

유기랭킨 사이클 발전 기술

강 훈 | 고려대학교 기계공학과, 연구교수 | e-mail : khlabkang@empal.com

이 글에서는 산업폐열이나 신재생에너지를 이용한 유기랭킨 사이클 발전시스템의 원리 등에 관하여 설명하고 이어서 응용분야에 대하여 소개한다.

21 세기에 들어오면서 환경·에너지 문제는 전 세계 모든 나라에서 중요한 이슈가 되고 있으며, 환경·에너지 산업은 21세기에 가장 각광받는 유망산업으로 기대되고 있는 추세이다. OECD를 중심으로 각국의 환경규제가 강화되고 있고, 환경과 무역의 연계 움직임에 따라 환경문제 대응능력은 국가경쟁력을 좌우하는 중요한 요소가 되고 있다. 또한, 지구온난화 문제에 대응하고 고유가 시대에 대비하기 위해서는 현재의 화석연료 에너지를 대체할 만한 신재생에너지의 보급·확대가 필수적이며, 선진국에서는 신재생에너지 산업을 부가가치가 높은 차세대 산업으로 인식하고 관련 산업 육성을 지속적으로 지원하고 있다.

에너지 자원이 부족한 우리나라는 산업 및 경제생활에 필요한 많은 에너지를 외국에서 수입해 오고 있는 실정이며, 특히 주요 에너지원인 석탄과 석유는 거의 전량 수입에 의존하고 있다. 현재 우리가 직면하고 있고 시급히 해결해야 할 문제로는 에너지원의 지속적인 확보와 함께 우리가 생활하고 있는 자연환경을 보존하는 것이다. 이 두 문제는 서로 상호 보완적인 관계로 어느 한 쪽만의 해결을 통해서서는 이를 수 없기 때문에, 반드시 동시에 해결할 수 있는 방안을 찾아야 한다. 특히, 우리 인류에게 큰 재앙으로 다가오고 있는 지구 온난화 문제의 주요인으로는 화석연료의 사용에 의한 이산화탄소의 배출이므로, 화석연료가 아닌 신재생에너지를 이용하거나 화석연료를 이용하는 시스템의 효율향상 및 유해 배기가스를 절감하는 기술의

개발이야말로 에너지원의 확보와 환경보호라는 두 문제를 동시에 해결하기 위해 반드시 수행되어야 할 과제라고 할 수 있다. 이를 위한 노력은 현재 세계적으로 다방면에서 수행되고 있으며, 이러한 노력의 일환으로 산업폐열이나 신재생에너지를 이용한 유기랭킨 사이클 발전기술에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.

유기랭킨 사이클

일반적인 랭킨 사이클(Rankine cycle) 발전시스템은 증발기(evaporator)를 통과하면서 고압이 된 증기가 터빈(turbine)을 회전시킴으로써 발생하는 축동력을 전기에너지로 변환시키는 시스템이다. 그러나 기존의 랭킨사이클은 작동유체(working fluid)로서 물(water)을 사용하고 있으며 고온의 열원에 대해서는 효율적인 작동유체이지만, 열원 온도가 중저온(70~400℃)일 경우에는 시스템 효율저하로 인한 경제성의 문제로 그 적용이 어려운 실정이다. 중저온 열원의 적용 시에 발생하는 기존 랭킨 사이클의 효율저하 문제를 극복하기 위한 대안인 유기랭킨 사이클(ORC; Organic Rankine Cycle)은 작동유체로서 물을 사용하지 않고 유기혼합물(organic compound)을 사용한다. 즉, 유기랭킨 사이클 발전시스템은 화력발전 시스템과 기본구성은 동일하지만 유기혼합물을 작동유체로 사용하는 발전시스템으로 정의할 수 있다.

유기랭킨 사이클은 기존의 랭킨 사이클과는 달리 비교

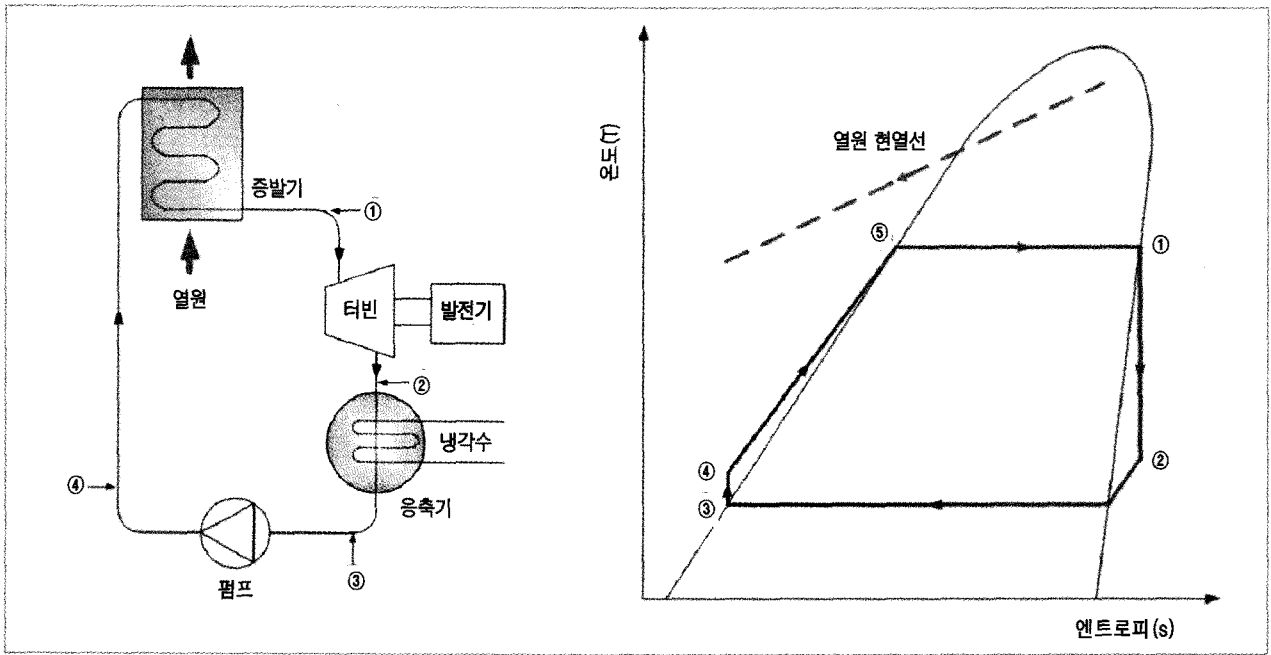


그림 1 유기랭킨 발전시스템의 구성도 및 운전선도

적 엑서지(exergy)가 낮은 저열원을 이용하여 전력을 생산해 내는 시스템으로 낮은 에너지 열원에서 작동해야 하기 때문에 작동유체로는 비등점이 낮고, 증기압이 높아야 하며, 터빈의 입구 질량유량을 증가시키기 위해 잠열(latent heat)이 작고, 밀도가 큰 것이 상대적으로 유리하다. 유기혼합물은 비등점이 낮아 저온에서도 기화되기 때문에 중저온 배열, 태양열, 지열 등을 이용하여 랭킨 사이클 시스템을 운용할 수 있으며, 주로 사용되는 유기혼합물은 프레온(freon) 계열의 냉매와 프로판(propane) 등의 탄화수소계(hydro carbon series) 물질 등이 적용되고 있다.

일반적인 유기랭킨 사이클은 그림 1에서와 같이 펌프(pump), 증발기, 터빈 그리고 응축기(condenser)로 구성되어 있으며, 이상적인 사이클의 각 과정은 펌프에서의 압축 과정, 증발기에서의 흡열 과정, 터빈에서의 팽창 과정, 응축기에서의 방열 과정으로 구성된다. 터빈 출구에서의 과열(superheated) 상태 유기혼합물은 응축기에서 응축(2-3 과정)되어 포화(saturated) 액상으로 펌프에서 의해 압축(3-4 과정)된다. 펌프에서의 압축에 의해 과냉(subcooled) 상태로 된 유기혼합물은 증발기에서 열원과 열교환을 통해 포화증발온도에 도달(4-5 과정)한 후 기

상으로 증발(5-1 과정)하게 된다. 증발기 출구에서의 포화 증기 유기혼합물이 터빈에서 팽창(1-2 과정)됨으로써 발생하는 팽창일(expansion work)은 기계적 에너지로 변환되며, 터빈과 연결된 발전기에 의해 전력이 생산된다. 터빈 출구에서의 유기혼합물은 과열상태로 응축기로 유입되어, 다시 응축되는 과정을 반복하게 된다.

기존 랭킨시스템의 작동유체인 물이 포화증기점에서 터빈을 통해 팽창되는 경우에 터빈 출구에서 이상(two-phase) 상태로 유지되는 것과는 달리, 유기혼합물은 과열 증기 상태로 유지된다. 따라서, 유기혼합물을 작동유체로 사용하는 랭킨시스템의 터빈 내에서는 액적(liquid droplet)이 발생되지 않으므로 터빈 회전익(rotating blade)에 스트레스(stress)가 발생되지 않고, 증발기 출구에서 과열영역이 필요 없는 포화 사이클 시스템을 구성할 수 있다. 실제 시스템의 경우에는 열효율 향상을 위하여 대향류 열교환 방식의 재생기(recuperator)가 터빈 출구와 증발기 입구 사이에 추가로 설치되며, 그림 2는 재생기 부착형 유기랭킨 시스템의 실제 구성도를 나타낸다. 터빈에서 팽창된 작동유체는 이상 상태에 도달하지 않고 과열 상태를 유지하기 때문에 증발기 입구에서의 과냉액보다

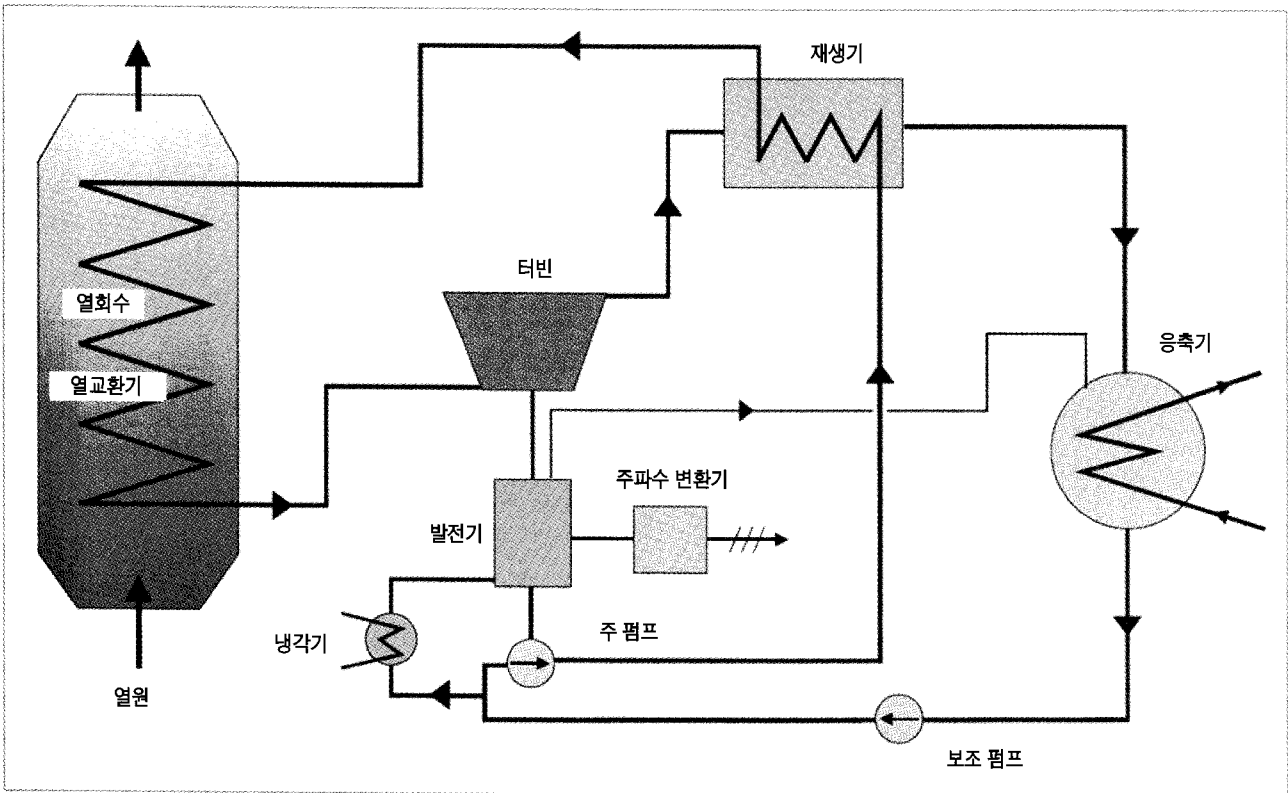


그림 2 재생기 부착형 유기랭킨 시스템

높은 온도로 유지되게 된다. 재생기의 장착에 의해 터빈 출구의 과열증기와 증발기 입구의 과냉액이 서로 열교환되어, 증발기로 들어가는 작동유체의 온도를 상승시킴과 동시에 응축기로 들어가는 작동유체의 온도는 감소시킴으로써 전체 시스템 효율을 상승시킬 수 있다.

랭킨사이클의 작동유체로서 유기혼합물을 선정할 때는 적용하고자 하는 시스템과 유기혼합물의 정확한 특성을 정확히 파악하여 선정하여야만 시스템의 효율을 최적화시킬 수 있다. 유기랭킨 사이클용 작동유체의 선정기준으로는 1) 시스템의 구성기기가 초고압(증발과정)이나 초진공(응축과정)이 되지 않도록 하기 위하여 사용온도 범위 내에서 적정한 증기압(vapor pressure)을 유지하여야 하며, 2) 터빈, 배관 등의 콤팩트(compact) 설계를 위해 작동유체의 밀도가 커야 하며, 3) 증발기나 응축기에서의 열전달 성능 향상과 사이즈 감소를 위해 열전달 특성이 좋아야 하며, 4) 사용온도 범위 내에서 화학적인 안정성을 가지며 열분해가 일어나지 않고, 독성이나 위험성이 없어야 한다.

또한, 시스템 전체의 제작 원가의 절감과 함께 유지관리 편의성 및 비용 감소를 위해서는 작동유체의 구입이 쉽고 가격이 저렴하여야 할 것이다.

할로겐화 탄화수소계 화합물(halogenated hydrocarbon compounds)나 이소부탄(iso-butane)과 같은 유기 화합물은 약 200℃ 정도의 작동 온도에 매우 적합하며, 또한 화학적 특성이나 사용상의 조건도 우수하여 안전하게 사용할 수 있다. 하지만, 작동온도가 200℃ 이상인 경우에는 열안정성이 더욱 높은 톨루엔(toluene), 프로리놀 85(F-85)와 같은 유기물질을 사용하여야 한다. 프로리놀 85는 250℃를 넘는 온도에도 안정되어 열분해가 일어나지 않으나 매우 가격이 비싼 단점이 있다.

유기랭킨 사이클은 현재 사용되는 열역학적 사이클 중에서 가장 낮은 온도범위에서 작동되는 사이클 중의 하나이다. 저온 사이클로서의 유기랭킨 사이클의 특징은 신재생에너지원의 이용, 폐열회수뿐만 아니라 기존의 고온 열사이클과의 병합운전을 통해 기존 시스템의 에너지 변환

효율을 증대시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 유기랭킨 사이클의 장점으로는, 폐열을 단순히 열에너지로 변환하는 기존의 폐열회수 방법과 달리 고급에너지인 전기에너지로 변환이 가능한 효과적인 폐열회수 시스템이며, 작동 유체의 적절한 선정을 통해 넓은 범위에서의 열에너지를 효과적으로 활용할 수 있다. 또한, 저온 열원을 에너지원으로 하는 기관이기 때문에 가스터빈과 같이 고온의 열원을 사용하는 시스템보다 신뢰성이 높으며, 유지관리 비용도 상대적으로 저렴한 장점이 있다.

유기랭킨 시스템에 대한 국내 연구는 한국동력자원연구소에서 “폐열회수 활용을 위한 유기 랭킨 사이클 개발 및 실용화 연구”라는 연구주제로 3년 동안 연구를 진행하여 10kW급 유기랭킨 발전시스템을 개발하였다. 유기랭킨 시스템의 주요 요소 부품의 설계 및 제작 그리고 성능시험을 수행하였고, 시스템의 경제성 평가와 시스템 운전을 위한 제어시스템을 개발하였다. 본 연구는 현재까지 우리나라에서 유기랭킨 사이클 발전시스템의 연구가 부족한 상황에서 매우 중요한 자료를 제공하고 있다고 할 수 있다. 유기랭킨 사이클 시스템에 대한 국외 연구는 관련 정부의 지원 하에 신재생에너지의 보급과 더불어 활발히 진행되고 있다. 다양한 용량의 유기랭킨 발전시스템이 개발되고 있고, 사용 열원은 태양열, 지열, 산업폐열 등 다양하게 이용되고 있음을 알 수 있다. 2000년에 들어서는 건물과 연계된 유기랭킨 시스템이 활발하게 연구되고 있음을 최근의 문헌을 통해 알 수 있고, 특히 건물의 전기공급과 냉난방을 동시에 할 수 있는 마이크로 터빈 시스템의 배열을 열원으로 하는 유기랭킨 발전시스템에 관한 연구가 가장 많이 진행되고 있음을 볼 수 있다. 또한, 바이오매스(biomass)와 연료전지(fuel cell)의 열원에 대해서도 유기랭킨 시스템의 적용에 관한 연구가 수행되고 있다.

응용분야

유기랭킨 시스템은 저온의 열원을 이용하기 때문에 다양한 열원이 적용될 수 있으며, 태양열, 지열 및 해양온도와 같은 신재생 에너지와 산업 폐열, 바이오매스 등이

그것이다. 또한, 기존 발전 시스템의 하부 사이클(bottoming cycle)로 유기랭킨 시스템을 적용하여 효율 향상에 활용될 수 있으며, 지역 냉난방 시스템에서의 활용, 그리고 현재 그 수요가 크게 증가하고 있는 마이크로 터빈(micro turbine) 시장에서도 이들에 나오는 배열을 이용하여 분산 발전시스템(distributed power generation)의 성능을 크게 향상시키기 위해 활용될 수 있다.

현재 우리나라의 신도시 건설에는 열병합 시스템이 도입되고 있고, 추가적으로 신설되는 도시의 에너지 공급설비는 에너지 효율이 높은 열병합 시스템으로 표준화가 될 것으로 전망되고 있다. 지역 냉난방시스템과 관련하여 유기랭킨 시스템은 매우 다양하게 적용될 수 있는데, 지역 열병합발전의 하부 사이클(bottoming cycle)로 이용하면 최대 10%까지 발전효율을 증가시킬 수 있다. 한편 열병합 발전소에서 만들어지는 온수는 큰 손실 없이 각 최종수요자에 전달되고 있으며, 이러한 열원은 유기랭킨 시스템을 구동할 수 있을 정도로 충분하다. 따라서 대형 상가, 병원, 대학은 충분히 이러한 열원을 이용하여 유기랭킨 발전시스템을 자체적으로 구동하여 전력을 생산해낼 수 있고, 이는 첨두부하를 낮춰주는 역할 뿐 아니라 최종수요자 자체적으로 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 자유도를 부여할 수 있을 것으로 판단된다.

가스터빈을 사용하는 발전소에서는 가스터빈의 구동에 따라서 많은 열에너지가 배출되고 있다. 지금까지는 이러한 열에너지가 주로 온열 생산에 집중되어 있었으나, 유기랭킨 발전시스템을 하부 사이클로 채택함으로써 전력을 생산하는 방식이 현재 적용되고 있는 추세이다. 미국의 ORMAT사와 Montana-Dakota Utilities사는 공동 연구개발을 통해 기존 발전소에 5.3 MW급 유기랭킨 발전시스템을 적용한 재회수 에너지 생산설비 건설을 추진하고 있다.

태양열 집열 기술의 발달과 더불어 진공튜브(evacuated tube)가 개발되고 있는데, 이는 최고 185°C까지 작동유체의 온도를 올릴 수 있으며, 이는 유기랭킨 시스템의 적용에 매우 적당한 열원으로 활용될 수 있다. 현재 진공튜브 기술과 접목된 유기랭킨 시스템의 효율은 태양광 발전시

시스템에 비해서 55%의 효율을 나타내는데, 열저장용 탱크 기술과 접목되어 운전시간을 늘리고, 유기랭킨 시스템에서 나온 배열을 추가적으로 활용하면 태양광 발전시스템에 비해 더 큰 효율을 나타낼 것으로 예상된다. 비용적인 측면에서는 터빈과 발전기의 가격과 태양전지의 가격은 거의 동일한 정도를 나타내고 있으나, 터빈과 발전기의 대량생산은 이들의 단가를 크게 낮출 수 있고 현재의 계산은 유기랭킨 시스템의 효율이 7%라는 가정 하에 수행되었는데, 이를 10% 이상으로 높인다면 태양광 발전시스템 보다 더 큰 경쟁력을 가질 것이라 판단된다.

대부분의 지열 발전 시스템의 경우에는 지하에 매장된 고온수를 이용하여 기존의 랭킨 사이클 방식을 그대로 적용하고 있지만, 저온인 경우에는 시스템 효율 감소로 인한 경제적 문제로 인해 유기랭킨 사이클 발전시스템의 적용이 필수적이라 할 수 있다. 지하 3,000m 이내의 경우에는 물의 온도가 100℃를 넘기 힘들기 때문에 지열의 이용에서도 유기랭킨 시스템의 적용이 타당하다고 할 수 있다. 2007년에 시험가동이 시작된 독일 란다우 지열발전소는 심도 3,300m까지 시추하여 150℃ 열원온도에서 2.5MW의 발전용량을 확보하였으며, 본 지열발전 시스템에는 ORMAT 사의 공기응축식 유기랭킨 시스템이 적용되었다. 미국 DOE(Department Of Energy)와 UTC Power 사는 74℃의 저온열원 이용이 가능한 200/280kW급의 모

돌식 유기랭킨 사이클을 개발하였으며, 알래스카 체나(Chena) 온천에 총용량 680kW급 유기랭킨 지열발전 시스템을 운전하고 있다.

맺음말

무한한 신재생에너지를 열원으로 이용할 수 있고, 기존 시스템의 효율 증대가 가능한 환경친화적인 유기랭킨 사이클 발전 시스템은 신기술로서 무수한 응용분야를 가지고 있음에도 불구하고 특수한 정책적인 규모의 적용 이외에는 아직까지는 미개척분야라고 할 수 있다. 특히 국내에서는 이러한 유기랭킨 시스템에 관한 인프라가 미비한 실정이며, 시스템의 제작 및 시공을 위해서는 요소부품들을 외국에서 수입해야 하기 때문에 초기 설비투자비가 높고 운전보수 등에 어려움이 많은 실정이다. 따라서, 이러한 유기랭킨 사이클 시스템의 실용화 및 상용화를 위해서는 최적화 설계 기술의 개발과 함께, 팽창기, 펌프 및 열교환기와 같은 요소부품의 국산화 개발이 우선되어야 할 것이다. 특히, 대형시스템의 개발보다는 중소형 시스템의 응용 범위가 크게 증가하고 있기 때문에 이에 초점을 맞추는 연구가 반드시 필요하다. 국내 환경 및 에너지 문제 해결을 위해서 유기랭킨 시스템의 자체적인 설계 및 제작 능력 확보를 위한 연구 개발은 반드시 이루어져야 할 것이다.

기계용어해설

단면 2차 모멘트(Moment of Inertia of Area)

임의의 도형내에 미소면적을 dA , 이의 일정 축 z 까지의 거리를 y 라 할 때, z 축에 관한 미소면적 dA 의 2차 모멘트인 y^2dA 값을 도형의 전체 면적에 대해서 적분한 것.

모넬 합금(메탈)(Monel Metal)

니켈 64~69%, 구리 26~32%를 주성분으로 하고 철, 망간을 미량으로 함유하며, 염색기, 화학기계, 터빈 날개 등에 쓰이는 내산합금의 일종.

모터 사이렌(Motor Siren)

전동기축에 고정된 날개차 주위에 작은 틈새를 두고 많은 구멍이 뚫린 원통형 케이스를 설치하여 이 구멍에서 끊기는 바람의 진동으로 음향을 발생하는 경보장치.