

LNG 연료 추진 선박용 크랭크실 릴리프 밸브 화염방지기의 유동해석 및 폭발시험

이효렬^a, 안중환^a, 김동건^a, 안병훈^b, 김화영^{c*}

CFD Analysis and Explosion Test of a Crankcase Relief Valve Flame Arrester for LNG-fuelled Ships

Hyo Ryeol Lee^a, Jung Hwan Ahn^a, Dong Keon Kim^a, Byoung Hoon Ahn^b, Hwa Young Kim^{c*}^a School of Mechanical Engineering, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea^b PROSAVE Co. Ltd.,
185, Gomo-ro 324beon-gil, Jillye-Myeon, Gimhai, Gyeongnam-do, 50875, Korea^c Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	25	February	2016
Revised	2	May	2016
Accepted	24	May	2016

Keywords:

LNG fuelled ship
Crankcase relief valve
Flame arrester
Computational fluid dynamics

ABSTRACT

Growing concerns about air pollution have led to increased demand for liquefied natural gas (LNG)-fuelled ships that have crankcases equipped with explosion relief valves to relieve excessive crankcase pressures and stop the flames emitted from the crankcase. The results of a computational fluid dynamics (CFD)-based feasibility analysis of the crankcase relief valve flame arrester design conducted using ANSYS CFX V14 showed that the inlet and outlet relief valve temperatures differed by 350-700°C. An explosion test was performed based on European standard EN14797 to evaluate the flame transmission and mechanical integrity of the valve. No flame transmission from the pressure vessel to the exterior was detected, and the mechanical integrity of the valve was confirmed. Thus, the relief valve components were found to be safe from the viewpoint of fracture.

1. 서론

최근 전 세계 각국의 물자 수급이나 생산품 공급의 증가로 선박의 물동량, 운행횟수 증가에 따른 선박유 연소로 발생하는 황산화물, 질소산화물, 이산화탄소와 같은 대기오염물질의 배출량 증가로 이어졌다. 국제해사기구(IMO: international maritime organization) 산하 해양환경보호위원회에서는 선박 운항으로 발생하는 유해가스로 인한 대기 오염을 줄이기 위해 2013년부터 배

출량 규제를 시작하였고 2025년까지 매년 지속적으로 규제를 강화하고 있다. Man Diesel & Turbo사는 배출량 규제를 만족하기 위해 선박유와 LNG를 사용하는 이중연료 엔진을 개발하였고 기존의 선박유를 LNG로 대체하는 선박을 개발하여 유해가스 배출량을 감소하려는 노력을 진행하고 있다^[1].

선박 엔진 내부의 피스톤이 장시간 왕복 운동하는 동안 피스톤 링과 실린더 벽 사이의 마찰로 피스톤링에 마모가 발생하게 된다. 마모된 틈 사이로 유증기(oil mist)가 크랭크실로 유입되며 선박

* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-2861

Fax: +82-51-581-3087

E-mail address: hyokim@pusan.ac.kr (Hwa Young Kim).

엔진의 동작으로 인한 고온, 고압에 의해 이상 폭발을 일으킬 수 있다. 최초 폭발 이후 압력 강하가 발생하고 이로 인해 외부 공기가 크랭크실로 유입되어 최초 폭발보다 훨씬 규모가 큰 연쇄 폭발이 일어날 수도 있다.

크랭크실의 이상 폭발로부터 물리적·인적자원의 피해를 방지하기 위해 국제선급연합회(IACS: international association of classification societies)에서는 IACS UR M9 규정을 제정하였다. 이는 2006년 1월 1일 이후에 건조 계약되는 선박에 설치되는 엔진의 실린더 지름이 200 mm 이상이거나 크랭크실의 총 체적이 0.6 m³ 이상일 때 크랭크실 측면에 릴리프 밸브 설치를 의무화하고 있다^[2].

선박 엔진 연료를 LNG로 대체하려는 연구 개발이 진행됨에 따라 국제선급연합회의 규정에 의해 의무적으로 부착해야 하는 크랭크실 릴리프 밸브의 개발이 필수적이다. 본 논문에서는 유동해석을 통해 LNG 연료 추진 선박용 크랭크실 릴리프 밸브의 주요 구성품인 화염 방지기의 유동 특성을 분석하고, 폭발시험을 통해 화염 방지 성능을 확인하였다.

2. 크랭크실 릴리프 밸브의 구조

Fig. 1은 LNG 추진 엔진용 크랭크실 릴리프 밸브의 구조를 나타낸 것이며 밸브 커버, 밸브 플레이트 어셈블리, 디스크 스프링, 밸브 시트, 화염 방지기로 구성되어 있다. 밸브 시트는 릴리프 밸브가 선박 엔진 크랭크실 외벽에 접촉하는 부분으로 유증기에 의한 크랭크실 내부의 이상 폭발 시 화염이 밸브 내부로 유입되는 입구이다. 밸브 플레이트 어셈블리는 일상적인 선박 엔진 동작 시에는 스프링의 예 하중으로 인해 차폐되어 크랭크실 내부의 가스 유출이나 외부로부터 공기 유입을 차단한다. 그러나 이상 폭발로 발생하는 고압에 의해 밸브 플레이트 어셈블리는 밀려져 릴리프 밸브 내부로 고온의 화염이 유입되고 화염 방지기를 지나면서 발생하는 열전도에 의한 온도 감소로 인해 소멸된다^[2].

Fig. 2는 타공된 철판과 철선망이 수직으로 여러 겹 적층된 화염 방지기의 구조를 확대하여 나타낸 것이다. 화염 방지기의 공극률은 폭발 시 발생하는 압력과 화염의 배출 시간에 밀접한 관계가 있다. 공극률이 감소할수록 폭발 압력 및 화염 배출 시간의 증가로 허용 응력을 초과한 파손이 발생할 수 있으며, 공극률에 영향을 미치는 설계 인자로는 타공의 크기와 간격, 철판의 두께, 철선의 직경, 철선망 격자 크기가 있다. 화염 방지기의 적층 구조 또한 공극률에 영향을 미치며 타공된 철판만을 사용하였을 때보다 철판과 철선망을 교차로 사용하였을 때 공극률이 증가하여 화염의 배출이 원활해진다.

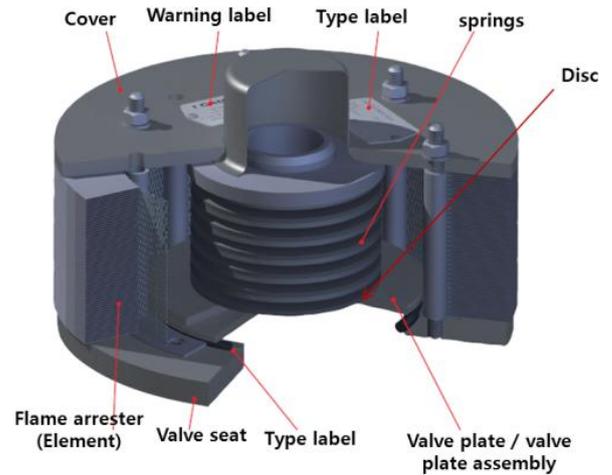


Fig. 1 Structure of crankcase relief valve for LNG fuelled ship

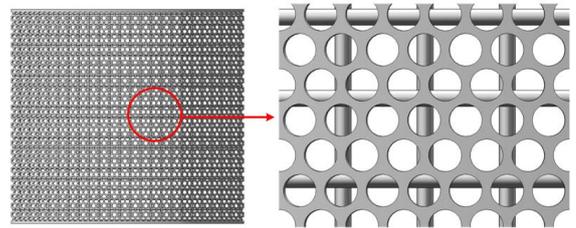


Fig. 2 Structure of flame arrester

3. 크랭크실 릴리프 밸브의 유동해석

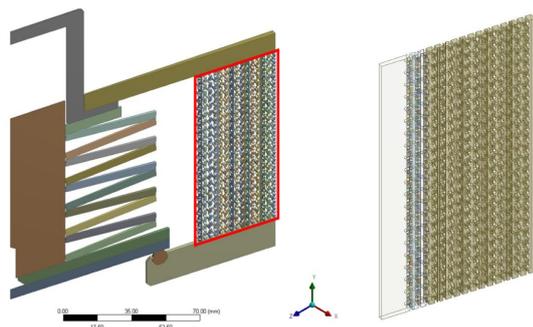
3.1 유동해석 모델

Fig. 3(a)는 화염 방지기의 유동해석에 사용된 모델을 나타낸 것이며, 화염 방지기 타공판의 개방 면적 비율은 58%, 수직방향으로 15겹 적층된 모델이다.

유동해석에 릴리프 밸브 전체 모델과 유동장을 해석하기에는 막대한 수의 해석 격자가 요구된다. 해석에 사용되는 시간과 자원을 절약하기 위해 축대칭 조건을 적용하여 전체 릴리프 밸브 모델의 1°를 발췌하였으며, 화염 방지기의 높이방향에서도 규칙적인 구조를 가지고 있으므로 전체 높이 104 mm에서 5 mm만을 해석에 사용하였다. Fig. 3의 (b)와 (c)는 유동해석에 사용되는 화염이 유동하는 유동장과 열전달이 발생하는 화염 방지기의 슬리드 모델을 나타낸 것이다.

3.2 유동해석 조건

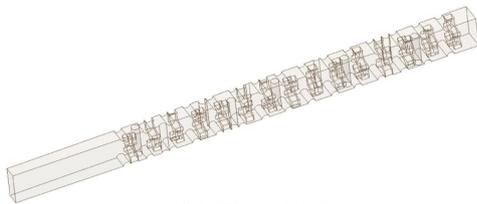
이상 폭발에 의해 발생하는 화염이 화염 방지기에 미치는 열적 영향을 파악하기 위해 CFD 상용 코드인 ANSYS CFX V14.0을 이용하여 유동해석을 수행하였다. LNG 연료 추진 선박용 크랭크실 릴리프 밸브의 시험인증 규격인 EN14797에 의하면 폭발시험 시 메탄을 이용하며, 메탄의 연소 가스는 대부분 CO₂이므로 작동



(a) Crankcase relief valve



(b) Flame arrester



(c) Flow field

Fig. 3 3D model of CFD analysis

유체는 CO₂ 이상 기체(ideal gas)를 적용하였다. 실제 폭발 시 화염의 온도는 메탄의 이론 연소 반응온도 1,953°C의 0.6~0.8배 정도이므로 1,700°C로 가정하였으며, 화염 방지기의 초기 온도는 상온인 20°C로 설정하였다^[3].

입·출구의 경계조건은 pressure inlet · outlet 조건으로 설정하고, 입구 압력은 폭발 압력인 6.62 bar로 설정하였으며 출구 압력은 대기압 상태에 노출되어 있으므로 대기압 조건을 설정하였다. 입·출구를 제외한 절단면에서는 symmetry 조건을 주어 유체의 교류가 이루어지도록 하였으며, 난류 모델로는 k-ε 모델을 이용하였다.

폭발에 의한 화염 방지기의 열적 영향을 해석하기 위해 작동 유체가 유동하는 유동장과 화염방지기 사이의 접촉면을 interface를 이용하여 전도에 의한 열전달이 발생하도록 하였다. Table 1은 화염 방지기의 열전도 계수 등의 물성치를 정리하여 나타낸 것이다.

과도(transient) 해석의 총 시간을 0.9초로 설정하였으며, 해석 격자는 화염 방지기에 육면체 격자를 이용하였고, 유동장은 내부 형상이 복잡하여 사면체 격자를 이용하였으며 해석에 사용된 노드 수와 격자 수를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

3.3 유동해석 결과

Fig. 4는 유동해석의 결과를 분석하기 위해 선정한 평면과 변수

Table 1 Material property of flame arrester^[4]

Property	Values
Material	spcc
Density	7,872 kg/m ³
Specific heat capacity	0.481 J/g·°C
Thermal conductivity	65.2 W/m·°C
Melting point	1426°C

Table 2 Mesh statistics of relief valve

	Flame arrester	Flow field
Number of nodes	347,743	3,521,065
Number of elements	384,332	18,934,180

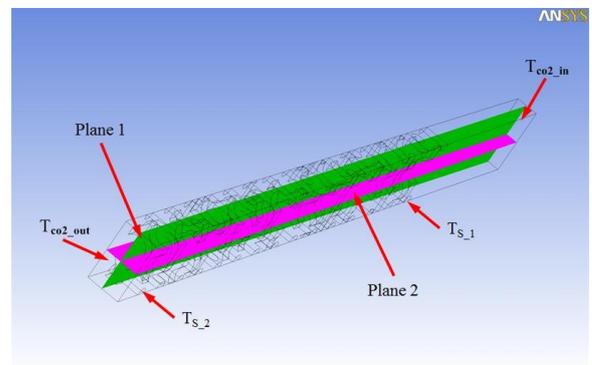
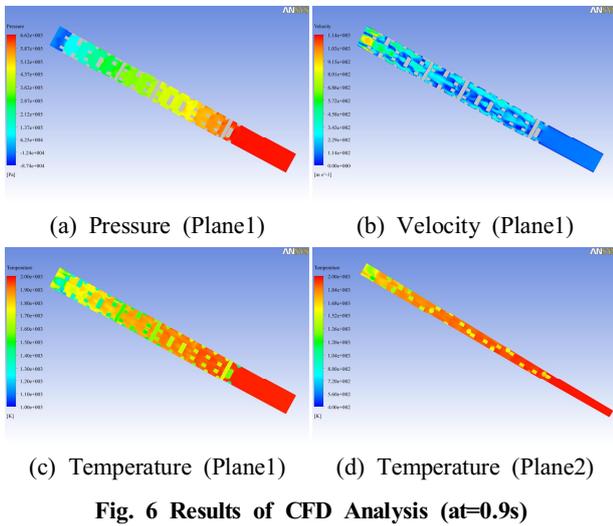
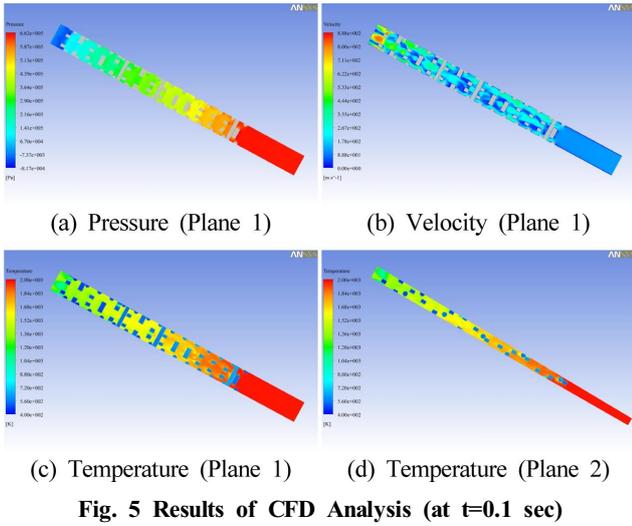


Fig. 4 Schematic of plane and variable for result analysis

를 도식화하여 나타낸 것이다. 평면 1은 릴리프 밸브의 높이방향, 평면 2는 반경방향의 평면이다. T_{co2_in}은 입구 부분의 유체 온도, T_{co2_out}은 출구 부분의 유체 온도를, T_{s_1}은 최내측 화염 방지기의 온도를, T_{s_2}는 최외측 화염 방지기의 온도로 정의하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 0.1초와 0.9초에서의 압력, 속도, 온도 분포를 나타낸 것이다. 시간 변화에 대한 압력 분포는 릴리프 밸브의 형상과 입구 압력이 변화하지 않기 때문에 거의 동일한 분포를 나타내고 있다. 또한 속도 분포 역시 입구와 출구의 압력차에 의해 발생하는 것이기 때문에 거의 동일한 속도 분포를 가지며, 최고 속도는 1,140 m/s이다.

Fig. 7은 시간 변화에 따른 입구 측과 출구 측의 유체, 화염 방지기의 온도 변화와 입·출구 측의 온도차를 그래프로 나타낸 것이다. 화염 방지기의 온도분포를 살펴보면, 초기에는 입·출구의 온도차가 610°C정도 차이가 나지만 시간이 지남에 따라 점점 온도차가 좁혀져서 0.9초에 이르면 50°C까지 감소하는 것을 확인하였다. 유체의 입·출구 온도 차이 역시 초기 700°C에서 350°C까지 감소하며, 이는 유체와 화염 방지기 사이의 열전달 효과가 초기에는 온도차가 커서 활발하게 일어나는 반면에 어느 정도 시간이 지나면 온도차가 작아짐으로 조금씩 열전달 효과가



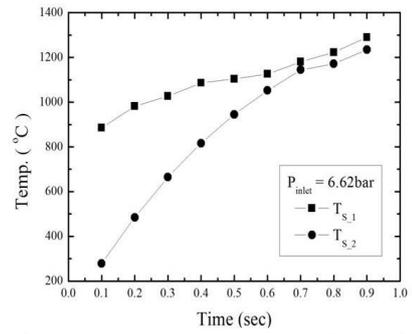
완화되기 때문이다. 0.9초에서 출구 측의 유체 온도는 1,379.52°C로 감소하였으며, 메탄의 소염 발생 온도인 1,490.85°C보다 낮아 화염 방지 가능성을 확인하였다⁵⁾.

4. 크랭크실 릴리프 밸브의 폭발시험

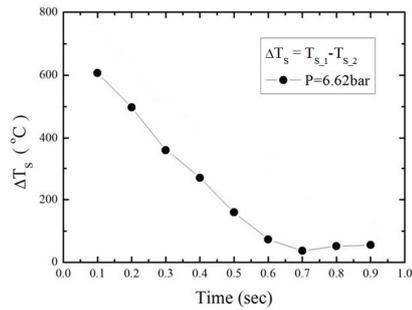
4.1 폭발시험 조건 및 장치

LNG 연료 추진 선박용 크랭크 케이스 릴리프 밸브의 국제공인 인증시험기관인 FTZU(Physical-Technical Testing Institute)에서는 EN14797 규격을 적용하여 형식 승인 시험을 진행하고 있다.

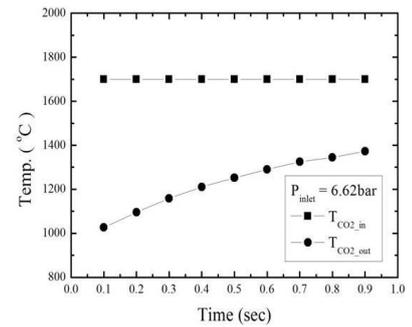
EN14797 규격에는 릴리프 밸브의 화염 방지 성능, 구조 안전성, 동작 압력에 대해 규정하고 있다. 화염 방지 성능은 1.6 m³의 정적 연소실 내부에 메탄 가스를 10%의 농도로 충전하고 점화 플러그를 이용하여 폭발을 유도하였을 때 화염이 릴리프 밸브 외부로 배



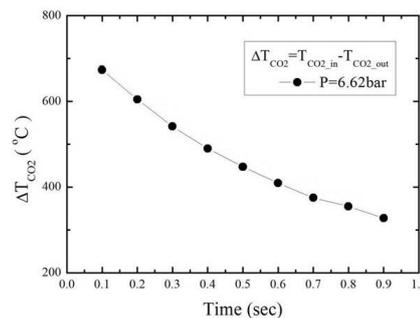
(a) Flame arrester temperature at $T_{s,1}$ and $T_{s,2}$



(b) Temperature difference between $T_{s,1}$ and $T_{s,2}$



(c) CO₂ temperature at $T_{co2,in}$ and $T_{co2,out}$



(d) Temperature difference between $T_{co2,in}$ and $T_{co2,out}$

Fig. 7 Comparison of temperature with time

출되지 않아야 한다. 릴리프 밸브의 구조적 안전성은 구성품이 폭발 압력에 의해 파단이 발생하지 않아야 한다. 밸브의 동작 압력은 3 bar±20%의 범위이며, 개방 직후 디스크 스프링에 의하여 밸브 플레이트 어셈블리가 닫혔을 때 30초 간 밸브 외부로 누설이 발생하지 않아야 한다.

Table 3 Test results of crankcase relief valve

	Opening pressure		Flame transmission	Integrity/ leakage test
	before	after		
1st	3.05	2.8	No	Good / No
2nd	2.8	2.6	No	Good / No

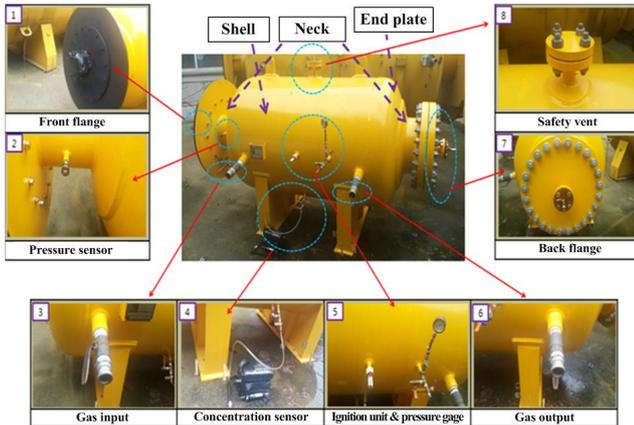


Fig. 8 Schematic of explosion test device^[2]

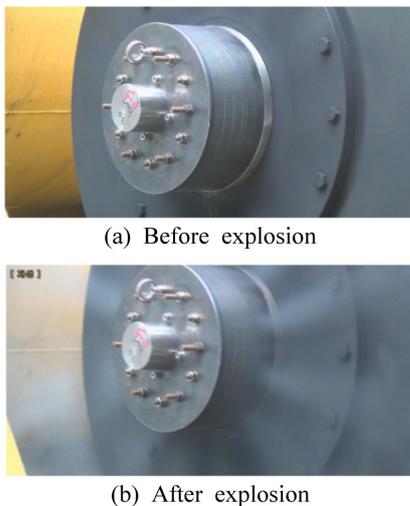


Fig. 9 Installation and explosion test status for crank case relief valve

1차 폭발시험 후 릴리프 밸브 구성품의 파단 유무를 확인한 후 재조립하여 개방 압력과 누설 시험을 진행한다. 그 다음 동일 조건으로 2차 폭발시험을 진행하며, 1차 폭발시험과 마찬가지로 파편 및 화염의 배출과 구성품의 파단이 발생하지 않아야 한다^[6].

Fig. 8은 EN14797 규격에 의거한 릴리프 밸브의 폭발시험을 위한 장치 구성도를 나타낸 것이다. 폭발시험 장치는 릴리프 밸브 장착을 위한 플랜지, 압력용기, 점화 유닛, 혼합 가스 농도 측정기, 압력 센서, 압력용기 내부에 가스를 충전하고 방출하기 위한 포트, 폭발 시 파편 및 화염이 외부로 배출되는지 확인하기 위한 비디오 카메라로 구성되어 있다^[2].

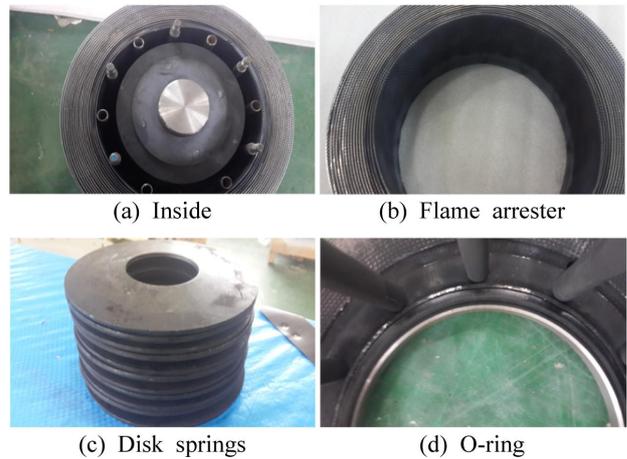


Fig. 10 Integrity check of after explosion test

따라서 개발된 크랭크실 릴리프 밸브가 LNG 연료 추진 선박 엔진에 적용되기 위해서는 화염 방지 성능뿐만 아니라 EN14797 규격에 명시된 구조 안전성, 동작 압력을 만족해야 하며, 실제 폭발 시험을 통해 이를 확인하였다.

4.2 폭발시험 결과

Fig. 9는 릴리프 밸브를 폭발시험 장치에 장착한 것과, 폭발시험 시 화염이 밸브 외부로 방출되지 않음을 나타낸 것이다. Fig. 10은 2회 폭발시험 후 릴리프 밸브 구성품의 파단 여부를 확인하기 위해 분해한 것을 나타내었으며, 구성품의 파단, 오링의 이탈이 발생하지 않음을 확인하였다. Table 3은 1, 2회차 폭발시험 전후의 릴리프 개방 압력과 누설 시험의 결과를 나타낸 것이다. 폭발시험이 진행됨에 따라 시험 시 발생하는 고온과 압력에 의해 디스크 스프링의 탄성력이 점차 감소하였으며, 최종 폭발시험 후 측정된 개방 압력이 2.6 bar로 3 bar \pm 20% 범위를 만족하였다. 또한 폭발 전과 1차 폭발시험 후 누설 시험에서 각각 2.97 bar와 2.7 bar의 압력에서 30초간 누설이 발생하지 않음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 유동해석을 통하여 LNG 연료 추진 선박용 크랭크실 릴리프 밸브의 유동 특성을 분석하였으며, 폭발시험을 통하여 릴리프 밸브 성능을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

릴리프 밸브의 유동해석에서 시간에 따른 유체의 최고 압력은 6.62 bar, 최고 속도는 1,140 m/s, 화염 방지기에해 밸브 외부로 유출되는 유체의 온도는 입구 대비 1,700°C에서 1,379.52°C로 감소하였으며, 메탄의 소염 발생 온도인 1,490.85°C보다 낮음을 확인하였다. 하지만 실제 폭발 시 유동해석에서 가정된 것처럼 6.62 bar의 압력과 1,700°C의 온도가 지속적으로 화염 방지기에 대해

지는 것이 아니라, 폭발에 의한 압력과 온도가 시간에 따라 최고점까지 상승 후 점차 감소하는 형태로 가해지기 때문에 유체의 온도 감소폭은 해석결과보다 증가할 것으로 사료된다.

유동해석에서 얻은 화염 방지기와 유체 간의 열전달에 의한 화염 방지 가능성 검증과 LNG 연료 추진 선박 엔진에 크랭크 밸브의 적용을 위해 폭발시험을 실시하였다. 1, 2차에 걸친 폭발시험에서 폭발 시 화염 방출 및 폭발 후 구성품의 파단, 개방 압력, 누설을 검사하였으며, 시험결과 인증 시험 조건을 모두 만족하는 것을 확인하였다. 그러나 1, 2차 폭발 후 고온과 압력에 의한 디스크 스프링의 탄성력 감소로 개방 압력이 3.05 bar에서 2.6 bar로 약 0.45 bar 정도 감소하였으며, 릴리프 밸브의 동작에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 디스크 스프링의 보완 설계가 필요하다고 사료된다.

후 기

이 논문은 2013년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과임(No. 2013032233).

References

- [1] Kim, H. S., Kim, K. P., Kim, D. H., 2013, A Status of LNG Fuelled Ship, Proceedings of the KOSOMES 2013 Autumn Annual Meeting, 247-249.
- [2] Lee, H. R., Ahn, J. H., Ahn, B. H., Kim, H. Y., 2015, Design and Evaluation of a Crankcase Relief Valve Spring for the LNG Fuelled Ship, KSMTE, 24:3 263-269.
- [3] Stephen, R. T., 2012, An Introduction to Combustion : Concepts and Applications 3/E, McGraw-Hill, New York.
- [4] Matweb, LLC., viewed 8 Feb. 2016, Material Property Data <<http://www.matweb.com/>>.
- [5] Oh, C. B., Lee, E. J., Hwang, C. H., 2011, An Investigation of the Extinction and Ignition Characteristics using a Flame-controlling Method, J. KOSOS, 26:1 21-26.
- [6] European Standard, 2006, Explosion Venting Devices, BS EN14797 - 1:32, European Committee for Standardization, European Union.