

다단 압축식 왕복동 공기압축기의 평형설계에 관한 연구

A Study on the Balancing of Multi-Stage Reciprocating Air Compressor

° 김형진*, 박용남**, 김의간***

Hyung-Jin Kim*, Yong-Nam Park**, Ue-Kan Kim***

ABSTRACT

A multi-stage reciprocating air compressor has many pistons and connecting rods to one crank throw, while a general engine has one connecting rod. Those make its design hard to apply balance weight design method generally using in an engine design.

This study introduces a modified balance weight design method in order to calculate the unbalanced inertia properly.

Vibration tests on V/W type air compressor have been conducted to prove the usefulness of design program. It is confirmed that the proposed program is applicable to design of balance weight.

1. 서 론

근래 선박은 더 많은 화물을 적재 하기 위하여 선체 자체를 경량화 하고 있으며 이로 인해 보다 얇은 강판 및 보강재를 사용하고 있다. 이러한 이유로 박용기기들은 정숙한 운전을 위한 저진동의 요구가 급증하고 있다. 특히 왕복동 기관은 기구학적 특성상 많은 진동이 발생할 수 밖에 없는 구조를 하고 있다. 이러한 진동을 보다 효과적으로 줄일 수 있는 방법으로는 크게 기진원 제어와 진동 전달경로의 제어를 생각 할 수 있다.

이중 기진원을 제어하는 것은 진동문제의 근본적인 해결을 제시 할 수 있다. 왕복동 기관의 기진원으로는 불평형 관성력 및 불평형 모멘트, 실린더 가스폭발에 의한 축압등이 있다. 왕복동 기관의 불평형 관성력 및 불평형 모멘트는 평형추를 이용하여 제어할 수 있는데 이에 관한 연구는 1930년대부터 이루어 졌으며 1980년대에 H. Masse, H. Klier는 다양한 형태를 갖는 피스톤 그

랭크 구조의 동역학적인 측면을 검토하였고 평형추 설계법을 제시하였다.⁽¹⁾⁽²⁾ 이외에도 자동차와 선박의 기관에 관한 것이 대부분이기는 하나 왕복동 기관의 평형문제에 대한 연구는 상당수 보고되었다. 왕복동 공기압축기의 불평형에 대한 연구로는 압축기 제작사인 T사의 기술자료가 있기는 하나 이 역시 기관의 것과 별다른 차이가 없다.⁽³⁾

그러나 다단 왕복동 공기압축기는 기관과는 달리 하나의 크랭크 스로우에 여러개의 연결봉이 연결되어 있으며 다단 압축방식을 채택하므로 각각의 피스톤 무게가 달라 기관의 평형추 설계법을 그대로 적용하기에는 문제가 있다. 또한 소형 대용량을 위해 공기압축기의 회전수를 높이고 진동 절연을 위해 탄성지지를 채택하면서 기기 자체의 진동문제는 더욱 빈번하게 발생하고 있다.

이러한 이유로 인해 다단 압축방식을 적용하는 공기압축기의 불평형 관성력 및 불평형 모멘트를 정량적 해석하고 이를 평형시키기 위한 평형추 설계법의 개발이 요망 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 다단 압축식 왕복동 공기압축기의 대표모델인 V/W형 왕복동 공기압축기의 평형설계에 대해서 이론적으로 검토하고 실험적으로 확인 하고자 한다.

* 정회원, 한국해양대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 양산대학 자동차과

*** 정회원, 한국해양대학교 기계정보공학부

2. 왕복동 공기압축기의 평형추 설계

2.1 단일 실린더 기관의 평형

Fig. 1은 단일 실린더 피스톤-크랭크 기구를 나타내고 있다. 여기서, 피스톤은 왕복 직선운동, 크랭크는 회전운동, 그리고 연결봉은 직선, 회전운동을 동시에 하고 있다. 이 경우 왕복운동에 의한 불평형 관성력과 회전운동에 의한 불평형 관성력은 식(1), (2)와 같다.

$$F_p = m_p r \omega^2 (\cos \theta + \lambda \cos 2\theta) \quad (1)$$

$$= m_p r \omega^2 \cos \theta + \frac{(m_p \lambda)}{4} r (2\omega)^2 \cos 2\theta$$

$$F_c = m_c r \omega^2 \quad (2)$$

F_p, F_c : 왕복 및 회전질량에 의한 불평형 관성력

m_p, m_c : 불평형 왕복질량 및 회전질량

r : 크랭크 회전반경, ω : 크랭크의 각속도

λ : 연결봉비 (= r/l), θ : 크랭크각

식(1)에서 왕복질량에 의한 관성력 F_p 의 방향은 언제나 행정 직선상에 있으나 그의 크기와 방향은 끊임없이 변화한다. 식(1)에 있어 $\cos \theta$ 의 항을 1차 관성력, $\cos 2\theta$ 의 항을 2차 관성력이라 한다. 이식을 검토하여 보면 1차 관성력은 m_p 가 크랭크 핀상에 있고 크랭크와 더불어 회전하는 경우에 생기는 원심력의 수직방향 분력으로 되고, 2차 관성력은 질량 $(m_p \lambda)/4$ 가 크랭크반경 r 상에 있고 크랭크의 2배의 속도로 회전하는 경우에 발생하는 원심력의 수직방향 분력으로 된다. 따라서, 1차 불평형 관성력과 2차 불평형 관성력은 동시에 평형시킬 수 없고 각 성분별로 평형시켜야 한다.

1차 관성력을 상쇄하기 위하여 평형질량 m_b 를 크랭크의 반대측에 부착하면 수직축상의 불평형 관성력은 상쇄되나 새로이 수평방향의 불평형 관성력 $m_b r \omega^2 \sin \theta$ 가 발생한다. 이와같이 평형질량만으로 불평형 관성력을 완전히 제거하는 것은 불가능하나 부가질량의 크기를 적당히 하면 1차 관성력의 일부는 실린더 축상에, 다른 일부는 직각방향으로 옮기는 것이 가능하여 불평형력의 크기를 줄일 수 있다. 2차 불평형 관성력은 1차의 것과 동일하나 크랭크 회전속도의 2배로 회전하므로 크랭크에 평형추를 설치하여 평형시킬 수 없고 크랭크 회전속도의 2배에 해당하는 속도로 회전하는 새로운

축을 부착한 후 이 축에 평형추를 적용하여야 한다.

물론 왕복질량에 의한 관성력도 부가장치를 사용하면 평형시킬 수 있으나 경제적인 이유로 의미가 없는 경우가 많아 본 연구에서는 문헌으로 대처한다.⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

2.2 V/W형 공기압축기의 평형

Fig. 2는 다단 압축식 W형 왕복동 공기압축기의 피스톤-크랭크 기구를 개략적으로 나타내고 있다. 이는 단일 실린더 기관의 불평형 관성력이 각기 다른 크기와 방향을 갖는 형태로 불평형 관성력을 각 방향별로 합하여 정리하면 식(3)과 같다.

$$\sum F_{V1} = r \omega^2 \left[\{ \cos^2 \varphi (m_1 + m_2) + m_3 + m_4 \} \cos \theta + \sin 2\varphi \frac{(m_1 - m_2)}{2} \sin \theta \right]$$

$$\sum F_{H1} = r \omega^2 \left[\sin 2\varphi \frac{(m_1 - m_2)}{2} \cos \theta + \{ \sin^2 \varphi (m_1 + m_2) + m_3 \} \sin \theta \right] \quad (3)$$

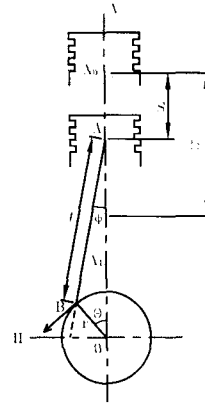


Fig. 1 Crank mechanism of single cylinder

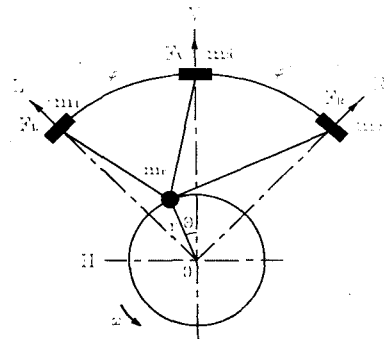


Fig. 2 Crank mechanism of W-type compressor

각 계수가 1차 불평형 관성력에 미치는 영향을 검토해 보기 위해 식(3)을 다시 정리하면 식(4)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sum F_{V1} &= r\omega^2(a\cos\theta + c\sin\theta) \\ \sum F_{H1} &= r\omega^2(b\sin\theta + c\cos\theta) \\ a &= \cos^2\varphi(m_1 + m_2) + m_3 + m_r \\ b &= \sin^2\varphi(m_1 + m_2) + m_r \\ c &= \sin 2\varphi \frac{(m_1 - m_2)}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)를 살펴보면, 각 방향 불평형 관성력의 첫째 항에서 $a > b$ 인 경우에는 $(a - b)$ 의 질량이 수직왕복 불평형 질량으로 작용하며 b 의 질량은 불평형 회전질량으로 작용한다. $a < b$ 인 경우에는 $(b - a)$ 의 질량이 수평왕복 불평형 질량으로 작용하는 것과 같고, a 의 질량이 불평형 회전질량으로 작용하고 있는 것을 의미한다. 여기서, 수직 또는 수평 왕복 불평형 질량을 제거하면 불평형 회전질량만이 존재하게 되며 완전평형을 이룰 수 있다. 수직 또는 수평 왕복 불평형 질량이 존재하지 않을 조건은 식(5)과 같다.

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{-m_3}{m_1 + m_2} \right) \quad (5)$$

식(4)에서 계수 c 의 의미는 c 의 질량이 기준축에 대해 $\pi/2$ 만큼의 위상을 가지고 크랭크 반대방향으로 회전하는 불평형 회전질량과 같다. 따라서 이는 크랭크와 반대방향으로 회전하는 축에 평형추를 설치하여야 한다. 이와같이 각 계수에 따라 불평형 관성력의 특성이 변하는데 이는 각각의 경우에 맞는 평형추의 크기와 방향을 결정한 후, 이를 벡터합성 하면 전체적인 평형추의 크기와 방향을 결정할 수 있다.

3. V/W형 공기압축기의 불평형 관성력 해석

본 절에서는 실제의 V/W형 다단 공기압축기에 대해 불평형 관성력을 정량적으로 계산하고 불평형 관성력의 특성을 검토하였다.

해석대상인 공기압축기는 선박 주기관 시동용으로 사용되고 있는 모델로 Fig. 4에 보이며, 압축기의 사양은 Table 1에 나타내었다. 대상모델은 다단 공기압축기의 가장 일반적인 형태이며, 3단 압축식으로 수직방향의 실린더 유무에 따른 불평

형 관성력 특성을 나타낼 수 있어 이들을 선정하였다. 각 모델의 불평형 관성력 해석은 두 가지 관점에서 분석하였다.

첫째는 수직방향과 수평방향의 불평형 관성력 분포이며 이는 기진력인 불평형 관성력이 전체적으로 어떠한 방향으로 분포되는지를 알 수 있다. 해석 결과는 Fig. 5와 6에 보이며, 이를 살펴보면 단일 실린더 구조와는 달리 불평형 관성력이 원형에 가까운 타원형태를 하고 있다. 불평형 관성력 분포의 형태는 각각의 질량에 따라 변하며, 이 모델들은 하나의 크랭크 스로우에 여러개의 연결봉이 연결되어 있으므로 왕복질량에 비해 회전질량이 상대적으로 크다. 이 결과 불평형 관성력 분포는 거의 원형으로 된다.

Table 1 Specifications of air compressors

Type	AHV-30 (V-TYPE)	AHW-60A (W-TYPE)	
No. of cylinder	2	3	EA
Delivery pressure	30×10^5	30×10^5	N/m ²
Free air	30	60	m ³ /hr
Bank angle	45	60	degree
Stroke	80	80	mm
Revolution	1200	1200	rpm
Reciprocating weight	W ₁	32.76	53.17
	W ₂	34.83	31.59
	W ₃	0	34.35
Rotating weight	77.3	100.26	N

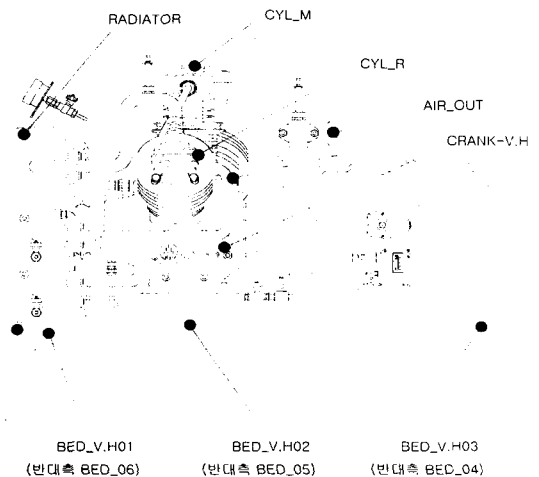


Fig. 4 G.A. of W-type compressor

여기서 V형 공기압축기의 불평형 관성력 분포와 W형 공기압축기의 불평형 관성력 분포를 비교하여 보면 V형의 경우가 W형의 경우보다 원형에 가까운 형태를 하고 있음을 알 수 있다. 이는 V형보다 W형의 경우가 회전질량이 크기는 하나 수직방향의 질량 m_3 에 의해 수직방향의 왕복질량도 커지기 때문이다.

또한 불평형 관성력 분포가 수직축에 대해 다소 기울어져 있다. 불평형 관성력의 기울기는 수직축을 중심으로 양측에 배치된 질량들의 차이로 인해 나타나게 된다. V형과 W형 공기압축기에 적용하여 비교하여 보면 m_1 과 m_2 의 질량 차이가 큰 W형이 더 많이 기울어짐을 알 수 있다.

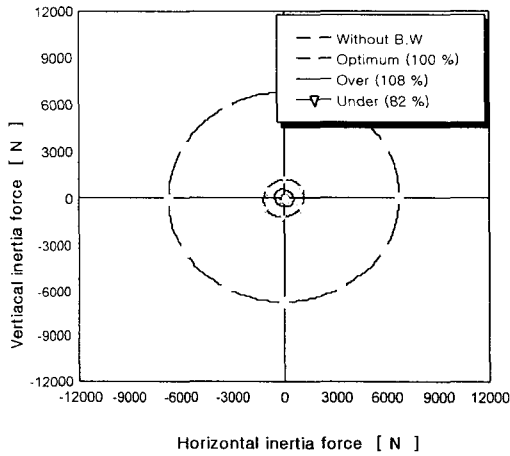


Fig. 5 The residual inertia force of AHV-30

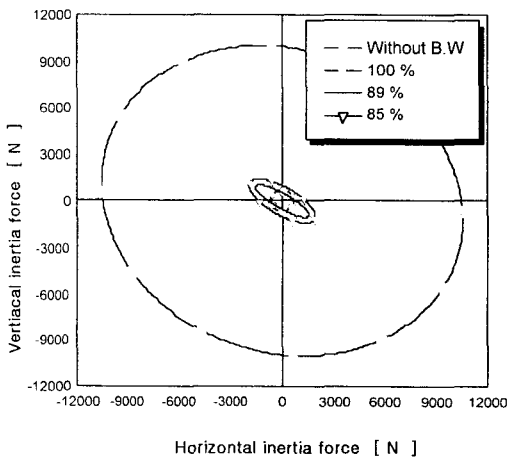


Fig. 6 The residual inertia force of AHW-60A

이와 같은 양단간의 질량차이로 인해 발생하는 불평형 관성력은 수직축에 90° 의 위상을 가지고 크랭크와 반대방향으로 회전하는 불평형 성분으로 평형추로 제어하는 것은 불가능하다. 이를 평형시키기 위해서는 크랭크와 동일한 크기의 각속도를 가지고 반대 방향으로 회전하는 축에 평형추를 설치하여야만 평형을 이룰 수 있다.

두 번째는 크랭크 각도에 따른 불평형 관성력의 합성치로 이는 각 부재의 강도 설계시 각 부재에 작용하는 최대 하중이 발생하는 크랭크 각과 크기를 쉽게 알 수 있으며 평형상태를 검증하는데 이용할 수 있다. 이 계산 결과는 Fig. 7과 8에 보이며, 이를 살펴보면 크랭크 각도에 따라 합성 관성력이 변동하고 있음을 확인 할 수 있다.

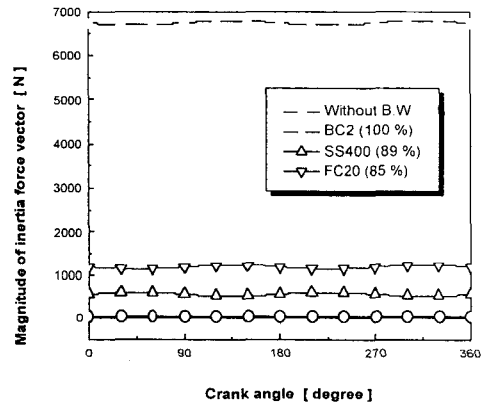


Fig. 7 The residual force as a function of the crank angle for AHV-30

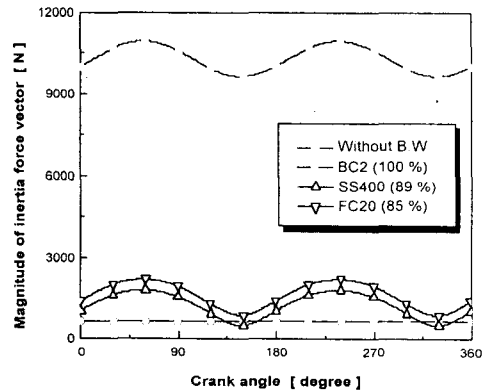


Fig. 8 The residual force as a function of the crank angle for AHW-60A

합성관성력의 변동은 왕복질량의 크기에 따라 변하며 수평방향과 수직방향의 불평형 관성력의 차가 클수록 크게 나타난다.

여기서 V형과 W형을 비교하여 보면 W형의 경우가 수직방향의 질량 m_3 에 의해 V형 보다 더 큰 변동이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 평형추 설치 후의 계산 결과를 보면 V/W형 모두 크랭크 각도에 따른 합성관성력의 변동이 없음을 알 수 있다. 이는 평형추에 의해 수직방향의 불평형 관성력이 수평방향으로 이동하여 두 방향에 동일한 크기의 불평형 관성력이 발생하고 있음을 의미한다.

4. V/W형 공기압축기의 평형추 실험 및 고찰

본 절에서는 이상의 해석결과를 확인하기 위하여 V/W형 다단 공기압축기를 대상으로 그의 평형추를 설계, 설치 후 진동속도를 측정하고 분석하였다. V형 공기압축기의 실험에 사용된 평형추는 1차 불평형 관성력을 수직과 수평방향 성분이 같게 되도록 설계한 평형추(일반적으로 최적 평형추라고 부른다)(optimum balance weight)와 이것에 각각 82% (under balance weight), 108% (over balance weight)의 평형량을 갖는 평형추를 선정하였으며 이는 계산의 타당성을 확인하기 위한 것이다. 이때 적용된 평형추의 치수를 Table 2 (a)에 보인다.

W형 공기압축기의 경우는 실제 탄성지지를 적용함에 있어 불평형력이 크게 작용하여 문제가 발생하였던 모델이다. 이 모델의 경우 압축기 제작사에서 기존의 평형추 설계이론으로 설계한 평형추에 의해서는 ISO 2372의 진동기준치를 만족하지 못하였다. 따라서, 본 연구에서 제시한 평형추 이론을 바탕으로 평형추를 설계하였으며, 이 역시 질량이 각기 다른 3종의 평형추를 제작하였다.

이때 크랭크케이스의 내부공간이 부족한 관계로 최적의 평형추와 over balance weight는 제작이 불가하였다. 이러한 이유로 최적의 평형추에 가장 근접한 크기를 결정한 후 이것의 재질을 FC20, SS400, BC2로 변경하여 각각의 평형량을 85%, 89%, 96%으로 설정하여 실험에 적용하였다. 이는 평형량의 변화에 따른 진동속도의 크기 변화를 고찰하여 해석의 신뢰성을 확인하고자 하였다. W형 공기압축기에 적용된 평형추의 치수는

Table 2 (b)와 같다.

Table 2 (a),(b)에 나타난 평형추를 각각의 모델에 적용하고 정상운전시의 진동속도를 측정하였다. 실험에 적용된 압축기는 해석대상의 압축기와 동일하며 Fig.4에 나타난 바와 같이 탄성지지 되어 있다.

V형 공기압축기의 진동측정 위치는 압축기 전체의 동적거동을 대표할 수 있는 크랭크케이스 부분과 앞쪽 좌측에 설치된 탄성지지 부근으로 선정하였고, W형의 경우는 제작사에서 관심대상으로 선정한 압축기의 주품위치와 각 탄성마운트로 선정하여 비교하였다. 측정된 진동속도는 평형추에 의해 직접적으로 영향을 받는 1차 성분을 주 대상으로 하였다. 각 측정점에서 측정된 진동속도를 Fig.9와 10에 보이고 있다.

측정된 진동속도를 검토하여 보면 두 모델 모두가 해석과정에서 잔류불평형력이 가정 작게 발생할 것으로 예상되는 최적 평형추를 설치한 경우가 진동이 가장 작음을 알 수 있다. 각 측정위치의 진동속도는 진동모드가 완전비연성된 경우가 아니므로 다소 차이는 있지만 전체적으로 평형추의 오차율에 비례하여 진동이 커지는 것으로 보아 해석법의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

Table 2 (a) Specifications of balance weights

	V-type (AHV-30)		
	Under	Optimum	Over
Material	FC 20	FC 20	SS 400
Balance weight [N]	31.7	37.8	40.9
Center of gravity [mm] (ref. shaft center)	54.39	55.44	55.44
$m_b r_b$ [N·mm]	1725	2094	2266
Percentage [%]	82	100	108

Table 2 (b) Specifications of balance weights

	W-type (AHW-60A)		
	Case I (Maker)	Case II	Case III (Optimum)
Material	FC 20	SS400	BC 2
Balance weight [N]	43.9	47.5	51.2
Center of gravity [mm] (ref. shaft center)	57.53		
$m_b r_b$ [N·mm]	2707	2835	3051
Percentage [%]	85	89	96

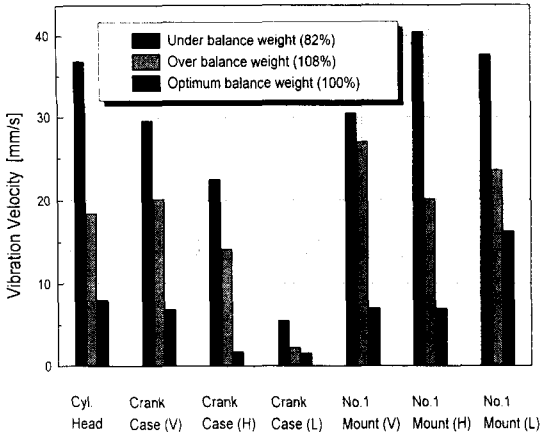


Fig. 9 Vibration velocities on the measuring positions for AHV-30

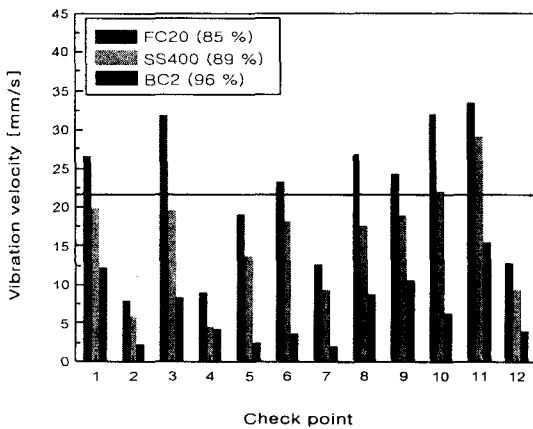


Fig. 10 Vibration velocities on the measuring positions for AHW-60A

이를 실제 제작되고 있는 V/W형 다단 왕복동 공기압축기에 적용한 결과 최적의 평형추를 설치하였을 경우가 가장 작은 진동속도를 보였으며, 평형추의 오차에 비례하여 진동이 커지는 것으로 보아 평형추 설계법의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 즉 각 단의 왕복질량이 서로 다른 경우 이것이 고려된 평형추 설계이론을 적용해야 함을 알 수 있다. 특히 W형의 경우는 기존의 이론으로는 만족하지 못하던 ISO 진동기준치를 본 연구에서 제시된 평형추 설계법에 의해 제작된 평형추를 적용하여 만족시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) J.P. Den Hartog, Mechanical Vibration, McGraw-Hill, 1934
- (2) H. Masse, H. Klier, Kraefte, Momente und dem Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschine, Die Verbrennungskraftmaschine, Neue Folge, Band 2, Springer-Verlag, Wien, 1981
- (3) Tanabe, "Technical Note", TES-D0059, 1981
- (4) Schmidt-Sorensen J., "Methods of Reducing Engine Vibration", ISME Tokyo'73, Panel discussions D-97, 1979
- (5) 김의간, "박용디젤기관진동에 관한 일반적 고찰", 기술현대, 1981
- (6) H. Lindquist, "Balancing the First Order External Moments of MAN B&W 4 cylinder Low Speed Engine", The Motor Ships, 1983
- (7) MAN B&W Diesel A/S, "Vibration Characteristics of Two-stroke Low Speed Diesel Engine", 1993

5. 결 론

다단 압축식 왕복동 공기압축기의 경우는 각단의 왕복질량이 달라 기존에 사용되던 기관의 평형추 설계이론을 적용하기에는 문제가 있었다.

따라서, 본 연구에서는 각단의 왕복질량이 서로 다른 다단 압축식 왕복동 공기압축기의 불평형 관성력을 정량적으로 계산하고 이를 평형시키기 위한 평형추 설계법을 정립하였다.