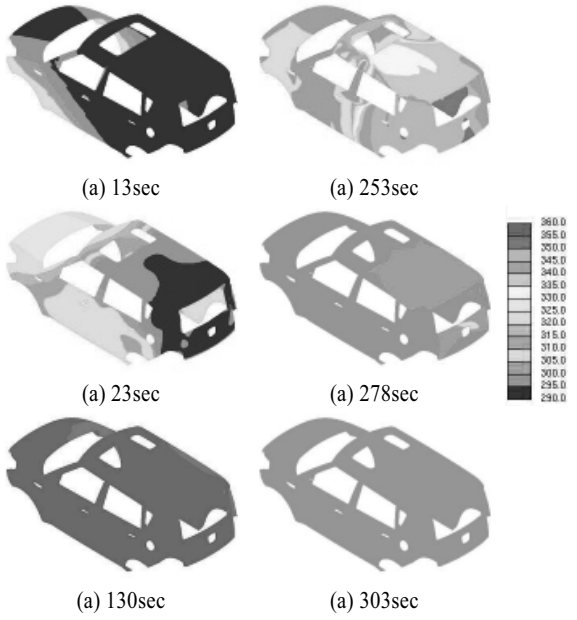
(a) A-A section
(b) B-B section
(c) C-C section
(d) D-D section
(e) E-E section

Fig. 3 Section view of velocity profile in the drying system



(a) 13sec (a) 253sec
(a) 23sec (a) 278sec
(a) 130sec (a) 303sec

Fig. 4 Computational results of the transient distribution of velocity magnitude near the painted surface



(a) 13sec (a) 253sec
(a) 23sec (a) 278sec
(a) 130sec (a) 303sec

Fig. 5 Computational results of the transient distribution of temperature near the painted surface

3. 해석결과

3.1 시간에 따른 유동장 분포

건조 설비내 각 단면에서의 속도 분포를 Fig. 3에 표시하고, Fig. 4에서는 차량 표면 유체의 속도분포를 나타내었다. 표면의 속도 분포는 첫 번째 노즐이 차량 전방 차량 표면의

유동은 첫 번째 노즐이 차량의 후미 부분을 통과하는 약 90초 이후부터 주기적인 분포를 보인다. 결과에서와 같이 차량 주변의 속도는 차량 형상 및 노즐의 위치에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 차량 표면의 속도분포는 약 2~4 m/s로 상대적으로 낮고, 차량 전반에 걸쳐 고르게 분포하는 것을 본 해석 결과를 통해 확인하였다.

3.2 시간에 따른 온도 분포

차량 표면의 시간에 따른 온도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 차량 주위의 온도는 차량이 열풍 노즐에 이르기 전부터 온도 상승이 시작되어, 차량이 첫 노즐을 지나갈 때 hood 부분이 350K 정도의 분포를 보인다. 이후 지속적으로 열풍의 효과에 의해 차량은 전반부부터 가열되다가, 냉풍 구간에 들어서면서 빠르게 차량 표면이 냉각됨을 알 수 있다. 특히 노즐과 거리가 가까운 측면에서는 온도 구배가 상대적으로 큰 반면, 노즐과의 거리가 먼 차량 상부에서는 온도 구배가 상대적으로 작은 것을 알 수 있었다. 그러나 상부에서도 선루프 주변은 형상에 따른 유동의 영향으로 부분적으로 온도 분포가 급하게 변하는 형상을 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 차량의 도장 건조 공정시 차량 표면 주변 유체 거동 및 온도분포의 시간에 따른 변화를 수치해석을 통해 연구하였다. 도장 건조 공정은 차량생산 공정에서 생산 속도 및 불량률에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 과정이다. 이에 따라 복잡한 차량 형상 및 전체 건조 설비를 모두 고려하는 수치해석 기법을 수립하였다. 표면의 유동과 온도분포를 살펴보면 노즐과의 거리와 차량 형상의 영향으로 인해 차량 상부는 비교적 고른 분포를 보이지만 측면과 선루프 부분은 변화가 급격하게 이루어짐을 확인하였다. 추후 이를 토대로 도장 건조 성능에 영향을 미치는 인자를 확인하고, 공정 변수를 조절함으로써 도장 건조 성능의 향상에 도움이 될 것이다.

후 기

본 연구는 (주)NGV의 현대기아 자동차 산학협력 과제의 일환인 '중상도 공정내 중간 건조로의 수성 도료 건조 인자 분석'의 연구 결과로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 1998, 신경효, 장영수, 김수연, 정평석, "열 및 유동을 고려한 가호기 건조시스템의 최적설계 - 열 및 물질전달을 고려한 열풍건조의 특성," *공기조화냉동공학회 하계학술대회논문집*, pp.27-32.

[2] 2009, 홍승찬, 이재효, 정길용, "Oven형 건조 및 열풍건조에 대한 전도성 잉크의 건조 특성에 관한 연구," *대한설비공학회 2009년도 하계학술발표대회 논문집*, pp.1429-1434.

[3] 1999, Avci, A. and Can, M., "The analysis of the drying process on unsteady forced convection in thin films of ink," *Applied Thermal Engineering,* Vol.19, pp.641-657.

[4] 2009, Hur, N., Park, J.-T. and Lee, S.H., "Development of a semimicroscopic heat exchanger(SHE) method for a vehicle underhood thermal management," *Progress in Computational Fluid Dynamics,* Vol.9, pp.141-146.

[5] 2009, 이승호, 이성원, 허남건, 최우녕, 설진환, "자동차 고속 주행시 와이퍼 부상현상에 대한 수치해석 연구," *대한기계학회 2009년도 추계학술대회*, pp.2093-2098.

[6] 2008, CD-adapco group, *STAR-CD Methodology V4.08*.