

초저온 액화천연가스용 기화기의 운전특성에 관한 연구 Study on the Working Characteristics of Vaporizer for Super Low Temperature Liquefied Gas

공태우 · 이종섭 · 이상철 · 정호민 · 정한식
T. W. Kong, S. B. Yi, S. C. Lee, H. M. Jeong and H. S. Chung

Key Words : LNG(액화천연가스), Vaporizer(기화기), Working Characteristics(운전 특성)

Abstract : LNG Vaporizers must be smaller, more efficient, and easier to operate and maintain. Recently, the vaporizers with greatly enhanced performance as compared to conventional type, have been developed to fulfill these requirements. The vaporizing characteristic of LNG vaporizer with air as heat source has fixed ice. These characteristic has efficient down and total plant cost and installing space can be increase. On that reasons must be optimize through tube and pipes analysis and experiments with enhanced type in this study. In this study performance to the workong characteristics for air heating type vaporizer for super low temperature liquefied gas.

기호설명

- T_{L-i} : 기화기 길이방향의 온도
- T_{S-i} : 표면의 온도
- T_O : 출구온도
- T_R : 실내온도

1. 서 론

LNG는 조성성분의 90% 이상이 메탄으로 구성된 액화천연가스의 약자로, 에너지 활용 측면이나 미래의 에너지 수급 측면에서 독보적인 위치를 점할 수 있는 에너지이다. LNG는 원산지의 NG를 취급 및 수송의 이득을 위해 -162°C까지 냉각시켜서 액화하여, 체적을 1/600 정도로 감소시킨 것으로, 이의 활용은 액체 상태로도 사용되나 대부분이 NG로 기화시켜 소비자에게 공급되고 있다.

-162°C는 초저온의 영역으로 이의 기화방법으로는 해수 가열식과 공기 가열식, 즉 대기 중에서 기화시키는 방법이 사용되고 있다.

본 연구는 초저온 기화기의 일반적인 특성을 파

악하고 공기 가열식 기화기를 개발하기 위한 연구이다. 공기 가열식 기화기는 산업단지 주변이나 대규모 아파트 단지 등에 설치될 위성지에서 활용 가능한 것이다. 이러한 공기 가열식 기화기는 공기의 질에 따라서 기화기 외부에 공기 중의 수분이 응결되는 고착 현상이 발생하여 기화 성능이 제대로 발휘되지 못하기 때문에 2~3개의 기화기를 교환하여 사용하고 있다. 위와 같은 성능저하 및 중복설비 등의 문제를 해결하기 위하여, 성능해석 및 실험을 통한 최적화 설계기술을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 LNG와 유사한 특성을 가지는 액화 질소(LN₂)를 이용하여 기화기의 운전특성을 파악하기 위하여 형상에 따른 실험을 수행하였다.

2. 개발동향

LNG용 기화기는 작고 효율적이고 유지보수가 쉽도록 개량되고 있다. 일반적으로 기화기는 공기 가열식과 해수 가열식으로 구분되며 본 연구의 실험 대상으로는 공기 가열식에 한하여 수행하였다.

2.1 공기 가열식

Fig. 1은 공기 가열식 기화기를 보여주고 있다. 대기 중에 설치하는 타입으로 본 연구의 중점적인 연구 대상이다. 이러한 기화기는 비교적 소용량의 기화를 위해 사용되고 수분의 응결 고착 현상을 대비해 2~3개의 설비를 교대로 사용하고 있다. 작동

접수일 : 2005년 4월 19일
정호민(책임저자) : 경상대학교 기계항공공학부
E-mail : hmjeong@gsnu.ac.kr Tel. 055-640-3184
공태우, 이종섭, 이상철 : 경상대학교 대학원
정한식 : 경상대학교 기계항공공학부

원리는 Fig. 2에 보여지는 바와 같이 열전달 관대로 LNG가 유입되고, 가열원으로는 공기를 사용한다. 이러한 타입은 공기의 질에 따라 수분을 응결 고착 시키기 때문에 용량에 비해 설비가 커지고 보조설비가 필요하다. Fig. 2는 공기 가열용 기화기의 열교환 관의 개념도로 일반적인 열교환기와는 그 구조에 차이가 있다.

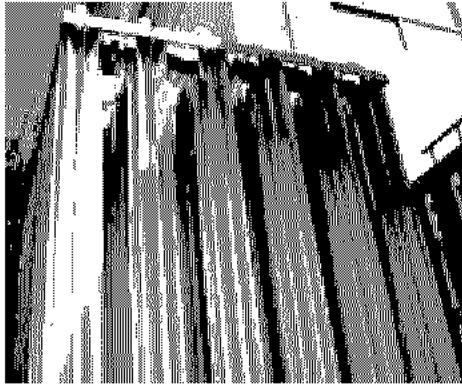


Fig. 1 Photograph of air heating type vaporizer for super low temperature liquefied gas



Fig. 2 Ice fixing mechanism of air heating type vaporizer

2.2 해수 가열식

Fig. 3은 해수가열식 기화기로 ORV(Open Rack Vaporizer) 타입이다. 작동원리는 기화기내의 튜브 내로 LNG가 유입되고, 기화기 외부 표면에 해수를 공급함으로써 LNG는 튜브 내에서 NG로 기화된다. 이는 일반적으로 LNG 인수기지 등에 사용하는 형태이다.

Fig. 4는 해수가열식 기화기의 열교환 관의 개념도이다. 가열원으로서 해수를 사용하므로 일반적으로 관의 표면에 Anodizing 처리를 하여 그 수명을 연장시키고 있다.

일반적으로 열용량이 큰 해수를 가열원으로 사용하므로 기화성능이 좋고 대용량의 기화가 가능하지만, 관의 부식 및 지역적 제약을 받는 단점이 있다. 이러한 해수식 기화기는 인수기지 등의 대형의 시스템에서 사용된다.

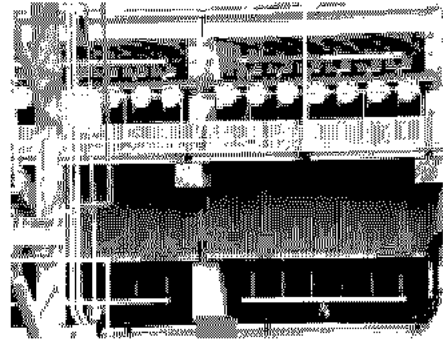


Fig. 3 Photograph of the sea water heating type vaporizer for super low temperature Liquefied gas

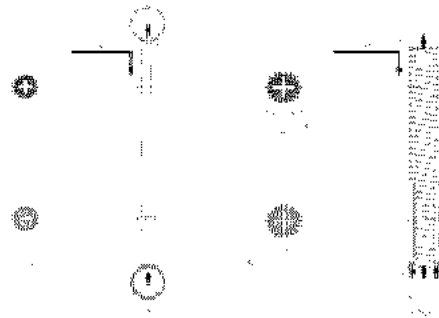


Fig. 4 Schematic diagram of the sea water heating type vaporizing system

2.2.1 ORV

ORV 타입의 기화기는 재래식 모델들과는 반대로 LNG는 격리된 상부의 헤더(header) 안으로 흐르고 NG가 하부로 흐른다. 이 모델은 열용력의 영향이 작고, NG의 발열량의 변동을 완화시킬 수 있는 특징이 있다.

2.2.2 DTV

DTV 타입의 기화기는 이중관 열전달 관들로 이루어져 있고, LNG는 아래로 흐르고, 관과 관사이의 환상경로를 따라서 역으로 상승한다. 이 모델은 해수의 평균유동이 적은 장점이 있다.

2.2.3 VSV

VSV 타입의 기화기는 셸 앤 튜브 타입(Shell and

tube type)의 열교환기와 조합된 시스템이다. 이 모델은 저압스팀 응축을 통해서 열전달 효율이 높고, 설비비용이 적고, 과잉 증기를 사용할 수 있는 특징이 있다.

2.2.4 SMV

SMV 타입의 기화기는 비상시에 난방과 기화를 할 수 있는 타입으로 연소 버너에 의해 가열되는 온수 탱크 안에 열전달 판이 위치한다.

2.2.5 TRI-EX

TRI-EX 타입의 기화기는 기초 부하 기화기로, 열원으로 바닷물을 매개 열원으로 사용하는 기화기이다. 소형으로 열전달 성능이 뛰어나고, 대부분 극저온 발전시스템에 사용된다.

상기와 같이 해수 가열식 기화기들은 용량에 따라 열전달 판을 개량한 New StarFin ORV, SUPERORV, 비상시에 사용될 연소버너를 부가한 SMV, 바다 위에 설치하여 해수를 매개 열원으로 사용하는 TRI-EX 타입 등이 있다.

Fig. 5는 대기식 기화기의 열전달판에 수분이 응결 고착된 경우로, 이로 인해 기화기의 성능이 저하되고, 열전달판의 길이가 길어지는 문제점이 있다. 상용설비에서는 여러 개의 기화기를 설치하고, 응결 고착된 기화기가 자연 해빙되는 동안 교대하여 운전하고 있다.

Fig. 6은 기화기 방열핀의 수분 응결 구조를 보여주고 있다. LNG의 유량이 작거나 핀의 간격 s가 클 경우에는 수분 응결 두께가 작아져서, 열교환율은 향상될 수 있으나 NG의 기화율이 급격히 감소하고, 이와 반대의 경우에는 LNG의 유량이 많거나 핀과 핀사이의 간격이 작을 경우에는 수분 응결 두께가 커져서 열교환 성능이 떨어진다. 후자의 경우에는 LNG의 유량이 많기 때문에 NG의 기화율이 증가하는 경향으로 갈수 있으나, 기화기의 종단부에서 액 상태로 유출할 가능성이 있다. 따라서 이들 양자 사이에 적절한 타협점인 최적의 상태를 도출하여 열교환 핀의 형상 설계를 해야 한다.

3. 실험 방법

3.1 운전특성 실험

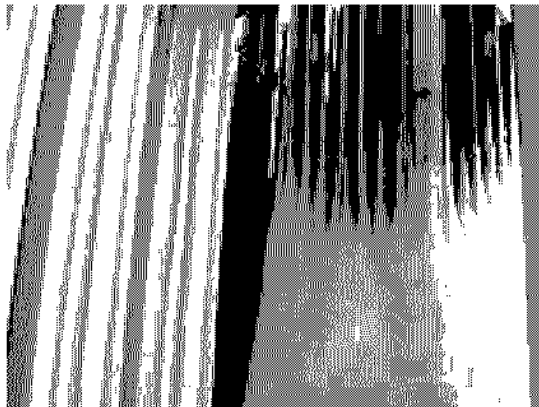


Fig. 5 Photograph of fixed ice on the air heating type vaporizer for super low temperature liquefied gas

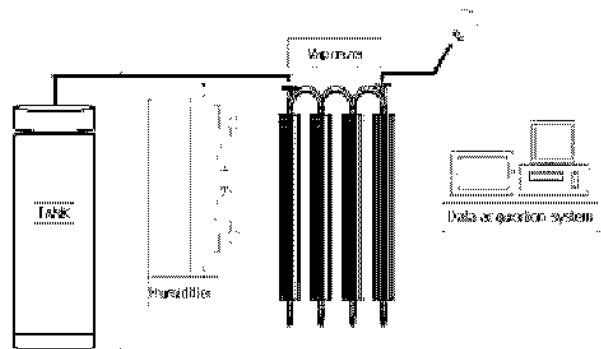


Fig. 7 Experimental setup of vaporizer for super low temperature liquefied natural gas



Fig. 6 Mechanism of fixed ice on the fin for air heating type

Fig. 7은 운전특성을 위한 실험장치의 개략도이다. 실험 장치는 공간의 온습도에 따른 기화특성 파악을 위한 장치이다.

Fig. 8은 실험에 사용된 기화기로 20Nm³/hr 용량의 대기식 기화기이다. 125 Starfin 타입으로 8개의 핀과 8개의 튜브로 구성되어 있고, 총 튜브의 길이는 10m로 소용량 기화에 사용될 수 있는 기화기이다. 실험에 사용된 가스는 -195.8°C의 액화질소로 기화기입구에 액 상태로 유입된다. 실험실은 밀폐된 공간으로 실내 습도를 90%까지 가습하여 성능실험을

수행하였다.

Table 1은 실험에 사용된 기화기의 디자인 조건을 나타내고 있다. 핀과 튜브의 재질은 A6063S로 열전도성이 좋은 알루미늄이 사용되었다.



Fig. 8 Air heating type vaporizer for LN2

Fig. 9는 실험 시에 나타난 기화기표면의 수분의 응결 고착현상으로 공기의 질에 따라서 기화기 외부에 공기 중의 수분이 응결되는 고착 현상이 발생하고 있다. 이로 인하여 기화 성능이 제대로 발휘되지 못하기 때문에 2~3개의 기화기 모듈을 적절한 배열이 중요하게 된다.

Fig. 10은 액화질소 탱크의 무게변화를 나타내고 있다. 초저온 유체의 경우 유량 측정시 기상과 액상이 동시에 존재하기에 유량계로 측정하는데 어려움이 많다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 전자저울을 통하여 시간에 따른 무게변화를 통해 질량유량을 구하였다. 초저온 액상의 유량을 일정하게 유지하기 위해서는 그림에서 보여 지는 바와 같은 부하가 작용하므로 정확한 유량의 조정은 곤란한 경우가 발생하리라 본다.

Table 1 Design condition of vaporizer for super low temperature liquefied natural gas

Design condition	
Fluid	LN ₂
Capacity	20 Nm ³ /hr
Design temperature	-196 °C
Design pressure	2.0 MPa
Operating temperature	-196 °C ~ -40 °C
Hydrostatic test	3.0 MPa
Pneumatic test	2.0 MPa
Weight	29 kg

4. 실험결과 및 고찰

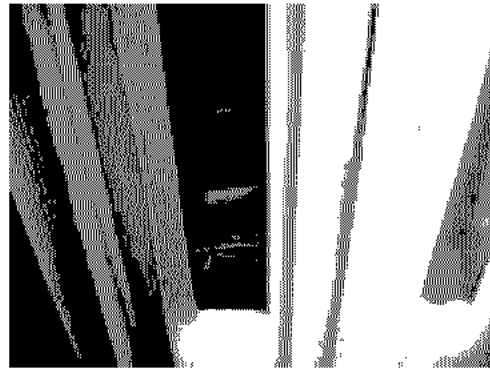


Fig. 9 Example of experimental result of vaporizer for super low temperature liquefied natural gas

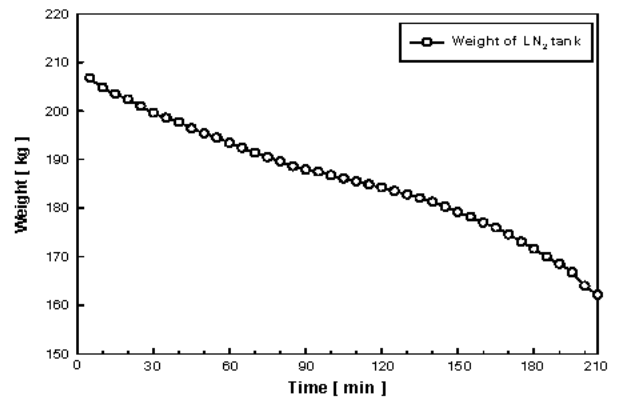


Fig. 10 Distributions of weight of LN2 tank

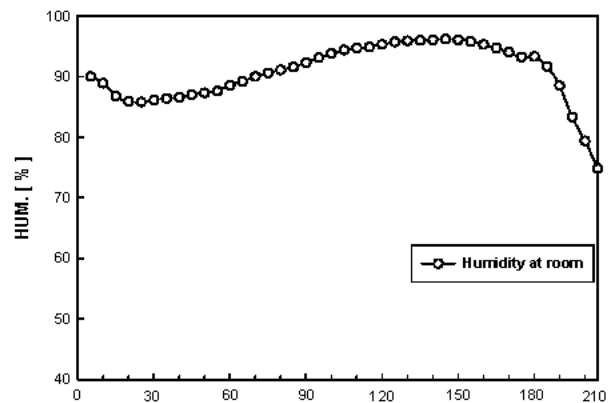


Fig. 11 Distributions of humidity of experiment room

Fig. 11은 실험실내의 습도의 변화추이를 나타내고 있다. 실험 시작시 90%까지 가습하고, 계속하여 추가 가습하여 기화성능에 따른 습도의 변화를 측정하였다. 습도의 변화추이 역시 기화기의 온도 상

승영역에 영향을 크게 받아 Fig. 11, Fig. 13과 비슷한 경향을 보여준다. $T_{L-1} \sim T_{L-8}$ 은 기화기 온도 취득점을 나타내며, T_O 와 T_R 은 출구측 온도와 실험 공간내의 온도를 각각 나타낸다. 기화기의 경우 장시간 사용 시에 습도의 영향으로 수분이 응결 고착되어 결빙되어 효율저하 현상을 가져오기 때문에 2기를 교체하여 사용하는 경우가 있다. 이러한 현상을 규명하기위해 극조건의 가습을 통해 실험을 하고 그 변화추이를 측정하였다.

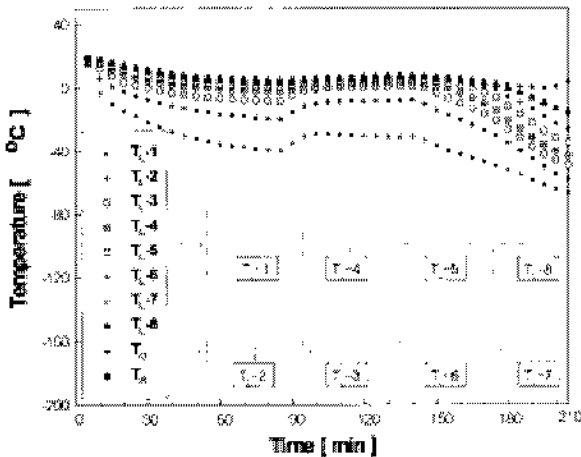


Fig. 12 Distributions of temperature on the Starfin vaporizer with fin and tube

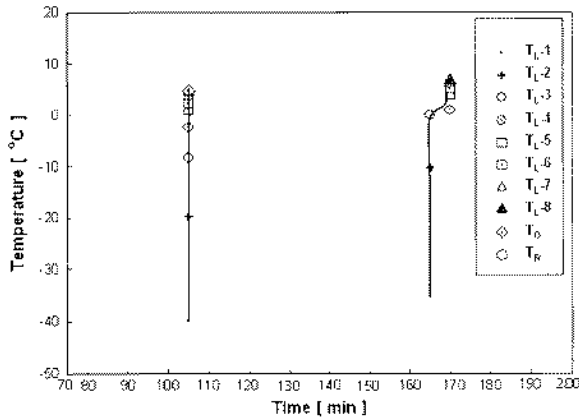


Fig. 13 A point of inflection of the Starfin vaporizer with fin and tube

Fig. 12는 성능실험에서 기화기내의 유동방향에 따른 각 지점의 온도를 나타내고 있다. 여기서 약 80분가량 경과되었을 때 전체적으로 온도가 상승하는 현상을 보이는데 이는 유량이 극히 작고, 기화기 내부에 액이 정체되어 발생하는 현상으로 사료된다. 이러한 현상은 수차례의 실험에서도 나타나고 있어

그 추이를 파악하고자 Fig. 13에 변곡점을 도시하고 있다. 실험 시에 액화질소 탱크의 밸브개도를 고정하고 유량을 고정하였지만 Table 2에서 보여 지는 바와 같이 시간에 따라 유량의 변화가 크게 나타난다. 이러한 현상은 전체적으로 기화기 내부에 액이 정체하여 발생하는 것으로 사료되고, Fig. 13의 실험실 내부 습도 역시 온도추이와 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 11에 보여 지는 바와 같이 기화기 내의 유로의 전반부는 전체적으로 변곡점이 동일측 선상에 존재하고, 후반부는 출구에 가까운 튜브일수록 변곡점이 후퇴하는 경향을 보이는데, 이는 입구단에서의 유입유체가 -195.8°C 의 초저온의 액상으로 유동하고, 출구부근에는 기화된 상태의 기상의 유체가 유동하기에 이러한 현상이 발생하는 것으로 사료된다. 이러한 현상은 약 60분가량 지속되고 이후 안정된 기화성능이 보여 진다.

Fig. 14는 기화기 핀의 열전달 성능을 나타내고 있다. 튜브에서 핀으로의 열전달은 고른 경향을 보이고 있고, 위의 경우에도 핀의 온도상승에 의한 변곡점이 보여 지고 있다.

Table 2 Discharge data of various positions for starfin vaporizer

Time[min]	$L_T 1$ [°C]	$L_T 2$ [°C]	$L_T 3$ [°C]	$L_T 4$ [°C]	$L_T 5$ [°C]	Discharge [kg/min]
0	18.9	18.9	18.9	18.9	19.0	0.4
60	55.9	55.6	54.1	54.0	53.8	0.2
120	46.6	47.2	46.2	46.0	45.6	0.14
180	75.6	74.2	73.0	72.7	72.2	0.34
AVE.						0.27

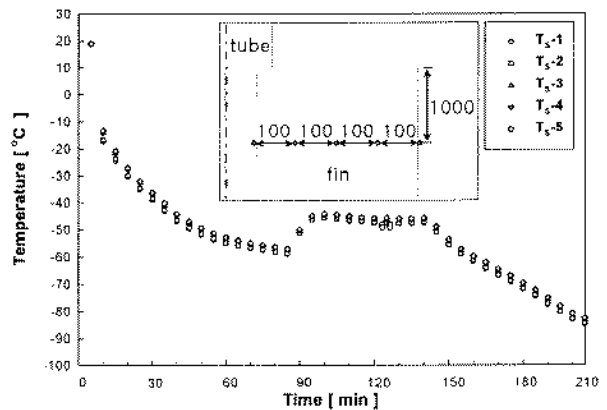


Fig. 14 Distributions of temperature on the fin surface

5. 결 론

초저온 천연가스용 기화기의 종류와 연구동향 및 개발동향을 분석하여 최적화 모델 개발에 관한 자료를 도출하고, 초저온 액화천연가스용 기화기의 운전특성에 관한 연구하였다.

초저온 기화기는 공기가열식과 해수 가열식으로 구분하여 위성 기지용 공기 가열식을 본 연구의 실험대상으로 하였다. 공기 가열식은 비교적 소용량의 기화를 위해 사용되고 수분의 응결 고착 현상을 대비해 2~3개의 기화기 모듈을 교대로 사용하고 있는 특징이 있다.

운전특성을 도출하기 위하여 20Nm³/hr 용량의 공기 가열식을 대상으로 하여 125 Starfin 타입으로 8개의 핀과 8개의 튜브로 구성된 것으로 택하였다. 실험에 사용된 가스는 -195.8°C의 액화질소로 기화기입구에 액 상태로 유입된다. 실험실은 밀폐된 공간으로 실내 습도를 90%까지 가습하여 성능실험을 수행하였다. 시간이 증가함에 따라 일반적으로 온도가 하강하지만 약 80분에서 120분 동안에 다소의 온도 상승이 나타나는 특이성이 관찰되었다. 이는 실제 설계유량 보다 저유량 운전시에만 발생하는 현상으로 기화기 관내에 액의 정체 현상으로 인한 열전달의 억제로 인한 결과로 사료된다. 이러한 현상은 기화기 운전 특성에서 특별히 고려하여야 할 특성으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역혁신인력양성사업, 경상대학교 NURI와 BK21 지역대학육성사업단 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다

참고 문헌

1. N. J. Kim, C. B. Kim, S. M. Yun and S. T. Han, 1994, "A Study on Boiling Characteristics of Direct Contact LNG Evaporator", SAREK, Winter Conference, pp. 380-385.
2. K. I. Choi and H. M. Chang, 2000, "Analysis of a cryogenic Nitrogen-Ambient Air Heat Exchanger Including Frost Formation", SAREK, Vol. 12, No. 9, pp. 825-834.
3. J. S. Park and H. M. Chang, 1997, "Analysis and Design of LNG Open Neck Vaporizer", SAREK, Vol. 9, No. 2, pp. 189-197.
4. T. Nakayara, et al., 1984, "Construction of Mos type LNG ship", Bulletin of Mitsubishi Heavy Industry Co., Vol. 21, No. 2, pp. 54-63.
5. T. Nakayara, et al., 1984, "Tank Insulation Characteristics of Moss type LNG ship Bulletin of Mitsubishi Heavy Industry Co., Vol. 21, No. 2, pp. 74-82.
6. Y. Huzitani, 1985, "On SPB type LNG Tanker of Kansai Naval Architecture Asso, Vol. 19, pp. 1-8.
7. Y. Huzitani, 1986, "Outlines and Background SPB", J. of Japan Naval Architecture Asso, Vol. 688, pp. 41-48.
8. K. Nishikawa. et al., 1988, "Heat Transfer Rikougaku Co., pp. 173-205.
9. I. G. Choi, et. al, 1992, "Heat Transfer", Bo Sui Pub, Co., pp. 329-442.
10. W. M. Roshenow and H. Choi, 1961, Heat, Mass, and Momentum Transfer, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 192-196.
11. R. K. Shah and S. Kakac, 1987, Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, John Willy and Sons, New York, Chap. 4, pp. 61-66.
12. A. F. Mills, 1992, Heat Transfer, Irwin, Boston, pp. 716-721.
13. Y. Miyata, S. Miura, H. Shohtani, M. Akiyama, and Y. Tonoike, 1994, "Thermal Performance of a Double-Tube Type LNG Vaporizer", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 39B, pp. 1599-1606.
14. D. G. Friend, 1992. "NIST Thermophysical Properties of Pure Fluids", Version 3.0 NIST Standard Reference Database 12, U.s. Dept. of Commerce, NIST, U.S.A.
15. F. M. White, 1979, Fluid Mechanics, Mc Grow-Hill, New York, pp. 673-680.
16. F. P. Incropera and D. P. Dewitt, 1990, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 489-500.
17. J. W. Kim, 2000, "A LNG Pressure Vessel Design", Journal of KWS, Vol. 18, No. 4, pp.

28-37.

18. J. K. Kim, C. S. Kim, D. S. Kim, and I. S. Yoon, 2000, "Fatigue Crack Growth Behavior of Membrane Material for LNG Storage Tank at Low Temperatures", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 23~28.
19. S. C. Lee, C. S. Kim, K. Y. Bae and K. P. Choi, S. C. Han, H. M. Jeong, 2004, "Heat Transfer Characteristics on the Protection Material of LNG Transport Pipe", *Journal of Korea Association of Small Business Innovation Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 53-60.
20. J. M. Han, Y. S. Han, 1993, "Review on Welding Technology and Welded Joint Strength of GT Membrane Type LNG Carrier", *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 11, No. 4, pp. 24-35.