

접촉식 센서를 이용한 고속 활주선 선미부 압력 계측 시험

박세용^{1,2}·박종열¹·이신형^{1,2}·김동진^{3,†}
서울대학교 조선해양공학과¹
서울대학교 해양시스템공학연구소²
선박해양플랜트연구소³

Pressure Measurement of Planing Hull Stern Bottom by Tactile Sensors

Sae Yong Park^{1,2}·Jong Yeol Park¹·Shin Hyung Lee^{1,2}·Dong Jin Kim^{3,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University²
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The running attitude of a planing hull is determined by the pressure distribution on the hull bottom, and it significantly affects hydrodynamic performance of the ship, i.e., resistance, maneuverability, and seakeeping ability. Therefore, it is essential to investigate pressure distribution on the hull bottom in order to improve hull design. In the present study, a novel pressure measurement system using tactile sensors was introduced for a planing hull. The test model was a 23 m-class planing hull with a hard chine. The pressure measurement showed that the pressure at the transom was lower than the atmospheric pressure, owing to flow separation at the transom.

Keywords : Planing hull(활주선), Pressure measurement(압력 계측), High speed model test(고속모형시험), Tactile sensor(접촉식센서)

1. 서론

고속 활주선은 고속에서 항주 시에 선체의 중량의 대부분을 선저에서 발생하는 양력이 지지하는 방식의 선형으로, 운용속도가 높아서 임무 수행 능력이 뛰어나기 때문에 국내외에서 군사적 목적으로 많이 채택되고 있다. 활주선형은 속도에 따라 선저 압력 분포가 크게 달라지면서 항주자세를 변화시키는데, 이에 따른 선형의 유체성능 변화가 크다. 따라서 활주선의 성능 분석을 위해서 속도에 따른 선저 압력 분포에 대한 이해가 선행되어야 한다.

고속 활주선 선저면 압력에 관한 연구로는 Sottorf (1934)와 Kapryan and Boyd (1955)가 차압계를 이용하여 활주선의 선저 경사각, 트림 등이 선저 압력 분포에 미치는 영향을 계측한 바 있다. Allen et al. (1978)은 실선 선체 구조에 가해지는 압력을 계측하기 위하여 활주선과 공기부양선에 대하여 압력계측 시험을 수행하였다. 그리고 Grigoropoulos and Damala (2001)는 더블 차인 활주선형에 대하여 피토판과 Membrane-type 압력계를

이용하여 선저면 압력을 계측하였고, 이러한 실험에서는 선저 정체선(stagnation line)을 예측하기 어렵기 때문에 센서의 장착 밀도를 높일 것을 주장하였다.

최근 연구로는 Game et al. (2010)과 Santoro et al. (2014)가 전자식 압력계를 이용하여 각각 정수 중과 파 중에 대한 압력 계측과 슬래밍에 대한 압력 계측 시험을 수행한 바 있다.

선저 압력의 계측에 대한 연구들에서 확인된 바로는 정체선 주위의 급격한 압력 변동이나 파랑 중 운동으로 인한 순간 최대압력의 발생 등의 특징이 나타났다. 일반적으로 사용되는 차압계 시스템은 선체 표면에 구멍을 내어 예인전차 상에 설치된 차압계와 연결하는 방식이므로 압력관 내의 댐핑과 응답 지연으로 인해 수 ms 영역의 급격한 압력 변화를 제대로 계측하는데 한계가 있다(Kawata & Obi, 2014). 따라서 선체 표면에 바로 부착되어 압력을 계측할 수 있는 방식의 센서가 적용되어야 한다. 더욱이 활주선형은 대개 고속에서의 실험을 위해 작은 크기로 제작되므로, 배치공간에서의 한계를 극복할 수 있는 실험 설계가 필요하다.

본 연구에서는 활주선 선미 선저면 압력 계측을 위하여 선형

연구들에서 압력 계측을 위하여 사용한 차압계나 전자식 압력계가 아닌 접촉식 센서라는 새로운 형식의 압력계를 도입하였다. 또한 반복 실험을 통하여 접촉식 센서에 대한 불확실성을 계산하고 유체성능 실험에 적용 가능성을 검토하였으며, 활주선 선미 선저면의 압력 계측 실험을 수행하여 활주선형의 선저 압력 분포의 특징을 얻어내었다.

2. 실험 설비

2.1 모형선

모형선의 압력 계측 실험을 수행하기 위하여 1/15.46 축척비로 축소한 활주선 모형을 제작하였다. 본 연구에서 이용된 선형은 여객선 'Olive'를 모선으로 하는 23m class 활주선형으로, 주요 제원은 Table 1에 기술하였다. Fig.1은 실험 선형의 형상이다. 대상 선형은 선저 양 끝에 하드차인(hard chine)이 설치되었으며, 선미로 갈수록 선저경사각(deadrise)이 작아지는 일반적인 활주선형의 형상을 가지고 있다. 실험 모형은 FRP(Fiber Reinforced Plastic)으로 제작되었다.

Table 1 Principal particulars of the test model

	Full scale	Model ship
LOA[m]	26.40	1.61
LWL[m]	23.20	1.50
Breadth[m]	5.20	0.34
Depth[m]	2.40	0.14
Draft[m]	0.87	0.04
Displacement[kg]	47,000	12.0
LCG from A.P.[m]	10.21	0.67
Deadrise at stern [deg.]	12	
Scale ratio	-	1/15.46

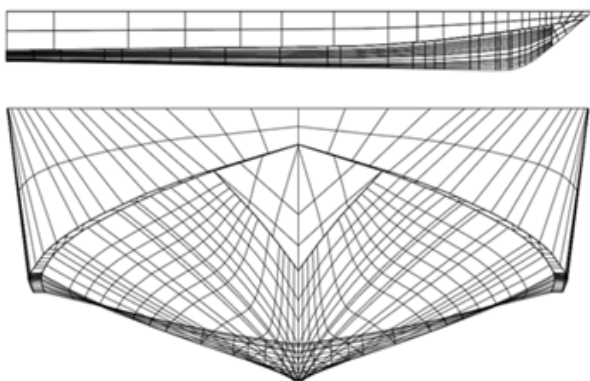


Fig. 1 Lines of the test model

2.2 선형에인수조

모형시험은 서울대학교 선형에인수조에서 수행하였다. 서울대학교 선형에인수조의 길이, 폭, 수심은 110 m, 8 m, 3.5 m이고 중저속에서 운용되는 에인전차와 고속에서 운용되는 고속에인전차 등의 장비가 설치되어 있는데, 고속선의 모형시험을 위해 최대속도 15 m/s의 고속에인전차를 이용하였다.

고속에인전차는 경량화를 위해 트러스 방식으로 설계되었다. 고속에인전차의 에인방식은 Wire-Drum 방식으로 전차에 연결된 와이어를 회전하는 드럼으로 감으며 전차를 끌도록 설계되었다. 대상 시스템의 상세한 구성은 Kim (2012)에 서술되어 있다. Fig. 2는 고속에인전차의 전경이다.



Fig. 2 SNU high speed towing carriage

2.3 압력계측 시스템

고속에인전차는 경량화에 중점을 두고 설계되어서 실험 장비를 배치할 공간이 부족하고 구동 방식의 특성 상 전차 구조물 전체에 걸쳐 일정한 진동이 발생하기 때문에 Kim (2015), 공간을 최소한으로 차지하면서 외부 진동에 영향을 받지 않는 실험 시스템이 요구된다. 본 연구에서는 위와 같은 제한 조건을 만족하기 위해 SingleTact의 접촉식 센서인 CS8-1N을 이용하였다. Fig. 3은 해당 센서의 사진이다. 좌측의 동그란 부분이 압력 계측부이고, 우측의 회로는 구동 전압의 입력, 계측값의 출력을 맡는다. 계측부의 지름은 8 mm이고, 두께는 0.35 mm이다. 이 센서는 계측면 전체에 걸친 힘을 계측할 수 있는데, 계측된 힘을 센서부의 면적으로 나누어 계측면의 평균 압력을 얻을 수 있다.



Fig. 3 Tactile sensor (SingleTact)

압력계의 설치과정을 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구는 선미쪽 선저의 정확한 압력 분포를 얻어내는 것을 주된 목표로 하였다. 한번에 10개의 압력계를 이용하도록 선미에 10개의 홈을 내었

고, 여기에 센서 계측부를 통과시켜 선체에 붙인 다음 흠을 매워 방수처리를 하였다.

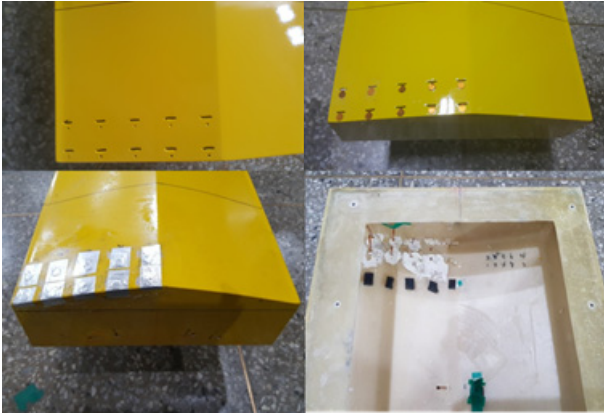


Fig. 4 Installation of the pressure sensors

접촉식 센서에서 나오는 전압 신호를 기록하기 위해 NI(National Instrument)사의 NI USB-6210과 Labview 프로그램을 이용하였다. 데이터 취득 주파수는 사전 실험을 통해 순간 압력의 변동을 얻어낼 수 있는 최소 주파수로 확인된 1000 Hz로 고정하였다.

실험 이전에 압력계의 전압 출력 값에 대한 압력 계측 값을 획득하기 위하여 Fig. 5와 같이 압력계의 감지부에 무게를 올리는 방식으로 교정시험을 수행하였다. 총 10개의 센서에 대하여 각각 수행하여 교정 값을 획득하였으며 선형적인 응답을 확인하였다.

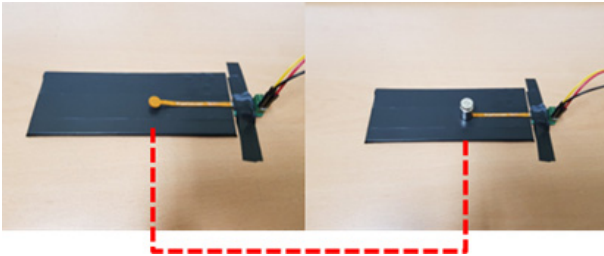


Fig. 5 Pressure sensor calibration

2.4 실험 조건

본 연구가 활주선형을 대상으로 한 것이므로, 활주 현상을 고려하여 실험 조건을 선정하였다. 활주조건 정의는 Savitsky (1992)를 따라 프루드 수(F_n , V/\sqrt{gL})가 1.2보다 큰 경우를 기준으로 하였다. 상세한 실험 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Speed condition

Case	1	2	3
F_n [V/\sqrt{gL}]	1.42	1.65	1.89
Speed [m/s]	5.43	6.34	7.24

3. 압력 계측 실험 불확실성

3.1 배경 이론

실험 불확실성은 실험 결과와 함께 제공되어 계측 대상의 참 값이 위치할 확률이 일정 이상 되는 구간을 나타낸다. 본 연구에서는 미국기계학회의 표준 절차에 따라서 불확실성 구간을 해석하였다 (Dieck et al., 2005).

Dieck et al. (2005)에 따르면 실험의 불확실성은 계통 오차(systematic error)와 랜덤 오차(random error)로 구성되어 있다. 계통 오차는 반복 실험을 수행하는 동안 상수로 남아있는 불확실성으로 반복 실험의 평균과 실제 값의 차이를 나타낸다. 랜덤 오차는 반복 실험을 수행하는 동안 각 실험의 결과가 반복 평균과 얼마나 떨어져 있는지에 대한 불확실성으로, 매 실험 결과의 표준편차를 이용해 나타낸다.

계통 오차를 추정하기 위하여서는 우선 실험 결과를 해석하는 과정인 데이터 식(data reduction equation)을 구성한다. 우선 압력 계측값을 분석하기 위한 무차원화 압력계수 C_p 는 압력 P , 유체의 밀도 ρ 그리고 예인속도 U 를 이용해 다음과 같이 정의한다.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1)$$

위에서 압력 P 는 압력계의 출력으로, 정지상태의 정압력인 P_0 에서 영점을 맞춘 뒤 계측된다. 실험 결과값은 아날로그 전압 신호 V 로 얻어진다. 유체의 밀도 ρ 는 실험 조건의 수온 T 로부터 얻어진다. 선체의 전진 속도 U 는 전체에 설치된 엔코더를 이용해 기록되었다. 이를 이용해 압력계수 C_p 의 계통 오차는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$\delta C_p = \sqrt{\left(\frac{\delta C_p}{\delta P} \delta P\right)^2 + \left(\frac{\delta C_p}{\delta \rho} \delta \rho\right)^2 + \left(\frac{\delta C_p}{\delta U} \delta U\right)^2} \quad (2)$$

$$\delta P = \sqrt{\left(\frac{\delta P}{\delta V} \delta V\right)^2} \quad (3)$$

$$\delta \rho = \sqrt{\left(\frac{\delta \rho}{\delta T} \delta T\right)^2} \quad (4)$$

위에서 편미분 항들이 의미하는 바는 각 항의 민감도를 의미하고 δ 항이 의미하는 것은 각 항의 계통 오차이다. 위의 식에서 확인할 수 있듯이 데이터 식의 각 요소들의 계통 오차들로부터 오차 분포를 고려하여 C_p 의 계통 오차를 얻게 된다.

랜덤 오차는 반복 실험의 결과를 다음과 같은 통계적 처리를 통하여 계산할 수 있다.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (5)$$

$$s_X = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (6)$$

$$s_{\bar{X}} = \frac{s_X}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

식 (5)는 데이터들의 평균, 식 (6)은 데이터들의 분산 그리고 식(7)은 랜덤 오차를 의미한다. 계통 오차와 랜덤 오차를 이용하여 데이터들의 error는 다음과 같이 나타낸다.

$$u_{\bar{X}} = \sqrt{(\delta C_P)^2 + (s_{\bar{X}})^2} \quad (8)$$

데이터의 신뢰구간의 95%를 포함하기 위하여 불확실성을 포함한 데이터는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{X} \pm 2u_{\bar{X}} \quad (9)$$

3.2 불확실성 해석 결과

계통 오차의 각 구성 성분의 민감도는 압력계의 성능표, 온도 계측과 ITTC가 제공하는 밀도표 그리고 예인전차 속도 계측 결과를 이용하여 획득하였다. 계통 오차를 구성하는 각 오차들은 압력 단위인 파스칼(Pa)로 나타냈었으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Systematic errors

	Pressure[Pa]
$\frac{\delta C_P}{\delta P} \delta P$	39.80
$\frac{\delta C_P}{\delta \rho} \delta \rho$	0.00
$\frac{\delta C_P}{\delta U} \delta U$	1.73

랜덤 오차는 10회의 반복실험을 수행하여 획득하였으며 10 개의 압력계에 대하여 해석한 압력 계측 불확실성은 Table 4와 같다.

Table 4 Uncertainty of pressure sensor for 5.43 m/s

#1 [Cp]	#2 [Cp]	#3 [Cp]	#4 [Cp]	#5 [Cp]
0.0029	0.0029	0.0028	0.0028	0.0033
#6 [Cp]	#7 [Cp]	#8 [Cp]	#9 [Cp]	#10 [Cp]
0.0029	0.0029	0.0028	0.0030	0.0029

4. 실험 결과

예인 속도에 따른 선미 압력 계측 결과를 나타내기 위하여 각 센서의 위치와 번호를 Fig. 6과 같이 결정하였다. 또한 압력계가 설치된 실제 위치를 배의 폭으로 무차원화하여 Table 5에 선미와 센터 라인을 기준으로 나타내었다.

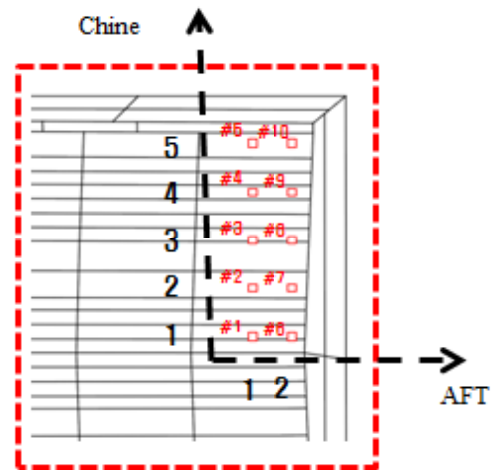


Fig. 6 Pressure sensor numbering

Table 5 Sensor location

Sensor number	From AFT [-]	From center line [-]
1	0.11	0.04
2	0.11	0.14
3	0.11	0.25
4	0.11	0.35
5	0.11	0.47
6	0.02	0.04
7	0.02	0.14
8	0.02	0.25
9	0.02	0.35
10	0.02	0.47

압력 계측 결과는 무차원화 압력 계수(C_p)로 나타내었다. 압력계는 정수 중 정지 상태를 기준으로 영점을 설정하였기 때문에 압력 계측 결과는 정수 중 정지 상태를 기준으로 표시된다. 즉, 동압이 정수 중 정지 상태보다 낮은 압력에서는 압력이 음의 값으로 표시되고, 높은 압력에서는 압력이 양의 값으로 표시된다. 또한 3.1절에서 명시되어 있듯이 압력계수는 예인속도와 유체 밀도로 무차원화 하였다.

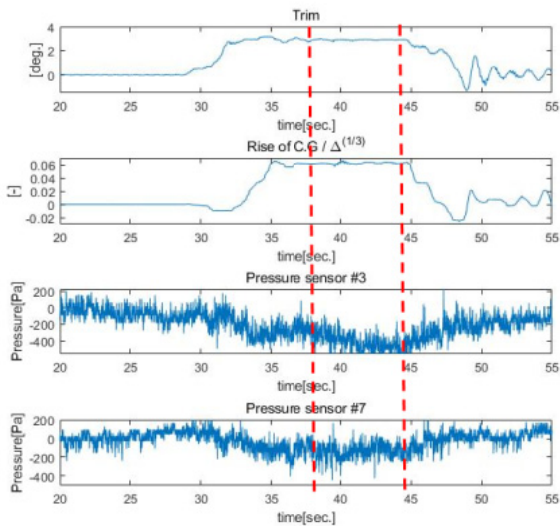


Fig. 7 Comparison of results for steady state

Fig. 7은 실험 결과의 예시이다. 계측 시스템의 특성 상, 정지 상태에서의 모형선 자세를 함께 계측하고, 점선으로 나타낸 등속 구간에서의 압력을 평균내어 압력 계측 결과를 얻었다.

불확실성 계산을 위한 반복시험을 수행한 모형선의 예인속도는 5.43 m/s이다. 이 때, 속도에 따른 모형선의 부상량과 트림은 Fig. 8에 트림, Fig. 9에 부상량을 각각 표시하였다. 트림의 경우 Fig. 8에서 각도로 표시하였으며, Fig. 9에서 부상량은 모형선의 배수량으로 무차원화를 하였다. 트림의 경우 예인 속도에 따른 변화가 작았으며, 부상량의 경우 예인 속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

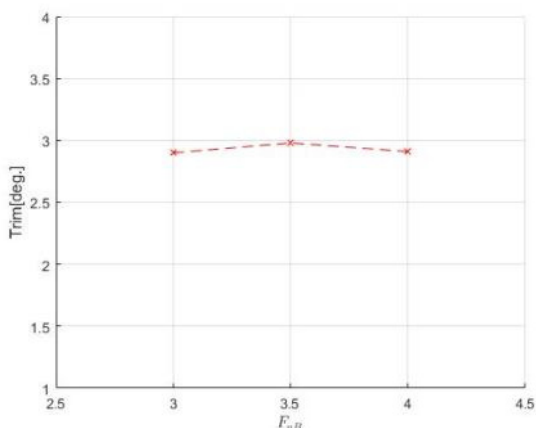


Fig. 8 Trim with respect to Froude number variation

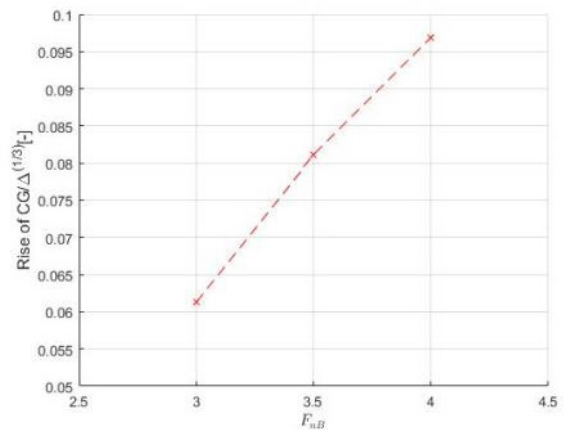


Fig. 9 Rise of center of gravity with respect to Froude number variation

선미에서 압력 계측 결과는 무차원화 압력계수로 각각 Fig. 10, Fig. 11과 Fig. 12에 3차원 그래프와 2차원 그래프로 나타냈다. 또한 2차원 그래프에는 불확실성을 함께 나타내었으며 X축은 폭 방향 위치와 모형선 폭의 비이다. 압력 계측 결과는 Table 6에 나타내었다.

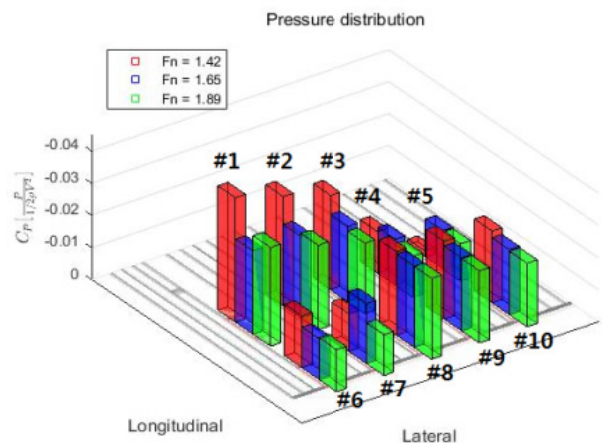


Fig. 10 Pressure distribution at transom (3D graph)

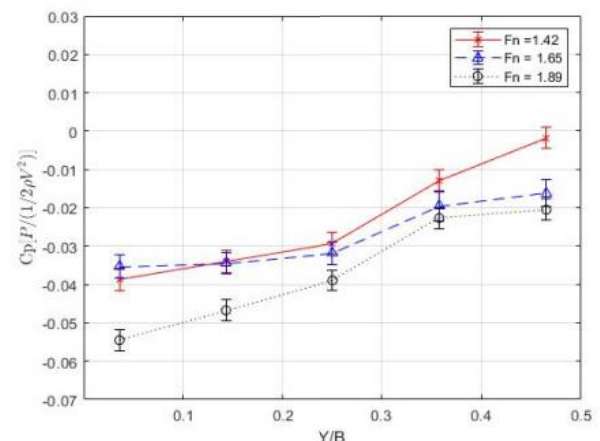


Fig. 11 Pressure distribution at 0.11 from aft

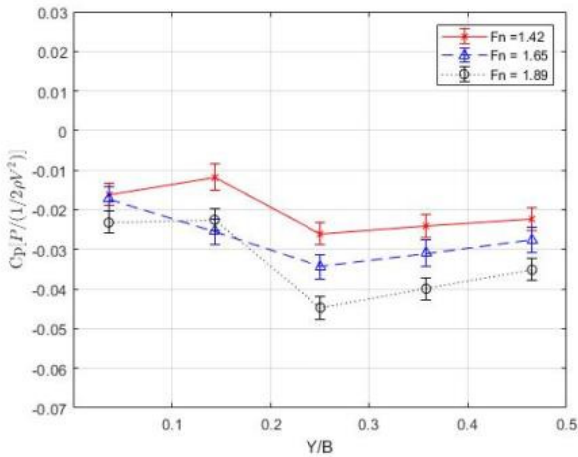


Fig. 12 Pressure distribution at 0.02 from aft

Table 6 Pressure measurement data for 5.4 3m/s

Fn	#1 [Cp]	#2 [Cp]	#3 [Cp]	#4 [Cp]	#5 [Cp]
1.42	-0.035	-0.032	-0.029	-0.013	-0.008
1.65	-0.026	-0.025	-0.023	-0.014	-0.012
1.89	-0.031	-0.026	-0.022	-0.013	-0.012
Fn	#6 [Cp]	#7 [Cp]	#8 [Cp]	#9 [Cp]	#10 [Cp]
1.42	-0.017	-0.016	-0.027	-0.032	-0.026
1.65	-0.013	-0.019	-0.025	-0.023	-0.020
1.89	-0.013	-0.013	-0.025	-0.023	-0.020

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 무차원화 압력 계수를 나타낸 3차원 그래프의 Z 축은 반전되어있다. 이는 선미에서 압력 계측 실험의 결과 정수 중 정지 상태보다 낮은 압력이 계측되어 압력 계수가 음으로 표시되어야하기 때문이다. 또한 위에서 정의한 압력계 번호를 함께 표시하였으며, X 축은 모형선의 종방향 위치를 나타내고 Y 축은 모형선의 횡방향 위치를 나타낸다.

실험 결과를 보면 활주선 선미에서 전체적으로 기준압인 정수 중 압력보다 낮은 압력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 동압력이 정수 중 압력 보다 훨씬 낮음을 의미한다. 보통 선수 선저와 수면이 만나는 지점에서 정체선이 생성되어 큰 압력이 발생하고, 선미로 갈수록 압력이 회복되어 자유 수면과 만나며 선미에서 대기압 수준의 압력이 발생하는 것으로 알려져 있다.

실험의 결과 선미에서 대기압보다 낮은 압력이 발생하였으며, 차인으로 진행하며 대기압에 가까워지는 것을 확인하였다. 그러나 선미에 가까운 쪽에서는 유체가 빠져나가며 이러한 경향을 유지하지 못하였다. 활주선 선미에서 대기압보다 작은 압력이 발생하는 이유는, 고속 활주선의 선저 유동이 선미 트랜섬의 급격한 곡률 변화를 따르지 못하고 강제로 박리되어 나가기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 고속예인전차를 이용한 압력 계측 시스템을 구성하고 고속 활주선 선미에 대한 압력 계측 실험을 수행하였다. 압력 계측 시스템에 기존 선행연구들과 달리 접촉식 압력계를 차용하였다. 불확실성 계산을 통하여 접촉식 압력계가 고속 예인 실험에서 발생하는 진동에 강건함을 확인하고 차압계나 전자식 압력계와 달리 설치되는 장비가 적어서 경량식 고속 예인전차를 이용한 선저면 압력 계측 실험에 적합함을 확인하였다.

선미 압력 계측을 통하여 고속 활주선의 선미에서 대기압보다 낮은 압력이 발생함을 확인하였다. 이는 고속 활주선 선미의 트랜섬 형상으로 인하여 선저 유동이 급격한 곡률 변화를 따르지 못하고 강제로 박리되어 나가기 때문이다.

본 연구를 통하여 새로운 방식의 압력계를 실험에 적용하고 실험을 수행하였다. 또한 고속 활주선의 트랜섬 선미에서 대기압보다 낮은 압력이 발생하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단(No.2016R1D1A1A09917670, 일반연구기초지원사업), 한국산업기술평가관리원(10060329, 극지환경 선박 및 해양플랜트용 환경하중해석 시뮬레이터 개발), 국가과학기술연구회 민간융합기술연구사업(No. CMP-16-03-KISTI)과 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원(No.20162010104420)을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Allen, R.G., Jones, R.R. & Taylor, D.W., 1978. A simplified method for determining structural design-limit pressures on high performance marine vehicles. *In Advanced Marine Vehicles Conference*, San Diego, California, 17-19 April 1978.
- Dieck, R.H., W.G. Steele & Osolsobe, G. 2005. Test Uncertainty. ASME PTC 19.1-2005. *American Society of Mechanical Engineers*.
- Garne, K., Rosén, A. & Kuttenkeuler, J., 2010. In detail investigation of planing pressure. *In Proceedings of Hydralab III Joint Transnational Access User Meeting*, Hannover, Germany, Febuary, 2010.
- Grigoropoulos, G.J. & Damala, D.P., 2001. Measurement of bottom pressures on planing craft. *WIT Transactions on Modeling and simulation*, 30.

Kapryan, W.J. & Boyd Jr, G. M., 1955. *Hydrodynamic pressure distributions obtained during a planing investigation of five related prismatic surfaces*. NACA Technical Note No.3477.

Kawata, T. & Obi, S., 2014. Velocity–pressure measurement based on planar PIV and miniature static pressure probes. *Experiments in Fluids*, 55(7), Article No. 1776.

Kim, D.J., 2012. *A study on the running attitude and dynamic stability of a semi-displacement round bilge vessel at high speed*. Ph.D. Thesis. Seoul National University.

Kim, Y.M., 2015. *System modeling and control of wire-driven high-speed towing carriage for uniform speed*. Master Thesis. Seoul National University.

Sanotoro, N., Begovic, E., Bertorello, C., Bove, A., De Rosa, & Franco, F., 2014. Experimental study of the hydrodynamic loads on high speed planing craft. *Procedia Engineering*, 88, pp.186–193.

Savitsky, D., 1992. Overview of planing hull developments. *In High Performance Marine Vehicle Conference and Exhibit*, Arlington, Texas, June 1992.

Sottorf, W. 1934. *Experimental with planing surfaces*. NACA Technical Note No.739.

