

열전발전 시스템의 부정합손실 저감방안 연구

최태호¹, 김태영^{2*}

¹서울과학기술대학교 기계자동차공학과 학생, ²서울과학기술대학교 기계자동차공학과 교수

Study of Reduction of Mismatch Loss of a Thermoelectric Generator

TaeHo Choi¹, Tae Young Kim^{2*}

¹Student, Department of Mechanical and Automotive Engineering,
Seoul National University of Science and Technology

²Professor, Department of Mechanical and Automotive Engineering,
Seoul National University of Science and Technology

요약 본 연구에서는 열전발전기에 장착된 열전소자 간의 불균일한 온도편차에 의해 발생하는 부정합 손실을 저감할 수 있는 Multi-layer Cascade (MLC) 전기연결 방법을 제안한다. MLC의 성능을 검증하기 위해 열유동 현상 뿐만 아니라 열전소자에서 발생하는 다중물리현상을 반영한 수치해석 모델을 개발하였다. MLC는 고온도차를 경험하는 소자와 저온도차를 경험하는 소자를 서로 다른 Layer에 배치하여 구현할 수 있으며, 고온도차 소자와 저온도차 소자의 분류에는 수치해석 모델을 통해 얻어진 소자별 고온부 표면 온도를 활용하였다. MLC를 구성하는 각 Layer의 전기분선 비율을 변화시키며 이상적인 열전발전 성능과의 비교를 통해 MLC의 부정합손실 저감 특성을 확인하였다. 최적 분선비율로 구성된 MLC의 경우 이상적인 결과 대비 96.5%의 발전성능을 보였으며, 열원의 유량이 적거나 발전시스템의 크기가 증가하여 소자 간의 온도편차가 클수록 부정합손실 저감효과가 더욱 증가하는 것을 확인하였다.

주제어 : 열전발전, 에너지회수, 폐열회수, 제벡효과, 부정합손실

Abstract In this study, a multi-layer cascade (MLC) electrical array configuration method for thermoelectric generator consisting of plural number of thermoelectric modules (TEMs) was proposed to reduce mismatch loss caused by temperature maldistribution on the surfaces of the TEMs. To validate the effect of MLC on the mismatch loss reduction, a numerical model capable of reflecting multi-physics phenomena occurring in the TEMs was developed. MLC can be employed by placing a group of TEMs experiencing relatively low temperature differences in an electric layer with more electrical branches while locating a group of TEMs experiencing relatively high temperature differences in an electric layer with less electrical branches. The TEMs were classified using the temperature distribution obtained by the numerical model. A MLC with an optimal electrical branch ratio showed a 96.5% of electric power generation compared to an ideal case.

Key Words : Thermoelectric generation, Energy harvesting, Waste heat recovery, Seebeck effect, Mismatch loss

*This study was supported by the Research Program funded by the SeoulTech(Seoul National University of Science and Technology).

*Corresponding Author : Tae Young Kim(tykim@seoultech.ac.kr)

Received January 17, 2022

Revised February 28, 2022

Accepted March 20, 2022

Published March 28, 2022

1. 서론

저탄소 산업생태계 조성과 탄소중립 사회로의 전환과 맞물려 산업현장에서 발생하는 미활용 에너지원의 고효율 회수에 대한 관심이 높아지고 있다 [1].

10% 이상의 비교적 높은 효율을 갖춘 Rankine cycle 기반의 에너지 회수 장치는 시스템 구성이 복잡하고 작동유체의 끓는점에 도달하지 못할 경우 심각한 발전성능저하가 나타나는 단점을 가지고 있다. Turbo-compound 기술은 상대적으로 작은 시스템 규모와 간단한 설치 및 사용이 가능하다는 장점을 가지나, 낮은 에너지변환 효율이 단점으로 꼽힌다. 이와 비교하여 Seebeck 효과에 기반한 열전발전 기술[2]은 시스템 구성이 간단[3]하고 구동부가 존재하지 않으며 상변화과정 없이 직접 전기발생이 가능하다는 장점을 가지고 있다[4]. 더불어, 장치의 크기와 발전규모를 열원의 조건과 수준에 맞추어 설계, 제작하여 사용할 수 있다[5]. 그러나 열전발전의 경우 열역학기반 에너지회수 기술 대비 낮은 에너지 변환 효율을 갖고 있으므로 이에 대한 개선이 요구된다[6].

열전발전 기술의 낮은 효율에 대한 다양한 원인 중 대표적인 것은 각 소자 (Thermoelectric module, TEM) 에 부여되는 열원조건의 차이에서 발생하는 부정합손실 (Mismatch loss)이다[7]. 열전발전이 적용되는 산업현장에서는 시스템의 규모가 커지고 전기적으로 상호 연결되는 소자의 개수가 증가할수록 발전효율이 감소한다는 보고가 발생하고 있으나[8], 이에 대한 정확한 원인 규명과 체계적인 해결책 제시가 이루어지지 않고 있다[9].

본 연구에서는 다수 개의 열전소자가 적용된 열전발전 시스템에서 부정합손실의 발생 원인을 살펴보고, 부정합손실을 줄일 수 있는 Multi-layer 기반의 Cascade 전기연결방안을 제시한다. 실험결과를 이용하여 검증된 열전발전 수치해석 모델을 개발하여 다양한 전기연결 방법이 열전 에너지회수 성능에 미치는 영향을 살펴본다. 주어진 엔진조건에 대하여 직렬 및 병렬연결 대비 Multi-layer cascade 연결방법이 에너지 회수 효율을 5.3 % 이상 향상시킬 수 있음을 확인한다.

2. 부정합 손실 원인분석 및 해결방안

2.1 부정합 손실 원인

열전소자는 전기적인 관점에서 발전을 일으키는 전

지 (Battery)와 전기저항 (Resistance)로 모델링할 수 있다. 소자의 전지특성은 발생하는 전압과 전류로 표현할 수 있으며 전압은 소자의 제벡계수 (α)와 양면에 부여되는 온도차 (ΔT)의 함수로 표현할 수 있다.

$$V = \alpha \Delta T \quad (1)$$

소자의 고온부와 저온부로 유입, 유출되는 열전달을 Q_h 와 Q_c 는 각각 다음과 같이 표현될 수 있다[10].

$$Q_h = \alpha I T_h + K \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R \quad (2)$$

$$Q_c = \alpha I T_c + K \Delta T + \frac{1}{2} I^2 R \quad (3)$$

여기서 T_h , K , T_c , R 은 각각 열전소자의 고온부 온도, Thermal conductance, 열전소자의 저온부 온도, 열전소자의 전기저항이다. 식 (2) 및 (3)의 우변의 첫 번째 항부터 세 번째 항은 각각 히트 펌핑, 전도, 및 Joule heating에 의한 열전달을 나타낸다. 소자의 발전양 P 는 Q_h 와 Q_c 의 차로서 표현되며, 발전양을 최대로 만드는 전류 (I_{opt})는 다음과 같다.

$$I_{opt} = \frac{\alpha \Delta T}{2R} \quad (4)$$

시스템 내부에 서로 다른 온도차를 경험하는 소자가 있다면 높은 온도차를 경험하는 소자 (TEM_{JTh})는 상대적으로 높은 전압과 높은 최적 전류를 갖게 되고, 반면에 낮은 온도차를 경험하는 소자 (TEM_{JTc})는 상대적으로 낮은 전압과 낮은 최적 전류를 갖게 된다. 이 때 두 소자를 직렬로 연결하게 되면 두 소자에는 하나의 전류만이 흘러야 하므로 TEM_{JTh} 에는 최적전류보다 낮은 전류가, TEM_{JTc} 에는 최적전류보다 높은 전류가 흐르게 되면서 각 소자의 발전양과 시스템 발전양의 감소를 유발한다. 두 소자가 병렬로 연결되는 경우에는 TEM_{JTh} 에서 발생한 일부 전류가 높은 전압에 의하여 상대적으로 낮은 전압을 보이는 TEM_{JTc} 로의 유입을 일으켜 역전류 현상 (Reverse current)를 유발하므로 시스템 전체적인 발전성능이 감소한다.

2.2 Multi-layer cascade 구성

일반적인 열원에서는 위치에 따라 온도 편차가 발생

하므로 소자 간 직렬, 병렬 혹은 직병렬을 혼합한 기존의 방식을 사용할 경우 부정합손실을 유발한다. 다른 관점으로 보면 부정합손실을 저감하거나 제거할 수 있는 방법은 각 소자가 경험하는 온도차에 따라 최적 전류가 흐를 수 있도록 맞춤형 전기연결 구성을 하는 것이다.

정상상태 (State-steady)로 작동하는 시스템의 경우 위치별 온도차는 나타나지만 시간에 따른 변화는 나타나지 않으므로 각 소자가 경험하는 온도차를 추출하여 TEM_{JTh} 에는 상대적으로 높은 전류가, TEM_{JTC} 에는 상대적으로 낮은 전류가 흐르도록 하는 것이 본 연구에서 제안하는 Multi-layer cascade (MLC) 전기연결 방법의 핵심개념이다.

MLC는 직병렬을 혼합한 전기배열을 2 개 이상으로 구성하여 소자로 공급되는 전류의 양과 비율을 조절할 수 있도록 한다. 그림 1은 기본적인 MLC 개략도를 나타내며, 다수의 전기분선 (Branch)로 구성된 좌측의 첫 번째 레이어 (x)와 소수의 전기분선으로 구성된 우측의 두 번째 레이어 (y)로 구성한다. 소자의 전기저항 및 전압이 일정하다는 가정을 하면, 시스템에 흐르는 전류 I_L 에 대하여 x layer에 배치된 소자는 (I_L/m) 의 전류가, y layer에 배치된 소자는 (I_L/n) 가 흐르게 된다. 따라서 TEM_{JTC} 는 다수 분선 Layer에 TEM_{JTh} 는 소수 분선 Layer에 배치할 경우 온도차에 따라 전류를 조절할 수 있다. 시스템의 온도분포에 따라서 전기분선 m과 n의 비율과 Layer 개수를 적절히 도출할 경우, 각 소자에서 요구하는 최적 전류에 근접한 전기환경을 유발하여 시스템의 발전특성을 극대화할 수 있다.

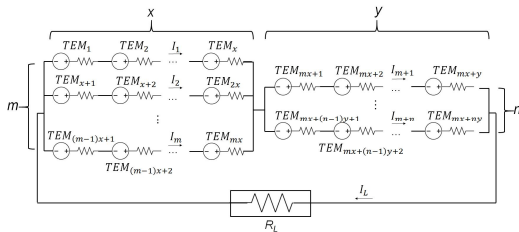


Fig. 1. Schematic of multi-layer cascade electrical array

3. 수치해석

3.1 수치해석 모델

본 연구에서 제안하는 MLC를 통한 부정합손실 저감 방법을 검증하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 먼저,

열유체 특성은 물론 열전소자의 발전특성을 예측할 수 있는 Multi-physics 모사 기반의 해석모델을 만들고 실험 결과와 비교하여 모델의 정확성을 검증한다. 그 후에 전기적인 연결방법을 변화시켜가면서 MLC가 부정합손실에 미치는 영향을 직, 병렬 연결방식과 비교한다.

복잡한 물리적 현상을 수치해석에 반영하기 위하여 User-defined function (UDF) 기반의 In-house code를 개발하였다. 개발된 코드를 바탕으로 키르히호프의 전류 및 전압법칙과 열전 에너지 변환 현상이 지배방정식과 결합됨으로써 열유동 현상뿐만 아니라 Joule heating 및 전자와 정공 이동에 의한 Heat pumping의 열-전기 변환특성 모사가 가능하다. 고온 부에서 저온부로의 Heat pumping에 의한 열전달을 모사하기 위하여 식 (2) 및 (3)에 근거하여 열전소자의 고·저온부 표면 각각에 1 mm 두께의 Heat sink 및 source 영역을 할당 하였다.

Fig. 2는 수치해석 모델을 나타낸다. 열전소자는 391개의 Bi_2Te_3 계열의 p-n 커플로 구성되어 있으며, 면적은 $60 \times 60 \text{ mm}^2$, 높이는 3.3 mm이다. 열전발전기의 상·하판 15개씩 총 30개의 열전소자가 부착되어 있으며, 각 열전소자의 구분을 위하여 번호가 할당되어 있다. 디젤 엔진의 배기가스를 고온 열원으로, 냉각수를 저온 열원으로 사용하였다.

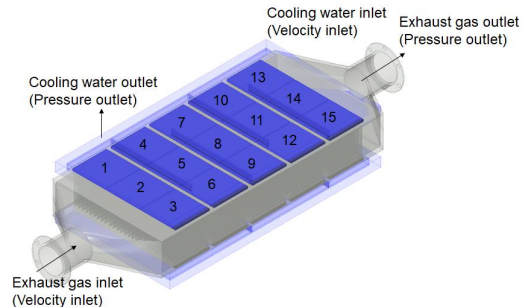


Fig. 2. The schematic diagram of the numerical model used in the present study

3.2 경계 조건 및 수치해석 조건

0.8 MPa의 brake mean effective pressure 및 1400 rpm의 엔진회전에 해당하는 실험조건으로부터 배기가스 유입속도는 51.0 m/s, 온도는 563 K을 부여하였다. 배기가스는 공기로 가정하였으며 물성치인 밀도, 비열, 점도, 열전도도는 온도에 의한 함수로 반영하

였다. 냉각수의 입구조건은 293 K의 온도와 8L/min의 냉각수 체적유량 조건을 속도로 환산하여 반영하였다.

난류모델은 Realizable $k-\epsilon$ 을 사용하였으며 SIMPLE algorithm을 사용하였다. 수렴 조건으로 Continuity equation은 10^{-4} , momentum, turbulence kinetic energy, 및 turbulence dissipation rate equation은 10^{-5} , energy equation은 10^{-8} 이하의 Residual 기준을 사용하였다.

3.3 수치해석 모델 계산 순서

열전소자의 다물리 현상이 반영된 UDF code 작성을 위하여 키르히호프의 전류 및 전압법칙 기반의 전기 방정식을 도출한다. 수치해석 시작시 열유동장을 초기화하고 전기방정식을 이용하여 각 소자의 전압 및 전류 초기값을 획득한다. 이를 활용하여 식 (2) 및 (3)로부터 계산된 흡열량과 발열량을 각 열전소자의 고온부와 저온부 경계조건으로 반영한다. 적용된 경계조건을 기반으로 식 (5), (6), 및 (7)로 표현되는 열유동 방정식을 풀어 유동 및 온도장을 업데이트한다. 수렴이 될 때까지 이러한 반복계산을 수행함으로써 수치해석 결과를 도출하였으며, 풀이과정은 Fig. 3과 같다.

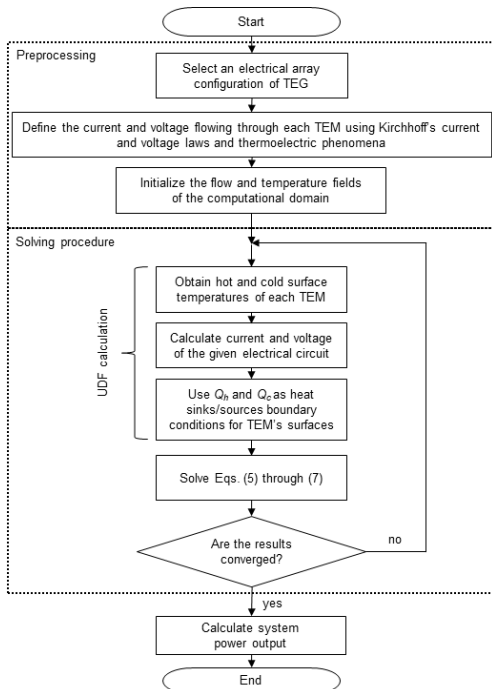


Fig. 3. The flow chart of the numerical simulation

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{5}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \tag{6}$$

$$\nabla \cdot (C_p \rho \vec{v} T) = k \nabla^2 T \tag{7}$$

여기에서 ρ , v , P , μ , g , C_p , T , k 는 각각 밀도, 속도, 압력, 점성계수, 중력가속도, 정압비열, 온도, 열전도도이다.

3.4 수치해석 모델의 검증

다물리 해석기반 수치해석 모델의 신뢰성을 확보하기 위하여 1400 rpm의 엔진 작동 조건에서 열전 소자들이 모두 직렬연결 되어있을 때 배기가스 출구온도 및 발전성능 실험결과를 이용하였다. 격자 의존성 (Grid independency) 검증을 330만 개의 격자부터 1088만 개 까지 총 5가지 Case에 대하여 수행하였다. 격자 개수가 649만 개에서 738만 개로 변화할 때의 출력 변화율은 4.2%였으며, 738만 개에서 1088만 개의 변화에서의 출력 변화율은 0.3%인 것을 바탕으로 738만 개의 격자가 격자 독립성을 갖는 개수로 선정되었다. 직렬연결일 때 실험결과와 수치해석 결과의 발전성능과 배기가스 출구 온도 오차는 각각 3.8 % 및 0.6 %로 수치해석 모델의 정확성을 확인하였다. 열전발전 시스템으로 유입된 열에너지 (15622.4 W)는 열전소자 발전 (73.4 W), 냉각수로의 열전달 (3555.4 W), 자연대류에 의한 손실 (906.1 W)이 발생하며, 나머지 열에너지 (11087.5 W)가 열전발전 시스템 출구로 배출된다. 시스템으로의 열 입·출입 관점에서 본 수치해석 모델의 열에너지 밸런스가 이루어짐을 확인하였다.

열전소자 간의 직렬연결 외의 다양한 전기연결에 대한 신뢰성 확보를 위하여 여덟 가지 서로 다른 전기적 연결 방법을 활용하였다. 여덟 가지 전기적 연결 방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [11]에 제시하였으며, 직렬연결과 병렬연결의 경우 실험결과와 4.1% 이내, 무작위성이 강한 전기연결의 경우 8.4% 이내의 오차로 잘 부합함을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 MLC의 부정합 손실 저감 효과

x layer와 y layer에 각각 몇 개의 전기분선 및 열전 소자를 할당할 것인가가 부정합손실 저감의 핵심이다.

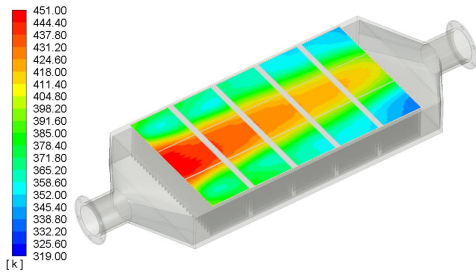


Fig. 4. The temperature distribution of gas channel

Fig. 4에 나타나 있는 것과 같이 상판에 위치한 15개 열전소자의 고온부 표면 온도처럼 유동관성에 의하여 배기가스 채널 중심부에 위치한 열전소자의 표면온도가 측면에 위치한 소자의 표면온도 대비 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 냉각수의 경우에는 비열이 높아 온도편차가 크지 않으므로, 배기온도를 기준으로 하여 채널 외곽에 위치하여 저온도차를 경험하는 소자 20개를 x layer에 배치하고 채널 중심에 위치하여 고온도차를 경험하는 소자 10개를 y layer에 배치하는 것이 타당하다. 다만, 본 연구에서는 전기분선 비율 (Line ratio, n/m)에 대한 Parametric 연구를 수행하기 위하여 다양한 전기분선비가 가능하도록 x layer에 소자 24개, y layer에 소자 6개를 할당하였다.

Fig. 5은 전기분선 비율이 0.083부터 1까지 변화함에 따라 얻어지는 발전성능특성을 나타낸다. 전기분선 비율이 0.083인 경우 발전성능이 가장 낮은 49.3 W의 발전 성능이 얻어졌다. 이는 두 가지의 이유를 꼽을 수 있는데, 첫 번째는 분선비율이 낮아 y layer를 구성하는 각 전기분선에는 최적 전류 대비 과도한 전류가 흘러 Joule heating에 의한 손실이 유발되기 때문이다. 두 번째 이유는 x layer에는 분선이 상대적으로 많으므로 해당 Layer에 배치된 소자에는 주어진 온도에서 발전하기에 충분한 전류가 흐르지 않기 때문이다. 본 연구에서는 전기분선 비율이 0.5일 때 최대의 발전성능을 나타냈으며, 각 소자에 최적의 전류가 흐를 때 얻어지는 최대 발전성능의 96.5 %인 77.5 W의 전력이 얻어졌다.

부정합 손실은 $(P_{ideal} - P_{MLC})/P_{ideal} \times 100$ 으로 표현할 수 있다. 따라서 전기분선 비율이 0.5일 때 3.5 % 만큼의 부정합 손실이 나타난 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서 확인한 직렬 및 병렬연결에서의 부정합 손실은 각각 8.7%와 12.5%로 나타났으며, 이는 Montecucco 등 [7]의 연구에서 밝혀진 직렬 및 병렬연결 부정합 손

실인 9.2% 및 12.9%와 유사함을 알 수 있다. 본 연구에서 얻어진 직렬 및 병렬연결의 부정합 손실은 최적 MLC 연결 대비 각각 2.5배 및 3.5배 높음을 알 수 있다.

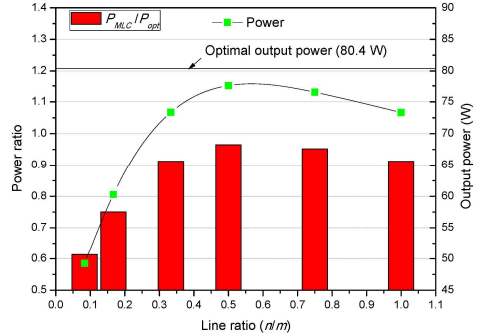


Fig. 5. The system-level output power and power ratio compared to MLC case according to line ratio

Fig. 6는 전기분선 비율이 0.5인 경우와 0.083인 경우에 대하여 상판에 위치한 15개 소자 각각에 대해 흐르는 전류와 최적 전류 간의 차이를 보여준다. 각 Symbol이 기준선으로 표시한 0에 가까울수록 개별 소자의 부정합 손실이 적다. 전기분선 비율이 0.083인 경우 온도차가 큰 2, 5, 8, 11번 소자에서 2번 소자를 제외하고 최적 전류보다 높은 전류가 흘러 Joule heating에 의한 손실이 큰 것을 알 수 있다. 나머지 소자의 경우 최적 전류보다 낮은 전류가 흘러 충분한 발전성능을 내지 못하고 있는 것이 나타나 있다. 반면에 전기분선 비율이 0.5인 경우 대부분의 소자에 흐르는 전류가 최적 전류와 유사한 결과를 나타냈으며 이는 Joule heating에 의한 손실이 적고 각 소자에서 충분한 발전성능 도출할 수 있는 전기적 환경이 갖춰졌음을 알 수 있다.

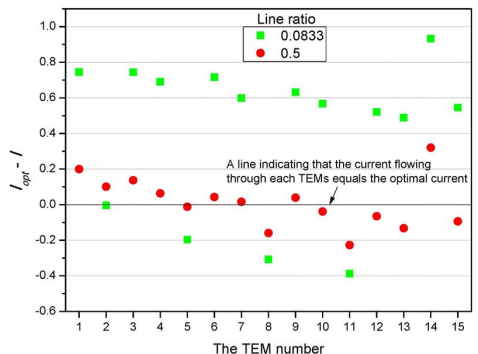


Fig. 6. The current difference between MLC current and current flowing through each TEM

4.2 온도편차에 따른 부정합 손실

열원의 조건이 다르거나 열전발전기 내부 구성 및 크기 등에 따라서 소자 간의 온도편차가 달라질 수 있다. 따라서 다양한 온도편차의 소자가 MLC로 구성되어 있을 때의 부정합손실 저감 효과를 분석하고자 한다.

3개 소자를 활용하여 직렬, 병렬, MLC에서의 부정합 손실 특성을 분석한다. MLC의 경우 Fig. 1의 회로도에서 x layer의 전기분선 m 이 2이고 y layer의 분선 n 이 1 인 경우를 사용하였다. 이 때 온도편차 조건을 부여하기 위해서 $TEM_{\Delta Tc}$ 을 모사하는 첫 번째 및 두 번째 소자의 전위 V_1 와 V_2 를 동일한 값으로 가정하고 0.05 V부터 1 V까지 변화시켰으며 $TEM_{\Delta Th}$ 를 모사하는 세 번째 소자의 전위 V_3 를 1 V로 가정하였다.

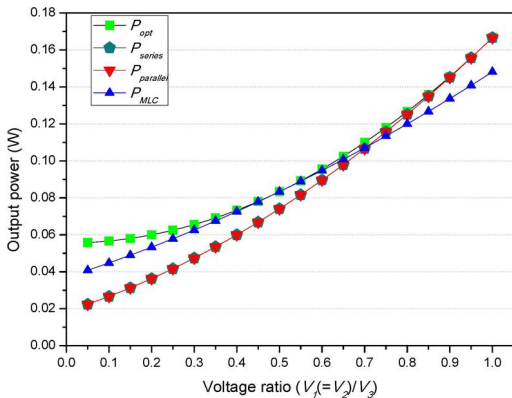


Fig. 7. The output power of optimal, series, parallel, and MLC array configuration according to voltage ratio

Fig. 7에 Voltage ratio ($V_1(=V_2)/V_3$)변화에 따른 연결 방법 별 발전성능 특성이 나타나 있다. Voltage ratio의 범위가 0.05부터 0.70까지는 MLC의 발전성능이 직렬 및 병렬연결의 발전성능보다 높은 것을 알 수 있다. 이는 직렬연결의 경우에는 전체 전기회로에 하나의 대표전류가 흐르기 때문에 $TEM_{\Delta Th}$ 에서는 최적 전류보다 낮은 전류가 흘러 발전성능이 저하되고 $TEM_{\Delta Tc}$ 에서는 높은 전류가 흘러 Joule heating 손실이 크게 발생하기 때문이다. 병렬연결의 경우에는 $TEM_{\Delta Th}$ 에 높은 전위가 나타나며 이에 따라 전위가 낮은 $TEM_{\Delta Tc}$ 로의 역전류가 발생하여 손실이 발생한다.

Fig. 8는 직렬연결 및 이상적인 경우 대비 MLC 연결법의 전력을 비교함으로써 부정합손실 개선성능을 나타낸다.

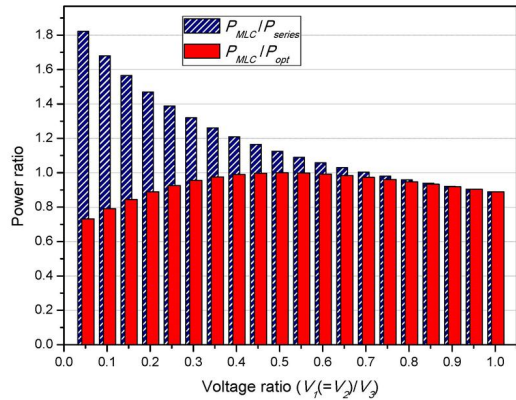


Fig. 8. The power ratio of optimal, series, parallel, and MLC array configuration according to voltage ratio

직렬연결은 앞서의 분석과 같이 전체 회로에 대표 전류 하나만 흐르므로 각 소자가 경험하는 온도 편차에 따른 최적 전류 차이를 보상할 수 없다. 따라서 소자 마다 경험하는 온도 편차가 커질수록 부정합 손실이 증가한다. MLC의 경우에는 전기분선 수가 다른 복수 개의 Layer로 구성을 하고 소자가 경험하는 온도편차를 고려하여 Layer 마다의 분선수를 결정한다. 이러한 방식으로 각각의 소자에는 경험하는 온도차에 맞춘 최적에 가까운 전류가 흐르므로 발전량의 최적화가 가능하다. 이러한 방식으로 소자를 배치할 경우에는, 하나의 Layer를 구성하는 소자 간에는 온도편차가 상대적으로 적으므로 소자간의 역전류 발생이 줄어들어 손실이 감소한다. 본 연구에 사용한 MLC의 경우에는 x layer에 배치된 두 개의 전기분선에 $TEM_{\Delta Tc}$ 소자가 각각 하나씩 존재하고 y layer에 배치된 하나의 전기분선에 $TEM_{\Delta Th}$ 소자가 존재하므로, 직렬연결에 대비하여 온도차에 비례한 전류가 흘러 직렬연결보다 부정합 손실이 상대적으로 적다. Fig. 8에서 온도편차가 가장 큰 경우인 Voltage ratio 0.05일 때 직렬연결 대비 MLC의 발전성능이 1.8배 이상 높은 결과가 얻어진다. 이와 반대로 Voltage ratio가 0.7보다 큰 경우에는 Fig. 7의 결과와 같이 x layer에 배치된 소자에 충분한 전류가 흐르지 않기 때문에 직렬연결 대비 발전성능이 낮게 된다. 이렇듯 소자가 경험하는 온도편차를 고려하지 않고 직병렬 연결을 혼합하여 부정합손실이 증가하는 경우가 기존의 연구에서 발생함을 확인할 수 있었다 [11]. 따라서 이러한 경우에는 본 연구에서 제안하는 바와 같

이 수치해석 결과를 이용하여 소자가 경험하는 온도편차를 살펴본 후 그에 적합한 분선비율로 MLC를 구성함으로써 직렬연결 대비 우수하며 이상적인 전기연결법에 근사한 발전양을 얻을 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 열전발전 시스템의 부정합 손실을 저감할 수 있는 MLC 전기연결 방법을 제안하였다. Multi-physics 기반 수치해석 모델을 개발하여 기존의 직렬 및 병렬연결 대비 MLC 연결법의 직렬 및 병렬연결 대비 부정합손실 저감성능을 검증하였다. 더불어, 개별 소자의 출력을 합산하여 도출한 이상적인 출력과 비교하여 MLC 연결법의 출력 수준을 확인하였다. 본 연구에서 다룬 3×5 소자배열 구성의 열전발전 장치의 경우 전기분선 비율이 0.5일 때 최적 발전양을 보였으며, 개별 소자에서 발생한 발전양을 합한 이상적인 경우 대비 96.5 %의 발전성능을 보여, 부정합 손실이 3.5 % 발생함을 확인하였다. 이는 직렬 및 병렬연결에서 발생하는 부정합손실 대비 2.5배 및 3.5배 낮은 결과이다. 추가적으로, 개별 소자가 경험하는 온도차에 따른 이상적인 전류 대비 실제 발생하는 전류 관점에서의 부정합 손실 해석을 수행하였다. 기존의 연구에서와 같이 전기분선 비율을 임의로 결정하여 분선 비율이 최적의 경우보다 작아질 경우 TEM_{JTh} 에 과도한 전류가 흘러 Joule heating에 의한 손실이 증가하고 TEM_{JTe} 에는 전류가 적게 흘러 충분한 발전을 하지 못하는 것을 확인하였다. 반면 본 연구에서 개발한 수치해석 모델과 연동하여 MLC 최적 전기분선 비율을 도출하여 적용할 경우에는 개별 소자마다 최적의 전류에 근접한 전류가 흘러 부정합 손실이 감소하고 이상적인 발전양에 근접한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구그룹이 개발하고 있는 선박용 2.5 kW급 열전발전기 및 폐자원 열원을 이용한 20 kW 열전발전 시스템과 같이 사회에서 요구하는 발전 용량이 증가함에 따라 열전발전 장치 내에서의 온도편차가 점차 크게 나타나고 이에 따라 부정합 손실이 증가할 가능성이 높아지고 있는 추세이다. 따라서 본 연구에서 제안하는 MLC 전기연결 방법을 사용할 경우, 열전발전 장치의 규모에 무관하게 부정합 손실을 저감하고 이상적인 경우에 가까운 발전양과 효율을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

REFERENCES

- [1] Á. Casi, M. Araiz, L. Catalán & D. Astrain. (2021). Thermoelectric heat recovery in a real industry: From laboratory optimization to reality. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116275. DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2020.116275
- [2] J. Wang, P. Cao, X. Li, X. Song, C. Zhao & L. Zhu. (2019). Experimental study on the influence of Peltier effect on the output performance of thermoelectric generator and deviation of maximum power point. *Energy Converse and Manage*, 200, 112074. DOI : 10.1016/j.enconman.2019.112074
- [3] D. Luo, R. Wang, W. Yu & W. Zhou. (2020). A numerical study on the performance of a converging thermoelectric generator system used for waste heat recovery. *Applied Energy*, 270, 115181. DOI : 10.1016/j.apenergy.2020.115181
- [4] N. Kempf & Y. Zhang. (2016). Design and optimization of automotive thermoelectric generators for maximum fuel efficiency improvement. *Energy Converse and Manage*, 121, 224-231. DOI : 10.1016/j.enconman.2016.05.035
- [5] M. He, E. Wang, Y. Zhang, W. Zhang, F. Zhang & C. Zhao. (2020). Performance analysis of a multilayer thermoelectric generator for exhaust heat recovery of a heavy-duty diesel engine. *Applied Energy*, 274, 115298. DOI : 10.1016/j.apenergy.2020.115298
- [6] D. Luo, R. Wang, W. Yu & W. Zhou. (2020). A novel optimization method for thermoelectric module used in waste heat recovery. *Energy Converse and Manage*, 209, 112645. DOI : 10.1016/j.enconman.2020.112645
- [7] A. Montecucco, J. Siviter Andrew & R. Knox. (2014). The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel. *Applied Energy*, 123, 47-54. DOI : 10.1016/j.apenergy.2014.02.030
- [8] P. Fernández-Yañez, O. Arms, A. Capetillo & S. Martínez-Martínez. (2018). Thermal analysis of a thermoelectric generator for light-duty diesel engines. *Applied Energy*, 226, 690-702. DOI : 10.1016/j.apenergy.2018.05.114
- [9] I. R. Cózar, T. Pujol & M. Lehocky. (2018). Numerical analysis of the effects of electrical and thermal configurations of thermoelectric

modules in large-scale thermoelectric generators. *Applied Energy*, 229, 264-280.
DOI : 10.1016/j.apenergy.2018.07.116

- [10] D. M. Rowe. (2006). *Thermoelectric Handbook*. Boca Raton, FL : CRC Press.
- [11] A. Negash, T. Y. Kim & G. Cho. (2017). Effect of electrical array configuration of thermoelectric modules on waste heat recovery of thermoelectric generator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 260, 212-219.
DOI : 10.1016/j.sna.2017.04.016

최 태 호(Taeho Choi)

[학생회원]



- 2020년 2월 : 전북대학교 기계시스템공학부 (공학사)
- 2020년 8월 : 서울과학기술대학교 미래기계기술연구소 (연구원)
- 2020년 9월~현재:서울과학기술대학교 기계자동차공학과 석사과정

- 관심분야 : 열전달, 열공학, 에너지
- E-Mail : dkfkql97@naver.com

김 태 영(Tae Young Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : KAIST 기계항공우주공학과 (공학박사)
- 2021년 10월~ : 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 부교수
- 관심분야 : 열공학, 에너지, 위상최적화, 사이클 해석
- E-Mail : tykim@seoultech.ac.kr