

자동차 배열회수시스템 기술개발 동향 Trend of Waste Exhaust Heat Recuperation Systems for Vehicles

김 규 성
K. S. Kim

1. 서 론

지구 온실가스 저감과 에너지 보전을 위한 저탄소 소비 사회를 이루어 내기 위해 CO₂ 배출저감기술에 대한 전 세계의 의식변화와 요구는 더욱 높아지고 있다. 이러한 CO₂ 저감에 대한 의식변화를 바탕으로 세계 각국은 CO₂ 배출저감 목표와 자동차 CO₂ 배출규제(연비규제)설정하고 있다. 일본의 자동차 연비규제는 2015년부터 일본국내에 판매되는 신차의 평균연비를 JC08모드연비로 16.8km/L(10·15모드연비로 18.5km/h에 해당)로 하는 규제시행이 예정되어 있다¹⁾. 이는 2004년 실적 평균연비치인 13.8km/L보다 23.5%향상을 요구한다. 또한 주행실험모드는 지금까지 10·15모드보다 실제주행에 근사한 JC08모드로 변경된다. JC08모드는 10·15모드보다 연비가 약 10%정도 저하되는 것으로 알려져 있다. 유럽은 2012년부터 CO₂ 배출량을 130g/km(가솔린으로 환산한 경우 약 18.2km/L 해당)정하고 있다¹⁾. 유럽의 연비규제는 2012년부터 2015년까지 연비규제통과 자동차 비율을 단계적으로 높여가는 유예조치를 두고 있다¹⁾. 이러한 세계 각국의 연비규제를 통과하기 위해서는 상당한 연비향상이 필요하다는 것을 알 수 있다. 따라서 세계 각국 자동차업계는 이러한 인식의 변화와 강화되는 연비규제에 대응하기 위해 기술개발에 많은 투자를 하고 있다. 현재의 연비향상기술은 엔진열 효율향상, 차량주행시의 손실저감방법 등이 있으나, 이러한 기존의 기술개발 접근법은 점점 한계에 도달하고 있다. 그래서 기존의 연비저감 기술방법 외에, 엔진에 도입된 연료중 약 60%가 대기로 방출되어 소모돼 버리고 마는 배열을 이용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 따라서 상용화가 이루어지면 상당한 연비향상이 기대되는 현재 세계 자동차업계의 배열회수기술을 소개하고자 한다.

2. 엔진 히트밸런스 및 배열회수 방법

엔진에 공급한 연료 가운데 동력으로 바뀌는 에

너지와 손실되는 에너지를 나타낸 히트밸런스의 내역과 엔진 배출 에너지를 회수하여 이용하는 방법을 Fig. 1에 나타내었다. 열은 자동차 주행중 여러 부분으로 소모된다. 연료를 연소시켜 발생하는 에너지 중에서 실제 동력으로 이용되는 것은 약 20%~40%정도에 지나지 않는다. 그 외에 나머지 열은 배출가스손실로 약 30%와 냉각손실로 약 30%로 배출되는 에너지는 촉매활성화와 난방으로 이용되는 것 이외에는 대부분 대기로 방출되어 우리 생활환경을 데우고 있다. 이렇게 배출되어 소모되어 버리고 마는 열을 이용하는 기술이 다양하게 연구되고 있다.

자동차에서 열의 수요는 엔진시동에서 워밍업까지는 많은 열의 수요가 있으나 이 기간 동안은 배출되는 열에너지의 열량은 적다. 그러나 배열량이 큰 고부하 영역에서는 열의 수요가 거의 없다. 역으로 냉각이 필요로 한다. 즉 자동차 시스템에서는 열의 수요와 공급은 시간적으로 상반관계에 있다. 배열을 이용하는 기술은 배출되는 열을 실시간으로 열로 회수하여 이용하는 방법과 배열을 일정시간 축열시켜 필요한 시기에 이용하는 방법이 있다. 그리고, 배열을 전기나 동력으로 변환시켜 이용하는 방법이 있다. Table 1에 각각의 배열회수기술의 특징을 나타내고 있다. 배열회수기는 차량에 도입되어 상용화되어 있다. 이 시스템은 높은 효율이 장점이나, 실시간으로 열을 회수하므로 차량 운행 중에 사용할 수 있는 부하 영역이 제한되어 있다. 랭킨 사이클은 배열을 전기 또는 동력으로 변환시키는 시스템으로 가장 실용화에 근접한 시스템이다. 열전변환시스템은 저온의 배열에서도 발전이 가능하고, 소형경량화가 가능하며, 수명길기 때문에 내구성이 높은 등 있 점이 많으나, 아직 낮은 변환효율과 매우 높은 코스트비용이 큰 과제이다. 스테어링엔진은 다양한 열원으로 이용이 가능하고 내연기관과 같이 시스템 내에서 연소를 하지 않기 때문에 유해한 배출물을 배출하지 않는 저공해 엔진이다. 그러나 시스템에 비해 매우 낮은 효율이 과제이다. 이러한 엔진의 배열회수 시스템은 낮은효율, 별도의 시스템발생, 시스템

부품 성능향상, 높은 코스트 비용 등 시스템 상용화에는 아직 많은 과제가 남아 있다.

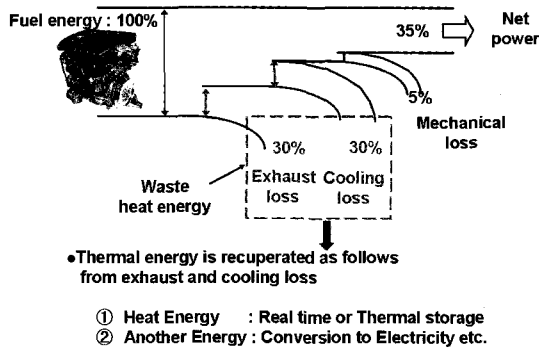


Fig. 1 Concept of waste heat recuperation¹⁾

Table 1 Comparison of waste heat recuperation system^{1-3,7)}

	배열 회수기	랭킨 사이클	열전변환	스터링 엔진
시스템 그림				
에너지원	배출가스 냉각수	배출가스 냉각수	배출가스	배출가스 냉각수
에너지 변환	열 ↓ 열	열 ↓ 전기 동력	열 ↓ 전기	열 ↓ 전기 동력
사용가능 배출온도	저온~ 고온	저온~ 고온	고온	저온~ 고온
효율%	높음 (80~90%)	낮음 (10~30%)	낮음 (10%)	매우낮음 (5~10%)
기술과제	상용화 단계	높은 코스트	매우 높은 코스트	낮은 열회수 효율

3. 엔진 배열 회수시스템 기술

3.1 배열회수기(Heat collector)

엔진에서의 배출되는 열을 그대로 회수하여 이용하는 가장 간단한 배열회수시스템이다. 현재 실용화된 이 시스템의 주목적은 엔진 워밍업시간 단축과 자동차 난방소비전력 저감으로 인한 연비향상이다. Fig. 2는 토요타(TOYOTA)의 하이브리드 자동차(HEV)인 에스타마(ESTIMA)에 장착된 “배열재순환시스템”로 불리는 배열회수기이다. 엔진 배기관의 촉매장치 뒤에 배열회수기를 설치하여 배열을 냉각수에 전달하는 방식이다. 촉매장치 앞에 설치할

경우 배기온도가 저하되어 유해 엔진 배출물을 증가시킬 가능성이 있어 촉매장치 뒤에 설치하였다. 배열 경로 제어는 액츄에이트 설치하여 사용한다. 엔진 워밍업과 차량 실내 난방이 필요한 경우 액츄에이트 밸브를 닫고, 엔진냉각수와 열교환 한다. 엔진 워밍업이 완료되면 밸브를 열어 배출가스를 대기 방출되는 구조이다. 즉, 자동차 워밍업시간을 단축시켜 가능한 빠른시간에 하이브리드의 전기운전(EV)이 가능한 조건으로 만든다. 또한, 전기운전과 정지상태에서 실내난방을 위해 엔진을 가동할 필요가 없어지게 된다. 이로 인해 겨울철 연비가 6%향상되었다^{1,2)}.

배열재순환시스템의 배열회수기 구조를 Fig. 3에 나타낸다. 3중관 구조로 되어 배기가스 바이패스 경로인 가장 안쪽 파이프, 열교환용 배출가스 경로인 파도형상의 중간 파이프 그리고 냉각수 경로인 가장 바깥쪽 파이프로 구성되어 있다. 배열회수기 작동은 엔진시동 후 배열회수기 선단부의 밸브가 닫히게 되고, 냉각수 경로에 배출가스가 통과하여 냉각수에 열을 전달한다. 냉각수가 설정온도에 도달하게 되면 밸브가 열리게 되고 통상의 배기가스가 가장 안쪽 바이패스 경로로 배출되게 된다. Fig. 4는 외부온도 5℃, 콜드 스타트, 난방 조건에서의 배열재순환 시스템유무에 따른 주행시 난방효과를 나타낸 것이다. 배열재 순환 시스템을 설치한 경우 300초 이후부터 차이가 나기 시작해서 히터 난방풍 온도가 50℃까지 상승하기까지 시간이 약 1/2로 단축되는 결과를 나타낸다. 또한 엔진 냉각수온도는 500초 전후에서 60℃를 초과하고 있어 워밍업시간이 단축되는 결과를 알 수 있다. 이 결과로 엔진 워밍업시간 단축과 히터성능 향상결과로 하이브리드자동차 겨울철 운행할 경우 약 8% 향상되었다²⁾. 가솔린과 디젤엔진의 경우 워밍업 시간 단축으로 약 3~4% 향상을 예측하고 있다²⁾.

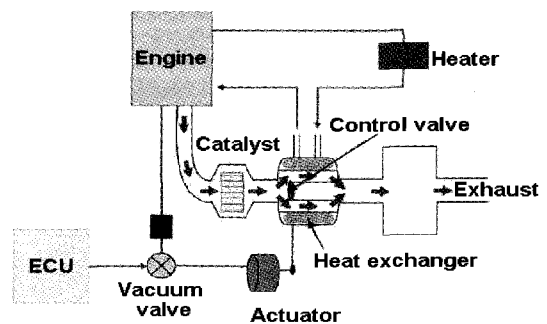


Fig. 2 Exhaust heat recirculation system of Toyota¹⁾

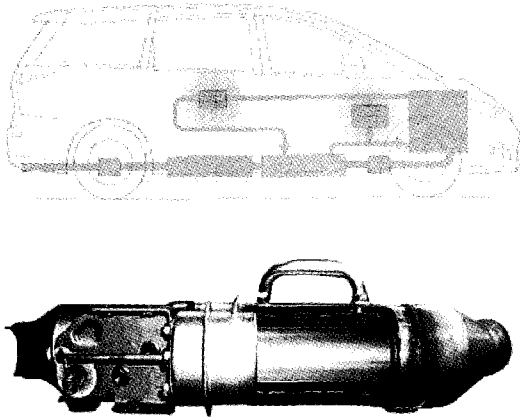


Fig. 3 Heat collector of Toyota¹⁾

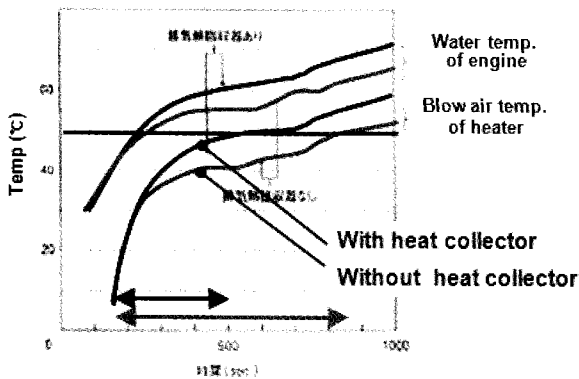


Fig. 4 Effect of heating of heat collector system²⁾

3.2 랭킨사이클(Rankine cycle)

랭킨 사이클은 열을 열 그대로 이용하지 않고, 동력 또는 전기로 변환하여 이용하는 사이클이다. Fig. 5는 랭킨사이클 시스템 구성을 나타낸다. 사이클은 열교환기, 익스팬드, 제네레이터, 콘덴스, 펌프로 이루어진다. 이 사이클은 배열로 가열하여 발생하는 고온고압증기를 터빈을 회전시켜 발생하는 운동에너지를 발전기 통해 전기에너지로 변환 하여 이용한다, 또는 운동에너지를 엔진 축동력으로 사용 가능하다.

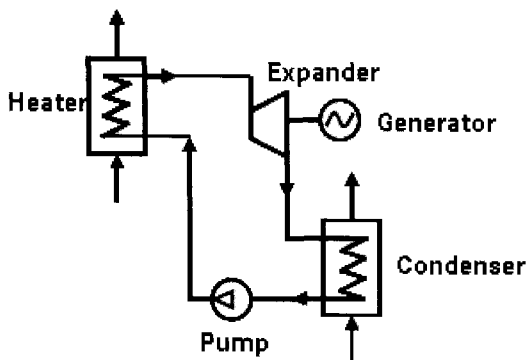


Fig. 5 Rankine cycle system diagram

자동차 엔진용 랭킨사이클시스템은 고온의 배열과 저온의 냉각수열인 2종류의 배출에너지 회수가 가능하다. 이 경우 고온용 배열경로와 저온용 냉각수 경로 2가지 경로가 필요하게 된다. 자동차용 랭킨사이클은 엔진의 워밍업 이후 또는 어느 정도 안정된 엔진의 고부하 조건에서 효율이 높다. 과제로서는 배열 회수 효율은 높으나 기존의 엔진 시스템에 랭킨 사이클 시스템을 추가해야 하므로 엔진 시스템이 커질 수 있다. 또한 랭킨사이클의 부품의 성능향상과 코스트 상승이 과제이다.

혼다(HONDA)는 랭킨사이클 시스템을 도입한 차량주행실험 결과를 2006년에 발표하였다³⁾. Fig. 6에 랭킨 사이클 시스템이 도입된 혼다 하이브리드 자동차(HEV)를 나타낸다. 이 시스템은 배열을 회수하여 전기로 변화시키는 방식이다. 하이브리드가 감속 운전시 감속에너지에서 발생하는 배열에서 회수한 열을 전기에너지로 재생하여 배터리에 저장하여 모터를 작동시키는 구조로 되어있다. Fig. 7은 하이브리드 자동차(HEV)에 도입된 랭킨사이클 시스템을 나타낸다. 이 시스템 특징은 엔진배기관 하류에 설치된 열교환기는 촉매컨버트와 익스팬드를 일원화 해서 배열 뿐만아니라 촉매반응열도 이용 가능하도록 한 구조이다. 고압급수 유니트에서 증발기에 보내진 냉각수는 고압증기가 되어 제네레이터와 일원화된 익스팬드에 보내진다. 익스팬드는 적은 유량에서 출력이 가능한 특징을 가진 경사축피스톤방식을 채용하고 있다. 전기 생산이 끝나고 나면 냉각수는 차량 앞부분에 병렬로 배치되어 있는 콘덴서로 보내진다. 또한 랭킨사이클 시스템의 전 부품이 엔진 룸 내부에 장착이 가능하도록 콤팩트하게 시스템이 설계되어 있다.

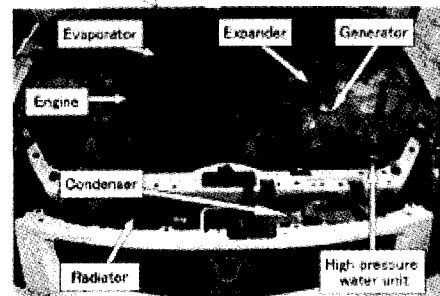
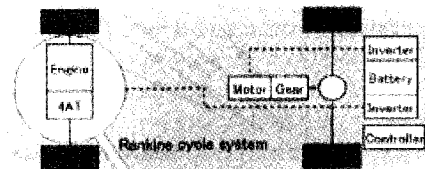


Fig. 6 Layout of Rankine cycle system for HEV³⁾

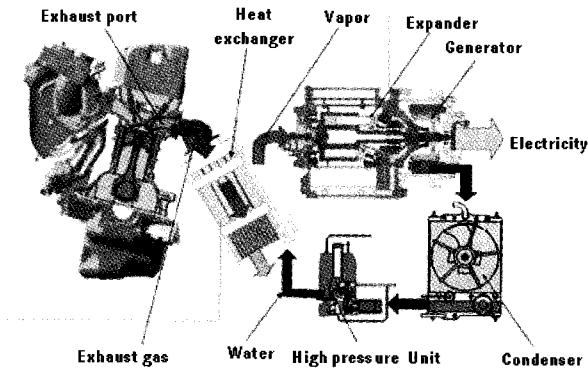


Fig. 7 Overview of Rankine cycle system of HONDA³⁾

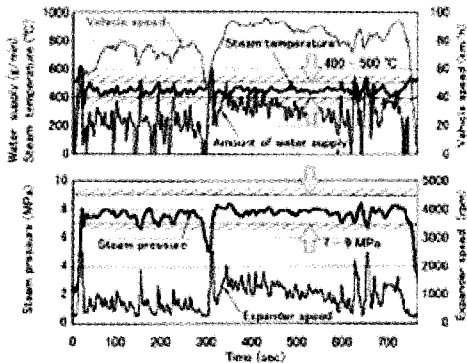


Fig. 8 Test result of highway mode running³⁾

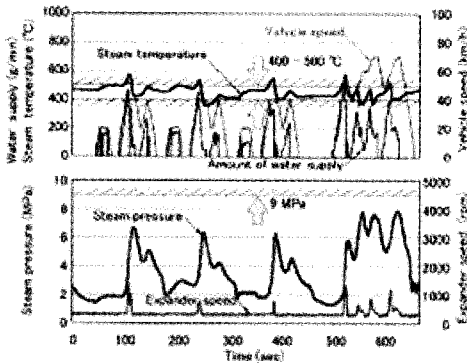


Fig. 9 Test result of highway mode running³⁾

Fig. 8과 Fig. 9는 고속도로 모드와 10·15모드에서의 주행시험결과를 나타내고 있다. Fig. 8의 고속도로모드에서는 응축압력과 온도는 0.1MPa, 100℃, 증기압력과 온도는 7~9MPa, 400℃~500℃, 범위에 제어되고 있다. Fig. 9의 10·15모드에서는 증기온도가 400℃~500℃ 범위에서 제어되고 있다. Fig. 9의 10·15모드는 엔진부하가 적기 때문에 증기유량이 적고 증기압력은 7~9MPa 범위에 도달하지 않는다. 이 결과는 스타트와 스톱이 반복되는 시내 운전조건에서는 동시에 적절한 증기온도와 압력이 얻는 것이 어렵다는 것을 알 수 있다. 따라서 과도 운전조건에서의 랭킨 사이클 시스템 향상이 과제이다

다. Fig. 10은 100km/h(엔진출력19.2kw, 에어컨 가동)조건에서 주행시 에너지 분석결과를 나타낸다. 익스팬드 출력 2.5kW의 배열에너지 회수가 가능했다. 엔진 열효율은 28.9%에서 32.7%로 향상되었다³⁾. 이 랭킨사이클 시스템의 과제는 익스팬드의 증기생성량향상, 팽창기효율향상, 그리고 마찰손실, 열손실저감 등이 과제이다³⁾.

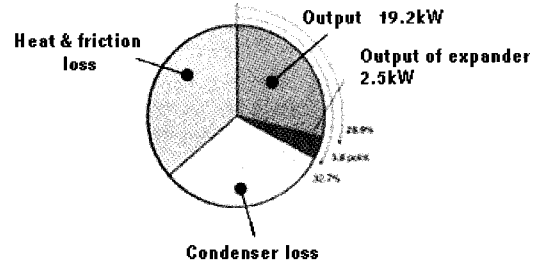


Fig. 10 Energy analysis at load 100km/h³⁾

Fig 11은 BMW가 2015년 생산목표로 개발중인 승용차용 랭킨사이클 시스템으로 터보스티머 (TURBO-STEAMER)로 불린다. 이 시스템은 회수된 에너지를 축동력으로 사용하여 연비 15% 향상되었다. 제네레이터 동력/토크는 10kW/20N·m이다¹⁾. 실제 상용화를 위해서는 시스템의 콤팩트화가 필요하다¹⁾. 그 외 기본구조는 위와 동일한 시스템으로 CUMMINS⁴⁾, AVL^{5,6)} 도 연비향상을 위한 자동차용 랭킨사이클 시스템을 개발중이다. AVL는 디젤 엔진에서 인터쿨러, EGR 쿨러의 배열을 이용한 랭킨시스템이다. 엔진실험결과 엔진출력 20% 향상되었다^{5, 6)}.

- High temp. cycle
- Low temp. cycle
- Water cooling cycle

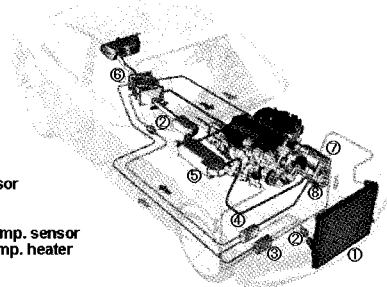


Fig. 11 Rankine cycle system of BMW¹⁾

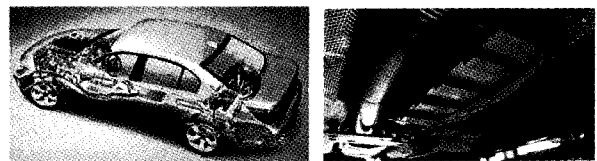


Fig. 12 Thermoelectric generator of BMW¹⁾

3.3 열전변환(Thermoelectric conversion)

배기열을 물질의 지백효과를 이용한 열전변환소자를 사용하여 전기로 변환시키는 시스템이다. 열전변환시스템은 수명이 길고, 소경량화와 다양한 형상이 가능이 가능하며, 응답성이 좋은 장점이 있다. BMW의 열전변환시스템을 Fig. 12에 나타낸다. 개발목표를 고속주행시 최대 1kW, 시가지 주행시 최대 500W, 전기변환효율 12%, 중량 약 454g이하, 코스트 1달러/W로 설정하고 열전변환시스템을 부착한 차량으로 2006년 주행테스트를 실시했다. 이 시스템은 배기관외의 촉매 후단에 열전변환모듈을 설치하여 밸브에 의해 배열의 열전변환시스템을 통과하는 통과량을 제어되어 구조이다. 시뮬레이션 평가결과 연비는 약 8% 향상되었다¹⁾. Fig. 13은 제네럴일렉트릭(GE)과 공동으로 개발한 제네럴모터스(GM)의 열전변환 소자와 실험모형을 나타내고 있다. 이 시스템은 배기와 라디에이터 경로에 열전변환 시스템을 부착한 경우다. 라디에이터 경로인 냉각수측 온도는 배기열 온도보다 낮아 효율이 저하된다. 실험결과 평균 350W, 최대 914W 출력을 나타냈다. 평균 350W출력은 고속도로와 시가지주행으로 약 3% 연비향상에 해당한다¹⁾. 목표는 2009년 주행테스트 반복을 통해, 3년 내 제품화를 목표로 하고 있다¹⁾.

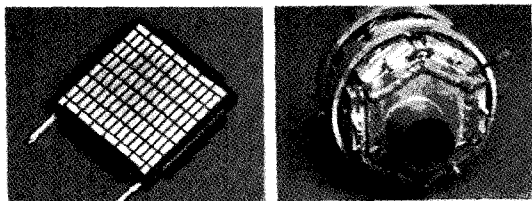


Fig. 13 Thermoelectric generator module and system model of GM¹⁾

3.4 스텔링 엔진(Stirling engine)

Fig. 14는 스텔링엔진의 기본구조를 나타낸다. 스텔링 엔진의 구성은 외부 에너지로 실린더를 가열해 피스톤을 팽창시키는 고온부와 냉각에 의해 압축시키는 저온부의 실린더와 피스톤, 그리고 고온과 저온을 열교환시키는 열교환기, 동력이 전달되는 크랭크 샤프트, 후라이 호일 구성되어 있다.

Fig. 15는 일본 해상기술안전연구소와 e스타(주)가 공동으로 스텔링엔진을 이용해 항만내의 환경오염방지를 위한 선박용 배열 회수시스템이다. 이 시스템은 선박이 운항중 디젤엔진의 배기열을 회수하

여 전기상태로 축적해두는 방식이다. 항만내 정지중에는 축적한 전기에너지를 이용함으로써 전기 사용을 위해 디젤엔진 운전이 필요 없게 된다. 이 시스템은 스텔링엔진, 열전발전소자, 흡수식 히트펌프로 구성된다. 스텔링엔진의 특징은 저온에서 고온의 넓은 온도범위에서 이용이 가능하다. 이 개발은 스텔링엔진시스템을 탑재는 500톤 정도의 비교적 작은 화물운반선을 대상으로 하여 정박시에 필요한 선내 축적전력량은 100kW로 설정했다. 따라서, 선박운항시간을 2일간(약 50시간)을 가정해서 발전출력 2kW의 소형발전 시스템 구축을 최종 목표로 설정했다. 운행결과 최대 발전량 897W, 엔진효율 3.3% (스텔링엔진의 도입열량에 대한 총발전량비율)향상되었다. 그러나 목표 발전량 2kW는 달성하지 못했다^{1),7)}.

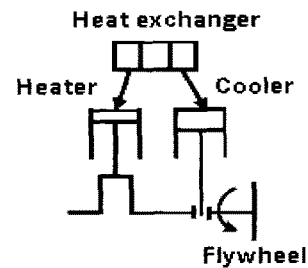


Fig. 14 Stirling engine diagram

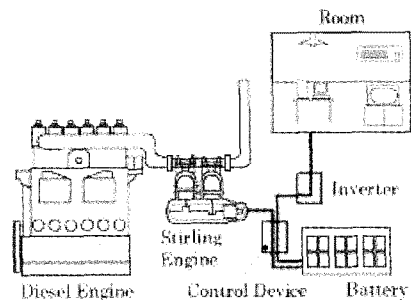


Fig. 15 Heat recuperation system for ship⁷⁾

4. 결 언

자동차 연비향상 관점에서 열에너지 매니지먼트는 아주 중요한 과제이다. 저탄소 소비사회 구현과 자동차 연비경쟁이 더욱 치열해지고 있는 현재의 시장요구에 대응하기 위해서는 비약적인 연비향상 기술기업의 필수기술이다. 따라서 기존의 연비향상 기술을 발전시켜 나가면서 여기에 더해 연비향상위 한 새로운 사고의 기술접근방법이 필요하다고 생각된다. 그러므로 이번에 소개한 배열회수기술은 멀지

않은 미래에 상당한 연비향상을 기대할 수 있는 아주 유망한 기술이라 생각된다.

참고 문헌

1. Motor Fan., 2009, "Thermal Energy Conversion Technology", Motor Fan illustrated, Vol. 28, Issue 11, pp. 34~59(in Japanese).
2. Nakagawa, T. et al., 2007, "Exhaust Heat Recirculation System for Actual Fuel Economy", Journal of society of Automotive Engineers of Japan , Vol. 61, No. 7, pp. 49~54(in Japanese).
3. Ibraki, S. et al., 2006, "Research of a Rankine Cycle On-Board Heat Waste Recovery System", Proceedings No. 92-06 of Academic Meeting of the Society of Automotive Engineers of Japan, Inc(in Japanese).
4. Nelson, C., 2005, "High Engine Efficiency at 2010 Emission", Directions in Engine Efficiency and Emission Research (DEER) Conference.
5. Ho, T. et al., 2007, "Waste Heat Recovery of Heavy-Duty Diesel Engines by Organic Rankine Cycle Part I: Hybrid Energy System of Diesel and Rankine Engines", SAE paper, No. 2007-01-0537.
6. Ho, T. et al., 2007, "Waste Heat Recovery of Heavy-Duty Diesel Engines by Organic Rankine Cycle Part II: Working Fluids for WHR-ORC", SAE paper, No. 2007-01-0543.
7. Hirata, K. et al., 2005, "Waste Heat Recovery System with Stirling Engine Generator for Ship", JSME Symposium(in Japanese).

[저자 소개]

김규성

E-mail : kskimcosy@gmail.com

Tel : 81-80-5209-306

미쓰비시 후소 트럭버스(주) 어드밴스 엔지니어링부