식기세척기 내부 유동 분포 분석을 위한 유동가시화 기법 개발

김아란^{*} · 함정윤^{**} · 조진호^{*} · 조위삼^{*} · 고한서[†]

Development of Flow Visualization Technique for Analysis of Flow Distribution inside Dishwasher

Ah Ran Kim, Jung Yoon Hahm, Jin Ho Cho, Wisam Jo and Han Seo Ko

Abstract. A flow visualization technique was developed to analyze flow distribution inside a dishwasher in this study. Then, a new design plan was proposed to improve the efficiency of the dishwasher by the analyzed results and it was confirmed experimentally by the developed technique. Gas flow fields inside a drying duct of a tub for a drying process was investigated by a developed PIV (Particle Image Velocimetry) and a CFD (Computational Fluid Dynamics) method. Also, the flow visualization technique was developed for the liquid flow field of a rotor-arm system to propose the improved design idea. Also, interactions between liquid and gas were observed around the rotor-arm system. The two-phase flow was modified to the liquid flow field because laser sheets are refracted when pass through the two-phase flow. Thus, the flow visualization techniques was developed in this study to measure the instantaneous flow velocities in the liquid quantitatively.

Key Words: Dishwasher(식기세척기), Flow Visualization(유동가시화), PIV(입자영상속도계)

1. 서 론

식기세척기는 1960년대 초부터 미국에서 보급이 시작 되었지만, 식기의 형상이 여러 가지이기 때문에 식기를 넣는 방법에 따른 성능의 차이가 생긴다. 또 근본적으로 에너지에 대한 규제 및 이에 대응하기 위한 식기세척기의 에너지 성능이 구매에도 큰 요소로 작용하고 있어 적은 에너지 사용으로 세척성능과 건조성능의 향상을 위해 지속적인 연구와 개발이 필요하다. 이처럼 식기세척기는 사용자 목적에 따른 다양한 관점의 개발이 중요하고, 적은 양의 세척수를 사용하면서 낮은 전기사용료를 가지는 효율이 뛰어난 제품을 위한 연구가 필요하다. 또한 다른 가전제품에 비해 보급률이 낮은 편이기 때문에 여러 기업에서도 지속적인 개발 경쟁을 하고 있다.

PIV 기법은 순간 속도장을 측정할 수 있다는 점에서 이상유동장(two phase flow)의 속도 측정에 적합한 방법

으로 고려될 수 있지만 기체와 액체의 굴절률 차이로 인해 야기되는 평면 레이저광의 분광과 각 상의 경계에서 발생하는 2차 반사 등의 문제를 해결하기 위해 Brorder와 Somefeld는 형광입자를 액상에 주입하고 카메라 렌즈 앞에 광학 Filter를 설치함으로써 기포에 의한 레이저의 난 반사를 제거하였다⁽¹⁾. Hassan, Gui 등은 배경조명으로 적색 계열의 LED를 조사하고 광학 Filter를 카메라에 부착하는 방식의 Shadow PIV 기법을 제시하였다^(2,3). Lindken 과 Merzkirch⁽⁴⁾는 입자와 기포의 크기가 서로 다르다는 점에 착안하여 영상분리를 위한 디지털 마스크(digital mask)기법을 제안하였고, 입자의 변위를 추적하기 위하여 MQD(minimum quadratic difference)기법을 사용하였다. 고효율 식기세척기를 개발하기 위해서는 식기세척기 내부 유동의 형태를 파악하고 해석 능력을 갖추는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 Kim은 식기세척기 주요 부위에서의 유동 현상을 수치적으로 해석하여 유동 유로의 특성 및 그에 따른 성능 변화를 파악함으로써 식기세척기 설계를 위한 유체역학적 자료를 해석적으로 제시하였다⁽⁵⁾. 건조과정에 있어서도 저에너지의 고효율 건조 성능을 만족하는 식기세척기의 개발에 필요한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로, Lee는 건조 성능과 건조에

[†] 성균관대학교 기계공학부

E-mail : hanseoko@skku.edu

^{*} 성균관대학교 대학원 기계공학과

^{**} 삼성전자(주)

관계된 인자인 가열 행균 온도, Blower 풍량, 건조시간과의 상관 관계를 짓는 표면과 주위 유동과의 물질 및 열 전달식과 습공기 상태량을 이용하여 규명하였다⁶⁾.

본 연구에서는 식기세척기의 내부 유동 분포 분석을 위한 PIV 기법을 개발하여 건조 덕트 내부 유동 분포와 Rotor arm system의 하단 노즐에서 토출되는 세척수의 속도장 패턴을 분석하고, 분석된 자료와 CFD 해석을 기초로 하여 식기세척기의 개선된 설계안을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 식기세척기 유동장 측정

식기세척기가 가지는 건조 과정 중 건조 덕트 내부 유동 분포와 세척 과정 중 Rotor arm system 하단 노즐의 Hole 별 속도 벡터 파악을 위한 PIV 실험을 진행하였다. 실험 진행에 앞서 레이저 평면광의 입사와 추적 입자에 의한 레이저 산란 촬영을 위해 불투명한 플라스틱 및 금속재질의 몸체를 빛의 투과성이 좋은 아크릴 재질로 Fig. 1과 같이 교체하였다.

식기세척기 Tub은 Fig. 2와 같이 전면부, 우측면부, 좌측면부, 상측면부를 가시화할 수 있도록 제작하였다. Tub 내부 Rotor arm system에서 분사되는 세척수가 대기 중으로 분사 될 때 물줄기가 레이저 광원을 굴절시키므로 식기세척기 Tub 내부에 사각 수조를 제작하고, 그 안에 물을 채워 단상유동으로 변경할 수 있도록 구성하였다. 실험 영역은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 Rotor arm system의 하단노즐이다.

Fig. 1. Flow route in drying duct

Fig. 2. Fabrication for PIV experiment

2.2 실험영역 별 실험장치 구성

PIV 실험장치는 532nm의 파장을 갖는 Nd-YAG Rod pulse laser를 광원으로 이용하였고, 변위 정보를 획득할 디지털 CCD 카메라(해상도 512x512), 계산용 소프트웨어, 건조 과정 실험과 세척 과정 실험에 적합한 추적입자를 사용하였다. 작동유체가 공기인 건조 덕트 내부 유동 분포 분석을 위한 실험의 추적 입자로 올리브오일(직경 1mm)을 이용하였고, Atomizer를 이용하여 입자를 투입하였다. 또 작동유체가 물인 Rotor arm system의 하단 노즐 속도장 파악을 위한 추적 입자로 Rhodamine B로 코팅된 형광입자(직경 15mm)를 유동장에 주입하여 사용하였다. 이 형광입자는 550nm의 빛에 의해 여기(excitation)되어 580nm 파장의 빛을 방출(emission)하게 되므로, 레이저 광원의 빛을 차단하고 형광입자로부터 방출된 빛만을 통과시키는 광학 필터를 카메라 전면부에 설치하였다. 이 광학 필터는 유체의 가장자리에서 발생하는 레이저 분광과 반사현상을 차단하는 역할을 하고, 디지털 CCD 카메라로 촬영되는 영상에 영향을 주지 않으므로 유체 유동장의 크기와 형상을 명확히 측정할 수 있게 한다. 건조과정에서의 유동 분포 실험을 위한 PIV system은 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3. Rotor arm system - experimental region of washing process

Fig. 4. Schematic diagram of experimental setup for drying process

(a)

Fig. 5. Velocity vector by PIV for top region of drying duct : (a) original image, (b) left region, (c) middle region and (d) right region

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 건조 과정의 건조 덕트

건조 덕트 내부 유동 분포 실험 결과를 통해 작동유체가 건조 덕트 내부 필터를 효율적으로 활용하지 못하고, 일부분만으로 흘러나가는 유동 집중 현상이 발생함을 확인할 수 있었다 (Fig. 5). 작동유체가 건조 덕트로 유입되기 시작하는 상단부의 좌측 영역은 0.1 m/s 이하로 유입되는 속도가 매우 낮았고 그 중에서도 하부 쪽은 작동유체가 흡입되는 Fan 방향과 반대방향으로 유동이 올라오는 경향을 보였다. 이는 속도가 낮은 부분에서 높은 부분으로 이동하는 경향으로 상단 좌측 영역 하단은 Fan의 영향이 거의 없음을 알 수 있었다(Fig. 5 (b)). 상단부 구간의 우측 영역은 0.1 - 0.6 m/s 로 좌측 영역보다는 약간 높은 속도를 보였고, 전 구간에서 작동유체가 흡입되는 Fan 방향으로 흐르는 것을 알 수 있었다(Fig. 5 (c)). 또한 좌측과 우측 영역은 건조 덕트 내부에 장착되어 있는 Filter의 영향으로 유동 저항이 발생하기 때문에 건조 덕트 벽면부의 속도가 조금 더 높은 경향을 보였다. 건조 덕트로 유입되어 Filter를 통과한 상단부의 중간 영역은 유체가 흡입되는 Fan 방향으로 유동이 발생하며, Fan의 위치와 가까워지는 중간 영역 하단부의 속도가 상단부의 0.5 m/s 에서 2 m/s 로 높아졌음을 알 수 있다. 그리고

상단부 좌측 영역보다 우측 영역의 속도가 조금 더 높았던 영향을 받아 중간 영역 우측부의 속도가 좌측부보다 0.2 m/s 정도 더 높다는 것을 확인하였다(Fig. 5 (d)).

Fig. 6. Velocity vector by PIV for bottom region of drying duct : (a) original image and (b) left region

Filter를 통과하여 유체가 흡입되는 Fan의 직접적인 영향을 받는 하단부의 좌측 영역의 유동은 Fig. 6과 같이 건조 덕트에서 가장 빠른 속도장을 보인다. Fan으로 유입된 유동장은 대부분 하단의 Fan 방향으로 진입하지만 일부 유동은 좌측 하단 영역을 순환하게 되는 Dead zone이 형성된다. 또한 하단부는 상단부에서 유입되는 다소 높은 속도의 영향으로 건조 덕트 좌측 벽면의 유속이 우측 벽면보다 높으며, 우측의 유속은 미약하게 나타남을 알 수 있었다.

(a)

(b)

Fig. 7. Improved model of series-type drying duct : (a) flow route and (b) PIV results for velocity vectors of bottom left region

건조효율을 향상시키기 위한 방안으로 실제 유체 이동 경로와 Filter를 통과하는 경로를 확인한 PIV 실험 결과에 의해 외부 형상을 변경하지 않고, Fig. 7 (a)와 같이 내부 유동 경로를 기존의 병렬 구조에서 직렬 구조로 변경하였다. Filter는 기존 하나의 크기를 1/4 크기로 등분하여 4곳에 설치하였고, 구조상 Filter가 효율적으로 이용될 것으로 예상하여 Filter 크기를 기존 모델보다 50% 정도 감소시켰다. Fig. 7 (b)의 PIV 실험 결과를 통해 볼 수 있듯이 필터의 사용 면적이 증가된 것을 확인할 수 있었고, 기존안에 비해 효율이 높아져 비용도 절감시킬 수 있었다.

3.2 세척 과정의 Rotor arm system

Rotor arm system의 하단 노즐 별 PIV 실험 결과는 Table 1과 같다. 노즐 홀은 각각 다른 각도로 설계되어 있

으며, 각각의 노즐에서 측정된 속도벡터를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 다른 홀들에 비해 크기가 큰 노즐은 상대적으로 속도가 낮게 측정되었다. 또한, 사각수조 속에서 토출되는 세척수의 속도벡터를 측정하였지만, 수심의 깊이가 0.04m로 얇기 때문에 수압에 의한 세척수의 속도 차이는 크지 않음을 수치해석에 의해 유추해 낼 수 있었다.

Fig. 8. Experimental results of velocity vector for bottom nozzle of current rotor arm system

적은 양의 세척수로 세척력을 향상시키기 위해 Rotor arm system의 하단 노즐의 개선안을 제시하고 PIV 실험을 수행하였다. 개선안으로 액체가 토출되는 노즐의 직경을 3mm에서 2.5mm로 줄였으며 세척수가 식기에 골고루 도달할 수 있도록 노즐의 각도를 조절하였다. PIV 실험 수행 결과 Fig. 9와 같이 개선된 모델의 속도가 기존 모델보다 상대적으로 증가하였음을 확인할 수 있었으며, Table 1과 같이 회전력을 고려한 상대 속도의 증가를 볼 수 있었다. 속도뿐만 아니라 최외곽 홀의 각도를 변경하였으므로 세척 범위가 보다 넓어진 것을 알 수 있었다.

Fig. 9. Experimental results of velocity vector for bottom nozzle of improved rotor arm system

Table 1. Velocity vectors for bottom nozzles

Hole No.	1	2	3	4	5	6	7
Current model $\frac{V_{max}}{V_{avg}}$	1.8	2.0	1.8	2.0	1.9	1.7	2.0
Improved model $\frac{V_{max}}{V_{avg}}$	2.6	2.4	2.0	-	2.2	2.0	2.4

4. 결 론

본 연구에서는 식기세척기 내부 유동가시화 실험을 위하여 가시화용 식기세척기를 제작하였고 건조 과정과 세척 과정 실험에 적합한 실험 장치를 구성하였다. 식기세척기 건조 덕트 내부 유동 분포를 PIV 기법으로 도출할 수 있었고, 유동에 영향을 미치지 못하는 건조 덕트 외부 형상 및 내부 형상을 변경하여 보다 효율적인 설계안을 제시하였다.

이상유동의 유동장을 단상유동으로 변경할 수 있도록 구조를 개선하여 Rotor arm system의 하단노즐에서 토출되는 세척수의 속도벡터 패턴 파악을 위한 실험을 수행할 수 있었고, 노즐 홀별 속도벡터 실험 결과를 얻을 수 있었으며, 노즐의 크기와 각도를 조절한 개선안을 제시하여 세척 효율이 향상되었음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 성균관대학교 미래가전연구센터의 지원으로 수행되었음.(S-2010-1534-000)

참고문헌

- 1) D. Broder and M. Sommerfeld, 2001, "Experimental Studies of the Hydrodynamics in a Bubble Column by an Imaging PIV/PTV-System", Proc. 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry, pp.1089.1-12.
- 2) Y. Hassan, 2002, "PIV Measurements and Analysis of Multiphase Bubbly Flows", Proc. 10th

- International Symposium on Flow Visualization, F0455.1-9.
- 3) L. Gui, L. Lindken and W. Merzkirch, 1997, "Phase-Separated PIV Measurements of the Flow Around Systems of Bubbles Rising in Water", ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting.
- 4) R. Lindken and W. Merzkirch, 2002, "A Novel PIV Technique for Measurements in Multiphase Flows and Its Application to Two-Phase Bubbly Flows", Experiments in Fluids, Vol. 33, pp.814-825.
- 5) S. H. Kim, 2007, "Numerical Studies on the Analysis and Enhancement of Flow Characteristics inside the Dish Washer", Ajou University, Master's Thesis.
- 6) J. H. Lee, 2007, "A Study on the Parameter to Improve the Drying Performance of the Dishwasher", Pusan National University, Master's Thesis.
- 7) R. D. Keane and R. J. Adrian, 1992, "Theory of cross-correlation analysis of PIV images", Applied Scientific Research, Vol. 49, No. 3, pp.191-215.
- 8) R. J. Adrian, 1991, "Particle-Image Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, pp.261-304.
- 9) M. Raffel, C. E. Willert and J. Kompenhans, 2007, "Particle image Velocimetry A Practical Guide", Springer, 2nd edition.
- 10) Y. H. Kim, "A Study on PIV Measurement by Correlation Method", Korea Maritime University, Master's Thesis.
- 11) H. M. Koo, W. S. Choi, B. J. Oh and J. K. Lee, 1998, "An Experimental Study on the Cross-Flow in Air conditioning Devices: Study on the influence of Some Basic Design Parameters", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp.438-443.