특 별 강 연

유기랭킨사이클(ORC)을 활용한 클링커 냉각기 폐열회수 방안

- 구심형(radial) 터빈을 통한 유기랭킨사이클(ORC) 효율향상 -

전 용 준

<이지엠에너지홀딩스>

1. 서 론

클링커 냉각기로부터 나오는 배가스(flue gas)의 폐열 온도는 165℃~304℃의 범위로서 상대적으로 저온이다. 더욱이 온도와 유량 모두에서 폐열원의 조건이 끊임없이 변한다. 이러한 저온의 변이가 심한 폐열은 스팀터빈을 통해 안정된 회수에 어려움을 야기한다. 이를 극복하기 위한 하나의 방안으로 유기랭킨사이클(ORC) 기술이 채택되고 있다.

키른(Kiln) 앞 뒤 공정에서의 폐열회수를 위한 스팀터빈과 ORC간 장단점 비교는 이미 검토가 충분히 이루어져 있다. 스팀터빈과 비교된 ORC의 알려진 장점은 아래와 같다.

- ORC는 상대적으로 저온의 폐열원에 대해 높은 효율성을 갖는다.
- 탄화수소 작동유체의 부피가 스팀보다 작음에 따라 터빈 및 파이프 사이즈가 작아진다.
- 스팀과 달리, 탄화수소 작동유체의 열역학적 특성에 따라 고압에서 저압으로의 팽창동안 습기 형성의 가능성이 없다. 이에 따라, 스팀터빈과 달리 슈퍼히터 없이도 부분부하 운전 수용이 가능하다.
- ORC는 공랭식(air-cooled)을 선호하는 프로젝트에 적합하다. 많은 경우에 있어, 용수부족에 기인하여 공랭식 방식 채택을 선호할 수 있다. 더욱이 ORC 발전소의 공랭식 응축기는 스팀발전용 공랭식 응축기보다 훨씬 소규모이며 저렴하다.
- 탄화수소의 결빙온도는 -73℃이하이므로 결빙의 가능성이 없다.

이러한 유기랭킨사이클(ORC) 폐열회수 공정 설계 기준은 폐열원의 특성 및 주변 환경에 의해 정해진다. 써멀오일(Thermal Oil)과 작동유기유체가 주어진 온도 및 압력 조건에서 ORC 시스템이 효율적으로 그리고 안정적으로 운전되기 위해 선택된다. 한편, ORC 공정을 최적화하기 위한 또 다른 중요한 대상은 터빈 유형의 선택이다.

유기랭킨사이클(ORC) 시스템에 적용이 가능한 터빈의 유형은 크게 두 가지로 구분이 가능하다: 구심형(radial) 터빈과 축류형(axial) 터빈. 본 연구에서는 ORC 공정 효율향상 방안의 일환으로 구심형(radial) 터빈의 장점을 중심으로 검토하고자 한다.

2. 구심형(radial) 터빈의 기술적 특성

유기랭킨사이클(ORC) 시스템 내 Thermal oil 루프에 의해 회수된 폐열원은 기화기(evaporator)에서 작동유체 (working fluid)를 포화상태 또는 과열 (slightly superheated)상태로 기화시켜 터빈으로 향하게 한다. 기화된 작동유체는 터빈에서 팽창하면서 발전기를 구동하여 전기를 생산한다. 이후 터빈으로부터 빠져나온 작동유체는 응축기를 통하여 액화한 후 순환펌프를 통해 기화기로 향하여 순환된다.

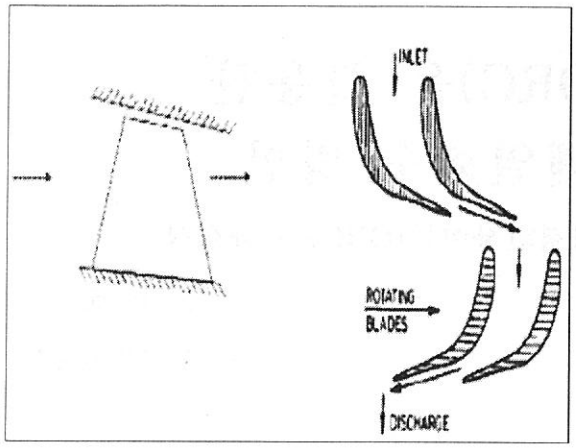

Fig. 1 Axial flow turbine

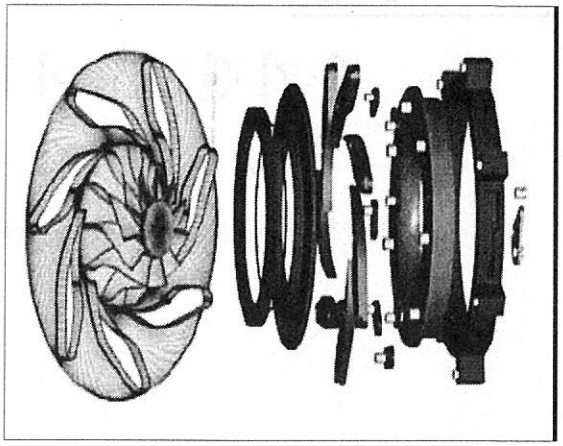

Fig. 3 Variable inlet guide vanes

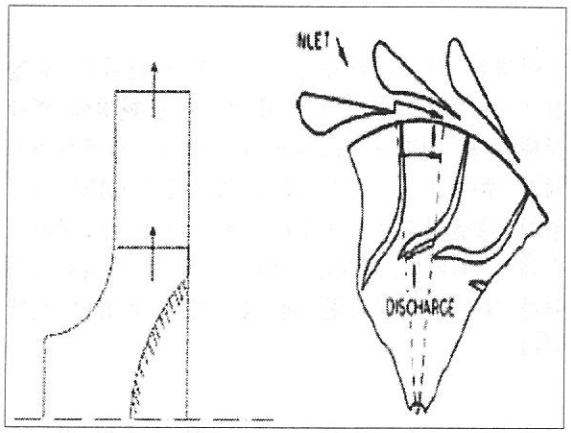

Fig. 2. Radial flow turbine, Turboexpander

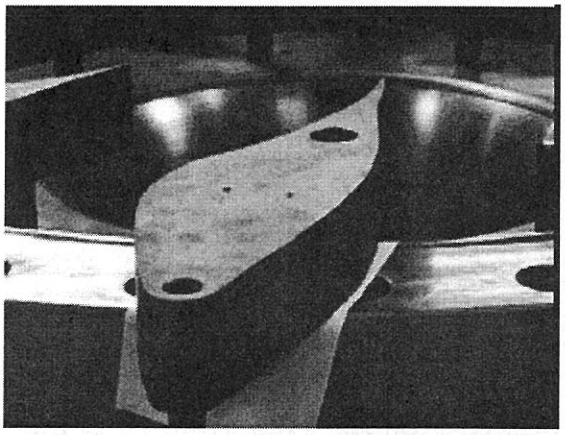

Fig. 4. An inlet guide vane segment

유기랭킨사이클(ORC) 사이클에서 터빈은 가장 핵심적인 부분이며, 터빈의 유형은 폐열회수발전을 설계함에 있어서 대단히 중요하다고 할 수 있다. ORC 시스템 구성에 있어 축류형 터빈(axial flow)과 구심형 터빈 (radial flow)의 두 가지 유형의 터빈 간 선택을 위해 구심형 터빈의 특성을 중심으로 정리하면 아래와 같다.

① Inflow radial turbine, Turbo-expander

터보팽창기술은 1930년대 air separation 산업으로부터 발전되기 시작해서, 천연가스처리공정, 석유화학, 에너지회수 등에 활용되고 있다. 구심형 터빈(Inflow radial turbine)의 가장 큰 특징은 유량조건에 맞춰 입구노즐의 개폐조절을 가능하게 하면서 유체를 터빈으로 향하도록 유도할 수 있다는 것이다. 이러한 특징으로 인하여, 에너지 회수공정에서 구심형터빈이 축류형터빈에 비해 높은 기계적 효율을 달성할 수 있다. 이는 압력차, 유량 및 온도 등에 변수와 관련하여 최적의 효율에 가깝게 운전될 수 있기 때문이다.

두 가지 유형의 터빈간의 구조적 특성을 기초로 고려할 차이점은 외기온도의 변화, 유량의 변화 등이다. 다시 말해, 응축기 성능은 외부온도에 의해 영향을 받고, 이는 터보팽창기의 입출구 압력차에 영향을 주어 발전량에 직접적인 변수로 작용하게 된다. 특히 우리나라와 같이 하절기와 동절기간 기온차가 심한 지역에서는 이러한 현상이 더욱 클 수 밖에 없다. 따라서 환경변화에 대응하기 위해서는 입구노즐의 개폐를 조절하여 터빈 출구압력을 상대적으로 일정하게 유지할 수 있는 구심형(radial) 터빈을 채택해야 하는 이유가 된다.

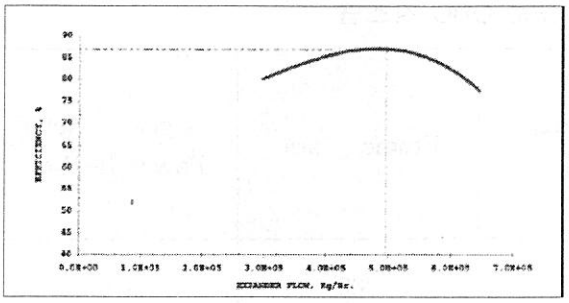

Fig. 5 Turboexpander Efficiency versus Flow

Fig. 5에서처럼 설계용량을 기준으로 적은 또는 많은 유량의 경우에 터빈효율은 낮아지는데, 축류형터빈의 경우 효율저하가 더욱 크게 나타난다. 일부 연구에 따르면 설계용량의 50% 정도의 유량만이 공급되는 경우에 구동형터빈과 축류형 터빈 간 터빈효율에서 최대 16%까지 차이를 보이는 것으로 알려져 있다.

이러한 구조적 특성으로 유기랭킨사이클(ORC)에서는 구심형터빈 (Inflow radial flow turbine)이 선택되어야 하는 점은 당연하다고 할 수 있겠다. 이는 결과적으로 주어진 조건에서 많은 전기를 생산할 수 있게 하고, 터보팽창기의 사이즈(flame size)를 적게 설계할 수 있게 함에 따라 장비의 가격을 낮출 수 있다.

② Working fluids

작동유체(Working fluids)의 선택은 유기랭킨사이클(ORC) 효율에 영향을 줄 수 있는 또 하나의 변수이다. 유기랭킨사이클에서는 물대신 이러한 낮은 비등점을 갖는 작동유체를 선택함으로 저온의 폐열원으로부터 에너지를 회수하는 것이 목적이므로 가급적 낮은 비등점 조건을 갖는 유체를 선택하는 것은 필수적이라 할 수 있겠다. 여기서 검토해야 할 사항은 아래와 같다.

오존층 파괴나 지구온난화 위험물질, 독성물질, 가연성 물질은 기본적으로 배제되어야 한다. 경제성 및 조달의 용이성 등이 고려되어야 하고, 물리적 특성에 따른 터빈사이즈가 우선적으로 검토되어야 하겠다. 현재 많은 사례에서 Iso-pentane, Iso-butane, propane 등이 선택 되어진다.

3. 대표적 구심형(radial)터빈 적용사례: 크라이오스타 지열회수 발전

프랑스 크라이스타사는 구심형 터빈을 적용하여 100°C~400°C의 미사용 폐열에너지를 Thermal oil loop 등으로 회수하도록 유기랭킨사이클을 설계하여 상용화하였으며, 지열에너지, 철강산업, 시멘트산업, 유리제조 등에 적합하도록 최적화 해오고 있다. 아울러 바이오매스 보일러, 바이오가스 엔진, 태양열 발전 등의 다양한 에너지시스템과 접목(intergration)한 시스템을 개발중에 있다.

구심형터빈 ORC를 적용한 대표적인 성공사례로 유럽연합(EU)의 통합프로젝트의 하나인 Shultz-ss-Forets 지열회수발전 사업을 들 수 있다. Iso-butane을 작동유체로 하는 1.5MWe급 상부 발전시스템을 공급하여 현재 상업운전되고 있다.

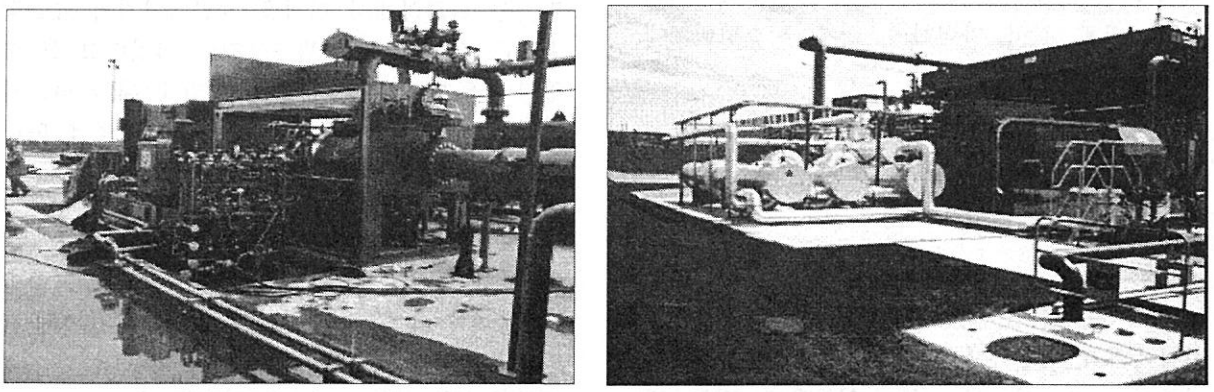

Fig. 6 Shultz-ss-Forets 지열발전시스템 전경

Table. 1 크라이오스타 표준 ORC 시스템

Working Fluid	In Pres. (Bar a)	Out Pres. (Bar a)	Frame size	Cycle Net Power (MWe)
Iso-pentane	9	1.1	700	2.1
Iso-butane	35	3.6	500	3.2
Propane	42	8.7	300	3.5

최근 지열 이용의 중요한 분야로 대두되고 있는 것이 심부지열에너지자원의 활용이다. 화산활동이 없는 즉 지열지대가 아닌 지역에서 심부 지열 에너지 개발 분야의 최근 세계적 연구동향은 지하 5 ㎞ 깊이까지의 시추공 굴착으로 200 °C 내외의 온도를 갖는 암반에 고압의 물을 주입하여 인공적으로 파쇄대를 만들고 또 다른 심부 시추공을 통해 고온의 지열수를 회수하여 발전을 수행하는 소위 Enhanced Geothermal System(EGS)으로, 프랑스 알사스지방의 Soultz-sous-forets 성공사례는 EU, 프랑스 및 독일의 주도로 진행되었으며, 상부 발전시스템은 구심형 터빈에 있어 30년 이상 세계적 선도기업인 크라이오스타 사의 ORC 발전시스템이 채택되었다.

위에서 소개한 각종 변수 및 고려사항을 종합하여 크라이오스타는 대표적인 표준시스템을 아래 Table. 1과 같이 마련하여 실제 시스템설계에 적용해오고 있다.

4. 결 론

전 세계의 연구 및 실제사례로부터 구심형 터빈(Inflow radial turbine)은 폐열에너지 회수 및 지열에너지 발전에 적용되는 유기랭킨사이클의 기준이 되고 있으며, 이는 외부온도 변화 및 유량변화에 따른 여러 가지 변수로부터 최적의 운전조건과 최대의 기계적 효율을 달성하게 한다.

작동유체의 선택에 있어서 고려해야 할 사항들 중에서 유기랭킨사이클이 미사용 폐열에너지의 회수가 그 목적임을 바탕으로 터보팽창기의 최대효율에 근접해야 하며, 이를 위해서 터빈의 사이즈를 고려한 선택이 필요하다.

크라이오스타는 여러 사례를 통해 시스템의 안정성과 효율 측면에서 검증된 기술을 보유하고 있으며, 보다 효율적인 에너지회수를 위하여 조건에 따른 OCR 표준시스템을 마련하고 있다. 아울러 보다 다양한 적용을 위하여 타 에너지 시스템과의 연계를 추진하고 있다.

고유가 국면이 지속되고 있고 건설경기의 불확실성 환경하에서 미사용 폐열에너지의 효율적 활용은 선택이 아닌 필수조건이 되었다고 할 수 있다. 또한 에너지 다소비 산업에 대한 범국가적인 규제가 더욱 강화될 것으로 예상됨에 따라 보다 적극적인 에너지 대책이 시급한 상황이다.

시멘트산업의 특성에 가장 부합하는 폐열에너지 회수 시스템으로 유기랭킨사이클을 소개하였으며, 이의 효율 극대화를 위해 핵심적인 기술적 내용으로 구심형터빈의 특성 및 검증된 유럽내 구심형 터빈 적용 사례를 검토하였다.