⊙ 解　　說

시스템의 지능화와 고속전자밸브

System Intelligence and Electronic High Speed On-Off Valves

류 길 수
K. S. Rhyu
• 1953년 5월 23일생
• 한국해양대학교
자동화 · 정보공학부

허 준 영
J. Y. Huh
• 1956년 11월 24일생
• 한국기술교육대학교
제어기계공학과

유 태 재
T. J. Yoo
• 1959년 1월 26일
• 한국기술교육대학교
제어기계공학과

1. 서　　론

시스템에 지능화를 부여하기 위해서는 전자와 기계의 인터페이스 요소가 필요하다. 지금까지는 전자비례제어밸브와 전기유압서보밸브가 일반적으로 사용되어 오고 있으나 요즈음 그 사용이 급증하고 있는 마이크로컴퓨터 등의 디지털 기기와 함께 사용하려면 D/A변환기와 증폭앰프를 사용해서 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환할 필요가 있다1). 디지탈화의 방향에 부응하기 위해 ON/OFF 신호를 그대로(D/A 신호 변환을 하지 않고) 유체 펄스로 변환하는 것이 가능하도록 개발된 것으로 고속전자밸브가 있다. 또한 고속전자밸브는 전자비례제어밸브나 전기유압서보밸브에 비하여 구조가 간단하기 때문에 가격이 저렴하며, 작동유의 오염에 둔감하여 보수유지의 측면에서 간접비용의 소모가 매우 작다는 장점을 가지고 있다2,3,4). 이러한 장점들로 요즈음 그 적용이 건설장비, 자동차, 공작기계, 산업기계 등의 위치제어와 압력제어에 이용되고 있고, 또 각종 전기 · 유압 파이롯트 제어용으로서 폭넓은 용도가 검토되고 있는 고속전자밸브의 작동원리와 응용사례를 살펴봄으로써 지능화된 시스템을 구성하려는 독자들에게 조금이나마 도움을 주고자 한다.

2. 고속전자밸브 일반

2. 1 특징

고속전자밸브는 전기의 펄스열에 따라 고속으로 개폐되는 전자밸브로 소형실린더의 작동 절환이나 위치 결정 등에 사용되어져 왔다. 고속전자밸브는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 개폐신호가 입력으로 주어졌을 때 포펫의 관성으로 인하여 작동지연시간(t_a, t_c)과 절환시간(절환에 요구되는 시간폭, t_b, t_d)을 갖고 있고, 이것이 제어계의 고속화, 고성

능화에 장애요인이 된다. 따라서 고속전자밸브로 전기-유압 디지털제어를 행하기 위해서는 소형이면서 고속으로 개폐가 가능한 전자밸브가 필요해져 왔다. Fig.2에 유량의 크기에 대한 밸브 개폐지연시간을 나타낸다. ○는 밸브 off상태에서 on상태로의 지연시간(t_c+t_d)을 나타내고, □는 밸브 on상태에서 off상태로의 지연시간(t_a+t_b)을 나타낸다. 고속전자밸브에 의한 전기 · 유압 인터페이스는 지금까지의 전기 · 유압 서보밸브나 전자비례밸브와 비교할 때 사용법이 틀리기 때문에 이 전자밸브의 특징과 성능을 확실히 이해해서 적절한 사용법을 익히는 것이 필요하다. 고속전자밸브의 특징을 아래와 같이 정리할 수 있다[5].

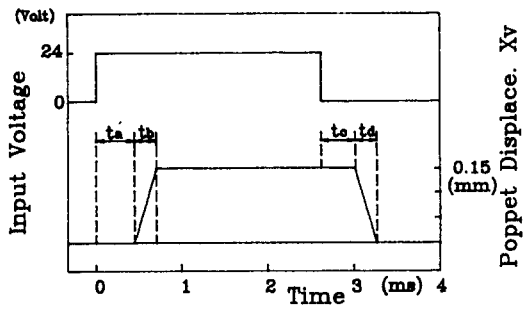


Fig.1 Modelling diagram of valve spool behavior

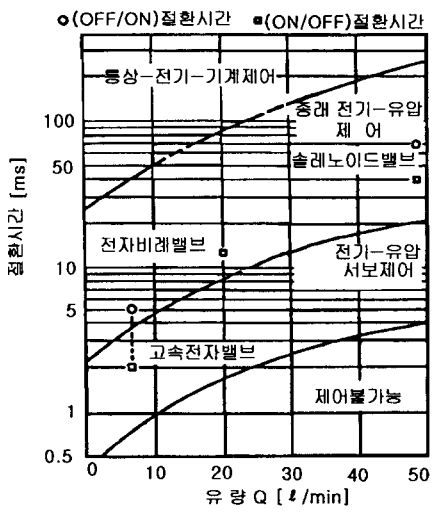


Fig.2 Comparision of the delay time in solenoid valve

① 소형, 경량으로 개폐지연시간이 1~5ms인 고속응답으로 작동한다.

② 개폐지연시간이 작기 때문에 컴퓨터의 디지털 ON/OFF 출력에 따라 구동 가능한 디지털 인터페이스 전자변이다.

③ 고속전자밸브를 사용하여 기존의 전기 · 유압 서보에 가까운 성능을 저 가격으로 실현 가능하다(가격 대 응답성능의 개략도를 Fig.3에 나타낸다).

④ 포펫 구조로 되어있어 압력제어회로에도 사용가능하다.

⑤ 구조가 간단하기 때문에 작동유의 오염관리를 NAS11급 이상으로 하면 된다.

⑥ 유로 형태는 3포트 2위치 절환밸브형, 2포트 2위치 상시폐형, 2포트 2위치 상시개형의 3종이 있다.

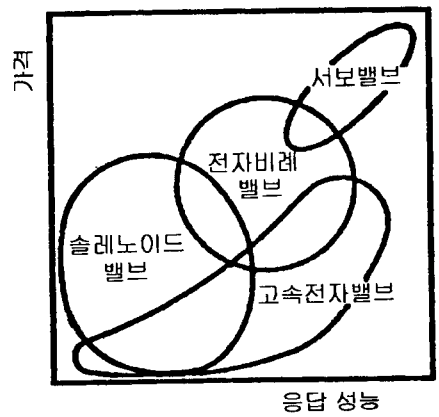


Fig.3 Cost versus performance of solenoid valves

2.2 구조와 작동원리

고속전자밸브는 구동방식에 따라 솔레노이드 방식과 토오크모타 방식으로 나눈다. Fig.4에 솔레노이드 구동방식의 3포트 2위치 절환밸브의 단면구조도를 나타낸다. 포펫의 상부가 P포트, 중앙부가 A포트, 하부가 T포트와 통하도록 구성되어 있다. 솔레노이드코일이 소자되었을 때에는 포펫이 스프링에 의해 밀어 올려져서 A포트와 T포트가 접속되고, P포트는 막히게된다. 또 이 때 발생된 파이롯트 압력은 주밸브의 볼에 가해져서 주밸브

의 유로가 변경되도록 되어있다. 슬레노이드 코일이 여자되면 전자석의 흡입력이 스프링의 힘보다도 강하므로 로드를 밀어 포펫을 밀어 내리게 되므로 A포트는 P포트에 접속되고, T포트는 막히게 된다. Fig.5에 토오크모타 방식으로 구동되는 2단 3포트 2 위치 절환밸브의 개략도를 나타낸다. 전류가 토오크모타에 가해지면 토오크가 발생하고 이 토오크에 의하여 파이롯트단의 유로가 절환된다. Table 1에 개발되어 있는 각종 고속전자밸브의 사양을 비교하여 나타내었다[6,7].

2.3 PWM제어

고속전자밸브는 고속으로 개폐를 되풀이하여 사용되는 경우가 많고 그 특성의 표준으로서 변조

Table 1. Specification of various high speed on off valves

Model	Maker	Pmax[bar]	Q[L/min] by p[bar]	t_a+t_b[ms]	t_c+t_d[ms]	V[V]	T℃	Port / Position	Type	Stage	R[Ω]	I[A]	Pressure Balance	Weight	Parts	Cost
SG	Alfred Teves (ITT Automotive)	230	3.3 100	3-5	3-4	12	-40... +120	2/2	Ball	1	3.45	N.K.	no	96	16	low
SO	Alfred Teves (ITT Automotive)	230	3.3 100	3-5	3-5	12	-40... +120	2/2	Ball	1	6.0	N.K.	no	92	15	low
MV 2.06	Robert Bosch	200	N.K.	3-5	4-7	12	-35... +80	3/3	Ball	1	1.2	N.K.	no	320	35	high
MV 3.05	Robert Bosch	160	1.1 100	4-7	6-9	12	-35... +80	3/3	Ball	1	1.25	N.K.	no	290	35	high
DV1-3/2	B & R	250	3.0 200	1.6	1.0	24	-40... +90	3/2	Ball	1	1.1	6	no	185	>30	very high
DV2-3/2	B & R	250	22.0 200	1.0	1.6	24	-40... +90	3/2	Ball	2	1.1	6	no	187	>34	very high
3NC	Feinmechanische Werke Mainz	250	3.3 100	1-1.5	1-1.4	12	-35... +120	2/2	Poppet	1	3.1	4	yes	48	13	mid.
6NC	Feinmechanische Werke Mainz	250	6.0 100	N.K.	N.K.	12	-40... +120	2/2	Poppet	1	5.7	N.K.	yes	48	13	mid.
V52HRAB	Honeywell Skinner	210	N.K.	N.K.	N.K.	12	-40... +80	2/2	Poppet	1	N.K.	N.K.	no	515	12	low
HS-A21	Nachi	175	6.0 100	4-6	1.5-2.5	12	-20... +90	3/2	Poppet	1	4.6	2.6	yes	248	12	low

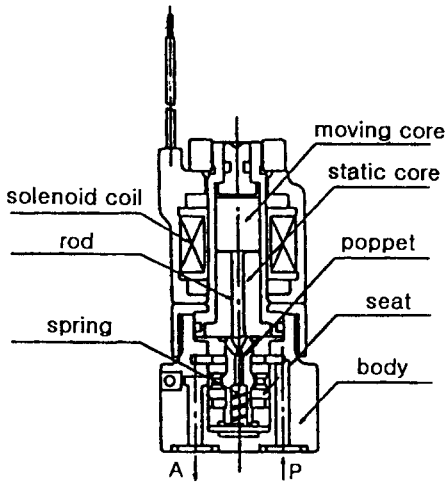


Fig.4 Solenoid operated 3/2 position high speed on off valve

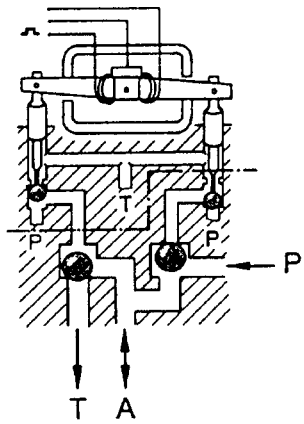


Fig.5 2 stage pilot operated high speed on off valve

율(듀티) "τ"을 사용하면 편리하다. 변조율 τ는 아래와 같다.

$$\tau = \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}}$$

여기서 t_{on}은 솔레노이드나 토오크모타에 전원이 인가되는 시간이고, t_{off}는 전원이 가해지지 않는 시간이다. 또 반복되는 주기 T는 전송주기라고 하며 t_{on}과 t_{off}의 합과 같다. 전송주기(T)를 일정하다고 하고 변조율(τ)를 바꾸는 것을 펄스폭변조(PWM: Pulse Width Modulation)이라 하고, 또 PWM을 제어에 사용하는 방식을 PWM제어라 부른다. 게다가 PWM제어는 변조율 (τ) 를 제어하는 것 때문에 듀티제어라고도 불리워지고 있다. Fig.6에 변조율을 결정하는 두가지 방식을 나타낸다. (a)는 자연적인 듀티 결정법으로 전송주기의 시작부터 오차곡선과 전송파가 만나는 점까지가 t_{on}시간이다. (b)는 등거리 결정법으로 전송주기의 시작점에서 오차곡선의 크기가 바로 t_{on}시간이 되는 것으로 전송주기의 시작점에서 변조율을 미리 알 수 있기 때문에 듀티제어에 많이 사용되고 있다.

한편 PWM신호의 펄스폭에 대한 밸브 통과유량의 발생형태는 Fig.7과 같이 5가지의 경우로 나눌 수 있다[8].

Case 1 : $t_e < t_a$

PWM펄스폭 t_e가 밸브의 포펫열림지연시간 t_a보다 짧은 경우로 이때는 밸브통과유량이 발생하지 않는다. 이 경우는 특히 제어값이 목표값 근방에 도달했을 때 생기며 이로 인해 정상상태오차가 생길 수 있다.

Case 2 : $t_a < t_e < (t_a + t_b)$

PWM펄스폭 t_e가 밸브의 포펫열림지연시간 t_a보다는 길고 포펫최대열림시간 t_b보다는 짧은 경우로 포펫은 완전히 열리기 전에 중간위치에서 닫힘신호를 받으므로 포펫닫힘지연시간 t_c만큼 그 위치에 머문 후에 닫힘동작을 행한다.

Case 3 : $(t_a + t_b) < t_e < (T - (t_c + t_d))$

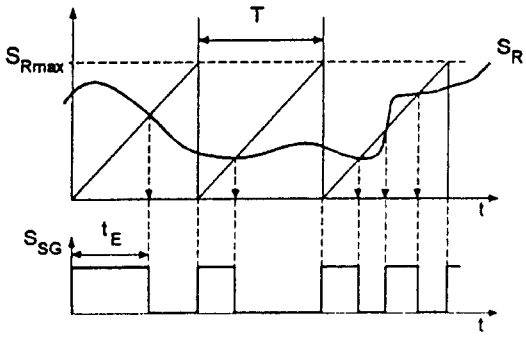
PWM펄스폭 t_e가 포펫열림지연시간 t_a와 최대열림시간 t_b의 합보다는 크고 또한 포펫닫힘동작을 행할 만큼의 시간적 여유가 있는 경우로 밸브의 포펫은 최대로 열린 후 닫힘동작이 완전히 이루어진다.

Case 4 : $(T - (t_c + t_d)) < t_e < (T - t_c)$

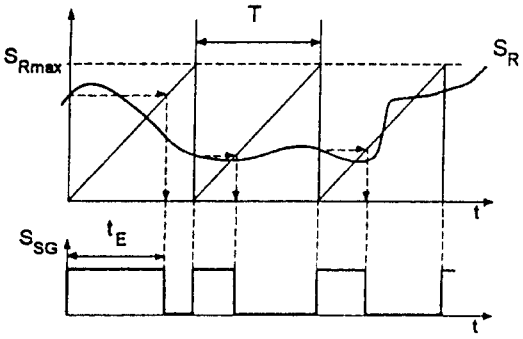
PWM펄스폭 t_e가 길어서 포펫이 최대로 열린 상태에서 닫힘신호를 받을 때 닫힘동작이 완전하게 수행되지 않는 경우이다.

Case 5 : $(T - t_c) < t_e < T$

PWM펄스폭 t_e가 길어서 포펫이 최대로 열린 후 포펫닫힘지연시간(t_c)의 여유가 없으므로 닫힘동작이 일어나지 않은 상태에서 새로운 신호를 받게 된다.



(a) Natural decision



(b) Same distance decision

Fig.6 Duty decision

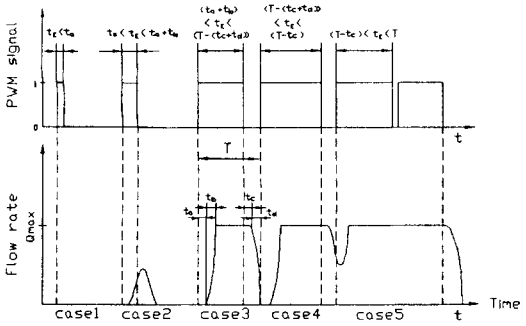


Fig.7 5 cases of valve flowrate for the PWM output signal

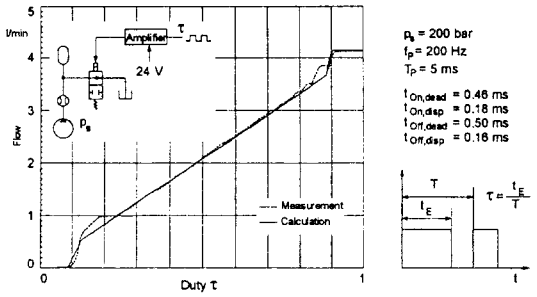


Fig.8 Flow versus duty for PWM-signal

Fig.8에 듀티 τ에 따른 밸브를 통한 유량의 정특성을 나타낸다. 여기서 펄스전송주파수가 200Hz로 일정이기 때문에 듀티는 전송주기(T)에 대한 밸브의 상대적인 열림시간을 나타낸다. 밸브의 절환거동은 작은 듀티(τ<0.1)에 대해 밸브는 닫힌 채로 있고, 반면에 듀티의 큰 값(τ>0.9)에 대해서는 완전 열림상태에 있다.

2.4 주파수응답

4개의 고속전자밸브와 양로드형 복동실린더 및 컴퓨터를 주요요소로 하는 Fig.9와 같은 장치에 대한 개루프 주파수응답의 실험결과를 Fig.10에 나타낸다. 가변주파수 범위를 0.1에서 20Hz로 하였고, 입력진폭의 크기를 각각 2와 5, 10mm로 하였을 때의 결과이다. 입력진폭의 크기에 따라 측정점을 삼각형(10mm)과 원(5mm), 사각형(2mm)로 나타내었다. (a)는 진폭비를 나타내는 곡선들로 입력 사인파형의 진폭의 크기에 따라 주파수응답의 진폭비 곡선이 다르게 나타났고, 그 대역폭은 각각 9와 4, 2Hz이었다. (b)는 위상차 곡선들을 나타낸 것으로 입력 사인파형의 진폭 크기에 따라 위상차는 포화특성에 의해 각각 다르게 나타났다. 사용된 실험장치에서 최대 피스톤 속도가 63mm/s이므로 각각의 진폭에 대해 5Hz와 2Hz, 1Hz보다 큰 입력 주파수에서 포화가 발생되었다[9].

2.5 내구성

고속전자밸브는 자동차의 브레이크 잠김방지장

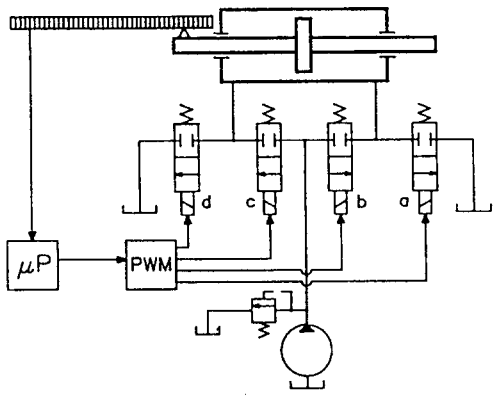
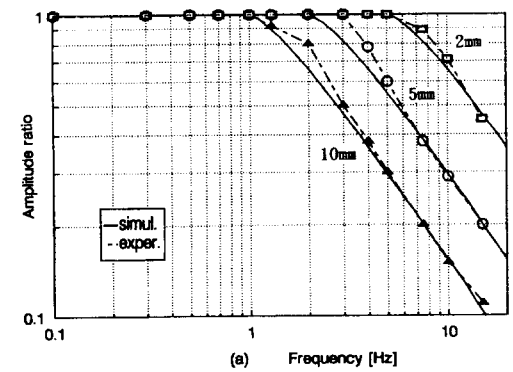


Fig.9 Electro-hydraulic servo system with high speed on-off valves



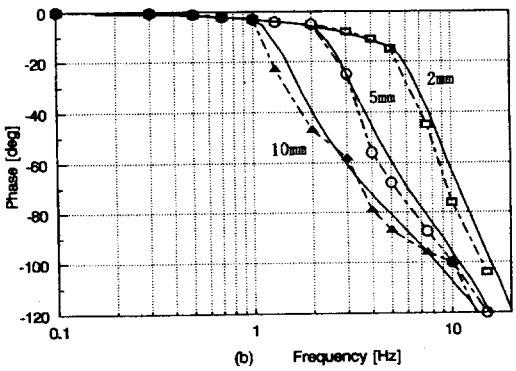


Fig.10 Frequency response

치(ABS)에 사용되면서 그 적용성을 크게 인정받게 되었다. 자동차의 사용수명은 약 5000시간으로 추정된다. 따라서 200Hz의 주파수로 끊임없이 작동하는 밸브라면 3.6×10^9 번의 여닫힘을 견디어 내야 한다. 1×10^9번 여닫음으로써 사용수명을 시험한 결과를 Fig.11에 나타낸다. 공급압력은 100bar, 시험온도는 50℃, 사용유체는 광물성 유압작동유이다. 누유는 약간 감소하는 추세로 3~7mm³/s의 범위내에서 변화하는 것으로 나타났다. 통과유량은 3.55 l/min로 일정하게 나타났다. 또 고속전자밸브 사용할 때 소음발생은 만약 승용차에 사용된다면 큰 문제가 될 수 있다. Fig.12의 (a)에 공급압력의 변화에 대한 소음크기를 나타내었다. 듀티 50%로 개폐하는 밸브는 개폐시 기계적인 충격에 의해 완전히 열린 밸브(τ = 100%)가 내는 소음보다 더 큰 소음을 발생시킨다. 전송주파수를 50Hz에서 200Hz로 증가시킴에 따라 소음의 크기는 80dB(공급압력 60bar)에서 86.5dB로 증가되는데 그 증가되는 폭은 점점 감소한다. 방음제를 사용하였을 때 소음크기를 크게 줄일 수 있음을 (b)에 나타낸다. 위치제어에 사용되었을 때 밸브들은 전 스트로크의 범위에서 작동하기 때문에 약간 높은 편이나 자동변속기제어나 브레이크 잠김방지장치등의 압력제어에 사용된다면 훨씬 적은 소음수준에서 사용될 수 있다[2].

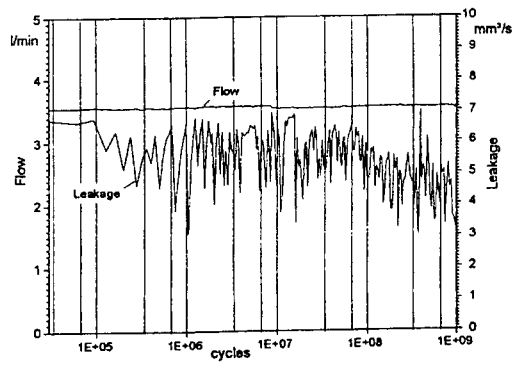


Fig.11 Flow and leakage od a valve during 109 switching cycles

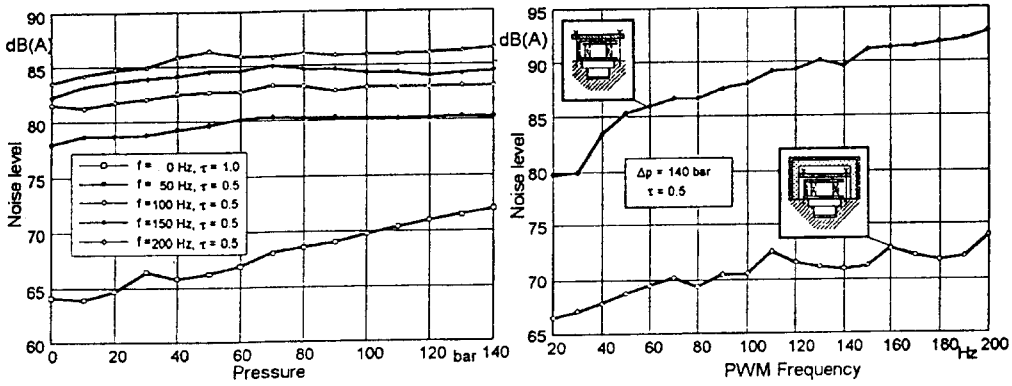


Fig.12 Noise production depending on pressure and frequency

3. 고속전자밸브의 응용

최근 산업 발달의 추세가 전자화, 자동화됨에 따라 다양한 기계들이 요구되어 지고 있는 실정이다. 따라서 그기에 부응하여 고속전자밸브의 응용범위도 점차 확대되어 가고 있는 추세인데, 본 해설에서는 그 응용 예 및 중요시되어 연구되고 있는 분야를 살펴보기로 한다.

3. 1 위치제어 응용

고속전자밸브로 유체펄스를 만들고 이에 의하여 유압모터의 회전 각도와 실린더의 위치를 제어하는데 응용되어진다. 이에 구체적인 예를 보면 유압 모터의 회전각도 제어가 요구되는 단조공정에서 공작물을 임의의 각도로 빠르고 정확하게 회전시킬 수 있는 인덱싱 시스템(Indexing System)을 구성하여 슬라이딩모드제어를 적용하여 공정의 자동화에 이용되고 있고[1], 또한 가변 피스톤 펌프의 경사각 제어에는 입력되는 아나로그신호와 경사각의 차에 의하여 PWM신호의 펄스폭이 계산되며 이에 의하여 고속전자밸브를 제어하는 PWM신호가 형성되고, 오차 신호가 크면 긴 폭의 펄스가 형성되어 밸브에 최대의 유량을 흐르게 하여 유압모터의 사판 각도를 제어한다. 실린더의 위치제어에 있어서는 컴퓨터에 의해 PWM 구동되는 4개의 고속전자밸브를 사용하여 피스톤을 움직이고 이 변위를 피드백하여 입력 측에 보내어 실린더의 위치를 제어하는데 적용되고 있다[3,8]. 이외에도 크레인의 원격 조작, 건설장비의 자동화 등 여러 분야에 적용되어 지고 있다.

3. 2 안정도

고속전자밸브를 사용한 펄스폭변조방식(PWM)의 전기유압서보계 제어에 있어서의 문제점은 PWM에 의한 듀티가 포펫의 작동지연 시간보다 작을 경우 밸브를 통한 흐름이 발생되지 않는 불감대가 존재하여 제어가 행하여지지 않는 것이다. 이로 인해 목표 값 근방에서의 정밀제어가 곤란하다. 이를 옵셋 조정에 의해 어느 정도 보상해 줄 수 있으나 불감대의 크기가 작동유의 온도, 포펫의 마모정도, 밸브마다의 작은 치수오차 등에 의해 크게 변하기 때문에 언제나 정밀제어 되기를 기대하기는 어렵다. 그래서 계의 파라메터가 변하는 경우에도 변함없이 좋은 응답을 얻기 위해서는 정상오차 상태를 적분하여 제어해 줄 수 있는 적분기가 내장된 적응제어 또는 견실 제어가 요구되고 있다. 제어를 행함에 있어서 최근에 중요시되고 있는 것으로 견실성(robustness)이 있다. 슬라이딩모드에 있는 제어대상은 초 평면에 구속되어지기 때문에 매개변수의 변동이나 비 선형성, 잡음 등에 대해서 둔감한 계, 즉 견실 제어계를 실현할 수가 있다[10].

4. 결 론

이상과 같이 고속전자밸브에 대하여 특징, 구조와 작동원리, 내구성 및 응용분야 등에 대하여 살

펴보았다. 고속전자밸브는 전기 · 유압제어 시스템을 구성하는 하나의 단위요소로서 요구되는 기능, 제어정도와 가격, 신뢰성 등에 있어서 균형을 이루는 종래의 밸브와는 다른 유연성을 가진 밸브이다. 현재 이 고속전자밸브를 이용하는 전기 · 유압 디지털 제어기술은 시스템의 지능화라고 하는 큰 흐름을 따라 종래의 전기 · 유압 제어에서는 이루지 못했던 새로운 응용분야를 만들어 내고 있다. 또 마이크로컴퓨터에 의한 제어는 메카트로닉스화의 진전 이상으로 연구가 활발히 진행되고 있어 고속전자밸브를 사용하는 전기 · 유압 제어기술은 큰 발전 가능성을 가지고 있다. 따라서 이 분야에 대한 체계적인 연구와 응용이 절실히 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. W.Backe, Recent research projects in hydraulics, Proceedings of the Japan International Symposium on Fluid Power, Tokyo, PP1-27, 1993
2. G. Wennmacher and J. Y. Huh, Closed loop control of position and pressure using fast switching valves, Proceedings of Int. Congress SIA l' Hydraulique et l' Automobile, Angers, No.94.05.22., 1994
3. T. Muto, H. Yamada and Y. Suematsu, PWM-Digital Control of Hydraulic Actuator Utilizing 2-way Solenoid Valves, Jour. Jpn. Hydraulic & Pneumatics Soc., (in Japanese), Vol.19, No.7, p.564, 1988
4. G. Wennmacher, Einsatz von Schnellschaltventilen fur elektro hydraulische Aktuatoren im Kfz,, 10th Aachener Fluid technisches Kolloquium, pp.1-20, 1992
5. 荒木一雄, "高速應答電磁弁", パワーデザイン, 第6券, 第26號, pp52-66, 1992.
6. G. Wennmacher, Untersuchung und Anwendung schnellschaltender elektrohydraulischer Ventile fur den Einsatz in Kraftfahrzeugen, RWTH Aachen Doctor paper, 1995
7. Nachi Catalogue, 1991, "HYDIS", 9701-5.
8. 허준영, Wennmacher,G., 1995, "고속전자밸브를 사용한 유압장치의 PWM제어에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, 제3호, pp868~876.
9. 허준영, Wennmacher,G., 1995, "고속전자밸브를 사용한 유압장치의 주파수 응답특성에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제12권, 제2호, pp79~86.
10. 허준영, Wennmacher,G., 1995, "슬라이딩모드제어에 의한 견실한 PWM 전기유압서 보계의 설계, 대한기계학회논문집, 제9권, 제10호, pp2465-2474.
11. 허준영, 1994, "고속온오프밸브를 사용한 서보인덱싱시스템의 슬라이딩모드제어에 관한 연구, 한국기술교육대학교논문집, 제1권, 제1호, pp103-118.