

냉각제 혼합성능 시험용 장치의 제작

구현곤*[#], 배영관*, 김진희**

*한화디펜스 종합연구소, **국방과학연구소

Manufacture of Apparatus for Coolant Mix Performance Test

Hyoun-Kon Ku^{*,#}, Young-Gwan Bae^{*}, Jin-Hee Kim^{**}

^{*}R&D Division of Hanwha Defense, ^{**}Agency for Defense Development

(Received 16 November 2021; received in revised form 30 November 2021; accepted 10 December 2021)

ABSTRACT

The test apparatus that can be protected from the high-temperature combustion flame and coolant injection was successfully manufactured. In this study, the coolant-injection module had a controllable consistent pressure, and the entire combustion module was protected using a nonflammable composite liner. Every flange was designed in accordance with the DIN standard, and the entire body of the module was designed in accordance with the EN 13445 code. Additionally, the hydraulic pressure test was performed in accordance with the 2014/68/EU directive and EN 13445 standard. Finally, after manufacturing, performance tests (such as pressure tests) were conducted to verify the reliability and safety.

Keywords : Coolant Mix Performance test(냉각제 혼합성능 시험), Hydraulic Pressure Test(수압 시험), Coolant Injection(냉각제 분사), High-temperature Combustion Flame(고온 연소 화염)

1. 서 론

냉각제 혼합성능 시험이란 고온 (1,200 ~ 3,000 [K])의 고압 연소 화염에 냉각제(물 또는 에탄올 등이 함유된 혼합물)를 분사하여 연소 화염과 냉각제의 질량비에 따라 변화하는 혼합물의 온도와 압력을 측정하는 시험이다.

본 연구에서는 냉각제 혼합성능 시험을 수행하기 위한 시험 장치를 제작하는 것을 목표로 시험실 바닥에 설치된 연소기에서 생성되는 고온 연소 화염

에 대해 내압 성능 (70 [bar]) 및 내열 성능 (1,200 ~ 3,000 [K])을 만족하는 연소 모듈 조립체와 시험 시간 동안 일정한 압력으로 냉각제를 분사할 수 있는 냉각제 분사 시스템을 포함하는 시험 장치를 제작하는 것에 그 목적이 있다.

시험장치의 제작을 위해 적용되는 모든 플랜지의 설계는 시험실 연소기와의 체결의 편의를 위해 DIN 규격을 적용하여 설계하고 이를 검증하기 위해 2014/68/EU PED 지침과 EN 13445 Unfired pressure vessels 유럽 표준을 적용하여 수압시험을 실시하였다. 상용제품을 사용한 냉각제 분사장치의 고압질소 예비챔버도 동일한 기준을 적용하여 안전성을 검증하였다.

Corresponding Author : Hyounkon.ku@hanwha.com

Tel: +82-55-711-7647, Fax: +82-55-711-7960

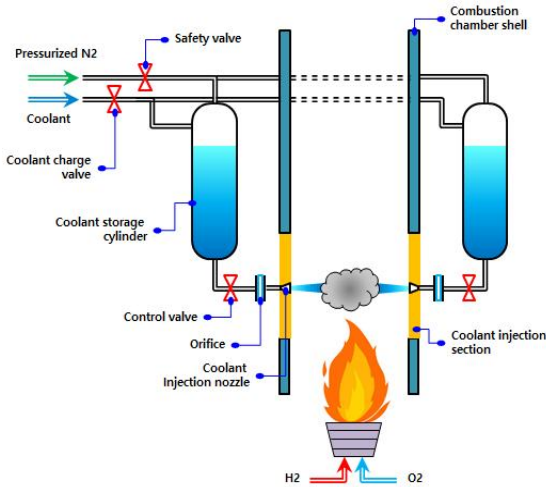


Fig. 1 Schematic of coolant mix performance test

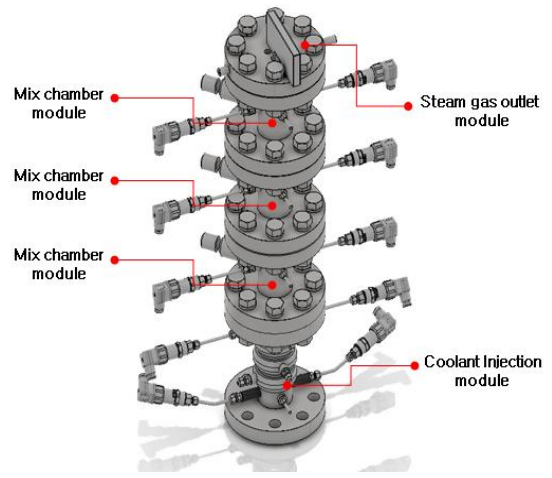


Fig. 2 Combustion module assembly

2. 시험 장치의 설계

2.1 연소 모듈 조립체의 설계

연소 모듈 조립체는 시험실의 연소기 상부에 조립되어 일정한 체적 하에서 형성되는 고온 고압의 연소 화염과 냉각제 혼합물의 온도와 압력을 측정하는 시험 장치 구성 품이다. 연소 모듈 조립체는 Coolant injection 모듈, Mix chamber 모듈, Steam gas outlet 모듈로 구성되어 있다.

2.1.1 Coolant injection 모듈의 설계

Coolant injection 모듈은 연소 모듈 조립체 가장 아래쪽에 조립되며 연소기에서 생성된 연소 화염에 냉각제를 분사하는 역할을 한다.

시험에서 요구하는 내압 성능 (70 [bar])을 만족할 수 있도록 DIN PN100 standard 규격을 적용하여 플랜지를 설계하였다. 또한 모듈 케이싱 내부를 관통하는 고온의 연소 화염에 견딜 수 있도록 SMC 복합재 라이너를 적용하였다. 이는 연소 모듈 조립체를 구성하는 모든 모듈에 동일하게 적용되었다.

Coolant injection 모듈의 모듈 케이싱에는 3열의 냉각제 분사 워터 자켓을 반영하였다. 각각의 냉각제 분사 워터 자켓에는 시험 조건에 맞춰 일정한 압력에 따라 냉각제를 분사 할 수 있도록 냉각제

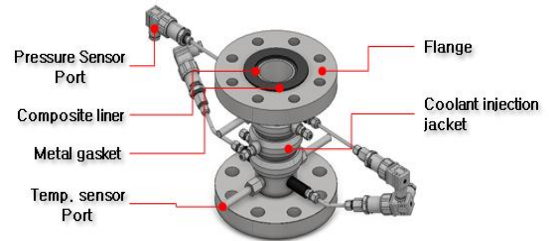


Fig. 3 Coolant injection module

노즐을 배치하였다. 냉각제 분사 워터 자켓을 기준으로 상, 하부에는 온도 및 압력 계측을 위한 센서 체결 부를 반영하였다.

2.1.2 Mix chamber 모듈의 설계

Mix chamber 모듈은 연소기에서 생성된 연소 화염이 Coolant injection 모듈을 지나면서 분사된 냉각제와 혼합될 수 있는 충분한 공간을 제공하는 역할을 한다. 연소 모듈 조립체에서 Mix chamber 모듈은 연소 화염과 냉각제의 충분한 혼합작용이 가능하도록 3단으로 적층하여 구성하였다.

시험에서 요구하는 내압 성능과 내열 성능을 만족할 수 있도록 Coolant injection 모듈과 동일한 DIN PN100 standard와 SMC 복합재 라이너를 적용하였다.

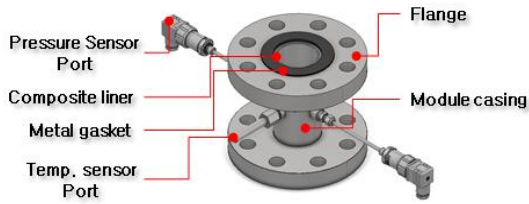


Fig. 4 Mix chamber module

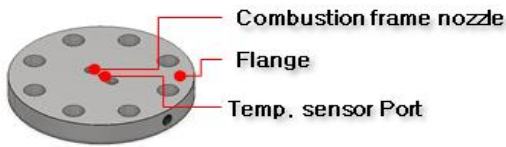


Fig. 5 Steam gas outlet module

Mix chamber 모듈의 케이싱에는 온도 및 압력 계측을 위한 센서 체결 부를 반영하였다.

2.1.3 Steam gas outlet 모듈의 설계

Steam gas outlet 모듈은 연소 모듈 조립체의 최상단에 조립되어 연소 모듈 조립체 내부에서 형성되는 연소 화염과 냉각제의 혼합물에 대한 압력 버퍼를 걸어주어 온도와 압력의 계측을 도와주는 역할을 한다.

시험에서 요구하는 내압 성능과 내열 성능을 만족할 수 있도록 Coolant injection 모듈과 동일한 DIN PN100 standard와 SMC 복합재 라이너를 적용하였다.

Steam gas outlet 모듈의 상단에는 연소 화염과 냉각제의 혼합물이 배출되는 노즐을 반영하였는데, 노즐의 크기를 변경하여 연소 모듈 조립체 내부에 형성되는 압력을 조절할 수 있도록 다양한 크기의 노즐 형상을 반영한 모듈을 제작하였다.

2.2 냉각제 분사장치의 설계

냉각제 분사장치는 고압질소 예비챔버와 연소모듈 조립체 사이에서 냉각제를 저장하거나 시험장치 작동 시 냉각제를 Coolant injection 모듈로 공급하는 역할을 한다.

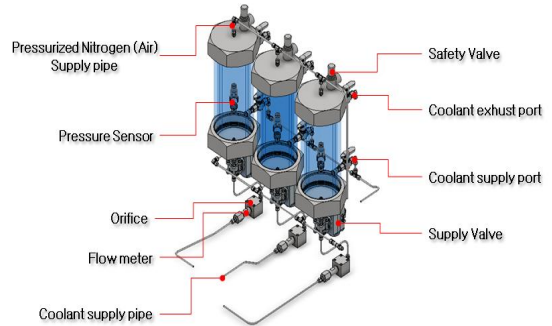


Fig. 6 Coolant storage tank

냉각제 분사장치는 냉각제를 저장하는 냉각제 저장용기, 냉각제 분사압력을 제어하여 분사량을 조절하는 제어 밸브 및 오리피스 등으로 구성된다.

냉각제 저장 용기는 Coolant injection 모듈에 배치되어 있는 3열에 냉각제 분사 자켓에 각각 연결되기 위해 총 3개의 용기와 연결배관으로 구성되어 있으며 각각의 저장 용기는 내압 성능 (70 [bar])을 만족하도록 설계하였다.

냉각제 저장 용기에는 내부 압력 계측을 위한 압력 센서 설치 부와 용기 내부로 냉각제를 공급하는 냉각제 공급 포트, 냉각제 분사 시 에너지원으로 사용되는 고압 질소의 공급 배관, 냉각제 저장 용기의 과도한 가압으로 인한 사고 방지를 위한 안전 밸브 등이 반영되었다. 냉각제 분사 압력을 제어하는 오리피스는 교체 형으로 제어 밸브 하단에 연결되어 있으며 오리피스 반대편에는 터빈형 유량계를 설치하여 냉각제 분사량을 직접적으로 계측할 수 있도록 설계 하였다.

2.3 고압질소 예비챔버의 설계

시험실에 공급되는 고압 질소를 냉각제 분사 에너지원으로 직접 사용하기에는 유량이 부족하므로 별도의 예비챔버를 두어 시험에 필요한 용량의 고압질소를 저장하는 고압질소 예비챔버를 반영하였다. 고압질소 예비챔버는 시험에 필요한 압력을 유지할 수 있도록 압력 조절용 레귤레이터와 고압질소를 냉각제 분사장치로 공급하기 위한 공급 배관, 제어밸브, 예비챔버 내부 압력계측용 압력센서 체결 부를 반영하였다.

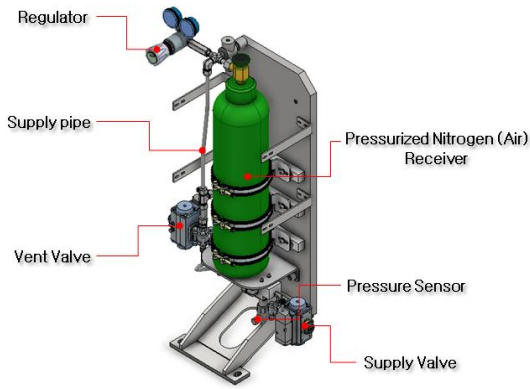


Fig. 7 Pressurized nitrogen receiver

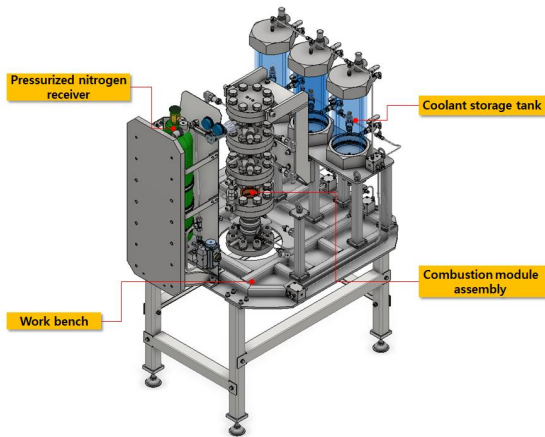


Fig. 8 Design of apparatus

3. 시험 장치의 제작

3.1 시험 장치의 제작

설계 결과를 바탕으로 시험 장치를 제작하였다. 시험 장치의 주요 구성품인 연소 모듈 조립체와 냉각제 저장 용기는 냉각제와 연소 화염의 혼합물 등으로 인한 부식 방지를 위해 스테인리스스틸 계열의 소재 SUS304를 사용하여 제작하였다.

시험장치의 구성 품들이 설치되는 워크벤치는 가공성과 용접성이 좋은 SS275 강재를 사용하여 제작하였다. 연소 모듈 조립체의 각 모듈 사이에는 기밀



Fig. 9 Manufacture of apparatus

용 Full-face metal seal을 적용하여 누기 방지를 하였다.

3.2 시험 장치의 성능 검증 및 인증

제작이 완료된 시험 장치의 냉각제 분사 성능을 검증하였다. 냉각제 저장 용기에서 계측된 압력과 Coolant injection 모듈의 냉각제 분사 워터 자켓에서 계측된 압력의 차압을 통해 냉각제 분사 조절 오리피스스의 성능을 검증하였고 터빈형 유량계 계측 값과 Coolant injection 모듈에서 실제 분사된 냉각제의 질량을 비교하여 분사 성능을 검증하였다.

성능 시험은 각 Case에 따른 시험 압력을 고압질소 예비챔버에 충전 후 0~7초까지 챔버 내부 압력을 계측한 후 8초 워터자켓 1열 분사, 14초 워터자켓 2열 분사, 19초 워터자켓 3열 분사를 실시하여 워터자켓이 동작할때마다 변화하는 고압질소 예비 챔버 내부의 압력과 실제 분사된 냉각제의 양을 계

측하여 각각의 워터자켓의 토출계수를 확인하는 순서로 진행하였다.

성능 시험 결과 각각의 워터자켓의 토출 계수는 0.5로 모두 동일함을 알 수 있었고 반복시험을 통해 실제 분사된 냉각제의 양을 계측하여 동일한 성능으로 작동함을 확인하였다.

내압 성능을 만족해야 하는 냉각제 저장 용기와 연소 모듈 조립체의 구성품들은 수압 시험을 통해 성능을 검증하였다.

Table 1 Test case of performance test

Case No.	Injection Pressure [bar]
1	10
2	40

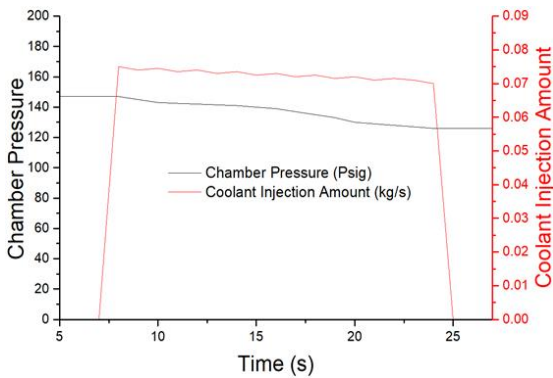


Fig. 10 Test result of case 1 (10 [bar])

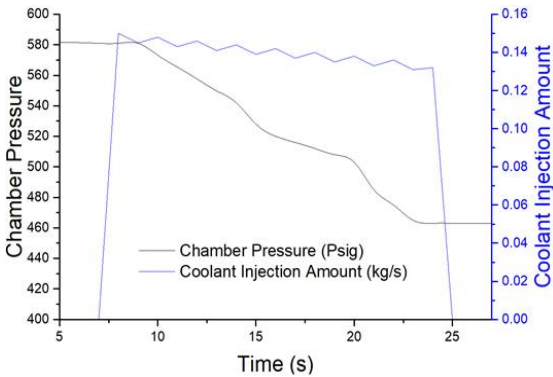


Fig. 11 Test result of case 2 (40 [bar])

Table 2 Test result of performance test

Case No.	10 [bar]	40 [bar]
Injection Amount	Max: 0.075 [kg/s] Min: 0.07 [kg/s]	Max: 0.15 [kg/s] Min: 0.132 [kg/s]
Average	0.0725 [kg/s]	0.141 [kg/s]
Injection Pressure	Max: 147 [Psig] Min: 126 [Psig]	Max: 581 [Psig] Min: 463 [Psig]
Average	136.5 [Psig]	522 [Psig]
Discharge Coefficient	0.5	0.5

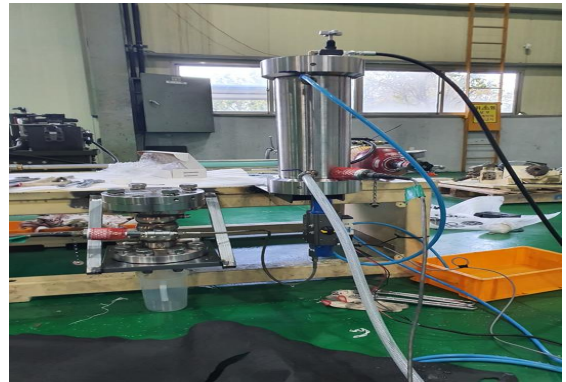


Fig. 12 Performance test of apparatus

내압 시험 전 시험장치 구성품 중 가장 내경이 큰 냉각제 저장 용기를 EN 13445-3,7.4.2 코드 설계 검증을 실시하였다. EN 13445에서 요구하는 Upper-Lower cover의 최소 두께는

$$e = \frac{P \times D_i}{(2f \times z) - P} \quad (1)$$

여기서,

P = 내부 설계압력 [Mpa]

D_i = 내경 [mm]

f = STS304의 허용응력 [MPa]

z = 용접 Factor

식 (1)을 통해 계산된 냉각제 저장 용기 Upper

-Lower cover의 최소 두께는

$$e = \frac{P \times D_i}{(2f \times z) - P}$$

$$= \frac{7 \times 163}{(2 \times 171.7 \times 1) - 7} = 3.4$$

EN 13445에서 요구하는 최소 두께는 3.4mm이나 실제 두께는 13.5mm로 이를 만족한다.

또한, EN 13445에서 요구하는 Main shell의 두께는

$$e = \frac{P \times D_i}{(2f \times z) - P} \quad (2)$$

식 (2)을 통해 계산된 냉각제 저장 용기 Main shell의 두께는

$$e = \frac{P \times D_i}{(2f \times z) - P}$$

$$= \frac{7 \times 136.6}{(2 \times 171.7 \times 1) - 7} = 2.84$$

EN 13445에서 요구하는 최소 두께는 2.84mm이나 실제 두께는 14.3mm로 이를 만족한다.

내압 성능 검증은 시험실이 위치한 독일에서 사용하기 위해 2014/68/EU PED 지침과 EN 13445 Unfired pressure vessels 유럽 표준을 기준으로 100bar의 압력으로 가압하여 검증하였고, 이에 대한 인증을 획득하였다.



Fig. 13 Hydraulic pressure test and certificate

4. 결론

본 연구에서는 고온 고압의 연소 화염에 냉각제를 분사하여 연소 화염과 냉각제의 질량비에 따라 변화하는 혼합물의 온도와 압력을 측정하는 냉각제 혼합성능 시험에 사용되는 시험 장치를 제작하고 시험 장치의 성능시험과 수압시험을 통해 신뢰성과 안전성을 평가하였다.

시험장치의 제작을 위해 적용되는 모든 플랜지의 설계는 DIN 규격을 적용하여 설계하고 이를 검증하기 위해 2014/68/EU PED 지침과 EN 13445 Unfired pressure vessels 유럽 표준을 적용하여 수압시험을 실시하여 안전성을 검증하고 유럽사용 인증을 획득하였다.

또한, 장비의 신뢰성을 확인하기 위해 오리피스 성능 검증 및 유량 확인을 통해 시험 장치의 성능 검증을 완료 하였다.

본 연구를 통해 냉각제 혼합성능 시험에서 요구되는 내압, 내열 성능을 만족하는 시험장치를 성공적으로 제작하였다.

후 기

“이 논문은 국방과학연구소의 핵심기술(응용연구) 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. European Commission., “Pressure equipment“ Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, 2019.
2. Saile, D. and Kirchheck, D. and Gilhan, A. and Serhan, C. and Hannermann, V., “Design of a GH2/GOX Combustion Chamber for the Hot Plume Interaction Experiments at DLR,” in 8th European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicle, 2015.
3. Kirchheck, D. and Gilhan, A., “GH2/GO2 Supply Facility for Hot Plume Testing in the Vertical Test Section Cologne (VMK),: Technische,” Universitat Mi.nches, 2016.