

제1장 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

국내 에너지 자원의 대외환경은 환경 오염에 대한 규제, 고유가에 따른 에너지시장의 수급불안, 세계 각국의 에너지자원 확보경쟁 심화 등의 문제로 갈수록 어려워지고 있다. 따라서 대안이 절실히 필요한 시점에서 신재생에너지의 한 분야인 수력은 국내의 자연적인 지역조건과 조화를 이루며, 부존 잠재량이 많고 특히 탄산가스를 배출하지 않는 청정에너지로서 범세계적인 환경오염 규제에 적극적으로 대비하여 지역의 분산전원에 기여할 수 있는 유용한 자원으로 평가되고 있으며, 이에 따른 국내 신재생에너지 기술개발현황은 Table. 1과 같다. ^[1]

1987년부터 대체에너지개발촉진법에 의거 정부주도로 소수력 기술개발에 관한 연구를 지원하여 주로 자원조사, 수차개발, 운용기술 등의 설계기술을 확보하고 국산화 기술개발을 추진하였다. 또한 1989년부터 소수력 자원조사, 2004년부터는 기존시설물을 활용한 소수력발전 지점조사를 실시하였다. 기술개발내용으로는 '99년까지 카프란수차 설계기술 및 국산화 개발, 튜블러 수차개발, 횡류형 수차개발을 하였으며 카프란수차 개발은 국산화율이 95% 이상이다. 수력분야에서 가장 핵심이 되는 것은 수차이며, 현재까지의 국산화율은 55% 수준에 머물러 있다. ^[2]

일본에서는 소수력발전에 대한 오랜 연구와 개발활동을 해 왔으며, 이미 다양한 형태의 소수력 발전을 활용하고 있다. 그 중에서도 도심 한가운데에서 수도관에 설치한 튜블러 수차는 구조적인 면에서나 실용성에서 돋보인다. Tsukamoto 등 ^[3]은 튜블러 수차의 날개 가변에 따른 실험을 통해 수차 성능에 대해서 연구하였다. 하지만 일반적인 설계법은

일부 알려져 있지만 상용화를 위한 상세설계 및 제작과 관련한 기준자료 등은 공개되지 않고 있다. Fig. 1.1에서는 일본 동경발전에서 건설하여 운용중인 애가사키 발전소의 수차 설치 현황을 보이고 있다. Fig. 1.2는 애가사키 발전소에 공급된 수차발전기의 제작사인 후지전기에서 공개한 수차발전기에 대한 설명 자료를 보이고 있다. 한편 국내에서는 튜블러 수차의 기본 개념을 참고로 5kW급 모형실험장치 실험을 수행하였으며, 수차의 기본적인 특성에 대한 연구를 수행하였다.^{[4]-[7]} 나아가 10m 이상의 낙차에서도 적용이 가능한 튜블러 수차의 설계를 위한 최적설계법을 제안하여, 이론적인 해석 및 CFD 해석과 실험을 통한 검토를 통하여 설계법의 신뢰성을 확보할 수 있는 계기를 마련하였다.^[8]

Fig. 1.3에서는 먼저 수행한 실험을 통해서 수차의 성능을 예측하기 위한 모델장치 구성도를 보이고 있다. 또한 발전설비의 구성은 실증 시험용 수차발전기와는 달리 발전기를 수차의 아래쪽에 위치하도록 구성하여 고찰하였다. Fig. 1.4에서는 튜블러 수차 러너베인의 특징을 고려한 설계치와 CFD 분석 결과가 거의 일치함을 보이고 있다.

현재까지 튜블러 수차 상용화를 위한 기술개발은 CFD 및 모델실험, 수차설계를 위한 기본자료 확보의 단계까지 진행되었으며 실질적인 현장설치나 운용까지는 실행하지 못하고 있다.

No.	과 제 명	주관기관	총사업기간
1	저낙차용 수차개발	한국생산기술연구원	'91.04~'92.12
2	카플란수차 설계기술 및 국산화 개발 연구	한국에너지기술연구원	'96.12~'99.12
4	중·저낙차 프란시스수차 국산화 개발	대양전기	'02.06~'05.05
5	소수력발전시스템 무인화설비 및 계통병입 안전장치 개발	대양전기	'03.07~'06.06
6	환경친화적 소수력자원 조사 및 활용기술개발	한국에너지기술연구원	'04.06~'06.05
7	소수력 수차 축변위 추적식 수차 봉수장치(Mechanical Seal) 개발	대양산업	'04.12~'06.12
8	프란시스수차의 실증연구	한국에너지기술연구원	'05.08~'07.12
9	팩키지형 50kW급 소형 수차발전시스템 개발	효성에바라(주)	'06.08~'09.07
10	수도관 차압을 이용한 마이크로 소수력 발전 실용화 기술개발	(주)신한정공	'06.08~'09.07

Table. 1 신재생에너지기술개발사업 소수력분야 기술개발현황
(‘06년 신규과제까지 포함)



Fig. 1.1 Agasaki hydropower generation used tubular turbine in Japan.

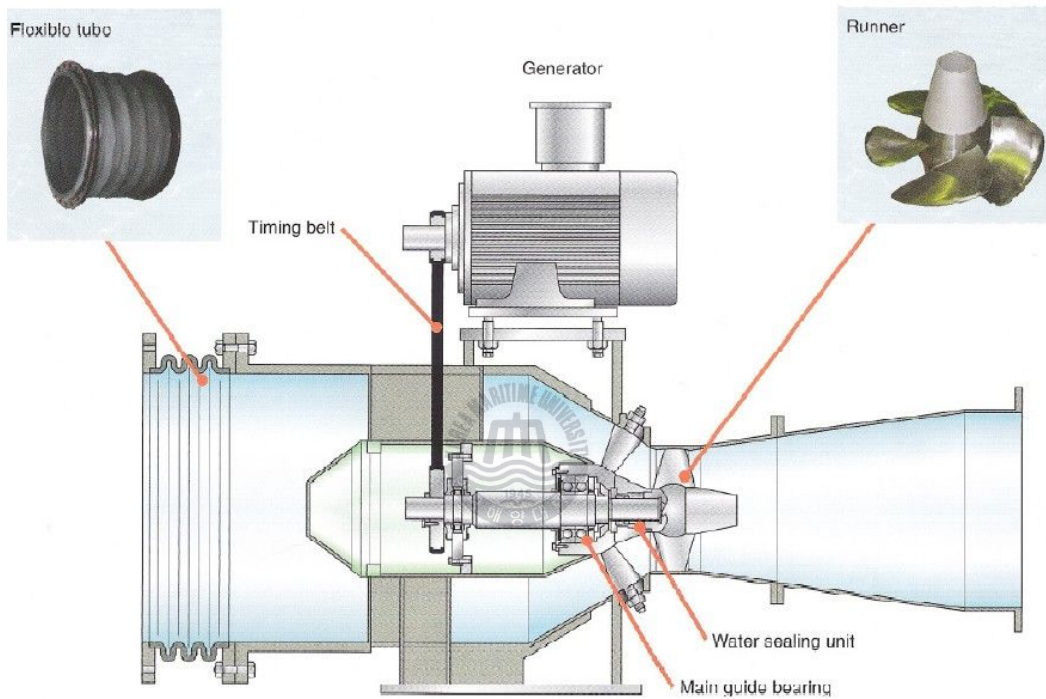


Fig. 1.2 Tubular hydraulic turbine by Fuji electric.

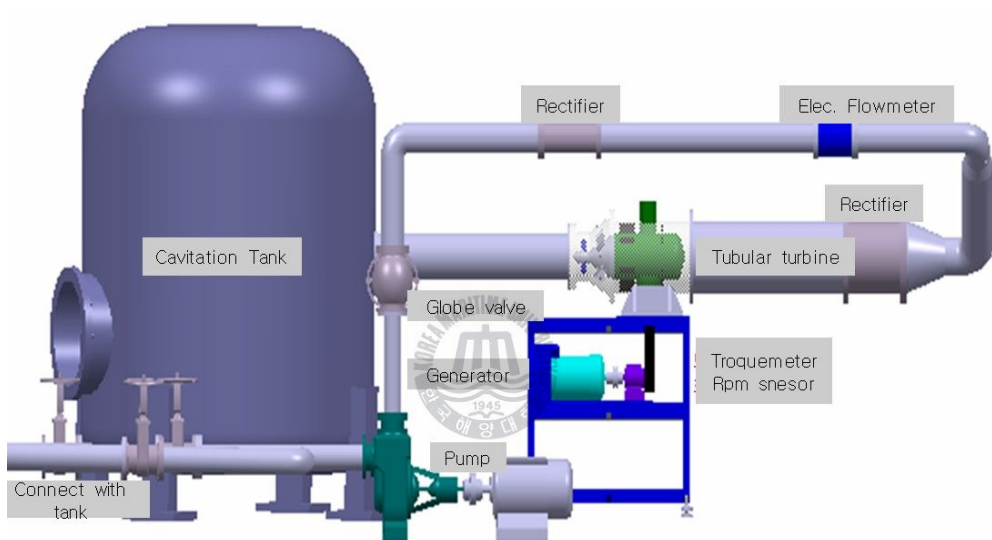


Fig. 1.3 Schematic view of experimental apparatus for tubular turbine model

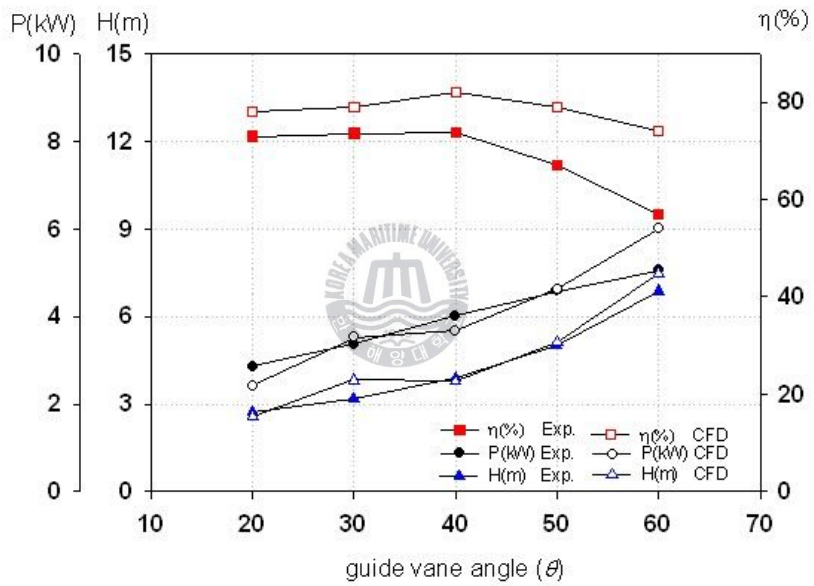


Fig. 1.4 Performance characteristic curves by model test

1.2 연구목적

기존에 개발되었거나 사용 중인 소수력발전용 수차는 유량조절 기능이 없어 낙차와 유량변화가 없는 지점에 적용되었으며, 기초 토목이나 건설공사에 많은 초기투자가 필요로 하였다. 그러나 배관 내 압력의 차이를 이용한 소수력용 튜블러 수차는 배관에서 이송에 사용되고 남은 압력의 감압을 위하여 사용되어진 감압밸브의 기능을 수행함과 동시에 감압밸브에 의해 폐기되었던 압력을 이용해서 수차발전기의 기능을 수행하도록 하였다. 이는 소수력 자원의 미활용에 대한 연구 및 제한적인 보급에 대하여 그 적용성을 확대하는 큰 의미가 있다.^{[9]-[11]} 이러한 수차의 특성을 실용화하기 위하여 본 논문에서는 튜블러 수차에 의한 감압기능 수행 및 에너지 재생산 기능에 대한 수차의 실증을 위한 설계 및 시험에 주안점을 두었다. 또한 본 연구에서는 Fig. 1.5에 나타낸 바와 같이 튜블러 수차를 설치하고자 하는 지점의 조건을 반영한 수차 설계를 통해서 최적설계법을 제안하고, 그 설계법에 따라서 제작된 수차의 성능을 현장 실증 시험을 통하여 상세하게 검증하는데 그 목적이 있다. 실제로 상업화와 더불어 실제 사용하게 될 지점의 입지 조건을 감안하여 시험을 하였으며, 더하여 유량조건과 유효낙차 조건을 고려한 수차 설치의 다양성을 검토하고, 동일 지점상에 2대의 수차를 직렬로 설치하게 될 경우 수차발전기의 운전특성을 실측하여 향후 상업화에 따른 적정성을 검토하도록 한다.

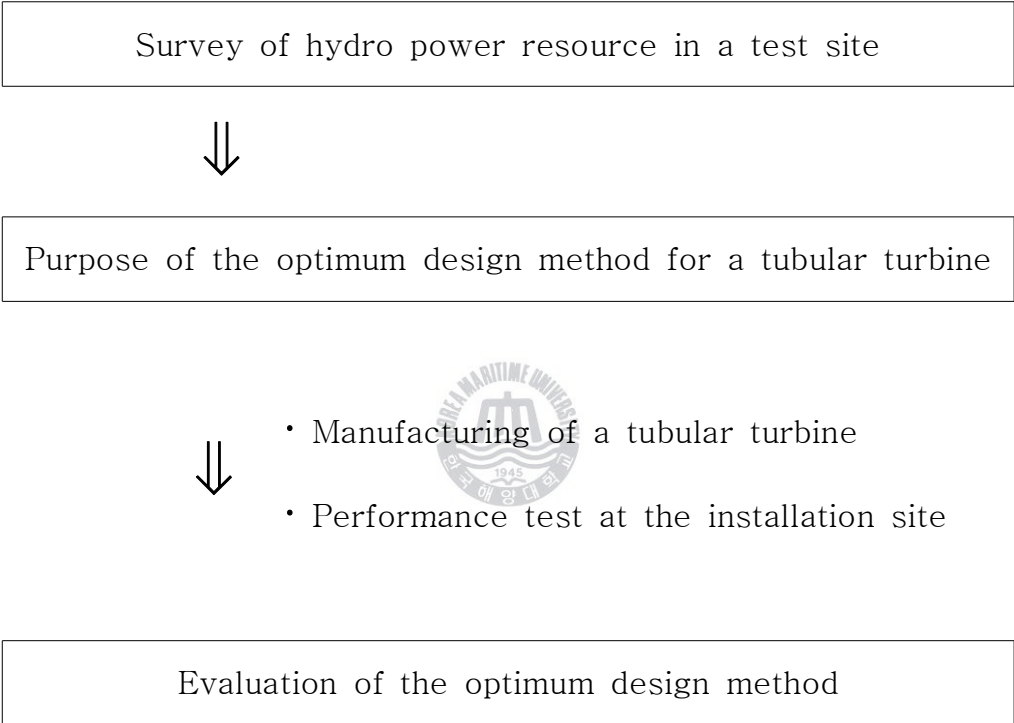


Fig. 1.5 Purpose of present study

제2장 수차 성능시험법

2.1 실증시험용 수차의 설치

본 연구에 앞서 이미 진행된 연구 결과 보고 자료에 의하면 사용한 공장 성능시험라인은 펌프시험설비와 유사한 구성을 가지며 수차의 운전 특성을 한눈에 볼 수 있도록 구성하였으며, 기본적으로 확보 가능한 자료는 운전 중인 수차의 회전수, 토크, 실제출력과 이론출력, 배관내 압력, 기동 펌프의 부하, 수차의 전·후단부 압력차(차압), 발전기의 Voltage 및 주파수 등이다. 하지만 실제로 설치 및 운영하게 될 현장 조건에서는 회전수, 실제출력, 이론출력, 배관내 압력, 발전기의 voltage, 주파수 등이다. 공장 성능시험설비에서 취합한 기초자료를 근거로 실제 상업화를 위한 현장 성능시험 설비의 설계 및 제작에 사용할 수 있다. 본 시험설비 구축에는 러너베인의 개도 변경에 따른 유량, 압력 변화 및 토크량의 변화, 회전수 변화등에 대한 공장시험 기초 자료를 확보하여 정수장내 설치 할 수차의 정격 사용조건 결정에 사용하였다. 그리고 수차 및 펌프 수차의 모형 시험 방법(KS B 6018)에 의한 수차 모형 시험 설비의 구축에 있어서 튜블러 수차의 경우 프로펠러형 수차와 유사한 형식을 가지므로 프로펠러형 수차의 시험에 적용해야 할 사항을 고려하면 다음과 같다.

- 프로펠러형 수차 모형의 대표치수는 러너 출구 지름을 말하며 실제 치수는 350mm이상의 크기를 따른다.
- 수차효율시험에 있어서 측정해야 할 항목은 유효낙차, 유량, 회전속도(무구속 속도 포함), 수차출력, 수차 효율 등이다.
- 측정기기의 교정 : 시험에 사용하는 측정기기는 시험 전에 교정의

범위에 대해서 교정을 실시하여야 한다.

- 시험 장치는 상·하부탱크, 수압관, 양수량 조절밸브, 유효낙차 (혹은 전체양정) 측정 장치, 회전속도 측정 장치, 출력(또는 입력) 측정 장치 및 유량(또는 양수량) 측정 장치를 갖춘 것이어야 한다.

본 실험에서는 Fig. 2.1에 보이는 바와 같이 정수장의 운영조건을 감안하여 기존에 사용하고 있는 전동밸브, 초음파 유량계, 압력계등을 이용하였으며, 바이패스 관로를 기준으로 하여 착수정 전단으로 토출이 되도록 구성하였다.

2.1.1 배관의 구성

수도배관용 압력강관을 이용하여 수차발전기와 기존의 바이패스 라인을 연결하였으며 수차발전기의 전단에 유지보수용 수동밸브를 설치하였다. 또한 지하매설을 통한 배관의 연결로 구성된 수도관로의 보호 및 수차의 진동등에 대비하여 수차의 전단에 플렉시블 주름관을 삽입하였다. 배관은 기존의 수도강관용 도복강관을 이용하기 힘들므로 아연도금 강관을 사용하였으며, 배관 손실을 감안하여 수차를 설치하였다.

2.1.2 수차의 설치

정수장의 경우 일반 실험실의 펌프를 이용한 운용과는 달리 수차발전기의 러너베인 개도를 줄여서 감압기능을 크게 작용시키게 되면 댐에서 착수정 전단간의 배관내부의 압력이 상승하여 전체 배관에 손상을 입힐 우려가 있으므로 반드시 By-pass 관로상에 설치하여야 하며, 비상정지를 시키는 경우가 없도록 주의를 필요로 한다. 따라서 본 실험에서는 착수정 전단의 By-pass 배관 차단용 전동밸브를 이용하여 수차의 운전을 제어할 수 있도록 지상 전동밸브 조절장치 제어 가능 범위에서 수차

발전기의 위치를 결정하였다. 또한 운전시 발생하게 되는 수차발전기의 진동을 줄이기 위하여 Base frame 하단부에 방진패드를 설치하였다.

튜브러 수차의 경우 동일유량에 유효수두를 두 대의 수차에 나누어 적용시키기 위해서 직렬로 설치 할 수 있다. 따라서 수차발전기 1대일 경우 러너의 개도, 유량, 압력, 부하등의 유효인자에 대한 특성을 파악하고, 동일조건에서 2대의 수차발전기를 설치하여 운전특성을 파악하기 위한 구조를 적용하였다. 그리고 전단과 후단부의 압력값을 측정하기 위해서 Fig. 2.2와 Fig. 2.3에 보이는 바와 같이 1대일 경우의 압력측정 및 설치 형상, 2대 직렬연결 실험을 할 경우의 압력측정 및 설치 형상을 보이고 있다. 정수장의 운영여건상 계절에 따라서 댐의 수위는 20m 이상의 차이를 보이기도 한다. 이러한 경우에 수차 전단에서 측정되는 압력 또한 약 2kg/m^3 의 차이를 보이게 되므로 수차발전기의 운영이 불가능하게 된다. 이 경우에는 2대의 수차를 직렬로 연결하여 압력을 분산하여 운영이 가능하다.



2.2 계측기기의 선정

모든 계측기기는 제작 및 시험 검사를 통과한 제품으로서, 그 성적서를 포함하고 있는 기기를 선정하였다. 또한 측정에 사용하는 기기는 시험에 앞서 수차의 운전 범위에 대하여 교정을 실시하였다.

2.2.1 압력계

수차의 효율 및 이론 발전량 계산을 위해서 Fig. 2.4에 보이는 바와 같이 4~20mA 출력이 가능하며 신뢰성 0.02%의 압력계 선정하였으며, 기본적인 측정 위치는 Fig. 2.2에 보이는 바와 같이 수차의 입구측, 수차 본체, 출구측 3개소에서 동시에 측정이 가능하도록 구성하였으며, 또한 러너베인의 특성을 파악하기 위하여 러너베인의 회전부에 압력측정 지점을 5개소 이상 지정하여 수차 구동시 러너베인 끝단부의 압력을 측정할 수 있도록 구성하였다. 또한 측정위치의 이동이 가능하도록 다수의 위치에 이동 부착이 가능하도록 하였다.

2.2.2 회전수 측정센서

회전수 측정은 Fig. 2.5에서 보이는 바와 같이 일반적이고 정밀도가 좋은 근접센스를 사용하였으며, 신뢰도는 0.2%의 허용오차를 가지는 제품을 사용하였다. 또한 4~20mA의 출력이 가능하여 제어측에서 데이터의 취합이 가능하도록 하였다.

2.3 제어시스템의 구성

본 시험설비의 구성은 측정기와 수차를 동시에 제어하면서 효율적인 시험이 가능하도록 휴대용 노트북에서 제어가 가능하도록 하였다. 모든 출력 데이터는 모니터 상에서 그 값을 확인할 수 있도록 별도의 확인 화면을 가지도록 하였다. 전체적인 시험 Loop에 근거하여 구성된 제어 시스템은 Fig. 2.6에 보이는 바와 같으며, 모든 데이터의 취합 및 러너 베인 각도의 조절이 가능하다. 또한 상업 발전시 사용될 정 출력 제어의 기능을 가지고 있다. 그리고 수차 1대 설치 운전 및 2대 직렬설치 운전을 위해서 2대의 수차를 동시 및 개별 제어가 가능하도록 구성하였다. 수차의 정출력 제어시 러너베인 각도 조절의 허용치는 0.5kW 범위 내에서 이루어지도록 구성하였으며, 러너베인 각도는 0.1도 범위에서 이루어지도록 구성하였다.



2.4 출력시스템의 구성

실제 출력을 측정하는 방법으로는 다이내모미터를 이용할 수 있으나 가격이 고가인 단점이 있으며, 일반적인 시험값의 측정은 토크메타를 이용한 측정이 가능하나, 이때에는 계산에 의한 출력만을 얻을 수 있다. 또한 실증 시험의 경우 실험실에서 수행하는 시험과 그 성질이 다르므로 토크메타를 적용할 수 없다. 더군다나 국내의 여건상 실증 시험 시 전력계통에 연결하여 시험을 진행할 수 없으므로 발전량에 비례하여 소모할 수 있는 장치를 구성하였다. 발생전력을 소모할 수 있는 고성능 히터코일을 Panel 기기장치 뒤편에 설치하고 아래쪽에 팬을 장착하여 장시간 사용하여도 저항값이 증가하지 않도록 구성하였으며, 각각의 히터는 모두 3상의 저항값을 측정하여 허용치 3% 이내에서 적용이 되도록 하였다. 발전부하장치는 1kW 단위로 조절이 가능하고 최저 1kW에서 최대 63kW까지의 발생 전력량과 볼트, 주파수 값을 보여준다.

또한 전력량, 볼트, 주파수 값을 Control panel로 전송하여 데이터 로깅이 가능하도록 하였다. 제작 완료된 형상은 Fig. 2.7에서 보이고 있으며 운전 중에도 부하의 양을 조절할 수 있으므로 시험에 효율적이다.

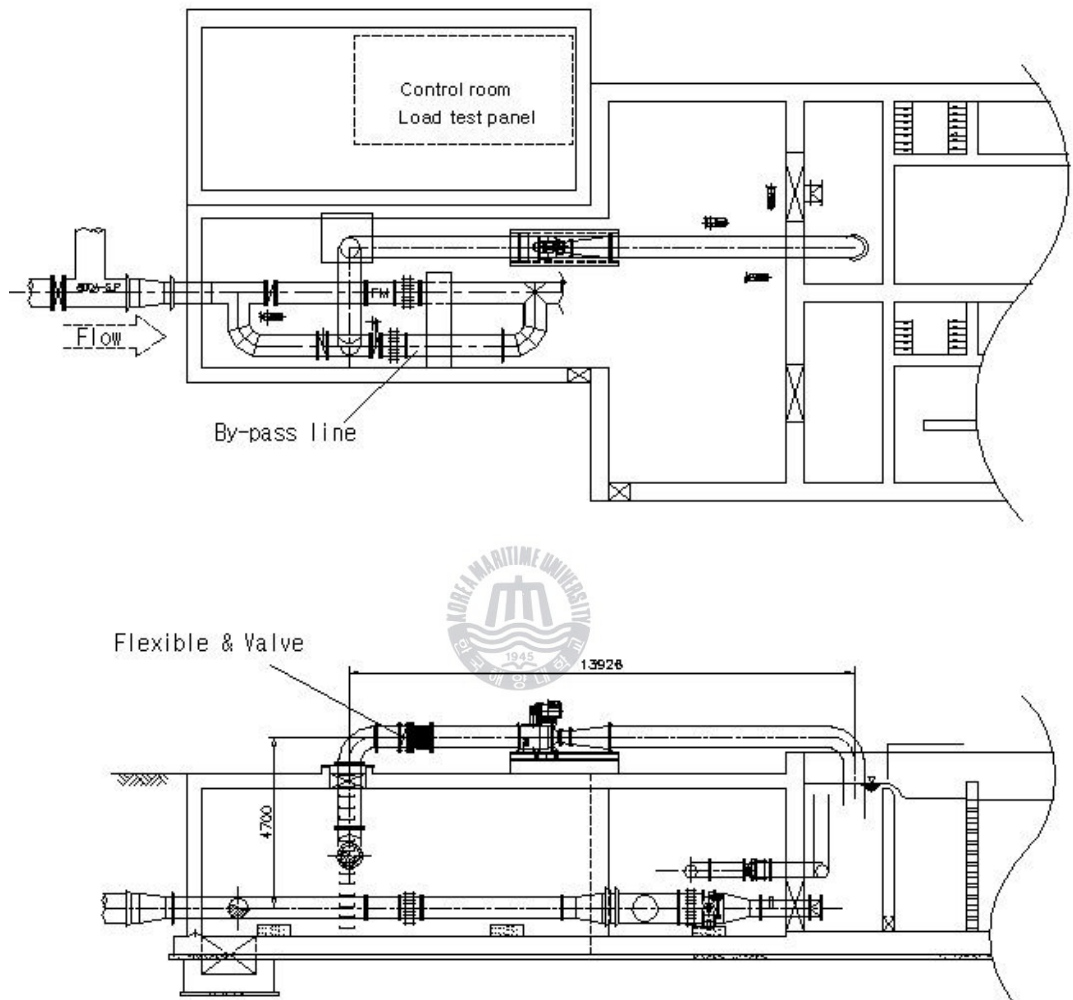


Fig. 2.1 Schematic view of experimental apparatus for site test

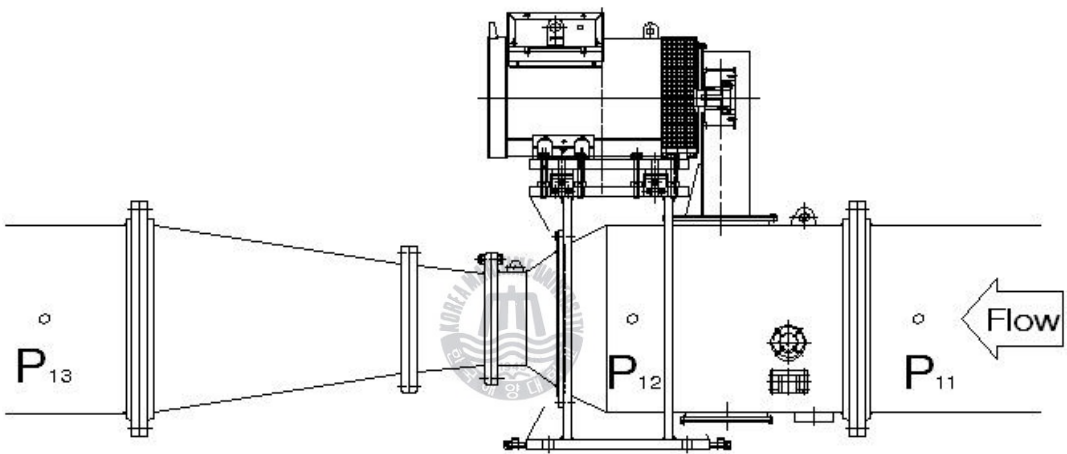


Fig. 2.2 Schematic view of one tubular turbine arrangement for test site experiment

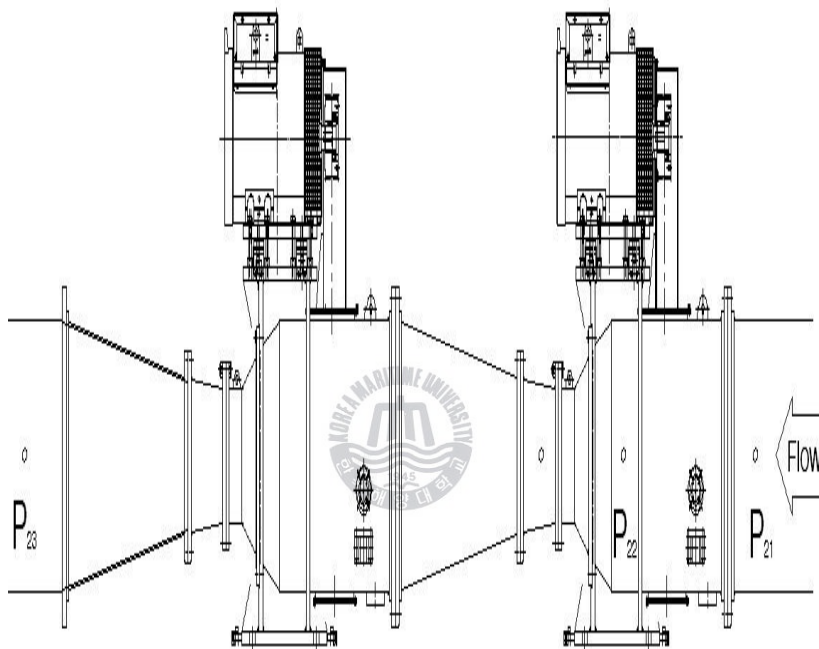


Fig. 2.3 Schematic view of two tubular turbine parallel arrangement for test site experiment



Fig. 2.4 Pressure gauge



Fig. 2.5 Rotation speed meter

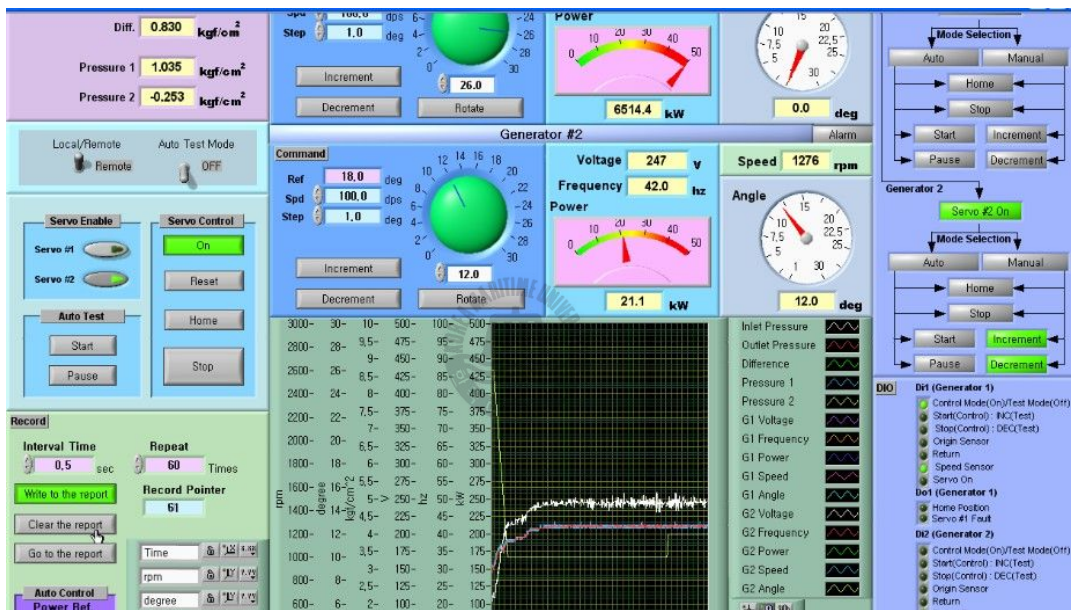


Fig. 2.6 Control System

2



Fig. 2.7 Load test panel

제 3 장 최적설계법 확립

3.1 수차의 설계

일반적으로 소수력 발전소를 건설함에 있어서 수차발전기를 설치하기 위해서는 수차에 대한 사양을 먼저 결정하고 난 이후에 발전가능 지점을 선정하는 것이 아니라 설치하고자 하는 지역을 선정한 후, 그 지역의 유량, 수두 등의 유효발전 인자를 검토한 뒤 최적의 효율을 가지는 수차를 선정한다.

그러나 튜블러 수차의 경우 러너의 개도 변경으로 일정한 범위 조건에서는 동일한 효율특성으로 설치 지점의 변경된 조건을 만족시킬 수 있는 장점이 있다. 배관 상에 설치될 튜블러 수차는 구조적으로 기존에 존재하는 파이프라인의 특정 구간에 바이패스 라인을 설치하여 수차발전기를 설치하는 구조를 취한다. 따라서 특정지점에 설치하고자 할 경우 그 지점에 적합한 튜블러 수차를 설계하는 방법은 아래의 순서를 따르는 것이 합리적이다.

1) 설치지점의 조건 확인

유효낙차(H), 유량(Q)조건을 근거로 한 수차의 형식 선정을 의미하며, 이를 근거로 하여 비속도, 효율을 산정한 뒤 수차의 형식을 선정한다. Fig. 3.1에서는 일반적으로 수차를 선정하는 조건을 보이고 있으며, Fig. 3.2는 소수력용 튜블러 수차발전기의 일반적인 설치 범위를 나타내고 있다.

2) 튜블러 수차의 형식에 적합한 조건이 확인 되었다면, 낙차(H) 범위를 확인한다

3) 낙차에 따라서 Blade 수를 결정

프로펠러 수차의 경우 $H > 10\text{m}$ 일 경우에는 5매, $H < 10\text{m}$ 일 경우에는 Blade 수를 4매로 결정하도록 되어 있으나, 러너 가변형의 경우 회전 시 제약조건을 감안하여 러너의 매수는 4매 이내로 제한하는 것이 효율적이다.

4) 수차의 스펙트럼(D_4), 단위회전수(n_{11}) 결정

단위회전수(n_{11})는 140 ~ 160rpm이내의 범위에서 결정되어야 하며, 단위유량(Q_{11})은 러너의 개도 20도 이상에서 결정되도록 한다.

5) 러너의 공칭외경(D_1)과 수차의 회전수(n) 결정

6) 설치지점의 배관규격 및 위의 계산식에 근거하여 수차의 케이싱, 가이드베인, 구동조건등의 변수를 결정한다.

본 연구에서 적용한 수차의 기본 구조는 Fig. 3.3에 보이고 있으며, 수차발전기의 주요 기능인 러너의 개도 변경은 Worm Gear에 직결된 Servo Motor를 이용하여 구동한다. 구동원리는 Servo Motor가 Worm Shaft를 회전시키면 Worm Wheel이 Slide Tap을 전·후진시켜 Runner에 장착된 Link에 의해 Runner가 회전하는 방식이다. 러너 개도변경에 관한 구조는 Fig. 3.4에서 보이는 형식을 취한다. Runner의 개도변경은 구동 Servo의 지령에 의해 변경되며, 지령 값은 유량, 회전속도 및 입구와 출구의 차압, 출력 값에 의하여 결정된다. 수차 러너의 각도를 서보모터의 구동을 통하여 자동으로 조절하는 기능을 가진다는 것은 수차가 최적의 효율에서 구동할 수 있도록 한다는 것이지 출력을 높이는 것과는 의미가 다르다. 본 실험에서는 공장 시험을 통해서 서보의 지령 값을 결정하였으며, 러너베인의 최적효율 개도를 확인하였다. 러너의 형상을 포함한 수차에 대한 설계 표준에 대한 연구는 이미 국외의 연구자들^{[12]-[15]}에 의하여 많은 부분에 대한 성능검증이 이루어진 상태이다

3.2 최적설계법

3.2.1 공장 시험용 터빈의 설계

본 연구에서는 주어진 유량과 낙차조건을 만족하는 수차의 설계를 통하여 수차발전기를 제작하고, 시험을 통하여 설계 및 상업화의 적정성을 확인하고자 한다. 또한 유량과 낙차조건에 따른 튜블러 수차의 적용성에 대하여 시험을 통해서 입증하도록 한다. 먼저 수차의 설계를 통한 실물수차의 제작 및 제어를 위해서는 수차발전기의 러너베인을 움직일 수 있는 기본 데이터가 필요하다. 이를 위해서 기존에 진행되었던 공장 시험용 수차발전기의 설계, 제작, 운용의 기본요소를 바탕으로 실증시험 장소인 정수장의 정격요건을 적용 한 뒤, 정수장내 시험용 수차의 상세 설계를 진행하였다.



먼저 공장 시험을 위한 수차 설계하는 과정은 다음과 같다.

H =유효수두, Q =유량, Q_{des} =이론유량, D_1 =러너공칭외경, D_4 = 스토틀경, n =회전수, n_d =임계회전수, n_{11} =단위회전수, Q_{11} =단위유량, η =효율, P =출력으로 정의한다.

시험을 위한 배관 유량 : $Q=0.215m^3/s$

시험을 위한 배관 유효수두 : $H=15m$ 로 결정한다.

이 조건을 근거로 하여 수차발전기의 설계를 아래와 같이 수행하였다.

$$Q=0.215m^3/s, \quad H=15m$$

$$Q_{des} = 225.75l/s \text{ (이론유량 = 유량} \times 1.05)$$

$$n_{11} = 140rpm, Q_{11} = 830l/s$$

$$D_4 = \sqrt{\frac{225}{830 \times \sqrt{15}}} = 0.233m$$

$$D_1 = 0.240m$$

$$D_{4P} = 0.23568m$$

$$n = n_{11} \times \frac{\sqrt{H}}{D_{4P}} = 140 \times \frac{\sqrt{15}}{0.23568} = 2300rpm$$

$$n_d = 2300 \times 2.3 = 5290rpm$$

$$\eta = 0.74$$

$$P_T = 9.8 \times 0.215 \times 15 \times 0.74 = 23.3kW$$

비교회전도를 통한 검증

$$n_s = \frac{nP^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{2300 \times 23.3^{\frac{1}{2}}}{15^{\frac{5}{4}}} = 376[rpm, kW, m]$$

이상의 계산을 토대로 수차의 외경은 240mm, 수차의 회전수는 2300rpm, 비교회전도는 376 rpm으로 결정되었다.

3.2.2 실증시험용 터빈의 설계

공장 시험용 터빈의 설계 및 계산에 더하여 실제 정수장의 착수정 전단에 설치할 수차의 설계를 아래와 같이 진행하였다.

1) 실측을 통한 설치 지점의 설계 유량 및 유효수두

$$Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}, \quad H = 12.28 \text{ m}$$

$$Q_{des} = 315 \text{ l/s}$$

2) 러너의 크기 결정

$$n_{11} = 150 \text{ rpm}, \quad Q_{11} = 1190 \text{ l/s}$$

$$D_4 = \sqrt{\frac{315}{1190 \times \sqrt{12.28}}} = 0.2748 \text{ m}$$

$$D_1 = 0.280 \text{ m}$$

$$D_{4P} = 0.275 \text{ m}$$

3) 러너의 회전수 결정

$$n = n_{11} \times \frac{\sqrt{H}}{D_{4P}} = 150 \times \frac{\sqrt{12.28}}{0.275} \approx 1911 \text{ rpm}$$



4) 예상출력

$$\text{수차효율 } \eta_t = 0.8,$$

$$P = 9.8 \times 0.3 \times 12.28 \times 0.8 = 28.9 \text{ kW}$$

5) 발전기 사양

발전기는 수차의 회전수를 감안하여 정격이 1800 rpm 인 4극 유도 발전기로 선정하고 통상적인 보증 효율인 91%를 발전기 효율로 결정하였다. 또한 이는 발전기 제작사에서 보증하고 있는 값이기도 하다.

6) 종합발전량 계산

$$\eta = \eta_t \times \eta_g = 0.8 \times 0.91 = 0.728$$

$$P = 9.8 \times Q \times H \times \eta = 9.8 \times 0.3 \times 12.28 \times 0.728 = 26.2kW$$

7) 수차의 토크

$$T_T = \frac{P_T \times 10^3 \times 60}{n_T \times 2\pi \times 9.8} = \frac{28.9 \times 10^3 \times 60}{1911 \times 2\pi \times 9.8} = 14.736kgf-m$$

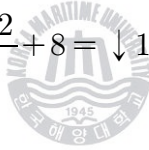
8) 베어링 부의 반력 계산

$$\Sigma M_A = (R_B - 8) \times 152.5 + 12 \times 274 + 131.12 \times 284.5 = 0$$

$$R_B = \frac{12 \times 274}{152.5} + \frac{131.12 \times 284.5}{152.5} - 8 = \uparrow 258.2kgf$$

$$\Sigma M_B = -(R_A - 8) \times 152.5 + 12 \times 426.5 + 131.12 \times 132 = 0$$

$$R_A = \frac{426.5 \times 12}{152.5} + \frac{131.12 \times 132}{152.5} + 8 = \downarrow 155.1kgf$$



9) 러너베인 조작 너트의 마찰토크 : T_{\max}

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{F_{\max} \times d(\cos 15^\circ \times \tan \alpha + \mu)}{2000(\cos 15^\circ - \mu \times \tan \alpha)} \\ &= \frac{625 \times 28.5(0.966 \times 0.0335 + 0.2)}{2000(0.966 - 0.2 \times 0.0335)} = 2.16kgf-m \end{aligned}$$

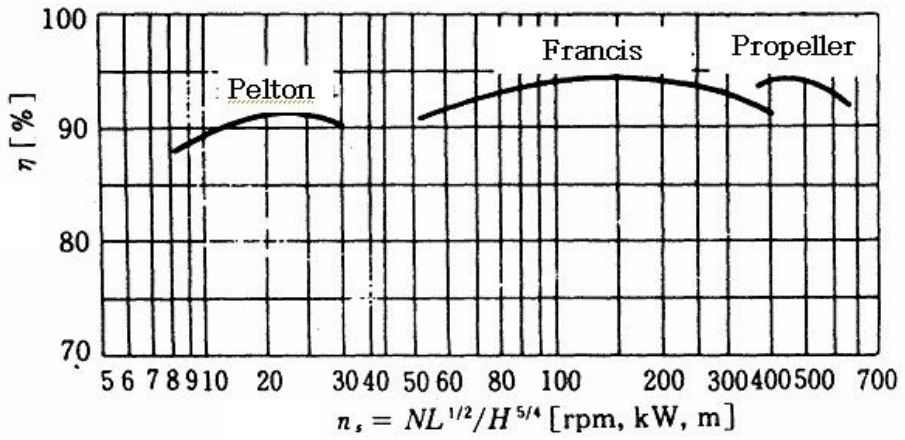
10) 러너베인 조작용 워ムの 마찰 토크

$$\begin{aligned} T_W &= \frac{T_{\max}}{0.06} \times \frac{1}{\cos 3.683} \times 0.0155 \times \mu \\ &= \frac{2.16}{0.06} \times \frac{1}{0.9979} \times 0.0155 \times 0.2 = 0.112kgf-m \end{aligned}$$

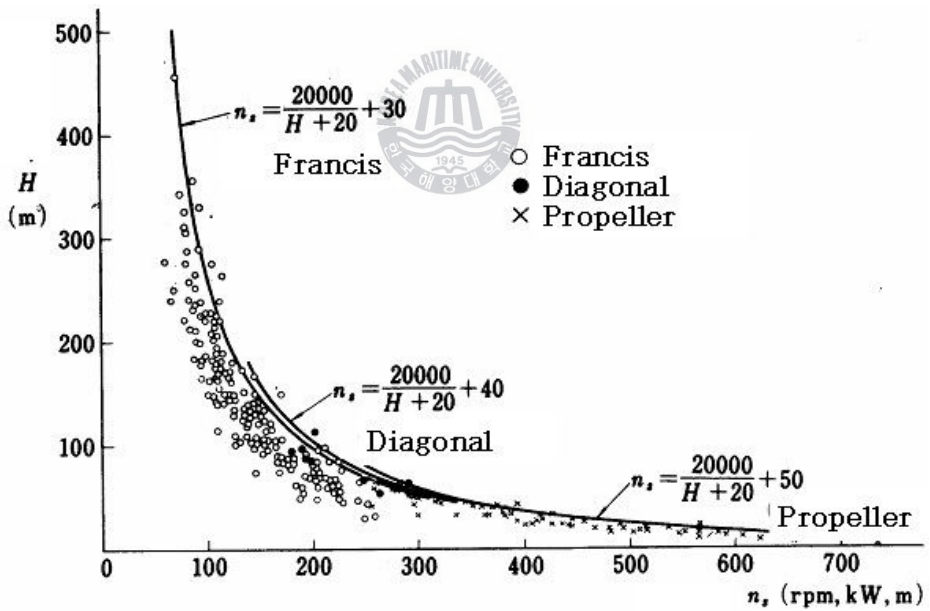
이상의 계산을 근거로 $Q=0.3m^3/s$, $H=12.28m$ 조건에서의 수차의 제작사양은 러너의 외경은 280mm, 수차발전기의 정격회전수는 1800 rpm으로 결정되었으며, Fig. 3.5에 제작 완료된 형상을 보이고 있다.

Fig. 3.6에서는 동일한 수차를 2대 직렬로 설치 완료한 형상을 보이고 있으며, 정수장의 운영조건에 비추어 추가로 시험이 가능하다.





(a)



(b)

Fig. 3.1 Table for characteristics of turbine

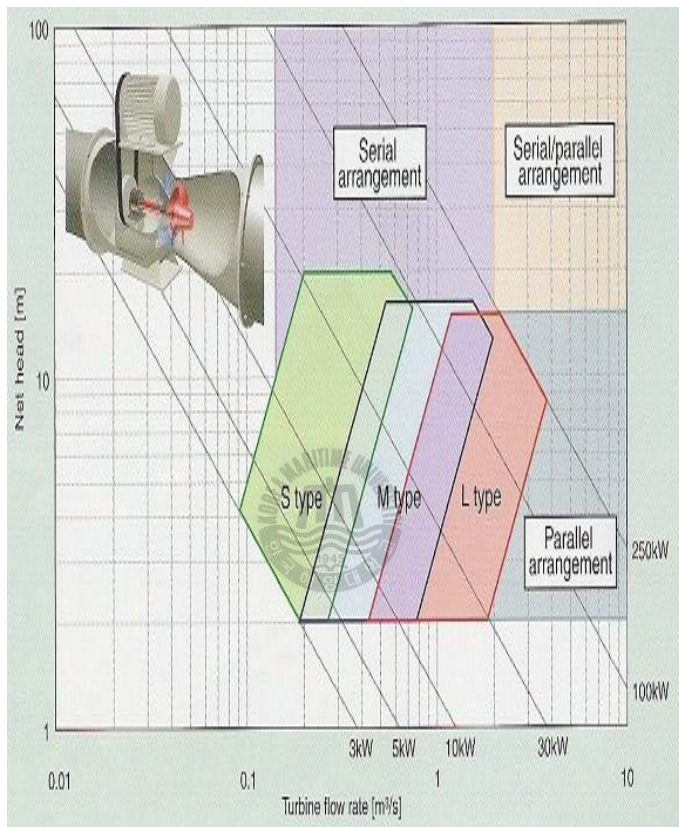
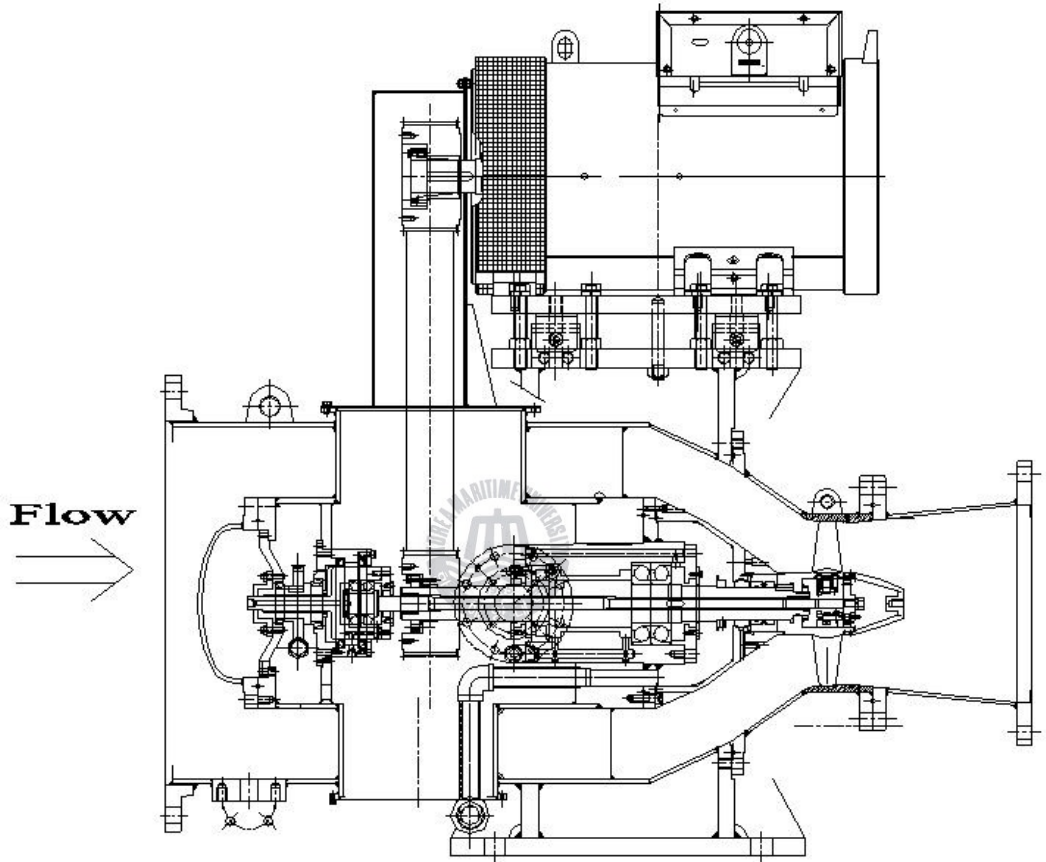
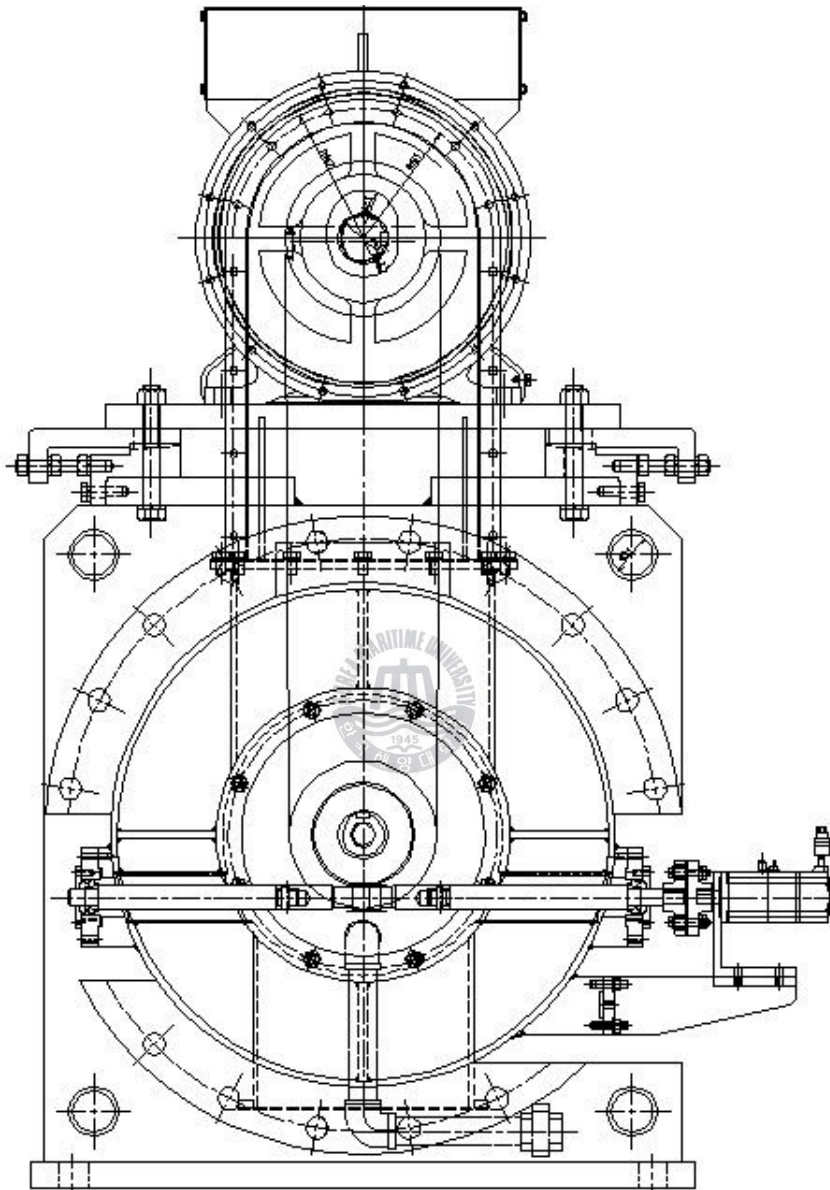


Fig. 3.2 Installation range by effective head and flowrate. (Fuji electric-japan)



(a) Front sectional view

Fig. 3.3 Drawing of test tubular turbine (continued)



(b) Cross sectional view

Fig. 3.3 Drawing of test tubular turbine

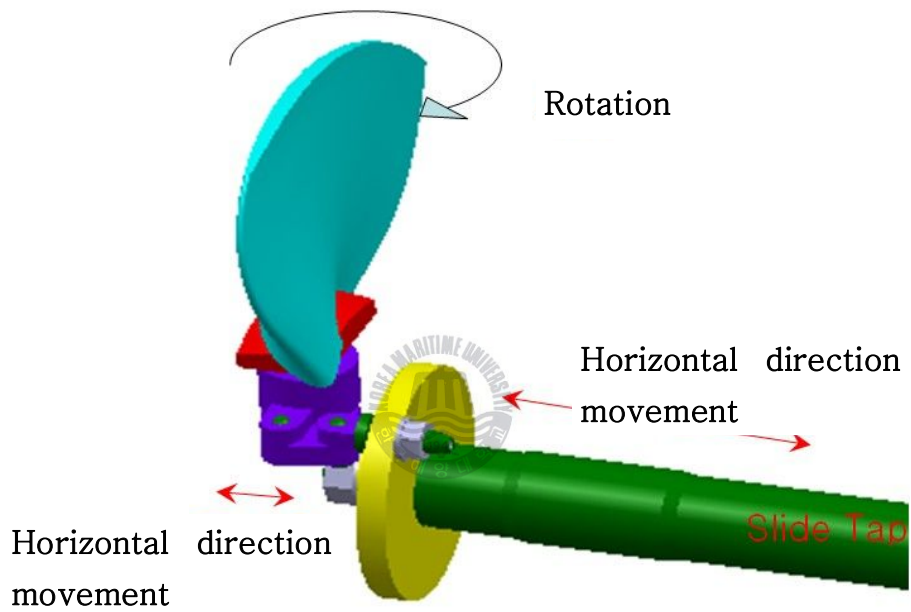


Fig. 3.4 Conceptual view of runner vane control system



Fig. 3.5 Manufactured tubular turbine for site test



Fig. 3.6 View of two tubular turbine parallel arrangement for site test

제4장 성능특성

4.1 압력 분포특성

수차의 효율에 직접적인 영향을 가진 압력의 측정을 위하여 Fig. 2.2에서의 실험장비 구성을 통하여 실증시험을 수행하였으며, 수차 1대 설치시의 성능특성 곡선을 구하였다. 곡선은 계통연결의 기능을 대체하여 유도발전기에 30kW 부하를 적용하여 러너 베인의 각도를 10도에서 18도까지 변경하면서 유량의 유입 측으로부터 수차의 러너를 지나고 난 후 출구측 까지를 3단계로 구분하여 P_{11} , P_{12} , P_{13} 지점의 압력을 측정하였다. 표에서는 러너 베인의 각도가 커질수록 현저한 회전수의 저하와 압력의 저하가 발생함을 보이고 있다. 또한 출구 측에서는 방수구보다 위쪽에 설치한 수차의 특성상 측정지점의 압력이 대기압보다 낮은 현상을 보이고 있다.



4.2 무구속 성능특성

수차 러너베인의 개도를 일정하게 하고 수차의 회전수를 상승시키면 출력과 효율은 점차 증가하지만 어떤 최대치를 지나면 점차 감소하기 시작하여 출력과 효율이 0이 되는 회전수가 존재한다. 이때는 기계적 손실만 발생하게 된다. 이러한 현상은 수차의 부하가 전혀 없어도 회전수가 무제한으로 상승하지 않음을 의미하고 이 상승한도를 무구속 속도라고 한다. 튜블러 수차의 경우 횡류 수차나 프란시스 수차와는 달리 가이드베인을 이용한 급폐쇄 시스템이 없기 때문에 이러한 무구속 속도 특성을 파악할 필요가 있다. 가이드베인을 이용한 급폐쇄가 불가능하므로 수차발전기의 성능으로 일정시간동안의 한계점 운전이 가능해야 한다. 본 시험에 사용된 튜블러 수차는 정격 회전속도의 2.3배까지 견딜 수 있는 구조로 설계를 진행하였으며, 최대 무구속 속도는 정격의 1.9배까지 상승하였다. 또한 본 시험에 사용된 튜블러 수차는 Fig. 4.2에서 보이는 것과 같은 속도특성을 나타낸다. 정수장의 운영조건에 비추어 측정시 무구속 운전은 각 개도별로 5분씩으로 제한하였다. 시험결과 개도를 증가시킬수록 유량은 증가하지만 회전수를 현저하게 줄어드는 특성을 보이고 있다.

4.3 유량변화에 따른 성능특성

Fig. 4.3에 보이는 성능곡선은 수차 러너베인의 개도를 일정하게 고정시키고 유량조건을 변화시켰을 경우의 수차발전기 성능특성을 나타내고 있다. 성능곡선에 보이듯이 단위유량의 증가에 따른 단위출력, 단위회전수의 증가 및 추세를 알 수 있다. 시험결과 유량이 증가하면 출력 및 회전수가 증가하는 특성을 보이는데, 동일한 유량에서는 부하의 양에 비례하여 변동을 보임을 알 수 있다. 실제로 이러한 현상은 수차발전기를 계통에 연결하였을 경우에는 부하의 영향이 사라지게 되므로 하나의 곡선으로 동일하게 나타날 것으로 예측된다. 또한 유량과 출력의 증가비율이 일정하게 나타나지 않는 것은 유량의 변동에 따라서 수차발전기 입구측의 압력이 변하기 때문이다. 측정에 의한 값을 비교해 보면 유량의 증가에 대하여 압력의 감소가 나타난다.



4.4 러너베인 개도 변화에 따른 성능특성

Fig. 4.4에서는 유량, 낙차 등의 외부조건을 동일하게 유지한 상태에서 수차발전기 러너베인의 개도를 변경시킬 경우 수차발전기의 효율특성을 나타내고 있다. 표에서 보이는 바와 같이 러너베인의 개도를 줄이면 회전수 및 출력은 증가하고 유량값은 감소함을 알 수 있다. 효율은 점차 증가하는 추세를 보이다 일정한 개도 이하에서는 감소하는 데, 이는 캐비테이션 발생등의 이유로 효율이 감소하는 현상을 보이는 것이다. 수차발전기의 보호를 위해서는 정격의 개도에서 사용하는 것이 최고의 효율을 얻을 수 있음을 보이고 있다.



4.5 부하량의 변화에 따른 성능특성

소수력용 수차발전기는 일반적으로 소용량의 발전일 경우 발전소 내부 공급전원으로 사용하거나 전력회사의 계통에 연결하여 발생된 전력을 판매하게 된다. 하지만 본 시험에서는 부하장치를 이용하고, 전력계통에 연결하지 않으므로 부하량의 변화에 따라서 수차발전기의 운전환경에 변화를 가져오게 된다. 이는 수차발전기의 특성을 파악함에 있어서 저해 요인이 되기도 한다. Fig. 4.5에 보이는 특성표는 50kW급 발전기에 실제로 30kW, 40kW, 50kW의 부하를 적용하여 동일 조건에서 운전한 결과이다. 12도의 개도에서는 50kW 부하일 때, 최고의 발전량을 보이고 있으며, 16도에서는 30kW와 50kW에서 거의 동일한 발전량을 보이고 있다. 특성표에서 보이는 바와같이 26kW의 출력을 가지는 수차발전기에 높은 부하보다는 출력값에 비례하는 부하를 적용하는 것이 수차발전기의 효율을 높게 유지할 수 있다.



4.6 2대 직렬연결에 따른 성능특성

Fig. 4.6에서는 앞에서 언급한 바와는 달리 유효수두값이 수차발전기의 설계값보다 높을 경우 동일한 형식으로 운전하기 위한 방법에 대한 특성시험 값을 보이고 있다. 댐 수위의 상승으로 정수장의 배관내 압력값이 2.0kg/m^3 이상을 보이므로 수차발전기를 직렬 2대 연결을 하였다. 러너베인의 변경 범위를 10에서 26도까지로 결정한 뒤 출력값과 유량, 회전수의 변화를 전단수차와 후단수차로 나누어서 시험하였다. A를 유량의 유입이 일어나는 쪽인 전단수차 값으로 하고 B를 후단수차로 하였을 때 두 수차의 성능을 비교해 보이고 있다. 특성 표에서는 전단(A)수차보다는 후단(B)수차의 효율이 조금 더 높게 나타나고 있다. 이는 전단수차에선 정류를 거친 흐름을 후단수차에서 발전으로 사용하기 때문에 효율면에서 높게 나타나고 있음을 보이고 있다. 또한 직접적인 발전량을 측정한 결과 후단수차의 출력이 높게 나타나고 있다. Fig. 4.7은 1대 독립 운전시 효율과 2대 직렬 운전시 효율을 상대적으로 비교 분석한 결과를 보이고 있다. 높은 압력(유효수두)을 배분하여 출력을 내는 수차보다는 독립적으로 절반의 압력을 받는 수차발전기의 효율이 더 높은 것을 보이고 있다.

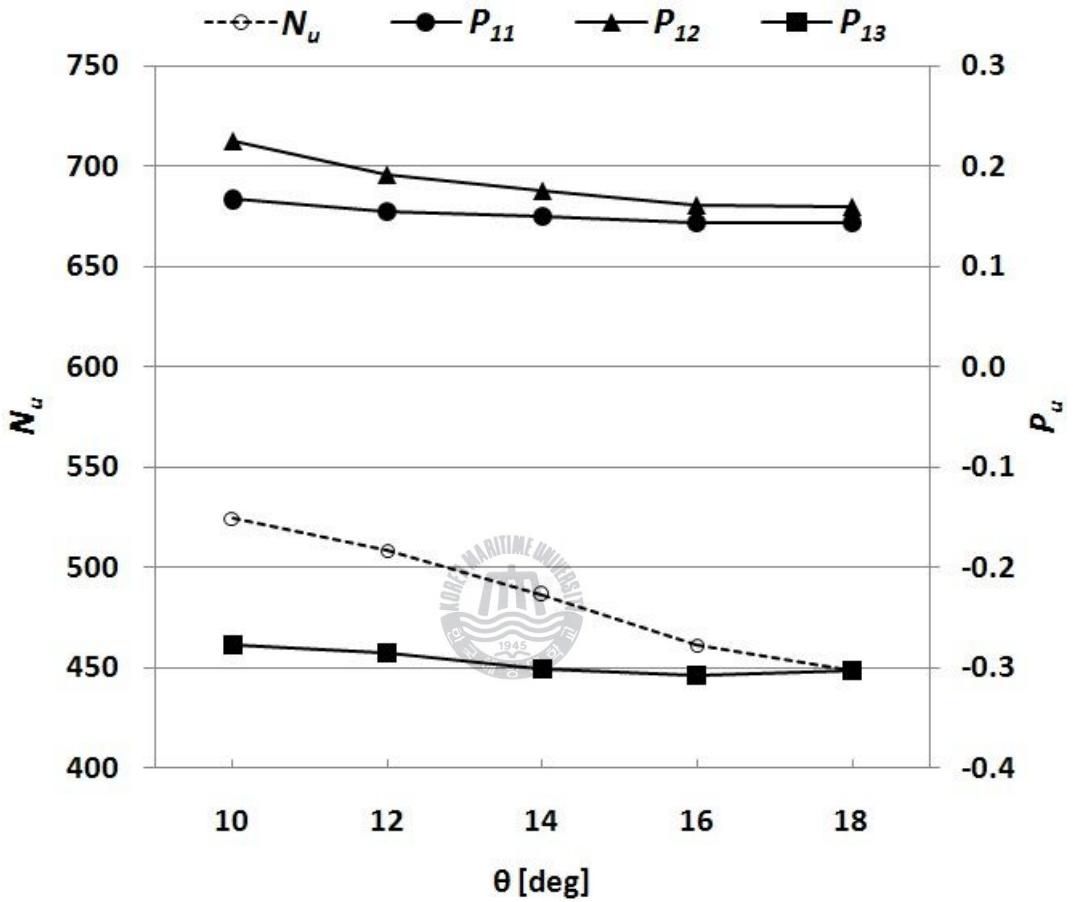


Fig. 4.1 Performance characteristics curve by runner vane angle variation

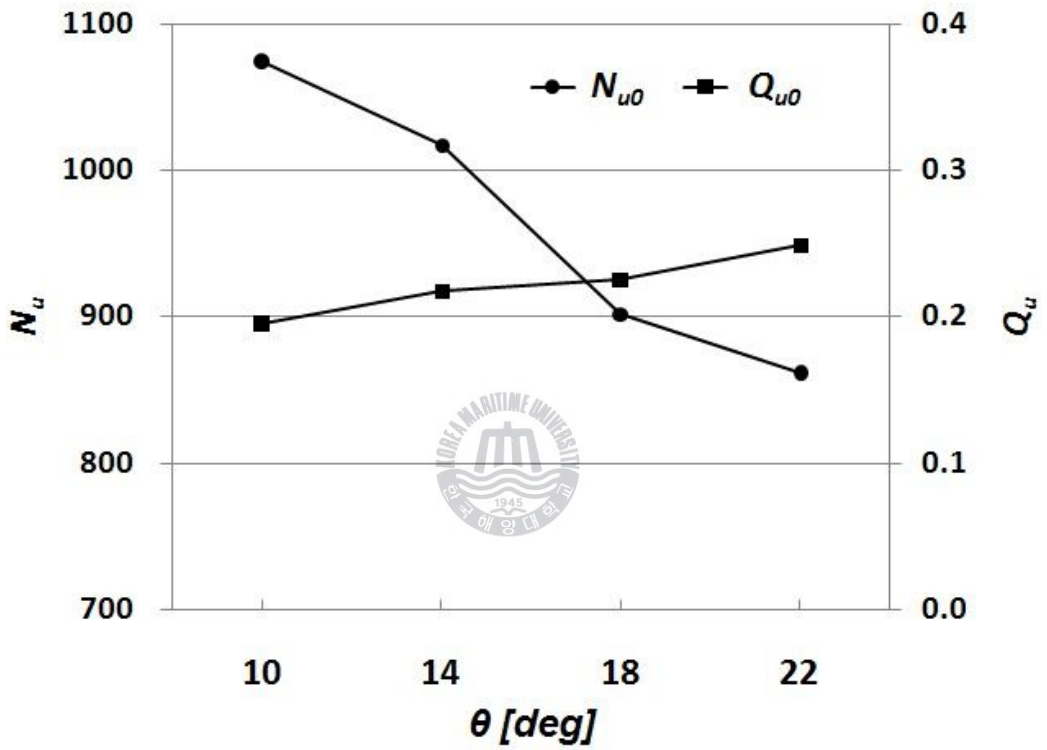
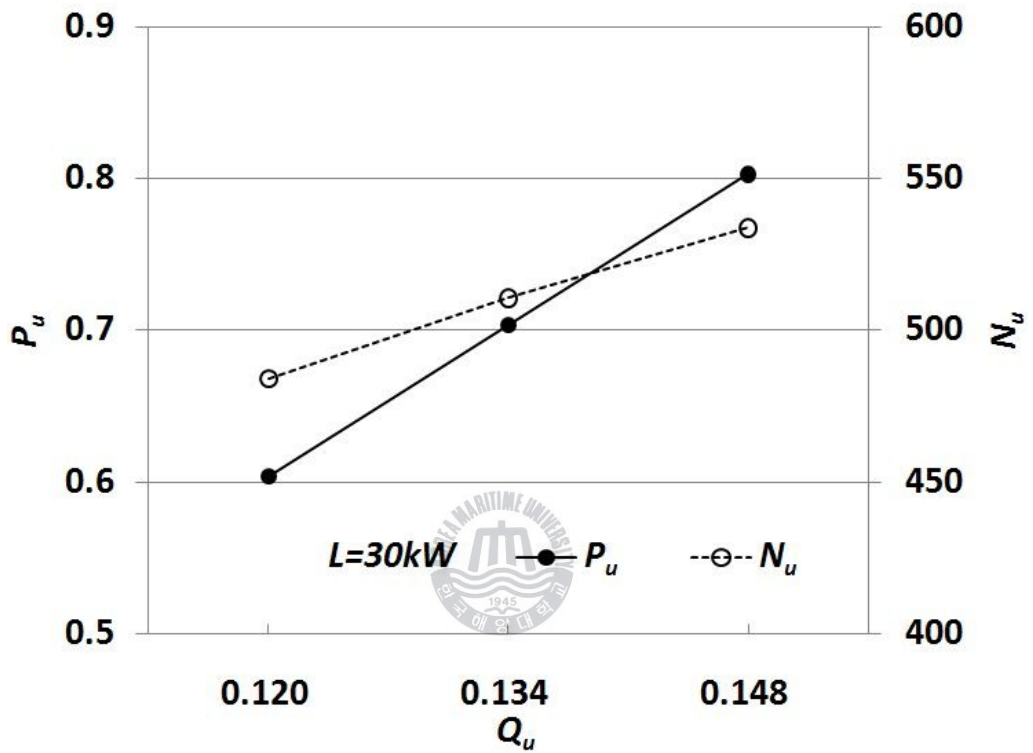
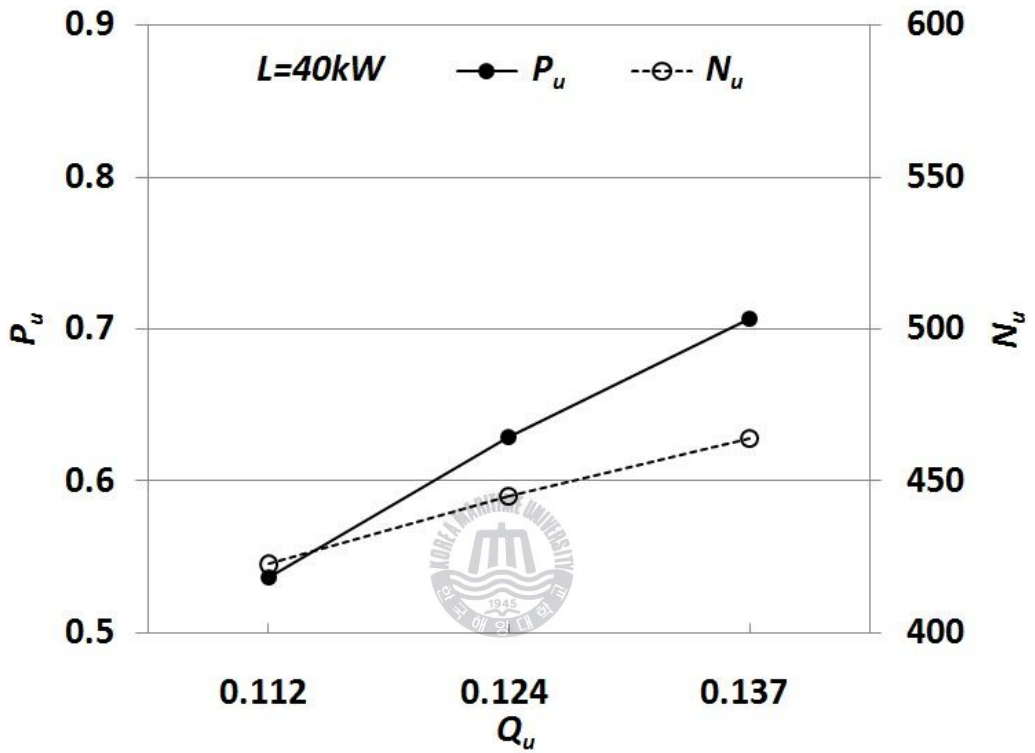


Fig. 4.2 Characteristic curve by run away speed



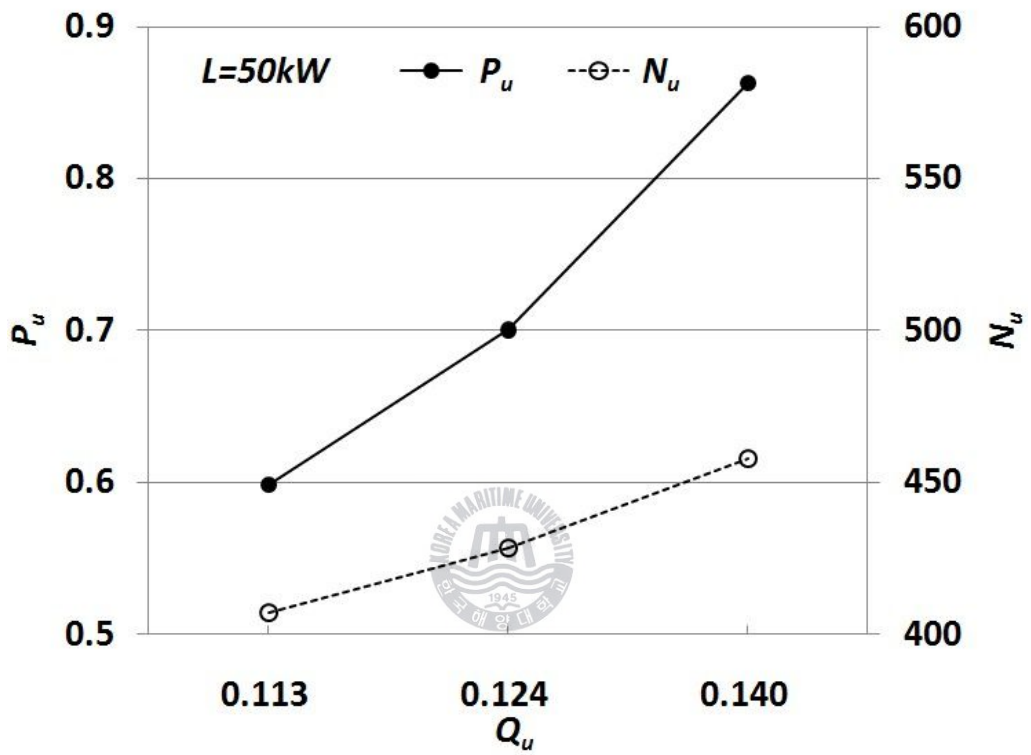
(a) $L = 30kW$

Fig. 4.3 Performance characteristics curve by flowrate variation (continued)



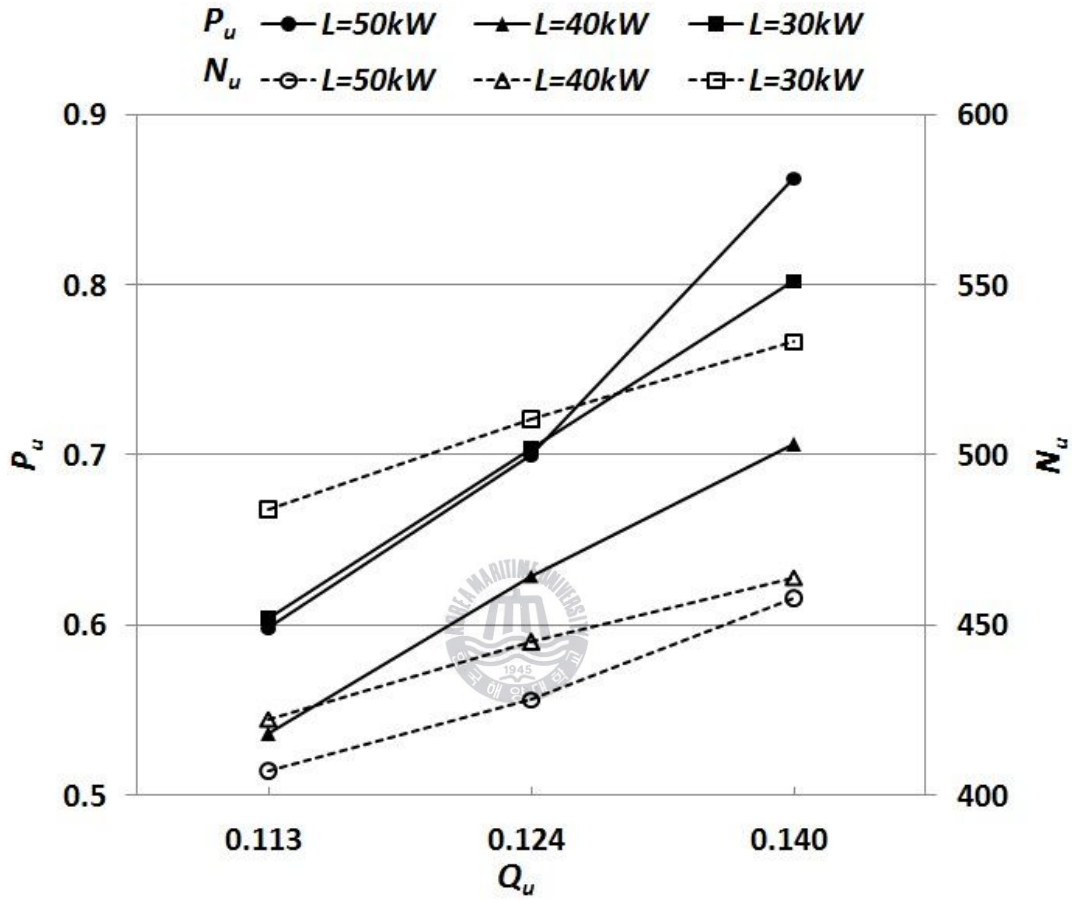
(b) $L = 40kW$

Fig. 4.3 Performance characteristics curve by flowrate variation (continued)



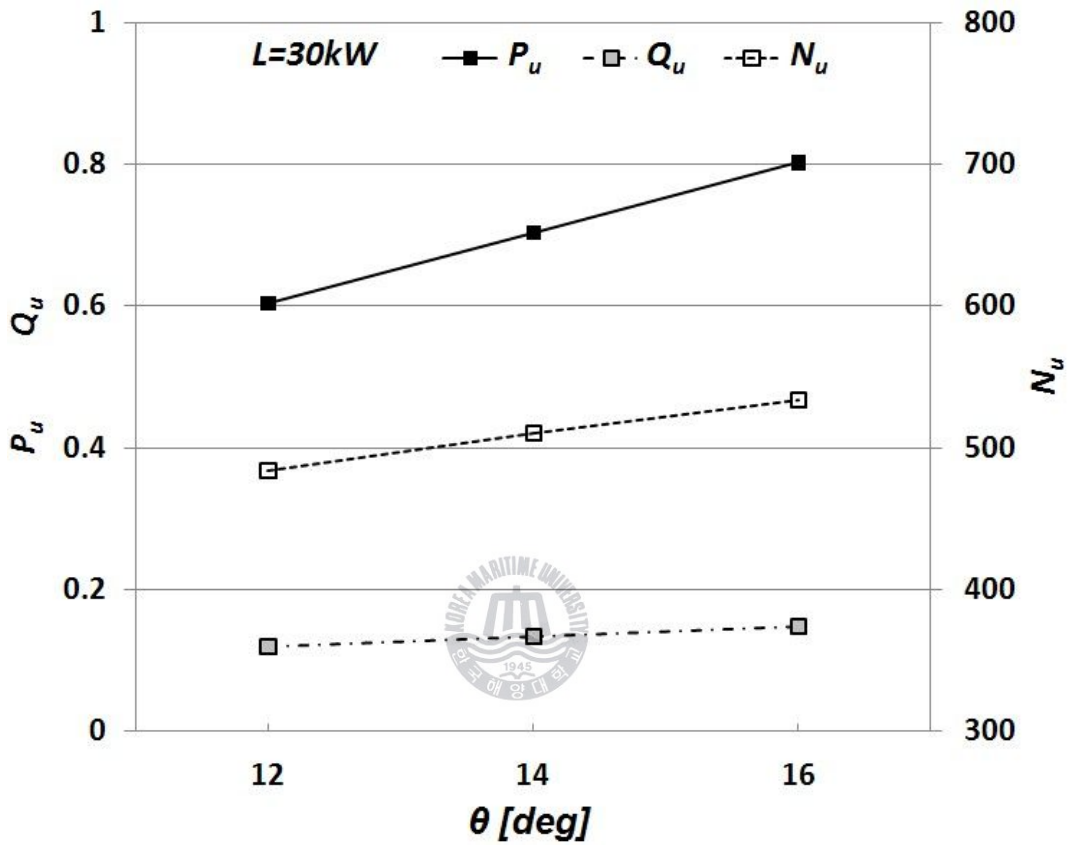
(c) $L = 50kW$

Fig. 4.3 Performance characteristics curve by flowrate variation (continued)



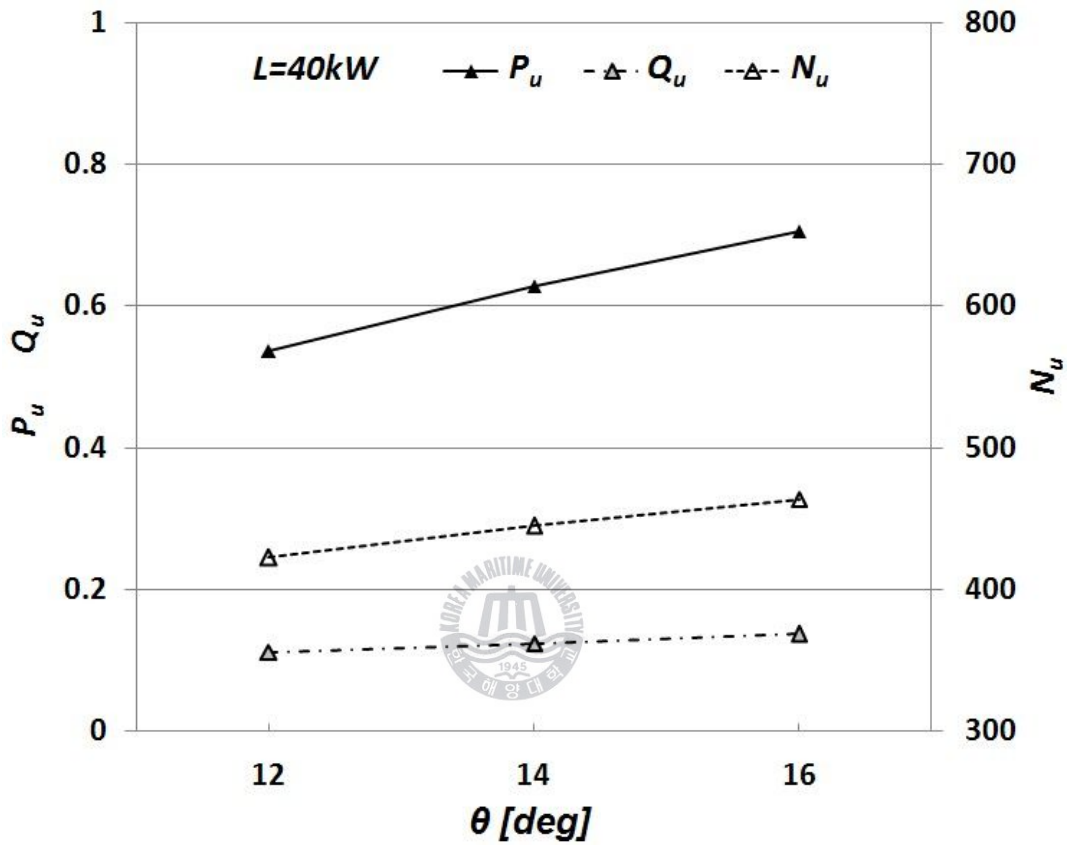
(d) Load variation

Fig. 4.3 Performance characteristics curve by flowrate variation



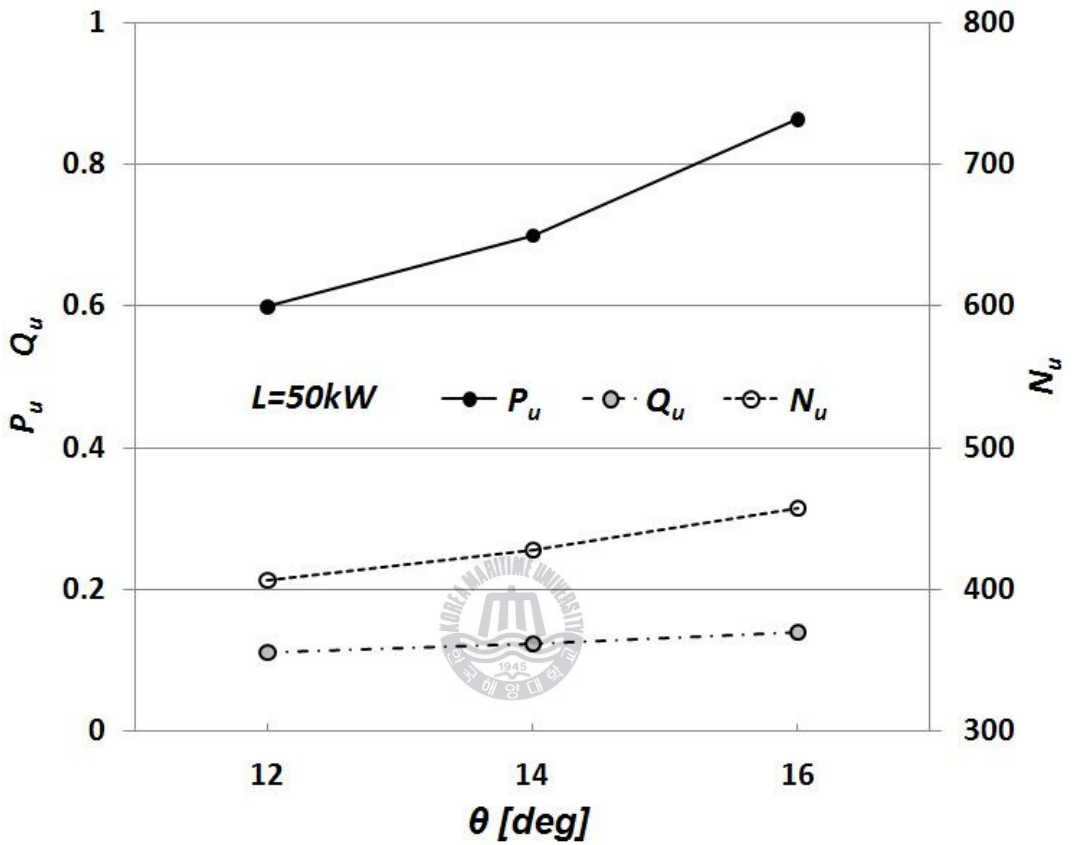
(a) $L = 30kW$

Fig. 4.4 Performance characteristics curve by runner vane angle variation (continued)



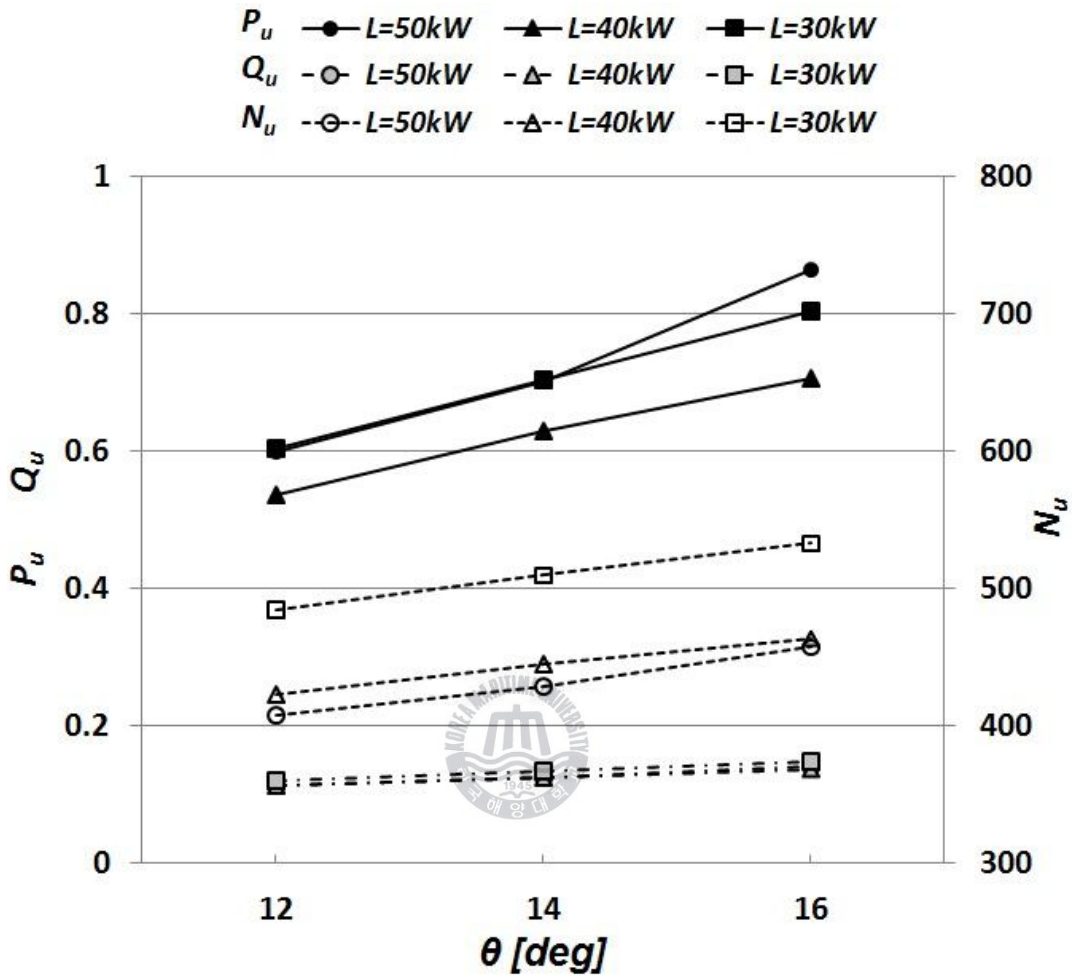
(b) $L = 40kW$

Fig. 4.4 Performance characteristics curve by runner vane angle variation (continued)



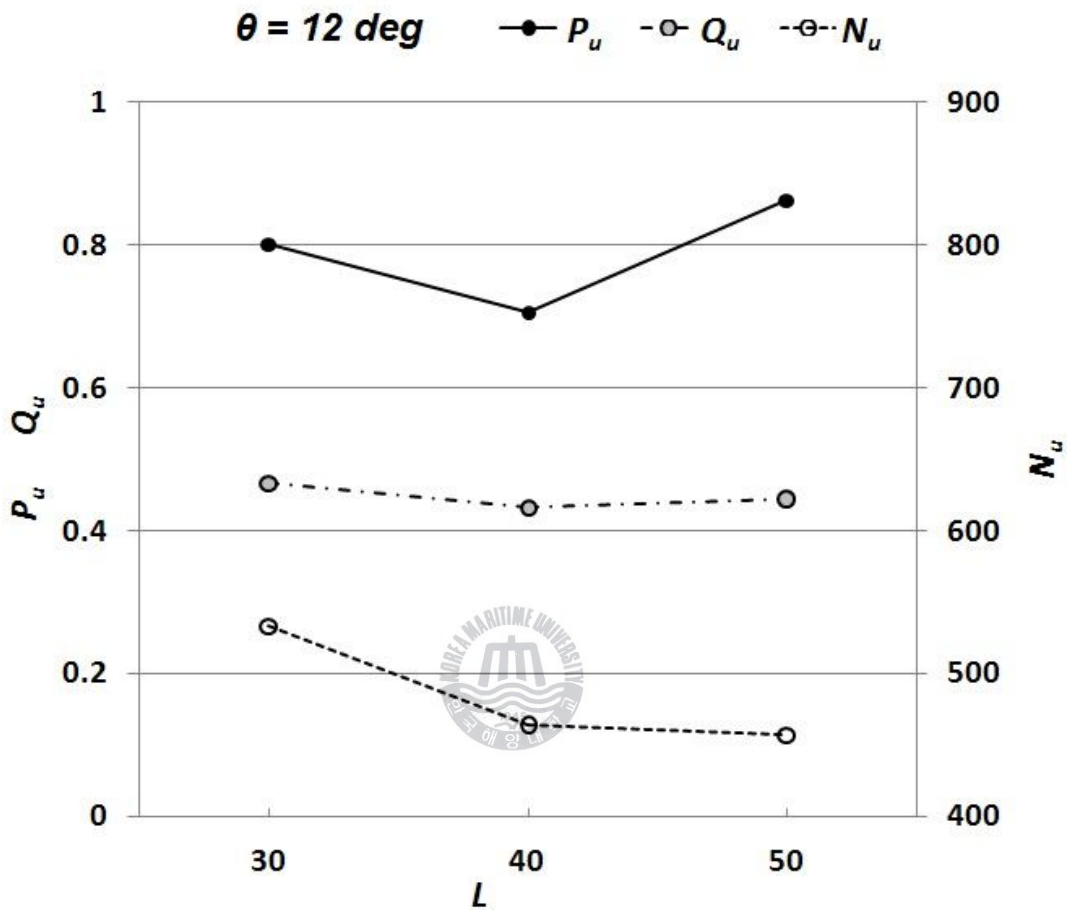
(c) $L = 50kW$

Fig. 4.4 Performance characteristics curve by runner vane angle variation (continued)



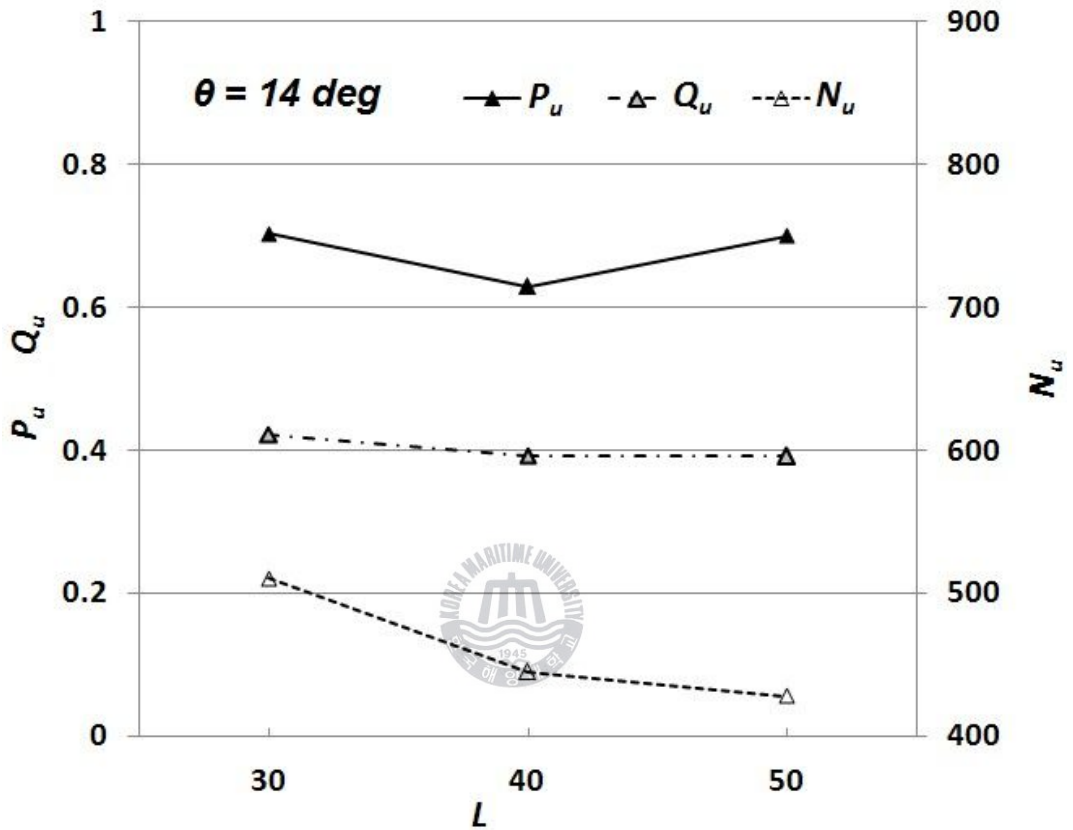
(d) runner vane angle variation

Fig. 4.4 Performance characteristics curve by runner vane angle variation



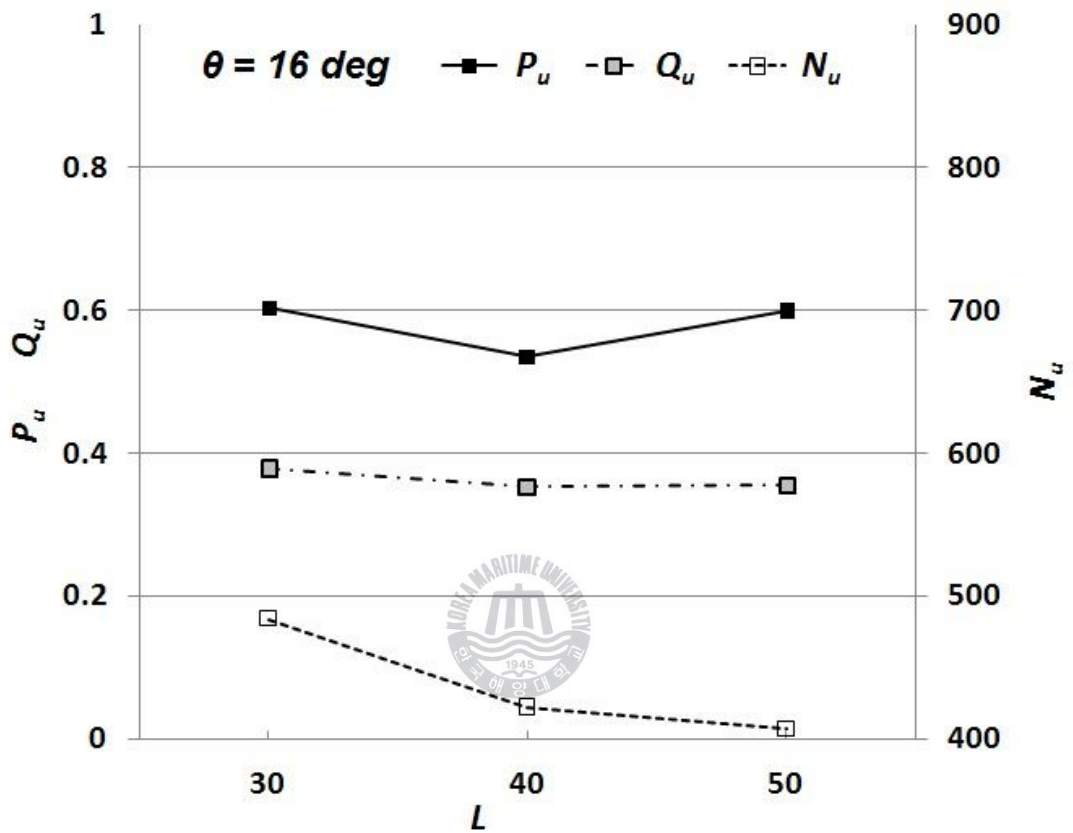
(a) $\theta = 12 \text{ deg}$

Fig. 4.5 Performance characteristics curve by electrical load variation (continued)



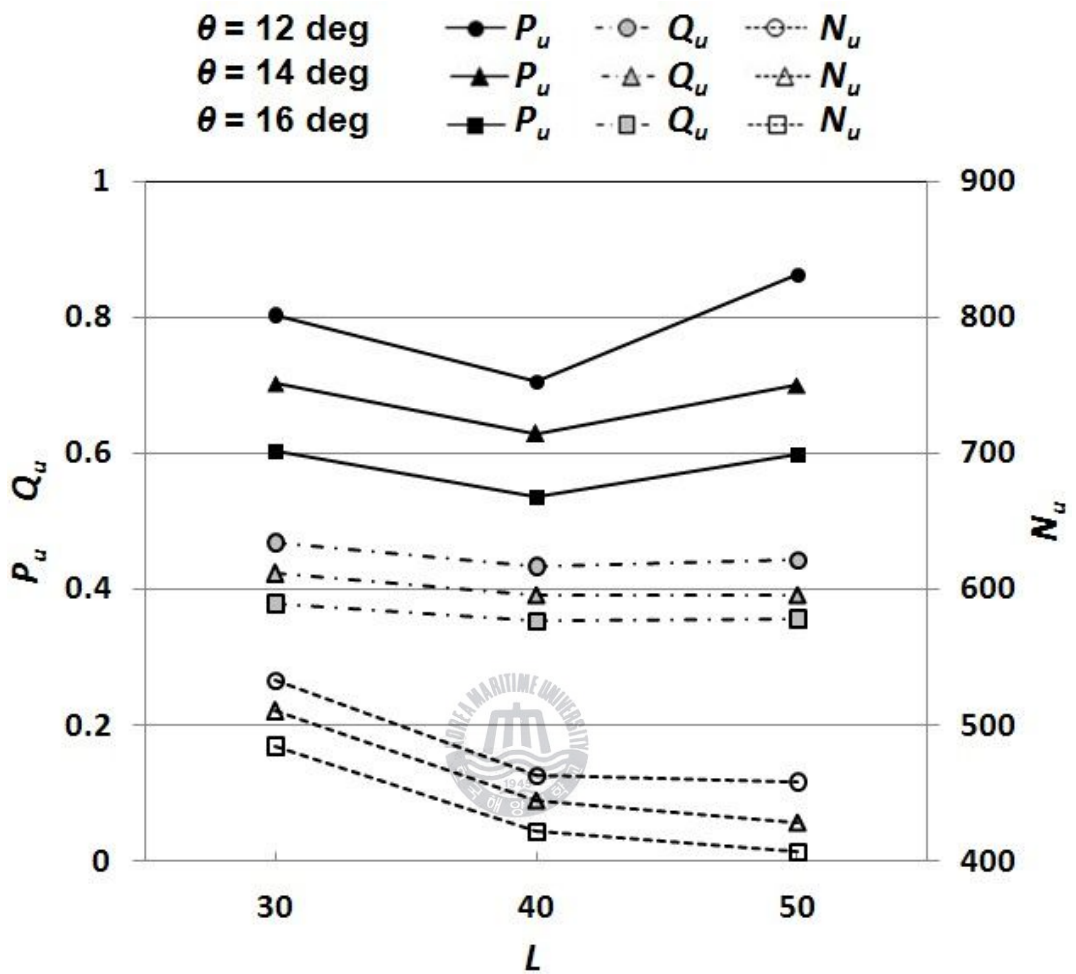
(b) $\theta = 14 \text{ deg}$

Fig. 4.5 Performance characteristics curve by electrical load variation (continued)



(c) $\theta = 16 \text{ deg}$

Fig. 4.5 Performance characteristics curve by electrical load variation (continued)



(d) electrical load variation

Fig. 4.5 Performance characteristics curve by electrical load variation

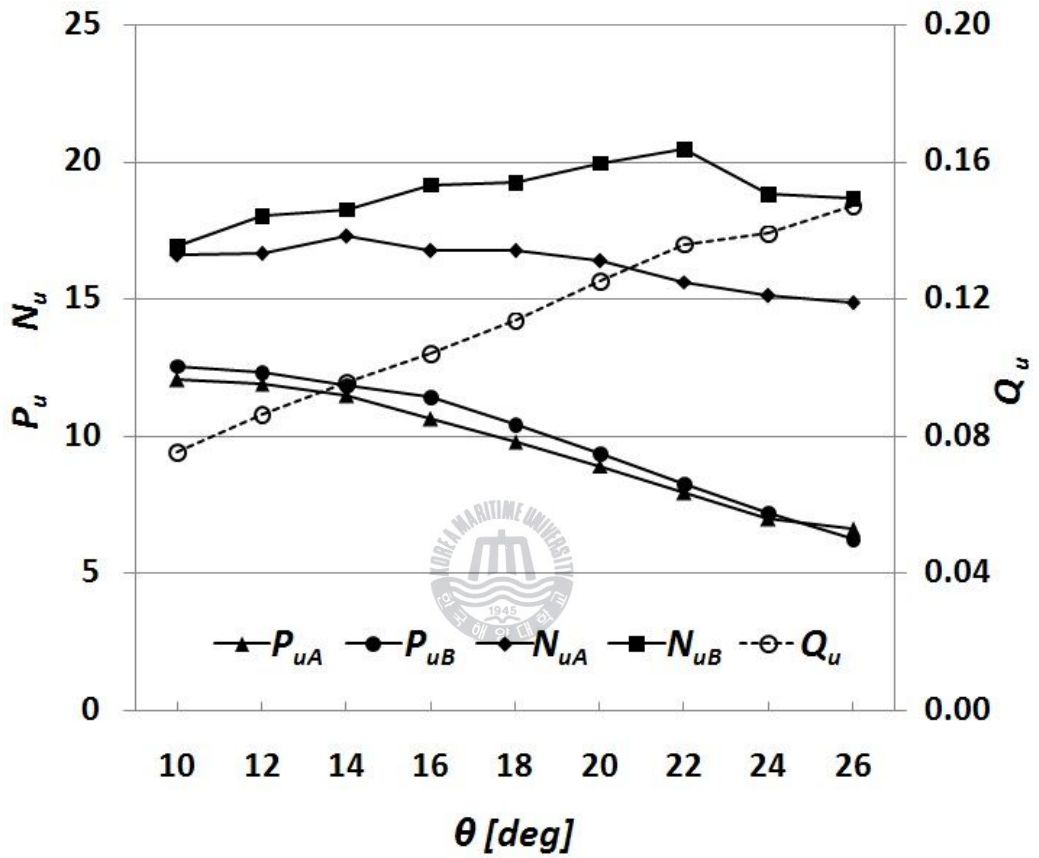


Fig. 4.6 Performance characteristics curve by parallel arrangement

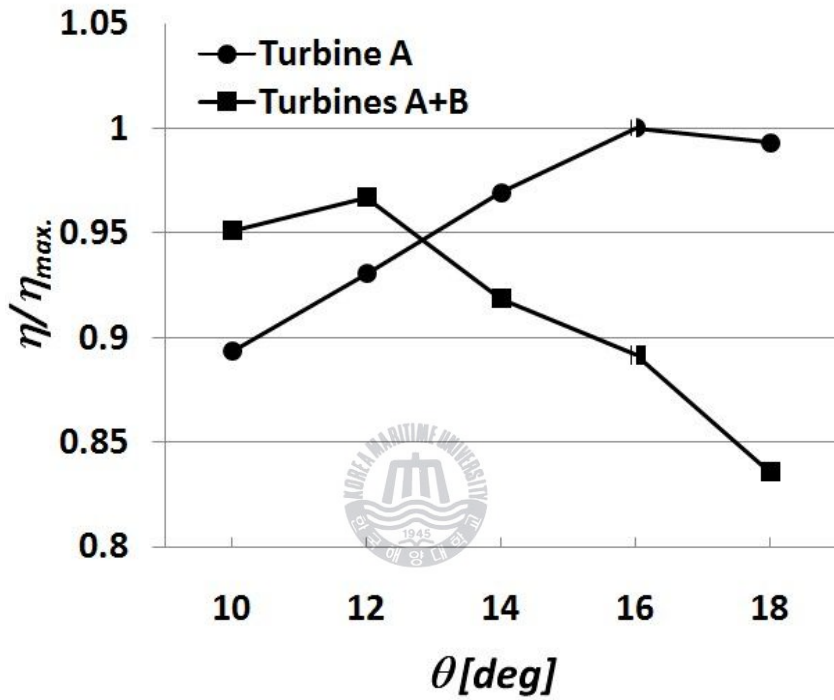


Fig. 4.7 Performance characteristics curve compare with turbine arrangement

제5장 결론

본 연구에서는 수도관차압을 이용한 튜블러 수차의 설계에 있어서 적용 될 수 있는 최적설계법을 제안하였으며, 설계법에 따라서 제작된 실물 수차에 대한 성능시험을 통하여 수차의 성능특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) $Q=0.3m^3/s$, $H=12.28m$ 조건에 바탕으로 러너의 외경은 280mm, 수차발전기 회전수 1911 rpm인 튜블러 수차의 시험결과 최고의 효율을 보인 러너베인의 개도는 16도이며, 유량의 변동에 따라서 최고 효율을 보이는 개도는 달라진다.
- (2) 튜블러 터빈은 러너베인의 개도 변경을 통하여 감압밸브의 기능을 수행 할 뿐만 아니라, 유량이나 압력의 변동에 대하여 기존의 소수력발전용 터빈과 대비하여 높은 적용성을 보였다.
- (3) 전력 계통에 연결하지 않은 발전기의 운전시에는 출력에 비례하여 부하를 연결하여야 설계 효율점에 근접한 운전이 가능하다.
- (4) 시험결과 2대 직렬운전에 있어서 유량이 먼저 유입되는 전단수차 보다는 전단수차를 거치고 난 수류의 흐름을 받는 후단수차의 효율이 더 높다.
- (5) 수차발전기는 설계점에서 독립 운전하는 것이 높은 압력을 배분하여 발전을 수행하는 발전기 보다 효율이 높다.

참고문헌

- [1] 에너지관리공단 2008, “신재생에너지 RD&D 전략 2030”, 2007년도 소수

력분야 전문위원회 최종보고서

- [2] 이경배 2006, “소수력발전 기술개발 현황과 전망”, 2006년도 제5회 소수력 연구회 세미나
- [3] 츠카모토, “마이크로 튜블러수차의 광대역화에 관한 개발연구”, 박사 논문 2004.11
- [4] 남상현, 김유택, 최영도, 남청도, 이영호, 2007, “소형 하이드로터빈의 깃수의 영향”, 2007년도 전기학술대회 한국마린엔지니어링학회 논문집, pp. 211~212.
- [5] 남상현, 김유택, 최영도, 남청도, 이영호, 2007, “러너베인 각도에 따른 튜블러 수차의 속도 및 압력분포”, 2007년도 춘계학술대회 대한기계학회 논문집 pp. 2378~2383.
- [6] 남상현, 김유택, 최영도, 남청도, 이영호, 2007, “CFD에 의한 소형 튜블러 수차의 캐비테이션 기초해석”, 2007년도 추계학술대회 한국 신재생에너지학회 논문집 pp.408~411
- [7] You-Taek Kim, Sang-Hyun Nam, Young-Do Choi, Yeong-Cheol Hwang, Chung-Do Nam, Young-Ho Lee, "Tubular-type Hydroturbine Performance for Variable Guide Vane Opening by CFD", the Fifth International Conference on Fluid mechanics, Aug.15-19, 2007, Shanghai, China pp. 424~427.
- [8] 황영철, 2008, “수도관차압을 이용한 마이크로 튜블러수차의 최적설계법에 관한 연구” 석사논문.
- [9] 김경엽 2005, “수도관로 소수력개발에 따른 최적시스템 적용 및 운영방안”에 관한 연구용역 최종보고서.
- [10] 2006-N-SH02-P-01, 팩키지형 50kW급 소형 수차발전시스템 개발, 에너지관리공단, 효성에바라, 한국수자원공사, 한국해양대학교
- [11] 2006-N-SH02-P-02, 수도간 차압을 이용한 마이크로 소수력발전 실용화 기술개발, 에너지관리공단, 신한정공, 한국수자원공사, 한국해양대학교

- [12] Arno G., Robin S., and Domink S., "Kaplan Turbine Runner Optimization by Numerical Flow Simulation (CFD) and Evolutionary Algorithm", Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems Yokohama, Japan, October 2006.
- [13] Torbjorn K.N., Jorgen R., and Ole G. D., "Propeller Turbine with Two Contra-Rotating impellers and built in Generators", Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems Yokohama, Japan, October 2006.
- [14] Daisuke T., and Toshiaki K., "Experimental Study on Design Materials for Solidity of Counter Rotating Runners", Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems Yokohama, Japan, October 2006.
- [15] Ales s., and Jiri O., "Shape Optimization of a Kaplan Turbine Blade", Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems Yokohama, Japan, October 2006.

후기

본 연구는 지식경제부 에너지관리공단 신재생에너지기술개발 사업의 (과제명 ; 수도관차압을 이용한 마이크로 소수력 발전 실용화 기술개발, 과제번호 : 2006-N-SH02-P-02-000, 개발기간 2006.8.1 ~ 2009.7.31) 일환으로 수행되었습니다.

주관기관 : (주)신한정공

위탁기관 : 한국해양대학교

참여기관 : 한국수자원공사



감사의 글

먼저 본 논문이 마무리 될 수 있도록 이끌어 주신 남창도 지도교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

또한 바쁘신 와중에서도 기술적인 부분에 도움을 주신 이영호 교수님과 김유택 교수님, 최영도 박사님께 감사의 말씀을 드립니다.

그리고 학업을 지속할 수 있도록 믿어주고 함께해 주신 회사 직원 여러분들께 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 아내와 아이들에게 고맙다는 말을 전합니다.

