

# 박용 스테어링엔진 개발을 위한 주설계변수 결정에 관한 연구

이택희\* · 이명호\*\* · 이종원\*\*\*

## A Study on the Determination of the Main Design Parameters for the Development of Marine Stirling Engines

T. H. Lee · M. H. Lee · J. W. Lee

**Key words** : Marine stirling engine(박용 스테어링엔진), Operating characteristics(작동특성), Rhombic drive mechanism(롬빅드라이브 메카니즘), Main design parameters(주설계변수)

### Abstract

This paper deals with the determination of the main design parameters on the efficient  $\beta$  type stirling engine for marine use having the rhombic drive mechanism.

This studies are performed as following. (1) The characteristics of  $\beta$  type stirling engine, (2) The kinds of driving mechanism, (3) The structure of rhombic drive mechanism, (4) The reasons of making choice of the rhombic drive mechanism in  $\beta$  type stirling engines, (5) Ultimately the purpose of this paper is to determine the main design parameters of  $\beta$  type stirling engines for marine use having the rhombic drive mechanism.

Finally, We can adapt the result of this paper in designing of  $\beta$  type stirling engine driven by the rhombic drive mechanism

### 기호설명

#### 영문자

$A_d$  : 디스플레이서 피스톤 단면적  
 $A_d'$  : 디스플레이서 피스톤 단면적 - 디스플레이서 피스톤 로드 단면적  
 $A_p$  : 파워피스톤 단면적

$A_p'$  : 파워피스톤 단면적 - 디스플레이서 피스톤 로드 단면적

$B_n$  : 계수

$D = \sqrt{(B-1)^{2+1}}$  : 상수

$r$  : 크랭크 반경

$f = \frac{A_d'}{A_p}$  : 파워피스톤 단면적에 대한 디스플레이서 피스톤 단면적

\* 경희대학교 대학원 기계공학과

\*\* 서울산업대학교 기계공학과 교수

\*\*\* 경희대학교 기계공학과 교수

$S=S_p=S_d$  : 파워피스톤 행정 = 디스플레이서 피스톤행정

$SU-ST$  : 디스플레이서 피스톤 요크의  $x$  좌표 방향의 이동거리 = 디스플레이서 피스톤의 행정거리

$VT=PQ=S/r$

$V_c$  : 압축공간 체적

$V_E$  : 팽창공간 체적

$V_o$  : 팽창공간 최대체적

$W$  : 진폭비

$X_d$  : 디스플레이서 피스톤의 횡좌표

$X_p$  : 파워피스톤의 횡좌표

$\frac{X_d}{r}$  : 디스플레이서 피스톤의 상대변위

$\frac{X_p}{r}$  : 파워피스톤의 상대변위

그리스문자

$\alpha$  : 크랭크각

$$\gamma_c := \tan^{-1} \frac{(1-f)}{(1+f)B_1}$$

$$\gamma_E := \tan^{-1} \frac{1}{B_1}$$

$\lambda$  : 피스톤 커넥팅로드의 상대길이

$\epsilon$  : 피스톤 구동메카니즘의 상대편심량

$\frac{1}{\lambda}$  : 커넥팅로드 길이

$\varphi_{dr}$  : 두 피스톤의 운동위상각

$\varphi_{vo}$  : 두 피스톤의 운동으로 인한 체적위상각

$\chi$  :  $x$ 축과 피스톤 커넥팅로드 사이에서 생기는 각도.

$\chi_{max}$  :  $x$ 축과 피스톤 커넥팅로드 사이에서 생기는 최대각도.

## 1. 서 론

스터링 엔진은 연료의 다양성, 저대기오염, 저연비, 고효력의 특성을 지니고 있어서 현재 활발히 연구되고 있는 대체 에너지원 및 대체 에너지기관 개발과제에 부합되는 미래형 엔진이다. 스테링 엔진은 실린더의 연결형태에 따라  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 형태로 분류한다.

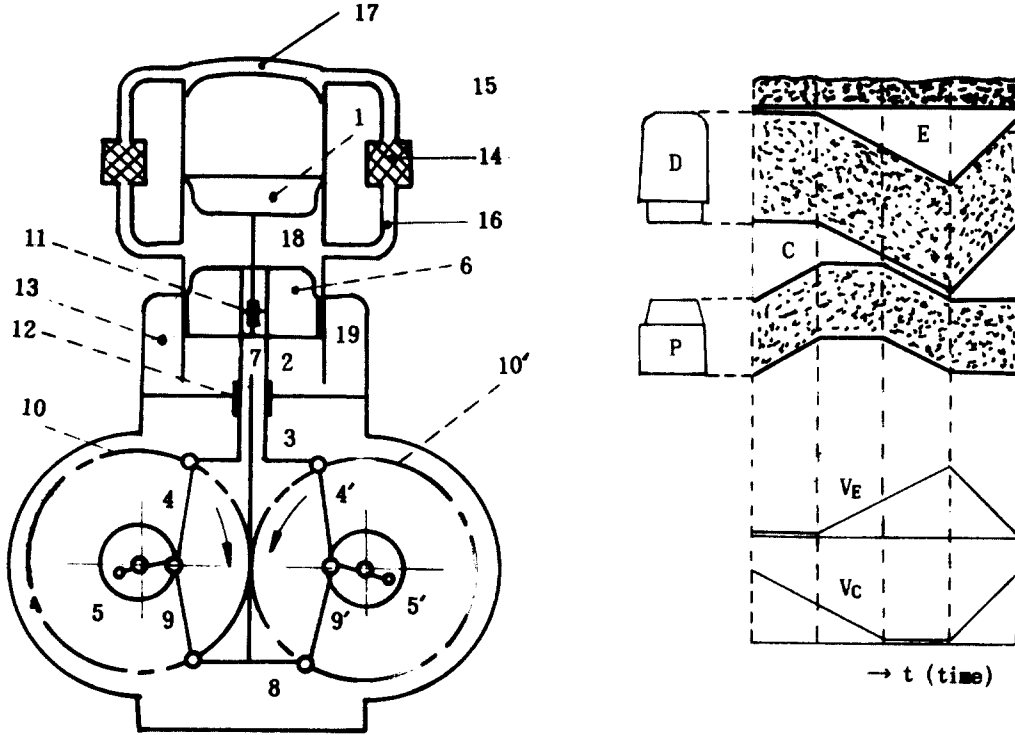
스터링엔진은 상기의 특성을 지닌 미래형 대체 에너지 기관이며, 육용 및 박용으로 채용하기에 유력한 기관이다. 특히 박용기관에 채용했을 때 유리한 점은 기존의 내연기관을 채택했을 때보다 냉각수량이 약 2배 정도 더 필요하고 마력당 고중량의 문제점이 있으나 박용기관에서는 육용기관에 비해 쉽게 극복할 수 있다. 박용기관의 주기 또는 보조기기로써 내연기관을 채택하는 경우 주기적인 폭발로 인하여 진동과 소음의 수위가 높은 문제점이 제기 되는데 스테링 엔진을 채택하면 이 엔진특유의 저진동 및 저소음의 특성으로 극복할 수 있고, 또한 저속하에서도 고효율 및 고회력을 낼 수 있으며 가열열원의 종류에 구애받지 않으므로 저연비의 효과를 얻을 수 있다.

장래의 박용기관의 주기 및 보조기기로 활용할 수 있는 스테링엔진은 주로  $\beta$ 형이 적합하다.

따라서 본 연구에서는 동일한 실린더 속에 2개의 피스톤이 들어있는  $\beta$ 형 엔진을 연구모델로 채택하였고 Fig.1에 제시하였다. 스테링 엔진에서 가열기는 연소실에서 나오는 열을 엔진내의 작동가스로 전달하는 기능을 하고 냉각기는 작동가스가 보유하고 있는 열을 외부로 방열하는 기능을 하며, 재생기는 작동가스가 보유하고 있는 열을 일시적으로 저장하였다가 다시 되돌려주는 열역학적인 스펀지 역할을 한다. 또한 스테링엔진에서는 2개의 피스톤이 있는데, 디스플레이서 피스톤은 작동가스를 주기적으로 가열 및 냉각시키는 기능을 하고, 파워피스톤은 작동가스를 週期的으로 압축 및 팽창시키는 기능을 한다.

스터링엔진에서 구동메카니즘은 크랭크축 구동 메카니즘과 롬빅드라이브 메카니즘을 주로 사용한다. 본 연구에서는 Fig.1에서처럼 구동메카니즘으로 롬빅드라이브 메카니즘을 채택하였으며, 롬빅드라이브 메카니즘을 채택한  $\beta$ 형 스테링엔진은 다음의 특성을 갖는다.

(1) 파워피스톤 로드와 디스플레이서 피스톤 로드는 축방향으로 운동하므로 측면방향으로 작용하는 힘성분은 없고 실린더의 기밀유지가 아주 양호하며 작동가스의 팽창으로 인해 파워피스톤에 작용하는 힘은 완충공간속의 가스의 압력으로 보정되므로 크랭크케이스 속은 대기압하에 직면할



1=displacer. 6=piston. 5.5' =cranks on two shaft which rotate in oppsite directions and are coupled by the gear wheels 10 and 10'. 4, 4' =connecting rods pivoted on the ends of a yoke 3 fixed to thee hollow piston rod 2.9, 9' =connecting rods pivoted on the ends of a yoke 8 fixed to the delplacer rod 7 which passes through the hollow piston rod.  
 11, 12=stuffing boxes. 13=buffer space filled with gas under high pressure. 14=Regenerator. 15=heater. 16=cooler. 17=expansion space volume. 18=compression space volume. 19=buffer space volume.

**Fig. 1(a) The Rhombic Drive Mechanism**  
**(b) Discontinuous Motion of the Two Piston**

수 있어서 엔진은 경량화 된다.

(2) 비출력을 높이기 위하여 엔진속에 고압유지가 가능하며, 다실린더 엔진을 만들 수 있고,

(3) 파워 피스톤에 대한 디스플라이서 피스톤의 位相角은 단순히  $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$  사이에 영역에 존재하며, 단일실린더 엔진으로도 완전히 평형상태를 얻을 수 있으므로 기본적으로 진동이 거의 없는 엔진을 설계 및 제작할 수 있다.

(4) 내연기관특유의 벨브기어가 없으므로 소음이 거의 없다.

상기의 특성 때문에 소형, 경량화, 고출력을 위하여  $\beta$ 형 스테어링엔진에서는 롬빅드라이브 메카니

즘을 채택하고 있다.롬빅드라이브 메카니즘은 일반형과 특수형으로 대별한다.

본 연구에서는 Fig.1에 표시된 특수형 롬빅드라이브 메카니즘을 채택하였다. 특수형 롬빅드라이브 메카니즘 구조는 다음과 같다. 쌍동이 크랭크축은 기어휘일에 연결되어 있고, 이 기어휘일은 엔진의 중심축(x축)에 대해 대칭적으로 양측에 위치하고 있다.

파워 피스톤 1은 피스톤로드 2와 요크 3에 연결되어 있고 요크3은 커넥팅로드 4, 4'와 디스플라이서 피스톤 6의 커넥팅로드 9, 9'와 연결되어 있고 이것은 다시 크랭크축에 연결되어 있다.

일반형 및 특수형 롬빅드라이브 메카니즘을 채택한  $\beta$ 형 스테어링엔진 개발을 위해서는 이 구동메카니즘에 대한 평형조건을 우선 알아야 한다. 그러나 이들에 대한 내용을 제시한 문헌은 거의 없으며, 약간의 참고문헌<sup>2),3),4)</sup>속에 소량으로만 언급되고 있을 뿐이다.

또한 엔진의 주설계변수들에 대한 연구내용도 열역학적인 측면에서는 다소 많이 연구되고 결과가 발표되고 있다. 그러나 구조적 측면에서 구동장치의 물리적 크기가 주어진 경우에 대한 엔진의 주설계변수들에 대한 연구내용은 거의 발표되지 않고 있는 실정이다.

실제 엔진설계 및 제작을 위해서는 열역학적, 구조적 측면에 대한 연구가 병행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 선박용  $\beta$ 형 스테어링엔진 개발을 위한 일환으로 구동장치로 롬빅드라이브 메카니즘을 채택했을 때 롬빅드라이브 메카니즘의 크기로 부터 엔진의 주설계변수 값 즉, 두 피스톤의 행정  $S$ , 두 피스톤의 운동위상각  $\varphi_{dr}$ , 체적위상각  $\varphi_{vo}$ , X축과 피스톤 커넥팅로드 사이에서 생기는 최대 각  $\chi_{max}$ , 팽창 및 압축공간의 체적  $V_e, V_c$ , 팽창공간 최대체적  $V_0$ , 진폭비  $w$ , 크랭크각  $\alpha$ 를 구하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 롬빅드라이브 메카니즘 크기로 주설계변수 결정

### 2.1 해석모델

본 연구에서는 롬빅드라이브 메카니즘의 크기로 엔진의 주설계변수 결정을 위한 해석모델을 Fig.1에 제시하였다.

### 2.2 두 피스톤의 행정

Fig.1에서 보면, 두 피스톤 로드 축 방향에 대해 롬빅드라이브 메카니즘은 좌우대칭을 이루고 있기 때문에, 파워 피스톤과 디스플레이서 피스톤에 대한 행정  $S$ 를 구하기 위해서는 롬빅드라이브 메카니즘 형태의 1/2만으로도 가능하며, 이를 Fig.2에 제시하였다.

Fig.2로부터 롬드라이브 메카니즘은 Y축에 대

하여 대칭이므로 파워피스톤의 행정과 디스플레이서 피스톤의 행정은 서로 같다.

디스플레이서 피스톤은 디스플레이서 피스톤의 커넥팅로드(길이  $\frac{1}{\lambda}$ )가 크랭크반경  $r$ 과 연장선상(위치  $V_0$ )를 형성할 때 실린더 속에서 가장 낮은 위치에 존재하게 되고, 디스플레이서 피스톤 커넥팅로드가 크랭크반경  $r$ 과 중복될 때(위치  $T_0$ ) 실린더 속에서 가장 높은 위치에 존재한다.

디스플레이서 피스톤상부와 하부 사이에는 압력차가 거의 없고 온도차만 크게 되므로 디스플레이서 피스톤이 실린더속의 가장 낮은 위치에 존재하면 작동가스는 가열되고, 가장 높은 위치에 존재하면 작동가스는 냉각된다.

파워피스톤의 커넥팅로드 길이가 크랭크 반경  $r$

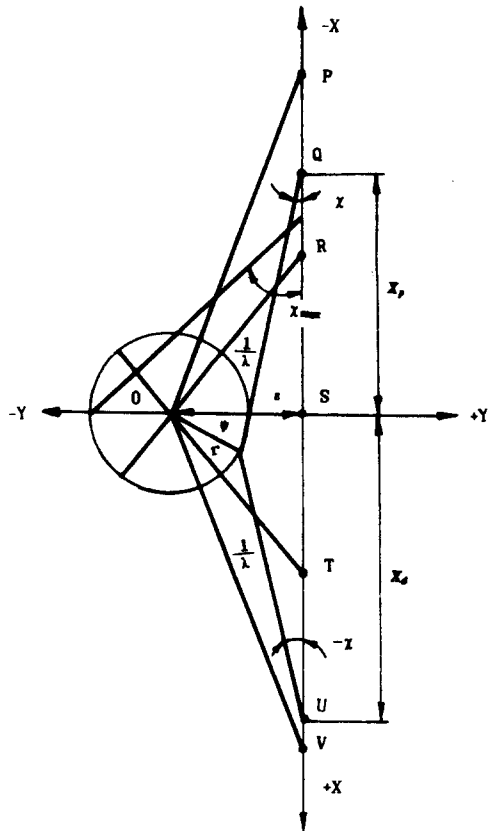


Fig. 2 Part of the Rhombic Drive Mechanism Shown in Several Positions : the Dimensions are Expressed Relative to the Crank Radius.

과 일직선상(위치 RO)에 있을 때 실린더 속에서 가장 낮은 위치에 존재하고, 커넥팅 로드와 크랭크 반경 r이 일직선상(위치 OP)에 위치할 때 실린더 속에서 가장 높은 위치에 존재한다.

파워피스톤의 상하부 사이에는 온도차가 거의 없고 높은 압력차만 존재하므로 파워피스톤이 실린더 속에서 가장 높은 위치에 있을 때 작동가스는 압축되고, 가장 낮은 위치에 있을 때 팽창된다. 따라서 두 피스톤에 대한 행정은 Fig.2로부터 다음식을 얻는다.

파워피스톤의 행정 PR와 디스플레이서 피스톤의 행정 VT는 같으므로

$$VT = PR = \frac{S}{r} \quad (1)$$

$$\frac{S}{r} = \frac{1}{\lambda} \left\{ \sqrt{(1+\lambda^2) - \lambda^2 \varepsilon^2} - \sqrt{(1-\lambda^2) - \lambda^2 \varepsilon^2} \right\} \quad (2)$$

따라서 두 피스톤의 행정 S는

$$S = \frac{r}{\lambda} \left\{ \sqrt{(1+\lambda^2) - \lambda^2 \varepsilon^2} - \sqrt{(1-\lambda^2) - \lambda^2 \varepsilon^2} \right\} \quad (3)$$

로 되며, 이 식(3)으로부터 두 피스톤의 행정 S를 구한다.

### 2.3 위상각

위상각  $\varphi_{dr}$ 은 디스플레이서 피스톤 운동의 첫번째 조화함수에 의해서 파워 피스톤 운동의 첫번째 조화함수를 리이드함으로써 생기는 위상각으로, Fig.2의 X축에 대한 부호 규정에 따라 디스플레이서 피스톤 요크의 횡좌표  $X_d$ 와 파워피스톤 요크의 횡좌표  $X_p$ 를 구하면 다음식으로 된다. 디스플레이서 피스톤과 파워피스톤의 상대적 변위는

$$\frac{X_d}{r} = \sin \Psi + \frac{1}{\lambda} \cos \chi \quad (4)$$

$$\frac{X_p}{r} = \sin \Psi - \frac{1}{\lambda} \cos \chi \quad (5)$$

이다.

그런데 식(4), (5)에서

$$\frac{1}{\lambda} \cos \chi = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - (\varepsilon - \cos \Psi)^2} \quad (6)$$

로 되므로, 이 함수를  $\cos n\psi$ 로 급수전개하면

$$\frac{1}{\lambda} \cos \chi = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos n\psi \quad (7)$$

로 된다. 식(7)을 식(4), (5)에 대입하면

$$\frac{X_d}{r} = \sin \psi + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos n\psi \quad (8)$$

$$\frac{X_p}{r} = \sin \psi - \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos n\psi \quad (9)$$

또는

$$\frac{X_d}{r} = B_o + D \cos(\psi - \gamma_E) + \sum_{n=2}^{\infty} B_n \cos n\psi \quad (8')$$

$$\frac{X_p}{r} = B_o - D \cos(\psi + \gamma_E) - \sum_{n=2}^{\infty} B_n \cos n\psi \quad (9')$$

된다. 여기서

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{dr} &= \pi - 2\gamma_E \\ \varphi_{dr} &= 2 \tan^{-1} B_1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$D = \sqrt{B_1^2 + 1} \quad (11)$$

$$\gamma_E = \tan^{-1} \left( \frac{1}{B_1} \right) \quad (12)$$

따라서 구하고자 하는 두 피스톤의 운동위상각  $\varphi_{dr}$ 은 식(10)으로 주어진다.

### 2.4 최대각도

Fig.2에서 각도  $\chi_{max}$ 는 x축과 커넥팅로드가 만드는 최대각도이며 다음과 같다.

$$\chi_{max} = \sin^{-1} \lambda(\varepsilon + 1) \quad (13)$$

식(13)으로부터 X축과 커넥팅로드가 만드는 최대각도  $\chi_{max}$ 는  $\lambda$ 와  $\varepsilon$ 의 함수임을 알았고,  $\varepsilon$ 값을 변화시킬때  $\lambda$ 에 대한 상수  $\chi_{max}$ 의 크기는 Fig.3에 제시하였다. 또한, 식(13)으로부터

$$\tan_{\lambda \rightarrow 0} \chi_{max} = B_1 \quad (14)$$

되고, 위상각  $\varphi_{dr}$  계산식(10)으로부터

$$\tan \frac{1}{2} \varphi_{dr} = B_1 \quad (15)$$

로 되므로, Fig.3으로부터  $\lambda=0$ 이면 다음식이 구해진다.

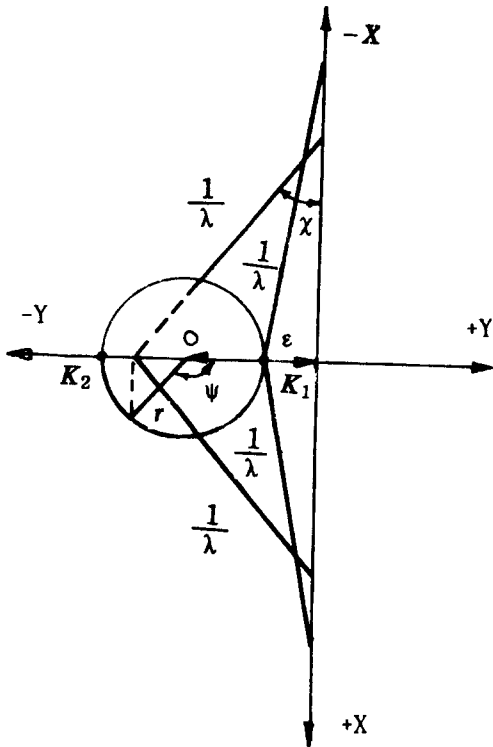


Fig. 3 Diagram Drawn as an Aid in Determining the Distance between the Power Piston and the Displacer Piston

$$\varphi_{dr} = 2 \tan^{-1} B_1 = 2 \chi_{\max} \tag{16}$$

따라서 디스플레이서 피스톤운동의 첫번째 조화함수에 의해 파워피스톤 운동의 첫번째 조화함수가 리이드되면서 생기는 두 피스톤 사이의 위상각  $\varphi_{dr}$ 은 두 피스톤의 연결로드축 (x축)과 커넥팅로드가 만드는 최대각도  $\chi_{\max}$ 의 2배이다. 즉 각도  $\chi_{\max}$ 는 두 피스톤의 운동 위상각  $\varphi_{dr}$ 의 반 (1/2)이다.

### 2.5 팽창공간의 체적

Fig.2로부터 디스플레이서 피스톤의 커넥팅로드와 요크가 서로 연결된 상태에서 위치 T점에 위치하고 있을 때, 디스플레이서 피스톤은 스테어링엔진의 실린더 속에서 가장 높은 위치에 존재하게 되고 작동가스는 압축공간에 있게 되며, 임의의 크랭크 각도  $\psi$ 에 대하여, 팽창공간 체적  $V_E$ 는 다음 방

정식을 만족한다.

$$\frac{V_E}{r \cdot A_d} = SU - ST \tag{17}$$

여기서,

$A_d$ : 디스플레이서 피스톤의 단면적

$r$ : 크랭크 반경

$SU$   $ST$ 는 디스플레이서 피스톤 요크의 x축 방향의 이동거리

$$SU = \sin \psi + \frac{1}{\lambda} \cos \chi \tag{18}$$

$$ST = \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)^2 - \epsilon^2} \tag{19}$$

이다. 따라서 식(17)로부터 스테어링엔진내의 팽창공간  $V_E$ 를 크랭크 길이  $r$ , 디스플레이서 피스톤 단면적  $A_d$ , x축과 커넥팅로드 사이의 각도  $\chi$ , 편심량  $\epsilon$ , 커넥팅로드 길이  $\lambda$ 의 함수로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$V_E = r \cdot A_d \left\{ \sin \psi + \frac{1}{\lambda} \cos \chi - \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)^2 - \epsilon^2} \right\} \tag{20}$$

그런데, 식(20)에 식(7)을 대입하면 임의의 크랭크각도  $\psi$ 의 함수로 표시되는 팽창공간 체적  $V_E$  계산식은 식(21)로 표시된다.

$$V_E = r \cdot A_d \left[ C + D \cdot \cos(\psi - \gamma_E) + \sum_{n=2}^{\infty} B_n \cos n\psi \right] \tag{21}$$

여기서

$$C = B_0 - \frac{1}{\lambda} \sqrt{(1-\lambda)^2 - \lambda^2 \epsilon^2} \tag{22}$$

$$D = (B_1^2 + 1)^{\frac{1}{2}} \tag{23}$$

$$\gamma_E = \tan^{-1} \left( \frac{1}{R_1} \right) \tag{24}$$

이다.

### 2.6 압축공간의 체적

압축공간체적  $V_c$ 는 디스플레이서 피스톤의 하부와 파워피스톤의 상부 사이에 존재하며, Fig.2로

부터 파워피스톤 커넥팅로드의 끝단이 P점에 위치하고 있을때 파워피스톤은 실린더 내에서 최고 높은 위치에 존재한다.

압축공간 체적  $V_c$ 는 디스플레이서 피스톤 직경이 파워피스톤 직경보다도 더 작은 경우와 더 큰 경우에 따라 2가지로 구분하여 구할 수 있다.

(1) 디스플레이서 피스톤 직경이 파워피스톤 직경보다 더 작은 경우, 또는 디스플레이서 피스톤 바닥의 유효 단면적  $A_d'$ 가 파워피스톤 상부의 유효단면적  $A_p'$ 보다 더 작은 경우,  $A_d' < A_p'$ 인 경우로서 체적은 다시 2부분으로 나누어진다. 즉,

(a)  $V_{c1}$ 을 단면적  $A_p'$ 로 된 파워피스톤과 디스플레이서 피스톤 사이의 체적으로 하는 경우, 크랭크 핀의 원운동은 수평성분과 수직성분으로 나눌 수 있고, 이 때 수직성분은 전체 롬빅드라이브 메카니즘을 상하방향으로 움직이게 하며, 두 피스톤의 상대적인 위치에 대해서는 영향을 주지않게 되므로 두 피스톤 사이의 체적변화는 크랭크핀 운동의 수평성분에 의해서만 결정 된다.

Fig.3에서  $k_1, k_2$ 는 압축공간의 체적이 각각 최소 및 최대가 되는 상태에서의 크랭크핀 위치이고, 구동 메카니즘이 y축에 대하여 대칭이므로,  $A_d' < A_p'$ 인 경우 압축공간 체적변화식  $V_{c1}$ 는 다음 식으로 된다.

$$V_{c1} = 2 \cdot r \cdot A_d' \left\{ \left[ \frac{1}{\lambda} - (\epsilon - 1)^2 - \frac{1}{\lambda} \cos \chi \right] \right\} \quad (25)$$

(b)  $V_{c2}$ 가 원형 단면적  $A_p' - A_d'$ 인 파워피스톤과 고정된 실린더벽 사이의 체적으로 하는 경우,  $V_{c2}$ 는 파워피스톤의 운동으로 완전히 결정된다. 파워피스톤 커넥팅로드가 크랭크와 연속일 때, 파워피스톤은 실린더 속에서 가장높은 위치(상사점)에 존재하고, 고정된 벽(디스플레이서 피스톤 하부 단면)과 접촉하게 된다. 임의의 주어진 각도에서 고정된 벽과 파워피스톤의 원형 단면적  $A_p' - A_d'$  사이에서 존재하는 체적은 다음식으로 표시한다.

$$\begin{aligned} V_{c2} &= P \cdot Q \cdot r (A_p' - A_d') \\ V_{c2} &= r \cdot (A_p' - A_d') \\ &\cdot \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right)^2 - \epsilon^2 + \sin \psi - \frac{1}{\lambda} \cos \chi \right] \right\} \quad (26) \end{aligned}$$

로 되며,  $A_d' / A_p' = f$ 를 이용하면

$$V_{c2} = r(1-f) A_p' \cdot \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right)^2 - \epsilon^2 + \sin \psi - \frac{1}{\lambda} \cos \chi \right] \right\} \quad (27)$$

로 된다.

만일 식(7)의 급수전개식을 대입하면, 압축공간의 총체적  $V_c$  계산식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} V_c &= V_{c1} + V_{c2} \\ &= r \cdot A_p' \cdot \left\{ E' - F \cos(\psi + \gamma_c) \right. \\ &\quad \left. - (1+f) \sum_{n=2}^{\infty} B_n \cdot \cos n\psi \right\} \quad (28) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} E' &= \frac{2f}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2(\epsilon - 1)^2} + \frac{(1-f)}{\lambda} \\ &\quad \cdot \sqrt{(1+\lambda)^2 - \lambda^2 \epsilon^2} - (1+f) B_0 \\ F &= \sqrt{(1-f)^2 + (1+f)^2} \cdot B_1^2 \\ \gamma_c &= \tan^{-1} \frac{1-f}{(1+f) B_1} \end{aligned}$$

(2) 디스플레이서 피스톤 단면적  $A_d'$ 가 파워피스톤 단면적  $A_p'$ 보다도 더 큰 경우 즉,  $A_d' - A_p'$ 인 경우도 체적을  $V_{c1}'$ 와  $V_{c2}'$ 로 구분 할 수 있다.

(a)  $V_{c1}'$ 를 단면적이  $V_p'$ 인 파워피스톤과 디스플레이서 피스톤 사이의 체적으로 하고

(b)  $V_{c2}'$ 를 원형 단면적  $A_d' - A_p'$ 를 갖는 디스플레이서 피스톤과 고정된 벽 사이의 체적으로 하는 경우로 나눌 수 있다. 체적  $V_{c1}'$ 은  $A_d'$ 가  $A_p'$ 로 대체될 수 있는 경우 다음식으로 된다.

$$V_{c1}' = 2 \cdot r \cdot A_p' \cdot \left\{ \left[ \frac{1}{\lambda} - (\epsilon - 1)^2 - \frac{1}{\lambda} \cos \chi \right] \right\}$$

체적  $V_{c2}'$ 는 디스플레이서 피스톤 운동으로 완전히 결정할 수 있다. Fig.2로부터, 디스플레이서 피스톤의 커넥팅로드가 크랭크와 연속이면 VO로 되고, 디스플레이서 피스톤은 실린더내에서 가장 낮은 위치(하사점)에 있게 되므로 고정된 파워피스톤의 상부 단면적과 접촉하게 된다.

따라서 임의의 크랭크 각도  $\psi$ 에 대한 체적  $V_{c2}$ 는

$$V_{c2}' = UT \cdot r(A_d' - A_p')$$

$$= r \cdot A_p'(f-1) \left\{ \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)^2 - \epsilon^2} - \sin\psi - \frac{1}{\lambda} \cos\chi \right\}$$

로 된다.

총 체적은 식(7)과 위의 식을 조합하면,

$$V_c' = V_{c1}' + V_{c2}'$$

$$V_c' = r A_p' \left\{ E'' - F \cos(\psi + \gamma_c) - (1+f) \sum_{n=2}^{\infty} B_n \cos n\psi \right\}$$

로 되고, 여기서

$$E'' = \frac{2}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2(\epsilon - 1)^2} - (1-f) \cdot \sqrt{(\lambda+1)^2 - \lambda^2\epsilon^2} - (1+f)B_0$$

$$F = \sqrt{(1-f)^2 + (1+f)^2 B_1^2}$$

$$\gamma_c = \tan^{-1} \frac{1-f}{(1+f)B_1}$$

이다.

따라서 압축공간 체적  $V_c$  계산식은 다음과 같다.

$$V_c = r A_p' \left\{ E - F \cos(\psi + \gamma_c) - (1+f) \sum_{n=2}^{\infty} B_n \cos n\psi \right\} \quad (29)$$

여기서  $A_d' / A_p' = f < 1$ 인 경우

$$E = \frac{2f}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2(\epsilon - 1)^2} + \frac{(1-f)}{\lambda} \cdot \sqrt{(\lambda+1)^2 - \lambda^2\epsilon^2} - (1+f)B_0$$

여기서  $A_d' / A_p' = f \geq 1$ 인 경우

$$E = \frac{2}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2(\epsilon - 1)^2} - \frac{(1-f)}{\lambda} \cdot \sqrt{(\lambda+1)^2 - \lambda^2\epsilon^2} - (1+f)B_0$$

이고,

$$F = \sqrt{(1-f)^2 + (1+f)^2 B_1^2}$$

$$\gamma_c = \tan^{-1} \frac{1-f}{(1+f)B_1}$$

이다.

### 2.7 팽창공간 최대체적, 진폭비, 크랭크 각 및 체적위상각

식(21)과 식(29)로부터 체적 변화에 대한 첫번째 조화함수의  $V_o, W, \alpha, \varphi_{vo}$ 을 구할수 있고 실제 체적 대신에 팽창공간의 최대체적  $V_o$ 의 첫째 조화함수의 값을 취했을때 생기는 가상적인 사공간 체적  $V'_{SE}$ 와  $V'_{SC}$ 도 구할 수 있다.

$$V_E = r A_d' D \{1 + \cos(\psi - \gamma_E)\} + r A_d' (C - D) + r A_d' \sum_{n=2}^{\infty} B_n \cos n\psi$$

$$V_c = r A_d' F \{1 + \cos(\psi + \gamma_E + \pi)\} + r A_d' (E - F) - (1+f) r A_d' \sum_{n=2}^{\infty} B_n \cos n\psi$$

이다.

여기서, 팽창공간의 최대체적  $V_o$ 는

$$V_o = 2r A_d' \cdot D = 2r A_d' \sqrt{B_1^2 + 1} \quad (30)$$

진폭비  $W$ 는

$$W = \frac{1}{f'} \frac{F}{D}$$

$$= \frac{1}{f \cdot f'} \sqrt{\frac{(1-f)^2 + (1+f)^2 B_1^2}{B_1^2 + 1}} \quad (31)$$

두공간의 체적 위상각  $\varphi_{vo}$ 는

$$\varphi_{vo} = \pi - \gamma E - \gamma_c$$

$$= \tan^{-1} \frac{-2B_1}{(1+f)B_1^2 - (1-f)} \quad (32)$$

크랭크각  $\alpha$ 는

$$\alpha = \psi - \gamma_E \quad (33)$$

팽창공간축에 대한 가상적인 사공간  $V'_{SE}$ 는

$$V'_{SE} = r A_d' (C - D) \quad (34)$$

압축공간축에 대한 가상적인 사공간  $V'_{SC}$ 는

$$V'_{SC} = r A_p' (E - F) \quad (35)$$

이다.



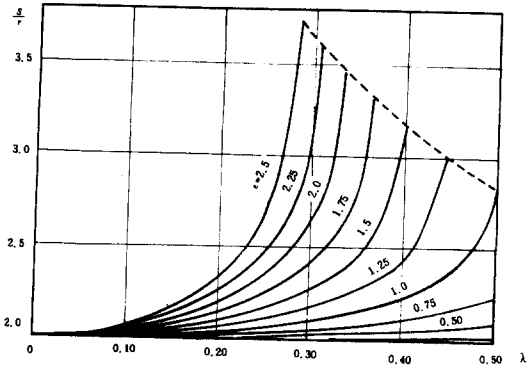


Fig. 4 The Relative Piston Stroke as a Function of the Relative Length of the Connecting Rods  $\lambda$  and the Relative Eccentricity  $\epsilon$ .

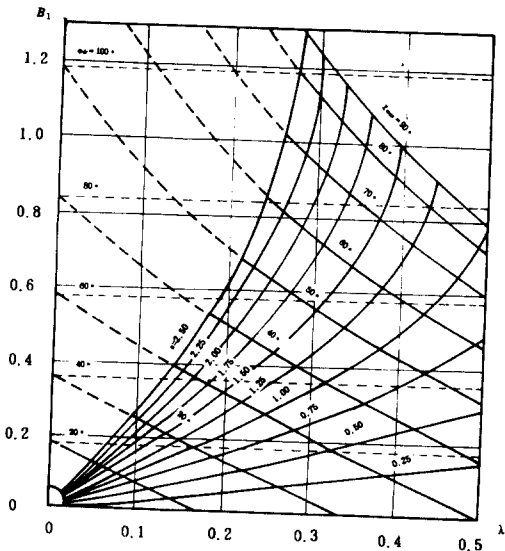


Fig. 5 The Phase Angle  $\varphi_{dr}$  between the Power Piston and the Displacer Piston, the Maximum Angle which the Connecting Rods Make with the Vertical,  $\chi_{max}$ , and  $B_1$ (see Equation(7) as Function of  $\lambda$  and  $\epsilon$ .

### 3. 결과 및 고찰

스테어링엔진이 물리적으로 일정한 형태의 롬빅 드라이브 메카니즘을 채택하고자 할때, 기하학적 형태에 따른 엔진의 행정거리를 알아야 한다.

따라서, 롬빅드라이브 메카니즘의 커넥팅로드

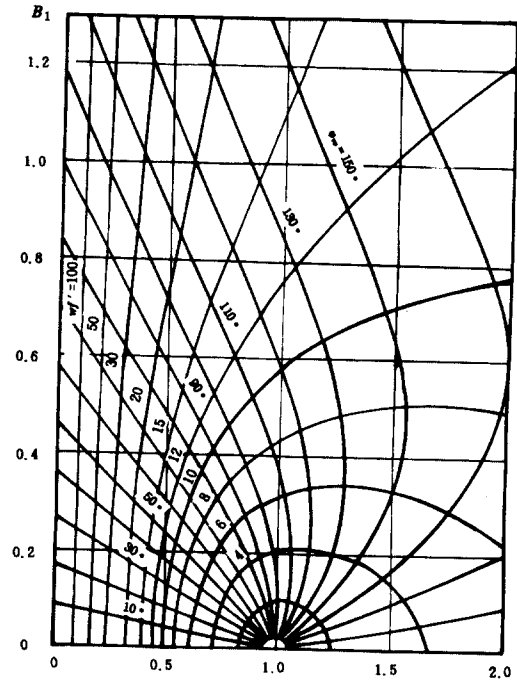


Fig. 6 The Phase Angle between the Volume of the Expansion and Compression Spaces  $\varphi_0$  and the Ratio of the Maximum Values of these Volumes,  $W$ , as Functions of  $B_1$  and the Relative Areas  $f$  and  $f'$ .

상대적길이가  $\lambda$ 와 상대적 편심량  $\epsilon$ 이 상대적 행정 거리에 미치는 영향을 구하여 Fig.4에 제시하였다.

Fig.4로 부터 커넥팅로드의 상대길이가  $\lambda$ 와 상대적 편심량  $\epsilon$ 이 증가할수록 상대적인 피스톤의 행정거리  $S/r$ 은 증가함을 알았고, 특히  $\lambda=0.30$ 이고  $\epsilon=2.25$ 이면 상대적 행정거리  $S/r=3.0$ 임을 알 수 있다.

Fig. 5로부터 커넥팅로드의 상대길이가  $\lambda$ 가 증가할수록  $\chi_{max}$ 가 증가할수록 계수  $B_1$  값은 증가하고, 위상각이 증가할수록  $B_1$  값은 증가하였으며,  $\epsilon$  값이 감소할수록  $B_1$  값은 감소하였다. 따라서  $\lambda$ 와  $\epsilon$ 의 주어진 값에 대한  $\chi_{max}$ ,  $\varphi_{dr}$ ,  $B_1$ 의 상관관계를 얻을 수 있으므로 물리적인 크기를 갖는 엔진 설계시 제변수 상호간의 영향관계를 구할 수 있고 설계에 적용할 수 있다.

Fig.6으로부터 두 피스톤 단면적비  $f$ 가 증가할수록 계수  $B_1$  값은 증가하였고, 단면적비가 일정

할 때의 체적 위상각  $\varphi_{vo}$ 와 진폭비가 증가할수록 계수  $B_1$  값은 증가하였다. 엔진의 체적이 결정될 때 진폭비  $w$ 와 체적위상각  $\varphi_{vo}$ 를 구할수 있는 선도로 활용할 수 있다.

#### 4. 결 론

고효율, 다중 연료사용, 저대기오염, 저연비, 저진동, 저소음, 고풍력의 특징을 갖고 있으며 대체 에너지 기관으로 매력을 지닌 박용 스테링엔진 개발을 위한 일환으로, 1차적인 엔진 설계시 필수적으로 알아야 하는 엔진의 주 설계 변수값을 구하였고, 이를 종합하면 다음과 같다.

(1) 엔진의 주설계변수를 구하는 식을 구하였다.

(2) 피스톤의 상대행정은 두 피스톤 커넥팅로드의 상대길이  $\lambda$ 와 상대편심량  $\epsilon$ 의 함수이며,  $\lambda$ 와  $\epsilon$ 가 증가할수록 상대행정  $S/r$ 은 증가하였고, 임의의  $\lambda$ 와  $\epsilon$ 값에 대한 행정거리를 알 수 있었다.

(3)  $\lambda$ 와  $\epsilon$ 의 함수로 두 피스톤의 운동위상각  $\varphi_{dr}$ 와 커넥팅로드와 X축 사이의 최대각도  $\chi_{max}$ 값을 구하였으며, 두 피스톤의 상대적 단면적비  $f$ 와  $f'$ 의 함수로 두 공간 사이의 체적위상각  $\varphi_{vo}$ 와 최대진폭비  $w$ 를 구하였다.

상기 내용은  $\beta$ 형 롬빅드라이브 스테링엔진을 개발 연구시 엔진의 크기 및 예상성능을 예측할 수 있는 설계에 기초자료로 활용될 수 있다.

#### 참고문헌

- 1) G.Walker, 'Stirling Engines', Oxford Press, 1980, pp. 1 - 542
- 2) C.M.Hargreaves, 'The Philips Stirling Engines', Elsevier, 1991, pp. 129 - 141
- 3) I.Urieli, D.M.Berchowitz, 'Stirling Cycle Engine Analysis', Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984, pp. 1 - 50
- 4) Marien Cichy, 'The Evaluation of Angular Velocity Variation in Stirling Engines with Rhombic Drive Mechanism', 4th ICSE, pp. 87 - 91
- 5) Archie Higdon et al. 'Engineering Mechanics', 청문각, 1992, pp. 1 - 464
- 6) G. T. Reader and C.Hooper, 1983, 'Stirling Engines', London NewYork, E. & F. N. Spon, pp. 169 - 388
- 7) C. Hooper, G. T. Reader, 'The Effects of Higher Harmonics on the Preliminary Design of Rhombic Drive Stirling Engines', 14th IECEC, paper, 1979, pp. 1082 - 1085
- 8) I. Urieli, 'A Review of Stirling Cycle Machine Analysis', 14th IECEC, paper, 1979, pp. 1086 - 1090
- 9) G. Walker, G.L. Ward, J. Slowley, 'Operating Characteristics of a Small Stirling Engine', 14th IECEC, paper, 1979, pp. 1157 - 1162