



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

2행정 이중 연료엔진의 실린더커버 인코넬
면적 최적 설계에 관한 연구

A Study on Optimal Design of Cylinder Cover Inconel
in 2-stroke Dual Fuel Engine

울산대학교 산업대학원

자동차선박기술전공

이 현 석

2행정 이중 연료엔진의 실린더커버 인코넬
면적 최적 설계에 관한 연구

지도교수 이상구

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2023년 10월

울산대학교 산업대학원
자동차선박기술전공
이 현 석

이현석의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 이 상 구 (인)

심사위원 박 종 원 (인)

심사위원 김 병 재 (인)

울산대학교 산업대학원

2024년 1월

2행정 이중 연료엔진의 실린더커버 인코넬 면적 최적 설계에 관한 연구

이현석

울산대학교 산업대학원 자동차선박기술전공

국문요약

세계 무역 활성화에 따라 물동량과 운송량 증가로 선박연료 연소 후 배출되는 오염물질, 즉 선박 배출가스로 인한 대기오염 및 온실가스 또한 급격히 증가하여 해양 환경문제가 대두되고 있다. IMO(International Maritime Organization)는 해양 환경규제를 제정하여 선박 연료의 연소에 의해 발생하는 대기오염 저감에 대한 협약을 전 세계 선박에 적용하고 있다. 황산화물과 질소산화물 배출가스 기준 강화에 따라 이를 저감할 수 있는 친환경 연료를 주 동력원으로 사용하는 엔진이 주목받고 있다. 친환경 연료 중 메탄이 주 성분인 천연가스를 2차 동력원으로 사용하는 이중연료 엔진은 표 1.3과 같이 기존 석유계 연료 대비 매연과 이산화황 배출이 거의 없고 최대 황산화물 99%, 질소산화물 80%까지 저감 가능하다. 강화된 IMO 환경규제와 NECA(Nitrogen Emission Control Area), SECA(Sulphur Emission Control Area) 지역을 운항하기 위해 이중연료 엔진을 탑재한 선박 발주가 확대되고 있다. 이미 운항 중인 선박 또한 친환경 엔진으로 변경하여 IMO 환경규제를 만족하기 위한 개조 시장도 점점 확대되고 있다. 이와 같이 세계 각국의 대형엔진 제조사들의 이중연료 엔진 시장을 선점하기 위한 경쟁이 치열해지고 있다.

본 연구에서는 연소실 내 고온, 고압 연소 환경에서의 실린더커버 인코넬 용접 면적을 최적 설계하여 대형엔진 부품의 성능과 원가 경쟁력 향상을 목적으로 한다. 현재 양산 중인 천연가스 이중연료 엔진을 대상으로, 연소에 따른 실린더커버 열응력을 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 통해 해석하고 열응력 분포도에 따른 인코넬 면적을 최적설계 방안을 제시한 뒤 안정성에 대한 검증을 하였다.

오늘날 전 세계 대형엔진의 시장 규모는 2027년 약 17조원에 이를 것으로 전망되며, 친환경 엔진의 시장을 선점하기 위해 엔진 성능 최적화를 통한 원가 경쟁력 확보가 필수적이다. 이중연료 엔진은 종래의 일반 단일 연료엔진과는 달리 서로 다른 2가지 연료를 선택적으로 사용하여 해상 규제에 대응하는 엔진으로서 선가의 약 10~15% 비중을 차지하며 이중연료 기술에 따른 대형엔진 원가는 점차 높아지고 있다. 이에 따라 친환경 연료의 연소 특성에 따라 각 엔진 부품의 최적 성능 확보를 위한 설계가 필수적이며, 엔진 부품의 최적 설계를 활용하면 대형엔진 원가 경쟁력 확보 및 IMO 탄소중립 목표 달성에 상당한 기여를 할 것으로 판단된다.

목차

국문요약	i
목차	ii
표 및 그림 목차	iii
I. 서론	
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적과 연구 범위	4
II. 본론	
1. 이론적 배경	5
가. LNG연료의 특징과 LNG 이중연료엔진의 연소 방식	5
나. LNG 이중연료 엔진의 실린더커버 구성 및 인코넬 형상	8
다. ME-GA 실린더커버와 인코넬 재료 특징	11
라. 지배방정식	11
2. ME-GA 실린더커버 인코넬 비교 해석	13
가. ME-GA 실린더커버 인코넬 경계 조건	13
나. ME-GA 실린더커버 온도 분포 해석	16
다. ME-GA 실린더커버 열변형 및 열응력 해석	16

3. ME-GA 실린더 커버 인코넬 설계 개선 및 해석 결과	18
가. 인코넬 면적 설계 개선	18
나. ME-GA 실린더커버 열변형 및 열응력 해석	18
III. 결론	20
1. 결론	20
참고 문헌	21

표 및 그림 목차

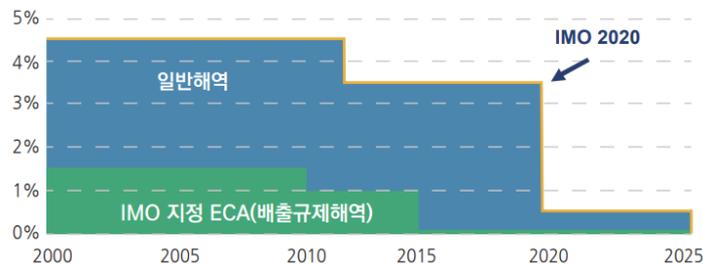
- <표 1.1> IMO 선박연료유 황 함유량 제한 기준
 - <표 1.2> IMO 선박 배출가스 내 질소산화물 배출제한 기준
 - <표 1.3> IMO 질소산화물 규제와 디젤, 천연가스의 질소산화물 배출현황 비교
 - <표 1.4> 연도 별 선박 연료 비중 추이
 - <표 2.1> ME-GA엔진의 S20CrMoVS 기계적 성질
 - <표 2.2> ME-GA엔진의 Inconel 625 기계적 성질
 - <표 2.3> 5G70ME-C10.5-GA 공장 시운전 계측 값 (Tier III Diesel 100% load)
 - <표 2.4> 5G70ME-C10.5-GA 공장 시운전 계측 값 (Tier III Gas 100% load)
 - <표 3.1> 인코넬 재료 축소량에 따른 원가 절감 효과
-
- [그림 1.1] IMO 지정 ECA 현황
 - [그림 1.2] ME-GA 실린더커버 Inconel 625 모델링 형상
 - [그림 2.1] MAN社 ME-GI 선박 연료공급시스템
 - [그림 2.2] MAN社 ME-GI LNG연료 연소 과정
 - [그림 2.3] WinGD社 X-DF 선박 연료공급시스템
 - [그림 2.4] WinGD社 X-DF LNG연료 연소 과정
 - [그림 2.5] MAN社 ME-GA 선박 연료공급시스템
 - [그림 2.6] MAN社 ME-GA LNG연료 연소 과정
 - [그림 2.7] ME-GA엔진의 실린더커버 Complete 모델링
 - [그림 2.8] ME-GA엔진의 디젤모드에서의 연료 분사 경로
 - [그림 2.9] ME-GA엔진의 가스모드에서의 파일럿 화염 분사 경로
 - [그림 2.10] X-DF 실린더커버 인코넬 형상
 - [그림 2.11] ME-GA 실린더커버 인코넬 형상
 - [그림 2.12] 열전달의 종류
 - [그림 2.13] 크리프 곡선
 - [그림 2.14] SN 선도
 - [그림 2.15] ANSYS 해석 프로세스

- [그림 2.16] 실린더커버 해석 모델링
- [그림 2.17] 실린더커버 Mesh configure
- [그림 2.18] 실린더커버 온도 경계 조건
- [그림 2.19] 실린더커버 압력 경계 조건
- [그림 2.20] 100% Load Diesel의 실린더커버 온도 분포
- [그림 2.21] 100% Load Diesel에서의 열변형 분포도
- [그림 2.22] 100% Load Diesel에서의 열응력 분포도
- [그림 2.23] 인코넬 면적 설계 변경
- [그림 2.24] 100% Load Diesel에서의 설계 변경된 실린더커버 열변형 분포
- [그림 2.25] 100% Load Diesel에서의 설계 변경된 실린더커버 열응력 분포
- [그림 2.26] 100% Load Diesel에서의 설계 변경된 실린더커버 safety factor 분포

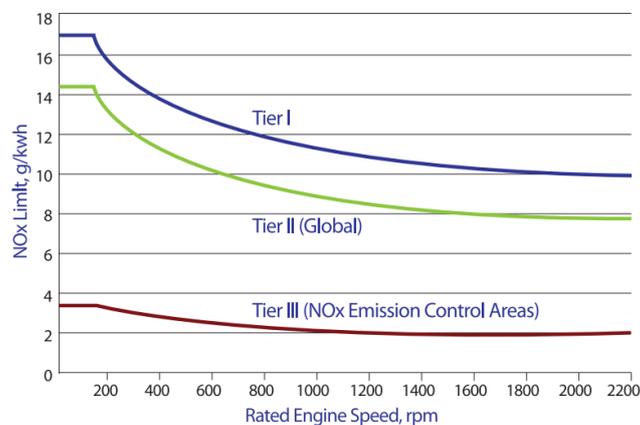
I. 서론

1. 연구 배경

선박 및 해운 산업은 세계 경제성장과 함께 필요한 물품을 전 세계에 공급하기 위해 꾸준히 성장하였다. 세계 무역 활성화에 따라 물동량과 운송량 증가로 선박연료 연소 후 배출되는 오염물질, 즉 선박 배출가스로 인한 대기오염 및 온실가스 또한 급격히 증가하여 해양 환경문제가 대두되고 있다. IMO(International Maritime Organization)는 해양 환경규제를 제정하여 선박 연료의 연소에 의해 발생하는 대기오염 저감에 대한 협약을 전 세계 선박에 적용하고 있다. 일반적으로 선박연료로 사용하고 있는 연료는 HFO(Heavy Fuel Oil), MDO(Marine Diesel Oil) 등으로 황 함유량이 매우 높아 대기오염에 심각한 문제를 초래하고 있다. 특히 연소에 의해 발생하는 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx)은 대기 중 수분과 반응하여 산성비와 황산염을 발생시켜 자연 파괴와 호흡기 질환을 유발한다. 이로 인해 IMO와 세계 각국은 선박 배출가스 중 황산화물과 질소산화물 규제를 단계적으로 강화하고 있다. 표 1.1에 따라 IMO는 2020년 1월 1일부터 전 세계 모든 선박의 선박 연료의 황 함유량 상한선을 3.5%에서 0.5%로 낮추는 규제를 시행하였고, 더불어 항만 지역의 대기질 개선을 위해 배출규제해역 ECA(Emission Control Area)를 별도로 지정하여 일반해역보다 강화된 황 함유량 기준 0.1% 이하를 적용하고 있다. 질소산화물도 Tier III 규제를 적용하여 현재 Tier II 수준보다 총량 대비 75%를 감축해야 한다.



<표 1.1> IMO 선박연료유 황 함유량 제한 기준

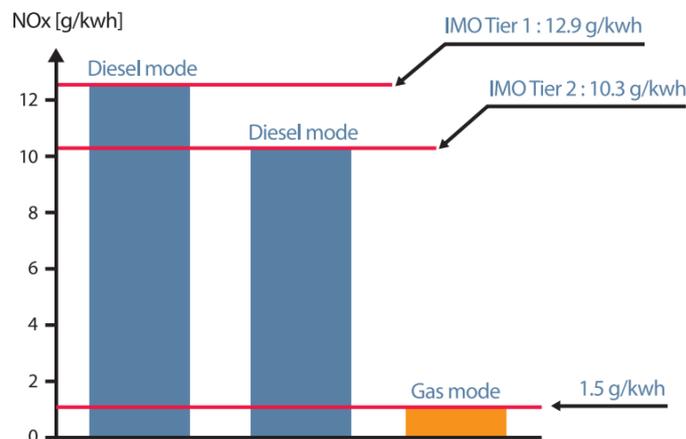


<표 1.2> IMO 선박 배출가스 내 질소산화물 배출제한 기준

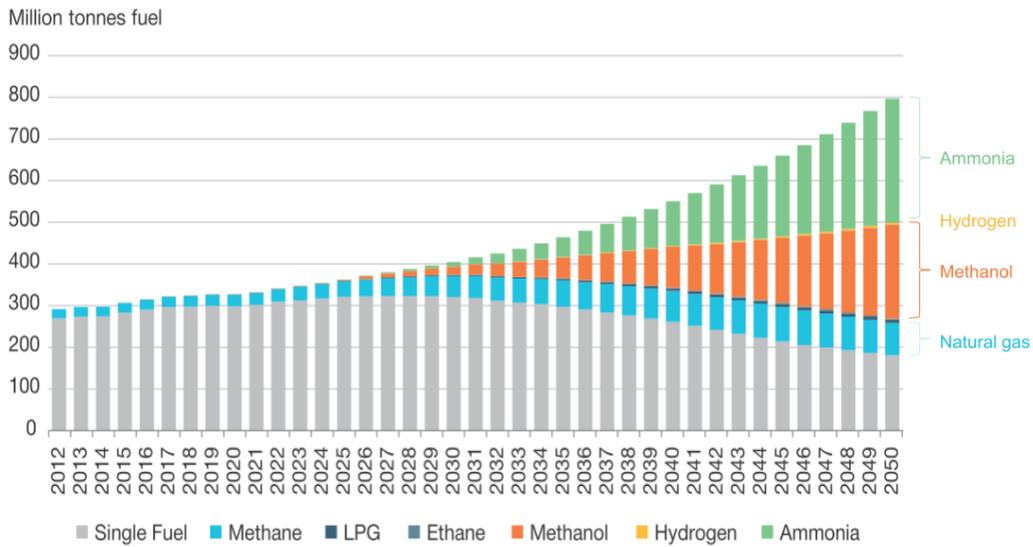


[그림 1.1] IMO 지정 ECA 현황

이러한 황산화물과 질소산화물 배출가스 기준 강화에 따라 이를 저감할 수 있는 친환경 연료를 주 동력원으로 사용하는 엔진이 주목받고 있다. 친환경 연료 중 메탄이 주 성분인 천연가스를 2차 동력원으로 사용하는 이중연료 엔진은 표 1.3과 같이 기존 석유계 연료 대비 배연과 이산화황 배출이 거의 없고 최대 황산화물 99%, 질소산화물 80%까지 저감 가능하다. 강화된 IMO 환경규제와 NECA(Nitrogen Emission Control Area), SECA(Sulphur Emission Control Area) 지역을 운항하기 위해 이중연료 엔진을 탑재한 선박 발주가 확대되고 있다. 특히 신조 이중연료 엔진의 비중은 표 1.4에 따라 증가하고 있는 추세이며, 이미 운항 중인 선박 또한 친환경 엔진으로 변경하여 IMO 환경규제를 만족하기 위한 개조 시장도 점점 확대되고 있다. 이와 같이 세계 각국의 대형엔진 제조사들의 이중연료 엔진 시장을 선점하기 위한 경쟁이 치열해지고 있다.



<표 1.3> IMO 질소산화물 규제와 디젤, 천연가스의 질소산화물 배출현황 비교



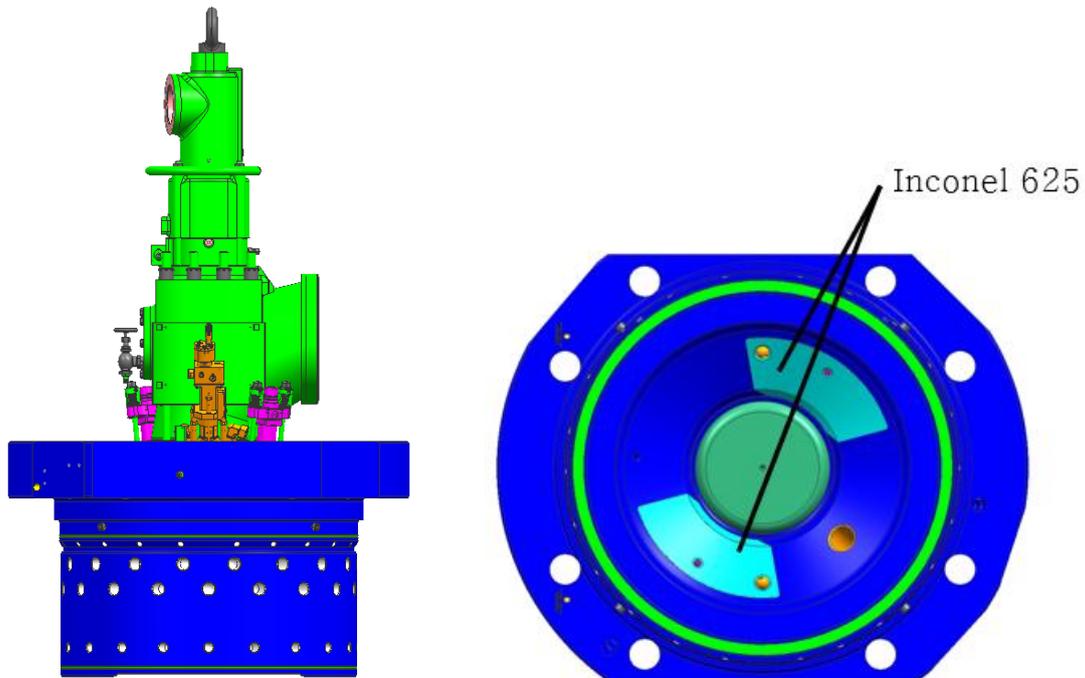
<표 1.4> 연도 별 선박 연료 비중 추이

오늘날 전 세계 대형엔진의 시장 규모는 2027년 약 17조원에 이를 것으로 전망되며, 친환경 엔진의 시장을 선점하기 위해 엔진 성능 최적화를 통한 원가 경쟁력 확보가 필수적이다. 이중연료 엔진은 종래의 일반 단일 연료엔진과는 달리 서로 다른 2가지 연료를 선택적으로 사용하여 해상 규제에 대응하는 엔진으로서 선가의 약 10~15% 비중을 차지하며 이중연료 기술에 따른 대형엔진 원가는 점차 높아지고 있다. 이에 따라 친환경 연료의 연소 특성에 따라 각 엔진 부품의 최적 성능 확보를 위한 설계가 필수적이며, 엔진 부품의 최적 설계를 활용하면 대형엔진 원가 경쟁력 확보 및 IMO 탄소중립 목표 달성에 상당한 기여를 할 것으로 판단된다.

2. 연구 목적과 연구 범위

본 논문의 목적은 연소실 내 실린더커버 하부면에 용접되는 인코넬 소재의 면적을 최적화하여 성능과 원가 경쟁력을 확보하는 것이다. 현재 양산 중인 천연가스 이중연료 엔진을 대상으로, 연소에 따른 실린더커버 열응력을 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 통해 해석하고 열응력 분포도에 따른 인코넬 면적을 최적설계 방안을 제시한 뒤 안정성에 대한 검증을 하였다.

연소실 내 실린더커버는 연소반응에 의해 생성되는 높은 온도와 압력에너지에 견딜 수 있는 재료 설계가 필수적이다. 특히, 발화가 시작되어 화염이 전파되는 연료 분사 밸브 주위에는 열응력이 최고점에 도달하기 때문에 그림 1.2와 같이 내열성이 우수한 특수합금 인코넬이 사용된다. 이중연료 엔진의 운전모드에는 HFO 또는 MDO 연료를 사용하여 운항하는 디젤모드와 메탄 등 친환경 연료를 사용하여 운항하는 가스모드가 있다. 따라서 효율적이고 경제적인 인코넬 설계를 위해서는 각 운전모드에 따른 Pmax, Pcomp와 같은 실제 시운전 계측 정보를 정확하게 확보하여 해석 경계조건으로 활용하여야 한다. 본 연구에서는 인코넬 최적설계가 완료되어 양산 중인 WinGD社 X-DF (Dual Fuel) 엔진을 기초로 하여 최근 신규 개발된 MAN社 ME-GA (Main-engine Electronic Gas Admission) 엔진을 최적설계 연구 대상으로 선정하였다. 저압 LNG 연료 분사 방식을 사용하는 ME-GA와 X-DF 엔진은 연소 원리가 동일하므로 신규 개발된 ME-GA에도 확대 적용하여 조기 최적화 및 원가 경쟁력 향상을 본 연구의 목적으로 한다. 본 연구 범위는 ME-GA의 최대출력을 기준으로 선박 생애주기 사이클에 따라 열 피로응력에 대한 분포도를 CFD를 통해 분석하고, 인코넬의 최적면적 재설계하여 안정성 검증을 진행하였다.



[그림 1.2] ME-GA 실린더커버 Inconel 625 모델링 형상

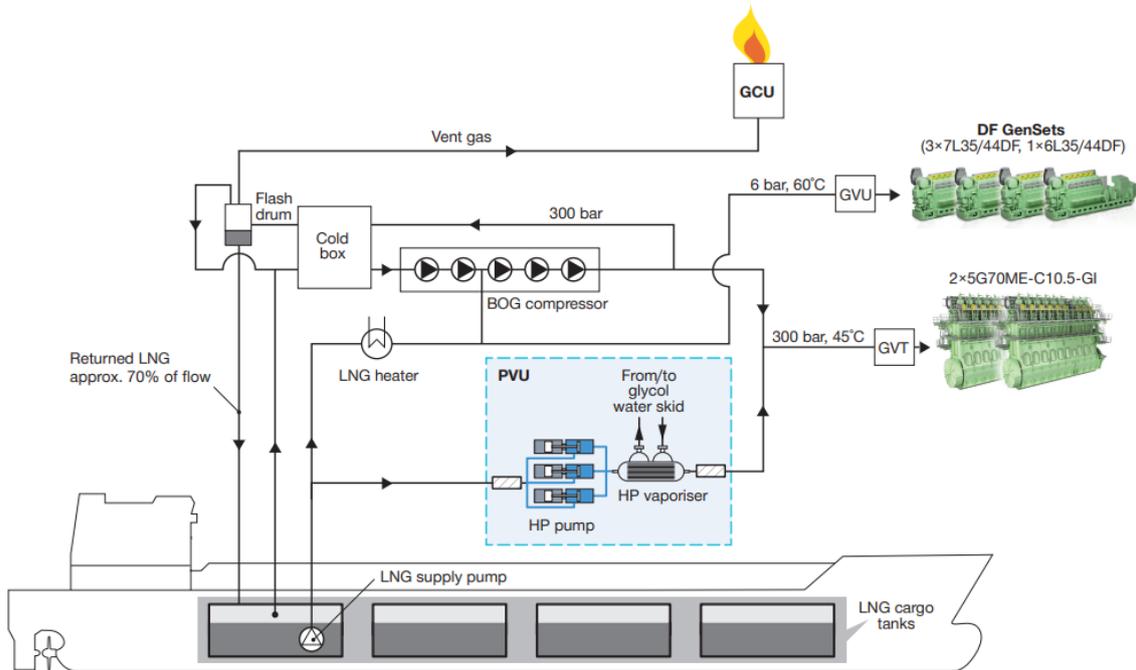
II. 본론

1. 이론적 배경

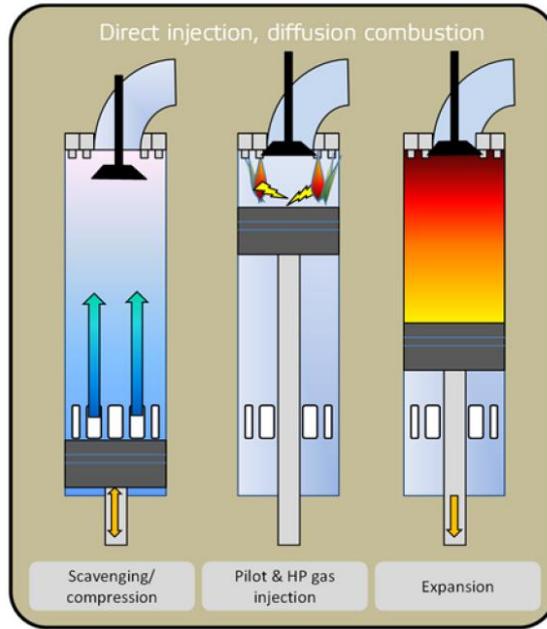
가. LNG연료의 특징과 LNG 이중연료 엔진의 연소 방식

LNG(Liquified Natural Gas) 운반선 선박의 액화천연가스 저장 탱크에서 자연 기화된 BOG(Boil Off Gas)를 활용하는 방안으로 천연가스를 연료로 사용하는 엔진이 개발되어 상용화에 이르고 있다. 천연가스는 액화 과정에서 먼지제거, 탈유, 탈탄소, 탈수 등의 전처리를 하기 때문에 연소 시에 아류산 가스가 발생하지 않고 질소산화물의 발생이 적어 IMO 환경규제를 만족시키기 위한 선주들의 관심이 증가하고 있는 추세이다. LNG는 연소 반응식에 따라 기존 석유계 연료 대비, 최대 황산화물 99%, 질소산화물 90%까지 배출 저감 효과가 있는 친환경 연료로 HFO와 LNG를 이중연료로 하는 DF(Dual Fuel) 엔진을 장착한 친환경 엔진을 도입하는 것이 IMO 환경규제에 대응하기 위한 가장 현실적이고 효율적인 대안책이 되고 있다.

LNG 이중연료 엔진은 연소실 내 분사방식에 따라 고압과 저압 분사 방식으로 분류된다. 고압 분사 방식인 MAN社 ME-GI는 연소실 내 고압으로 압축된 공기에 디젤 연료를 분사하여 압축 착화를 통해 연소되는 디젤 사이클이 적용된다. 높은 압력으로 압축된 공기에 연료가 균일하게 혼합되기 위해서는 디젤연료의 높은 분사압력을 필요로 하기 때문에 선박 LNG탱크로부터 공급된 LNG연료를 300bar로 가압하기 위한 high pressure pump 구성이 필요하다.

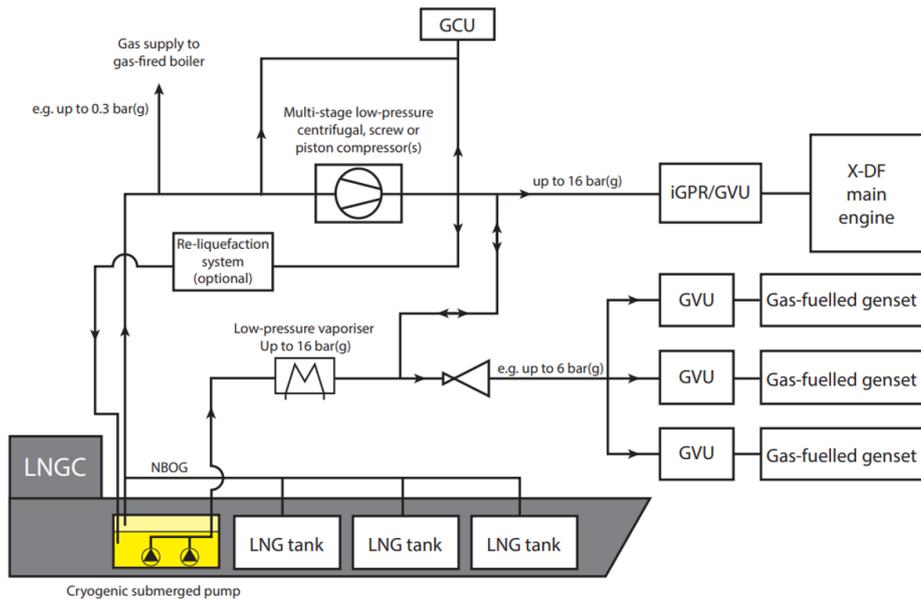


[그림 2.1] MAN社 ME-GI 선박 연료공급시스템

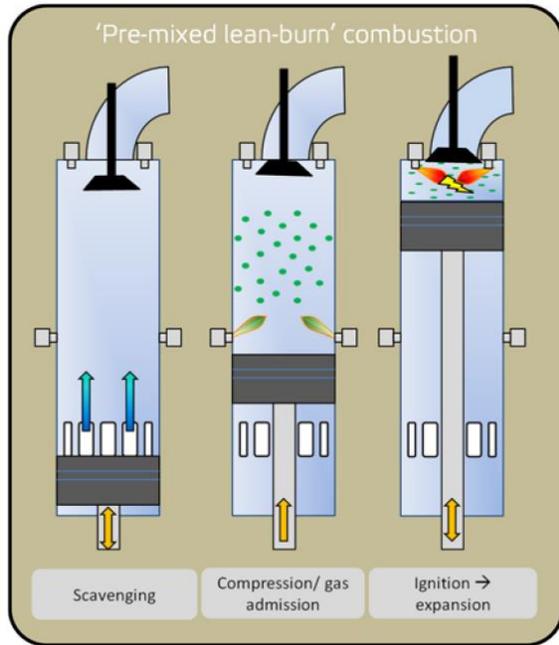


[그림 2.2] MAN社 ME-GI LNG연료 연소 과정

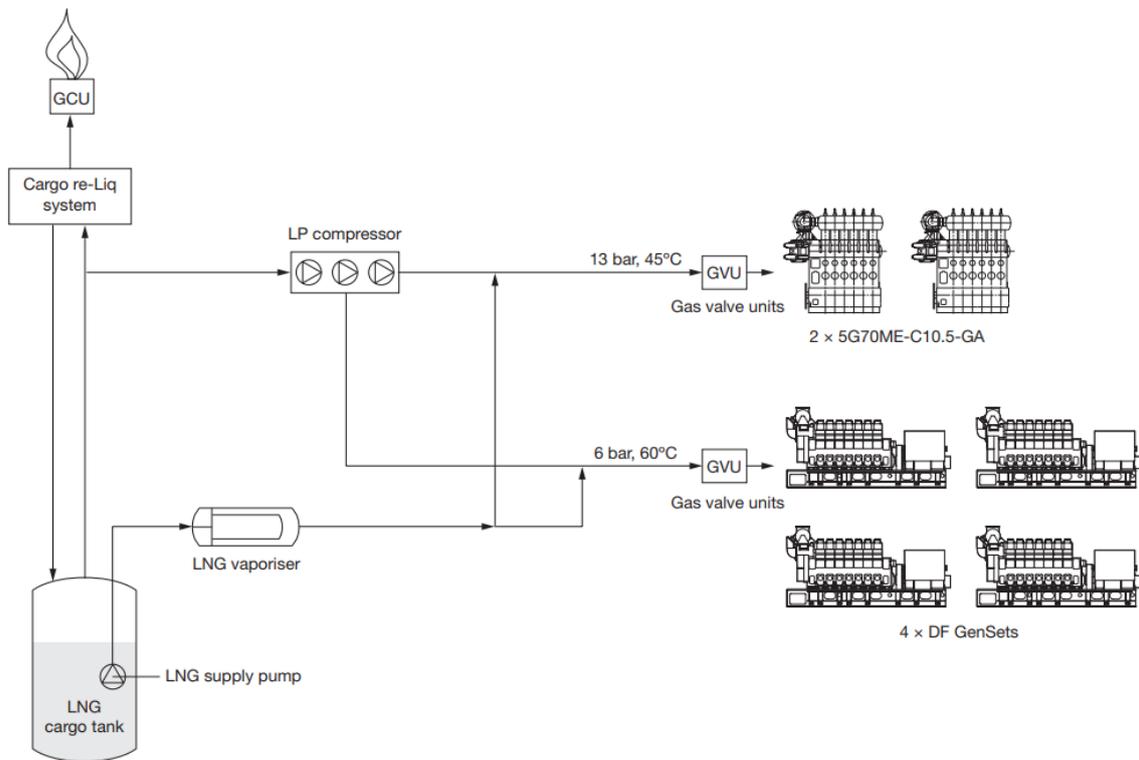
저압 분사 방식인 WinGD社 X-DF와 MAN社 ME-GA는 선박 LNG탱크로부터 공급 받은 16bar LNG를 별도 high pressure pump 없이 연소실 내 분사시켜 소기압과 예혼합된 압축혼합기를 점화하는 오토사이클이 적용되기 때문에 고압 분사 방식인 ME-GI와는 달리 여러 이점이 있다. 저압 LNG연료를 취급하기 때문에 고압상태보다 상대적으로 가스 취급 안정성이 높다. 또한 LNG 공급압력을 높이기 위한 high pressure pump가 불필요하기 때문에 보기 장비 설치와 운영 비용 그리고 공간 절약 효과가 우수하다.



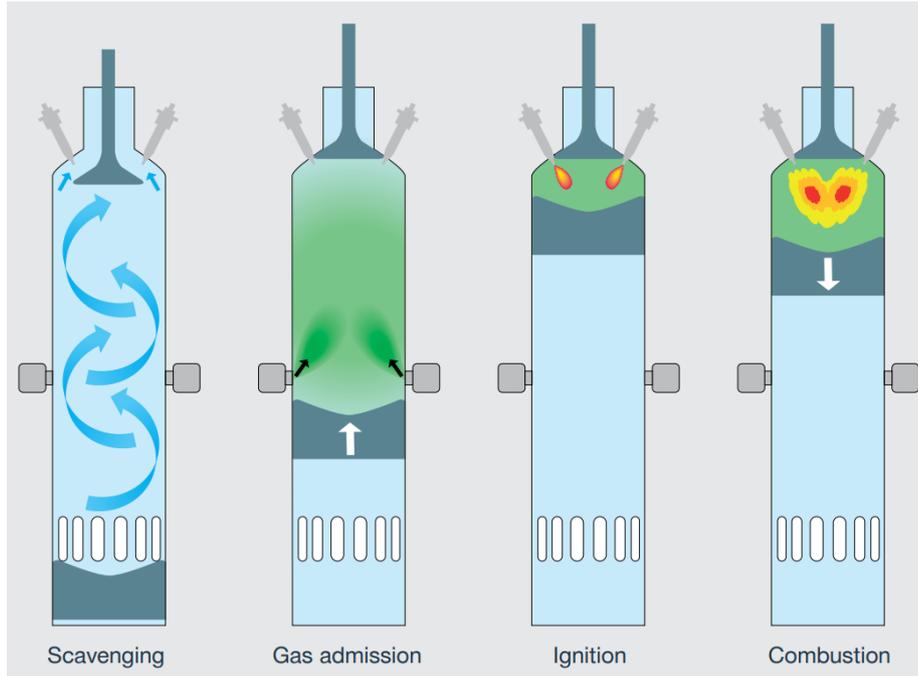
[그림 2.3] WinGD社 X-DF 선박 연료공급시스템



[그림 2.4] WinGD社 X-DF LNG연료 연소 과정



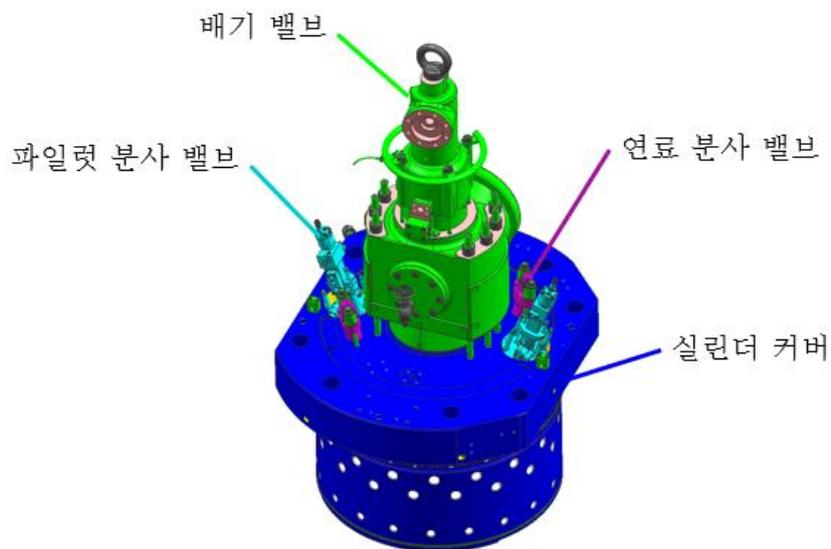
[그림 2.5] MAN社 ME-GA 선박 연료공급시스템



[그림 2.6] MAN社 ME-GA LNG연료 연소 과정

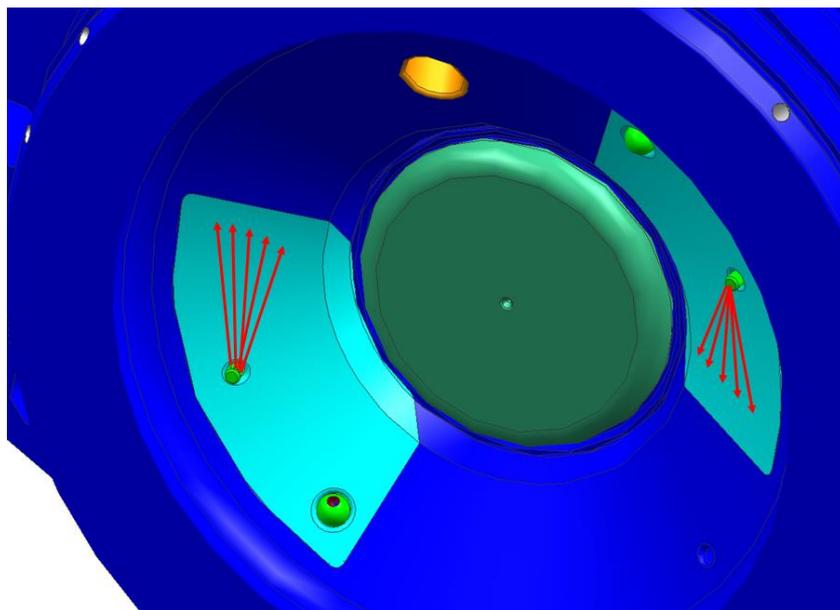
나. LNG 이중연료 엔진의 실린더커버 구성 및 인코넬 형상

LNG 이중연료 엔진의 실린더커버는 실린더 라이너 상부에 조립되는 연소부품으로 공통적으로 연소실 내 연료공급을 위한 디젤 연료 분사 밸브, LNG연료를 점화하기 위한 파일럿 분사 밸브 그리고 배기가스를 배출하는 배기밸브가 그림 2.7과 같이 구성된다. 더불어 LNG연료 분사 밸브인 GAV (Gas Admission Valve)는 저압 LNG와 소기압이 함께 예혼합기를 형성하기 때문에 실린더 라이너에 조립된다.

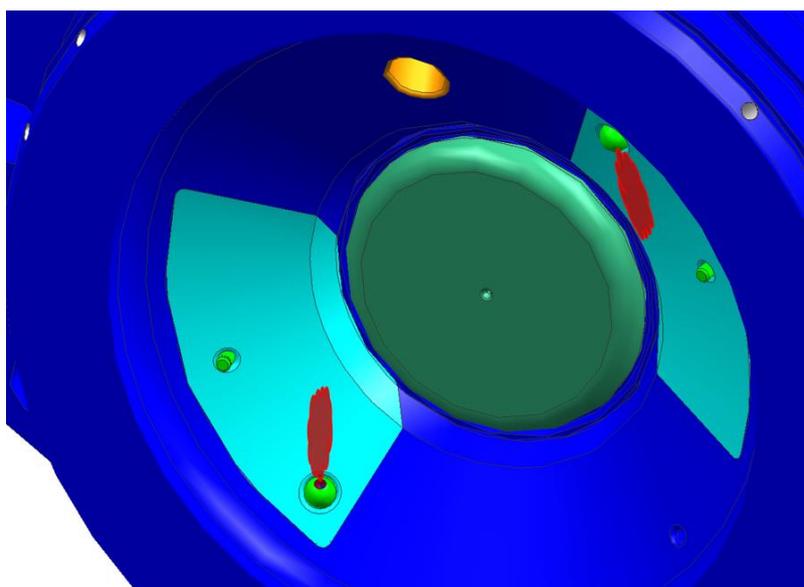


[그림 2.7] ME-GA엔진의 실린더커버 Complete 모델링

디젤모드에서는 고온 압축공기에 고압 디젤 연료를 분사하여 압축 착화 방식의 디젤사이클이 적용된다. 연료 분사 노즐에서 분사된 연료는 그림 2.8과 같이 실린더커버 하부면을 따라 연소실 내부로 확산되어 압축 착화를 발생하기 때문에, 실린더커버 하부면은 연소에 의한 열변형을 통해 열응력이 발생한다. 압축된 예혼합기를 점화하기 위한 파일럿 밸브 주변도 화염이 시작되는 가스모드 또한 화염 전파와 압축 팽창에 의한 열변형이 발생한다.

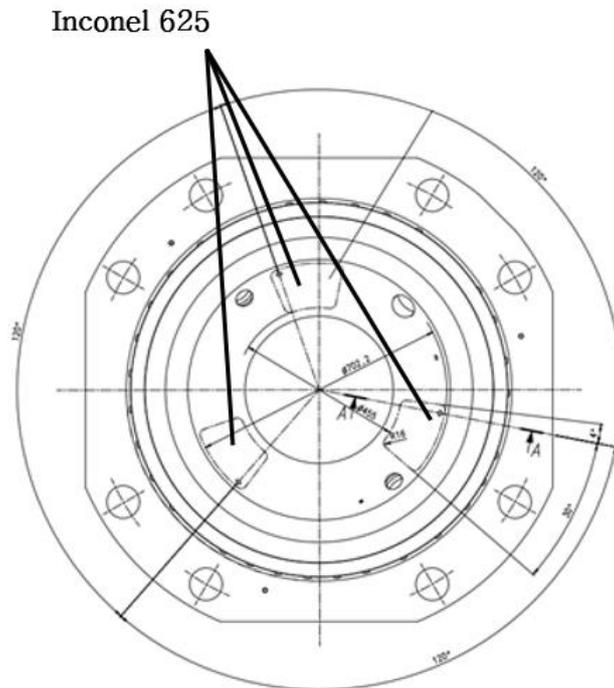


[그림 2.8] ME-GA엔진의 디젤모드에서의 연료 분사 경로

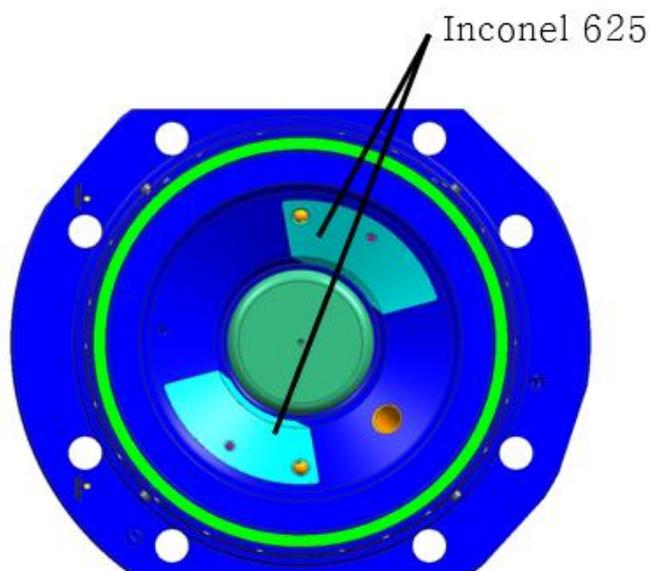


[그림 2.9] ME-GA엔진의 가스모드에서의 파일럿 화염 분사 경로

현재 양산 중인 WinGD社 X-DF 실린더커버의 인코넬 형상은 그림 2.10, 2.11과 같다. 디젤 연료 분사 범위에만 인코넬 면적이 형성되어 있으며, 파일럿 화염이 분사되는 노즐 주위에는 인코넬이 형성되어 있지 않다. 반면, 신규 개발된 MAN社 ME-GA는 파일럿 노즐을 포함하여 디젤 노즐까지 인코넬 용접이 분포되어 있다.



[그림 2.10] X-DF 실린더커버 인코넬 형상



[그림 2.11] ME-GA 실린더커버 인코넬 형상

다. ME-GA 실린더커버와 인코넬 재료 특징

실린더커버의 재료는 S20CrMoVS이며 최대 530도의 온도를 견딜 수 있는 내크리프 성을 가진 재료로 강의 크리프 속도를 감소시키고 고온에서 사용되는 동안 탄화물의 응고를 느리게 한다. 인코넬 재료는 Inconel 625로서 니켈을 주성분으로 하여 탄소, 철, 크롬 등을 첨가한 니켈합금으로 내열성, 내식성, 내산화성이 높고 고온 환경 하에 장시간 노출되어도 높은 강도를 유지하는 우수한 특성이 있다. 900도 이상의 산화기류 속에서도 산화하지 않고, 황을 함유한 대기에도 침지되지 않으며 질기고 강한 성질이 있으며 특히 산화, 부식에 잘 견디며 인산용액에 강하다. 고온산화저항이 우수하고 용접성 또한 탁월하다.

	인장강도	항복강도	브리넬 경도	탄성계수
S20CrMoV	655 Mpa	415 Mpa	197 HB	205 GPa

<표 2.1> ME-GA엔진의 S20CrMoVS 기계적 성질

	인장강도	항복강도	브리넬 경도	탄성계수
Inconel 625	760 Mpa	345 Mpa	220 HB	208 GPa

<표 2.2> ME-GA엔진의 Inconel 625 기계적 성질

라. 지배방정식

본 해석의 기본 지배 방정식은 열전달이다. 열전달 중에서도 연소 후 대류에 의해 열이 재료 표면으로 전달되며, 이는 곧 식 (2.1)과 같이 표현된다.

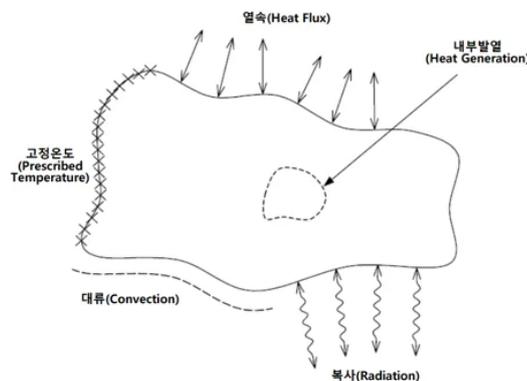
$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) [W] \tag{2.1}$$

h : 대류열전달계수

A_s : 대류열전달이 발생하는 표면적

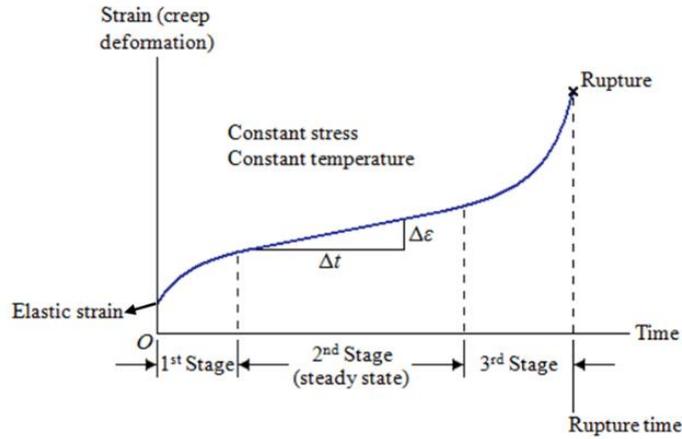
T_s : 고체표면 온도

T_∞ : 고체의 온도에 영향을 받지 않는 유체의 온도



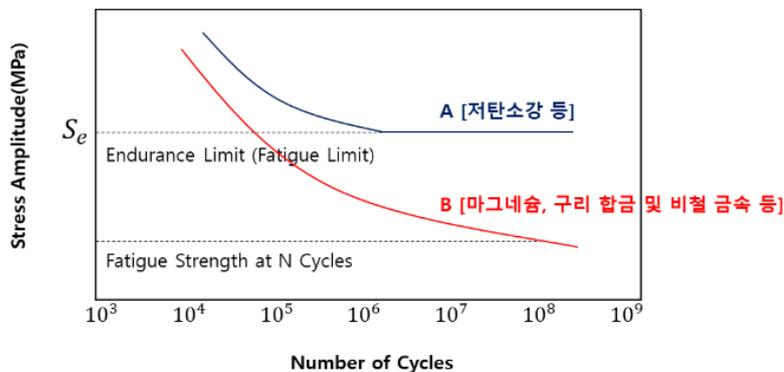
[그림 2.12] 열전달의 종류

크리프는 결정질 교체 재료에 일정 응력을 가하고 일정 시간 동안 특정 온도에서 물체를 유지시키면 응력에 따라 물체는 변형량을 일정하게 유지하지 않고 시간에 따라 변형량이 증가하는 현상이다. 이 현상은 항복점 이하의 응력에서도 시간경과에 따라 변형 또는 파괴된다. 그림 2.13과 같이, 1차 크리프 영역에서는 소성 변형에 따른 가공 경화가 발생하는 구간으로서 시간이 증가할수록 변형은 증가하고 속도는 감소한다. 2차 크리프 영역에서는 응력과 미세조직 사이에 동적 평형이 이루어지는 구간으로 크리프 속도가 일정하다. 3차 크리프 영역에서는 변형량 증가로 인한 파단이 발생하는 구간이다.



[그림 2.13] 크리프 곡선

SN 선도는 반복되는 하중을 받는 구조물의 수명을 분석하기 위한 중요한 도구이다. 재료의 항복강도보다 낮은 하중임에도 그 주기가 반복적으로 수행되면 파괴로 이어지게 된다. 이를 피로수명, 피로파괴로 명칭하며 SN 선도를 통해 stress와 cycle의 관계를 정의한다. 그림 2.14는 피로하중에 의한 응력(S)과 반복 횟수(N)의 관계를 나타내었다. 부재 형상, 용접 형상, 사용 환경 등에 따라 선도는 달라지게 되며, 응력 진폭이 작을수록 파괴까지의 반복 횟수가 증가하여 그 수명이 증가하고 응력 진폭이 일정 값 이하가 되면 무한히 반복되더라도 파괴가 되지 않는 특성이 있다.

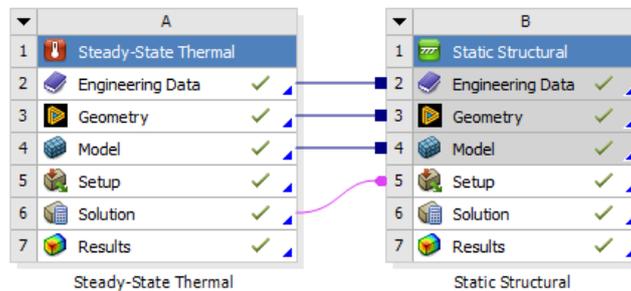


[그림 2.14] SN 선도

2. ME-GA 실린더커버 인코넬 비교 해석

가. ME-GA 실린더커버 인코넬 경계 조건

실린더 내부 챔버는 연소과정에서 발생하는 화염의 대류 열전달에 의해 재료의 열변형이 발생되어 열응력을 받는다. 연소과정에서 발생한 열 뿐만 아니라 폭발 압력에 의한 하중 또한 실린더 커버의 수명에 영향을 끼치는 요인이다. 본 논문에서는 ANSYS Steady-state thermal를 활용하여 연소 열에 의한 실린더 챔버 온도변화 해석을 수행하였고, 생성된 온도변화 해석을 기반으로 Static structural를 통해 실린더 챔버의 열변형과 열응력 해석을 도출하였다. 선박 생애주기에 따른 실린더 커버의 피로파괴 수명까지 Fatigue tool을 활용하여 분석하였다.



[그림 2.15] ANSYS 해석 프로세스

해석의 경계 조건은 표 2.3, 2.4와 같이 5G70ME-C10.5-GA 공장 시운전 계측을 통해 얻은 실측 값 중 운전 조건이 가장 열악한 100% 출력 데이터 기준으로 해석을 진행하였다.

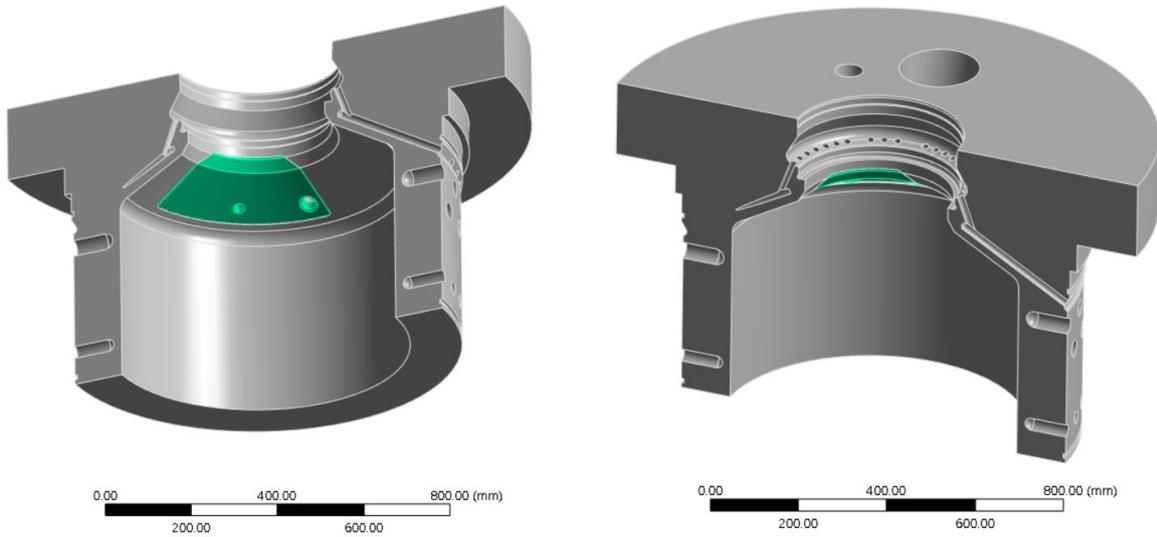
Load (%)	100
Speed (rpm)	73.7
Pmax (bar)	141.9
Pcomp (bar)	111.9
Exh Gas Temp (°C)	363
Scavenging Air (°C)	40

<표 2.3> 5G70ME-C10.5-GA 공장 시운전 계측 값 (Tier III Diesel 100% load)

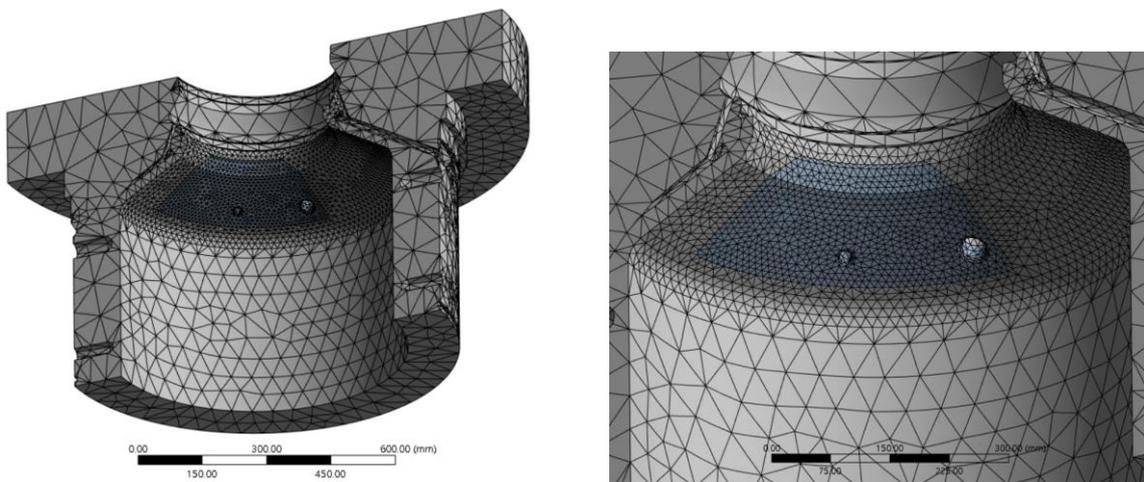
Load (%)	100
Speed (rpm)	73.7
Pmax (bar)	162.9
Pcomp (bar)	67.1
Exh Gas Temp (°C)	344
Scavenging Air (°C)	43

<표 2.4> 5G70ME-C10.5-GA 공장 시운전 계측 값 (Tier III Gas 100% load)

그림 2.17은 복잡한 모델링 구조에서의 Mesh를 효율적으로 설정 가능한 Tetra 기법을 사용하였고, 실린더커버의 대칭성을 이용해 symmetry 기법을 활용하여 모재의 절반만 본 해석 모델링으로 사용하였다. 실린더커버의 기본적인 Mesh 사이즈는 50mm로 설정하였고, 중요 해석 부품인 인코넬과 그에 맞는 실린더커버의 모재 Mesh 사이즈는 각각 10mm로 설정하였다. 부드러운 해석 결과 값을 위해 인코넬 주변의 Mesh 사이즈는 25mm로 사용하였다.



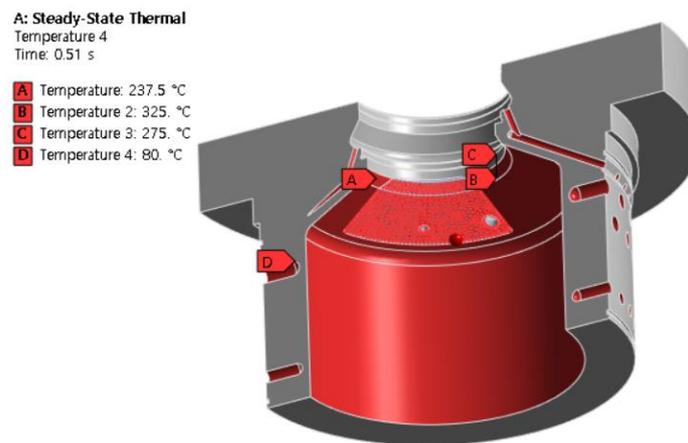
[그림 2.16] 실린더커버 해석 모델링



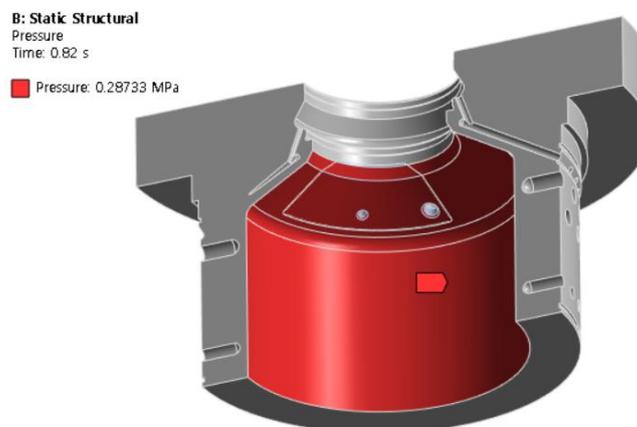
[그림 2.17] 실린더커버 Mesh configure

경계 조건은 1cycle 왕복 회전 시간에 따른 연소실 내 온도와 압력 변화를 기준으로 흡기, 압축, 폭발, 배기 순으로 설정하였고, 측정된 온도와 압력을 경계조건으로 입력하였다. 연소실 내 발생한 온도와 압력은 인코넬을 포함한 연소실 내 표면에 대류 열전달에 의해 전파되며, 본 해석에서는 이를 바탕으로 연소실 내 표면에 직접 온도 경계조건을 입력하여 열해석을 수행하였다. 100% 출력에서의 73.7rpm 기준으로 피스톤 1회전 왕복 시간은 약 0.82sec 소요된다. BDC에서 소기압이 공급되어 TDC에 도달하게 되면 압축된 공기의 온도가 디젤연료의 발화온도 450℃까지 증가하게 되고, 이 때의 압력은 Pcomp이며 최대 폭발 압력인 Pmax에서의 연소 온도는 약 1,300℃까지 발생한다.

본 해석에서는 상기 경계조건을 활용하여 Steady-state Thermal를 통해 온도와 압력 데이터를 연소실 모델링 표면에 입력하였다. 연소가 시작되는 연료 분사 밸브 주변을 시작으로 실린더 벽면까지 열전달되는 것을 확인할 수 있다. 연소 폭발에 의한 압력은 균일하게 모든 표면에 작용하는 것으로 가정하였다.



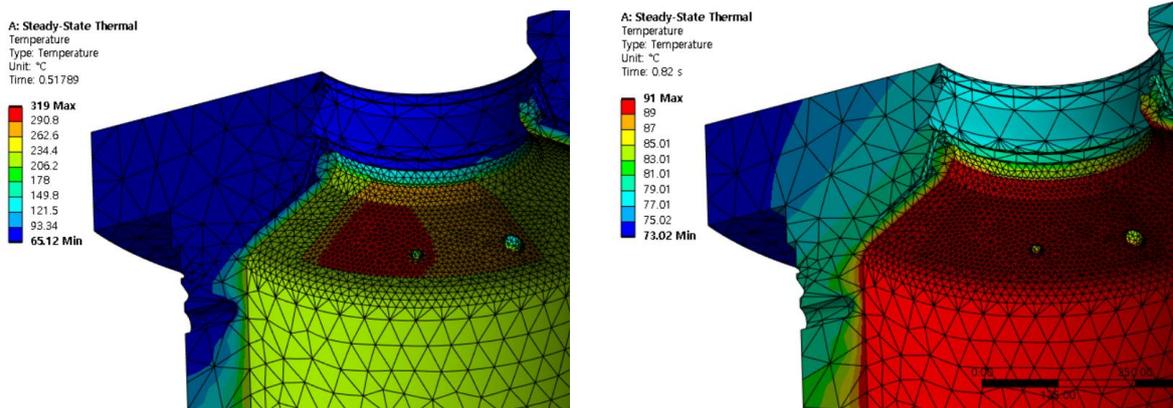
[그림 2.18] 실린더커버 온도 경계 조건



[그림 2.19] 실린더커버 압력 경계 조건

나. ME-GA 실린더커버 온도 분포 해석

TDC 전 분사된 연료가 고온, 고압의 압축 공기에 의해 자발화 시작되어 화염이 생성되고 Pmax에 도달하면 분사 노즐에서부터 주변 온도가 약 319℃로 최대 온도가 발생하게 된다. 초기 연소가 시작되고 폭발 압력이 균일하게 연소실 벽면에 작용하고 남은 배기가스에 의해 연소실 내 표면온도가 약 91℃로 형성됨을 본 온도 분포 해석 결과로 확인 된다.



(a) 100% Load Diesel의 Pmax 온도 분포 (b) 100% Load Diesel의 배기 온도 분포

[그림 2.20] 100% Load Diesel의 실린더커버 온도 분포

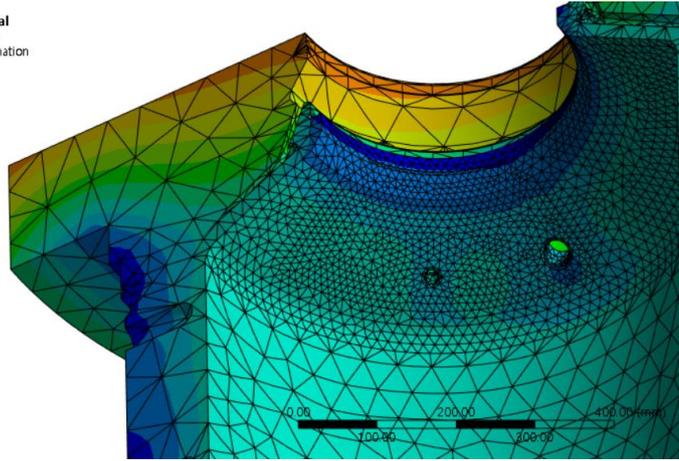
다. ME-GA 실린더커버 열변형 및 열응력 해석

열변형은 재료의 열전도도와 온도변화에 비례하기 때문에 온도 변화가 높은 인코넬이 변화가 낮은 S20CrMoV과 최종적으로 열변형량이 유사함을 알 수 있다. 이는 인코넬의 열전도도가 낮아 열변형에 유리한 것으로 판단되며, 디젤 노즐 홀과 파일릿 노즐 홀 주변은 연료 분사 경로와 반대 방향 지점에 위치하여 상대적으로 낮은 열변형량이 발생하였다.

열응력은 열변형량과 탄성계수에 비례하며 열변형 해석 결과에 따라, 유사한 분포를 확인할 수 있다. 연소 폭발에 의한 압축 응력이 각 연소실 표면에 작용하였으며, 연료 분사 거리가 멀어질수록 열변형과 열응력이 낮아지게 된다. 본 열응력 해석을 바탕으로 열응력이 낮은 부위의 인코넬 면적을 줄이고 재설계하여 해석 검증을 진행한다.

B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 0.82 s

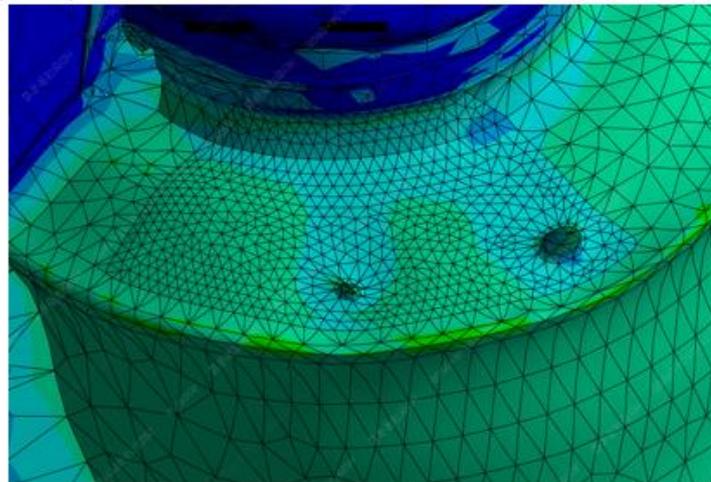
0.20932
0.17443
0.13955
0.10466
0.069773
0.034886
0 Min



[그림 2.21] 100% Load Diesel에서의 열변형 분포도

B: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 0.82 s

604.1
453.2
302.4
151.6
0.7522 Min

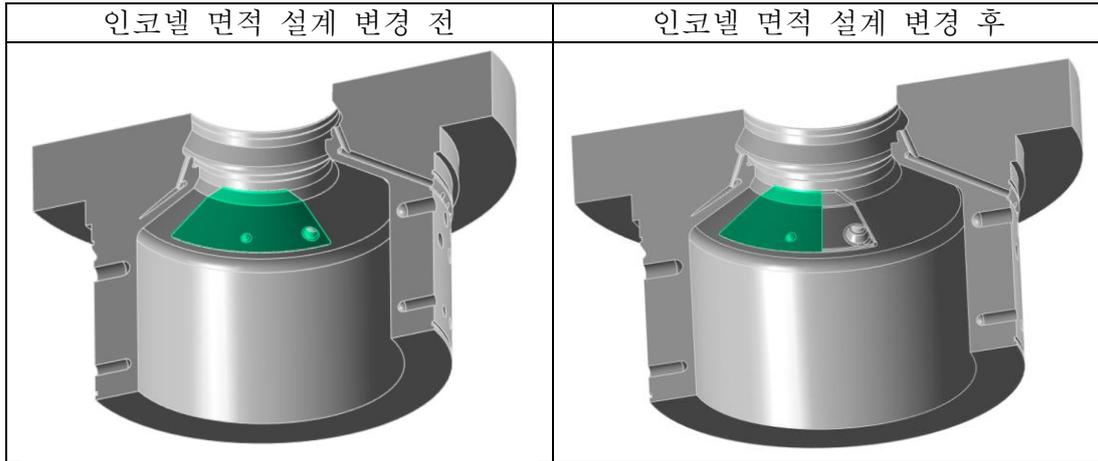


[그림 2.22] 100% Load Diesel에서의 열응력 분포도

3. ME-GA 실린더커버 인코넬 설계 개선 및 해석 결과

가. 인코넬 면적 설계 개선

본 장에서는 열변형과 열응력 분포도 해석 기반으로 인코넬 면적을 그림 2.23과 같이 설계 변경하여 해석을 수행한다. 디젤 모드에서의 연료 분사 후 연소 온도분포에 따라 설계 변경하였으며, 가스 모드에서의 파일럿 화염에 의한 온도분포는 연소 폭발 대비 온도분포와 열변형이 작기 때문에 파일럿 밸브 주변의 인코넬 면적을 축소하였다.



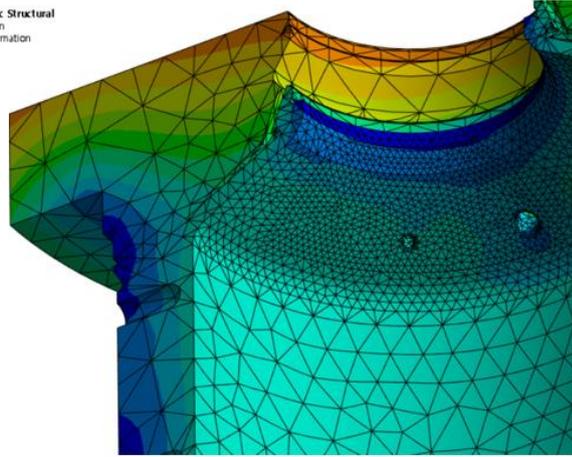
[그림 2.23] 인코넬 면적 설계 변경

나. ME-GA 실린더커버 열변형 및 열응력 해석

열변형 분포에서 파일럿 노즐 주변의 열변형량이 디젤 노즐보다 상대적으로 우수한 것으로 나타난다. 열응력 분포 해석에 따라 인코넬의 열응력이 S20CrMoV 소재보다 상대적으로 낮은 결과 값을 나타낸다. 재료를 축소한 면적의 열응력이 주변 S20CrMoV 소재와 동일한 열응력 분포를 나타내고 있으며, safety factor 분포 결과에서도 안전계수 2 이상으로 연료 분사 경로와 멀어질수록 온도 변화에 따른 열변형량이 낮아지기 때문에 파일럿 노즐 주변의 재질은 S20CrMoV를 사용하여도 무방한 것으로 판단된다.

D: Copy of Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 0.82 s

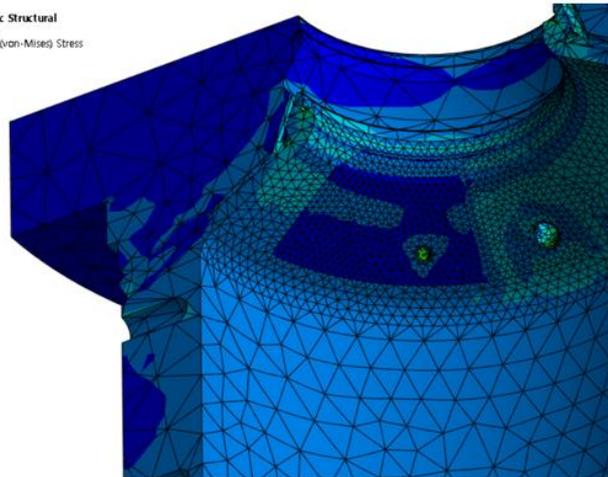
0.13954
0.10466
0.069771
0.034895
0 Min



[그림 2.24] 100% Load Diesel에서의 설계 변경된 실린더커버 열변형 분포

D: Copy of Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 0.82 s

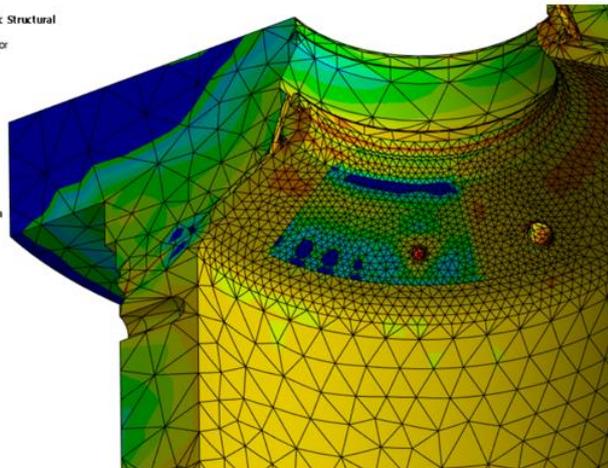
599.4
449.9
300.5
151
1.535 Min



[그림 2.25] 100% Load Diesel에서의 설계 변경된 실린더커버 열응력 분포

D: Copy of Static Structural
Safety Factor
Type: Safety Factor

15 Max
10
9
8
7
6
5
4
3
2
0.42537 Min
0



[그림 2.26] 100% Load Diesel에서의 설계 변경된 실린더커버 safety factor 분포

III. 결론

1. 결론

현재 ME-GA 엔진의 인코넬은 연소실 내 고온, 고압 환경에서의 내열성을 확보하기 위해 설계되었으며, X-DF 엔진의 개선된 인코넬 형상과 유사하게 생산성 및 원가 경쟁력을 확보하고자 ME-GA 인코넬 최적 설계를 주제로 본 연구를 진행하였다.

인코넬의 특성 상 열응력 분포 해석에 따라 인코넬의 열응력이 S20CrMoV 소재보다 상대적으로 낮은 결과 값을 나타내며, S20CrMoV 대비 열변형량과 열응력에서 유리한 것으로 확인된다. 특히, 연료 분사 경로에 인접한 면적일수록 연료 분사 후 연소에 의한 화염으로 인한 온도 변화가 크며, 연료 분사 경로와 반대 방향의 연소실 면적에서는 상대적으로 온도 변화가 작아 열에 의한 변형과 응력이 작은 것으로 나타난다.

개선된 인코넬 면적의 열응력이 주변 S20CrMoV 소재와 동일한 열응력 분포를 나타내고 있으며, safety factor 분포 결과에서도 안전계수 2이상으로 연료 분사 경로와 멀어질수록 온도 변화에 따른 열변형량이 낮아지기 때문에 파일럿 노즐 주변의 재질은 S20CrMoV를 사용하여도 무방한 것으로 판단된다. 인코넬 면적 설계 개선에 있어 연료 분사 경로가 중요한 인자로 판단되며 분사 방향을 설계에 영향을 미치는 인자로 우선 순위를 두어 효율적인 최적 설계가 가능할 것으로 기대된다.

최적 설계된 인코넬 면적에 따른 절감 효과는 표 3.1에 따라 인코넬 총 중량 3.62kg 중 1.99 kg 축소되며 향후 신규 엔진 설계 시 본 연구를 기초 자료로 활용하여 인코넬 부품 생산성 및 원가 경쟁력의 선제 확보에 기여할 수 있기를 기대한다.

Inconel	Inconel 총량	Inconel-FIV + Pilot 축소량		Inconel 총 축소량
중량	3.62 kg	1.81 kg (FIV)	0.18 kg (Pilot)	1.99 kg
단가	180만원	99만원		99만원
절감 효과	-	총 99만원 (per one cylinder cover)		

<표 3.1> 인코넬 재료 축소량에 따른 원가 절감 효과

참고문헌

- 1) 노현철, 단기통 2 행정 압축점화 디젤기관에서 연소 및 배기 특성에 관한 실험적 연구, 경남대학교 대학원, 2012년
- 2) 김준수, 2행정 이중연료엔진의 가스분사노즐 최적 설계에 관한 수치해석 연구, 한국해양대학교 대학원, 2022년
- 3) 김기복, 2행정 디젤기관의 소기압력 변화가 기관의 연소 및 성능특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 경남대학교 대학원, 2017년
- 4) 박계도, 선박엔진 연소 폭발 압력 측정용 압력 센서 개발에 관한 연구, 부산대학교 대학원, 2022년
- 5) 정균식, 선박용 디젤엔진의 출력 측정에 관한 연구, 한국해양대학교 대학원, 2013년
- 6) 조병호, 混合燃料를 이용한 예혼합 압축착화 디젤엔진의 연소 및 배기특성에 관한 研究, 한양대학교 대학원, 2001년
- 7) 김재웅, 다단 분사 방식을 적용한 디젤엔진에서 부분 예혼합 분사전략에 따른 연소 및 배기 특성에 관한 연구, 한양대학교 대학원, 2014년
- 8) 강동원 외 2명, 2-행정 기관에서 연소실 헤드 형상과 포트각이 연소실 유동에 미치는 효과에 대한 수치 해석 연구, 중앙대학교 대학원, 1994년
- 9) 한중호 외 2명, 2행정 디젤기관의 연소과정에 미치는 소기압력의 영향, 금오공과대학교 산업대학원, 2002년
- 10) 이강기 외 2명, 대형 저속 2행정 과급디젤기관의 연소형태 고찰, 대한기계학회, 1990년
- 11) 최재혁, 선박용 2행정 이중 연료 엔진에서 메탄-수소 연료의 수소 함량이 연소 및 배출물 형성에 미치는 영향 평가, 해양환경안전학회, 2023년
- 12) 김용래 외 4명, 수소 연료를 적용한 소형 2행정 엔진 성능 특성에 관한 연구, 한국가스학회, 2020년
- 13) 서종철 외 2명, 실린더 헤더의 가속도 신호를 이용한 선박용 디젤엔진의 연소 상태 모니터링, 한국소음진동공학회, 2009년
- 14) 김찬주 외 4명, 선박용 디젤 기관의 연소실 벽면에서의 비정상 열유동에 관한 연구, 대한기계학회, 1991년
- 15) 김태훈, 2중 Wiebe 연소모델을 이용한 2행정 대형 선박용 디젤엔진의 성능예측, 한국마린엔지니어링학회, 1999년