

유압 펌프 및 모터의 고출력 밀도화 설계기술 분석



함 영 복(KIMM 산업기술연구부)

- '83 - '87 금오공과대학교 기계공학과(학사)
- '88 - '90 금오공과대학교 기계공학과(석사)
- '90 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

액체에 에너지를 공급하여 그 위치나 압력·속도를 높이는 펌프는 특수한 것을 제외하고는 작동원리상 터보식과 용적식으로 대별된다. 터보식 펌프는 임펠러를 케이싱 안에서 회전시켜 통과하는 유체의 각운동량을 증가시키는 형식으로 동수력적 에너지를 부여하는 기계이며, 원심펌프 및 사류펌프 등의 물 펌프로써 널리 이용되고 있다. 한편 용적식 펌프는 고체벽(피스톤, 베인 등)의 이동에 따른 용적의 변화를 이용하여 공간 안에 폐쇄된 액체를 압력에 저항하여 밀어내는 작용을 통해 액체에 정수력적 에너지를 공급하는 것이다.

따라서, 펌프 토출량을 Q , 압력증가를 Δp 로 하면 이론 유동력 P 는 $P=Q \times \Delta p$ 이지만 작동원리상 전자는 저압, 대 유량에 후자는 고압, 소 유량의 용도에 적합하다. 용적식 펌프는 토출량이 주기적으로 맥동하는 결점이 있지만 소형인데다 효율이 높고 또 부하(압력)가 변화해도 동일 유량을 토출하기 때문에 액츄에이터의 제어에 이용하기 쉽다는 등의 많은 잇점을 지니고 있다. 그 때문에 유압에는 전적으로 용적식 펌프가 사용된다. 용적식 펌프는 로터의 회전운동에 따른 용적변화를 이용하는 회전식과 피스톤 또는 플런저의 왕복운동에 의한 용적변화를 이용하는 왕복식이 있다.

표 1에 각종 유압모터 성능의 개요를 제시한다. 표 중의 수치는 국외에서 생산 또는 판매중인 유압모터에 대한 평균성능(카타로그 값)이며

표 1. 유압모터의 성능 비교

형식	명 칭	분 류	배제용적 [cc/rev]	최고압력 [MPa]	최고회전속도 [rpm]	최고효율 (%)	기동토크비 (%)	
회 전 식	기어모터	외접형	4~500	9(대형)~21	1800(대형)~3500(소형)	75~85	75~85	
		내접형	7~1000	35~41	150(저속 고 토크)~ 5000(소형)	60~80	65~85	
	평형형 배인모터	보통배인형	10~220	3.5~7	1200(대형)~2200(소형)	65~80	75~90	
		특수배인형	25~300	14~17.5	1800(대형)~3000(소형)	75~85	75~90	
	나사모터	삼 축 형	3~1300	1~17.5	1000(대형)~10000(소형)	75~83	60~65	
왕 복 식	액설피스톤 모터	사 축 식	5~920	21~40	1000(대형)~4000(소형)	88~95	85~95	
		사 판 식	4~500	21~40	2000(대형)~4000(소형)	85~92	85~95	
	레이디얼 피스톤 모터	편심식	회전 실린더형	6~500	14~25	1000(대형)~1800(소형)	85~92	80~90
			고정 실린더형	125~7000	14~25	70(대형)~400(소형)	85~92	80~90
		다 행 정 식	25~38100	17.5~25	18(대형)~750(소형)	85~92	95~100	

특수한 용도에 대해서는 이 표 범위 밖의 것도 있다. 또 표의 기동 토크 비란 운전 토크에 대한 기동토크의 비율이다. 저속 고 토크용으로 특별히 설계된 것을 제외하고, 고속유압모터는 같은 형식의 유압펌프와 대개 동일 구조이므로 최고 압력·최고회전속도 및 최고효율은 유압펌프에 대한 값에 가깝다. 각 형식간의 비교에서 보면 최고압력에 대해서는 유압펌프와 마찬가지로 피스톤 모터가 기어모터, 배인모터(vane motor)에 비해 높은 압력을 발생할 수 있고 또한 피스톤 모터 중에도 레이디얼(radial)형에 비해 액선타(axial)형 쪽이 고압에 적합함을 알 수 있다. 유압모터의 최고 회전속도를 결정하는 C_M 값 ($=n_{max} V_{th}^{1/3}$ [cm/min])은 액선타형 피스톤 모터가 가장 커서 큰 동력 밀도(power density)를 얻는 것이 적합하다.

또한 출력토크를 결정하는 배제용적의 경우, 레이디얼 피스톤 모터가 가장 큰 배제용적을 얻을 수 있고, 편심형 보다는 저속 고 토크용으로 특별히 설계된 다행정형의 배제용적이 상당히 커서, 윈치 등에서와 같이 저속 고 토크가 필요한 용도에는 감속기를 사용하지 않고 다행정형

유압모터를 직접 구동시키는 경우가 있다. 또 액선타형은 대용량으로 하기가 어려우므로 그 자체로는 저속 고 토크를 얻지 못하지만 감속기의 사용으로 저속 고 토크용으로 이용할 수 있다. 그러나 고속으로 운전되는 경우, 감속기 기어의 맞물림 소리가 발생하고, 동일출력 토크를 낼 경우 중량이 레이디얼형에 비해 크게된다.

2. 고출력 밀도화 설계동향

출력밀도의 관점에서 피스톤 펌프의 성능을 조사하면, 출력밀도[kW/Kg]는 다음 식으로 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{출력밀도} &= \frac{1}{612} \cdot \frac{PQ\eta}{W} \\ &= \frac{1}{612} \cdot \frac{PV_{th}N\eta}{W} \end{aligned}$$

여기서 W : 제품중량[kgw]

P : 토출압력[kgf/cm²]

Q : 유량[l/min]

N : 회전수[rpm]

V_{th} : 배제용적[cm³/rev]

η : 全 효율, 다만 η 는 1로 가정하여 평가하는 경우도 있다.

우선 고출력밀도를 얻기 위한 조건으로서의 압력, 속도, 효율 및 용적당의 중량에서 현재의 경향을 살펴보자.

2.1 압력

최근의 사축식, 사판식 피스톤 펌프의 최고압력을 그림 1, 그림 2에 제시한다.

최고 레벨에서의 400bar를 초과하는 경향이 있는데 이것은 주로 실린더 블록, 밸브 플레이트, 피스톤 shoe등의 재료기술, 트라이볼로지 기술이 발달함으로써 가능해 졌다. 그러나 경제성의 측면에서는 단순히 고압화에 그치지 않고 사용압력에 맞는 설계를 하는 것은 너무도 당연하며, 압력 수준이 210bar이하를 light-duty, 250bar이하를 medium-duty, 350bar이하를 medium-high

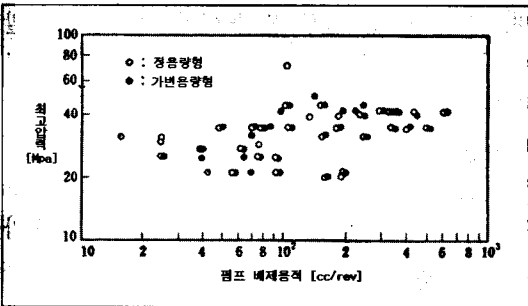


그림 1. 사축식 액셀 피스톤 펌프의 최고압력

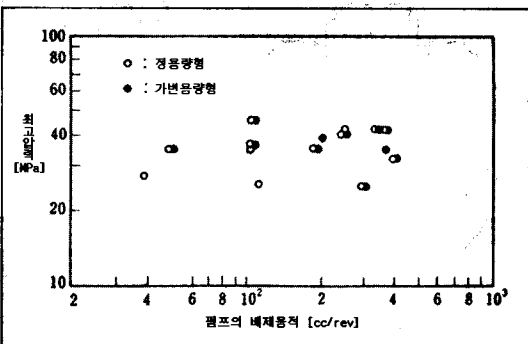


그림 2. 사판식 액셀 피스톤 펌프의 최고압력

duty, 450bar이하를 heavy duty로 분류해서 각 레벨에 합당하게 구성된 펌프를 제조하고 있다. 항공기용으로 고출력밀도를 얻기 위해 500bar의 초고압펌프·모터의 개발이 추진되고 있다.

2.2 속도

펌프 또는 모터의 최고회전수를 비교할 때는 다음 식을 사용한다.

$$C_p = n_{max} V_{th}^{1/3}$$

여기서 n_{max} : 최고 회전수[rpm]

V_{th} : 배제 용적[cm³/rev]

C_p 값은 일반적으로는 5000미만을 저속, 5000~10000을 중속, 10000이상을 고속으로 한다. 사축식의 대부분은 10000~15000, 사판식은 10000~13000정도이다. 또 항공기용 사판식에서는 25000까지 도달하였다.

2.3 효율

통상 펌프효율은 (또는 전효율) η 가 높은 것이

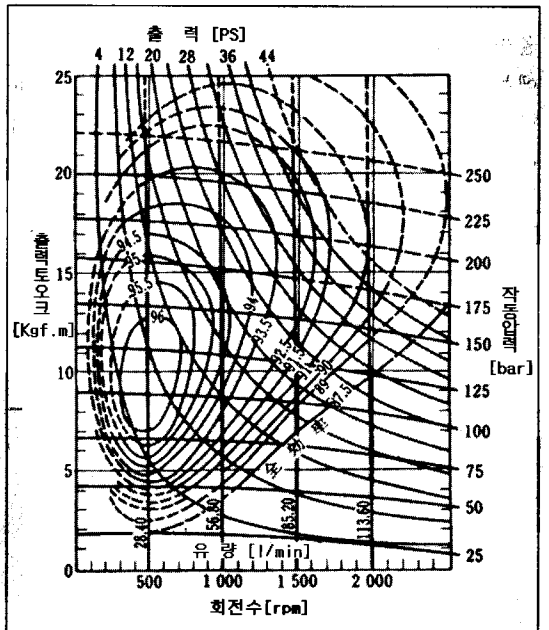


그림 3. 액셀 피스톤 펌프의 효율곡선

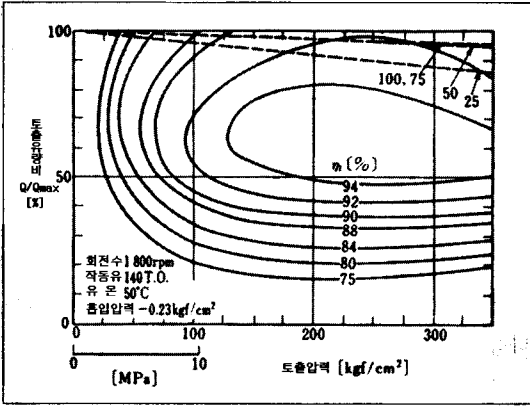


그림 4. 사축식 액셀 피스톤 펌프의 효율곡선(사축각 45°, 42cSt 석유계 작동유)

바람직하지만, 용도에 따라서는 용적효율 η_v 또는 토크효율 η_t 가 중시될 때가 있다. 효율의 표시방법으로는 등효율 선도가 그 특성을 잘 파악할 수 있으므로 편리하다. 가변펌프는 압력-경사각(회전수를 파라미터), 가변모터에서는 회전수-출력 토크(경향 파라미터)표시가 많다. 그림 3, 그림 4에 대표적인 선도를 나타낸다.

잘 조정된 펌프 모터에서는 최고효율점이 93~94%가 된다. 전동기로 구동되는 펌프는 효율이 80%이상의 영역이 넓은 것이 좋다. 최근에는 $P > 1/5 P_{max}$ (압력), $Q > 1/4 \sim 1/5 Q_{max}$ (유량) 영역에서 $\eta \geq 80\%$ 에 도달하는 것이 등장하였다.

2.4 경량화

컴퓨터의 이용 등 요소기술의 발달로 한계설계의 개념을 도입하여 같은 형식 펌프라도 제품 중량은 감소되었고, 구조면에서 아래의 두 점이 경량화에 기여하고 있다. 사축식에서는 전술과 같은 섹터형(편경전전용)의 출현으로 1/2~1/3로 중량이 대폭 줄었다. 또 사판식에서는 종래 많이 사용되어온 그림 5의 a)와 같은 트러니온(trunnion)축에 의한 사판 지지방식에서 그림 5의 b)와 같은 크레이들(cradle) 방식을 이용하게 되었다. 이렇게 소형화 된데다 강성이 높은 지지기구를 채택함으로써 30%정도의 경량화를 실현할 수 있다.

3. 기술적 전망

유압에 의한 동력전달방식은 다른 전달방식에 비해 중량당 동력전달능력이 높은 점이 특징이며, 그 능력(출력밀도)을 높이기 위해 기술개발이 추진되어 왔다. 출력밀도의 변천은 그림 6과 같지만 최근에는 7.5kW/kg를 넘는 것도 있다. 더욱이 기술적 측면에서는 그림 7과 같이 전망할 수 있고, 앞으로의 방향은 사축식에서는 고경각화에 따른 용량증가, 사판식에서는 고속화가 고출력밀도화의 포인트가 될 것이다.

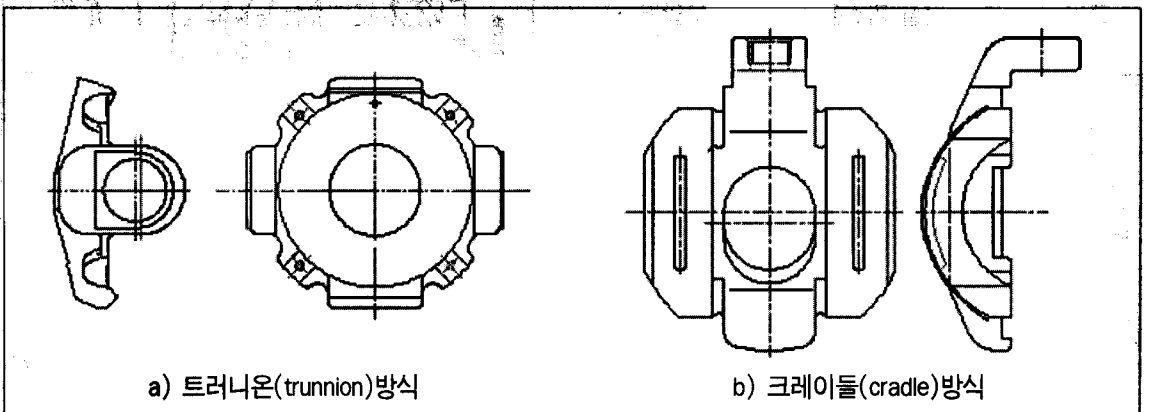


그림 5. 사판 지지방식에 의한 경량화

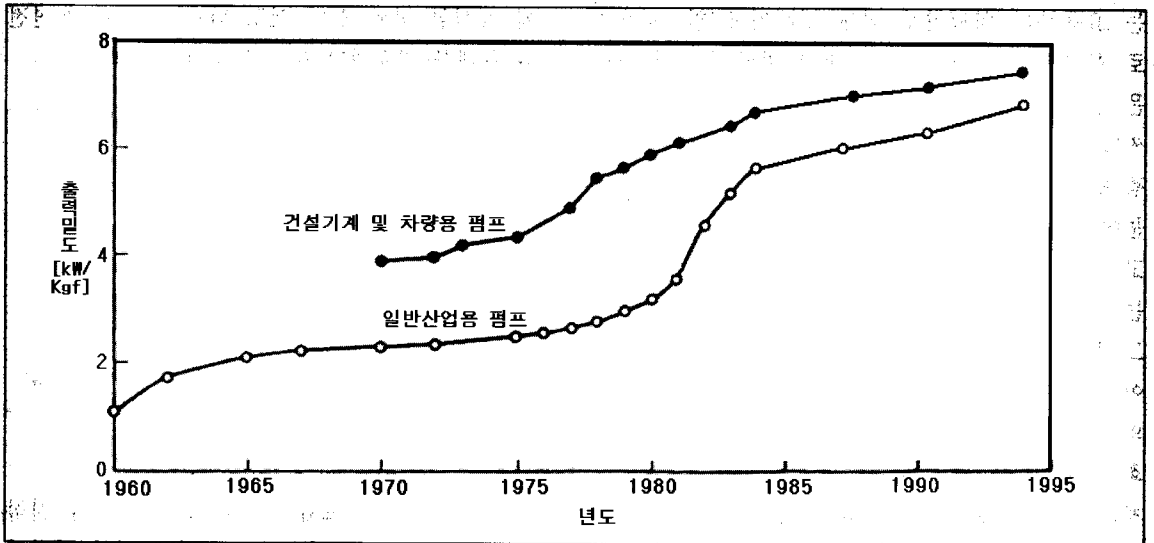


그림 6. 유압펌프의 출력밀도의 변천

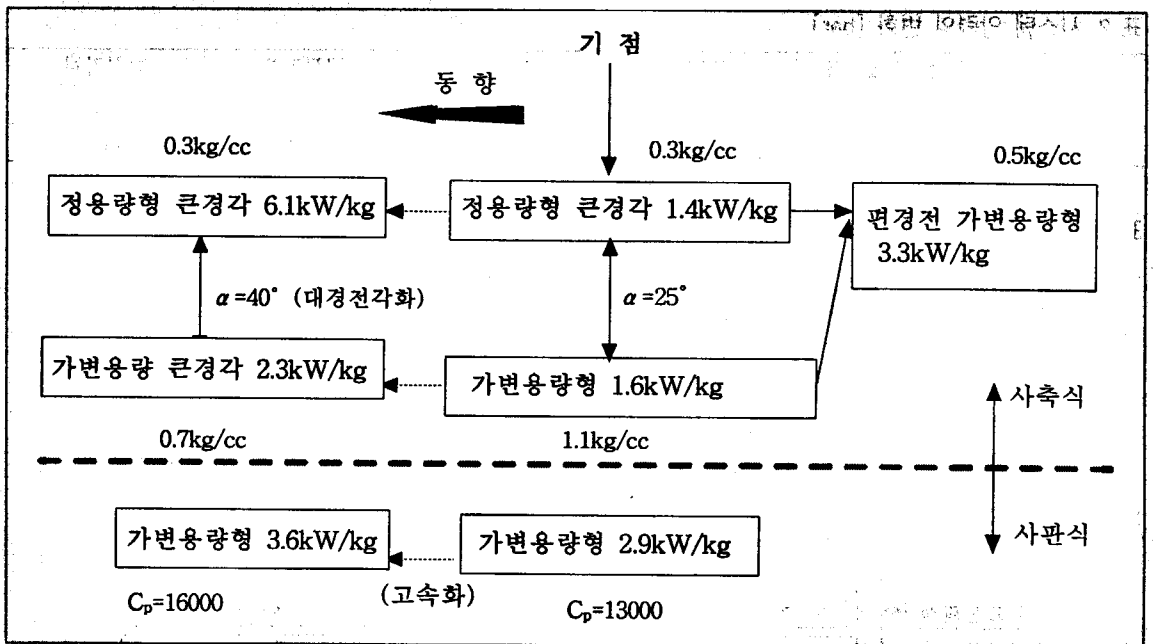


그림 7. 액셀 피스톤 펌프 기술동향

4. 고출력 밀도화를 위한 대책

유압 동력은 압력×유량(회전속도)에 비례하기 때문에 고출력 밀도화 하기 위해서는 압력, 유량 어느 한쪽 또는 양쪽을 크게 할 필요가 있다.

펌프 또는 모터에 있어서 회전속도(유량)의 사용한계는 캐비테이션(cavitation)한계에 의해 정해지고, 고출력 밀도화의 요소로 되는 압력의 사용 한계는 재료의 피로파괴 한계에 의해 정해진다. 이것의 곱이 출력 밀도가 되지만 사용한계

는 요동부의 열평형에 의해 정해지고 일반적으로 회전속도·압력 각각의 한계 치의 곱보다 작은 값으로 된다. 이 요동부의 열평형에 관해서는 씌일(seal)과 윤활이라는 상반되는 문제로 되어 펌프·모터의 경우 누설방지(용적효율 확보)때문에 완전 유체 윤활 상태로는 설계되어지지 않고, 일부는 고체간 접촉(metal contact)를 수반하는 혼합 윤활 상태로 되고 혼합 윤활 상태 및 그 부근의 현상을 이해하는 것이 연구과제이고, 이론적으로 미완성 영역으로 되어있다. 산업기계의 경우, 보통 전동기로 구동되므로 고속화(고속 회전)는 전동기의 회전수에 의존하므로 크게 문제되지 않고 고압화에 초점이 맞춰진다. 피스톤 펌프를 사용하는 기계의 시스템 압력은 그림 8

에 표시한 바와 같이 서로 다르다. 또한 20년전과 현재를 비교하면 표 2와 같다.

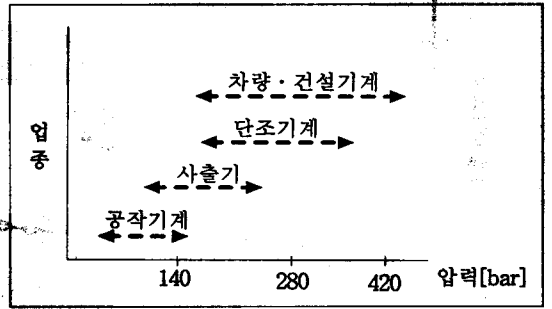


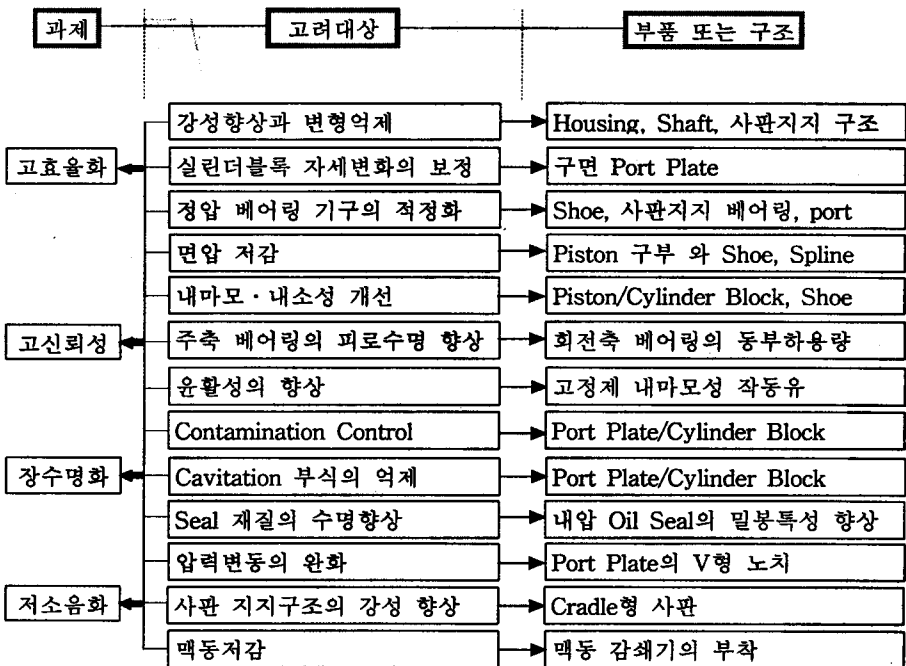
그림 8. 유압시스템의 압력

시스템 압력의 고압화는 펌프와 모터를 시작으로 배관 및 보조기계의 소형화에 의한 기계의

표 2. 시스템 압력의 변화 [bar]

구분	차량·건설기계	단조기계	사출성형기	공작기계	제철기계
20년전	140	140~210	70	35	140
현재	210~420	10~350	140~210	50~140	210

표 3. 피스톤 펌프의 고압화 과제와 대책



소형화(downsizing)을 이루고 있으며 유압 기기는 중량 및 가격(cost)의 저감이 요구된다. 그림 8에 표시한 것과 같이 건설기계분야는 산업기계보다 한발 앞서 고압화 되어있지만 산업기계분야는 실내에서 사용되는 것이 많고 가동시간이 주야 구별 없이 사용되는 경우도 있으므로 소음 레벨의 상한치가 건설기계 분야 쪽의 펌프보다 엄격하고 펌프의 수명시간도 보다 긴 것이 요구되어지기 때문에 고압화를 추진하는 것은 곤란하다 할 수 있다. 전술한 것과 같이 고압화에 따른 소음의 증가, 효율, 신뢰성, 수명의 저하등 많은 기술적 과제가 발생하므로, 피스톤 펌프에는 ① 고압화에 의한 변형과 파괴 : 요소 부품의 구조 및 기구의 변경을 위한 각부의 치수 및 재질을 적정화함으로써 강성을 높여 성능향상을 도모한다. ② 기계적 손실 : 요동부를 구성하는 재료의 개량 혹은 표면 조도개선에 의한 장수명화를 꾀하고, ③ 누설 증가 : 틈새(clearance), 면의 조도 등 효율에 영향을 미치는 인자를 관리하는 등 품질면의 개선에 의한 고압화가 가능하다.

또한 소음 저감에 대해서도 펌프 압력 port내의 압력상승 완화를 시도하고, 맥동저감, 진동전달의 방지등 시스템 전체적으로 충분한 대책을 세워, 피스톤 펌프의 고압사용영역을 확대하는 것이 가능하다. 표 3에 이들의 과제에 대한 개선방법을 표시하고, 그림 9에 고압화의 과제를 실현한 액셜 피스톤 펌프 및 모터의 피스톤 형상에 있다.

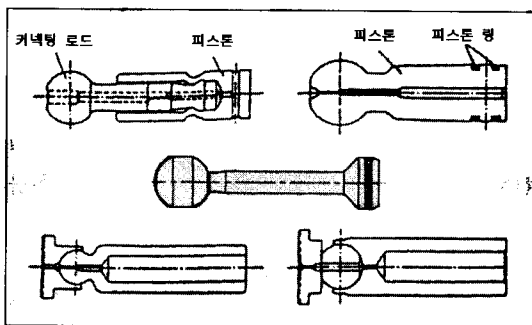


그림 9 고압화된 피스톤 형상의 예

5. 결 언

고 출력 밀도화를 달성 하기위해 여러 가지 기술의 발전 과정을 살펴보았지만 결국 고출력 밀도화를 고압화하여 달성할 것인가, 고속화하여 달성 할 것인가의 문제부터 결정해야 한다. 용도 면에서 산업기계와 같이 건물 내부에서 주야로 계속 회전하는 경우 일반 유도전동기에 의해 고정된 회전속도로 사용되므로 고속화보다는 고압화 및 저소음화를 추진해야 하며, 건설기계에서와 같이 야외에서 간헐적으로 사용되고 엔진과 연결되는 펌프라든지 고속회전이 요구되는 유압 모터는 고속화를 이루어 출력밀도를 증가시킬 수 있다. 한편 사축식 유압펌프 및 모터의 경우는 사축각을 점점증대시켜 고경각화 함으로써 주어진 공간(volume)내에서 큰 배제용적이 가능해지도록 설계하고, 사판식은 구조상 사축식에 비해 고속회전이 가능한 구조이므로 더욱 고속화 설계해나가는 것이 필요하다. 이러한 노력과 아울러 구성재료를 경량화된 고강도 소재로 개발하여 적용해 나가는 것 또한 중요한 문제이다.

참 고 문 헌

- [1] 橋本 登志雄, 産業用 ピストンポンプの現狀と課題, 油壓と空氣壓, 25-6, 1993.
- [2] 上原一男, 油壓 システムの高壓化(總論), 油壓と空氣壓, 27-7, 1995.
- [3] Parker Motion & Control, Hydraulic Motor/Pump Series F12, Catalog 9129 8206-02, 1997.
- [4] 石原貞男, ピストンポンプ・モータの理論と實際, オーム 社, 1979.
- [5] 김형의, 함영복, "유압피스톤 펌프/모터의 경량화를 위한 가변용량 기구의 기술동향", 기계와 재료, 제7권 1호, 1995.