

Original Article

고체 평면상에서 두 캐비테이션 버블의 상호 붕괴 충격력에 관한 실험적 연구

노메텃나잉¹ · 정노택^{2,†}

¹울산대학교 조선해양공학부 대학원생

²울산대학교 산학협력단 연구교수

Experimental Study on Impact Forces Collapsed by a Pair of Bubbles Near Wall

Nyo Me Thet Naing¹ and Rho-Taek Jung^{2,†}

¹Graduate Student, School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

²Research Professor, Foundation for Industry Cooperation, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

요 약

본 논문은 정지된 유체 내의 고체평면 근방에서 크기가 다른 두 개의 캐비테이션 버블을 발생시켜 이 버블들이 동시에 붕괴할 때, 벽면 최대 충격력 및 충격량을 실험적으로 파악하였다. 무한 원방에서의 버블 붕괴와는 달리 벽면 가까이에서 발생하는 두 개의 버블은 버블-버블과의 상호작용뿐만 아니라, 버블-벽면과의 상호작용도 함께 일어나기 때문에 보다 복잡한 현상을 지닌다. 전기 스파크 발생장치를 통해 세 종류의 버블(반경 3.1 mm, 3.8 mm, 4.5 mm)을 조합하여, 발생에서 붕괴까지의 전 과정에서 나타나는 충격력과 이에 해당하는 버블의 형태를 정량적으로 비교하였다. 버블-버블 간의 거리(η), 벽면과의 거리(γ)에 따라 생성된 버블의 형태를 다섯 가지로 구분 할 수 있었다. 대표적으로, 아래 버블이 큰 경우는 종의 형태로, 작은 경우는 핀치오프 형태로 나타남을 고속카메라를 통해 확인할 수 있다. 두 버블의 크기와 거리에 따라 붕괴 시 발생하는 충격력을 PVDF 센서를 통해 계속하였다. 고체면에 세로로 정렬된 두 버블의 충격력은 단일버블과 비교하여 두 배이상의 충격력이 발생하고, 발생 시기도 늦어진다는 점을 확인하였다. 또한 충격량의 관점에서 보면 벽면가까이에 위치한 버블의 크기가 큰 것이 보다 큰 충격량을 발생한다는 결과를 얻었다.

Abstract – It is to experimentally investigate the maximum impact force on the wall when two cavitation bubbles of different sizes are generated near the solid surface in a still fluid. Unlike bubble collapse in free filed, two bubbles generated near the wall have a rather complicated phenomenon because not only the interaction with the bubble-bubble but also the interaction with the bubble-wall surface occurs. Through the electric spark generator, three types of bubbles (radius 3.1 mm, 3.8 mm, and 4.5 mm) were used to compare with the impact force that appeared in the entire process from generation to collapse and the shape of the corresponding bubble. Using two non-dimensional distance between the bubble and the bubble (η) and the distance from the wall (γ), the shape of the generated bubble was classified into five categories. It can be confirmed through the high-speed camera that the lower bubble appears in the form of a bell when the bubble is large, and in the form of a pinch-off when it is small. The impact force was measured through a PVDF sensor. It was confirmed that the impact force of the two bubbles vertically aligned on the solid surface generated more than double the impact force compared to the single bubble, and the generation time was also delayed. In the case of impulse, it was obtained that the larger the size of the bubble located near the wall, the greater the impulse amount.

Keywords: Two cavitation bubbles(두 캐비테이션 버블), Spark generation(전기스파크발생), PVDF(polyvinylidene flouride, 폴리비닐리덴 플로라이드)

[†]Corresponding author: rtjung@ulsan.ac.kr

1. 서 론

유체 내 압력구배가 큰 경우에 캐비테이션 현상이 일어나기 쉽고, 이는 유체기계 벽면에 지속적인 반복응력, 소음 방출등을 야기시킨다. 한편, 캐비테이션 버블을 이용해서 다양한 산업에 활용하는데, 예를들면, 고압으로 분사하여 캐비테이션을 발생시켜 해양 오염표면을 청소한다든지, 소규모 초음파 클리닝에 이용된다든지, 캐비테이션의 충격력을 이용하여 박테리아 박멸이나 의료 시술시에도 활용된다(Chahine *et al.*[2016]; Okada *et al.*[1995]; Sankin *et al.*[2010]; Brennen[2015]; Schovanec *et al.*[2020]). 뿐만아니고, 캐비테이션 초생에 의한 전체 표면 변동압력 변화는 추진기 CIS (Cavitation Inception Speed) 판단을 위한 참고자료로 활용되고 있다(Lee *et al.*[2011]).

실제 현상에서는 다량의 캐비테이션 버블이 발생함으로 버블간의 상호관계 및 벽면과의 충격연계성을 파악하기에는 한계가 있다. 따라서, 마이크로시간단위에서 붕괴현상이 종료되는 캐비테이션 현상에 대해 단일 버블 붕괴를 먼저 파악하기 위해 연구가 지속적으로 진행 되어 왔다. 우선, 버블을 생성하는 방법에 대해 거론되어야 하는데, 폭발력을 가진 분말을 이용하는 방법, 레이저 빔을 이용하는 방법, 전기 스파크를 이용하는 방법등이 있다. 본 연구에는 두 개의 버블을 동시에 생성해야 하기 때문에 첫 번째 방법인 폭발분말을 이용하는 방법은 동일시간에 점화시점을 맞추기가 어렵고, 레이저의 경우 실험시설이 고가일 뿐만 아니라 생성 버블크기가 상대적으로 작음에 따라 초고속촬영시스템이 요구된다. 한편 전기 스파크의 경우 시스템 구성이 저렴하고, 실험 장비간에 동기화를 비교적 용이하게 할 수 있다는 장점이 있다. Table 1에는 두 개 이상의 캐비테이션 버블연구의 최근자료를 정리한 표이며, 마지막 줄에 본 논문에서 사용한 방식이 간략히 기술되어 있다. 버블크기의 관점에서 보면, 레이저 방식은 버블을 크게 만들기 위해서는 소모비용이 많이 드는 반면, 전기 스파크방식은 자유도가 높다고 하겠다.

단일버블의 다이내믹스에 관해서 이론, 계산, 실험적 연구가 많이 진행되었다. Tomita and Shima[1986]는 레이저를 이용해서 버블을 생성시키고 벽면가까이의 붕괴 및 소멸과정을 고속촬영, schlieren 방식과 photoelastic시스템으로 충격파를 관측하였고 벽면에 가까이 붕괴되면서 1차와 2차붕괴의 충격압이 형성됨을 확인하

였으며, 두 개의 버블에 대해서도 고체면 근방에서 붕괴시의 형상을 고찰하였다(Tomita and Sato[2017]). Vogel *et al.*[1989]은 초당 100만프레임을 촬영할 수 있는 고속카메라를 이용하고, PIV 및 하이드로폰을 이용하여 실험하였다. 실험결과로 1차 붕괴시에 발생하는 높은 속도의 제트는 γ 값(=고체면과 발생지점사이의 거리/버블 최대반경)에 따라 링 보텍스를 관찰 하였다. Lindau and Lauterborn[2003]은 초당 1억프레임의 초고속카메라 영상을 통해 벽면과 반대방향인 counter제트가 고체면과 발생지점사이의 거리가 버블 반경보다 더 클 경우에 발생하고, 벽면 가까이 갈수록 벽면으로 마이크로 제트가 더 커지는 것을 확인하였다($\gamma=0.6$ 중심으로). 그 외의 논문을 통해서 평판외에 곡판의 경우, 자유표면이 있을 경우, 코너근방, 탄성면등에서 버블 다이내믹스에 대해 지속적인 연구가 이루어지고 있다. Wang *et al.*[2006]; Wang and Chen[2007]은 자체적으로 제작한 25 μ m 두께의 PVDF(polyvinylidene fluoride) 센서로 평판의 버블 충격력을 정량적으로 실험하였다. 이 때 γ 가 0.9 근방에서 복수의 충격패턴이 측정되었다. 이는 두 개이상의 토로이드(환상면, toroid) 캐비테이션이 순간적으로 발생함을 의미한다(Brujan *et al.*[2002]). Wang and Chen[2007]; Tomita and Shima [1986]는 $0.6 < \gamma < 1.1$ 의 범위에서 첫 번째 붕괴시에 압력값이 감소하는 범위가 존재하는 것을 확인하였다. 이 현상을 설명하기 위해서 Tong *et al.*[1999]은 $0.8 < \gamma < 1.2$ 사이의 범위에서 레이저로 인한 실험을 통해 버블과 고체면 사이에 얇은 막이 충격을 완화하며, 그 과정에서 고체면과 반대로 발생하는 스플레쉬의 효과가 그 원인임을 설명하고 있다. 계속하여 Shaw *et al.*[2001]은 실험을 통해 1차 붕괴 충격력 데이터에 두 개의 정점으로 스플레쉬의 효과를 설명하고 있다. Brujan *et al.*[2002]은 초당 5만 프레임의 고속 촬영 결과를 통해 버블 붕괴시의 최종단계에 대해 설명하고 있다. 즉, 버블확장단계에서 반경방향으로 작용하는 운동에너지는 고체면 가까이 벽면을 통과할 수 없으므로 벽면을 따라 퍼져나간 입자들이 콜로이드 형상을 만들면서 수축단계를 거쳐 회전운동에너지가 더욱 발전되어 충격력이 가해지나 이때 스플레쉬를 동반하면서 충격력은 감소될 수 있다. 반면, Yao *et al.*[2019]는 홉킨슨(Hopkinson) 압력게이지를 사용하여 버블 충격력을 측정하였는데 버블의 특정 위치에 따라 압력값의 골(vally)이 발생하는 것이 아니라, 고체면과 버블과의 거리가 멀어질수록 일정하게 충격값이 감소하는 경향을

Table 1. Lab experiments with two cavitation bubbles

Author	bubble generation	Max. radius	In field / near wall	Sensor
Blake <i>et al.</i> [1993]	Q-switched Ruby Laser	0.47~0.98 mm	rigid wall	-
Robinson <i>et al.</i> [2001]	Q-switched Ruby Laser	1.04 mm~1.31 mm	free surface	transducer
Bremond <i>et al.</i> [2006]	Laser	0.14 mm	rigid wall	transducer
Sankin <i>et al.</i> [2010]	Q-switched Nd:YAG Laser	0.05 mm	elastic cell	-
Chew <i>et al.</i> [2011]	60-voltage discharger	2 mm~7 mm	free field	-
Tomita and Sato [2017]	Q-switched Ruby Laser	0.12 mm~0.7 mm	free field	-
Luo and Niu [2019]	Q-switched Nd:YAG Laser and 100-voltage discharger	0.47 mm, 0.86 mm	free field, rigid wall	-
THIS PAPER	60-voltage discharger	3.1 mm, 3.8 mm, 4.5 mm	rigid wall	PVDF

보였다. 이것은 고체면의 형상과도 관련성이 있어 보인다. 즉, 흡킨 스펙트럼계의 센서 끝단 형상은 반구 형태를 가지므로, 팽창단계에서 발생하는 반경방향의 운동에너지가 회전운동에너지로 변경되는 과정에서 에너지의 누수가 발생하고, 반구체와 버블간의 유체막의 면적이 비교적 작게 존재하게 때문인 것으로 생각할 수 있다.

한편, 90년대 후반부터 단일 캐비테이션 버블의 거동연구와 함께 복수개의 캐비테이션 버블의 상호작용에 대해서 연구가 시작되었다. 복수개의 경우는 두 캐비테이션 버블간에 상호작용과 벽면에서의 상호작용에 관해 충격력을 다루기보다는 주로 버블 붕괴면 형상 연구가 대부분을 이루고 있다. 우선 자유 원방내에서 두 개의 캐비테이션 버블을 발생시키는 방법도 단일 버블과 마찬가지로 레이저 발생장치 및 전기스파크 발생장치를 이용하고 있다. Blake *et al.*[1993]은 두 개의 버블을 발생시켜서 일정 거리에 따라서 두 버블의 붕괴시에 버블간의 형상변화나 붕괴시 방향성에 대해 논하였으며, 자유 원방 뿐만 아니고 벽면 가까이에서의 붕괴시의 상호 작용연구의 중요성을 강조했다. Fong *et al.*[2009]의 경우는 전기 스파크 발생장치를 이용하여 자유 원방내에서 동일한 크기, 두 버블간의 거리 및 발생 시간등의 무차원수를 통해 버블 상호간의 발생, 붕괴 및 잔여 형상 진동에 대해 연구하였다. Chew *et al.*[2011]는 다른 크기의 두 개의 버블을 대상으로 거동실험을 수행했으며, 두 버블간의 상대 크기 변화가 클 경우, 작은 버블은 자유수면 근처의 버블 붕괴시와 비슷한 거동이 이루어짐을 실험을 통해 확인하였다. 그리고 버블간의 거리 무차원 η 가 1보다 작을 경우 보다 강력한 붕괴 거동을 동반한다는 것을 실험으로 나타내었다(Tomita and Sato[2017]).

본 연구에서는 두 개의 버블을 전기 스파크 버블발생장치를 제작하여 수조실험을 통해 버블간의 형상 및 붕괴시 고체면에 마이크로시간 단위로 충격하는 충격력 및 충격량을 실험적으로 분석하였다. 계속해서 2장에는 실험장치 설명, 3장은 단일버블인 경우, 4장은 고체면에 수직으로 배치된 두 개(pair) 버블의 실험결과를, 5,6 장에서는 충격력과 충격량을 형상과 비교분석하였다.

2. 실험장치

실험장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 가로 400 mm, 세로 400 mm, 높이 450 mm, 두께 10 mm의 아크릴수조에 높이 400 mm까지 일반 수돗물을 채워, 상온(18°C)에서 실험을 수행하였다. 0.1 mm 주석도금된 구리선(+와 -선) 두 쌍을 사용하여 전기스파크 발생장치를 통해 캐비테이션 버블 두 개를 발생하는 회로시스템을 구성하였다(Goh *et al.*[2013]). 본 시스템은 저전압방출회로로서 구성은 커패시터(capacitor) 6900 μ F의 에너지를 N-채널 MOSFET (Metal-

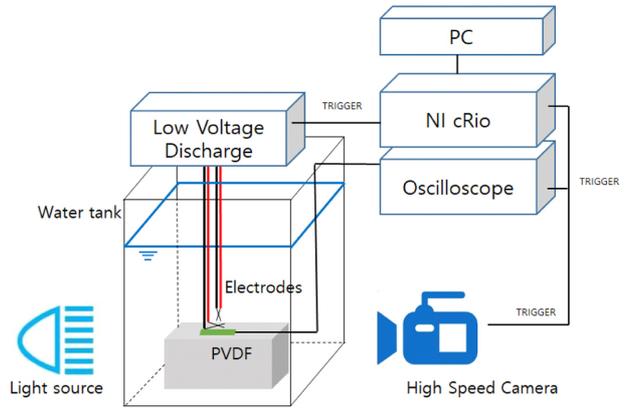


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

oxide-semiconductor field effect transistor)을 통해 순간적으로 전류를 보내는 방식이다. 이때 스위치시간은 600 μ s로 설정하였다. 두 개의 버블은 독립적으로 생성되도록 구성되었다. 200W용량의 라이트는 반투명 아크릴을 통해 버블의 생성에서 소멸까지 전과정에 걸쳐 연속적으로 비추며, 반대편의 일직선상에 있는 초고속카메라(Chronos 1.4, 32,667 fps)로 영상을 획득하게 된다.

버블 붕괴로 인한 충격력은 28 μ m PVDF(FDT1-028K)에 의해 신호를 받아 오실로스코프(PICOSCOPE 5443D 100MHz, 1GS/s)에 기록된다. 본 실험은 μ s(마이크로초)의 컨트롤이 요구됨에 따라 NI Compact Rio 및 Labview의 FPGA 모듈을 이용하였으며, 두 개의 버블 발생기와 초고속카메라 및 PVDF 센서신호가 동기화되게 설계되어 있다. MOSFET 스위치로 인해 플라즈마가 발생함과 동시에 캐비테이션 버블이 발생하게 된다. 전압에 따라 발생버블의 크기가 달라지는데 본 논문에서는 세 종류의 전압 46, 52, 60 volt를 사용하였다.

12 mm \times 30 mm의 센서부를 가진 PVDF는 방수처리를 위해 50 μ m 두께로 라미네이팅 처리를 했으며, 다시 양면테이프로 부착을 하여 실험에 사용하였다(Fig. 2). 작은 γ 값에서는 플라즈마가 발생하는 위치와 센서사이의 거리가 가까우므로 플라즈마 발생시 접지된 구리선이 끊어지면서 파편이 발생하게 된다. 이때, 제일 상부에 부착된 테이프는 구리선 파편의 순간적인 높은 온도에도 손상 없어야 하며, 센서의 방수가 지속적으로 확보되어야 한다. 센서의 캘리브레이션은 최종 방수처리가 마무리 된 상태에서 충격-모멘텀 형식의 볼 낙하방식으로 수행되었으며(Hujer and Muller[2018]), 그 환산값은 0.0177 Volt/Newton을 구했다(카탈로그 값은 0.013 V/N).

Fig. 3에는 본 논문의 실험에서 사용하게 될 세 개의 다른 버블 크기를 설정하기 위해 세가지의 전압 46, 52, 그리고 60volt를 각

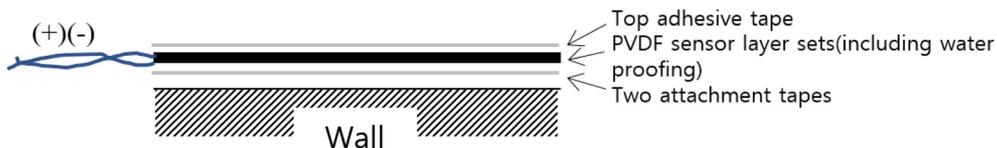


Fig. 2. Waterproofed and laminated PVDF.

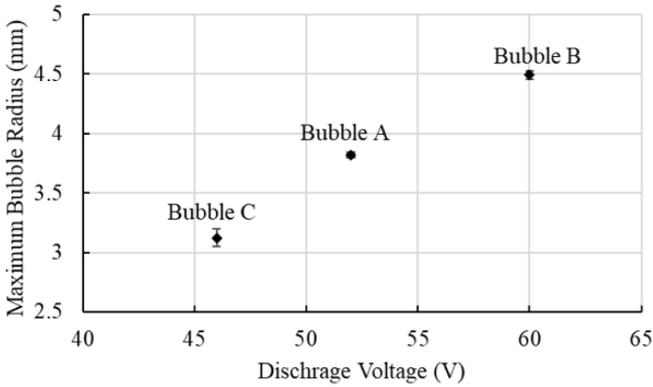


Fig. 3. Bubble size consistency for ten repetitive spark discharges through 46Volt, 52Volt and 60Volt.

각 10번씩 테스트 한 것으로 최대반경의 평균값 3.1 mm(small), 3.8 mm(medium), 그리고 4.5 mm(large)를 나타내었다. 약 2~3%의 실험 변동값을 가진다. 카메라의 성능, PVDF센서의 유효면적, 전 기스파크방식의 용량등을 고려하여 버블크기 세가지를 정하였다.

3. 단일 캐비테이션 버블 붕괴

무한원방(free field)상에서 버블 붕괴시에는 수축과 팽창을 반복 하면서 진동을 유발시킨다는 것은 Reyleigh-Plasset 방정식과 고속 카메라 촬영 실험을 통해서 잘 알려진 바이다(Franc and Michel [2004]; Franc *et al.*[2011]). 또한, 본 논문에서 사용될 단일 및 복 수개의 버블 크기는 Fig. 4(a)의 반경 3.8 mm를 기준으로 (b)는 보다 큰 4.5 mm, (c)는 작은 3.1 mm로 설정하였으며, 4장의 복수 캐비테이션 버블시에도 이들의 조합으로 구성하였다.

버블과 벽과의 거리 무차원 값은 $\gamma = d/R_{max}$ 로 표현되며, d 는 구리 와이어의 교차점(또는 버블중심)에서 벽까지의 거리, R_{max} 는 버블의 최대 반경을 나타낸다. Fig. 5에는 세가지 다른 직경의 버블이 γ 에 따라 계속된 최고충격값과 시간으로 적분한 충격량을 그래프로 나타내었다. γ 값이 커진다는 것은 벽면과 멀어진다는 의미이므로 충격값이나 충격량은 점점 줄어들 것이다. 다만 특정한 γ 값에서는

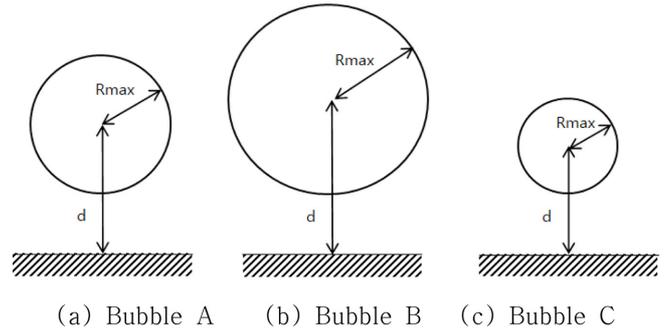


Fig. 4. Single bubble collapse near boundary (R_{max} , A=3.8 mm, R_{max} , B=4.5 mm, R_{max} , C=3.1 mm).

두 번째 충격 최대값이 첫 번째 충격값보다 더 큰 값이 나타나고 있다.

즉, γ 가 0.5정도보다 작을 경우는 1차 충격값이 2차 충격값 보다 월등히 높은 값을 보이나, γ 가 약 0.8에서 약 2.0까지는 2차 충격력이 1차 충격력보다 더 높은 값을 가지고 있다는 것을 실험 결과값 으로부터 얻을 수 있었다. 이러한 경향성은 기존 논문들과 일치한다. γ 가 커짐에 따라 그리고 버블의 크기가 클수록, 충격력의 진동 패턴은 2차 보다 1차 충격력이 보다 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 또한, 버블 크기가 클수록 2차 충격력의 크기가 커진다는 사실임에 주목할 필요성이 있다. 뿐만 아니고, Fig. 5의 γ 에 따른 충격량 그래프에서도 알 수 있듯이 버블의 크기가 클수록 충격량의 기울기는 높아짐을 알 수 있다. 벽면에 가까워질수록 분명 충격량이 감소하는 범위가 존재하나 그 값은 바로 회복함을 알 수 있으며, 이는 2차 충격이 1차 충격보다 더 큰 범위에도 충격량은 결코 작지 않다는 사실을 알 수 있다. Fig. 6은 52Volt에 반경 3.8 mm의 경우, γ 가 1.05 일때의 일반적인 캐비테이션 붕괴사진을 나타내고 있다. 1.2 milisecond(ms)에서 마이크로젯이 발생함을 알 수 있고, 그 속도는 약 50 m/s정도로 나타났다.

작은 크기의 단일 캐비테이션 버블 연구는 1장 서론에서도 언급 했듯이 비교적 많은 연구자들에 의해 연구되었으므로 본 논문에서는 두 개의 버블에 의한 실험결과를 거론하고자 한다.

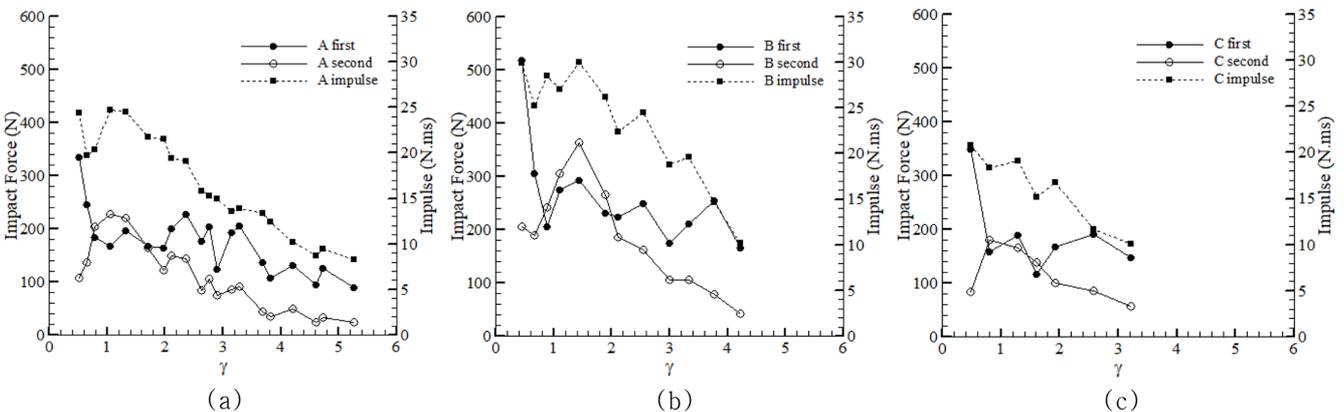


Fig. 5. Impact forces on the left and impulse on the right according with γ (a) R_{max} , A=3.8 mm, (b) R_{max} , B=4.5 mm, and (c) R_{max} , C=3.1 mm).

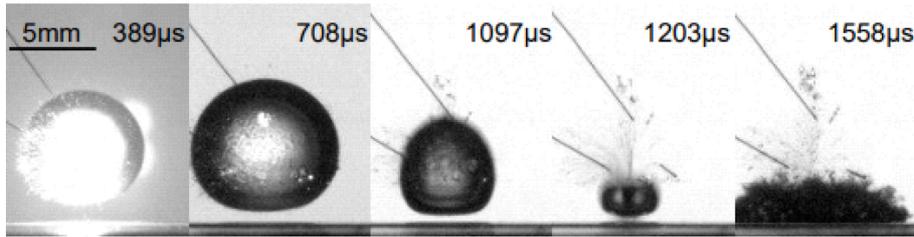


Fig. 6. A cavitation bubble's life from generation to collapse near a solid wall ($\gamma=1.05$).

4. 복수 캐비테이션 버블 붕괴 형태

복수의 버블붕괴가 단일 버블붕괴와 다른 점은 버블 주위의 경계면이 다양하다는 것이다. 단일 버블의 붕괴 시에는 버블 한 개와 고체면 뿐이지만 두 개이상의 버블은 고체면과 버블사이에 또 하나의 버블이 있음으로 해서 자유표면과 같은 경계면이 중복으로 존재한다는 것이다. 본 장에서는 두 개의 버블에 관해 실험한 결과를 나타내고자 한다. Fig. 7과 같이 크기가 다른 (또는 같은)버블 두 개가 아래 위 세로 방향으로 배치되어 있는 경우로 크기가 다른 조합으로 구성되어 있다. 아래버블은 그 위치가 고정되어 있고, 위의 버블은 위아래로 움직이게 된다. 즉, 아래버블은 고체면과 다른 버블 사이에, 윗 버블은 주위에 다른 버블과 무한원방인 상태이고, 버블의 크기가 다르다는 것은 버블발생에서 붕괴사이의 시간이 다르다는 것임으로 고체면에 가해지는 충격압도 다소 복잡할 것으로 예상된다.

3장 Fig. 4에서 나타난 a, b, c의 버블크기로 4가지의 조합을 구성하였다. 각각의 경우 두 버블의 발생 시기는 동기화가 이루어져 동일한 시간에서 플라즈마가 발생하며, 전압에 고저에 따라 버블의 크기가 조절된다. 중간크기의 A-A형, 아래가 큰 버블인 A-B형, 작은 버블 A-C형, 그리고 큰 버블과 작은 버블 B-C형이다(Fig. 7).

무차원 길이로는 $\gamma_1=d1/R_{max}$, $\gamma_2=d2/R_{max}$, $\eta=d1/(R_{max1}+R_{max2})$ 로 설정하고, 고체면과 가까운 버블은 $\gamma_2 \sim 0.8$ 로 선정하였으며, 4가지 경우에 모두 동일한 값으로 고정시켰다. γ_1 은 위의 버블이 위 아래

로 움직임에 따라 다른 값을 가진다. 따라서, 두 버블간의 거리를 나타내는 η 값은 0.4~2.0의 범위에 위치한다. γ_2 를 0.8로 선정한 이유는 Fig. 5에서 확인했듯이 두 번째 충격이 첫 번째 충격값보다 큰 영역이 존재한다. 한편, 복수개일 경우에도 동일 영역이 존재하는지 실험으로 확인하는 것도 흥미로운 일일것이다.

고체면상에 두 버블의 거동 및 붕괴 시에 충격력을 알아보기 위한 것이 목적으로(5장 기술), 우선 수축 붕괴 시에 두 버블간의 형태변화에 대해 알아보려고 한다. 두 버블간의 거리가 가까워지거나 특히 고체면에 가까울 때 아래와 같이 다섯 가지의 형태변화가 생김을 확인할 수 있었다.

4.1 콘 형태(AA, AC)

Fig. 8에서는 AA조합과 AC조합의 경우에, 버블 반경이 최대가 되었을 시점부터 붕괴시점까지의 사진을 시간대 별로 열거했다. 두 버블 사이는 어느 정도 간격이 있으며($\eta=1.71 \sim 1.739$) 바로 위의 버블이 수축과 함께 벽면 버블이 수축함에 있어 콘의 형태로 나타난 후 바로 벽면으로 붕괴된다. 붕괴전 Fig. 8(c)와 (f)에서 위 버블이 수축 시 상단에서 버블중심으로 쏠려 들어오는 흔적을 볼 수 있다.

4.2 종 모양(AA, AB)

Fig. 9의 경우는 AA조합과 AB조합에 있어 비교적 η 가 가까운 값(1.18~1.2)에서 나타나는 형태로, 두 버블과 근접한 면에 보조개 처럼 약간 패인 면이 보이며, 벽면에서도 얇은 유체막이 붕괴 전까

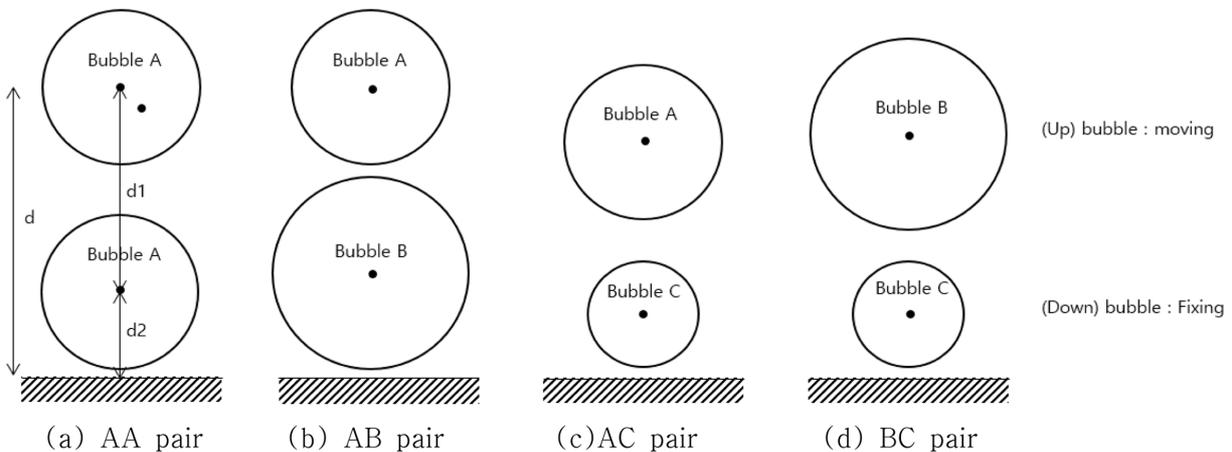


Fig. 7. Schematic of two bubbles interaction near boundary.

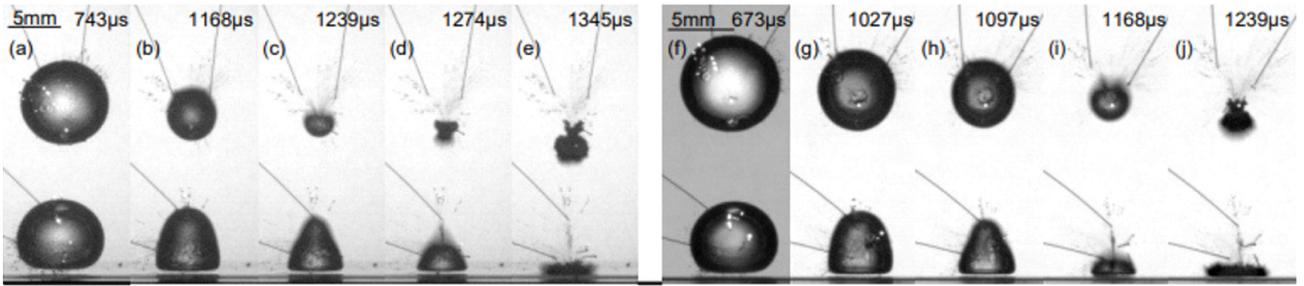


Fig. 8. Bubble deformation (a)-(e) AA pair with $\eta=1.71$ (f)-(j) AC pair with $\eta=1.739$.

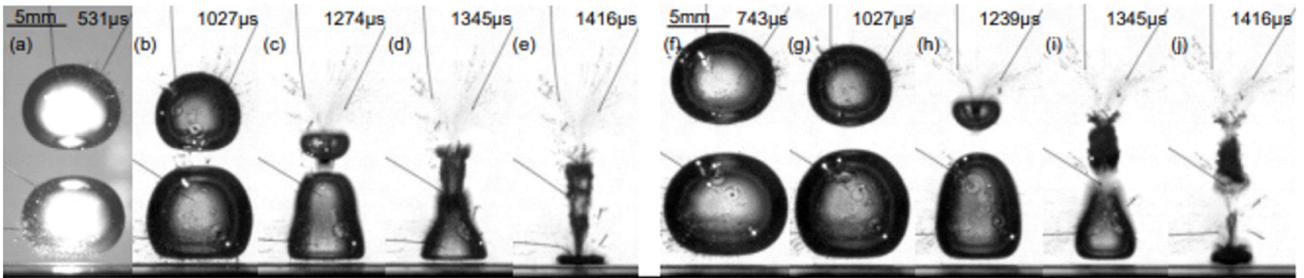


Fig. 9. Bubble deformation (a)-(e) AA pair with $\eta=1.18$, (f)-(j) AB pair with $\eta=1.2$.

지 존재한다. Fig. 9(c) 아래버블은 좀 부풀어 올라있는 종모양의 형태가 나타난다. 즉, Fig. 8보다는 두 버블이 가까이 붙어 있어 버블의 수축이 아래버블의 수축을 지연시키는 효과가 나타난다. 이어서, Fig. 8(d)와 (i)는 축의 형태로 붕괴 후 잔여버블이 합쳐지는 모습을 보이는데, 아래 버블이 수축하면서 위 버블의 1차 붕괴 후의 잔여버블을 아래쪽으로 끌어당기는 형태를 보인다. Fig. 9(h)~(i)에서는 위 버블의 마이크로버블젯이 뚜렷히 보인다.

4.3 핀치 오프(AC, BC)

Fig. 10의 경우는 위의 버블보다 아래 버블의 크기가 작을 경우 즉, AC와 BC의 경우에 나타나는 형태로 벽면과 가까운 아래버블이 핀치오프 형태임을 알 수 있다. 즉, 버블간 거리가 비교적 가까

울 경우($\eta=1.18\sim 1.23$)에 아래 버블의 중간 목 부분이 발생하는 데, 이는 위 버블의 수축과 아래 버블의 수축 시에 아래 버블의 상단부가, 보다 큰 직경인 상단 버블의 수축력에 영향을 받는 것으로 파악된다. 이는 Fig. 10(d)(f)에서 실 형태의 세로선이 보이며, 이 일정부분이 위 버블의 2차 분리와 결합되어 큰 버블(Fig. 10(e),(j))이 형성됨을 알 수 있다.

4.4 백열등 모양(AC, BC)

Fig. 11은 Fig. 10의 경우보다 버블사이의 거리가 가까울 경우 백열등모양으로 나타나고 있다. Fig. 10과 같이 아래 버블에서 주름이 지고, 위의 버블이 풍선모양 같은 형상으로 이루어져 있다. 크기가 큰 위 버블이 수축하기 전에 작은 크기의 아래 버블이 먼저

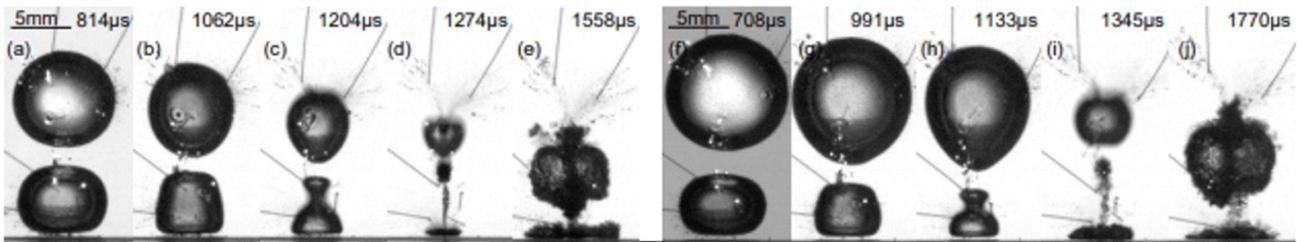


Fig. 10. Bubble deformation (a)-(e) AC pair with $\eta=1.23$, (f)-(j) BC pair with $\eta=1.18$.

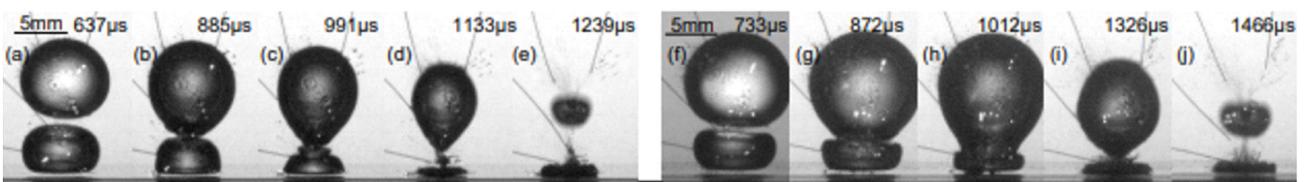


Fig. 11. Bubble deformation (a)-(e) AC pair with $\eta=0.94$, (f)-(j) BC pair with $\eta=0.79$.

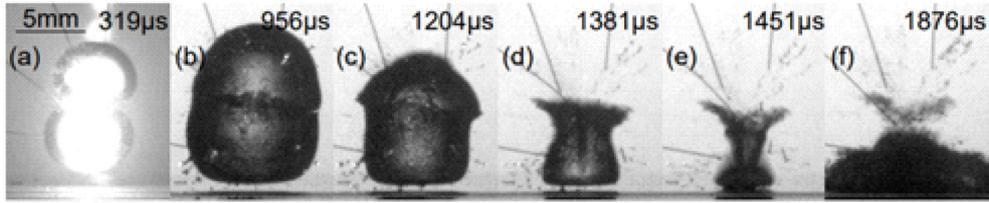


Fig. 12. Bubbles deformation (a)-(f) AB pair with $\eta=0.42$.

수축함으로 인해 아래버블의 상단으로 몰려드는 유선이 풍선 끝단에 방해를 받아 주름형상이 보인다.

4.5 합체 형태(AB)

Fig. 12은 두 버블 사이의 거리가 가장 가까운 경우($\eta=0.42$)로 아래 버블은 원기둥 형태 위의 버블은 원뿔의 형태로 합체되어 윗 버블이 수축되면서 마이크로젯(Fig. 12(d))이 발생함을 명확하게 관찰 할 수 있다.

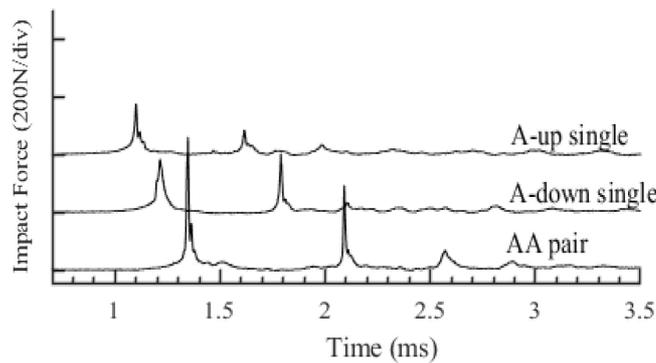
두 버블이 수직으로 배치되었을 때 두 버블의 간격 η 에 따라 형태가 바뀌는 것을 확인하였고, 아래 버블이 큰 경우는 종의 형태로 작은 경우는 펀치오프 형태로 나타남을 알 수 있다. 이어서 5장에서는 두 버블 붕괴 시에 벽면에 작용하는 충격력을 확인하고자 한다.

5. 복수 캐비테이션 버블 붕괴 충격력

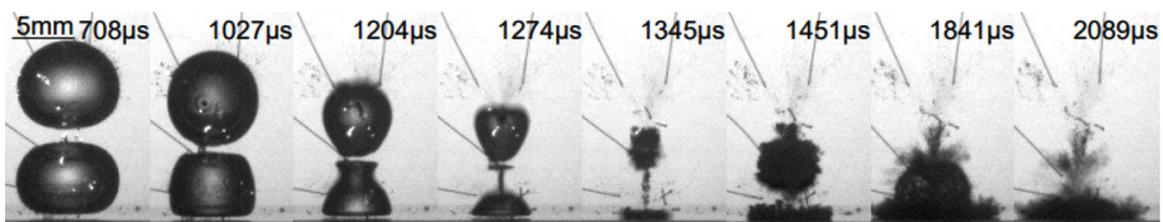
정지된 유체 내에 두개 소형 캐비테이션 버블의 붕괴로 인해 고체면에 발생하는 충격력에 대해서 PVDF센서를 활용하여 계측한 결과를 고찰한다. 무한원방에서의 단일버블의 팽창과 수축이 반복

되면서 소멸해가는 현상을 통해 고체면 가까운 곳에서 버블이 발생시에도 발생과 수축, 붕괴되면서 충격력이 고체면상에 발생하게 된다. 이때 첫 번째 붕괴로 인한 충격을 1차 충격, 다시 팽창되었다가 재 붕괴가 2차 충격으로 이어지고, 붕괴 에너지가 소멸 할 때까지 계속된다. 실험적으로 보았을 때, 경우에 따라 3, 4차 충격까지 보이거나 주로 1차와 2차충격이 지배적인 것을 알 수 있다. 이는 복수개의 버블일 경우도 유사하게 나타났다. 단일버블 실험 때와 동일한 실험방법으로 두 개의 버블을 위해 회로를 두 개 제작하였다. 4장에 나타난 버블 형태 중 대표적 결과를 시간선상에 충격값들과 비교하였다. 가로축은 시간을 세로축은 한 칸당 200N을 나타내며, 편의상 실험 케이스에 따라 동시에 표현하였다. 먼저 AA의 경우를 고려해 보자. 두 버블은 동일한 크기로 γ_1 은 2.631, γ_2 는 0.789 그리고 $\eta=0.921$ 의 경우이다. Fig. 13(a)를 보면 버블 생성에서 붕괴이후까지(0.0 ms~3.5 ms)의 충격력을 나타낸 것으로 AA pair는 두 개의 버블, A-up single은 위의 버블 한 개만 있을 때이며, A-down single은 아래버블(γ_2 위치)만 있을 때이다.

Fig. 13(a)는 PVDF를 통해 벽면에서의 충격신호가 비교적 명확하게 계측됨을 알 수 있다. 첫 번째 붕괴와 두 번째 붕괴 시점에 있



(a) Comparison of sensor outputs



(b) Evolution of bubbles morphology

Fig. 13. Bubble interaction of AA pair for parameters: $\gamma_1=2.631$, $\gamma_2=0.789$, $\eta=0.921$.

어 몇 가지 중요한 정보를 보여준다. 고체면과 멀리 떨어져 있는 버블1의 경우(A-up single) 고체면과 가까이 있는 버블2(A-down single)보다 붕괴시점이 빠르다는 점이다. 이것은 버블2의 경우 고체경계면의 영향으로 버블2의 형태가 다소 옆으로 퍼진 형태를 보인다(Fig. 6). 이로 인해 0.1 ms정도 충격시점이 조금 밀렸다. 뿐만 아니고, 충격값의 최대치를 살펴보자. 벽면 충격치를 논할 때 1차 충격이 그 뒤에 일어나는 2차 충격보다 큰 것이 일반적이다(Fig. 13(a) A-up single). 그러나, Fig. 13(a) A-down single을 보면 2차 충격값이 1차 충격값보다 큰 것을 알 수 있다. 이 현상은 Fig. 5에서도 이러한 경향이 나오는 것을 확인한 바 있다. 즉, γ 값에 따라 두 번째 충격값이 첫 번째 충격값보다 더 큰 영역이 있다는 것이다. 동일 크기의 버블(AA pair)의 경우, 단일 버블의 충격력 최대값을 각각 따로 단순 합산한 것 보다 크다는 것을 알 수 있고, 최대값이 발생하는 시점이 버블2보다 더 뒤에 발생한다는 사실도 흥미롭다. 이러한 시간지연은 4-2장에서도 언급했듯이 버블1의 수축력이 버블2에 영향을 끼치는 것으로 생각할 수 있다. 또한, 계측값을 통해 AA pair는 1.34 ms에서 1차 붕괴되었으며, 이것은 Fig. 13(b)에 1,274 μ s 및 1,345 μ s의 사진을 통해 확인할 수 있다. 이후, 2차, 3차 붕괴를 통해 각각의 충격력이 점차 감소하고 있는 경향이 보인다.

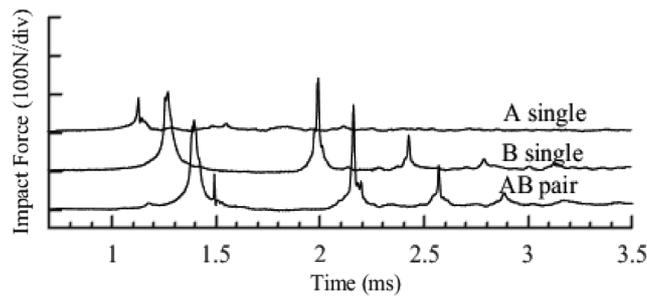
Fig. 14(a)은 $\gamma_1=5.263$, $\gamma_2=0.888$, $\eta=1.927$ 으로 Fig. 13 보다 두 버블 사이는 두 배 정도로 떨어져 있고 아래 버블이 큰 경우이다. 따라서 두 버블의 경우(AB pair)는 버블2(B single, down)와 비교하면 최대충격치는 약간 높은 정도이다. AB pair 센서 값을 보면 1.5 ms에서 위 버블의 2차 충격값이 미세하게 감지된다(1차는 1.16 ms-아래버블이 쿠션역할로 인해 충격값이 작게 보임). Fig. 13의

경우보다 충격값의 크기 자체는 반 정도로 작지만, AB pair의 2차 충격은 1차보다 크다는 사실도 뚜렷이 보여주고 있다. 다만, 충격값의 스파이크 폭은 좁다. Fig. 14(b) 1,345 μ s에서 양 버블의 내부에 마이크로젯이 뚜렷이 확인된다.

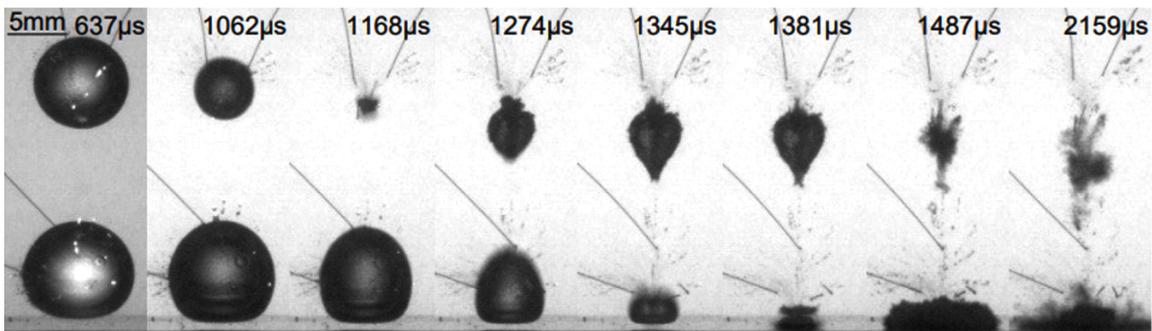
Fig. 15(a)는 $\gamma_1=2.763$, $\gamma_2=0.888$, $\eta=0.783$ 으로 AB pair에서 버블 간의 간격이 가까운 경우 역시 최대 충격값은 크게 나온다. 고체면 가까이에 있는 버블의 크기가 그 위의 버블크기와 비교해서 비슷하거나 크면, 1차와 2차 충격값이 뚜렷이 나온다. 특히, 두 버블에 있어 2차 충격값이 무시 못할 중요한 요소인 것을 알 수 있다. 3차 충격부터는 그 값이 대폭 감소된다. Fig. 15(b) 1,381 μ s에서 100 μ s 걸쳐 위 버블의 마이크로젯이 아래버블 안을 관통하고 있는 것을 볼 수 있다.

마지막으로 BC페어의 경우를 살펴보면, 반경 4.5 mm 버블이 위쪽에, 반경 3.1 mm 버블이 고체면 가까이 발생할 경우를 나타낸다(Fig. 16). 즉 아래 작은 버블이 먼저 붕괴하는 경우로 BC pair는 다소 복잡한 충격 형태를 나타낸다. 고체면에 가까운 버블의 첫 번째 붕괴시점과 두 번째 붕괴시점은 1.1 ms와 1.37 ms이며, 위쪽의 버블은 1.3 ms와 1.86 ms임을 Fig. 16(a)에서 보여준다. 즉, 충격력의 크기를 보더라도 고체면에 가까운 버블은 두 번째 충격력(1.37 ms에서)이 큰 것을 알 수 있다. 그리고, 충격력의 폭을 보더라도 아래쪽 버블이 넓고, 위쪽 버블이 좁은 것을 알 수 있다. 만약, 의 도을 따라서, 고체면에서 먼 버블의 크기가 큰 경우의 첫 번째 붕괴와 고체면 가까이의 버블의 두 번째 붕괴시점이 일치 할 경우 순간적으로 큰 충격력이 발생할 수 있다는 점을 시사하고 있다.

따라서, 고체면과 가까울수록, 버블사이의 거리가 가까울수록 고

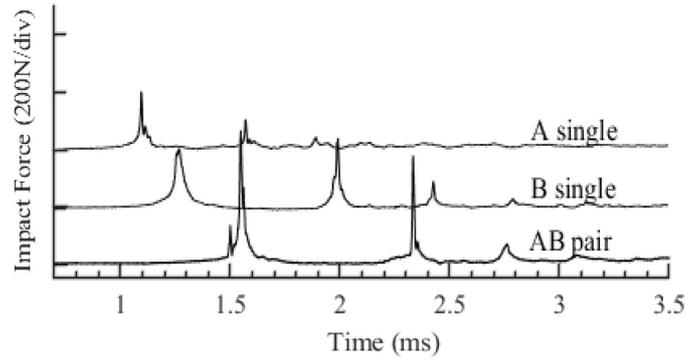


(a) Comparison of sensor outputs

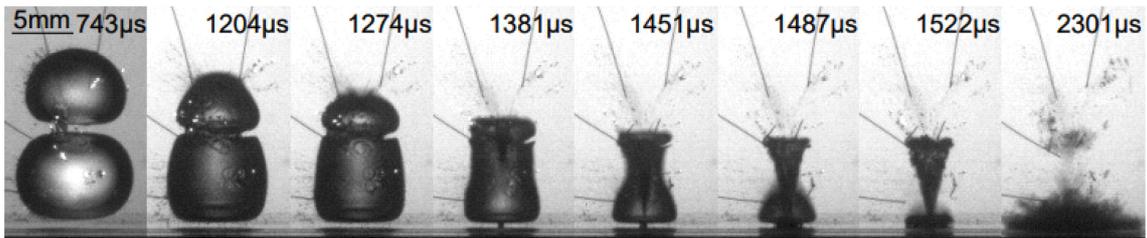


(b) Evolution of bubbles morphology

Fig. 14. Bubble interaction of AB pair for parameters: $\gamma_1=5.263$, $\gamma_2=0.888$, $\eta=1.927$.

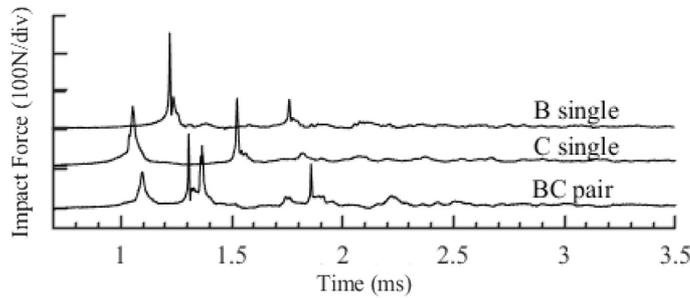


(a) Comparison of sensor outputs

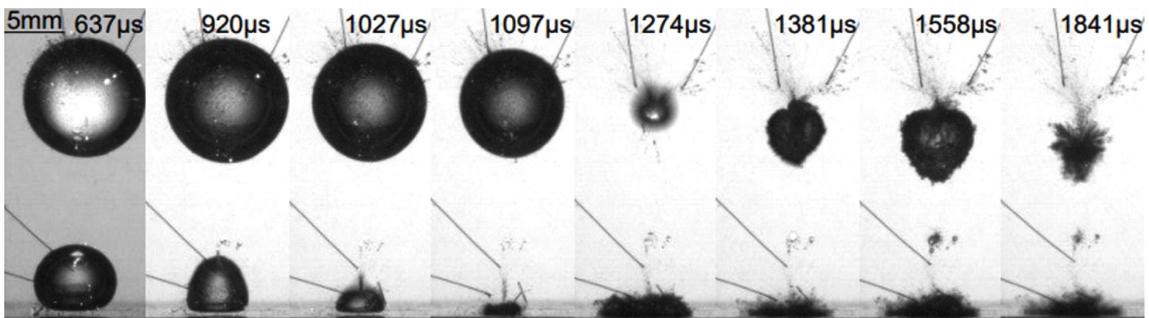


(b) Evolution of bubbles morphology

Fig. 15. Bubble interaction of AB pair for parameters: $\gamma_1=2.763$, $\gamma_2=0.888$, $\eta=0.783$.



(a) Comparison of sensor outputs



(b) Evolution of bubbles morphology

Fig. 16. Bubble interaction of BC pair for parameters: $\gamma_1=3.777$, $\gamma_2=0.806$, $\eta=1.907$.

체면에 미치는 충격력이 커진다는 것을 알 수 있다. 이런 충격력의 최대값을 확인 하는 것도 의미가 있으나, 경우에 따라서는 충격량을 검토하는 것 또한 공학설계에 있어 중요한 요소라 할 수 있다. 6장에서는 그 값을 비교해 보았다.

6. 복수 버블 붕괴 충격력과 충격량

단일버블 및 두 개버블의 붕괴시 발생하는 1차, 2차 충격값의 최대치의 경향 및 최대치가 발생하는 시점을 중심으로 시간 구획으로 적분한 값인 충격량을 Fig. 17(왼쪽그래프(a)(c)(e)(g)는 충격력, 오

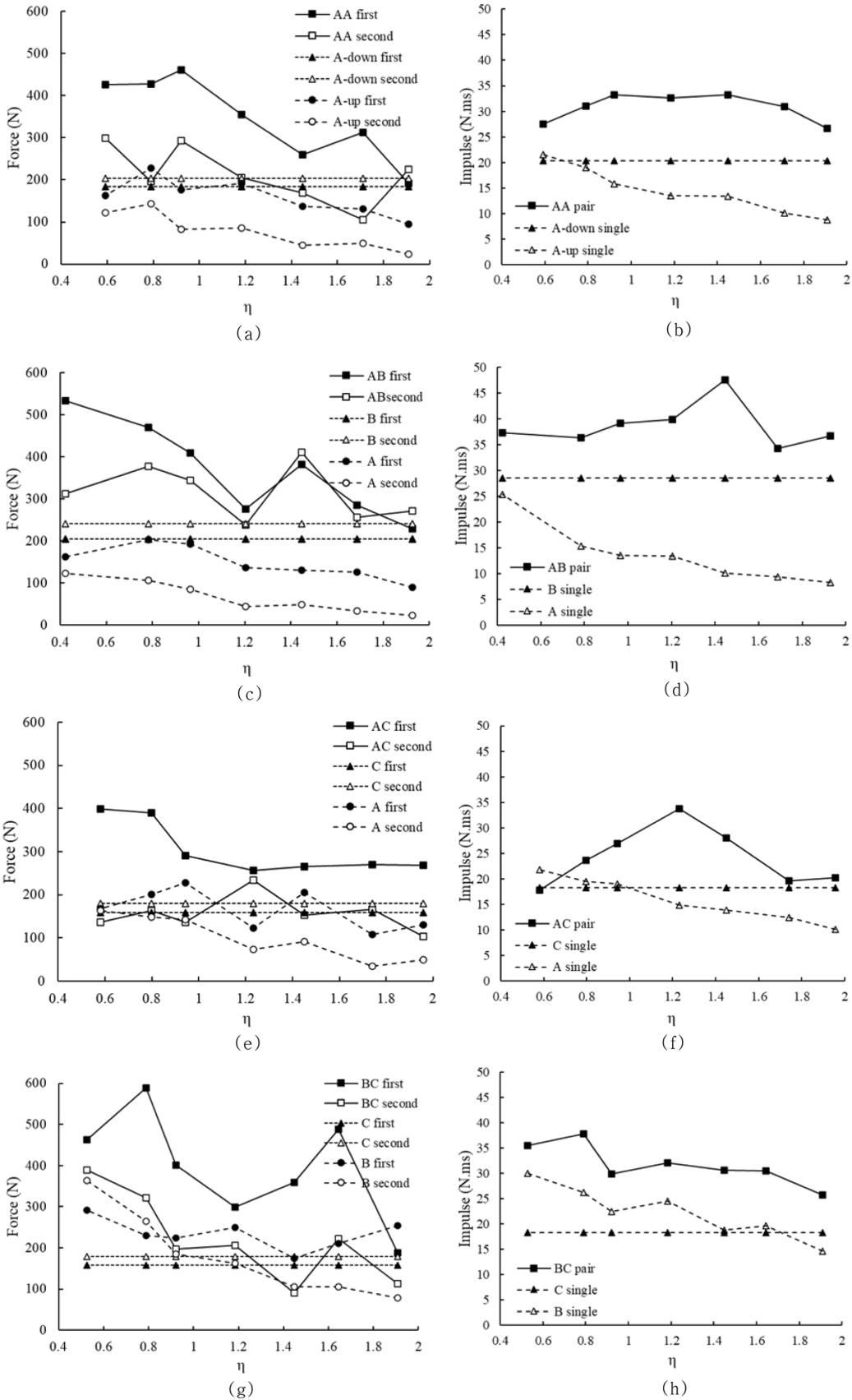


Fig. 17. Comparison of first and second peak forces and impulses for (a)-(b) AA pair and single bubble As, (c)-(d) AB pair, single A and single B, (e)-(f) AC pair, single A and single C (g)-(h) BC pair, single B and single C, as a function of η (or γ alternatively).

른쪽그래프(b)(d)(f)(h)는 충격량)에 나타내었다. 본 그래프는 가로 축이 두 버블인 경우는 η 를, 단일 버블인 경우는 γ 의 값으로 생각해도 무방하다. 두 버블일 경우, 고체면에 가까운 버블은 고정해 두고 다른 버블을 상하로 이동하면서 거리 η 를 증가해 가며 첫 번째 붕괴로 인한 충격력과 두 번째 붕괴로 인한 충격력을 나타낸 결과로 실선으로 표현되어 있으며, 단일 버블에 대해서는 점선으로 표현되어 있다. 그리고, 각 조합당 아래 버블로 단독 버블의 1차 및 2차 붕괴 충격값은 평행선으로 나타내었다. 두 버블인 경우 대부분 첫 번째 충격력이 두 번째 충격력보다 크게 나타나지만 η 가 증가함에 따라 충격력의 차가 줄어드는 것을 볼 수 있다(Fig. 17(e)의 경우는 $\eta=1.2$ 까지는 줄어든다가 그 이후는 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 크기가 작고, 버블사이에 상호관련성이 적어지기 때문이다). 충격력이 역전하는 경우도 있는데, 이 현상이 단일버블일 때 γ 가 1.0 근방이라면 두 개 버블시에는 η 값이 약 1.4이상때 보이는 경향이 있으나 γ 보다는 뚜렷하지 않다. 그리고, AC와 BC를 비교하면 두 버블의 크기차가 크면 클수록 η 에 따른 충격력 변동성이 크게 나타난다.

한편, 충격량의 경우, 버블 크기가 동일한 경우인 AA가 η 에 따라 33[N·ms]정도로 부드럽게 나타나, 버블의 크기가 다른 조합들에서는 충격량의 변동성이 뚜렷하다. AB조합일 경우 η 가 1.4일 경우 50[N·ms]으로 가장 큰 값을 나타내고 있는데, 전반적으로 고체면 가까이 발생하는 버블의 크기가 상대적으로 클 경우에 보다 큰 충격량이 발생한다는 것을 알 수 있다. 더우기, 버블간의 무차원 거리가 특정값일 때 매우 큰 충격량이 동반된다는 것이다. 이 현상은 AC 조합일 때도 동일하다. 본 실험에서는 1.2일때가 가장 큰 충격량을 나타내며, 최소값과 비교해서 두배정도의 충격량 차이가 나타난다. 오히려 BC조합의 경우는 버블간 거리가 가까울 때 변동성이 있어, 버블의 크기의 변화가 클 때, 충격력의 변동성은 크나, 충격량의 경우는 변동성이 크지 않다고 추정 할 수 있다.

7. 결 론

유체기계 내 증기압 이하에서 발생하는 캐비테이션 버블을 가상하여 정지된 유체 내에서 전기 스파크 발생방법으로 두 개의 버블을 발생시켜 PVDF센서 계측 결과 및 동기화된 고속카메라의 붕괴영상을 통해 고체 평면에 가해지는 충격치를 정량적으로 분석하였다. 크기가 다른 두 버블이 간격 η 및 고체면과의 거리 γ 를 무차원수로 하여 고체면으로 부터 수직으로 배치되었을 때 버블의 발생 및 붕괴과정을 거치면서 다섯 가지의 형태로 구분 지었으며, 아래 버블이 큰 경우는 중의 형태로, 작은 경우는 핀치오프 형태로 나타남을 알 수 있었다. 벽면에 가해지는 충격력적인 면에서는 고체면과 가까울수록, 버블사이의 거리가 가까울수록 고체면에 미치는 충격력이 커지고, 고체면 가까이 발생하는 버블의 크기가 상대적으로 클 경우가 보다 큰 충격량이 발생한다. 두 버블의 경우는 단일 버블의 충격력보다 두 배 이상 높고, 두 버블이 상대적으로 차이가 날 때, 충격력의 변화가 심하고, 크기가 동일 할 때 보다는 충격량의 변동성이 크다.

후 기

본 연구에 집중할 수 있도록 여건을 마련해 주신 안형택교수님께 감사드립니다.

References

- [1] Blake, J.R., Robinson, P.B. Shima, A. and Tomita, Y., 1993, Interaction of Two Cavitation Bubbles with a Rigid Boundary. *J. Fluid Mech.* 255, 707-21.
- [2] Bremond, N., Arora, M., Dammer, S.M. and Lohse, D., 2006, Interaction of Cavitation Bubbles on a Wall. *Phys. Fluids* 18(12).
- [3] Brennen, C.E., 2015, Cavitation in Medicine. *Interface Focus* 5(5), 1-12.
- [4] Brujan, E.A., Keen, G.S., Vogel, A. and Blake, J.R., 2002, The Final Stage of the Collapse of a Cavitation Bubble Close to a Rigid Boundary. *Phys. Fluids* 14(1), 85-92.
- [5] Chahine, G.L., Kapahi, A., Choi, J.-K. and Hsiao, C.-T., 2016, Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse, *Ultraso. Sonochem.*, 29, 528-549.
- [6] Chew, L.W., Klaseboer, E., Ohl, S.-W. and Khoo, B.C., 2011, Interaction of Two Differently Sized Oscillating Bubbles in a Free Field. *Phys. Rev. E* 84(6), 66307.
- [7] Fong, S.W., Adhikari, D., Klaseboer, E. and Khoo, B.C., 2009, Interactions of Multiple Spark-Generated Bubbles with Phase Differences. *Exp. Fluids* 46(4), 705-24.
- [8] Franc, J.-P. and Michel, J.-M., 2004, *Fundamentals of Cavitation*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers.
- [9] Franc, J.-P., Riondet, M., Karimi, A. and Chahine, G.L., 2011, Impact Load Measurements in an Erosive Cavitating Flow. *J. Fluids Eng. Trans. ASME* 133(12).
- [10] Goh, B.H.T., Oh, Y.D.A., Klaseboer, E., Ohl, S.W. and Khoo, B.C., 2013, A Low-Voltage Spark-Discharge Method for Generation of Consistent Oscillating Bubbles. *Rev. Sci. Instrum.* 84(1).
- [11] Hujer, J. and Müller, M., 2018, Calibration of PVDF Film Transducers for the Cavitation Impact Measurement. *EPJ Web Conf.* 180, 2-5.
- [12] Lee, P.-H., Ahn, B.-K., Lee, C.-S., Lee, J.-H., 2011, An experimental study on noise characteristics of propeller cavitation inception. *J. Soc. Nav. Archit. Korea.*, 48(1), 1-7.
- [13] Lindau, O. and Lauterborn, W., 2003, Cinematographic Observation of the Collapse and Rebound of a Laser-Produced Cavitation Bubble near a Wall. *J. Fluid Mech.*, 479, 327-48.
- [14] Luo, J. and Niu, Z., 2019, Jet and shock wave from collapse of two cavitation bubbles, *Scientific reports*, 9, 1352.
- [15] Okada, T., Iwai, Y., Hattori, S. and Tanimura, N., 1995, Relation between Impact Load and the Damage Produced by Cavitation Bubble Collapse. *Wear* 184(2), 231-39.

- [16] Robinson, P.B., Blake, J.R., Kodama, T., Shima, A. and Tomita, Y., 2001, Interaction of cavitation bubbles with a free surface, *J. Appl. Phys.*, 89(12), 8225-8237.
- [17] Sankin, G.N., Yuan, F. and Zhong, P., 2010, Pulsating Tandem Microbubble for Localized and Directional Single-Cell Membrane Poration. *Phys. Rev. Lett.* 105(7).
- [18] Schovanec, P., Jasikova, D., Kotek, M., Havlicek, K., Nechanicka, M., Eichler, J., Cech, J. and Subrtova, P., 2020, Sterilization of Biofilm in Foam Using a Single Cavitation Bubble. *MATEC Web Conf.* 328, 05003.
- [19] Shaw, S.J., Schiffers, W.P., and Emmony, D.C., 2001, Experimental Observations of the Stress Experienced by a Solid Surface When a Laser-Created Bubble Oscillates in Its Vicinity. *J. Acoust. Soc. Am.* 110(4), 1822-27.
- [20] Tomita, Y. and Sato, K., 2017, Pulsed Jets Driven by Two Interacting Cavitation Bubbles Produced at Different Times. *J. Fluid Mech.* 819, 465-93.
- [21] Tomita, Y. and Shima, A., 1986, Mechanisms of Impulsive Pressure Generation and Damage Pit Formation by Bubble Collapse. *J. Fluid Mech.* 169, 535-564.
- [22] Tong, R.P., Schiffers, W.P., Shaw, S.J., Blake, J.R. and Emmony, D.C., 1999, The Role of "splashing" in the Collapse of a Laser Generated Cavity near a Rigid Boundary. *J. Fluid Mech.* 380, 339-361.
- [23] Vogel, A., Lauterborn, W. and Timm, R., 1989, Optical and Acoustic Investigations of the Dynamics of Laser-Produced Cavitation Bubbles near a Solid Boundary. *J. Fluid Mech.* 206 (September), 299-338.
- [24] Wang, Y.-C. and Chen, Y.-W., 2007, Application of Piezoelectric PVDF Film to the Measurement of Impulsive Forces Generated by Cavitation Bubble Collapse near a Solid Boundary. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 32(2), 403-14.
- [25] Wang, Y.-C., Huang, C.-H., Lee, Y.-C. and Tsai, H.-H., 2006, Development of a PVDF Sensor Array for Measurement of the Impulsive Pressure Generated by Cavitation Bubble Collapse. *Exp. Fluids* 41(3), 365-73.
- [26] Yao, X., Cui, X. Guo, K., and Chen, Y., 2019, An Experimental Approach to the Measurement of Wall Pressure Generated by an Underwater Spark-Generated Bubble by a Hopkinson Bar. *Shock Vib.* <https://doi.org/10.1155/2019/5341317>

Received 3 December 2021

Revised 17 January 2022

Accepted 24 March 2022