

## 비례 압력제어 기술



최 영 호

(KIMM 첨단산업기술연구부)

'00 금오공과대학교 기계공학(학사)  
'02 금오공과대학교 기계공학(석사)  
'02 - 현재 한국과학재단 신진연구자

윤 소 남

(KIMM 첨단산업기술연구부)



'86 제주대학교 기계공학(학사)  
'90 부경대학교 유압제어(석사)  
'94 부경대학교 유압제어(박사)  
'94 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



김 도 우

((주) 신기기연)

'87 동아대학교 기계공학(학사)  
'92 동아대학교 유압공학(석사)  
'93 - 현재 (주)신기기연 대표이사

### 1. 서 론

유압 시스템에서 비례 압력을 제어하는 기술은 차량의 자동 변속기, 연삭기, 자동화 설비, 농업기계, 건설기계, 사출 성형기, 압연설비 등 산업 전반에 응용되며, 종류로는 구조 형태에 따라 Single stage형과 Two stage형, Multi stage형, 포트 방향에 따라 2, 3, 다방향 밸브로 나눌 수 있다. 보통 상부 스테이지에 솔레노이드 밸브를 설치하고 하부 스테이지에는 유압 시스템의 압력을 작동유체의 유입유량에 무관하게 일정한 값으로 유지하는 릴리프 밸브나 감압 밸브를 설치하여 사용한다. 이러한 밸브들은 무단 제어기능을 가짐으로써 구조가 간단하고 신뢰도가 높으며 가격이 저렴하고 작동유체의 오염에 덜 민감하다는 장점을 가지고 있다. 제어 방식이 전기·전자화 경향으로 그 수요가 점차 증가하고 있는 전자비례 압력제어 밸브는 전자기술과 기계기술이 복합된 고난도 기술이 요구되나, 설계 제조 기술의 미확보로 밸브 자체의 독자 개발은 물론 이를 응용한 시스템 설계 기술 및 응용기술 개발에 한계가 있으며, 이로 인하여 전량 수입에 의존하고 있으므로 국산화 개발이 시급한 실정이다.

본고에서는 관심대상인 비례 압력제어 밸브, 특히 비례 감압 밸브와 비례 릴리프 밸브에 대해서 전반적인 사항과 국내외 개발동향을 기술하고, 성능향상, 에너지 절약 및 고압화를 위한 대처 방법 등은 어떠한 것들이 있는지 조사하여 국내 비례 유압 기술향상을 도모하고자 한다.

## 2. 압력제어 밸브(Pressure Control Valve)

압력제어 밸브는 유압회로내의 압력을 설정치 이내로 유지하며, 회로내의 압력이 설정치에 도달하면 소정의 유량(압력)을 탱크로 돌려보내는 역할을 하는 것으로, 사용목적에 따라서 릴리프 밸브(Relief valve), 시퀀스 밸브(Sequence valve), 언로딩 밸브(Unloading valve), 감압 밸브(Reducing valve), 카운터 밸런스 밸브(Counter balance valve), 압력 스위치(Pressure switch)로 나누어지고, 구조에 따라서 파일럿 작동형(Pilot operated)과 직동형(Direct operated)으로 나누어지며(표 1 참조), 밸브요소 형식에 따라 포켓 밸브(Poppet valve)와 스푼 밸브(Spool valve)로 나뉘어진다.

그림 1은 포켓 밸브의 작동원리를 보이는 것으로, 포켓이 스프링력  $F_F$ 로 닫혀 있다가 공급된 압력  $P_E$ 에 의해 스프링력  $F_F$ 보다 큰  $F_{hyd}$ 가 발생하면 초과된 유량은 탱크( $P_A$ )로 보내진다. 그림 2는 스푼 밸브의 원리로서 공급된  $P_E$  압력이 스프링력보다 커지게 되면 스푼 변위  $S$  만큼 이동 후 탱크( $P_A$ )로 보내진다.

### 2.1 릴리프 밸브(Relief valve)

최초의 압력이 설정압력 이상이 되면 회로 유량의 일부 또는 전부를 탱크로 보내어 회로내의 최고압력을 규제하며, 시스템의 과부하를 방지하기 때문에 안전밸브라고도 한다. 그림 3은 직동형 릴리프 밸브로서 공급 압력이 포켓에 작동하여 수동으로 조절된 스프링력을 초과하면 포켓이 열리며 탱크로 기름이 보내진다. 그림 4는 파일럿 작동형 릴리프 밸브로서 주압력이 파일럿 밸브(강구)에 의해 제어되며, 카트리지를 이용하기 때문에 대유량 압력제어가 가능하다.

표 1. 파일럿 작동형과 직동형의 특성 비교

구분	파일럿 작동형	직동형
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 채터링 현상 없음.</li> <li>· 압력 Override가 작음.</li> <li>· 원격제어 가능.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 저압, 저유량 사용.</li> <li>· 회로의 효율 영향이 큼.</li> <li>· 채터링 발생 대책으로 댐핑실이 존재.</li> </ul>
구조	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 메인 스푼과 파일럿 스푼(포켓)이 존재.</li> <li>· 유압으로 밸런스시켜서 압력을 유지.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 메인 스푼(포켓)을 스프링으로 눌러 압력을 조정.</li> </ul>
조작	· 간단하고 쉬운 조정.	· 큰 힘을 이용하여 조작.
압력범위	· 광범위한 조정.	· 작은 압력조절범위
원격조작	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 리모트 컨트롤 밸브로서 원격 압력 조절이 가능.</li> <li>· 방향 전환밸브로서 언로드도 가능.</li> </ul>	· 원격 압력 조절이 불가능.
응답성	· 서지압이 발생.	· 서지압이 적게 발생.
압력 오버라이드 (유량-압력 곡선)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 압력 변화가 적음.</li> <li>· 효율이 좋음.(곡선변화)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 압력 변화가 큼.</li> <li>· 효율이 나쁨. (직선변화)</li> </ul>

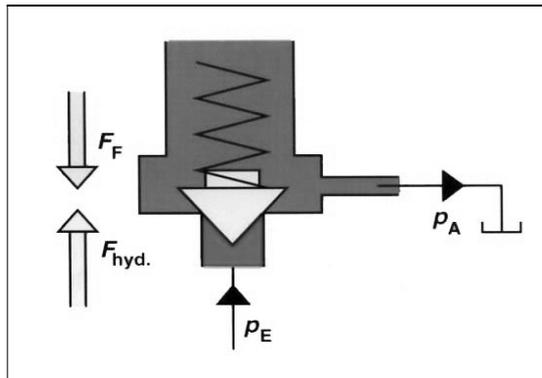


그림 1. 포켓형 압력제어 밸브

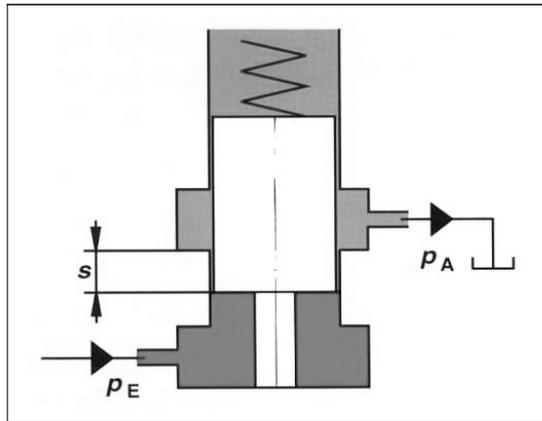


그림 2. 스푼형 압력제어 밸브

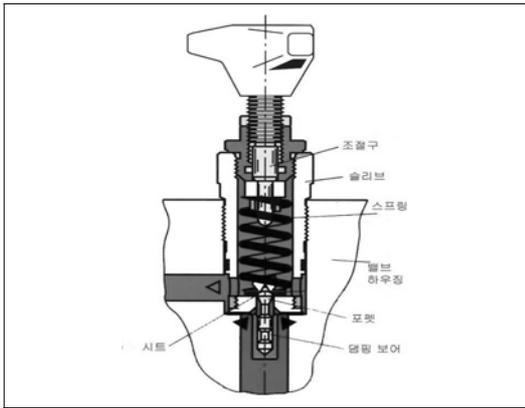


그림 3. 직동식 릴리프 밸브

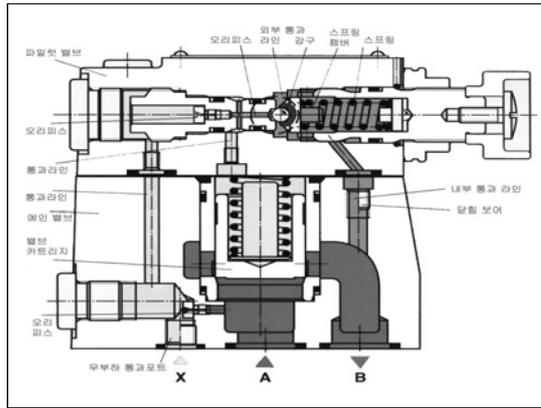


그림 4. 파일럿 작동식 릴리프 밸브

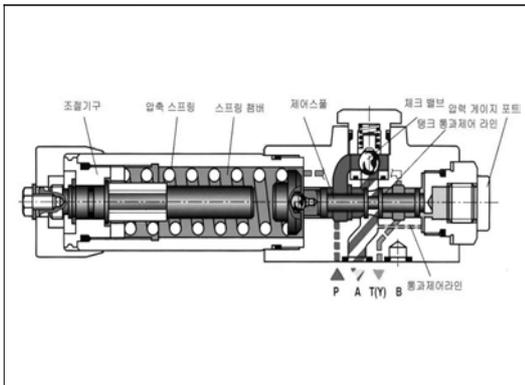


그림 5. 직동식 감압 밸브

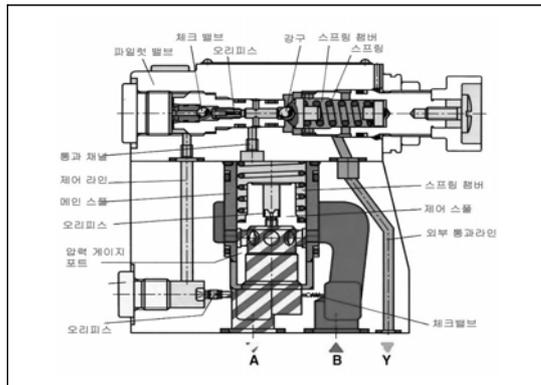


그림 6. 파일럿 작동형 감압 밸브

## 2.2 감압 밸브(Reducing valve)

감압 밸브는 회로의 일부에 감압한 압력을 가하는 기능을 지니는 압력 제어 밸브이며, 제어 방식에 따라서 표 2와 같이 나누어진다. 그림 5와 그림 6은 각각 직동식 및 파일럿 작동식 감압밸브를 보이는 것으로 2차압력 제어를 목적으로 하는 구조로 되어 있다.

표 2. 감압밸브의 제어방식에 의한 분류

종류	유압기호	특징
정비례형		1차 압력을 일정한 비율로 감압하는 것.
정차등형		1차 압력과 2차 압력의 차를 일정하게 유지하는 밸브.
2차압 일정형		작용 유압회로내의 일부 압력을 감압하는 밸브.

## 3. 솔레노이드 밸브(Solenoid Valve)

### 3.1 솔레노이드 밸브 일반

솔레노이드 밸브는 전자석(솔레노이드)의 흡인력을 이용하여 기름의 흐름 방향을 조절하는 밸브이다. 전기신호의 On/Off에 의해 제어할 수 있으므로 원격조작이 쉽고, 시동과 정지지령으로 플런저의 위치 결정을 규칙적으로 정확히 제어할 수 있는 특징이 있어 일반 산업기계 및 건설기계에 널리 이용된다. 그림 7과 같이 코일 주위에 철 또는 강철제 철심으로 둘러싼 구조로 이루어져 있어, 코일에 전류를 흘림으로써 생기는 자기장에 의해 만들어지는 자속이 철심을 통하기 때문에 효율이 좋은 강한 전자석이 되어 힘(흡인력)이 발생하고, 이 힘으로 제 2의 동작특성이 얻어진다.

솔레노이드 밸브는 공급되는 전원의 종류에 따라 AC 솔레노이드(On/Off Solenoid), DC 솔레노이드(Proportional Solenoid), 정류기 내장 솔레노이드로 나누어진다(표 3 참조).

### 3.2 비례 솔레노이드(Proportional Solenoid)

그림 8은 비례 솔레노이드의 대표적인 구조를 나타내는 것으로, 플런저를 흡인하는 구성은 기본적으로 On/Off 솔레노이드와 동일하나, 컨트롤 Zone이라 불리는 스트로크 범위에서는 스트로크에 관계없이 흡인력을 일정하게 하고, 흡인력을 전류의 함수로 한 것이 비례 솔레노이드이며, 이를 위해 플런저 가이드 끝면이 테이퍼 처리되어 있다. 또한 플런저에 비자성인 스페이서를 넣어 스트로크를 제한하고 있다. 그림 9는 비례 솔레노이드의 모형도로서, 솔레노이드에는 끝면으로 흡인력과 측면으로의 흡인력 2가지가 작용한다. 측면에서의 흡인력은 플런저 가이드의 테이퍼각  $\theta$ 와 플런저 가이드간의 틈새 C의 함수가 된다.  $\theta$ 가 커질수록 플런저가 플런저 가이드에 가까운 위치에서 측면 흡인력이 커지는 경향이 나타나며 작을수록 측면을 향한 자속의 흐름이 약해지고 추력 특성에 미치는 영향도 작아지게 된다.

### 4. 비례 압력제어 밸브(Proportional Pressure Control Valve)

비례 압력제어 밸브는 단순한 솔레노이드 밸브보다 더 높은 레벨(솔레노이드 밸브와 서보밸브의 중간정도의 레벨)의 제어를 제공하는 것으로, 정확한 위치제어를 달성하기 위해서 압축 스프링에 의해 저항을 받는 스톱(포켓)의 끝에는 비례 솔레노이드가 부착된다(표 5 참조). 이 솔레노이드의 아마추어가 발휘하는 출력은 아마추어를 통하여 흐르는 전류에 종속된다. 따라서 전자비례 압력제어 밸브에 대한 전기제어에는 통상 가변전압보다도 가변전류를 사용한다.

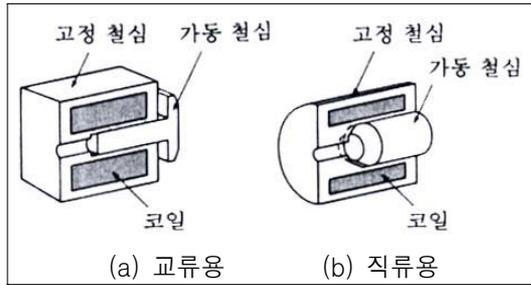


그림 7. 밸브용 솔레노이드

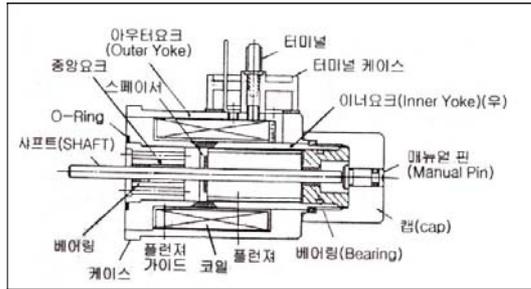


그림 8. 비례 솔레노이드의 구조

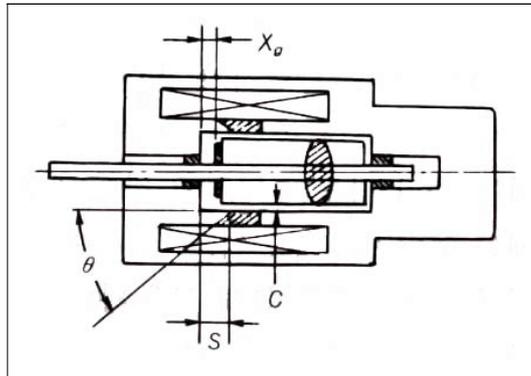


그림 9. 비례 솔레노이드의 모형도

표 3. 교류·직류 솔레노이드의 비교

	교류 솔레노이드	직류 솔레노이드	정류기 내장 솔레노이드
전원	교류(AC)	직류(DC)	교류(AC)
크기	1	교류 솔레노이드의 1~2배의 크기	
동작시간[ms]	빠르다(10~30)	느림 (ON:50~80) (OFF:20~30)	느림 (ON:50~80) (OFF:100~200)
흡착 때의 충격	크다	작다(ON 응답이 느리기 때문에)	
서지 전압	보통	크다	없다
전류	스트로크에 따라 변화	스트로크에 관계없이 일정	
코일 소손	가능성 있음	가능성이 적음	

4.1 직동형 비례 릴리프 밸브

각종 압력제어나 가변피스톤 펌프 등의 압력을 입력신호에 대해 비례적으로 제어하기 위해 사용되며, 그 목적상 정격 유량은 1~2 l/min 정도이며, 일반적으로 비례 솔레노이드와 직동형인 포켓 밸브로 구성된다. 그림 10은 비례 전자식 파일럿 릴리프 밸브 구조를 보이는 것으로, 비례 솔레노이드에 입력 전류가 공급되면 그에 비례한 흡인력이 발생하고 가동철심은 스프링을 압축하는 방향으로 이동하고 스프링을 통하여 포켓을 시트에 밀어붙인다. 한편 압력 포트에 유입한 압유는 시트에서 포켓으로 향하여 유출하며 이 압력과 비례 솔레노이드 흡인력이 평형되어 제어 압력이 정해진다.

4.2 파일럿 작동식 비례 릴리프 밸브

그림 11은 파일럿형 비례 릴리프 밸브를 보이는 것으로, 그림 4의 수동형 밸브 대신에 비례 솔레노이드형 직동밸브가 내장되어 있다.

표 4. 비례 압력제어 밸브의 기호

Symbol		Characteristics
최대 압력 조절 불가능	최대 압력 조절 가능	Control Method
		직동형 압력 릴리프 밸브 (파일럿 헤드에 사용)
		간접작동형 압력 릴리프 밸브 (내부 파일럿, 외부 드레인)
		간접 작동형 압력 릴리프 밸브 (외부 파일럿, 외부 드레인형)

4.3 비례 릴리프 붙이 감압밸브

그림 12는 비례전자식 릴리프 붙이 감압밸브를 보이는 것으로, 릴리프 유량을 크게 하는 구조로 하면 과도응답시의 감쇠성이 훼손되기 때문에 릴리프 유량은 소유량으로 한 것이 많다. 비례전자식 릴리프 붙이 감압 밸브의 특징은 비례전자식 릴리프 밸브에 비해 유량이 변동했을 때의 제어 압력의 변동이 미미하다는 점이다. 또 스텝 응답 특성은 비례전자식 릴리프 밸브에 비하면 응답시간이 늦고 응답과형 감쇠성도 뒤지는 경향이 있다. 스텝 응답특성은 감압밸브의 2차측 가압용적의 대소에 따라 크게 영향을 받으며 가압면적이 작으면 응답시간은 빠르고 감쇠성도 좋다.

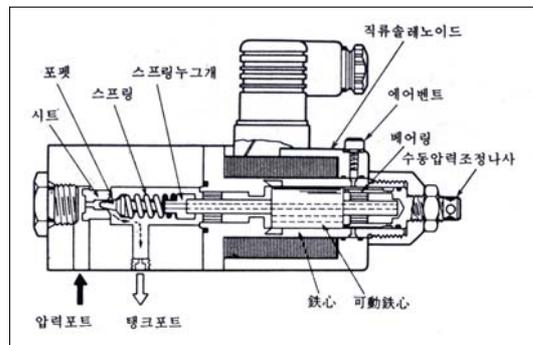


그림 10. 직동형 비례 릴리프 밸브

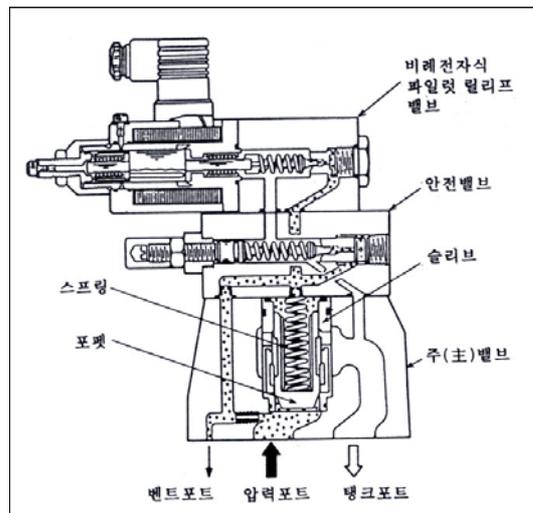


그림 11. 파일럿형 비례 릴리프 밸브

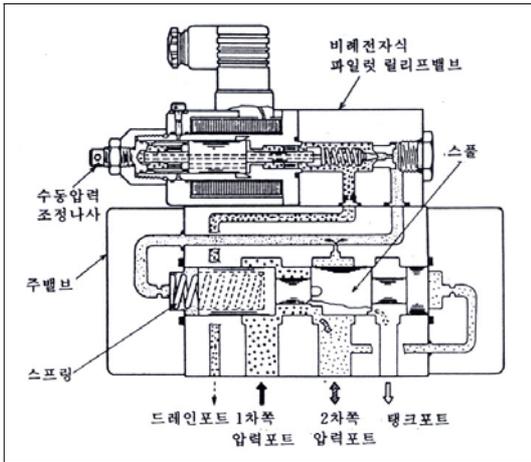


그림 12. 비례전자식 Relief 볼이 감압밸브

## 5. 국내의 연구 동향

최근 국내에서의 비례 제어밸브에 관한 연구는 대학, 연구소, 산업체에서 밸브내의 스프링부와 슬리브의 윤활특성에 대한 해석, 고속·소형 솔레노이드의 플런저 중량, 인가전압, 탄성계수, 스트로크, 코일권수 등에 따른 설계 최적치에 관한 연구가 매우 활발히 수행되고 있으며, 국외에서는 비례 압력제어밸브의 솔레노이드에 변위계를 붙여 서보를 구성하고 응답성과 속응성을 높여서 서보 밸브에 가까운 특성을 주는 연구와, 비례 솔레노이드에 영구 자석을 사용하여 쌍방향 제어성을 주는 연구들이 수행되고 있다. 밸브내의 유동해석은 밸브실 내의 흐름은 좁은 틈새로부터 고속 분류를 수반하기 때문에 레이놀즈수가 높으며 밸브실내 형상이 복잡하고 2차원적인 축대칭 흐름뿐만 아니라 3차원적인 흐름이 일어난다. 그러므로 유동장은 Navier-Stokes equation, 연속방정식, 난류 점성모델식을 지배 방정식으로 하고, 이산화법(離散化法)-차분법(差分法:FDM), 유한요소법(有限要素法:FEM), 경계요소법(境界要素法:BEM) 등을 이용하여 해석하는 연구가 진행되고 있다. 독일의 아헨공대에서는 전자 비례밸브 및 그 제어에 관한 연구를 진행하고 있으며 특히 유한요소법에 의한 추력 계산, 제어법, 동특성 향상법, 새로

운 비례 밸브 등에 관한 연구가 진행되고 있다. 고성능 메카트로닉스화에 대응하는 페루프식 비례 전자 과일릿 릴리프 밸브는 소형화된 파워 증폭기, 압력 센서, 디지털식 압력 표시기 등을 밸브에 복합단체화하여 밸브속에서 페루프의 압력제어를 함으로써 입출력특성의 직선성이나 히스테리시스가 개선됨은 물론이고, 유량이나 유온이 변화해도 제어압력이 거의 변동하지 않는 등 정밀도 향상을 대폭 꾀할 수 있다. 게다가 압력 센서를 밸브에 내장시킴으로써 제어 압력을 밸브위에 디지털 표시하거나, 페루프계의 편차신호를 이용하여 밸브의 고장진단을 할 수 있는 장점도 있다.

## 6. 기술적 문제 및 해결방안

재료의 히스테리시스 문제는 플런저 및 플런저 가이드의 재질을 자기 포화 밀도가 높고 히스테리시스가 작은 것을 선택하는 것으로 해결할 수 있으며, 재질로서는 순철이나 이것에 가까운 재질을 자기 풀림(Annealing)처리하여 사용한다. 접동마찰에 의한 히스테리시스는 해결방안이 어려운 실정이나, 여러 가지 시도되는 방법 중 하나가 PWM에 의한 구동법으로 입력전류가 순수한 직류전류를 공급하지 않고 디터효과(Dither Effect)로 일컬어지는 소진폭으로, 비교적 고주파수의 주기적 전류신호를 입력전류에 중첩해서 공급하여 마찰력을 감소시키는 방법으로 널리 쓰이고 있다. 또 다른 방법으로는 로드(rod)와 금속 접동부에 리니어 볼 베어링(Linear Ball Bearing)을 사용한다든가 금속의 경우에는 로드 및 금속 표면을 주의 깊게 다듬질하여 접동저항을 저감하는 방법이 있다.

스풀의 가동정밀도가 높지 않으면 스프링의 횡추력에 의한 스틱(Stick) 문제가 발생하는데, 이 경우는 테이퍼부를 정압 베어링화하여 저마찰화시킨다. 채터링 현상으로 밸브내의 소음진동 문제는 탱크 포트를 약간 교축하여 배압을 만들어줌으로써 포켓 채터링 현상을 방지하거나, 사용 목적상 다른 유압기기와의 매칭이 좋도록 직류 솔레노이

드의 가동철심을 유침형으로 하여 감쇠효과를 얻을 수 있는 방법들이 제안되고 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김기영, 전자-유압 제어, 도서출판 세화, pp.92 ~ 109, 1998
- [2] 송창섭, 유압기술 실무 매뉴얼, 도서출판 기술, pp.164 ~ 169, 1993
- [3] 손병진, 강명순, 박영조, 유압공학, 회중당, pp.180 ~ 185, 1989
- [4] 양협, 유압부품의 설계 및 선정, 태훈출판사, pp.183 ~ 188, 1997
- [5] Hirohisa Tanaka, "고속전자 밸브에 관한 연구", 일본기계학회논문집(c편), 50권, 457호, pp.1594 ~ 1601, 1984
- [6] 백동기, 성세진, "고속 플린저형 솔레노이드의 동특성 해석", 전력전자학회 논문집, 제2권, 제10호, pp.26 ~ 32, 1997