대칭형상의 평판 전극 주위의 비대칭 절연유체 유동

백광현* · 조동식* · 서용권†

Asymmetric Electrohydrodynamic Flow of Dielectric Liquid around Symmetric Coplanar Electrodes

Kwang Hyun Baek, Dong Sik Cho and Yong Kweon Suh

Abstract. This paper presents experimental observation of asymmetric electrohydrodynamic flow generated around a pair of symmetric coplanar electrodes. Electrodes are attached on the bottom of the cavity containing a dielectric liquid, i.e., a mixture of dodecane and 0.5% wt Span80. In the first experiment, an AC voltage of 1500 V is applied with the frequency varying in the range 10~500 Hz and the left electrode being grounded. The flow patterns show that the center line of vortices is unexpectedly tilted to the left side. If the right side electrode is grounded, the center line is tilted to the right side. The magnitude of the fluid velocity shows an irregular variation with the frequency in the range 10 Hz~100 Hz, beyond which it simply decays. In the second experiment, we applied fixed AC with 1000 V and 60 Hz superposed by DC voltage varying in the range -1000 V ~ +1000 V. The center line of the flow pattern is tilted to the right side with positive DC voltage and to the left side with negative DC. We have managed to show that the flow pattern can be symmetric with a suitable combination of DC and AC, e.g., DC 850 V plus AC 1000 V with the frequency 10 Hz.

Key Words: Dielectric liquid(절연유체), Electrohydrodynamic flow(EHD 유동), AC voltage(교류전압), Frequency(주파수)

1. 서 론

도데칸(dodecane)과 같은 비전도성 유체는 낮은 전기 유전율과 전도성을 가지고 있다. 비전도성 유체가 주변 환경에 장시간 노출되면 수분이나 불순물 등이 섞이게 되고 이러한 비전도성 유체에 고전압에 의한 전기장이 인가될 때 용액 중의 불순물들이 이온화 하면서 전기 전도도가 증가한다. 필요에 따라서 비전도성 유체에 계면활성제를 첨가하면 자유이온의 농도를 증가시켜 전도성은 더욱 향상된다. 이러한 경우 전기장의 세기와 더불어 이온의 농도가 증가한다는 Onsager 효과⁽¹⁻⁵⁾로 인해 버크 중에 0이 아닌 전하와 이에 따른 유체유동이 형성되는데 이것을 EHD유동이라 부른다.

본 연구에서는 계면활성제가 혼합된 도데칸 용액을 담고 있는 용기의 바닥에 평판전극을 설치하고 교류전압과 직류전압을 동시에 인가하였을 때 전극 주위에 발생하는 EHD유동의 비대칭성에 관한 가시화 실험의 결과이며, 연구 결과는 변압기 내부 절연액체의 제어^(1, 6-8) 등에 응용될 수 있다.

2. 실험방법

절연유체인 도데칸(Sigma-Aldrich)에 계면활성제 Span80(Sigma-Aldrich)을 무게비율 0.5%로 혼합한 용액을 가로 약 3 cm, 세로 약 1.5 cm 크기의 Cavity에 담고 Cavity 바닥에 놓인 한 쌍의 평판 전극에 교류와 직류를 합쳐서 인가하였을 때 얻어지는 유동을 가시화하였다(Fig. 1). 전극으로 유리판 위에 ITO를 코팅하여 사용하였으며 전극사이 거리는 1 mm이고 좌측 전극을 접지로 하였다(Fig. 2). 인가한 전압은 함수발생기

†동아대학교 기계공학과
E-mail : yksuh@dau.ac.kr

*동아대학교 대학원 기계공학과

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental arrangement.

Fig. 2. Location of the point 'C' for the measurement of the velocity components u and v .

(Model DSOX2012A, Agilent Tech.)에서 교류전압과 offset 기능을 이용한 직류전압을 함께 발생시킨 것으로서 발생한 전압을 증폭기(Model 610E, Trek, Inc.)에서 1000배 증폭하여 전극에 인가하였다. 그리고 인가된 전압의 정확성을 위하여 오실로스코프(Model DSOX2012A, Agilent Tech.)를 통해 발생한 전압의 크기를 확인할 수 있도록 하였다.

유동의 가시화를 위하여 $4.1\ \mu\text{m}$ 크기의 나일론 형광 입자(Model 10456, Kanomax, Inc.)를 용액에 섞어 사용하였으며 YAG laser를 이용하여 매우 얇은 두께의 평면레이저를 Cavity 바닥에 수직으로 비추고 고속 CCD 카메라(Model GX1050, Allied Vision Technologies, Inc.)를 수평하게 두어 수직 단면에 대한 동영상상을 얻었다. 얻어진 동영상상을 이용하여 주어진 한 점(한 쌍의 평판전극의 정중앙에서 위로 1 mm 떨어진 지점, 즉 Fig. 2에서 점 C)을 지나가는 입자의 변위와 경과 시간으로부터 유동의 수평 및 수직 방향 성분을 구하였다.

3. 실험결과

3.1 교류 주파수의 영향

두 평판 전극에 1500 V의 교류전압 (본 논문에서 교류전압의 크기는 교류 전압의 최대값과 최소값의 차이를 의미한다.)을 인가하고 주파수를 10 Hz~500 Hz로 변화시키며 유동을 관찰하였다. Fig. 3은 전극 주위에 형성되는 유동을 가시화한 유선으로서 중심 축이 좌측으로 상당히 많이 기울어진 형태로서, 주파수가 변하더라도 이는 거의 동일한 패턴을 유지하였다. 전극 구조를 포함한 외견상의 모든 조건이 대칭인데도 불구하고 이러한 비대칭 유동양상이 관찰되어 이에 대해 집중적으로 연구하였다.

접지를 오른쪽 전극으로 하면 중심 축은 반대로 우측으로 기울어진 모습을 보인다. 유동 속도의 크기는 주파수가 변화함에 따라 Fig. 4와 같이 10 Hz~100 Hz까지는 불규칙적으로 변화하다가 100 Hz부터는 주파수가 커질수록 점차적으로 감소하는 것을 확인하였다. 교류 주파수에 따라 이처럼 유속의 크기가 감소하는 이유와 관련하여 두 가지를 생각할 수 있는데, 하나는 이온들이 전극 근처에 몰려서 전극을 차단하는 시간, 두 번째는 소위 전하의 완화시간(charge relaxation time)이 그것이다. 우선 첫 번째 현상과 관련한 시간은 본 연구에서 취급한 유체와 유사한 유체를 사용한 이전 연구에서 약 0.3초로 예측한 바 있으며⁽⁹⁾, 이는 약 3[Hz]에 해당하므로 본 연구의 결과와는 직접 관련 없는 것으로 이해할 수 있다. 다음, 이온 수송 방정식에서 이온 농도의 천이항의 존재로 인한 전하의 완화시

Fig. 3. Visualized streamlines for at 1500 V and 60 Hz with the cavity put on an aluminum block.

Fig. 4. Effect of the AC frequency on the vertical (square) and horizontal (gradient) components of the fluid velocity measured at the point 'C' shown in Fig. 2 at AC 1500 V and 60 Hz.

간은 $\tau = \epsilon/\sigma$ 로서, 전기 전도도를 $\sigma = 3 \times 10^{-8} [\text{S/m}]$, 유전율을 $\epsilon = 2 \times 8.85 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$ 로 하여 계산하면 $\tau = 5.9 \times 10^{-4} [\text{s}]$ 이 되며 이는 약 1700[Hz]에 해당한다. 이는 본 연구에서 관찰된 주파수 증가에 따른 유동의 약화가 전하의 완화와 관련한 것이라는 것을 뒷받침하고 있다.

3.2 Cavity 아래 블록의 영향

Fig. 3에서 보인 것처럼, 두 평판 전극에 교류 전압만을 인가하였을 경우에 전극 주위의 유동 형태가 예상과 다르게 비대칭이 되는 이유를 밝히기 위해 파라미터들을 다양하게 변화시켜가며 실험하고 분석하는 과정에서, Cavity를 올려놓은 블록이 도체일 때와 도체가 아닐 때에 유동 형태가 다른 것을 확인하였다.

Fig. 5(a)는 Cavity를 알미늄 블록 위에 놓고 2000 V, 60 Hz의 교류를 인가하였을 때 얻어진 유선이며, Fig. 5(b)는 PVC 블록 위에 놓고 같은 교류를 인가하였을 때의 유선이다. 실험 결과 중심축이 좌측으로 기울어진 형태이지만 Cavity 아래에 알미늄 블록이 있을 경우의 중심축은 PVC 블록일 때보다 더 많이 기울어진 것을 확인할 수 있다. 이는 교류를 인가한 경우 전극과 블록사이의 유리가 축전기(capacitor) 역할을 함으로써 이로 인해 캐비티 내부의 유체 중에 형성되는 전기장이 왜곡되기 때문이라 판단된다.

3.3 직류 전압의 영향

두 평판 전극에 교류는 일정하게 두고 직류전압의 크기를 달리 하면서 유동을 관찰하였다. Fig. 6은 바닥

(a)

(b)

Fig. 5. Visualized streamlines at AC 2000 V (60 Hz) with the cavity put on (a) aluminum block and (b) PVC block.

블록이 알미늄인 경우에 교류를 100 V, 60 Hz로 고정하고 직류 전압의 크기를 - 1000 V ~ +1000 V로 변화시켰을 때의 유동가시화 결과로서 직류전압의 크기가 (+)일 경우에는 중심축이 우측으로, 직류전압의 크기가 (-)일 경우 좌측으로 기울어진 형태를 보인다.

유동속도의 크기는 직류 전압의 크기에 따라 Fig. 7과 같이 변화하는데, 직류전압의 크기가 증가할수록 수직방향 속도의 크기도 함께 증가한다. 유동을 유발시키는 유체력은 전기장 하에서 쿨롱힘을 받아 발생하게 된다. 따라서 전압의 증가는 전기장의 세기를 증가시키고 이는 유체 내부의 전하농도를 증가시킨다. 이로 인한 유체력의 증가는 유동속도를 증가시킨다.

직류와 교류전압을 함께 인가한다는 것은 교류전압을 직류전압의 크기만큼 offset시킨다는 의미이다. 이 실험에서 교류전압의 크기를 100 V로 설정하였으므로 최소직류전압 500 V를 인가할 경우 실제로 인가 되는

Fig. 6. Visualized streamlines with AC 100 V (60 Hz) plus (a) DC 800 V and (b) DC - 800 V with the cavity put on the aluminum block.

Fig. 7. Effect of DC voltage on the vertical (square) and horizontal (gradient) components of the fluid velocity under the voltage condition of Fig. 6.

전압은 450~550 V 범위이다. 즉 교류전압의 효과는 상대적으로 미약하다.

3.4 유동장 패턴의 제어

유동장의 패턴이 대칭이 되는 조건을 찾아보기 위해 전극에 인가하는 직류 전압과 교류 전압의 크기를 변화시켜 가며 유동장을 제어하여 보았다. 교류는 1500 V, 10 Hz로 고정하고 직류전압의 크기를 변화시켰을 경우에는 중심축이 좌우측으로 기울어진 비대칭 형태의 유동만을 확인하였다. 그리고, 직류전압의 크기를 850 V로 고정하고 교류전압의 크기를 변화시켰을 경우, 교류전압의 크기가 1000 V일 때 Fig. 8 (a)와 같이 전극 주위에 생성되는 유동장이 좌우가 거의 대칭을 이루는 것을 확인 할 수 있었다.

실험결과 얻어진 유선을 확인하기 위해 상용 프로그램 COMSOL을 이용하여 수치해석하였다. COMSOL에서 제공하는 층류 유동, 전기장, 이온 수송 방정식 등의 모듈을 사용하였고, 폭 3 cm, 높이 1 cm의 직사각

Fig. 8. Visualized symmetric streamlines patterns obtained (a) from experiment with the aluminum block at 10 Hz, AC 1000 V and DC 850 V, and (b) from COMSOL simulation with DC 850 V and Langevin constant reduced by the factor 0.53.

형 Cavity의 2차원 모델에 대해 정상상태의 비압축성 유동으로 해석하였다. 삼각형 격자를 사용하였으며 전극 근처의 매우 얇은 DSL 층(dissociation layer[1])를 고려하여 전극의 표면 근처에는 격자를 충분히 조밀하게 구성하였다. 실험결과와의 정량적 비교를 위해 Langevin 상수는 이론 값의 0.53배를 적용하였다⁹⁾.

수치해석 결과(Fig. 8b)는 실험 결과(Fig. 8a)와 유동장 패턴이 거의 일치하였고, 점 C에서의 수직방향 속도가 실험에서 5.88 [mm/s], 수치해석에서 5.8 [mm/s]로 거의 동일하게 얻어졌다.

4. 결 론

(1) 교류 전압의 크기가 일정한 경우 주파수가 증가하면 유동 속도의 크기는 대체로 감소한다.

(2) 교류만을 인가하였을 때 Cavity 아래의 블록이 도체일 때와 부도체일 경우에 따라 유동의 형상이 달라진다.

(3) 직류 전압과 교류 전압의 크기를 변화시켜 가며 유동장이 좌우 대칭이 되는 조건을 찾을 수 있었다. 이를 이용하면 대칭뿐만 아니라 유동의 중심축의 각도를 좌우로 원하는 각도만큼 충분히 제어할 수 있다.

후 기

본 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD연구센터(ERC)’의 과제(20090083510)와 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(20114030 200030)을 받아 수행한 연구임.

참고문헌

- 1) Y.K. Suh, “Modelling and simulation of ion transport of dielectric liquids - Fundamentals and review”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 19, No. 3, pp. 831-848, 2012.
- 2) A. Dukhin and P.J. Goetz, “How non-ionic ‘electrically neutral’ surfactants enhance electrical conductivity and ion stability in nonpolar liquids”, J. Electroan. Chem., Vol. 588, pp. 44-50, 2006.
- 3) J.K., Park JK, J.C. Ryu, W.K. Kim, and K.H. Kang, “Effect of electric field on electrical conductivity of dielectric liquids mixed with polar additives: DC conductivity”, J. Phys. Chem. B, Vol. 113, pp. 12271-12276, 2009
- 4) J.C. Ryu, H.K. Park, and K.H. Kang, “New electrohydrodynamic flow caused by the Onsager effect”, Phys. Rev. Lett., Vol. 104, 104502, 2010.
- 5) W. Kim, J.C. Ryu, Y.K. Suh, and K.H. Kang, “Pumping of dielectric liquids using non-uniform field induced electrohydrodynamic flow”, Appl. Phys. Lett., Vol. 99, 224102, 2011.
- 6) A. Perrier, A. Beroual, and J-L. Bessede, “Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 13, pp. 556-564, 2006.
- 7) A. Bourgeois, G. Mortha, T. Paillat, G. Touchard, O. Moreau, and Y. Bertrand, “Flow electrification in power transformers: Study of a potential remedy”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 13, pp. 650-656, 2006.
- 8) F. Bitam-Megherbi and M. Megherbi, “Time evolution of current through insulating paper under dc voltage stress”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 14, pp. 656-662, 2007
- 9) Y.K. Suh and K.H. Baek “Competition between the bulk and the dissociation layer in electrohydrodynamic flow of dielectric liquid around coplanar electrodes”, Phys. Rev. E, Vol. 87, 023009, 2013.

- 1) Y.K. Suh, “Modelling and simulation of ion transport of dielectric liquids - Fundamentals and review”, IEEE