

## 프로펠러 레이싱에 대비한 SOFC/GT 하이브리드시스템의 대책 방안에 관한 기초적 연구

김명환\* · 임태우\*

(원고접수일 : 2007년 12월 31일, 심사완료일 : 2008년 2월 15일)

### A Study on Proposing Practicable Configurations against Propeller Racing for SOFC/GT Hybrid System in Ships

Myoung-Hwan Kim\* · Tae-Woo Lim\*

**Abstract** : The purpose of this study is to propose practicable configurations against Rapid Load Down like propeller racing of ships which have been using SOFC/GT hybrid system on board. This paper suggests four kinds of countermeasures against propeller racing. The types A and B keep a fixed load of SOFC and save a surplus electric power to a storage system. In types of C and D, the load of SOFC is changed with the propeller racing. The best desirable countermeasure for Rapid Load Down depends upon the size of the ship, the propulsion power, and the characteristics of the engine system.

**Key words** : SOFC/GT hybrid system(고체산화물형 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템), Propeller racing(프로펠러 레이싱), Countermeasure(대응책), Rapid load down(급부하감소), Surplus electric power(잉여전력)

#### 1. 서 론

석유에너지원의 고갈과 환경오염의 심각성은 지속가능하고 친환경적인 새로운 에너지원의 필요성을 부각시키고 있다. 또한 최근의 고유가는 동력발생장치의 고효율화도 요구하고 있다. 대형선박의 연료 및 동력발생장치의 주류는 20세기 초반에 고체연료와 외연기관에서 액체연료와 외연기관으로 1,2차 오일쇼크를 거치면서 다시 액체연료와 내연기관으로 변해 왔다. 육상용 수송장치인 자동차도

선박과 유사한 변화를 거쳐 현재 액체연료와 내연기관으로 주종을 이루고 있지만, 최근 대체연료, 친환경성, 고효율화 등을 목적으로 하이브리드시스템, 연료전지시스템이라는 새로운 개념의 자동차들을 선보이고 있다. 이런 자동차산업 변화와 새로운 인프라의 구축은 자연스럽게 선박에도 영향을 미치겠지만 현재로서는 개념적 구상과 실험적 수준 정도에 머물러 있는 듯하다<sup>[1]</sup>. 최근 동력 발생·전달 장치 배치의 유연성에 따른 공간 활용도 증가 그리고 추진기의 고성능화 등의 이유로 선박의 추

\* 교신저자 : 한국해양대학교 기관시스템공학부

\* 한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail : mhkim@hhu.ac.kr, Tel : 051)410-4267

진방식은 기계식에서 전기식으로 옮겨가는 경향을 보이고 있다<sup>[2]</sup>. 연료전지시스템은 전기식 추진방식을 채용하기에 가장 적합한 동력발생장치이며 대체연료, 친환경성 및 고효율화도 함께 추구할 수 있는 장점을 가지고 있다.

연료전지는 작동온도에 따라 저온형과 고온형으로 나누어지나 막대한 연료를 사용하는 대형선박 동력발생장치에는 열효율이 높은 고온형 연료전지(SOFC, MCFC)<sup>[3]</sup>의 사용이 적합하다. 그리고 더욱 고효율화를 추구하기 위하여 GT와 결합한 하이브리드시스템이 검토될 수 있다. 그러나 고온형 연료전지는 부하변동에 따른 스택온도 변화에 대단히 취약하여 스택의 손상 및 수명단축 등의 문제를 야기하므로 운전에 주의를 기울여야 한다. 대형 선박의 동력발생장치의 정상적인 운전 모드는 거의 정부하 상태인 대양 항해 운전과 부하가 수시로 변동하는 입·출항 운전으로 나누어지며 빈도는 낮지만 비정상적인 운전 모드로 황천항해 중에 발생하는 프로펠러 레이싱(propeller racing)에 대한 운전 등이 있다.

본 연구에서는 후술하는 SOFC/GT 하이브리드시스템<sup>[4], [5]</sup>의 안정된 시스템의 구축을 위하여 프로펠러 레이싱과 같은 순간적 비정상 부하감소의 경우에 대한 대책 방안을 정성적으로 검토하고자 한다.

## 2. 연구 대상 및 범위

### 2.1 SOFC/GT 하이브리드시스템

고온형 연료전지인 SOFC를 더욱 고효율화 하기 위하여 G/T와 결합한 하이브리드시스템이 있다. 이 시스템은 에너지효율이 운항 경제성의 평가에 큰 영향을 미치는 대형 선박의 동력발생장치로 적합하다고 하겠다. Fig. 1은 SOFC/GT 하이브리드시스템의 개략도를 나타낸다. 다양한 연료가 사용될 수 있지만 본 연구검토에서는 NG로 하였다. 연료는 폐열을 이용하는 열교환기에서 연료전지 작동온도 근방까지 가열되며 탈황장치를 거쳐 스택의 연료류으로 공급된다. 스택으로 공급되는 공기는 G/T 발생동력의 일부로 구동되는 공기압

축기를 거쳐 열교환기에서 가열된다. 스택으로 공급되는 연료와 공기의 일부는 경우에 따라 연소기로 직접 보내어져 G/T 부하를 조절하는 목적으로도 사용될 수 있다. 스택으로 공급된 연료는 개질되고 전기화학반응을 통하여 전기적 에너지를 발생한다. 개질된 연료가 스택 내를 유동하며 반응하고 소비될 때 전극표면에서는 반응물질(수소)의 농도가 변화하여 발생전압에 영향을 주는 비가역성의 농도과전압이 발생한다. 이 농도과전압을 줄이기 위하여 스택의 연료이용률을 낮추며 연료는 반응물질농도 10~20% 정도로 스택에서 배기된다. 고온의 이 잔여 연료는 스택의 공기극에서 배출되는 고온공기와 혼합·연소하여 G/T를 구동하는 에너지원이 된다. G/T는 발전기를 구동하여 부가적 전기에너지를 생산하며 일부의 동력은 공기압축기의 구동에도 사용된다. G/T에서 배출되는 연소가스는 열회수용 열교환기를 거쳐 배기된다. 선박에서 필요한 추진동력은 스택과 G/T에서 발생한 전력을 변조하여 얻으며 추진기는 연결된 전기모터에 의하여 구동된다. 아울러 선내에서 필요한 기타 전기동력도 함께 발생시키며 적절히 변조하여 공급한다.

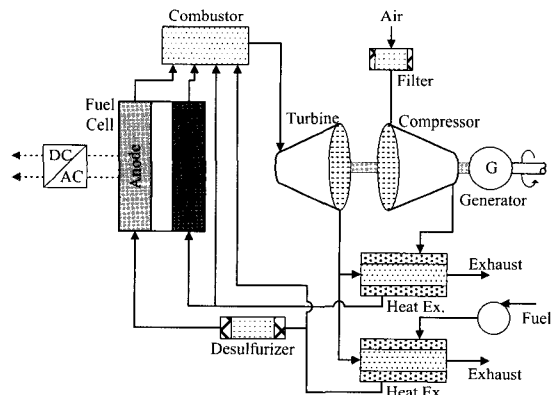


Fig. 1 Schematic diagram of SOFC/GT hybrid system

### 2.2 프로펠러 레이싱의 영향

프로펠러 레이싱이란 선박이 항해 중에 프로펠러가 수면 위로 돌출하여 공전하는 현상으로 주로 황천 항해 중에 발생한다. 프로펠러 레이싱이 발생

하면 순간적으로 부하가 급감소하기 때문에 제어하지 않으면 회전속도의 급증가로 동력발생장치 및 전달장치에 손상의 우려가 높아진다. 기관실이 선미에 배치되는 구조와 함께 선박 대형화의 추세는 프로펠러 레이싱의 발생빈도를 한층 줄였으며 아울러 정확한 기상예보시스템과 선박의 고속화는 레이싱의 우려가 높은 항천지역을 회피하도록 도와주고 있다. 예전보다 발생빈도는 많이 줄긴 하였지만 이에 대비한 제어시스템은 선박의 안전을 확보하기 위하여 반드시 갖추어야 한다. 현재의 내연기관시스템에서는 조속기가 내연기관에 공급되는 연료를 급감소시킴으로서 순간적 비정상 부하감소에 대한 속도제어를 하고 있다. 그러나 SOFC/GT 하이브리드시스템에서는 연료의 급감소는 스택 내부의 온도 변화를 초래하여 수명 단축과 치명적 손상을 야기할 수 있다.

프로펠러 레이싱의 주기<sup>[6]</sup>는 파랑상태, 선체 길이, 방형계수, 흘수, 선속 등의 영향을 받는 선체운동의 중요(pitching) 주기와 밀접한 관계가 있으며 일반적으로 수초 이내로 평가되고 있다.

### 3. 순간적 비정상 부하감소 대책

#### 3.1 대책 방안

SOFC/GT 하이브리드시스템이 선박의 추진동력 발생장치로 사용되는 경우 전술한 바와 같이 항천 항해시 장치와 선박의 안전을 확보하기 위하여 프로펠러 레이싱과 같은 비정상적이고 순간적인 부하감소에 대한 대책이 마련되어야 한다. 대책 방안으로는 부하변동에 따른 스택 온도변화를 억제하기 위하여 스택의 출력을 일정하게 유지하는 방법과 스택의 온도 유지를 위한 제어시스템이 따로 필요하겠지만 부하에 따라 스택의 출력을 조절하는 방법이 있을 수 있다.

Fig. 2, 3은 연료전지 스택의 출력을 일정히 유지시켜 스택의 온도변화를 극력 억제시킴으로서 장치의 안전을 확보하는 대책 방안의 개략도를 나타내고 있다. Fig. 2에서는 레이싱으로 부하가 급감하는 경우에 추진동력으로 사용하고 남은 잉여전력을 배터리에 전기적 에너지로 충전하였다가 출력

회복시에 방전하는 방식(Type A)을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 3은 가열열원용으로 보일러를 이용하는 선박에서 잉여전력을 보일러의 열에너지로 저장하는 방식(Type B)을 나타내고 있다. Type A, B 이외에도 스택의 출력을 일정히 유지하기 위하여 관성 휠을 사용하는 방법 등이 있겠으나 채용가능성의 측면에서 상기의 두 방안만을 제안한다. Fig. 4, 5, 6은 연료전지 스택의 출력을 추진부하의 변동에 따라 조절되는 방식의 개략도로 Fig. 4, 5는 스택에 공급되는 연료를 부하에 따라 제어하는 방식(Type C-1, 2)을 Fig. 6은 연료의 공급을 일정히 유지하는 방식(Type D)을 각각 나타내고 있다. Type C-1, 2의 방식은 스택의 입구 또는 출구에서 공급되는 연료 또는 미반응물질을 스택의 출구 농도에 따라 제어하여 가압펌프의 입구로 되돌리는 방식이며 스택의 온도를 일정히 유지하기 위한 별도의 제어시스템이 요구된다. Type D는 레이싱이 수초간의 순간적 부하변동이며 발생빈도가 대단히 낮음을 고려 이에 대한 대책을 단순히 가져가기 위하여 공급되는 연료를 제어하지 않는 방식으로 과잉 공급된 연료는 스택의 출구에서 미반응물질로 배기된다. 배기된 미반응물질은 연소에서 연소되어 G/T에서 동력발생용으로 또는 스택의 온도유지를 위한 열에너지로 사용되거나 외기로 방출하는 방식으로 에너지 효율사용이라는 측면에서만 검토한다면 적절한 대책이라고 할 수 없다.

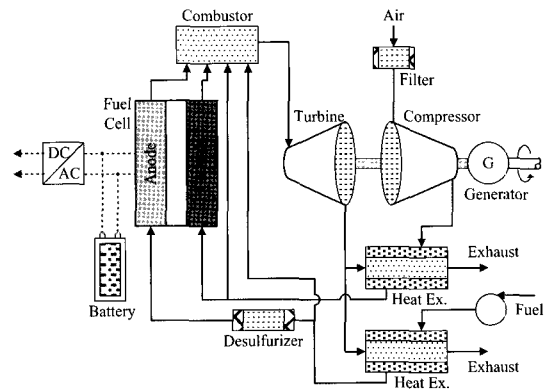


Fig. 2 Schematic diagram of SOFC/GT hybrid system (Type A)

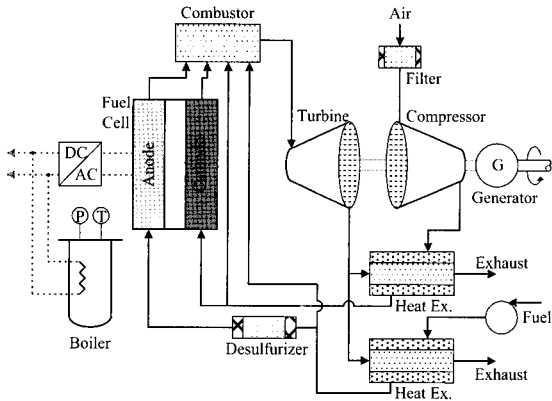


Fig. 3 Schematic diagram of SOFC/GT hybrid system (Type B)

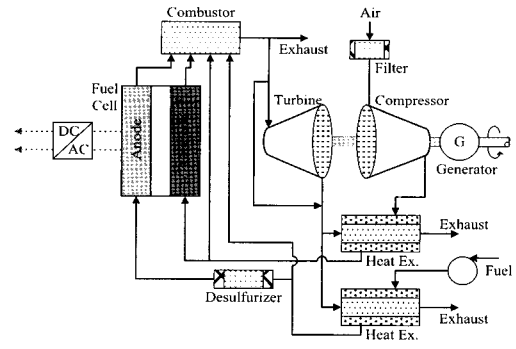


Fig. 6 Schematic diagram of SOFC/GT hybrid system (Type D)

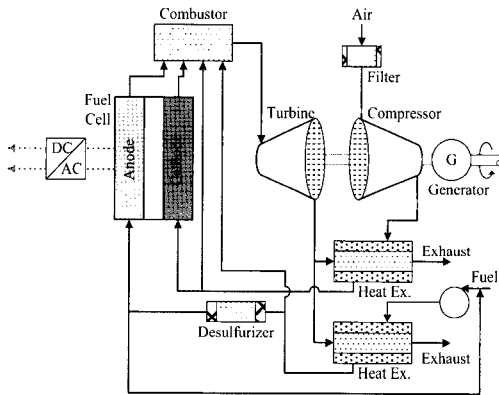


Fig. 4 Schematic diagram of SOFC/GT hybrid system (Type C-1)

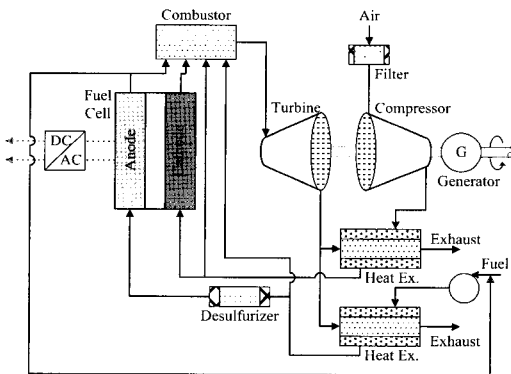


Fig. 5 Schematic diagram of SOFC/GT hybrid system (Type C-2)

### 3.2 대책 방안의 비교

Type A는 스택의 출력이 일정히 유지되며 연료 및 공기의 공급량에 변화가 없으므로 스택의 온도제어가 용이한 비교적 단순한 시스템이다. 그리고 순간적 추진부하 감소시에 발생하는 잉여전력을 배터리에 충전하고 출력의 회복시에 사용하므로 에너지(공급연료)의 손실이 발생하지 않는 시스템이나 대용량의 충전장치를 필요로 하므로 초기투자비, 설치 공간, 중량의 증가를 감수해야 하는 단점이 있다. 또한 충전장치도 전기이중층 현상을 이용하는 슈퍼캐패시터나 리튬이온전지 등과 같이 수초내의 순간적 잉여전력을 급속 충전할 수 있는 장치라야 한다. 충전장치의 용량은 잉여전력×레이싱 주기×레이싱 연속성×안전율로 계산할 수 있다. 예를 들어 잉여전력 10,000kW, 레이싱 주기 3sec, 연속 2회, 안전율 1.5로 할 경우 충전장치의 필요 용량은 25kWh이다. 여기서 레이싱의 연속성이란 레이싱이 발생한 뒤 충전에너지를 방전할 기회 없이 재차 발생하는 레이싱의 횟수를 말한다. 전술한 바와 같이 Type A는 대용량의 충전장치가 요구되는 단점이 있으나 선박의 안전을 위한 비상전원충전시스템(수kWh~수십kWh)과 연계하여 구성한다면 효과적인 방법이 될 수 있다.

Type B는 Type A처럼 스택의 출력을 일정히 유지하는 방식으로 잉여전력을 배터리 대신 보일러에 열에너지로 변환하여 저장하며 에너지의 손실이 없는 비교적 간단한 방법이라 하겠다. 그러나 보일러를 레이싱 대책의 전용으로 사용하기에는 초기투

자비, 설치 공간 및 중량의 증가 등 단점이 너무 크다. 연료전지를 추진 및 선내 동력발생용으로 사용하는 경우 에너지원을 전기로 일원화하여 사용하는 것이 바람직하겠지만 선적화물 등 가열의 요소가 많은 선박에 있어서 전기절연과 같은 안전의 문제와 관리 등을 고려할 때 직접전기가열식과 스팀가열식 중에서 어떤 방식이 더욱 적절한지는 따로 검토되어야 할 것이다. 그러나 가열을 위한 목적으로 스팀발생용 보일러의 운용을 필요로 하는 선박이라면 Type B도 레이싱에 대한 적절한 대응책으로 검토될 수 있다. 잉여전력의 흡수에 따른 보일러내의 압력상승은 보일러의 용량, 잉여전력의 크기에 따라 다르다. 예를 들면 잉여전력 10,000kW, 레이싱 주기 3sec, 보일러 용량 2000kg/h, 700kPa로 할 경우 레이싱 주기 동안의 압력상승은 약 30kPa 정도이다.

Type C-1, 2는 레이싱에 의한 추진부하의 급감소에 따라 스택의 입구 또는 출구에서 과잉 공급되는 연료 또는 미반응물질을 가압펌프의 입구로 되돌리는 방식으로 Type D와 비교하여 과잉 공급되는 연료의 소모를 줄일 수 있다. 그러나 Type C-1의 경우 공급연료 제어밸브와 스택 사이의 연료는 제어가 불가능하므로 일부 연료의 소모가 불가피하다. 한편 Type C-2는 연료가 스택을 유동하는 동안 수소로 개질되거나 부하의 감소로 반응에 사용되지 못하고 스택의 출구로 유출되므로 재사용을 위하여 스택의 출구 혼합가스(수소, 메탄, 이산화탄소, 수증기 등)를 가압펌프 입구로 되돌리는 방식이다. 따라서 연료의 소모는 없지만 내부연료 개질의 경우 과잉 공급된 연료로 인한 예열과 개질의 흡열반응으로 스택의 상당한 온도변화를 초래하게 된다. 결국 Type C-1, 2는 급부하 변동에 따른 연료량, 공기량 및 스택 온도의 신중한 제어가 불가피하며 이를 위한 별도의 제어시스템이 반드시 마련되어야 한다.

스택 온도제어는 별도로 하고 Type D는 레이싱에 대한 비교적 간단한 대응시스템이나 스택을 관통하는 미반응 물질의 대부분을 연소 배기해야 하는 에너지손실이 발생하게 된다. 그러나 이 손실에 의한 경제적 피해액은 그다지 크지 않다. 예를

들어 감소부하 10,000kW, 레이싱 주기 3sec, 연료전지 효율 60% 그리고 수소와 산소의 반응에서 저위발열량(241.8kJ/mol)을 기준으로 할 경우 레이싱 주기당 미반응 연료의 양은 1.16Nm<sup>3</sup>이고 최근 메탄의 소비자 가격(640원/Nm<sup>3</sup>)으로 환산하면 레이싱 주기당 약 740원이 된다. 또한 최근 선박의 대형화와 정확한 기상예보시스템의 구축은 선박이 레이싱 발생 환경에 노출되는 빈도가 상당히 줄었으므로 Type D로 인한 항해중 총에너지 손실은 그다지 크지 않다고 평가된다.

만약의 경우를 항상 대비해야 하는 선박은 프로펠러 레이싱에 대한 안전대책을 반드시 갖추어야 하나 어떤 방안과 시스템이 가장 적합할 것인가는 해당 선박의 크기, 추진마력, 이용할 수 있는 기관시스템 및 장치들과 깊은 관련성을 가진다. 예를 들어 선박이 대형화될수록 사용되는 전체 연료량에 대한 레이싱 주기 동안 손실되는 연료량의 비는 대단히 경미하므로 장치의 안전을 지키는 방향으로의 Type A 또는 Type B와 같은 시스템이 적합할 것이다. 아울러 기존의 비상전원축전시스템 또는 보일러와 연계되어 사용할 수 있을 경우라면 초기 투자비 등의 문제도 경감할 수 있을 것이다. Type C는 입출항 등 정상적인 부하조정에 대한 연료량의 제어시스템과 연계하여 사용할 수 있는 경우, Type D는 LNG선의 GCU처럼 과잉의 연료를 태워 예열, 온도유지 등으로 사용하는 비교적 간단한 시스템의 구성을 위하여 적합할 것이다.

## 4. 결 론

본 연구논문은 SOFC/GT 하이브리드시스템을 선박추진 및 선내전기 동력발생용으로 사용하는 경우 안정적 시스템의 구축을 위하여 프로펠러 레이싱과 같이 항해중 비정상적이고 순간적으로 부하가 급감소하는 운전모드에 대하여 다음과 같은 정성적 대책방안들을 제안하고 있다.

SOFC는 고온형 연료전지로 부하감소에 따른 온도변화에 대단히 취약하므로 선박의 안전상 프로펠러 레이싱과 같은 부하 급감소에 대한 장치보호의 방안이 반드시 마련되어야 한다. 대응책으로는

연료전지 스택의 출력을 일정히 유지하여 스택내의 온도변화를 극력 억제하는 방안으로 Type A, B를 제안하고 있다. 또한 Type C, D는 부하감소에 따라 스택의 출력이 조절되는 방식으로 스택에 공급되는 연료량을 변동하는 방법과 일정히 하는 방법을 제안하고 그 장단점들을 비교하였다. 어떤 대응방안이 가장 적합할 것인가는 선박의 크기, 추진마력, 기관시스템의 구성장치들과 깊은 연계성을 가진다.

### 참고문헌

- [1] 김명환, "선박 동력발생용 연료전지시스템 기술 개발 전망에 대한 고찰", 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 제8호, pp. 924-931, 2007.
- [2] 문양경, "LNG운반선 전기 추진 계통의 개요", 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 제6호, pp. 652-664, 2007.
- [3] J. Larminie, A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Wiley, 2003`.
- [4] Marte Reenaas, "Solid Oxide Fuel Cell Combined with Gas Turbine versus Diesel Engine as Auxiliary Power Production Unit Onboard a Passenger Ferry: a Comparative Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Assessment", Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2005.
- [5] Jens Palsson, "Thermodynamic Modelling and Performance of Combined Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Systems", Doctorial Thesis, Lund University, 2002.
- [6] A. Shinkai, S. Wan, Y. Konishi, "Propeller Racing of Ocean-going Ships", 일본조선학회논문집, 제182호, pp. 435-444, 1997.

### 저 자 소 개



**김명환(金明煥)**

1959년생 1월생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업(공학사), 1983년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(공학석사), 1994년 일본 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1984년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수



**임태우(林兌禹)**

1970년생 6월생, 1995년 부경대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1997년 부경대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 큐슈대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2005년~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수