

유동가시화를 통한 다중 수중익 덕트 내 유속조절에 대한 연구

김지훈* · Patar Ebenezer Sitorus* · 원보름* · Tuyen Quang Le** · 고진환†

Study on Flow Velocity Control of a Multiple Hydrofoil Duct via Flow Visualization Techniques

Jihoon Kim*, Patar Ebenezer Sitorus*, Boreum Won*, Tuyen Quang Le**, and Jin Hwan Ko†

Abstract In this work, we investigate the flow velocity controllability of a diffuser-type multiple hydrofoil duct by experimental and numerical flow visualization approaches. The flow velocity controllability is analyzed by changing the angle of the hydrofoil near the outlet, which is the diffuser, while the incoming flow velocity is 0.6 m/s in the experiment. When the diffuser angle is changed from 0 to 7.5 degree, the maximum velocity inside the duct is varied from 1.35 m/s to 1.52 m/s. Also, it is shown from the numerical analysis that the maximum velocity is varied from 1.09 m/s to 1.17 m/s in the same condition. Thus, the aspect of the acceleration in the duct due to the increase of the diffuser angle is similar between the both approaches. Therefore, the multiple hydrofoil duct can be used to control the flow speed inside the duct for continuously extracting power close to a rated capacity.

Key Words : Flow visualization(유동가시화), Duct(덕트), Diffuser(확산기), Multiple hydrofoil(다중 수중익)

1. 서론

최근 들어 에너지에 대한 전 세계적인 수요 증가와 이에 따른 환경 오염의 문제가 점점 더 심각해지는 추세이다⁽¹⁾. 이에 따라 오염의 주원인인 화

석 에너지를 대체할 효과적인 방법으로서, 자연을 동력원으로 사용하는 신재생 에너지(renewable energy)가 주목을 받고 있다. 신재생 에너지의 경우 기존 화석 에너지 자원들과 비교했을 때, 평균적으로 이산화탄소, 이산화질소, 그리고 중금속 등으로부터 그 영향도가 훨씬 적은 것으로 알려져 있다^(2, 3).

신재생 에너지의 형태는 다양한 에너지원과 이를 이용하는 방법에 따라 분류되는데, 이 중 액체 상태인 유체의 흐름을 직접적으로 이용하는 경우에는 조류 (tidal current)^(4, 5), 해류(ocean current)^(6, 7), 소수력(micro hydro power)^(8, 9) 발전이 대표적이다. 액체 상태인 유체는 공기에 비해, 그 종류에 따라 수백에서 수천 배 이상의 높은 밀도를 지니고 있

† Korea Institute of Ocean Science and Technology, Republic of Korea
E-mail: jhko@kiost.ac.kr

* Korea Institute of Ocean Science and Technology, Republic of Korea

**Institute under the Agency for Science, Technology and Research (A*STAR), Singapore

어, 좁고 작은 면적 내에서도 상대적으로 높은 에너지를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 상기에서 언급된 장치들은 유체의 흐름 방해와 압력 손실에 의한 영향을 최소화 하도록 설계가 필요하다⁽¹⁰⁾.

따라서 이를 위해 덕트(duct) 방식이 제안되고 있다. 또한 덕트 내 확산기(diffuser)의 각도를 조절하게 되면 입사유속 변동성에 대응하여, 발전에 이용되는 덕트 내 유속을 조절할 수 있게 된다. 이를 통해 덕트 내 수두 손실이 감소하게 되고, 유속을 이용한 발전 장치 (i.e. 조류 발전기, 해류 발전기, 소수력 발전기 등등)의 효율과 이용률을 향상시킬 수 있게 된다.

선행 연구 사례로서 B. Kirke는 덕트를 이용하여 유동에 기인하는 발전 터빈의 효율을 증가시킬 수 있음을 보였다⁽¹¹⁾. M. J. Werle 등은 덕트 형태의 풍력 혹은 유체 터빈에 대한 성능증가를 제시하였다⁽¹²⁾. 또한 B. Majumdar 등은 덕트의 가로-세로 종횡비(aspect ratio)에 따른 덕트 내 확산기 형상이 유체에 미치는 영향을 실험적으로 제시하였다⁽¹³⁾.

그러나 앞서 언급된 선행연구들의 경우 대다수 고정형 덕트를 사용하기 때문에 입사유속의 변동성에 대한 능동적 대응이 어려운 한계점이 존재하였다. 이러한 입사유속의 변동성은 곧 구조 안전성과 직결되는 사항이고 시스템의 과설계의 원인이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 다중으로 구성된 수중익 기반의 덕트로, 액체 상태 유동의 유속 변동성에 능동적으로 대응할 수 있는지 살펴보았다. 특히 덕트의 내부 유속을 가시화하기 위해 입사 영상 유속계(Particle Image Velocimetry, PIV)를 이용한 실험적 방법을 이용하였으며, 전산 수치해석을 통해 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 가시화 실험

먼저 그림 1과 같이 세 개의 서로 다른 수중익(hydrofoil)을 갖도록 덕트를 구성하였다. 수중익의 형상과 배치는 기존 덕트형 수직축 조류발전 시스템을 참고하여 구성하였다⁽⁴⁾. 수중익은 PLA 원료

(Poly Lactic Acid filament)로 3차원 프린터 장비(Makerbot, Inc.)를 통해 제작하였으며, 아크릴 유리 와 연결 프레임을 이용하여 입사 유속 대비 수직 방향으로 가시화가 용이하게 만들고 개수로 벽면에 고정될 수 있도록 제작하였다.

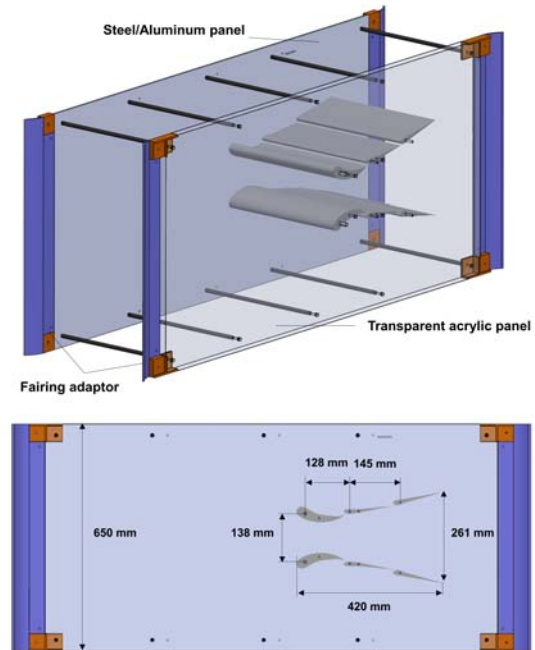


Figure 1. The schematic of the multiple hydrofoil duct for flow visualization

다중 수중익과 이를 지지하는 프레임은 개수로의 테스트 섹션 내 유리 표면과 유체에 의한 난반사와 산란효과를 최소화 하기 위해, 검정색 무광 스프레이를 이용하여 전체 도색 하였다. 또한 덕트의 출구부를 구성하는 수중익이 확산기(diffuser) 역할을 하게 되며 각도를 변경 가능하게 구성하였다. 각도는 0도와 7.5도가 되도록 설정하였으며, 확산기가 유동에 의해 흔들리지 않도록 후면에 고정력 볼트와 너트를 조합하여 구성하였다.

실험에 사용된 수조는 개수로(open water channel) 형태로서 폭 0.6 m, 길이 25 m를 갖는 한국해양과학기술원의 순환형 장비이며, 개수로 수문 개폐 조건에 따라 입사 유속은 최대 1 m/s로 운영이 가능하다.

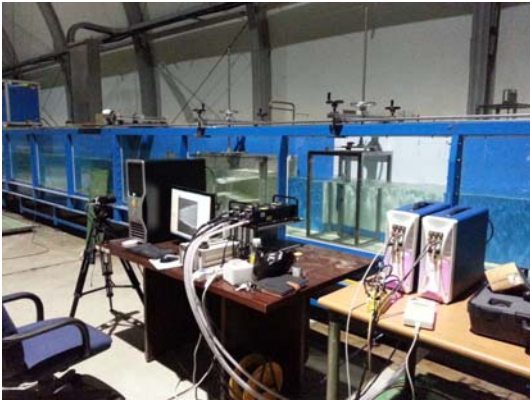


Figure 2. A snapshot of experiment setup for flow visualization in the open water channel

그림 2는 개수로 내 덕트와 입자 영상 유속계 (Particle Image Velocimetry, PIV)를 설치한 전경을 나타낸다. 입자 영상 유속계의 경우 개수로의 연속적으로 유입되는 일정한 유속 환경에 적합하도록, 펄스(pulse) 타입의 Nd:YAG레이저를 사용하였으며 실험 선정 유속 0.6 m/s 기준에서 연속 획득 주기는 7.25 Hz, 프레임 간 딜레이(delay)는 850 μ s 을 사용하였다.

한편, 개수로 내 유입되는 유속의 정확도를 확인하기 위해 ADV(Acoustic Doppler Velocimetry, Nortek, Inc.)를 이용하여 설정 유속 0.6 m/s 대비 10 초간 평균 오차 ± 0.02 m/s 를 얻도록 개수로 개문을 조절하였다. 이 때, ADV의 설치 위치는 입사 유속의 흐름을 방해하지 않도록 설치된 덕트의 유입구 위치로부터 5 m 거리 앞에 고정하였다.



Figure 3. A fluorescence image of the multiple hydrofoil duct

그림 3은 입자 영상 유속계를 이용하여 촬영된 형광 이미지를 나타내고 있다. 사용된 형광 입자는 평균 직경 30 μ m를 갖는 유리질 중공체(glass hollow)재질을 사용하였고, 개수로 특성상 일정특정 농도 비율을 정량화하기 어려웠다. 그래서 32 X 32 유의한 픽셀(pixel) 내 평균 20개의 입자가 나타나도록 형광 입자 투입량을 조절하였다.

이를 통해 프레임 간 획득된 이미지 128개의 세트(set)를 앙상블(ensemble) 평균하여 유동장을 분석하였다. 이미지 분석의 경우 상용 소프트웨어인 Insight 4G(TSI, Inc.)를 사용하였다. 이 때, 가로-세로 각각 2048 X 2048 픽셀의 해상도를 이용했다. 유동장 분석 시에는 64 X 64 픽셀에서 32 X 32 픽셀로 감소기법을 적용 후, 상관영역(interrogation area)의 50% 화상중복(overlap)을 계산하여 속도 분포를 얻었다.

2.2 전산 수치해석

다중 수중익으로 구성된 덕트 내에서 실험상의 유속 특성을 비교하기 위해 실험과 동일한 규격의 모델을 전산 수치해석 대상으로 고려하였다. 이 때, 확산기의 각도가 0도인 경우를 기본 모델로, 확산기 각도가 0도 대비 7.5도 변경된 경우를 비교 대상으로 설정하였다.

수치해석에 있어서는 상용 코드인 FLUENT (ANSYS, Inc.)를 사용하여 2차원 정상 유동해석을 수행하였으며 SST K- ω 난류 모델을 사용하였다.

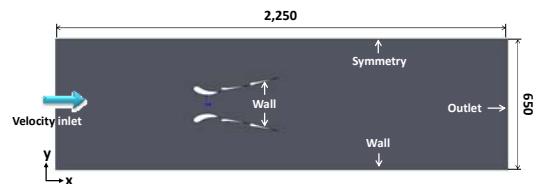


Figure 4. The definition of domain with boundary conditions

그림 4는 수치해석을 위한 경계조건을 보여주고 있으며, 유동 영역은 가로와 세로 각각 2,250 mm, 650 mm 로 확산기의 가속 성능 비교를 위해 실험 환경과 동일한 크기로 선정하였다. 전방에 유속

입구(velocity-inlet)조건, 후방에는 압력출구(pressure-outlet) 조건을 적용하였으며 덕트와 하부는 벽면(wall) 조건, 상부는 대칭(symmetry) 조건을 적용하여 실험 환경과 유사도를 갖도록 구성하였다. 이때, 입구 내 입사 유속 또한 0.6 m/s로 동일하게 설정하였다.

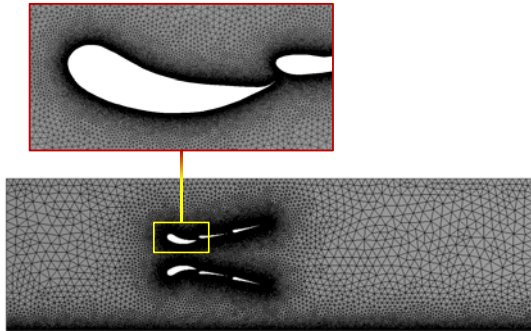
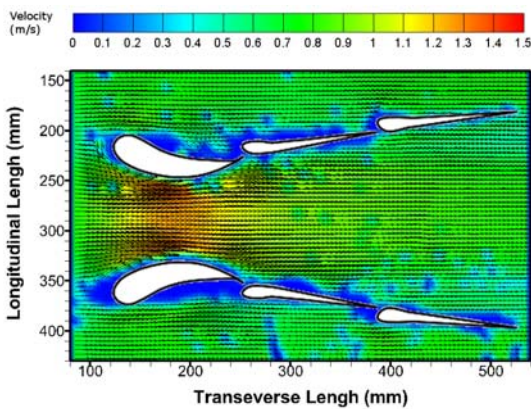


Figure 5. Grid around the multiple hydrofoil duct

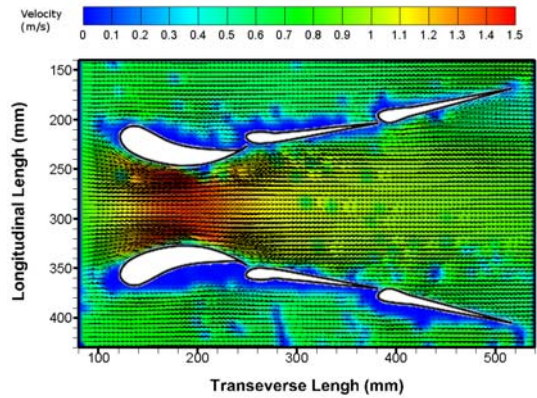
그림 5에는 수치해석을 수행하기 위한 격자를 나타내었다. 수치 해의 수렴성을 확인한 조밀한 격자로 구성하였으며, 이 때 총 격자 수는 446,074개이다.

3. 결과 및 토의

3.1 가시화 실험 결과



(a) diffuser angle 0°



(b) diffuser angle 7.5°

Figure 6. Flow fields in the multiple hydrofoil duct

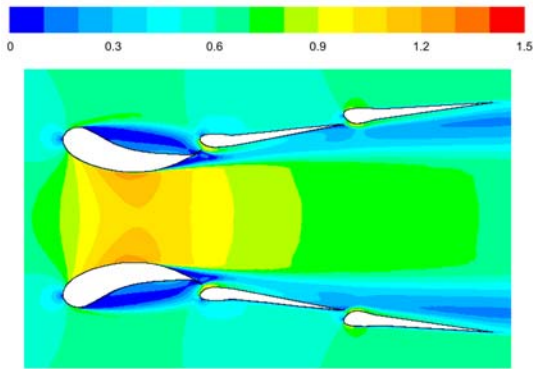
그림 6는 PIV를 이용하여 얻은 속도장 분석 결과를 보여준다. 유동의 흐름을 방해하지 않기 위해 레이저 굴절 장치와 조사 방향을 출구로 위치시켰으며, 이로 인해 수중익의 휘어짐 정도에 따라 부분적으로 유동장의 확인이 어려운 부분이 발생하였다. 그러나 레이저가 가려진 영역들의 경우 유체 확산에 크게 관여하는 위치는 아니므로 유동장을 분석하기 위한 주요한 부분이 아닌 것으로 판단된다.

덕트 내 최대 유속은 확산기 각도 0도의 경우 1.35 m/s이고 7.5도의 경우 1.52 m/s 인 것으로 확인되었다. 입사 유속 대비 증가율(rate of increase)은 0도의 경우 225%이고 7.5도의 경우 253%가 된다. 이 때의 레이놀즈 수(Reynolds number)는 2.41E5에서 2.71E5로서 난류영역에 해당된다. 특히 세 개의 각기 다른 수중익 중, 유체가 유입되는 입구 부근에 위치하고 곡률이 가장 큰 수중익 근처에서 최대 가속이 나타나는 경향을 확인할 수 있다.

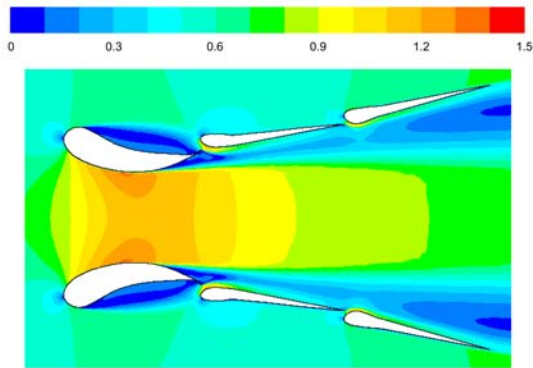
3.2 전산 수치해석 결과

그림 7은 수치해석 결과를 나타내며 덕트 내 최대 유속은 확산기 각도 0도의 경우 1.09 m/s이고 7.5도의 경우 1.17 m/s 인 것으로 확인되었다. 입사 유속 대비 증가율은 0도의 경우 182%이고 7.5도의

경우 195%가 된다. 유속이 증가되는 위치와 분포는 실험 결과와 유사하게 유속 유입부에 위치한 수중익 근처에서 나타났다. 또한 확산기의 각도가 증가된 경우 출구 쪽에 확산효과가 증가됨을 확인할 수 있다.



(a) diffuser angle 0°



(b) diffuser angle 7.5°

Figure 7. Velocity contour plots in the multiple hydrofoil diffuser (unit: m/s)

3.3. 실험과 수치해석 간 비교 및 토의

확산기 각도에 따른 유속 조절 효과를 상호비교하기 위해 표 1에 실험과 수치해석의 최대유속과 증가율을 나타내었다.

표 1의 결과에 의하면 실험과 수치해석 간 공간상의 조건이 다소 다르더라도, 동일한 입사 유속 조건에서 확산기 각도 증가에 따라 덕트 내 유속도 유사하게 증가됨을 확인할 수 있다.

Table 1. Comparison between experimental and numerical results

	Angle of the diffuser		Ratio by increase of diffuser angle
	0 degree	7.5 degree	
Maximum speed of the experiment (rate of increase)	1.35 m/s (225%)	1.52 m/s (253%)	1.52/1.35 (113 %)
Maximum speed of numerical analysis (rate of increase)	1.09 m/s (182%)	1.17 m/s (195%)	1.17/1.09 (107%)

따라서 실제 입사 유속이 감소되는 경우에 확산기 각도를 높이는 방향으로 대응함으로써, 덕트 내 일정한 유속으로 조절이 가능하게 된다. 이러한 덕트 내 유속 조절 기능을 이용하면 넓은 입사 유속 범위를 갖는 하천이나 해상 에서도 정격 용량에 근접하게 지속적으로 발전이 가능하게 된다⁽⁴⁾.

표 1의 실험결과와 수치해석 결과보다 다소 상회하는 수준으로 나왔다. 이는 실험의 경우 개수로 벽면에 기인하는 유체 집중(flow focusing) 효과에 의해 더 큰 증가율을 보이게 된 것으로 판단된다. 이러한 유체 집중 효과 현상은 난류 영역에서 보다 두드러지는 특성을 가지며, 수조 단면 형상에 따라 다르게 분포될 수 있다고 알려져 있다⁽¹⁰⁾.

지금까지 실험과 수치해석의 두 가지 방법을 통해, 확산기를 이용하면 덕트 내 유속을 조절할 수 있고, 확산기를 제어함으로써 유속 변동성에 대응할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 확산 방식의 다중 수중익 덕트 내부 유동을 실험적인 방법과 전산 수치해석 방법을 통하여 가시화하였다. 실험의 경우 덕트의 확산기 각도를 0도에서 7.5도로 변화시킴에 따라, 유입 유속 0.6 m/s 대비, 덕트 내 최대 유속은 1.35 m/s에서 1.52 m/s로 증가됨을 확인하였다. 전산 수치해석의 경우에도 0도의 경우 최대유속이 1.09 m/s이고 7.5도의 경우 최대유속 1.17 m/s로서 실험과 유사하게 확산기 각도 증가에 따른 덕트 내 유속 증가를 확인하였다. 따라서 다중 수중익으로 구성된

덕트를 이용함으로써 덕트 내 유속 조절이 가능하며, 이를 통해 유입 유속의 변동성에 대한 대응 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20163010071630)

또한 개수로 실험에 도움을 주신 한국해양과학기술원 장세철, 이상현, 그리고 이성봉님께 감사드립니다.

REFERENCE

- 1) Dincer, I., 2000, "Renewable Energy and Sustainable Development: A Crucial Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 4(2), pp.157-175.
- 2) Wüstenhagen, R., Wolsink, M., and Bürer, M. J., 2007, "Social Acceptance of Renewable Energy Innovation: An Introduction to the Concept," *Energy policy*, Vol. 35(5), pp.2683-2691.
- 3) Panwar, N., Kaushik, S., and Kothari, S., 2011, "Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15(3), pp.1513-1524.
- 4) Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M., and Quaiocoe, J., 2009, "Hydrokinetic Energy Conversion Systems and Assessment of Horizontal and Vertical Axis Turbines for River and Tidal Applications: A Technology Status Review," *Applied Energy*, Vol. 86(10), pp. 1823-1835.
- 5) Pelc, R., and Fujita, R. M., 2002, "Renewable Energy from the Ocean," *Marine Policy*, Vol. 26(6), pp.471-479.
- 6) Güney, M., and Kaygusuz, K., 2010, "Hydrokinetic Energy Conversion Systems: A Technology Status Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14(9), pp.2996-3004.
- 7) Rourke, F. O., Boyle, F., and Reynolds, A., 2010, "Marine Current Energy Devices: Current Status and Possible Future Applications in Ireland," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14(3), pp. 1026-1036.
- 8) Williams, A., 1996, "Pumps as Turbines for Low Cost Micro Hydro Power," *Renewable Energy*, Vol. 9(1), pp.1227-1234.
- 9) Paish, O., 2002, "Small Hydro Power: Technology and Current Status," *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 6(6), pp.537-556.
- 10) Cengel, Y. A., 2010, *Fluid Mechanics*, Tata McGraw-Hill Education.
- 11) Kirke, B., 2006, "Developments in Ducted Water Current Turbines," *Tidal paper*, Vol. (25-04).
- 12) Werle, M. J., and Presz, W. M., 2008, "Ducted Wind/Water Turbines and Propellers Revisited," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24(5), pp. 1146-1150.
- 13) Majumdar, B., Mohan, R., Singh, S., and Agrawal, D., 1998, "Experimental Study of Flow in a High Aspect Ratio 90 Deg Curved Diffuser," *Journal of fluids engineering*, Vol. 120(1), pp.83-89.