

차량 도장 건조 성능 향상을 위한 수치해석 연구

이 승 재,¹ 최 종 략,¹ 허 남 건,² 김 희 수³

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

Seung Jae Lee,¹ Jongrak Choi,¹ Nahmkeon Hur,² and Heesoo Kim³

In this study, three-dimensional transient numerical simulations were carried out for a paint drying system of vehicle. The vehicle on assembly line passes through the drying system consisting of hot and cool air blow region. For the moving motion of the vehicle, moving of inlet boundary condition and MRF technique are used. The transient distribution of temperature and velocity in the drying system were predicted numerically. In order to validate the numerical results, transient distribution of the vehicle surface temperature was compared with experimental data, showing a good agreement. As a result of present study, 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. 이 중에서 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. 열 전달 방식 중 복사에 의한 방식은 장치의 구조적 단순함과 건조 대상물의 본래의 향과 색을 보존해야 하는 특수한 경우 다른 방식에 비해 유리하며, 최근 이에 관한 연구가 이루어지고

있다[1-4]. 하지만 실제 자동차 생산 라인에서는 복사를 이용한 건조 분위기를 만들기 어렵고, 유지 및 관리의 측면에서 송풍방식의 건조가 용이한 실정이다. 따라서 실라인에서는 Fig. 1과 같이 열풍 및 냉풍 공정 단계를 진행함으로써 도료가 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[5]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[6]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[7]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. 도료 건조와 관련된 특허로는 차량의 외관에 열풍을 가해 도료를 건조시키는 도장 열처리실이 제안 [8]된 바 있다.

접수일: 2011년 1월 31일, 수정일: 2011년 6월 17일,
계재확정일: 2011년 6월 20일.

1 정회원, 서강대학교 대학원 기계공학과

2 종신회원, 서강대학교 기계공학과

3 기아자동차 도장생기팀

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

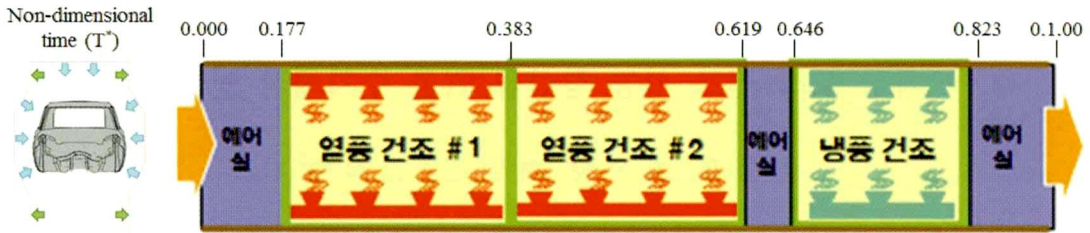


Fig. 1 Schematic geometry of paint drying system

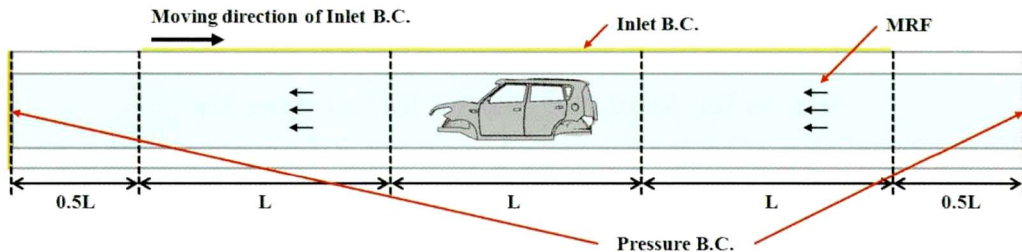


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

이러한 기존 연구들은 차량과 같은 대형의 복잡한 형상에 따른 건조특성을 고려하지 않아 실제 차량의 도료 건조 성능을 파악하는데 어려움이 있고, 실제 공정에서 차량을 이동시키면서 도료를 건조하는 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[5]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[9]은 자동차 고속 주행시 와이퍼 부상현상에 대한 수치해석 연구수행을 통해, 차량의 공력 특성을 해석하였다. 그에 따라 본 연구에서는 기존 선행 연구를 바탕으로 실제 차량이 도장 건조 시스템을 통과할 때 시간에 따른 차량 주변의 유동 및 차량 표면의 온도 분포를 연구하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델 및 해석조건

실제 차량 제조 공정에서의 건조 설비는 도료를 건조시키기 위한 열풍구간과 후공정을 위한 냉풍구간으로 구성된다. 열풍/냉풍 구간에서 노즐을 통한 건조로 내 송풍 방식은 Fig. 1의 좌측 단면그림과 같다. 차체 윗부분과 측면의 세방향에서 노즐을 통해 송풍을 해주고, 위쪽과 아래쪽에 배기구를 두고 유입된 풍량만큼 배출시켜줌으로써, 건조로의 길이방향으로

발생하는 유동을 방지하게 된다. 본 연구에서 사용한 도장 건조 시스템의 경우, 총 33.925 m 길이의 건조 설비를 차량이 5.75 m/min의 속도로 이동함에 따라 차량 한 대가 건조 시스템 통과 시간은 354초이다. 이로부터, 전체 공정에 소요되는 시간에 대비하여 현재 건조 공정의 진행 시간을 무차원화하여, 열풍 구간($T^*=0.177\sim 0.619$)과 냉풍 구간($T^*=0.646\sim 0.823$)에서 차량 주변의 유동 및 열전달 특성에 대해 분석하였다.

본 연구에서는 건조 설비 내에서의 차량 도장 건조 해석을 위해 Fig. 2와 같이 해석 영역을 구성하고, 경계조건을 설정하였다. 해석영역의 크기는 차량의 크기를 포함하여, 길이방향으로 차량의 길이(L)에 대해 4L로 구성하였으며, 높이방향 및 폭방향 형상은 건조로의 단면과 같게 구성하였다.

실제 공정에서 차량이 이동됨에 따라 차량과 노즐간 상대 위치를 모사하기 위하여 차량을 해석 영역 가운데 고정시킨 상태에서 입구 경계조건을 설정하고 user-subroutine을 사용하여 Fig. 3과 같이 시간에 따라 노즐을 통한 송풍영역이 변화하도록 하였다. 입구 경계조건은 노즐에서 나오는 열풍 및 냉풍을 고려하기 위하여 실제 설비에서 측정된 노즐 위치와 풍향, 풍속, 온도 등을 적용하였다. 또한, 차량 주변 유체영역에 다중 회전 구조 음해법(Implicit multiple rotating frame)을 사용하여 유체의 운동량 보존식에 생성항을 더해줌으로써 실제로 차량이 이동됨에 따른 차량 주변 대기의 움직임에 구현하였다. 차량 표면은 no-slip wall로 설정하였으며, 양쪽 경계면은 대기환경을 고려하여 압력 경계 조건을 설정하였다.

해석 시간은 열풍구간 첫 노즐이 해석영역에 진입하면서부

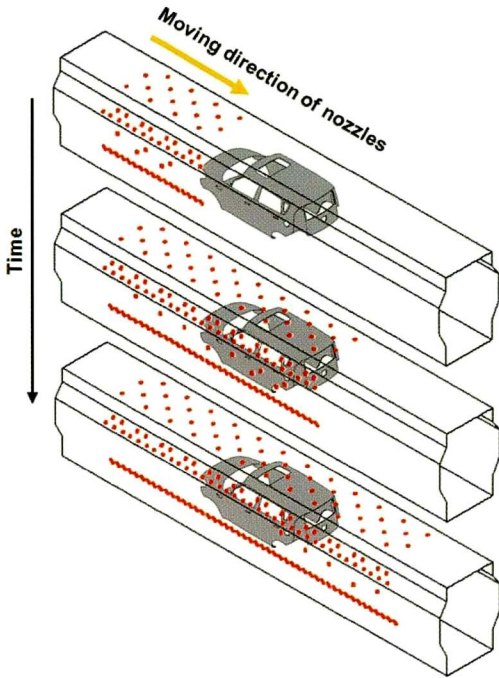


Fig. 3 Time dependent location of the nozzle

터 냉풍구간 마지막 노즐이 벗어나는 시간인 354초로 설정하였으며, time step은 0.295초로 설정하여 해석을 수행하였다. 또한, 열풍 및 냉풍 구간에서 차체 주변 유체와 고체 사이의 열전달을 해석하기 위해 복합 열전달을 고려하였으며, 차량의 복잡한 형상 및 얇은 판재 두께를 구현하기 위하여 차량 주변 영역은 다면체 격자와 prism layer로 구성하였다. 열풍 및 냉풍을 분사하기 위한 이동하는 노즐의 구현을 용이하게 하기 위하여 건조 설비 영역은 육면체 격자로 구성하였다. 이때, 건조 설비 내 차량 주변 유동 및 열전달 특성에 대한 해석 결과는 차량 주변 격자에 의해 영향을 받기 때문에, 본 연구에서는 차량 주변 격자 밀도를 변화하여 격자 민감도 테스트를 수행하였다. 이를 위해, 298 K인 차체에 360 K의 공기가 노즐로부터 분사될 경우, 격자 밀도를 변화하여 차체에서 열전달계수에 미치는 영향을 분석을 위한 정상상태 해석을 진행하였다. 차량 주변 격자 크기가 약 15 mm인 해석을 통해 얻은 차체에서 평균 열전달량은 격자 크기가 약 18 mm인 해석 결과와 3.36 %, 약 21 mm인 해석 결과와 9.01 %, 약 24 mm인 해석 결과와 22.0 % 차이를 보였다. 이를 통해, 본 연구에서는 차량 주변 영역을 위한 약 350만개의 해석 격자와 건조 설비 영역을 위한 약 250만개의 해석 격자를 구성하였다. 본 연구는 상용코드인 STAR-CD V.4.12[10]를 이용하여

해석하였으며, 난류 모델로써 k-ε 모델을 사용하였다. AMD Opteron 64 bit processor 2.4 GHz 16 CPU 리눅스 클러스터를 이용한 병렬계산을 수행하여 약 12시간의 해석 수행시간이 소요되었다.

2.2 지배방정식

도장 건조 설비 내 차체 주변 유동 특성을 해석하기 위한, 질량 보존 방정식(Continuity equation)과 운동량 보존 방정식(Momentum equation)은 다음과 같다[10].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = s_m \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \tag{2}$$

여기서, t 는 시간, u_i 는 유속, ρ 는 밀도, τ_{ij} 는 응력 텐서, p 는 압력을 나타내며, 우변의 마지막 항은 기체 간 밀도 차에 의한 부력으로 g_i 는 x_i 방향의 중력을, ρ_0 는 기준 밀도를 의미한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho h u_j + F_{h,j}) \\ = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial p}{\partial x_j} + s_h \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, h 는 엔탈피, $F_{h,j}$ 는 에너지 확산 플럭스, s_h 는 엔탈피 생성항 성분을 나타낸다.

3. 해석결과

도장 건조 설비와 차량형상을 고려한 수치해석적 기법을 기반으로 기존 건조 설비에서의 실제 차량 주변 유동에 대한 수치해석을 수행하고, 실험값과 비교하였다. 설비 내 노즐로부터 분사되는 공기의 유입 속도 및 온도가 위치에 따라 다르기 때문에, 열풍 구간 노즐 유입 온도 83℃와 노즐 유입 풍량 50Hz로 설정한 실제 공정에서 노즐 위치별 유입 속도 및 온도를 직접 측정하여 경계조건에 적용하였다. 또한, 차량 이동속도는 실제 공정에서와 같이 5.75 m/min로 적용하여, 차량 도장 건조 설비 내 유동 및 열전달 특성에 대한 수치해석을 수행하였다.

3.1 차량 도장 건조 설비 내 유동 특성

도장 건조 설비 내 차량이 열풍 구간 및 냉풍 구간에 위치

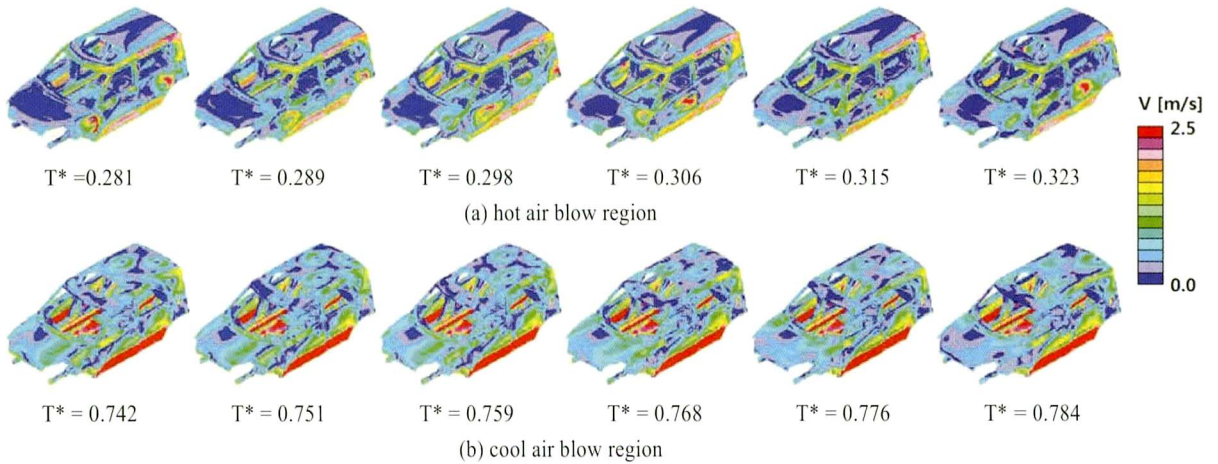


Fig. 4 Velocity magnitude distribution around the vehicle surface

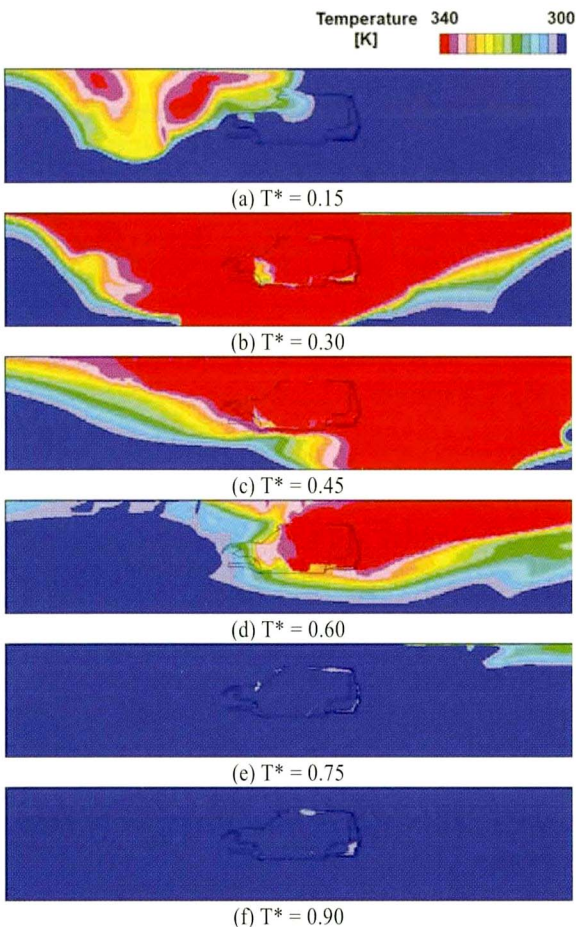


Fig. 5 Section view of transient distribution of temperature in the drying system

할 경우, 시간에 따른 차량 주변에 형성되는 유동장 특성은 Fig. 4와 같다. 차량에 도포된 도료의 건조 특성을 결정하는 차량 주변의 속도는 차량 형상 및 노즐의 위치에 큰 영향을 받게 되며, 노즐을 통해 분사된 공기는 노즐 근처 차체 주변에서 약 2~3m/s의 속도를 갖는 활발한 유동장을 형성하게 되며, 차량이 설비를 통과하는 동안 노즐의 위치 변화에 따라 활발한 유동장을 주기적으로 이동시키므로써 차체의 전면에서 열전달을 향상시키게 된다. 그러나 차체의 밀폐 및 도어부의 형상적 특성으로 인해 차체 내부의 유동이 외부에 비해 정체되는 특성을 보였다.

3.2 차량 도장 건조 설비 내 온도 특성

건조 공정이 진행됨에 따라 건조 설비 내 무차원화된 시간에 따른 온도 분포는 Fig. 5와 같다. 열풍 구간에서 유입된 뜨거운 공기는 부력에 의해 상승하게 된다. 또한, 차량의 형상에 의해 차체 내부로 열풍의 유입이 지연되거나(Fig. 5 (b)) 열풍 구간 이후에도 내부에 가열된 공기가 쉽게 빠져나가지 않고 정체됨에 따라 (Fig. 5 (d)) 차체의 온도 상승을 유도하게 된다.

한편, Fig. 6에는 차량 표면의 무차원화된 시간에 따른 온도 분포를 나타내었다. 차량 주위의 온도는 차량이 열풍 노즐에 이르기 전에는 큰 온도 상승이 없으나 열풍구간 첫 번째 노즐이 후드 상부를 통과하는 시점부터 온도 상승이 급격히 이루어진다. 이후 지속적으로 열풍의 효과에 의해 차량은 전 반부부터 가열되다가, 냉풍 구간에 들어서면서 빠르게 차량 표면이 냉각됨을 알 수 있다. 노즐의 위치에 따라 유입되는 공기의 온도 및 속도가 다르기 때문에 차량 전반에 걸쳐 비대칭적인 온도 분포를 나타낸다. 차량 후드부분은 노즐과 거

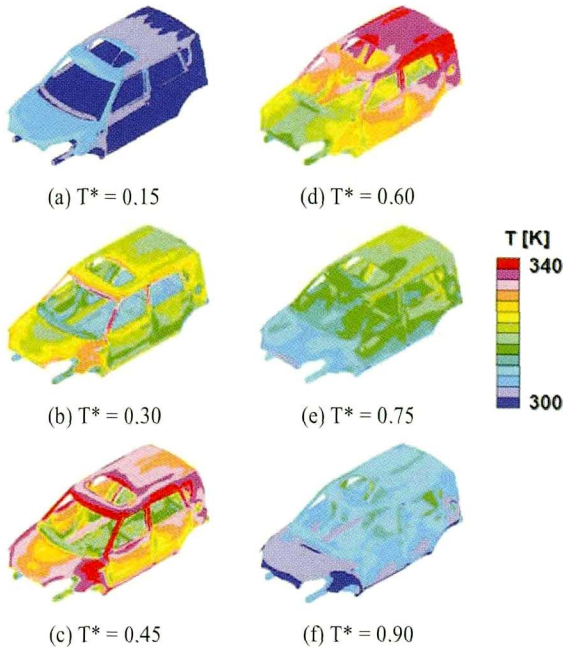


Fig. 6 Transient distribution of the vehicle surface temperature

리가 멀지만 가장 먼저 가열 및 냉각이 시작되는 위치에 있으므로, 그림과 같은 온도 분포를 나타낸다. 특히 노즐과 거리가 가까운 측면에서는 온도 구배가 상대적으로 큰 반면, 노즐과의 거리가 먼 차량 상부에서는 온도 구배가 상대적으로 작은 것을 알 수 있었다. 또한, 도어부가 열려있는 형상으로 인해 Fig. 6(c)와 같이 형상변화로 인한 와류가 발생하는 부분의 온도가 주변부에 비해 떨어지는 것을 알 수 있으며, 앞문과 뒷문이 연속적이지 않기 때문에 불연속적인 온도 분포를 나타낸다. 또한 도어부 안쪽면은 상대적으로 열풍 및 냉풍이 직접적으로 영향을 미치지 못하는 사각지대에 위치하기 때문에 가열 및 냉각이 주변부에 비해 그 속도가 늦어지는 것을 확인할 수 있다.

3.3 실험결과와 비교

Fig. 7에서는 차체 각 부위별 온도 변화를 실험 결과와 비교하였다. 차량이 건조 설비를 따라 이동되면서 실온상태의 판재가 가열되고, 차량이 열풍 구간과 냉풍 구간 사이에 위치하는 무차원화 시간이 약 0.6에서 온도 값이 완만하게 변화하다가 다시 급격하게 냉각되는 것을 볼 수 있다. 이는 열풍 구간이 끝나고 에어실 구간에서 완만한 온도변화를 거친 후 냉풍구간을 통과함에 따라 가열되었던 차체가 급속히 냉각되는 것을 의미한다. 또한 후드부분이 가장먼저 열풍구간에 진입하므로 온도 상승이 가장 먼저 발생하고, 도어 및 프레임 부분

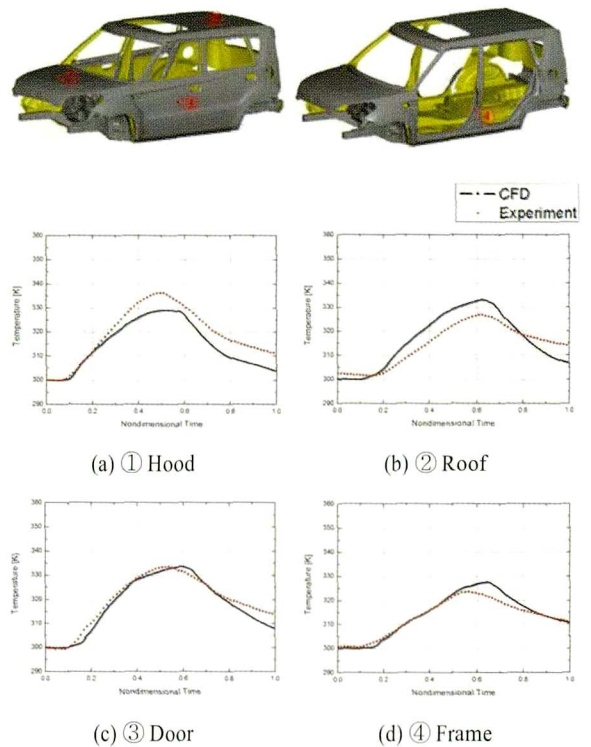


Fig. 7 Comparisons of the vehicle surface temperature between numerical prediction and experimental data

의 온도 상승은 상대적으로 늦는 것을 확인할 수 있다. 후드 부분에서 약 12.7% 가량 하향 예측되고, 루프 부분에서 약 11.7% 상향 예측되는 경향이 있으나 이는 노즐을 통해 유입되는 공기의 온도 및 유속을 건조로내 모든 노즐의 위치에서 측정하지 못한 점 등의 원인에 기인하는 것으로 예측된다. 또한 건조 공정시 취약할 것으로 예상되는 도어부 및 프레임 부분에서의 승온 그래프는 전반적으로 온도 상승 정도 및 경향이 실험결과와 잘 일치한다.

3.4 건조 공정시 취약점 예측

도료 건조 공정에서 수성 도료가 증발하는 물질전달 현상을 열전달과 물질전달의 유사성을 토대로[11, 12] 차체에 전달되는 열에너지를 추정하여 건조성능을 평가할 수 있다. 차체에 전달될 시간에 따라 평균된 단위 면적당 열전달양 분포를 Fig. 8에 나타내었으며, 이는 다음 식으로 구한다.

$$h_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T h dt = \frac{1}{n} \sum_1^n h_i \quad (4)$$

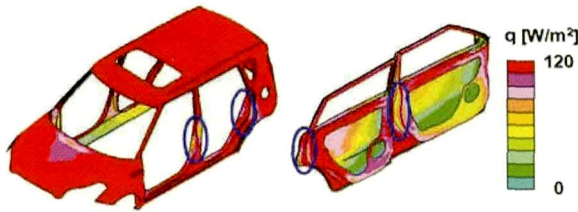


Fig. 8 Distribution of the time averaged heat flux

도료가 건조될 때 증발하기 위해 일정 수준 이상의 열량이 요구된다. Fig. 8에서 나타난 바와 같이 차체가 건조공정을 통과하면서 받는 열전달량의 분포를 구함으로써 건조공정시 취약점을 미리 예측할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 차체 도어부 안쪽면과 프레임부분이 다른 차체 부분에 비해 전달받는 열에너지가 작아 건조 공정상 취약할 수 있다. 차체의 아래쪽 부분과 도어의 바깥면의 안쪽면 또한 열전달량이 떨어지지만 이와 같은 부분은 유효도장면이 아니므로 무시할 수 있다.

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. 이를 검증하기 위하여 실라인에 대한 모델링을 수행하고, 실험결과와 비교하였다. 차체의 각 부위별 온도분포를 비교한 경우, 건조 공정시 취약점으로 예상되는 도어 및 프레임 부분에서의 온도분포는 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보여주었다.

추후 이를 토대로 설비 운전 조건의 변화에 따른 도장 건조 성능을 사전에 예측하고, 각 인자별 영향성을 평가하여 기존 설비 가동시 에너지 절감 방안을 제시하는데 활용 가능하다. 또한, 차량 생산 속도 증대시(uph up) 기존과 동등한 건조 성능을 보이는 설비 운전 조건을 예측함으로써 설비 운전 조건에 대한 가이드 라인을 제공하여 도장 건조 성능의 향상에 도움이 될 것이다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받는 ‘다중현상 CFD 연구센터 (No.

20090083510)’ 산학대응 과제의 일환으로 (주)현대기아자동차의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] 2007, Dhib, R., "Infrared Drying : From Process Modeling to Advanced Process Control," *Drying Technology*, Vol.25, pp.97-105.
- [2] 1997, Blanc, D., Laurent, P., Gerard, J.F. and Andrieu, J., "Experimental Infrared Drying Study of a Model Water-Based Epoxy-Amine Painting Coated on Iron Support," *Drying Technology*, Vol.15, pp.1787-1799.
- [3] 2004, Dufour, P., Blanc, D., Toure, Y. and Laurent, P., "Infrared Drying Process of an Experimental Water Painting Model Predictive Control," *Drying Technology*, Vol.22, pp.269-284.
- [4] 1997, Parrouffe, J.M., Dostie, M., Navari, P., Andrieu, J. and Mujumdar, A.S., "Heat and Mass Transfer Relationship in Combined Infrared and Convective Drying," *Drying Technology*, Vol.15, pp.399-425.
- [5] 1998, 신경효, 장영수, 김수연, 정평석, "열 및 유동을 고려한 가호기 건조시스템의 최적설계 - 열 및 물질전달을 고려한 열풍건조의 특성," *공기조화냉동공학회 하계학술대회논문집*, pp.27-32.
- [6] 2009, 홍승찬, 이재효, 정길용, "Oven 형 건조 및 열풍건조에 대한 전도성 잉크의 건조 특성에 관한 연구," *대한설비공학회 2009년도 하계학술발표대회 논문집*, pp.1429-1434.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 2009, 이승호, 이성원, 허남건, 최우녕, 설진환, "자동차 고속 주행시 와이퍼 부상현상에 대한 수치해석 연구," *대한기계학회 2009년도 추계학술대회*, pp.2093-2098.
- [10] 2008, CD-adapco group, *STAR-CD Methodology V4.08*.
- [11] 1921, Thoma, H., "Hochleistungskessel," *Julius Springer*.
- [12] 1993, 유성연, 노종광, 정장환, 정문기, "열전달과 물질전달의 유사성에 관한 연구," *대한기계학회 논문집*, Vol.17, No.10, pp.2624-2633.