Journal of the KIMST, Vol. 17, No. 3, pp. 296-303, 2014
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2014.17.3.296

Research Paper 해상 · 수중 부문

자연형 초공동화 운동체의 구속 직진운동 해석기법 연구

나영인*,1) · 김선범1)

1) 국방과학연구소 제6기술연구본부

A Study on the Motion Analysis of the Wire-guided Underwater Test Body in Natural Supercavitation

Young-In Nah*,1) · Sunbum Kim1)

1) *The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 27 December 2013 / Revised 10 April 2014 / Accepted 16 May 2014)

ABSTRACT

This paper describes the simplified simulation method of the wire-guided underwater test body with natural supercavitation. In this paper, the simulation based model of the wire-guided underwater body with natural supercavitation is proposed by using preceding research and commercial flow-analysis software. By using the model, the 1-dimensional wire-guided body motion in natural supercavitation can be solved very fast with reliability. The suggested model is validated by the comparison of simulation results with experimental data.

Key Words : Supercavitation(초공동), Natural supercavitation(자연형 초공동), Modeling(모델링)

1. 서 론

고속으로 주행하는 유선형 수중운동체의 항력 대부분을 차지하는 마찰저항을 줄이기 위한 방법으로써 최근 크게 주목받고 있는 초공동화(Super cavitation) 기법은 단일 기포로 운동체를 완전히 덮어 마찰저항을 극소화 시키는 방법이다. 초공동상태에서, 운동체는 물과 접해 공동을 발생시키는 캐비테이터(Cavitator)를 제외하고는 기포 내 기체로 둘러싸여 운동체 주위의 유체의 밀도와 점성이 대폭 감소한다.

* Corresponding author, E-mail: yinah@add.re.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

초공동화 운동체의 운동해석과 제어, 공동의 발생과 유지 기법을 포함한 종합적인 연구의 일환으로써, 본 논문에서는 공동의 발생을 디스크형 캐비테이터에만 의존하는 자연형 초공동화 운동체를 대상으로 대상체의 운동 해석을 수행하였다.

케비테이터 주변의 고속유동으로 인한 난류, 수중운동체 주변의 다상유동 등의 난해한 물리 현상으로 인해 초공동화 운동체의 운동 모델링의 수립은 매우 어렵다. 때문에 운동체를 제어하기 위해서는 많은 실험을 통한 기초 자료의 축적이 요구된다. 만약 운동체의 제어에 필요한 자료가 부족할 경우, 초공동화 수중동체의 수중발사시험을 위해서는 운동체를 구속해 운동을 제한하여 시험하는 방법을 이용할 수 있다.

본 논문에서는 자연형 초공동화 운동체의 운동을 해석하기 위해, 운동을 단순화하여 1차원 운동으로 가정하였다. 먼저 직진 운동하는 초공동화 운동체를 모델링하기 위한 기법을 제안 한 뒤, 운동체를 와이어에 고정시켜 1차원 직진 운동으로 제한한 뒤, 두 가지(직경 40mm, 50mm) 디스크형 캐비테이터를 장착한 운동체의 주행 시험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 모델링의 타당성을 검증하고 고찰하였다.

2. 모델링

2.1 운동 방정식

구속 직진 시험장치는 운동체 단면 중앙에 종방향으로 뚫린 관통 홀을 위치시켜 운동체가 설치된 강선을 따라 주행하도록 고안되었으며, 이에 따라 운동체의 운동은 전후동요 운동 및 횡단면 내 회전운동으로 한정되었다. 계산의 편의를 위해 횡단면 내 회전운동이 전후 동요 운동에 영향을 주지 않는다는 가정을 도입하면, 운동체의 좌표계는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 1차원으로 한정된다.

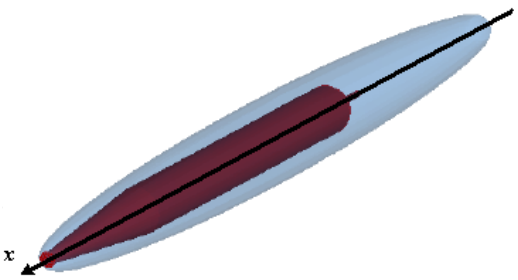

Fig. 1. 1-dimensional coordinate system of the underwater body

또한 운동체의 전후동요 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$(m(t)+m_a(v))a_x(t) = F_T(t) - F_D(v) - F_f$$

여기서 m : 운동체 중량
m_a : 부가질량
a_x : 종방향 운동가속도
F_T : 추력
F_D : 항력
F_f : 유도선과 운동체 사이 마찰력

유도강선에 충분한 장력을 가하여 초공동 상태에 돌입한 운동체의 부력의 상실로 인한 강선의 처짐을 최소화하였다. 그 결과, 실험중 강선의 처짐과 강선의 전체길이의 비가 약 0.02 이하로 떨어져 강선의 처짐으로 인한 영향을 무시할 수 있었다.

2.2 항력 모델링

2.2.1 완전 침수상태 항력계수

완전 침수상태의 항력계수는 Fluent 계산을 토대로 C_D = 2.5를 사용하였다. 여기서, 항력계수는 항력 F_D를 유체의 밀도 ρ와 지배속도 V의 제곱, 캐비테이터 단면적 A의 곱으로 무차원화 한 값이다.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho A V^2}$$

2.2.2 천이상태 항력계수

운동체는 속력이 증가함에 따라 완전 침수 상태에서 부분공동 상태를 거쳐 초공동 상태로 변화된다. Fig. 2는 공동상태의 변화에 따른 항력계수의 변화를 도식적으로 표현한 것이다. 완전침수상태와 초공동상태와 같은 단일유체 내에서의 항력계수는 알려진 연구결과를 통해 예측 할 수 있으나 천이 상태와 같은 액체와 기체가 혼재하는 다상유동의 영역에서의 항력계수 추정은 어려운 문제이다.

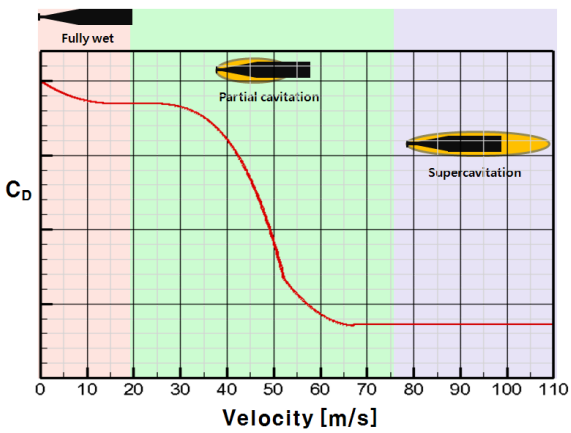

Fig. 2. Schematic change of the drag coefficient according to velocity

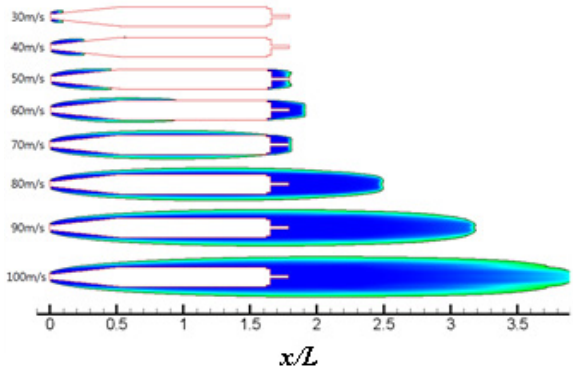

Fig. 3. Cavity shapes according to velocity(calculated by FLUENT)

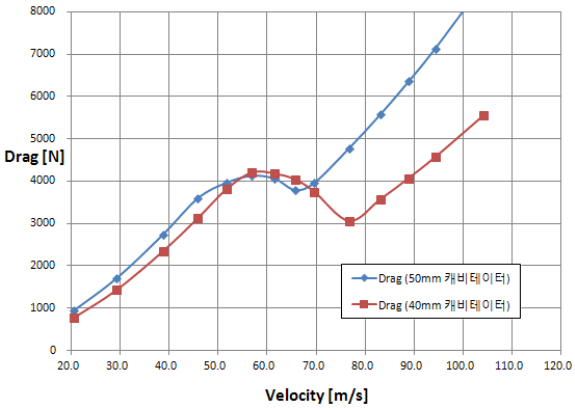

Fig. 4. Drag coefficient change according to velocity (calculated by FLUENT)

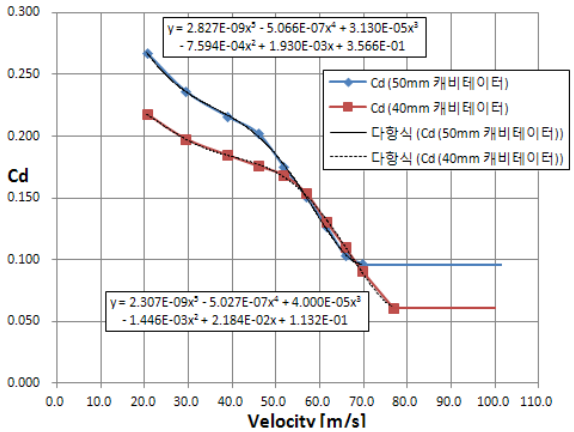

Fig. 5. Regression polynomials of each cavitator model (using computed results)

천이구간에서의 항력계수의 추정을 위해. 모형실험과 Fig. 3과 같이 Fluent를 사용해 초공동 운동체의 유동을 계산, Fig. 4와 같이 각 속도대별 항력을 도출하였다. 최종적으로 무차원화를 통해 Fig. 5과 같이 항력계수 회귀식을 유도하여 모델링에 사용하였다.

2.2.3 초공동 상태 항력계수

선행 연구(Semenenko, 2001)를 참고하여 공동수 σ가 약 1.2 이하에서 뭉툭한(blunted) 캐비테이터에 대한 Reichardt 추정식을 사용하여 초공동상태에서의 디스크 캐비테이터의 항력계수를 추정하였다.

$$c_x(\sigma) = c_{x0}(1+\sigma),\ 0 < \sigma < 1.2$$

여기서 c_{x0} : σ가 0일 때의 캐비테이터 항력계수
(디스크 캐비테이터의 경우
c_{x0} = 약 0.82, Logvinovich(1972))
σ : 공동수,

$$\sigma = \frac{P_0 - P_c}{1/2 \cdot \rho \cdot v^2}$$

P_0 : 무한원방의 압력
P_{BL} : 공동의 내압
v : 주행속도
ρ : 주행매질밀도

이 식은 BEM, Fluent 계산 및 유사 연구 논문(Savchenko(1998))결과와 거의 유사한 값을 보인다. Fig. 6은 디스크 캐비테이터의 초공동 상태 항력계수 추정식을 비교한 것이다.

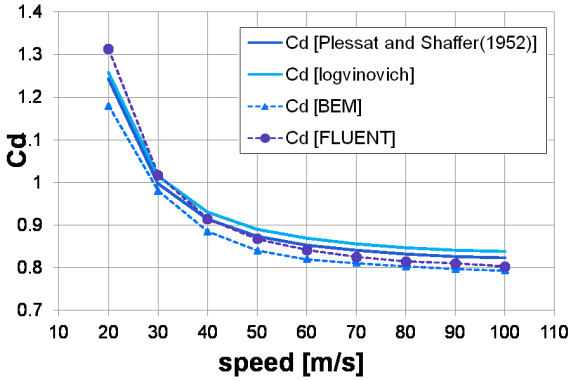

Fig. 6. Estimate of the drag coefficient of a disk cavitator in the supercavitational regime

2.3 초공동 형상 모델링

초공동의 형상이 축대칭형 공동(axisymmetric cavity)이라고 가정되는 경우에는 초공동의 주요목(main dimension)인 초공동 최대직경 D_c와 초공동 길이 L_c가 반경험식에 의해 다음과 같이 표현된다(Logvinovich (1972)).

$$D_c = D_n\sqrt{\frac{c_x(\sigma)}{k\sigma}},\ L_c = D_n\frac{A\sqrt{c_x(\sigma)}}{\sigma}$$

여기서, k : 0.9~1.0
A ≈ 2
D_n : 캐비테이터의 직경

G. V. Logvinovich(1973)에 의한 초공동 형상 추정식은 다음과 같다.

$$R_{front}(x) = R_n(1+\frac{3x}{R_n})^{\frac{1}{3}},\ x \le x_1$$

$$R_{rear}(x) = R_c\sqrt{1-\left(1-\frac{R_1^2}{R_c^2}\right)\left(1-2\frac{x-x_1}{L_c-2x_1}\right)^{2/\kappa}}$$

여기서, κ : 0.85
$R(x)$: x 위치에서의 공동의 반경
R_c : $D_c/2$
R_n : $D_n/2$
x_1 : 기준거리. 계산에서는 $D_n/2$사용
R_1 : R(x_1)

캐비테이터가 시작되는 지점으로부터 R_1까지는 R_{front}를 사용하고, R_1 이후에서는 R_{rear}를 사용한다.

2.4 마찰력 모델링

유도선과 몸체 관통 홀 사이의 마찰력은 다음과 같이 예측하였다.

- 운동체중량 : 35kg, 마찰계수 : 1.0
  (유도선 섬유 마찰계수 ≒ 0.5)
- 마찰력 = 마찰계수 × 운동체중량 × 중력가속도
  ≒ 350N (= 80lbf)

유도선 섬유의 마찰계수를 고려하고, 안전계수를 2배 반영하여 마찰계수는 1.0로 하였다. 물리적으로 운동체의 상태(Fully wet, 천이상태, 초공동상태)에 따라 유도선의 마찰력은 달라지지만 운동체가 받는 전체 항력에 비해 작은 값이므로 무시 가능하다고 가정하였다.

2.5 부가질량 모델링

수중에서 주행하는 운동체의 부가질량 = 부가질량 계수 × 침수체적 × 물의 밀도 로 정의한다. 여기서, 부가질량 계수는 구(sphere : 0.5), 육면체(cube : 0.7) 및 회전타원체(spheroid)의 부가질량 계수를 참조하고, 시뮬레이션을 통해 시험결과와 가장 유사한 값을 결과를 주는 0.3을 사용하였다. 또한 초공동 형상 모델링 식을 이용해 속도에 따라 변하는 침수체적을 계산하여 적용하였다. Fig. 8은 부가질량 변화에 따른 운동체 주행결과 비교이다. 주행 시의 유도선에 의한 마찰력은 '2.4'에서 제시한 350N을 사용하였다.

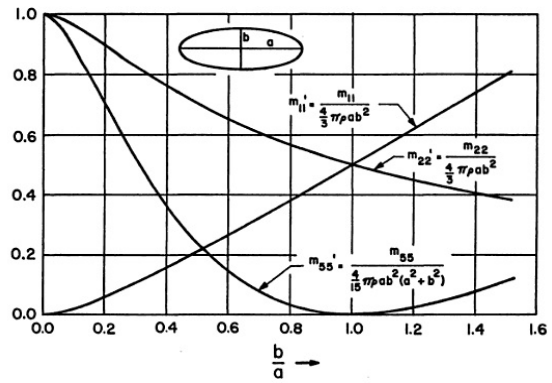

Fig. 7. Additional drag coefficient of spheroid(Newman, 1978)

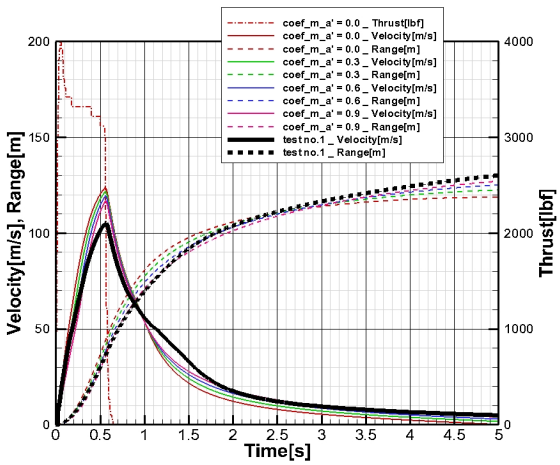

Fig. 8. Body motions according to additional drag change

2.6 감속판 모델링

감속판의 설계는 추력 미작용 속력 100m/s에서, 10m 이내 운동체 정지를 목표로 하였다. 감속판은 캐비테이터 직경으로부터 선형적으로 증가시켜 운동체 직경의 2배 이상의 직경을 갖도록 조정하였다. 운동체가 감속판에 부딪히는 순간 운동체의 캐비테이터의 직경이 감속판의 직경으로 증가해 운동체에 가해지는 항력이 따라서 증가한다고 모델링하였다. 감속판의 세부 직경, 설치위치 및 간격은 다음과 같다.

Fig. 9. Installation of the disk brakes

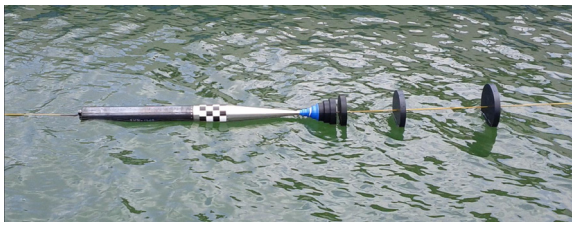

Fig. 10. Disk brakes after the experiment

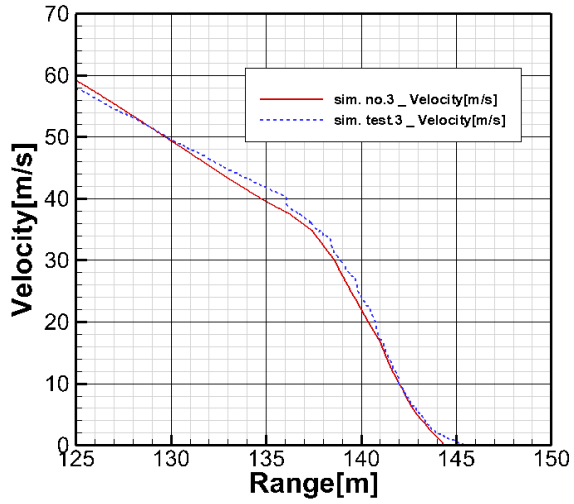

Fig. 11. Simulation result applying the disk brake model (velocity-range)

- 감속판 형태 : 디스크
  (직경[mm] : 80, 110, 140, 170, 200, 250, 300)
- 시작위치[m] : 135 (출발점으로부터 거리)
- 설치간격[m] : 1.2 ~ 1.5

Fig. 9와 10은 시험전/후의 감속판의 사진이며, Fig. 11, 12는 감속판에 의한 주행속력 및 가속도의 시험과 시뮬레이션 결과를 비교 도시한 것으로 잘 일치하고 있다.

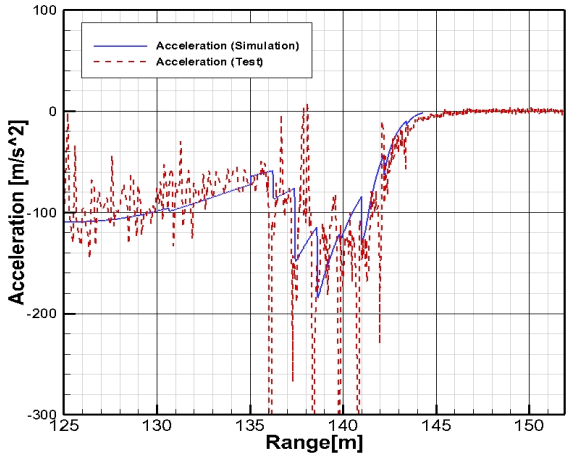

Fig. 12. Simulation result applying the disk brake model (range-acceleration)

2.7 기타

2.7.1 초기가속력

추력의 증가에 의한 초기 가속구간으로 추력특성에 따라 약 0.05초간 가속구간으로 선형 증가로 처리하였다.

2.7.2 모델링 및 시뮬레이션의 가정

- 운동체의 운동을 1차원으로 가정했다.
- 주행 속도별 steady 상태의 항력 계산 값을 기반으로 천이상태(완전침수 → 초공동 상태) 항력변화를 예측했다.
- 감속 디스크를 적용한 시뮬레이션 시, 몸체와 상호작용을 무시한 디스크의 항력만을 고려했다.

2.7.3 모델링 및 시뮬레이션의 한계

- 천이상태(완전침수 → 초공동 상태)에서 측력발생 시 운동예측이 불가능하다.

- Unsteady 한 유동이 지배하는 실제 주행에서는 가속구간에 차이가 발생될 수 있다.
- 추정항력은 속력 약 15m/s 이상에서 유효하다.

3. 실험결과와의 비교 및 고찰

3.1 추진기관 추력이력

Fig. 13은 시간에 따른 운동체의 추력과 항력계수의 시간이력을 나타내고 있다. 약 0.1초 부분에서 항력계수가 평행하게 보이는 부분이 존재하는데 이는 초공동에 의해 운동체의 몰수면적이 작아지면서 생기는 현상이다. 약 0.4초에서 1.8초까지는 초공동주행 영역으로써 캐비테이터만의 항력이 작용한다.

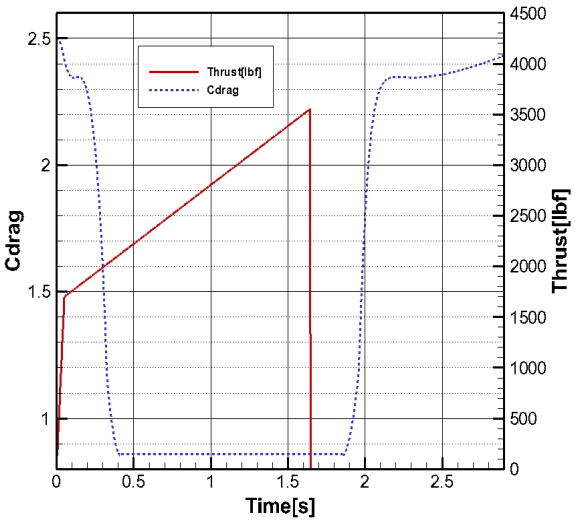

Fig. 13. Time series of drag coefficient and thrust

3.2 초공동 형상

2장에서 언급된 초공동 형상 모델링식에 따라 표준(50mm), 최소(40mm) 크기의 캐비테이터 장착시 운동체를 완전히 덮는 초공동 시작 속력과 공동 형상을 예측하였다. 표준 캐비테이터 장착시 초공동 시작 속력은 약 67m/s, 최소 캐비테이터 장착시 초공동 시작 속력은 약 76m/s 였다.

Fig. 14는 BEM에 의한 공동크기 예측결과로 형상모델링 식에 의한 초공동 시작 속력 및 공동 형상은 BEM 및 상용 유동해석 프로그램(Flunet)을 통한 분석결과와 일치하는 결과를 보였다.

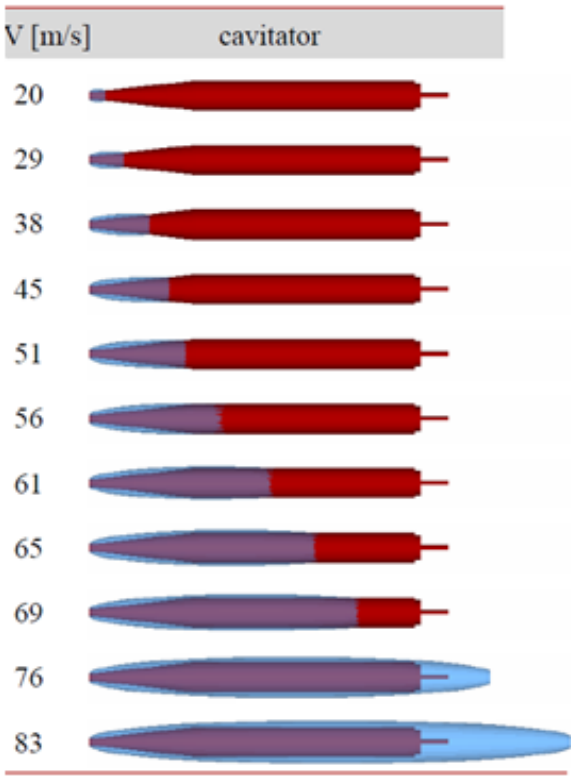

Fig. 14. Estimate of cavity shapes by BEM

3.3 표준 캐비테이터(직경 50mm) 장착 초공동화 운동체 시뮬레이션 결과

Fig. 15는 표준 캐비테이터 장착 운동체의 주행시뮬레이션 결과이다. 추력작용시점은 약 1.6초까지로, 추력 컷 이후에 자연감속이 되고 있다. 감속판 모델은 적용되지 않았다. 초공동 구간은 운동 속도가 약 67m/s 이상인 상태의 구간으로, 주행 시작 후 약 0.96초에서 시작되어 1.86초 정도까지 지속되며 초공동 상태의 주행거리는 약 156m 이다. 이때 최고속력은 약 133m/s이다.

3.4 최소 캐비테이터(직경 40mm) 장착 초공동화 운동체 시뮬레이션 결과

Fig. 16는 최소 캐비테이터 장착 운동체의 주행시뮬레이션 결과이다. 추력작용시점은 1.6초까지로, 추력 컷 이후에 자연감속이 되고 있다. 감속판 모델은 적용되지 않았다. 초공동 구간은 약 76m/s 이상의 구간으로 약 0.43초에서 1.96초 사이에서 약 200m간 유지된다. 이때 최고속력은 약 163m/s 이다.

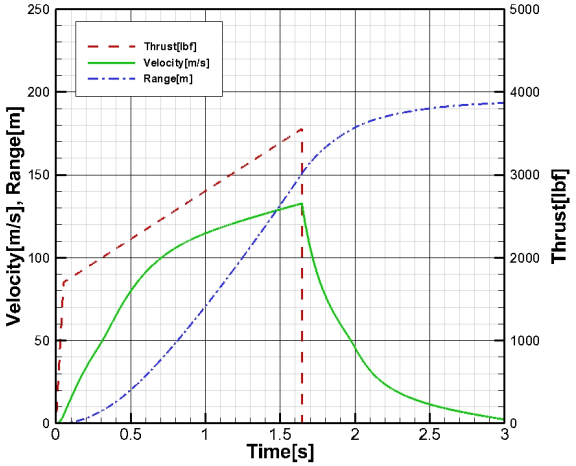

Fig. 15. Simulation result of the underwater body with 50mm cavitator

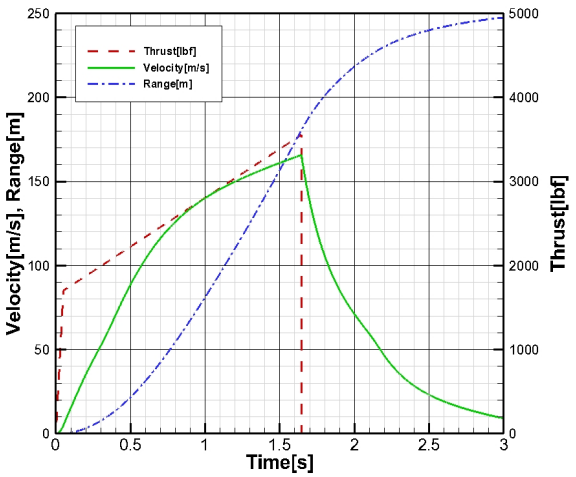

Fig. 16. Simulation result of the underwater body with 40mm cavitator

3.5 실험 결과와의 비교 및 고찰

Fig. 17은 표준 캐비테이터를 장착한 운동체의 주행 시뮬레이션과 시험결과를 비교한 것이다. 약 0.9초까지 추력의 증가를 따라 가속한 뒤 초공동상태에 돌입해 감속한다. 약 1.65초 부근에서 감속판과 충돌해 감속이 급격해진 뒤 곧 정지하는 것을 알 수 있다. Fig. 18은 *x*-방향가속도를 비교한 것으로 잘 일치하고 있다. 주행거리 약 135m 지점에서부터 감속판에 의해 감속되어 약 145m 지점에서 정지하고 있다. 시뮬레이션과 실험결과가 비교적 잘 일치하고 있으나, Fig. 17

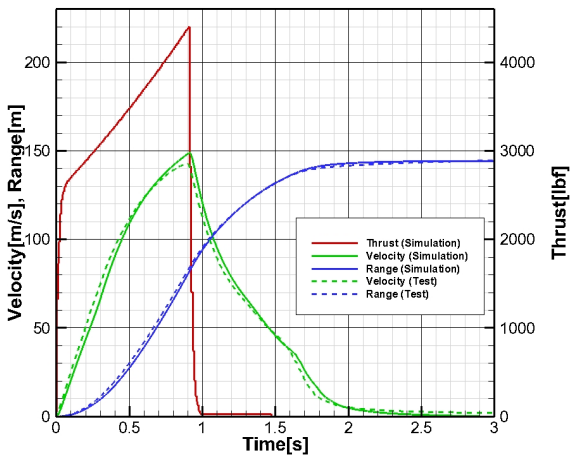

Fig. 17. Test and simulation results(velocity, range)

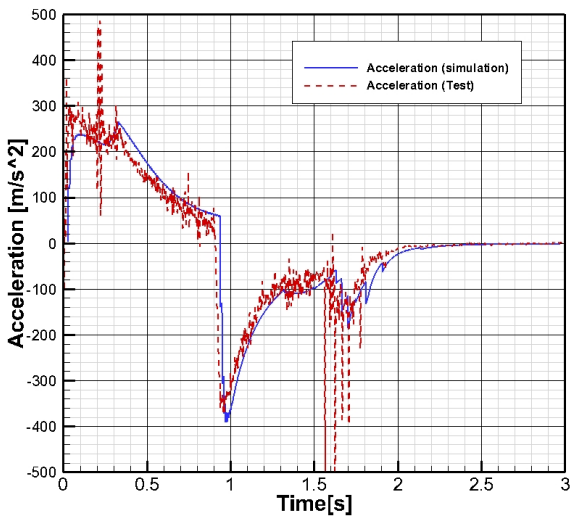

Fig. 18. Test and simulation results(acceleration)

에 나타난 속도 및 가속도의 오차는 계측기기의 민감도, 주행 중 수심의 미세 변화, 유체력의 모델링 등에 의해 기인한 것으로 생각된다. 시뮬레이션이 실험결과와 일치할 수 있었던 이유 중의 하나로서, 간결한 모델링을 들 수 있다. 먼저, Logvinovich등에 의해 정립된 비교적 정확한 초공동에 관한 실험식을 사용함으로써 매우 복잡한 각 속도대별 초공동의 형태와 캐비테이터의 항력을 효과적으로 계산할 수 있었다. Table 1에 나타난 바와 같이, 예측된 초공동의 형상은 실제 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 또 유도선의 마찰력과 유체의 점성에서 기인하는 마찰력을 부가질량

에 의한 저항으로 가정하여 선형적으로 더함으로써 실제로 매우 복잡한 유동과 항력을 간단하고 정확하게 모델링 할 수 있었다. 이러한 복잡한 시스템을 여러 부분으로 나누어 계산해 선형적으로 더하는 기법은 차후 분사형 초공동화 운동체의 시뮬레이션에도 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 1. Camera acquired images and simulation results

	4m 지점	10m 지점
전산 해석		
고속 카메라		
분석 결과	42m/s (부분공동상태)	70m/s (초공동상태)

4. 결 론

본 논문에서는 자연형 초공동화 운동체의 구속 직진운동 해석을 위한 모델링 기법을 제시하였으며, 실제 실험결과 시뮬레이션 결과를 비교해 그 모델링 기법의 타당성을 검증하였다.

일반적으로 초공동화 운동체에서 발생하는 항력 및 운동체 주위 유동은 해석하기에 매우 복잡하다. 여기서, 본 논문에서 제시한 운동 해석기법을 이용해 운동해석을 위해 필요한 초공동화 운동체의 유동과 항력을 초공동 항력, 유도선 마찰력, 부가 질량에 의한 추가항력의 선형적인 합으로 가정해 계산함으로서, 계산의 복잡도를 대폭 줄이면서도 Fig. 17에서 나타난 실험결과와의 일치에서 확인할 수 있듯이 신뢰도 높은 시뮬레이션이 가능해졌다.

본 연구의 추후 연구로서 초공동화 운동체에 대한 보다 종합적인 이해를 위해 자연형 초공동화 운동체의 다자유도 운동 해석 기법 및 분사형 초공동화 운동체의 운동 해석 기법 등에 대한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

References

[1] Logvinovich, G. V., Hydrodynamics of Flows with Free Boundaries, Halsted Press, 1973.

[2] Savchenko, Yu. N., “Experimental Investigation of Supercavitating Motion of Bodies,” RTO AVT Lecture Series on Supercavitating Flows, pp. 4-1～4-24, 2001.

[3] Semenenko, V. N., “Artificial Supercavitation. Physics and Calculation,” RTO AVT Lecture Series on Supercavitating Flows, pp. 11-1～11-32, 2001.

[4] J. N. Newman, Marine Hydrodynamics, The MIT Press, 1978.

[5] Kim, et al., “A Numerical Analysis of the Supercavitating Flow around Three-dimensional Axisymmetric Cavitators,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 160～166, 2013.