

Article

취가오리 모방 진동식 조류 터빈의 출력향상에 대한 실험적 연구

고진환<sup>1\*</sup> · 김지훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 기계공학전공  
(63243) 제주특별자치도 제주시 제주대학로 102  
<sup>2</sup>한국해양과학기술원 수중건설로봇사업단  
(37553) 경상북도 포항시 북구 흥해읍 해안로 1104

Experimental Study on Power Improvement of a Flapping Tidal Stream Turbine by Mimicking a Manta-Ray

Jin Hwan Ko<sup>1\*</sup> and Jihoon Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Major of Mechanical Engineering, Jeju National University  
Jeju 63243, Korea

<sup>2</sup>Underwater Construction Robotics R&D Center, KIOST  
Pohang 37553, Korea

**Abstract :** Various approaches have been tried in an effort to improve the power performance of a flapping tidal stream turbine after it was introduced as an alternative to conventional rotary turbines. Among the different approaches, researches on mimicking the morphology and behavior of animals have been conducted. In this study, we utilized a flapper to mimic the multi-joint pectoral fin of a Manta-ray and investigated its effect on power generation. Experiments were conducted by a dual flapping apparatus with rigid and flexible flappers in a towing tank facility. First, in order to determine the conditions that can produce high power generation, the performances of the dual rigid flappers were compared when input arm angles and frequencies are changed, and the two conditions 40°, 0.2 Hz and 40°, 0.3 Hz for the input arm angle, frequency were selected. When the mimicked flexible flapper was used instead of the front rigid flapper and the rear one, the power was improved by an average of 22% and 38% in the experimental conditions, respectively. Moreover, it was recognized from the apparent camber observed during the experiment that the flexible flapper had been successfully applied. If the feasibility of the Manta-Ray mimicked flapper is improved through subsequent researches, the flapping tidal turbine can be a viable alternative to rotary turbines in the near future.

**Key words :** flapping tidal stream turbine, power improvement, flexible flapper, multi- joint pectoral fin, manta-ray

1. 서 론

조류 에너지는 화석 연료에 대한 의존도를 줄이기 위한

재생 가능 에너지 원의 하나로 고려되고 있다. 현재까지 대부분의 조류 발전기는 수평축, 수직축 및 진동식 터빈의 세가지 방식으로 개발되고 있다(Khan et al. 2009). 그 중 진동식 장치는 수평축과 수직축의 회전식 터빈(Bahaj et al. 2007; Kirke 2011; Han et al. 2013; Khan et al. 2009)

\*Corresponding author. E-mail : jko@jejunu.ac.kr

에 비해 다소 늦게 실효성에 대한 검토가 이루어 졌지만 최근 연구개발이 활발히 되고 있다. 특히 21세기 들어와서는 프로젝트 회사 중심으로 여러 진동식 시스템을 설계, 개발, 설치 및 실증하기도 하였다. 진동식 시스템은 회전식 터빈 대비 비교적 느린 선단 속도(tip speed ratio)로 인해 환경 친화적인 시스템인 것으로 알려져 있으나 기존 회전식 터빈의 대체 가능성을 높이기 위해 발전 능력, 제어성, 그리고 구조 안전성의 향상이 요구되고 있다(Xiao and Zhu 2014).

진동식 터빈의 경우 실험적 및 수치적 접근법을 이용하여 출력 및 효율 등을 포함하는 성능평가 연구가 활발히 진행되고 있다. 첫 번째 시도로 알려진 것은 1980년대의 실험적인 연구로, 피치(pitch)와 플런지(plunge) 운동을 결합한 진동자(flapper)를 이용하여 풍력 에너지를 추출할 수 있음을 보여주었다(McKinney and DeLaurier 1981). 이 후 매개 변수 연구를 통해 진동식 터빈의 최적 효율을 결정하는 연구가 이어졌다. NACA0012 형태의 알루미늄 수중익(hydrofoil)을 이용한 실험적 연구에서는 피치와 플런지 운동 사이의 위상 각(phase angle) 및 받음각(angle of attack)의 함수로 출력 추출 효율을 조사하였고 최대 받음각이 34.4도, 피치와 플런지 동작의 위상 각 차이가 90도 조건에서 최대 효율 43%를 얻음으로 회전식 터빈에 근접하는 효율을 가질 수 있음을 확인하였다(Simpson et al. 2008). 또한 근접 발전이 가능한 장점을 살려 듀얼(dual) 진동자, 즉 전면 진동자와 후면 진동자 구성이 제안되었다. 이 구성에 대한 2 차원 수치해석 결과는 2 kW 프로토타입(prototype)의 실험 결과와 잘 일치하였고 진동식 조류 터빈의 3차원 효과도 연구되었다(Kinsey and Dumas 2012a, 2012b). 이 연구에서는 스패(span) 길이에 의한 유체 역학적 성능의 저하가 2차원의 경우와 비교하여 제시하였다. 이 결과 선단부 손실(tip loss)을 최소화하기 위해서 진동자 끝 부분의 마감 판(end plate) 설치와 고 종횡비(aspect ratio)의 진동자가 제안되었고 2차원 진동자와 비교한 결과 3차원 진동자의 성능 저하를 약 10% 이하로 제한할 수 있었다.

생체 모방 기술이 먼저 적용된 것은 진동자를 이용한 추진 분야이며, 모방된 날개(진동자)의 유연성은 추진 효율 수준을 향상시키기 위한 중요한 요인으로 잘 알려져 있다. 추진체의 경우 실험적 연구가 활발하게 진행되어서 최적 효율, 앞전 와류(leading edge vortex)와 스패 방향 흐름의 상관 관계가 규명되고 있다(Anderson 1998; Read et al. 2003; Beem et al. 2012). 또한 최근에는 딱정벌레의 두 쌍 날개에 대한 상관 관계와 함께 유연한 날개로 인한 양력 향상에 대한 연구 결과도 발표되었다(Le et al. 2013a).

이러한 생체 모방 시도는 발전 분야에도 진행되었다.

대표적인 것은 흑동 고래 가슴 지느러미의 주름을 모방한 경우로 유체 역학적 성능 향상을 확인한 연구 결과가 제시되었다(Fish et al. 2011). 또한 가리비 껍데기의 주름 형상을 모방한 조류 터빈의 진동자에 대한 수치 해석 결과로 출력 및 효율 향상을 확인할 수 있었다(Le et al. 2013b). 그리고 최근에는 유연한 진동자에 의한 조류 발전 성능 향상에 대한 수치적 연구도 진행되었다(Le and Ko 2015). 하지만 발전 분야에서는 현재까지도 유연한 진동자의 실험 연구에 대해서 발표된 논문이 극히 드물고 대부분 강체 진동자에 대한 실험 연구가 주를 이루고 있다.

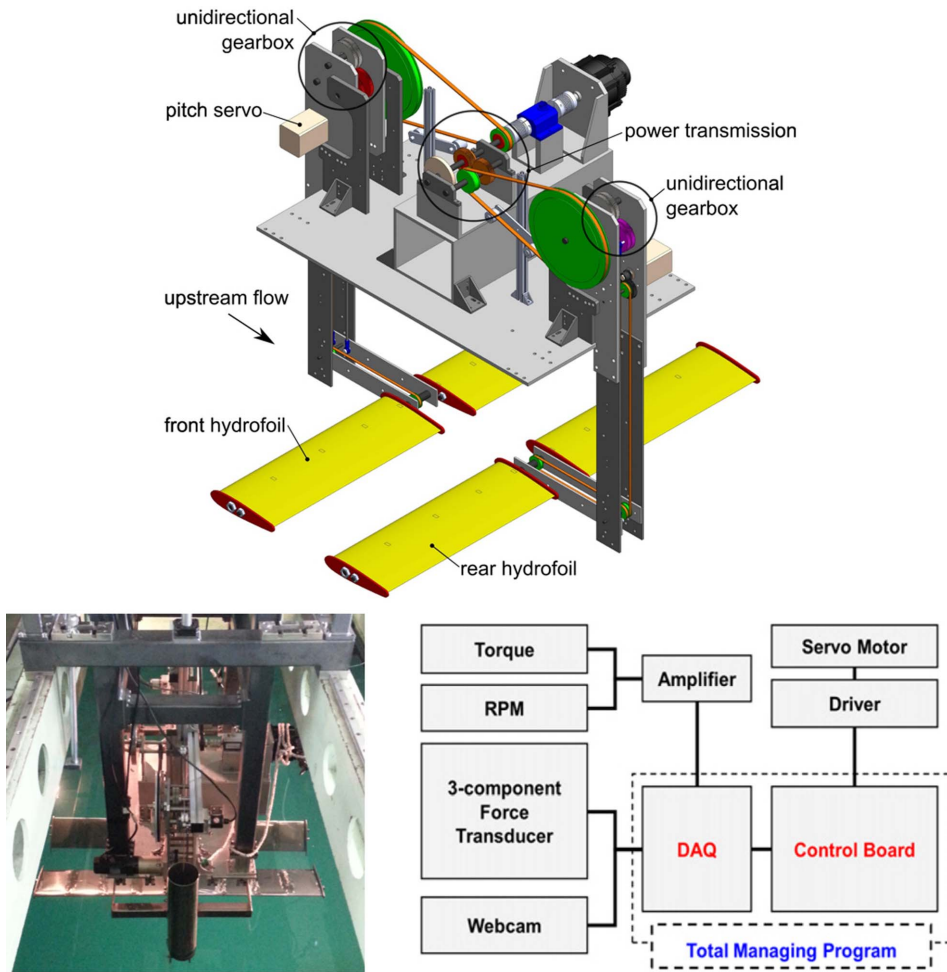
본 연구에서는 먼저 유연 진동자 구성 메커니즘을 구현하여 실험장치를 구성하였다. 또한 강체와 유연 진동자를 탑재한 듀얼 진동식 조류 터빈에 대한 실내 모형 실험을 수행하였고 이를 통한 출력 영향을 확인해 보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 진동식 조류 터빈 실험장치

Fig. 1에 실험장치가 도식되어 있으며 진동자로서의 각 날개 혹은 수중익(hydrofoil)은 진동 암(arm)에 연결되어 있다. 피치 모터는 벨트-폴리 변속기를 통해 동력을 공급하고 있고 진동 암의 동력 전달을 위해서는 링크 구조를 사용하고 있다. 각 진동자의 단면은 NACA0012, 코드의 길이는 200 mm, 스패의 길이는 600 mm, 그리고 진동 암 길이는 375 mm이다. 또한 선단 손실을 줄이기 위해 마감 판이 진동자의 단부에 장착되어 있다. 진동 암의 왕복 운동을 변환하는 운동 변환 장치는 한 방향 클러치(unidirectional clutch) 잠금 장치를 이용한다. 한 방향 클러치는 각 출력 기어 박스에 포함되어 있으며 그 결과 전면(front)과 후면(rear) 진동 암의 각 스트로크(stroke)는 기어 박스의 출력축을 한 방향으로 회전시킨다. 듀얼 진동자의 동력전달시스템(power transmission)은 전면 진동자와 후면 진동자 사이의 90도 위상차에 대응하도록 설계되어 있다. 각 진동자에 연결된 출력 축의 한 방향 회전 운동은 주로 최종 출력 축의 한 방향 회전 운동에 기여한다. 기계적 출력 산출에 사용되는 토크(torque)와 회전 수 (RPM)를 측정하기 위해 원통형 센서(T20WN, HBM Inc.)가 부하 부여용 서보 모터(servo motor) 앞 단에 부착되어 있다. 이 때의 기계적 출력은 토크와 회전속도( $\text{radian} = \text{RPM} * 2 * \text{Pi}/60$ )의 곱으로 계산된다. 또한 전면 및 후면 진동 암 각도는 각 엔코더(angle encoder)를 이용하여 측정하게 된다.

실내 실험에 사용된 예인 탱크(towing tank)의 규격은 폭 8 m, 길이 100 m, 깊이 3 m이고 최대 속도는 약 5 m/s이다. Fig. 1의 왼쪽 그림은 예인 탱크 캐리지(carriage)에 장착된 진동식 터빈 시스템의 전경을 보여준다. 발전성능



**Fig. 1. Design of the dual flapping turbine, dual flapping turbine attached to the towing train, and the total managing program**

평가를 위해 앞서 언급한 각 센서들의 데이터 수집을 담당하는 신호 처리 시스템이 필요하다. 여기에서 사용하는 시스템에서는 DAQ 보드(QuantumX 840A, HBM Inc.), 노이즈 필터 증폭기(VK20A, HBM Inc.), 그리고 상용 관리 소프트웨어(Catman Easy, HBM Inc.)를 탑재한 IBM 컴퓨터가 포함되어 있다. 데이터 세트(set)를 통일하기 위해 서보 모터의 온/오프 등 기계 부품을 제어하는 Fig. 1의 오른쪽 아래 그림의 통합 관리 프로그램을 구축하였다. 터빈이 작동하는 동안 모든 데이터는 관리 프로그램에 저장된다.

**쥐가오리 모방 진동자(flapper)**

대부분 해양 생물들의 지느러미는 유연 중에 유연한 형태를 가지며 이 중 매가오리(eagle ray) 종류는 새의 날개 짓과 유사한 운동을 하는 것으로 알려져 있다. 이 매가오리 과에 속하는 쥐가오리는 8미터까지 성장하는 해양에서 가장 큰 동물 중에 하나이면서도, 점잖은 성격으로 다이버

(diver)들이 좋아하는 해양 동물이다. 그러나, 최근 아시아의 약재 수요에 대응하기 위해 늘어나는 포획으로 이 중 2종이 보호종으로 분류되고 있다. 뛰어난 유연 성능으로 놀라운 추진력을 보여 주고 있으며 단적인 예로, 수면에서 공기 중으로 9 ft 이상 뛰어오를 수 있다. 본 연구에서는 이 놀라운 추진력에 대한 유력한 요인으로 유연한 가슴 지느러미 움직임에 주목하였고 가슴 지느러미가 인간의 손과 유사하게 다 관절로 구성되어 있어 곡면(camber) 형상을 만들어 낼 수 있는 점을 활용하고자 한다.

최근 연구(Le and Ko 2015)에서 이러한 곡면 형상이 조류 터빈에서의 큰 양력과 높은 출력 추출에 기여 함을 수치해석을 통해 제시하였다. 또한 Fig. 2와 같이 다관절의 지느러미 형태를 모방하여 흐름에너지로부터 곡면 형상을 만드는 기구도 고안되었다(Ko and Patar 2015). 이 기구에서는 코드 방향의 휘어짐과 스펀 방향의 휘어짐을 결합하여 유연 진동자의 변형을 설계하고 있다. 유동 에너지에 따라 모양이 코드와 스펀 방향의 곡면이 생성되는

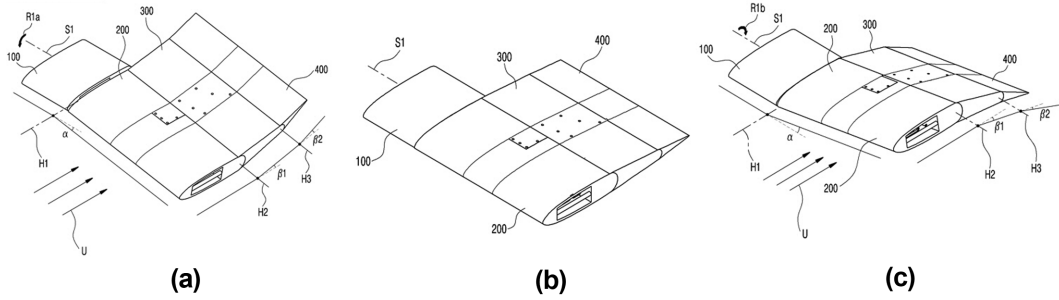


Fig. 2. Variable-camber changing mechanism of a flexible flapper during (a) the downstroke, (b) the midstroke, and (c) the upstroke (Ko and Patar 2015)

방식을 채택하고 기어-폴리 시스템을 이용한 전달 장치가 진동자 루트(root)부터 연결된다. 이 고안된 메커니즘에서는 코드와 스패의 곡면 생성을 위해, 진동자에 작용하는 유체 역학적 힘을 사용하여 진동자의 형상이 수동적으로 형성된다. 앞전(leading edge)이 뒷전(trailing edge)보다 낮아지면 유체 역학적인 힘은 아래쪽으로 향해 진동자는 아래 방향으로 내려가고(downstroke), 반대의 경우는 위쪽으로 향해 위 방향으로 올라가게 되며(upstroke) 이는 주기적으로 변화하여 진동하게 된다. 아래 방향으로 이동 시 유동에 의해 루트 관절의 회전축이 시계방향으로 돌게 되어 스패 방향으로 볼록하게 되고 이 때의 회전력이 세계로 분리된 코드 연결축을 반시계 방향으로 회전시키면서 유동을 감싸는 형태의 곡면(positive camber)이 생성된다. 위 방향으로 이동 시 유동에 의해 루트 관절의 회전축이 반시계 방향으로 돌게 되어 스패 방향으로 오목하게 되고 이 때의 회전력이 코드 연결축을 시계 방향으로 회전시키면서 역시 유동을 감싸는 형태의 곡면이 생성된다. 이 경우 코드의 곡면의 정도는 결합 메커니즘의 기어 비율에 따라 변화된다.

내부 구조를 좀 더 자세히 보면 Fig. 3의 루트 A에서 유동에너지에 의해 수동으로 코드 방향 축으로 회전 및 회전력이 생기고 이 회전력은 녹색의 베벨기어(Bevel Gear)를 통해 코드 절단부 사이의 스패 방향 축으로 전달

된다. 이때 기어 연결부에 의해 코드 방향과 스패 방향 축에 대한 회전방향은 반대가 되도록 설계되었다. 즉 유동에 너지에 의해 발생된 일차적인 회전 및 회전력은 B 위치의 코드 절단 부 스패 방향 축으로 전달되어 유동을 감싸는 형태의 곡면을 생기게 하는 원리이다. 이러한 원리를 적용하여 Fig. 3의 오른쪽 그림과 같이 유연 진동자의 모형이 제작되었고 강체 진동자와의 성능 비교를 위해 강체 진동자와 유동 받음 면적이 동일하도록 하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 입력 암각(arm angle)과 주파수에 따른 영향

곡면에 대한 영향을 보기 위해서 먼저 주어진 조건에서 고출력이 나오는 조건을 추출하고자 한다. 사용되는 시스템은 듀얼 진동자를 사용하고 전후면 모두 강체 진동자가 장착된다. 고정 입력으로는 예인 속도 0.8 m/s, 부하 1.5 N·m이며 변동 입력으로는 주파수와 입력 암각이 사용되었다. 주파수의 경우 0.2 Hz에서 0.5 Hz까지 0.1 Hz씩 증가하도록 하였고, 입력 암각의 경우는 20도, 30도, 그리고 40도로 증가하도록 하였다. 입력값이 주어지면 통합프로그램에서 이를 만족할 수 있도록 전후면 진동자의 피치를 조절하게 되고, 피치에 의한 상하 이동력이 발생하게 된다. 수중이라는 특성 때문에 부가 질량(added mass)과

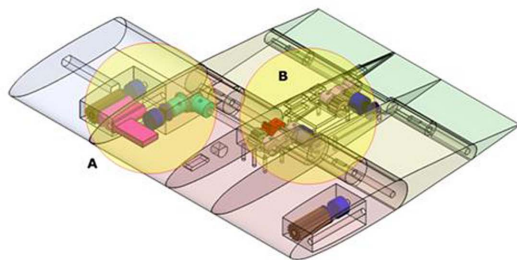


Fig. 3. CAD and prototype of the flexible flapper

Table 1. Actual arm angle and output power upon input frequency, input arm angle, and imposed torque

Input arm angle (degree)	Frequency (Hz)	Actual arm angle of front flapper (degree)		Actual arm angle of rear flapper (degree)		Load (N·m)	Power (W)
		Upstroke	Downstroke	Upstroke	Downstroke		
20	0.2	22	23	22.5	22.5	1.5	2.54
20	0.3	22	21	20.5	20	1.5	3.97
20	0.4	12	11	11	11.5	1.5	2.83
20	0.5	7	6	5.5	6	1.5	1.9
30	0.2	27	26	25	26	1.5	2.91
30	0.3	20	21	20.5	19.5	1.5	4.07
30	0.4	10	11	11	10.5	1.5	2.9
30	0.5	6	7	5.5	5.5	1.5	1.88
40	0.2	39	38	37.5	37.5	1.5	4.34
40	0.3	24	25	22.5	22	1.5	4.58
40	0.4	12	11	11	10.5	1.5	2.85
40	0.5	5	6	5.5	5	1.5	1.83

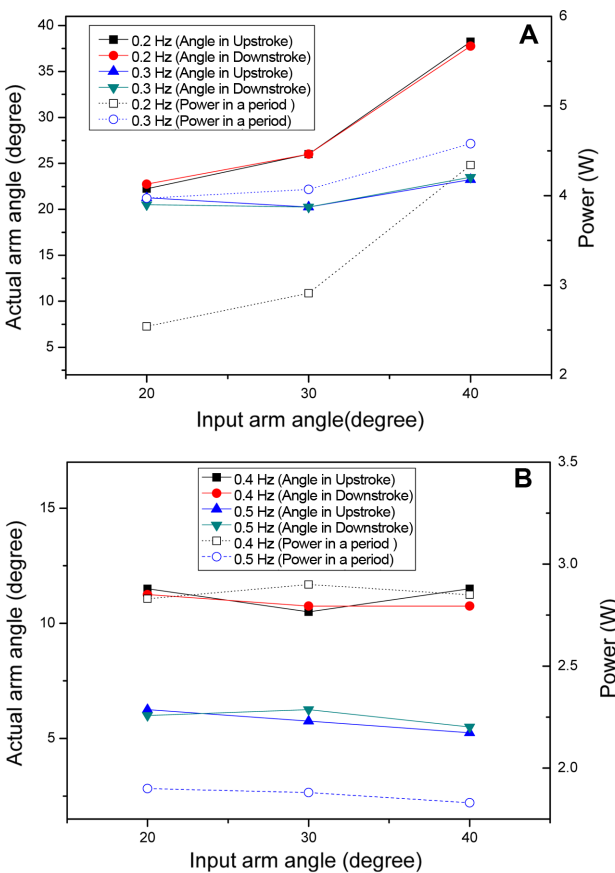


Fig. 4. Actual arm angles and powers when varying the input arm angle. A: low frequency condition, B: high frequency condition

높은 수력학적 감쇠(hydrodynamic damping)가 추가되어 속도의 전환과 가속의 정도가 공기 중보다는 늦어지게 된

다. 이러한 영향으로 Table 1에서 제시한 바와 같이 주파수가 증가하는 경우 입력 암각과 실제 암각과의 차이가 커지게 된다. 이러한 주파수 영향을 자세히 살펴보기 위해 저주파 조건(0.2와 0.3 Hz)과 고주파 조건(0.4와 0.5 Hz)으로 나누어 실험 결과를 Fig. 4에 도식하였다. 여기서 각 주파수의 실제 암각은 전면과 후면의 실제 암각의 평균값을 사용하였다.

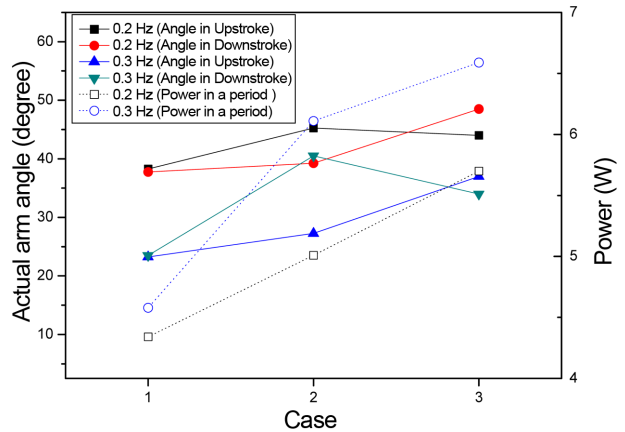
Fig. 4A의 결과에 따라 저주파수 조건에서 입력 암각이 커지면 출력 암각이 커지는 경향을 확인할 수 있다. 큰 입력 암각이 주어지면 이를 만족하기 위해 피치각이 증가하게 되고 이에 따라 회전 속도도 증가하게 된다. 반면 주파수가 커지는 경우도 이를 만족하기 위해 피치각이 증가하게 되는데 0.3 Hz의 경우는 고 피치각 구형이나 암 이동에 필요한 시간이 부족하게 되어 실제 암각의 증가 폭이 0.2 Hz의 실제 암각의 증가 폭보다 작아지게 된다. 같은 부하 조건인 경우 출력은 회전 속도에 비례하게 되는데 저주파 조건에서는 입력 암각과 주파수 증가에 따라 회전 속도 증가로 이어지고 출력 증가에 기여함을 확인할 수 있다. 앞서 기술한 바와 같은 이유로 주파수 증가에 따른 출력 증가의 폭은 입력 암각이 커질수록 줄어들게 되어 40도 인 경우 거의 근접한 것을 확인할 수 있다. 고주파 조건에서는 Fig. 4B의 결과에 따라 주파수가 증가하는 경우 출력이 감소하는 반대의 경향을 확인할 수 있다. 또한 입력 암각의 증가에 대한 실제 암각의 증가도 확인할 수 없다. 이에 대한 가장 큰 원인은 입력 암각과 주파수의 증가가 피치각의 증가로 잘 반영되지 않은 것으로 피치각 회전 주기의 한계와 피치 회전에 대한 수력학적 감쇠 효과에 기인된다. 즉 실험장치와 운전 환경에 기인되는 제약 조건에 의해 원하는 제어가 되지 않았다고 판단된다. 따라

서 주어진 조건들 중에서는 입력 암각 40도이고 주파수 0.3 Hz인 경우와 입력 암각 40도이고 주파수 0.2 Hz인 경우가 가장 높은 출력을 보여 이들을 곡면의 효과를 확인하는 조건으로 선정하였다.

**곡면 효과**

다음으로 출력이 높은 조건인 입력 암각 40도와 입력주파수 0.2, 0.3 Hz에서 예인속도는 0.8 m/s, 부하도 동일한 값으로 고정시켜 유연 진동자를 사용한 경우 기존 출력과 비교하여 보았다. 비교 대상의 첫 번째는 전면의 강체 진동자를 유연 진동자로 변경한 경우이고 두 번째는 후면의 강체 진동자를 유연 진동자로 변경한 경우이다. 첫 번째 경우의 출력과 강체 진동자의 기존 출력과의 비교 결과는 Table 2에 두 번째 경우의 출력과 강체 진동자의 기존 출력과의 비교 자료는 Table 3에 나열되었다. Table 2의 결과에 따라 유연 진동자가 예인방향 전면에 위치할 경우 강체 듀얼시스템 대비 출력이 평균 21.8%로 향상된다. 반면 Table 3의 결과를 보게 되면 동일 조건에서 유연 진동자의 위치를 후면으로 변경할 경우, 강체 듀얼시스템 대비 출력이 평균 37.7%로 향상된다. 또한 Table 2와 3의 결과에 따라 유연진동자가 전면에 위치하는 것 보다 후면에 위치하는 경우, 출력이 평균 11%로 향상된다. 따라서 본 실험의 조건에서 곡면을 줄 수 있는 유연 진동자가 강체 진동자보다 높은 출력을 낼 수 있음을 알 수 있다.

Table 1, 2, 그리고 3의 비교 자료를 가시화 한 결과는 Fig. 5에 도식화 되었다. Case 1은 강체-강체 조합, Case 2는 유연-강체 조합, 그리고 Case 3는 강체-유연 조합을 나타낸다. 먼저 강체-강체 조합에 비해 유연 진동자를 사용한 경우의 확인한 출력 향상을 확인할 수 있다. 유연 진동자에 의한 출력 향상은 곡면 형성에 의한 양력의 증가가 가장 큰 이유이며 곡면 형성으로 유동 받음 면적이 줄고



**Fig. 5. Actual arm angles and powers of different cases. Case 1: rigid-rigid flappers, Case 2: flexible-rigid flappers, Case 3: rigid-flexible flappers**

저항을 덜 받는 형상이 된 것도 항상 요인으로 판단된다. 실제 암각도 유연 진동자를 사용한 경우에 증가된 것을 확인할 수 있으며 상하 진동의 평균치의 경우 Case 3(0.2 Hz: 46.3°, 0.3 Hz: 35.5°)이 Case 2(0.2 Hz: 42.3°, 0.3 Hz: 33.9°)보다 다소 크게 나타나긴 하였으나 유사한 수준으로 볼 수 있다. 실제 암각이 유사한 수준임에도 불구하고 Case 2 대비 Case 3의 출력 향상 폭이 커진 이유는 Fig. 1에 보여진 바와 같이 후면의 경우 진동 축 앞쪽에 진동자가 위치하는데 기인하며 이런 진동 방식이 전체 출력에 더 크게 기여함을 알 수 있다. 상·하 스트로크 간 차이가 Fig. 4의 강체 듀얼 시스템에 비해 크게 나타난 것은 이중의 진동자가 배치된 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 6에서는 실험 진행 중에 유연 진동자의 스펙과 코드 방향의 곡면 형성을 보여 준다. 두 방향의 곡면 크기가

**Table 2. Power comparison of the flexible-rigid dual flapping turbine over the rigid-rigid one**

Input arm angle (degree)	Frequency (Hz)	Actual arm angle of flexible flapper (degree)	Actual arm angle of rigid flapper (degree)	Load (N·m)	Power (W)	Power improvement over rigid-rigid one (%)		
40	0.2	40.5	40.5	50	38	1.5	5.01	9.4
40	0.3	27.5	30	27	51	1.5	6.11	34.1

**Table 3. Power comparison of the rigid-flexible dual flapping turbine over the rigid-rigid one**

Input arm angle (degree)	Frequency (Hz)	Actual arm angle of rigid flapper (degree)	Actual arm angle of flexible flapper (degree)	Load (N·m)	Power (W)	Power improvement over rigid-rigid one (%)		
40	0.2	44	53	44	44	1.5	5.7	30.1
40	0.3	44	41	30	27	1.5	6.59	45.2

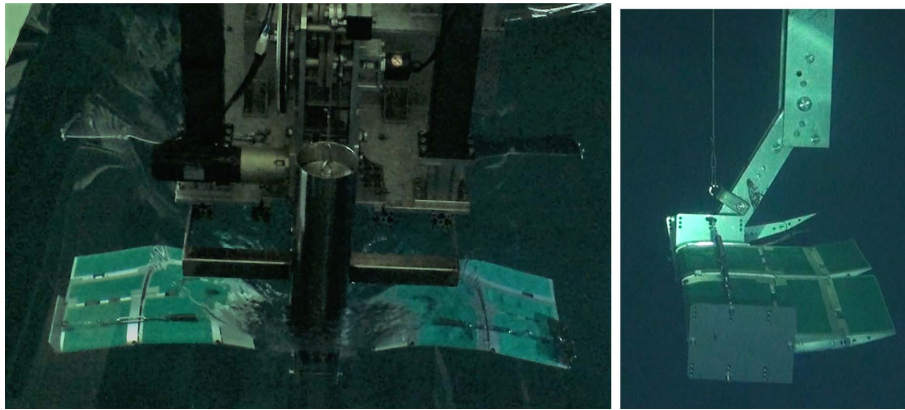


Fig. 6. Experimental scene and formed camber of the flexible flapper in the towing tank

시각적으로 확인할 수 있는 수준이며 특히 코드 방향의 곡면은 큰 양력을 도출할 수 있는 형태로 형성되는 것을 확인할 수 있다. 본 실험의 경우 다양한 성능 인자를 고려한 정밀한 비교는 아니었고 진동자 표면 근처의 국소 유동 특성을 가시화하지는 못하였지만, 명확한 곡면의 형성과 상대적으로 높은 출력 도출을 통해 제안한 유연 진동자의 우수한 특성을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 듀얼 진동식 조류 터빈 실험장치를 구축하고 강체와 유연 진동자를 제작하여 유연 진동자의 출력 향상 효과를 실내 실험을 통해 확인해 보았다. 유연 진동자의 경우 쥐가오리의 가슴지느러미를 모방한 다관절 방식을 채택하였고 큰 양력 산출에 적합한 곡면 형태를 생성하는 메커니즘을 구현하였다. 유연 진동자의 출력 향상을 확인하기 위해 먼저 강체 진동자를 사용하는 경우 최대 출력이 나오는 조건을 도출하였다. 결과적으로 주어진 유속과 부하에서 입력 압각이 커지는 경우가 가장 출력이 높았으며 주어진 실험 조건에서는 (입력 압각, 주파수)가 (40°, 0.2 Hz)와 (40°, 0.3 Hz)일 때 최대 출력 조건이 되었다. 이 조건에서 동일한 유동 받음 면적을 갖는 유연 진동자를 전면에 설치해 보았을 때 출력 향상이 평균 22%이었고, 후면에 설치했을 때는 평균 38%의 출력 향상 결과를 얻어 유연 진동자의 우수성을 확인하였다. 또한 실험 중에 스펙과 코드 방향의 명확한 곡면 형성을 확인하여 쥐가오리 가슴지느러미 모방 메커니즘이 잘 구현된 것도 확인할 수 있었다. 향후 다양한 성능 인자들에 대한 정밀한 비교와 진동자 표면 근처의 국소 유동 특성 가시화에 대한 연구가 이어질 수 있으며 이를 통하여 진동식 조류 터빈의 실효성을 높일 수 있을 것이다.

#### 사 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 진행되었습니다(No. 20163010071630).

#### 참고문헌

- Anderson JM, Streitlien K, Barrett DS, Triantafyllou MS (1998) Oscillating foils of high propulsive efficiency. *J Fluid Mech* **360**:41–72
- Bahaj AS, Batten WMJ, McCann G (2007) Experimental verifications of numerical predictions for the hydrodynamic performance of horizontal axis marine current turbines. *Renew Energ* **32**:2479–2490
- Beem HR, Rival DE, Triantafyllou MS (2012) On the stabilization of leading-edge vortices with spanwise flow. *Exp Fluids* **52**:511–517
- Fish FE, Webber PW, Myrrey MM, Howle LE (2011) The tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology. *Integr Comp Biol* **51**(1):203–213
- Khan MJ, Bhuyan G, Iqbal MT, Quaiocoe JE (2009) Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review. *Appl Energ* **86**:1823–1835
- Kinsey T, Dumas G (2012a) Three-dimensional effects on an oscillating-foil hydrokinetic turbine. *J Fluids Eng-T Asme* **134**(7):071105
- Kinsey T, Dumas G (2012b) Computational fluid dynamics analysis of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils. *J Fluids Eng-T Asme* **134**(2):021104

- Kirke BK (2011) Tests on ducted and bare helical and straight blade darrieus hydrokinetic turbines. *Renew Energ* **36**(11):3013–3022
- Ko JH, Patar S (2015) Reciprocating device of oscillating tidal stream generators. KR Patent KR101488870B1, 4 Feb 2015
- Han SH, Park JS, Lee KS, Park WS, Yi JH (2013) Evaluation of vertical axis turbine characteristics for tidal current power plant based on in situ experiment. *Ocean Eng* **65**(1):83–89
- Le QT, Truong TV, Park SH, Truong TQ, Ko JH, Park HC, Byun D (2013a) Improvement of the aerodynamic performance by wing flexibility and elytra-hind wing interaction of a beetle during forward flight. *J R Soc Interface* **10**:20130312
- Le QT, Ko JH, Byun D (2013b) Morphological effect of a scallop shell on a flapping-type tidal stream generator. *Bioinspir Biomim* **8**:036009
- Le QT, Ko JH (2015) Effect of hydrofoil flexibility on the power extraction of a flapping tidal generator via two- and three-dimensional flow simulations. *Renew Energ* **80**:275–285
- McKinney M, DeLaurier J (1981) The wingmill: an oscillating-wing windmill. *J Energy* **5**(2):109–115
- Read DA, Hover FS, Triantafyllou MS (2003) Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering. *J Fluids Struct* **17**:163–183
- Simpson BJ, Hover FS, Triantafyllou MS (2008) Experiments in direct energy extraction through flapping foils. In: *Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver Canada, 6–10 July 2008*
- Xiao Q, Zhu Q (2014) A review on flow energy harvesters based on flapping foils. *J Fluids Struct* **46**:174–191

---

*Received Oct. 31, 2017*

*Revised Nov. 29, 2017*

*Accepted Dec. 5, 2017*