

개인 시료 포집기 적용 저유량 정압조절기 실험적 연구

조진표*, 강수정**, 조명식**, 이훈**, 현승균*, 김광희*
*인하대학교 제조혁신전문대학원
**(주)연우, 미크론테크,
e-mail : realwind1@inha.ac.kr

An Experimental Study on the Low Flow Static Pressure Regulator with Individual Sample Collector

Jin-Pyo Cho*, Soo-Jung Kang**, Myung-Sik Cho**, Hun Lee**, Seung-Gyun Hyun*, Kwang-Hee Kim*
*Manufacturing Innovation School, Inha University
**Yonwoo.CO.,LTD, Microntech

요 약

본 연구는 0.5 - 0.1 L/min의 저유량 조건에서 안정적인 정압 조절이 가능한 조절기 설계를 수행하였고, 주요 부품을 3D 프린팅하여 다양한 설계 요소를 반영한 시제품을 제작하고, 설계 변수들이 정압 조절 성능에 미치는 영향을 평가했다. 연구의 첫 번째 단계에서는 상부 공기 흡 크기가 조절기에 미치는 영향을 조사했는데, 외기 유입 구멍이 커질수록 외부 공기 유입이 증가하여 유량 조절 가능 범위가 좁아졌으며, 작은 흡은 내부 정압을 형성하는 데 유리하여 더욱 안정적인 유량 조절 성능을 보였다. 하부 스프링 볼트 형상의 경우, 원형, 6각형, 12각형의 볼트 형태로 유량 조절 성능을 비교한 결과 저유량에서는 형상에 따른 차이가 거의 없었으나, 고유량 조건에서 원형 볼트가 가장 적합한 성능을 보였다. 스프링 길이와 탄성에 따른 실험에서는 스프링 길이가 길고 탄성이 클수록 성능이 높아질 것으로 예상되었으나, 실제 실험에서는 스프링 길이가 성능에 미치는 영향이 지배적이지 않음을 확인했다. 패드 재질을 실리콘 패드와 고무 패드를 비교한 결과, 고유량 조건에서 실리콘 패드가 우수한 성능을 나타냈으며, 신축성이 좋아 누기 방지에도 효과적이었다. 마지막으로, 실리콘 패드의 흡 크기 실험에서는 직경 1.0mm와 2.0mm를 비교했으며, 직경이 작을수록 유리한 것으로 나타났으나 차이는 미미했다.

1. 서론

산업 현장에서 근로자들이 노출되는 유해 환경 요소를 정확히 측정하는 것은 근로자의 건강과 안전을 보호하는 데 필수적이다. 특히, 산업안전보건법 제42조(2024년 5월 17일 시행)에 따르면, 상시 근로자 1인 이상을 고용하는 사업장에서는 소음, 분진, 화학물질 등 유해 환경에 노출되는 근로자에 대한 작업환경 측정이 의무적으로 이루어져야 한다. 이 법령에 따라 근로자가 노출되는 유해 물질을 평가하기 위해 다양한 측정 방법과 도구가 사용되며, 그 중 개인 시료 포집기는 작업자의 실제 노출 정도를 측정하는 중요한 도구로 자리 잡고 있다.

산업안전보건법은 옥내외 작업장에서 근로자가 유해 물질에 노출되는 것을 방지하고 이를 관리하기 위해 작업환경을 정기적으로 측정하도록 규정하고 있다. 소음, 분진(6종), 고열,

금속가공유, 화학물질(182종) 등에 노출되는 근로자에 대해 작업환경 측정이 이루어져야 하며, 단위작업 장소에서 근로자 2인 이상을 대상으로 측정하도록 규정하고 있다. 작업자가 10명을 초과하는 경우에는 매 5인당 1명 이상의 추가 측정이 필요하며, 최대 20명의 근로자까지 시료를 채취해야 한다.

시료포집기의 설치 방법 및 저유량 정압밸브 모식도는 그림1에 나타내었다. 시료포집기로 작업시간 동안(6시간 이상)에 필터에 일정한 유량을 유지하면서 측정하기에는 많은 어려움이 있고, 필터내에 작업환경의 이물질이 축적되어 지면 필터내의 압력이 변화가 생겨 필터 통과되는 유량이 일정하지 않게 되는데, 이러한 현상은 1 L/min급의 고유량 필터보다 0.5 - 0.1 L/min의 저유량 필터에서 차이가 크게 발생된다.

본 연구는 0.5 - 0.1 L/min의 저유량에서 안정적인 정압 조절을 달성할 수 있는 정압 조절기의 설계를 목적으로 주요 부품을 3D 프린팅으로 시제품화하고, 정압 조절 성능에 영향을



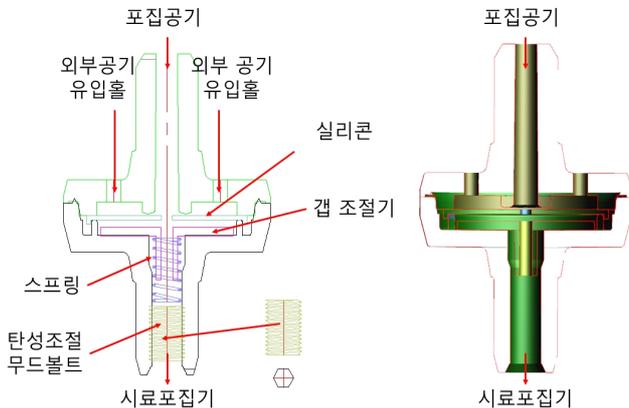
[그림 1] 저유량 정압밸브 모식도

미칠 수 있는 다양한 조건들을 적용하여 실험을 진행하였다. 실험 과정에서는 상부 공기 홀 크기, 하부 스프링의 장력, 실리콘 재질과 홀 크기 등 다양한 설계 변수들이 정압 조절기에 미치는 영향을 평가하였으며, 이를 통해 최적의 조절 성능을 갖춘 모델을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 저유량 환경에서 정압을 유지할 수 있는 정압 조절기를 설계하고 최적화하는 것을 목적으로 한다. 연구 방법으로는, 우선 밸브의 주요 구조를 3D 프린팅을 통해 다양한 형상으로 시제품화하고, 이를 통해 각 요소의 변화를 실험한다.

베르누이 방정식^[1-2]을 사용하여 정유량 밸브의 구조에 따른 압력구배 및 속도등을 계산할 수 있는데, 0.1 L/min은 상대적으로 낮은 유량이기 때문에 보다 정밀한 설계가 필요하다. 그림 2에 정압 조절기 세부 설계 주요요소를 표시하였다. 제품의 사용특성상 제어되는 공기의 상태는 음압 상태 이므로 밸브 누기가 있을 경우 외부의 공기가 유입되게 되고 이는



[그림 2] Low flow Constant Pressure Controller valve shape design

밸브 유량조절에 방해되는 요인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 밸브는 상판과 하판으로 나누고 내부에 실리콘 패드와 중간삽입물을 설치하고, 스프링을 이용하여 중간삽입물을 밀어 올려 실리콘 패드와 상판의 간격을 조정하여 유량을 조절하는 구조로 설계하였다.

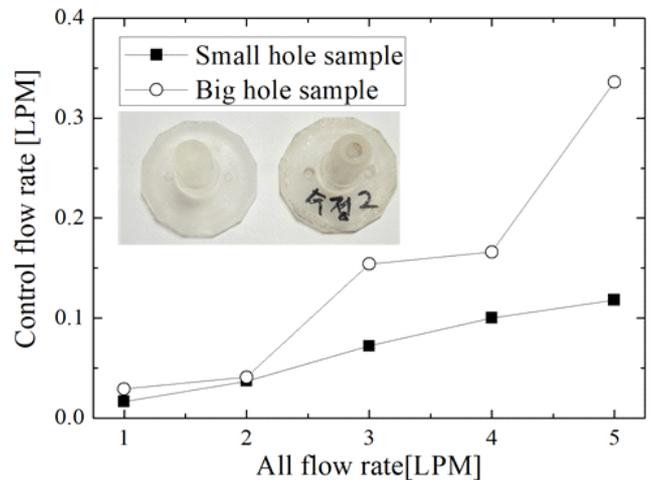
내부는 음압이기 때문에 상판에 홀을 통하여 외부 공기가 들어오게 되는데, 실리콘과 상판의 채널의 폭을 조절하여 유량을 세밀하게 조절할 수 있는 구조로 설계하였다.^[3]

첫째로, 상판의 외부 공기 유입 홀 크기를 조절하여 공기 유입량 변화가 전체 유량에 미치는 영향을 분석한다. 둘째, 하판 고정 볼트의 형상을 원형, 6각형, 12각형으로 다양화하여 볼트 형상이 공기 흐름과 유량 조절에 미치는 영향을 검토한다. 셋째, 스프링의 길이를 조절해 갭 간격을 변형함으로써 스프링 장력이 밸브의 개폐 및 유량 조절 성능에 미치는 영향을 시험한다. 넷째, 실리콘 패드의 재질을 달리하여 적용함으로써 유량 조절 성능에 대한 재질 특성의 영향을 평가한다. 마지막으로, 실리콘 패드의 홀 크기를 직경 1.0mm와 2.0mm로 변화시켜 이에 따른 유량 조절 변화를 비교하고 최적의 조합을 도출한다. 이를 통해 각 변수의 정압 조절 성능에 대한 최적화 조건을 파악하고자 한다.

3. 연구결과

3.1 상부 외부 유입 공기홀 크기 영향 검토

그림 3에는 유입 공기홀 변경에 따른 시험 결과가 보여진다. 바이패스 밸브에서 외기가 밸브 내부로 들어가는 부위는 제작된 정압조절기 상판에 위치하고 있다. 이 홀은 총 2개로 구성되어 있으며, 상판 좌,우로 180도 회전 간격으로 위치해 있다. 상판 외부홀이 바이패스 밸브 유량 조절에 있어서 어떤 영향이 있는지 실험을 진행하였다.



[그림 3] 상부 외부 유입 공기홀 크기 비교 그래프

외기가 들어오는 홀이 클수록 외기가 더 많이 유입되기 때문에, 더 좁은 범위에 유량 조절 가능함을 보인다. 오히려 내부 정압이 생기는 작은 홀이 유량 조절에 유리함을 보였다.

3.2 하부 스프링 조절 무드 볼트 영향 검토

그림 4에는 하부 스프링 조절 무드 볼트 영향에 대한 시험 결과를 나타내었다. 바이패스 밸브의 하판 공기 유입부에는 부속 볼트가 삽입되게 되는데, 볼트의 삽입 위치를 조절하여 밸브 내부에 있는 중간 모듈의 위치를 변화시킨다. 이 중간모듈에는 실리콘 패드가 부착되어 있어 내부 틈 조절을 하는 역할을 한다. 볼트는 내부에 홀이 있어 홀을 통하여 공기가 흐르게 된다. 본 실험은 볼트의 형상이 유량조절에 영향을 갖는지 확인하는 실험이다. 볼트의 모양을 원형, 6각형, 12각형 총 3가지 볼트로 바꾸어 가며 실험을 수행하였다.

3가지 볼트홀은 저유량에서 큰 차이를 보이지 않았다. 2LPM에서 전 구간 유량이 낮아지는 현상을 보이는데, 측정

범위가 미세하여 생긴 실험 오차로 판단된다. 저유량에서는 3가지 모양이 비슷함을 보이지만, 유량의 크기가 커질수록 원형에서 유리함을 보이고, 12각 6각은 전 구간에서 비슷한 결과를 보였다. 이를 바탕으로 검토를 하였을 때, 볼트의 구멍은 원형이 가장 적합함을 보인다.

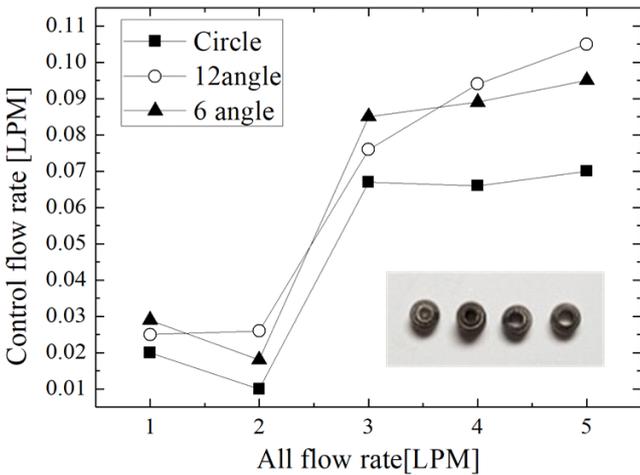
3.3 스프링 길이 영향 검토

그림 5에는 스프링 길이에 따른 시험 결과를 나타내었다. 정압 컨트롤러 내부에는 갭 조절기 모듈이 삽입되어 있는데, 갭 조절기는 실리콘을 떠받치는 구조로 정압컨트롤러 하판위에 놓여있고 간격을 스프링의 장력으로 조절하는 구조로 되어 있다. 스프링 선정에 있어서 기존에는 별다른 기준 없이 적당한 길이의 스프링을 사용하는 설정으로, 이에 스프링의 길이를 변화하여 탄성력 변화가 밸브 성능에 미치는 영향성을 검토하였다.

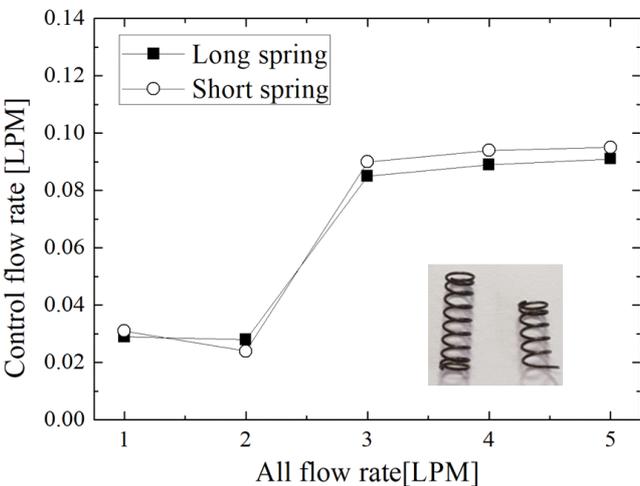
스프링의 탄성이 클수록 내부 정압이 크게 걸려 스프링의 길이가 긴 샘플의 성능이 높을 것으로 예측 되었으나, 실험결과 두 샘플의 최저 조절 유량이 거의 비슷함을 보였다. 이는 예상과 달리 스프링은 정압조절기 성능에 영향성은 있지만 지배적이지 못함으로 보인다. 따라서 정압 조절기에 사용되는 스프링은 기존 사용하는 스프링을 사용하는 것이 바람직해 보인다.

3.4 패드 재질별 영향

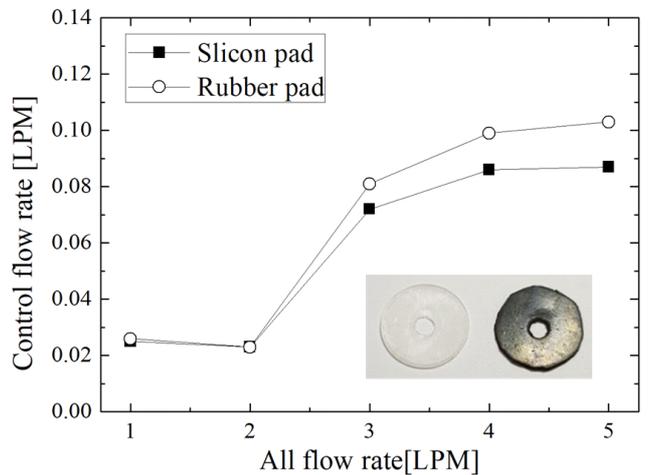
그림 6에는 패드 재질별 시험 결과를 나타내었다. 바이패스 밸브는 상판에 두 홀을 통하여 공기가 들어오게 된다. 유량 조절을 할 필요가 없을 때, 이 두 홀을 막아주어야 하는데 이때 내부에 들어있는 실리콘이 중간 모듈에 밀려 홀을 막게되고, 그 힘에 의해 공기의 유입을 막게된다. 반면, 유량 조절



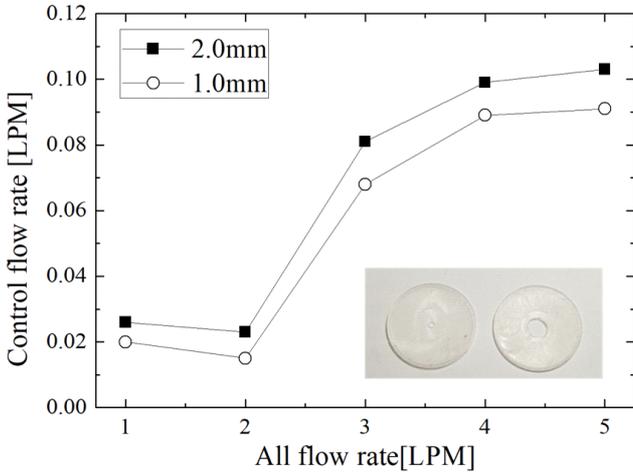
[그림 4] 하부 스프링 조절 무드 볼트 영향 비교



[그림 5] 스프링 길이 영향 비교



[그림 6] 패드 재질 영향 검토



[그림 7] 실리콘 홀 크기 영향 검토

을 할 때는 공기에 노출되어 있는데 실리콘의 재질이 밸브 성능에 영향이 있는지 검토하였다.

실험은 실리콘 패드와 고무패드 두 종류로 진행을 하였다. 차이는 미비하였지만, 실리콘이 고유량에서 보다 좋은 성능을 보였다. 또한 홀을 막을 때 실리콘의 신축성이 더 뛰어나기 때문에 누기에서도 유리함을 보였다. 따라서 내부 패드의 재질은 실리콘이 적합함을 보였다.

3.6 실리콘 홀 크기 영향성 검토

그림 7에는 실리콘 홀 크기에 대한 시험 결과를 나타내었다. 실리콘 홀 크기에 대한 영향성 검토를 진행하였다. 전산유체해석을 통하여 미리 검토하였지만 실제 실험을 통하여 보다 정확성을 높이고자 했다. 실리콘 홀은 직경 1.0mm, 2.0mm 두 경우에 대하여 실험을 진행하였다. 실험 결과 실리콘홀 1.0mm에서 더 유리함을 보였지만 그 차이는 미비하였다.

4. 결론

본 연구는 0.5 - 0.1 L/min의 저유량에서 안정적인 정압 조절을 달성할 수 있는 정압 조절기의 설계를 목적으로 주요 부품을 3D 프린팅으로 시제품화하고, 정압 조절 성능에 영향을 미칠 수 있는 다양한 조건들을 적용하여 실험을 수행하였다.

- (1) 상부 공기 홀의 크기에 따른 영향을 검토한 결과, 외기 유입 홀의 크기가 커질수록 외부 공기가 많이 유입되어 유량 조절이 가능 범위가 좁아짐을 확인하였다. 특히 작은 홀은 내부 정압을 형성하는데 유리하여 유량조절에 효과적임을 보였다.
- (2) 하부 스프링 고정 볼트의 형상(원형, 6각형, 12각형)에 따

른 유량 조절 성능을 비교한 결과, 저유량 조건에서는 형상에 따른 차이가 크지 않았으나, 고유량 조건에서는 원형 볼트가 가장 적합한 성능을 나타냈다.

(3) 스프링 길이의 영향 검토에서는 스프링의 탄성이 클수록 내부 정압이 커지면서 길이가 긴 스프링이 더 높은 성능을 보일 것으로 예상되었으나, 실험 결과 두 샘플의 최저 조절 유량이 비슷하게 나타났다. 따라서, 정압조절기 성능에 스프링 길이가 일정한 영향을 주지만 지배적이지 않음을 확인하였고, 기존 스프링을 사용하는 것이 바람직해 보인다.

(4) 패드 재질의 경우, 실리콘 패드와 고무 패드 사이 차이는 미미하였으나, 고유량 조건에서는 실리콘이 더 우수한 성능을 보였다. 또한, 실리콘의 높은 신축성 덕분에 누기 방지도도 유리하여 내부 패드 재질로 적합하다고 판단되었다.

(5) 실리콘 홀 크기 영향성 검토에서는 직경 1.0mm와 2.0mm 두 가지를 비교한 결과 1.0mm 직경이 더 유리한 것으로 나타났으나 차이는 크지 않았다.

결론적으로, 외부 공기 유입 홀이 작고, 스프링 길이가 길며, 실리콘 홀 크기가 작은 설계가 최적의 성능을 보였다.

[후기]

본 논문은 인하대학교 스마트제조고급인력양성사업 산학공동프로젝트 결과와 제조혁신전문대학원 석사학위논문 제출을 위해 발표한 논문입니다.

참고문헌

- [1] International Standard Iso 5167-1, "Measurement of flow by means of pressure differential device"
- [2] Flow Measurement Engineering Handbook, second edition
- [3] 유체역학 4판, Mc Graw Hill, 2021