

## 자동차 도장 건조 공정의 건조 성능 향상을 위한 수치해석 연구

최 종 락, 허 남 건<sup>†</sup>, 김 동 철, 김 희 수<sup>\*</sup>

서강대학교 기계공학과, \*기아자동차 도장생기팀

### A Numerical Study on the Improvement of the Performance of a Vehicle Paint Drying Process

Jongrak Choi, Nahmkeon Hur<sup>†</sup>, Dongchoul Kim, Hee-Soo Kim<sup>\*</sup>

Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

<sup>\*</sup>Paint Shop Engineering Team, Kia Motors Corp., Gwangju 502-711, Korea

(Received October 22, 2012; revision received November 7, 2012)

**ABSTRACT:** In the present study, three-dimensional transient numerical simulations were carried out to improve the performance of a vehicle paint drying process. In order to describe the movement of a vehicle, the techniques of moving boundary condition and multiple reference flames (MRF) were used. For the validation of the numerical analysis, the predicted temperature on the surface of a vehicle was compared to the experimental data, and a good agreement was achieved. With validated numerical procedure, various operating conditions of the temperature and the flow rate of the supply air were investigated to improve the drying performance of the facility. It is shown that the optimization of the operating condition can lead to energy savings and faster line speed of the production.

**Key words:** Paint drying process(도장 건조 공정), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Conjugate heat transfer(복합 열전달)

#### 기 호 설 명

$A$	: 열교환 면적 [ $m^2$ ]
$E$	: 에너지 [kJ]
$F_{h,j}$	: $j$ -방향 확산 플럭스 [ $W/m^2$ ]
$T$	: 온도 [K]
$g$	: 중력가속도 [ $m/s^2$ ]
$h$	: 엔탈피 [kJ/kg]
$p$	: 압력 [Pa]
$q''$	: 열유속 [ $W/m^2$ ]

$t$	: 시간 [s]
$u_i$	: $i$ -방향 속도 [m/s]

#### 그리스 문자

$\rho$	: 밀도 [ $kg/m^3$ ]
$\tau_{ij}$	: 전단응력 텐서 [Pa]

#### 1. 서 론

최근 차량 구매자의 구매 성향은 품질 좋은 차량뿐만 아니라, 값싸고 다양한 차종을 선택하는 방향으로 바뀌고 있다. 이러한 구매자의 구매 성향의 변화에

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-705-8637; fax: +82-2-713-8637

E-mail address: nhur@sogang.ac.kr

따라 최근 상용 차량은 개발 시간 단축 및 다품종, 고품질 생산이 요구되며 이를 위한 생산 라인을 구축하여 소비자의 눈높이에 맞추려 하고 있다. 이러한 생산 라인을 구축하기 위한 생산 라인의 설계 및 제작에 있어, 각각의 공정 특성이 반드시 고려되어야 한다. 이러한 생산 공정 중 차량 도장 공정은 제품의 미관을 높이고 기계적·화학적 성질을 개선시키는 매우 중요한 공정이다. 일반적으로 차량 도장 공정은 주로 전착 도장 공정(electro deposition process)과 스프레이 도장 공정(spray painting process), 도장 건조 공정(paint drying process) 순으로 이루어진다. 이중 도장 건조 공정은 전착 도장 공정 및 스프레이 도장 공정에서 입혀진 도료를 차량 표면에 정착시키기 위한 공정으로, 건조가 제대로 되지 않는 경우 전체 공정의 불량률 초래 할 수 있다. 또한 건조 공정의 불량률은 후속 공정에 문제를 야기하거나, 외관 및 차량의 내구성 저하로 연결되기 때문에 생산성 및 생산 비용은 물론 생산 품질에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 이러한 이유로 생산성 향상 및 공정 개선을 위해 건조 공정에 대한 분석이 반드시 필요하다.

이러한 건조 공정은 건조 방식에 따라 주로 두 가지로 나뉘게 된다. 첫 번째 건조 공정 방식은 복사에 의해 차량을 건조시키는 공정이다. 복사 건조 공정은 건조로 내부에 위치한 복사등과 같은 열원을 이용한 방법으로, 대상물 본연의 향과 색을 보존하는데 유리한 장점을 가지고 있다. 예전부터 이러한 장점을 이유로 복사를 이용한 건조 공정에 대한 연구<sup>(1-5)</sup>들이 많이 수행되고 있다. 하지만 복사에 의한 건조 공정은 상대적으로 많은 에너지 비용과 긴 공정 시간을 가지고 있기 때문에 상용 차량의 생산 라인과 같은 대규모 생산 현장에 적용하기 힘들다는 단점이 있다. 두 번째 건조 공정 방식은 열풍을 건

조로 내부로 송풍하여 대상물을 건조시키는 방법으로 상대적으로 복사에 의한 방법보다 유지 및 관리가 쉽고 생산성이 높은 장점을 가지고 있다. Fig. 1은 열풍에 의한 건조 방식을 도식화 한 그림이다. 실제 공정에 따라 공정 길이의 일부 차이가 있지만, 열풍에 의한 건조 공정 방식은 열풍 건조로(hot air blowing chamber, HAB) 안에서 대부분 건조 대상물을 가열시키고, 냉풍 건조로(cold air blowing chamber, CAB) 안에서 식히는 과정을 수행하면서 도료가 대상물에 정착하도록 한다. 이러한 열풍 건조로 내부의 건조 특성을 분석하기 위해서는 실제 건조 공정과 유사한 작동 조건 하에서, 건조로 내부의 열풍 및 냉풍 단계에 따른 복잡한 유동 분석 및 건조 대상물의 유체-고체의 복합 열전달을 고려해야 한다.

도로 건조 연구와 관련하여 Hong et al.<sup>(6)</sup>은 복사에 의한 Oven 방식과 열풍형 방식의 건조 방법에 대해 전도성 도료의 건조에 대해 실험적인 연구를 수행하여, 전도성 도료의 건조 특성을 도출하였다. Shin et al.<sup>(7)</sup>은 가호사 건조 공정의 건조 시스템의 건조 특성을 파악하기 위해 적절한 건조 모델링을 제시하였으며, 수치해석 연구를 기반으로 다양한 설계 조건에 따라 공정의 건조 성능을 분석하였다. Chun et al.<sup>(8)</sup>은 열풍 건조기의 운전 조건에 따른 변화에 따른 건조 특성에 대해 실험적인 연구를 진행하였으며 운전조건에 따른 열효율변화를 분석하였다. 또한 Avci and Can<sup>(9)</sup>은 열풍건조 방식에 대해 수치해석적으로 연구를 수행하여 고속 제트 방식 노즐을 사용 시 도료에 건조 특성을 연구하였다. 이를 바탕으로 건조 공정에 대한 설계 인자들을 제안하였다.

이러한 기존의 건조 특성에 대한 연구들은 간단한 형상 기반의 연구들이 주를 이루고 있어, 실제 차량과 같은 큰 스케일과 복잡한 형상에 따른 유동 및

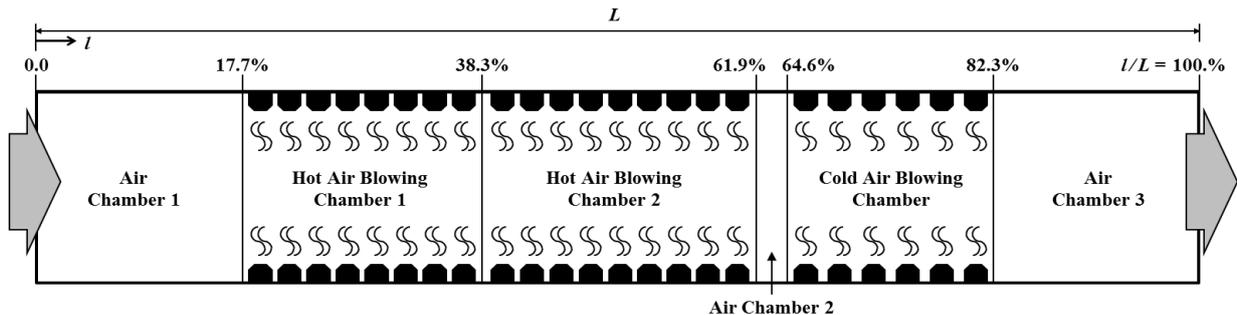


Fig. 1 Schematic of a vehicle paint drying process. Note that a vehicle is passing through the air chambers from left to right.

열전달 특성을 분석하는데 한계가 있다. 또한 실제 건조 공정과 유사하게 도장 대상물의 이동을 고려하면서 건조 시설의 내부 유동 및 건조 특성을 고려하는 연구에 대해서는 국내외적으로 거의 없는 실정이다.

본 연구의 열 및 유동 특성 해석의 근간이 되는 연구로 Park et al.<sup>(10)</sup>은 차량 후드 내에 장착되어 있는 루버핀 라디에이터에 대해 준 미시적(semi-microscopic) 해석을 통해 엔진에서 발생하는 대기로 배출하기 위한 유동 및 열전달 특성을 고려한 수치해석 방법론을 제시하였다. 또한 본 연구의 선행 연구로 Lee et al.<sup>(11)</sup>은 도장 건조 시스템에 대한 연구를 진행하여 차량이 도장 건조 시스템을 통과할 때 시간에 따른 차량 주변의 유동 및 차량 표면의 온도 분포에 따른 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 실제 차량의 건조 특성을 고려하기 위해 복잡한 차량의 3차원 형상을 실제와 같이 모델링하였으며, 차량의 전도 및 대류 열전달을 고려하기 위해 고체-유체 복합 열전달을 해석하였다. 또한 차량의 움직임에 모사하기 위한 방법론들을 제시하였으며, 수치해석 결과와 실험과 비교해 정성적, 정량적으로 타당한 결과를 도출해 냈다. 정립된 수치해석 기법들을 기반으로 건조 취약부에 대한 분석을 수행하여 차량 건조 공정 시 취약부에 대한 개선점에 대해 언급하고 있다.

본 연구에서는 건조 공정 내 유동 및 열전달 특징

을 분석하고 공정의 생산성 향상을 위한 개선을 위해 Lee et al.<sup>(11)</sup>이 도입한 수치해석 방법론들을 기반으로 건조로 내부에 대해 수치해석을 진행하였다. 이러한 수치해석 방법을 기반으로 건조 성능을 평가하기 위해, 추가적으로 정량적으로 건조 성능을 비교하기 위한 방법론을 제시하였다. 또한 특정 작동 조건에서 생산 속도를 증가시킴으로 공정 속도에 대한 분석을 실시하여, 도장 건조의 공정 속도를 최적화 하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 건조 공정 해석을 위한 모델링 및 해석 조건

Fig. 2는 본 연구에서 해석 대상으로 삼은 수치영역 도메인 및 경계조건을 나타낸 것이다. 건조로는 차량의 전장을  $L$ 로 설정하였을 때 건조로의 길이는  $4L$ 로 설정하였다. 차량은 일반적인 경차의 모양을 설정하였으며, 건조로 중앙에 위치시켰다. 차량의 움직임을 모사하기 위해, 건조로 옆면에  $3L$  길이에 걸쳐 움직이는 입구 경계조건을 적용하여 노즐의 상대 움직임을 모사하였다.

Fig. 3은 시간에 따른 노즐의 움직임을 나타낸 그림이다. 건조로 앞에서 나타난 노즐은 시간이 지남에 따라 차량이 있는 방향인 뒤쪽으로 이동하게 되면서 차량의 움직임을 모사하였다. 또한 건조로 내

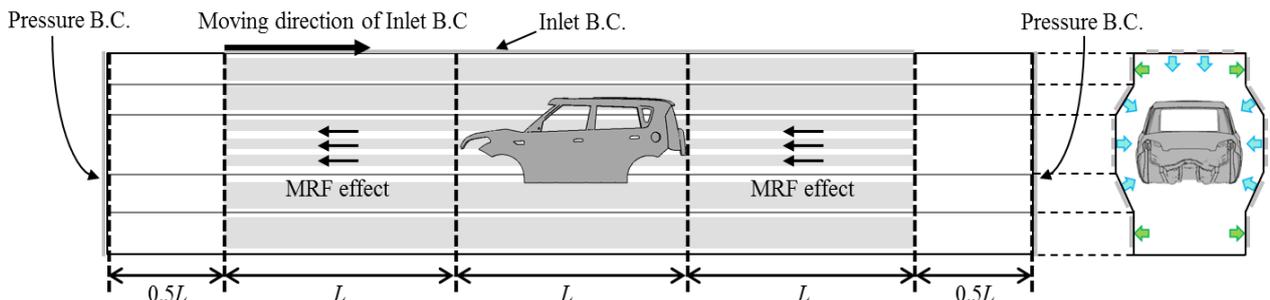


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions for the simulation of a vehicle paint drying process.

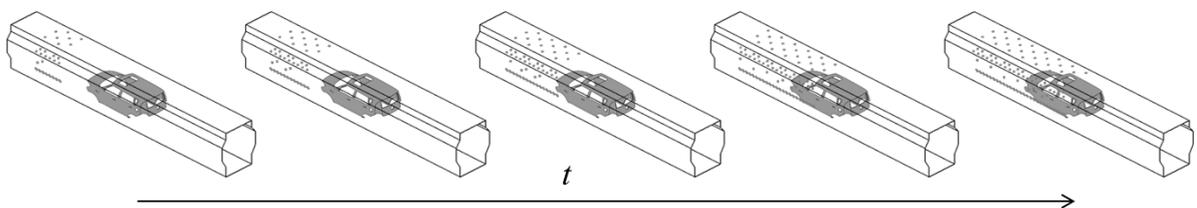


Fig. 3 Time dependent locations of the nozzle to describe the relative motion of a vehicle.

부 유체의 관성에 의한 효과를 고려하기 위해 건조로 내부에 MRF(multiple reference frames) 기법을 사용하였다. 건조로 내 노즐 배치는 천장과 옆면에서부터 급기가 되고, 하단과 상단으로 배기가 되는 방식을 적용하였다. 노즐로 급기되는 유량과 배기구로 배기되는 유량이 서로 동일하게 설정되어 건조로 앞·뒤로 빠져나가는 공기의 양을 최소화 하였다.

건조 성능을 향상시키기 위해 건조로 내부에 향상된 작동 조건을 적용시켜 해석을 수행하였다. 향상된 작동 조건은 기존 공정의 전체 급기 및 배기되는 노즐 풍량을 10% 증가시켰으며 주입되는 열풍의 온도도 10°C 증가시켰다. 이러한 특정 작동 조건을 바탕으로 차량의 공정 속도를 증가시켰을 때, 차량에 공정 속도가 미치는 건조 특성에 대해 분석하였다.

2.2 지배방정식

건조 설비 내부의, 유동 및 열전달 특성을 고려하기 위해 비압축성을 가정한 연속방정식, 운동량보존방정식, 에너지 보존방정식이 사용되었다. 연속방정식, 운동량 보존방정식 그리고 에너지 보존방정식은 다음과 같이 표현된다.<sup>(12)</sup>

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial(p/\rho)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\tau_{ij}/\rho)}{\partial x_j} + g_i \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \tag{2}$$

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

건조로 내부에 복잡한 유동에 의한 난류 효과를 적용하기 위해, Standard *k-ε* 난류 모델이 사용되었다. 위의 보존방정식과 난류 모델을 풀기 위해 상용 CFD 프로그램인 STAR-CD V4.12를 사용하여 해석을 수행하였다. 차량의 복잡한 형상을 고려하기 위해 다면체격자(polyhedral grid)를 사용하여 약 6 백만 개의 격자를 구성하였다. 전체 공정을 모두 모사하기 위해, Xeon 2.26 GHz 96 core를 이용해서 한 케이스 해석에 약 3일의 시간이 소요되었다.

2.3 건조 성능의 정의

건조 공정 시 차량의 건조 성능을 정량적 판단하기 위해, 차량의 각 부분에 받는 열에너지를 비교하였다. 실제 공정에서는 도장 건조 후 도료의 광택정도, 도료의 점성 등을 이용해 도장 공정의 건조 만족도를 평가한다. 하지만 수치해석상에서는 차체의 도료의 두께가 수십 마이크로에 지나지 않아 실제 열전달에 도료의 영향이 무시할 만큼 작다고 가정하여 도료를 무시하였기 때문에 실험상의 지표로는 정량적으로 건조 성능을 예측하기 힘들다. 도료의 건조는 차체에 전달되는 열에너지에 의해 지배적으로 발생한다는 가정 하에 본 연구에서는 열에너지를 이용한 건조 성능 지표를 정의하였다. Fig. 4는 시간에 따라 차량 표면의 열유속 변화를 나타낸 것이다. 그래프의 가로축에서 나타나는 공정무차원 시간( $t^*$ )는 전체 공정시간에 대해 공정 진행 정도를 나타내는 시간으로 다음과 같이 정의 된다.

$$t^* = \frac{t}{t_{max}} \tag{4}$$

여기서  $t_{max}$ 는 전체 건조공정 시간을 의미한다. 도장 건조는 열풍구간에서 차체가 열을 전달 받을 때 진행되게 된다. 따라서 차량이 가열되는  $t_1$ ,  $t_2$ 까지의 시간의 열유속을 미소 면적과 시간에 따라 적분함으로써 차량 표면에서 건조로로 부터 흡수되는 열에너지를 다음과 같이 계산하였다.

$$E = A \int_{t_1}^{t_2} q'' dt \tag{5}$$

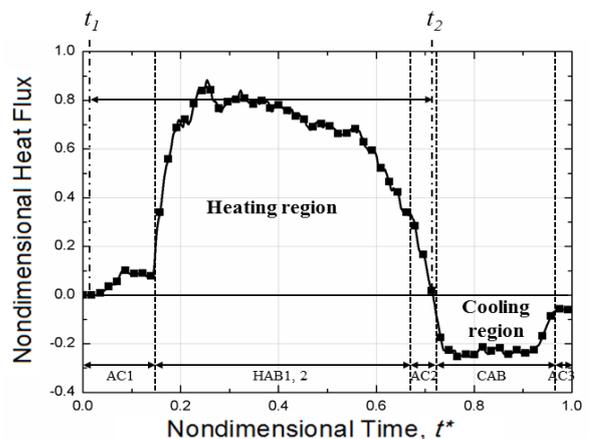


Fig. 4 Time history of heat flux on the surface of a vehicle.

흡수된 열에너지는 공정 시간과 작동 조건에 따라 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 공정상에서 건조에 영향을 주는 열에너지를 근간으로 각 부분에 흡수된 열에너지의 합을 정량적인 건조 지표로 정의하였다. 실제 산업 현장에서는 차체에 가해지는 열에너지를 정량적으로 측정하기 어렵고, 열에너지를 기준으로 한 건조 만족 판단조건이 없기 때문에 본 연구에서는 현 공정에 대한 수치해석을 선행하였다. 현 공정에서의 차량의 각 부분의 열에너지를 구함으로써, 건조 만족 기준을 설정하였다. 이러한 건조 만족 기준을 기반으로 생산성 향상을 위해 향상된 작동조건에서 생산속도를 증가시켰을 때 건조 정도를 흡수된 열에너지를 기준으로 비교하였다.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 건조로 내부의 유동 특징 분석

Fig. 5는 공정시간에 따라 건조로 내부의 속도 및 온도 분포에 대해 공정무차원시간에 따라 나타낸 그림이다. 건조로 내부에서는 천장 노즐뿐만 아니라 좌·우에 많은 슬릿 노즐과 병커 노즐들이 있어

내부에 복잡한 유동 형태가 나타나게 된다. 각 노즐은 차량 외부에 직접적으로 열풍을 분사하게 되어 주로 대류열전달에 의해 열이 건조로에서 차량으로 전달되게 된다. 공정에서 노즐의 영향을 직접적으로 받는 차량 외판의 경우에는 일반적으로 건조가 잘 되는 것으로 알려져 있다. 하지만 내판의 경우에는 노즐에 의해 내부로 유입되는 공기의 양이 적기 때문에, 대부분 외판에서의 열에 의한 전도 열전달로 건조가 이루어지게 된다. 건조로 내부의 유동 특징은 건조로 상단에 위치한 노즐로부터 차량의 내부로 뜨거운 공기가 유입되게 되며, 온도차에 의한 부력에 의해 뜨거운 공기가 떠오르면서 공기는 건조로 양쪽 입구를 향하게 된다. 하지만 상단 루프의 노즐 및 배기구의 영향으로 인해 뜨거워진 공기는 시스템 안에 계속적으로 순환하게 되며, 이는 연속적인 공정을 수행해야 하는 생산 라인에서 에너지 절감 및 오염 물질을 회수 하는 방법으로 사용된다.

이러한 건조로 내부의 유동 및 열전달의 수치해석 결과를 정합성을 확보하기 위해 본 연구에서는 실제 공정에서의 실험 데이터와 수치해석 결과를 비교하였다. Fig. 6은 차량 내부의 A필라 부분의 무차원온도를 비교한 그림이다. 이러한 무차원 온도

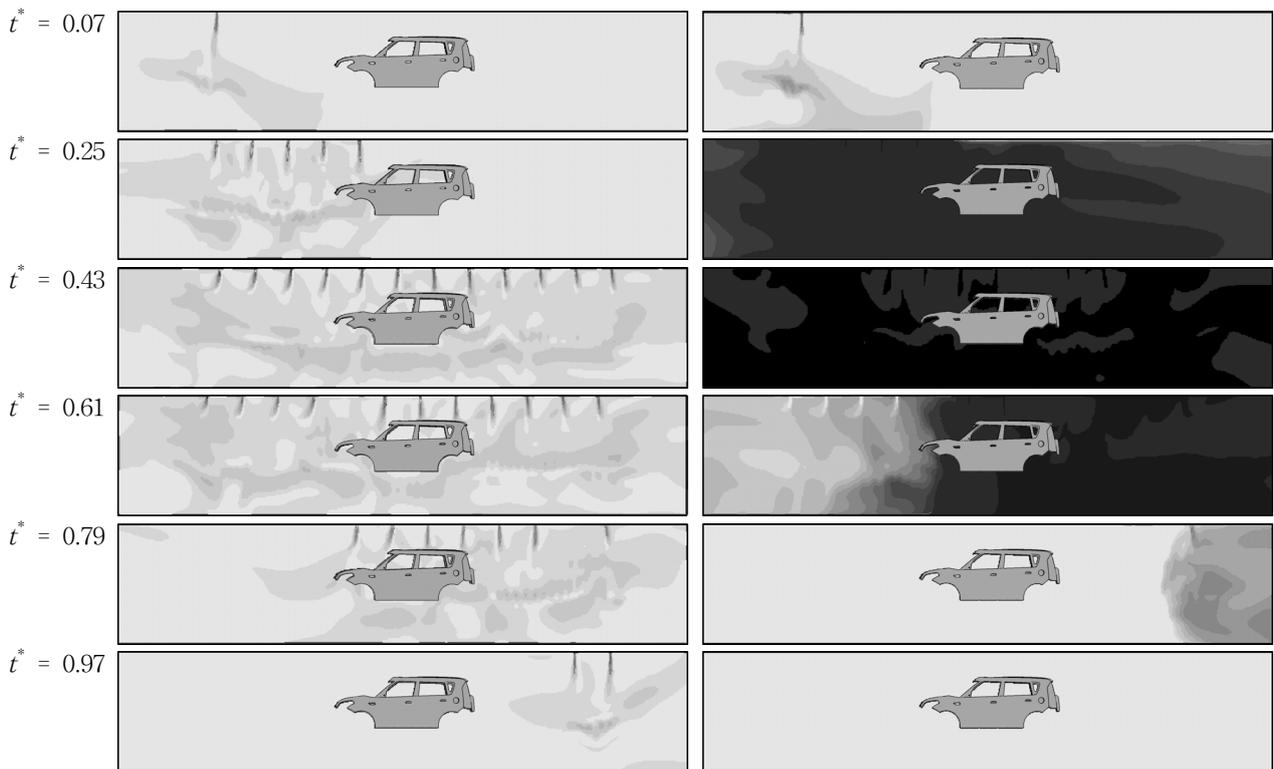


Fig. 5 Velocity magnitude(left) and temperature(right) distribution in vertical section of a drying chamber.

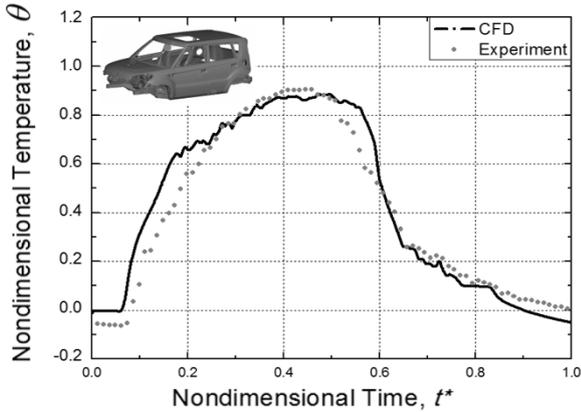


Fig. 6 Comparison of temperature inside an interior space between numerical results and experimental data.

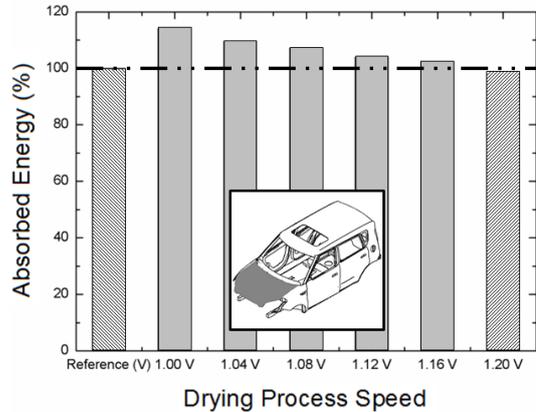
(θ)는 다음과 같은 관계로 계산된다.

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_{ref} - T_0} \quad (6)$$

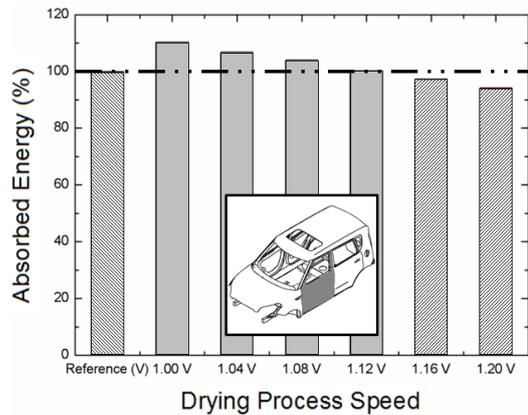
여기서  $T_0$ 는 공정 초기 온도,  $T_{ref}$ 는 기준 온도이다. 수치해석의 경우 초기 온도를 약간 높게 설정하였으나, 실험결과와 비교하여서 큰 차이가 없이 같은 경향으로 온도 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 공정무차원시간 0.2초 이전에 온도가 약간 상향예측 되는 구간의 이유로는 본 연구에서는 도료의 증발을 고려하지 않았고 다른 실제 공정과 다른 여러 가지 영향들로 인해 일부 상향 예측하는 것으로 사료된다. 하지만 전반적인 온도 분포를 통해 우리는 수치해석 결과에 대한 타당성을 확보할 수 있었다.

### 3.2 생산형 향상을 위한 생산속도에 따른 건조 성능 비교

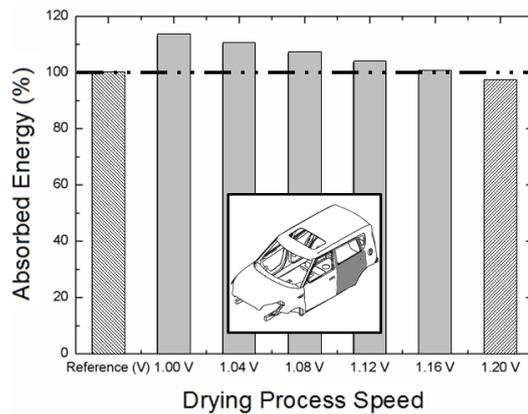
자동차 건조 공정의 생산성 향상을 높이기 위해서는 본 연구에서는 공정 속도에 따른 건조 성능을 비교하였다. 이를 위해 현 공정보다 노즐에 의해 급·배기되는 풍량을 10% 향상시켰으며 노즐의 유입 온도는 10°C 상승시킨 작동조건을 사용하였다. 이와 같은 조건은 현재 건조로에서 작동할 수 있는 최대의 조건을 가정한 수치이다. 향상된 작동 조건을 적용한 경우 생산 속도를 4%씩 증가시켜 흡수되는 열에너지량을 비교하였다. Fig. 7은 적용된 공정 조건으로 건조 공정을 수행하였을 때 차량의 외관 각 부분



(a) hood



(b) front door



(c) rear door

Fig. 7 Total absorbed heating energy in outer parts as a vehicle passed through hot air blowing chamber for various speeds of drying process.

의 흡수된 열에너지를 비교한 그래프이다. 측정된 부분은 전반적인 건조 특성을 나타내는 후드부와 앞문, 그리고 뒷문 부분이다. 차량 윗부분에는 천장 노즐이 직접적으로 건조를 하기 때문에 다른 영역

보다 건조가 잘 되어, 주로 건조가 취약한 세부분의 건조 정도를 가지고 도장 공정의 건조 정도를 판단하게 되었다. 각 그래프의 가장 좌측 열에너지는 현 공정에서의 결과를 나타낸 것이다. 이를 기준으로 공정 속도가 동일할 때부터 4%씩 증가시키면서 차량에 전달되는 열에너지를 비교 하였다. 결과로, 현 공정과 동일한 정도의 열에너지를 받는 경우, 후드부는 공정 속도가 120% 미만인 경우, 앞문의 경우에는 116% 미만, 뒷문에 경우에는 120% 미만 향상시켰을 경우로 나타났다. 세 부분 모두 풍량이나 온도 조건이 상승하여 열에너지를 많이 받게 되지만 공정 속도가 증가함에 따라 열풍 건조로에서 건조되는 시간이 짧아지기 때문에 열에너지가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 현 건조로에서의 최대 건조 작동조건을 사용한다면, 약 116% 미만의 공정 속도 향상 시에도 현 공정과 동일 이상의 건조 성능을 예상할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 최적화된 공정 속도는 현 공정의 116% 정도로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 차량 도장 건조 공정 내 유동 및 열 전달 특징을 분석하고 공정속도를 최적화하기 위한 수치해석 연구를 수행하였다. 이를 위해 Lee et al.<sup>(11)</sup>의 선행 연구로부터 축적된 수치해석 기법을 바탕으로, 건조로 내부의 차량의 이동 모사 및 유체-고체 복합열전달 특성을 분석하였다. 정량적으로 건조 성능을 평가하기 위해 열풍에 의해 차량의 각 부분에 흡수된 열에너지를 기준을 설정하였다. 이와 같은 수치해석 결과의 정합성을 검증하기 위해 공정 시간에 따른 온도를 실험 데이터와 비교해 타당한 결과를 입증하였다. 건조 공정 향상을 위해, 현 건조 시설의 최대 작동 조건(풍량 : 10% 향상, 온도 : 10°C 향상)시 공정 속도에 따른 열에너지 변화에 대한 수치해석을 수행하여 약 116%의 최대 공정 속도를 제시하였다. 이와 같은 수치해석 기법을 근간으로 자동차 도장 건조 공정에서 다양한 작동 조건에 따른 건조 성능 비교를 통해, 에너지 비용과 생산 속도를 최적화 하는 연구에 기반 연구로 본 연구가 활용 될 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한

국연구재단의 지원을 받은 '다중현상 CFD 연구센터(ERC)'의 과제(No. 20090083510) 일환으로 수행된 기아자동차(주)와의 산학협동연구임.

#### 참고문헌

1. Dhib, R., 2007, Infrared drying : from process modeling to advanced process control, *Drying Technology*, Vol. 25, No. 1, pp. 97-105.
2. Dufour, P., Blance, D., Toure, Y., and Laurent, P., 2004, Infrared drying process of an experimental water painting model predictive control, *Drying Technology*, Vol. 22, No. 1/2, pp. 269-284.
3. Blanc, D., Laurent, P., Gerard, J. F., and Andrieu, J., 1997, Experimental infrared drying study of a model water-based epoxy-amine painting coated on iron support, *Drying technology*, Vol. 15, No. 6/8, pp. 1787-1799.
4. Parrout, J. M., Dostie, M., Navarri, P., Andrieu, J., and Mujumdar, A. S., 1997, Heat and mass transfer relationship in combined infrared and convective drying, *Drying Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 399-425.
5. Choi, C. J., Jang J. H., Kim, C., and Kim, M. Y., 2010, Numerical investigation of the effect of IR heating on drying mechanism in a tumble dryer, *Transactions of the KSME B*, Vol. 34, No. 3, pp. 219-228.
6. Hong, S.-C., Lee, J. H. and Jung, G. Y., 2009, A study on the drying characteristics of conductive ink by oven drying system and the hot-air system, *International Conference on Air-Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea*, pp. 1429-1434.
7. Shin, K. H., Jang, Y. S., Kim, S. Y., and Jung, P. S., 1998, The characteristics of the hot air drying of sizing yarn with heat and mass transfer, *The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Summer Annual Conference*, pp. 27-32.
8. Chun, W.-P., Lee, K.-W., Park, K.-H., Lee, K.-J., and Kim, H., 2001, Influence of thermal efficiency on operating condition chang in hot

- air dryer, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Summer Annual Conference, pp. 1511-1516.
9. Avci, A. and Can, M., 1999, The analysis of the drying process on unsteady forced convection in thin film of ink, Applied Thermal Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 641-657.
  10. Park, J. T., Hur, N., Choi, B. K., and Ahn, B. J., 2006, Development of a semi-microscopic numerical analysis method for an automotive heat exchanger, Proceedings of The Fourth National Congress on Fluids Engineering, pp. 983-986.
  11. Lee, S. J., Choi, J., Hur, N., and Kim, H., 2011, A Numerical study for improving performance on paint drying system of a vehicle, Journal of Korea Society for Computational Fluid Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 75-80.
  12. CD-adapco group, 2008, STAR-CD Methodology, V412.