

반응표면기법을 이용한 자동세차기 노즐시스템의 최적설계

최영석* · 김성** · 김선창***

Design Optimization of the Air Nozzle System in the Automatic Car Wash Machine Using Response Surface Method

Young-Seok Choi*, Sung Kim**, Seon-Chang Kim***

Keywords : Design Optimization(최적설계), Response Surface Method(반응표면기법), Air Nozzle System(노즐시스템)

Abstract

In the present study, the air jet flow characteristics of the dryer in the automatic car wash machine were numerically predicted by commercial CFD code. The effects of the dryer shape and the nozzle width variations on the performance of the automatic car wash machine were discussed. To optimize the geometric parameters, the response surface method(RSM) with CFD was used. Predicted jet velocity distributions for the optimized geometry were compared with experimental data and the comparisons show generally good agreements. Also, the performance of the dryer was improved with the optimized results.

1. 서론

1914년 미국의 디트로이트에서 처음 시작된 자동세차시스템은 현재 사용의 편리성 및 신속성과 더불어 점점 더 저렴한 비용으로 가능하게 되어 전 세계적으로 널리 사용되고 있다. 자동세차 과정 중에서 마지막 과정인 자동세차기의 건조시스템은 세정제와 왁스세차 후의 물기를 제거하기 위한 건조과정으로써 슬릿노즐 slit nozzle) 형상의 건조기를 통하여 고속의 제트를 발생시켜서 차량의 표면에 붙어 있는 물방울을 물리적으로 제거하는 역할을 한다. 차량표면에 물기를 원활하게 제거하기 위해서는 강력한 제트유동의 발생과 더불어, 가능하면 슬릿노즐을 통해서 나오는 제트유동 속도가 균일한 속도 분포를 가져야 한다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서는 노즐부의 유로 형상에 대한 설계가 매우 중요하다.

본 연구에서는 현재 자동세차시스템에 사용하고 있는 건조시스템에 대하여 속도장 측정을 통하여 문제점을 알아보았다. 또한 제작된 건조기의 3차원 모델링의 자료를 통해 얻은 유동영역에 대해 CFD를 활용하여 내부유동장 및 제트유동을 분석하였다. 차량의 물기를 완전히 제거할 수 있는 최적의 건조기 형상을 설계하기 위하여 건조기 성능을 정의하고, 이에 영향을 미치는 변수를 지정하여 반응표면기법(Response Surface Method)[1]을 사용하여 최적 변수값을 도출하였다.

2. 자동세차기 형상변수

현재 사용되고 있는 자동세차기 건조시스템에는 고압의 유동을 발생하기 위한 블로워가 슬릿노즐이 장착되어 있는 건조기 몸체와 분리되어 장착되고 서로 가변형 덕트로 연결되어있는 분리형 건조시스템과, 블로워를 건조기와 일체형으로 결합하여 덕트의 연결을 제거한 일체형 건조시스템이 있다. 본 연구에서는 분리형 건조시스템을 대상으로 하였으며, 분리형건조기 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 차량표면의 물기를 제거하는 건조기는 고속제트유동을 위한 슬릿노즐이 건조기의 하단에 위치하고 있고 측면 상단에는 고압유동을 발생하는 블로워가 위치하며 가변형의 덕트로 연결되어 있다. 블로워에서 발생한 유동은 가변 덕트 및 건조기 몸체를 지나 건조기 하단의 슬릿노즐을 통하여 제트유동을 이루게 된다. 슬릿노즐은 차량을 따라 이송되며, 여기서 발생한 제트 유동이 차량표면과 충돌하여 물기를 제거하게 된다.

유동을 발생시키는 블로워의 성능이 물론 매우 중요하나, 건조기의 유로형상이나 제트유동이 나오는 슬릿노즐의 폭도 중요한 설계변수가 된다[2]. 제트유동에 영향을 미칠 수 있다고 판단되는 슬릿노즐 및 건조기 유로형상의 치수를 Fig. 2에 나타내었다. 슬릿노즐의 양쪽 폭의 치수는 입구쪽에 가까운 부분을 W1, 끝부분을 W2로 지정하였다. 슬릿노즐의 전체 길이는 L1으로 지정하였고, 건조기 전체 몸체길이는 L2, 상단의 직선부 길이는 L3, 기타 건조기 높이와 관계된 변수는 H1, H2, H3로 나타내었다.

L1, L2의 경우는 차량의 폭과 연관되어 있으므로 변화를 줄 수 있는 범위가 한정되어 있어서 최적화를 위한 변수선정에서는 제외하였으며, 높이의 경우도 제한되어 있어서 H1, H2도 고정하였다.

* 한국생산기술연구원 열유체시스템팀, yschoi@kitech.re.kr

** 한양대학교대학원 한국생산기술연구원, ks2928@kitech.re.kr

*** 한국생산기술연구원 열유체시스템팀, kimsc@kitech.re.kr

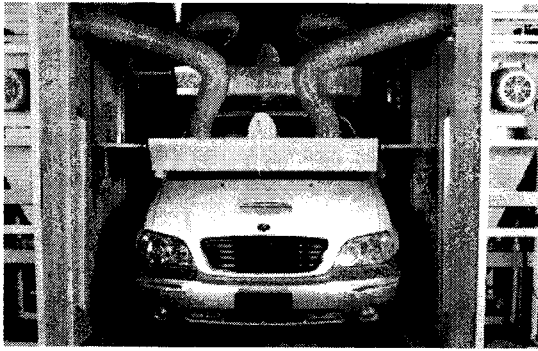


Fig. 1 Photo of an automatic car wash machine

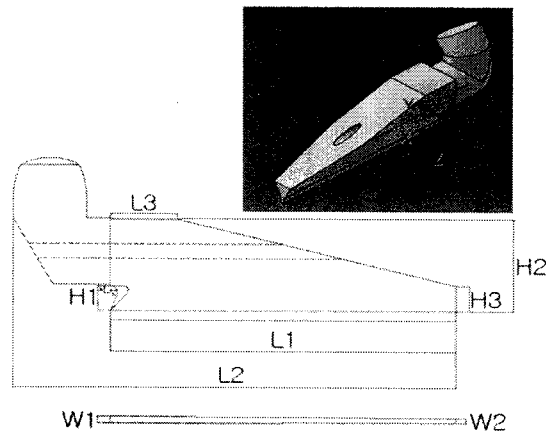


Fig. 2 Geometry of original nozzle system

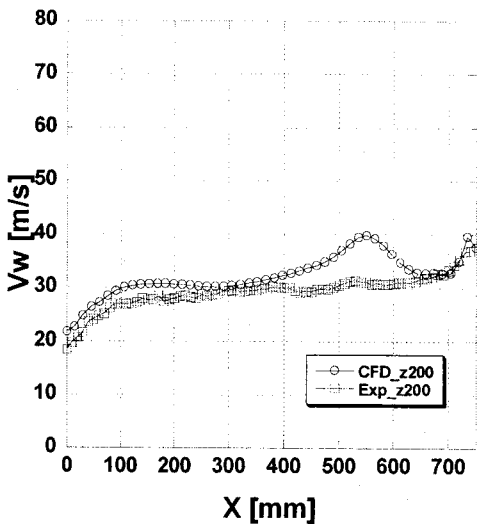


Fig. 3 Comparison of jet velocity distributions along the slit nozzle ($z=200\text{mm}$)

Fig. 2에서 제트유동이 나오는 방향을 Z축으로 정의하였다.

3. 자동세차기 노즐시스템의 최적설계

3.1 설계 요구조건 및 기존 노즐 성능 분석

건조시스템의 핵심기능은 슬릿노즐에서 나오는 제트유동이 차량표면을 따라 이동하면서 차량표면의 물기를 제거하는 것이다. 이때 건조시스템은 차량 표면에서 약 200mm 정도 떨어진 위치에서 이송된다. 차량표면의 물기를 완전히 제거하려면 차량에

Table 1 Design set of RSM

	W1/W2	H3	L3	Vt_m	Ut	VL_m	UL
m1	1	40	100	29.56	0.9837	24.25	0.9938
m2	1.5	40	100	34.29	0.9944	30.52	0.9952
m3	1	80	100	29.36	0.9789	24.25	0.9918
m4	1.5	80	100	34.21	0.9915	30.57	0.9936
m5	1	40	300	29.80	0.9739	24.21	0.9933
m6	1.5	40	300	34.31	0.9937	30.75	0.9945
m7	1	80	300	29.56	0.9837	24.25	0.9938
m8	1.5	80	300	34.07	0.9906	30.79	0.9954
m9	1	60	200	29.78	0.9736	24.14	0.9869
m10	1.5	60	200	34.54	0.9943	30.98	0.9931
m11	1.25	40	200	32.33	0.9892	27.95	0.9929
m12	1.25	80	200	32.43	0.9873	27.75	0.9943
m13	1.25	60	100	32.27	0.9886	27.88	0.9931
m14	1.25	60	300	32.49	0.9862	28.05	0.9915
m15	1.25	60	200	32.64	0.9885	27.99	0.9921

충돌하는 제트속도가 경험적으로 약 30m/s 속도 이상을 유지하면서 제트유동이 균일한 속도분포를 가져야 한다.

제트유동이 약하면 근본적으로 차량 표면에 물기를 제거하기 어렵게 되고, 제트유동이 균일하지 않은 경우에도 차량표면에 물기가 남아 띠를 형성하여 건조성능이 현저히 떨어지게 된다. 또한 차량의 특성상 측면부($x=0\text{mm}-150\text{mm}$)는 차량 중앙부분에 비하여 곡면을 형성하고 있어 노즐 제트출구에서 떨어진 거리도 커지게 되고 이로 인해 물기 제거에 어려움이 있어 상대적으로 유동속도가 커야 하며 속도의 균일성이 더욱 요구되고 있다.

기존 노즐 시스템에 대하여 슬릿노즐에서 200mm 정도 떨어진 차량표면 예상 지점에서의 제트유동을 측정하여 이를 CFD와 비교하여 Fig.3에 나타내었다. 차량 측면부에서의 속도가 전체 평균속도에 비하여 작으며 균일성도 좋지 않음을 알 수 있다. 수치해석 결과는 비교적 실험 값과 비슷한 결과를 보이고 있다.

3.2 수치해석 방법

본 연구에서의 수치해석은 건조기의 3D형상을 정의하여 상용해석프로그램인 CFX-10을 사용하였다. 건조기의 내부 유동장 및 제트유동의 특성을 알아보기 위해 비압축성 난류유동해석을 위하여 3차원 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치해석 계산에 사용한 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 되었으며, 이산화 기법으로는 2차 이상의 정확도를 가지는 고휘상도기법 (high resolution scheme)을 사용하였다. 난류유동의 해석을 위해 사용한 난류모델로는 유동박리형상 등에 적절한 전단이송 (shear stress transport) $k-\omega$ 모델을 사용하였다. 경계조건으로는 건조기 입구부에 유량 35CMM을 주었고 출구부에는 균일한 상태의 대기압을 주어 해석을 하였다. 건조기 내부 유동장에 대하여는 비정렬 격자계 (unstructured grid system)를 사용하여 격자를 구성하였으며, 노즐 출구의 제트 유동영역은 정렬격자를 사용하여 수렴성을 향상시켰다. 전체영역에서 약 27만개의 격자점을 사용하였으며, 작동유체는 25℃의 공기를 사용하였다.

3.3 반응표면기법

반응표면기법이란 하나 또는 그 이상의 반응변수와 정량적인 실험변수 또는 인자 집합과의 관계를 규명하는데 사용하는 실험 설계방법으로 반응변수를 최적화 할 수 있는 인자의 조건을 찾는 데 목적이 있다. Fig. 2에 나타나 있는 여러 형상변수 중에서 제트유동에 영향을 미치는 주요 변수를 W1/W2와 H3, L4로 정

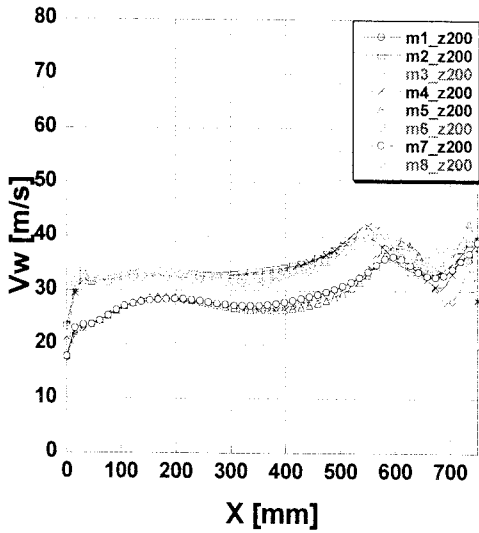


Fig. 4 Comparison of jet velocity distributions along the slit nozzle (Case m1~m8, z=200mm)

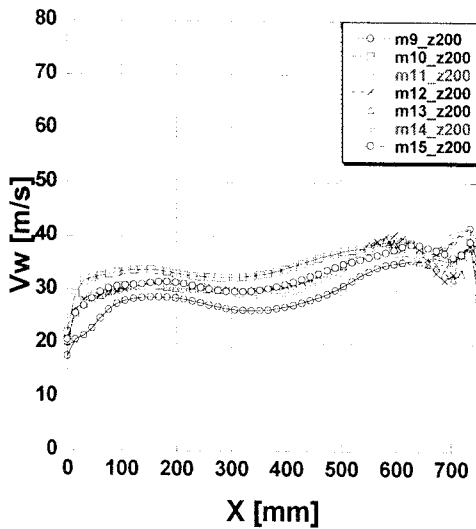


Fig. 5 Comparison of jet velocity distributions along the slit nozzle (Case m9~m15, z=200mm)

하였다. 3가지 주요인자로 표면 중심합성법(central composite)을 사용하여 20개의 수치해석 실험조건을 생성하였다. Table 1에는 반응면기법을 적용한 구체적인 실험조건을 보여주고 있다. 3개의 인자로 구성되는 반응면기법의 실험횟수는 20회인데, 그중 6개 항목은 실험오차를 측정하기위해 같은 실험조건으로 구성 되어있다. 전산수치해석에서는 실제실험에서 발생하는 실험오차가 없다고 가정하여 16~20번까지의 반복 실험조건을 생략하였다.

노즐시스템의 성능을 나타내는 반응값으로는 두 가지를 선정 하였다. 첫 번째는 z=200mm 위치에서의 평균속도의 크기(Vt_m)이고, 두 번째는 같은 z 위치에서의 속도의 균일성(Ut)이다. 또한 자동차의 측면부의 중요성을 감안하여, 특정구간(x=0mm-150mm)에서의 평균속도크기(VL_m)와 균일성(UL)을 추가하였다. 여기서 속도분포의 균일성[3]은 식(1)과 같이 정의하였다.

$$Uniformity = \frac{\overline{V_{m,area}}}{\overline{V_{m,mass}}} \quad (1)$$

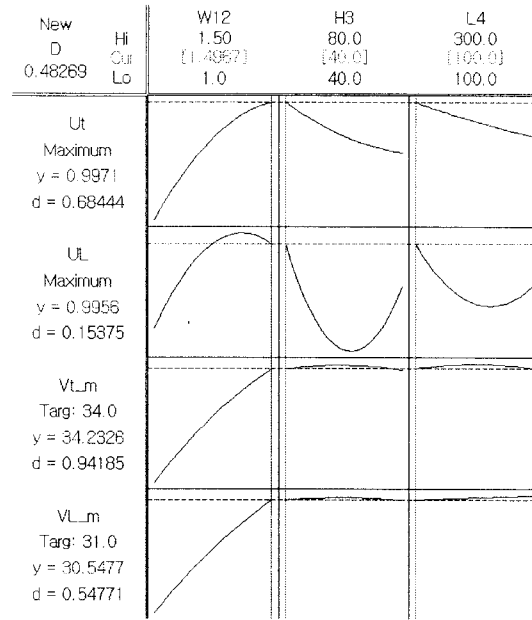


Fig. 6 Plot for response optimization

여기서 $\overline{V_{m,area}}$ 는 면적평균, $\overline{V_{m,mass}}$ 는 질량평균을 나타낸다.

각 실험설계에 대하여 수치해석을 수행하여 차량표면위치에서의 평균속도와 균일성은 Table 1에 추가하여 나타내었다. 또한 각 실험설계에 대한 제트유동속도분포를 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. 설계변수의 변화에 따라 제트 유동속도분포도 큰 차이를 보이게 됨을 알 수 있다.

3.4 반응 최적화

본 연구대상과 같이 반응값이 여러 개가 존재하는 다중반응값의 최적화는 각 반응값의 호감도(desirability)에 따라서 결정된다. 즉 어느 반응값의 호감도가 다른 반응값에 비하여 낮다면 낮은 반응값의 최적값은 덜 중요하게 생각한다. 다중 반응값은 각 반응값의 호감도를 묶은 전체 호감도가 최적이 되게 한다.

자동제차기 노즐시스템의 경우 선정한 4가지 반응값의 중요도는 명확히 구별하기 어려운 한계가 있으며, 본 연구에서는 중요도(weighting importance)를 같게 놓고 최적화를 수행하였다.

Fig. 6에 최적화된 결과를 표시하였다. 여기서 D는 전체 반응값의 호감도이고 d는 부분적인 각 반응값의 호감도이며, 둘 다 1에 가까울수록 반응값에 만족함을 나타낸다. Vt_m과 Ut는 다소 높으나 VL_m과 UL은 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이는 반응표면기법으로 찾아낸 여러 반응값을 만족시키는 변수들이 Vt_m과 Ut의 반응값에는 만족하나 VL_m와 UL은 상대적으로 만족도가 작다는 것이다. 반응표면기법으로 찾아낸 최적의 변수값은 W12는 1.5, H3는 40, L4는 100이다. 이 최적의 변수값은 m2와 동일한 형상변수를 가지며 m2에 대한 수치해석값이 최적의 변수값으로 계산된 값이다.

Fig. 7에 각 반응값의 반응표면에 대한 중첩 영역을 나타내었다. 실선은 반응값의 최소값을 나타내며 점선은 반응값의 최고값을 나타낸다. 그림에서 최소값과 최고값은 우리가 허용하는 반응값의 변화를 입력으로 주게 되어 있으며, 이 경우에 최적값은 각 반응값이 모두 만족하는 영역에 존재하게 되며 그림에서는 L4가 100인 경우에 H3는 40 근처 W12는 1.5 근처에 중첩된 영역이 존재하게 된다.

반응표면기법을 사용하여 찾아낸 최적 변수값에 해당하는 형

Overlaid Contour Plot of Ut, UL, Vt_m, VL_m

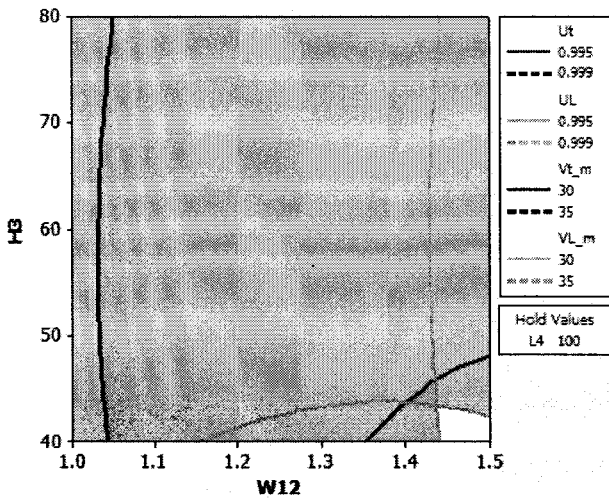


Fig. 7 Region of the optimum found by overlaying Ut, UL, Vt_m and VL_m response surface.

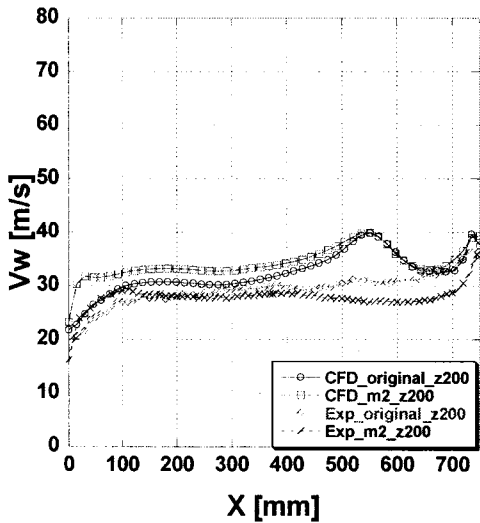


Fig. 8 Averaged velocity of original nozzle system and optimized nozzle system

상으로 자동세차기 건조시스템을 제작하여, 기존의 건조시스템에서 수행한 실험을 반복하여 수행하였다. Fig. 8에 기존의 노즐시스템과 최적화된 노즐시스템에 대한 실험결과와 수치해석결과를 비교하여 나타내었다. 수치해석 결과는 최적화 과정을 통하

Table 2 Calculated and measured performance parameters

		Vt_m	VL_m	Ut	UL
Original	CFD	32.28	26.61	0.9866	0.9916
	Exp	29.02	25.48	0.9922	0.9871
Optimized	CFD	34.29	30.51	0.9944	0.9952
	Exp	27.63	26.74	0.9959	0.9881

여 균일성과 평균속도가 향상된 결과를 보여주고 있다. 하지만, 실험결과와 비교하여 균일도는 전반적으로 향상되었으나 평균속도는 기존시스템에 비하여 낮게 측정되었다. Table 2에 평균속도와 균일도를 비교하여 나타내었다. 실험값과 수치해석값이 평균속도에 차이를 보이고 있는 이유는 유량조건의 차이 때문이다. 실제 노즐시스템은 수치계산에서와 같이 유량조건을 정확하게 맞추어 실험을 수행한 것이 아니라, 블로워와 결합되어 작동되기 때문에 블로워와 노즐시스템의 결합조건에 따라 블로워의 운전점이 바뀌게 되어 작동유량도 다르게 된다. 따라서 보다 정확한 비교를 위해서는 작동유량점에 대한 정확한 보정이 필요하다.

4. 결론

반응표면기법을 사용한 자동세차기 건조기의 노즐시스템 최적화 과정을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 건조기 노즐시스템의 형상변수의 차이에 따라 제트유동의 평균속도와 균일성이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 건조기의 형상변수가 제트유동에 많은 영향을 주고 있음을 나타낸다.
- 2) 반응표면기법을 이용하여 형상변수에 대한 최적값을 도출하였다.
- 3) 최적화된 형상변수에 대한 해석결과 및 시험결과는 기존 시스템에 비하여 향상된 성능을 보여주고 있다.

참고문헌

- [1] Myers, R. H. and Montgomery, D.C., 2001, Response Surface Methodology, Wiley Interscience Publication..
- [2] Yue, Z. 1999, "Air jet velocity decay in ventilation applications," ISRN KTH/IT/M-48-SE
- [3] Zangeneh, M. 1993, "Inviscid-viscous interaction method of 3D inverse design of centrifugal impellers," ASME Paper No. 93-GT-103.