

유압 사축식 액셀 피스톤 펌프의 로드 구동에 관한 연구 제 1보: 구동 메카니즘의 이론해석

김종기 · 오석형* · 정재연**

전북대학교 정밀기계공학과 대학원, *군산대학교 기계공학부
**전북대학교 기계공학부, 자동차 신기술연구소

A Study on the Driving of Rods in Hydraulic Bent-axis-type Axial Piston Pump Part 1: The Theoretical Analysis of Driving Mechanism

Jong-Ki Kim, Suk-Hyung Oh* and Jae-Youn Jung**

Graduate School, Chonbuk National University

*Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University

**Department of Mechanical Engineering and Automobile High Technology Research Institute,
Chonbuk National University

Abstract—Recently, bent-axis-type axial piston pumps driven by rods being in extensively used in the world, because of simple design, lightweight, effective cost. So, to guarantee the quality of bent-axis-type axial piston pumps driven by rods, it is necessary to know characteristics of the driving mechanism of rods. But, as they perform both reciprocating and spinning motions, it is difficult to understand driving mechanism. In this paper, I studied the theoretical driving mechanisms of cylinder block driven by rods through geometric method. I found that the cylinder block was driven by one rod in limited area and the driving area was changed by rod's tilting angle and cylinder block's swivel angle.

Key words—bent-axis-type axial piston pump, cylinder block, rod, driving mechanism.

1. 서 론

근년 들어 기계장치들이 대형화 및 자동화되어 가는 추세에 있으며, 이러한 기계장치들의 대형화와 자동화의 실현 수단으로서 유압펌프가 널리 사용되어지고 있다. 그 중에서도 특히 유압 피스톤 펌프는 다른 펌프에 비해 고압화에 적합하고, 출력밀도가 크며, 효율이 좋은 것등 많은 장점을 가지고 있기 때문에 건설 기계를 비롯하여 사출성형기, 공작기계, 자동차, 항공기, 조선 등 산업 전 분야에 걸쳐 핵심 기기로서 폭넓게 사용되어지고 있다.

이러한 유압 피스톤 펌프는 크게 액셀형, 레이디얼형, 왕복형의 3종류로 구분되지만, 현재 가장 많이 사

용되고 있는 것이 액셀형 피스톤 펌프이다. 액셀형 피스톤 펌프는 다시 사축식과 사판식으로 분류되는데, 사판식은 고압연속 사용이 가능하며, 고속제어에 적합하고, 사축식은 레귤레이터에 의한 유량, 압력, 출력 등의 제어가 용이하고, 체적효율이 사판식에 비해 좋다는 특징이 있다. 따라서 유압 액셀 피스톤 펌프에 대한 많은 연구들이 행해졌는데, 특히 주요 요소인 실린더 블록과 밸브 플레이트[1-4]를 비롯하여 피스톤과 슈[5-8]에 대한 많은 연구들이 수행되어졌다. 그러나 대부분이 사판식 피스톤 펌프를 대상으로 하고 있으며, 펌프 전체적인 견지에서 보다는 부분적인 요소들을 위주로 한 연구들이다.

특히, 로드 구동방식 사축식 피스톤 펌프는 구조가

간단하고, 경사각을 최대 40°까지 할 수 있어 경량화 및 저가격화에 적합하기 때문에 다양한 산업분야에서 유용하게 사용되고 있지만, 설계 기술의 핵심인 실린더 블록과 피스톤 로드 사이의 구동 메카니즘에 대해서는 제조 메이커들만 확보하고 있는 고도의 기술이며, 아직 공개적으로 발표되어진 것을 찾아보기가 힘든 실정이다. 또한, 본 방식 피스톤 펌프의 로드는 실린더 보어 내를 고속으로 왕복 운동하는 동시에 자·공전운동을 행하면서 실린더 블록을 구동하기 때문에 이것의 실체를 파악하는 것은 무척 어려운 일이다. 그러나 최근 피스톤 펌프의 고성능·고신뢰성의 요구에 부응해서 본 방식 피스톤 펌프의 품질과 성능을 향상시키기 위해서는 로드와 실린더 블록이 구동되는 메카니즘을 체계적으로 해석하는 것이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 로드 구동방식 사축식 피스톤 펌프를 대상으로 로드 구동 메카니즘에 대한 이론 해석을 행하였다.

2. 이론해석

2-1. 연구대상 펌프의 개요

본 연구의 대상이 되는 로드 구동방식 사축식 피스톤 펌프의 단면도와 펌프 사양 및 주요치수를 Fig. 1과 Table 1, 2에 나타내었다.

2-2. 유니버설조인트 구동 메카니즘

로드 구동방식 사축식 피스톤 펌프는 유니버설조인트 구동방식 사축식 피스톤 펌프에서 실린더 블록 구동체인 유니버설조인트를 제외시킨 것이기 때문에, 로드 구동메카니즘의 이론 해석시에는 유니버설조인트 구동 메카니즘이 기본이 된다. 따라서, 로드 구동

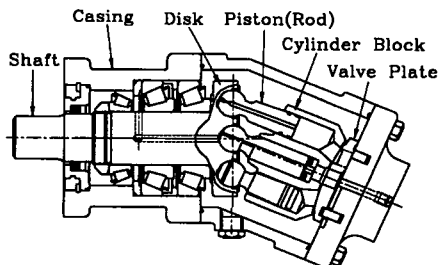


Fig. 1. Bent-axis-type axial piston pump is driven by rods.

Table 1. Specification of piston pump

피스톤 수×직경 (mm)	7×22.7
용량 (cc/rev)	72
정격 압력 (kgf/cm ²)	210
최대 압력 (kgf/cm ²)	350
정격 회전수 (rpm)	1800
이론 토출유량 (l/min)	130
최대 경전각 (°)	23

Table 2. Basic data of pump parts (unit: mm)

디스크 피치원반경	33.3
실린더 블록 피치원반경	32.0
피스톤의 유효거리	54.4
밸브 플레이트 Inner seal land 내측반경	10.0
Inner seal land 외측반경	14.6
Outer seal land 내측반경	29.6
Outer seal land 외측반경	33.4
밸브 플레이트 곡률반경	148.0
밸브 플레이트 피치원반경	22.1

메카니즘의 이론을 해석하기에 앞서 이것의 기본이 되는 유니버설조인트 구동 메카니즘의 이론에 대해서 살펴보고 그것을 기초로 하여 로드 구동 메카니즘의 이론을 해석하고자 한다.

Fig. 2에 유니버설조인트 구동방식 사축식 피스톤 펌프를 나타내었다.

유니버설조인트 구동방식은 디스크와 실린더 블록 사이를 유니버설조인트로 연결한 것으로 디스크로부터의 구동 토크를 유니버설조인트에 의해 실린더 블록에 전달하고 따라서, 디스크와 실린더 블록은 동기회전을 하게 된다. 그에 반해 로드 구동방식은 로드(본 연구에서는 피스톤과 로드의 일체형을 사용했으며, 이하 로드로 칭한다.) 자체가 구동체로 되어 실린

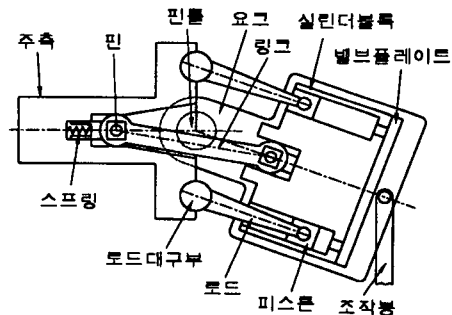


Fig. 2. Bent-axis-type axial piston pump is driven by universal joint.

더 블록에 구동토크를 전달하기 때문에 후술하는 바와 같이 실린더 블록은 디스크에 대해 지연되어 회전하게 된다. 즉, 실린더 블록과 디스크는 비동기 회전운동을 하게 된다.

Fig. 2에서 실린더 블록 중심과 디스크 중심이 이루는 각도를 경전각 α 라 할 때, 이 경전각이 0이 아닌 임의의 각을 갖는 경우, 실린더 블록 좌표계에서 본 디스크(로드 구부)의 회전궤적은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 타원으로 된다.

또한, 디스크의 회전에 따라 실린더 블록 중심에서 실린더 보어 중심을 연결한 선과 실린더 보어 중심에서 로드 중심을 연결한 선과 이루는 각도(로드 방위각 ϕ)는 디스크 회전방향과 반대 방향으로 회전한다. 이때, 로드는 BDC에서는 실린더 블록의 중심쪽을 향해 위치해 있고, 중립점에서는 실린더 보어의 바깥쪽을 향하게 되며, 회전하여 TDC가 되면 다시 실린더 블록의 중심쪽을 향해 위치하게 된다. 결국 디스크를 BDC에서 180° 회전시키면 로드의 방위각은 디스크 회전방향의 역방향으로 360° 변한다. 즉, 디스크 1회전 중 로드는 실린더 보어 내를 2회 자전운동 하게 된다.

Fig. 4는 디스크와 실린더 블록이 동기회전 운동을 하는 경우의 디스크, 로드 및 실린더 블록의 위치관계를 보여주고 있다. 단, 실린더 블록 중심은 디스크 중심과 항상 일정하게 유지된다고 가정한다.

이때, 디스크의 회전운동은 실린더 블록 축에서 보면 타원운동을 하기 때문에 디스크(로드 구부, P_1)는 외관상 실린더 블록에 대해서 지연·선행각 δ_0 를 갖게 된다. 따라서 임의의 경전각 α 에서, 디스크가 BDC로부터 임의의 회전각 θ 만큼 회전하였을 때, 지연·선행각 δ_0 , 로드의 방위각 ϕ 및 경사각 β_0 (실린더

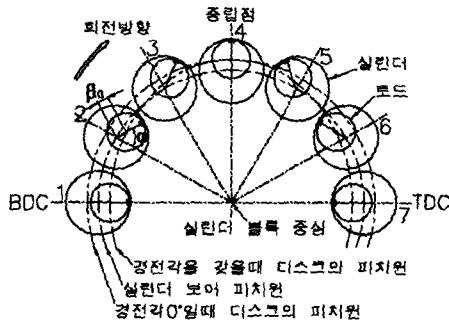


Fig. 3. Movement of rods.

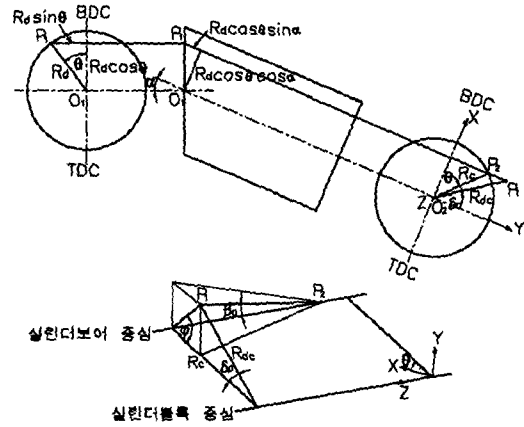


Fig. 4. Geometric diagram of the driving mechanism.

보어 중심과 로드 중심이 이루는 각도에 대해 기하학적으로 고려해 보면 다음과 같다.

$$R_{dc} = \sqrt{(R_d \sin\theta)^2 + (R_d \cos\theta \cos\alpha)^2} = R_d \sqrt{\sin^2\theta + (\cos\theta \cos\alpha)^2} \quad (1)$$

$$\sin(\theta + \delta_0) = \frac{R_d \sin\theta}{R_{dc}} \text{ 에서}$$

$$\therefore \delta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{R_d \sin\theta}{R_{dc}}\right) - \theta \quad (2)$$

따라서,

$$\tan\phi = \frac{R_{dc} \sin\delta_0}{R_c - R_{dc} \cos\delta_0} \text{ 에서}$$

$$\therefore \phi = \tan^{-1}\left(\frac{R_{dc} \sin\delta_0}{R_c - R_{dc} \cos\delta_0}\right) \quad (3)$$

또한,

$$\sin\beta_0 = \frac{\sqrt{(R_c - R_{dc} \cos\delta_0)^2} + \sqrt{(R_{dc} \sin\delta_0)^2}}{L} = \frac{\sqrt{R_c^2 + R_{dc}^2 - 2R_c R_{dc} \cos\delta_0}}{L}$$

$$\therefore \beta_0 = \sin^{-1} \frac{\sqrt{R_c^2 + R_{dc}^2 - 2R_c R_{dc} \cos\delta_0}}{L} \quad (4)$$

Fig. 5는 동기회전시 디스크를 경전각 α 를 파라미터로 하여 BDC에서 TDC까지 회전시킨 경우, 실린더 보어 중심을 원점으로 해서 로드 구부의 궤적을 β_0

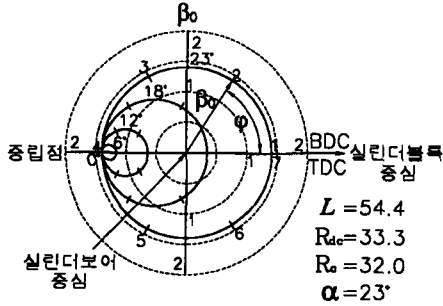


Fig. 5. Variation of β_0 and ϕ by swivel angle.

ϕ 의 좌표계로 나타낸 것이다. 좌표계 원점은 실린더 보어 중심이고 축 상에 있는 값은 β_0 를 나타낸다. 그림의 각 실선원 상에 있는 번호(1~7)는 Fig. 3상의 실린더 보어 번호(1~7)에 대응한다.

로드는 실린더 블록의 회전방향과 반대방향으로 실린더 보어 중심을 그 회전 중심으로 해서 자전운동을 하게되고, 그 자전운동 범위는 경전각이 작아짐에 따라 작아지게 된다. 경전각 $\alpha=0$ 인 경우는 $\beta_0=1.4^\circ$, $\phi=180^\circ$ 인 일정한 점으로 되며, 따라서 로드는 디스크의 임의회전에 대해 항상 실린더 블록 중심과 실린더 보어 중심을 연결한 선상에서 실린더 보어 외측을 향하게 된다.

경전각을 갖는 경우는 로드의 방위각 $\phi=0\sim 360^\circ$ 변화한다. 그래서, 최대 경사각 $\alpha_{max}=23^\circ$ 에서는 β_0 는 항상 1.4° 로 되고, 로드의 자전운동 영역은 최대로 광범위하게 된다.

이와 같이 로드는 실린더 보어 내를 자전운동하기 때문에 이점을 고려해서 로드와 실린더 보어가 서로 간섭을 일으키지 않도록 실린더 보어 중심에 대해서 로드가 자유롭게 회전할 수 있는 각도가 로드에게 주어져야만 한다.

2-3. 로드 구동 메카니즘

전술한 바와 같이 로드는 디스크의 회전에 따라 실린더 보어 내를 자전운동하며, 그 운동영역은 로드의 유효길이 L , 실린더 보어의 피치원 반경 R_o , 디스크 구부의 피치원 반경 R_c 와 경전각 α 에 의해서 결정된다. 그래서, 임의 회전의 로드가 구부 P_1 는 Fig. 3에서 실선원 상에 있게 된다.

여기서 로드가 구동체로 되는 로드구동의 경우 로드가 실린더 블록의 회전보다 선행하는 위치에 있어

야 만이 구동이 가능하기 때문에 로드 구동영역은 Fig. 5에서 말하면 로드 방위각이 $0 \leq \phi \leq 180^\circ$ 의 위치에 올 때가 된다.

Fig. 6은 로드 구동 메카니즘의 개략도이다.

유니버설조인트에 의해 디스크가 BDC에서 θ 만큼 회전했을 때, 실린더 블록 측에서 디스크를 본 경우 디스크는 δ_0 만큼 선행한 상태가 된다. 그리고 로드 구부의 실린더 블록 좌표계로의 투영점인 P_1 과 실린더 보어 중심 P_2 와의 거리 $\overline{P_1P_2}=L \sin\beta_0$ 로 된다. P_1 는 반경이 $\overline{P_1O_2}$ 인 원과 도망각 ξ (로드가 실린더 보어 중심에서 경사질 수 있는 최대각도)의 원과의 교점이고, 이때 도망각 ξ 의 원 중심은 P_2 이다.

반경이 P_2O_2 인원(실린더 보어 피치원) 상에서 $\overline{P_1P_2}=L \sin\xi$ 로 되는 위치를 P_2' 로 하면, 이때 로드와 실린더 보어가 처음으로 접촉을 하게 된다. 따라서 P_2 를 P_2' 위치까지 되돌렸을 때 생기는 각도가 로드와 실린더 보어간의 지연각이고 그림에서는 $\angle P_2O_2P_2'$ 에 상당한다. P_2' 의 회전각을 θ' , 이때 디스크의 선행각을 δ_0 로 했을 때 형성되는 2개의 삼각형 $\triangle P_2O_2P_1$ 와 $\triangle P_2'O_2P_1$ 은 합동이고 지연각 δ_x 는 기하학적인 관계로부터

$$\delta_x = \delta_0' - \delta_0 \tag{5}$$

즉,

$$\begin{aligned} \angle P_2O_2P_2' &= \angle P_1O_2P_2' - \angle P_1O_2P_2 \\ &= \angle P_1O_2P_2' - \delta_0 \end{aligned}$$

여기서, δ_0 는 $\angle P_2O_2P_2'$ 에서 삼각함수의 코사인 법칙을 사용하면,

$$\begin{aligned} \delta_0' &= \angle P_2O_2P_2' \\ &= \cos^{-1} \frac{R_{dc}^2 + R_c^2 - (L \sin\xi)^2}{2R_cR_{dc}} \end{aligned} \tag{6}$$

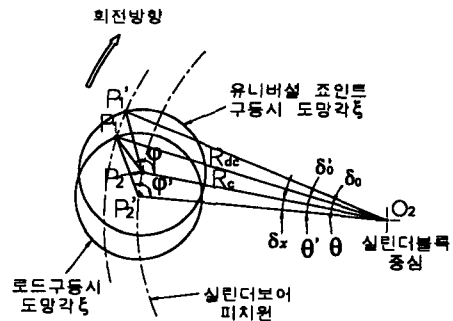


Fig. 6. Diagram for the driving mechanism of rods.

로 되고, 따라서 실린더 보어에 대한 로드의 지연각 δ_x 는 다음 식으로 된다.

$$\delta_x = \cos^{-1} \frac{R_{dc}^2 + R_c^2 - (L \sin \xi)^2}{2R_c R_{dc}} - \delta_0 \quad (7)$$

3. 이론해석 결과

Fig. 7과 8은 경전각 α 의 영향을 살펴보기 위해 $\xi=1.7^\circ$ 이고, ω 가 각각 $12^\circ, 23^\circ$ 인 경우에 전 로드에 대한 지연각 δ_x 의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 경전각 α 가 커지면 지연각 δ_x 의 변화폭이 커지면서 그 최소값은 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 경전각 α 가 증가하면 로드가 실린더 보어를 자전하는 영역이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

한편, 그림중에 숫자(1~7)는 BDC에 위치한 로드를 1번으로 해서 그 이후 실린더 블록의 회전방향에 따라서 나타낸 로드의 번호이며, 지연각은 정현파형으로 동기성을 갖고 변화하고 있고, 그 값이 최소로 되는 영역은 1회전 중 2회가 되는 것을 알 수 있으며, 이 영역에 있는 로드에서 실린더 블록은 구동된다. 지연각이 최소로 되는 로드는 임의의 회전 위치에서 기본적으로 1개이고(구동영역의 전환시에는 순간적으로 2개로 된다.) 그 로드는 교대로 교체된다.

실린더 블록의 구동 영역은 로드 구부 P_1 의 실린더 블록에 대한 외관상의 선행각 δ_x 가 최대로 되는 BDC를 기준으로 하여 실린더 블록의 회전 방향으로 $0\sim 360^\circ$ 사이를 90° 간격으로 1~4 상한으로 구분할 때,

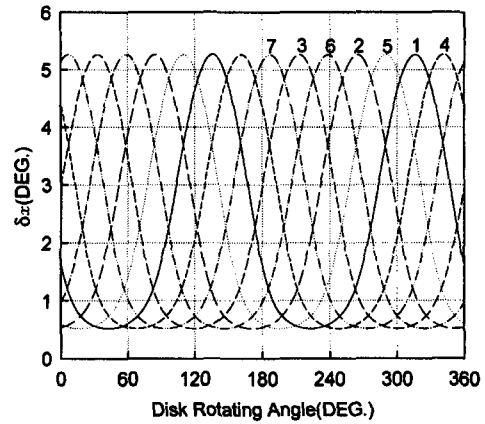


Fig. 8. Variation of δ_x about rods ($\xi=1.7^\circ, \alpha=23^\circ$).

제 1상한과 제 3상한이다. 결국 제 1상한의 실린더 블록 구동영역에서 로드가 벗어나는 순간에 제 3상한에 있는 로드가 실린더 블록 구동영역으로 돌입하고 그 후에는 이것을 반복하는 것으로 된다. 또, 실린더 블록 구동영역은 로드가 51.4° 의 간격으로 위치해 있고, 각 로드가 1회전당 2회 구동영역을 가지므로 25.7° 가 된다.

Fig. 9와 10에는 도망각 ξ 의 영향을 살펴보기 위해 $\xi=1.9^\circ$ 이고, ω 가 각각 $12^\circ, 23^\circ$ 인 경우에 전 로드에 대한 지연각 δ_x 의 변화를 나타내었다.

Fig. 7 그리고 8과 비교해 볼 때 도망각이 증가함에 따라 지연각의 변화폭은 감소하고 있으며, 그 최소값은 증가하는 것을 알 수 있다. 이것의 원인으로서는 로드의 도망각이 증가하면 구동축의 회전에 따른 실린

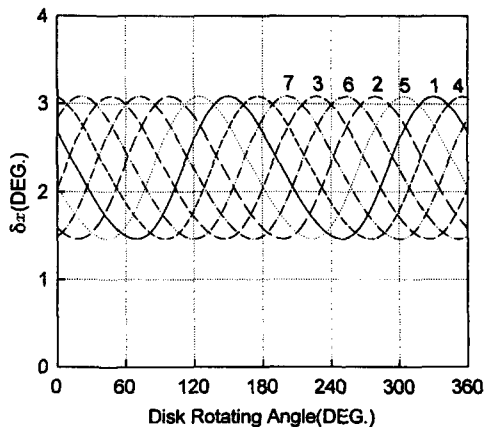


Fig. 7. Variation of δ_x about rods ($\xi=1.7^\circ, \alpha=12^\circ$).

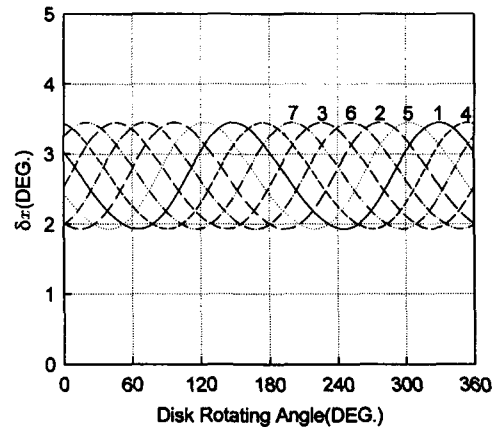


Fig. 9. Variation of δ_x about rods ($\xi=1.9^\circ, \alpha=12^\circ$).

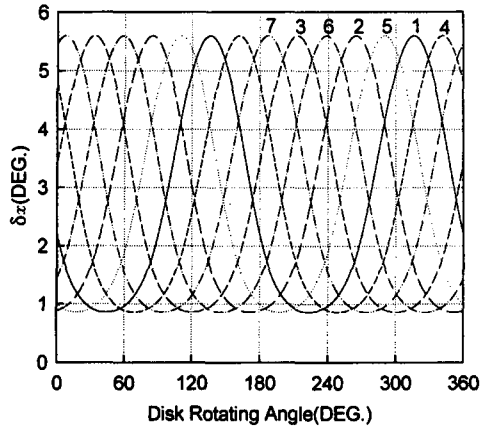


Fig. 10. Variation of δ_r about rods ($\xi=1.9^\circ$, $\alpha=23^\circ$).

더 블록의 회전이 더욱 지연되어 지연각의 변화폭은 감소하고, 그 최소값은 로드 도망각의 증가에 비례하여 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 11은 도망각 ξ 가 지연각 δ_r 의 최소값과 구동영역에 미치는 영향을 살펴보기 위해 $\alpha=23^\circ$ 이고, ξ 가 1.7° , 1.9° , 2.1° 로 변할 때, 지연각 δ_r 의 변화를 보여주고 있다.

지연각 δ_r 의 최소값은 도망각 ξ 가 커짐에 따라 증가하고 있으며, 구동영역의 시작점은 ξ 가 커짐에 따라 조금씩 늦어지고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 로드의 도망각 ξ 는 지연각 δ_r 와 로드가 실린더 블록을 구동하는 구동영역에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 12는 로드의 도망각 $\xi=1.7^\circ$ 일 때 경전각 α 의

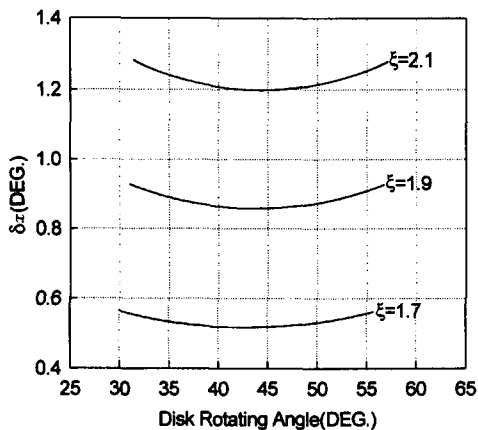


Fig. 11. Variation of δ_r according to ξ ($\alpha=23^\circ$).

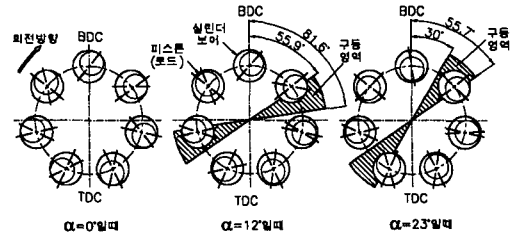


Fig. 12. Variation of the driving area according to swivel angle ($\xi=1.7^\circ$).

변화에 따른 구동영역의 변화를 알기 쉽게 도식적으로 나타낸 그림이다. $\alpha=0^\circ$ 일 때는 모든 로드가 구동에 관여하지만, α 가 임의의 각을 갖는 경우 로드는 일정구간에서만 실린더 블록을 구동하게 되고, 경전각에 따라 그 구동영역도 변하게 된다. 즉, 그림으로부터 경전각 α 커질수록 BDC를 기준으로 했을 때 구동영역의 시작점이 점점 빨라지고 있는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이상과 같이 로드 구동방식 사축식 피스톤 펌프의 피스톤 로드 구동 메카니즘에 대한 이론해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 로드 구동방식 사축식 피스톤 펌프의 실린더 블록은 BDC를 기준으로 회전할 경우 $0\sim 90^\circ$ 구간에 있는 1개의 피스톤 로드에 의해 어느 일정 구간에서 구동이 된 후 이어서 $180\sim 270^\circ$ 구간에 있는 또 다른 1개의 피스톤 로드에 의해 인접한 일정 구간에서 구동이 되며, 그 다음에는 이것을 반복하면서 연속적으로 구동 영역안에 있는 피스톤 로드에 의해 일정구간씩 구동되어짐을 알 수 있었다.

2. 각 피스톤 로드는 실린더 블록이 1회전하는 동안에 실린더 보어 내를 2회 자전운동하고, 지연각 δ_r 가 최소로 되는 영역에서 2회 실린더 블록을 구동시킴을 알 수 있었다.

3. 피스톤 로드의 지연각 δ_r 의 변화폭은 도망각 ξ 가 커짐에 따라, 또한, 경전각 α 가 작아짐에 따라 감소하고, 지연각 δ_r 의 최소값은 도망각 ξ 가 커짐에 따라, 또한, 경전각 α 가 작아짐에 따라 증가됨을 알 수 있었다.

4. 피스톤 로드가 구동영역으로 접어드는 각도는 경전각 α 가 커짐에 따라 작아짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Franco, N., "Pump design by force balance," *Hydraulics & Pneumatics*, Vol. 14, No. 11, pp. 101-107, 1961.
2. Shute, N.A. and Turnbull, D.E., "Minimum power loss conditions of the pistons and valve plate in axial-type pumps and motors," *ASME*, Paper 63-WA-90, pp. 6-17, 1963.
3. McKeown, J., Milner, D.A., Shute, N.A. and Turnbull, D.E., "Hydrodynamic factors affecting the design of valve plates and thrust bearings," *Proc. I. Mech. E.*, Vol. 181, No. 1, pp. 653-665, 1966.
4. Hibbert, G., Lindsay, D.V., Shute, N.A. and Turnbull, D.E., "The balancing of piston and valve plate forces in axial-piston pumps and motors," *BHRA*, Paper G2, pp. 13-40, 1971.
5. Dowd, J.R. and Barwell, E.T., "Tribological Interaction between piston and cylinder of a model high pressure hydraulic pump," *ASLE Trans.*, Vol. 18, No. 1, pp. 21, 1975.
6. Hooke, C.J. and Kakouliis, Y.P., "The effects of centrifugal load and ball friction on the lubrication of slippers in axial piston pumps," *6th International FLUID POWER SYMPOSIUM*, BHRA, pp. 179, 1981.
7. 方義, 池谷光榮, "斜板式アキシアルピストンポンプ・モタの低速におけるピストン~シリンダ間潤滑状態," *油壓と空氣壓*, Vol. 23, No. 4, pp. 76-83, 1992.
8. 山崎, ほか, "油壓ピストンポンプ・モタにあけるピストン~シリダ間の油膜厚さ測定," *北陸信越支部第31基總會講演會論文集*, pp. 157, 1994.