

파도에서 플래핑 포일을 적용한 부유체의 서지 운동에 관한 실험적 연구

심우림·쿠마르 루페시·유영재·신현경[†]
울산대학교

Experimental Study of Surge Motion of a Floater using Flapping Foils in Waves
Woo-lim Sim·Kumar Rupesh·Youngjae Yu·Hyunkyoung Shin[†]
University of Ulsan

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.

In order to utilize the marine environment in various fields such as renewable energy and offshore plant, it is necessary to utilize the far and deep ocean. However, there is still a limit to overcome and utilize the extreme deep-sea environment. Currently, the mooring system, which is the representative position control method of floating structure, has a structural and economic limit to expand the installation range to extreme deep-sea environment. Research has been conducted to utilize wave energy by developing floater using flapping foil as an alternative for station keeping in the deep sea by University of Ulsan. Based on the research, a model test was conducted for application to actual structures. In this study, we investigate how the floating body with passive flapping foils move in regular waves with different periods and study the condition of the model that can maintain its position within a certain range by overcoming the movement.

Keywords : Floating offshore structure(해양 부유 구조물), Renewable energy(재생 에너지), Flapping foil(플래핑 포일)

1. 서론

기존의 부유식 해상구조물은 바다에서 계류선을 이용하여 구조물의 위치를 유지하고 있다. 하지만 더욱 먼 바다, 깊은 수심의 극한 심해에서의 계류선 적용은 구조적, 경제적 한계가 분명하다. 수심에 따른 계류선의 길이와 파지력의 무한한 증가는 적절한 대안으로 보이지 않기 때문이다. 그러므로 아직은 개척되지 않은 해양 영역, 즉 극한의 심해 환경을 활용하기 위해서는 구조물의 위치 유지를 위한 적당한 대안이 필요할 것이다.

이에 울산대학교는 부유체의 위치 유지(stationkeeping)에 대한 새로운 방법으로 플래핑 포일(flapping foil)의 적용을 연구하고 있다. 이전부터 국내외 연구진들에 의해 패시브 플래핑 포일(passive flapping foil)은 파도의 전파에 대하여 추력을 발생시킬 수 있으며(Young et al., 2013), 부가적인 동력이 없이 부유체의 추진을 도모할 수 있음이 밝혀졌다. 현재 이에 대한 이론적, 실험적 연구가 많이 진행되고 있고, 또 선박의 추진이나 에너지하베스팅에 관한 연구(Zhu, 2012) 등 이를 활용하고자 하

는 연구도 많이 진행되고 있는 상황이다.

울산대학교는 상기 패시브 플래핑 포일의 능력을 활용하면 해양구조물의 위치 유지 또한 가능할 것으로 보고, 이는 수심의 한계와 복합적인 계류에 대한 잠재적인 해결책이 될 것으로 보고 있다.

본 연구는 플래핑 포일만을 이용하여 6자유도운동을 극복하고 위치 유지가 가능한 신개념 부유체 개발을 최종 목표로 한다.

본 논문에서는 그의 첫 번째 단계로서 한 방향에서 파도를 가했을 때 부유체가 밀리는 현상을 극복하고자 부유체의 6자유도 운동 중 서지 운동을 관찰하며, 상하동요, 횡, 종동요의 극복은 다음 단계로 한다. 실험은 울산대학교 3차원 광폭 수조에서 수행되었으며 부유체의 거동 경향을 파악하고자 규칙파를 생성, 적용하였다. 실험에 사용한 부유체는 앞서 언급한 플래핑 포일이 적용된 모형을 사용하였으며 그 외 일체의 계류를 하지 않았다. 파랑 중 포일의 개수에 따른 서지 운동의 변화를 관찰, 모형이 일정 범위 내에 위치를 유지하는 것을 목표로 한다. 또한 이를 기반으로 본 연구의 최종목표에 대한 유효성을 판단하고자 한다.

2. 실험 소개

일반적으로 평행하게 놓여있는 포일(foil)의 정면에서 유체가 가해지면 저항에 의해 뒤로 밀려나는 힘(drag)와 함께 양력(lift)이 발생한다. 이 때 포일의 각도가 변경되면 양력의 각도 또한 변경되어 Fig. 1과 같을 것이며, 양력을 벡터를 삼각형법으로 나누면 그림과 같이 왼쪽 방향의 추력을 얻을 수 있다는 관점을 적용한다.

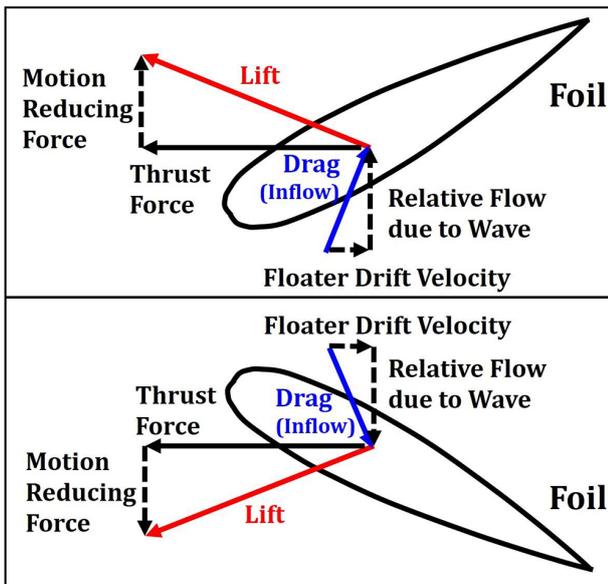


Fig. 1 Thrust force generated by flapping foil

또한 울산대학교에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 포일의 추력의 발생 정도에 따른 연구를 진행해왔으며(Kumar et al., 2017a, 2017b), 유체의 주파수에 따라 생성되는 추력의 정도가 다르다는 점과 다양한 주파수에서도 안정적인 추력을 공급하는 포일의 조건을 고려하고자 하였다.

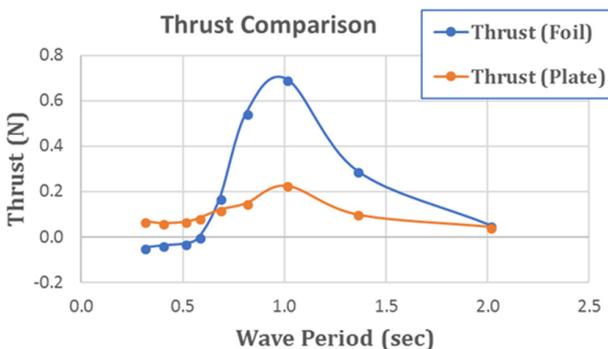


Fig. 2 Comparison of thrust force between foil and plate

수중에서 플래핑하는 포일과 평평한 판(flat plate)을 비교하였을 때 전자는 좁은 주파수 범위에서 큰 추력을, 후자는 넓은 주파수 범위에서 안정적인 추력을 생성한다는 점(Kumar et al., 2018a), 제작이 간단하다는 점 등을 고려하여 본 실험에서는 포

일의 형태가 아닌 판(flat plate)의 형태로 제작, 적용하였으며, 그 재원은 Fig. 3와 Table 1로 설명한다.

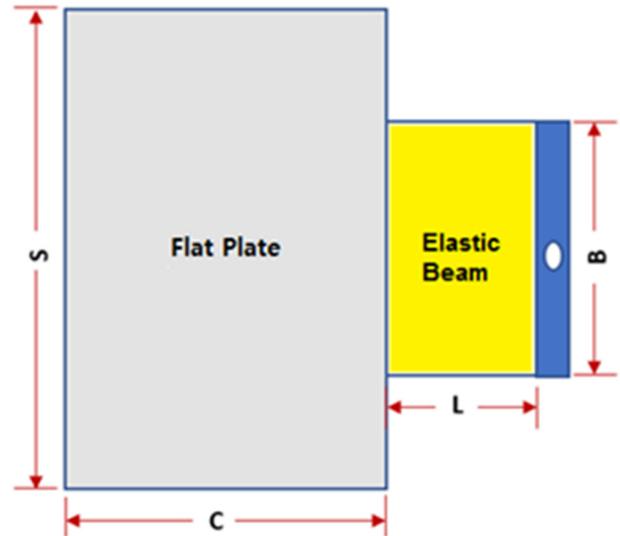


Fig. 3 Geometry of flat plate

Table 1 Specification of flat plate

	Thickness	Length	Width
Flat plate	8mm	S: 200mm	C: 150mm
Elastic beam	2mm	B: 100mm	L: 50mm
Material	Polyethylene		0.93g/cm ³

본 연구의 가설은 Fig. 4와 같이 포일은 파도의 상하운동에만 영향을 받기에 파도가 입사되는 방향과 관계없이 포일이 플래핑할 때에 포일의 방향을 따라 추력이 생성되며, 다른 계류 장치 없이 부유체에 포일만을 대칭으로 구성하였을 때에 하나의 방향에서 파도가 가해질 때에 부유체는 밀려나지 않고 양 포일의 힘의 평형을 통해 위치를 유지할 수 있다는 것이다.

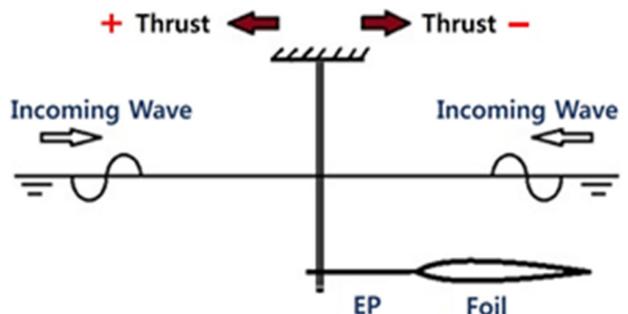


Fig. 4 Thrust forces generated by a flapping foil

본 연구는 원형 부유체에 조파기를 이용하여 규칙파를 가했을 때, 파도에 의해 밀리는 정도를 확인하고 포일의 적용을 통해 그를 얼마나 극복하는지, 또 전방향(全方向)으로 포일을 적용하였을 때의 부유체의 거동을 관찰하며 가설을 확인하고자 한다.

본 실험은 포일들의 추력 발생과 생성된 각 힘 간의 평형을 이용하면 다른 계류 장치가 없어도 부유체가 위치를 유지한다는 것이 핵심이며, 그를 확인하기 위한 첫 번째 단계이기에 부유체는 파도에 의한 저항이 작을 수 있도록 Fig. 5과 같이 새장(cage) 형태로 설계하였다.

또한 부유체의 부력을 조절하기 위해 Fig. 5 우측 하단의 원통형 스펀지를 제작하여 수직 기둥에 부착하였다. 파도이론에 따라 수심이 깊어질수록 파도입자의 상하운동은 작아지기에 포일의 상하 운동을 최대를 하고자 포일의 위치를 수면에 가깝게 운동 시 포일의 끝이 수면 밖으로 나오지 않는 높이 약 10cm로 지정하여 모형의 흘수를 설정하였다.



Fig. 5 Model of a floater

Table 2 Specification of a floater

Component	Length
Ring diameter	1600mm
Ring height	700mm
Ring pipe diameter	28mm
Ring pipe thickness	2.2mm
Draft	460mm
Column pipe diameter (Sponge)	110mm

상기 모델의 실물 크기(full scale)는 아직 결정되지 않았다. 그러므로 파도 또한 스케일링 되지 않는다. 본 실험의 목적은 해양공학 수조에서 포일이나 판(plate)이 부유체의 위치 유지에 어떠한 영향을 나타내는지 확인하고 연구하는 것이다.

3. 실험 방법

본 실험은 울산대학교의 3차원 광폭 수조(길이 30m, 너비 20m 깊이 2.5m)에서 진행하였으며, 조파기를 이용하여 모형에 규칙적인 사인파를 가하고 그에 따른 모형의 거동을 정밀 관찰하고자 적외선 Vicon Camera를 이용하였다

실험에 적용할 파도는 Table 3과 같이 파고를 고정하고 파의 주기만을 변경한 사인파인데, 포일의 추력 발생 정도는 파도의

주파수(또는 주기, 파장) 영향이 크기 때문이다.

또한 해당 수조의 수심은 2.5m이기에 심해파를 표현하는 파장은 최대 5m이다. 그리하여 본 실험에 사용된 파도의 파장은 5m에 가까운 4.99m를 적용하여 깊은 수심의 장파(wave 2)에서의 모형의 효과를 확인하고자 하였으며, 그보다 주기가 짧은 파도(wave 1)에서의 영향을 확인하고자 한다. Wave 3의 경우 파장은 9.79m로 5m의 두 배에 가까운 크기이기에 본 수조에서 적용하기에는 천수파라 할 수 있지만 심해파와 동시에 천수파에서 나타나는 포일의 플래핑 효과 또한 확인하고 비교하기 위해 적용하였다.

Table 3 Load case: Regular wave

Wave type	Period	Wave height	Wave length
Wave 1	0.89sec	0.025m	1.25m
Wave 2	1.78sec	0.025m	4.99m
Wave 3	2.50sec	0.025m	9.79m

다음은 실험에 적용할 모형의 포일 적용 조건을 나타낸 그림을 나열하였다.

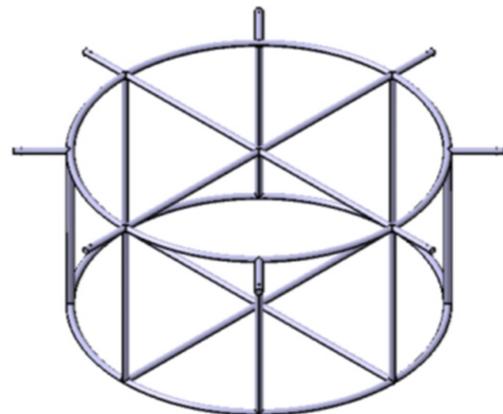


Fig. 6 Model of a floater [without foil]

Fig. 6의 조건은 포일을 적용하지 않았을 때에 부유체의 서지 운동과 밀림현상(drift)을 확인하기 위한 조건으로 포일이 적용된 모형과 비교하기 위한 조건이다.

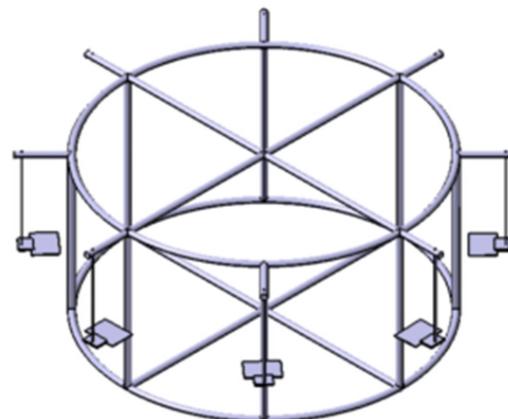


Fig. 7 Model of a floater with [5 foils]

Fig. 7의 조건은 파도가 모형에 입사되는 방향으로만 포일을 적용함으로써 발생하는 추력이 파도에 의한 저항을 극복하고 전진하는 것을 확인하기 위한 조건이다.

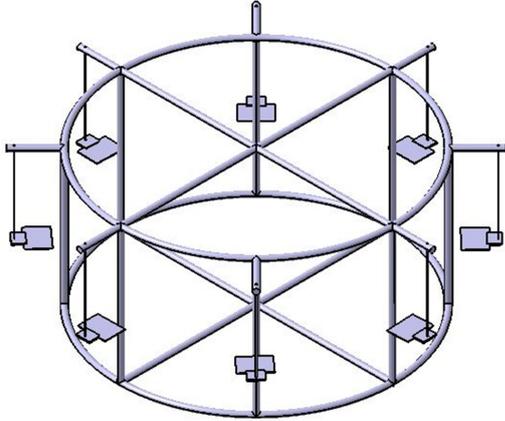


Fig. 8 Model of a floater with [8 foils]

Fig. 8의 조건은 본 실험의 목적과 연관된 것으로 발생하는 추력이 평형을 이루어 파도에 의해 밀리는 현상을 극복하고 위치를 유지할 수 있는지에 대해 판단할 수 있는 포일의 조건이다.

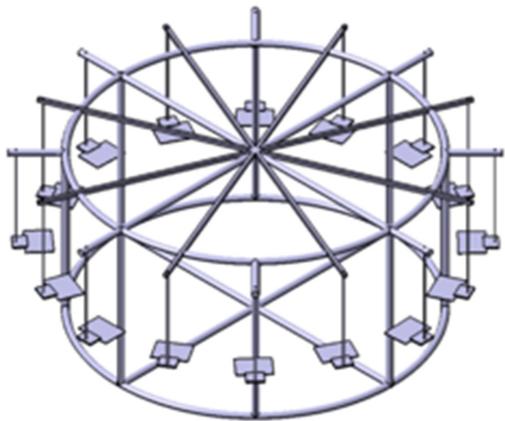


Fig. 9 Model of a floater with [16 foils]

Fig. 9의 조건 또한 포일로부터 발생하는 추력이 힘의 평형을 이루어 파도의 저항을 극복하고 위치를 유지할 수 있는지에 대해 판단할 수 있는 조건으로 Fig. 8와 다른 점은 더욱 많은 포일의 적용으로 발생하는 추력의 수를 증가, 파도의 저항을 극복하기에 조금 더 유리할 것으로 사료된다.

또한 상기 모형 조건들 중 포일의 방향과 발생하는 추력의 방향의 상관관계를 Fig. 10에 나타내었다.

상기 제시된 파도와 모형의 조건으로 실험을 진행한다면, 파도가 입사될 때 Fig. 6의 부유체 모형은 뒤로 밀려나게 될 것이다. 이후 Fig. 7의 포일 조건에서 부유체 모형은 파도의 에너지를 흡수하고 파도에 대항하는 방향으로 전진할 것이다. 그 후 Fig. 8의 부유체 모형은 포일의 대칭으로 인해 힘의 평형을 이룰 것이고 위치를 유지하는 양상을 보일 것으로 기대된다. 하지만

부유체에 발생하는 저항으로 인해 평형을 이루는 힘이 부족할 가능성을 염두에 두어 마지막 단계인 Fig.9의 조건을 구성, 포일로부터 발생하는 추력을 증가하고 그 힘의 평형을 이루어 자체 저항을 극복하고 마침내 모형의 밀리는 정도(drift)가 감소하여 위치를 유지할 수 있다는 시나리오를 구성하였고 이를 Fig. 11을 통해 그림으로 설명한다.

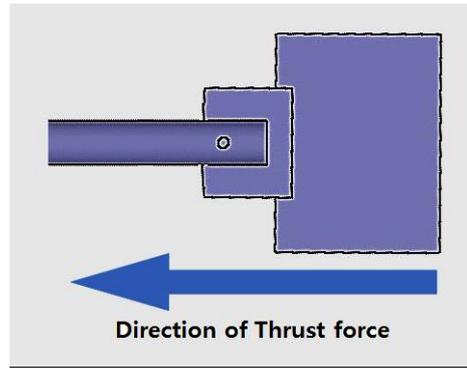


Fig. 10 Direction of thrust force

Without foil	5 foils
8 foils	16 foils

Fig. 11 Scenario of experiments

이 때 모형이 위치를 유지한다고 판단하는 기준은 모형의 서지 방향의 움직임이 약 2분간 수심 2.5m의 15% 이내를 벗어나지 않는 조건으로 설정하며, 그 이유는 다음과 같다.

일반적으로 심해에서 계류선을 이용하여 위치를 유지할 때 밀림현상은 수심의 5~8% 이내로 제한한다. 따라서 계류선을 제거하고 패시브 플래핑 포일을 이용하는 본 부유체 모형의 초기 기준은 약 두 배인 수심의 15% 이내로 지정하였다. 향후 연

구를 지속하며 기준을 단계별로 줄여갈 예정이다.

본 실험에서는 패시브 플래핑 포일(passive flapping foil)에 의해 발생하는 추력의 활용이 위치 유지(stationkeeping)에도 유용할 수 있음을 확인하는 것을 목표로 한다.

또한 Fig. 12의 경우 관찰할 모형의 움직임에 대한 그림으로, 서지 운동(surge motion)에 대하여 (+)방향은 파도에 의해 뒤로 밀려남을, (-)방향은 파도에 대항하여 전진함을 표현한다.

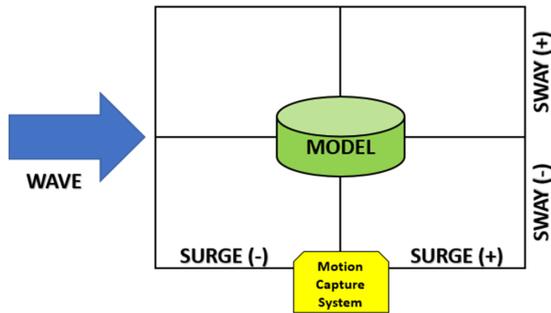


Fig. 12 Description of surge motion

4. 실험 결과

앞서 언급한 시나리오를 따라 실험한 결과는 다음과 같다.

4.1 In wave 1

비교적 짧은 파장을 갖는 Wave 1번에서의 실험 결과는 Fig. 13에서 확인할 수 있다.

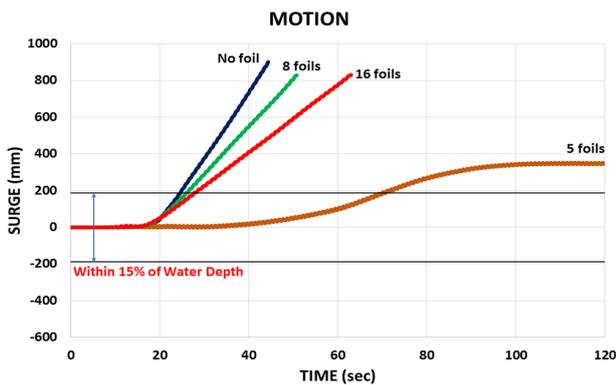


Fig. 13 Surge motion in Wave 1

Fig. 13에서 보는바와 같이 포일이 없는(no foil) 모형의 서지가 양의방향으로 급격히 증가, 즉 사인파에 의해 뒤로 밀려남을 확인할 수 있었다. 또한 8, 16 foils에서도 파도의 힘을 극복하지 못하고 뒤로 밀려남을 확인할 수 있었는데, 그의 기울기가 완만해 졌다는 것은 발생된 추력의 평형이 효과가 있었다고 볼 수 있다.

5 foils에서 굉장히 완만해진 기울기를 나타내지만 여전히 서지가 증가하는 것을 보아 파도에 대항하는 방향의 포일을 추가한다면 충분히 밀림(drift)을 극복할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 In wave 2

중간 영역인 Wave 2번에서의 실험 결과는 Fig. 14에서 확인할 수 있다.

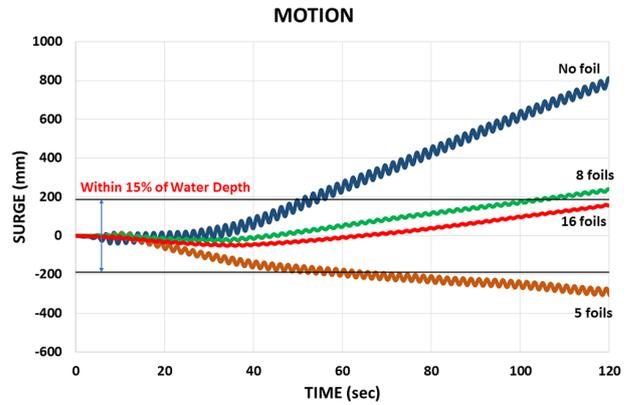


Fig. 14 Surge motion in Wave 2

Fig. 14에서 보는바와 같이 No foil의 모형에서 서지는 여전히 양의 방향으로 증가하고 있다. 하지만 5 foils에서 파도에 대항하여 전진하는 모습(서지가 (-)로 감소)을 나타내기 때문에 추력의 평형을 이룬다면 위치를 유지할 가능성이 있다고 판단하였다.

8 foil과 16 foils에서 비교적 안정적인 기울기를 나타내며 포일로 발생하는 추력의 평형을 통한 위치유지 제어가 눈에 띄게 나타났으며 서지가 (+)방향으로 증가하지만 초기 설정한 기준 범위 내의 움직임을 보였다.

Wave 2에서의 결과에서는 타 파에 비해 다른 특징이 나타나는데, 그래프의 진폭이 포일의 개수에 따라 다르다는 점이다.

여러 원인들 중 가장 큰 원인은 포일의 플래핑 효과라 할 수 있다. 포일의 관점에서 앞서 Wave 1의 주기는 포일이 상하운동을 할 충분한 시간을 제공하지 않고, 다음의 Wave 3의 주기는 모형이 위치를 유지하는 데에는 충분하지만 포일이 더 큰 추력을 생성하기에는 너무 길다. 하지만 Wave 2에서 포일은 충분한 상하운동으로 인해 추력이 생성되는데, 8 foil과 16 foil의 경우 전방향(全方向)으로 충분한 추력을 발생하기에 일정 시간 위치 범위를 유지함과 동시에 외력을 충분히 흡수, 상쇄하여 No foil의 경우에 비해 동요가 줄어들어 그래프의 진폭이 작아지는 것으로 나타난다. 그 외 부유체의 무게와 관성모멘트 변화에 의한 영향 등 여러 원인을 지속적으로 연구하고 분석할 계획이다.

4.3 In wave 3

가장 긴 파장을 갖는 Wave 3번에서의 실험 결과는 Fig. 15에서 확인할 수 있다.

Fig. 15에서 보는바와 같이 본 파도에서는 No foil의 경우에서 파도에 의해 부유체 모형이 뒤로 밀려남을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 장파의 경우 파장에 비해 파고의 변화가 작아 포일의 상하 운동이 낮은 속도로 진행 된다. 이는 추력 발생 정도

가 작아지는 것을 의미하며, Fig. 15에서 보이는 5 foils의 경우 그래프의 기울기가 완만하다는 것으로부터 알 수 있다. 하지만 8, 16 foils의 경우에서 힘의 평형을 이루어 파도에 의한 저항을 극복할 만큼 충분한 추력이 발생되고 있음이 안정적으로 위치를 유지하는 현상으로부터 나타나고 있다.

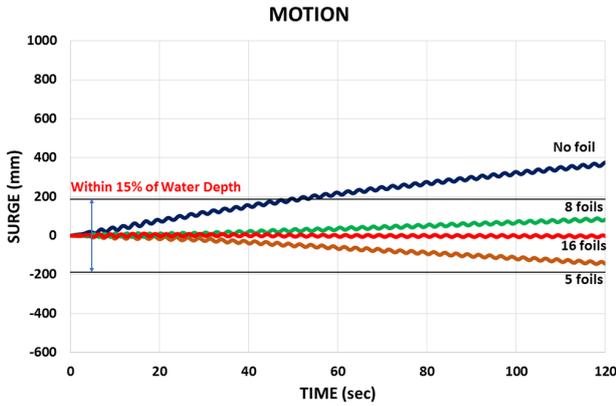


Fig. 15 Surge motion in Wave 3

실험의 결과로부터 초기 가설인 부유체의 전방향(全方向)으로 포일을 적용하여 파도의 힘에 의해 추력을 발생시키고, 그 힘의 평형은 부유체의 위치를 유지하는 데에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 파장이 가장 큰 파도(wave 3)를 제외하고는 크고 작은 밀림 현상(drift)이 여전히 발생하는 것으로 나타났다.

실험은 정수면 상태에서 조파가 시작됨과 동시에 모형의 움직임을 계속하였으며, 이는 결과 그래프의 시작점이 0초에 0mm 지점임을 의미한다. 각 그래프에서 밀림이 시작되는 지점이 다른 원인은 파의 속도이론에 기인한다. 파장이 길수록 파의 속도가 높아지고 모형에 파가 닿는 속도가 빨라져 모형의 움직임 또한 빨리 시작되기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 심해 환경에서의 계류선에 대한 한계를 극복하기 위한 대안으로 플래핑 포일(flapping foil)의 적용을 제안하고, 그를 검증하기 위한 첫 번째 단계로 포일(foil)의 힘을 이용해서 부유체의 밀림(drift)이 감소하는 것을 확인하기 위해 서지(surge motion)를 관찰하였다.

이번 실험의 결과로 부유체의 포일 적용은 분명한 효과를 나타내고 있으므로 플래핑 포일을 이용하여 파도의 힘만으로 위치를 유지하는 부유체의 개발이 가능할 것으로 보인다. 하지만 비교적 짧은 파장의 파도에서는 더 큰 포일의 추력과 부유체의 저항력이 함께 고려된 힘의 평형이 필요할 것으로 사료된다.

하지만 지속적인 추력의 증가가 해결책이 될 수 없기에 다른 대안이 필요할 것이다.

그 대안으로 울산대학교에서는 포일에 파도가 입사되는 각도에 따른 추력의 변화를 연구하였고(Kumar et al. 2018b) 이를 반영하여 부유체 모형에 적용된 각 포일의 각도 변경을 통해 포

일이 생성하는 추력을 조절, 부유체의 저항을 포함한 힘의 평형을 실험적으로 연구하고자 한다.

후기

본 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(No.20183010025270)과 한국전력공사의 2018년 착수 에너지 거점대학 클러스터 사업의 지원(No: R18XA03)을 받아 수행된 연구임.

References

- Kumar, R., Kim, J.Y., Kim, D.J. & Shin, H.K.. 2017a. Effects of elastic bands on the thrust generation of a flapping foil. *Annual Fall Meeting in The Korean Society for Marine Environment & Energy*, Jeju, Republic of Korea, 11–12 October 2017. pp.123–123.
- Kumar, R., Kim, J.Y., Seo, B.C., Kim, D.J. & Shin, H.K., 2017b. An estimation of thrust force of a flapping foil in waves using potential theory. *Annual Spring Meeting in The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Busan, Republic of Korea, 19–20 April 2017. pp.47–48.
- Kumar, R., Sim, W.R., Kim, D.J., & Shin, H.K., 2018a. Thrust estimation of a flapping flat plate in waves. *Annual Spring Meeting in The society of Naval Architects of Korea*, 24–25 May 2018. pp.329–330.
- Kumar, R., Sim, W.R., Yu, Y.J., Kim, J.B., Seo, B.C., & Shin, H.K., 2018b. The effects of azimuth angles on the thrust estimation of a passive flapping foil. *Advanced Maritime Engineering Conference 2018, Concurrently with 8th Pan Asian Association of Maritime Engineering Societies*, 09–12 Busan, Republic of Korea, 09–12 October 2018. pp.17–19.
- Young, J., Ashraf, M. A., Lai, J. C., & Platzer, M. F., 2013. Numerical simulation of fully passive flapping foil power generation. *AIAA Journal*, 51, pp.2727–2739.
- Zhu, Q., 2012. Energy harvesting by a purely passive flapping foil from shear flows. *Journal of fluids and structures*, 34, pp.157–169.

