한국신·재생에너지학회 2007년도 추계학술대회논문집 pp.403~406

운전실적자료를 이용한 삼천포 해양소수력 성능평가

강 금석[1], 김 지영[2], 조 홍연[3]

Performance Evaluation of the Samcheonpo Ocean Small Hydropower Plant Using Operation Results Data

Keum-Seok Kang, Ji-Young Kim, Hong-Yeon Cho

Key words : performance evaluation(성능평가), efficiency analysis(효율분석), ocean small hydropower plant(해양소수력 발전소), Samcheonpo(삼천포)

Abstract :

발전소 온배수의 원활한 배수를 위한 설계 낙차와 함께 남서해안의 조위변화에 따른 낙차의 이용가능성을 인지하고 소수력 발전 방식과 조력발전 방식의 특징을 동시에 활용하는 해양소수력 발전소를 삼천포화력발전소 배수로에 최초로 건설하여 운전함으로써 청정 재생에너지 개발 및 CO_2 저감효과 창출에 이바지하고 있다. 본 연구에서는 삼천포 해양소수력 발전소의 운전실적 자료를 토대로 조위 및 방류량의 변화에 따른 해양소수력의 효율 특성을 분석하고자 한다. 해양소수력 발전소의 효율은 방류량과 유효 낙차의 영향을 직접적으로 받기 때문에 관측한 수위 및 방류량, 해양소수력발전소 운전실적 자료를 토대로 효율분석을 실시하였다. 우선, 소수력 가동 이후 배수로에서의 수위 상승이 명확히 나타났으며, 배수로 내 위어에서의 흐름구조가 완전월류 상태에서 불완전월류로 바뀌면서 배수로 전체의 수면 불안정성이 크게 증가하였으나, 배수로의 범람이나 순환수 계통에의 큰 영향을 초래할 만한 수준은 아니었다. 성능시험 결과, 최대출력, 평균출력, 최소출력 모든 부분에서 설계 보증치 이내의 값을 보였으며, 효율 또한 설계 보증치를 상회하는 결과를 보였다. CWP 유량 분석결과, 소수력 발전소에서의 유량이 과소 측정되고 있음을 확인하였으며, 최대낙차에서 최대효율을 보이고, 저낙차일 때는 보증치보다 효율이 낮게 나타나는 결과를 보였다. 또한 조위조건을 고려한 유량을 이용하여 산정한 효율 곡선이 보증치와 가장 일치하였으며, 전체 시스템 효율은 비교적 양호한 상태임을 알 수 있었다.

1. 서 론

국내 대형 화력발전소에서 냉각수로 사용되고 방류되는 해수는 6기 기준 약 150 ㎥/s로 약 3,000 ㎿ 이상의 수력에너지를 보유하고 있으나, 활용되지 못하고 그대로 해양으로 방류되어 왔다. 이에 발전소 온배수의 원활한 배수를 위한 설계 낙차와 함께 남서해안의 조위변화에 따른 낙차의 이용가능성을 인지하고 소수력 발전 방식과 조력발전 방식의 특징을 동시에 활용하는 해양소수력 발전소를 삼천포화력발전소 배수로에 최초로 건설하여 운전함으로써 청정 재생에너지 개발 및 CO_2 저감효과 창출에 이바지하고 있다.

본 연구에서는 삼천포 해양소수력 발전소의 운전실적 자료를 토대로 조위 및 방류량의 변화에 따른 해양소수력의 효율 특성을 분석하고자 한다. 해양소수력 발전소의 효율은 방류량과 유효 낙차의 영향을 직접적으로 받기 때문에 관측한 수위 및 방류량, 해양소수력발전소 운전실적 자료를 토대로 효율분석을 실시하였다.

2. 성능시험

2007년 1월 22일부터 23일까지 예비시험과 본 시험을 수행하였다. 설계유량(130㎥/s)에 근접하

1) 한국전력공사 전력연구원
E-mail : gldstn@kepri.re.kr
Tel : (042)865-5762 Fax : (042)865-5725
2) 한국전력공사 전력연구원
E-mail : jykim77@kepri.re.kr
Tel : (042)865-5749 Fax : (042)865-5725
3) 한국해양연구원
E-mail : hycho@kordi.re.kr
Tel : (031)400-6318 Fax : (031)408-5823

표 1. 성능시험 결과

성능 보증 항목	구 분	보증 조건	실측치	보정치 (낙차, 유량)	판정 결과
수차 출력 [kW]	최대출력	≥5,412	4,491	6,007	만족
	평균출력	≥3,866	3,482	4,327	만족
	최소출력	≥2,220	2,178	2,594	만족

도록 CWP(Circulation Water Pump)를 추가 기동하여 유량을 확보하였으며, 측정조건은 대조평균간조위(EL-1.339), 평균해수면(EL-0.03), 대조평균 만조위(EL+1.279) 등 3개의 설계조위 부근에서 6개호기 수차를 동시에 운전하는 상태였다.

성능시험 결과, 표 1과 같이 최대출력, 평균출력, 최소출력 모든 부분에서 보증치 이내의 값을 보였으며, 효율 또한 설계 보증치를 상회하는 결과를 보였다. 그러나, 최대효율 보증치 84%를 상회하며, 97%의 효율을 보이고 있는 것은 설계 원리에 배반하는 것으로서 유량을 과소 측정하는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

성능시험 기간뿐만 아니라 5개월간의 운전자료를 분석하였을 때에도 동일하게 유량이 과소 측정되어 효율이 100%를 초과하는 구간이 빈번하게 나타나고 있다. CWP 정격유량은 설계 최소유량으로서 실제 운전에서는 항상 이를 상회하게 취수가 이루어지는데, 소수력 이용 유량은 이보다 약 10% 적게 계측이 이루어지고 있는 것이다. 실제로 CWP 정격설계유량 130cms를 적용하면, 설계사 보증효율과 1~2%의 사이에서 일치하는 값을 보이고 있다. 즉, 소수력 발전소에서의 유량측정 결과의 정확도보다 CWP의 특성으로 파악한 유량 산출이 좀더 정밀도가 높을 것으로 판단된다.

또한, 성능보증치와 실측값의 낙차와 유량 조건이 다르기 때문에 보정식을 이용하는데, 설계사에서 수차의 특성을 고려하여 제시한 보정식을 이용하였다. 그러나 이는 제작사에서 목표로 하는 값으로 실제 현장에 제작된 수차의 경우 효율 및 성능 특성이 다를 가능성도 있으므로, 실측치를 바탕으로 보정곡선을 작성하여 성능을 평가하는 방안도 고려할 수 있으며, 향후 효율적인 운전을 위해서도 운전자료의 축적을 통하여 정확한 효율 및 성능 특성을 파악할 필요가 있다.

3. 운전자료를 이용한 성능평가

3.1 수위변화 분석

소수력 건설 전·후의 배수로 수위 상승량을 분석하였다. 정격냉각수량(최소 유량)이 130cms일 때 소수력 건설 이후 평균 수위는 4.825m, 최대값은 5.975m, 최소값은 4.181m를 보였다. 평균 수위가 실측치 대비 0.215m 상승하였고, 예측치와는 평균값에서 비슷한 결과를 보였다. 여기에서 정격냉각수량이 130cms일 경우, 실제 냉각수량은 조위의 변화에 따라 130~156.2cms 범위의 값을 보인다.

한편, 배수로 수위의 편차가 소수력 건설 이후에는 매우 크게 나타남을 확인하였다. 표준편차가 0.278m로서 소수력 건설전의 다른 유량에서의 표준편차가 2~3cm 내외인 점을 감안하면, 배수로 수위의 변화폭이 크고 매우 불안정한 구조임을 알 수 있다. 이는 관측 시점이 소수력발전소 건설중으로 가물막이를 설치하고, 일부호기의 시운전을 위해 권양기식 수문으로 냉각수의 배출을 제어했기 때문으로 판단된다. 권양기식 수문은 반응속도가 느려 수위의 안정적 유지가 불가능한 구조이다. 이에 따라 공사중 냉각수가 월류되는 경우도 있었던 점을 감안하면, 관측시점에서 소수력 공사에 따라 배수로 하류부의 수위가 매우 불안정함에 기인한 것으로 판단된다.

유량 117cms일 때와 103.9cms일 때는 실측치 대비 각각 0.350m, 0.380m의 수위가 상승하였다. 여기에서, 유량이 적을수록 수위 상승량이 큰데 이는 설계시에도 예상했던 사항으로 정격유량일 때의 배수로 수위를 기준으로 통수능을 고려하여 소수력을 설계하였으므로 유량이 적을 경우는 보다 큰 수위 상승이 나타난다. 이 때에도 표준편차가 각각 0.211m, 0.184m로 소수력 건설전과 비교하여 큰 값을 나타내었다.

유량이 97.4cms일 경우 표준편차가 0.088m로서 냉각수량이 감소함에 따라 편차가 감소함을 알 수 있다. 실제로 현장점검 결과, 소수력을 가동함에 따라 배수로의 흐름 구조가 건설전에 비하여 상대적으로 불안정해졌음을 확인하였다. 기존 위어부와 배수로 말단 낙차부에서 발생한 수면파와 소수력 수차의 급정지, 수문의 개폐에 의한 압력파가 배수로 상류까지 일부 전파되고 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용한 수위 관측 장비로는 이러한 비정상류의 작용 구조를 정량적으로 분해하기는 불가능하였으나, 불완전 월류구조를 채택함에 따른 당연한 귀결로 판단된다. 즉, 이러한 비정상류의 상류로의 전파는 완전월류 구조의 사류구간에서 차단할 수 있는 것이다. 다만, 이러한 불완전한 흐름 구조가 발전소 순환수계통에 심각한 영향을 주지는 않음이 분명해 보인다. 소수력 댐 부위부터 순환수관 말단부까지

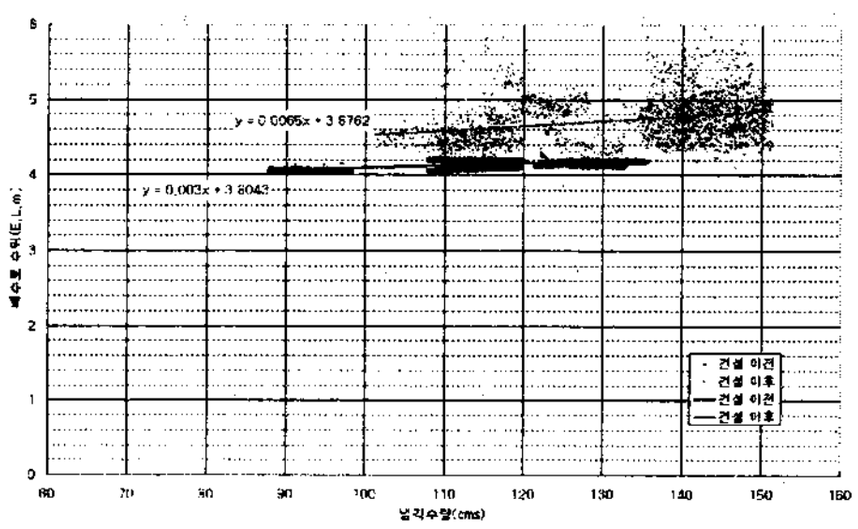

그림 1. 소수력 건설 전·후의 배수로 수위 비교

는 3개의 불완전 월류구조가 존재한다. 즉, 배수로 말단부 낙차부와 배수로내 위어부, 그리고 seal well 위어부이다. 이러한 월류부와 수로내에서 일차적으로 에너지의 소멸이 이루어지고, 최종적으로는 순환수 토출구의 유속이 약 3m/s에 달하기 때문에 계통내로 단파 성분들이 전달되지는 않을 것으로 판단된다.

한편, 소수력 상류부의 수위 불안의 원인 중의 하나로, 자동 운전시스템 불안정을 들 수 있다. 소수력 상하류 수위 계측 결과로부터 자동으로 가이드 베인의 조절이 이루어져야 하는데, 수위계의 부정확성으로 인하여 현재 수동운전 방식을 취하고 있는데, 이 때문에 일시적으로 댐을 월류하는 현상이 일어나고 있다. 이 경우 상류부의 수위 상승을 유발하는 것으로, 현재 수정 작업 중에 있다.

3.2 배수로 수위상승에 따른 순환수 계통에의 영향

배수로 위어부의 수위 상승은 순환수관 말단부 seal well의 수위 상승으로 직결된다. 즉, 현재 모든 호기의 seal well에서 submerged weir 구조 상태이므로 하류부의 수위 상승은 바로 seal well의 수위 상승을 직결된다. weir 식에 의해 검토한 바에 의하면 50cm 하류 수위 상승에 대하여 48cm의 seal well 수위 상승이 이루어지고 있다. 또한, 배수로의 수면 경사를 살펴보면 4호기 seal well 부분까지는 수면경사가 완만하며, 5,6호기 부분은 큰 유량으로 인하여 상대적으로 수면경사가 급하다. 배수로 위어 인접부는 배수로 위어 수위와 직접 연동되어 변화한다고 볼 수 있으나, 3호기 seal well 상류 부분부터는 상세한 Backwater를 고려해야만 정밀한 수위변화 값을 얻을 수 있다. 그러나, 모든 경우의 수에 대하여 배수로의 Backwater 영향을 매번 고려하기 곤란하므로, 기존 배수로 수위 해석 결과로부터 위어부에서 각 호기 seal well부까지의 수면경사를 이용하여 배수로 위어의 수위 상승이 seal well부 수위상승과 직접 연동된다고 보는 것도 무리가 없다고 판단된다. 즉, 이 방안이 배수로의 안전이나 소수력 성능평가에 있어서 보다 보수적인 방안이다. 또한, CWP의 경우 전체 양정고가 10cm 증가할 경우, BHP(Brake Horse Power)가 대당 약 5kW 증가하며, 유량은 약 0.3% 감소한다. 따라서, 배수로의 수위 상승이 약 30cm이고 모든 CWP가 가동된다면 약 180kW의 BHP가 증가하게 되며 유량은 약 1% 감소된다고 볼 수 있다.

따라서, 배수로의 수위 상승에 의한 순환수계통에의 영향을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 배수로의 수위 상승이 순환수계통의 운전 정지 등 중대 사고를 초래하지는 않는다. CWP는 약 7m에서 약 15m 정도의 양정고 범위에서 움직이기 때문에 약간의 배수로 수위 상승이 안전성 문제와는 직결되지는 않는다.

둘째, 배수로 수위 상승은 배수로 상류에서의 범람을 초래할 수 있다. 삼천포 화력의 경우, 5,6호기 설계시 순환수량이 증가함에 따라 배수로 상류부의 범람을 방지하기 위해 배수로 벽면을 높였다.

셋째, 현재 모든 호기의 seal well weir는 일반적인 가동조건에서(4개호기 이상 가동상태) submerged weir 상태이므로, 소수력 발전소 건설에 따라 배수로 위어 상류부의 수위 상승이 조금이라도 이루어진다면, 이론적으로는 냉각수량의 감소와 CWP의 BHP가 증가함으로 추가 동력이 소모된다고 볼 수 있다. 그러나, 소수력 건설 이전에도 CWP의 가동대수의 변동 및 조위의 변화에 따라 냉각수량과 수위가 항상 변화하고 있는 상태였으므로, 소수력 건설에 따른 수위 변화가 큰 규모가 아니라면 순환수 계통의 안전에 큰 지장이 없을 뿐만 아니라 추가동력 소모량이나 냉각수 감소량은 전체 순환수 계통의 용량에 비하여 매우 미약한 양이라 할 수 있다.

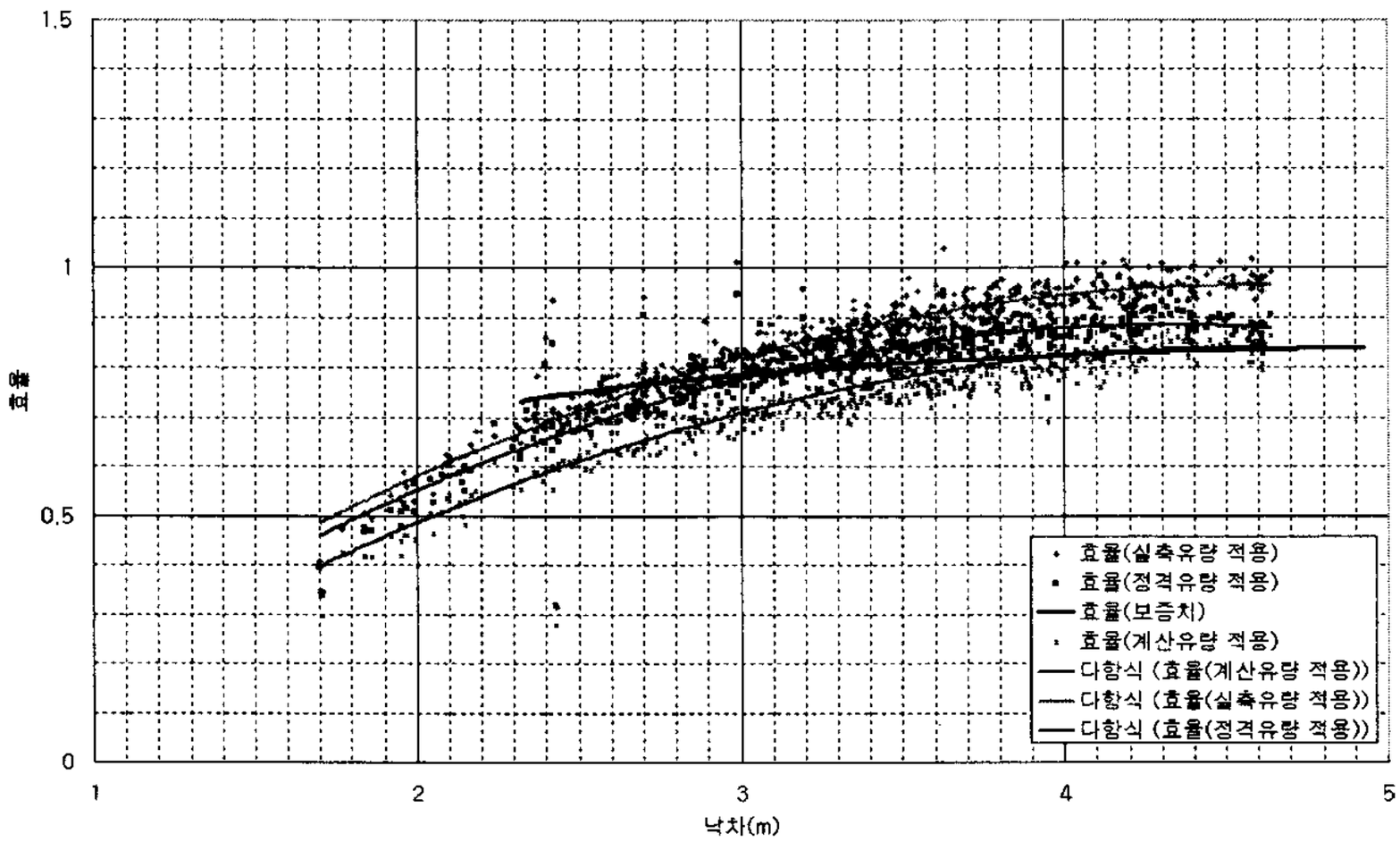

그림 2. 낙차와 효율 특성

3.3 소수력 발전 성능평가

앞 절의 성능시험 결과를 보면 삼천포 소수력 발전시스템은 당초 설계 목표치를 달성하고 있다. 그러나, 당초 설계와 비교하였을 때, 소수력 방수위의 상승에 따라 성능 감소가 발생하고 있으며, 유량의 정확한 계측이 이루어지지 않아 효율 및 성능이 과대평가되고 있는 상황이다. 실측유량이 정격유량보다 작게 나타나고 있는데, 실제 CWP는 정격유량이 최소유량으로서 조위와 연동하여 유량이 증가하기 때문에 실제 실측유량은 정격유량보다 크다. 그러므로 현재 유량이 과소계측되고 있는 것이다. 그리하여 그림 2와 같이 효율이 1을 초과하는 경우를 보이는 것이다. 현재, 유량 계측기의 문제는 해결 중에 있다.

발전소 배수로 소수력은 조위와 연동하여 간조시 최대출력, 만조시 최저출력을 보이고, 간조시 최대 효율, 만조시 최저 효율을 보이고 있다. 소수력의 출력, 효율 등 실측 결과를 살펴보면, 고낙차일때는 보증치보다 효율이 높고, 3m 이하의 저낙차일때는 보증치보다 효율이 낮게 나타난다. 출력 또한 동일한 특성을 보이고 있다. 여기에서 실측유량이란 수차 입구부에서 측정한 유량이고, 정격유량은 CWP의 정격유량이며, 계산유량은 정격유량에 조위의 변동을 고려한 유량이다. 실제 유량에 보다 가까운 계산유량을 적용할 경우 보증치 이하의 효율값을 보이고 있다. 삼천포 해양소수력에 적용된 오스버그 카플란 수차는 앞에서 살펴본 바와 같이 최대낙차에서 최대효율을 갖는다. 제작사는 유량의 증감에 관계없이 효율이 일정하다고 제시하였으나, 정격유량에서 최대값을 보이고 유량에 따라 효율이 다르게 나타났다.

소수력 수차 6개호기 가동자료를 이용하여 펌프성능곡선을 산출한 결과, 그림 3과 같이 조위조건을 고려한 유량을 이용하여 구한 효율 곡선과 보증치가 가장 일치하였으며, 삼천포 해양소수력발전시스템은 효율 측면에서 비교적 양호한 상태임을 확인하였다.

4. 결론 및 향후 연구방향

삼천포 해양소수력은 최대낙차에서 최대효율을 갖고, 유량에 대해서는 정격유량에서 최대값을 보이고 있다. 따라서, 삼천포 해양소수력의 최대 성능을 확보하기 위해서는 유량은 정격유량에 가까운 범위에서 최대낙차를 확보하는 방향으로 운전을 해야한다. 즉, 화력발전소의 냉각수량에 따라 소수력의 가동호기수를 조절하여야 한다. 냉각수량이 감소하여 소수력 단위호기당 유량이 정격유량 이하로 크게 떨어질 경우에는 소수력 가동호기 수를 줄이는 것이 적절하다. 또한, 현재 배수로 수위가 불안정한 상태이므로, 수위계 및 유량계 등의 계측결과의 정확도를 높여 자동운전의 안정화를 가져와야 한다. 자동 운전방식이 어려운 경우, 상시 월류 구조를 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

References

[1] 한전 전력연구원, 2007. 발전소 온배수를 이용한 1,500kW급 수력발전 상용화기술 개발(최종보고서), 산업자원부.

[2] 조홍연, 김정대, 정신택, 강금석, 2006.12. 소수력발전소 건설에 의한 삼천포 화력발전소 방류수로 흐름변화 예측, 한국해안해양공학회지, 제18권, 제4호, pp.338-347.

[3] 조홍연, 정신택, 강금석, 2006.12. 삼천포 화력발전소 방류수로 및 방류해역의 흐름관측 및 특성 분석, 한국해안해양공학회지, 제18권, 제4호, pp.329-337.

[4] 조홍연, 조범준, 강금석, 2007.6. 삼천포 해양소수력 성능평가, 한국신재생에너지학회 춘계학술대회 논문집, pp.617-620.

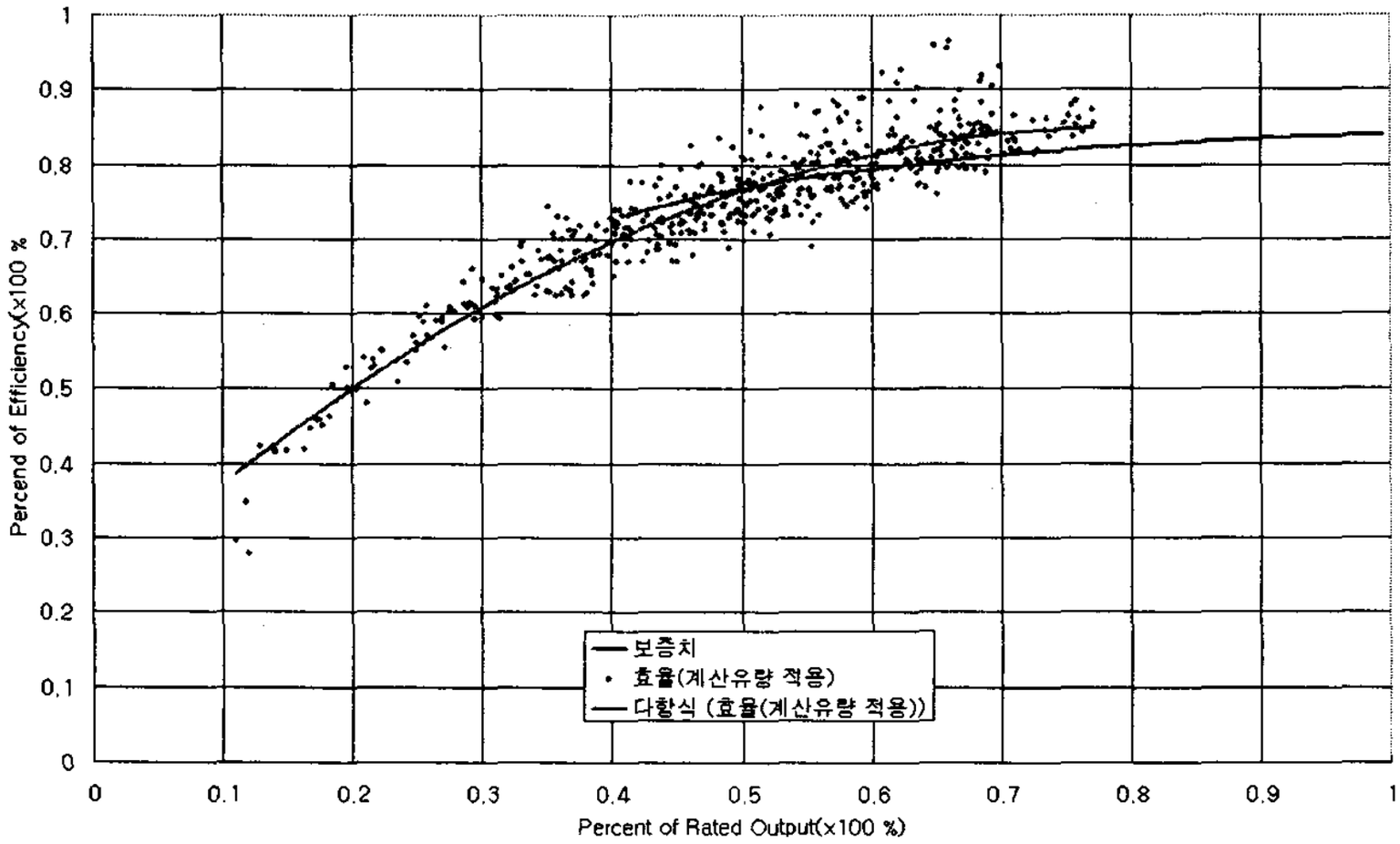

그림 3. 수차 성능 곡선