



배수로 수위조절을 통한 소수력 성능개선



정진경

jinkyong@kosep.co.kr

전북대학교 기계공학 학사
한양대학교 파워엔지니어링공학 석사
한국남동발전(주) 대리

1. 서론

최근 지구 온난화 문제로 기후변화협약과 같은 환경 규제가 강화되면서 신재생 에너지 개발에 대한 중요성이 더욱 강조되어 세계 각국에서는 과다한 초기투자비에도 불구하고 신재생에너지 연구개발과 보급에 과감한 투자를 하고 있다. 특히 한국은 2008년말 기준 총에너지의 2.4%인 신재생에너지 비율을 2011년까지 5%로 높인다는 장기적인 목표하에 신재생에너지 기술개발 및 보급 사업 등에 대한 지원을 강화하고 있다. 또한 발전사업자에 총발전량에서 일정 비율을 신재생에너지로 공급토록 의무화하는 제도인 신재생에너지 공급의무 할당제를 2012년 전체 발전량의 2% 안팎에서 시작해 2022년엔 10%수준으로 늘릴 예정이다. 이와 같이 신재생 에너지에 대한 중요성이 점차 강조되고 있는 가운데, 소수력은 타 신재생 에너지원에 비해 발전설비가 비교적 간단하여 설치 및 유지관리가 용이하고 발전효율이 우수한 장점을 가지고 있다. 또한 국내의 풍부한 부존량을 바탕으로 과거부터 많은 관심을 받아 왔으나 낮은 경제성으로 개발이 활성화되지는 못하였다가 근래에 들어 화력 발전소의 냉각수 방류수, 농업용 저수지, 하수 처리장, 중·소규모 댐의 방류수 등 기존 시설물을 이용한 소수력 개발이 활발하게 추진되고 있다.

특히 국내 대형 석탄 화력발전소에서 냉각수로 사용되고 해양으로 방류되는 해수는 약 100 MW 당 5 ton/s에 달하는 수력에너지를 보유하고 있으며, 연중 안정적인 유량을 확보 할 수 있다는 점에서 강우특성에 따라 발전가능 기간이 제한되는 하천의 소수력에 비해서 개발에 큰 장점이 있고 일부 문제를 제외하고 경제적 및 기술적인 측면에서 적용여건이 양호한 것으로 알려져 있다. 또한 냉각수 배수로 구조물을 이용한 저수조와 일정한 조위변화에 따라 발생하는 낙차를 이용하므로 환경변화에 대한 영향을 거의 받지 않는다는 장점이 있다. 이에 각 발전 회사들은 삼천포화력, 태안화력, 영흥화력, 보령화력, 당진화력 등의 발전소 냉각수 계통에 소수력을 설치하여 운영 중에 있다. 그러나 소수력의 발전량은 냉각수 방류수량, 발전낙차, 배수로 구조물의 형태, 소수력의 특성 및 운영방법에 따라 달라지게 되며, 이러한 인자들은 소수력 건설 시 경제성 평가 및 발전용량 선정에 중요한 판단 기준이 된다.

이 중에서도 소수력 발전의 저수조 수위와 외해 조위와의 차에 의해 발생 하는 낙차는 발전량에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 발전량 증대를 위해서는 저수조 높이를 증가시키면 되나 이에 따라 냉각수 계통의 통수 불량 및 해수취수 펌프의 소비동력 증가 등 기존 발전소의 안정적인 운전 에 문제를 초래한다. 발전소 냉각수 배수로에 소



수력을 설치 시 출력 증대를 목적으로 저수조 수위를 일정치 이상 높이는 것은 냉각수 계통에 기능 저하를 초래한다. 따라서 소수력 발전 용량 산정 시 저수조 높이는 냉각수 계통의 안정성이 저하되지 않도록 배수로 내 폐정에서의 수위 상승이 일정 기준치를 넘지 않는 범위 내에서 결정되며, 이는 소수력 발전의 용량 제한 요소가 된다.

본 고에서는 기존 냉각수 계통의 기능 저하를 최소화하면서 발전량을 증가시킬 수 있는 방안으로 가동보를 활용하여 수차 발전기 운전 및 정지에 따른 저수조 수위 조절에 대해 소개하고, 저수조 수위 변화에 따른 폐정에서의 수위 변화를 예측하고 비교함으로써 발전 출력을 증대시킬 수 있는 가동보의 활용 방안과 효과에 대해 고찰하였다.

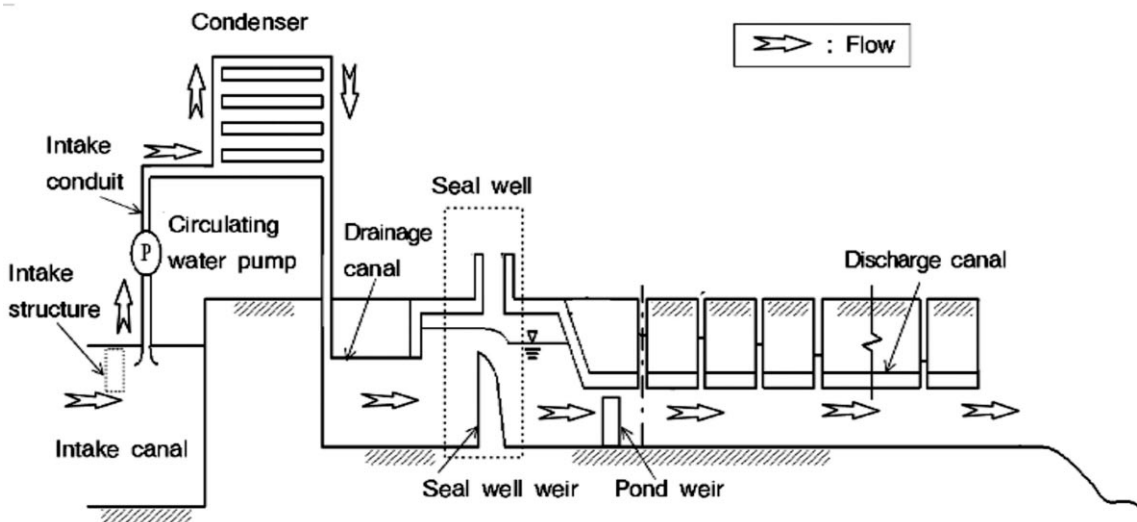
2. 냉각수 이용 소수력 발전

2.1 냉각수 계통의 개요

냉각수 계통은 발전소 터빈발전기의 저압터빈으로부터 배기되는 수증기를 복수기에서 냉각하여

물로 전환시킴으로써 터빈 배기압력을 낮추고 정격압력을 유지하여 터빈의 효율을 증대시키는 역할을 한다. 또한 배기 증기를 물로 전환 시켜 보일러 급수로써 재순환이 용이하도록 한다. 이 때, 사용되는 냉각수량이 너무 적거나 온도가 높은 경우 복수기 내부 압력이 상승하여 터빈 효율 및 출력이 저하되고, 냉각수량이 너무 많거나 온도가 낮은 경우에는 과냉된다. 이러한 냉각수 계통의 기능은 복수기에 적절한 용량과 온도의 냉각수를 원활하게 공급하고 배출시키는 데 있다.

냉각수 계통의 형식은 냉각수를 복수기로 이송하여 열교환을 한 후 다시 회수하지 않고 취수원으로 방류하는 직접 순환방식(once-through system)과 사용된 냉각수를 냉각탑이나 냉각지로 이송하여 냉각시킨 후 재사용하는 재순환 방식(closed system)으로 크게 분류할 수 있다. 재순환 방식의 경우는 대부분의 열병합 발전소에서 사용되고 있으며, 직접 순환방식의 냉각수 계통은 취수원이 매우 풍부한 해양근처에서 주로 사용되며 영흥 화력을 비롯한 국내 모든 국내 화력 발전소에서 사용되고 있다.



[그림 1] Overview circulating water system



그림 1은 소수력이 설치된 직접 순환방식의 냉각수 계통을 나타낸 것이다. 이 계통은 접근수로(intake canal), 취수구조물(intake structure), 해수취수 펌프(circulating water pump), 취수로(intake conduit), 복수기(condenser), 배수로(drainage canal), 소수력 발전(small hydro power plant), 배수구조물(drainage structure), 방수로(discharge canal)로 구성된다. 접근수는 해수가 외해에서 냉각수 계통으로 일정한 속도로 유입되도록 설계되며 외해 파랑이나 조위 변화에 영향을 받지 않고 일정한 유량이 안정적으로 공급될 수 있도록 설치된다. 취수 구조물은 펌프를 이용하여 해수를 공급하기 위한 목적이며 해수취수 펌프의 운전 조건에 따라 공급유량이 결정된다. 배수로는 복수기에서 방류되는 해수를 외해로 배출시키기 위한 수로로서 마찰 손실수두 증가에 따른 펌프 소비동력 증가를 감안하여 개수로 형태로 구성된다. 배수로의 구조 형태는 관수로식, 암거식, 관로식 등으로 구분되며 주로 콘크리트 구조물이 이용된다. 한편, 소수력 발전은 배수로에 저수조 보(pond weir)를 설치한 후 복수기에서 방출되는 해수를 이용하여 발전하는 설비이다. 방수로는 냉각수 계통의 최하부 구조물로서 냉각수가 외해로 방류되기 전에 해수의 에너지를 분산시키고 유속을 감소시켜 배출 시 외해에 영향이 없도록 한다. 직접 순환방식은 냉각수가 해수취수 펌프 출구로부터 복수기를 지나 냉각수원인 해양으로 되돌려 보내는 지점까지 밀폐된 구조로 만들 수 있어서 펌프동력 절감을 위해 사이편을 이용하는 것이 특징이다.

한편, 폐정은 냉각수 계통의 사이편을 유지하는 기능을 한다. 그림 1에서 점선으로 표시되어 있는 부분으로 폐정은 대기 중의 공기가 일정치 이상 냉각수 계통 내로 들어오지 못하게 할 목적으로, 위어를 설치하여 냉각수원의 수위변화에 관계없이 출구 배관이 항상 물에 잠기도록 한다. 이를 통해 냉각수 계통의 사이편이 깨지지 않고 지속적

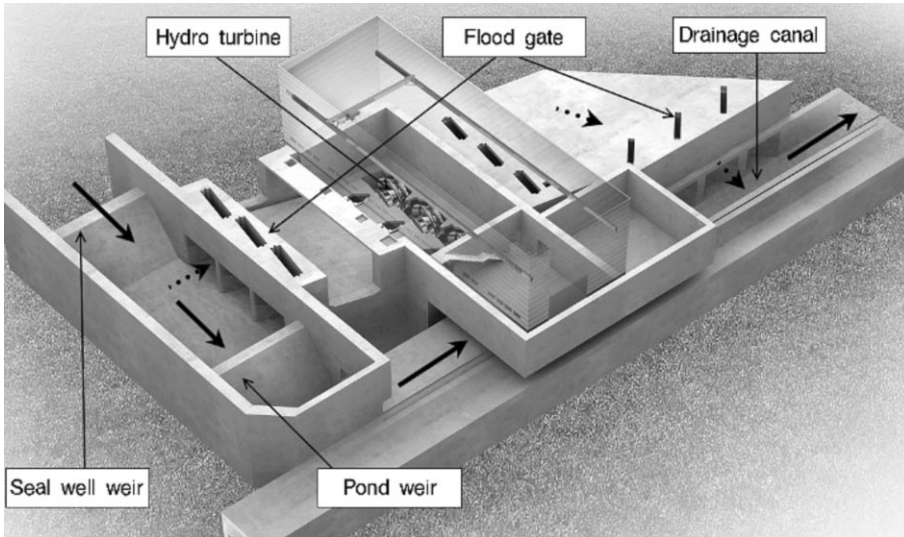
으로 형성되어 펌프 소비동력을 절감하는 역할을 하고 있다.^[5] 또한 폐정 위어를 중심으로 상부는 복수기를 비롯한 기계계통이 하부는 방수로 등의 구조물인 기계 외부계통이 존재하여 해수면이 높을 시 하부의 해수 수위 상승이 상부 기계계통에 영향을 미치지 않도록 하는 완충역할을 한다.

2.2 소수력 발전 구성

화력발전소 냉각수 방류수를 이용한 소수력은 복수기를 냉각시킨 해수를 일정한 저수조를 설치하여 저장한 후 조석에 따라 변화하는 해수위와의 낙차를 이용하여 발전하는 방식이다.

소수력 발전 방식은 주변 지형 및 배수로 조건에 따라 수로식, 댐식, 댐수로식, 흐름식 등으로 구분된다. 현재 국내 화력 발전소 냉각수 계통에 설치되어 있는 소수력 발전소는 수로식과 댐식의 두 가지이다. 댐식 소수력 발전은 방수로 말단부에서 외해로 방류되는 지점에 발전유량 확보를 위한 댐을 설치하고 저수지와 외해와의 낙차를 이용하여 발전하는 방식이다. 댐식은 냉각수 방류수 전부를 이용하는 것이 목적이며 조위낙차는 작지만 이용 냉각수량이 많을 때 설치가 고려된다. 그러나 일반적으로 댐식은 수로식에 비해 발전량을 크게 할 수 있지만 공유수면 사용 허가 및 환경 영향 평가 등 인허가 사항이 많은 단점이 있다.

그림 2는 수로식 소수력 발전의 개략적인 구성을 나타낸 것이다. 수로식 소수력 발전은 크게 수로 구조물, 수차발전기(hydro turbine), 수로 설비(flood gate), 계측기, 기타 부속 설비 등으로 구성된다. 수차발전기는 유량, 낙차 및 출력에 의해 결정되는데 낙차는 조위에 따라 한정되기 때문에 낙차 및 부하의 변동에 대응하여 효율이 가장 좋고 부분 부하에서도 효율 저하가 적은 카플란(kaplan)수차나 프로펠러(propeller)수차가 주로 사용된다. 수로 설비는 수차발전기의 보수를 위하여 소수력 발전소에 유입되는 유량을 차단하기 위한 문비설비로 구성되며 정상 운전 중에는



[그림 2] Diversion canal type small hydro power plant

별도로 보관하였다가 필요 시 설치하여 수로 구조물의 유입 및 유출구를 차단한다. 계측기는 수차 발전기의 안정적인 운영 상태를 점검하기 위한 진동감시 장치, 소수력 내 및 배수로 내 수위 현황 등을 파악하기 위한 초음파 레벨 측정장치 등으로 구성된다.

수로식은 배수로 폐정 후단에 일정한 높이의 월류보를 설치하여 저수조를 구성하고 배수로의 기존 경로를 변경하여, 외해 조위와의 낙차를 이용하는 발전 방식으로 낙차를 최대한 크게 확보하고 방류수 일부만을 이용하고자 하는 것이 목적으로 서해와 같이 조위낙차가 큰 지역이 유리하다. 한편 수로식은 댐식에 비해 발전량이 작고 배수로 구조물에의 간섭 등의 단점이 있지만 기존 계통에 미치는 영향이 적고 운영이 용이한 장점이 있다. 그러나 수로식의 경우에도 저수조 보가 높을 경우 기존 계통에 큰 영향을 준다.

2.3 소수력 출력 특성

발전소 냉각수 방류수를 이용하는 소수력은 외해 조위 변화에 따라 발전 낙차가 변화한다. 외해

조위는 평균해면(mean seal level)을 중심으로 만조에서부터 간조까지 일간 주기적으로 변화하며, 평균 해면을 원점으로 만조시는 (+)로, 간조시에는 (-)로 수위를 표시한다. 이에 발전 낙차는 저수조 수위와 외해 조위의 차에 의해 결정되며, 일조석 주기당 낙차 변화에 대한 평균값은 저수조 수위와 평균 해면과의 차로 일정하다. 따라서 조차의 변화에 관계없이 일조석 주기당 에너지 변화는 평균 해면과 저수조 수위만을 고려하면 된다. 또한 소수력의 출력 범위는 최대 낙차와 최소 낙차 사이가 되며, 최대 낙차는 저수조 수위와 간조 시 외해 조위의 차로 결정되며, 최소낙차는 저수조 수위와 수차가 안정적으로 운전될 수 있도록 요구되는 최저 운전 낙차와 계통 손실수두를 고려하여 결정된 외해 조위와의 차에 의해 결정된다.

한편 발전 낙차는 소수력 구조물 형상에 의한 마찰 손실, 계통에서의 마찰 손실을 고려해서 산정해야 한다. 특히 냉각수의 원활한 방류 및 온배수의 혼합을 빠르게 하기 위한 심층배수를 목적으



로 방수로 말단부에 급격한 경사 구간이 존재하는데 이 구간에서 손실 수두가 크게 발생한다. 따라서 최초 소수력 건설 시 발전량 산정에 큰 영향을 미치게 되어 이러한 손실 수두가 고려되지 않을 시 발전량은 계획대비 상당한 차를 보이게 되므로 정확한 발전량을 예측하기 위해서는 반드시 고려되어야 한다.

소수력에 이용되는 유량은 해수취수 펌프의 토출량으로 이는 복수기 진공도와 발전 출력에 따라 결정되며, 일정 조건에서 복수기가 필요로 하는 냉각수량은 해수 온도에 따라 달라지므로 계절별로 발전 유량이 변화한다. 앞서 살펴 본 바와 같이 소수력의 출력에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 발전 낙차와 냉각수량이다. 이 중에서 냉각수량은 발전소 운전 조건에 따라 달라지므로 임의적인 변경이 불가능하고, 이에 출력을 증대시키기 위해서는 저수조 수위 상승이 필요하다.

3. 소수력 출력증대 방안

3.1 운전 정지 시 폐정 수위의 유지

소수력 발전은 조위 특성과 냉각수 계통의 특성에 따라 2가지의 운전 방식으로 구분할 수 있다. 우선 정유량, 변낙차 방식은 소수력 저수조 수위를 일정하게 유지시키기 위해 정유량을 공급하는 형식으로, 조위차가 적은 지역에 주로 적용하며 낙차변화에 따라 발전출력의 변화가 큰 것이 특징이다. 반면 변유량, 변낙차 방식은 유량을 조절하기 위해 월류보를 구성하고, 목표 발전출력을 위해 낙차 변화에 따라 공급 유량을 조정하는 형식으로 조위차가 크더라도 목표 출력을 일정하게 유지할 수 있다는 장점이 있다. 변유량 변낙차 방식의 경우는 일정 발전 용량을 기준으로 조위가 하강하여 발전낙차가 커질 경우 전체 유량을 발전에 이용하지 않고 일부 유량을 월류 위어를 통해 배수함으로써 일정 발전량이 유지되도록 한다. 따라서 소수력이 가동 중일 때는 냉각수의 대부

분이 소수력 발전수로로 유동하고 발전에 이용되지 않는 일부 해수만이 저수조 보를 월류하므로 저수조 내 수위는 일정하게 유지되어 전단 구조물인 폐정의 수위상승은 발생하지 않는다.

그러나 수차 발전기가 정지 시에는 방류수 전체가 저수조 보를 월류하여 방류되므로 저수조 보 설치에 따른 냉각수 흐름이 불완전 월류가 되어 전단 구조물인 폐정에서의 수위 상승이 발생한다. 특히 폐정의 수위 상승은 방류되는 냉각수 유량과 외해 조위의 영향을 많이 받으며, 이에 따라 냉각수량이 가장 많은 하절기 고조위 시 최대가 된다.

일반적으로 냉각수 계통에 소수력 발전이 설치될 시의 가장 중요한 문제는 기존 냉각수 계통에의 영향 유무를 파악하는 것이다. 수차 발전기 정지 시 저수조 수위에 의한 폐정의 수위 상승은 냉각수 계통의 기본적인 설계에 영향을 주며 이에 대한 영향 유무를 파악하기 위해서는 냉각수 계통의 수리현상을 분석할 필요가 있고, 이때 고려하는 것이 냉각수 계통의 에너지 경사선(energy gradient line)이다.

에너지 경사선은 해수취수 펌프의 양정고를 산출하기 위해 계통 내 전체적인 손실수두를 계산하여 작성된다. 손실수두 계산은 냉각수 계통 설계 및 펌프 운영에 가장 중요한 항목으로, 손실수두가 과대 또는 과소 산정될 경우 펌프의 진동 및 공동 현상이 발생하게 되며 특히 과대하게 산정될 시 펌프 소비 동력이 증가하고, 복수기 튜브의 마모가 발생하기도 한다. 에너지 경사선의 펌프 토출측은 계통 설계유량이 폐정 위어를 월류할 때의 높이를 기준으로 폐정 위어에서 역으로 펌프쪽으로 작성되는데 이 높이를 기준으로 위어에서 복수기 출구, 복수기 출구에서 복수기의 최상부, 복수기 최상부에서 펌프 토출구 등 각 구조물의 구간별 관로에서의 마찰 수두를 계산하여 산출한다. 또한 펌프 흡입측에서는 외해 조위를 기준으로 취수 관로, 취수설비 및 구조물에서의 마



찰수두를 계산하여 산출한다. 이러한 단계에 의해 작성된 냉각수 계통의 에너지 경사선을 기준으로 펌프 토출 측과 흡입측의 비 에너지 차에 의해 펌프의 양정이 결정된다.

냉각수 계통에서 가장 우려하는 사항은 폐정에서의 수위가 변화되는 것으로, 특히 수위가 일정치 이하로 하강할 시 계통내로 기포가 다량으로 유입되어 싸이펀이 깨지는 경우이다. 소수력 설치로 인해 폐정의 수위는 상승하기 때문에 싸이펀이 깨질 우려는 없으나 반대로 싸이펀 수두가 감소함으로써 에너지 경사선이 변화하게 되며, 해수 취수 펌프의 양정고가 상승하여 토출 유량이 감소하고 소비동력이 증가하는 문제가 발생한다. 따라서 소수력 발전의 출력 상승을 위해 저수조 수위를 일정 이상 높이는 것은 펌프의 추가적인 소비동력 증가를 유발하므로 의미가 없다. 또한 냉각수 계통의 통수 불량으로 배수되는 유량이 감소하는 문제가 발생하기도 하며 심각할 경우 발전소 정지로도 이어질 수 있다. 따라서 폐정의 수위 상승 역시 냉각수 계통에 악영향을 주게 된다.

이에 소수력 발전의 저수조 보 높이는 냉각수 계통에 영향이 없도록 일정 범위내에서 결정되며, 소수력 발전의 출력도 제한되게 된다. 그러므로 소수력의 출력을 증대시키기 위해서는 운전 정지 시 폐정의 수위가 설계치 및 허용치를 초과하지 않도록, 수차 발전기 가동 및 정지에 따라 저수조 수위를 높이거나 낮출 수 있는 방안이 필요하다.

3.2 가동보를 활용한 저수조 수위 조절

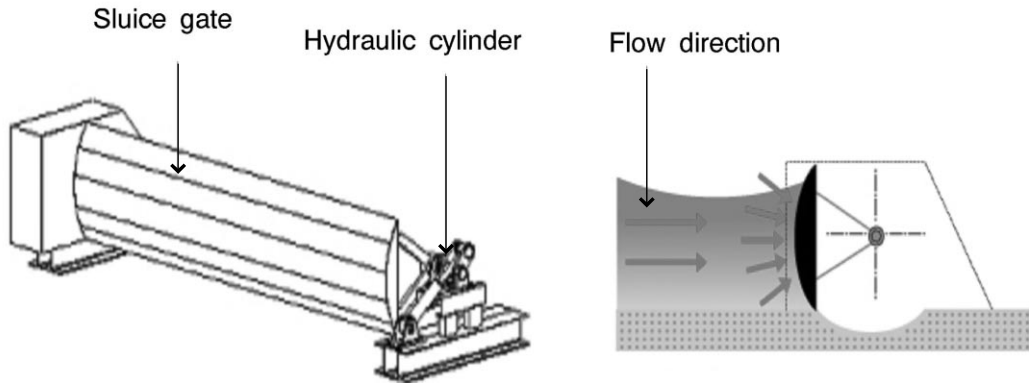
보는 각종 용수의 취수, 저수조 내 수위 유지 및 조절, 조류의 역류 방지 등을 위한 수리구조물로서 구조적으로 고정보와 가동보로 구분할 수 있다. 고정보는 일정 수위 이상이 되면 유수가 보를 월류하여 수위가 유지되는 방식으로 상류부에 영향이 없거나 저수조에 여유가 있는 경우 주로 이용되고 대부분 콘크리트 구조물로 이루어진다.

한편 가동보는 저수조 내 수위 상승 시 문비설비를 이용하여 상시적으로 수위 조절이 가능한 방식으로 일반 하천이나 방수로에 다양하게 이용되고 있다. 가동보는 구동 방식에 따라 크게 고무+철관 저층수 유입 가능 가동보, 고무보, 전도식 가동보, 유선형 자동보 등으로 구분된다.

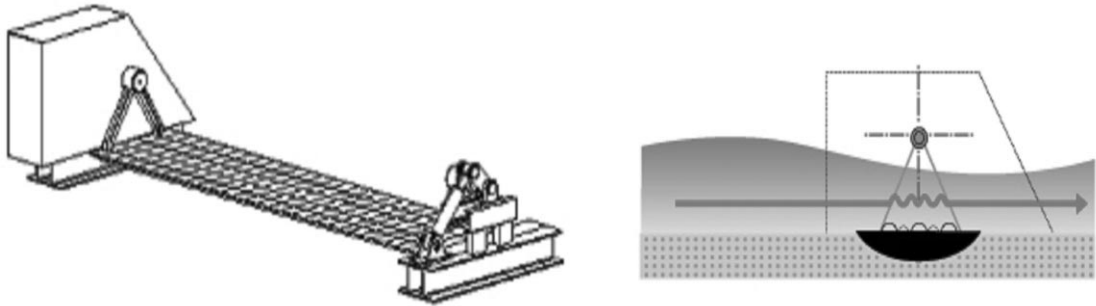
본 고에서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 개량형 전도식 가동보의 일종인 복합 가동보를 적용하는 방안에 대해 검토하였다. **그림 3**은 복합 가동보의 구조와 문비 동작을 나타낸 것이다. 복합 가동보는 수문을 회전 가능케 하는 구동부가 좌우 측면에 설치되어 유압실린더의 직선운동을 회전 운동으로 변환하여 수문을 개폐하는 방식으로 동작된다. **그림 3 (a)**는 보의 기립 상태를 나타낸 것으로 수문이 곡면으로 구성되어 있기 때문에 유동 차단 시 수문 표면에 수압이 분산 분포됨으로써 수문 자체 표면압력이 최소화된다. **그림 3 (b)**는 보의 도복 상태를 나타낸 것으로 수문이 바닥과 같은 높이로 완전 전도되기 때문에 바닥과의 단차가 없어 통수 단면적을 최대화 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 복합 가동보를 활용하면 저수조 높이 변경에 따른 정확한 수위 조절이 가능하다.

기존의 소수력 발전 저수조 보는 콘크리트 고정보로서 수차 발전기 가동 및 정지 시 수위 조절이 불가능한 단점이 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 이는 폐정 수위에 영향을 미치므로 소수력 발전의 출력 제한 요인이 된다.

따라서 폐정 수위가 설계치를 초과하지 않는 범위 내에서는 고정보를 사용하고 그 이상에서는 고정보 상부에 일정 규모의 가동보를 설치하여 수위 조절이 필요한 범위 이내에서 수차 발전기 운전 조건에 따라 기립 또는 도복할 수 있게 구성하면 저수조 수위 조절을 통하여 폐정에서의 수위 상승을 방지할 수 있다. 이러한 방안을 적용하면 기존 소수력 발전의 출력을 상승시킬 수 있게 된다.



(a) Shutting the movable weir



(b) Opening the movable weir

[그림 3] Movable weir with the fluid pressure

4. 가동보 활용 필요성

본 장에서는 가동보의 활용 필요성을 확인하기 위하여 모델 발전소로 영흥화력 3,4호기 소수력 발전을 선정 후, 발전 정지 시 저수조 보 높이에 따른 폐정에서의 수위 변화를 상용 전산유동해석 프로그램인 Flow-3D를 이용하여 예측하였다. 이를 통하여 폐정의 수위가 설계치를 유지하면서 저수조 보 높이를 증가시키기 위한 방안으로 가동보를 활용한 저수조 수위 조절에 대해 고찰하였다. 한편 본 논문에서 모든 수위치는 수준 원점을 기준으로 나타내었다.

4.1 실증대상 설비

4.1.1 설비 개요

영흥화력 3, 4호기 소수력 발전소는 1,200 kW 용량의 발전기 3대가 설치된 3,600 kW급 발전소이다. 발전 방식은 수로식으로 전체 유량을 발전에 이용하지 않고 일부 유량을 저수조 보를 통해 배수함으로써 일정 발전량이 유지되도록 하는 변유량 변낙차 방식이다.

표 1은 영흥화력 3, 4호기 소수력 발전의 정격 낙차 및 유량 등의 주요 사항을 나타낸 것이다. 현재 소수력의 정격 낙차는 6.92 m, 운전 가능 최저



〈표 1〉 Specifications of the small hydro power plant in Yonghung #3,4

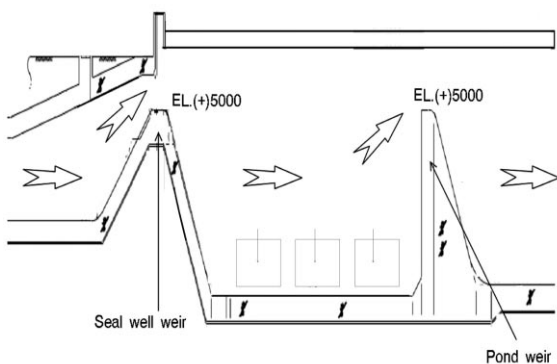
Item	Unit	Specifications
Net head at rated condition	m	6.92
Minimum head for operation	m	2.3
Maximum flow rate	m ³ /s	75 (25 × 3)
Hydro turbine efficiency	%	93.3

낙차는 2.3 m이고, 정격 유량은 수차 한 대당 25 m³/s로 총 유량은 75 m³/s이다.

한편 운전은 수차 전·후단에 설치된 초음파 레벨측정 장치를 통해 계측된 수위에 의해 기동 및 정지가 자동으로 이루어진다. 이에 따라 외해 조위가 발전 가능한 일정수위 이하가 되면 1대씩 자동으로 순차 기동이 되고 일정 수위 이상에서는 정지된다.

표 2는 영흥화력 3, 4호기 냉각수 계통의 주요 사항을 나타낸 것이다. 순환수 펌프는 호기당 2대씩 총 4대가 설치되어 있고 설계 유량은 73,000 m³/hr이며, 배수로 구조물의 규격은 표에 나타내었다.

그림 4는 실증 모델인 영흥화력 3, 4호기 배수로 구조물 중 폐정과 저수조 보가 설치된 구간을 나타낸 것이다. 구조물에서 수위 변화에 가장 중



〈그림 4〉 Detail drainage canal including seal well weir and pond weir

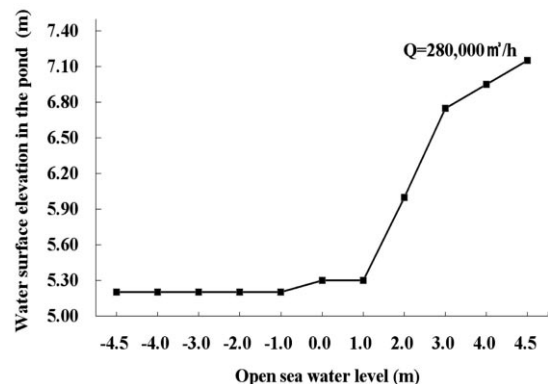
〈표 2〉 Specifications of the circulating water system in Yonghung #3,4

Item	Unit	Specifications
Pump capacity	m ³ /hr	73,000 × 4 ea
Total discharged water	m ³ /s	81.12
Drainage canal size	m	6.1(Breadth) × 5.7(Height) × 1 ea

요한 부분은 폐정 위어로 현재 높이는 5.0 m이고, 저수조 보의 높이는 5.0 m이다. 폐정 천정고는 통수 여유 및 자유수면 확보를 위하여 8.5 m로 설치되어 있다. 한편 저수조 중앙에는 수로 구조물이 설치되어 있어 소수력 운전 중에는 유량은 수로를 통해 수차 발전기쪽으로 유입되고 정지 중에는 저수조 보를 월류하여 기존 배수로를 통해 외해로 방류된다.

4.1.2 운영 현황

그림 5는 본 고의 실증 대상인 영흥화력 3, 4호기 소수력 발전의 2009년도 하절기 연중 냉각수 유량이 설계치에 거의 접근했을 때 일간 조석주기당 외해 조위 변화에 따른 저수조에서의 수위 변동 현황을 나타낸 것이다. 저수조 수위는 초음파레벨 측정 장치에 의해 관측되었으며, 저수조



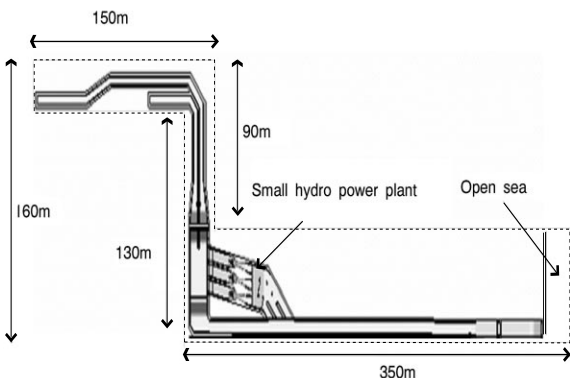
〈그림 5〉 Sea water level water fluctuation in the pond for a day

중앙에서의 값이다. 냉각수량이 계통 설계유량에 근접한 280,000 m³/h일 때 저수조 내 수위는 수차 발전기가 최초 정지한 시점인 외해조위 2.0 m 일 때부터 상승하며 고조위 4.5 m일 때, 수위는 7.15 m까지 이른다. 특히 저수조의 수위상승은 폐정의 수위 상승을 의미하므로 이는 현재 소수력 발전에서 수차 발전기 정지 후 외해 조위 상승에 따라 폐정의 수위가 계통 설계 기준치인 6.8 m를 초과할 것으로 추측되었다.

한편 펌프 소비동력 증가량은 조위 변동에 따른 양정변화에 의하여 달라지며, 펌프 성능곡선에 따라 산출하면 펌프 1대를 기준으로 양정이 0.1 m 상승할 시 7~8 kW가 증가되는 것으로 분석된다.

4.2 폐정 수위 예측

소수력 배수로 내부 유동에서, 저수조 수위 상승으로 인한 상부 구조물인 폐정의 수위는 외해 조위 및 유량의 영향을 받기 때문에 일반적인 예측과는 상당한 차이를 보인다.^[16] 따라서 저수조 보 높이가 변경에 의한 폐정의 수위 변화에 대하여 정확한 비교 분석을 위하여 현재 5.0 m와 변경시의 높이 5.5 m, 4.5 m, 4.0 m에 대하여 폐정의 수위 변화를 예측하였다. 특히 외해 조위가 가장 높을 때인 고조위 5.0 m에서 폐정의 수위가 최고가 되므로 이를 기준으로 하였다.

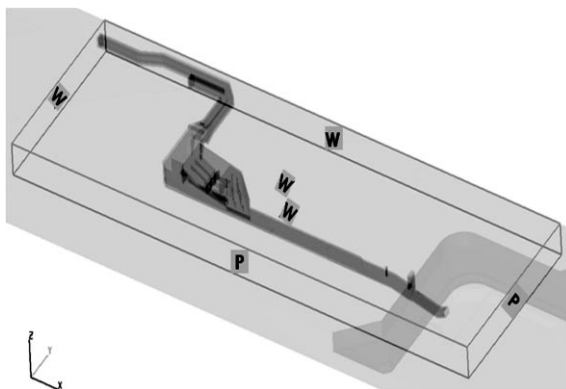


[그림 6] Domain numerical analysis

4.2.1 해석 범위 및 경계조건

그림 6은 실증 모델인 영흥화력 3, 4호기 냉각수 계통의 수치해석 범위를 나타낸 것이다. 해석은 계통 전체 중에서 배수로, 소수력 발전소, 방수로 등 복수기 후단에서 외해까지의 구조물과 외해 100 m를 대상으로 실시하였고 해석 범위는 그림에 나타내었다. 배수로 구조물 외해는 배수구에서 토출되는 냉각수량의 영향으로 인하여 수위변동이 없도록 구성되어야 한다. 따라서 이를 고려하여 해석범위 내의 결과값이 영향을 받지 않도록 외해 100 m까지 해석범위를 정하였다.

수치 해석을 위한 경계 조건은 각 제어체적 면에 하나가 부여되고, 본 해석에 사용된 경계 조건은 벽면(wall)과 압력(specified pressure)의 두 가지 조건이다. 그림 7은 수치해석 모델의 각 제어체적면에 대한 경계 조건을 나타낸 것이다. 이 때 벽면 경계 조건은 물리적으로 벽을 의미하며 경계에 수직인 방향으로의 속도 성분이 0인 조건이다. 한편 압력 경계 조건은 방향에 대한 함수 또는 시간에 대한 함수로서 압력값 및 수위값을 부여할 수 있는 조건을 의미한다. 그림에서 W는 벽면 조건, P는 압력 조건을 의미하며, 경계조건에서의 수위 변동은 외해에서만 발생하므로 해당좌표계에 압력 경계 조건으로 수위값을 부여하였고, 이외는 벽면 경계 조건을 부여하였다.



[그림 7] Assignment of boundary conditions



초기조건은 저수조 보 높이를 기준으로 폐정 및 폐정 전단 배수로 내에 유량이 존재하는 것으로 설정하였다. 해수취수 펌프에 의해 공급되는 유량은 계통 설계유량을 적용하였으며, 유량 공급에 소요되는 시간은 실제 펌프 한 대가 완전히 가동되는데 걸리는 시간이 대당 180초씩이므로 첫 번째 펌프 가동 후 순차적으로 유량이 공급되며 720초가 경과하면 전체 냉각수가 계통으로 공급되는 것으로 설정하였다. 수치해석은 초기 정지상태의 해수가 내부계통 유량 공급으로 인하여 변화가 발생한 후 냉각수 계통의 운동에너지 및 난류에너지가 시간에 따른 변화가 거의 없을 때까지인 1,200초 ~ 2,400초까지 수행하였다.

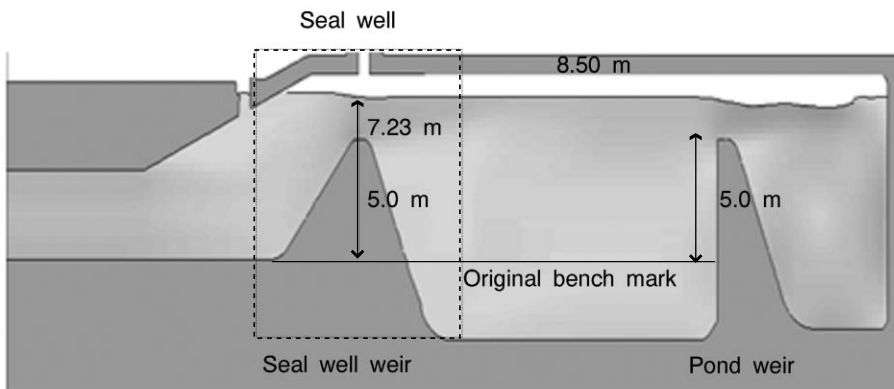
4.2.2 저수조 높이에 따른 폐정 수위

그림 8은 현재 저수조 보 높이 5.0 m에서 수치해석에 의해 분석된 폐정 내 수위 분포를 나타낸 것이다. 점선으로 표시된 부분이 폐정이며, 폐정의 수위 검토 위치는 위어 중앙의 상부 수면으로 하였다. 해석결과 폐정 및 저수조에서 수면형은 거의 일정하고 폐정에서의 수위는 7.23 m인 것으로 예측되었다. 그림 9는 저수조 보 높이를 5.5 m로 변경할 경우 폐정에서의 수위를 나타낸 것이다. 수위는 7.8 m로 기존 대비 0.6 m 정도 상승하여 폐정의 월류 수위 설계 기준치 및 허용치를 초

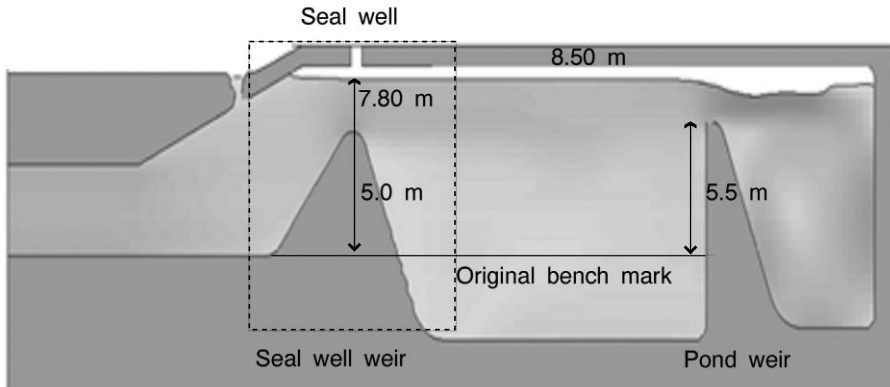
과하는 것으로 예측되었다. 이는 설계 기준치인 6.8 m와 비교하여 1.0 m 상승하는 것으로 냉각수 계통의 기능저하와 통수에 문제가 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 한편 그림 10은 저수조 보 높이를 4.5 m로 변경할 경우 폐정의 수위로서 6.93 m로 현재보다 0.3 m 하강하며 계통 설계 기준치에 근접하는 것으로 예측되었다. 그림 11은 저수조 보 높이 4.0 m에서의 폐정 수위로 저수조 보 높이가 4.5 m 일 때와 비교하면 수위는 0.1 m 정도 하강하며 계통 설계치와 거의 동일한 것으로 예측되었다.

4.3 가동보 적용 검토

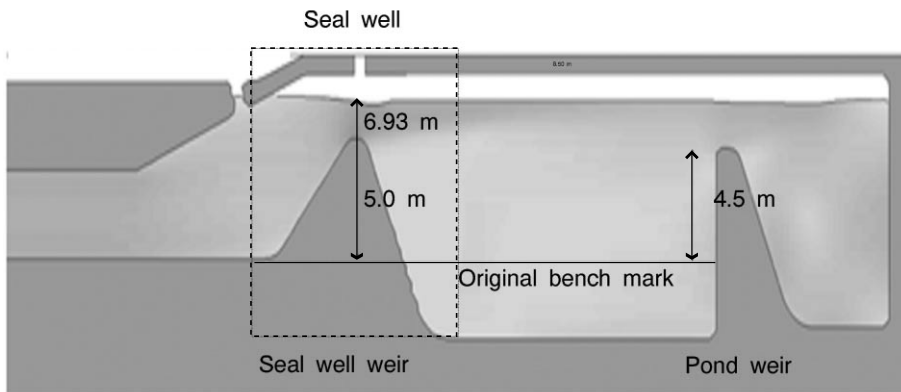
앞서 살펴 본 바와 같이 저수조 보 높이가 4.5 m 이상일 시에는 저수조 수위가 폐정의 수위 상승에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 특히 현재 저수조 보 높이 5.0 m에서도 폐정의 수위가 설계치를 초과하는 것으로 나타났다. 현재 상태에서 냉각수 계통의 통수 기능에는 문제가 없고, 저수조 보 높이 4.5 m일 때와 비교하여 저수조 수위 상승에 따른 소수력의 출력 증가가 폐정의 수위 상승으로 인한 펌프 소비동력 증가분보다 크기 때문에 경제적으로는 이득이 되는 것으로 분석되었으나 설계치에 근접한 유량을 취수할 시에는 폐정의 수위가 기준치 이상 상승하기 때문에 수



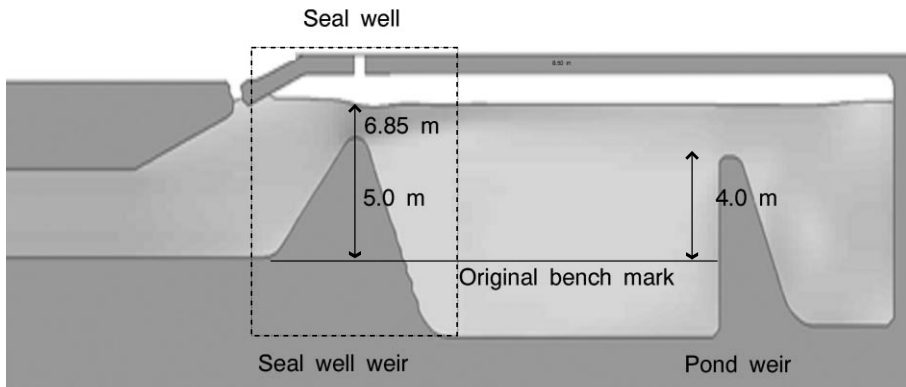
[그림 8] Predicted water surface elevation in the seal well (pond weir : 5.0 m)



[그림 9] Predicted water surface elevation in the seal well (pond weir : 5.5 m)



[그림 10] Predicted water surface elevation in the seal well (pond weir : 4.5 m)



[그림 11] Predicted water surface elevation in the seal well (pond weir : 4.0 m)



위 초과분만큼 펌프의 양정보 상승으로 소비동력이 증가할 것으로 판단되었다.

이에 고정보 높이를 4.5 m로 하고 고정보 상부에 1 m의 가동보를 구성하는 방안을 고려하였다. 가동보를 활용하여 수차 발전기 정지 시 저수조 보 높이를 4.5 m로 유지하면 폐정의 수위를 설계치에 근접하게 유지시킬 수가 있고 운전 중에는 5.5 m로 유지하여 출력을 기존보다 상승시킬 수 있기 때문에 펌프의 소비동력이 증가되는 문제없이 발전 출력 증대가 가능한 것으로 판단되었다. 특히 저수조 보의 높이를 4.0 m로 유지하면 4.5 m일 때보다 폐정의 수위를 더 낮게 유지할 수 있지만 수위 하강치는 0.1 m이내의 미약한 감소로 가동보의 도복 범위를 0.5 m 넓게 하더라도 폐정의 수위상승 방지에는 큰 이득이 없는 것으로 분석되었다. 따라서 가동보의 작동 범위를 4.5 m에서 5.5 m로 설정하는 것이 운영 신뢰성 및 활용 효과 측면에서 가장 타당할 것으로 판단되었다.

5. 결론

본 고에서는 영흥화력 발전소 3,4호기 배수로에 설치되어 운전 중인 3,600 kW급(1,200 kW × 3기) 수로식 소수력 발전소를 대상으로 소수력 운

영에 따른 폐정 내 수위 변화를 파악하였다. 소수력의 발전 출력 증대를 위하여 기존 보 높이를 상승시 발생하는 폐정의 수위 변화를 상용 전산 유동해석 프로그램인 Flow-3D를 이용하여 예측한 결과, 저수조 보 높이를 부지표고 기준 5.5 m로 고정하면 수차발전기가 정지된 상태에서 고조위 시 폐정의 수위는 7.80 m까지 상승하여 허용 설계치를 초과하여 계통의 문제가 발생하는 것으로 예측되었다. 저수조 보 높이를 4.5 m로 할 경우 폐정의 수위는 6.93 m, 보 높이가 4.0 m일 경우 폐정 수위는 6.85 m로 계통 설계치에 근접하며, 가동보를 활용하여 수차 발전기 가동 및 정지에 따라 저수조 보를 4.5 m에서 5.5 m까지 조절할 경우 냉각수 계통의 기능저하 문제없이 소수력의 출력증대가 가능한 것으로 예측되었다.

소수력 발전소의 발전용량은 냉각수 계통의 안정성을 저하시키지 않는 범위에서 결정되므로 발전량을 증대시키는 것은 펌프 유량 감소 및 소비동력 증가 등 기존 냉각수 계통에 영향을 초래한다. 그러나 운영 현황 파악을 통한 적정한 높이의 가동보로 폐정 수위 조정을 시행하면 기존 계통에 영향을 주지 않고 발전량 증대가 가능하며 이는 신재생 에너지의 효율적인 이용측면에서도 의의가 있다고 할 수 있다. (KIPED)