대형 하이브리드 트럭용 열전 무시동 공조시스템 성능 연구

박 경 민[†]

(재)전북자동차기술원 사업기획팀

Performance of Non-starting Conditioning System using Thermoelectric Modules for Hybrid Heavy Trucks

Kyungmin Park[†]

Project Planning Team, Jeonbuk Institute of Automotive Technology, 1641-4, Soryong-dong,
Gunsan-si, Jeollabuk-do 573-879, Korea

(Received June 11, 2013 ; Revised August 20, 2013 ; Accepted August 25, 2013)

Abstract – To reduce vehicle fuel consumption due to not only driving but also air conditioning, battery-operated non-starting conditioning systems with thermoelectric modules and without mechanical elements like compressors are being manufactured for use by hybrid heavy trucks in the near future. In this study, the voltage and current consumed by a thermoelectric module were measured to determine the required battery power, and the performance of the conditioning system with air temperature, and humidity of the inlet/outlet modules and inside/outside the cabin for a truck, was evaluated using experimental apparatus under actual conditions. The results showed that, the thermoelectric module can be continuously operated for about 1.5 h using existing 24 V batteries. The coefficient of performance(COP) of the cooling and heating modes was calculated to be an average 0.8-1.32. As expected, the heating performance was 30% more efficient than the cooling performance, which is general characteristic of thermoelectric modules.

Keywords – thermoelectric module(열전모듈), non-starting(무시동), conditioning system(공조시스템), battery(배터리), C-O-P(냉난방 효율계수), hybrid(하이브리드), heavy truck(대형트럭)

1. 서 론

최근 배기규제는 물론 전 세계적으로 연비규제가 심화됨에 따라 1990년대 중반부터 일본 토요타 프리우스부터 본격적으로 시작된 하이브리드 자동차는 상용차까지 확대되어 기존 차량보다 많아진 전력을 활용한 시스템의 적용이 확대되고 있다. 대형 상용트럭의 경우는 장거리 운행을 요구하는 특성에 따라 운전자가 고속도로 휴게소나 기타 휴식 주차공간을 이용하여 운전 피로해소를 위한 휴식을 취하거나, 수면을 취하는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 또한, 작업 진행에 따라 공사현장에서 차량 대기를 하는 경우도 많기 때문에 여름철

이든 겨울철이든 운전자는 실내 공조시스템을 가동함으로써 쾌적한 실내 환경을 유지하는 것이 일반적이다.

보통 차량 공조시스템의 구동력은 엔진으로부터 인출하고 있어서 앞선 사례와 같이 실제 차량 구동이 불필요한 상황에서 단지 공조시스템의 작동을 위해 엔진을 공회전하게 되어 연료소모로 연비가 나빠지고, 배기가스로 인한 환경오염도 발생되고 있어 많은 연구가 진행 중이다[1].

이런 문제를 해결하기 위해 전 세계적으로 공회전이 5분간 지속되면 자동으로 엔진이 정지되는 시스템 장착이 의무화되고 있거나, 무시동 실내 난방을 위해 소량의 연료를 이용한 독립형 난방장치가 이미 유럽에서 개발되어 장착되고 있으며, 냉방장치로는 컴프레서를 활용한 냉매 압축식 장치나 가정용 에어컨디셔너를 개조

[†]Corresponding author : kmpark@jjat.re.kr

하여 차량에 장착되는 등 다양한 냉매를 활용한 성능 예측연구도 진행중이나 냉매로 인한 오존층 파괴문제는 여전히 내재하고 있다[2]. 또한, 아직 상용화는 되지 않았으나, 열전소자를 이용한 냉난방 시스템에 대한 연구도 연구되고 있다[3, 4].

본 연구에서는 펠티어효과를 활용한 열전소자를 무시동 냉난방 기능의 공조시스템에 적용을 위해 개발 중인 시제품에 대한 다양한 특성 시험을 수행하며, 하이브리드 트럭에 적용 가능성을 확인하기 위해 열전모듈의 부하조건별 전력소비 특성과 개발 공조시스템의 냉난방 효율특성, 공조시스템의 차량 장착에 필요한 진동내구 특성에 대한 시험을 수행하여 대형 하이브리드 트럭용 공조시스템으로써 적용 가능성을 검증하고자 하였다.

2. 무시동 열전 공조시스템 개요

일반적인 차량용 공조시스템을 Fig. 1에서와 같이 냉매의 상변화에 따른 주변에 흡열 또는 방열 특성 활용하여 압축기와 팽창밸브 등의 기계적인 요소부품이 필요한 반면, 무시동 열전 공조시스템은 배터리에 저장된 전력을 에너지원으로 하여 별도 동력원없이 중대형 상용트럭에서 요구하는 냉난방 용량에 맞도록 열전모듈시스템과 냉각기만 이용하여 별도 시동없이 차량 내 냉난방을 담당하는 새로운 공조시스템이다.

Fig. 2는 열전소자의 펠티어효과를 보여주는 그림으로, P형, N형 반도체로 구성된 열전소자에 직류전압을 인가시 일측에는 발열이 되고, 타측에서는 흡열이 되는 펠티어효과를 이용한다[5]. 열전소자는 미사일이나 우주선의 전자회로 냉각을 목적으로 주로 연구개발되어 왔으나, 1980년 이후 상용 열전모듈이 시판되면서

Fig. 1. General refrigerant type conditioning system.

Fig. 2. Feltier effect of thermo electric element.

Fig. 3. Concept diagram of thermo electric condition system.

냉정수기, 냉온장고, 가전장치 및 통신장치, LED 등의 냉각부품 등에 적용되고 있다. 그러나 아직 효율이 낮아 이를 해결하기 위한 연구가 계속적으로 진행되고 있다[6, 7].

무시동 열전 공조시스템은 앞서 설명한 냉매 순환형과 달리 배터리와 송풍기 일체 열전모듈, 냉각기만으로 구성되고, 그 시스템 개념도는 Fig. 3에 나타내었다.

본 연구에서는 고용량 배터리가 적용되는 하이브리드 시스템 적용에 앞서 기존 배터리의 조합과 기존 장치를 이용하도록 구성하였다. 주요 구성으로는 엔진의 시동과 발전을 담당하는 알터네이터와 냉각팬, 시스템 본체, 외부로부터 순환공기의 유입구, 실내로 유입되는 냉난방 공기의 출구부, 제어공급전원, 주요부 냉각수관으로 구성되어 있다. 특히, 본 대상 시스템의 에너지원인 전력인 배터리는 하이브리드 트럭에 적용 전에 기존 24V의 주배터리와 보조 배터리를 별도 장착하여 연구를 진행하였다. 전체 시스템의 주요 부품과 차량에 조립 형상을 Fig. 4에 나타내었다.

보통 공조시스템의 냉난방 효율을 계산하기 위해서 유체의 밀도, 입출구의 온도, 습도, 이동유량 등을 알아야하며, 열교환량(Q)의 계산식은 식 (1)과 같다.

Fig. 4. Components and assembly of non-starting thermoelectric conditioning system.

$$Q = G(h_2 - h_1) \quad (1)$$

여기서 G 는 송풍유량으로 공기의 밀도와 풍량의 곱을 나타낼 수 있다. 또한, 엔탈피 h 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$h = (C_{pa} \cdot T) + (\nu + C_{pv} \cdot T) \cdot a \quad (2)$$

여기서 C_{pa} 는 공기의 정압비열로 $0.24 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$, ν 는 물 0°C 의 증발잠열로 597.5 kcal/kg , C_{pv} 는 수증기의 정압비열로 $0.441 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ 이며, a 는 절대습도로서 상대습도와 포화수증기압력의 곱으로 구할 수 있다. 본 계산식을 통해 구한 열교환량은 소비전력과 비교를 통해 대상 공조시스템의 성능 계산에 활용하였다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 시험장치

Fig. 5는 본 연구에서 열전 무시동 공조시스템의 부하시험 및 냉난방 효율특성을 위한 시험장치를 나타내고 있다. 전체적으로 시스템 구동을 위한 전기모터, 알터네이터, 인버터를 비롯하여, 에너지원인 배터리, 냉각장치인 라디에이터와 워터펌프, 열전모듈, 시험조작 제어장치 등으로 구성되어 있다. 주요 시험구성품에 대한 주요 사양은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 5. Test apparatus of non-starting thermoelectric conditioning system.

Table 1. Specifications of test devices

Components	Specifications
Truck cap	Tata Daewoo, Nobus
Thermo electric module	Voltage: DC 24V Current: 3.0~3.5A×42EA
Electric Motor	24PS, 4P 380V
Alternator	24V, 180A
Inverter	LS SV-iS7
Battery	Lead-acid. 12V 150A×4EA 12V 230Ah×2EA
Water pump	PMP-450S, DC 24V

Fig. 6. Thermo electric module.

엔진 대신으로 적용한 전기모터는 24PS AC 380V의 전원으로 알터네이터를 구동하고, 이때 생성된 전력은 배터리에 저장되고, 다시 배터리 전압이 열전모듈에 인가되어 펠티어효과로 냉난방 기능을 수행한다. 각 주요부분의 전압, 전류, 온도 등을 NI System을 통해 실시간으로 계측하였으며, 주로 배터리의 충전전 시간, 전압, 전류, 공조시스템 입출구 온도, 압력, 풍속 변화 등을 측정하였다. Fig. 6은 열전모듈을 이용한 공조시스템의 시제품 모습을 보여주고 있다.

Fig. 7. Measure circuit of voltage and current.

3-1-1. 열전모듈 부하시험

Fig. 7은 열전모듈의 소비 전압과 전류를 측정하기 위한 회로도를 나타내며, 시험전 배터리 초기 전압을 측정하고, 스위치가 작동된 이후 배터리 전압이 21V까지의 전압 및 전류를 측정하여 소비전력을 계산하였다.

3-2-2. 공조시스템 냉난방특성시험

시험모드는 총 4가지 모드로서 실제 대형트럭을 이용한 물류운송업자의 설문을 통해 냉방장치는 주로 주간 사용하고, 난방장치는 주야간 모두 사용하고 있다는 것을 기초로 구성하였다. Table 2는 구성한 시험모드의 세부내용을 보여준다.

냉방시험은 9월 오후 2시, 4시에 실시하였으며, 난방시험은 1월 오전 8시, 밤 11시에 수행하였다. 배터리는 기존 12V 150 Ah, 230 Ah를 활용하였으며, 냉방모드인 경우는 150 Ah 4개, 난방모드인 경우는 230 Ah 2개를 각각 직병렬로 연결하였다. 이는 추후 타겟차량인 하이브리드 트럭에서는 대용량 배터리가 활용될 예정으로 문제가 되지 않을 것이다. 배터리 충전은 1시간 후 열전모듈 시스템의 연속 작동시간은 현 차량의 배터리 방전 종지전압인 21V까지를 측정하는 것으로 제한하였다.

Fig. 8은 대형 상용차의 실제 캐빈(cabin)을 활용하여 열전모듈 입출구와 캐빈 내외부에 온도센서를 부착한 후 냉/난방 부하조건에서의 온도 변화와 상대습도를

Fig. 8. Measure locations for Temperature and humidity on truck cabin or conditioning system.

측정하는 모습을 보여주고 있다.

여기서 T1은 열전모듈의 입구온도, T2는 열전모듈의 출구온도를 나타내며, T3와 T4는 상용차 캐빈 내 내부온도와 외부온도를 각각 나타내며, T5는 냉각수 온도, H1과 H2는 열전모듈의 입출구의 습도를 각각 나타낸다.

3-2-3. 공조시스템 진동내구시험

공조시스템의 진동내구시험을 위해 전용 전자식 진동내구시험기(LDSV850-440)를 이용해 상용차 내외장 부품에 적용되는 KS 시험규격에 맞춰 상하방향으로 33 Hz의 가진 주파수에 따라 29.43 m/s²의 가진크기로 4 hr 동안 진동시험을 수행하였다. Fig. 9는 전자식 진동시험기에 장착된 시험품에 대한 모습을 보여주고 있다.

Fig. 9. Comparison of pressure differentials(P) on Solenoid A, B and C at case 2 condition.

Table 2. Test modes and conditions

Mode	Conditions			Battery
Mode 1	Cooling	Day	Indoor	24V
Mode 2			Outdoor	300Ah
Mode 3	Heating	Night	Outdoor	24V
Mode 4		Day		230Ah

Table 3. Test condition of vibration durability

Parameters	Condition
Standards	KS D
Direction	Up/down
Frequency	33 Hz
Input vibration size	29.43 m/s ²
Test time	4 hr

4. 연구결과 및 고찰

4-1. 열전모듈 소비전압 및 전류 특성

냉방 및 난방모드에서 시간에 따른 열전모듈의 소비 전압과 소비전류의 측정결과를 Fig. 10~11에 각각에 도시하였다. 소비전압은 냉난방모드에서 거의 유사한 값을 보여 냉방모드에서 평균 23.2V, 난방모드에서 23.0V를 나타냈다. 그러나, 전류 소모량에 있어 Fig. 9의 냉방모드에서는 초기 87.1A에서 20여분이 지난 후에도 75A 이상의 전류 소모가 발생하며 21V일 때 67.8A로 평균 76A의 높은 전류 소모가 있음을 나타내었다. 한편, 난방모드에서 초기에 높은 85.6A이며, 10분 이내에 급격히 감소하다 이후에는 완만한 경사로 감소하는 경향을 보인다 21V일때 53.9A로 평균 62.2A의 의 전류 소비패턴을 보여주었다.

결국 이런 높은 전류 특성에 따라 배터리 종지전압인 21V에 도달하는 시간은 냉방모드는 31.7분, 난방모드는 39.2분으로 냉방모드가 난방모드에 비해 7.5분 먼저 방전되는 특성을 보여주고 있다.

4-2. 열전 공조시스템의 냉난방 특성

Fig. 12~13은 Mode 1에서 Mode 4까지 각 냉방 및

Fig. 10. Comparison of voltage and current consumption on cooling mode.

Fig. 11. Comparison of voltage and current consumption on heating mode.

난방모드에서 시간에 따라 열전모듈의 입출구에서 측정 한 온도변화와 실제 운전자가 체감할 수 있는 캐빈 외부와 내부의 온도차(T3-T4)를 나타낸 그래프이다.

Fig. 12에서 보는 바와 같이 냉방 Mode 1의 경우 열전모듈 입구온도는 24°C에서 약 1~2°C 정도는 유지하나, 열전모듈 출구의 온도는 초기 10분은 큰 영향이 없다가 25°C에서 약 2°C까지 급격히 온도가 떨어지는 현상을 보였다. 그러나 다시 35분까지는 증가세를 보인다 이후에는 10~12°C를 유지하였다. 이때 캐빈 내외 온도차는 초기에 증가하다 8분이 흐른 뒤 최대 7°C를 보이다 이후 5°C를 유지하였다. 그러나, Mode 2의 경우는 초기 실외의 태양 복사열의 영향으로 열전모듈 입구온도가 32°C에 이르다 캐빈 내 실내온도가 떨어지면 28°C까지 감소하였다. 한편, 열전모듈 출구온도는 초기 27°C에서 초기 5분 이내 15°C까지 급격한 감소를 보이다 그대로 유지되는 특성을 보였다. 캐빈 외부와 내부 온도차는 15분이 되기까지 3~4°C에 불과하였으며 5°C 내외를 유지하다 50분 이후에는 다시 감소하는 경향을 보여줬다. 전체적으로 냉방모드에서 실제 캐

(a) Mode-1

(a) Mode-2

Fig. 12. Variation of temperature in cooling mode 1~2.

(a) Mode-3

(b) Mode-4

Fig. 13. Variation of temperature in cooling mode 3~4.

빈 내 온도변화는 약 5°C에 지나지 않아 현재 설계 제작된 열전 공조시스템의 냉방효과는 미미한 것으로 나타났다.

Fig. 13는 난방 Mode 3과 Mode 4의 조건에서의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적으로 두 모드에서의 측정온도 추이는 유사한 경향을 보이고 있다. 열전모듈 입구는 초기 8~10°C에서 대략 10분 이후에는 20°C 내외를 유지하고 있으며, 열전모듈 출구의 경우는 초기 입구온도와 유사하다가 5분까지 45°C까지 급격히 높아지다가 이후 완만해져서 50~12°C를 유지하는 것을 확인하였다. 전체적으로 두 난방모드에 대한 차량 캐빈 외내부의 온도차는 10~12°C 정도를 보여주고 있다. Mode 4보다는 Mode 3의 경우가 더 빨리 온도차를 보여주었는데, 이는 낮 시간에 앞쪽 유리로부터 전달되는 태양 복사열에 따른 영향으로 판단할 수 있다. 전체적으로 현재 설계 제작된 열전 공조시스템의 난방효과는 예측대로 우수하였으나, 냉방효율을 올릴 수 있는 방안으로 열전모듈의

Fig. 14. Graph of cooling characteristics (Performance, Power consumption, Efficiency).

Fig. 15. Graph of heating characteristics (Performance, Power consumption, Efficiency).

생산공정이나 구성, 냉각기 효율 향상연구 등이 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 14는 열전모듈 시제품으로 측정한 냉방성능 중 Mode 1의 경우에 대해 나타낸 특성 그래프이다. 비교하기 위해서 계산된 열량을 낼 수 있는 전력으로 변화하여 성능을 보여준다. 본 모드에서의 냉방성능은 초기부터 12분까지 증가하여 최대 2.2 kW이며 20분 이후 점차 감소하여 평균 1.6 kW를 나타내고 있다. 한편, 작동을 위해 소비한 전력량은 각 시간에 따라 평균 2.0 kW를 보여주고 있다. 냉각성능계수인 C.O.P는 약 13분이 지난 지점에서 최대 1.06에 이르고, 평균 C.O.P는 0.8 정도 수준을 나타내었다. 그리고, 그래프에서 볼 수 있듯이 현재 배터리의 충전전압인 21V를 기준으로 연속으로 작동할 수 있는 시간은 70분 정도를 나타내었다.

Fig. 15는 Mode 3의 경우에 대해 열전모듈 시제품의 난방특성을 보여주고 있으며, 난방성능도 역시 전

Fig. 16. Inspection of vibration test sample.

력으로 변환하여 초기 5분까지 급속히 증가하여 최대 2.25 kW를 보여주다 10분 이후 점차 안정한 성능을 보이며 평균 2.15 kW를 나타냈다. 한편, 전력소비량은 초기 2분 이내에 1.8 kW로 떨어지며 평균 1.65 kW를 보이며, 난방성능계수로 C.O.P는 약 13분이 지나 최대 1.53에 이르고 평균 C.O.P는 1.32 정도로 난방 효율에 비해서는 약 31% 정도 효율이 높게 나타났다. 그래프에서 볼 수 있듯이 배터리 전압 21V를 기준으로 연속 작동시간은 80분으로 난방시스템보다 15분 가량 사용할 수 있는 시간이 더 확보됨을 알 수 있다. 이것은 기본적으로 열전소자의 기본 특성으로 흡열보다는 방열성능이 높은 특성을 그대로 모사되었으며, 전체적인 성능은 역시 난방성능에 맞춰 설계하고 제작해야 함을 확인하였다.

4-3. 진동내구성

열전 공조시스템의 시제품을 전자식 진동시험기에 장착하여 시험규격에 따라 진동내구시험을 실시한 후 Fig. 16에서와 같이 각 주요 조립부의 풀림이나 균열, 변형, 파괴가 발생하였는지 육안을 정밀 확인한 결과, 특별한 이상이 없었으며, 이를 통해 시스템 설계나 제작에 문제가 없음을 판단할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 대형 하이브리드 트럭에 적용할 열전 모듈을 활용한 무시동 공조시스템에 대한 여러 특성 실험을 위해 시험장치를 제작하고, 열전 공조시스템의 소비전압 및 전류, 운전식 내 온도변화 등을 직접 측

정하고, 이를 통해 계산식에 의한 소비전력, 성능, 효율 등을 측정된 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 시스템의 전력소비는 평균 2 kW이며, 현재 상용 차량의 24V 배터리의 중지전압을 기준으로 약 1.5시간 정도 연속적으로 사용할 수 있는 것으로 나타났다. 시스템 가동 후 내외부 냉방온도차는 약 5°C 정도이며, 난방온도차는 10°C 정도를 보였으며, 냉방의 경우는 운전자의 요구 온도에 도달하는 시간이 다소 길다는 문제점이 도출되었다. 열전모듈 특성상 냉방보다는 난방의 효율이 약 30% 정도 높게 나왔으며 전체 성능상 냉방성능 향상에 중점이 필요할 것으로 판단되고, 전체 시스템의 진동내구 신뢰성은 확보된 것으로 판단된다. 이후에는 열전모듈의 효율 개선과 각 주요부에서의 공기저항이나 마찰, 냉각수 관로 마찰특성에 대한 세부적인 연구를 통해 전체 성능향상 증대와 무시동 사용시간을 3~4시간까지 높일 수 있는 방안 마련이 필요할 것으로 판단된다.

Nomenclature

- a : absolute humidity (kg/kg')
- h : enthalpy (kcal/kg)
- ν : latent heat of vaporization, water (0°C) (kcal/kg)
- C_{pa} : specific heat of air (kcal/kg°C)
- C_{pv} : specific heat of water vapor (kcal/kg°C)
- G : mass flow (kg/h)
- H1: Inlet humidity of thermoelectric module (%)
- H2: Outlet humidity of thermoelectric module (%)
- T : temperature (°C)
- T1: Inlet temp. of thermoelectric module (°C)
- T2: Outlet temp. of thermoelectric module (°C)
- T3: Outlet temp. of Cabin (°C)
- T4: Inlet temp. of Cabin (°C)
- T5: Coolant temp of Radiator (°C)
- Q : heat exchange amount (kcal/hr)

References

1. Won, S. I., "Freezing Engineering," Bosu-nggak, 2003.
2. Roh, G. S., "Prediction on Performance of Cascade Refrigeration System using Natural Refrigerants," *Journal of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 45-51, 2010.
3. Yang, D. U., Park, K. M., Lee, K. H., Ro, Y. S., and

- Kim, S. W., "Experimental Study on Operating Characteristics of Anti-Start Air-Condition and Heating System Using Thermo Electric Element," *KSAE Autumn Conference Proceedings*, pp. 660-665, 2011.
4. Kim, S. H., "A Study on the Application of Thermoelectric Module in the Air Conditioner System Using Automotive," *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 12, No.4, pp. 32-38, 2008.
5. Majumdar, A., "Thermoelectricity in Semi-conductor Nanostructures", *Science*, pp. 303-777, 2004.
6. Kim, K. J., "The Efficiency of Thermoelectric Energy Conversion at High Power Electronics," *KSME Autumn Conference*, pp. 1702-1706, 2011.
7. Park, J. S. and Huh, C. S., "A Study on Improve Efficiency and Cooling Performance of the LED Lighting using a Seebeck Effect of the Thermoelectric element", *EMECSS Annual Autumn Conference*, pp. 1225-1227, 2012.