

## 이단 왕복동 공기압축기 구조에 따른 관성력 비교

김영철<sup>\*\*</sup>, 안국영<sup>\*</sup>

### Inertia Force Comparison of 2 Stage Reciprocating Air Compressors

Young-Cheol Kim<sup>\*\*</sup>, Kook-Young Ahn<sup>\*</sup>

Key Words : Inertia force(관성력), Reciprocating Air Compressor(왕복동 공기압축기), Balancing(평형잡기)

#### ABSTRACT

For the purpose of high outlet pressure, compactness and low vibration and noise, 2 stage reciprocating air compressors can have various cylinder arrangement: opposed, in-line, and V type. This paper presents an effective method to calculate the inertia forces and to design counter weight. This method is based on the complex representation for the orbital behavior of the compressor shaft. This method helps to find the optimal balancing rate easily to reduce the inertial force or moment. This paper shows that the residual inertia forces of the single throw shafts and the residual inertia moments of the double throw shafts remain to be imbalanced.

#### 1. 서론

최근 산업용, 수조저장용, 선박용, 호흡용, 냉장용 등에 이용되고 있는 왕복동 공기압축기(reciprocating air compressor)는 고압, 경량화, 저진동, 저소음, 고압축비를 종합적으로 실현하기 위해 실린더배열을 대향형, In-line형, V형 등으로 하는 2단 압축기를 많이 채택하고 있다. 크랭크기구를 그 기본구조로 하는 왕복동 공기압축기는 항상 왕복질량(reciprocating mass)의 불평형력(unbalance force)이 진동문제를 일으키는 원인이 되므로, 왕복질량을 적절하게 배치하거나 적절한 평형추(counter weight)를 설치하며, 때로는 알루미늄합금과 같은 경량재료를 왕복질량으로 사용하기도 한다.

일반적으로 single-throw 크랭크축을 사용하는 압축기의 경우에는 축간거리가 짧으므로 compact 해지며 축강성 및 비틀림강성이 커지게 되나, 실린더수가 많아지게 되면 평형추의 밸런싱량이 아주 커지게 된다. 반면 double-throw 크랭크축을 사용하는 경우에는 구조적으로 실린더수가 짝수일 때 보다

작은 평형추로도 구조적인 관성력을 상쇄함으로써 효율적으로 밸런싱할 수 있으나 구조가 커지고 비틀림진동의 원인을 제공하기도 한다.

Fig. 1은 single throw 형태의 1단 diaphragm 압축기의 형상과 그 기본구조를 나타낸 것이다. Fig. 2는 double throw를 가진 in-line 형과 opposed 형의 이단 압축기의 기본 구조를 나타낸다. Fig. 3은 single throw를 가진 opposed형과 V형의 이단 압축기의 기본 구조를 나타낸다.

Fig. 4는 Diaphragm 압축기의 구조의 한 예를 나타낸 것으로, 피스톤은 1개의 압축단을 가지고 있으나 반대편에 부가질량을 가지는 opposed형으로 구성되어 있다. 회전질량은 1단과 2단에서 모두 20.05kg으로 계산되어졌으며, 왕복질량은 1단이 21.049kg, 2단이 18.991kg으로 예측하였다.

본 연구에서는 대향형, In-line형, V형 등 다양한 이단 압축기의 구조에 대해 관성력을 계산하는 방법을 복소벡터를 이용하여 제시하고자 한다. 그리고 Fig. 4의 질량을 이용하여 각 구조의 관성력 특성 및 평형추 설계방법을 제시하고자 한다.

\* 한국기계연구원

† 교신저자, E-mail: kyc@kimm.re.kr

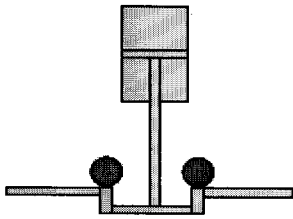


Fig. 1 Structure of a single stage compressor

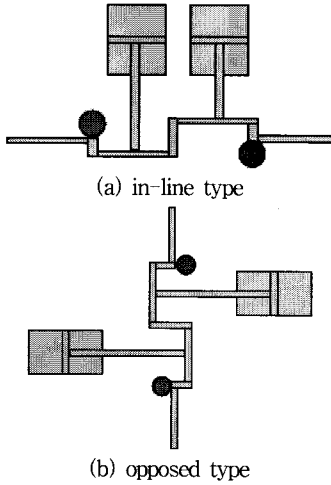


Fig. 2 Structure of a two stage compressor with double throw

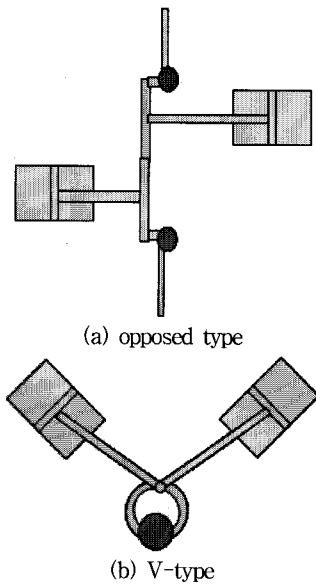


Fig. 3 Structure of a two stage compressor with single throw

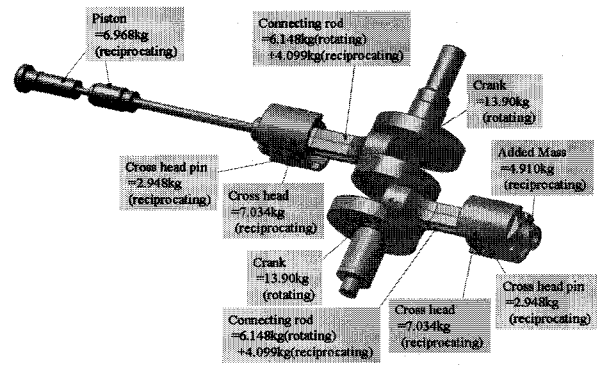
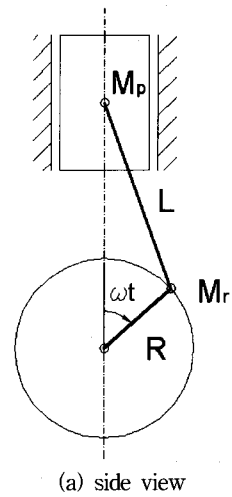


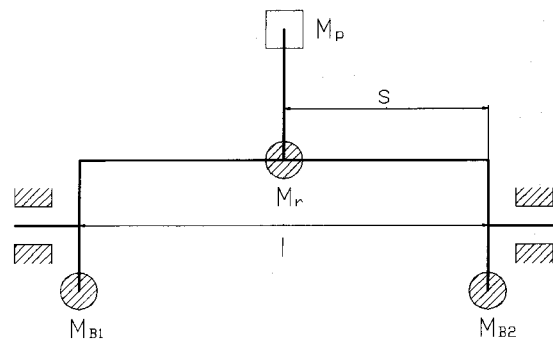
Fig.4 An example of a diaphragm compressor structure

## 2. 1단 실린더 압축기의 관성력

Fig. 5는 1단 실린더, single-throw 크랭크축을 가진 왕복 동 압축기의 평형추계산 모델을 나타낸다. 이때,  $\omega$ 는 축의 회전속도,  $R$ 은 크랭크암(crank arm) 길이,  $L$ 은 연결봉(connecting rod) 길이를 나타낸다.



(a) side view



(b) front view.

Fig. 5 Single cylinder single-throw crank-shaft model

그리고  $M_r$ 은 연결봉 대단부를 포함하는 회전질량을 나타내며,  $M_p$ 는 피스톤과 연결봉 소단부를 포함하는 왕복질량을 나타낸다. 크랭크암 양단에는  $M_{B1}, M_{B2}$ 의 평형추(counter weight)가 부착되어진다.

왕복질량  $M_p$ 에 의한 관성력  $F_p$ 와 회전질량  $M_r$ 에 의한 관성력  $F_r$ 은 각각 다음과 같다.

$$F_p = Ae^{i\omega t} + Be^{-i\omega t} + Ce^{i2\omega t} + De^{-i2\omega t} \quad (1)$$

$$F_r = Ee^{i\omega t} \quad (2)$$

여기서,

$$A = B = \frac{1}{2} M_p R \omega^2 \quad (3)$$

$$C = D = \frac{1}{2} \lambda M_p R \omega^2 \quad (4)$$

$$E = M_r R \omega^2 \quad (5)$$

이 때 연결봉비(ratio of crank arm to length of connecting rod)  $\lambda$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{R}{L} \quad (6)$$

평형률(balancing rate)을  $\Psi[\%]$ 라고 하고, 힘과 모멘트 평형방정식을 함께 고려하면, 다음과 같은 평형추 설계 식을 얻을 수 있다.

$$M_{B1} = \frac{s}{l} (M_r + \Psi M_p) \quad (7)$$

$$M_{B2} = \left( \frac{l-s}{l} \right) (M_r + \Psi M_p) \quad (8)$$

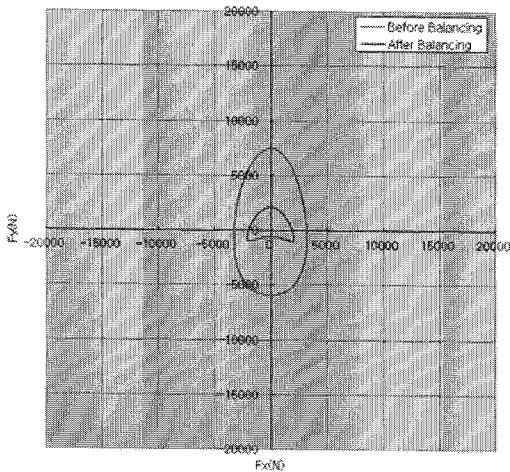


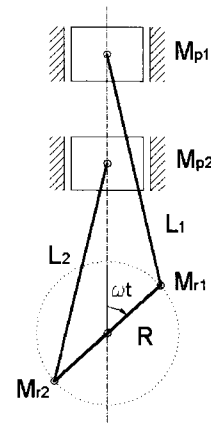
Fig. 6 Inertia force orbit of a 1 cylinder single-throw compressor at 61% balancing rate

이때  $l$ 은 throw의 길이를 나타내고  $s$ 는 왕복질량의 위치를 나타낸다. Fig. 6는 평형률 61%일 때 1단 실린더 압축기의 관성력 orbit을 나타낸다. counter weight를 부착하였을 때 1단 실린더 압축기는 61%의 평형률에서 71.8%로 최고의 관성력 저감률을 보임을 관찰할 수 있다. 1단 압축기의 경우 주로 관성력이 잔류로 남게 되고, 관성모멘트는 거의 발생하지 않게 된다.

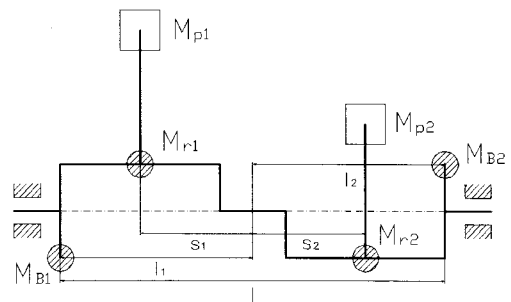
### 3. 2단 실린더 압축기의 관성력

#### 3.1 In-line (2 throw) 형

Fig. 7은 2 실린더, double-throw 크랭크축을 가진 in-line 형 왕복동 압축기의 평형추계산 모델을 나타낸다. 실린더를 In-line형으로 배치함으로써 그 관성력의 방향을 서로 상쇄시키는 구조로 되어 있다. 크랭크암 양단에는  $M_{B1}, M_{B2}$ 의 평형추가 서로 반대방향으로 부착되어진다.



(a) side view



(b) front view

Fig. 7 2 cylinder double-throw in-line crank-shaft model

불평형 왕복질량  $M_{p1}$ ,  $M_{p2}$ 와 회전질량  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$ 에 의한 관성력은 식 (1)과 (2)로 표현되고, 이 때의 계수들은 다음과 같다.

$$A = B = \frac{1}{2} R\omega^2 (M_{p1} - M_{p2}) \quad (9)$$

$$C = D = \frac{1}{2} R\omega^2 (M_{p1}\lambda_1 + M_{p2}\lambda_2) \quad (10)$$

$$E = (M_{r1} - M_{r2}) R\omega^2 \quad (11)$$

이 때 연결봉비  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda_1 = \frac{R_1}{L_1} \quad \lambda_2 = \frac{R_2}{L_2} \quad (12)$$

힘과 모멘트 평형방정식을 함께 고려하면, 다음과 같은 평형추 설계 식을 얻을 수 있다.

$$M_{B1} = \frac{1}{l} [(s_1 + l_2)(M_{p1} + \Psi M_{r1}) - (l_2 - s_2)(M_{p2} + \Psi M_{r2})] \quad (13)$$

$$M_{B2} = \frac{1}{l} [-(l_1 + s_2)(M_{p2} + \Psi M_{r2}) + (l_1 - s_1)(M_{p1} + \Psi M_{r1})] \quad (14)$$

Fig. 8은 평형률 50%일 때 2단 In-line형 압축기의 관성모멘트 orbit을 나타낸다. counter weight를 부착하였을 때 In-line형 압축기는 50%의 평형률에서 74.9%로 최고의 관성모멘트 저감률을 보임을 관찰할 수 있다. In-line형 압축기의 경우 주로 관성모멘트가 잔류로 남게 되고, 관성력은 거의 발생하지 않게 된다.

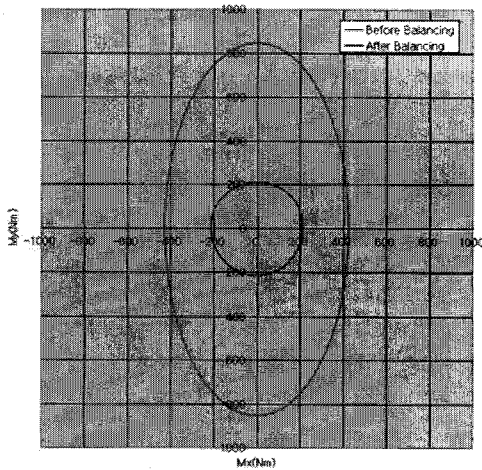
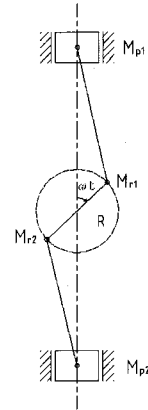


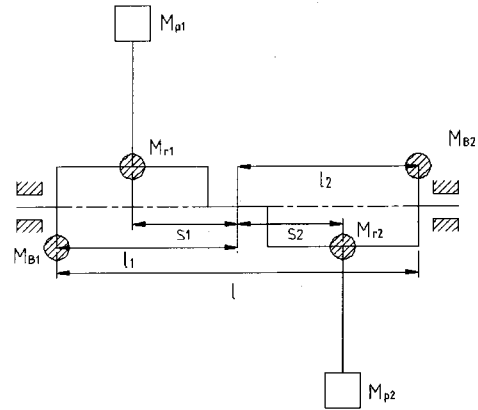
Fig. 8 Inertia moment orbit of a 2 cylinder double-throw in-line type compressor at 50% balancing rate

### 3.2 Opposed (2 throw) 형

Fig. 9는 2 실린더, double-throw 크랭크축을 가진 Opposed 형 압축기의 평형추계산 모델을 나타낸다. 실린더를 Opposed 형으로 배치함으로써 그 관성력의 방향을 서로 상쇄시키는 구조로 되어 있다. 크랭크암 양단에는  $M_{B1}$ ,  $M_{B2}$ 의 평형추가 서로 반대방향으로 부착되어진다.



(a) side view



(b) front view

Fig. 9 2 cylinder double-throw opposed type crank-shaft model

불평형 왕복질량  $M_{p1}$ ,  $M_{p2}$ 와 회전질량  $M_{r1}$ ,  $M_{r2}$ 에 의한 관성력은 식 (1)과 (2)로 표현되고, 이 때의 계수들은 다음과 같다.

$$A = B = \frac{1}{2} R\omega^2 (M_{p1} - M_{p2}) \quad (15)$$

$$C = D = \frac{1}{2} R\omega^2 (M_{p1}\lambda_1 - M_{p2}\lambda_2) \quad (16)$$

$$E = (M_{r1} - M_{r2}) R\omega^2 \quad (17)$$

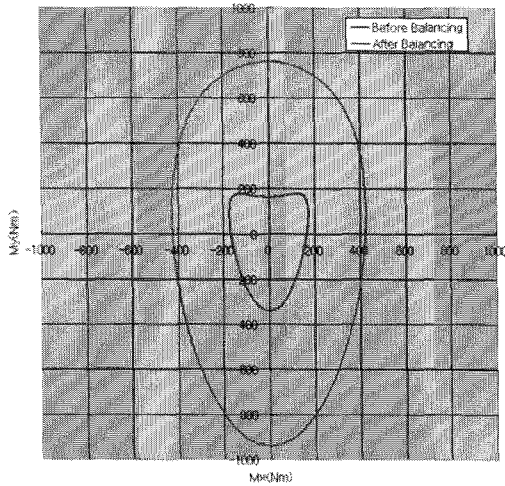


Fig. 10 Inertia moment orbit of a 2 cylinder double-throw opposed type compressor at 41% balancing rate

힘과 모멘트 평형방정식을 함께 고려하면, 다음과 같은 평형추 설계 식을 얻을 수 있다.

$$M_{B1} = \frac{1}{l} [(s_1 + l_2)(M_{p1} + \Psi M_{r1}) - (l_2 - s_2)(M_{p2} + \Psi M_{r2})] \quad (18)$$

$$M_{B2} = \frac{1}{l} [-(l_1 + s_2)(M_{p2} + \Psi M_{r2}) + (l_1 - s_1)(M_{p1} + \Psi M_{r1})] \quad (19)$$

Fig. 10은 평형률이 41%일 때 Opposed형 압축기의 관성모멘트 orbit을 나타낸다. counter weight를 부착하였을 때 Opposed형 압축기는 41%의 평형률에서 76.7%로 최고의 관성모멘트 저감률을 보임을 관찰할 수 있다. Opposed형 압축기는 주로 관성모멘트가 잔류로 남게 되고, 관성력은 거의 발생하지 않게 된다.

### 3.3 Opposed (1 throw) 형

Fig. 11은 2 실린더, single-throw 크랭크축을 가진 Opposed형 왕복동 압축기의 평형추계산 모델을 나타낸다. 크랭크암 양단에는  $M_{B1}, M_{B2}$ 의 평형추가 부착되어진다.

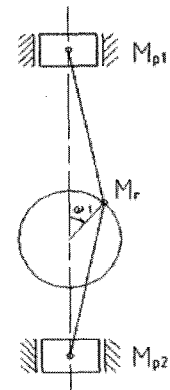
왕복질량  $M_{p1}, M_{p2}$ 과 회전질량  $M_r$ 에 의한 관성력은 식 (1)과 (2)로 표현되고, 이 때의 계수들은 다음과 같다.

$$A = B = \frac{1}{2} R\omega^2 (M_{p1} + M_{p2}) \quad (20)$$

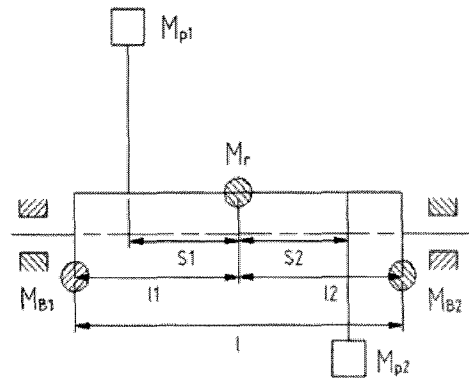
$$C = D = \frac{1}{2} R\omega^2 (M_{p1}\lambda_1 - M_{p2}\lambda_2) \quad (21)$$

$$E = M_r R\omega^2 \quad (22)$$

힘과 모멘트 평형방정식을 함께 고려하면, 다음과 같은 평형추 설계식을 얻을 수 있다.



(a) side view



(b) front view

Fig. 11 2 cylinder single-throw opposed type crank-shaft model

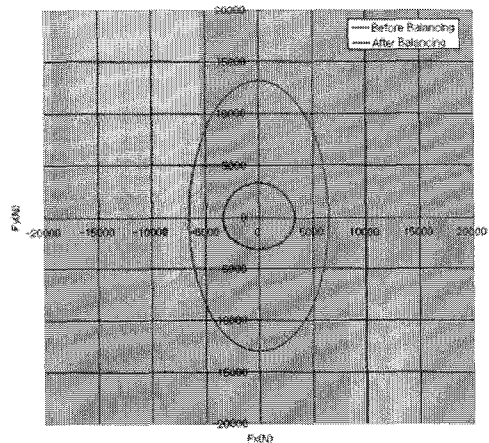


Fig. 12 Inertia force orbit of a 2 cylinder single-throw opposed type compressor at 51% balancing rate

$$M_{B1} = \frac{1}{l} [(l_R - s_R)\Psi M_R + (l_R + s_L)\Psi M_L + l_R M_r] \quad (23)$$

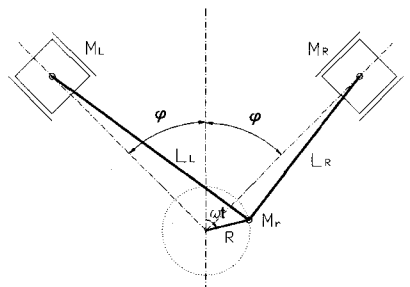
$$M_{B2} = \frac{1}{l} [(l_L - s_L)\Psi M_L + (l_L + s_R)\Psi M_R + l_L M_r] \quad (24)$$

Fig. 12는 평형률이 51%일 때 Opposed형 압축기의 관성력 orbit을 나타낸다. counter weight를 부착하였을 때 Opposed형 압축기는 51%의 평형률에서 74.7%로 최고의 관성력 저감률을 보임을 관찰할 수 있다. Opposed형 압축기는 주로 관성력이 잔류로 남게 되고 관성모멘트는 거의 발생하지 않게 된다.

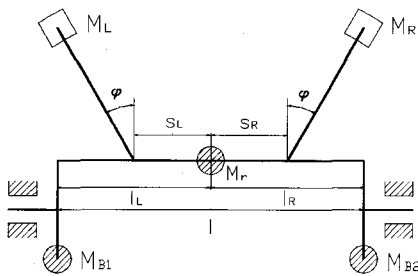
### 3.4 V형

Fig. 13은 2 실린더, single-throw 크랭크축을 가진 V형 왕복동 압축기의 평형추계산 모델을 나타낸다. 수평방향 관성력을 서로 상쇄하기 위해 실린더배열을 V형(배열각  $\phi$ )으로 많이 사용한다. 크랭크암 양단에는  $M_{B1}, M_{B2}$ 의 평형추가 부착되어진다.

왕복질량  $M_R, M_L$ 과 회전질량  $M_r$ 에 의한 관성력은 식 (1)과 (2)로 표현되고, 이 때의 계수들은 다음과 같다.



(a) side view



(b) front view

Fig. 13 2 cylinder single-throw V type crank-shaft model

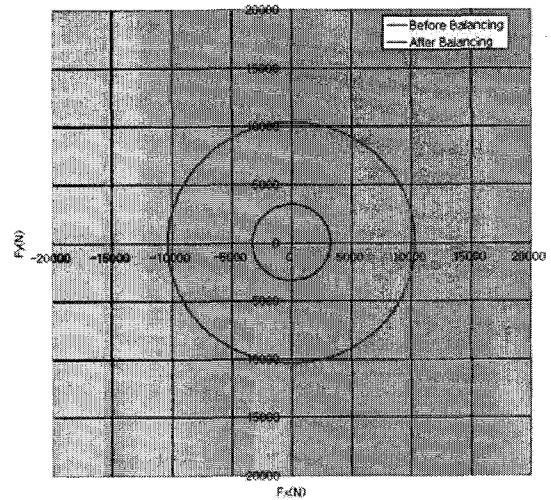


Fig. 14 Inertia force orbit of a 2 cylinder single-throw V type compressor at 70% balancing rate

$$A = \frac{1}{2} R\omega^2 (M_R + M_L) \quad (25)$$

$$B = \frac{1}{2} R\omega^2 (M_R e^{i2\phi} + M_L e^{-i2\phi}) \quad (26)$$

$$C = \frac{1}{2} R\omega^2 (\lambda_R M_R e^{-i\phi} + \lambda_L M_L e^{i\phi}) \quad (27)$$

$$D = \frac{1}{2} R\omega^2 (\lambda_R M_R e^{i3\phi} + \lambda_L M_L e^{-i3\phi}) \quad (28)$$

$$E = M_r R\omega^2 \quad (29)$$

힘과 모멘트 평형방정식을 함께 고려하면, 다음과 같은 평형추 설계식을 얻을 수 있다.

$$M_{B1} = \frac{1}{l} [(l_R - s_R)\Psi M_R \cos \phi + (l_R + s_L)\Psi M_L \cos \phi + l_R M_r] \quad (30)$$

$$M_{B2} = \frac{1}{l} [(l_L - s_L)\Psi M_L \cos \phi + (l_L + s_R)\Psi M_R \cos \phi + l_L M_r] \quad (31)$$

Fig. 14는 평형률이 70%일 때 V형 압축기의 관성력 orbit을 나타낸다. counter weight를 부착하였을 때 V형 압축기는 70%의 평형률에서 68.4%로 최고의 관성력 저감률을 보임을 관찰할 수 있다. V형 압축기는 주로 관성력이 잔류로 남게 되고, 관성모멘트는 거의 발생하지 않게 된다.

### 4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 복소벡터 표기법을 이용하여 다양한 2단 압축기의 구조에 대한 관성력 계산 방법 및 평형추 설계방법을 제시하였다.

2) 각각의 2단 압축기에 대해 관성력 및 관성모멘트가 최고로 저감되는 최적의 평형률을 찾을 수 있다.

3) double throw를 가진 In-line 또는 Opposed형의 압축기는 관성모멘트가 잔류로 남게 된다. 반면에 single throw를 가진 Opposed 형 또는 V형의 압축기는 관성력이 잔류로 남게 된다. 이들 잔류 관성력(또는 모멘트)은 count weight로 완전히 제거할 수 없다.

## 후 기

본 연구는 신재생에너지기술개발사업 “수소 스테이션용 다이어프램 압축기 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) 김영철, 김병욱, 신현익, 2003, “다단 왕복동 공기압축기의 평형추 설계”, 유체기계 연구개발발표회 논문집, pp. 656~661.
- (2) 김영철, 성세제, 김영주, 최상규, 2002, “W형 및 V형 왕복동 공기압축기의 평형추설계”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 227~233.
- (3) 김영주, 1989, “회전식 압축기의 진동분석 연구”, 한국기계연구원 보고서, BS1734~1297·D.
- (4) R. Clink, 1958, “Balancing of High Speed Four Stroke Engines”, Proc. Intern. Mech. Engrs(A.D.), N0.2, pp.73~108.
- (5) P.M. Heldt, 1953, “An Evaluation of 90 Deg. V-Six Engine”, Automotive Industries, July 15, pp. 42~45.
- (6) E.C. Grover, N. Lalor, 1973, “A Review of Low Noise Diesel Engine Design at I.S.V.R”, Journal of Sound and Vibration, No.28(3), pp. 403~431.