

지역난방 사용자기계실 내 열수송관 차압을 이용한 발전 및 제어 기술

김경민[†] · 박성용 · 오문세

한국지역난방공사 미래개발원

(2017년 8월 11일 접수, 2017년 9월 15일 수정, 2017년 9월 18일 채택)

Power Generation and Control System Using Differential Pressure of District Heating Pipeline in a Substation

Kyung Min Kim[†] · Sung Yong Park · Mun Sei Oh

Frontier Research Institute, Korea District Heating Corp.

(Received 21 August 2017, Revised 15 September 2017, Accepted 18 September 2017)

요 약

지역난방 열수송관을 통해 중온수를 공급할 때 고압의 중온수로부터 열사용자 설비(지역난방 열교환기)를 보호하고 온도조절을 원활히 하고 유체의 원거리 공급을 위해 차압유량조절밸브를 통해 압력을 조절하거나 압력을 감소시키고 있다. 하지만, 고압 유체 사용에 따라 압력조절밸브에서 캐비테이션이 발생하여 잦은 고장 및 오작동을 유발하여 많은 문제가 발생하고 있으며, 사업자 및 사용자 모두에게 에너지 손실 및 민원 유발 등의 원인이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 연구 중인 1차측 차압유량조절밸브를 수력터빈으로 대체하여 차압에너지를 전기에너지로 변환하고, 전기를 2차측 펌프의 동력으로 활용하는 에너지 절감기술을 소개하고자 한다.

주요어 : 지역난방, 열수송관, 차압, 수력터빈, 제어시스템

Abstract - When the hot water is supplied through the district heating (DH) pipeline, a pressure differential control valve (PDCV) protects the DH user equipment from the high pressure DH water and helps to supply DH water to long distance. It also controls the temperature and adjust the pressure in the main district heating pipeline. However, cavitation occurs in PDCV due to the use of high pressure DH water. It causes frequent failures and many problems. It also causes energy loss and complaints to both operators and users. In order to solve these problems, we will introduce the energy saving technology to replace the primary side PDCV with hydraulic turbine, convert the differential pressure into electricity, and utilize electricity as the power of the secondary side pump.

Key words : District Heating, District Heating Pipeline, Differential Pressure, Hydraulic Turbine, Control System

1. 서론

지역난방(District Heating)이란 일정지역에 있는 아파트와 빌딩, 상가 등 건물에 개별 열생산시설(가스보일러 등)을 갖추는 대신 집중된 대규모 열생산시설(열

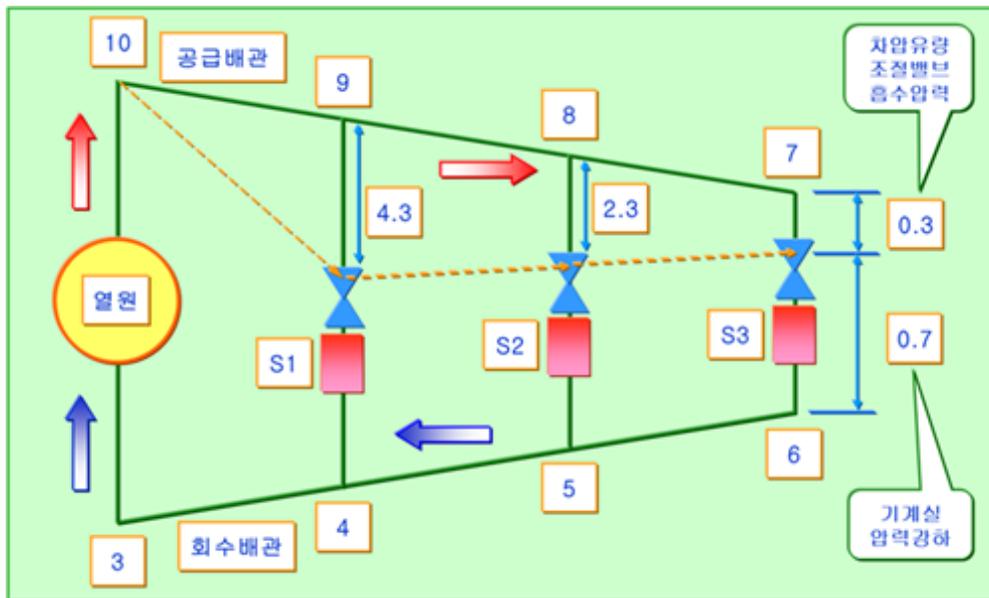
병합발전소 등)에서 생산된 열(온수)을 지하에 매설된 열수송관을 통하여 일괄적으로 공급하는 난방 방식을 말한다. 지역난방은 집중화된 고효율 열생산시설을 이용하기 때문에 경제적이며 운영관리가 용이하고 친환경적이라는 장점이 있다.[1]

중온수의 열을 이송하기 위해 열수송관을 사용하고 있다. 하지만 Fig. 1과 같이 관내 유체의 압력강하로 인해 열수송관을 통해 이송되는 유체는 거리에 따라

[†]To whom corresponding should be addressed.
Tel : +82-31-8014-9645 E-mail : kimkm@kdhc.co.kr



(a) Needs of differential pressure control



(b) Pressure distribution by the location of substations

Fig. 1. Diagram of a differential pressure system in district heating pipelines

수압차가 존재하게 된다. 이러한 수압차로부터 일정한 유량을 공급 받고 고압의 유체로부터 열사용자시설의 설비를 보호하기 위해 차압유량조절밸브(Pressure Differential Control Valve)를 사용하고 있다. 차압유량조절밸브의 또 다른 역할은 유체의 원거리 공급이 가능하도록 각 지점의 압력을 조절하게 된다.

그러나 6bar이상의 고압 유체 사용으로 인해 차압유량조절밸브에서 캐비테이션이 발생하여 잦은 고장 및 오작동을 유발하여 많은 문제가 발생하고 있으며, 에너지 손실 및 민원 유발의 원인이 되고 있다.[2] 차압유량조절밸브가 고장 날 경우 안정적인 기기 작동

이 불가하여 기기들의 수명이 단축되고 또 일정하지 않은 유량과 압력으로 인해서 발생하는 온도조절밸브의 비정상적인 작동으로 인해 세대에 안정적인 온도의 난방수와 급탕을 공급하지 못하므로 많은 양의 열손실이 발생되어 밸브를 교체하거나 주기적으로 부품을 교체하게 된다.

현재, 국책연구를 통해 이러한 차압유량조절밸브의 한계를 극복하고 현장 문제점을 줄이며, 열수송관 내에 미활용되고 있는 압력에너지로부터 수력터빈 발전 시스템을 이용하여 전력을 생산하여 에너지 신사업을 창출하는 연구를 진행하고 있다. 압력에너지를 이용한

수력발전은 소수력 발전(small hydropower)의 하나로 온실가스 배출 없이 높은 에너지 밀도를 가지고 유지비 적어 경제적인 발전 방식이다. 또한 사용자 기계실 내 차압유량조절밸브 위치에 설치할 경우, 하천 소수력발전과 다르게 토목공사비가 들지 않아 초기 투자비가 저렴하며 주변 생태계에 미치는 영향이 없는 장점이 있다.

본 논문에서는 지역난방 사용자 기계실에 수력 차압 발전시스템을 설치하였을 때 발생하는 전력생산량 등의 효과를 산출하였으며, 이를 통해 지역난방 사용자 기계실에 수력 차압 발전시스템 도입 가능성을 보고자 한다.

2. 기술 및 시장동향

본 기술은 도심형 에너지 하베스팅 기술로써 생산과 사용처를 근거리화하여 송배전 효율을 극대화할 수 있고, 누수예방과 미활용에너지 활용측면에서 국가적으로 에너지를 절약할 수 있는 기술이다. 잉여수압(Surplus Hydraulic Pressure)과 고도차에 의해 발생한 유속을 회수(Harvesting), 정류(Rectifying), 저장(Storing)하여 도시 전력 인프라에 활용하는 기술이라고 할 수 있다. 유사기술로는 아파트 단지로 들어오는 상수도 공급관에 소형 터빈발전기를 설치하여, 물의 낙차 에너지와 수압을 이용해 전기를 생산하는 방식이 있으며, 이 경우의 발전용량은 약 100kW 미만의 마이크로수력(Micro hydropower) 수준이다. 본 논문에서 서술한 차압유량조절밸브를 대체하는 열수송관 차압발전시스템은 이보다 작은 피코수력(pico hydropower, 5kW이하)로 분류할 수 있다.

선진국의 경우 1970년대에 두 차례의 석유파동 이후 정부가 소수력 기술개발에 집중적으로 투자하여 1990년초에 낙차와 유량에 따라 표준범위에 적합한 수차를 형식별로 표준화하고, 대량생산에 의한 수차 건설 비용을 절감하여 경제성을 향상시켰으며 가능한 자원 개발을 강력하게 지원하고 있다. 최근에는 각국의 온난화 대책으로 신재생에너지 활용 강화 추세에 따라 미활용 에너지인 마이크로 수력과 피코 수력에너지 활용이 진행 중이다.

시장 및 기술현황을 보면 미국의 포트랜드 전력생산 실증연구 사례를 포함하여 현재 관련 시장이 성장하고 있다. 이와 같은 마이크로 수력과 피코 수력은 미국 DOE의 The Small Hydropower Market에 의하

면 2022년 시장규모는 293,500억원에 달할 것으로 전망된다. 일본은 기술선점을 위해 NEDO를 중심으로 에너지 안전측면과 환경측면에서 우수한 특징을 가지고 있는 소수력 개발을 활발하게 추진하면서 친환경적인 개발에 중점을 두고 개발지점의 경제성 확보와 개발 가능지점을 확대해 가기 위해 비용요인을 고려한 전략적 기술개발을 진행하고 있다.

국내에서는 롯데건설이 국내 최초로 아파트 단지 내 지하 물탱크를 채우는 상수의 낙차를 이용해 전력을 생산하는 ‘공동주택용 마이크로 수력발전시스템’[3]을 개발해 특허권을 취득하였으며, 이를 2016년에 용인 중동에 위치한 아파트에 9kW 및 3.5kW 발전기 2대를 설치하였으며 매달 2,520kWh의 전기 생산이 가능하다고 한다. 이 외에도 2013년 하수처리시설(기흥레스피아)에 10kW 마이크로수력 발전기를 적용한 사례가 있다.[4]

더욱이 수압이 높아지는 국내 10층 이상의 고층 건물(2014년 기준 8만개 이상)에 상수도와 지역난방 배관 모두 우선 적용이 가능하며, 에너지 절감 효과뿐만 아니라 배수관 누수의 사전예측 및 빠른 복구가 가능하다는 장점을 찾을 수 있다. 따라서 본 기술을 통한 기술적 선점을 통해 향후 시장 개척이 가능할 것으로 보인다.

3. 시스템 구성 및 발전량 산정 방법

3-1. 열수송관 차압 발전시스템 구성

Fig. 2와 같이 지역난방 열공급시스템은 열교환기를 중심으로 열원플랜트로부터의 열배관 계통(이하 1차측)과 열사용자 중심의 열공급 및 회수 배관(이하 2차측)으로 구분되는 특성을 가지고 있다. 플랜트에서 생성된 지역난방수는 사용자 기계실 내 차압유량조절밸브를 통과하면서 중온수 공급관과 환수관 사이의 압력을 일정하게 유지된다. 즉 압력변동에 대응하여 일정한 압력을 유지함으로써 열교환기 및 난방, 급탕 제어용 밸브 보호와 냉난방 배관, 피팅류를 안전하게 유지 동작하게 하는 기능을 가지고 있다.

앞서 언급한 차압유량조절 밸브 위치에 수력터빈을 배치하는 것이 수력 차압발전 시스템이라 하겠다. 수력 차압발전 시스템은 Fig. 3과 같이 수력터빈으로 1차측 열배관의 압력을 감소시키고 감소된 압력에너지를 전기에너지로 전환하여, 전기를 가장 가까운 사용처인 2차측 펌프 구동하기 위한 에너지로 전달할

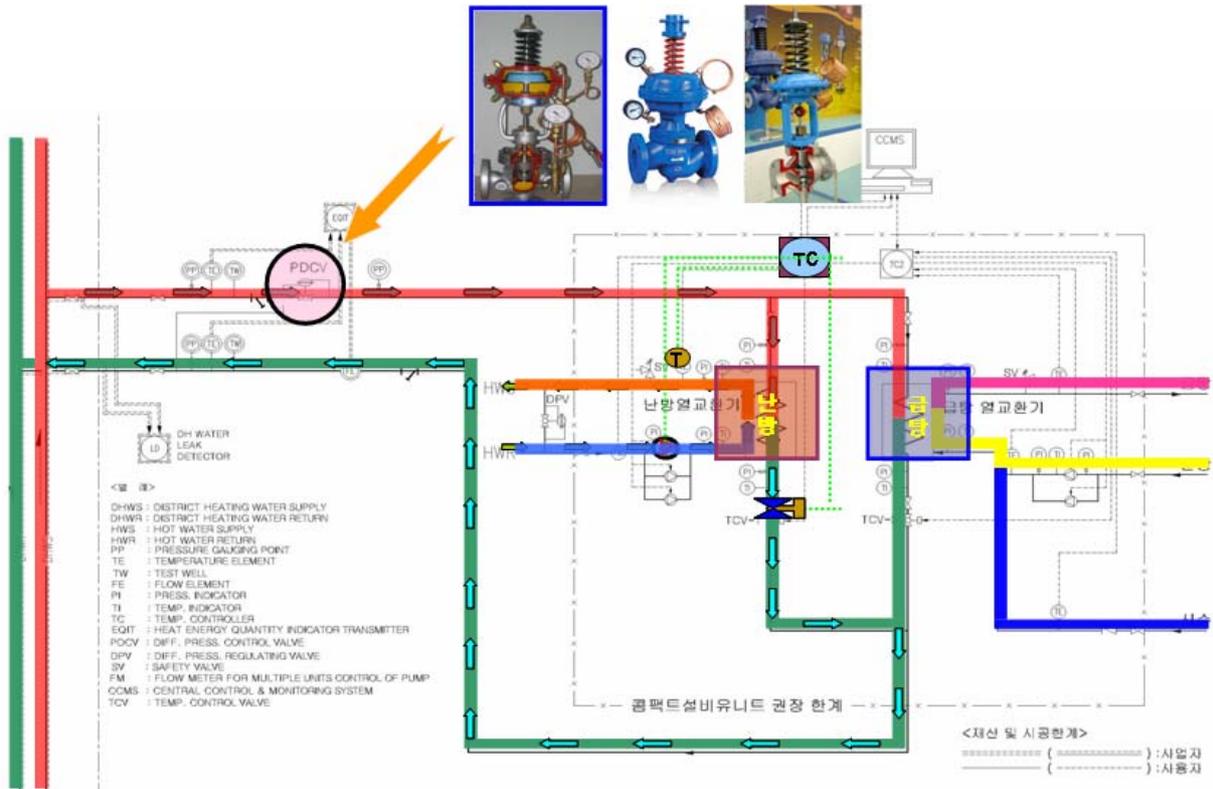


Fig. 2. District heating system in a substation

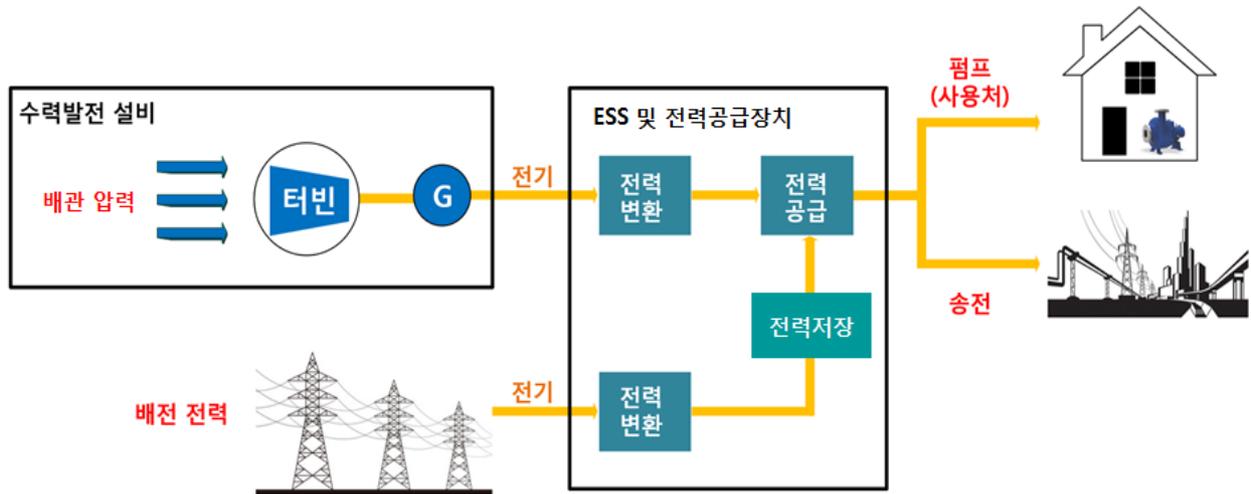


Fig. 3. Hydropower system concept

경우 펌프동력을 절감하고 손실을 줄일 수 있는 기술을 사용하는 기술이다.

본 시스템은 크게 2가지로 나눌 수 있는데, 하나는 압력에너지를 전기에너지로 바꾸는 수력발전 설비 부분과 생성된 전기를 변환하여 펌프로 공급하거나, 송전 또는 에너지저장장치(Energy Storage System)에

저장하는 ESS 및 전력공급장치로 나눌 수 있다. 또한 경제성을 높이기 위해 4가지 기능을 가지도록 설계하였는데, 우선 수력터빈을 통해 차압유량조절밸브 역할과 회전수 측정을 통해 유량계를 대체할 수 있도록 하였고 전력변환장치를 통해 발전기 속도제어를 통해 온도조절밸브를 대체하고 생산된 전력활용을 위해 펌프

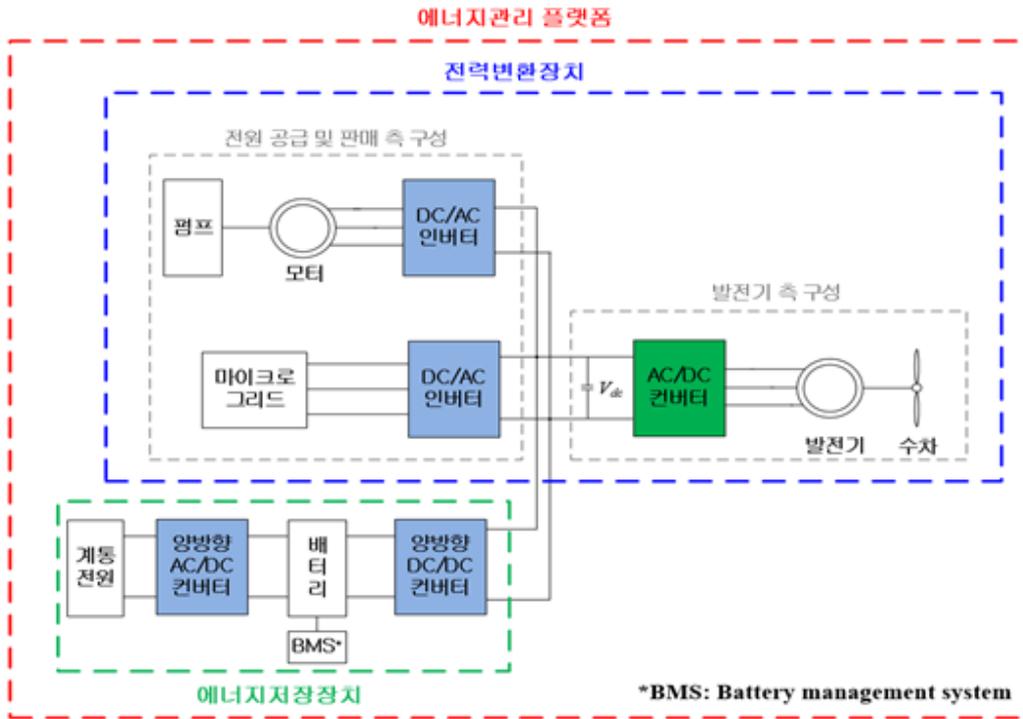


Fig. 4. Hydropower management platform

인버터 역할을 하는 전력공급장치를 개발하였다. 이와 같이 차압조절, 유량측정, 온도조절, 펌프인버터의 다기능을 통해 경쟁력을 높이고자 하였다.

열수송관 내 차압을 전기로 바꾸는 수력터빈의 용량은 표준 5kW로 설계하였다. 수력터빈은 열수송관 내의 유동특성은 압력차가 높고 유량이 적기 때문에, 고낙차 저유량에 적합한 용적식 수력터빈으로 선정하였다. 그리고 ESS 및 전력공급장치는 Fig. 4와 같이 내부 시스템을 개발하였다.

3-2. 발전량 산정 방법

사용자 기계실에서 단위시간당 생산되는 평균 발전량(P_e)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 그 외에 설비용량(C), 연평균가동률(L_f) 그리고 연간발전량(E_a)은 식 (2)~(4)와 같다.[5] 가동률은 1년 동안에 발전된 총발전량을 최대출력(설비용량)으로만 발전되었다고 가정할 때 발전한 시간과 1년(8,760 시간)에 대한 비율을 말한다.

$$P_e = \rho g H_e \eta \left(\int_0^{Q_r} Q P(Q) dQ + Q_r \int_{Q_r}^{\infty} P(Q) dQ \right) = P_1 + P_2 \quad (1)$$

$$C = \rho g H_e Q_r \eta \quad (2)$$

$$L_f = (P_1 + P_2) / C \quad (3)$$

$$E_a = 8,760 C L_f \quad (4)$$

여기서,

P_e : 단위시간당 출력(kW)

g : 중력가속도(m/s²)

ρ : 물 밀도(kg/m³)

η : 발전시스템 효율(%)

H_e : 유효낙차(m)

Q : 유량(m³/s)

Q_r : 수력터빈 설계유량(m³/s)

P_i : 수력에너지(kW)

P_1 : 부분출력(kW)

P_2 : 정격출력(kW)

L_f : 발전시스템 가동률(%)

C : 시설용량(kW)

E_a : 연간발전량(kWh)

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 분당에 위치한 공동주택에 공급된 1년 동

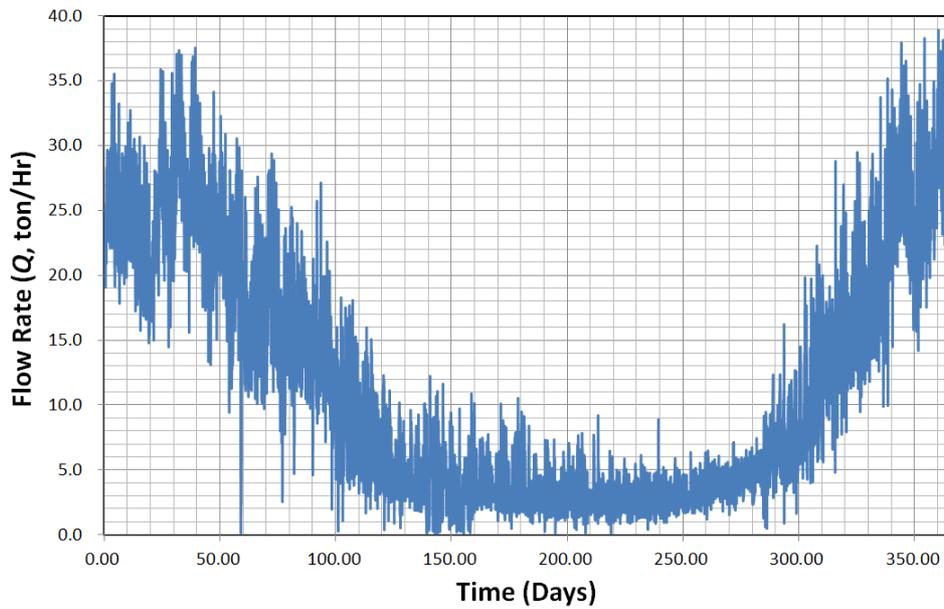


Fig. 5. Actual flow rate (Q) in a year

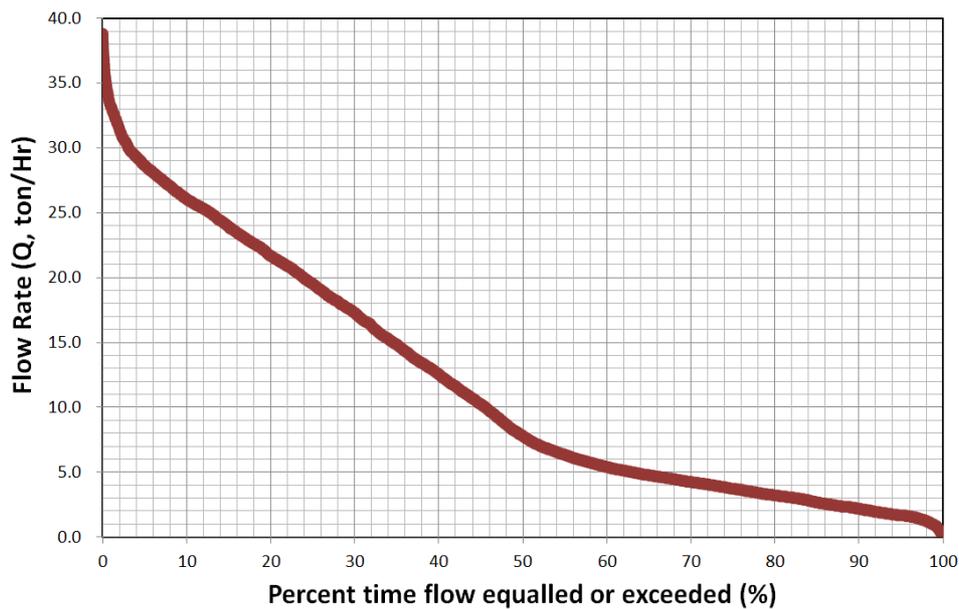


Fig. 6. Duration of flow rate (Q) in a year

안의 실제 유량이다. 1년간 유량을 분석한 결과 시간 별 유량은 $0.07 \sim 38.8 \text{ m}^3/\text{Hr}$ 으로 변동폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 날씨(외기온도)와 생활패턴에 기인한 것으로 다른 공동주택 기계실도 비슷한 경향을 보인다. 연중 유량은 계절적 요인으로 인해 하절기에 적고 동절기에는 많아지는 양상을 보였다. 그리고 일간 유량 변동 폭은 $8 \sim 15 \text{ m}^3/\text{Hr}$ 로 일간 변동 폭도 매우 큰 것으로 나타났다.

계절적 요인은 수차 설계용량 산정 시 중요한 영향을 미친다. 즉, 설계용량보다 낮은 유량이 들어오는 기간에는 소수력발전이 불가하고 가동률을 높이기 위해 설계용량을 낮은 값으로 잡으면 연간 발전량 면에서 불리하게 된다. 따라서 유량변동이 비교적 큰 영역에서도 운영이 가능한 수차와 유량제어시스템 선정이 지역난방 기계실 적용을 위해서는 매우 중요하다. 동시에 최적 차압 발전시스템 설계를 위해서는 유량의

연간 유량변동특성을 고려해야 한다. 하지만 하절기에는 워낙 유량이 적기 때문에 하절기는 유량 설계에 고려하지 않았다.

설계유량은 발전용량과 수력터빈 선정에 위한 중요 인자이다. 변동폭이 큰 유량조건에서 전력생산량을 극대화하기 위한 설계유량 값 선정이 필요하다. Fig. 5의 유량에 대한 상대빈도와 누적밀도 곡선을 통해 안정적인 설계유량 범위를 10~35 m³/Hr로 설계하였다. 따라서 빈도를 고려하여 설계유량(Q_s)을 25m³/Hr로 최소 유량은 15m³/Hr 선정하였다. 이때 설비용량(C)은 3~5kW 수력터빈 설치가 가능하며, 가동률(L_f)은 30~40%로 나타났다.

위와 같은 설비를 가동할 경우, 1개당 약 10~20MWh년 전력 발생과 약 7 ton에 이산화탄소 배출 저감 효과가 있을 것으로 사료된다. 그리고 현재 지역난방 사용자 기계실 약 10,000개 중 3,000여개 이상 설치가 가능할 것으로 보인다. 또한 이는 열원측에도 전력비용 절감효과가 기대되는데, 대표적으로 PDCV 10% 불량시 DH펌프 동력비가 3% 이상 증가하게 되는 비용이 감소될 것이며, 회수온도도 감소하여 약 0.3% 이상의 효율 향상을 가져올 수 있다.

5. 결론

지역난방 열수송관을 통해 중온수를 공급할 때 고압의 중온수로부터 열사용자 설비(지역난방 열교환기)를 보호하고 온도조절을 원활히 하고 유체의 원거리 공급을 위해 차압유량조절밸브를 통해 압력을 조절하거나 압력을 감소시키고 있었다. 하지만, 고압 유체 사용에 따라 압력조절밸브에서 캐비테이션이 발생하여 잦은 고장 및 오작동을 유발하여 많은 문제가 발생하였으며, 사업자 및 사용자 모두에게 에너지 손실 및 민원 유발 등의 원인이 되고 있었다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 1차측 차압유량조절밸브를 수력터빈으로 대체하여 차압에너지를 전기에너지로 변환하고, 전기를 2차측 펌프의 동력으로 활용하는 에너지 절감기술을 소개하였다.

사용자 기계실에 차압 발전시스템을 가동할 경우, 1개당 약 10~20MWh년 전력 발생과 약 7 ton에 이산화탄소 배출 저감 효과를 볼 수 있다. 그리고 현재 지역난방 사용자 기계실 약 10,000개 중 3,000여개 이상 설치가 가능하여 중소기업의 에너지신사업 모델로 성장 가능하다. 또한 이는 지역난방 열원측에도 전력

비용 절감효과가 있는 것으로 계산되었다. 대표적으로 PDCV 불량으로 인한 DH펌프 동력비가 3% 이상 절감 가능하며, 회수온도도 감소로 인한 CHP 효율 약 0.3% 향상을 기대할 수 있다.

사 사

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20172020108970)

References

1. Ahn, Y. M., et al., 2016, New climate change regime & DHC in Korea, E-square, pp. 15-25
2. Johansson, P. O., 2011, Buildings and district heating, Lund University, Ph. D. Dissertation (in Denmark)
3. Lee, G. T., et al., 2010, Micro power generation system in mass residence area and method therefore, Patent No. 10-1200550 (in Korea)
4. Chae, K.-J., et al., 2013, Micro-hydropower system with a semi-kaplan turbine for sewage treatment plant application: Kiheung resopia case study (in Korean), JKSEE, Vol. 35, No. 5, pp. 363-370
5. Na, D. H., et al., 2010, Feasibility study on the construction of small hydro-power plants at the discharge point of Gumi sewage treatment plant, Kumoh National Institute of Technology, Ph. D. Dissertation (in Korean)