



## 로켓추진을 이용한 고속 수중운동체의 수중 주행성능 측정 결과(II)

윤현걸<sup>a,\*</sup> · 이효남<sup>a</sup> · 차정민<sup>a</sup> · 임 설<sup>b</sup> · 서석훈<sup>b</sup>

### Measurement of Performance of High Speed Underwater Vehicle with Solid Rocket Motor(II)

Hyun-Gull Yoon<sup>a,\*</sup> · Hoy-Nam Lee<sup>a</sup> · Jung-Min Cha<sup>a</sup> · Seol Lim<sup>a</sup> · Suhk-Hoon Suh<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Agency for Defense Development, Korea

<sup>b</sup>Actuator Systems, Hanwha Corporation Defense R&D Center, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [hy9072@add.re.kr](mailto:hy9072@add.re.kr)

#### ABSTRACT

A natural cavitation-type high-speed underwater vehicle with solid rocket motor is tested, and its speed and running distance are measured. The outputs from pressure sensors on the surface of the vehicle reveal a pressure-time history reflecting the development of supercavitation. Underwater cameras installed on the wall of the test pool record the entire process from the onset of supercavitation to its full development. CNU-SuperCT, based on two-dimensional inviscid theoretical analysis, is used to simulate test results. Considering CNU-SuperCT does not include the control fins of the vehicle, simulation results agree with test results very well. Additionally, pictures from underwater cameras support the test results.

#### 초 록

고체 로켓추진기관을 이용한 자연공동형 수중운동체를 수중주행 시험하였다. 수중운동체의 속도 및 주행거리를 측정하고, 수중운동체 표면에 설치한 압력센서로 초공동의 발달에 따른 표면 압력 변화를 조사하였고, 수중카메라로 수중운동체에 초공동이 발생하여 진행되는 과정을 기록하였으며, 이를 이차원 비점성 이론해석법에 근거한 CNU-SuperCT 프로그램을 사용하여 계산한 시뮬레이션 결과와 비교하였다. CNU-SuperCT 프로그램은 수중운동체의 조종면을 포함하지 않고 계산하는 것을 고려하면, 시뮬레이션 결과와 측정결과가 잘 맞는다고 판단되며, 수중촬영결과도 이와 동일한 결과를 보인다.

Key Words: Supercavitation(초공동), Rocket Motor(로켓 모터), Natural Cavitation(자연공동), Underwater Vehicle(수중운동체)

Received 3 June 2017 / Revised 10 November 2017 / Accepted 14 November 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2017년도 춘계학술대회(2017. 5. 31-6. 2, 라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

#### 1. 서 론

초공동화 현상이란 어뢰, 탄체와 같은 수중운

동체의 고속주행 중에 발생한 공동이 몸체 전체를 뒤덮는 현상을 말한다. 이러한 초공동화 현상이 발생하게 되면, 수중운동체의 항력이 급격하게 감소하게 되어 주행 속도 및 거리 등에 큰 이득을 얻을 수 있다.

국내에서는 이은택 등이 높은 속도로 아주 기본적인 형상을 가진 수중운동체를 주행시켜 자연공동이 형성되는 것을 시험하여 발표하였고, 고속카메라를 이용한 수중 영상촬영을 통하여 초공동이 발생하는 지점을 확인하였다[1]. 임설 등은 로켓추진 및 초공동화 현상과 관련된 연구 결과들을 반영한 고속 수중운동체의 설계 및 수중 주행성능 예측방법에 대한 연구결과를 발표하였다[2]. 또한 윤현걸 등은 로켓추진기관을 이용한, 후단부에 조종면(fins)이 없는, 수중운동체의 수중주행 시험을 실시하고 그 성능을 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 주행거리, 속도 등을 측정하였으며, 고속으로 수중주행 중인 수중운동체의 표면 압력을 여러 곳에서 측정하여 초공동 발생여부를 확인하였다[3]. 본 연구에서는 위에서 언급된 연구에서 축적된 경험과 지식을 바탕으로 고체 로켓추진기관을 이용한, 후단부에 조종면이 있는, 자연공동형 수중운동체를 수중주행 시험하여 그 성능을 측정하고, 수중운동체 표면의 여러 곳에 압력센서를 설치하여 초공동이 발달됨에 따라 표면 압력이 어떻게 변화하는지를 조사하고, 이를 시뮬레이션 결과 및 수중촬영영상과 비교하였다.

2. 본 론

2.1 수중 시험 개요

직경 165 mm, 길이 2,290 mm인 수중운동체가 직경 50 mm의 캐비테이터와 수중운동체의 후단부에 4개의 조종면을 가지고 평균추력 12,600 N, 연소시간 1.7초의 성능을 가진 로켓추진기관을 이용하여 고속으로 수중 주행할 때의 주행성능을 측정하였다(Fig. 1 참조). 측정항목으로는 수중운동체 표면 4곳에서의 압력과 로켓추진기관의 연소압력, 수중운동체의 자세 정보를

알기위한 각속도, 가속도 등이 있다.

시험장의 크기 한계로 인해 총 주행가능거리는 134 m이며 주행깊이는 1.5 m이고, 수중운동체의 주행 안전성을 위하여 운동체 단면 중앙에 구멍을 내어서 강선을 따라 주행하도록 하였고, 운동체를 정지시킬 목적으로 정지 지점에 Fig. 2와 같이 11개의 원형 감속판을 50 cm 간격으로 설치하였는데, 감속시 수중운동체에 충격을 최대한 완화하기 위하여 감속판의 크기를 점차적으로 증가시켰다. 또한 Fig. 3과 같은 간격으로 수중에 카메라를 설치하여 시험시 수중주행영상을 기록하여 초공동이 발생하여 진행되어가는 과정을 기록하였다. 한정된 예산 내에서 설치한 카메라는 최대 240 frames/s를 기록할 수 있으나 이는 해상도와 화각 등과 연동하여 정해지며, 본 시험에서는 120 frames/s로 기록되었다.



Fig. 1 Configuration of underwater vehicle tested.

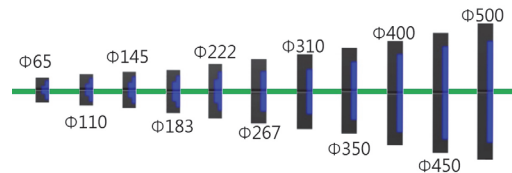
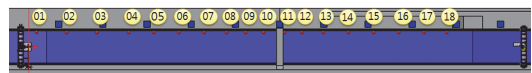


Fig. 2 Stopper assembly.



No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distance (m)	2.6	12.2	21.8	31.8	39.8	47.7	55.8	62.9	69
No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Distance (m)	74.7	81.4	86.9	93.6	101.6	109.6	117.6	125.7	132.9

Fig. 3 Schematic of test site for high-speed underwater vehicle and location of underwater cameras.

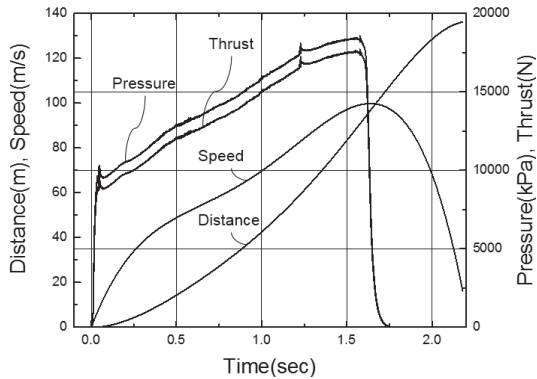


Fig. 4 Measured combustor pressure, thrust, distance, and speed of the underwater vehicle.

2.2 추진기관 성능, 주행속도 및 거리

Fig. 4는 로켓추진기관의 시간에 따른 연소실 압력 측정 결과와 이를 통해 계산된 추력 값을 보여준다. 추력은 사전에 실시된 지상연소시험 결과로부터 얻어진 압력-추력 관계식으로부터 얻을 수 있다. 로켓추진기관의 압력은 점화 후 0.09초에 9,500 kPa부터, 1.6초에 18,000 kPa까지 점진적(progressive)으로 증가하며 1.7초에 연소가 종료된 후 압력은 급격히 감소한다. 평균압력은 13,800 kPa이다. 추력은 8,500 N에서 17,600 N까지 증가한 후 감소한다. 평균추력은 12,600 N이고 총역적은 21,800 N·s이다. 또한 Fig. 4는 측정된 시간에 따른 수중운동체의 속도와 주행거리를 나타내고 있다. 속도는 0초부터 1.7초까지 지속적으로 증가하나, 선형적으로 증가하지는 않고 약간의 굴곡을 보이며, 최대 100 m/s이고 이때 주행거리는 98 m이며, 이후 속도는 감소하며 총 주행거리는 134 m이다. 이는 시험장의 길이방향 한계로 인해 설치한 첫 번째 감속판에 도달한 거리이다.

2.3 수중운동체 표면의 압력

수중운동체의 표면 4곳에 압력센서를 설치하여 수중주행중 수중운동체의 표면 압력을 기록하였다. Fig. 5에서 P1의 위치는 캐비테이터 뒷면이며, 수중운동체 전단에서부터 32.5 mm 길이

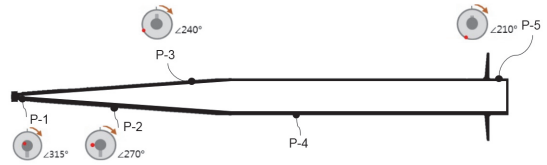


Fig. 5 Positions of pressure sensors installed on the vehicle.

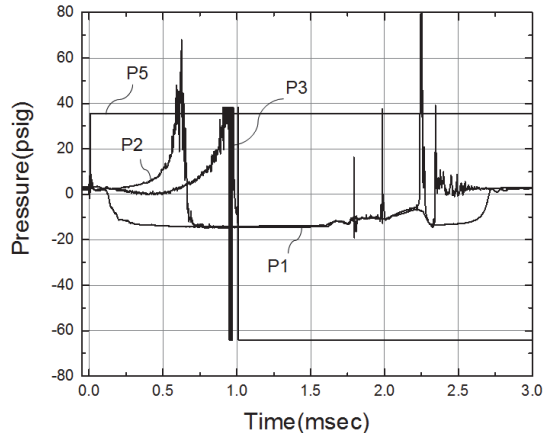


Fig. 6 Pressures measured on the vehicle surface.

위치이고, P2의 위치는 전방동체의 원뿔(cone) 부위의 경사면에 있고 수중운동체 전단에서부터 592 mm 길이 위치이며, P3의 위치는 역시 전방동체의 원뿔 부위의 경사면에, 운동체 전단에서부터 896 mm 길이 위치에, 이는 신호처리장치 전면에 위치하며, P5의 위치는 수중운동체의 후미에 위치한 조종면 뒤에 위치하며 운동체 전단에서부터 2,284 mm 길이 위치이다. 그리고 P4는 추진기관의 연소압력을 측정한다.

사용된 압력센서는 Kulite사의 XTM-190 series이며 압력센서의 측정범위는 P1, P3, P5는 50 psi, P2는 500 psi, P4는 5000 psi이다.

Fig. 6와 같이 P1은 0.35초에 -13 psig에 도달하여 이 압력이 2.2초까지 유지되며, P2는 0.7초에 -13 psig에 도달하여 2.2초까지 유지되며 P1과 유사한 값을 보인다. P3는 0.8초에 급격하게 증가하다가 측정범위를 과도하게 초과하여 overshoot된다. P5는 시작부터 급격하게 증가하여 38 psig를 유지하며 이상 현상을 보인다. 본 시험 이후에 실시된 다른 시험에서도 유사한 현

상을 보여 단순한 센서의 오류가 아니며, 이 지점에서 발생하는 현상을 조사할 필요가 있다고 판단된다.

2.4 계산한 공동 분포

공동의 분포를 계산하기 위하여 CNU-SuperCT 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 이차원 비점성 이론해석법에 근거하여 공동 내부 압력을 계산하는 대신 공동 표면에서의 접선 방향 속도 성분을 구함으로써 공동 내의 압력을 계산하는데, 공동의 범위를 먼저 가정하고, 이에 대응하는 공동 표면의 접선 방향 속도성분과 캐비테이션 수를 계산한다. 경계치 문제 해석을 위하여 수중운동체의 표면에 소스(Source)와 법선 다이폴(Dipole)을 분포시킴으로써 공동의 길이와 두께를 수정하며, 이를 통해 계산의 정도를 향상시키고, 원하는 수렴도를 얻을 때까지 반복 계산을

수행한다[4]. 본 시험에 사용한 수중운동체에 대한 형상정보 및 환경조건을 사용하여 계산한 항력, 속도 및 공동분포를 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 1은 공동 길이에 따른 속도, 항력, 캐비테이션 수( $\sigma$ ), 최대 기포 직경에 대한 추정치이다. 캐비테이션 수는 아래 Eq. 1과 같이 계산할 수 있으며, 속도의 제곱에 반비례하는 관계를 가지고 있으므로 속도가 증가함에 따라 캐비테이션수가 감소하고, 공동의 길이는 길어진다.












$$\sigma = \frac{P_{atm} - P_v}{\frac{1}{2}\rho U^2} \tag{1}$$

항력의 경우 속도가 63.8 m/s에 이르기까지 점점 증가함을 Table 1에서 확인할 수 있다. 하지만 이후에 항력이 감소하여 Table 2에서 보는

Table 1. Estimated speed, total drag, cavitation number, and maximum cavity diameter by changing cavity length.

Speed [m/s]	Cavitation Number ( $\sigma$ )	Total Drag [N]	Cavity Length [m]	Max. Cavity Diameter [m]
20.7	0.511	1157.6	0.1	0.082
29.5	0.251	2142.3	0.25	0.106
39.1	0.143	3500.0	0.5	0.134
52.9	0.078	5643.3	1	0.173
63.8	0.053	6624.0	1.5	0.2
72.1	0.042	6170.0	2.0	0.223
79.4	0.035	4961.0	2.5	0.243
85.9	0.03	5777.9	3.0	0.261
91.8	0.026	6581.7	3.5	0.278
97.3	0.023	7375.1	4.0	0.293
107.4	0.019	8937.5	5.0	0.321

Table 2. Configuration of the vehicle covered by supercavitation by changing vehicle speed.

Speed [m/s]	Contour
20.7	
29.5	
39.1	
52.9	
63.8	
72.1	
79.4	
85.9	
91.8	
97.3	
107.4	

바와 같이 공동이 수중운동체 몸체 전체를 덮기 시작하는 속도 80 m/s 부근까지 항력이 감소하며, 이후에 속도가 증가함에 따라 항력 역시 증가함을 확인할 수 있다. 공동의 길이가 길어짐에 따라 기포의 최대 직경 역시 증가하며, 속도가 약 110 m/s에 이르면 최대 기포 직경은 약 0.3 m까지 커지게 된다.

Table 2에서 수중운동체의 속도가 점차 증가함에 따라 공동의 크기가 증가함을 알 수 있다. 속도가 약 63 m/s에 이르면 수중운동체의 원뿔형상과 원통형상의 경계를 지난 지점까지 기포가 덮이고, 수중운동체의 속도가 약 80 m/s에 이르면 기포가 겨우 수중운동체 몸체 전체를 덮게 되며, 속도가 약 86 m/s에 도달해야 기포가 수중운동체 몸체 전체를 덮게 되며, 속도가 97.3 m/s일 때 공동의 길이가 4.0 m로 수중운동체 길이의 약 2배가 되어 이 속도에서 안정적으로 공동을 유지하면서 수중운동체를 운용할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 공동의 끝 부분이 운동체를 벗어날 확률이 가장 크기에 최대기포직경의 위치가 수중운동체의 끝에 있는 것이 가장 적절하기 때문이다.

속도 97.3 m/s 이상은 Fig. 4에서 1.5초에서 1.75초 사이의 구간이며 이때의 주행거리는 84 m에서 107.5 m까지이다. Fig. 6에서 보여준 P3의 값은 0.8초에서 급격하게 증가한 후 overshoot 되면서 0.9초에 초공동으로 진입한 것으로 판단된다.

계측결과인 Fig. 6와 Fig. 4에 의하면 0.9초에 속도는 65 m/s이나, 계산결과인 Table 2에 의하면 속도가 약 51 m/s일 경우 P3가 설치된 위치인 896 mm까지 기포가 덮이게 된다. 하지만 공동이 초기에는 수중운동체의 진행방향과 반대방향으로 단면으로 균일하게 썩워지기 보다는 위쪽이 아래쪽보다 먼저 썩워지는 경향을 보이고, 또한 계산결과는 수중운동체의 조종면을 고려하지 않은 것으로 차이를 설명할 수 있겠다. P5의 위치는 기포가 수중운동체 몸체 전체를 덮게 되는 시점을 알 수 있어 측정하였으나, 수중운동체가 움직이기 시작하자마자 예측하지 못한 값을 보여, 원인을 파악 중이다.

Table 3. Supercavitation shape on the test vehicle captured by underwater cameras.

Distance (m)	Speed (m/s)	Supercavitation shape
31.8	61	
39.8	68	
55.8	80	
62.9	86	
74.7	93	
81.4	96	
86.9	98	

## 2.5 수중촬영결과

Table 3은 수중 카메라를 통하여 촬영된 시험체이며 초공동이 발생하여 진행되는 과정을 나타내고 있다. 속도 61 m/s에서는 공동이 압력센서 P3의 위치에 못 미친 것으로 보이며, 속도 68 m/s에서는 공동이 P3의 위치에 도달한 것으로 보인다. 또한 속도 80 m/s에서는 기포가 수중운동체 몸체 전체를 감싸지 못하며, 속도 96 m/s에서는 기포가 수중운동체 몸체 전체를 감싸게 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 4에서 1.47초에서 1.78초 사이의 구간이며 이때의 주행거리는 80.5 m에서 110.3 m까지이다. 운동체의 속도가 빨라지면서 기록된 영상에 잔상이 남아있다.

## 3. 결 론

로켓추진기관을 이용한 수중운동체의 수중주행 시험을 실시하고 그 성능을 측정하였다. 수중운동체에 사용된 로켓모타의 압력을 측정하여 추력을 계산하였고, 주행거리, 속도 등을 측정하였으며, 고속으로 수중 주행 중인 수중운동체의 표면 압력을 여러 곳에서 측정하여 초공동 발생

여부를 확인하였고, 수중촬영을 통해 초공동이 형성되어 발전해 나가는 과정을 기록하였다. 계측결과를 이차원 비점성 이론해석법에 근거한 CNU-SuperCT 프로그램을 사용하여 도출된 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

시뮬레이션 결과는 속도가 97.3 m/s 이상일 때 초공동화가 형성되었으며, 이는 발사 후 1.5초에서 1.75초 사이의 구간이며, 이때의 주행거리는 발사지점에서 84 m에서 107.5 m까지이다. 또한 수중촬영영상을 통한 계측결과는 속도가 96 m/s일 때 초공동화가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 1.47초에서 1.78초 사이의 구간이며 이때의 주행거리는 80.5 m에서 110.3 m까지이다. 고속 주행하는 수중운동체가 초공동화되는 속도는 시뮬레이션 결과와 영상을 통한 결과가 비교적 잘 맞는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 민군겸용기술개발과제(UM1406RD1)의 일환으로 수행되었습니다.

#### References

1. Lee, E.T., Yu, Y.J. and Yoon, H.G., "Experimental Results of High Speed Natural Supercavitating Underwater Vehicle," *2015 KSPE Spring Conference*, Busan, Korea, pp. 811-813, May 2015.
2. Lim, S., Park, H.H., Kim, S.S., Cho, S.H. and Yoon, H.G., "Performance Analysis of High Speed Underwater Vehicle by Using Solid Rocket Motor," *2016 KIMST Spring Conference*, Jeju, Korea, pp. 27, Jun. 2016.
3. Yoon, H.G., Yu, Y.J., Lee, H.N., Lim, S., Park, H.H., "Measurement of Performance of High Speed Underwater Vehicle by Using Solid Rocket Motor," *2016 KSAS Fall Conference*, Jeju, Korea, pp. 1154-1155, Nov. 2016.
4. Kim, H.T., Lee, C.S. and Ahn, B.K., "1st Stage Final Report of the Incorporative Research on Supercavitating Underwater Vehicles (Cavimator Design and Flow Analysis)," *ADD Reprort*, pp. 9-57, 2011.