

# 열 및 물질 제어 연구실

고한서<sup>†</sup>  
성균관대학교 기계공학부

## 1. 서론

열 및 물질 제어 실험실은 2001년에 개설 후 유체역학 및 열전달의 현상을 열유동 가시화 실험을 통해 분석하는 연구들을 지속적으로 수행해오고 있으며, 다양한 현상의 분석을 위해 가시화 기법 개발 및 수치해석을 병행하고 있다. 본 실험실은 유동 가시화 실험을 위해 Particle Image Velocimetry (PIV), Digital Speckle System, Mach-Zehnder Interferometry, Phase Doppler 등을 보유하고 있으며, 온도 분포 가시화 실험을 위해 Infrared (IR) Camera와 Thermochromic Liquid Crystal (TLC) 등을 사용하고 있다. 현재 본 실험실은 박사과정생 6명과 석사과정생 7명으로 구성되어 있으며, 첨단 유동가시화 기술 개발을 위한 창의적인 국가 과제뿐만 아니라 가시화 실험기법을 필요로 하는 다양한 기업체 과제들도 활발히 수행함으로써 실제 산업 현장에서 사용되는 유동 분석 기술 개발을 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 본 연구실에서 수행하는 주요 과제는 다음과 같다. 1) 3차원 밀도 분포 분석을 위한 레이저 간섭계와 디지털 스펙클 토모그래피의 동시 측정에 관한 연구 2) 정전기적 액적의 토출 메커니즘 분석 3) 복합 수질 정화 장치 개발 4) 이온풍 기초 및 응용 연구 5) 집적형 하이브리드 구동장치 내부 유동 분석을 통한 성능 개선 등과 같은 다양한 분야의 연구들을 수행하고 있다.

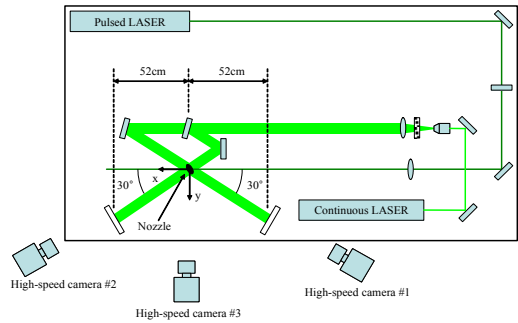


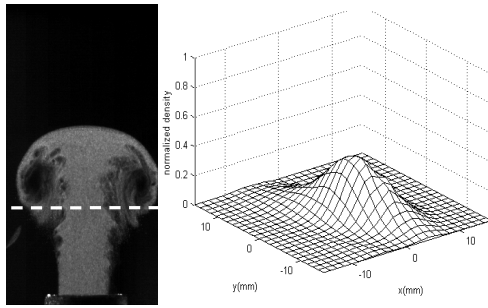
Fig. 1. 디지털 스펙클 시스템 및 PIV 광학 세팅

## 2. 연구 내용 소개

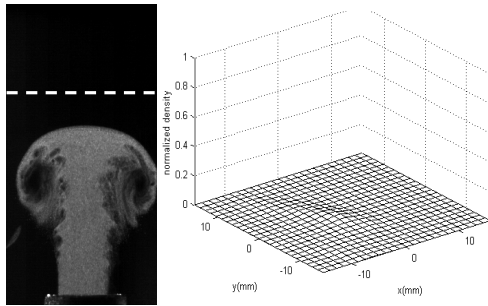
### 2.1 디지털 스펙클 토모그래피와 입자 영상 유속계에 의한 밀도장 및 속도장 동시 측정에 관한 연구

고속으로 분출되는 이산화탄소 유동의 속도장과 밀도장을 동시에 측정하기 위하여 Pulsed Nd:YAG Laser와 Continuous Nd:YAG Laser, 그리고 3대의 고속카메라를 이용하여 디지털 스펙클 시스템과 입자 영상 유속계 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 유동장이 비대칭 비정상이므로 토모그래피를 사용하여 스펙클 이동거리로부터 밀도장을 재건하였고, 2/15,000초 간격으로 얻어진 영상으로부터 상호상관법에 의해 속도장을 계산하였다. 노즐이 분사된 후 29/15,000초와 31/15,000초가 지났을 때 노즐로부터 9.1mm와 18.1mm 떨어진 지점의 상대 밀도장을 Fig. 2에서 보여주고 있다. Fig. 3은 동시에 얻어진 영상으로부터 계산된 29/15,000초와 31/15,000초 시점에서의 속도장을 나타내고 있다. 본 연구를 통하여 초고속 비대칭 비정상 유동장에서 밀도장과 속도장의 동시 재건이 가능함을 알 수 있었다.

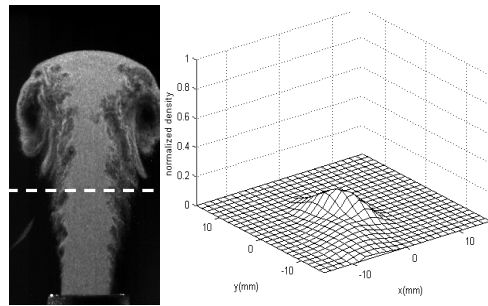
<sup>†</sup> School of Mechanical Engineering,  
Sungkyunkwan University  
E-mail : hanseoko@skku.edu



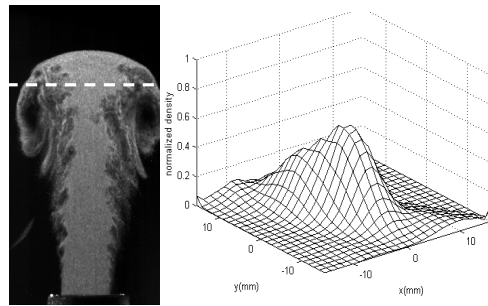
(a) 29/15,000 second at 9.1mm



(b) 29/15,000 second at 18.1mm

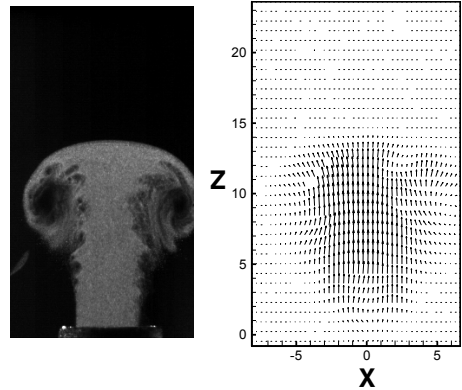


(c) 31/15,000 second at 9.1mm

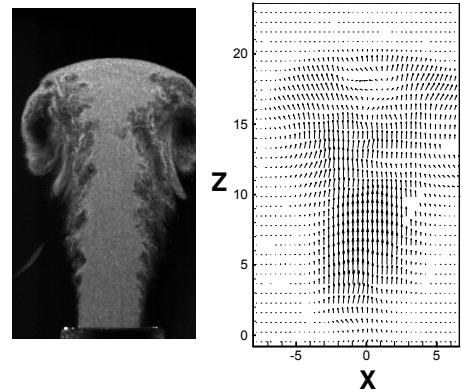


(d) 31/15,000 second at 18.1mm

Fig. 2. 고속 CO<sub>2</sub> 유동에서의 시간, 공간에 따른 밀도 분포



(a) 29/15,000 second

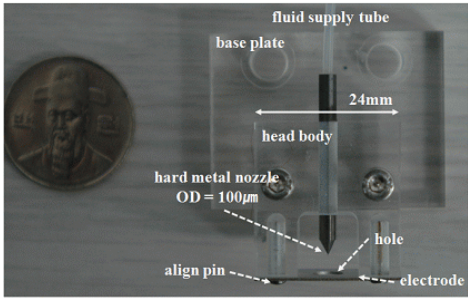


(b) 31/15,000 second

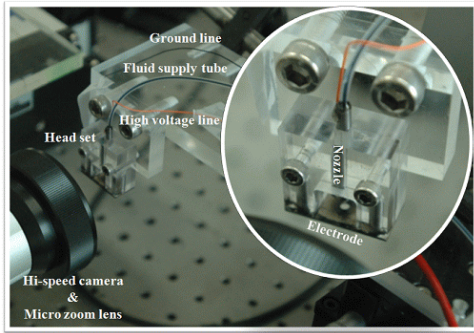
Fig. 3. 고속 CO<sub>2</sub> 유동에서 측정된 PIV 이미지 및 유동장

### 2.2 정전기적 액적의 토출 메커니즘 분석

향후 다양한 분야에서의 실제적인 활용을 위해 노즐과 전극이 하나의 몸체로 구성된 일체형 구조를 가지는 전기수력학 (Electrohydrodynamic; EHD) 제트 (Fig. 4)를 설계하여 제작하였다. 전기수력학 제트 싱글 헤드는 초경 정밀 노즐, 액체 공급 관, 구멍이 뚫린 전극과 이 부품들의 위치를 정밀하게 고정시켜주는 바디로 구성되어 있다. 전극의 경우 액적의 형성 및 토출을 위해 충분한 크기를 가지고 있으며 형성된 액적이 대상 물체에 도달하도록 하기 위해 정 중앙에 구멍을 설치하여 통과하도록 하였다. 전기수력학 제트 싱글 헤드는 정밀한 위치 제어 및 토출 현상의 정확도를 높이기 위하여 정밀 가공된 초경 노즐을 사용하였으며, 전기수력학 분무 특성상 노즐 외경 보다 훨씬 작은 수  $\mu\text{m}$  크기의



(a) Head set part



(b) Head system

Fig. 4. 정밀 메탈 노즐을 이용한 실험 세팅

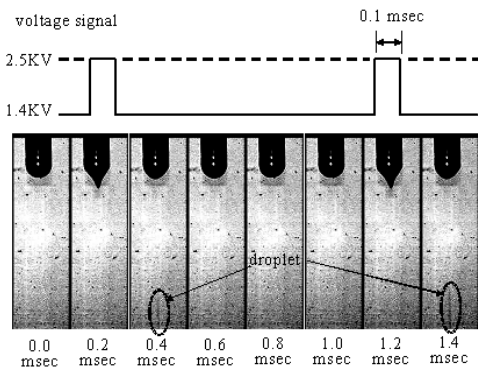


Fig. 5. EHD jet에서의 Drop-on-demand 토출 현상

액적 토출도 가능하다. 또한 반복된 토출로 인한 노즐의 오염을 방지하고자 테플론 재질로 코팅하여 소수성 특성을 가지도록 하였다.

실제 정전기장 잉크젯 헤드로서의 가능성을 파악하기 위해 Fig. 5에서 보는 것과 같이 drop-on-demand 실험을 수행하였다. Drop-on-demand 방식의 토출은 원하는 순간에만 액적을 토출하는 것으로서 잉크젯 헤드분야에서 필히 요구되는 성능 중 하

나이다. 이를 위해 1.4 kV의 직류 전압으로 액체의 메니스커스를 긴장시키고 원하는 순간에 액적을 토출하기 위해 1.1 kV의 구형과 교류 전압을 추가하여 실험하였다. 따라서 낮은 전압이 1.4 kV, 높은 전압이 2.5 kV에 이르는 파형을 형성하고 있다. 이러한 현상을 정량적으로 분석하기 위해서는 다양한 계측법을 사용한다. 특히 유량 측정은 매우 다양한 방법으로 수행할 수 있다. 그 중 가시화를 통한 유량 측정 방법은 노즐에 맺히는 meniscus의 형태 및 토출되는 방향까지 동시에 관측할 수 있기 때문에 매우 효율적인 분석이 가능하다. 하지만 2차원적인 가시화기법으로는 확대칭 형상이 아닌 토출 형태에서의 계측이 힘들기 때문에 3차원 가시화 기법이 사용되어야 한다. 현재까지 3차원 가시화 기법을 이용한 액적 재건에 관한 연구가 활발하게 진행되어왔다. 그러나 현재 연구되어온 가시화기법으로는 각각도 Shadowgraphic image를 통해 재건할 경우, 보이지 않는 부분에 대한 재건오차 보정이 힘들기 때문에 토출 현상에 대한 정확한 부피를 예측하기 어렵다. 또한 재건 시간이 매우 오래 걸리기 때문에 실시간으로 분석하기에는 한계가 있다. 이 문제점들을 보완하기 위해 본 연구실에서는 SMLOS (Shadowgraphic Multiplicative Line Of Sight) estimation과 타원 추정법을 이용한 3차원 재건을 수행하였다.

SMLOS estimation은 Shadowgraphic 이미지와 MLOS estimation을 접목한 기술이며, 원리는 MLOS와 매우 흡사하다. MLOS estimation은 Mapping function을 통해 각 Projection image에 해당하는 좌표값을 얻고 연동하여 Non-zero voxel을 추정한다.

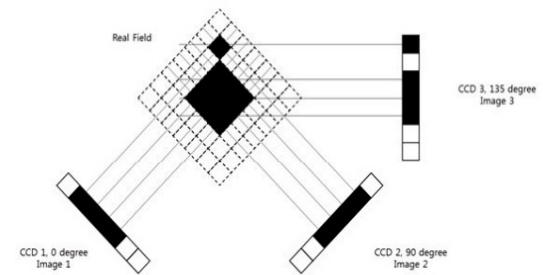


Fig. 6. SMLOS 기법의 원리

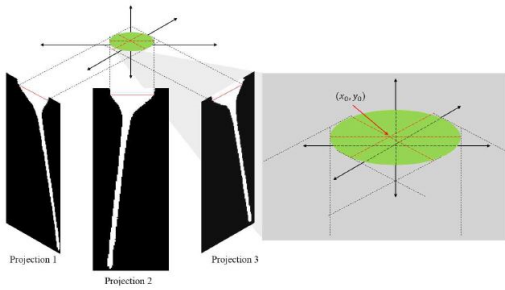


Fig. 7. 타원 추정법의 원리

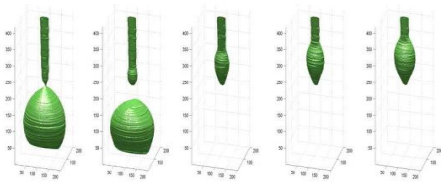


Fig. 8. 시간에 따라 노즐로부터 토출되는 액적의 3차원 재건 결과

Fig. 6에서 보이듯이 실험을 통해 얻은 Shadowgraphic image를 Projection data로 설정하여 MLOS에 적용하였다. 이 방법은 액적의 형태를 3차원화하는 재건 시간이 매우 빠르기 때문에 실시간 분석에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

타원 추정법은 Fig. 7에서 보이듯이 다각도의 Shadowgraphic image를 타원 형태의 정사영 데이터로 변경하여 형상을 추정하는 방법이다. 이 방법은 재건시간이 매우 빠르기 때문에 실시간 분석에 적합하며, 액적 형상의 절단면이 대부분 타원 형상이기 때문에 실제 형상과 큰 차이가 없다는 것이 큰 장점이다. 본 연구실은 이 방법을 이용하여 액적 토출에 대한 3차원 분석을 진행하였다. 노즐에서 토출되는 액적에 대해 3대의 초고속 카메라를 이용하여 다각도 shadowgraphic image를 구한 뒤 타원 추정법을 통해 3차원 재건을 수행하였다. Fig. 8에서 보이듯이 재건 결과값이 매우 매끄러울 뿐만 아니라 매우 빠른 속도로 재건이 되기 때문에 토출 현상에 대한 실시간 분석이 가능해진다. 또한, micro-syringe pump에서 야기되는 유량과 비교했을 때, 약 5% 미만의 오차를 보임으로 해당 방법에 대한 유량 측정의 신뢰성을 확인하였다.

외부 환경적 요인에 의한 내부 유동장 변화를

분석하는 것 또한 매우 중요하다. 하지만 광학을 이용한 열유동 계측 관련 많은 실험에서 왜곡 현상에 의한 오차가 발생한다. 왜곡 현상은 빛이 다른 매질을 만날 경우 굴절하는 특성으로 인해 발생하며, 이 문제를 해결하기 위해 액적 표면에서 굴절에 의한 왜곡 현상을 보정하여 액적 내부 유동 분석 결과에 대한 신뢰성을 높이는 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되었다. 본 연구에서는 축 대칭형 액적에 대한 굴절 보정을 수행하는 보편화하고 전반적인 개념에 대해 정리하였다. 굴절 보정 방법에서 가장 핵심적인 부분은 굴절 벡터를 추출하는 것이다. 이 벡터를 구하기 위해서는 프로젝션 벡터와 접선 벡터를 구해야 한다. 그 후 Snell의 법칙을 통해 방법에 대한 증명을 수행하고 왜곡된 거리를 얻어 보정을 진행한다. 이 전반적인 내용에 대한 증명을 시뮬레이션을 통해 수행하고, 실제 액적 내부 속도 분포 분석 실험에 적용하였다. 증명된 방법을 이용하여 노즐에서 토출되는 액적의 내부 유동장을 가시화하였다. 사용된 노즐의 직경은 2mm이고, 액적 생성을 위해 Ethanol을 사용하였으며, 상대굴절률은 1.3614이었다. 또한 PIV (Particle image Velocimetry)기법을 통해 유동장을 가시화하기 위해 사용된 액적 내 입자 크기는 15mm이고, 연속광 레이저인 Ar-ion 레이저를 사용하였으며, 고전압 공급 장치를 통해 노즐에 고전압을 공급하여 액적 내 유동을 야기하였다. 그 후 고속카메라를 사용하여 Fig. 9에서 보이듯이 입자의 움직임을 촬영하고 보정하였다. 2kV를 공급한 상태에서 액적 내 입자의 이미지를 얻었고 Fig. 10과 같이 액적 내 유동장을 보정하였다.

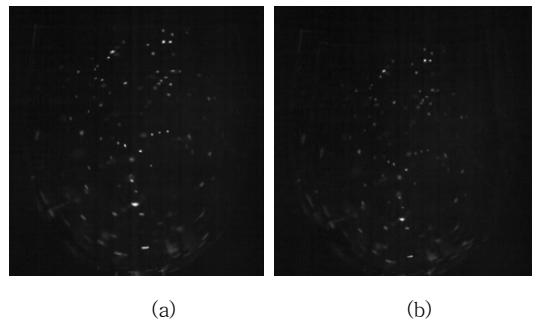


Fig. 9. 액적 내부 입자 촬영 이미지 (a) 굴절된 이미지 (b) 굴절 보정이 된 이미지



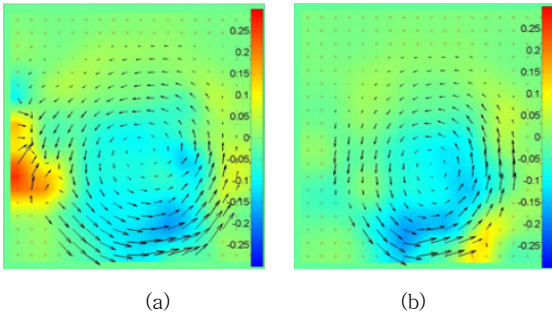


Fig. 10. 액적 내부 유동장 (a) 굴절된 유동장 (b) 굴절 보정이 된 유동장

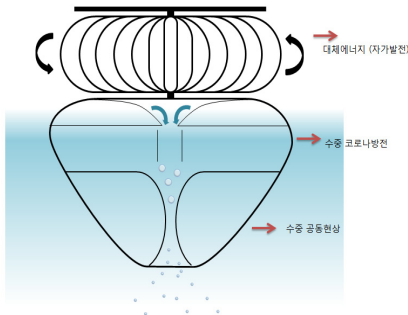


Fig. 11. 복합 수질 정화 장치 개념도 및 원리

보이는 것과 같이 액적 내 입자가 반시계 방향으로 회전하고 있으며, 굴절 보정을 수행하지 않았을 때 액적표면 근처에서 경향에 어긋나는 유동을 관찰할 수 있었다. 하지만 굴절 보정을 수행했을 때, Vorticity가 생기는 위치가 바뀌는 것을 볼 수 있었고, 왜곡 보정이 됨으로써 유동이 경향에 맞게 원활하게 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 굴절 보정법의 신뢰성을 증명했기 때문에 보정된 결과 값이 실제 내부 Vorticity의 위치라고 볼 수 있다.

### 23 복합 수질 정화 장치 개발

수중에 설치된 전극 사이에 전압이 인가되면 전계가 발생하고 주변 물 및 전해질 분자가 큰 영향을 받는다. 우선 분극(polarization) 현상에 따라 발생한 양전하의 원자핵과 음전하의 전자는 반대방향으로 전기력(Coulombic force)을 받는다. 전압이 계속 증가하면 어느 순간 원자핵의 양이온과 전자의 음이온으로 분리되어 전기방전(electric discharge)이 발생한다. 전계세기, 전극형상, 주위환경에 따

라 다양하게 나타나는 전기방전 현상 중에서 전극 표면의 국부적 전계집중에 의해 나타나는 코로나(corona) 현상은 유기체의 절연파괴 과정의 초기 상태에서 완전 절연파괴에 이르지 못하고 국부적인 영역에서 지속적으로 양이온과 전자를 발생시킨다. 최근 코로나 발생장치는 전자장비 냉각, 전기집진장치, 전착 도장, 공기정화기, 정전기 제거, 오존 발생기, 반도체 제조공정(dry etching, sputtering, ion implantation) 등에 유용하고 다양하게 활용되고 있다. 본 연구의 목적은 물속 코로나 방전에 대한 기초 연구와 이를 통한 수질정화 장치의 개발에 있다.

본 연구에서 계획중인 수질정화장치는 Fig. 11과 같은 형태이다. 맨 위쪽은 대체에너지를 통한 구동에너지 공급을 위한 구조이다. 수질 정화장치가 호수, 강 등에서 사용될 때, 전기에너지를 꾸준히 공급받기 어렵기 때문에 대체에너지를 통한 구동에너지 공급이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 태양열 및 풍력 발전기 일체형 수질정화장치를 개발하고 두 번째 단계에서 공급받은 에너지를 통해 물속 코로나 방전을 시행한다. 세 번째 단계로, 수중펌프를 작동시키며 그에 따라 발생한 버블 유동을 벤츄리 노즐을 통해 오염 지역에 분사시킨다. 벤츄리노즐에서의 공동현상으로 인하여 많은 양의 수산화 라디칼이 생성될 것이며, 유체 유동의 강한 난류와 모멘텀에 의해 오염지역 전역에서 수질정화 현상이 야기된다. 본 연구에서 제시하는 수질정화장치의 장점과 독창성은 다음과 같다. 첫째, 코로나 방전은 에너지 효율이 매우 높으며, 움직이는 기계구조물에 의하지 않고 수질 정화에 효과적인 유체 유동을 만들어낸다. 둘째로는, 코로나를 발생시키고 그 이온들을 전기장을 이용해 가속시키기 위하여 매크로 스케일에서는 매우 높은 전압이 필요하지만 작은 스케일에서는 필요한 전압의 정도가 완화될 수 있다는 점이다. 이를 통해 에너지 효율이 극대화 되며, 물속 유기물과의 표면 마찰력을 증가시켜 reaction rate을 증가시킬 수 있다. 셋째, 벤츄리 노즐을 이용한 공동현상으로 에너지 효율 및 난류 모멘텀을 극대화 시킬 수 있다. 이 때, 수중코로나 방전을 통해 얻은 미세기포의 영향으로 종래보다 훨씬 낮은 펌핑 압력에서 공동현상을 발생시킴으로써 에너지효율과 정화효율을 극대화시

키는 방법을 사용한다. 넷째, 대체에너지를 이용한 복합 발전기를 탑재함으로써, 구동에 필요한 모든 파워를 자체적으로 공급할 수 있다.

## 24 이온풍 기초 및 응용 연구

이온풍이란 전극에 고전압이 가해질 때 발생하는 코로나 방전을 통해 발생한 공기 유동을 말하며, 코로나풍이라고도 부른다. 본 연구실에서는 이온풍에 대한 기초 연구와 더불어 국소 단열 및 소형 방열 기구 개발에 응용하였다.

기존 논문 연구와 이론연구를 통해 코로나 현상의 전기적 원리 및 특성을 분석하였고 전기적 해석 모델을 새롭게 개발하였다. 전극 구조에 따른 이온풍 특성 연구를 위해 Fig. 12, 13의 침전극 평행판 전극과, 와이어 평행판 전극 구조의 이온풍 발생기를 제작하였고, 조건에 따른 유속 및 온도 측정 실험을 진행하였다. 실험을 통해 전극 구조에 따른 이온풍 특성 및 방열성능을 분석 할수 있었으며, 각각의 경우에 따른 실험 상관식을 제시하였다. 또한 이를 통해 해석 모델링을 개발하고 수치해석을 진행하였으며, 그 결과를 실험 데이터와 비교 분석하여 계산 결과의 신뢰도를 입증하였다.

전극 구조에 따른 이온풍 특성 연구와, 최적 전극 재료 선택을 위한 연구를 수행한 뒤, 이를 실제 방열 사례에 적용하기 위한 연구를 진행하였다. 이를 위해 이온풍을 이용한 히트싱크를 개발하였으며, LED 방열에 적용하였다. 이온풍을 이용한 히트싱크 개발 시, 와이어 평행판 전극구조를 택하여 최적 설계를 진행하였다. 와이어 평행판 전극 구조는 침전극 평행판 전극 구조에 비하여 최대 유속은 약하지만, 안정적으로 유속을 유지할 수 있다는 장점이 있으며, 제작 및 설치가 용이하기 때문에 소형 전자장비 냉각에 보다 유리하다. Fig. 14는 본 연구에서 개발된 수치해석 기법을 통해, 계산한 이온풍 유속 결과값이다. 기존 연구의 분석 사례와 비교할 때, 매우 일치하는 경향성을 보여 주고 있다. 실험에서 측정된 유속 값과 6% 이내의 오차를 보이며 일치했다. 와이어 주변에서 유동이 분리되며 가장 강한 유속을 기록하고 있으며, 평행판 근처에서는 유동 역류 효과가 관찰되었다.

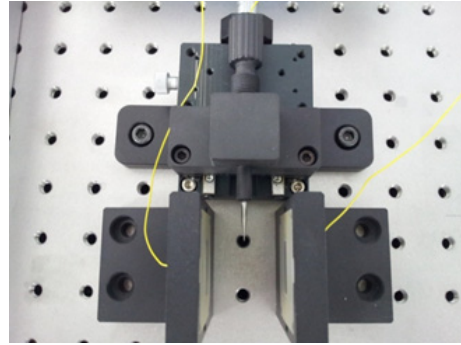


Fig. 12. 침전극 평행판 전극구조 이온풍 발생기

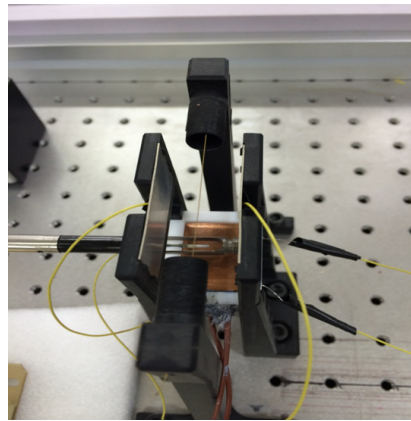


Fig. 13. 와이어 평행판 전극구조 이온풍 발생기

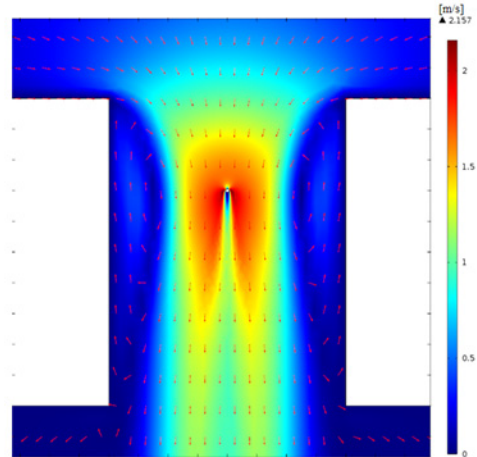


Fig. 14. 이온풍 유속 해석 결과

역류 효과는 이온풍의 유속을 저해 시키며 에너지 효율을 감소시키는 주 원인이 된다. 평행판 근처에서의 유동 역류 효과는 이미 학계에 보고된 바 있지만, 이에 대한 유동가시화 분석은 본 연구를

통해 처음 시도되었다. 이를 제어하기 위하여 본 연구에서 개발한 수치해석 기법을 통해, 와이어 위치의 최적설계를 진행하였다.

최종적으로 이온풍을 이용한 LED 방열 기구 프로토타입을 제작하여 기존 LED 방열 기구와 비교 분석하였다. 이를 통해 이온풍 응용기술이 차세대 국소 방열기구로 활용가능함을 입증하였다.

### 2.5 집적형 하이브리드 구동장치 내부 유동 분석을 통한 성능 개선

자동차 및 항공기에 사용되는 구동장치는 유압을 이용한 중앙집중식으로부터 시작되었다. 중앙집중식 유압장치는 20세기 초반부터 이용되기 시작하였으며, 이는 신뢰도가 높아 아직까지 많이 사용되고 있다. 그러나 중앙유압장치는 유관이 많아 공간을 많이 차지하며 설치가 복잡하고 유지보수가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 이후 전기-기계 구동장치가 나왔으나 이는 적용 가능범위가 적고 내구성 확보가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이에 최근에는 전기-유압 구동장치가 개발되었다. 특히 스마트 재료인 압전재료를 사용하는 전기-유압 구동장치를 집적형 하이브리드 구동장치라고 부른다. 이 장치는 소형, 경량화가 가능한 대신 구동 속도와 구동압력이 다른 종류의 구동장치보다 상대적으로 낮은 단점이 있었다. 그러나 압전재료에 대한 연구가 진행됨에 따라 기존에 사용되던 구동장치를 대체할 수 있게 되면서 성능을 높이고자하는 연구가 진행중이다. 또한, 최근 소형 비행 시스템의 필요성이 대두되면서 본 시스템에 대한 연구가 더 중요해졌다. 그러나 유압시스템을 이용한 적층식 구동방식을 가지는 장치임에도 불구하고, 내부에서 발생하는 유동에 대한 연구는 거의 이루어지지 못했다.

따라서, CFD (Computational Fluid Dynamics) 기법을 이용하여 해당 구동장치의 내부 유동을 분석하고 성능 개선을 위한 방안을 도모하기 위한 연구를 진행하였다. 특히 유압시스템에서 사용하는 리드밸브(Reed Valve)에 대한 유동해석을 진행하였다.

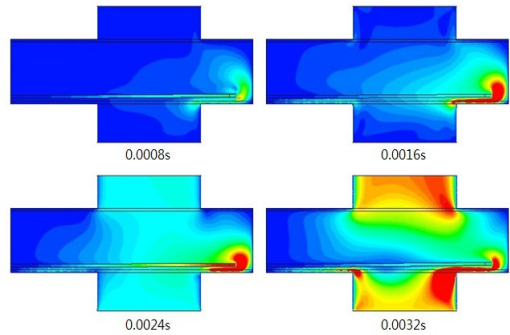


Fig. 15. 밸브 두께 0.15mm, 구동주파수 250Hz에서 밸브 포트 내부 유동 분포

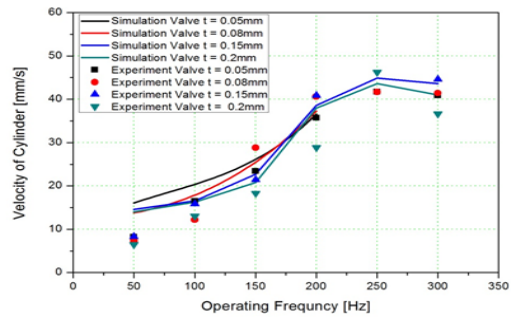


Fig. 16. 밸브 두께와 구동주파수에 따른 실험과 수치해석의 유동 속도 결과 비교

이 장치는 일반적으로 압전 스택, 축압기, 실린더, 유체, 유관, 전원과 제어장치로 구성되어있다. 본 구동장치는 펌프 챔버 내 압력상태와 밸브의 상태 변화에 따라 압축, 배출, 팽창 및 흡입 4개의 단계로 작동한다. 압전 스택이 전기신호를 받아 팽창하면 펌프 챔버 내부가 압축되면서 압력이 상승하고 이에 실린더 쪽으로 향하는 밸브가 열리면서 작동 유체가 배출된다. 이후 전기신호에 따라 압전 스택이 수축하면 펌프 챔버 내부의 압력이 낮아지면서 축압기 쪽에서 펌프 챔버 내부로 작동유체가 흡입된다. 이러한 네 가지 단계를 반복적으로 수행하면서 적층적으로 실린더를 작동시켜 동력을 전달하는 것이 집적형 하이브리드 구동장치의 구동 원리이다. 이 구동원리를 바탕으로 수치해석 기법을 선정하였다. 선정된 수치해석 기법은 FSI (Fluid-Structural Interaction) 기법으로 유체 해석과 구조 해석이 서로 상호작용하는 Full-Coupling인 2-way가 사용되었다. 설계요소는 밸브의 두께와

모양으로 밸브 두께에 대한 해석은 실험결과와 비교하여 결정하였다. Fig. 15는 FSI해석을 진행하였을 때 유동해석과 구조해석을 모두 결과로 생성한 그림이며, Fig. 16은 밸브 두께와 구동주파수에 따른 유동 속도를 비교한 것이다. Fig. 16의 실선은 해석 결과를, 점선은 실험 결과를 나타낸 것이다. 실험과 해석을 비교한 결과, 모두 250Hz, 밸브 두께 0.15mm에서 출구 유속 44.9mm/s로 최고 성능을 보이며, 300Hz에서는 성능이 떨어지는 것을 확인하였다. 또한 밸브의 두께는 각 구동주파수에 따라 최적값이 다르며, 대략적으로 낮은 구동주파수에서는 얇은 밸브가 높은 주파수에서는 두꺼운 밸브가 유리한 경향이 있는 것으로 나타났다. 이는 펌프의 움직임에 따라 능동적으로 움직이는 밸브가 금속의 탄성력과 유체의 관성력에 의해 원활히 동작하지 못하면서 생기는 것으로 판단된다.

### 3. 맺음말

성균관대학교 열 및 물질 제어 실험실은 새로운 열유동 가시화 기법을 개발하여 자연 현상 및 산업 현장에서 일어나는 다양한 열유동 제어 문제를 해결하고자 노력하고 있으며, 기존에 개발된 유동 가시화 기법을 새로운 분야에 적용하는 연구도 병행하여 수행하고 있다. 따라서, 다상 유동, 연소 현상, 마이크로/나노 유동의 정밀 분석을 위한 가시화 기법 개발뿐만 아니라 압축기, 공작기계, LCD, 증기 터빈, 룸에어컨, 냉장고, 프린터, 방사기, 식기세척기, 오븐 등과 같이 실제 가정 및 산업 현장에서 많이 쓰이는 제품에 다양한 가시화 기법을 적용하여 에너지 효율 및 성능 향상을 달성하기 위한 연구도 활발히 수행하고 있다. 또한, 다양한 조건에서의 열유동 현상 분석을 수치적으로 해석하기 위한 각종 프로그램을 개발하여 전산 열유동 해석 분야에서도 많은 연구 결과를 도출하고 있다.

### REFERENCES

- 1) Gim, Y., and Ko, H. S., 2014, "Study on Correction of Optical Distortion for Flow Visualization inside Axisymmetric Droplet", *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 12(3), pp. 21-25.
- 2) Gim, Y., and Ko, H. S., 2016, "Development of a three-dimensional correction method for optical distortion of flow field inside a liquid droplet", *Optics Letters*, Vol. 41(8), pp. 1801-1804.
- 3) Gim, Y., Shin, D. H., Moh, D. Y., and Ko, H. S., 2017, "Development of limited-view and three-dimensional reconstruction method for analysis of electrohydrodynamic jetting behavior", *Optics Express*, Vol. 25(8), pp. 9244-9251.
- 4) Shin, D. H., Baek, S. H., and Ko, H. S., 2016, "Development of heat sink with ionic wind for LED cooling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 93, pp. 516-528.
- 5) Shin, D. H., Yoon, J. S., Ko, H. S., 2015, "Experimental optimization of ion wind generator with needle to parallel plates for cooling device", *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 84, pp. 35-45.