



# 소수력용 고효율 프란시스 터빈의 설계에 관한 연구

A Study on the Design of High Efficiency Turbine for Small Hydro Power 지도교수 이 영 호

1945

# 2019년 2월

한국해양대학교 대학원

# 기계공학과

이 선 호

# 본 논문을 이선호의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2018년 12월 18일

한국해양대학교 대학원



목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Abstract	viii
Nomenclature	xii

#### 1. 서 로

1.1	연구 배경 및 문제점	1
1.2	기존의 연구	2
	1.2.1 수차 설계 최적화	2
	1.2.2 국산화 설계 활용	2

ARTIME AND OCEAN

## 2. 수차 시스템 구성 및 일반

2.1	마이크로 수차 시스템	3
2.2	프란시스 수차 시스템 구조	5
2.3	수차 종류의 선정	8
2.4	프란시스 수차 시스템 설계	10
2.5	수차 시스템 제어	12
2.6	수차 시험설비의 제작	21

# 3. 수차 관련 표준 및 시험규격

3.1	수차 관련 표준 및 규격의 정리	22
3.2	IEC 60193 수차의 시험	23
3.3	수차의 주요성능 기준	25
	3.3.1 수력 효율	25
	3.3.2 효율 및 시험 결과의 계산	26
	3.3.3 모델과 프로토 타입의 치수 체크	27

# 4. 수차 설계

4.1 설계 표준화	29
4.1.1 수차 설계 프로세스에 대한 기존 연구 분석	29
4.1.2 수차 설계 프로세스	32
4.1.2.1 수차 설계 프로세스의 단계별 구분	32
4.1.2.2 설계지원 프로세스	34
4.1.2.3 설계지원 프로그램 프로세스 설명	35
4.1.2.3.1 수차 요구사항 결정	36
4.1.2.3.2 Model 설계 ·····	36
4.1.2.3.3 효율 계산 및 보고서 작성	37
4.1.2.3.4 설치 및 운용환경 계산	38
4.1.2.3.5 검토 함수	39
4.1.3 매개변수 결정의 시험조건	45
4.2 입구경과 β의 관계 ·····	46
4.2.1 수차 효율과 입구경	46
4.2.2 입구경 변화에 따른 수차 효율의 변화	48

## 5. 국산화 설계의 실증 및 결과

5.1	국산화 설계	50
	5.1.1 국산화 설계의 실증 및 결과	50
5.2	모델 실험	50
	5.2.1 실제 수차 모델 실험	50
	5.2.2 수차 성능시험설비 보완 및 완성	51
5.3	실제 수차 설계 및 제작, 성능테스트	56

6. 결론





# List of Tables

Table 1 Types and characteristics of turbines 4
Table 2 Small hydro power classification   4
Table 3 Type of hydro turbine by head5
Table 4 Specific speed range for each type of turbine         7
Table 5 List of standards related to small hydropower generation control
system 13
Table 6 Functional classification in control system specification standard of
IEC 61362 16
Table 7 Functional classification in IEC 60308 control system test standard
Table 8 A part of the standard function of a dam(juam) in operation 18
Table 9 Theorem on the turbine standard   22
Table 10 Definition of turbine geometric terms
Table 11 Symbols and formulas used for turbine efficiency         25
Table 12   Variables that define efficiency   26
Table 13 Some representative papers related to turbine design         30
Table 14 Minimum size for model size and test parameters 46
Table 15 Change design value according to change of inlet diameter 49
Table 16 Ability to perform each test and additional equipment and
adjustments required for performance
Table 17 Prepare materials for reviewing the equipment and determining
the range of performance tests
Table 18 Major equipments   54



Table	19	New turbine specification	57
Table	20	Existing small hydro power efficiency test result data	63
Table	21	New small hydro power efficiency test result data	64





# List of Figures

Fig.	1 Small Hydro Power System ·····	•• 4
Fig.	2 Casing (Shinhan Precision Holdings)	•• 6
Fig.	3 Runner (Shinhan Precision Holdings)	•• 6
Fig.	4 Francis turbine	•• 7
Fig.	5 Selecting turbine type by head and flow rate	•• 9
Fig.	6 Selecting turbine type by head and power	•• 9
Fig.	7 Design of runner blade and manufacturing technique	10
Fig.	8 Shape of turbine according to specific speed	11
Fig.	9 Runner design general procedure	12
Fig.	10 Name of runner each department	12
Fig.	11 Power system configuration diagram	14
Fig.	12 Monitoring control system configuration diagram	15
Fig.	13 Top level of control system configuration	19
Fig.	14 Hierarchical control functional diagram	20
Fig.	15 Plant control functional diagram	20
Fig.	16 Francis turbine testing equipment	21
Fig.	17 Details of Francis turbine	24
Fig.	18 Sectional view of the turbine	25
Fig.	19 Francis turbine runner shape and test subject	28
Fig.	20 Study on improvement of low efficiency Francis turbine efficie	ncy
thro	ugh T1DD	31
Fig.	21 Rational turbine design process	32
Fig.	22 Turbine design detail flow	33
Fig.	23 Hydraulic power system installation structure layout chart	34



Fig.	24	Determination of turbine design point	36
Fig.	25	Model confirmation process	37
Fig.	26	Create turbine efficiency curve	38
Fig.	27	Installation and operation environment calculation	39
Fig.	28	Runner design flow chart	40
Fig.	29	1 pitch domain CFD analysis	42
Fig.	30	Numerical method CFD analysis	43
Fig.	31	Comparison data between each runner	43
Fig.	32	Comparison of Efficiency in Outlets	44
Fig.	33	Blade loading and stream lines	44
Fig.	34	Example of inlet diameter design drawing	48
Fig.	35	Shape of turbine blade after changing inlet diameter	49
Fig.	36	Performance test facility installation	53
Fig.	37	Review the new turbine application	56
Fig.	38	Analysis of actual turbine draft tube flow	56
Fig.	39	Lay-out design of new turbine	57
Fig.	40	Results of internal flow analysis	60
Fig.	41	Result of change in inlet width (Bg)	60
Fig.	42	Effect of guide vane and stay vane	60
Fig.	43	Effect of number of blades	61
Fig.	44	Hill-Chart with CFD	61
Fig.	45	Result of runner strength analysis	61
Fig.	46	Existing turbine and new turbine	62
Fig.	47	Small hydro power efficiency test of proof point	62
Fig.	48	Existing small hydro power efficiency test result	63
Fig.	49	New small hydro power efficiency test result	64

# A Study on the Design of High Efficiency Francis Turbine for Small Hydro Power

Seon Ho Lee

## Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The principle of small hydropower is no different from that of hydroelectric power generation. However, large-scale hydroelectric power has a negative impact on the environment, while small power generation has a peak that can be installed in local conditions and environmentally friendly development is possible. Domestic small hydropower generation has been installed in more than 44 regions since 1982 with government support, and the annual power generation amount is about 157,510 MWh. Until now, domestic small hydropower development has been dependent on overseas aeration production technology like 4 rivers hydroelectric power plant, and localization of water turbine production technology has been made. However, there has been a shortage in the increase of the aberration efficiency by concentrating only on the improvement of the capacity increasing technology. Recently, the development of the small hydroelectric power has been activated and the hydraulic power plant using the domestic



- viii -

aberration has been increasing, and the efficiency has been improved to 80 %.

China's largest share of the world's hydropower market share is due to its overwhelming domestic yield, so the strengths of the traditional strong players Alstom, Andritz and VOITH are still continuing.

European leading companies are expected to learn not only the non-speed runner blade profiles, but also know-how about the design of detailed parts such as cones, casings and draft tubes, but these parts are difficult to quantify, There is very little exposure to technology security.

In this study, we propose a standard process to follow the procedure when designing to improve the aberration efficiency and confirm that the optimal aberration efficiency parameter can be determined by localizing the detailed shape determination affecting the efficiency. And the validity of the localization design technology was verified by comparing the results obtained by the theoretical formula with the errors of the CFD model obtained after the design.

KEY WORDS: Small hydro power 소수력; Francis hydro turbine 프란시스 수차; Design 설계; High efficiency 고효율;



# 소수력용 고효율 프란시스 터빈의 설계에 관한 연구

## 이 선 호

#### 한국해양대학교 대학원

Abstract

소수력 발전의 원리는 수력 발전과 차이가 없으나 대규모 수력발전이 환경 에 부정적 영향을 미치는 반면, 소수력 발전은 국지적인 지역 조건에 설치가 능하고 환경친화적 발전이 가능하다는 정점을 보유하고 있다. 국내 소수력 발전은 1982년 이후 정부의 지원으로 현재까지 44여 개 지역에 설치되어 있 으며, 연간 전력 생산량은 약 157,510 MWh에 달하고 있다. 지금까지 국내 소수력 개발은 4대강 수력발전소와 같이 해외 수차제작 기술에 의존해왔으 며, 수차제작 기술 국산화 노력을 기울여 왔다. 그러나 용량증가 기술향상에 만 집중해 수차 효율증가에 다소 부족한 부분이 있었지만, 최근에는 소수력 개발이 활성화되어 국내 수차를 이용한 수력발전소가 증가하고 있으며 효율 또한 외국 수차 효율 80%에 이를 정도로 기술력이 향상되고 있다.

현재 세계 수력 시장의 점유율 상 가장 큰 지분을 차지하고 있는 것은 중 국의 업체들이지만 이는 압도적인 내수율에 기인한 것이므로, 아직까지 전통 적인 강자인 유럽업체 Alstom과 Andritz, VOITH 등의 강세가 이어지고 있다 고 볼 수 있다. 유럽의 선진 업체는 비속도별 런너 블레이드 프로파일을 습득하고 있음은 물론 콘, 케이싱, 홉출관 등 세부 부품의 설계에 대한 노하우도 상당부분 축 적한 것으로 예상하고 있으나, 이러한 부분은 정량적으로 나타내기 어렵고, 기술 보안이 뛰어나 노출된 것이 거의 없다.

본 연구는 수차 효율을 높이고자 설계를 실시할 때 어떤 절차를 따라야 하는지 표준 프로세스를 제시하고, 효율에 영향을 미치는 상세형상 결정을 국 산화한 사례를 제시함으로써 수차 효율 최적 변수를 결정할 수 있는지 확인 하고자 한다. 그리고 이론 수식으로 얻은 결과와 설계 이후 수행하여 얻은 CFD 모형의 오차를 비교하여 국산화 설계기술의 타당성을 검증하여 효과적 인 최적 솔루션을 찾을 수 있는지의 여부를 고찰하였다.

KEY WORDS: Small hydro power 소수력; Francis hydro turbine 프란시스 수차; Design 설계; High efficiency 고효율;





# Nomenclature

В	Bucket width	[m]
g	Gravitational acceleration	[m/s <sup>2</sup> ]
Η	Head	[m]
N	Rotational speed	[rpm]
$N_{s}$	Specific speed	[-]
$P_h$	Hydraulic power	[kW]
$P_m$	Shaft power	[kW]
Q	Flow rate	[m³/s]
Re	Reynolds number	[-]
Т	Torque 1945	[Nm]
s	Needle stroke	[m]
$\alpha$	Guide vane angle	[°]
eta	Runner blade angle	[°]
$\eta$	Efficiency	[%]
$\eta_h$	Hydraulic efficiency	[%]
$\eta_v$	Volume efficiency	[%]
$\lambda L$	Length scale ratio	[-]

# 제1장 서론

## 1.1 연구 배경 및 문제점

수차는 오랜 기간 동안 사용해 온 에너지 시스템이다. 특히 원전의 위험성 등을 고려하여 신재생에너지 확대 정책의 일환으로 소수력 분야의 프란시스 수 차 수요 또한 증가하고 있다.

지금까지 국내 소수력 개발은 4대강 수력발전소의 경우와 같이 해외 수차제 작 기술에 의존해왔으며, 수차제작 기술 국산화에 노력을 기울여 왔다. 그러나 용량증가에만 집중해 수차 효율증가에 다소 부족한 부분이 있었지만, 최근에는 소수력 개발이 활성화되어 국내 수차를 이용한 수력발전소가 증가하고 있으며 효율 또한 외국 수차효율 80%에 이를 정도로 기술력이 향상되고 있다.

현재 세계 수력 시장의 점유율 상 가장 큰 지분을 차지하고 있는 것은 중국 의 업체들이지만 이는 압도적인 내수율에 기인한 것이므로, 아직까지 전통적인 강자인 유럽업체(예, Alstom과 Andritz, VOITH) 등의 강세가 이어지고 있다고 볼 수 있다. 유럽의 선진 업체는 비속도별 런너 블레이드 프로파일을 습득하고 있음은 물론 콘, 케이싱, 홉출관 등 세부 부품의 설계에 대한 노하우도 상당부 분 축적한 것으로 예상하고 있으나, 이러한 부분은 정량적으로 나타내기 어렵 고, 기술 보안이 뛰어나 노출된 것이 거의 없다.

수차 효율에 영향을 미치는 요소는 다양하다. 효율을 측정하는 방법은 여러 가지이나 그 중 가장 중요하고 보편적인 방법의 하나는 모델 수차를 이용한 성 능시험이다. 다양한 실험값과 실험실 밖의 다른 유사한 실제 상황의 현상을 설 명할 수 있도록 상사 법칙(similitude)의 개념을 사용함으로써, 실물을 만들지 않 고도 수차 효율에 대한 예측이 가능하다.

본 연구는 수차 효율을 높이고자 설계를 실시할 때 어떤 절차를 따라야 하는 지 표준 프로세스를 제시하고, 효율에 영향을 미치는 상세형상 결정을 국산화 한 사례를 제시함으로써 수차 효율 최적 변수를 결정할 수 있는지 확인하고자



한다. 그리고 이론 수식으로 얻은 계산값과 설계 이후 수행하여 얻은 CFD 모 형의 오차를 비교하여 국산화 설계기술의 타당성을 검증하여 효과적 최적 솔루 션을 찾을 수 있는지 여부를 고찰하고자 한다.

## 1.2 기존의 연구

#### 1.2.1 수차 설계 최적화

수차 설계 최적화를 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 국내 설치된 프란시스 수차를 역설계하고, CFD를 통해 성능향상을 연구하기도 하고, 기술력 부족으로 인한 효율개선 한계에 봉착한 업체들에 설계기술을 제공하기 위하여 유동해석 을 활용한 연구를 수행하기도 하였다. 또한, 마이크로 튜블러 수차의 성능개선 에 관련 연구(박지훈, 김유택, 황영철, 이영호, 2010.)등도 수행되었으나, 대다수 가 CFD를 중심으로 연구되거나 개선 착안 및 효율 향상을 연구하였다. 혹은 수차 모델의 성능에 대한 연구를 통하여 실험으로 모델의 유효성 검증을 수행 하거나 특정 부위의 변화에 따른 수차의 특성 변화 연구가 주를 이루고 있으 며, 설계의 표준화 및 설계 프로세스 과정 내 국산화를 위한 설계기술 검토 등 에 관한 연구는 아직 사례가 많지 않은 것도 사실이다. 다만, 풍력터빈이나 항 공 역학에서의 블레이드 설계(사정환 등, 2009) 및 성능평가에는 다양한 최적화 와 소프트웨어 개발(모장오 등, 2011)이 시도되어 국산화를 위한 노력이 일부 엿보이기도 한다.

#### 1.2.2 국산화 설계 활용

프란시스 수차에 대한 대표적인 국산화 연구로 '중·저낙차 프란시스 수차 국산화 개발'이 2005년 산업자원부 지원으로 진행되었으며, 이때 런너 시제품 제작의 경험을 축적하기도 하였다.(이철형, 박완순, 2005) 또한, '프란시스 수 차의 진동과 효율 특성에 관한 연구'를 수행하여 부분적인 성능향상을 위한 설계 국산화 노력(박노천, 이용철, 장현욱, 2008)도 있었으나, 실제 제품이 실증 을 거쳐 상용화된 사례는 본 연구 이전에는 진행된 경우는 찾아보기 힘들다.



# 제 2 장 수차 시스템 구성 및 일반

## 2.1 마이크로 수차 시스템

Collection @ kmou

수력발전은 높은 위치에 있는 하천이나 저수지의 물을 낙차에 의한 위치에너 지를 이용하여 수차의 회전력을 발생시키고 수차와 직결되어있는 발전기에 의 해 전기에너지를 변환시키는 방식이다. 2005년도 이전에는 설비용량 1만kW를 기준으로 소수력(Small hydropower)과 수력(Hydropower)을 구분하였으나, 신에 너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 시행 규칙 개정을 통하여 설비용량을 삭 제하였다.

소수력 발전의 원리는 일반적인 수력 발전과 차이가 없으나 대규모 수력발전 이 환경에 부정적 영향을 미치는 반면, 소수력 발전은 국지적인 지역 조건에 설치가능하고 환경친화적 발전이 가능하다는 장점을 보유하고 있다. 국내 소수 력 발전은 1982년 이후 정부의 지원으로 현재까지 44여 개 지역에 용량 약 57,534kW가 설치되어 있으며, 연간 전력 생산량은 약 157,510MWh에 달하고 있 다. 소수력 발전시스템은 수압판과 수차, 흡출관 부분으로 연결되는 곳에 조절 밸브가 있고 그 윗부분으로 연관되어있는 구조에는 변속기와 발전기가 설치되 어 있다.(한국수자원공사연구원, 2012) 소수력의 가장 중요한 설비는 수차 (turbine)이며, 형식에 따라 크게 충동수차와 반동수차로 나누고 있다. 또한, 소 수력 발전은 전기에너지를 생산하는 설비용량, 낙차 및 발전방식에 따라 분류 하지만 국가별이나 지역 및 기관별로 별도 기준을 편의에 따라 제시하기도 한 다.

수차는 하천 또는 저수지 등에 설치하고 물이 가지고 있는 위치에너지로부터 전기에너지를 얻는 수력발전시스템에서 가장 중요한 핵심 기기로서, 물의 위치 에너지를 기계에너지로 변환시키는 유체기기이며, 이 수차에 발전기를 연결하 여 전기를 생산하는 보편적 구조물을 말한다.





Table 1	Types and	characteristics of	turbines
---------	-----------	--------------------	----------

구분	수차의 종류			
충동수차	_ 펠톤(Pelton), 튜고(Turgo), 오스버그(Ossberger)			
	프란시스수차(Francis)			
반동수차	프로펠러 수차 카플란(Kaplan), 튜블러(Tubular), 벌브(Bulb), 림(Rim)			
	1945			

# Table 2 Small hydro power classification

구 분	분 류		
	Micro hydropower,	100kW미만	
설비용량	Mini hydropower,	100~1,000kW	
	Small hydropower	1,000~10,000kW	
	저낙차(Low head)	2~20m	
낙차	중낙차(Medium head)	20~150m	
	고낙차(High head)	150m이상	
	수로식(run-of-river type)	경사가 급한 중상류지역	
발전방식	댐식(Storage type)	경사가 작고 유량이 큰 지점	
	터널식(Tunnel type)	형태가 오메가(Ω) 지점	

수차는 프란시스(Francis), 카플란(Kaplan), 펠턴(Pelton) 등 다양한 종류의 수 차가 있고, 물의 낙차와 유량에 따라 최고의 효율에서 작동할 수 있는 영역이 있다. 소형 프란시스 수차는 이 중에서도 특히 낙차 범위도 넓고 효율이 높아 국내외에서 가장 많이 설치하여 사용 중이다.

발 전 방 식	고 낙 차	250m이상, 폘턴수차
	중 낙 차	35~250m, 프란시스 수차
	저 낙 차	35m이하, 카프란, 프로펠러, 벌브수차 등

Table 3 Type of hydro turbine by head



# 2.2 프란시스 수차 시스템 구조 하//

압력을 가진 물이 터빈으로 들어가서 터빈의 런너(RUNNER)를 회전시키면서 에너지를 소진한 후 흡출구(draft tube)를 지나 방류 수로로 방출되는 형식의 터빈을 반동터빈(reaction turbine)이라 하고, 프란시스 터빈은 여기에 속한다. (이응천, 2011)

프란시스 터빈은 유량이 축에 대해 원주 방향으로 유입(radial flow)하여 런너 중앙의 축방향으로 흘러나가도록 설계된 형식이다. 주요 구성요소는 고정 버켓 이 장착된 런너(runner), 런너로 물을 공급하는 케이싱(casing), 유량을 조절하고 런너에 유량을 골고루 배분하는 위킷게이트(wicket gate), 런너 밖으로 유량을 내보내는 드래프트 튜브(draft tube) 등이 있다. 수평축과 수직축 형식으로 나뉘며, 수직축은 고가의 비용이지만 평면 면적을 작게 차지하고 방수위에 비하여 터빈을 낮은 위치에 깊이 설치할 수 있다. 런 너로 물을 공급하는 케이스(spiral casing)은 15m 미만 낙차에서는 개거(open flume)나 콘크리트 케이스를 이용하기도 한다. 소규모의 프란시스 터빈에서는 5m 이하 낙차에서도 운영 가능하고, 최소 사용유량은 40%정도까지이며 효율은 낙차와 유량에 따른 변동 폭이 커서 75~95%의 범위이다.

비속도의 함수에 따라 터빈 단면과 최대효율이 결정된다. 이때 주어진 터빈 의 실제효율은 터빈의 상세 형상에 강하게 영향받으며, 효율적 설계를 위해서 는 신중한 해석과 실험이 필요하다.(고형종, 권오붕, 김용직, 2001)





Fig. 3 Runner(Shinhan Precision Holdings)

다양한 종류의 수차 중 프란시스 수차는 적용 가능한 낙차, 유량의 범위가 넓어 소형 수차부터 대형수차까지 많이 채용되고 있으며, 유량을 조절할 수 있 는 기구인 가이드 베인을 설치하여 유량조절이 최우선되는 경우에도 사용하고 있다. 프란시스 수차에 있어 수류는 회전축의 가로방향에서 물이 유입되어 수 차 내에서 축방향으로 방향이 바뀌어 유출되기 때문에 방향이 직각으로 바뀌는 특징을 가지고 있다.



Fig. 4 Francis turbine

프란시스 수차는 회전비속도에 따라 일반적으로 저낙차, 중낙차, 고낙차, 초 고낙차로 분류하며, 수차의 수류 형식을 보면 예상할 수 있듯이 고낙차와 대출 력의 경우가 저낙차와 소마력의 수차보다 효율이 높은 특징이 있다. 따라서, 각 형식의 회전비속도 범위를 벗어난 영역에서는 효율이 좋은 수차를 설계할 수 없으므로 유의하여야 한다.

Table 4 S	pecific spe	ed range	e for ea	ach type	of	turbine
-----------	-------------	----------	----------	----------	----	---------

수차	Ns (m 단위)	
펠턴수차	single nozzle	10 ~ 25
	double nozzle	20 ~ 40
	저낙차	60 ~ 100
고리기 시 스키	정상차	100 ~ 200
프던지스구자	고낙차	200 ~ 350
	초음속차	350 ~ 450
프로	400 ~ 700	
카플	450 ~ 1000	

국내에서 운영 중인 소수력 발전소는 약 51개소이며, 수차의 대수는 약 129 대에 이르고 있고, 그 중에서 제원파악이 불가한 26대를 제외한 103대를 대상 으로 비교한 결과 수차의 형식은 대부분 반동 수차인 프란시스 수차, 프로펠러 수차, 카플란 수차, 벌브 수차가 90% 이상을 차지하고 있으며, 소형 프란시스 수차발전시스템 효율 향상 기술개발에 필요한 핵심기술은 '소형 프란시스 수 차 및 구조물 유동해석을 통한 표준 설계기술', '소형 프란시스 표준형 런너 설계기술', '소형 고효율 유도발전기 설계 기술', '소형 프란시스 수차발전 기 표준 제어시스템 설계기술', '소형 프란시스 수차발전기 성능시험 및 실 증' 등 다양한 기술이 필요하다.

#### 2.3 수차 종류의 선정

고객의 요구에 맞도록 수차를 선정할 때에는 각각의 효율을 고려하여 최적의 효율을 나타낼 수 있는 수차 형식을 선정하게 된다. 이때 영향을 크게 미치는 요소는 낙차와 유량, 시설용량(출력) 등에 따라 적절한 수차의 형식을 결정해야 한다.

LND OCE

또한, 수차의 제작비용과 수차 운용에 따른 경제성 분석을 통하여 수차의 운 용범위에 따른 형식을 결정하여야 한다. 최적 효율보다 경제적 효율을 중시한 선택도 가능하다.

예를 들어, 희망출력 150kW, 높이 7.3m. 유량 1일 25만 톤의 상황에 맞는 수 차 형식을 결정하려고 할 경우, Q = 2.8m<sup>3</sup>/s, H = 7.3m, η = 85%, 발전기 효율 94%로 가정하면, 수차의 출력 P는 아래와 같다.

 $P = 9.8 \times 2.8 \times 7.3 \times 0.85 \times 0.94 = 160 \,(kW) \tag{2}$ 

이럴 경우 출력과 수두(head)를 고려하여 튜블러 수차를 적용하는 것으로 의 사결정을 내릴 수 있다. 다만, 수차의 설치 현장상황이 폐회로형 배관이거나 수 도관 같이 공사가 어려운 경우에는 출력이나 경제성을 적절히 고려하여 수차의 형식을 달리 선정할 수 있으며, 이러한 의사결정의 경우에는 고객의 의사가 충 분히 반영되어야 한다.



Fig. 6 Selecting turbine type by head and power

#### 2.4 프란시스 수차 시스템 설계

일반적으로 수차의 형식이 선정되고 난후에 프란시스 수차를 개발하고자 할 때에는 먼저, 비속도별로 그룹화하여 구분하고, 각 그룹별로 대표형상을 지정한 다. 그 후, 런너의 익형(翼型)을 재설계하여 효율을 극대화하고, 제작방식을 선 정하는 절차를 따르게 된다.



Fig. 7 Design of runner blade and manufacturing technique

수차에 가장 중요한 핵심 부품의 하나인 수차 런너를 설계할 때 기존에는 2D 설계를 활용하였으나, CAD 해석기술의 발달로 인하여 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 많이 활용하고 있다. 설계에 필요한 고급기술을 확보하기 위하여 분류해보자면, '프란시스 수차 회전비속도별 표준 런너의 설계 기술', '프란 시스 수차의 Spiral casing, Draft tube 등 요소별 최적 성능개선', '최적화를 통한 표준설계기법 개발', '상사 모델의 개발', '수차 수력 설계·해석' 등이 필요하며, 이러한 설계기술을 반영할 제작기술이 필요하다.

수차 런너의 설계시 가장 중요하게 고려해야 하는 부분 중 하나는 런너의 형 상(Configuration)이다. 프란시스 수차는 넓은 범위의 낙차와 유량에 적용하여 사용하게 되므로 운용 요구조건에 반응하기 위하여 여러 가지 형태의 런너가 필요하고, 형태에 따라 효율이 달라진다. 일반적으로 고낙차 지점에서는 유량이 적고, 저낙차 지점에서는 유량이 많은 설치 환경에 맞게 고낙차 런너는 런너 직경의 입구(Inlet) 폭이 좁고, 출구(Outlet) 직경이 작게 만들어지고, 반대로 저 낙차용 런너는 입구(Inlet) 폭이 넓고, 출구(Outlet) 폭이 좁아지는 경향을 가지 고 있다.

국내 소수력 발전의 경우, 회전비속도가 주로 50~350rpm의 범위 내에서 운영 되는 경우가 많고, 따라서 3개 그룹으로 구분되어 런너의 형상을 달리 취하고 있다. 회전비속도(N<sub>s</sub>, specific speed)는 수차를 단위낙차 1m에서 운전시켜 단위 출력 1kW를 발생시키는데 필요한 1분간의 회전수를 의미하는데, 산출을 위한 식은 식(3)에 나타내었다.(European Small Hydropower Association, 2004)

N<sub>s</sub> = 
$$\frac{NP^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}$$
 (3)  
N<sub>s</sub> : 회전비속도(rpm), N : 정격회전수(rpm),  
H : 유효낙차(m), P : 수차출력 (kW)  
Fig. 7은 회전비속도 그룹별 런너의 일반 형상을 보여준다.(이종순, 2004.)



Fig. 8 Shape of turbine according to specific speed

수차 시스템 설계에 필요한 회전비속도 결정 후, 수차의 형상을 결정하고 나 면, 적절한 모델을 우선 개발하여야 한다. 토목공사가 수반되는 수력발전의 특 성상 설치 후 변경이 어려운 점을 고려하여 모델을 우선 개발하여 시험을 거치 게 되는데, 이때 가공기술도 고려해야 가장 효율적인 모델이 개발될 수 있다. 모델 개발 및 선정에는

- 설계 변형 런너의 모델링 및 런너 블레이드부 가공 기술 검토

- 유효낙차에 따른 블레이드 깃수 결정

- 모형 실험을 위한 회전비속도 맞춤형 표준 런너 설계

등의 고려가 필요하다.



procedure

## department

## 2.5 수차 시스템 제어

수차를 운용하기 위해서는 다양한 제어시스템이 필요하다. 수차는 운용환경 의 변화 폭이 매우 넓으며, 늘 물을 접하는 특성상 제어의 컨트롤이 쉽지 않다. 다양한 변화 조건을 관리하기 위하여 국제전기기술 위원회(IEC, International Electro-technical Commission)에서는 다양한 제어표준을 만들었다. 이를 차용하 여, 국내에서는 KS C IEC를 통하여 소수력에 필요한 표준을 제공하고 있으며, 소수력을 운용·제작하는 기관에 따라 상이하여 기업의 입장에서는 호환이 어 려울 경우가 많다. 소수력발전 제어시스템은 각각의 개발업체에 종속적으로 작 업이 이루어지고 있다. 경제성을 고려하여 각 기업들은 소수력에 필요한 최소 한의 기능을 모듈 별로 구성하지 않음으로써, 유지보수 및 추가 확장성에 대비 하지 못하여 비용적 낭비를 유발하기도 한다.

제어시스템을 위한 각각의 기능을 보다 표준화하여 제공함으로써, 신규 수차 시스템 개발에 필요한 제어시스템 구축에 있어 빠른 고객 대응과 저비용 고효 율의 맞춤형 제어시스템을 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 제어시스 템을 구축, 운용하는데 필요한 지침과 여러 가지 국내외 표준을 Table 5에 정 리 나열하였다.

표준번호	Title	
KS C IEC 61116:2006	소수력발전 설비용 전기기계 장비 지침	
KS C IEC 60308:2006	수력 터빈-제어시스템의 시험	
KS C IEC 61362:2006	수력 터빈 제어시스템 규격 시방 지침	
KS C IEC 62270:2006	수력 발전소 자동화-컴퓨터 기반 제어 지침	
IEC 60308	Hydraulic turbines -Testing of control systems	
IEC 61362	Guide to specification of hydraulic governing systems	
IEC 62270	Hydroelectric power plant automation - Guide for computer-based control	
IEC 60193	Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests	
IEC 62006	Hydraulic machines - Acceptance tests of small hydroelectric installations	
Guidelines for small hydro development	Guidelies for selection of control SHP stations	

 Table 5 List of standards related to small hydropower generation

 control system



제어시스템 표준화안을 제시하는데 필요한 내용 중 또 하나는 기존 시스템의 분석이다. 기존 시스템의 각 세부 기능을 분류하여 하위단계로 분해 (decomposition)하여 필요한 기능과 자원을 세분화하는 작업이 필요하다. 본 연 구에서는 국내 설치 운영 중인 7개소를 대상으로 하여 제어시스템의 기능 공통 성과 차이를 나타내고자 표로 정리하였다. 정리 분류하는 작업은 우선 IEC61362의 제어시스템 규격시방 표준에 나타난 기능을 정리하여 표로 만든 후, IEC60308의 기능별로 분류하였다. 그 다음 실제 운용중인 주암댐의 기능을 정리하고 관련 제어시스템 자료를 분석하여 표로 나열하였다. 세 가지 경우를 Table 6, Table 7, Table 8에 각각 다음과 같이 확보하였다.(KS C IEC 61362, KS C IEC 60308, 2006)

분석 대상은 소수력 혹은 미니수력으로 구분되는 1MW 이하 급의 소형 수력 발전시스템이며, 유도발전기와 프란시스 수차가 해당된다. 분석 대상은 전력계 통 구성과 감시제어계통의 구성으로 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 나누었다.



Fig. 11 Power system configuration diagram



Fig. 12 Monitoring control system configuration diagram





WBS	Lev1	Lev2	Lev3
1			
1.1		속도제어	
1.2		초려╖싮	사이 /호르 /개바레이
1.2.1		굴덕세어	구위/흐름/개방세어
1.3			비려그즈
1.3.1			8 2 T T
1.3.2		조하 제어 자키그서	직렬구조
1.3.3		응답 세이 성지구성	기타구성
1.3.4			서보포지셔너 구성
1.3.5		ANNE AND	다중제어
1.4		RIIII	미데리 미 디지터 시무레이셔
1.4.1			그 글 이 옷 먹지 글 지 줄데 하면
1.4.2			PID 제어기 특성 매개변수
1.4.3	주 제어		기타 매개 변수
1.4.4	기능		서보 포지셔너 간의 기능적 관계
1.4.5		-011	실제 신호 측정
1.4.6		194	수동 제어
1.4.7			선형화
1.4.8		제어장치 성능 및	후속 점검 제어
1.4.9		구성요소	최적화 제어
1.4.10			진폭기 병렬 포지셔닝
1.4.11			동작 에너지 공급(어큐뮬레이터)
1.4.12			전자제어 시스템 전기공급
1.4.13			동작 전이
1.4.14			안전 장치/회로
1.4.15			추가설비
1.4.16			조속기 구성 요소 환경 적합성
1.4.17			전자기 적합성

Table 6 Functional classification in control system specification standard of IEC 61362

WBS	Lev1	Lev2	비고
1.1		제1차모드	속도제어, 전력제어, 개도제어
	- พ่อไปไหรมี เปิรม		수위제어, 위치(개도) 제어,
1.2	세어시스템 논세	제2차모드	유량제어, 최적화 제어(스테이션
			제어)
0			서지(surge)제어, 압력제어, 기동과
Z	기타 세어 /	시스템과 선완	동기화, 셧다운과 부하차단
			전기-유압 및 전기-기계 변환기,
	-11.01.11.1		제어밸브, 서보모터, 압력오일 공급
3	세어시스템	넴 검포넌트	시스템과 에너지 저장, 전기전자
			시스템에 대한 보조 전원
			안전 셧다운, 과속보호,
4	안선	1기능	연동(interlock), 크리프(creep)검축
5	환경	<u> </u>	진동, 기후조건
6	전자기	적합성	전자기 적합성, 장해 발생원
7.1			안전장치, 발전기 유닛 시운전,
7.0		신규 제어시스템	무부하운전, 제어기 둔감성,
1.2	시험		제어기 파라미터
7.0		기조 피신 기소테	제어 결함 표시, 결함 식별,
1.5		기존 세이 시스템	기존 제어시스템 교체 및 수리여부
8.1		zi oj 1945	허용 한계치, 맥동률, 전류입력,
8.2		신편	고장 감시
83		과전압보호와	-11
0.5	전기적 점검	장해전압의 억제	
		프로세스	
8.4		인터페이스 시스템	
		시험	
9.1		 전기-유압 변화기	
9.2			
9.3		<u> 선기-기계 먼완기</u> 2Fb게	
0.4	버희리 조고리	4년계	
9.4	면완기, 증폭기	선거-기계/유압	
	및 액주에이터	제어	
	시험		에어떨므, 서모모터, 서모모터
9.5		유압승폭기	개폐방식, 데드타임, 눈감성,
			오일누출
9.6		<u> </u>	어큐뉼레이터 유무
9.7		역과	

Table 7 Functional classification in IEC 60308 control system test standard

WBS	Lev1	Lev2	Lev3
1			하드웨어 공통, 회로 정밀도,
			계기 및 회로용 전력, 루프
		일반사항	분류기 및 변환기, 환경
1.1			적격성, 신호준위, 제어반
			동력공급
1.2		정보통신설비	
			경보표시 기능, 플랜트
1.3		OS	감시화면, 트랜드 화면, 시스템
	시스템구성		상태 화면, 오퍼레이트 기능
1 /		으저제어 바아	감시 및 제어 방안,
1.4		군 관계 이 정 관	🕖 수차유입밸브, 발전기,
15		रन्त्रम	일반, 원격감시제어설비,
1.0			원격감시제어장치, 각 Board,
	1		RTU System S/W, RTU
1.6		원격감시제어설비(RTU,	요구조건, 기타 부속설비,
1.0		Remote Terminal Unit)	Surge Arrester, Interface
		roll	Module
2	네트워크	1945	
3		일반다	
3.1			
3.2	표순감시제어화	HMI	
3.3	면	Console 프로그램	
3.4		모니터 Display P/G	
3.5		Reporting P/G	
4	고장경모		
E	시스템		
р 5 1	설비보호체계	피뢰기 및 서지보호기	
5.1			시승요 서지비승기 DC 투시요
		자재	·교포등 시시포오기, N3 중신용 서지보호기
6	데이터 연계		
7	보안관리		

Table 8 A part of the standard function of a dam(juam) in operation

이 때, 기능별 분류는 IDEF Ø의 다이어그램을 사용하여 분류하였고, 각 레벨 은 WBS(Work Breakdown Structure)를 일련으로 부여하였다. IDEF Ø 기능 모델 링(IDEF Ø functional analysis) 방법은 의사 결정, 작업 혹은 활동, 그리고 조직 이나 시스템의 유기적 활동을 모델로 설계하기 위한 것이다. IDEF Ø는 구조적 분석 및 설계 기법(SADT)로 잘 알려진 그래픽 언어에서 파생되었다.(Richard J. Mayer, 1990.)

소수력발전 시스템의 제어시스템 구성의 최상위 레벨은 플랜트 제어시스템으 로 표현하였다. 플랜트 제어시스템은 기능에 따라 계층제어와 플랜트 제어로 나눠지고, 각각의 하위 기능으로 Decomposition을 수행할 수 있게 된다. 플랜트 제어시스템의 경우 크게 계층제어와 플랜트 제어 2개의 상위 레벨로부터 각 기 능을 세분화하였다.



Fig. 13 Top level of control System configuration





Fig. 15 Plant control functional diagram

## 2.6 수차 시험설비의 제작

수차를 설계하고 제어시스템을 개발한 후에는 시험/설치 등의 다양한 후속절 차를 진행해야 한다. 후속 절차를 진행하기 위한 첫 번째 작업으로 수차를 제 작하여야 한다.

설계된 수차는 수학적 해석 및 설계에 따라, 치수가 표준화 치수와 달리 나 오게 된다. 제작에 있어서는 부품 및 센서, 계측기, 발전기 등의 시스템 조합을 위하여 표준화된 치수가 필요하며 별도의 제작도가 제시되어야 한다.

이런 다양한 절차를 진행함에 앞서 시험설비를 통하여 수차의 성능을 테스트 하고, 설계보정을 우선 확인할 필요가 있으며, 특히 상수관망 활용을 위하여 수 압 및 유량의 시험데이터가 꼭 필요하다.

본 연구에 앞서 국내에서는 수차 시험의 공인기관이 부재한 관계로 기업에서 는 자체 시험설비를 보유하고자 하였으며, 다양한 설비 중 프란시스 수차의 시 험설비를 사용하였다.



Fig. 16 Francis turbine testing equipment
## 제 3 장 수차 관련 표준 및 시험규격

## 3.1 수차 관련 표준 및 규격의 정리

수차를 개발하기 위하여 다양한 규정을 고려하여야 한다. 크게 수차 시스템 을 구분하면, 동력을 생성하는 수차부와 발생동력을 전기로 변환하는 발전부, 그리고 수차부와 발전부를 제어하는 제어부로 나눌 수 있다.

각 부분에 관련된 표준을 정리하면 Table 9와 같다.

국가 (기관)	표준번호	Title		
INDIA	N/A	Standards / Manuals / Guidelines for Small Hydro Development		
INDIA	N/A	Standards / Manuals / Guidelines for Small Hydro Development		
한국	KS C IEC 61116	소수력발전 설비용 전기기계 장비 지침		
한국	KS C IEC 60308	1945 수력 터빈-제어시스템의 시험		
한국	KS C IEC 61362	수력 터빈 제어시스템 규격 시방 지침		
한국	KS C IEC 62270	수력 발전소 자동화-컴퓨터 기반 제어 지침		
IEC	IEC 60308	Hydraulic turbines -Testing of control systems		
IEC	IEC 61362	Guide to specification of hydraulic governing systems		
IEC	IEC 62270	Hydroelectric power plant automation - Guide for computer-based control		
IEC	IEC 60193	Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests		
IEC	IEC 62006	Hydraulic machines - Acceptance tests of small hydroelectric installations		

Table 9 Theorem on the turbine standard



소수력 분야의 수차 개발에서는 정해진 하나의 표준을 별도로 만들어 제시하 기보다는 국가적, 지리적 특성과 경제성 등을 고려하여 기존 수력분야 개발 관 련 표준을 차용한 경우가 많다. 표준을 정리하다 보면 크게 설치와 시험으로 나뉘는데, 시험의 경우 상사 법칙을 활용하여 모델 승인시험으로 현장을 가늠 하게 된다.

비록 본 연구가 국산화를 기점으로 진행하더라도 국제적 표준 규격의 충족시 키는 것은 최소한의 필요조건이므로, 국산형 수차 설계를 위해서는 IEC60193의 규격들을 만족시켜야 한다. 따라서, IEC60193의 설계 관련 부분을 발췌하여 요 약 정리하고자 한다.

# 3.2 IEC60193 수차의 시험

IEC60193은 반동수차, 저장펌프, 펌프-터빈 모델에 적용된다. 다만, 단위전력 이 5MW 이상이거나 직경 3m 이상인 프로토 타입 기계에 적용되며, 그 이하 규모에 대해서는 구매자와 공급자간의 계약에 따라 적용 가능하도록 명시하고 있다. 또한, 비교시험과 연구 및 개발 작업을 위한 모델 시험에도 적용될 수 있 으므로, 본 연구에서 추진하는 설계 모델의 목표값 설정에 충분히 활용할 수 있다.

수력 기계의 성능은 유체역학 효과에 따라 기인한 모든 성능 매개변수를 이 야기하고 이 중 고려되어야 하는 주요 수력성능은 전력, 방출, 비유압 에너지, 효율, 안정상태 무구속 속도 및 방출, 캐비테이션(cavitation)의 영향 변수이다. Table 10과 Table 11에는 각 매개변수에 영향을 끼치는 구성 세부도와 용어를 정리하였다.



- 23 -





(닫힌 위치: α = 0° 또는 a = 0 mm)

Fig. 17 Details of Francis turbine

Table	10	Definition	of	turbine	geometric	terms
		-				

용어	정의	기호	단위
구역	일반적인 흐름 방향에 대하여 정상적인 순횡단면(net cross section) 면적	А	m <sup>2</sup>
안내깃(Guide vane, 가이드베인) 개구부	인접한 안내깃들 간의 평균 최단 거리 (필요한 경우 명시된 구역에서)	а	m
안내깃 각도	닫힌 위치에서 측정된 평균날개깃(vane) 각도	α	0
니들 스트로크 (needle stroke) (임펄스 터빈)	닫힌 위치에서 측정된 평균 니들 스크로크(needle stroke) 1945	S	m
런너/임펠러 블레이드(날개깃) 각도	기준 위치에서 측정된 평균 런너/임펠러 블레이드(날개 깃) 세팅	β	o
기준 직경	제시된 수력 기계의 기준 직경	D	m
런너(runner) 유출구/임펠러 유입구 width	런너/임펠러의 두 개의 인접한 블레이드(날개깃)들 간 의 평균 최단 거리	al, a2	m
버킷 너비	Pelton 터빈의 런너(runner) 버킷의 내부 최대 너비	В	m
길이 척도 율(length scale ratio)	모델의 길이에 대한 대표적인 프로토타입의 비율. 일반 적인 경우, 이것은 기계의 기준 직경이다. 이 기준을 확인하기 어려운 경우, 또 다른 중요한 길이를 취할 수 있다.	λL	-
레벨	시스템 내 점(point)이 '명시된 기준 데이터'를 초과함 (일반적으로 해수면(sea level)을 의미)	Z	m

표준에서 명시하고 있는 주요 매개변수 중 하나는 효율성에 관한 부분이다. 설계에서 꼭 고려되어야 하며, 향후 연구과정에서 변화값을 추적해야 하는 기 준치로 활용될 것이다. Fig. 18과 Table 11에는 단면도와 기호를 나타내고 있 다.

Table 11 Symbols and

formulas used for turbine

efficiency

e	기호/설명	수식
└└ ↓ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	q	q' + q"
Ⅰ <sup>PL</sup> <sup>~</sup> 축(shaft)의 커플링(결합)	Q1(유량)	Qm + q
	$P_h$	$\boldsymbol{P}_h = \boldsymbol{E} \times (\boldsymbol{\rho} \times \boldsymbol{Q})_1$
	P	$P = P_m - P_{LM}$
	$\eta_v$ (체적효율)	$\eta_v = \frac{Q_m}{Q_1}$
	$\eta_h(수력효율)$	$\frac{P_m}{P_h}$
Fig. 18 Sectional view of the turbine	$\eta( ilde{\mathbf{a}} \mathbf{b})$	$\frac{P}{P_h}$
수차의 주요성는 기주	67	

## 3.3 수차의 주요성능 기준

Collection @ kmou

#### 3.3.1 수력 효율

수력 효율은 물과 교환되는 수력(hydraulic power)P,와 런너 및 축의 결합 (coupling)을 통해 전달되는 기계력 P<sub>m</sub>으로 계산한다.

$$\eta_h = \frac{P_m}{P_h} \tag{4}$$

정의에 따라 원판 마찰 손실과 누출 손실은 유압 손실로 간주하여 필요한 보 정을 거치지 않으므로 무시하고, 원칙적으로 유량 Q, 비유압에너지 E, 토크 T, 회전속도(회전수) n으로 결정한다.

#### 3.3.2 효율 및 시험 결과의 계산

특정 포인트에서 정해진 운용조건하의 모델 수력 효율은 식(5)로 계산하게 된 다.

$$\eta_h = \frac{2\pi n T_m}{E(\rho Q)_1} \tag{5}$$

모델 시험을 통해 확인된 성능 매개 변수는

- 기하학적 매개변수

- 독립적 유압 변수

- 종속 유압 변수

로 구분되며, 이때, 유량과 속도인자 또는 유량과 에너지 계수를 사용하여 성 능효율곡선(Hill Chart)를 작성하게 된다. 정의된 변수는 Table 12와 같다.

ANNE AND OCE

	roll	기계 유형					
	단일 조절형	이중 조절형	비조절형				
기하학적 매개변수	α 또는 β 또는 S	α및 β	-				
독립적 유압 변수	$E_{nD}, Q_{nD}, \sigma_{nD}$ 또는 $n_{ED}, Q_{ED}, \sigma$	$egin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	$egin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$				
종속적 유압 변수	$\eta_h, \ P_{nD}$ 또는 $P_{ED}$	$\eta_h, \ P_{nD}$ 또는 $P_{ED}$	$\eta_h, \ Q_{ED}$ 또는 $E_{nD},$ $P_{nD}$ 또는 $Q_{ED}$ 또는 $n_{ED}, P_{ED}$				
무구속(runaway) 시험에 대하여 ηh = 0 및 PnD = PED = 0: 단일 조절형 기계의 경우, <i>E<sub>nD</sub></i> , <i>Q<sub>nD</sub></i> (or <i>n<sub>ED</sub></i> , <i>Q<sub>ED</sub></i> )들 중의 오직 하나만이 독립							
변수임							

Table 12 Variables that define efficiency



#### 3.3.3 모델과 프로토 타입의 치수 체크

제작된 모델의 모든 주요 구성요소는 치수검사를 거쳐야 한다. 반동터빈인 프란시스 터빈은 다음과 같은 구성요소를 포함하고 있다

- 스파이럴 케이싱, 스테이 링, 디스트리뷰터, 드래프트 튜브, 런너와 헤드커버

- 입구와 출구의 지름을 포함한 런너, 유입 높이, 런너 밴드와 크라운
- 런너 블레이드, 가이드 베인, 스테이 베인의 개수
- 가이드 베인, 스테이 베인, 런너 워터 통로의 폼
- 씰, 런너의 블레이드 팁 여유와 가이드 베인의 끝단 여유
- 기계의 모든 컴포넌트의 거칠기
- 런너 블레이드, 가이드 베인과 스테이 베인의 파형(waviness)

각각의 구성요소에 대한 검사요소와 기호는 IEC60193에 명시되어 있으며, 그 중 가장 중요한 몇몇을 요약하면 다음과 같다.

T : 가이드 베인, 스테이 베인 혹은 런너 블레이드의 최대 두께

- D : 수차 런너 지름
- *P<sub>i</sub>*; 블레이드 유입(inlet) 피치
- d : 노즐 구멍 지름

Collection @ kmou

- B : 런너 버킷의 최대 내부 너비
- a1 a2 : 런너의 고압과 저압에서의 조정 블레이드 사이의 개도

수차의 성능효율을 검증하기 위하여 검사대상을 선정할 때 고려해야 하는 기 준 중 하나는 블레이드 유입 프로파일이다. 이러한 블레이드 유입 프로파일은 적어도 6개 이상의 항목에 대한 측정 기준을 지켜야 한다.

- 프란시스 터빈의 최소 스피드에서 2개 섹션, 고속 스피드에서 3개 섹션을 검사
- 2) 전체 블레이드 프로파일(인렛 엣지부터 아웃렛 엣지까지) 측정 가능 하다면 특정속도 런너에 종속된 전체 표면 중 랜덤으로 적어도 하나 의 섹션을 선택
- 3) 블레이드 유입 각도는 측정 가능한 프로파일 위치를 선택
- 4) 블레이드 유출 프로파일은 적어도 3개의 섹션에서 측정
- 5) 선행 및 후행 에지 런너의 위치는 특정 스피드상에서 적어도 2 혹은 3개의 포인트에서 체크
- 6) 블레이드간의 유출 넓이는 각 블레이드에서 적어도 4개 포인트에서 검사



Fig. 19 Francis turbine runner shape and test subject

## 제 4 장 수차 설계

#### 4.1 설계 표준화

수력개발에서 가장 핵심은 수차이며, 1999년까지 카프란 수차, 튜블라 수차, 황류형 수차 개발이 진행되어 왔다. 2006년 에너지관리공단 신재생에너지센터 의 발표에 따르면 국내 국산화 및 표준화 기술은 선진국 대비 73% 수준에 머 물러 있다.(황영철, 2009, 2017)

수차 개발에 가장 중요한 요소는 설계 시 수차를 구성하는 각 부문의 적절한 설계값 계산과 원하는 성능효율을 확보하기 위한 CFD 분석 등을 통하여 최대 한 현실에 가깝게 모델을 구성하는 것이다. 수차는 주문제작형 제품으로 대당 단가가 비싸고, 설계점 조건에 따라 성능이 달라지므로 제작 이전 최대한 현실 에 가까운 분석이 아주 중요하다.

수차의 형상관리 및 설계점 관리의 표준화 및 DB화를 통하여 다양한 설치요 구에 대해 빠른 피드백과 적절한 성능예측을 제시할 수 있는 능력이 국내외 시 장에서의 경쟁력을 갖출 수 있는 생존 필수 조건이기도 하다. 이러한 설계 프 로세스 관리 및 형상관리가 일본이나 유럽 업체에 비해 국내 업체는 경험과 실 력이 부족하다.

#### 4.1.1 수차 설계 프로세스에 대한 기존 연구 분석

수차 설계는 기업별로 나름의 절차를 따르고 있으며, 대외비적 운영의 성격 이 강하다. 이러한 수차 설계에 대하여 효율곡선을 관리하는 것이 기업의 핵심 기술 관리이기도 한 특성을 가지고 있다. 이에 많은 연구자들이 수차 설계에 관한 연구를 추진하였으며, 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서 제공하는 NDSL (www.ndsl.kr)은 다양한 논문·특허·보고서·동향·표준·사실 정보 등을 제공 하고 있다. NDSL을 이용하여 수차 관련 논문을 검색한 결과 국내외 논문 87건 을 찾을 수 있었으며, 그중 설계 관련 논문의 목록은 아래 Table 13과 같다.



Table 13 Some representative papers related to turbine design

No	제목 및 내용	저자	연도
1	CFD를이용한 10kW급모델실험용 프로펠러수차의 유량 및 런너베인 깃수 변화에 따른 성능해석 - 대상 : 10kw급 모델 실험용 프로펠러 수차 - 가이드베인, 런너베인, 흡출관만을 계산 - 유동 및 수치해석을 위한 ANSYS-CFX 사용(tetra-prism mesh)	박지훈, 김유택, 조용	2014
2	유출각 변화에 따른 프란시스 수차 성능해석 - 대상 : 15MW급 프란시스 수차 효율/출력 계산 - 유출관 변화에 따른 효율 변화 계산 - ANSYS-CFX, SST 난류모델 사용(격자 140만개)	전진현, 변순석, 최영철	2013
3	런너와 가이드 베인의 연동을 통한 마이크로 카프란 수 차의 출력 최적화	박노현, 이영우	2013
4	5kW급 인라인 마이크로 수차 설계에 대한 연구 - 대상 : 수직 Kaplan 수차, 목표낙차 3m, 5kw급 - 설계 프로그램 TINN이용 계산, 무차원 설계 활용	박상언, 노형운	2012
5	유효낙차에 따른 80kW급 횡류수차의 성능 및 내부유동 해석	최영도, 임재익, 이영호	2010
6	황류수차 노즐형상이 성능과 내부유동에 미치는 영향	최영도, 임재익, 김유택	2008
7	마이크로 용적형 수차의 개발에 관한 연구	이영호, 최영도	2006
8	마이크로 관류수차의 최적형상 및 성능향상에 관한 연 구	자오린후, 이영호, 최영도	2006
9	카프란수차의 수력학적 성능특성	이철형, 박완순	2005

상기 논문 및 연구 중에 CFD를 활용한 단순해석에 관한 연구는 제외하였으 며, 연구 동향이나 수차 시험에 관한 실증 연구 역시 제외하였다.

또한, 'T1DD를 통한 저효율 프란시스 수차의 효율 향상에 대한 연구'(노형 운 등, 2010)의 경우에는 국내에 기설치된 해외 수차를 3D 스캐닝을 통하여 설 계 데이터를 추출하고, 이를 통해 런너 형상을 변형하여 런너의 성능을 향상시 키기 위한 연구를 수행한 과제이다. 이 연구를 통하여 런너의 성능이 90% 수준 으로 개선됨을 입증하여 보여준 사례이다.

본 연구에서는 이와 같은 역설계 사례가 아닌, 신규 런너 형상을 개발하는 과정을 표준화하고 설계 효율화를 시도하는 점에 있어 기존 연구와 차별을 가 지게 되었다.

## Reverse Design(1) -3D Scanning & DB

- We conclude that applying the renewal runner's shape and process of manufacturing using new technology can improve the efficiency.
- It is very difficult to design hydraulic with highly efficiency.
- Therefore, the shape of the vane is referenced from the high efficient numer of 500kW, well-designed runner.
- In the reverse design, it utilizes a highly efficient 500kW runner that has
  operated at a 90% efficiency rating since the dam was constructed in 1990.



Fig. 20 Study on improvement of low efficiency Francis turbine efficiency through T1DD



4.1.2 수차 설계 프로세스

4.1.2.1 수차 설계 프로세스의 단계별 구분

수차의 설계는 크게 2가지 단계로 구분할 수 있다. 1단계는 합리적 수차 설 계 프로세스이다. 기존 연구에 따르면 수차의 설치를 위한 설계 절차는 1)설치 지점의 조건 확인, 2)낙차(H) 범위 확인, 3)낙차에 따른 블레이드의 깃 수를 결 정, 4)수차의 스로트경 및 단위회전수 결정, 5)런너의 공칭외경과 수차 회전수 결정, 6)설치지점의 배관규격 및 구동조건의 변수 결정의 순서대로 진행한다. (황영호, 2009)

Fig.21은 기존 연구에 따라 합리적 수차 설계프로세스를 도식화한 것이다.



Fig. 21 Rational turbine design

process



- 32 -

1단계인 합리적 수차 설계 프로세스는 수차의 설치, 제어, 발전기 등을 포함 한 시스템 전체에 대하여 설계 절차를 설명하고 있다.

2단계는 순수하게 기계적 수차설계에 대한 것으로 범위를 한정할 수 있다. 2 단계에서 설계의 대상이 되는 것은 런너(runner), 가이드 베인(guide vane), 캐 비테이션(cavitation), 케이싱(casing), 드래프트(draft) 등이다. Fig. 22는 상기 절 차를 도식화한 것이다.



Fig. 22 Turbine design detail flow



수차의 효율에는 다양한 요소가 유기적으로 연결되어 영향을 미치게 된다. 특히, 효율에 중요한 설계점은 런너의 프로파일이다. 런너 프로파일을 획득하는 가장 정교한 방법은 실제 설치를 통한 실험치 테이블 확보이다. 각 기업은 런 너 프로파일 확보를 위하여 자체 모델의 개발 시험, CFD 시뮬레이션 검증 등 다양한 연구와 노력을 동원하고 있다.

#### 4.1.2.2 설계지원 프로세스

Collection @ kmou

수차 설계의 시작은 시스템의 이해와 시스템 설치환경 및 구조 배치에 관한 이해가 기본적으로 필요하다.(Alternate Hydro Energy Center Indian Institute of Technology Roorkee, 2011)



Fig. 23 Hydraulic power system installation structure layout chart

Fig. 23을 참고하면 알 수 있듯이, 수차의 설치에는 수류의 업스트림과 다운 스트림이 적절하게 움직일 수 있도록 배치가 되어야 하며, 축동력의 상실을 최 소화한 설치를 고려하여야 한다.

따라서 현장의 상황을 파악하고 수리학적 정보를 확보하는 것이 수차 설계의 가장 첫발을 내딛는 것이다. 이것을 수차 요항 혹은 수차 설계점 결정이라고 부른다,

## 4.1.2.3 설계지원 프로그램 프로세스 설명

본 연구에서 진행하는 수차 설계 절차는 크게 4가지 부분으로 나눌 수 있 다. 4가지 부분에 대한 각각의 설명은 다음과 같이 구분하여 나타내었다.

- 수차 요항 결정
- 모델 설계
- 효율 계산 및 보고서 작성
- 설치 및 운용환경 계산

Collection @ kmou

- 검토 함수

각각의 장은 우선 담당 역할 및 기능분석, 프로세스 설명과 그 다음의 화면 및 사용 변수의 모음으로 설명하였다. 기능의 분석 및 프로세스 설명은 용어가 일부 미흡하거나 부적절한 부분은 일본의 사례라든지 국내 산업현장의 용어를 차용하였으므로 추후 별도의 용어정리 연구가 추진될 필요가 있다.

1945

본 연구를 수행하는 과정에서도 약어나 용어의 혼돈이 프로세스의 무의미한 반복과 설계 지점에 대한 불분명한 설명을 초래하여 각각의 내용을 수정한 경 우도 많았으며, 계산 영역의 변수 선정 시 누락도 나타나기도 하였으며, 업무 진행상 완성도를 낮추는 문제점이 대두되기도 하였다.

#### 4.1.2.3.1 수차 요구사항 결정

수차는 기본적으로 수요가 많은 시스템은 아니다. 제작방식이 양산의 형태를 갖기 힘든 구조이다. 시스템이 설치될 장소에 따라서 운영과 효율이 달라지는 특성을 가지고 있다. 따라서 수차를 처음 계획할 때에는 설치 현장의 요구사항 을 우선 결정해야 한다.

결정되어야 하는 수차 요항은 낙차, 유량, 수차효율 등이 있으며 회전비속도 와 발전출력이 필요하다. 각각을 계산하기 위하여 결정된 기본변수를 토대로 요구사항을 정할 수 있다. 이후 효율이나 출력에 대한 이론수두를 계산하고 이 론수두에 맞는 모델을 설계해야 한다. 이에 적절한 수차요항 결정 프로세스를 Fig. 24에 나타내었다.



Fig. 24 Determination of turbine design point

#### 4.1.2.3.2 Model 설계

🕖 Collection @ kmou

수차를 개발하기 위해서는 결정된 설계 요항에 맞는 적절한 모델을 선정하여 야 한다. 어떤 경우에는 모델을 굳이 택할 필요가 없다. 현재는 대다수가 모델 을 사용하지 않고 직접 설계항에 맞는 수차를 개발하기도 한다. 기존 대수력에 서는 실패시 큰 비용의 손실 리스크가 있으므로 모델의 존재가 필수불가결하 나, 소수력은 공사비 규모가 크지 않고, 효율 손실이 크지 않아 오히려 모델을 만들지 않는 것이 경제성 측면으로 보자면 적절하다. 다만, 모델이 없는 경우에 는 안정적 효율운영이 어렵거나 성능보장이 안되는 경우가 생길 수 있다. 소수 력 수차의 경우 토목공사가 동반되므로 설치 실패에 따른 비용 추가가 나타날 수 있다. 그러므로 경제성을 고려하여보고 모델을 개발할 것인지, 실제기계를 바로 개발할 것인지를 결정하는 것이 필요하다.

Fig. 25는 설계항에 대하여 모델을 확정 짓는 프로세스를 나타낸다. 모델은 실제 설치될 수차와 달리 소형일 경우가 많으므로, 실제 필요한 수차의 규격을 얻기 위하여서는 모델과 실제 기계의 비율을 미리 검사하여야 한다.



Fig. 25 Model confirmation process

#### 4.1.2.3.3 효율 계산 및 보고서 작성

Collection @ kmou

수차를 개발한 후에는 수차의 효율을 보증하기 위하여 효율곡선 형태로 개발 된 수차의 성능을 보증하여야 한다. 수두와 유량의 설계조건에 맞춰 그때의 운 용 및 효율값이 나타나고, 유량별 RPM이나 출력을 그래프 형식으로 제공하여 사용자가 신뢰할 수 있는지 확인하도록 해야 한다. 이러한 보고서 제공은 고객 의 요구에 따라 탄력적으로 운용될 수 있다.



수 차 효 율 곡 선

발전소명:소수력 수차형식:HF-1RS 격 유효낙차= 최대수차출력= 1.21 m³/s 900 min" 64.2 m 최대사용유량= 회전속도= 차 정 수 659 k W 최고 효율점 량 [%] 100 90 80 70 60 50 40 유 량 [m<sup>3</sup>/s] 1.21 유 1.02 0.84 0.66 1.21 수차효율 [%] 90.5 86.2 79.1 67.4 90.5 수차출력 [k₩] 659 527 395 260 659 100 90 수차효율 [%] 80 70 ... 60 800 700 600 [WM] ኮ춯· 500 400 大社 300 200 100 n 70 0 10 20 30 40 50 60 80 90 100 유량[%]

Fig. 26 Create turbine efficiency curve

#### 4.1.2.3.4 설치 및 운용환경 계산

Collection @ kmou

수차의 설치 및 운용환경을 계산하는 것도 중요한 일이다. 수차는 유량과 낙 차를 이용한 시스템이지만, 실제 자연환경은 늘 변화하므로 설치와 운용에 각 별한 주의를 기울여야 한다. 따라서 설계항으로부터 거꾸로 역산하여 가장 효 율적일 수 있도록 설치 및 운용환경을 제시함으로써 시스템의 효율성 극대화를 기대할 수 있다. 또한, 모델을 통한 개발은 실제기계로 치수를 상사할 필요가 있다.

Fig. 27 Installation and operation environment calculation

#### 4.1.2.3.5 검토 함수

수차의 설계에 있어 가장 중요한 함수중 하나는 오일러 방정식이다. 오일러 (Euler) 방정식은 속도장으로 유체운동에 필요한 공간과 시간 함수를 기술함으 로써 사용한다. 또 하나는 라그랑쥐(Lagrange)방법이라 불려지며, 개개의 유체 입자들의 움직임을 추적하는 방법이다.

다수의 경우 3차원 유동에 있어 속도성분의 하나는 다른 두성분에 비해 상대 적으로 의미가 작을 수 있다. 이러한 상황에서 보다 작은 성분을 무시하고 2차 원 유동장으로 가정하여 계산을 수행한다.

유체에 있어 또 하나 중요한 해석도구로는 레이놀드(Reynolds) 수가 있다. 이 는 관성에 의한 힘과 점성에 의한 힘의 비로써, 주어진 유동조건에서 두 종류 의 힘의 상대적 중요도를 나타내는 것이다. 유체 동역학에서 가장 중요한 무차 원 수의 하나이다. 다만, 이 연구에서는 레이놀즈 수의 정의 등에 관하여 참고 만하고, 다루지 않는다. 오일러의 속도방정식은 다음과 같다.

오일러 방정식으로 나타낸 수차효율은 다음과 같다.

$$\eta_{h} = \frac{1}{gH_{e}} (u_{1}v_{1}\cos\alpha_{1} - u_{2}v_{2}\cos\alpha_{2})$$

$$\eta_{h} : 수두에서의 효율$$
(7)

g : 중력

H : 유효수두

수차 런너를 설계하는 플로 차트는 다음과 같이 표준화할 수 있다. 아래 표 준화한 설계flow는 모두 (주)신한정공에서 실제 신규모델의 수차를 설계하면서 활용하고 정립한 프로세스이다.



Fig. 28 Runner design flow chart



이 플로는 일반 런너 설계 플로와 차별화되는 점이 있는데, 기존 런너 설계 플로의 경우 수차시스템 전체의 효율을 고려하지 않고 단지 런너 자체의 입사 각과 토출각만을 고려하여 런너 블레이드의 자오면 구성만 최적 설계값을 구하 려하였다. 그러나, 본 연구에서 제시하는 방법은 단지 런너만의 설계 효율을 고 려한 것이 아닌 수차 전체에 영향을 미치는 효율을 고려한 런너 설계 플로차트 이다. 이렇게 설계할 경우, 기존 설계와 달리 런너의 효율 최적화 이전에 전체 최적화를 위한 설계파라미터의 범위를 일부 정하고 접근할 수 있으므로, 프로 젝트 진행의 시간적 손실을 크게 줄여줄 수 있다. 이러한 효율성 향상에 기여 하는 2가지 반복 프로세스가 존재하는데, 1차 재설계 프로세스와 2차 재설계 프로세스로 명명하여 구분한다.

1) 1차 재설계 프로세스

• 1차 재설계프로세스는 GV으로부터 런너로 이어지는 Stream line을 확정 짓는 프로세스

ANNE AND OCEN

• 우선 lpitch 설계를 통하여 최적설계 값을 확보한 후 다음 프로세스로 이동, 이때 다양한 최적값에 대한 기준을 제시할 수 있으나, 여기에서는 이론수두인 Hth와 유량인 Q 값으로 결정

2) 2차 재설계 프로세스 🔨 하/ 이는 🕻

Collection @ kmou

- 2차 설계는 적절한 런너 블레이드 형상을 가정한 후 블레이드 출구각이
   적절한 효율을 보장하는지 Hth를 비교하여 결정함
- 이때 적절한 Hth를 보장하지 못할 경우에는 Port를 조정하여 전체설계 를 재수행

이러한 2단계 프로세스를 거치고 나면 최적 모델을 확보할 수 있다. 확보된 최적모델을 상사로 늘려서 적절한 모델을 찾을 수 있게 된다. Fig. 29는 본 연 구에 사용된 모델의 1 pitch domain 사례를 이미지화한 내용으로, Turbulence 모델은 SST를 사용하고, inlet 모델은 Mass flow rate를 사용하였다.

1 pitch domain 분석이 완료된 후, 최적 설계값 임을 검증하기 위하여 CFD

모델 시뮬레이션을 통하여 수치해석을 실시하여 적절한 형상과 효율이 얻었는 지 확인을 하였다.

Fig. 30은 이러한 시물레이션 모델을 나타내고 있다. CFD를 위한 각각의 격 자수를 테이블에 정리했으며, Turbulence 모델은 SST, Outlet의 Static Pressure 는 0으로 설정하여 시뮬레이션을 가동하였다.

1차, 2차 재설계프로세스를 거쳐 설계된 런너의 효율 변화의 한 예제를 다음 의 그림으로 나타내었다. 다수의 시뮬레이션 이후 획득한 값으로써, 효율이 최 고 높은 런너와 outlet case를 확인할 수 있었다.

Fig. 32에서 좌측은 기존 방식의 설계를 통한 outlet의 토출 시 변화 그래프이 며, 우측은 변경된 방식의 런너 활용시 나타나는 토출방식이다. 그림을 살펴보 면 우측 사례가 훨씬 토출이 원활하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

또한, 블레이드 각 부분에서의 로딩과 스트림라인의 변화를 확인해도 보다 효율적임을 알 수 있다. 기존 블레이드의 프론트 로딩 부분의 2차흐름이 감소 하고 유동이 원활하게 진행되는 형상을 나타내고 있으며, Suction사이드의 흐름 도 보다 부드럽게 진행되는 것을 알 수 있었다.

1945



Fig. 29 1 pitch domain CFD analysis



#### Numerical method



## Fig. 30 Numerical method CFD analysis



Fig. 31 Comparison data between each runner



Fig. 33 Blade loading and stream lines

#### 4.1.3 매개변수 결정의 시험조건

IEC 60193에서는 수차의 성능에 영향을 주는 요소를 측정하기 위하여 반동기 계에 대한 시험의 유형을 성능시험, 캐비테이션 시험, 무구속 시험, Four-quadrant 시험으로 구분하고 있다. 이때 필요한 매개변수 중 마찰 손실은 주로 레이놀드 유사성(Reynolds similitude)에 따라 다르다. 기계의 기준직경을 지칭하는 모델의 레이놀wm 수는 모델 효율이 프로토타입 효율보다 다소 낮다. 다만, 캐비테이션 영향으로 효율이 0.5% 감소하되 효율의 범위 내에 있을 때에 는 레이놀드 수의 영향을 고려하지 않는다.

따라서 본 연구에서 레이놀드 수에 대한 영향은 고정된 값을 사용하여 프로 그램 하기로 한다. 또한, 모델과 프로토타입 간의 효과적인 유사성을 달성하기 위하여 최소한 다음의 요구사항이 충족되어야 한다

- 일반적인 제조기법을 통하여 요구되는 치수의 정확성
- 허용 가능하지 않은 시험 조건에 관계없이, 충분히 정확한 시험 측정 결과
   를 확보
- 적합한 레이놀드 및 프라우드 수에서 시험을 실시하여 스케일(Scale)효과를 감소

이러한 조건을 만족시키기 위하여 최소값이 IEC60193에서는 제시되어 있 다.(IEC 60193, 1999)



- 45 -

Table 14 Minimum size for model size and test parameters

	기계의 유형					
방사형	대각선	축형	임펄스			
(Francis)	(혼합-흐름)	(Kaplan)	(Pelton)			
4 x 106	4 x 106	4 x 106	2 x 106			
100	50	30 (주의 2)	500			
0,25(note 3)	0,30	0,30				
			0,08			
-	방사형 (Francis) 4 x 106 100 0,25(note 3) 	방사형 대각선 (Francis) (혼합-흐름) 4 x 106 4 x 106 100 50 0,25(note 0,30 3)	방사형 대각선 축형 (Francis) (혼합-흐름) (Kaplan) 4 x 106 4 x 106 4 x 106 100 50 30 (주의 2) 0,25(note 0,30 0,30 3)			

주의

1 프라우드(Froude) 유사성 조건에 관련하여, 캐비테이션 시험을 위한 시험 특 정적 유압 에너지는 결과적인 Re 수가 주어진 값보다 더 낮도록 선택되어야 한 다.

2 Emin = 20 J.kg-1(D가 0,4 m 이상일때)

3 낮은 비속도(specific speed)를 가진 펌프와 펌프-터빈의 경우, 외부 직경이 0.5m 이상이면0.20 m < D< 0.25 m 등의 기준 직경이 허용될 수 있다.

1945

#### 4.2 입구경과 β의 관계

#### 4.2.1 수차 효율과 입구경

수차를 설계할 때 설계점이 주어지고 나면, 가장 먼저 효율과 이론 양정을 계산해야 한다. 수차 효율은 식(8)에 의해 구해지고, 구해진 수차효율을 사용하 여 이론 양정을 구하는데, 이때 식(9)를 사용한다

$$\eta = \eta_h \times \eta_v \times \eta_m \tag{8}$$

$$\eta$$
 : 수차효율,  $\eta_h$  : 런너효율,  $\eta_v$  : 누설효율,  $\eta_m$  : 원판마찰효율

 $H_{th}=H_e\times\eta_h$ 

(9)

 $H_{th}$  : 이론 헤드,  $H_e$  : 설계 유효낙차,  $\eta_h$  : 런너효율

프란시스 수차의 효율에 가장 중요한 요소 중 하나는 수차의 입구경이다. 런 너베인 입구부의 기본 속도 삼각형은 다음의 파라미터를 가진다

α : 절대 흐름각(가이드 베인 출구각), β : 상대 흐름각(런너 베인 입구각)

 $v_u$ : 절대속도의 주 방향 성분,  $w_u$ : 상대속도의 주 방향 성분

이때, 수차 효율은 오일러 방정식에 따른다

$$\eta_h = \frac{1}{gH_e} \left( u_1 v_1 \cos\alpha_1 - u_2 v_2 \cos\alpha_2 \right) \tag{10}$$

이러한 공식에 따라 효율적인 입구를 설계하고자 할 때 출구에서는 캐비테이 션이 0일 경우 최고 효율이 나타나는 지점을 계산하는 공식은 식11과 같다

$$H_{th} = \frac{1}{g} \left( \frac{\pi^2 D_1^2 n}{3600} - \frac{nQ}{60B_1 \tan\beta_1} \right)$$
(11)

g : 중력가속도, D<sub>1</sub> : 입구경, B<sub>1</sub> : 입구폭, β<sub>1</sub> : 입구각, n : 회전속도

여기서 입구경, 입구폭, 입구각의 3개 변수 결정에 따라 효율이 달라지며, 설 계자가 구하고자 하는데 큰 어려움을 가지는 변수이다. 경험치에 따르면 입구 각 β<sub>1</sub>의 범위는 50~80° 사이로 한정지어 계산하는 것이 효율적이다.

이 논문에서는 세 가지 변수의 관계를 고려하여 다양한 해집합 중 하나의 값 을 선택하고, CFD를 통한 실험 결과를 비교하여 효율적 설계를 실시하고자 하 는 것이 주 목적이다.

- 47 -



## 4.2.2 입구경 변화에 따른 수차 효율의 변화

수차의 입구경 변화에 따라 수차는 많은 효율의 차이를 가지게 된다. 본 논 문에서는 이러한 변화를 효율적으로 수행하게 될 때에 따른 결과를 예측하고, 좀 더 최적화된 설계항 변경을 채택할 수 있도록 지원하고자 하는 것이다. Fig. 35는 입구경 D의 크기가 350mm에서 310mm로 수정했을 경우, 설계항을 변경 한 사례이다. 이 설계 변경에 따른 CFD 결과 효율이 90.27%에서 92.91%로 증 가함을 알 수 있었다.



- 48 -



Fig. 35 Shape of turbine blade after changing inlet diameter

Table 15 Change design value according to change of inlet diameter W///

O//

		Prototype	Redesigned			
φ 🖉		0.825	0.75			
<i>D</i> <sub>1</sub> [mm]		350	310			
$D_e$ [mm]		250	250			
Inlet $\beta$ [°]		55.93	60			
	$\beta_1$	18	18			
Outlet $\beta$ [°]	$\beta_2$	23.27	23.27			
	$\beta_3$	28.29	28.29			



## 제 5 장 국산화 설계의 실증 및 결과

#### 5.1 국산화 설계

#### 5.1.1 국산화 설계의 실증 및 결과

일반적인 공학 문제에서 야기되는 최적화 문제는 최적화하고자 하는 값과 이 와 관계된 요소들(Elements) 사이의 관계가 명시된(Explicit) 목적함수(Object function)에 대해 주어진 제한조건(Constraints)을 만족하며 최대 혹은 최소화하 도록 하는 요소들의 값을 구하는 것을 목적으로 한다.

하지만 앞서 제안된 런너베인 입구각의 경우, 유량과 유속에 따라 순간적으 로 유체흐름이 변화하므로 입구경과 입구각 사이의 목적함수를 수학적으로 구 하기 어렵기 때문에 최적화 알고리즘 적용에 어려움이 있다. 따라서 정확한 목 적함수를 구하기보다 근사함수를 구하여 최적화하는 방법을 적용하고자 한다.

1945

OFL

#### 5.2 모델 실험

#### 5.2.1 실제 수차 모델 실험

🕖 Collection @ kmou

실제 수차의 성능곡선(hill-chart)를 구성하기 위해서는 모형을 실험하거나, 실 제 수차를 테스트하여 성능을 검증하여야 한다. 다양한 운용조건에서의 성능 시험을 위하여 압력(H)과 유량(Q)의 변화에 따른 수차의 성능 곡선을 나타냄으 로써, 수차의 효율에 대한 입증자료를 제시할 수 있다.

이러한 수차실험을 위하여 필요한 공인시험기관이 아쉽게도 국내에는 아직 구축되어 있지 않다. 다만, 한국수자원공사에서 수차성능시험을 위한 테스트설 비를 구축되어 있다.

수차의 효율 개선을 위해서는 우선 정확한 효율 측정 기술이 우선되어야 하 며, 효율측정을 위한 여러 가지 방법들 중 가장 공신력을 가지고 있는 방법이 모델 수차를 이용한 성능시험이다.

현재 수력 시장의 점유율 상 가장 큰 지분을 차지하고 있는 것은 중국의 업 체들이지만 이는 압도적인 내수율에 기인한 것이므로, 아직까지 전통적인 강자 인 Alstom과 Andritz 등의 강세가 이어지고 있다고 볼 수 있다.

이들 업체는 비속도별 런너 블레이드 프로파일을 습득하고 있음은 물론 콘, 케이싱, 흡출관 등 세부 부품의 설계에 대한 노하우도 상당부분 축적한 것으로 보이나, 이러한 부분은 정량적으로 나타내기 어렵고, 기술 보안이 뛰어나 노출 된 것이 거의 없는 실정이다.

수차에 걸친 각 기관의 실무자와의 협의와 실증지점 조사를 통하여 모델 실 험을 위한 성능시험 설비의 제원을 결정하였으며, 현재 각 비속도별 기본설계 가 진행 중에 있다.

#### 5.2.2 수차 성능시험설비 보완 및 완성

수차 성능시험은 효율시험, 캐비테이션 시험, 무구속시험, 압력맥동시험, 축추 력시험, 수류관찰시험, 윈터 케네디 시험 등의 세부 시험으로 나눌 수 있으며, 이 중 프란시스 수차의 성능시험으로써 현재 효율시험, 캐비테이션 시험, 무구 속시험, 압력맥동시험, 윈터 케네디 시험은 현재 성능시험 설비의 조정 후에 시 험이 가능하다.

여기서 조정이란 그 수차의 운전범위를 고려한 시험 장비의 전반적인 재배치 와 교정을 포함하며, 현재 프란시스 수차의 성능시험을 위해 가압 펌프와 기본 적인 배관의 구성이 완료 되었고, 모델수차 상하부 연결 탱크 및 다이나모미터 프레임 제작 등이 이루어지고 있다.

각 시험별 수행 가능 여부와 시험 수행을 위해 필요한 추가 설비 및 조정 내 용은 Table 17에 나타내었다.

수차의 형태와 관계없이 모델의 성능시험에 앞서 대상 수차의 시험 범위를 선정하여야 하며, 이에 해당되는 사항으로는 유량, 압력, 토크, 회전수 등이 있 다.

시험종류	가능여부	내 용		
효율시험	0	시험범위가 제한적이므로 사전 조율필요		
캐비테이션 시험	0	시험범위가 제한적이므로 사전 조율필요		
무구속시험	0	시험범위가 제한적이므로 사전 조율필요		
압력맥동시험	0	시험범위가 제한적이므로 사전 조율필요		
축추력시험	X	관련설비(유압베어링 블록, 스트레인 게이지 센서블록) 개발 필요		
수류관찰시험	Х	관련설비 조사중		
윈터 케네디	0	시험범위가 제한적이므로 사전 조율필요		
기타	Х	가이드베인 토크,추력 맥동 등		

Table 16 Ability to perform each test and additional equipment andadjustments required for performance

 Table 17 Prepare materials for reviewing the equipment and

determining the range of performance tests



유량과 압력은 사실상 맞물려 있는 시험 조건인데, 성능시험 설비의 펌프 성 능곡선 내에서만 성능시험이 이루어질 수 있다.

현재 보유중인 설비의 경우 펌프의 성능에는 문제가 없으나 압력탱크의 내압 한계에 대한 재검토를 실시할 필요가 있는 것으로 조사되었으며, 토크 측정의 경우 수력 다이나모미터에 의존하는 바가 크기 때문에 수력 다이나모미터의 제 어 범위에 시험 범위를 조사하여 준비완료 하였다.

성능시험을 진행하기 위하여 각 압력탱크의 위치 및 높이, 계측기기 설치, 설 비와 수차 간의 입출구 연결 배관 등에 대한 고려한 재배치 수행하였다.



Fig. 36 Performance test facility installation











#### 5.3 실제 수차 설계 및 제작, 성능테스트

실제 소수력에서는 모델수차를 설계하여 모델테스트를 하고 실제 수차를 설 계하여 제작하는 것은 경제성에 맞지 않다. 그리하여 실제 운영중인 노후된 프 란시스터빈을 대체하기 위한 설계를 진행하였다. 실증지점 소수력발전소 운영 조건을 적용한 수차 최적설계 및 최적 발전방안 도출을 위한 현장조사 수행고 기존 설치 여건 및 설계조건을 고려한 수차발전기 설치방안에 대한 구조 검토 및 배치도작성, 상세설계 수행 및 기존 시설물 활용을 위한 최소 공사범위 수 차 설치안을 도출하였다.

우선, 노후된 설비에서 교체가 불가능한 흡출관에 대한 개선방향 검토 및 최 적안 도출을 실시하였다.

주변의 사항들을 검토한후 실제 설계를 위한 수차의 설계사양을 Table19와 같이 검토하였으며, Fig 39과 같이 외형도를 설계하였다.



Fig. 37 Review the new turbine application



Fig. 38 Analysis of actual turbine draft tube flow



Table 19	) N	Jew	turbine	specification
----------	-----	-----	---------	---------------

비속도	정격유량	정격낙차	회전속도	수차효율	수차출력	런너경
(m-kW)	(m <sup>3</sup> /sec)	(m)	(rpm)	(%)	(kW)	(mm)
Ns130	1.21	64.2	914	90	685	460



Fig. 39 Lay-out design of new turbine
외형도를 설계하였으면 실제 수차의 사양서를 이용하여 런너의 1D 설계를 실 시하였다.

η = η<sub>h</sub> × η<sub>v</sub> × η<sub>m</sub>
 (12)

 η<sub>h</sub> = 
$$\frac{0.985 \times 0.98}{0.9}$$
 = 0.932
 0.9

 η : 수차효율, η<sub>h</sub> : 런너효율, η<sub>v</sub> : 누설효율, η<sub>m</sub> : 원판마찰효율
 (13)

 H<sub>th</sub> = H<sub>e</sub> × η<sub>h</sub> = 64.2 × 0.932 = 59.83 m
 (13)

 H<sub>th</sub> : 이론 헤드, H<sub>e</sub> : 설계 유효낙차, η<sub>h</sub> : 런너효율
 (13)

 프란시스 수차에서 주속도계수 φ = 0.75로 주로 선정되어지며 주속도 계수를
 이용하여 입구경을 계산하면 식 14의 값을 구할수 있다.

$$D_{1} = 60 \times \sqrt{2gH_{th}} \frac{\phi}{\pi N} = 60 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 59.83} \frac{\phi}{\pi \times 914} = 0.5368m$$
(14)

이론헤드  $H_{th}$ 와 입구경  $D_1$ 를 이용하여 런너 입구측 입구각을 계산하면,

$$H_{th} = \frac{1}{g} (u_1 v_{u1} - u_2 v_{u2})$$

$$= \frac{1}{g} \left( \frac{\pi D_1 N}{60} \left( \frac{\pi D_1 N}{60} - \frac{Q}{\pi D_1 B \tan \beta} \right) \right)$$

$$= \frac{1}{9.8} \left( 25.69 - \frac{1.21}{\pi \times 0.5368 \times 0.095 \times \tan \beta} \right) = 59.83$$
(15)

1945

 ${\rm tan}\beta=2.6757$ 

Collection @ kmou

 $\beta = 69.5$  °

프란시스 수차의 입구각은 Shroud면에서 Crown면까지 일정하게 계산한다. 반 대로 출구각는 Shroud면에서 Crown면까지 출구측 흐름을 선회없이 일정하게 유출시키기 위하여 Shroud면에서 Crown면까지의 각도를 다르게 설계한다. 실 제 런너의 설계에서도 Shroud면 출구경  $D_s = 0.460m$ 이며, Crown면 출구경  $D_{c} = 0.2368 \, m$ 이다. 이를 출구 자오면 속도를 이용하여 출구각을 계산하면

출구측 자오면 속도 
$$v_m = v_c = v_s = \frac{Q}{\frac{\pi D_2^2}{4}}$$
 (16)

Crown측 및 Shroud측 출구각도는

Collection @ kmou

$$u_{c} = \frac{\pi D_{c}N}{60} = \frac{\pi \times 0.2368 \times 914}{60} = 11.33 \, m/s \tag{17}$$
$$\tan \beta_{c} = \frac{v}{u_{c}}, \ \beta_{c} = 32.7^{\circ}$$

$$\begin{split} u_s &= \frac{\pi D_s N}{60} = \frac{\pi \times 0.460 \times 914}{60} = 22.01 \, m/s \\ \tan \beta_s &= \frac{v}{u_s}, \ \beta_s = 18.3^\circ \end{split}$$

출구측 각도면 Crown측 및 Shroud측 이외에도 등유량면의 각도도 구해야 한 다. 이는 각도의 변화가 비례적이지 않기 때문에다. 등유량면의 각도를 구하기 위해서는 등유량면의 직경을 구해야 한다.

$$r_m = \sqrt{\frac{r_c^2 + r_s^2}{2}} = \sqrt{\frac{0.23^2 + 0.1184^2}{2}} = 0.1829\,m\tag{18}$$

등유량면의 직경을 이용하여 등유량면의 출구각을 계산하면

$$u_{c} = \frac{\pi D_{m}N}{60} = \frac{\pi \times 0.365 \times 914}{60} = 17.52 \, m/s \tag{19}$$
$$\tan \beta_{m} = \frac{v}{u_{m}}, \ \beta_{m} = 22.6^{\circ}$$

이렇게 계산되어진 입구각, 출구각을 이용하여 전체 설계보다 1Pitch 설계로 출력과 효율을 검토하여 각 부분의 유동해석을 실시하였다.



Fig. 40 Results of internal flow analysis



Fig. 42 Effect of guide vane and stay vane



Fig. 43 Effect of number of blades



Fig. 44 Hill-Chart with CFD



Fig. 45 Result of runner strength analysis



위의 1D계산과 CFD결과를 이용하여 사용유량 1.21㎡/s, 유효낙차 64.2m, 정격 회전속도 914rpm의 수차설계 및 제작을 진행하였다.



Fig. 46 Existing turbine and new turbine

실제 수차를 설계, 제작, 설치하여 기존수차와 신규수차의 수차성능시험을 실 시하였다. 효율측정은 시스템의 출력에 따라 전자유량계를 사용한 유량측정을 실시하였고, 제어시스템의 출력을 측정하여 수차발전 시스템의 종합효율을 구 하였으며, 발전기 효율을 사용하여 수차효율을 구하였다.

수차효율(%) = 종합효율(%) / 발전기효율(%)

Collection @ kmou

(16)



Fig. 47 Small hydro power efficiency test of proof point

기존 수차의 종합효율시험을 실시하였으며, 출력 510kW에서 종합효율 75%, 수차효율 78.1% 로 측정되었다. 신규 수차의 종합효율 시험은 총 4회 실시하였 으며 최고효율을 90.1%, 종합효율은 86%였다. 기존 수차와 비교하여 최대 12% 의 효율증가를 확인하였다.



Fig. 48 Existing small hydro power efficiency test result

출력	유량	낙차	종합효율	발전기효율	수차효율
(kW)	(m³/s)	(m)	(%)	(%)	(%)
302.6	0.694	66.14	67.2	96	70.0
361.4	0.806	66.13	69.2	96	72.1
401.9	0.861	66.13	72.0	96	75.0
442.1	0.906	66.13	75.3	96	78.5
445.8	0.917	66.04	75.1	96	78.3
485.7	1.000	66.13	74.9	96	78.1
502.6	1.047	66.13	74.1	96	77.1
535.5	1.111	66.12	74.4	96	77.5
544.2	1.111	66.12	75.6	96	78.7
579.9	1.214	66.11	73.7	96	76.8
581.9	1.214	66.11	74.0	96	77.1
592.3	1.228	66.11	74.5	96	77.6
594.3	1.264	66.11	72.6	96	75.6

 Table 20 Existing small hydro power efficiency test result data





Fig. 49 New small hydro power efficiency test result

출력	G/V개도	유량	낙차	종합효율	발전기효율	수차효율
(kW)	(%)	(m3/s)	(m)	(%)	(%)	(%)
293	45.0	0.581	68.61	75.1	95.69	78.45
343	51.0	0.644	68.51	79.3	96.04	82.54
388	56.0	0.725	68.39	79.9	96.06	83.13
425	61.0	0.778	68.29	81.7	96.08	84.99
463	65.0	0.833	68.16	83.2	96.10	86.56
507	70.0	0.903	68.01	84.3	96.06	87.71
539	74.0	0.947	67.87	85.6	95.98	89.14
583	80.0	1.019	67.70	86.2	95.87	89.91
621	87.0	1.092	67.69	85.7	95.77	89.53
643	91.0	1.128	67.54	86.1	95.72	90.00
654	93.0	1.150	67.54	85.9	95.68	89.80
599	82.0	1.056	67.70	85.5	95.83	89.25
559	76.0	0.964	67.87	87.2	95.93	90.89
519	71.0	0.917	68.00	85.0	96.03	88.47
477	66.0	0.833	68.15	85.7	96.10	89.18
441	62.0	0.792	68.29	83.2	96.09	86.63
394	56.0	0.731	68.39	80.5	96.06	83.77
357	52.0	0.694	68.50	76.6	96.05	79.73
321	48.0	0.619	68.50	77.2	95.99	80.42

Table 21 New small hydro power efficiency test result data

## 제 6 장 결론

본 연구는 기업의 필요에 따라 선진 기술의 획득과 산업현장의 생산성 향상 을 위하여 시작하였으며, 프란시스 수차의 설계 프로세스 정리 및 성능향상 접 근, 설계 표준화를 위한 표준 프로세스 대안 제시, 수차의 국산화 설계로 요약 할 수 있다.

우선 기존 댐의 수차 효율을 국제 기준에 맞게 측정하고, 기본설계요소들을 확인하여 수차 출력 및 비교속도를 계산하여 런너의 입구각, 출구각을 결정하 고 CFD 해석에 기본적인 설계요소를 반영함으로써 CFD 해석시간을 줄였다. 또 한, 전체 모델을 CFD 해석을 수행하는 것은 많은 시간이 소요되므로 기본요소 를 제공하여 1 pitch 해석과 중점해석 부분을 제시함으로써 합리적인 해석이 가능하게 하였다. 기본설계와 CFD 해석을 검증하기 위하여 실제 운영 중인 발 전소의 소수력 2기 중 1기를 설계, 제작하여 설계방법에 대해 검증하였다.

본 연구를 통하여 설계에 접근하는 종사자들이 불필요한 시행착오를 배제하 고, 보다 효율적이고 생산적인 설계 방안과 기업 내 표준화된 방안을 마련하도 록 지원하였으나, 아직 실증 없이 모델의 성능곡선(Hill Chart) 작성을 자동화하 거나, 실증 이전에 예측해볼 수 있도록 지원하는 시뮬레이션 연구는 미흡한 상 황이다.

현재 전통적으로 기술 강국인 유럽 국가 일부와 일본은 고급 기술을 보유하 고 있으며, 중국은 거대한 시장을 바탕으로 수력 분야에 기술력을 축적하며 세 계 시장을 선도하고 있는 상황이로 이를 타개하기 위해서는 향후 보다 효율적 런너 곡면 형상 결정 방안이나, 사용자 요구가 변화하게 되어 발생하는 변수(경 제성과 효율성의 Trade-off 등)를 반영하여 설계 범위를 결정하는 시뮬레이션 자동화 등 연구가 더욱 필요할 것으로 여겨진다.

Collection @ kmou

## 참고문헌

박지훈, 김유택, 황영철, 이영호, 2010, *CFD에 의한 마이크로 튜블러 수차의 성능개선에 관 한 연구*, 유체기계연구개발발표회 논문집, pp109-110.

사정환 등, 2009, *로터 블레이드 OA 익형의 공력 최적 설계*, 한국전산유체공학회지, 14권 2 호, pp25-31.

모장오 등, 2011, *날개요소 운동량 이론을 이용한 피치제어형 수평축 풍력터빈 블레이드 설 계 및 성능평가 소프트웨어 개발*, 한국유체기계학회 논문집, 14권 2호, pp5-10.

이철형, 박완순, 2005, 중저낙차 프란시스 수차 국산화 개발, 산업자원부

박노천, 이용철, 장현욱, 2008, *프란시스 수차의 진동과 효율 특성에 관한 연구*, 유체기계연 구개발발표회 논문집, pp247-252.

한국수자원공사연구원, 2012, *마이크로수차발전시스템 개발*, 한국수자원공사연구원

이응천, 2011, 댐 및 수력발전 공학, 씨아이알

고형종, 권오붕, 김용직, 2001, 쉽게 배우는 유체역학, 홍릉과학출판사

European Small Hydropower Association, 2004, *Guide on how to develop a small hydropower plant* 

이종순, 2004, *유체기계*, 동명사 🔻

KS C IEC 61362, 2006, 기술표준원 고시 제2006-00677호.

KS C IEC 60308, 2006, 기술표준원 고시 제2006-0077호.

Richard J. Mayer, 1990, *IDEFØ Function Modeling: A Reconstruction of the Original Air Force Report*, Knowledge Based Systems Inc. College Station, TX pp12-20

황영철, 2009, 수도관차압을 이용한 마이크로 튜블러수차의 최적설계법에 관한 연구, 석사학 위논문, 부산:한국해양대학교

황영철, 2017, 소수력용 프란시스 수차의 고성능화를 위한 직접설계법의 개발 및 적용에 관 한 연구, 박사학위논문, 부산:한국해양대학교

노형운 등, 2010, *TIDD를 통한 저효율 프란시스 수차의 효율 향상에 대한 연구*, 유체기계 연구개발 발표회, pp589-596.



황영호, 2009, *소수력용 튜블러수차의 최적설계 및 성능특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 부 산:한국해양대학교

Alternate Hydro Energy Center Indian Institute of Technology Roorkee, 2011, STANDARDS/MANUALS/GUIDELINES FOR SMALL HYDRO DEVELOPMENT Electro-Mechanical, Works-Monitoring, Control

IEC 60193, 1999, *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests* 



