

1kW급 수소리니어 발전기 열해석

양 시원¹⁾, 이 재성²⁾, 권 기영³⁾

A Thermal Analysis of 1kW Hydrogen Linear Generator

Siwon Yang, Jaesung Lee, Kiyeong Kweon

Key words : Hydrogen(수소), Linear(선형), Generator(발전기), CFD(전산유체역학), Stator(고정자), Mover(이동자), Loss(손실), Heat source(열원)

Abstract : Recently, many researches of the alternative and renewable energy have introduced due to the increasing oil price, the limited natural resources and the environmental pollution. In case of hydrogen energy, it has some merits, which can be substituted the existing the fossil fuel because of no contaminants from the combustion and the chemical reaction.

We have been developing 1kW Hydrogen Linear Generator. In this paper, the thermal characteristic of this prototype linear generator has been investigated and obtained reliable analysis results comparing with experimental measurements. Especially, it is predicted that in case of 1kW, 60Hz test sample, the results satisfy with the temperature standards of H type insulation, which is shown average 69.0°C temperature distribution at the coil.

Nomenclature

K : Conductivity, W/mK
 H_v : Heat Loss per Volume, W/m³

Subscript

Stator[L, R] : left, right of stator
Wall[L, R] : left, right of wall
ATRT : average temperature raise time
TCTR : top coil temperature raise

1. 서 론

최근 급격한 유가상승과 환경오염으로 인한 화석에너지의 이용에 많은 문제점들이 발생하고 있다. 특히 자원이 부족한 국가나 환경오염이 심각한 산업화 국가의 경우가 특히 그러하다. 화석 연료를 이용하는 에너지 기기의 경우 이산화탄소(CO₂), 산화 질소화합물(NO_x) 등 각종 유해가스의 배출에 따른 이상기온 및 호흡기 질환 발생 등

심각한 문제에 직면해 있다. 특히 온실가스의 주범인 이산화탄소(CO₂)를 줄이기 위한 방법으로 배기가스 배출부에 촉매반응기 장착으로 제거하는 방법과 완전 연소를 통한 저감방법 등이 사용되고 있다. 이에 비해 수소에너지의 경우는 연소 및 화학반응 결과물로 어떠한 오염물질도 배출하지 않는다는 이점을 가지고 있다. 이러한 수소에너지는 기존 화석연료 대비 대체에너지로서 최근 각광받고 있으며 수소연소, 연료전지 등의 분야에서 널리 연구되고 있다. 그중 하나인 고효율 수소 연소 선형 동력시스템은 수소 연료를 초회박 연소시켜 40%이상의 고효율 운전이 가능한

- 1) (주) 효성 중공업 연구소 열유동팀
E-mail : c1@hyosung.com
Tel : (055)268-9935 Fax : (055)268-9926
- 2) (주) 효성 중공업 연구소 열유동팀
E-mail : jaesung@hyosung.com
Tel : (055)268-9936 Fax : (055)268-9926
- 3) (주) 효성 중공업 연구소 열유동팀
E-mail : kykweon@hyosung.com
Tel : (055)268-9934 Fax : (055)268-9926

동력시스템으로 수소 연료의 개발과 함께 차세대 동력시스템으로 관심을 모으고 있다. 선형발전기는 이 시스템의 핵심적인 요소로써 엔진에서 발생하는 기계적인 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기기이다. 선형전기기기는 선형운동이 요구되는 실생활에서 시스템의 단순화와 고효율화가 가능하기 때문에 대체 수요가 많이 발생할 것으로 전망되고 있다. 발전기 사양을 결정하여 전기 설계를 마치면 구조적 안정성과 열적 안정성 평가가 필요한데, 발전기 내부에서 발생한 열량은 열전달을 통하여 발전기 표면으로부터 방출되고 내부 발생열량과 표면의 방출열량이 서로 같을 때 발전기의 온도상승은 정지한다. 발전기 냉각에 있어서 열전달 기구는 크게 전도, 대류로 구분할 수 있으며, 복사는 무시할 만한 수준이다. 현재 검토 중인 1kW급 영구자석형 선형발전기의 경우 고효율 시스템이므로 손실은 적지만, 표면적이 작고, 엔진으로부터 열전달이 발생할 수 있는 구조이기 때문에 열적 안정성에 대한 검토가 필요하다.⁽¹⁾

본 논문에서는 신제품 개발과정에서 많이 적용하는 전산 열유체 해석 코드 중의 하나인 FLUENT를 이용하여 Mover의 이동에 대해 Steady 및 Unsteady 조건에 대하여 해석⁽²⁾을 수행하고 실제 Proto type 발전기 온도상승 시험값과 비교함으로써 해석결과의 타당성 검증 및 향후 5kW 발전기 설계 기준으로 활용할 계획이다.

2. 본 론

1kW급 수소리니어 발전기 시스템에서 선형 리니어 왕복 운동을 모사한 Proto-type 모델을 제작하여 기기의 전기적, 열적 안정성에 대하여 시험과 해석을 통해 검증 하였다.

2.1 1kW 수소리니어 발전기 구성

2.1.1 System Layout

Fig. 1은 1kW급 수소리니어 발전기 시스템 구성을 나타낸 것으로 피스톤의 좌우 왕복 운동에 의해 양쪽에 설치된 프리 피스톤 엔진에서 발전이 이루어지는 분산형 전원 장치를 보여주고 있다. 본 기기는 엔진 자체에서 냉각이 이루어지므로 발전기 쪽으로 피스톤을 타고 오는 전열량이 다소 발생하고 있지만 시스템 전체에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

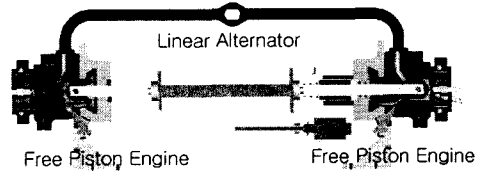


Fig.1 Configuration of Hydrogen Powered Linear Generation System

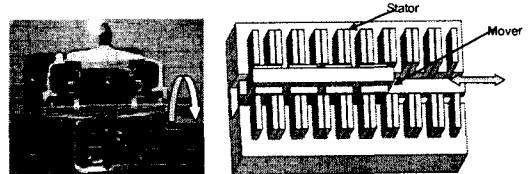


Fig.2 Conventional Generator vs Linear Generator

Fig.2의 좌측은 일반적인 회전형 발전기(그림은 소형전동기 사진)를 나타내고 있고, 우측은 Fig.1의 발전 시스템에 적용되는 선형발전기의 내부 구조를 간략화하여 나타내고 있다. 회전형 발전기는 엔진의 크랭크 샤프트 회전에 의한 자속의 단속과정에 의해 발전이 이루어지고, 선형 발전기는 프리 피스톤 엔진의 왕복운동에 의해 Mover가 좌우 왕복운동을 하면서 발전을 하게 된다.

2.1.2 해석조건

1) 3D Modeling & Grid generation

해석 대상 리니어 발전기는 Mover의 이동 방향을 기준으로 상·하, 좌·우가 서로 대칭이므로 해석 시간의 단축과 편의를 위해 Symmetry 기법을 적용하였으며, 이로 인해 Fig. 4와 같이 실제 모델의 1/4에 해당되는 영역만 격자를 생성하였다.

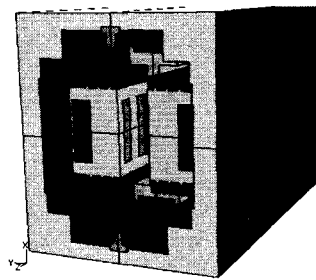


Fig.3 Linear Generator 3D Modeling

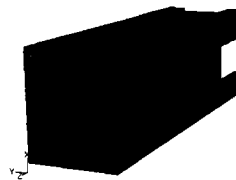


Fig.4 Linear Generator Grid generation

Table 1 체적당 열손실값 [W/m³]

H _i	30Hz	45Hz	60Hz
동 손	23386	52863	45533
철 손	76834	171096	243584
기계 손	163361	574804	1411255

Table 2 물성치 조건

	K, Conductivity [W/mK]	비고
Copper-Slot	0.13/0.13/227	Orthotropic
Core	45.2/45.2/1.97	Orthotropic
Mover-shaft	41.3	
Mover-magnet	8.95	
Air	0.0242	
Case	41.3	

2) 해석기법 및 경계조건

Mover의 거동을 고려한 열유동 해석은 해의 수렴성에 큰 영향을 주므로, 먼저 유동장에 대해 비정상상태로 계산한 후에 Energy를 정상상태 조건으로 계산하는 방법을 채택하였다.

이때 열원은 주요 발열부에 대해 Heat Source 항으로 처리하였으며 사용된 열손실 값은 table 1 과 같으며, 각 재료의 물성치는 table 2 와 같다.

3) 냉각설계 기준

- 주위온도 : 40℃
- 절연기준 : H종 (180℃)
- 온도상승 : 130℃

2.1.3 해석결과

1) 30Hz

Fig.5는 비교적 저출력인 30Hz(900rpm)에서 Mover의 이동방향을 기준으로 수직으로 1/2 자른 열해석 결과를 보여주고 있다.

기기 전체적으로 32.5 ~ 37.4℃ 사이의 열분포 계산 결과를 보여주고 있으며, 코일(Coil)과 코어(Yoke & teeth) 중심부에서 최고 37.2℃의 온도 분포를 보이고 있다. 이때의 온도상승은 약 15.6℃로 절연기준을 충분히 만족하고 있다.

또한 30Hz의 경우 Mover 이동에 따른 마찰열이 기기의 온도 상승에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

2) 45Hz

Fig.6은 45Hz(1350rpm)에서의 온도 분포를 나타내고 있는데, 기기 전체적으로 41 ~ 52.4℃ 사이의 열분포 계산 결과를 보여주고 있다.

내부 온도 분포가 가장 높은 코일과 코어부의 최고 온도는 약 52.4℃로 29.3℃의 온도상승을 보이고 있으며, 케이스 외벽은 약 41.0℃로 계산되었다.

30Hz와 마찬가지로 코어와 코일의 전기적 손실이 주 발열원으로 작용하고 있으며, 30Hz에 비해 Mover 이동부에서의 마찰 손실로 인한 발열이 증가하였음을 확인할 수 있다.

Table 3 주요부 온도 (30Hz)

초기 외기 온도	외벽 온도	고정자 상부 온도	Δt
21.6℃	32.5℃	35.8℃	14.2℃

Table 4 주요부 온도 (45Hz)

초기 외기 온도	외벽 온도	고정자 상부 온도	Δt
23.1℃	41.0℃	49.2℃	26.1℃

Table 5 주요부 온도 (60Hz)

초기 외기 온도	외벽 온도	고정자 상부 온도	Δt
23.1℃	54.8℃	66.2℃	43.1℃

3) 60Hz

Fig.7은 60Hz(1800rpm)에서의 온도 분포를 나타내고 있다. 이때, 온도가 가장 높은 코일 & 코어부는 최고 약 72.8℃로 49.7℃의 온도상승을 보이고 있으며, 케이스 외벽은 최고 약 62.6℃로 계산되었다. 이때 내부 온도는 저주파수 대역과 달리 Mover와 Rail부에서 왕복 운동에 의한 발열이 크게 발생되고 있는 모습을 예측할 수 있다.

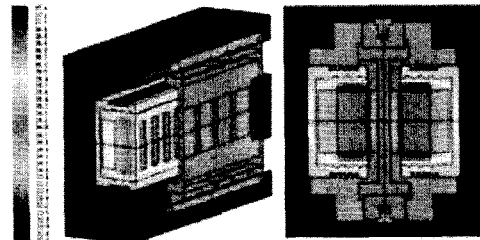


Fig.5 Contours of Celsius temperature (30Hz)

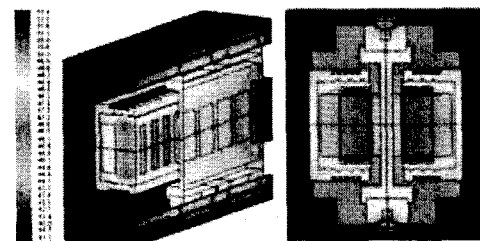


Fig.6 Contours of Celsius temperature (45Hz)

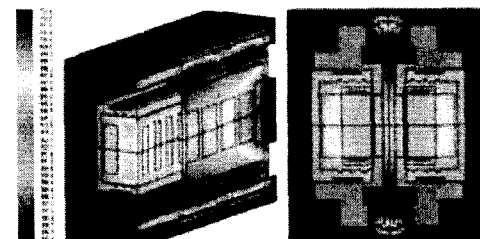


Fig.7 Contours of Celsius temperature (60Hz)

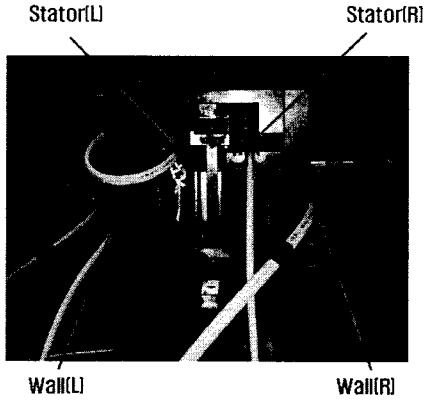


Fig.8 Measurement of Linear Generator Temperature

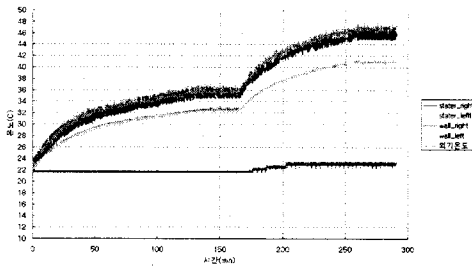


Fig.9 Measurement Data of Temperature Rise Experiment

2.2 수소리니어 발전기 온도상승 실험

2.2.1 실험조건

1) 신뢰성 있는 결과 검토를 위해 1kW(60Hz)의 온도상승 시험을 수행해야 하나 발전기 구동부의 기계적인 문제로 정격 출력보다 낮은 영역(30Hz, 45Hz)에서만 실험을 수행하였다.

2) 실험장비

발전기 온도측정을 위해 보정된 열전대(K-type)를 사용하였고 발전기 내외부의 전자기장에 의한 전류노이즈를 차단하기 위하여 쉴드된 타입을 사용하였다. 측정된 전류 Data를 온도로 환산해주기 위하여 Agilent사의 DAQ 장비를 사용하였고 CFD 경계조건 및 결과비교를 위해 외기온도, Stator, 외벽과 구동부의 온도 등을 측정하였다. Fig.8은 발전기에 부착된 열전대의 위치를 보여주고 있다.

2.2.2 실험결과

1) Fig.9는 1kW급 수소리니어 발전기 온도상승 시험 결과를 보여주고 있다. 평균 포화온도시간(ATRT)은 약 130분~150분이며 30Hz의 경우 약

14.4℃ 45Hz의 경우는 약 23.9℃의 온도 차이를 보였다.

2) 시험결과 30Hz, 45Hz 모두 고정자 포화온도가 36℃, 47℃로 발전기 내부 절연물인 H중 절연 허용온도 180℃를 충분히 만족 시킴을 알 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 수소리니어 발전기 온도상승 시험과 의 CFD를 이용한 Mover 거동에 의한 방열 성능을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

온도상승 실험결과와 상용 CFD code를 이용한 해석결과가 평균 5% 내외의 차이를 보이고 있어 해석기법에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었고 동일한 기법을 이용하여 60Hz의 온도 상승치를 예측할 수 있었다.

최고 Coil 온도 상승(TCTR)을 보이고 있는 60Hz의 경우, 온도가 가장 높은 Coil에서 평균 69.0℃의 온도 분포를 보이고 있으며 이때의 온도 상승은 45.9℃로 H중 절연기준을 충분히 만족하고 있다.

발전기 내부 온도상승을 예측한 결과 Core와 Coil의 전기적 손실, Mover 거동에 의한 기계적 손실 등에 의해 많은 열이 발생하지만, 대부분의 열은 전도와 대류에 의해 외부로 방출되어 내부 방열 성능에는 문제가 없음을 확인하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 프론티어연구개발사업(수소에너지사업단) 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] 이창준, 2005, "수소리니어 발전기 내부 열유동해석", 2005 CFD conference, pp. 104
- [2] 양관석, 이호준, 정원봉, 2003, "CFD를 이용한 전동기 냉각성능 개선에 관한 연구", 대한설비공학회, 동계학술대회논문집