



플라즈마 제트를 이용한 유체 표면 안정화

Fluid surface stabilization using plasma jets

연구책임자: 최원호 | 소속학과: 원자력및양자공학과 | 홈페이지: <http://gdpl.kaist.ac.kr>

제트 기체를 액체 표면에 분사시키는 구조는 과학분야와 산업기술에서 다양하게 쓰이고 있지만, 기체 제트가 분사되는 액체 표면에서 유체역학적으로 불안정성이 커져 이를 안정화하는 방법에 대한 연구가 절실했다. 본 연구에서는 기체를 이온화시킨 플라즈마가 기체와 액체 사이 경계면의 유체역학적 안정성을 높이는 것을 최초로 발견하고 그 원인을 규명하였다. 플라즈마 제트에 의해 유체 표면에 인가되는 힘은 유체방울의 생성이나 방울이 튀어오르는 것을 최소화하면서도 보다 안정적으로 경계면을 깊이 파이게 한다. 특히, 본 연구는 중성기체 제트에 비해 플라즈마 제트가 경계면에 더욱 깊고 안정적인 공동을 만드는 원인이 수면을 따라 전파되는 가스 이온화 펄스파인 '플라즈마 총알'의 영향임을 보였다. 본 연구는 플라즈마 제트를 활용한 기초 응용과학 발전에 쓸 수 있는 기초 기술을 개발한 것으로 과학 연구와 산업 현장에서 기초 기술로 활용할 수 있으며, 플라즈마 의료, 생명, 농업, 식품, 화학 등 여러 분야의 기술 개발에 기여할 것으로 기대된다.

1. 연구배경

컵에 담긴 물 표면을 향해 빨대로 바람을 불어 넣을 때 경계면이 움푹 들어가는 것과 같이 기체와 액체 사이의 경계면에서 나타나는 기체 유동에 의한 현상들은 다양한 산업 공정에서 활발히 쓰이고 있을 뿐만 아니라, 수면과 충돌하는 로켓 배기가스에 대한 연구 등 경계면 현상들은 기초와 응용 연구 분야에서도 주목받아 왔다. 그럼에도 불구하고 기체 유동에 의해서 기체와 액체 경계면에서 일어나는 유체역학적 불안정성의 원인에 대한 이해가 부족하여 현상에 대한 높은 관심도에 비해 활용성을 높이는 데 한계가 있었다. 계면에서 일어나는 이러한 불안정성은 전기유체역학적 불안정성(electrohydrodynamic instability)으로 인한 테일러 원뿔(Taylor cone) 현상과 같이 기체 또는 액체가 전기적 특성을 가지고 있는 경우에도 나타난다. 그러나 이러한 액체 계면의 불안정성과 이와 관련된 현상들은 복합적인 원인으로 인해 나타나기 때문에 심도 있는 이해가 이뤄지지 않았다.

2. 연구내용

본 연구에서는 플라즈마에 의한 전기바람 발생의 기본 원리를 탐구하며, 기체를 이온화시킨 플라즈마가 기체와 액체 사이의 경계면의 유체역학적 안정성을 증가시키는 것을 최초로 발견하고 이를 규명하는 데 성공했다. 물 표면을 향해 플라즈마가 있는 기체 제트를 분사할 경우, 플라즈마가 발생시키는 전기바람(electric wind)에 의해 물 표면이 더 깊이 파이는데도 불구하고 표면의 안정성이 향상되는 것을 발견하였다. 연구팀이 본 실험에 활용한 플라즈마 제트에서는 '플라즈마 총알(plasma bullet)'로 불리는 높은 속도의 이온화 파동과 전기바람이 발생하는데, 이들에 의해 물 표면이 안정화되는 것을 실험적으로 확인하였다. 플라즈마 제트가 물 표면에 도달한 이후 물의 곡선 표면을 따라 수십 km/s 속력으로 이동하는 플라즈마 총알이 물 표면과 나란한 방향으로 강한 전기장을 발생시킨다. 이 전기장과 물 표면 사이의 전기역학적인 상호작용을 통해 표면의 깊이가 깊어지더라도 물 표면의 모양이 흐트러지지 않고 유지되며 안정적으로 공동이 형성되는 원인을 세계 최초로 규명했다. 또한

3. 기대효과

플라즈마를 만들기 위해 인가한 전압의 펄스 폭을 증가시키면 물 표면이 더 깊어지는 것을 발견하여, 플라즈마에 의한 전기역학적 힘(electrohydrodynamic force)이 물 표면에 가해지는 힘에 큰 역할을 한다는 것을 실험적으로 증명하고, 안정성 또한 향상시키는 것을 규명했다. 이와 더불어, 본 연구팀은 플라즈마 제트와 물 표면에 대한 이론적 전산모형을 개발하여, 실험적으로 발견한 현상을 이론적으로 검증하였다. 개발한 플라즈마 및 유체 전산모형을 이용하여 플라즈마의 특성과 물표면 방향의 전기장 세기를 시공간적으로 분석하고, 이 결과를 바탕으로 전기바람에 의해 물 표면 공동의 깊이가 깊어지면서도 경계면을 안정적으로 만드는 요인을 정량적으로 규명해 냈다.

연구팀이 활용한 플라즈마 제트는 최근 여러 학제간 연구 분야에 다양한 목적으로 활용되고 있다. 따라서 본 연구는 대기압 플라즈마와 같이 약하게 이온화된 플라즈마에서 나타나는 하전입자와 중성입자 사이의 상호작용을 이해하는데 유용한 기반이 되고, 경제적이고 산업적 응용이 가능한 플라즈마 유체 제어 분야를 확대하고 활용을 가속시키는 데 큰 역할을 할 것으로 기대한다. 뿐만 아니라 그동안 부족했던 플라즈마 제트와 물 표면 사이의 상호작용에 대한 이해를 통해 이와 밀접한 관련이 있는 플라즈마 의료, 생명, 농업, 식품, 화학 분야 기술 개발 및 발전에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.



그림1. 기체 제트의 이온화를 통한 액체 표면의 안정화를 묘사한 실험



그림2. Video: High-speed shadowgraph movie of water surface deformations induced by plasma impingement

연구성과

- 논문** S. Park, W. Choe, H. Lee, J. Y. Park, J. Kim, S. Y. Moon & U. Cvelbar, "Stabilization of liquid instabilities with ionized gas jets", Nature 592, 49-53 (2021) [2020-21 Impact Factor = 49.962].
- 행보** 국내 언론보도 27여 회, 외국 언론보도 10여회(Science Daily 등)
Highlighted in Asia Research News (selected as front cover picture)
한국물리학회 2021가을 학술대회 초록집의 커버 이미지로 선정
KAIST 홈페이지 및 KAIST Breakthrough '21에 홍보
International Low Temperature Plasma Community Newsletter 14에 기사 소개

연구비 지원

KAIST High-Risk and High-Return 프로젝트
한국연구재단 개인연구지원사업(우수신진연구)