



일반원고

저온 열원이용 ORC 발전 시스템

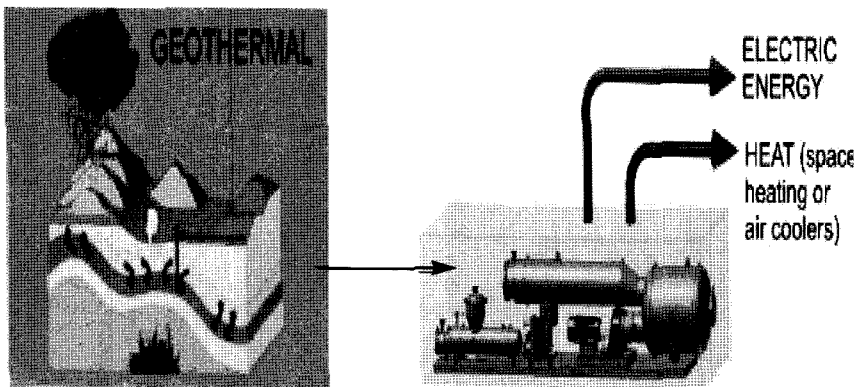
박 창 용

서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부 교수

1. 서언

최근 에너지 자원, 온실가스 배출 등과 관련한 국제적 분쟁과 규제가 심화되고 있다. 에너지 자원이 부족하고 막대한 양의 에너지를 수입에 의존하는 국내 현실을 고려하여 에너지의 효율적 이용은 국가 경쟁력 향상과 직결되는 중요한 문제이다. 특히 전력생산의 다변화는 지난 9월 전력 대란이 보여주는 것과 같이 국가 전력발전의 중요한 요소로 인식되기 시작 하였으며 이에 대한 연구도 최근 활발하다.

전력의 다변화 방향 중 최근 지열이나 폐열원과 같은 저온 열원을 사용한 발전 시스템인 ORC (Organic Rankine Cycle, 유기랭킨사이클)가 각광받고 있다. 저온 랭킨사이클은 중저온 폐열을 회수하여 발전이 가능한 기술로 미국 및 유럽의 일부 선진국에서는 이미 오래 전부터 연구개발을 시작하여 현재 상용화를 활발히 진행 중이다. 저온랭킨사이클을 이용한 지열, 신재생 에너지 회수 열병합발전 기술개발은 산업 분야의 에너지 효율 향상 및 온실가스 저감과 관련하여 큰 효과를 나타낼 것으로 예상된다. 그림 1은 지열을 이용한



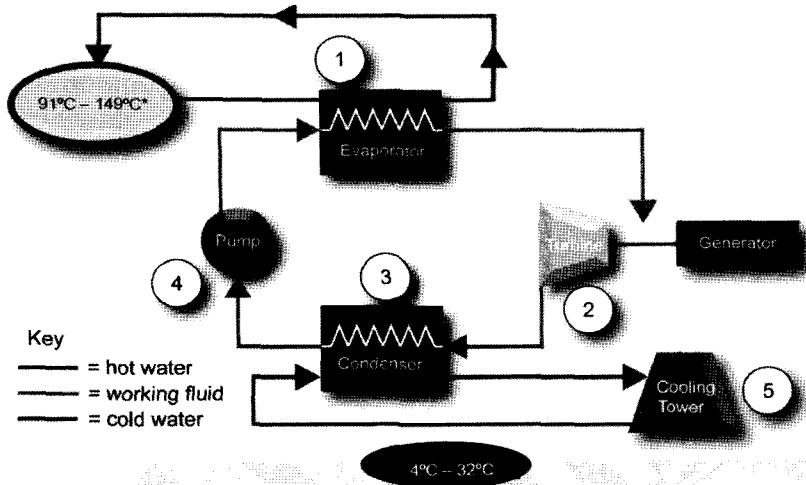
[그림 1] ORC 발전 개략도

ORC 발전 개략도를 보여주고 있다.

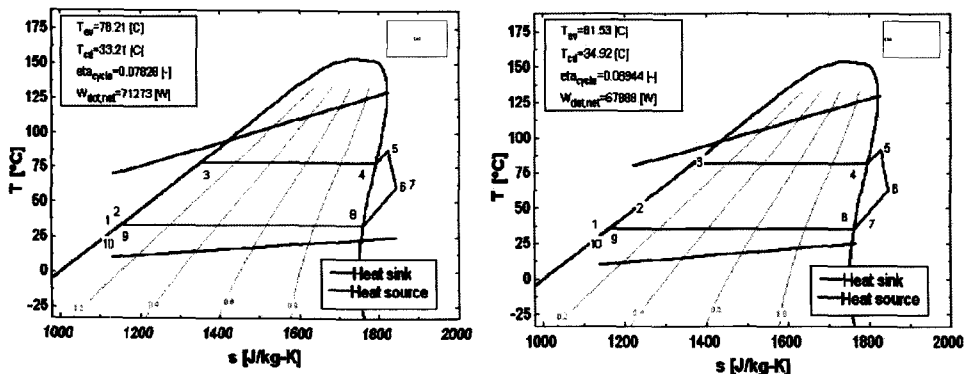
2. 기술개요

유기 랭킨 사이클(Organic Rankine Cycle, ORC)은 이론적인 랭킨 사이클에서 작동유체를 고분자 유기 화합물로 사용하는 사이클을 말한다. 랭킨 사이클은 열에너지를 회전 운동에너지(전기에너지)로 변환하는 사이클이며, 대부분 작동유체는 물을 사용한다. 일반적인 랭킨 사이클과 유기 랭킨 사이클의 차이점은 유기 랭킨 사이클이 낮은 증발압력을 갖는 작동유체를 사용함으로써,

비교적 낮은 온도의 열원(약 100°C 이상)을 이용하여 전기를 생산할 수 있다는 점이다. 최초의 유기 랭킨 사이클 시험설비는 1961년 이스라엘의 엔지니어 Harry Zvi Tabor와 Lucien Bronicki에 의해 개발되었으며, 아래의 그림 2는 일반적인 유기 랭킨 사이클의 구조를 보여주고 있다. 그림 2에서 1은 열을 흡수하여 작동유체를 증발시키는 증발기, 2는 작동유체를 팽창시켜 전기에너지를 생산하는 터빈과 발전기, 3은 기체상태의 작동유체를 액체상태로 만드는 응축기, 4는 액체상태의 작동유체를 증발기로 보내주는 펌프를 나타낸다. 그림 3는 작동 유체를 R245fa를 사용하는 폐열



[그림 2] 일반적인 유기 랭킨 사이클의 개략도



[그림 3] 유기 랭킨 사이클의 T-s 선도 예 (a) 재생기 사용 (b) 재생기 미사용

회수 유기 랭킨 사이클의 T-s 선도를 보여준다. 유기 랭킨 사이클이 갖는 장점을 요약하면 다음과 같다.

- 터빈과 사이클의 열역학적 효율이 비교적 높음
- 터빈에 작용하는 열적, 기계적 스트레스가 낮음
- 터빈 내부에서 팽창이 기체 상태로만 이루어져 액체에 의한 손상이 없음
- 사이클의 작동 시작이 용이하고, 연속적으로 작동이 가능함
- 유지보수가 용이하고, 작동을 통제하는 작업자의 상시대기가 불필요함
- 약 20년 이상의 수명을 가짐
- 일반적인 랭킨 사이클에서 요구되는 무기물 제거가 필요하지 않음

3. 해외 기술개발 현황

최근 저급열원에서 열을 회수하는 기술에 대한 관심의 증대에 따라, 해외에서는 비교적 저온의 열원을 이용하여 전력을 생산하는 유기 랭킨 사이클(ORC)에 관한 다수의 연구 및 제품개발이 이루어지고 있다. ORC는 바이오매스, 태양열, 지열, 폐열 등 다양한 열원을 이용한 발전이 가능하며, 열원의 종류에 따라 기술 현황을 구분하여 설명하였다. 또한 작동유체에 따른 기술개발 현황도 제시하였다.

■ 바이오매스를 이용한 ORC

바이오매스(biomass)는 농업이나 삼림업의 폐기물로 연소시키는 경우 열에너지를 발생시키는 물질을 의미한다. 흔히 바이오매스는 에너지의 밀도가 낮기 때문에 이를 수송하는 경우 수송에 소요되는 에너지 당 유용에너지가 낮은 물질에 해당한다. 따라서 바이오매스는 산지에서 직접 소비하여 전력과 열에너지를 생산하는 것이 경제적이다, 이는 대부분 바이오매스 산지가 외진 곳이라는 장소의 특성과도 부합한다. 바이오매스를 이용한 유기 랭킨 사이클은 지역의 소형 발전기능을

담당하며, 그 용량은 전기에너지 생산량을 기준으로 대부분 1 MW 미만이다. 바이오매스를 이용하는 ORC의 장단점을 기술하면 다음과 같다.

장점: 물을 사용하는 랭킨 사이클에 최고점 온도 450℃와 압력 70 bar에 비해 바이오매스를 이용한 ORC는 최고점 온도가 300℃로 낮고, 작동압력도 낮아 내압용기 등에 사용되는 비용을 낮출 수 있다.

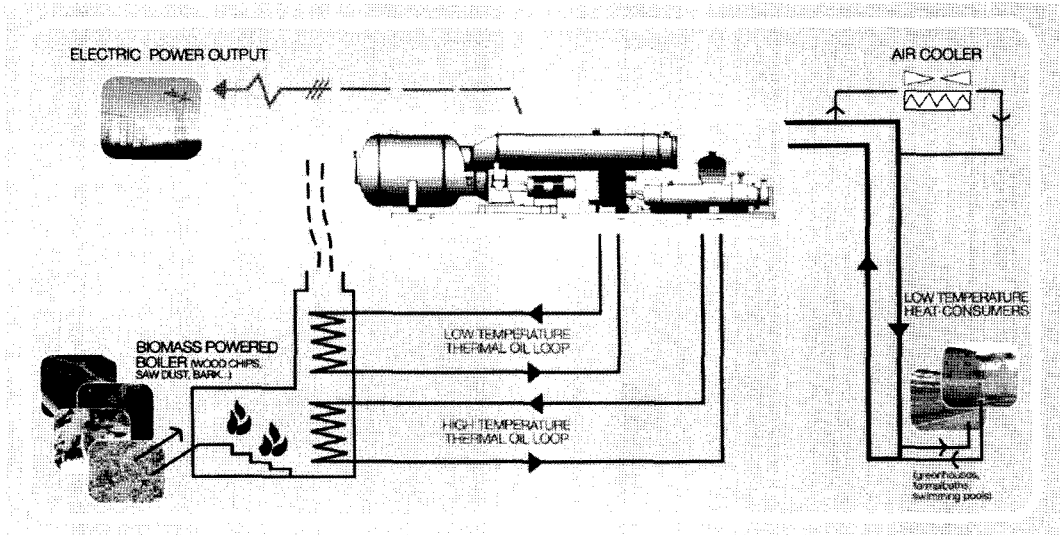
단점: ORC는 스팀을 이용한 랭킨 사이클에 비해 효율이 낮으며, 일반적으로 사이클의 크기가 작아질수록 효율도 감소한다. 따라서 대부분의 바이오매스 이용 ORC 사이클은 전기 생산과 열생산을 함께 하는 CHP (Combined Heat and Power) 시스템의 형태를 가지며, 전기와 열 생산의 조건을 조절하여 ORC의 가동효율을 높이려는 노력이 진행되고 있다.

그림 4는 바이오매스를 이용한 ORC 예를 보여주고 있으며, 제시된 사이클은 전기에너지 생산을 최대화 하기위해 고온과 저온 연소열에서 2차 유체를 통한 독립적인 열 회수 방식을 사용하고 있다.

■ 태양열을 이용한 ORC

집광형 태양열 발전(Concentrating Solar Power, CSP)은 집광관에 의해 모아진 태양열을 이용하여 전기에너지를 생산하는 것을 말한다. ORC가 이용될 수 있는 집열기는 반원통형 집열기(Parabolic Through Collector, PTC)로 이 집열기를 통해 얻을 수 있는 최대온도는 약 400℃ 정도이다. 따라서 스팀을 사용하는 랭킨 사이클도 이용 가능하지만, 기후조건에 따라 가용 최대온도가 낮을 수 있으며 초기 투자비용을 고려하는 경우 ORC가 더 경제적이 될 수 있다.

현재 가동되고 있는 태양열 이용 ORC는 그 수가 매우 작다. 미국 Ormat 사는 n-pentane을 작동유체로 사용하는 1 MWe급 ORC를 2006년 Arozona 주에 건설하였으며, 전기에너지 생산 기



[그림 4] 바이오매스를 사용하는 ORC 개략도

준으로 효율이 12.1%였다. 독일의 GMK 사는 2005년 250kWe급 시험설비를 제작하였으며 전기에너지 생산효율은 약 15%였다.

태양열 ORC에서는 ORC의 효율과 집열기의 효율이 온도변화에 따라 반대의 특성을 갖는다. 그림 5에서 보여주는 것과 같이 열원의 온도증가에 따라 ORC의 효율은 증가하지만 집열기의 효율은 감소한다. 따라서 전력생산에 최고의 효율을 주는 온도영역이 존재하게 되며 설계자는 이러한 특성을 잘 파악하여 사이클을 설계해야 한다.

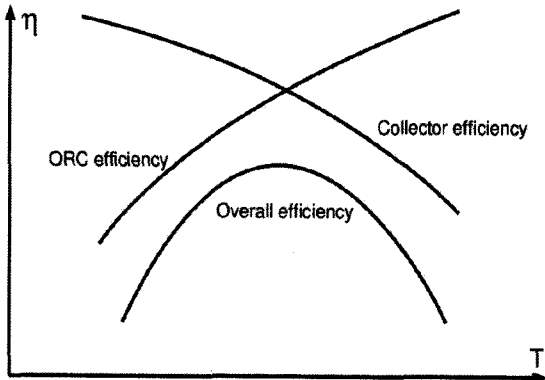
■ 지열을 이용한 ORC

지열원을 이용하는 경우 그 온도범위는 지역에 따라 매우 다양하다. ORC가 적용될 수 있는 열원의 최소온도는 약 100℃이며, 지열을 사용하는 ORC는 대부분 열원의 온도가 200℃ 이상인 지역에 위치하고 있다. 열원이 150℃ 이상인 경우 ORC CHP의 형태로 운영되는 경우가 많으며 이러한 경우 냉매의 응축온도는 약 60℃이고, 응축기를 냉각하는데 사용되는 열은 난방용으로의 사용이 가능하다. 하지만 응축온도의 상승에 따라 전기에너지를 생산하는 효율은 감소하게 된다. 지

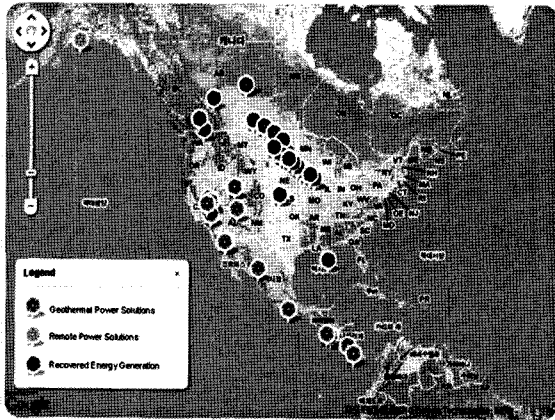
열을 이용한 ORC의 개략도가 그림 6에 제시되어 있다.

지열을 이용한 ORC는 많은 제품들이 이미 출시되어 있으며, 미국의 Ormat 사, 이탈리아의 Turboden 사, 독일의 GMK 사, 미국의 Pratt & Whitney 사 등에서 전기에너지 발전용량이 수십 kW에서 수십 MW급에 이르는 다양한 ORC가 제작되고 있다.

지열을 활용하는 ORC는 양질의 열원이 확보되는 경우 경제성이 우수하다. 하지만, 지열은 지역에 따른 특성 차이가 매우 큰 에너지원이다. 그림 7은 미국 Ormat 사가 현재 북미에 설치 운영하고 있는 ORC의 분포를 보여주고 있다. 붉은 색으로 표현된 지점이 지열활용 ORC의 설치위치를 나타낸다. 그림 7을 살펴보면 대부분의 지열활용 ORC가 환태평양 조산대에 위치하고 있음을 알 수 있다. 이는 화산 또는 지진의 활동이 활발한 지역에서 지열활용 ORC의 경제성이 확보된다는 것을 보여준다. 그림 8은 미국 Pratt & Whitney 사의 소형 260 kW급 ORC를 병렬로 연결하여 지열을 활용한 발전시스템을 건설한 모습을 보여주고 있다.



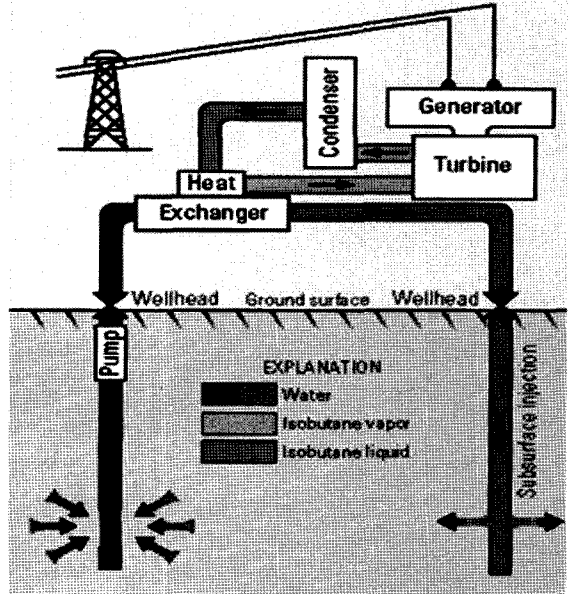
[그림 5] 열원온도 변화에 따른 ORC와 집열기의 효율변화



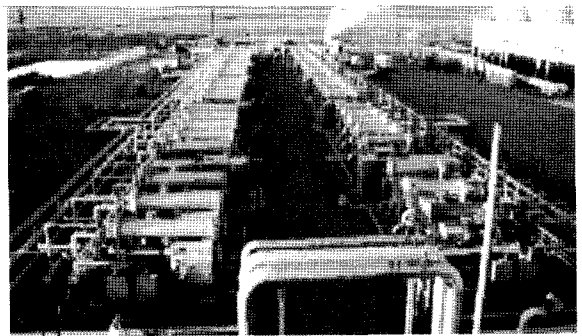
[그림 7] 미국 Ormat 사의 북미 ORC 설치위치 (붉은색이 지열 이용 ORC)

■ 폐열활용 ORC

최근 에너지 가격상승과 이산화탄소 배출 감소 요구 증가에 따라 산업공정에서 버려지는 폐열회수에 관한 관심이 증가하고 있다. 90°C 이하 온도의 폐열은 전기에너지 생산 효율이 낮아 열에너지 형태로 회수되어 냉난방 등에 사용되고 있으며, 90°C - 300°C 정도의 온도 범위를 갖는 폐열을 이용하여 전기에너지를 생산하는 경우 ORC가 바람직하다. 폐열을 활용하는 ORC가 다른 열원(바이오매스, 태양열, 지열)을 활용하는 ORC에 비해 갖는 장점은 폐열이 발생하는 산업이 있는 지역이라면 장소에 제한없이 설치 가능하다는 점



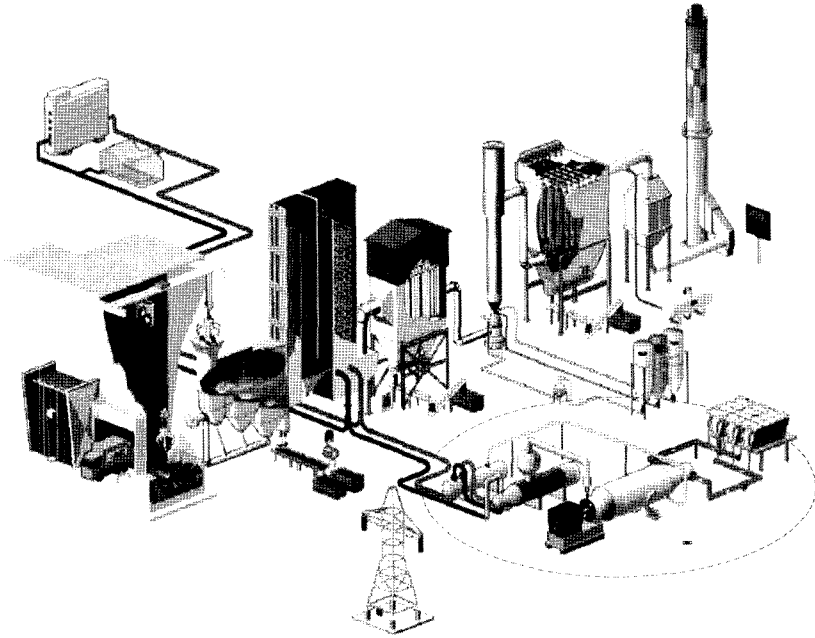
[그림 6] 지열을 이용한 ORC의 개략도



[그림 8] 미국의 지열활용 ORC 발전 시스템 건설 예

이다. 그림 7에서 검은색으로 표시된 지점이 폐열을 회수하는 ORC의 위치를 나타내고 있으며, 이를 통해 지리적 장소에 관계없이 폐열이 생산되는 산업이 위치한 곳에 폐열활용 ORC가 설치되어 있음을 알 수 있다. 공장 폐열을 활용하는 ORC의 개략도가 그림 9에 제시되어있다.

폐열은 다양한 산업에서 회수가 가능하다. 특히 공정과정 중 고열을 요구하는 시멘트, 유리, 철강, 비금속 용광로, 정유 산업에서는 많은 양의 폐열



[그림 9] 공장 폐열회수 ORC 개략도

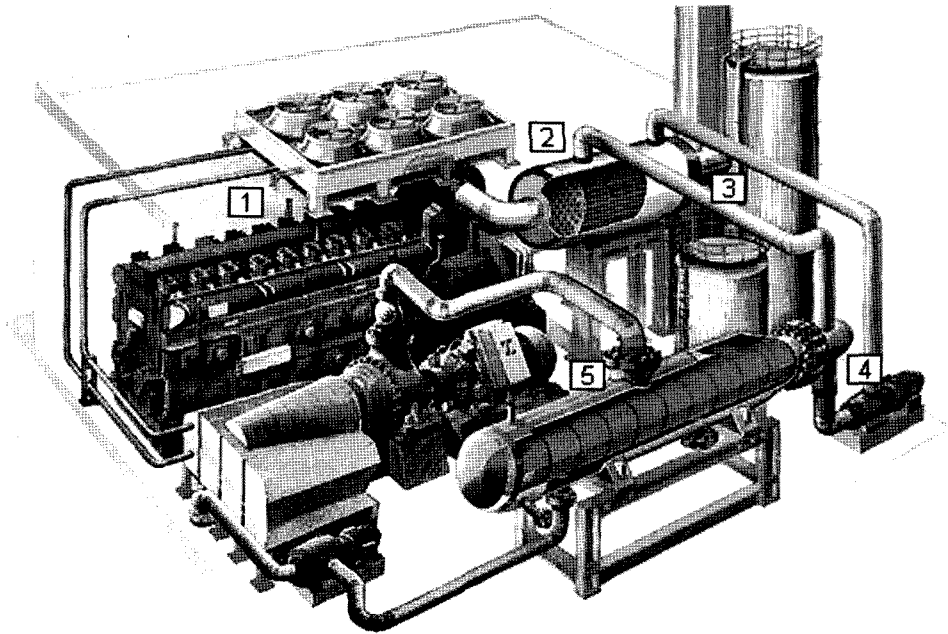
이 발생하기 때문에 이에 대한 활용잠재 가능성은 충분하다. 또한 대형 내연기관이 설치된 지역에서는 이를 활용한 폐열회수 ORC 이용이 가능하다. 일반적으로 내연기관은 공급되는 열에너지의 약 1/3 정도만 기계적 에너지로 변환되고 나머지는 열에너지로 방출되기 때문에 이는 ORC의 열원으로 활용될 수 있다. 내연기관에서 방출되는 열에너지 중 특히 고온의 열원인 배기가스(400℃ - 900℃)를 사용한 폐열회수 ORC가 상용화되고 있다. 그림 10는 독일 GMK사에서 제작하는 배기가스 폐열회수 ORC의 개략도이다. 그림에서 (1)은 내연기관, (2)는 배기가스에서 2차 유체로 열을 흡수하는 열교환기, (3)과 (4)는 2차 유체를 위한 배관과 펌프, (5)는 2차 유체를 이용하여 ORC의 작동유체를 증발시키는 증발기, 그리고 (1)과 (5) 사이에는 발전을 위한 터빈과 발전기가 배치되어 있다.

폐열회수를 위한 다양한 시스템은 몇몇 회사에서 제작중이며 현재 상용화 단계이다. 미국 Ormat사에서는 가스 플랜트, 시멘트 플랜트에서

폐열회수를 통해 1 - 5 MW의 전기에너지를 생산하는 설비를 구축하였다. 이탈리아 Turboden사에서는 폐열을 회수하여 1 - 3 MW의 전기에너지를 발전하는 ORC 설비를 제작하고 있다. 수백 kW급 소형 ORC 미국 Pratt & Whitney사, 네덜란드 Tri-o-gen사, 수십 kW급 ORC는 미국 Electratherm사에서 공급하고 있다.

■ 작동유체에 대한 유기 랭킨 사이클 기술현황
주어진 작동조건에 대한 적절한 ORC의 작동유체 선정은 매우 중요한 공학적 문제이며 상당한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 냉매 선택과 관련된 일반적인 특성을 열거하면 다음과 같다.

- 열역학적 성능: 효율과 시간당 출력에너지는 주어진 고온측 및 저온측 열원의 온도에서 되도록 최대가 되어야 한다. 이는 펌프에서의 낮은 에너지 소모와 높은 임계점과 관련된다.
- 양(positive)의 기울기를 갖는 포화증기 곡선: 음(negative)의 기울기를 갖는 ("wet" fluid)



[그림 10] GMK 사의 내연기관 배기가스 폐열회수 ORC 개략도

포화증기 곡선은 터빈 내 팽창 과정의 마지막 단계에서 액상의 작동 유체가 발생하여 터빈을 손상시킬 수 있다. 약간의 ORC 성능감소를 감수하고서라도 터빈 입구는 과열상태로 만들어야 한다. 포화 증기 곡선이 양의 기울기를 갖는 작동유체에는 재생기 등을 사용하여 성능향상이 가능하다.

- 높은 기체 밀도: 기체밀도는 매우 낮은 응축온도를 갖는 작동유체에서 중요한 설계변수가 된다. 기체 밀도가 낮은 경우 팽창장치(터빈)와 응축기의 크기가 커져 제작비용의 상승을 초래하기 때문이다.
- 적절한 압력: 작동유체의 압력이 너무 커지는 경우 시스템 제작비용 상승과 구성의 복잡성 문제가 발생한다.
- 온도에 대한 화학적 안정성: 물과 달리 유기 작동유체의 경우 높은 온도에서 화학적으로 분해되거나 다른 물질과 결합하는 성질을 가지고 있다. 따라서, 고온 열원의 최대온도는

작동유체의 화학적 안정성을 유지할 수 있도록 제한되어야 한다.

- 낮은 환경영향과 높은 안전성: 오존층 파괴지수(ODP)와 지구 온난화지수(GWP), 독성, 발화성이 낮은 물질을 선택해야 한다.
- 우수한 적응성과 낮은 가격

지금까지의 많은 연구에서 다양한 물질이 ORC의 작동유체로 사용되었으며, 그러한 물질을 열거하면 다음과 같다. R134a, R245fa, R600, R245ca, R601, R123, R124, R227ea, R152a, R290, Bensene, Toluene, Water, isopentane, AlkylBenzens, Ammonia, n-pentane, silicon oil, Propylene. 위의 연구대상 냉매 중, 가장 많이 사용되는 작동유체로는 R134a, R245fa, n-pentane, silicon oil이 있다. 특히 R245fa는 환경적 영향이 작고, 화학적 안정성과 안전성이 우수하며, 넓은 온도영역에 대해 열역학적 특성이 뛰어나 ORC에 적합한 물질로 각광받고 있으나, 상

대적으로 높은 가격이 R245fa의 단점으로 지적되고 있다.

4. 결론

지금까지 ORC의 개요와 해외 기술개발 현황에 대해 설명하였다. 국가의 전력생산 다양화, 신재

생 에너지 및 산업 폐열의 사용 측면에서 ORC는 낮은 효율이 갖는 단점에도 불구하고 활용 가능성이 높은 시스템이라 할 수 있다. 최근 정부 주도로 몇몇 연구개발 사업이 이루어지고 있으며, 이러한 연구 개발이 완료되는 수 년 후에는 ORC의 국산화를 통한 기술 경쟁력 및 경제성 확보를 통해 그 활용이 확대될 것으로 기대된다. 