

# 스터링엔진의 개발현황과 연구동향

최갑석

한국기계연구소 부설 해사기술연구소



● 1945년생  
● 내연기관을 전공하였으며, 디젤엔진의 연소 특성해석과 스텔링 엔진 개발연구에 관심이 있다.

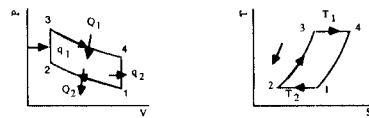
## 1. 머리말

代替에너지 機關 開發은 石油資源의 有限性에 대비하고 振動·騒音·公害로부터 環境을 保存시켜야 하는 목적을 包含시키고 있기 때문에 代替에너지 機關으로서는 燃料의 多樣性, 高効率, 低振動·低騒音 등의 특징 외에 用途도 다양해야 한다. 이러한 엔진으로 水素燃料 利用엔진, 스텔링 엔진 등이 개발되고 있으나, 스텔링엔진은 外燃機關으로 미래엔진으로서의 요건을 갖추고 있을 뿐만 아니라 特殊用途, 즉 宇宙船用이나 海中作業船用으로도 이용될 수 있어 이의 開發研究는 世界的으로 치열해지고 있다. 日本政府는 “장래의 機關으로서 스텔링 엔진을 開發과 研究를 행할 필요가 있다”고 70년대 초 결정한 이래 Moonlight Plan, Post Moonlight Plan을 세워 지속적인 開發研究로 實用化를 목전에 두고 있으며, 美國에서는 宇宙船用과 自動車用에 집중적인 研究로 自動車用的 경우 Demonstration과 더불어 實用化 研究가 계속되고 있다. 국내에서도 89년부터 政府主導과제가 진행되고 있다.

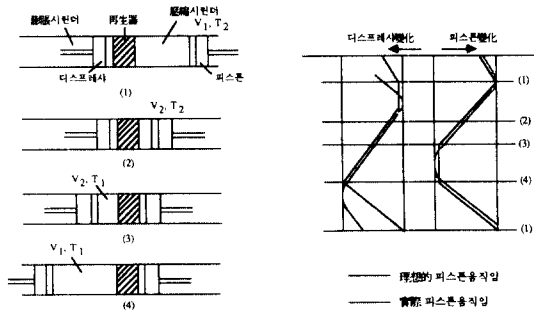
그러나 이렇게 스텔링엔진의 長點으로 競爭的인 研究가 이루어지고 關聯機械, 電子産業의 발달로 스텔링엔진 開發에 직접적인 지원이 되고 있지만 스텔링엔진의 특성상 開發의 어려움은 많다. 外燃機關이기 때문에 밀폐사이클을 이루고 密閉空間內 작동유체는 高傳熱성과 底

流動低抗의 특성을 가져야 하며 高出力을 얻기 위하여 高壓力下에서 작동시켜야 되기 때문에 氬류이나 수소가스가 사용되고 있어 작동유체의 Leakage에 대한 대책이 가장 중요한 과제이며, 엔진의 制御技術, 經濟性 있는 엔진 開發 등이 스텔링엔진 研究에 어려움을 주고 있다.

1816年 스코틀랜드의 R. Stirling이 스텔링엔진을 發明한 이래 代替機關의 必要性和 環境保存을 위한 排氣가스 規制나 Freon 사용 規制 등의 相關環境보존법규 강화에 따라 스텔링엔진 開發 研究는 오늘날 가장 심도깊은 研究를



(a) P-V, T-S 線圖



(b) 사이클 說明圖 (c) 피스톤, 디스프레샤움직임

그림 1 이론 스텔링 사이클

추진하고 있는 실정이다.

본 글에서는 스테링엔진의 基本原理, 開發狀況과 核心技术 및 앞으로의 연구과제를 요약 소개한다.

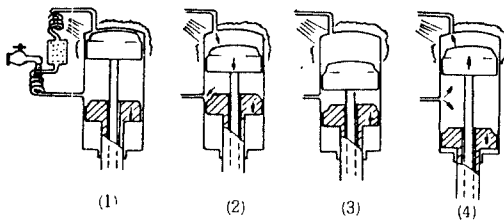
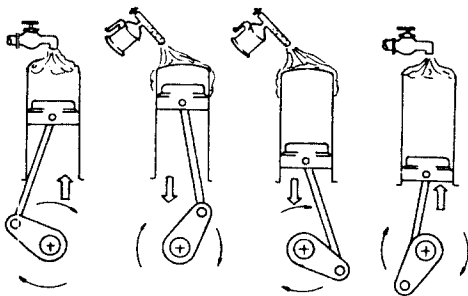
## 2. 스테링엔진

### 2.1 이론사이클과 Schmidt 사이클

그림 2/1에서 보는 바와같이 스테링엔진 사이클은 등온압축, 등적가열, 등온팽창, 등적방열로 이루어진 外熱機關이다. 이론적으로는 팽창, 압축의 兩 실린더내 作動流體는 항상  $T_1, T_2$ 로 일정하고 가스의 이동에 따른 流動損失은 없으며, 完全가스로 系外로의 누설이 없고 팽창, 압축 피스톤은 理想사이클을 형성하게 된 것으로 하여 解析을 한다. 再生器의 溫度効률을 100%로 하면 각 과정에서 熱의 授受는 그림을 參照하여 다음 式으로 나타낸다.

$$Q_1 = ART_1 \cdot \ln(V_1/V_2) \quad (1)$$

$$q_1 = C_v \cdot (T_1 - T_2) \quad (2)$$



(1) 저온·압축 (2) 고온·고압  
(3) 고온·팽창 (4) 저온·저압

그림 2 스테링엔진 작동개념도

$$Q_2 = ART_2 \cdot \ln(V_1/V_2) \quad (3)$$

$$q_2 = C_v \cdot (T_1 - T_2) \quad (4)$$

이때 圖示일량  $W$ 와 理論熱効率  $\eta_{th}$ 는

$$W = AR(T_1 - T_2) \cdot \ln(V_1/V_2) \quad (5)$$

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (6)$$

上記 式으로 나타나며 理論熱効率は 카르노 사이클의 熱効률과 一致된다. 現實的으로 再生器 熱効률  $\eta_R$ 을 考慮하면 上記 式 (6)의 理論熱効률  $\eta_{th}$ 는 다음과 같이 된다.

$$\eta_{th} = \frac{(\gamma - 1)(1 - \tau) \cdot \ln \epsilon}{(\gamma - 1) \cdot \ln \epsilon + (1 - \eta_R) \cdot (1 - \tau)} \quad (7)$$

여기서  $\epsilon = (V_1/V_2), \gamma = C_p/C_v, \tau = (T_2/T_1)$

한편, 스테링사이클의 해석을 간편하게 하기 위하여 G. Schmidt는 上記 이론사이클에 피스톤 運動을 正弦波함수로 표시하고 膨脹피스톤과 壓縮피스톤의 位相角  $\alpha$ 를 도입하였다. 즉, 어느순간의 膨脹 및 壓縮실린더와 熱交換器內 體積을  $V_E, V_C, V_D$ , 각 공간의 溫度를  $T_H, T_C, T_D$ 로 할때 作動空間 全體의 가스중량  $G_T$ 는 式 (8)로 나타나며

$$G_T = \frac{P \cdot V_E}{R \cdot T_H} + \frac{P \cdot V_C}{R \cdot T_C} + \frac{P \cdot V_D}{R \cdot T_D} \\ = \frac{F \cdot V_{ES}}{2 \cdot R \cdot T_C} \quad (8)$$

여기서  $R$ 은 가스정수,  $T_D = (T_H + T_C)/2, F$ 는 정수,  $V_{ES}$ 는 팽창실린더의 행정체적을 나타낸다.  $V_E, V_C$ 는  $V_{ES}, V_{CS}$ 를 팽창·압축 실린더의 행정체적으로 할때 Schmidt가정에 의해

$$V_E = V_{ES} \cdot (1 - \cos \theta)/2 \quad (9)$$

$$V_C = V_{CS} \cdot \{1 - \cos(\theta - \alpha)\}/2 \quad (10)$$

이 되며  $\theta$ 는 크랭크각,  $\alpha$ 는 위상각을 나타낸

다.  
결국, 作動流體의 壓力  $P$ 는 式 (11)이 된다.

$$P = P_{\max} \cdot V_T \cdot \pi \frac{(1-\tau)}{(k+1)} \sqrt{\frac{1-\delta}{1+\delta}} \cdot \frac{\delta \sin \theta}{1+\sqrt{1-\delta^2}} \quad (11)$$

여기서  $\delta = \frac{\tau + k + 2s}{\sqrt{\tau^2 + 2\tau k \cos \alpha + k^2}}$ ,  $k = \frac{V_{CS}}{V_{ES}}$

### 2.2 作動原理

스터링엔진이 內燃機關과 크게 다른 점은 作動流體에 熱을 供給하는 방법에 있다. 內燃機關에서는 作動流體를 壓縮해서 直接燃燒시켜 作動流體를 高溫·高壓으로 하여 피스톤의 운동을 가져오나, 스테링엔진에서는 膨脹시에 加熱器 또는 실린더헤드를 통해 전해지는 熱로 作動流體를 高溫·高壓으로 하여 피스톤을 움직인다.

그림 2의 概念圖에서 (1)의 作動流體는 低溫상태로 유지되면서 壓縮되고 上死點을 지나면 冷却상태로부터 加熱상태로 들어가며 作動流體는 高溫·高壓으로 되어 (2), (3)에서와 같이 피스톤을 下向시켜고 下死點에서 다시 冷却상태로 들어간다.

엔진은 그림의 과정을 순서적으로 밟게 되어 있으나, 실제로는 1개의 실린더를 반복해서 加熱·冷却시켜 出力을 뽑아내는 것은 불가능하다. 실제엔진에서는 壓縮·膨脹을 專門으로 分擔할 실린더를 준비하고 作動流體의 壓縮은 低溫실린더에서, 膨脹은 高溫실린더에서 하게 하고 있다.

그림 아래에는 실제 機構를 나타낸 것으로 실린더내에 있는 여과기(displacer)를 경계로 하여 上部는 膨脹(高溫)실린더, 下部는 壓縮(低溫)실린더로 되어 있다. 여과기가 下向할때

作動流體는 高溫으로 되고 上向할 때 低溫으로 되어 高溫상태와 低溫상태일때 出力피스톤을 각각 膨脹과 壓縮상태가 되도록 하면 그림 上部의 作動과 같게 되어 엔진출력을 얻을 수 있다.

### 2.3 分類 및 特徵

스터링엔진의 分流方法에는 作動空間, 실린더配列, 加熱方式, 出力機構 등에 의한 여러가지가 있으며, 일반적으로 피스톤의 배치에 따라서 3가지가 있다(그림 3). 두개의 실린더와 두개의 피스톤으로 구성된  $\alpha$ 型, 하나의 실린더내에 피스톤과 여과기가 내장된  $\beta$ 型, 피스톤과 여과기가 별도의 실린더내에 설치된  $\gamma$ 型으로 나누며, 그 基本 構成은 실린더, 피스톤, 여과기, 加熱器, 冷却器, 再生器등이며 補機로서 空氣예열기, 放熱機, 펌프류(공기 blower, 연료펌프, 냉각수, 運轉유용)기타 제어용 수소 압축기 및 공조용 壓縮機, 發電機 등이 선택적으로 사용된다.

한편, 스테링엔진의 特徵으로서는 理論熱效率이 높기 때문에 高熱效率의 엔진 開發이 期待될 수 있고, 外燃機關이기 때문에 外部에서 作動가스를 加熱함으로 어떠한 燃料라도 熱源으로 사용할 수 있으며, 內燃機關에서 나타나는 爆發的인 燃燒가 아니기 때문에 조용하고 公害가 적어 環境保存을 위한 미래의 엔진으로 脚光을 받고 있을뿐만 아니라 用途가 多樣하

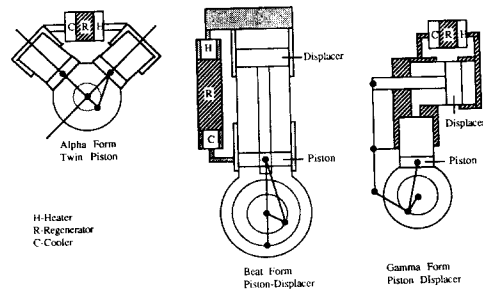


그림 3 스테링엔진 피스톤 배치방법

다. 卽, 自動車用, 産業界動力源, 冷凍機구동용, 船舶用을 위시하여 인공심장펌프 구동용에 이르기까지 多様하며, 특히 空氣吸入이 어려운 宇宙船 및 海底探査船의 動力源에도 이용될 수 있는 점은 타기관에 비해 매우 유리하기 때문에 世界的으로 스테링엔진 開發연구는 치열하다.

미래의 機關으로서는 환경보존과 에너지절감에 대한 문제해결을 시켜줄 수 있는 관점이 중요시되는데, 以上에서와 보는 바와 같이 스테링엔진은 高効率, 低振動, 低騒音, 低公害, 燃料多様性 및 用途多様性에서 미래의 機關으로서 最適으로 脚光을 받고 研究가 치열하게 추진되어 왔다. 특히 空氣가 없는 공간의 原動機 즉, 宇宙船 및 海中作業船의 動力源으로서는 독보적인 엔진일 수 밖에 없다.

### 3. 開發現況 및 核心技術

#### 3.1 開發現況

지금까지의 스테링엔진 연구개발 현황을 개

괄적으로 살펴본다.

스터링엔진에 관한 연구논문은 매년 50편 정도가 미국에서 개최되는 에너지 變換工學國際會議(IECEC)에 발표되고 있다. 또 스테링엔진 國際會議(ICSE)가 격년제로 개최되고 있으며, 제 1회는 영국 London에서, 제 2회는 1983년 중공, 제 3회는 이탈리아에서 개최되고, 제 4회는 1988년 11월 동경에서 개최되었다.

근대적 스테링엔진 개발 역사는 여과기식 중심의 1960년대, Double Acting 식 개발의 1970년대, 그리고 實用化에 들어선 1970년대말 이후의 3기로 대략 나눌 수 있다.

Philips 社의 R.J. Meijer가 1953년에 발명한 Rhombic Driving Displacer 식은 1960년대를 중심으로 개발이 진전되고 단기적으로 出力 數 kw에서부터 4氣筒 구성의 265kW에까지 試製作되었다. 이중 出力 150kW의 4~235형은 버스나 보트에 탑재되어 있다. 이 엔진은 1957년에 GM, 1967년에 서독의 MAN/MWM, 1968

표 1 Double Acting 형 엔진 특성 비교

메이커	Philips-Ford	USAB	AISHIN	DOE	USAB	USAB	
아이템	형식	4-125D	P75	MT79	Mod I	4-95	4-275
작동가스	수소	수소	헬륨	수소	수소	수소	
소기용적 (cm <sup>3</sup> )	215×4	189×4	189×4	123×4	95×4	275×4	
평균압력 (MPa)	20	15	13.4(추정)	15	15	15	
열관 온도(°C)	750	720	750	720	.	.	
냉각수온도(°C)	64	70	20	50	.	.	
온도비 $\tau$	0.329	0.345	0.286	0.325	.	.	
<u>최고출력조건</u>							
회전수 (rpm)	4000	2400	2500	4000	4000	2600	
축출력 (kw)	127	64	52	54.4	43	110	
열효율 (%)	23	29	23	28	27	38	
Beale No.	0.0111	0.0141	0.0123	0.0111	0.0113	0.0154	
<u>최고열효율조건</u>							
회전수 (rpm)	1350	1250	700	2000	2000	1000	
축출력 (kw)	60.5	39	20.8	36	30	50	
열효율 (%)	33	32	31	34.5	34	42	
Beale No.	0.0156	0.0165	0.0176	0.0146	0.0158	0.0182	

년에 Sweden의 United Stirling Engine社 (USAB)에 각각 기술이 제공되어 발전의 계기가 되었다.

Double Acting 식개발은 美國 Philips社와 공동 개발하고 1975년에는 승용차에 탑재시킨 회전사판의 4-215DA를 대표적으로 개발하여 車에 탑재 시험을 하였다. 이 시기에 日本의 Aishin社, 運輸省등에서 연구개발을 시작하였다. 또 美國에서는 FPSE(free piston stirling engine)의 개발이 본격화되었다.

1970년대 이후의 제3기에 두드러진 것은 1979년에 Philip社가 개발을 중지한 것이다. 이것은 FORD社가 미국 DOE의 자동차용 엔진 개발 계획에 1978년 참가 포기를 한 것에

기인한 것으로 알려지고 있다.

한편, USAB는 V4로 전환하고 4-95 및 4-275의 개발을 진행시키고 있고, 자동차용 외에 열펌프용, 태양열전지용 및 잠수정용으로서 實用化를 목표로 하고 있다. 4-95는 DOE의 자동차용 엔진 Mod I의 기초가 되어 있다. Mod I은 MTL, USAB및 AMG에서 공동 개발하고 있고 차량 탑재 시험도 행하였다. 현재는 부분적 개량형의 Mod I A, B의 개발이 계속되고 있다. 이상 기술한 Double Acting형 엔진의 성능을 표 1에 나타낸다. 4-275의 특성이 뛰어나고 대형의 효과가 현저하게 나타난다.

한편, 日本에서는 1976년부터 通商産業省 工

표 2 凡用 스티어링엔진 目標性能 및 中間評價 試驗結果

項目	方式		3kW級 家庭用冷煖房用		3kW級 業務用冷煖房用	3kW級 小形動力用
	型式		NS03M	NS03T	NS30A	NS30S
目標性能	使用燃料		天 烈 가 스			
	作動가스		헬 리 움			헬 리 움(最終目標는 水素)
	엔진 冷却法		冷 却 式			
	熱 効 率		32%		35%	35%(最終目標는 37%)
	出 力		3kW		30kW	
中間評價試驗結果	最高出力特性	열管溫度	801℃	789℃	751℃	763℃
		平均作動가스壓力	6.2MPa	6.1MPa	15.0MPa	11.1MPa
		엔진 回轉率 (rpm)	1201rpm	1250rpm	1500rpm	1600rpm
		出 力	4.27kW	3.46kW	30.9kW	23.4kW
		熱 効 率	29.5%	27.3%	27.8%	26.8%
	最高熱効率特性	열管溫度	782℃	798℃	754℃	812℃
		平均作動가스壓力	6.2MPa	6.1MPa	10.8MPa	13.7MPa
		엔진 回轉數 (rpm)	800rpm	900rpm	750rpm	826rpm
		出 力	3.17kW	3.00kW	13.0kW	18.8kW
		熱 効 率	31.6%	31.1%	31.6%	29.5%

業技術院에서 省에너지 기술개발의 한 프로젝트로서 스텐링엔진이 연구되고, 80년대에 들어 Moonlight Plan으로 實用化의 可能性, 市場性을 고려하고 民生部門에 石油代替 및 省에너지化의 추진을 위해 空調用 및 小形 動力用에 초점을 두어 추진되었다.

1982년부터 NEDO(new energy development organization: 新에너지 綜合開發機構)에 技術開發體制를 두고 네가지 방식의 엔진을 4社에 위임하여 요소기술에 관한 기초적 연구로부터 實際엔진의 設計, 試製作 및 운전 연구를 중심으로 利用시스템 및 燃料多樣化의 연구까지 폭넓은 연구개발이 수행되었다.

1982년부터 6년간의 연구개발기간중 전반의 3년은 性能(熱效率, 出力)의 향상을 목적으로 한 기본엔진의 개발을 수행하고, 후반의 3년은 實用性(耐久性, 小形 輕量化, NO<sub>x</sub>騒音의 低減 등)의 향상을 목적으로 한 실용엔진 개발 연구를 수행하였다. 전반 3년간의 연구결과를 평가하여 후반 계획에 반영시키기 위하여 전반이 끝날무렵 중간평가 계획이 포함되어 있다.

4社의 엔진 目標性能 및 中間評價 試驗結果

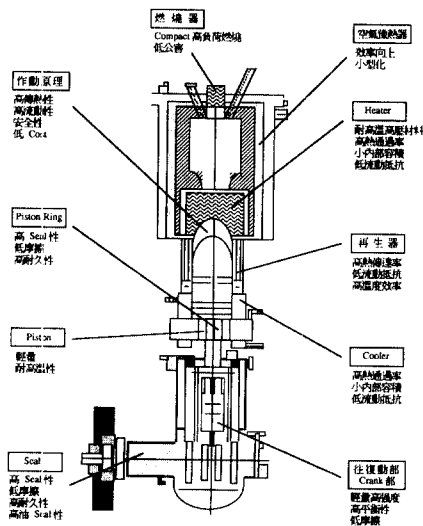


그림 4 스텐링엔진의 핵심기술

를 표 2에 제시한다.

上記計劃에 대한 평가가 1988년 이루어지고 Post Moonlight계획이 추진되고 있다.

### 3.2 核心技术

스터링엔진의 개발상 어려운 문제는 그림 4에서와 같이 크게 분류하여 10개의 부문에서 제기되고 있다.

지금까지의 연구로 개발을 진행해온 결과에 의하면 密封裝置, 耐熱材料開發, 空氣豫熱器와 연소시스템의 熱效率, 速度制御, 再生器效率制御, 補器選定 등이 어려운 과제로 남아 있다.

## 4. 研究動向

스터링엔진은 代替機關으로서 要求事項을 충족시키고 있으며, 특수조건하에서도 사용이 가능하기 때문에 實用化 研究는 더욱 拍車가 가해질 것이다.

특히 環境保存을 위한 Freon사용 規制나 自動車 排氣가스, 石油價引上 要人發生 등은 미래의 엔진으로만 인정해온 스텐링엔진을 새롭게 인식시키는 促進劑 役割을 하고 있다.

그러나 上記 여건과 關聯工業의 발달로 直接的인 技術支援을 받아 스텐링엔진 開發研究에 가장 좋은 환경이지만, 그림 4에서와 같이 核心技术이 부분적으로 해결되지 않고 있기 때문에 계속되는 연구의 주된 과제가 되고 있으며, 그림 5에서 보는 바와 같이 각 분야의 용도에

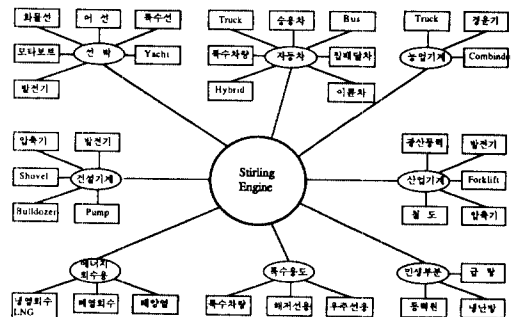


그림 5 스텐링엔진의 용도

따른 개발이 진행되고 있다.

그외에도 出力制御機構開發이나 用途에 相應한 各 構成品의 開發研究(예를 들면, 宇宙船用에서는 태양열을 이용한 燃燒器, 海低探查船用에서는 燃料電池나 Li-SF<sub>6</sub>의 化學反應(metal combustion)을 熱源으로 하는 燃燒器 開發), 기존 動力源에 경쟁될 수 있는 經濟性 추구에 대한 研究 및 設置取扱·管理上의 安全·便利 度모에 이르기까지 研究방향은 단기간에 확대 되고 實用化에 박차를 가할 것이다.

### 5. 맺음말

代替에너지 機關으로서 요구되는 條件을 갖춘 스테irling엔진의 理解를 돕기 위하여 基本原理, 開發現況, 開發上 문제점 등의 基本事項을 소개하였다.

內燃機關과는 달리 外燃機關인 스테irling엔진은 作動流體가 密閉空間內에서 高·低溫 양 영역을 이동하면서 壓力差를 발생시켜 일을 형성하는 과정을 밝기 때문에 高溫·高壓일수록 높은 出力이 예상되며, 傳熱性能과 作動抵抗面에서 수소나 헬륨과 같은 低分子量의 가스가 作動體로 채택되기 때문에 作動流體의 누기(leakage) 및 크랭크실의 冷却 윤활유의 作動空間으로의 누유 등은 스테irling엔진의 出力 低下에

가장 큰 요인으로 작용한다. 摩擦 등 機械的 損失의 低減技術, 速度制御技術, 用途에 따른 엔진 형식 設計技術, 構成部品 性能向上을 위한 要素技術 등의 開發이 중요한 과제가 되고 있으며, 이상 소개한 내용이 관심있는 많은 분들의 스테irling엔진 연구나 이해에 도움이 될 수 있기를 바란다.

### 참 고 문 헌

- (1) 一色尙次, “スターリングエンジンの開發”, 1982, 工業調査會.
- (2) 塚原茂司, “船用スターリングエンジンの可能性と問題點”.
- (3) 塚原茂司, “船用スターリングエンジンの研究”, 日本船舶技術研究所.
- (4) Walker, G. “Stirling cycle Machine”, 1973, Oxford Univ. press.
- (5) Reader, G.T. C. Hooper, “Stirling Engines”, 1983.
- (6) Martini, W.R. “Stirling Engine Design Manual”, 1978.
- (7) 과학기술처, “선박용 스테irling엔진 개발”, 1990. 6.

