

칠보수력용 15MW급 프란시스 수차 실증개발 및 기술확장 가능성



박 준 관

한국수력원자력(주) 중앙연구원
park.jungwan@khnp.co.kr



권 창 섭

한국수력원자력(주) 그린에너지본부 팀장
newbigkcs@khnp.co.kr



황 태 규

한국조선해양기자재연구원 센터장
andrew@komeri.re.kr

제 1 장 개요

고대 그리스 시대에서 그 활용기원을 찾을 수 있는 대표적인 재생에너지원인 수력은 오랫동안 인류 활동을 위한 에너지를 제공해 왔다.

수력에너지를 이용하여 발전을 하기위해 필요한 수력설비의 주기는 수차와 발전기로 이 중 수차는 물이 가진 수력에너지를 회전을 통해 기계적인 에너지로 변환시키는 설비로 회전축을 통해 발전기를 회

전시켜 전기를 생산하는 발전설비에서 가장 중요한 역할을 담당한다.

근대식 수차를 이용한 수력발전은 1848년 미국의 James Francis에 의해 프란시스 수차가 개발된 이래로 많은 연구자들과 개발자들에 의해 기술개발이 진행되어 그 효율가치가 확대되어 왔으며, 현재는 최대 에너지 변환효율 95%이상, 단위기당 최대 용량 1GW에 이르는 등 화석에너지를 포함한 전 에너지원 중 가장 효율적인 에너지원으로서 재생에너지를 대표하고 있다.

또한 수력발전기술은 그 특성상 발전소가 들어서는 지역의 입지조건에 따라 낙차와 유량이 달라 기

표 1. 국내 운영사별 수력설비 현황

구분	운영사	설치 대수	용량 [MW]	점유율 [%]
일반 수력	한국수력원자력	21	591.7	9.3
	한국수자원공사	22	1,000.6	15.7
	소계	43	1,592.3	25.0
양수	한국수력원자력	16	4,700.0	73.8
	소계	16	4,700.0	73.8
소수력	한국수력원자력	14	11.3	0.2
	한국수자원공사	55	42.3	0.7
	기타	16	22.1	0.3
	소계	85	75.7	1.2
합계		144	6,368.0	100

개발된 수차·발전기를 활용할 수 없어 각 발전소 건설시 신규 수차·발전기 개발을 위해 대규모 연구개발이 진행되어야 하며 이를 위해 설계기술을 포함한 핵심기술을 보유하여야 하나, 국내 수력설비기술은 관련산업의 소규모로 인해 주로 소수력 중심의 기술개발이 이루어져 중·대수력이상의 설비를 위한 기술개발은 최근 들어서 한국수력원자력(주) 등 운영사 중심으로 진행 중에 있다.

국내에서 운전되고 있는 양수발전을 포함한 수력발전 설비용량은 표 1에서와 같이 6.36GW에 이르며 주로 한국수력원자력(이하 한수원)과 한국수자원공사에서 운영하고 있다. 최근 두 수력발전 운영사의 설비노후화로 기존설비에 대한 지속적인 설비현대화사업이 진행되고 있지만 국내에는 이를 지원할 핵심기술 미보유로 인해 현대화 사업에 사용되는 중·대수력용 설비는 전량 해외사에 의존해 오고 있는 실정이다.

이러한 상황에서 국내 수력발전 설비용량의 약 82.1%(양수포함)를 보유하고 있는 한수원은 수력발전용 핵심기술의 확보를 통해 중·대수력 기술의 국산화와 이를 통해 국내 수력산업 생태계를 육성하고자 2012년~2016년 ‘10MW급 이상 프란시스 수차발전기 개발 및 실증’ 정부과제를 추진하여 광역 정전시 울춘복합화력 발전소로의 시송전 발전을 담당하는 칠보수력발전소에 설치하여 실증하는데 성공함으로써 중·대수력 기술의 국산화를 위한 초석을 다졌다.

제 2 장 수력발전용 수차기술

1. 수력설비의 분류 및 기술개발 현황

일반적으로 국내에서 수력설비는 단일기 설비용량 10MW를 기준으로 그 이하의 소수력과 그 이상의 중·대수력으로 구분하고 있으나, 국제적으로는 단일기 용량이 점점 대형화되어가는 추세에 따라 30MW를 기준으로 대형수력으로 구분하기도 한다.

또한 수차의 수력특성과 형상을 구분 짓는 특성값인 비속도(Specific Speed)에 따라 적용되는 수차가 구분되는데 저비속도에 사용되는 펠턴수차와 중비속도 구간에서 사용되는 프란시스 수차 그리고 고비속도에 사용되는 카플란 및 벌브 수차로 구분된다. 이러한 용량별 구분과 비속도별 구분에 따라 수차개발시 고려해야 할 기술은 다르며 특히 소수력과 중·대수력용 설비개발시 고려해야하는 기술들에는 큰 차이가 있다.

이 중 특히 프란시스 수차는 그 적용범위가 넓어 가장 많이 사용되며 현재까지 설치된 단일기 최대 용량은 812MW로서 중국 Xianjiaba발전소에 설치되어 운전되고 있으며 현재 프란시스 수차 1GW급이 개발 중에 있다. 또한 최대용량 발전소인 삼협발전소(중국)는 700MW급 프란시스 수차 32기로 22.5GW에 달하며 이는 국내 3세대 표준원자로인 APR1400 원자로 16기에 해당하는 용량이다.

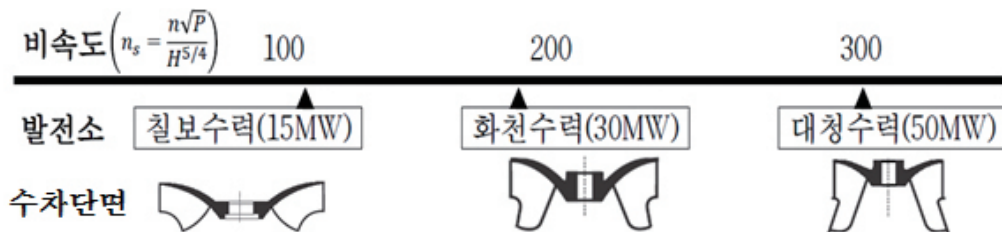


그림 1. 비속도별 국내 수력설비 및 단면형상

2. 수차의 비속도

프란시스 수차가 설치된 국내 수력발전소는 주로 비속도 100~300 범위에 있으며 상대적으로 낙차가 큰 유역변경식인 칠보수력과 화천수력 그리고 댐식인 대청수력, 합천수력, 소양강수력, 충주수력 등이 있으며 그 대표 비속도와 그에 따른 수차 단면형상은 그림 1과 같다.

그 외 저낙차, 대유량의 특성을 가지는 비속도 300 이상의 카플란 또는 벌브 수차로는 춘천수력, 의암수력, 청평수력, 그리고 팔당수력 등에 설치되어 있다.

이러한 비속도는 그 수차의 형상을 결정지를 뿐만 아니라 내부에서 발생하는 유동특성 및 진동특성 등이 구분되며 특히 비속도+출력의 조합으로 수차개발시 고려해야할 요소기술이 달라지게 된다.

제 3 장 비속도 110급 15MW 수차 · 발전기 국산화 개발

1. 기술개발 추진체계

국내 최초의 중수력 수차개발과제인 ‘10MW급 이상 프란시스 수차 발전기 개발 및 실증’ 정부과제에서 프란시스 수차의 설계/제작은 (주)대양수력, 발전기의 설계/제작은 (주)효성, 그리고 통합 제어시스템은 한국전력의 전력연구원에서 담당하였다. 또한 한국조선해양기자재연구원(KOMERI)에서는 향후 30MW급에 적용을 위한 기반기술 개발을 담당하였으며 한국수력원자력(주)은 과제의 총괄주관 및 수차의 모델시험을 통한 설계검증과 수차의 설치 및 시운전을 담당하여 2016년 칠보수력에서 실증을 성공적으로 마무리하여 저비속도 프란시스 수차개발 기술에 대한 국산화를 완료하였다.

2. 비속도 110급 15MW 칠보수력 수차 · 발전기 개발

가. 수차

수차는 스파이럴 케이스와 스테이베인, 런너로 유입되는 유체의 방향을 제어하는 가이드베인, 물이 가진 에너지를 실제로 흡수하는 런너, 그리고 런너 출구에서 물이 가진 속도에너지를 압력에너지로 변환시켜 손실을 감소시키는 흡출관으로 구성된다(그림 2 참조).

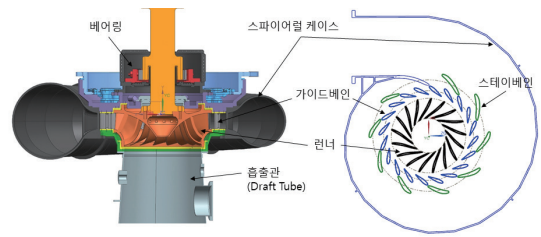


그림 2. 프란시스 수차 단면

표 2. 칠보수력 2호기 사양

정격낙차	155[m]
정격유량	10.84[m ³ /s]
회전속도	514[rpm]
정격출력	15,000[kW]
수차형식	입축 프란시스

실증대상인 칠보수력 2호기 사양은 정격낙차 155m, 정격유량 10.8m³/s, 정격출력 15MW로서 비속도 110급에 해당하며 수차 · 발전기 실증을 통해 수차 및 발전기 일체를 교체하여 성능개선을 추진하였으며, 수차개발에 필요한 칠보수력 2호기의 기본적인 사양은 표 2와 같다.

수차개발의 위한 런너의 수력 설계목표는 높은 효율, 낮은 캐비테이션 발생정도, 넓은 고효율 운전영역, 그리고 낮은 진동 등을 설정할 수 있다. 그러나 성능개선의 경우 신규개발에 비해 수차 · 발전기에

서 발생하는 하중을 건물구조물에 전달하는 역할을 하는 매설 구조물의 변경에 제약이 있어 수차 입·출구 직경을 비롯해 수차의 성능에 큰 영향을 끼치는 설계변수들이 고정되므로 성능증대를 위한 설계 난이도가 높다. 칠보수력의 경우 매설부인 스파이 어럴 케이스와 흡출관은 구조변경 없이 기존의 것을 사용하고 수차부와 그 부속기기들만을 대상으로 설계사양을 만족시키며 고효율의 수차모형을 개발하는 것을 목표로 하였다.

이를 위해 기존 국내 소수력 개발시 적용해 오던 역설계를 이용한 방식에서 벗어나 비속도 110급 수차에 대한 개념설계와 기본설계를 직접 수행하였으며, 최신 CFD기술을 활용한 유동해석을 통해 이론적인 성능예측으로 수차의 이론 성능특성곡선을 도출하였고 축소모델시험을 통해 설계검증을 수행하는 수력설계 전 과정을 진행하였다. 특히 축소모델을 이용한 모델성능시험은 기존 소수력용 수차개발에서는 요구되지 않았던 과정이지만 중·대수력용 수차개발을 위해서는 필수적인 과정으로 해당과제를 통해 개발된 수차에 대해 국제적으로 신뢰성을 인정받은 스위스 연방로잔공대에서 모델시험검증을 실시하여 92.5%이상의 효율성능을 확인한 바 있다. 이러한 모델시험 효율은 IEC60193코드에 따라 현장 효율로 환산할 경우 93.5%이상의 효율성능을 확보한 것으로 평가되었으며 이는 현장 설치 후 진행된 현장 실증시험을 통해 확인하였다.

또한 수차·발전기는 저속 고중량 특성의 회전체이므로 이를 안전하게 지탱하기 위해 저널베어링이 주로 사용된다. 그러나 기존 터빈 베어링은 오일 윤활방식을 사용함으로써 누유로 인한 환경오염의 위험에 취약하였으나 이를 보완하기 위해 수운활 기술을 적용함으로써 누유에 의한 환경오염 문제를 원천적으로 차단하였다.

나. 수력발전기

수력용 발전기는 수차와 달리 비속도가 아닌 출력에 따라 구분이 된다. 그 형태는 수차의 형식에 따

라 다르며 화력발전이나 가스발전과 달리 주로 동기식 발전기가 사용된다. 특히 중·대형 이상의 수력 발전기는 500rpm미만의 저속회전과 다수의 극수로 큰 직경과 고중량을 그 특징으로 하고 있어 주로 분할제작 및 현장조립이 필요하나 칠보수력의 경우 (주) 효성에서 보유한 제작설비를 이용 15MW급 일체형 발전기로 제작하였다. 설계적인 특징으로는 회전자 외경증가 및 무방향성 구조강판의 적용으로 동일 직경기준 출력이 증대되었고 고조파 왜형률 감소와 고정자 권선피치, 턴수, 그리고 회로 병렬수 최적화를 통해 효율을 목표치인 96.5%를 넘어 98.2%까지 달성하였다. 또한 단락비 1.0을 확보하여 광역 정전시 시송전의 역할을 수행할 수 있도록 설계하였다.

현재 국내 기술로 실증가능한 수력발전기의 규모는 15MW급으로 그 이상 대형수력발전기는 현장조립 등이 필요하며 이를 위한 국산화가 필요하다.

다. 통합제어시스템

수력발전용 제어시스템은 수차 및 발전기를 안전하고 효율적으로 운전하게 하는 설비로 수차 및 발전기의 상태를 운전자에게 전달하거나 운전자의 의도를 수력설비에 전달하여 최적인전이 되도록 제어하는 역할을 담당한다. 또한 수차 및 발전기를 외부적인 충격 등의 위험조건으로부터 안전하게 보호하기 위해 높은 신뢰성과 안정성이 확보되어야 한다. 최근의 제어시스템은 예전의 아날로그 방식에서 디지털 방식으로 바뀌어가고 있으며 디지털제어는 응답성이 좋은 것이 그 특징이다. 이를 위해 칠보수력의 제어시스템은 DCS, 수차의 회전속도 및 출력을 제어하는 GOV 제어, 발전기 제어로 크게 구분되며 특히 GOV 제어를 DCS에 통합하여 콤팩트한 제어시스템을 구성하였다. 또한 발전기 제어기는 고속 기능블럭형 구조의 소프트웨어 채택으로 사용자 편의성을 증대하여 사용자가 편리하게 제어 및 감시를 할 수 있도록 기능을 구성하였다.

제 4 장 15MW급 수차기술의 확장가능성

대부분의 수차 개발 및 제작사들은 오랜 경험을 통해 확보한 수차 설계를 위한 비속도-설계상수의 상관관계 경험식을 보유하고 있으며 이는 각 제작사마다 상이하다. 이러한 방법으로 인해 각 비속도 모델에 대한 경험식의 계수들을 확보하여 설계 DB가 확보될 경우 설계기술과 더불어 전체 수차개발을 위한 기술을 확보할 수 있다. 이러한 방식은 각 제작사별 수차설계를 위한 개념이 다른 이유이기도 하다.

이번 장에서는 철보수력 실증을 통해 확보한 특정 비속도를 가진 프란시스 수차기술의 확장가능성을 살펴보고 이를 통해 신규 수력사업 추진시 철보수력에 적용된 기술의 확장적용 가능성을 평가하고자 한다.

2장에서 언급한 것처럼 수차는 비속도에 따라 그 형상이 다르며 비슷한 비속도 범위의 수차는 그 형상이 상호 유사하여 실증을 통해 수차 성능에 대한 신뢰성을 확보한 특정 비속도 모델은 일정한 비속도 변화 범위 내에서 상사모형을 이용한 확장적용이 가능하다.

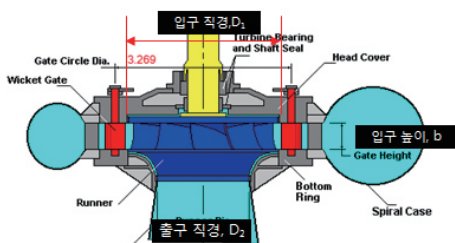
또한 이러한 개발 과정을 통해 확보한 형상설계를 위한 경험식의 계수들을 이용함으로써 특정 비속도 범위의 형상에 대한 수차개발이 가능할 것이다. 그러므로 동일한 비속도에 대한 기술확장 가능성을 살펴봄으로써 향후 수력사업 추진시 출력에 따른 구분이 아닌 비속도 구분으로, 출력이 상이하지만 동일한 비속도를 가진 수차인 경우 신규연구개발이 아닌 기존

기술의 적용을 통해 신속한 사업추진이 가능하다.

이러한 기술확장 가능성은 비속도와 비속도에 따른 수차설계 기준값을 비교 검토함으로써 평가가 가능하다.

동일한 비속도 수차모델의 확장 가능성 평가를 위한 제한조건은 아래와 같다. 먼저 회전수와 수차 입·출구 직경에 의해 결정되는 입·출구에서의 회전속도를 특정범위 이하로 유지하여 진동 및 소음에 대한 제한치를 설정해야한다. 또한 수차의 크기 기준인 출구직경 증가율은 10% 이하, 그리고 비속도 증감율 15% 이하로 유지할 경우 철보수력 수차는 그림 3의 우측 표에서와 같이 18~23MW급 수차에 적용 가능할 것으로 판단되며, 50MW급에도 제한적으로 적용가능 할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 해외수력사업 추진시나 또는 다양한 출력특성을 가지는 북한수력의 현장조사를 통해 철보수력 수차기술의 직접 적용가능성을 평가할 수 있을 것이다.

한편, 철보수력 이후 현재 비속도 300급 50MW 용량의 프란시스 수차에 대한 국산화가 진행되고 있으나, 현재 성능개선이 예정되어 있는 30MW급인 화천수력설비는 낙차와 유량의 고려한 비속도가 180에 해당되어 이미 개발 완료된 철보수력용 수차 모델 적용이 곤란하며 현재 진행되고 있는 50MW급의 수차와도 상이한 형상으로 인해 이에 대한 화천수력발전용 수차를 위한 신규 기술개발이 필요할 것으로 판단된다.



구분	낙차 [m]	유량 [m ³ /s]	출력 [MW]	회전수 [rpm]	비속도	런너 형상[m]			
						D ₂	D ₁	D ₁ /D ₂	b
철보수력	155	10.84	15.0	514.3	115	1.20	1.52	1.27	0.25
	184	10	18.0	514	102	1.20	1.90	1.58	0.21
	215	10.9	23.0	514	95	1.30	1.90	1.46	0.20
기술 확장 가능성	180	28.3	49.9	360	122	2.00	3.00	1.50	0.36
	화천 #4	64.7	43.8	27.8	200	182	2.50	2.65	1.06

그림 3. 철보수력 수차기술의 확장적용 가능성