

무맥동 정량주입 펌프

이해영*

1. 서 론

일반적으로 유체를 정량 이송하기 위해 사용하는 왕복동 정량펌프 (reciprocating-metering pumps) 는 Fig. 1과 같이 토출유속이 sine 파형을 동반한 특유의 맥동파 (pulsation)를 수반하는 단점을 가지고 있다. 이러한 맥동파는 관성저항에 의해 토출구 측에 과도한 압력이 발생함으로서 배관의 파손과 펌프 내부부품이 고장 나는 원인이 되기도 하며 또한, 순간유량이 일정하지 못함으로서 균질성을 요하는 Process는 사용상제약을 받게 된다.

이러한 맥동파를 발생하게 하는 주요한 원인은 플런저를 왕복 운동하여 흡입과 토출을 반복하도록 유도하는 편심캠 (eccentric cam)으로부터 발생하게 된다.

편심캠은 일정한기울기의 편심량을 가지는 원형체이므로 플런저의 왕복속도가 정현파 (sinu-soidal wave)로 나타나게 되는데 이것이 토출유량에 맥동을 미치게 하는 원인인 것이다.

그간 국내 산업현장에서 맥동을 줄이기 위한 방법으로 여러 가지 모색되어 왔다. 그 대표적인 방법이 에어 챔버 (Air Chamber)를 이용한 기술로서 가장 단순하면서도 쉬운 방법이었다. 그러나 이 방법은 공기가 액체에 녹아드는 문제로 주기적인 공기 보충작업이 필요한 함과 동시에 역압 밸브 등을 설치해야하는 번거로움이 따른다. 특히 압력이 높을수록 공기가 빠르게 녹아드는 현상으로 주기적인 점검이 필요하게 된다. 따라서 자동화 응용 프로세스에는 사용상 주의를 기울여야할 필요성이 있으며, 고도의 연속류를 요구하는 생산 프로세스 등에는 접근할 수가 없는 단점을 가지고 있다.

따라서 단점을 극복하기 위한 근원적인 대안은 등속도 캠을 개발하여 적용하는 유일한 방법인 것이다. 등속

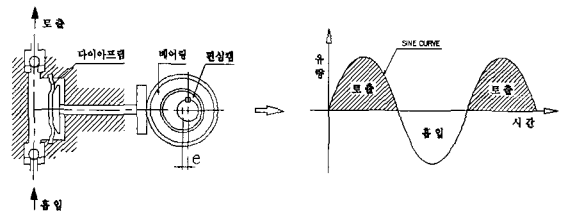


Fig. 1 왕복동 정량펌프의 맥동파

도 캠을 이용한 무맥동 정량펌프는 약 10여년 전부터 일본에서 개발되어 실용화가 진행되고 있었다. 대표적인 기업이 TACMINA와 NIKKISO이다. TACMINA社는 현재까지 맥동율의 정도를 $\pm 1\%$ 까지 가능한 유압식정량펌프를 개발, 시장공략에 나서고 있으며, NIKKISO사는 고압용 플런저형식을 무맥동화 하여 국내 발전사를 중심으로 고압용 화학 플랜트시장을 석권하고 있는 실정이다.

연속류가 가능한 무맥동 정량펌프는 그간 산업현장에서 필요에 의해 제품개발의 필요성이 인식 되어져 왔

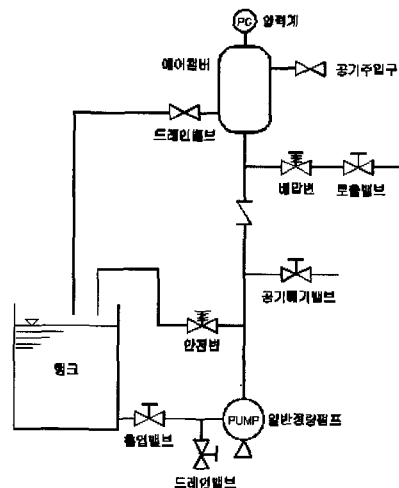


Fig. 2 일반 정량 펌프 배관도

* 천세산업주식회사 펌프기술연구소
E-mail : cheonsei@cheonsei.co.kr

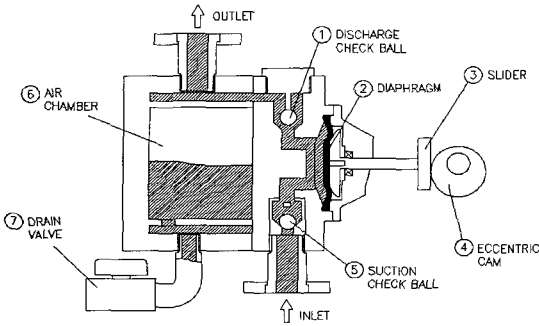


Fig. 3 에어 챔버내장형 정량펌프

다. 반도체장비, display panel 제조장치 등 고부가가치를 창출하는 첨단 분야의 활용도가 많은 제품으로서 국산화전까지는 국내에 유입되는 모든 제품은 외산제품을 수입사용해 왔다. 특히, 우리나라 핵심기술인 display 산업분야에는 제조과정상 연속류를 반드시 적용해야 하는 시스템으로서 무맥동 펌프의 활용도는 지속적으로 증가할 것으로 전망된다.

2. 등속도 캠을 이용한 무맥동 정량펌프 (Pulseless Metering pump)의 기본적 이론

Figure 4는 유량이 일정한 구간이 있는 1연식 구조의 등속도 캠에 의한 맥동파형이다. 등속도 캠이 플런저를 등속도로 운전시키기 때문에 토출유량 또한 등속도로 흘러나온다. 이때의 등속유량이 맥동이 없는 유량이 되는 것이다.

그러나 왕복동 정량펌프의 특성상 토출구간이 있으면 반드시 흡입구간이 있으므로 연속적인 무맥동류를 얻기 위해서는 Fig. 5와 같이 등속도 캠을 180° 위상차로 한 2연식구조의 접액부 (헤드)를 사용하여야 연속토출이 가능해진다.

등속도 캠을 이용한 정량펌프의 무맥동화 기술은 앞에서 언급했듯이 이미 일본에서 주도적으로 개발되어져 왔다. 일본의 기술은 아래와 같이 등속도 캠은 커야 되

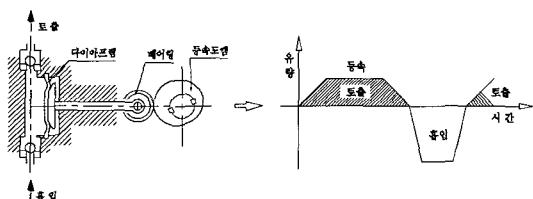


Fig. 4 1연식 등속도 캠의 무맥동 정량펌프

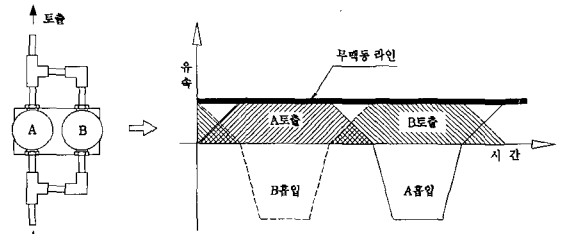


Fig. 5 2연식 등속도 캠의 무맥동 정량펌프

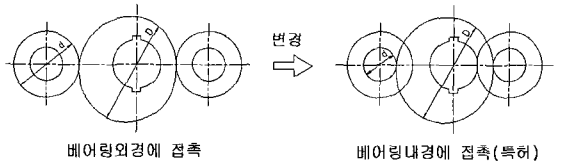


Fig. 6 일본기술의 특허내용

고, 플런저를 미는 베어링은 작아야 하는 지극히 당연한 논리적 접근으로 Fig. 6과 같이 등속도 캠을 CAM FOLLOW BEARING 내경에 접촉하도록 개발하였다.

등속도 캠의 직경을 D, 베어링의 직경을 d라 하면 이론적으로 $\frac{D}{d} = \infty$ 이면 왜곡현상은 나타나지 않는다. 즉, $D \gg d$ 일수록 왜곡현상의 영향은 작아진다. TACMINA 社는 이것을 이용하여 특허를 받았으며 d를 작게 하기 위하여 Fig. 6과 같이 베어링 내경에 접촉하는 방법으로 설계하여 왜곡현상의 영향을 줄였다.

그러나 축, 베어링 등의 강도를 고려할 때 최소한의 직경이 필요하고, d가 존재하는 한 왜곡현상은 반드시 발생하며 현실적으로 왜곡현상을 줄이는 데는 한계가 따른다.

3. 보정등속도 캠 (constant velocity cam)을 이용한 무맥동 정량펌프

선진기술에서 한 단계 발전된 무맥동화 기술에 대하여 소개하고자 한다. 핵심기술은 왕복동 정량펌프에서 발생하는 정현파 유속을 등속운동이 가능하도록 정현파 유속을 보정기술을 통하여 근원적으로 제거한 기술로서, 등속도 캠의 형상을 1차 가공 후 순간유속 변화에 따라 발생할 수 있는 맥동율을 최소화하기 위해 원주방향에 대한 분할 각을 세분화시켜 2차 보정 가공함으로써 외산보다 개선된 무맥동 라인을 실현할 수가 있었다.

3.1. 등속도 캠 개발의 이론적 접근 (무맥동 그래프의 왜곡현상)

Figure 7과 같이 타원형인 등속도 캠과 원형인 베어링이 만날 때, 등속도 캠의 회전각에 따라 만나는 접촉점이 이동하게 된다. 즉, 원과 원이 만나는 지점은 두 원의 중심선 상이 되나, 타원인 등속도 캠과 원인 베어링이 만나는 위치는 중심선 상이 아니며, 캠의 회전각에 따라 접촉위치 또한 계속 변화하게 된다. 이러한 현상은 다이어그램의 왕복 운동속도에 영향을 주어 실제 만들어 지는 무맥동 그래프를 왜곡 시키게 되며, 이 왜곡된 그래프는 결과적으로 증가된 맥동율을 가지게 된다. 따라서 접촉점 변화에 대한 위치를 보정해야만 이론적 무맥동 그래프를 얻을 수가 있다.

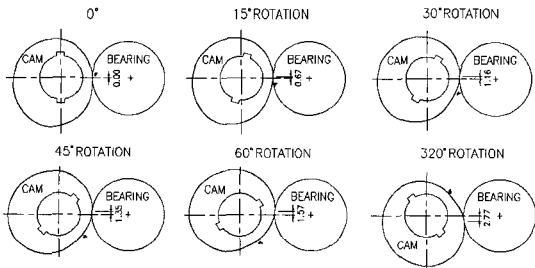
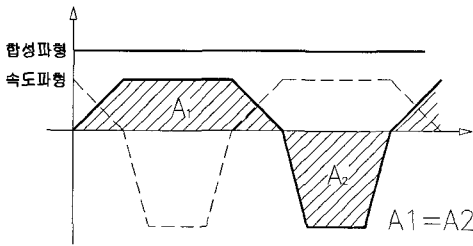
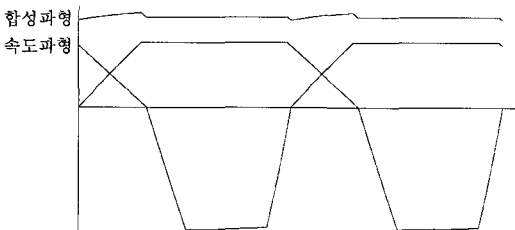


Fig. 7 등속도 캠의 회전과 접촉점의 이동현상



(a) 이론 등속도 선도



(b) 캠보정 전 왜곡된 등속도 선도

Fig. 8 접촉점 이동에 의한 등속도 선도의 변형

보정순서는

- (1) LISP 프로그램을 활용하여 접촉위치 좌표값 파악
- (2) 보정하기 전 등속도 그래프를 그려, 오차량 만큼 등속도 그래프보정
- (3) LISP 프로그램으로 보정되어진 등속도 그래프를 출력하여 검증
- (4) 보정되어진 등속도 캠의 가공좌표 값을 출력

3.1.1. LISP을 이용한 접촉위치 (좌표)의 파악

등속도 캠과 베어링은 A점에서 접촉한다.

$X_{MAX} = X_C + X_B$, C 점은 $X = X_C' + X_B'$ 로 표현 이때 $X_{MAX} > X$ 이 되며 P를 기준하여 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 사이 X의 최대값이 등속도 캠과 베어링의 접촉위치가 된다.

등속도 캠, 베어링 모두 수식으로 표현이 가능하므로 Y축 값을 순차적으로 대입하여 X값을 찾게 된다. (LISP 프로그램을 이용)

그리고 회전각도별 X_{MAX} 값의 변화는 바로 유속의 변화를 의미하므로 실제의 등속도 그래프를 그릴 수 있다. (캠을 회전시켜 각도별 접촉위치를 연속적으로 찾아낸다.)

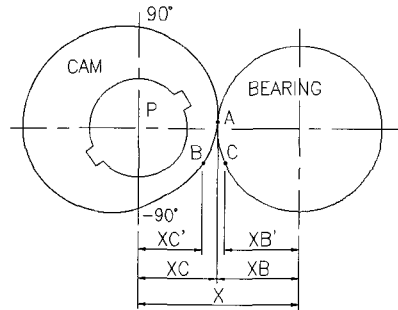


Fig. 9 LISP 프로그램을 활용하여 접촉위치 파악

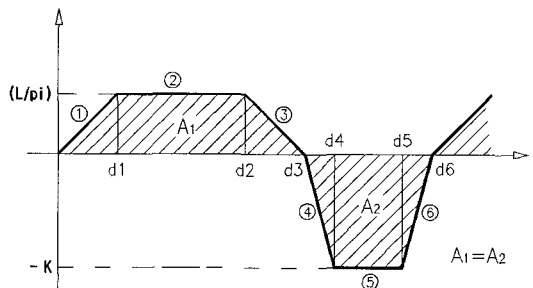


Fig. 10 등속도 선도의 보정

3.1.2. 등속도 선도의 보정

Figure 10에서와 같이 $d1$, $d2$, $d4$, $d5$ 등의 값을 Fig. 11과 같이 변화시켜 최적의 값으로 보정을 실시한다.

이 방법은 현실적으로 이론 무택동 그래프에 거의 동일하게 파형을 만들 수가 있으며, 등속도 캠과 베어링의 크기에 영향을 받지 않으므로 구조설계가 자유로운 장점이 있다.

3.1.3. 보정된 등속도 선도의 출력검증

보정된 등속도 선도의 전후 합성파형의 비교하여 등속 상태를 검증한다.

4. 등속도 캠의 개발 과정소개

(1) 토출유체의 등속도 선도 작성 → (2) 구간별 적분 후 실용식으로 변형 → (3) 실용식의 LISP 프로그램화 → (4) LISP에 의한 보정된 등속도 선도 작도 → (5) 등속도 선도의 보정 → (6) LISP 산출 DATA를 가공기계 (MCT)에 입력 → (7) 원하는 형상의 등속도 캠 가공

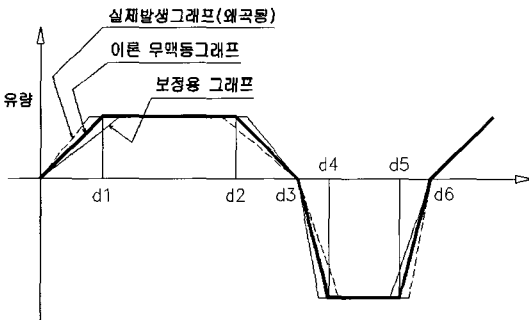


Fig. 11 보정 등속도 선도

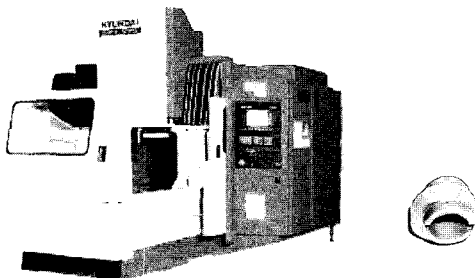


Fig. 12 캠 가공기와 가공 캠

5. 다이아프램식과 플런저식의 구조와 차이

동일한 직동식 펌프이므로 등속도 캠에 의한 구동원리는 형식에 관계없이 동일하다.

단, Fig. 14와 같이 액을 흡입하고 토출하는 부분 (접

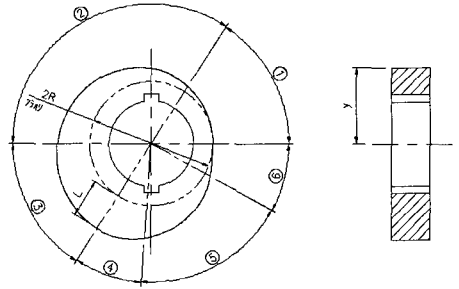


Fig. 13 가공 캠 도면

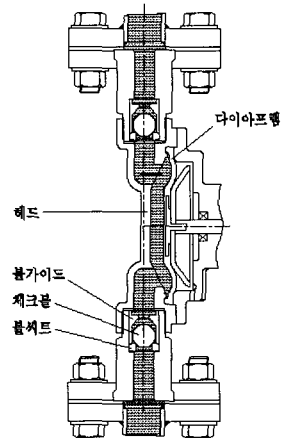


Fig. 14 다이아프램식

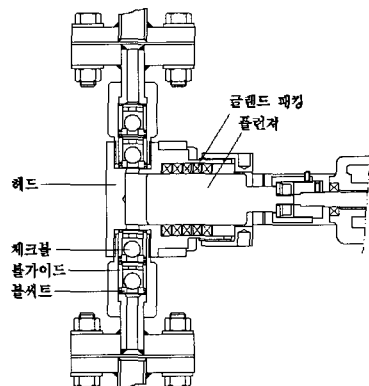


Fig. 15 플런저식

액부)의 재질 (특성) 및 구조가 형식에 따라 다르므로 맥동율의 차이가 발생하게 된다.

5.1. 다이어프램식

Figure 14와 같이 플런저 끝에 설치된 격막(DIAPHRAGM)이 왕복운동을 함에 따라 펌프헤드의 내부용적을 변화시켜 여압 및 부압에 의해 PUMPING 되는 원리로서 약액을 흡입, 토출하는 다이어프램이 테프론 막을 씌운 고무재질이므로 왕복 운동시 특히 토출행정에서 압력을 받게 되면 신축성에 의한 변형으로 맥동율에 영향을 미치게 된다

다이어프램 형식이 플런저형식에 비해 맥동이 더 발생하는 이유는 접액부(헤드, 또는 실린더) 구조 및 재질에 따른 영향이다. 액을 흡입하고 토출을 유도하는 부위가 플런저형식은 금속이므로 외압의 영향을 받지 않으나 다이어프램식은 고무재질로서 토출측에 압력이 가해지면 Fig. 16과 같이 고무재질의 신축성에 의해 다이어프램에 변형이 발생하게 된다. 따라서 토출행정 상태에서 압력을 받게 되면 다이어프램이 후방으로 밀리게 되며 이때 밀린 만큼 토출량이 지연되는 현상이 발생하게 된다. 이것이 유량감소의 원인이며, 맥동율의 변화로 나타나게 된다.

용도로는 액이 접촉되는 부위가 테프론 막으로 형성되어 있으므로 황산 또는 염산 등 부식성이 있는 액체를 이송할 때 적합하며, 주로 저압용으로 사용된다.

5.2. 플런저식

Figure 15와 같이 플런저로 액을 직접 흡입, 토출하

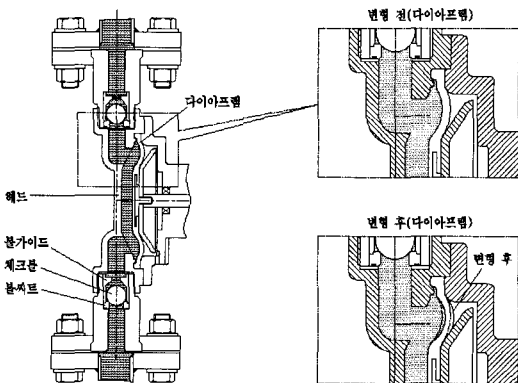


Fig. 16 다이어프램의 변형

는 구조로서 플런저가 금속 재질이므로 다이어프램식과 비교시 변형율에 의한 영향을 전혀 받지 않는다.

용도는 액이 접촉되는 부위가 금속 재질이므로 부식성이 없는 액체에 사용하며, 주로 고압용으로 사용된다.

6. 결 론

현재까지의 개발과정으로 등속도 캠을 보정한 결과 아래와 같이 외산제품에 비해 2배정도의 향상된 맥동율을 확보할 수 있었다.

6.1. 맥동율 비교

설계설계(다이어프램식) 유량변동률(%)	설계설계(PLUNGER) 유량변동률(%)	TACMINA 유량변동률(%)
2kg/cm ² 맥동률(%)	맥동률(%)	1. DIAPHRAGM TYPE ● 1.05
6.0	1.10	2. PLUNGER TYPE ● 0.50
10.0	1.15	

※ 실험 방법: 유량변동률 측정기(계량기)를 사용하여 측정하여 비교한 결과로
 ※ 실험 조건: 유량변동률 측정기(계량기)를 사용하여 측정하여 비교한 결과로
 ※ 실험 조건: 유량변동률 측정기(계량기)를 사용하여 측정하여 비교한 결과로

6.2. 유량 변동율

유량변동율의 평가기준은 각 압력별로 반복 측정된 값을 아래 식으로 산출하였을 때 그 결과 값을 5%범위 이내로 평가한다. 단, 유량의 기준은 각 압력별로 측정된 평균유량을 기준으로 한다.

$$\text{유량변동율 (\%)} = \frac{(\text{측정최대유량} - \text{측정최소유량})}{\text{평균유량}}$$

Table 1 유량변동율

(a) 1분간 측정시

측정회수 \ 설정압력	0 kgf/cm ²	2 kgf/cm ²	6 kgf/cm ²	10 kgf/cm ²
N1 (ml)	670.1	667.2	656.4	649.3
N2 (ml)	671.4	665.6	659.8	646.1
N3 (ml)	669.9	668.0	658.5	649.4
평균유량 (ml)	670.5	666.9	658.2	648.3
유량변동율 (%)	0.22	0.36	0.52	0.51

(b) 2분간측정

설정압력 측정회수	0 kgf/cm ²	2 kgf/cm ²	6 kgf/cm ²	10 kgf/cm ²
N1 (ml)	1342.8	1337.0	1323.9	1309.2
N2 (ml)	1341.2	1338.1	1320.7	1310.4
N3 (ml)	1343.4	1339.6	1324.0	1305.7
평균유량 (ml)	1342.5	1338.2	1322.9	1308.4
유량변동율 (%)	0.16	0.19	0.25	0.36

(c) 3분간측정

설정압력 측정회수	0 kgf/cm ²	2 kgf/cm ²	6 kgf/cm ²	10 kgf/cm ²
N1 (ml)	2013.1	2015.0	1995.2	1970.1
N2 (ml)	2015.2	2012.1	1997.0	1962.8
N3 (ml)	2015.3	2008.9	1993.5	1965.8
평균유량 (ml)	2014.5	2012.0	1995.2	1966.2
유량변동율 (%)	0.11	0.30	0.17	0.37

다이아프램식 정량펌프의 유량변동율을 시간에 따라 실험한 결과 (MODEL: PKD-521 정격최대압력 10 kgf/cm²,)는 Table 1과 같다.