

유기랭킨사이클 시스템을 이용한 중·저온 동력회수 이용기술

Mechanical Energy from Low Temperature Heat using ORCS.

이 영 수,* 이 원 용
Y. S. Lee, W. Y. Lee

1. 개 요

에너지의 효율적 이용에서는 단순한 에너지의 양적 균형만을 고려할 것이 아니라 변환과정에서의 질적변화를 고려해야 한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 흔히 많이 사용되는 석유나 석탄과 같은 고급의 연료에너지로부터 비교적 저온에서의 열에너지가 필요할 때 소위 말하는 열병합발전 등의 방식으로 동력을 먼저 생산하고 이에 수반하여 열에너지를 이용하는 것이다. 이와같은 방식은 세계 각국에서는 물론 우리나라에서도 점차 그 중요성이 높아지고 있다.

산업체에서 방출되는 열을 회수, 이용하는 방법은 열원과 온도범위에 따라 여러가지가 있을 수 있는데, 그중 고급에너지를 전력으로 변환시키는 기술로서 가장 유망한 것이 유기랭킨사이클 시스템이다.

종래에는 산업용 폐열을 이용하여 축동력이나 전력을 발생시키기 위해서는 화력발전기술을 그대로 사용하는 것으로 배가스를 직접 증기 발생 보일러를 통하게 하여 여기서 발생된 증기를 이용 구동시키는 방법을 사용하였다.

그러나 중·저온(150 ~ 450 °C) 범위의 폐열을 수증기로 회수한 경우에는 보일러가 대

형화되고 열회수율이 나빠져 경제성이 없어지기 때문에 이 방법을 사용할 수가 없어 많은 량의 폐열이 방출될 수 밖에 없었다. 그러므로 중·저온의 폐열을 동력으로 회수하기 위하여 작동유체로 물대신 비등점이 낮고 증기압이 높은 유기매체를 사용한 유기랭킨사이클 시스템(ORCS: Organic Rankine Cycle System)을 사용하는 것이 효과적이다.

유기랭킨사이클을 이용하여 전기에너지로 변환시킬 수 있는 유효 폐열에너지원은 다음과 같다.

- 1) 각종 산업용 요로의 배가스
- 2) 화학제조 공정의 폐열수와 요로 등의 냉각수
- 3) 산업제조 공정의 폐증기
- 4) 디젤기관이나 가스터어빈의 배가스 등이다.

2. 구성 및 특징

2-1. 구 성

유기랭킨사이클 시스템의 주요 구성은 증발기, 터어빈, 재생기 및 펌프 등으로 구분된다.

그림 1은 유기랭킨사이클 시스템의 구성 및 이에 상응하는 열역학적 동력사이클의 온도-엔트로피 선도를 예시한 것으로 각 과정은 다

* 한국동력자원연구소

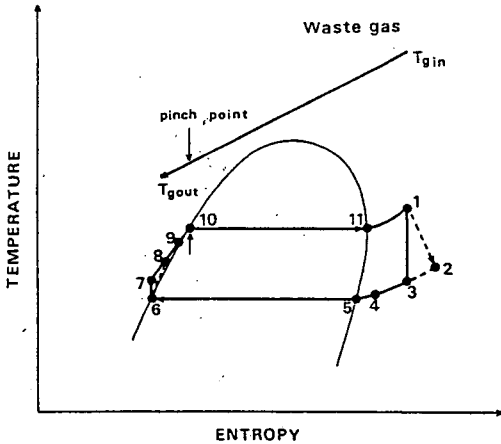


그림 1 유기랭킨사이클 시스템의 T-S 선도

음과 같다.

(1-2)과정 : 증기상태의 작동유기 매체가 터빈을 통과하면서 팽창 일을하는 과정

(2-4)과정 : 팽창된 작동유기매체가 재생기를 통과하면서 열을 방출하는 과정

(4-6)과정 : 작동유기매체가 응축기를 통과하면서 열을 방출하고 액체상태로 상변화하는 과정

(6-8)과정 : 액체상태의 작동유기매체가 펌프로 압축되는 과정

(8-9)과정 : 재생기에서 작동유기매체가 예열되는 과정

(9-1)과정 : 증발기에서 증발열을 공급받아 작동유기매체가 증발하여 증기상태로 되는 과정

이 사이클에서 응축기로 나가는 포화 작동유체의 온도 (T) 와, 펌프와 터빈의 효율 그리고 터빈 입구에서의 온도 (T), 압력 (P) 을 알면 기본적인 열역학에 의해 작동유체에서의 엔탈피를 구할 수 있으며 기본 사이클 성능은 다음과 같이 계산된다.

- 입열 : $Q_h = h_1 - h_9$
- 터빈출력 : $T_w = h_1 - h_2$
- 펌프동력 : $P_p = h_8 - h_6$
- 정미사이클출력 : $P_c = T_w - P_p$
- 사이클 효율 : $\eta_c = P_c / Q_h$

그림 2 는 유기랭킨사이클 시스템의 주요 구성도이다.

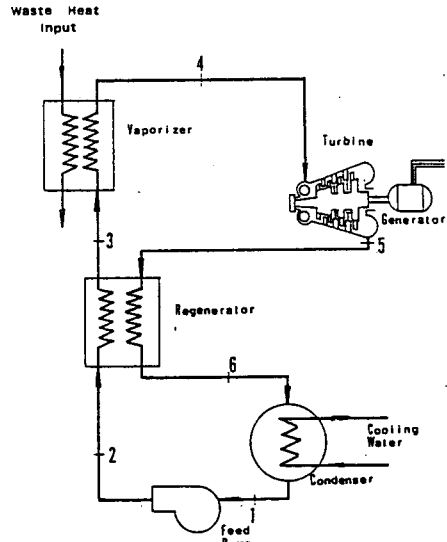


그림 2 유기랭킨시스템 구성도

2-2. 특 징

유기랭킨사이클은 증기랭킨사이클의 작동유체인 물보다 더 낮은 온도범위에서 증발과 응축이 일어나는 유기매체를 작동유체로 하여 구성되는 저온 열동력사이클이다.

그림 3 은 현재까지 개발되어 실용화 사용되고 있는 대표적인 각종 열동력 사이클에 대한 작동온도 범위를 나타내는 그림으로 현재 사용되는 열역학적 사이클 중에서 유기랭킨사이클이 가장 낮은 온도범위에서 작동되는 것을 알 수 있다.

저온 사이클로서의 유기랭킨사이클의 특징은 산업체에서 폐열회수만 아니라 오토, 디젤

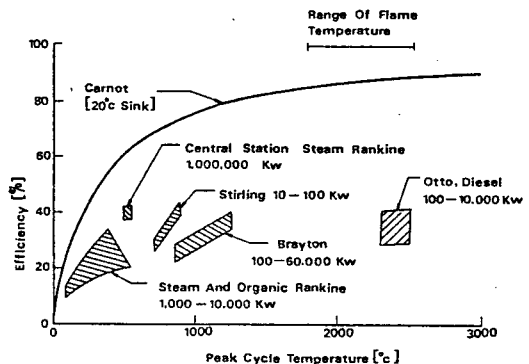


그림 3 Power cycle 의 종류 및 특징

사이클 및 브레이튼사이클 등의 고온열기관과 고저온 병합 운전을 가능하게 하여 기존 시스템의 에너지 변환효율을 증대시킨다.

그림 4는 고온 열기관인 디젤사이클의 배가스를 회수할 수 있는 유기랭킨사이클을 복합하여 고저온 병합운전을 통한 시스템의 효율 향상 특성을 예시한 것이다.

그림 4에서 디젤사이클의 변환효율은 총 15%가 증가함을 알 수 있다.

유기랭킨사이클 시스템을 이용한 폐열회수는 작동유기매체의 다양성으로 오토 디젤 및 브레이튼사이클 등의 고온 열기관 뿐만 아니라 이보다 저온의 열원을 폐열로 방출하는 일반 산업공정에서의 적용을 가능하게 하여 준다.

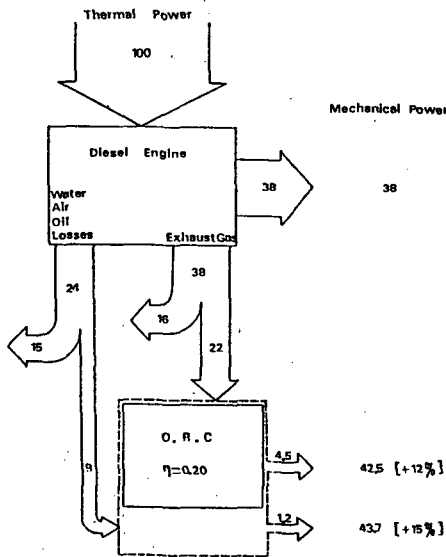


그림 4 유기랭킨사이클을 이용한 시스템 효율향상 특성도

이러한 유기랭킨사이클의 장점을 요약하면 다음과 같다.

1) 저온의 폐열원을 회수하여 증기랭킨사이클과 거의 동등한 효율로 증진의 타페열원 회수 방법(열-열)과는 달리 폐열을 이용하여 고급에너지인 전기 또는 기계적인 에너지로 변환가능하게 하는 효과적인 폐열회수 이

용 방법이다.

2) 작동유기매체의 적절한 선정에 따라 광범위한 온도 열낙차 범위에서의 고효율로 시스템의 운전이 가능하며 대부분의 산업폐열을 회수할 수 있다.

3) 고온 열기관과 병합하여 고저온 병합사이클을 구성하여 적용전보다 에너지의 변환효율을 크게 개선하게 시킬 수 있다.

4) 저온의 열원을 에너지원으로 하는 기관이기 때문에 기관의 신뢰성이 향상되고 유지관리 비용이 저렴하여 콤팩트설계가 가능하다.

3. 열역학적 해석

그림 1에 표시한 사이클의 1-2, 1-3과정은 작동유체가 팽창과정을 통해 터빈일을 하는 과정이다. 이때 팽창과정후 터빈 출구에서 작동유체의 물성치는 단열가역 과정인 3점의 경우 등엔트로피 관계를 이용하여 구할 수 있으며 실제 팽창후 상태 2점은 터빈의 단열효율을 고려하여 다음과 같이 구한다.

$$h_2 = h_1 - E_t (h_1 - h_3) \quad (1)$$

그림 1에서 2-4 및 8-9 과정을 팽창일을 마친 응축열을 회수하여 증발기에 유입되는 작동유체를 예열하는 재생과정으로서 열교환정도 (Effectiveness)는 고온유체의 온도변화를 이론적 최대온도 변화량으로 나눈 값으로 나타내며 다음과 같이 계산한다.

$$E_r = (T_2 - T_4) / (T_2 - T_8) \quad (2)$$

그림 1에서 2점과 8점에서 주어진 온도 T_2 , T_8 과 열교환기 설계시 주어지는 E_r 에 의해 식(2)로부터 4점에서의 온도 T_4 가 얻어지고, 이 T_4 값과 응축기압력을 이용하여 4점의 엔탈피와 엔트로피를 주어진 냉매방정식에 의해 구할 수 있다. 따라서 재생기 출구에서의 엔탈피는 다음과 같이 구해진다.

$$h_9 = h_8 + (h_2 - h_4) \quad (3)$$

그림 1에서 6-7 및 6-8 과정은 각각 가역과 비가역 펌프의 압축과정을 나타낸 것으로 가역과정시의 엔탈피 변화는 다음 식으로 주어진다.

$$h_7 = h_6 + v_6 (P_7 - P_6) \quad (4)$$

여기서 v_6 은 응축기 출구에서 작동유체의 비체적으로 액체상태이므로 거의 일정하다고 볼 수 있다. 비가역 과정시의 엔탈피 변화는 펌프의 단열효율 (E_p)을 고려하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h_8 = h_6 + (h_7 - h_6) / E_p \quad (5)$$

그림 1에서 5-6 및 10-11 과정은 각각 응축과 증발에 따른 상변화가 생기는 과정으로 각점의 물성치는 포화증기 상태의 냉매방정식과 clapeyron 방정식을 이용하여 계산한다. 이 과정에서 냉매방정식을 이용하여 구한 사이클 각점의 물성치는 작동유체 단위질량당의 값이므로 시스템의 출력이나 엑서지 효율 등을 구하기 위해서는 열원인 배가스 유량에 따른 작동유체의 양이 계산되어야 한다.

표 1. 각종 작동유기매체에 대한 특성

작 동 유 기 체	화 학 기 호	분자량	임 계 점 °C/Kpa	빙 점 °C	열안정한계 °C	40°C에서의 증기압, Kpa
R-11	CCl ₃ F	137	198/4413	-111	120	159
R-21	CHCl ₂ F	103	178/5102	-135		276
R-22	CHClF ₂	86	96/4978	-160	200	1455
R-113	C ₂ Cl ₃ F ₃	187	214/3441	-35	175	76
R-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	171	146/3261	-94	175	317
R-133a	C ₂ H ₂ ClF ₃	118	152/4068	-106	200	310
CP-9(a)	C ₁₅ H ₁₆	196	522/2448	-55	370	
CP-25(b)	C ₇ H ₈	92	321/4254	-95	480	7
CP-27(c)	C ₆ H ₅ Cl	113	359/4523	-55	320	7
CP-32(d)	C ₅ H ₅ N	79	347/5633	-95	370	7
CP-32/Water(e)	0.23 C ₅ H ₅ N 0.77 H ₂ O	33	366/8964	-18	400	14
CP-34(f)	C ₄ H ₄ S	84	307/5461	-40	290	21
FC-75(g)	C ₈ F ₁₆ O	416	227/1607	-62	320	7
FC-88(h)	C ₅ F ₂	288	150/2131	-115	200	140
F-85(i)	0.85 CF ₃ CH ₂ OH 0.15 H ₂ O	88	240/6412		290	21
Dowtherm A(j)	0.265 (C ₆ H ₅) ₂ 0.735 (C ₆ H ₅) ₂ O	166	499/3241	-48	370	
Biphenyl	(C ₆ H ₅) ₂	154	498/3289	69	370	
Allied p-1 D	C ₁₀ F ₂₂ O ₂	570	243/1186	-85	370	2

4. 작동유기매체

고온용 랭킨 사이클의 작동유체는 주로 물이 사용되지만 증발기의 작동온도가 낮을 때는 증기압이 높은 프레온 계통의 유기매체가 이용된다. 유기매체를 선택할 때는 종류가 매우 다양하므로 작동시스템과 유기매체의 정확한 특성을 파악하고 다음과 같은 사항에 유의하여 선택하여야 한다.

1) 시스템의 구성기기 초고압(증발과정)이나 초진공(응축과정)이 되지 않기 위하여, 사용온도 범위내에서 적절한 증기압을 유지할 것

2) 터빈 배관 등을 콤팩트하게 하기 위하여 작동유기매체의 밀도가 클것.

3) 증발기나 응축기의 크기를 줄이기 위해 열전도율이 클 것.

4) 사용온도 범위내에서 화학적인 안정을 가지며, 열분해가 일어나지 않을 것.

5) 낮은 인화성 또는 높은 점화온도일 것.

6) 구조재와 공존성이 양호할 것

7) 독성이나 위험성이 없을 것.

8) 구입이 쉽고 가격이 저렴할 것

표 1은 유기랭킨 사이클의 유기매체로 가장 많이 사용되는 작동유기매체에 대한 각종 특성을 나타낸 것이다.

불화수소탄화물 계열 (Fluorohydrocarbon) 인 R11, R12, R113, R114의 유기매체들은 약 200℃ 정도의 작동온도에서 매우 적합하며 또한 화학적 특성이나 사용상의 조건도 우수하여 안전하게 사용할 수 있다.

R11과 R114의 유기매체를 사용하면 150℃이하의 저온 범위에는 유기랭킨사이클의 효율을 극대화 할 수 있다.

R114는 다른 불화수소탄화물 계열의 유기매체에 비하여 비교적 열안정성과 압력 특성이 좋기 때문에 사용범위가 가장 광범위하다.

작동온도가 200℃ 이상이 되면 위에서 언급한 불화수소탄화물 계열의 유기작동매체의 사용은 불가능하며, 이 경우에는 열안정성이 더욱 높은 톨루엔, 프로리놀 85와 같은 유기매체를 사용하여야 한다. 프로리놀 85는 250℃를 넘는 온도에도 안정되어 열분해가 일어나지 않으나 매우 가격이 비싸다.

작동온도가 400℃가 넘으면 유기랭킨사이클의 작동유체로서 유기매체를 사용하는 것보다 물을 사용하는 것이 바람직하다.

5. 적용분야 및 응용

유기랭킨사이클은 저온동력사이클로서 일반 산업 제조공정에서 발생하는 폐열원을 회수하여 유효한 동력으로 변환하는 것이 가능할 뿐 아니라 대체에너지로서의 적용도 가능하며 적용가능 분야는 다음과 같다.

1) 각종 산업 제조공정이나 화력발전 등의 배가스, 폐증기, 폐열

2) 직접 구동식 히트펌프

3) 지열발전

4) 태양열 병합발전

5) 해양 온도차 발전

6) LNG 냉열발전

등이다.

5-1 폐열회수

폐열회수 유기랭킨사이클 시스템은 저온의 폐열을 회수하여 유효한 동력으로 변환시키는 시스템으로 산업체에서 소비되는 많은 양의 에너지를 회수하여 절약할 수 있다.

일본의 경우 1974년 이후 “선샤인(sunshine)” 계획에 의해 대체에너지 개발을 위한 연구가 시작되었으며 1977년 이후에는 문라이트(Moonlight) 계획에 따라 폐열회수 시스템으로 연구 개발되어 실용화시키고 있다.

그림 5는 200~400℃의 산업폐가스를 회수하여 동력을 얻기 위한 유기랭킨사이클 시스템의 회로도도 일본의 히다찌에서 개발된 시스템이다.

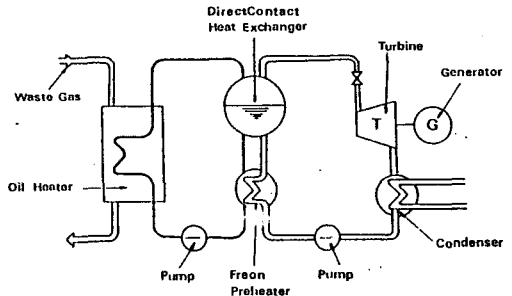


그림 5. 유기랭킨사이클 시스템 회로도

이 시스템은 두개의 열교환 회로를 이용한 직접 열교환방식을 채용하고 있는데 사용온도 범위가 다른 두개의 작동유체를 사용하므로 시스템의 안정성이 높고 열교환기의 전열효율이 좋아 전체적인 시스템의 효율이 높은 장점이 있다.

5-2 태양열발전

유기랭킨사이클의 적용분야에서 가장 많은 관심과 연구 개발이 되고 있는 분야의 하나

가 태양열 발전으로 이 시스템을 이용하여 태양열을 유효한 축동력으로 변화시켜 건물의 냉난방, 바닷물의 담수화 등에 이용할 수 있다.

이 연구는 주로 이스라엘의 올마프를 중심으로 이루어져 거의 실용화 단계에 이르고 있다. 일본에서는 선샤인 계획의 일환으로 기존의 스팀 터빈을 이용한 발전 연구가 진행되고 있다. 그림 6은 태양 연못(solar pond)을 이용한 유기랭킨사이클 발전 시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

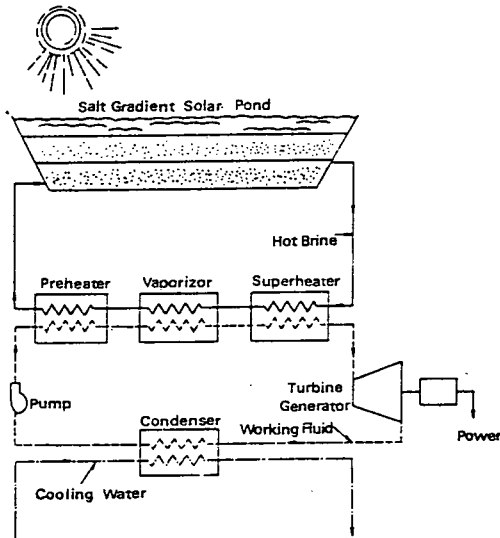


그림 6. 태양 연못을 이용한 발전시스템

5-3 지열발전

대부분의 지열발전소는 스팀 사이클을 사용하지만 저온인 경우와 염수인 경우에는 경제적인 이유로 유기랭킨 바이너리 사이클을 사용한다. 그림 7은 일본 도시바에서 제작, 건립한 1,000 kW급의 유기랭킨 지열발전 시스템이다.

5-4 해양 온도차 발전

해양열 발전을 위한 동력원은 열대와 아열대 지방에서 해양표면과 심해의 바닷물의 온도차를 이용하는 것이다. 해양온도차 발전시스템은 개방형과 밀폐형의 두가지로 분리될

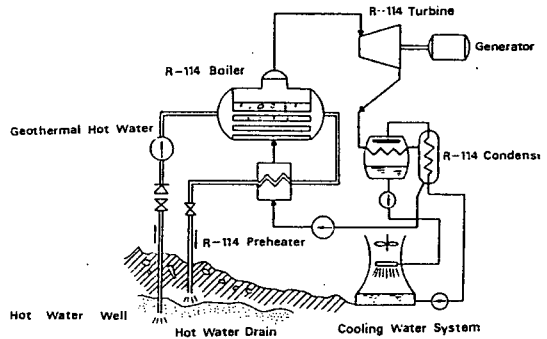


그림 7. 유기랭킨사이클을 이용한 지열발전 시스템

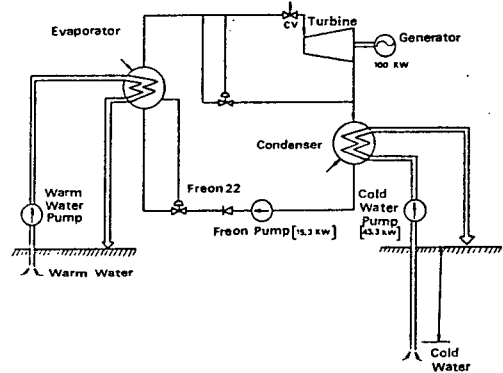


그림 8. 해양 온도차 발전시스템 개략도

수 있는데 개방형은 작동유체로 물을 사용하며, 밀폐형 시스템은 작동유체로 암모니아를 사용하는 유기랭킨사이클로 해양열 발전시스템의 주류를 이루고 있다. 그림 8은 일본 니후라에 설치된 100kW급의 유기랭킨사이클을 이용한 해양열 발전시스템의 개략도이다.

5-5 직접 구동식 히트펌프

공조용 히트펌프를 유기랭킨 사이클을 이용하여 구동하는 시스템으로 랭킨사이클에서의 터빈 출력을 이용하여 히트펌프의 압축기를 작동시키게 된다. 동력사이클과 히트펌프 사이클은 동일한 유기매체를 이용하며 이 시스템의 장점은 터빈과 압축기가 직결된 하나의 운동체만을 갖고 있어 베어링의 윤활구조 등이 간단하여 수명이 긴 점이다. 그림 9는 이 시스템의 개략도이다.

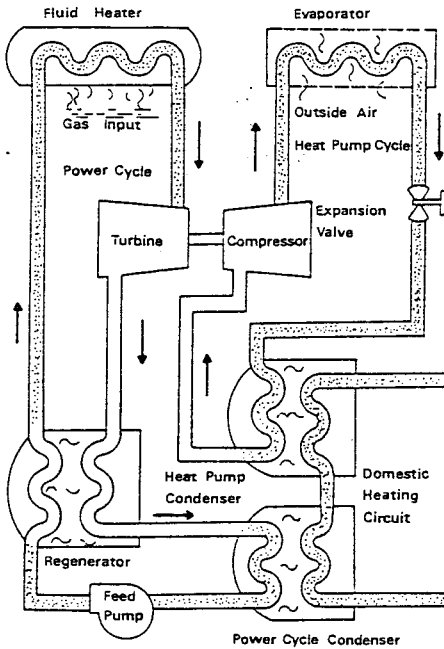


그림 9. 직가열식 히트펌프의 개략도

5. 맺 음 말

유기랭킨사이클 시스템은 중, 저온의 폐열원을 이용하여 높은 효율로 발전 또는 동력원을 회수할 수 있는 시스템으로 현장에서 배출되는 폐열원으로 발전을 하여 산업공정에 필요한 전력을 자체공급할 수 있어 에너지 사용량을 크게 줄일 수 있는 장점이 있으며 작동 유체유가 다양하므로 이것의 적정한 선정에 의하여 광범위한 온도범위에서 운전이 가능하며 대부분의 산업폐열을 회수할 수 있으므로

년간 폐열로 낭비되는 막대한 량의 에너지를 회수하여 산업체의 에너지 절약에 크게 기여할 것으로 기대된다. 또한 부존자원이 부족한 국내 실정으로 대체에너지로서의 적용도 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. Performance Characteristics of Organic Rankine Cycles, International Journal of Ambient Energy, Vol5, No.1, pp.3-12, 1984.
2. Overview of International R&D Programs on ORC Systems, 17th IECEC, CHI 789-7/82/0000-2130, 1982.
3. D.A. Reay, Industrial Energy Conservation, Pergamon Press, Oxford, 1977.
4. V.R. Degner, Correct working Fluid Markes Organic Rankine Cycle Work, SAE Journal, June 1970.
5. G. Angeline and V. Moroni, Perspectives for Waste Heat Recovery by Means of Organic Fluid Cycle, Journal of Engineering for Power April, 1973.
6. 一色尙次 外, 廢熱回收利用システム 實務便覽, 1984.
7. 瀬賀 桔二, フロンターゼンシステムによる排熱回收, 排熱機器の開発・設計と排熱利用技術, 總合技術センター, 東京, pp. 117 ~ 139. 1984.