

## 솔레노이드 밸브를 이용한 카복시 건의 주입량 제어

### Injection volume control of carboxy-gun using a solenoid valve

탁 태 오\* 한 남 규\*\* 신 영 규\*\*  
Tak, Tae-Oh Han, Nam-Gyu Shin, Young-Kyu

#### Abstract

Carboxy-guns are used for rapid and precise injection of CO<sub>2</sub> gas to the target skin area using external power source. In the design of carboxy-gun, the most important thing is how to precisely control injection volume of CO<sub>2</sub> gas. This paper deals with the control scheme of injection volume of carboxy-gun using solenoid valve. First the amount of volume that passes through the solenoid valve under on-off time ratio control is estimated based on the assumption of compressible gas flow. The flow rate of gas is experimentally measured under the varying pressure of the gas reservoir. Two results showed good correlation to each other, thus demonstrating the validity of the volume control strategy.

키워드 : 메조건, 주사, 솔레노이드 밸브, 압축성 가스, 듀티비  
Keywords : Meso-gun, injection, solenoid valve, compressible gas, duty-ratio

#### 1. 서론

메조건(meso-gun)은 목표로 하는 특정 부위의 피부 층에 수백 회에서 수천 회에 이르는 미세한 양의 약물을 주입하기 위한 주사기이다. 약물 치료의 일부분으로 카복시세라피(Carboxy therapy)는 피하 지방층에 CO<sub>2</sub>가스를 주입함으로써 국소지방 조직의 결합을 분리시키고 지방세포를 파괴시키며, 지방조직 내의 미세혈관을 확장시켜 혈액순환을 증가시킨다. 시술의 목적은 적색반점 제거, 국소비만, 탄살복원, 거친피부 복원 등 주로 성형목적으로 시술된다. 카복시 시술은 CO<sub>2</sub>탱크에 연결된 카복시 인젝터를 사용하여 시술하는데 장비는 약

400만원의 고가이다.

카복시 건의 구성은 그림 1과 같다. 컴프레서에 의해 나오는 공압을 개폐하는 솔레노이드 밸브와 바늘의 삽입을 위한 바늘 삽입 실린더, CO<sub>2</sub> 압력 및 유량 조절 밸브 등으로 이루어져 있다.

솔레노이드 밸브는 방향제어 밸브의 한 종류로

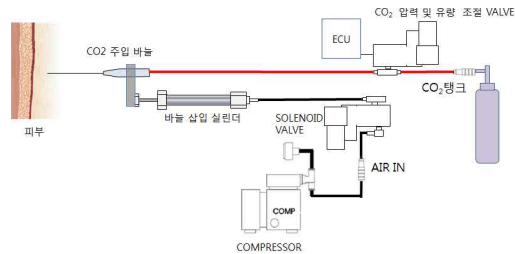


그림 1. 카복시 건의 구성도

\* 강원대학교 기계의용공학과 교수, 공학박사, 교신저자

\*\* 강원대학교 대학원 기계의용공학과 석사과정

서 압축공기를 흐르게 하거나 혹은 차단하는 기능을 포함하고 있는 밸브이다. 공압의 방향제어 밸브는 액추에이터의 운동 방향을 바꾸는 기능을 가지고 있다. 또한 이미 설명한 바와 같이 제어 시스템을 구성하는 요소로 사용할 수 있다. 즉, 방향제어 밸브에는 제어 시스템의 구성을 위하여 필요한 논리적 기능을 만족하는 밸브가 있다[1].

공압 밸브에서의 압력 강하와 공기의 유량은 밸브의 선정에 매우 중요하다. 그러므로 밸브의 선정은 실린더의 속도와 체적, 요구되는 스위칭 횟수, 허용할 수 있는 압력강하를 고려하여야 한다. 공압 밸브에서의 유량은 여러 인자들을 고려하여 계산하여야 한다. 밸브의 유량을 측정할 때에는 밸브의 한쪽으로부터 공기가 통하도록 설치하고 밸브의 출구 쪽의 압력을 측정하면 입구 쪽의 압력은 알고 있으므로 압력 차이  $\Delta p$ 를 구할 수 있다. 밸브의 유량은 유량기를 통하여 측정하며 여기에 영향을 미치는 밸브 입구의 압력, 밸브 출구의 압력, 압력 차이, 온도, 정상유량 인자들을 고려하여야 한다[2].

방향제어 밸브의 특성을 고려하였을 때 시간에 따른 검출 유량은 제어할 수 있다. 방향 제어 밸브의 유량 특성이란 밸브의 입구와 출구의 압력상태와 유량의 관계를 나타내는 특성으로 공기의 유동능력을 표시하는 척도이다. 일반적으로 유량 특성은 입구 압력을 패러미터로 했을 때 출구측의 압력과 유량의 관계를 나타낸 것이다. 또한 응답시간 특성이란 밸브의 응답속도를 말하며 동적 성능이라고 말한다. 여기서 응답시간이란 밸브에 입력신호가 가해진 때부터 출구의 출력이 어느 규정치에 도달할 때까지의 시간을 말하며 수동조작 밸브나 기계적 작동 밸브는 문제되지 않으나 솔레노이드 밸브나 마스터 밸브에서는 응답시간이 중요시된다. 그러므로 실험에 채택된 솔레노이드 밸브의 응답시간 특성은 중요시 여겨져야 한다. 일반적으로 전자 밸브에서 응답 속도는 파일럿 작동형보다 직동식이 빠르고, 직류보다는 교류 솔레노이드가 빠르다[3].

방향제어 밸브의 사용 압력은 밸브체의 구조나 재질에 따라 정해져 있다. 파일럿 작동형 밸브는 공기 압력의 일부가 주 밸브의 조작에 사용되기 때문에 공급 공기 압력이 낮아지면 작동하지 않으므로 사용 공기 압력 범위를 반드시 확인하여야 한다. 또한 공기압에 의해 작동되는 압력작동 밸브도 밸브 내부의 마찰력이나 스프링 여부에 따라 작동 압력이 차이가 있다. 실험에 사용할 파일럿형 3포트 솔레노이드 밸브는 작동 시간에 따른 유량 제어를 하기 위한 실험에서 사용 압력의 요인이 중요시 된다.

본 논문에서는 압축성 유동에서의 계산식을 정리하였고 일정 압력의 기체가 시간제어에 따른 솔

레노이드 밸브를 통해 나오는 유량을 확인하였다. 또한 가스 저장탱크의 출력 압력의 변화를 통해 밸브의 작동에 적절한 압력으로 솔레노이드 밸브 개방시간에 대해 검출되는 유량을 확인하였다.

또한 솔레노이드 밸브의 응답시간 특성을 고려하여야 하므로 밸브에 입력신호가 가해진 때부터 유량이 검출되는 시기를 확인하였고 카복시세라피 기술에 사용되는 의료기기 활용방안으로 일정시간 동안 유속의 변화에 따른 검출유량을 유량측정기와 데이터 수집기를 통해 측정유량을 확인하였다.

## 2. 솔레노이드 통과 유량계산

이상 기체의 엔트로피 흐름은 정체된 압축 흐름에 대한 상태를 정의한다는 점에서 유용하다. 흐름의 시점에서 흐르지 않고 정체된 엔탈피, 또는 총 엔탈피,  $h_o$ 로 정의하여 단위 질량 당 정체 엔탈피가 아래 식 (1)에 의해 정의되고 있다.

$$h_o = h + \frac{V^2}{2} \quad (1)$$

식 (2)에서 정체 온도 또는 총 온도  $T_o$ 는 단열적으로 정체 위치에서 측정된 온도이다.

$$h_o - h = c_p(T_o - T) = \frac{V^2}{2} \quad (2)$$

그래서, 정체 온도 또는 총 온도  $T_o$ 에 대해 정리를 하면 다음 식 (3)와 같이 정의된다.

$$T_o = \frac{V^2}{2c_p} + T = T \left( 1 + \frac{V^2}{2c_p T} \right) \quad (3)$$

그러나,  $c_p$ 는 정압비열로서 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \quad (4)$$

그러므로, 정체 온도 또는 총 온도  $T_o$ 는 다음 식 (5)와 같다.

$$T_o = T \left[ 1 + \frac{(\gamma - 1)V^2}{2\gamma RT} \right] \quad (5)$$

또한, 이상기체법칙을 사용함으로써 다음 식 (6)이 정의된다.

$$\gamma RT = a^2 \quad (6)$$

위의 식들 (3), (4), (5), (6)에 의해 변하지 않는 특정 온도에서 완벽한 가스는 다음의 식 (7), (8)에 따른다.

$$\frac{T_o}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (7)$$

$$M = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left( \frac{T_0}{T} - 1 \right)} \quad (8)$$

흐름의 시점에서 침체 압력, 또는 총 압력,  $P_0$ 는 만일 그 위치에서 흐름이 일정한 엔트로피 과정이라 가정하여 얻어진 온도로 정의된다. 일정한 특정 온도의 완벽한 기체는 등엔트로피 과정을 통해 다음과 같은 식 (9), (10), (11)을 얻을 수 있다.

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (9)$$

$$\frac{p_0}{p} = \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (10)$$

$$\frac{p_0}{p} = \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (11)$$

온도의 비율을 알았을 때 Mach number(12)를 결정할 수 있다.

$$M = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[ \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (12)$$

교차 단면적의 질량 유량은 다음 식 (13), (14)에 의해 정해진 압력과 온도로 표현할 수 있다.

$$\dot{m} = \rho A V \quad (13)$$

$$\dot{m} = \frac{P}{RT} A M \sqrt{\gamma RT} \quad (14)$$

### 3. 유량 측정

솔레노이드 밸브는 전자석을 이용하여 밸브를 개폐하므로 밸브를 통과하는 유량은 전자석의 특성에 영향을 받는다. 유량 검출 실험에 대한 솔레노이드 밸브는 현재 의료기기 업체에서 사용되고 있는 KV190 기종으로 선정하였다.

표 1 파일럿형 솔레노이드 밸브 사양

기종	KV190
사용유체	공기, 불활성 가스
사용압력	0.15~0.7MPa
사용유체온도	최고 50°C
유효단면적(CV)	6.0mm <sup>2</sup>
응답시간	12ms이하
최대작동빈도	5c/s
급유	불필요
질량(g)	28.2

표 1은 서론부분에서 제시한 파일럿형 3포트 솔레노이드 밸브이다. 선정된 밸브의 사용 유체는 공기를 비롯한 불활성 가스를 제어 할 수 있으며 밸브 작동에 영향을 미치지 않는 허용압력은 0.15~0.7MPa이다. 사용 기체의 온도는 최고 50°C까지 적용 가능하며 밸브의 유효단면적은 6.0mm<sup>2</sup>으로 고유유량계수(CV) 0.58을 가진다. 또한 솔레노이드 밸브나 마스터 밸브에서 중요하게 여겨지는 밸브 응답시간은 12ms이하이다.

실험을 위해 적용한 유량측정기 제원은 표 2에서와 같다. 질량 유량 측정기의 종류에는 차압을 이용한 질량 유량계, 운동량의 변화를 이용한 질량 유량계, 열을 이용한 질량 유량계가 있으며, 현재 열을 이용한 질량유량계가 가장 많이 사용되고 있다. 온도센서(thermal sensor)의 원리는 기체가 흐르는 관 상류측과 하류측에 동일한 열선을 감아 전류를 흘려 열평형 상태를 만든다. 기체의 흐름이 시작되면 열평형 상태가 깨지고 상하측 온도차( $\Delta T$ )가 발생하는데 이 온도차에 따른 질량 유동률을 계산하여 유량을 측정한다.

이 실험은 가스탱크에서 일정 압력으로 나오는 탄산가스를 시간을 변수로 적용된 솔레노이드 밸브의 작동에 의해 최종 검출되는 총 탄산가스량을 측정하기 위한 실험이다. 그림 2는 밸브 조절기에 의해 솔레노이드 밸브 개방시간이 결정되고 밸브로 통해 이동한 탄산가스가 유량측정기에서 전기적 신호로 전환되어 데이터 수집기로 받아들여져 그래프로 분당 유량을 알 수 있다. 또한 일정 간격의 연속 작동에 관여하는 듀티비(duty ratio)를 결정하기 위한 목적으로 솔레노이드 밸브 제어기를 설치하여 밸브 개방시간과 차단시간을 조절함에 따라 시간 조절에 의한 검출 유량을 측정할 수 있다. 측정된 데이터는 데이터 수집기를 통해 얻어진 데이터들을 적분하여 총 유량을 알 수 있다.

표 2 유량 측정기 제원

적용기체	질소, 수소, 산소, 헬륨, LPG, 아르곤 등(대부분의 기체)
제작유량범위	100slm~400slm(N2기준)
제어범위	3~100%
정확도	±1% of F.S 이내
선형성	0.2% of F.S. 이내
반복성	0.3% of Reading 이내
응답속도	1초 이내
위밍업시간	15분(정밀 측정시: 30분)
회로타입	아날로그방식
전원	+15VDC~+24VDC
출력신호	0~5VDC or 4~20mA
커넥터	D-Sub 9 Pins
연결피팅	SWL or VCR SElectable
운용온도	0~50°C
운용습도	85%RH이하
재질	STS316L

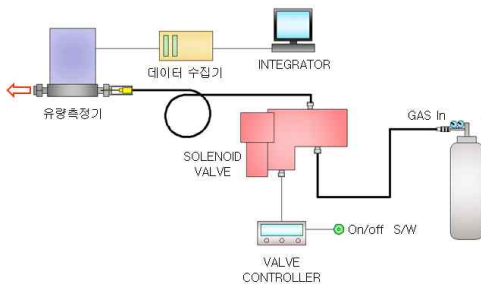


그림 2 시간 조절에 의한 유량측정 실험 개념도

단, 데이터의 정확성에 관여하는 일정 압력을 유지하기 위해 압력 감지기를 설치하여 만일 정해진 압력 이하로 내려갈 시에 차단밸브를 통해 기체 공급이 초기에 차단되어야 한다.

솔레노이드 밸브의 전기적 신호와 실제 작동하는 순간의 응답시간 특성을 알아보기 위해서는 밸브에 입력신호가 가해진 때부터 출구의 출력이 어느 규정치에 도달할 때까지의 시간을 측정해야 하며 이 측정값은 솔레노이드 밸브나 마스터 밸브에서 중요시된다. 그림 3에서 밸브 개방시간을 0.05sec로 설정하여 솔레노이드 밸브의 전기적 신호와 실제 유량이 측정되는 순간을 동시에 비교할 수 있는 그래프로 표현하였다. 응답시간은 전기적 신호가 발생한 후 유량이 측정되기까지 평균 0.239sec가 발생하였고 신호가 사라진 이후에 유량이 모두 배출되기까지 1.128sec 시간이 소모되었다. 밸브 작동 시 시간에 따른 유속그래프의 형상이 서로 유사하게 보임으로써 검출유량의 변동폭이 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 0.05sec 밸브를 개방했을 때 최고 유속은 0.66cc/sec가 발생

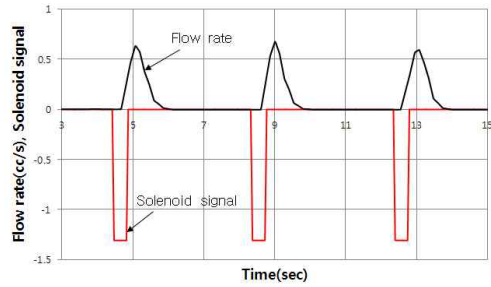


그림 3 밸브 개방시간(0.05sec) 경우 실험

하였다

솔레노이드 밸브 작동에 있어서 기체 공급압력은 파일럿 방식의 작동 방법을 가진 밸브에 영향을 준다. 그림 4는 압력을 1bar, 2bar, 3bar, 4bar로 변경한 후 솔레노이드 밸브 개방시간에 따라 검출되는 기체유량을 표시하고 다항식 그래프로 연결하여 표시하였다. 카복시세라피 기술에 사용되는 압력은 환자가 고통을 느끼지 않아야 하며 또한 공급 가스가 피부에 적절히 주입되어야 한다. 따라서 의료기기에 사용되는 기준 압력은 3bar로 설정된다. 실험에 사용된 솔레노이드 밸브는 낮은 압력 1bar에서도 3.8cc의 유량이 검출되어 이보다 높은 압력인 3bar에서의 밸브 작동은 기준 목표치 유량 검출에 영향을 주지 않은 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 솔레노이드 밸브의 개방 시간을 일정하게 고정하고 유속을 변화시켜 목표치 검출 유량을 달리 하였다. 분당 10cc, 20cc, 30cc, 100cc의 검출량을 목표로 하였고 그래프에서 알 수 있듯이 유속은 초기 관성의 영향을 제외하고 1분동안 일정함을 보인다.

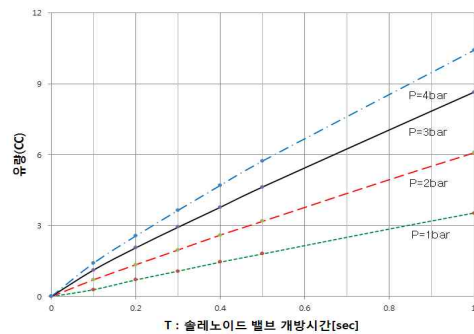


그림 4 압력 변화에 따른 개방시간에 대한 유량

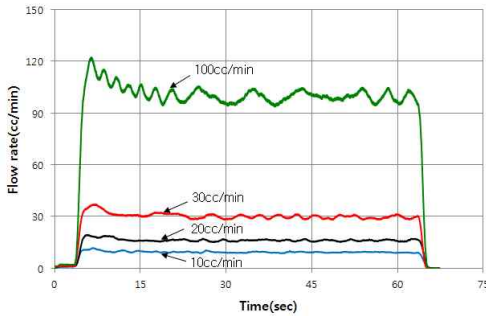


그림 5 유속변화에 의한 분당 유량 검출

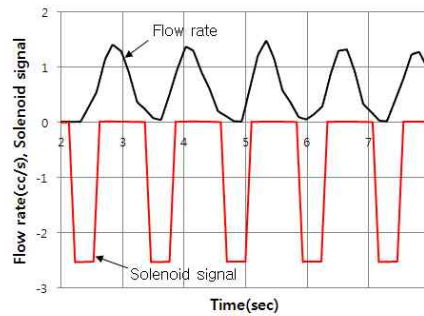


그림 7 밸브 연속 작동 시 검출 유량 특성

#### 4. 듀티비 설정

그림 6은 솔레노이드 밸브의 한 주기에 대해서 펄스가 off 상태인 시간을 솔레노이드 밸브 컨트롤러에 의해 1sec로 설정하여 연속 작동시 유속이 발생하는 경향을 나타낸 그래프이다. 밸브의 전기적 신호가 멈춘 후 잔류 유량이 모두 빠져나가기 전에 다시 밸브의 전기적 신호가 입력되는 것을 볼 수 있다. 따라서 초기에 목표로 하는 설정 유량에 영향을 끼친다. 그림 5는 실제 카복시세라피에서 적용하고 있는 니들삽입 후 솔레노이드 개방시간의 설정 예이다. 카복시건의 니들 삽입 실린더가 작동하여 바늘이 피부에 삽입된 후 솔레노이드 밸브가 개방될 때까지의 시간을  $\Delta t_1$ 으로 표시하였다. 또한  $\Delta t_2$ 는 가스의 주입을 마친 후 니들이 피부에서 빠지기 전까지의 시간이다.

그림 7의 실험 결과 한 주기에 대해서 펄스가 off 상태인 시간을 1sec가 아닌 잔류 유량이 모두 제거되는 시간을 고려하여 다음 밸브의 전기적 신호가 가해진 후 유량이 재 측정되는 시간을 확보했을 시 목표한 기대 주입 유량에 가까워진다.

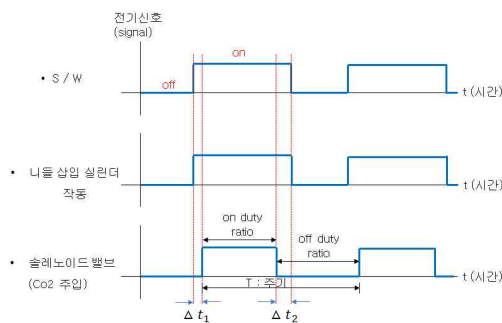


그림 6 솔레노이드 밸브 듀티비(Duty Ratio)

#### 5. 결론

실험 결과, 일정 압력의 기체가 시간제어에 따른 솔레노이드 밸브를 통해 나오는 유량은 압력변화에 의해 증가 또는 감소하였고 나아가 응용분야인 카복시테라피 시술에 적용하기 위한 설정 압력이 밸브 작동에 영향을 미치지 않았다. 따라서 설정된 일정 압력을 유지하는 동안 솔레노이드 밸브의 정상작동으로 배출되는 기체 유량을 확인하였다.

정해진 시간동안 요구하는 유량을 검출하기 위해서 솔레노이드 밸브의 응답시간 특성을 전기적 신호로 받아들여 Labview 프로그램을 통해 유량을 확인함으로써 듀티비(Duty Ratio) 설정 값을 제시했다. 밸브의 연속 작동 시 잔류 유량이 모두 배출되어진 후 밸브의 개방 순간을 결정하기 위해 off duty ratio를 설정하여야 하는 이유도 확인되었다.

카복시세라피 시술에서 일정 시간 동안 유속에 의해 유량이 결정되는 솔레노이드 밸브 적용 실험은 분당 유속이 일정하게 유지됨에 따라 기대 설정 유량 값에 근접했다.

#### 후 기

본 연구는 산학연 공동기술개발 지역사업의 연구 결과입니다.

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도 산업인재양성사업의 연구결과입니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 엄정섭, 김중, 김문경, 최병관, *유공압공학*, pp. 138-157, 2010.
- [2] 신흥열, *공압제어*, pp. 127, 2008.
- [3] 태성길, 김원희, 남대훈, 김동호, *자동화 설계를 위한 공압시스템기술*, pp. 125-145, 2000.

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제32권 A호, 2012.  
탁 태 오, 한 남 규, 신 영 규

- [4] James E. John, Theo G. Keith, *Gas Dynamics Third Edition*, pp. 74-76, 2006.
- [5] 이중엽, 이수용, “솔레노이드 밸브의 고유유량계수에 대한 실험과 성능예측”, *항공우주기술*, 제10권, 제1호, pp.70-78, 2011.
- [6] 심한섭, 이치우, 김남경, 안국찬, 남궁제관, “솔레노이드 밸브를 이용한 고압가스의 유량 제어”, *한국공작기계학회 2005 춘계학술대회 논문집*, pp.156-161, 2005.