



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

압력보상 이미터의 유체-구조 상호작용
기작에 대한 실험적·수치적 분석

**Experimental and Numerical Analysis on
Fluid-Structure Interaction Mechanism of
Pressure-Compensating Emitter**

2023년 2월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부
지역시스템공학전공
서 병 훈

압력보상 이미터의 유체-구조 상호작용
기작에 대한 실험적·수치적 분석

**Experimental and Numerical Analysis on
Fluid-Structure Interaction Mechanism of
Pressure-Compensating Emitter**

지도교수 최 원

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023년 1월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공
서 병 훈

서 병 훈의 석사 학위논문을 인준함
2023년 1월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

지구 온난화로 인해 기후 변화가 촉진되고 수자원 안정성이 위협받고 있으며, 농업에서는 작물이 필요로 하는 물의 양이 증가할 것으로 예상된다. 점적 관개 시스템은 개별 작물 위치에 물을 직접 공급하여 작물의 품질 향상 및 생산량을 높이고 효율적인 물 소비가 가능하게 하는 관개 방법이다. 점적 관개는 수원에서 멀어지면서 관 내부의 압력이 저하되고 유출 유량이 불균일한 문제가 있으나, 점적 관에 부착된 압력보상 이미터는 불균일한 압력에도 균일한 유량을 유지하여 이러한 문제를 해결할 수 있다. 미래 정밀 관개를 위해서는 공급 압력 범위에서 목표 유량을 나타내는 압력보상 이미터 설계가 필수적이며, 설계 최적화에 앞서 원리 도출과 신뢰성 있는 성능 예측이 필수적이다. 그러나, 압력보상 이미터는 작은 크기로 인해 내부 탄성막과 용수의 상호작용 기작을 실험적으로 관찰하는 것이 어려우며, 내부 탄성막과 용수가 변형되기 때문에 전산유체역학 해석에 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 해결하기 위해 상사 법칙을 적용한 압력보상 이미터의 확대 모형 실험과 양방향 유체-구조 연계해석 모형을 설계하였으며, 이를 통해 압력보상 이미터의 유체와 구조 상호작용 기작을 분석하였다. 확대 모형 실험 결과에서 압력보상 이미터 성능에는 변형된 탄성막에 의한 유출구 시작부 단면적 감소가 주요한 것으로 분석되었다. 또한, 압력보상 이미터 형상에 따라 유량의 급격한 감소를 유도하는 탄성막 진동 현상이 발생하여, 이에 대한 방지 설계가 필요한 것으로 판단되었다. 압력보상 이미터의 설계 변경에 따른 성능 영향을 관찰하기 위해, 대상 압력보상 이미터 (Case 1), 미로 유로 형상 (Case 2)과 탄성막 강성 (Case 3)이 변경 설계된 모형 실험과 양방향 유체-구조 연계해석 결과를 비교하였다. 이를 통해, 미로 유로 형상의 변화는 최대 유출 유량의 변경에 주

요한 영향을 미치며, 탄성막 강성의 변화는 압력보상 구간을 이동시키고 넓이를 변경시키는데 주요한 것으로 분석되었다. 양방향 유체-구조 연계해석 모델을 이용하여 최대 유출 유량이 나타나는 압력 구간까지 실험과 10 % 이내 오차로 예측 가능하였다. 수치해석 결과, 압력보상 구간 성능에는 챔버 영역의 압력 저하와 난류 운동 에너지 손실이 주요하였으며, 내부 미로 유로, 탄성막 강성과 챔버 치수가 주요 설계인자로 판단되었다. 원형 크기로 환산된 Case 1·2·3 의 압력보상 구간은 각각 1.54 - 3.84, 1.28 - 3.65와 1.86 - 4.67 bar, 최대 유량은 각각 3.62, 2.90과 4.13 L/hr로 상이하게 나타났으며, 이를 고려하여 압력보상 구간이 대상지 지형과 가압 조건에 따른 지점별 수두를 포함하면서 최대 유량이 작물 최적 유량을 만족하는 압력보상 이미터 설계가 가능할 것으로 판단된다. 추후, 본 연구의 분석 결과를 바탕으로 압력보상 이미터의 성능 예측 모델을 개선하고, 농경지 조건에 적합한 최적의 점적 관개 시스템을 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 압력보상 이미터, 상사 법칙, 모형 실험, 양방향 유체-구조 연계해석, 점적 관개 시스템

학 번 : 2021-22890

목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적	5
제 2 장 연구사	7
2.1 이미터의 실험적 연구	7
2.2 이미터의 수치해석 연구	9
2.3 상사 법칙에 의한 모형 실험	12
제 3 장 재료 및 방법	13
3.1 연구 대상	13
3.1.1 대상 압력보상 이미터	13
3.1.2 설계 인자별 압력보상 이미터 모델링	14
3.2 확대 모형 실험	17
3.2.1 수리학 상사성 검토	17
3.2.2 탄성막 상사성 검토	20
3.2.3 실험 설정	23
3.3 양방향 유체-구조 연계해석 모델	27
3.3.1 양방향 유체-구조 연계해석	27
3.3.2 전산유체역학 설정	30
3.3.3 구조해석 설정	36
3.3.4 해석 솔버 및 요소망 설정	37
제 4 장 결과 및 고찰	39

4.1 유체-구조 상호작용 기작의 실험적 분석	39
4.1.1 압력보상 이미터 확대 모형의 배율 결정	39
4.1.2 확대 모형 실험 결과 분석	41
4.1.3 압력보상 이미터 설계 인자 영향 분석	48
4.2 유체-구조 상호작용 기작의 수치적 분석	51
4.2.1 양방향 유체-구조 연계해석 예측 정확성 검증	51
4.2.2 유체-구조 영역의 국부적 거동 분석	55
4.3 압력보상 이미터 최적 설계 인자 고찰	65
제 5 장 요약 및 결론	67
참고문헌	69
Abstract	78

List of Tables

Table 3.1 Properties of elastic membrane in pressure-compensating emitter.	22
Table 3.2 Statistical parameters for meshing algorithms.	38
Table 4.1 Physical variables equation between original and enlarged model of pressure-compensating emitter.	41
Table 4.2 Statistical analysis of model experiment and simulation result.	55
Table 4.3 Performance specifications of commercial pressure-compensating emitters (Netafim, 2022; Jain Irrigation Systems, 2022; Rivulis Irrigation, 2022; Metzger, 2022; Namkyung, 2022).	65

List of Figures

Fig. 1.1 Schematic of drip irrigation system.	1
Fig. 1.2 Schematic of non pressure-compensating emitter and pressure-compensating emitter attached to drip irrigation pipe (Netafim Co., Ltd.).	2
Fig. 1.3 Flow chart of the study.	6
Fig. 3.1 Schematic of target pressure-compensating emitter and main components of emitter.	14
Fig. 3.2 Schematic of pressure-compensating emitter attached to drip irrigation pipe.	14
Fig. 3.3 Schematic of target pressure-compensating emitter according to design parameter.	16
Fig. 3.4 Schematic of hydraulic experiment setup for enlarged model of pressure-compensating emitter.	24
Fig. 3.5 Microscope camera setting for measurement of deformation.	25
Fig. 3.6 Measurement method of maximum deformation and gap between membrane and outlet.	26
Fig. 3.7 Process of two-way fluid-structure interaction analysis.	28
Fig. 3.8 Domain setting for two-way fluid-structure interaction analysis.	30
Fig. 3.9 Outlet flow rate against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter according to computational fluid dynamics model.	34
Fig. 3.10 Boundary conditions of computational fluid dynamics for two-way fluid-structure interaction analysis.	35

Fig. 3.11 Boundary conditions of structure analysis for two-way fluid-structure interaction analysis.	36
Fig. 3.12 Outlet flow rate against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter according to algorithms of building mesh.	38
Fig. 4.1 Outlet flow rate against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter with 5:1 scale.	39
Fig. 4.2 Enlarged model of pressure-compensating emitter.	40
Fig. 4.3 Outlet flow rate against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter by experiment.	43
Fig. 4.4 Deformation against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter according to measurement point by experiment.	43
Fig. 4.5 Comparison on side view of deformed elastic membrane at stationary and catastrophe phase.	44
Fig. 4.6 Outlet flow rate against inlet pressure of case 2 pressure-compensating emitter by experiment.	46
Fig. 4.7 Deformation against inlet pressure of case 2 pressure-compensating emitter according to measurement point by experiment.	46
Fig. 4.8 Outlet flow rate against inlet pressure of case 3 pressure-compensating emitter by experiment.	47
Fig. 4.9 Deformation against inlet pressure of case 3 pressure-compensating emitter according to measurement point by experiment.	47
Fig. 4.10 Comparison of outlet flow rate against inlet pressure according to type of pressure-compensating emitter by experiment.	50
Fig. 4.11 Comparison of maximum deformation against inlet pressure according to type of pressure-compensating emitter by experiment. ..	50
Fig. 4.12 Comparison of outlet flow rate against inlet pressure according to type of pressure-compensating emitter by experiment	

t and simulation.	53
Fig. 4.13 Comparison of maximum deformation against inlet pressure according to type of pressure-compensating emitter by experiment and simulation.	54
Fig. 4.14 Contour plots for deformation of elastic membrane at maximum inlet pressure according to cases and view.	57
Fig. 4.15 Comparison of maximum deformation against effective pressure to elastic membrane by fluid-structure interaction and structure analysis.	58
Fig. 4.16 Contour plots of fluid pressure at side view according to inlet pressure and cases.	60
Fig. 4.17 Contour plots of streamline at top view according to inlet pressure and cases.	61
Fig. 4.18 Contour plots of kinetic turbulence energy at front view according to inlet pressure and cases.	63
Fig. 4.19 Contour plots of kinetic turbulence energy at side view according to inlet pressure and cases.	64

제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

점적 관개 시스템 (Drip irrigation system)은 노지 및 시설 농업에서 일정 간격으로 구멍이 뚫려있는 점적 관을 통해 개별 작물의 위치에 직접 물을 공급하는 관개 방식이다 (Fig. 1.1). 작물로 유출되는 용수의 유량은 점적 관벽에 부착되는 이미터 (Emitter)에 의해 정밀하게 조절되며, 이미터는 비압력보상 (Non pressure-compensating) 이미터와 압력보상 (Pressure-compensating) 이미터로 나뉜다 (Fig. 1.2). 비압력보상 이미터의 구조는 미로 (Labyrinth) 형태의 점적 관에서 용수가 들어오는 유입구 (Inlet), 내부 유로 (Channel)와 유출구 (Outlet)로 이루어져 있으며, 압력보상 이미터는 유입구로 들어오는 용수 압력에 의해 변형되어 유출구를 막는 탄성막 (Elastic membrane)이 추가된 이미터이다.

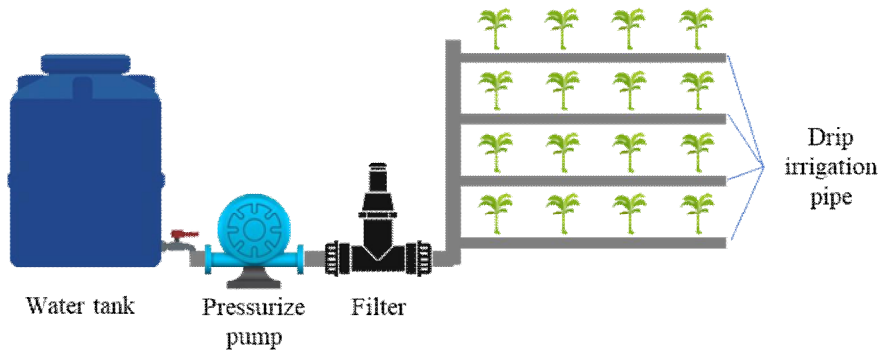
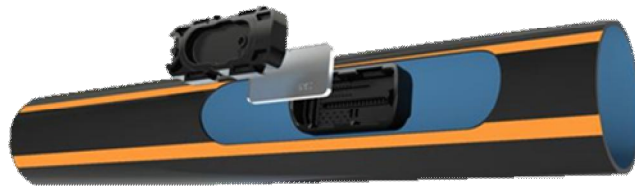


Fig. 1.1 Schematic of drip irrigation system



(a) Non pressure-compensating emitter



(b) Pressure-compensating emitter

Fig. 1.2 Schematic of non pressure-compensating emitter and pressure-compensating emitter attached to drip irrigation pipe (Netafim Co., Ltd.).

전 세계적인 지구 온난화로 작물이 필요로 하는 물의 양이 증가할 것으로 예상되며 (Nikolaou et al., 2020), 기후 변화로 인해 연중 강수량 분포가 불규칙해지면서 수자원 안정성이 악화되고 있다. 점적 관개 시스템은 개별 작물의 위치에 물을 분배하여, 효율적인 물 공급과 작물 수분 스트레스의 정밀한 조절이 가능하기 때문에 개별 작물의 품질과 생산량을 높일 수 있는 관개 방법이다 (Iqbal et al., 2014; Burney et al., 2010). 초기에 사용되었던 비압력보상 이미터는 점적 관에서 내부로 유입되는 용수가 미로 유로를 지나며 압력이 저하되는 원리로 유출 유량을 조절하며, 비압력보상 이미터의 유입 압력에 따른 유출 유량이 거듭제곱의 관계식으로 나타난다고 다양한 실험적 연구에서 보고되었다 (Keller et al., 1974). 그러나, 점적 관 내부의 용수 압력은 수원지에서 멀어지면서 점적 관벽과의 마찰 및 용수 유출로 인해 점점 감소하게 되며, 이에 따라 작물에 공급되는 물의 양도 점차 감소하게 된다. 또한, 관개 대상지의 지형이 고르지 않을 경우 각 지점별 위치 수두가 균일하지 않으며,

이로 인한 불균일한 관개는 작물의 수분 스트레스로 이어져 생장이 저하되고 수확량 예측을 어렵게 한다 (Hsiao et al., 1976). 압력보상 이미터는 균일한 유출 유량을 공급하여 이러한 한계를 해결할 수 있으며, 압력보상이란 이미터 내부 용수와 탄성막이 상호작용하여 불균일한 압력상태에서도 균일한 유출 유량을 나타내는 기작을 의미한다.

압력보상 이미터를 용도에 따라 설계하는 연구들이 수행되었다. 초기에는 설계한 이미터가 부착된 점적 관에 펌프로 압력을 가하고, 측정된 유출 유량의 균일한 정도를 비교하여 최적 이미터를 결정하는 경험적 방식으로 연구가 이루어졌다. 그러나 이미터의 경험적 설계 방식은 대상지의 다양한 조건을 반영하기에는 시간과 비용 측면에서 한계가 있다. 미래에는 정밀한 센서, 원격 통신과 데이터 사이언스 기술을 통해 정밀 농업이 발전할 것으로 예상되며, 작물 생육 정보를 바탕으로 작물의 필요 수량을 정밀하게 공급하기 위해 압력보상 이미터의 유입 압력과 유출 유량 관계를 정확하게 예측하고 설계하는 것이 필수적이다.

컴퓨터의 발달로 빠른 반복 계산이 용이해지면서 수치해석 기법으로 복잡한 문제의 근사해를 구하는 방법이 연구되었다. 물과 대기 등 유체의 물리적 인자를 계산하는 전산유체역학 (Computational fluid dynamics) 해석에 의한 비압력보상 이미터의 유입 압력과 유출 유량 관계 예측 연구가 수행되었으며, 실험과의 비교를 통해 예측이 비교적 정확하다고 보고되었다. 그러나, 압력보상 이미터는 내부 용수에 의해 탄성막이 변형되고, 용수와 유출구가 상호작용하기 때문에 전산유체역학에 의한 해석에 한계가 있다.

유체-구조 연계 (Fluid-structure interaction) 해석은 유체와 구조해석의 결과를 연계하는 수치해석 방법으로 압력보상 이미터의 거동을 더 자세하게 반영할 수 있다. 유체-구조 연계해석에서는 유체해석에 의한 압력과 점성력을 유체와 구조 영역이 접촉하는 면을 통해 구조해석에 전달하며, 전달된 힘에 대한 구조해석의 변형 속력을 유체해석에 전달하는 과정을 반복하여 근사해를 계산한다. 유체해석의 힘의 구조해석 전달만을 고려하는 단방향 유체-구조 연계해석을 이용하여 압력보상 이미터

성능을 예측하는 연구가 수행되었으나, 압력보상 현상이 일어나는 압력 구간의 해석 정확성이 떨어지고 내부 탄성막의 구조해석 결과 검증이 부재하였다. 압력보상 이미터의 유입 압력과 유출 유량 관계 예측을 위해서, 유체와 구조해석 결과의 상호교환을 고려하는 양방향 유체-구조 연계해석 모델 개발이 필수적이다.

반복계산을 통해 해를 근사하는 수치해석 모델은 실제 현상에서 관찰된 결과로 검증되어야 하며, 실험을 통한 압력보상 이미터 내부 탄성막의 거동 관찰이 필수적이다. 압력보상 이미터는 일반적으로 최대 변의 크기 20 mm 이하의 작은 크기로 제작되며, 이로 인해 내부 막의 변화 관찰이 어렵다. 연구자들은 관찰이 어려운 현상을 상사 법칙을 적용한 모형 실험을 통해 재현하였으며, 현상의 물리적 특성을 반영하는 무차원 수가 일치하면 실제 현상과 동치인 모형 실험을 설계할 수 있다. 기존에는 대부분의 모형 실험들이 현상의 크기를 축소하거나 유체와 구조 등한 가지의 물리학에 대해서만 고려하였으나, 압력보상 이미터에 상사 법칙을 적용하여 확대 모형 실험을 설계할 수 있을 것으로 생각된다.

1.2 연구 목적

본 연구는 압력보상 이미터의 내부 용수와 탄성막 상호작용 기작의 원리 도출을 최종 목표로 한다. 압력보상 이미터의 유체-구조 상호작용 기작 원리 도출을 위하여, 상사 법칙을 적용한 확대 모형 실험을 수행한다. 또한, 압력보상 이미터의 양방향 유체-구조 연계해석 모델 개발하고, 압력보상 이미터의 국부적인 거동을 분석한다. 이를 위해, 연구의 세부 목표를 Fig. 1.3과 같이 나누었다. 먼저, 압력보상 이미터의 탄성막과 용수의 이론적 거동을 바탕으로 이를 반영하는 무차원수를 결정하며, 압력보상 이미터의 원형과 무차원수를 일치시킨 확대 모형 실험을 설계한다. 압력보상 이미터의 모형 실험 결과를 바탕으로 유입 압력에 따른 유출 유량과 탄성막 변형 사이의 상호작용 기작을 분석하고, 압력보상 이미터 설계 인자의 성능에 대한 영향을 분석한다. 압력보상 이미터의 이론적 거동을 바탕으로 양방향 유체-구조 연계해석 모델의 경계조건과 전산유체역학 및 구조해석 모델을 결정하며, 해석 모델로 예측한 결과를 모형 실험 결과와 비교하여 예측 정확성과 해석 모델의 신뢰성을 검증한다. 해석 모델의 유체·구조해석 결과를 통해 탄성막 변형에 따른 유체 영역의 국부적인 변화를 분석한다.

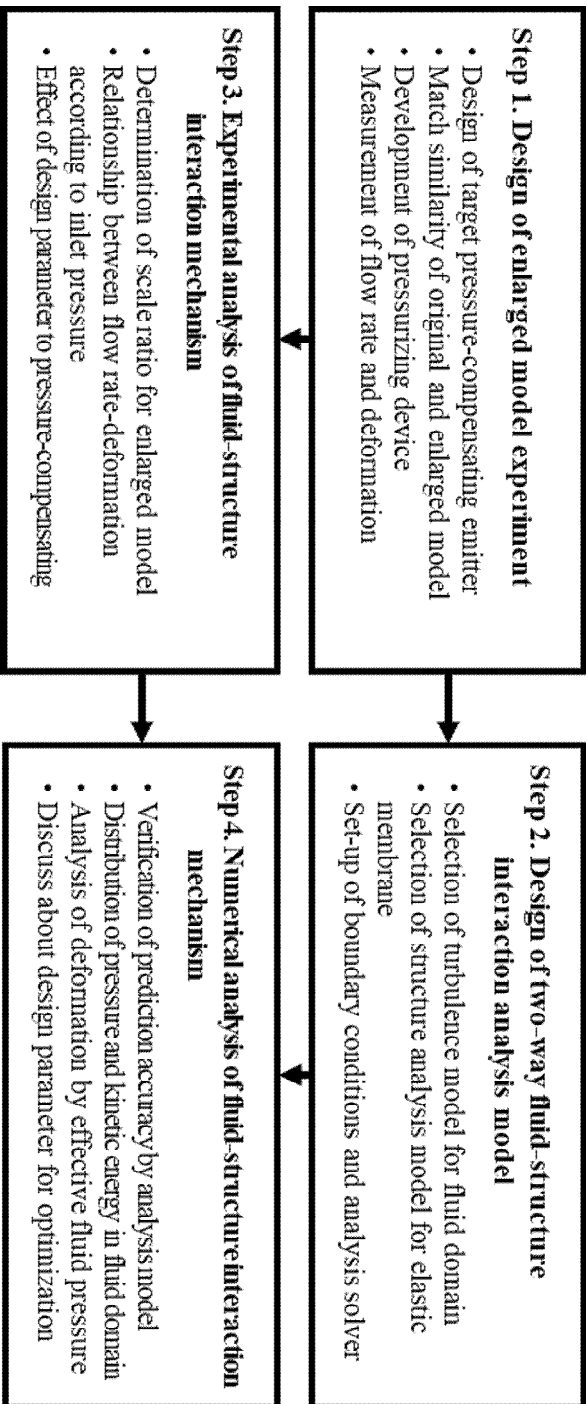


Fig. 1.3 Flow chart of the study.

제 2 장 연구사

2.1 이미터의 실험적 연구

점적 관개 시스템은 일정 간격의 구멍이 뚫려있는 점적 관에 부착된 이미터를 통해 이루어진다. 점적 관의 시작 지점에서 펌프로 압력이 가해진 물이 흘러 각 지점의 유출구로 빠져나가고, 이로 인해 압력이 저하되면서 시작 지점에서 멀어질수록 유출 유량이 감소한다. 점적 관의 압력 저하 특성을 제시하는 연구가 수행되었으며, 평지인 지형에서 점적 관 시작 지점에 가해지는 표준 압력과 이미터 간격별로 다르게 나타나는 압력 저하 특성과 관개 균일성을 수리학 실험을 통해 제시하였다. Bagarello et al. (1997)은 점적 관 각 지점 이미터의 압력 저하를 Obstruction Index (OI)로 계산하고, 점적 관의 압력 저하 특성을 시작 지점 용수의 레이놀즈 수에 따라 제시하였다. Safi et al. (2007)와 Nam et al. (2012)은 평지에서 상용 점적 관별로 가해진 압력 조건과 이미터 간격에 따른 압력 손실 계수와 관개 균일성 지표를 제시하였다. 그러나, 점적 관의 수리학 실험 연구는 주로 평탄한 경사와 정해진 가압 조건에서 수행되었으며, 이로 인해 실제 농업에서의 활용성이 떨어졌다.

점적 관의 압력 저하와 관개 균일성은 적용 대상지의 가압 조건, 지형과 부착되는 이미터에 따라 상이하기 때문에 이미터로 유입되는 압력에 따른 유출 유량 특성을 수리학 실험으로 분석하는 연구가 수행되었다. Keller et al. (1974)는 다양한 비압력보상 이미터의 수리학 실험 결과를 통해, 유입 압력에 따른 유출 유량 관계식이 이미터별 2 가지의 특성 계수로 나타난다고 보고하였으며, Li et al. (2006)과 Provenzano et al. (2005)는 내부 유로의 형상이 다른 비압력보상 이미터의 수리학 실험을 수행하여 각 이미터의 특성 계수를 제시하였다. Wei et al. (2003)은 비압력보상 이미터의 3차원 CAD 도면을 설계하고 이미터 특성 계수를 위한 수리학 실험 방법을 제시하였으며, 비압력보상 이미터의 유로 설계

인자를 변경하고, 수리학 실험을 수행하여 최적 설계안을 제시하는 연구가 수행되었다 (Souza et al., 2014; Li et al., 2009).

내부에 탄성막이 있어 압력에 따른 유량 관계가 특성 계수로 나타나지 않는 압력보상 이미터에 대한 수리학 실험 연구가 수행되었다. Sokol et al. (2019)는 상용 압력보상 이미터의 수리학 실험을 수행하여 가압 조건이 낮은 최적의 압력보상 이미터를 결정하였으며, Kim et al. (2018)은 내부 탄성막의 경도를 변경한 상용 압력보상 이미터의 수리학 실험을 통해 압력에 따른 유량 관계의 영향을 분석하였다. 또한, Al-agele et al. (2021)은 농경지에서 실시간 유량을 측정하기 위한 시스템이 결합된 압력보상 이미터의 수리학 실험을 수행하였다.

수리학 실험 연구를 통해 이미터의 특성 계수를 제시하였으며, 이미터 특성 계수를 바탕으로 상대적으로 적합한 이미터를 선택할 수 있다. 그러나, 수리학 실험은 다양한 농경지 조건에 최적인 이미터를 설계하는데 활용하기에는 효율성이 떨어진다.

2.2 이미터의 수치해석 연구

컴퓨터 기술의 발달과 함께 유체역학 문제의 근사해를 반복 계산하여 구하는 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics) 수치해석이 도입되었으며, 이를 활용한 연구가 수행되었다. 비압력보상 이미터 내부의 압력 저하, 속도 분포 및 난류 형성 등을 전산유체역학으로 분석하는 연구가 수행되었다. Zhang et al. (2011)과 Wang et al. (2012)는 전산유체역학을 이용하여 상용 비압력보상 이미터를 해석하고 특성 계수를 제시하였으며, 수리학 실험을 통해 수치해석 결과를 검증하였다. Zhang et al. (2007)은 비압력보상 이미터의 난류 정도와 분포를 분석하기 위하여, 층류와 난류 모델의 예측 정확성을 비교하고 LDV (Laser-Doppler Velocimetry)를 이용하여 유로에서의 국부적인 난류 분포를 분석하였다. Demir et al. (2007; 2019)는 전산유체역학을 통해 비압력보상 이미터 내부 유체의 벽면 마찰에 의한 압력 손실 정도를 분석하였으며, 인라인 (in-line) 비압력보상 이미터의 경우 수리학 실험 결과에 비하여 최대 1.7%의 오차를 보인다고 보고하였다. 또한, Al-Muhammad et al. (2016)는 비압력보상 이미터 내부 흐름의 난류 정도를 파악하기 위하여, 난류 강도의 크기별 난류 모델의 해석 결과를 비교하였다.

전산유체역학을 이용하여 비압력보상 이미터의 압력에 따른 유량 관계와 원리를 해석하였으며, 비압력보상 이미터의 성능을 예측하는 연구가 수행되었다. Celik et al. (2011)은 상용 비압력보상 이미터의 유로의 모서리 형상을 수정하고 전산유체역학으로 해석하였으며, 수리학 실험 결과와 비교하여 예측 정확성을 검증하였다. Wei et al. (2006)은 유로 형상이 다른 3 가지의 비압력보상 이미터의 성능을 예측하고 실험으로 검증하였으며, 수치해석 결과를 분석하여 압력과 유속 측면에서 유로 형상의 영향을 분석하였다. Feng et al. (2018)은 $k-\varepsilon$ 난류 모델로 비압력보상 이미터를 해석하였으며, 수리학적 성능과 막힘 방지 측면에서 최적의 유로 형상을 결정하였다.

비압력보상 이미터의 성능 예측이 비교적 정확한 전산유체역학과 최

적화 기법을 이용하여 비압력보상 이미터의 설계를 최적화하는 연구가 수행되었다. Mattar and Alamoud (2015)는 전산유체역학과 인공신경망 (Artificial Neural Networks)을 연계하여 이미터의 흐름 변동과 변동 계수에 대하여 설계를 최적화하였으며, Mattar et al. (2020)는 인공신경망과 유전 알고리즘을 연계하여 비압력보상 이미터 설계를 최적화하였다. 또한, Chen et al. (2022)는 기계학습 (Machine Learning)과 RSM을 이용하여 비압력보상 이미터 설계를 최적화하였다.

한편, 압력보상 이미터는 내부의 탄성막이 유체 압력에 의해 변형되어 비압력보상 이미터의 압력에 따른 유량 관계와 다르게 나타나며, 전산유체역학에 의한 해석 정확성이 떨어진다. 유체-구조 연계해석은 전산유체역학과 구조해석의 해석 결과를 교환하는 방식의 수치해석으로 이론적으로는 압력보상 이미터의 해석에 더 적합하다. 유체와 구조해석 결과를 교환하는 방식에 따라 단방향과 양방향 유체-구조 연계해석으로 구분되며, 단방향 유체-구조 연계해석을 이용하여 압력보상 이미터를 해석하는 연구가 수행되었다. Wang et al. (2012)와 Wei et al. (2014)는 압력보상 이미터를 단방향 유체-구조 연계해석으로 해석하였으나 해석 정확성이 떨어졌으며, 유체와 탄성막 상호작용의 원리로 탄성막의 변형이 느려지는 구간에서 압력에 따른 유량 증가가 느려진다는 점만을 보고하였다.

양방향 유체-구조 연계해석은 유체와 구조해석 결과를 상호교환하는 방식의 수치해석으로 단방향 유체-구조 연계해석에 비하여 압력보상 이미터의 원리를 잘 반영한다. Zhou et al. (2013)과 Kang et al. (2022)는 양방향 유체-구조 연계해석을 이용하여 압력보상 이미터를 해석하였으며, 유량이 균일해지는 압력보상 구간 이전까지 해석하여 높은 예측 정확성을 보고하였다. Chen et al. (2021)은 유체 압력에 의해 변형된 탄성막이 유출구에 닿기 전까지 양방향 유체-구조 연계해석으로 해석하고, 나머지 구간을 단방향 유체-구조 연계해석으로 해석하였다. 해당 연구에서는 탄성막 변형의 증가가 느려지는 압력 구간부터 유량 증가가 유의미하게 감소한다고 보고하였으나, 압력보상 구간의 예측 정확성이 비교적 떨어지고 구조해석에 의한 탄성막 변형 예측 결과의 검증이 부재하였다.

또한, 유체-구조 연계해석을 이용하여 분석한 압력보상 이미터의 유체와 탄성막 상호작용 기작을 상이하게 보고하였다.

양방향 유체-구조 연계해석은 수치해석의 비선형성이 많아 해석 시간이 최대 20시간까지 걸리는 등 효율성 측면의 한계가 존재한다 (Sokol et al., 2022). 압력보상 이미터의 설계 최적화를 위하여 시간 측면에서 효율적인 매개변수 모델 연구가 수행되었다. 압력보상 이미터의 매개변수 모델은 유체 영역을 1차원으로 가정하여, 압력에 따른 유량의 관계식과 매개변수로 나타내는 모델이다. Philipova et al. (2011)은 비압력보상 이미터의 형상과 관련된 유입 압력-유량 회귀 관계식과 매개변수로 나타내었으며, Shamsbery et al. (2017)은 압력보상 이미터의 탄성막이 유출구와 접촉하는 지점을 경계로 매개변수를 나누어 1차원 유체해석과 선형 거동 범으로 가정된 탄성막의 구조해석을 연계하는 매개변수 모델을 개발하였다. 해당 매개변수 모델을 이용하여 특정 지점까지는 비교적 높은 예측 정확성을 보였으며, 기개발한 매개변수 모델과 유전 알고리즘을 이용하여 특정 가압 조건에 적합한 최적의 압력보상 이미터를 설계하였다 (Shamsbery and Winter, 2018). Narain and Winter (2019)는 Shamsbery et al. (2017)의 매개변수 모델의 계산 효율성을 개선하였으며, Sokol et al. (2022)는 탄성막 굽힘 거동을 구조해석하는 매개변수 모델을 연구하였다. 그러나, 매개변수 모델의 예측 결과에서 압력보상 구간의 예측 정확성이 비교적 떨어졌으며, 이는 유체 압력에 의해 변형되는 탄성막 거동을 이론적으로 가정하였기 때문으로 사료된다.

2.3 상사 법칙에 의한 모형 실험

압력보상 이미터는 가장 긴 변의 길이가 0.05 m 이하, 탄성막 두께가 0.001 m 이하의 작은 크기로 제작되며, 이로 인해 유체 압력에 의해 변형되는 탄성막의 관찰 및 상호작용 기작을 실험적으로 도출한 연구가 전무하였다. 연구자들은 현상의 관찰에 한계가 있는 경우, 상사 법칙을 적용한 모형 실험을 설계하여 간접적으로 현상을 관찰하였다 (Weigand and Simon, 2007). 상사 법칙을 적용한 모형 실험을 이용하여 관찰이 어려운 물의 거동을 분석하였으며, Jung et al. (2012)는 하천에 인공섬을 설치하였을 때 하천 흐름의 변화를 관찰하기 위하여 개수로 흐름에 관한 무차원 수인 프루드 수 (Froude number)에 대한 상사성 검토를 바탕으로 축소 모형 실험을 수행하였다. Park et al. (2017)은 하천에 설치되는 저류조에 퇴적되는 입자 제거를 위한 이동식 버킷의 성능을 도출하기 위하여 축소 모형 실험을 설계하였다. 또한, 구조물의 외부 부하에 의한 영향을 모형 실험을 통해 관찰할 수 있으며, Chen et al. (2013)은 콘크리트 댐의 단면을 축소한 모형 실험을 설계하여 지진에 의한 영향을 관찰하였다. 연구자들은 바람에 의한 구조물의 영향을 관찰하기 위하여 모형 실험을 수행하였다. Lee et al. (2000)과 Kim et al. (2019)는 온실이 받는 풍하중의 풍압계수를 산정하기 위하여, 이를 전산유체역학으로 해석하고 풍동에서의 축소된 모형 실험을 통해 검증하였다. 또한, Kwon et al. (2016)은 강풍이 많이 부는 해안가에 위치한 온실의 풍하중 영향을 관찰하기 위하여, 대기의 난류 강도와 풍속에 대한 상사성 검토를 바탕으로 축소 모형 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 관찰이 어려운 압력보상 이미터의 유체 압력에 의한 탄성막 변형을 관찰하고, 상호작용 기작을 분석하기 위하여 상사 법칙을 적용한 확대 모형 실험을 설계한다. 이를 통해, 압력보상 이미터의 유체와 탄성막 상호작용에 의한 압력보상 원리를 도출하며, 확대 모형 실험 결과를 바탕으로 양방향 유체-구조 연계해석의 결과를 검증한다.

제 3 장 재료 및 방법

3.1 연구 대상

3.1.1 대상 압력보상 이미터

압력보상 이미터를 설계하는 방식은 연구자나 기업마다 서로 상이하며 (Chamba et al., 2019), 국외의 대표적인 4 개의 점적 관개 시스템 기업 (Netafim Co., Ltd., Israel; Jain Irrigation Systems Co., Ltd., India; Rivulis Co., Ltd., Israel; Chinadrip Irrigation Equipment Co., Ltd., China)과 국내 기업 (Namkyung Co., Ltd., Korea)의 상용 압력보상 이미터 형태를 분석하였다. 상용 압력보상 이미터는 공통적으로 유입구 (Inlet), 미로 유로 (Labyrinth channel), 탄성막 (Elastic membrane), 챔버 (Chamber), 랜드 (Land)와 유출구 (Outlet)로 구성된다. 유입구는 주로 그물 형태 (Net-type)로 제작되며, 유입되는 용수의 압력을 1차적으로 저하시키고 용수 내에 존재하는 부유물질을 여과하는 역할을 한다. 미로 유로는 유입구를 통과하여 들어온 용수의 압력을 주요하게 저하시키며, 유출되는 유량은 미로 유로의 형태에 따라 상이하게 나타난다. 챔버, 랜드와 유출구는 탄성막을 경계로 유입구의 반대편에 위치하며, 탄성막은 유입구로 들어온 용수 압력이 증가함에 따라 점차 변형되어 유출구로 빠져나가는 용수의 유출을 방해한다. 압력보상 이미터를 지나며 유량이 조절된 용수는 점적 관과 직접 연결된 유출구를 통해 지표로 빠져나간다 (Fig. 3.2). 본 연구에서는 위에서 서술한 공통적인 구성 요소를 포함하는 압력보상 이미터를 설계하고, 이를 연구 대상으로 하였다 (Fig. 3.1).

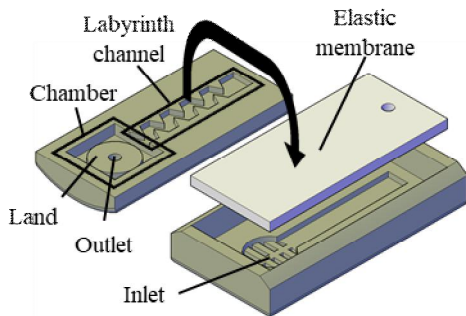


Fig. 3.1 Schematic of target pressure-compensating emitter and main components of emitter.

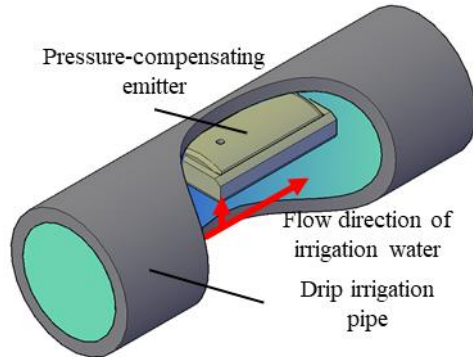


Fig. 3.2 Schematic of pressure-compensating emitter attached to drip irrigation pipe.

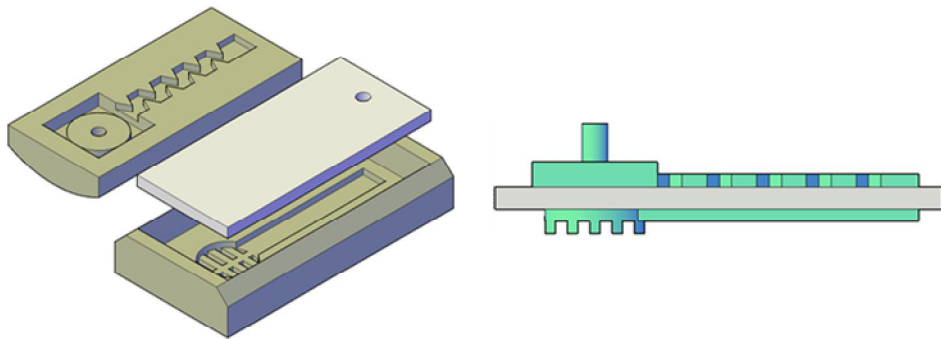
3.1.2 설계 인자별 압력보상 이미터 모델링

Kim et al. (2018)은 탄성막 경도가 다양한 상용 압력보상 이미터의 수리학 실험을 수행하여 수리학적 성능이 상이하게 나타난다고 보고하였으며, 많은 이미터의 실험과 수치해석 연구에서 미로 유로 형태에 따라 수리학적 성능이 상이하게 나타난다고 보고하였다. 이를 고려하면, 압력보상 이미터의 탄성막 강성과 미로 유로 형태 등의 설계 인자에 따라 내부 유체와 구조 상호작용 기작이 상이하게 나타날 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 선행 연구 결과에 따라 주요 설계 인자로 예상되는 미로 유로 형태와 탄성막 강성이 다른 압력보상 이미터를 모델링하였으며, 압력보상 이미터 확대 모형의 내부를 통과하는 유체 영역과 탄성막을 Fig. 3.3에 나타내었다. 연구 대상인 상용 압력보상 이미터를 Case 1으로 하였으며 (Fig. 3.3 (a)), Case 1 압력보상 이미터의 미로 유로 형태를 변경하여 설계한 것을 Case 2로 하였다 (Fig. 3.3 (b)). 힘을 받는 물체가 이에 저항하여 나타나는 응력과 변형을 해석하는 구조해석에서 저항하는 정도를 강성 (Stiffness)이라고 하며, 탄성막과 같은 균일한 등방성 판 (Plate)의 응력에 의한 변형을 Kirchhoff-Love 판 이론의 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다 (Love, 1888).

$$\begin{aligned}
W &= \frac{16P}{\pi^6} \times \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} \\
&\cdot \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)(2n-1) \left(\frac{(2m-1)^2}{a^2} + \frac{(2n-1)^2}{b^2} \right)^2} \quad (3.1) \\
&= \frac{l \times P \times (1-\nu^2) \times a^2 b^2}{Et^3}
\end{aligned}$$

여기서, W_{max} 는 판의 최대 변형량 (m), l 는 직사각형 단면 판의 비례 상수, ν 는 판 재료의 포아송 비, P 는 판에 가해진 등분포 압력 (Pa), a 는 판의 가로 방향 길이, b 는 판의 세로 방향 길이, E 는 판 재료의 탄성계수 (Pa), t 는 판의 두께 (m)이다.

식 (3.1)에 따라 탄성막이 압력에 의해 변형되는 정도를 결정하는 인자는 탄성막의 가로, 세로 길이, 두께, 재료의 푸아송 비 및 탄성계수이며, 본 연구에서는 Case 1 압력보상 이미터 탄성막의 두께와 탄성계수를 변경하여 이를 Case 3으로 하였다 (Fig. 3.3 (c)). Case 1 압력보상 이미터 확대 모형의 탄성막 두께는 2.0 mm이고 경도 (Shore A durometer)는 27.9로 측정되었으며, Case 3 압력보상 이미터 확대 모형의 탄성막 두께는 1.5 mm이고 경도는 45.7로 측정되었다.

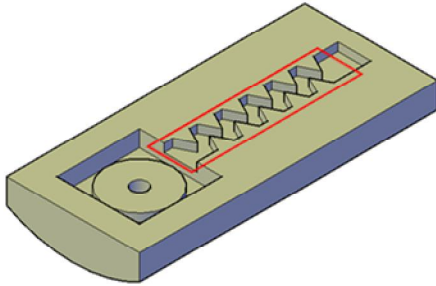


- Stereoscopic view of top and bottom structures
- Side view of fluid domain and membrane

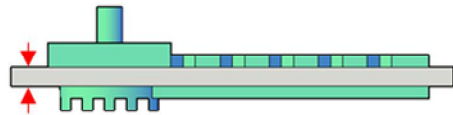
(a) Case 1 pressure-compensating emitter

Increase of curve section
 Decrease of cross-sectional area
 ➤ **Increase of pressure drop**

Increase of elasticity
 Decrease of thickness
 ➤ **Increase of stiffness**



(b) Top structure of case 2 pressure-compensating emitter



(c) Case 3 fluid domain and membrane

Fig. 3.3 Schematic of target pressure-compensating emitter according to design parameter.

3.2 확대 모형 실험

3.2.1 수리학 상사성 검토

상사 법칙의 확대·축소 모형 실험을 설계하기 위해서, 현상의 원형과 모형의 기하학적 상사성과 동역학적 상사성을 모두 만족시켜야 한다 (Weigand et al., 2007). 기하학적 상사성은 원형과 모형 지형의 모든 길이 비율이 일치할 때 만족하며, 이 때 압력보상 이미터 원형과 확대 모형 사이의 길이 변수에는 식 (3.2)의 비례식이 성립한다. 모든 원형과 모형의 물리 인자는 각각 아래 첨자 og와 en으로 표시하여 구별하였다.

$$L_{en} = \lambda L_{og} \quad (3.2)$$

여기서, L 는 지형의 길이 인자 (m), λ 는 현상 원형에 대한 모형의 확대 배율이다. 동역학적 상사성은 현상에서 지배적인 힘으로 이루어지는 무차원수가 일치할 때 만족된다. 무차원수는 2 가지 힘의 비로 힘의 조합에 따라 서로 다른 현상을 반영하며, 압력보상 이미터와 같은 관수로 흐름을 반영하는 무차원수는 레이놀즈 수이다. 레이놀즈 수는 유체의 흐름에서 관성력과 점성력의 비로 나타낼 수 있으며, 레이놀즈 수는 유체 흐름이 층류 또는 난류인지 판단하는 기준이기도 하다 (식 3.3).

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (3.3)$$

여기서, Re 는 흐름의 레이놀즈 수, V 는 관수로 흐름의 평균 속도 (m/s), D 는 관수로의 평균 직경 (m), ν 는 유체의 동점성 계수 (m^2/s)이다.

식 (3.4)와 같이 확대 모형과 원형 흐름의 레이놀즈 수를 일치시켜 동역학적 상사성을 만족시킬 수 있으며, 기하학적 상사성을 만족할 때 식 (3.2)를 대

입하면 원형과 모형 흐름의 속도 변수의 관계식은 식 (3.5)와 같이 계산된다.

$$\frac{Re_{en}}{Re_{og}} = \frac{\frac{V_{en}D_{en}}{\nu}}{\frac{V_{og}D_{og}}{\nu}} = \frac{V_{en}}{V_{og}} \times \frac{D_{en}}{D_{og}} = \frac{V_{en}}{V_{og}} \times \lambda = 1 \quad (3.4)$$

$$V_{en} = \frac{1}{\lambda} V_{og} \quad (3.5)$$

길이와 속도 변수의 관계식을 이용하여 압력보상 이미터 흐름의 유량과 압력 변수의 관계식을 식 (3.6) - (3.9)과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{Q_{en}}{Q_{og}} = \frac{A_{en} V_{en}}{A_{og} V_{og}} = \frac{\frac{\pi}{4} D_{en}^2}{\frac{\pi}{4} D_{og}^2} \times \frac{V_{en}}{V_{og}} = \lambda^2 \times \frac{1}{\lambda} = \lambda \quad (3.6)$$

$$Q_{en} = \lambda Q_{og} \quad (3.7)$$

여기서, Q 는 흐름의 유량 (m^3/s), A 는 관수로의 단면적 (m^2)이다.

$$\begin{aligned} \frac{P_{en}}{P_{og}} &= \frac{\frac{F_{en}}{A_{en}}}{\frac{F_{og}}{A_{og}}} = \frac{F_{en}}{F_{og}} \times \frac{A_{og}}{A_{en}} = \frac{\rho L_{en}^4 T_{en}^{-2}}{\rho L_{og}^4 T_{og}^{-2}} \times \frac{L_{og}^2}{L_{en}^2} \\ &= \lambda^4 \times (\lambda^2)^{-2} \times \lambda^{-2} = \lambda^{-2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$P_{en} = \lambda^{-2} P_{og} \quad (3.9)$$

여기서, P 는 유체의 압력 (Pa), F 는 유체 압력에 의한 하중 (N), ρ 는

물의 밀도 (kg/m^3), T 는 시간 (s)이다.

압력보상 이미터는 유입구로 들어온 유체의 압력이 유출구로 흐름에 따라 압력이 점차 감소하며, 이렇게 위치별로 정수압 차이가 큰 흐름은 식 (3.10)와 같이 정수압과 동수압의 비인 오일러 수 (Euler number)에 대한 상사성을 검토해야 한다. 앞서 계산된 물리 인자의 관계식을 바탕으로 원형과 모형의 오일러 수를 식 (3.11)와 같이 계산하여 상사성을 만족하는 것을 확인하였다.

$$Eu = \frac{P}{\rho V^2} \quad (3.10)$$

여기서, Eu 는 흐름의 오일러 수이다.

$$\frac{Eu_{en}}{Eu_{og}} = \frac{\frac{P_{en}}{\rho V_{en}^2}}{\frac{P_{og}}{\rho V_{og}^2}} = \frac{P_{en}}{P_{og}} \times \left(\frac{V_{og}}{V_{en}}\right)^2 = \lambda^{-2} \times (\lambda)^2 = 1 \quad (3.11)$$

관수로 흐름에서 관벽과의 마찰 및 부차적 요인에 따라 용수의 압력 손실이 발생한다. Darcy와 Weisbach는 압력 손실과 손실 계수 사이의 관계를 식 (3.12)으로 나타내었다 (Kamand, 1988).

$$P.L. = \gamma f \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad (3.12)$$

여기서, $P.L.$ 는 유체 흐름에 따른 압력 저하 (Pa), γ 는 물의 비중, f 는 흐름의 손실 계수, L 는 흐름의 전체 길이 (m), g 는 중력 가속도 (m/s^2)이다.

모형과 원형의 압력 인자 상사성이 만족되기 위해서, 모형과 원형의

압력 손실 사이에 식 (3.9)의 관계가 성립해야 한다. 모형과 원형의 압력 손실의 비율은 식 (3.13)과 같이 계산할 수 있으며, 식 (3.13)이 압력 인자의 관계식을 만족하는 손실 계수는 식 (3.14)의 관계를 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \frac{P.L_{en}}{P.L_{og}} &= \lambda^{-2} = \frac{\gamma}{\gamma} \times \frac{f_{en}}{f_{og}} \times \frac{L_{en}}{L_{og}} \times \frac{D_{og}}{D_{en}} \times \left(\frac{V_{en}}{V_{og}}\right)^2 \times \frac{g}{g} \\ &= \frac{f_{en}}{f_{og}} \times \lambda \times \frac{1}{\lambda} \times \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 = \frac{f_{en}}{f_{og}} \times \lambda^{-2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$f_{en} = f_{og} \quad (3.14)$$

Kim et al. (2018)은 연구 대상인 상용 압력보상 이미터의 수리학적 실험 결과를 보고하였으며, 이를 기반으로 압력보상 이미터 내부 흐름의 최대 속도와 레이놀즈 수는 각각 0.92 m/s와 911이다. 일반적으로 레이놀즈 수가 2100 미만인 관수로 흐름은 층류로 분류되며, Moody (1944)는 레이놀즈 수가 약 3000 이하인 층류의 마찰계수는 관벽 거칠기와 상관없이 흐름의 레이놀즈 수에 반비례한다는 것을 실험을 통해 보고하였다. 부차적 요인에 따른 압력 손실 계수는 많은 연구에서 관수로의 기하학적 구조와 관련성이 높다고 실험을 통해 보고하였다 (Brown, 2002; Larock et al. 1999; Rettore et al. 2014). 따라서, 레이놀즈 수가 일치하고 기하학적 상사성을 만족하는 압력보상 이미터 모형과 원형의 손실 계수는 식 (3.14)의 관계를 만족한다.

3.2.2 탄성막 상사성 검토

일반적인 수리학 모형 실험과 다르게 압력보상 이미터는 내부 용수와 탄성막이 상호작용하고 변형되며, 내부 용수의 압력에 따른 변형에 대한 검토가 필요하다. 압력보상 이미터 내부 유체는 탄성막과 함께 변형되기 때문에 탄성막 모형과 원형 사이에도 압력과 길이 인자 관계식이 만족되어야 한다. 탄성막의 재질인 실리콘은 가해지는 하중에 따른 변형률이 비선형으로 나타나며, 이를 초탄성 재질이라고 한다. 초탄성 재질의 응력

에 따른 변형률 거동은 선형이 아니기 때문에 일반적으로 후크의 법칙에 따라 단순히 탄성계수로 나타내지 않으며, 재질의 일축인장시험 응력-변형률 결과에서 초탄성 재료 모델 함수의 매개변수를 얻어내어 해석할 수 있다 (Ogden et al., 2004). 그러나, 압력보상 이미터의 탄성막과 같이 변형률이 20% 이하인 비압축성 초탄성 재질은 매개변수가 1개인 비교적 단순한 Neo-Hookean 초탄성 모델로 정확하게 해석이 가능하며 (Alan, 2001), Sokol et al. (2022)은 압력보상 이미터 탄성막의 수직 방향 가압 실험을 통해 최대 변형률 범위에서 응력-변형률 관계가 선형에 가깝게 나타난다고 보고하였다. 따라서, 본 연구에서는 압력보상 이미터의 탄성막을 Neo-Hookean 초탄성 모델로 해석하여 확대 모형 실험과 수치해석을 설계하였으며, 비압축성 초탄성 재질의 Neo-Hookean 모델은 식 (3.15)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} W &= C_1(I_1 - 3) \\ I_1 &= \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

여기서, W 는 고체 요소의 변형량 (m), C_1 는 Neo-Hookean 모델의 매개변수 (Pa), I_1 는 Cauchy-Green의 1차 변형량 텐서, ϵ_i 는 주 변형량 (m)이다.

Neo-Hookean 모델의 초탄성 재질이 비압축성일 때는 식 (3.16)와 같이 전단 탄성계수 (Shear modulus)로 나타내어지며 (Pence and Gou, 2015), 실험을 통해 고무의 경도 (Shore A durometer)와 탄성계수 사이의 관계가 식 (3.17)와 같이 경험적으로 도출되었다 (Gent, 1958).

$$C_1 = \frac{\mu}{2} \quad (3.16)$$

여기서, μ 는 재질의 전단 탄성계수 (Pa)이다.

$$E = \frac{0.0981(56 + 7.66H_A)}{0.137505(254 - 2.54H_A)} \quad (3.17)$$

여기서, H_A 는 탄성막의 shore A durometer 정도이다.

또한, 등방성 재질의 탄성계수와 전단 탄성계수 사이에는 식 (3.18)이 성립하며 (Landau et al., 1986), 고무와 실리콘과 같은 비압축성 초탄성 재질의 푸아송 비는 0.5로 근사가 가능하다 (Gent, 2012). 이를 종합하여, 본 연구 대상인 압력보상 이미터의 탄성막 물성을 Table 3.1에 나타내었다.

$$E = 3\mu \quad (3.18)$$

Table 3.1 Properties of elastic membrane in pressure-compensating emitter.

Case	H_A	E (MPa)	μ (MPa)	Thickness (mm)
1	27.9	1.05	0.35	2.0
2	27.9	1.05	0.35	2.0
3	45.7	2.13	0.71	1.5

압력보상 이미터의 유체와 탄성막 압력과 길이 인자 사이의 상사성을 검토하기 위해 식 (3.1)에 압력과 길이 인자에 관한 관계식인 식 (3.2)와 식 (3.9)을 대입하였으며, 모형과 원형의 탄성막 변형 인자는 식 (3.19)와 같이 기하학적 상사성을 만족해야 한다. 실리콘과 고무와 같은 비압축성 초탄성 재질의 푸아송 비는 탄성계수에 상관없이 0.5에 근접하며, 탄성계수를 임의로 조절하는 것은 어렵기 때문에 본 연구에서는 기하학적 상사성에 영향을 주지 않는 두께 인자를 조절하여 식 (3.20)의 관계식을 도출하였다.

$$\lambda = \frac{W_{en}}{W_{og}} = \frac{\frac{l(1-\nu^2)P_{en}(a_{en}b_{en})^2}{Et_{en}^3}}{\frac{l(1-\nu^2)P_{og}(a_{og}b_{og})^2}{Et_{og}^3}} \quad (3.19)$$

$$= \frac{P_{en}}{P_{og}} \times \left(\frac{a_{en}b_{en}}{a_{og}b_{og}}\right)^2 \times \left(\frac{t_{en}}{t_{og}}\right)^{-3} = \lambda^{-2} \times \lambda^4 \times \left(\frac{t_{en}}{t_{og}}\right)^{-3}$$

$$t_{en} = \lambda^{1/3}t_{og} \quad (3.20)$$

3.2.3 실험 설정

압력보상 이미터 확대 모형 내부의 탄성막 변형을 관찰하기 위해 외벽을 투명한 아크릴 재질 판을 레이저로 절단, 적층 및 접착하여 제작하였으며, 원형 압력보상 이미터의 탄성막과 동일한 재질로 모형의 탄성막을 제작하였다. 식 (3.9)에 따라 연구 대상 상용 압력보상 이미터의 수리학 실험 결과를 바탕으로 예상되는 압력보상 이미터 모형의 압력 범위는 가압 펌프를 통해 공급하는 것이 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 0.012 - 0.065 bar의 유입구 압력 설정이 가능한 정수압 원리의 실험 장치를 제작하였다. Fig. 3.4는 본 연구에서 제작한 수리학 실험 장치를 나타낸 것이다. 설정 압력을 유압계 (PSAN-L01CPV-R1/8, Autonics Co., Ltd.)에 입력하면 실시간 압력과 설정 압력을 비교하여 유압계에서 2번 밸브 (Valve #2)로 개·폐 신호가 전송되며, 가압 수조 (Compression tank)에서 물이 공급되어 정수압 수조 (Static pressure tank)의 실시간 압력을 설정 압력으로 유지시켰다. 유압계는 0.001 bar 단위의 정확성으로 압력 유지 및 조절이 가능하였으며, 설정 압력의 각 단계별로 30 초간 압력보상 이미터 모형의 유출 유량을 측정하고 탄성막 변형을 촬영하였다.

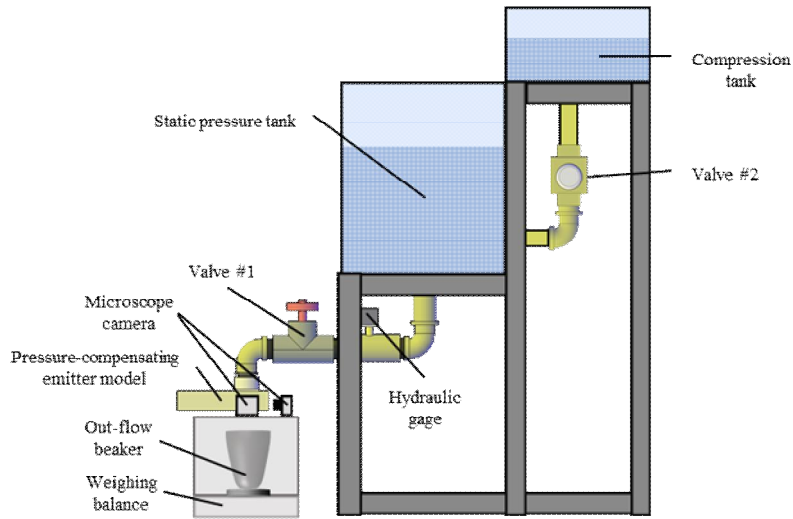
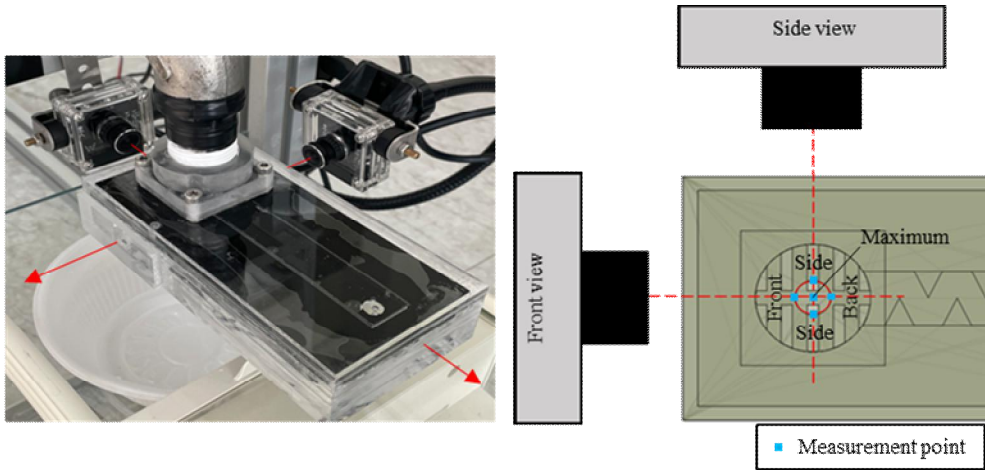


Fig. 3.4 Schematic of hydraulic experiment setup for enlarged model of pressure-compensating emitter.

압력보상 이미터 모형에서 유출되는 용수는 저울 (HR-202i, A&D Co., Ltd.) 위에 올려진 비이커에 떨어지며, 저울을 통해 0.001 g의 정확성과 0.2 초 간격으로 비이커에 모아진 용수의 질량이 측정되었다. 30 초 간 측정된 시간별 용수 질량 결과에서 흐름이 정적인 20 초 구간의 결과를 선형으로 회귀하였으며, 선형 회귀식에서 얻은 질량 유량을 십씨 20도로 조절된 실험실에서의 물 밀도로 환산하여 체적 유량이 계산되었다.

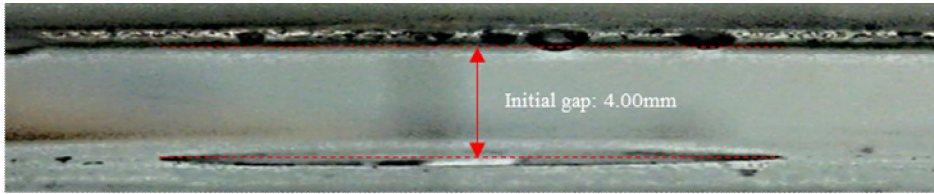
압력보상 이미터 모형 탄성막의 변형은 현미경 카메라 (oCam-5CRO-U, WITHROBOT Co., Ltd.)를 통해 측면과 정면의 각도에서 촬영되었다 (Fig. 3.5). 또한, 각 설정 압력별로 측면 각도의 사진에서 탄성막의 최대 변형, 정면과 후면 방향 유출구측 변형이 측정되었으며 (Fig. 3.6 (b)), 정면 각도의 사진에서 탄성막의 최대 변형과 측면 방향 유출구측 변형이 측정되었다 (Fig. 3.6 (c)).



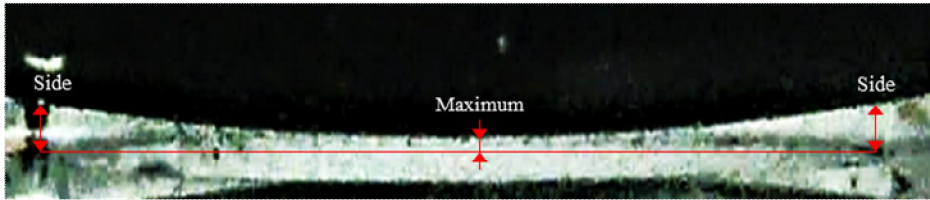
(a) Camera angle of microscope camera

(b) Measurement points of gap between membrane and outlet

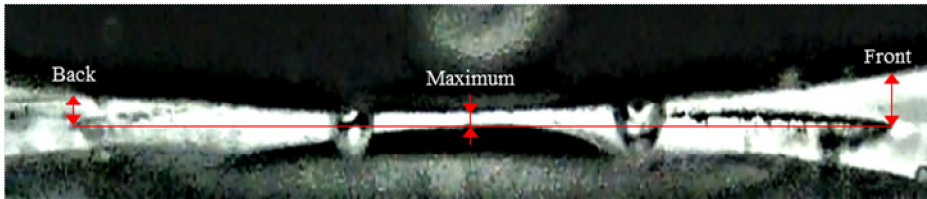
Fig. 3.5 Microscope camera setting for measurement of deformation.



(a) Side view of membrane - initial gap



(b) Front view of membrane - maximum side deformation



(c) Side view of membrane - maximum front-back deformation

Fig. 3.6 Measurement method of maximum deformation and gap between membrane and outlet.

3.3 양방향 유체-구조 연계해석 모델

3.3.1 양방향 유체-구조 연계해석

유체-구조 연계해석은 유체와 구조물이 상호작용하는 거동을 수치적으로 해석하기 위한 방법이며, 전산유체역학과 구조해석의 결과를 연동하여 해석한다. 유체-구조 연계해석은 전산유체역학과 구조해석의 결과를 연동하는 방식에 따라 양방향과 단방향으로 나뉘며, 양방향 유체-구조 연계해석은 각각의 변위와 압력 인자를 상호교환하여 해석한다. 본 연구의 양방향 유체-구조 연계해석 모델의 개략적인 순서를 Fig. 3.7에 나타냈다. 먼저, 압력보상 이미터 3차원 유체 영역의 유입구 단면에 압력이 설정되며, 이에 대한 전산유체역학 해석이 수행된다. 유체 영역과 구조 영역이 공유하는 단면에 전산유체역학 해석 결과의 압력과 점성력을 포함한 힘이 전달되며, 이에 대한 구조해석이 수행된다. 구조해석 결과 구조 영역은 변형되고, 구조 영역과 공유되는 유체 영역의 단면이 이동한다. 처음 단계에서 해석된 결과를 초기값으로 하여 변형된 유체 영역의 전산유체역학이 수행되며, 수렴성을 만족하지 못하면 해석 결과를 초기값으로 하여 계산을 반복한다. 본 연구에서는 압력보상 이미터의 성능을 예측하고 내부 용수와 탄성막의 상호작용에 의한 국부적인 분석을 위해, 압력보상 이미터 거동을 반영하는 양방향 유체-구조 연계해석 모델을 설계하였다.

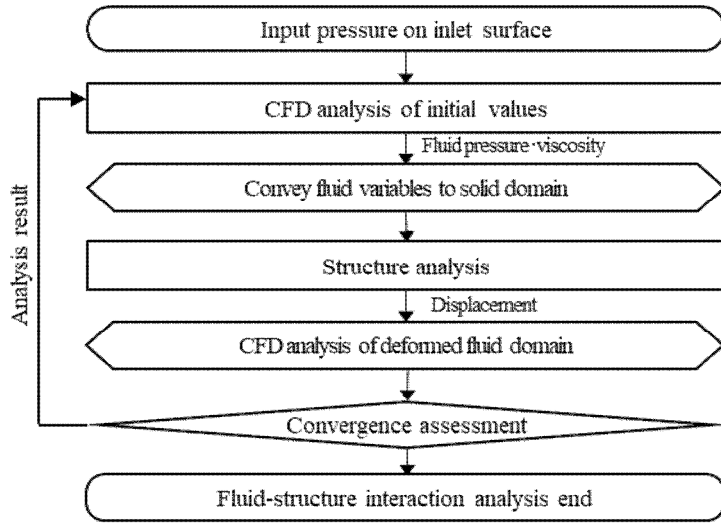


Fig. 3.7 Process of two-way fluid-structure interaction analysis.

양방향 유체-구조 연계해석 모델의 유체와 구조 영역 물리 인자 교환의 지배 방정식은 유체 영역의 압력과 점성력을 구조 영역으로 전달하는 식 (3.21)과 변형된 구조 영역의 단면 변형률이 유체 영역의 단면 변형률로 전달되는 식 (3.22)이다.

$$\begin{aligned}
 F_{fluid} = n \cdot [& -P \cdot I + \nu \cdot (\nabla V_{fluid} + (\nabla V_{fluid})^T) \\
 & - \frac{2}{3} \nu \cdot (\nabla V_{fluid}) \cdot I]
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

여기서, F_{fluid} 는 고체와 유체 영역이 맞닿는 단면을 통해 전달되는 총 하중 (N), n 는 고체와 유체 인접 단면의 법선 벡터, P 는 유체의 정수압 (Pa), I 는 좌표 벡터, V_{fluid} 는 유체의 속력 (m/s)이다.

$$\frac{\partial u_{solid}}{\partial t} = V'_{solid} \tag{3.22}$$

여기서, u_{solid} 는 유체 영역과 맞닿는 고체 단면 요소의 변위 벡터, V'_{fluid} 는 고체 영역과 맞닿는 유체 벽면의 변형 속도 벡터이다.

본 연구의 양방향 유체-구조 연계해석 모델은 유한요소법 기반의 상용 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics (ver. 6.0, COMSOL Co., Ltd.)로 개발되었다. 압력보상 이미터를 포함한 점적 관개 시스템은 농지에서 가압 펌프에 의해 압력이 유지되면서 정적인 거동을 나타내며, 본 연구에서도 압력보상 이미터를 정상 상태 (Stationary)로 해석하였다. 압력보상 이미터의 유체와 구조 영역을 3차원으로 모델링하였으며 (Fig. 3.8), 유체와 구조 영역이 상호작용하여 각각의 해석 결과를 교환하는 상·하부 단면은 Fig. 3.8 (b)와 같다. 유한요소법 기반의 양방향 유체-구조 연계 해석에서는 유체 영역의 초기 좌표와 변형된 유체 영역의 좌표가 일치하지 않아 수렴성에 문제가 발생하며, 변형된 유체 영역의 요소망 (Mesh)과 이에 해당되는 영역의 경계를 연결시켜 해석 수렴성을 높이는 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 기법을 적용하였다.

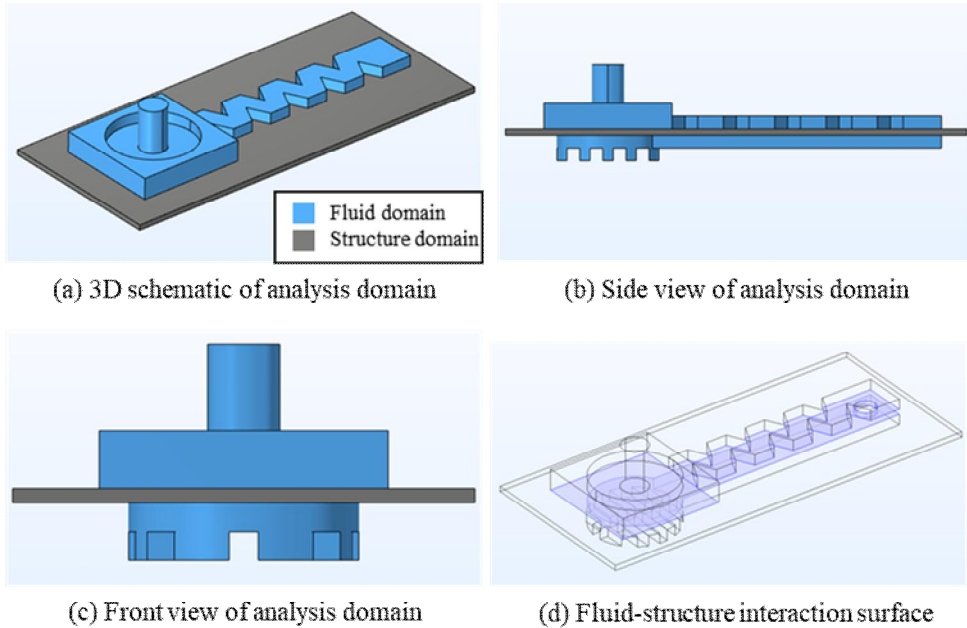


Fig. 3.8 Domain setting for two-way fluid-structure interaction analysis.

3.3.2 전산유체역학 설정

양방향 유체-구조 연계해석 모델은 유체 영역과 구조 영역 각각을 전산유체역학과 구조해석으로 계산한 뒤, 결과 교환 단면을 통해 상호작용을 계산하는 과정으로 수행된다. 압력보상 이미터는 관수로 흐름을 나타내며, 온도의 영향이 적은 물의 관수로 흐름은 일반적으로 비압축성으로 가정된다. 이러한 특성의 유체는 식 (3.23) - (3.24)의 Navier-Stokes 방정식으로 나타내어지며, 식 (3.23)은 유체 질량 보존, 식 (3.24)는 유체 운동량 보존을 의미한다.

$$\rho \nabla \cdot V_{fluid} = 0 \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} & \rho(V_{fluid} \cdot \nabla) \cdot V_{fluid} \\ & = \nabla(-P_{fluid} \cdot I + \nu \cdot (\nabla V_{fluid} + (\nabla \cdot V_{fluid})^T)) + F + \rho g \end{aligned} \quad (3.24)$$

여기서, V_{fluid} 는 유체의 속도 벡터, P_{fluid} 는 유체의 압력 벡터이다.

관수로 흐름은 유체의 레이놀즈 수에 따라 흐름 방향으로 유선이 평행한 층류와 유선이 불규칙하게 나타나는 난류인지를 판단할 수 있으며, 일반적으로 층류의 관수로 흐름은 일반화된 Navier-Stokes 방정식으로 해석이 가능하다. 본 연구의 대상 압력보상 이미터의 최대 레이놀즈 수는 층류에 해당되나, 유체 흐름 방향의 변화가 큰 관수로에는 낮은 레이놀즈 수에서도 난류가 발달할 수 있다. 또한, 압력보상 이미터는 유입 압력이 증가함에 따라 유출구 시작부 단면이 감소하여 인근 유체 영역의 레이놀즈 수가 급격하게 증가하고, 난류 흐름이 나타날 것으로 예상된다. 일반화된 Navier-Stokes 방정식으로 불규칙한 난류 흐름을 전산유체역학 등으로 해석하는 것은 시간과 성능 측면에서 매우 어려우며, 유체 영역의 속력과 압력의 평균을 계산하는 식 (3.25)의 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 통해 효율적으로 계산이 가능하다.

$$\begin{aligned} & \rho(V_{fluid} \cdot \nabla) V_{fluid} = \\ & \nabla(-P_{fluid} \cdot I + (\nu + \nu_T)(\nabla V_{fluid} + (\nabla \cdot V_{fluid})^T)) + F + \rho g \end{aligned} \quad (3.25)$$

여기서, ν_T 는 유체 요소의 난류 점성 벡터이다.

RANS 방정식을 이용한 난류 흐름의 전산유체역학 해석은 난류 점도를 계산하는 방식에 따라, 다양한 종류의 난류 모델로 나눌 수 있다. $k-\epsilon$ 난류 모델은 식 (3.26)의 난류 운동 에너지와 식 (3.27)의 난류 운동 에너지 소산율을 통해 식 (3.28)과 같이 난류 점도를 계산하며 (Wilcox, 1998), 시간과 성능 측면에서의 장점으로 인해 다양한 비압력보상 및 압력보상 이미터의 전산유체역학 해석 연구에서 활용되었다 (Zhang et al., 2007; Zhang et al., 2011; Demir et al., 2019).

$$\rho(V_{fluid} \cdot \nabla) \cdot k = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} & \rho(V_{fluid} \cdot \nabla) \cdot \epsilon \\ &= \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \cdot \frac{\epsilon}{k} \cdot P_k - C_{\epsilon 2} \cdot \rho \cdot \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\nu_T = \rho C_v \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.28)$$

여기서, k 는 유체의 난류 운동 에너지, σ_k 는 유체의 프란틀 수, ϵ 는 난류 운동 에너지의 소산률, C_v , $C_{\epsilon 1}$ 와 $C_{\epsilon 2}$ 는 실험에 의해 결정된 난류 흐름의 상수이다.

k - ω 난류 모델은 식 (3.29)의 난류 운동 에너지와 식 (3.30)의 특정 난류 운동 에너지 소산율을 통해 계산되며, 압력보상 이미터와 같이 곡률이 큰 흐름에서 일반적으로 k - ϵ 난류 모델보다 높은 정확성을 나타내지만 수렴성이 떨어지고 효율성 측면에서 단점이 있다. k - ω SST (Shear Stress Transport) 난류 모델은 식 (3.31)을 통해 2 종류의 난류 모델의 특징을 결합하여 정확성과 효율 측면에서 장점이 있으며 (Wilcox, 1998), 최근 수행된 압력보상 이미터의 전산유체역학과 유체-구조 연계해석 연구에서 활용되었다 (Chen et al., 2021; Zhou et al., 2013; Zhang et al., 2007).

$$\rho(V_{fluid} \cdot \nabla) \cdot k = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \nabla k \right] + P_k - \beta_0^* \rho \omega k \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} & \rho(V_{fluid} \cdot \nabla) \cdot \omega = \nabla \cdot \left[(\nu + \nu_T \sigma_\omega) \cdot \nabla \omega \right] \\ & + \frac{\gamma}{\nu_T} \rho P - \rho \beta_0 \omega^2 + 2(1 - f_{v1}) \frac{\rho \sigma_\omega 2}{\omega} \nabla \omega \cdot \nabla k \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$v_T = \rho \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S f_{v2})} \quad (3.31)$$

여기서, β_0^* 는 특정 흐름의 소산 계수, ω 는 특정 흐름의 난류 운동 에너지 소산률, f_{v1} 는 흐름 소산률의 보간 함수, f_{v2} 는 속도 구배의 보간 함수, α_1 는 난류 운동 에너지 계수, S 는 속도 구배이다.

본 연구에서는 Case 1을 대상으로 요소망 (Mesh) 조건을 동일하게 한 상태에서 압력보상 이미터의 유체 영역을 층류 모델, $k-\epsilon$ 과 $k-\omega$ SST 난류 모델로 선정하였을 경우의 해석 정확성을 비교하였다 (Fig. 3.9). 수치해석 결과를 통해 $k-\omega$ SST 난류 모델의 해석 정확성이 가장 높게 나타났으며, 이는 선행 연구 결과와 같이 $k-\omega$ SST 난류 모델이 만족부 압력 저하를 더 잘 반영하였기 때문으로 판단된다 (Chen et al., 2021). 따라서 본 연구의 양방향 유체-구조 연계해석의 전산유체역학 모델을 $k-\omega$ SST 난류 모델로 선정하였고, case별 압력보상 이미터의 성능 예측과 유체-구조 영역의 국부적인 분석을 수행하였다.

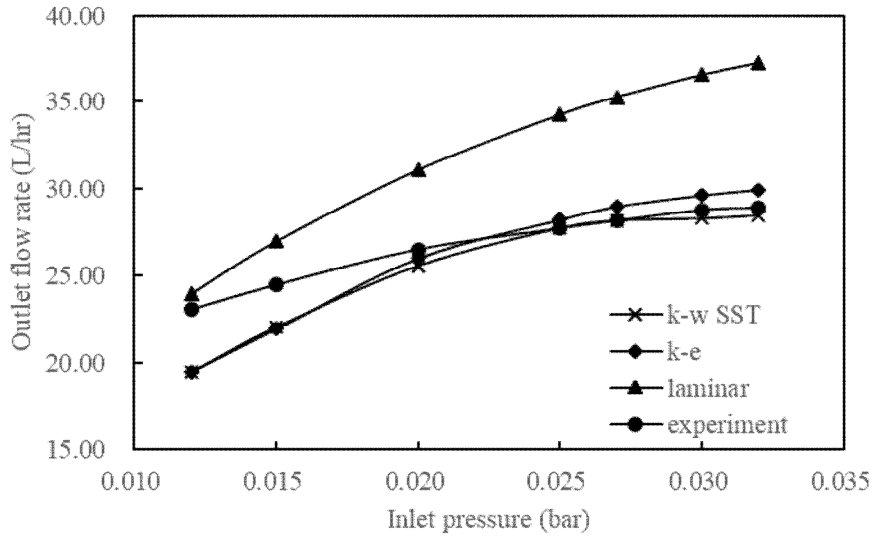


Fig. 3.9 Outlet flow rate against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter according to computational fluid dynamics model.

본 연구에서 설정한 양방향 유체-구조 연계해석 모델의 전산유체역학 경계 조건은 Fig. 3.10와 같다. 압력보상 이미터의 모형 실험에서와 같이 유출구가 지면 아래로 향하게 위치시켰으며, 동일한 설정으로 중력 조건을 부여하였다 (Fig. 3.10 (a)). 가압 실험 장치의 배관으로부터 용수가 유입되는 단면을 유입구 단면, 용수가 공기 중으로 유출되기 직전의 유출구 끝단을 유출구 단면으로 설정하였으며 (Fig. 3.10 (c) - (d)), 유입구와 유출구를 제외한 표면을 유체의 벽면으로 설정하였다 (Fig. 3.10 (b)).

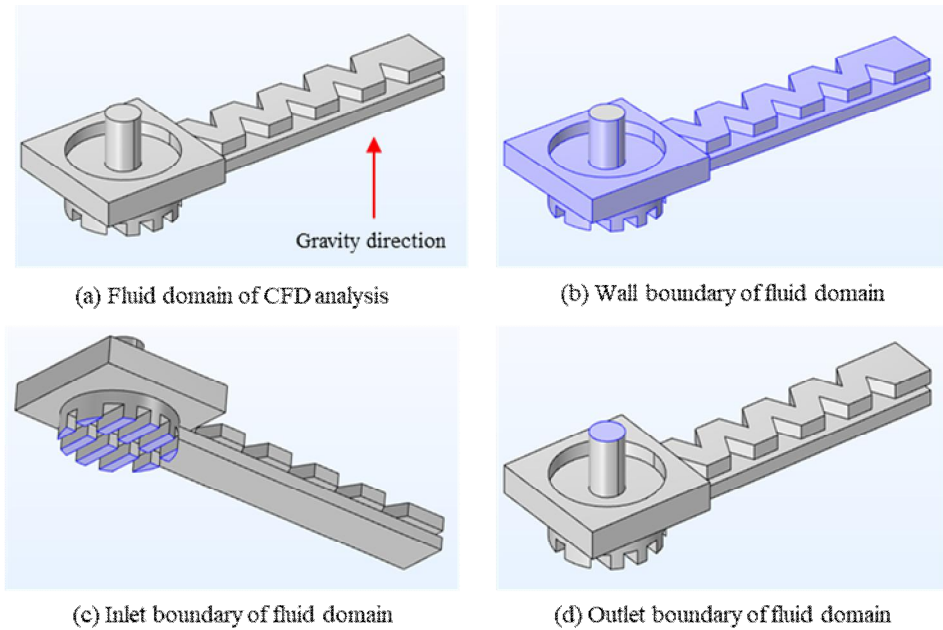


Fig. 3.10 Boundary conditions of computational fluid dynamics for two-way fluid-structure interaction analysis.

Demir et al. (2007; 2019)는 비압력보상 이미터의 내부 유체 흐름에 따른 마찰 조건의 해석 정확성을 비교하여 마찰의 영향이 거의 없다고 보고하였으며, 본 연구에서는 벽면을 매끄러운 벽으로 가정하여 벽면 마찰에 의한 에너지 손실이 없는 것으로 설정하였다. 유입구와 유출구가 설정되는 관수로 흐름의 전산유체역학에서는 흐름 역류가 발생할 수 있으며, 압력보상 이미터 유체 영역의 압력 저하와 운동 에너지 손실이 크기 때문에 식 (3.32)와 같이 역류 발생을 고려하였다.

$$\hat{P}_0 \geq P_0 \quad (3.32)$$

여기서, \hat{P}_0 는 반복 솔버로 계산된 유체 압력, P_0 는 유체 압력의 초기 값이다.

3.3.3 구조해석 설정

압력보상 이미터 모형의 내부 탄성막의 구조해석은 Neo-Hookean 초탄성 모델로 해석하였으며, 식 (3.15)과 식 (3.16)에 의해 유도된 지배 방정식은 식 (3.33)과 같다.

$$W = \frac{1}{2} \mu (I_1 - 3) \quad (3.33)$$

초탄성 모델의 구조해석에 필요한 전단 탄성계수는 Table 3.1의 물성치를 입력하였으며, 구조해석의 경계조건은 Fig. 3.11와 같다. 탄성막은 유체 영역과 인접하는 단면을 통해 유체영역의 압력과 점성력을 전달받으며, 압력보상 이미터의 상·하부 구조물에 의해 지지된다. 탄성막이 유출구 방향으로 유체에 의한 힘을 받을 때 구조물에 의해 지지되는 단면을 Fig. 3.11 (b)에 나타냈었으며, 3개의 변위와 3개의 모멘트 자유도를 제어하는 고정단 지지 조건을 부여하였다.

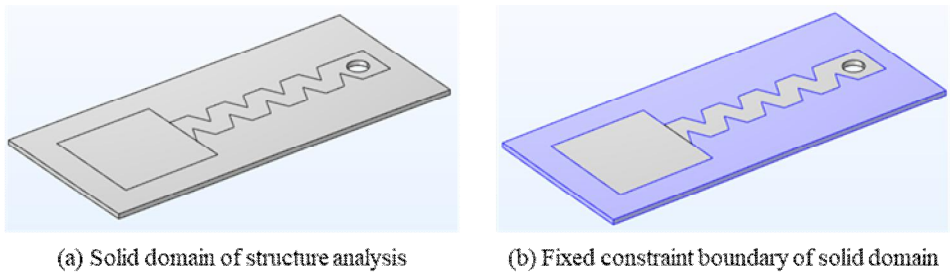


Fig. 3.11 Boundary conditions of structure analysis for two-way fluid-structure interaction analysis.

3.3.4 해석 솔버 및 요소망 설정

양방향 유체-구조 연계해석의 계산 방법은 완전 결합 솔버 (Fully coupled solver)와 분리 솔버 (Segregated solver)로 나뉜다. 완전 결합 솔버는 유체 영역과 구조 영역을 하나의 텐서로 설계하여 계산하는 방식으로 해석 정확성이 분리 솔버에 비해 일반적으로 높지만 시간과 성능 측면에서 매우 비효율적이다. 반면, 분리 솔버는 유체 영역과 구조 영역의 물리 인자에 관한 텐서를 분리 설계하여 각각 계산하고, 이를 결합하여 수렴성을 판단하기 때문에 수렴 안정성이 높고 시간과 성능 측면에서 효율적이다. 본 연구의 양방향 유체-구조 연계해석 모델은 분리 솔버를 이용하여 해석을 수행하였다. 분리 솔버 내에서 물리 인자를 계산하는 방식은 직접 솔버 (Direct solver)와 반복 솔버 (Iterative solver)로 나뉘며, 직접 솔버는 경계 조건, 물리 인자를 하나의 행렬 시스템으로 한번에 계산하기 때문에 시간과 성능 측면에서 효율성이 떨어진다. 해석 영역의 요소망 개수가 많고 비선형성이 높은 문제는 직접 솔버를 통한 해석이 어렵기 때문에 반복 솔버를 통해 해석하는 것이 일반적이다. 반복 솔버는 시간과 성능 측면에서 유리한 선형 방정식 시스템 내에서 경계 조건 행렬을 반복적으로 수정하며, 수정된 경계 조건 행렬에 의한 수치해의 잔차가 기준치 아래로 내려갈 때까지 계산을 반복한다. GMRES (Generalized Minimum Residual Method) 반복 솔버는 전산유체역학의 해석에 주로 사용되는 반복 솔버로 1회의 해석 시간과 메모리가 균일하게 유지되어 비교적 안정적이며, 특히 비선형성이 크고 요소망 개수가 많은 양방향 유체-구조 연계해석에 유리하여 본 연구의 반복 솔버로 선정하였다.

유한요소법 기반의 수치해석은 요소망 조건에 따라 결과가 상이하게 나타나며, 특히 전산유체역학의 해석 결과는 요소망 조건의 영향이 크다. 일반적으로 요소망의 크기가 작을수록 해석 정확성이 높아지는 경향이 있으나, 요소망의 개수가 많아져 해석 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 본 연구에서는 case 1 압력보상 이미터를 대상으로 해석 정확성을 보장하면서 시간 측면에서도 효율적인 요소망 조건을 선정하였다. COMSOL Multiphysics의 요소망 생성 알고리즘에 따라 “extremely coarse”, “extra coarse”, “coarser”와 “coarse”의 요소망 조건으로 양방향 유체-구조 연계해석이 가능하였으며, 더

작은 크기의 요소망으로는 반복 계산에 따른 잔차가 허용 기준보다 높아 수렴하지 않았다. 따라서, 4개 요소망 조건에서의 해석 정확성을 비교하였으며, 각 요소망 조건의 통계 인자와 해석 결과는 각각 Table 3.2와 Fig. 3.12와 같다. “coarse” 요소망 조건의 해석 정확성이 가장 높게 나타났으며, 전체 압력 구간의 해석 시간은 총 5 시간 15 분 55 초로 나타났다. 시간 종속 조건에서 수행된 유체-구조 연계해석 연구의 총 해석 시간인 1,618 시간과 비교하였을 때 충분히 효율적인 것으로 판단되었으며 (Chen et al., 2021), 이러한 해석 조건을 바탕으로 모든 case의 양방향 유체-구조 연계해석을 수행하였다.

Table 3.2 Statistical parameters for meshing algorithms.

Statistical parameters	extra coarser	extra coarse	coarser	coarse
Number of elements	33,444	62,447	148,376	352,686
Average element quality (Skewness)	0.4697	0.5090	0.5716	0.6206
Mesh volume (m ³)	4.354*10 ⁻⁴	4.357*10 ⁻⁵	4.358*10 ⁻⁵	4.359*10 ⁻⁵
Mesh type	Tetrahedra	Tetrahedra	Tetrahedra	Tetrahedra

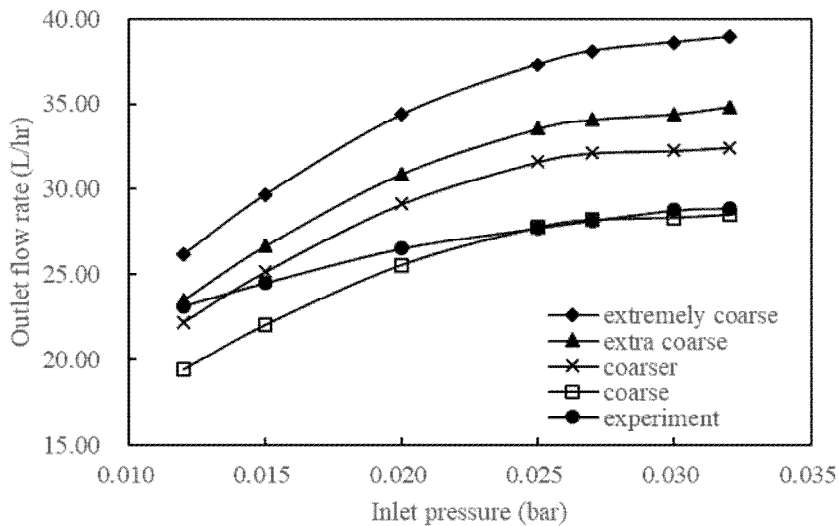


Fig. 3.12 Outlet flow rate against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter according to algorithms of building mesh.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 유체-구조 상호작용 기작의 실험적 분석

4.1.1 압력보상 이미터 확대 모형의 배율 결정

압력보상 이미터 확대 모형의 배율은 가압 실험 장치에서 공급 가능한 압력 범위와 현미경 카메라를 통해 촬영된 탄성막 변형 사진의 해상도를 바탕으로 결정되었다. 연구 대상인 상업용 압력보상 이미터를 포함한 점적 관의 수리학 실험에서 유출 유량이 최대를 나타낸 후 급격하게 감소하기 전까지의 압력 구간을 1.5 bar까지로 보고하였고 (Kim et al., 2018), 이를 바탕으로 확대 배율이 5 배일 때 가압 실험 장치의 공급 압력 범위는 0.012 - 0.065 bar로 결정되었다. 확대 배율이 5 배인 case 1 압력보상 이미터 모형 실험의 유입 압력에 따른 유출 유량 결과는 Fig. 4.1과 같다.

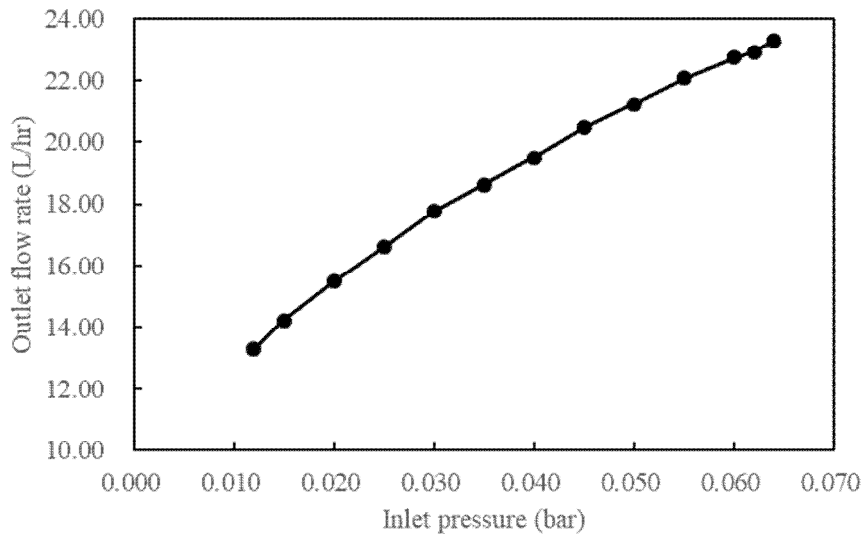
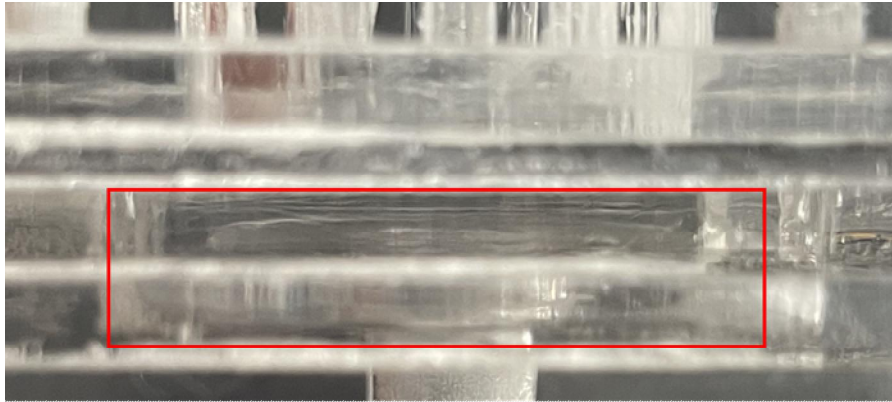
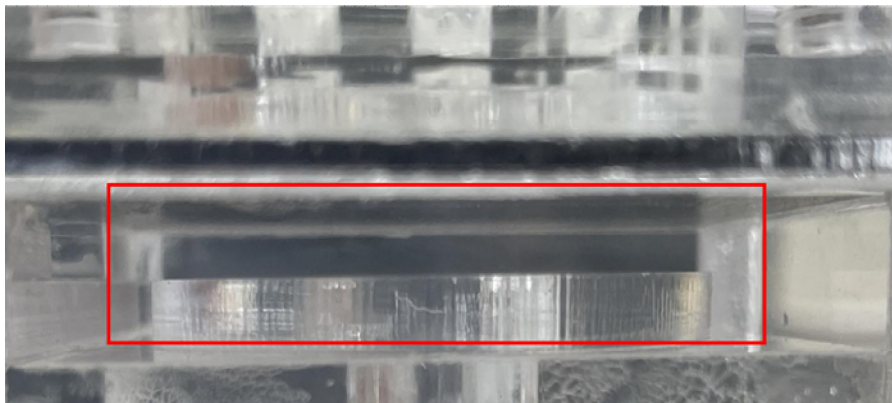


Fig. 4.1 Outlet flow rate against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter with 5:1 scale.

확대 배율이 5 배인 압력보상 이미터 모형의 실험 결과에서 최대 유량 관찰이 불가능하였으며, 관찰 압력 구간에서 유량이 감소하지 않았다. 또한, 현미경 카메라를 통해 촬영된 사진에서 탄성막 변형을 정밀하게 측정할 수 없었다. 이러한 결과를 바탕으로 압력보상 이미터의 확대 배율을 8배로 변경하였으며, 압력보상 이미터 모형의 투명도를 높이기 위해 관찰면이 절단되지 않도록 제작하였다 (Fig. 4.2). 확대 배율이 8 배로 설계된 압력보상 이미터 모형을 통해 모든 case의 실험을 수행하였으며, 압력보상 이미터 모형의 물리 인자 관계식은 Table 4.1와 같다.



(a) Version with an opaque observation surface



(b) Version with enhanced transparency of observation surface

Fig. 4.2 Enlarged model of pressure-compensating emitter.

Table 4.1 Physical variables equation between original and enlarged model of pressure-compensating emitter.

Physical variables	Equation
Length	$L_{en} = 8L_{og}$
Velocity	$V_{en} = \frac{1}{8} V_{og}$
Flow rate	$Q_{en} = 8Q_{og}$
Pressure	$P_{en} = \frac{1}{64} P_{og}$
Thickness	$t_{en} = 2t_{og}$

4.1.2 확대 모형 실험 결과 분석

8 배의 확대 비율로 설계된 압력보상 이미터 모형 실험을 유입 압력 0.012 - 0.065 bar 범위에서 수행하였다. 유출 유량과 탄성막 변형의 변화가 비교적 작은 압력보상 구간 인근의 압력 간격이 짧도록 측정 유입 압력 지점을 정하였으며, case별로 측정된 유입 압력 지점이 완전히 일치하지는 않았다. Case별 압력보상 이미터의 유입 압력에 따른 유출 유량 결과를 Fig. 4.4, Fig. 4.6과 Fig. 4.8에 나타내었으며, 유입 압력별 유출 유량은 10회 측정된 값의 평균을 나타내었다. Case별 유입 압력에 따른 탄성막 변형 결과를 Fig. 4.4, Fig. 4.7과 Fig. 4.9에 나타내었다.

Case 1 압력보상 이미터의 유입 압력에 따른 유출 유량 결과는 Fig. 4.3과 같으며, 10 회 측정된 유출 유량값의 Student-t 분포의 95 %을 오차 막대로 표시하였다. 유입 압력 0.012 bar에서 0.027 bar까지는 유출 유량이 비압력보상 이미터과 유사하게 증가하였다. 그러나, 유입 압력 0.027 bar부터 유출 유량의 증가율이 둔화되었으며, 0.034 bar에서 최대 유량을 보인 후 0.042 bar까지 느리게 감소하였다. 유입 압력 0.042 bar에서 0.049 bar까지는 유출 유량이 급격하게 감소하고, 각 유입 압력 지점별 유출 유량의 편차가 증가하는 등 불안정하게 나타났다. 유입 압력

0.050 bar에서 유출 유량이 크게 증가하였으나, 이후 0.065 bar까지 유출 유량이 비교적 완만하게 감소하였다.

Case 1 압력보상 이미터의 유입 압력에 따른 탄성막 변형 결과는 Fig. 4.4와 같으며, 각 유입 압력 지점별로 탄성막 변형의 최대값과 유출구 시작부 단면 수직 아래의 탄성막 변형을 나타내었다. 유출 유량과 유사하게 유입 압력의 증가에 따라 탄성막 변형이 단조롭게 증가하며, 유입 압력 0.031 bar에서 탄성막 최대 변형이 4.00 mm로 유출구 시작부 단면을 막기 시작하였다. 유입 압력 0.042 bar부터 탄성막 최대 변형의 증가가 유의미하게 둔화되기 시작하였지만, 0.049 bar까지 유출구 시작부 단면 수직 아래의 탄성막 변형은 증가하여 유출구 단면이 지속적으로 감소하는 것으로 생각된다. 유입 압력 0.049 bar부터는 탄성막이 위·아래 방향으로 진동하여 탄성막 변형을 정량적으로 측정할 수 없었으며 (Fig. 4.5), 관찰 압력 범위에서는 유출구 시작부 외벽과 탄성막이 맞닿지 않았다.

Case 1 압력보상 이미터 모형 실험을 통한 거동을 종합하면, 최대 유출 유량이 나타나는 0.031 - 0.034 bar에서 변형된 탄성막이 유출구 시작부 단면을 막기 시작하였다. 유입 압력 0.042 bar부터 탄성막 최대 변형 증가율이 둔화되기 시작하고 유출 유량이 급격하게 감소하여, 유입 압력에 따른 유출 유량의 증가율 감소와 압력보상 현상은 탄성막에 의한 유출구 시작부 단면적 변화가 주요 원인인 것으로 생각된다. 탄성막과 유출구 시작부 단면 사이의 간격이 특정한 거리 이하로 좁아지면 탄성막 진동 현상이 발생하며, 이러한 진동 현상은 수치해석 등의 수학적 방법으로 분석이 어려운 Catastrophe 현상이다 (Yong-nian and Ya-dong, 1989). 탄성막이 진동하는 유입 압력 구간에서 유출 유량이 급격하게 감소하고 불안정하였으며, 탄성막 진동을 방지하기 위한 압력보상 이미터 설계가 필요할 것으로 생각된다.

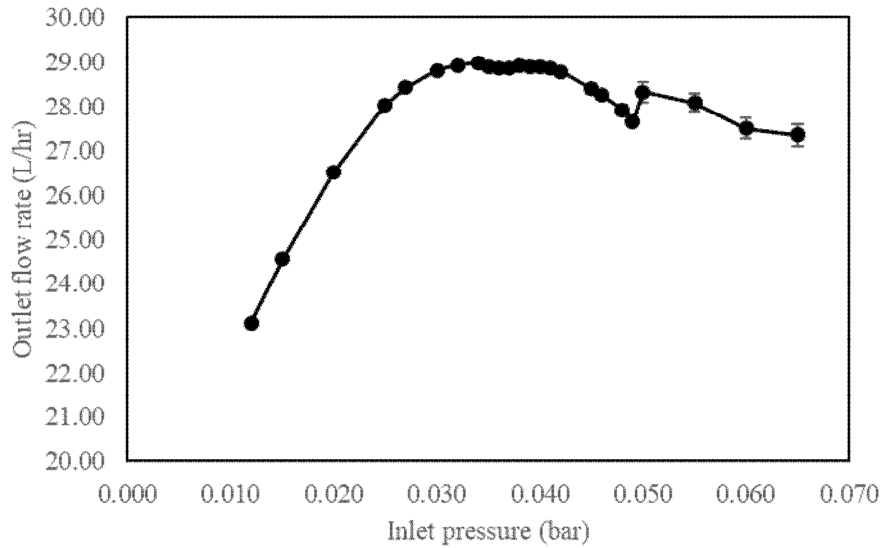


Fig. 4.3 Outlet flow rate against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter by experiment.

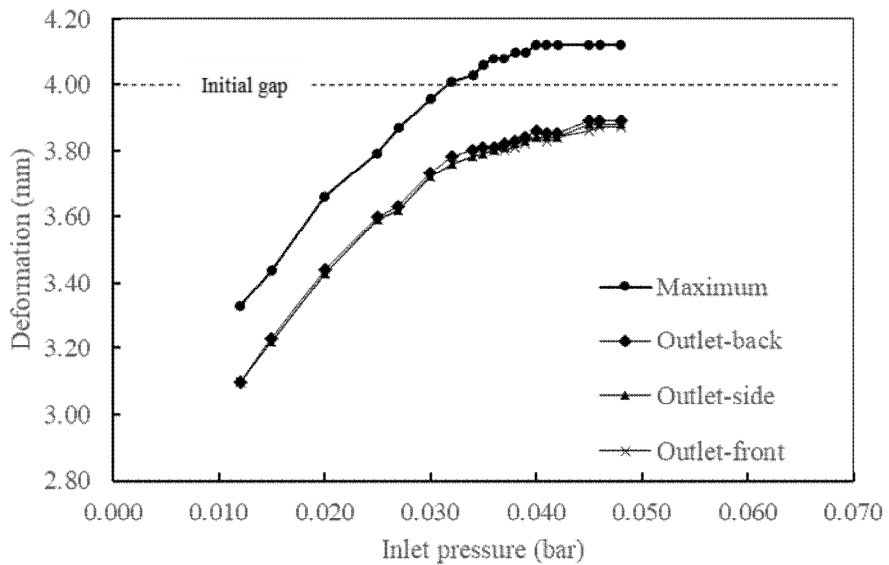
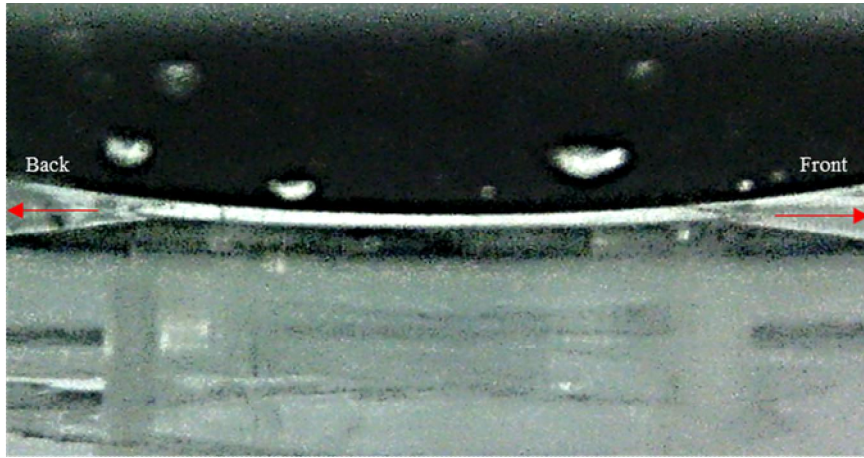


Fig. 4.4 Deformation against inlet pressure of case 1 pressure-compensating emitter according to measurement point by experiment.



(a) Side view at inlet pressure 0.033 bar (stationary phase)



(b) Side view at inlet pressure 0.065 bar (catastrophe phase)

Fig. 4.5 Comparison on side view of deformed elastic membrane at stationary and catastrophe phase.

Case 2 압력보상 이미터의 유입 압력에 따른 유출 유량과 탄성막 변형 결과를 Fig. 4.6와 Fig. 4.7에 나타내었다. 유입 압력 0.029 bar에서 최대 유출 유량 23.17 L/hr이 나타났으며, 탄성막 최대 변형이 4.00 mm를 넘어서 유출구 시작부 단면을 막기 시작하였다. 유입 압력 0.040 bar부터 탄성막 최대 변형의 증가율이 둔화되기 시작하였으며, case 1 압력보상 이미터와 다르게 0.055 bar에서 변형된 탄성막이 유출구 시작부의 미로

유로와 가까운 후면 방향의 외벽과 맞닿기 시작하였다. 최대 유량이 나타난 압력 지점 이후에는 유출 유량이 완만하게 감소하였으며, 관찰된 압력 범위에서 탄성막의 진동 현상은 발견되지 않았다.

Case 3 압력보상 이미터의 유입 압력에 따른 유출 유량과 탄성막 변형 결과를 Fig. 4.8와 Fig. 4.9에 나타내었다. Case 1과 2 압력보상 이미터와 유사하게 유입 압력에 따라 유출 유량이 단조롭게 증가하였다. 유입 압력 0.046 bar에서 최대 유출 유량 33.11 L/hr이 나타났으며, 인접한 압력 지점인 0.045 bar에서 탄성막 최대 변형이 4.00 mm로 유출구 시작부 단면을 막기 시작하였다. Case 2와 같이 관찰된 압력 범위에서 탄성막 진동 현상이 발견되지 않았으나, 변형된 탄성막이 유출구 시작부 외벽과 맞닿지 않았다.

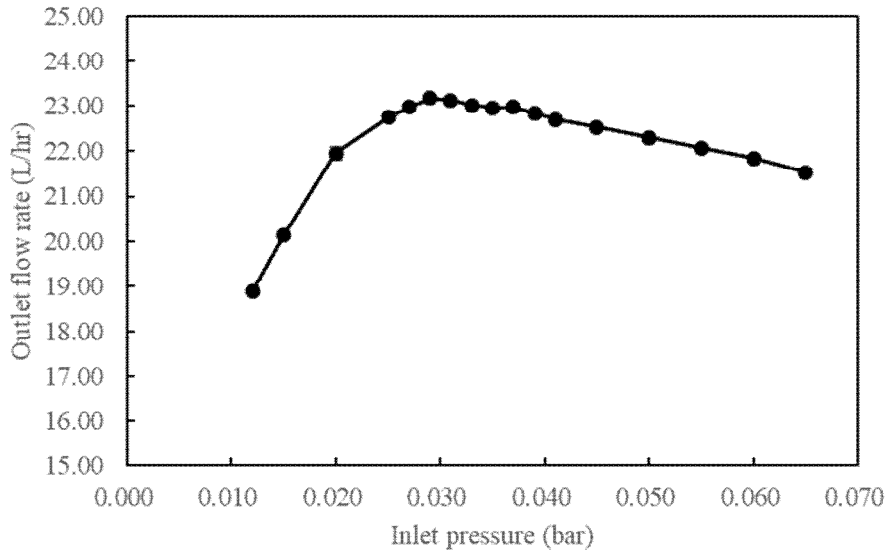


Fig. 4.6 Outlet flow rate against inlet pressure of case 2 pressure-compensating emitter by experiment.

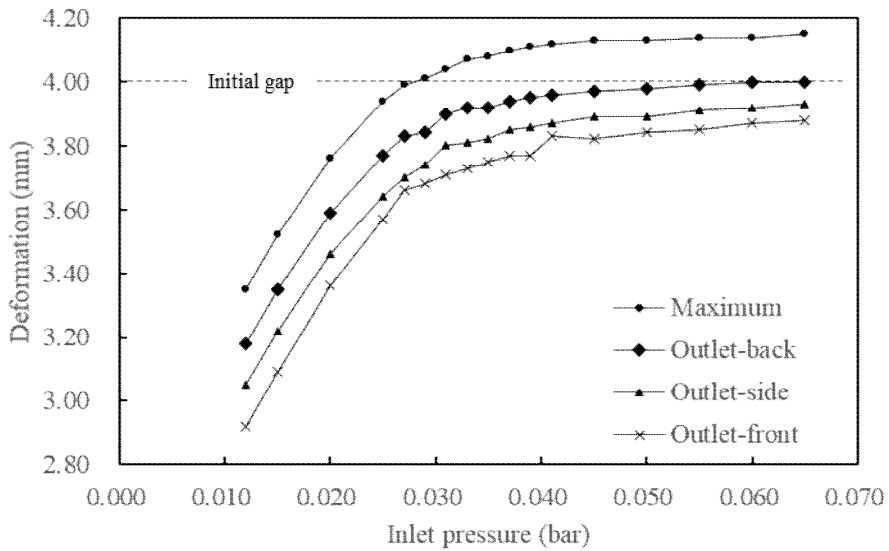


Fig. 4.7 Deformation against inlet pressure of case 2 pressure-compensating emitter according to measurement point by experiment.

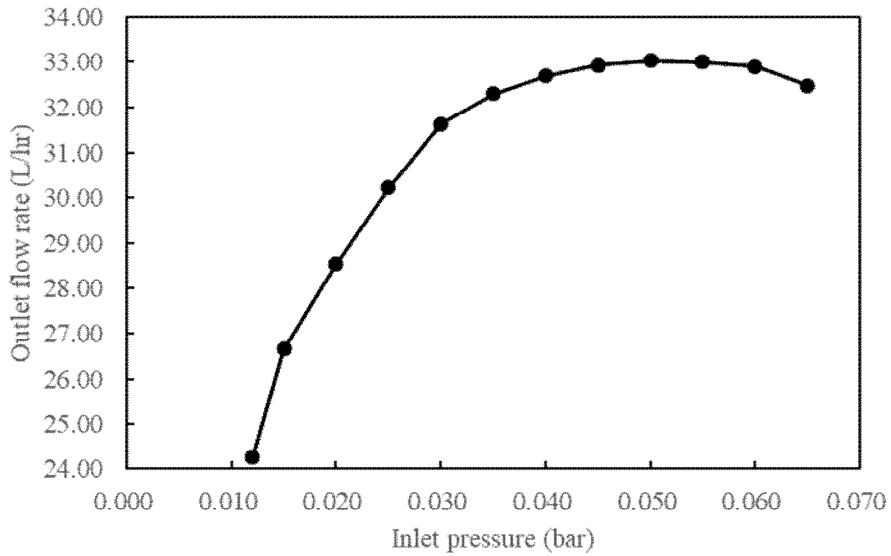


Fig. 4.8 Outlet flow rate against inlet pressure of case 3 pressure-compensating emitter by experiment.

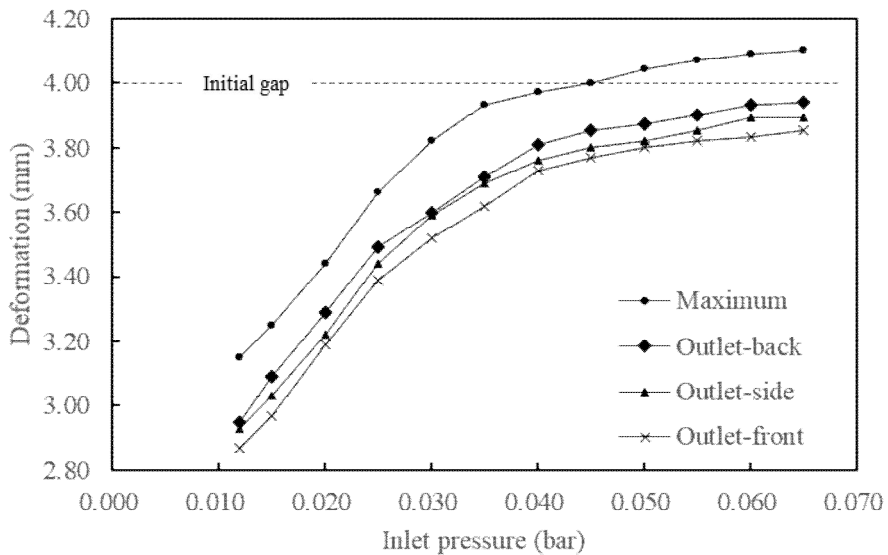


Fig. 4.9 Deformation against inlet pressure of case 3 pressure-compensating emitter according to measurement point by experiment.

4.1.3 압력보상 이미터 설계 인자 영향 분석

압력보상 이미터 성능에 대한 설계 인자의 영향을 분석하기 위해 Case 1·2·3 압력보상 이미터 결과를 비교·분석하였다. 유입 압력에 따른 유출 유량과 탄성막 변형 결과를 각각 비교하기 위해 Case별 결과를 하나의 그래프에 도시하였으며, 유입 압력에 따른 유출 유량과 탄성막 변형의 비교 결과는 Fig. 4.10와 Fig. 4.11와 같다.

상용 압력보상 이미터인 case 1에 비해 case 2 압력보상 이미터는 미로 유로의 형상을 압력 저하 경향이 더 커지도록 설계하였다. 평균적인 유로의 단면적이 감소하고, 유체 흐름의 방향이 바뀌는 만곡부 개수가 증가한 case 2 압력보상 이미터의 최대 유출 유량이 case 1 압력보상 이미터보다 약 20.1 % 감소하였다. 압력보상 이미터 탄성막의 변형은 유입구-탄성막 하단면 사이와 유출구-탄성막 상단면 사이 유체 영역의 압력 차이가 유효하게 작용할 것으로 생각되며, 이로 인해 case 1에 비해 case 2 압력보상 이미터의 탄성막 변형이 더 크게 나타났다. 본 연구에서는 압력보상 이미터 최대 유량의 5 % 이내의 유출 유량을 나타내는 압력 범위를 압력보상 구간이라고 정의하였으며, case 1과 2 압력보상 이미터의 압력보상 구간은 각각 0.024 - 0.060 bar와 0.020 - 0.057 bar로 유의미한 차이를 보이지는 않았다. Case 1과 다르게 case 2 압력보상 이미터 탄성막에서는 진동 현상이 발견되지 않았으며, case 2 압력보상 이미터의 유출 유량이 비교적 완만하게 감소한 것의 원인으로 생각된다. 이를 고려하면, 압력보상 이미터의 안정적인 균일한 유출 유량 산출을 위해서 탄성막 진동을 방지하는 압력보상 이미터 설계가 필요할 것으로 생각된다.

Case 3 압력보상 이미터는 case 1 압력보상 이미터에 비해 큰 강성의 탄성막을 사용하여 변형이 더 작도록 설계하였다. Fig. 4.11에서 case 1에 비해 case 3 압력보상 이미터의 변형이 유의미하게 작게 나타났다. 반면에 case 2 압력보상 이미터는 변형이 비교적 작아 탄성막과 유출구 시작부의 간격이 컸으며, 해당 영역의 압력 저하가 작고 흐름이 방해받

지 않아 최대 유출 유량이 약 13.9 % 증가하였다. Case 3 압력보상 이미터의 압력보상 구간은 0.029 - 0.073 bar로 예상 되어 case 1에 비해 넓은 압력 구간에서 균일한 유출 유량을 나타낼 것으로 생각된다.

Case 1·2·3 압력보상 이미터의 실험 결과를 종합하면, 모든 경우에서 최대 유출 유량은 탄성막이 유출구 시작부 단면을 막기 시작하는 압력 지점 인근에서 나타났다. 이를 고려하면, 압력보상 이미터에서 공통적으로 최대 유출 유량은 탄성막이 유출구 시작부 단면을 막는 압력 지점에서 발생할 것으로 생각되며, 이를 압력보상 이미터의 설계에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 압력보상 이미터의 성능 예측을 위한 매개변수 모델 연구에서는 탄성막의 최대 변위가 발생하는 압력 지점에서 유출 유량이 최대일 것이라고 가정하였는데 (Shamshery et al., 2017; Narain and Winter, 2019; Sokol et al., 2022), 이러한 가정이 압력보상 구간의 예측 오차 원인으로 생각된다. 압력보상 이미터의 유로 형상 변경 결과에서 복잡한 형상일수록 유출 유량을 감소시키고 최대 유출 유량이 나타나는 압력 지점이 먼저 나타나지만, 유출 유량 감소 경향이 더 큰 것으로 생각된다. 압력보상 이미터의 탄성막 강도 변경 결과에서 탄성막 강성이 클수록 유출 유량이 증가하고 최대 유출 유량의 압력 지점이 나중에 나타나며, 최대 유출 유량의 압력 지점에 대한 영향이 더 큰 것으로 생각된다. 또한, 탄성막 강성이 클수록 압력보상 구간이 넓게 나타날 것으로 생각된다.

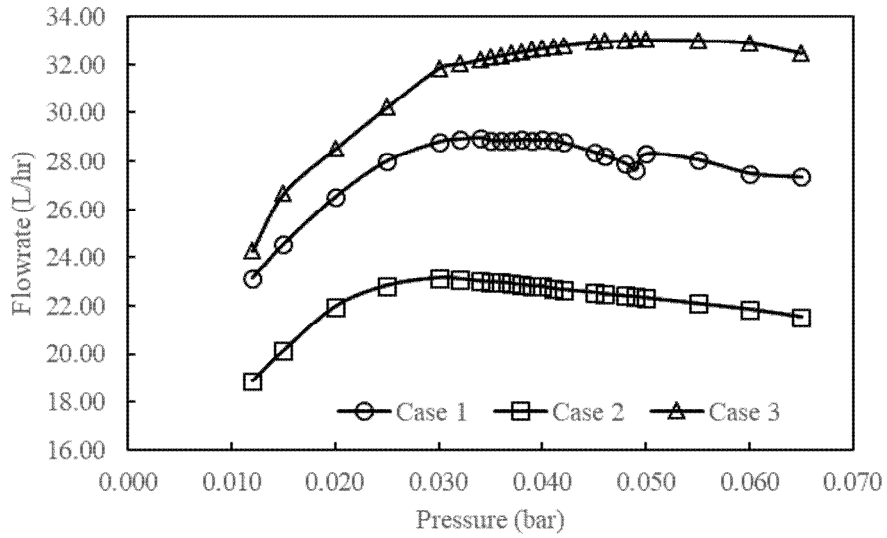


Fig. 4.10 Comparison of outlet flow rate against inlet pressure according to type of pressure-compensating emitter by experiment.

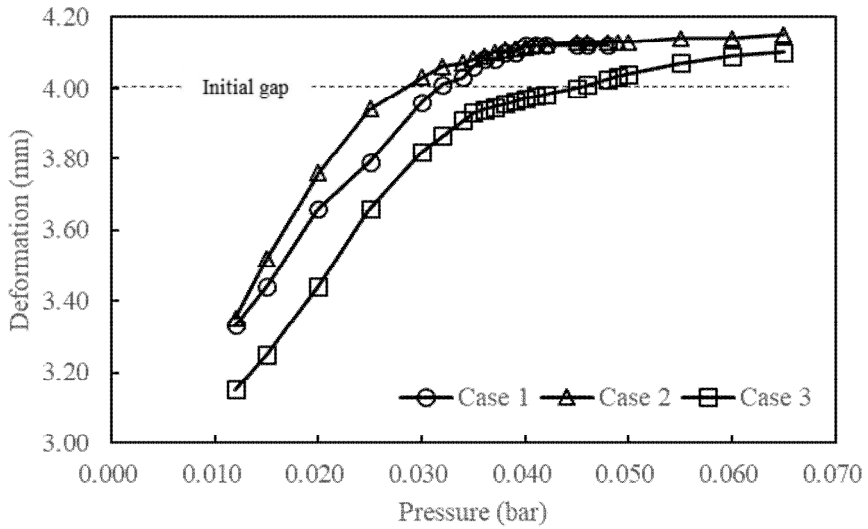


Fig. 4.11 Comparison of maximum deformation against inlet pressure according to type of pressure-compensating emitter by experiment.

4.2 유체-구조 상호작용 기작의 수치적 분석

4.2.1 양방향 유체-구조 연계해석 예측 정확성 검증

압력보상 이미터의 양방향 유체-구조 연계해석 모델을 설계하였으며, 유입 압력에 따른 유출 유량이 증가하여 최대 유량을 나타내는 압력 구간까지 해석이 가능하였다. 압력보상 이미터의 성능 예측 결과를 Fig. 4.12와 Fig. 4.13에 나타내었으며, case별로 실험 결과와 비교하였다. 초기 압력 구간에서 수치해석에 의한 유출 유량과 탄성막 변형이 과소 해석되었으나, 최대 유출 유량을 포함한 압력보상 구간을 비교적 정확하게 예측하였다.

수치해석으로 예측된 유입 압력 구간의 예측 정확성을 상관계수 (R^2)와 $NRMSE$ (Normalized Root Mean Square Deviation)의 2 가지 통계 변수로 평가하였으며, 각각의 계산 방법은 식 (4.1)와 식 (4.2)과 같고 평가 결과는 Table 4.2와 같다.

$$R^2 = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.1)$$

여기서, x_i 는 실험 결과, \bar{x} 는 실험 결과의 평균값, y_i 는 수치해석 결과, \bar{y} 는 수치해석 결과의 평균이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (4.2)$$
$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 (\%)$$

여기서, *RMSE* (Root Mean Square Deviation)는 평균 제곱근 편차이다.

압력보상 이미터의 수치해석에 의한 예측 결과 상관계수는 유출 유량에 대하여 0.983 - 0.994와 탄성막 변형에 대하여 0.980 - 0.997로 비교적 높은 유사성을 보였다. 수치해석의 예측 결과 *NRMSE*는 모두 10 % 이하로 나타나 수치해석 예측 정확성으로는 비교적 양호하게 나타났으며, 초기 구간의 오차를 고려하면 압력보상 구간의 예측 정확성은 비교적 높은 것으로 생각된다. 그러나, 선행 연구와 유사하게 양방향 유체-구조 연계해석 모델을 통해 유출 유량이 감소하는 압력 구간을 해석하지 못한다는 한계가 있었으며 (Chen et al., 2021), 압력보상 이미터의 설계 최적화를 위해 해석 모델을 개선할 필요가 있다.

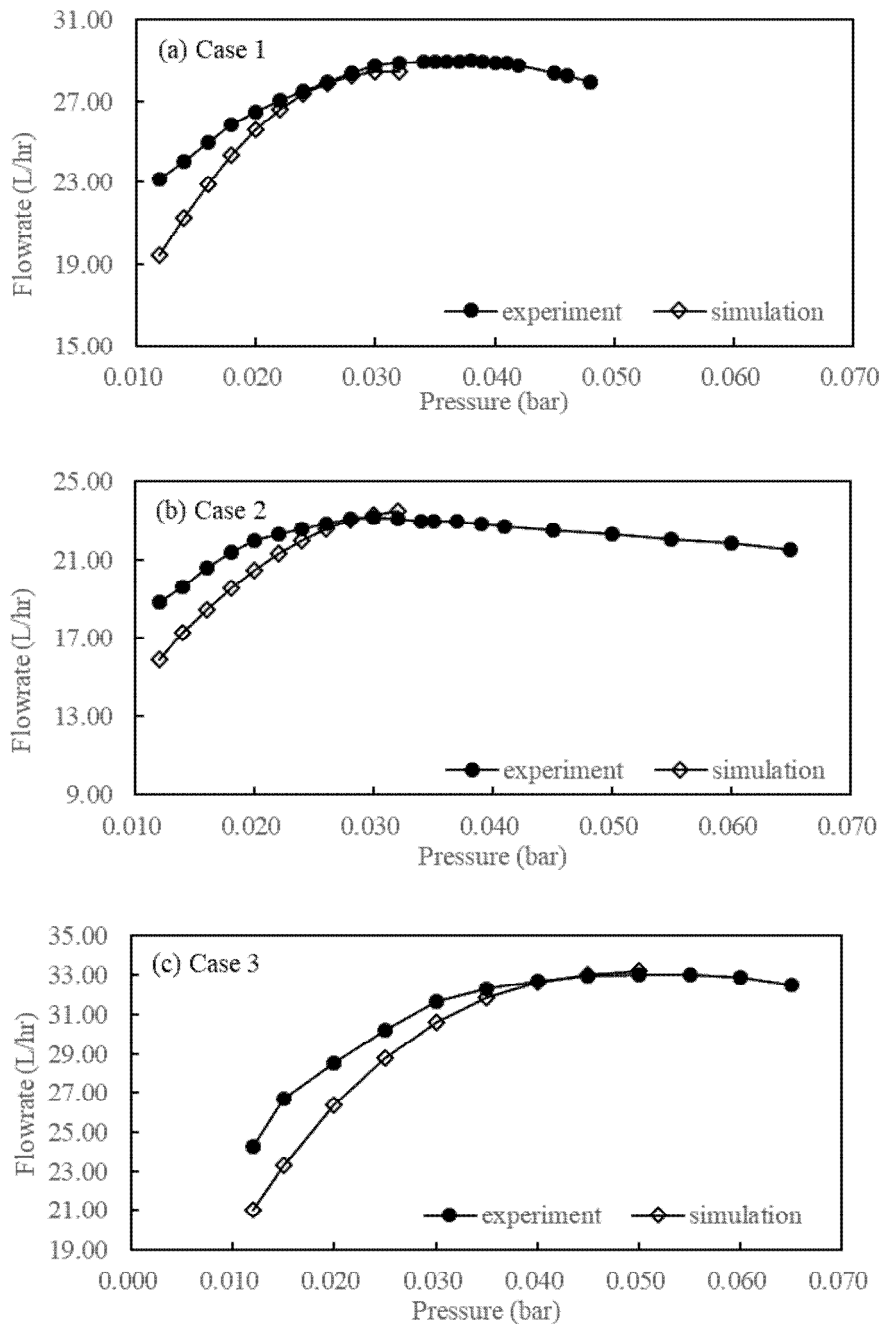


Fig. 4.12 Comparison of outlet flow rate against inlet pressure according to type of pressure-compensating emitter by experiment and simulation.

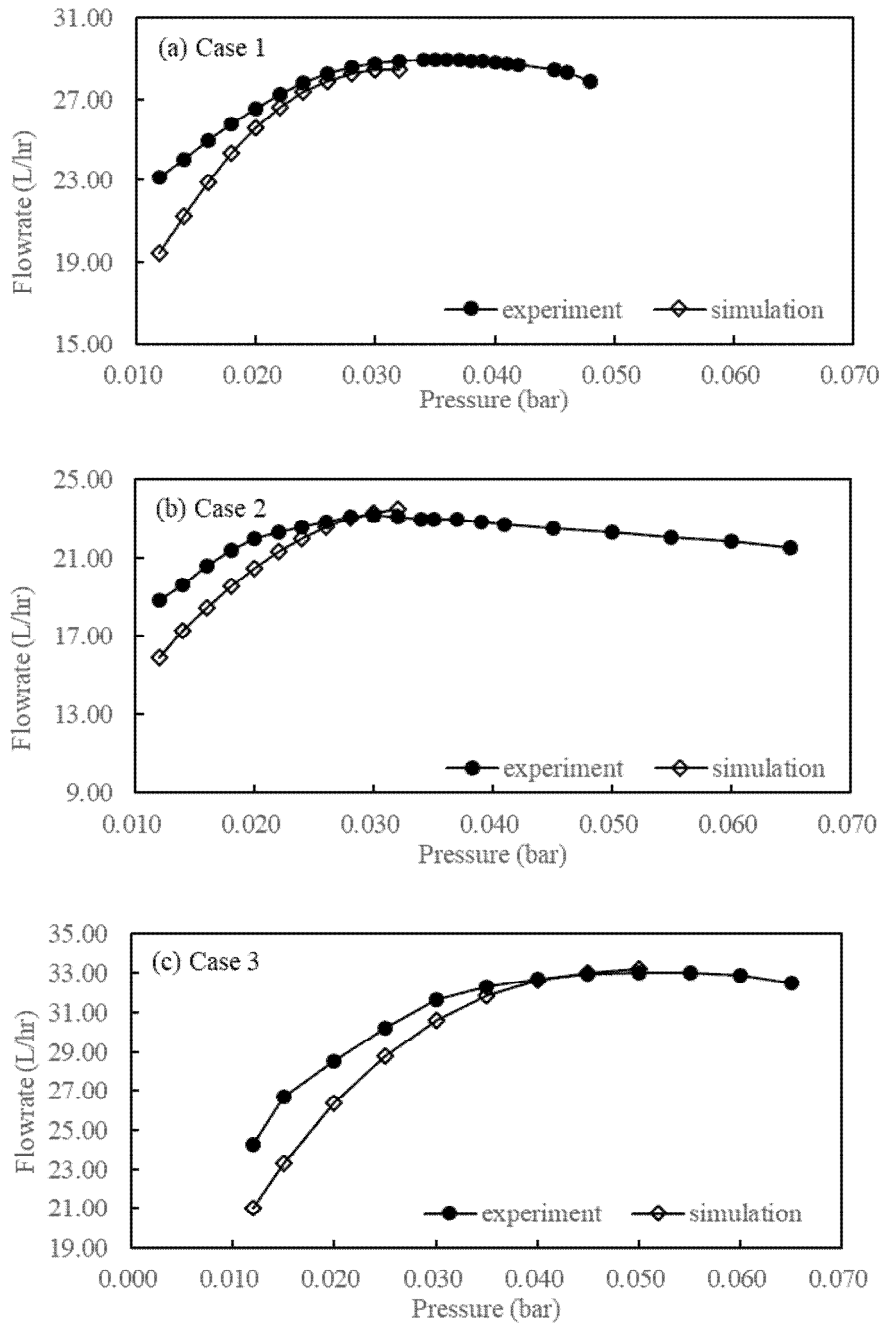


Fig. 413 Comparison of maximum deformation against inlet pressure according to type of pressure-compensating emitter by experiment and simulation.

Table 4.2 Statistical analysis of model experiment and simulation result.

Statistical parameter	Case 1		Case 2		Case 3	
	Flow rate	Deformation	Flow rate	Deformation	Flow rate	Deformation
NRMSE (%)	6.09	8.51	7.03	8.49	6.28	8.25
R ²	0.985	0.980	0.983	0.997	0.994	0.993

4.2.2 유체-구조 영역의 국부적 거동 분석

양방향 유체-구조 연계해석 모델의 예측 정확성이 비교적 높았기 때문에 해석 결과를 바탕으로 압력보상 이미터 유체-구조 영역의 국부적 거동을 분석하였다. 압력보상 현상의 국부적인 원인을 파악하기 위해, 각 case별 초기의 압력 지점과 최대 유출 유량이 나타난 압력 지점의 결과를 Fig. 4.14 - 4.19와 같이 비교하였다.

유입 압력에 따른 탄성막 거동의 해석 결과를 Fig. 4.14와 같이 분석하였으며, 각 case별로 최대 유출 유량이 나타나는 압력 지점에서의 탄성막 정면과 측면 단면 변형 결과를 비교하였다. 정면 결과에서 탄성막의 두께를 제외하면 양 측면의 탄성막-유출구 시작부 간격이 유사하게 나타났다. 반면에 측면 결과에서는 압력보상 이미터 모형 실험 결과와 유사하게 case 1과 3 탄성막보다 case 2 탄성막의 최대 변형이 유로에 가까운 위치에서 나타났으며, 이로 인해 후면 방향의 탄성막-유출구 시작부 간격이 더 좁게 나타났다.

탄성막의 변형은 유입구-탄성막 하단과 유출구-탄성막 상단 유체 영역의 압력 차이가 유효할 것으로 생각되며, 매개변수 모델링 연구에서는 이러한 압력 차이를 탄성막 하단에 작용하는 등분포 압력으로 가정하여 구조해석하였다. 해당 가정을 검증하기 위해, 양방향 유체-구조 연계해

석 결과에서 탄성막 상·하단면에 작용하는 압력의 차이에 따른 탄성막 변형 관계와 매개변수 모델의 가정과 같이 압력 차이를 탄성막 하단에 등분포 하중으로 부여한 구조해석 결과를 Fig. 4.15와 같이 비교하였다. 전체 압력 구간에서의 상관 계수는 0.9983 - 0.9996, *NRMSE*는 0.099 - 0.171 %로 높게 나타났으나, 압력보상 구간으로 갈수록 연관성이 떨어졌다. 초기의 압력 구간에서는 챔버 영역의 압력 분포가 비교적 균일하였으나, 압력보상 구간으로 갈수록 유출구 시작부 단면에서의 압력이 저하되어 등분포로 가정된 구조해석 결과와의 차이가 커진 것으로 생각된다. 이를 고려하면, 이러한 가정이 매개변수 모델의 압력보상 구간 오차의 원인인 것으로 생각된다.

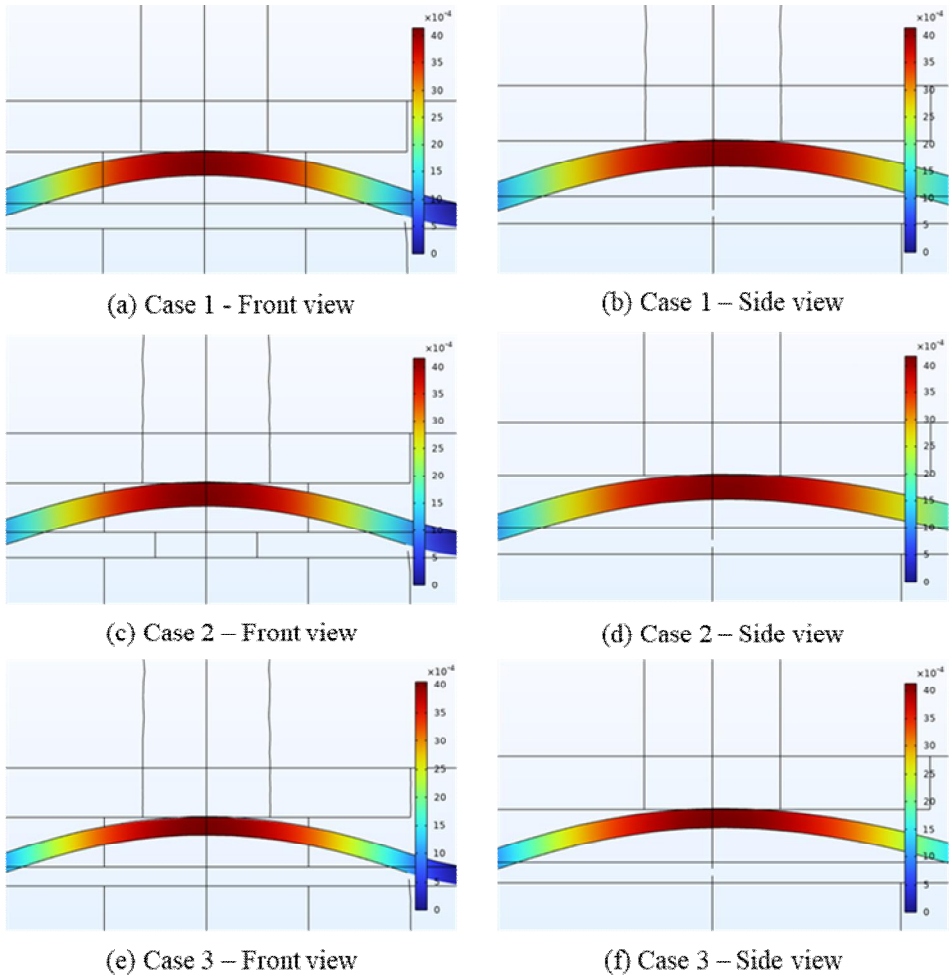


Fig. 4.14 Contour plots for deformation of elastic membrane at maximum inlet pressure according to cases and view.

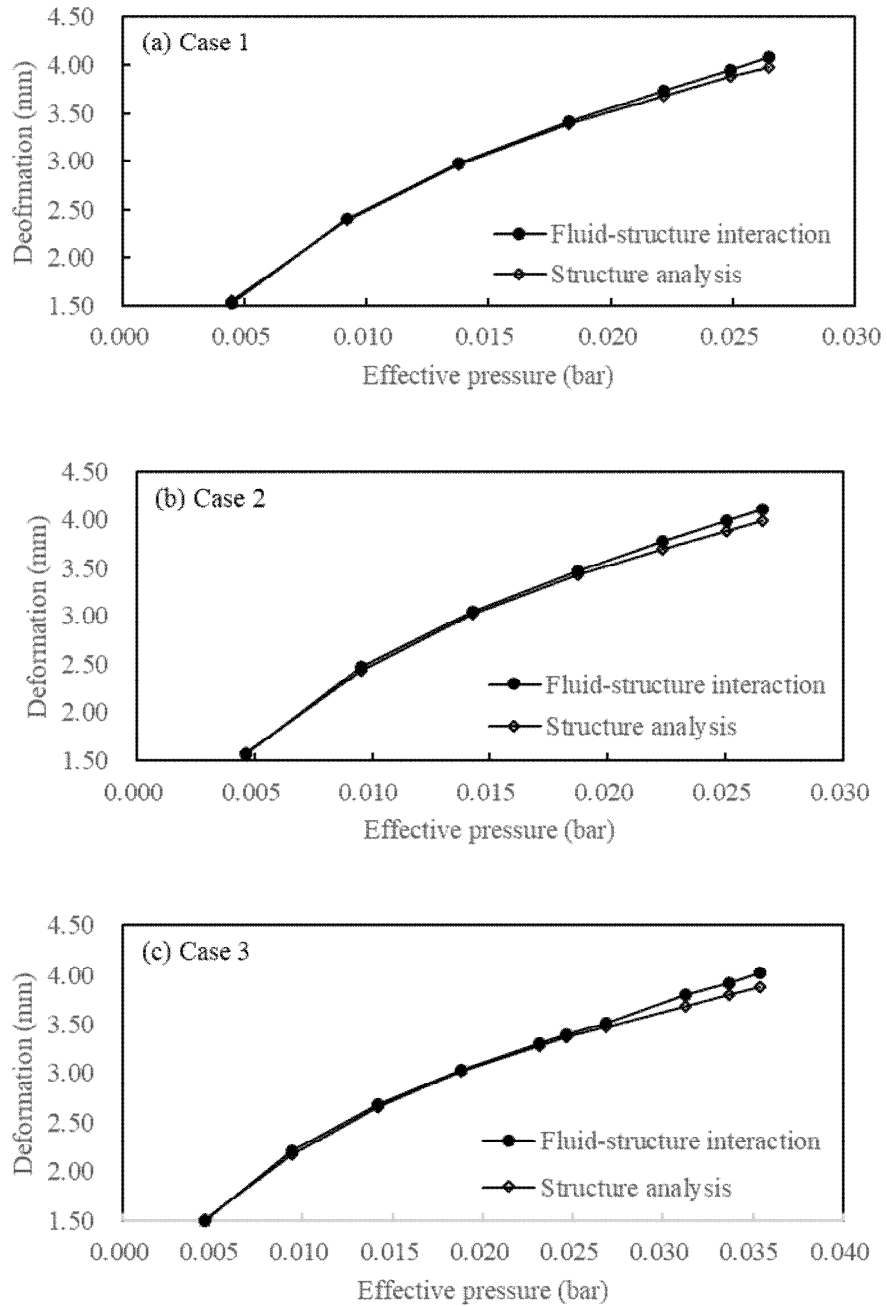
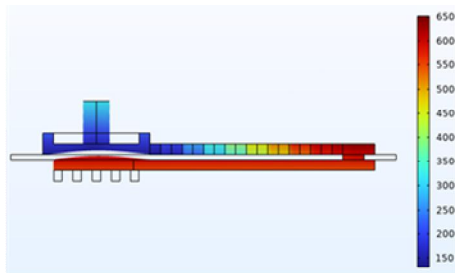


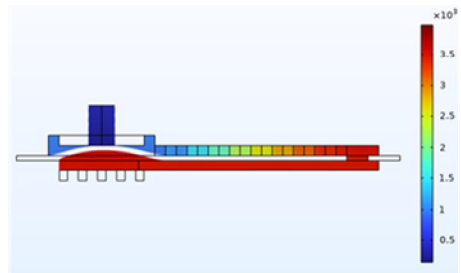
Fig. 4.15 Comparison of maximum deformation against effective pressure to elastic membrane by fluid-structure interaction and structure analysis.

압력보상 이미터 유체 영역 압력 분포의 측면 단면 결과를 Fig. 4.16와 같이 나타내었다. 모든 case에서 공통적으로 유입구에서 유출구 시작부까지 압력이 점차 감소하나, 초기 압력 구간에서는 유출구 시작부에서 끝단으로 갈수록 압력이 커졌다. 이는 비교적 낮은 초기 압력 구간에서 중력에 의한 정수압 비중이 컸기 때문으로 생각된다. 유입구 영역에서 미로 유로 직전 영역까지는 압력 저하가 거의 발생하지 않았으며, 대부분의 압력 저하는 미로 유로를 지나며 발생하였다. 또한, 압력보상 구간에서는 유출구 단면 감소로 인해 비교적 압력 저하가 크게 나타난 것으로 생각되며, 압력보상 현상의 원인으로 작용하였다.

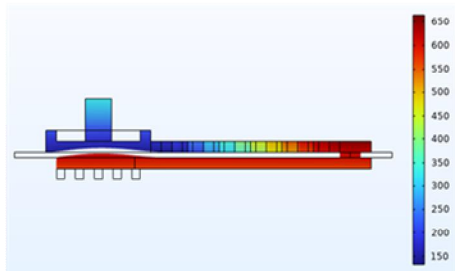
압력보상 이미터 유체 영역 유선 분포의 상단 결과를 Fig. 4.17와 같이 나타내었다. 초기 압력 구간에서는 공통적으로 미로 유로 측부와 만곡부에서 와류 (Vortex)가 발생하였으며, case 1과 3은 case 2에 비해 미로 유로에서 챔버 영역으로 유입되는 주 흐름이 우측면에 치우쳐져 나타났다. 반면에 case 2는 주 흐름이 비교적 가운데로 유입되어 챔버 반대쪽 벽면에 부딪혀 양측면으로 분리되었으며, 이로 인해 속력이 비교적 낮게 나타났다. 압력보상 구간에서는 case 2의 주 흐름이 미로 유로에 가까운 위치에서 양측면으로 분리되었으며, case 1과 3의 경우 초기 압력 구간과 유사하게 주 흐름이 우측면에 치우쳐져 나타났다.



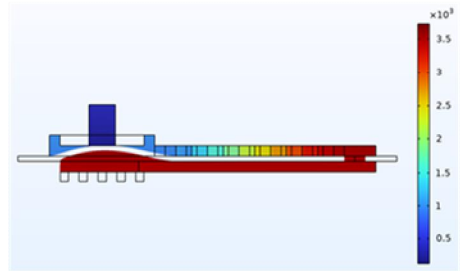
(a) Case 1 - Inlet pressure 0.005 bar



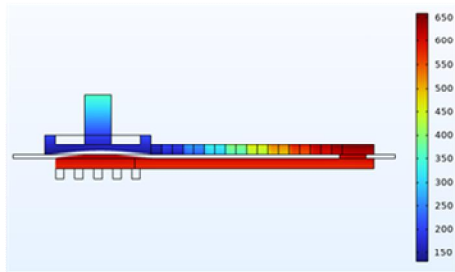
(b) Case 1 - Inlet pressure 0.032 bar



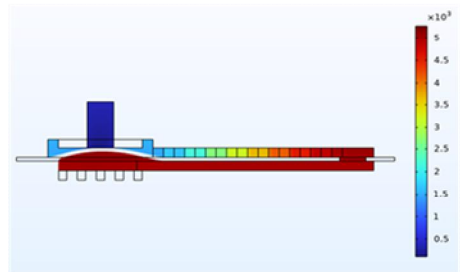
(c) Case 2 - Inlet pressure 0.005 bar



(d) Case 2 - Inlet pressure 0.030 bar

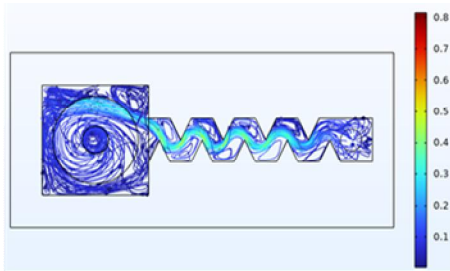


(e) Case 3 - Inlet pressure 0.005 bar

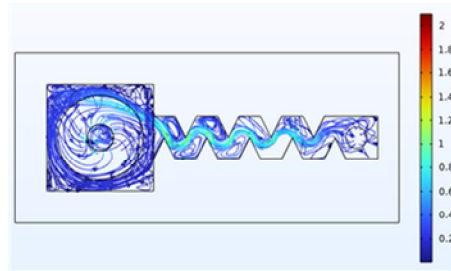


(f) Case 3 - Inlet pressure 0.050 bar

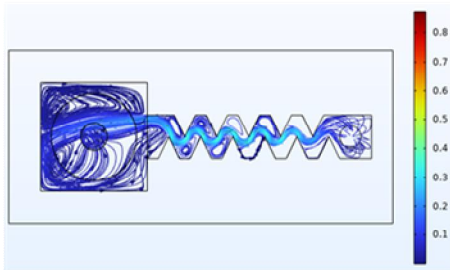
Fig. 4.16 Contour plots of fluid pressure at side view according to inlet pressure and cases.



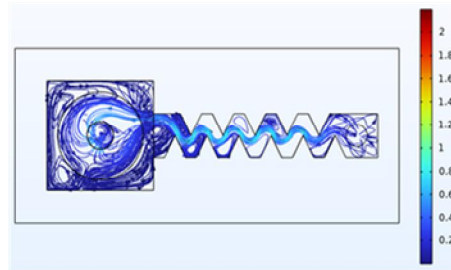
(a) Case 1 - Inlet pressure 0.005 bar



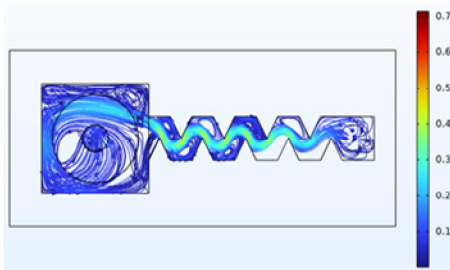
(b) Case 1 - Inlet pressure 0.032 bar



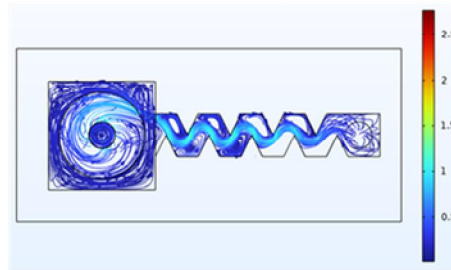
(c) Case 2 - Inlet pressure 0.005 bar



(d) Case 2 – Inlet pressure 0.030 bar



(e) Case 3 - Inlet pressure 0.005 bar

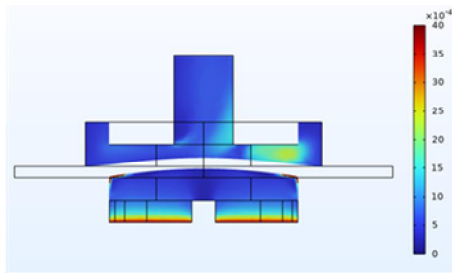


(f) Case 3 - Inlet pressure 0.050 bar

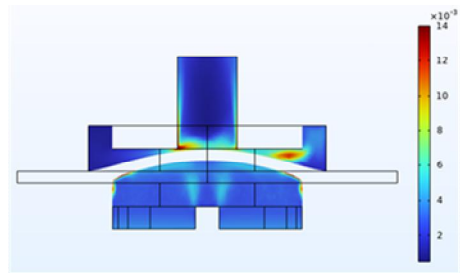
Fig. 4.17 Contour plots of streamline at top view according to inlet pressure and cases.

압력보상 이미터 유체 영역 난류 운동 에너지 분포의 정면과 측면 단면 결과를 Fig. 4.18와 Fig. 4.19와 같이 나타내었다. 정면 단면 분포 결과에서 초기 압력 구간은 주 흐름이 지나가고 속력이 높게 나타난 위치에서 난류 운동 에너지가 높게 나타났으며, 유입되며 발생하는 난류 운동 에너지 비중이 비교적 컸다. 압력보상 구간에서는 case 2에 비해 case 1과 3의 챔버 영역에서 주 흐름이 지나가는 위치와 유출구 시작부 단면에서의 난류 운동 에너지가 높게 나타났으며, case 2의 경우 주 흐름이 분리되어 속력이 낮기 때문에 난류 에너지가 낮게 나타난 것으로 생각된다. 측면 단면 분포에서 전체 압력 구간에서 미로 유로 영역에서 난류 운동 에너지가 가장 높게 나타났으며, case 1과 3은 챔버 영역에서 주 흐름이 지나가는 유로 반대쪽 측면 영역의 난류 운동 에너지가 비교적 높게 나타났다. 압력보상 구간에서 유출구 시작부 단면에서의 난류 운동 에너지가 높게 나타났으나 case 1과 3이 비교적 더 높았으며, 이는 case 2의 챔버 영역 주 흐름이 분리되었기 때문으로 생각된다.

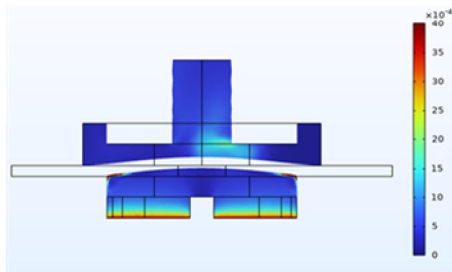
양방향 유체-구조 연계해석의 국부적인 분석 결과를 종합하면, 초기 압력 구간에서 유출구 시작부에서 끝단으로 갈수록 중력에 의해 정수압이 증가하였으나 실제 거동에서는 중력이 유체의 운동 에너지로 전환될 것으로 생각된다. 이러한 수치해석의 설정이 초기 압력 구간의 유출 유량과 탄성막 변형 결과 오차의 원인으로 생각된다. 또한, 전체 압력 구간에서 미로 유로에 의한 난류 운동 에너지가 가장 높게 나타났으며, 이는 층류 흐름이 지배적일 것으로 예상되는 초기 압력 구간에서 유출 유량이 과소 해석되는 원인으로 생각된다. 전체 압력 구간에서 압력 저하와 난류 운동 에너지는 주로 미로 유로 영역에서 나타났으며, 특히 압력보상 구간에서는 유출구 시작부에서 압력 저하와 난류 운동 에너지 발생 경향이 커 압력보상 구간의 거동 조절은 챔버의 설계 인자가 주요할 것으로 생각된다.



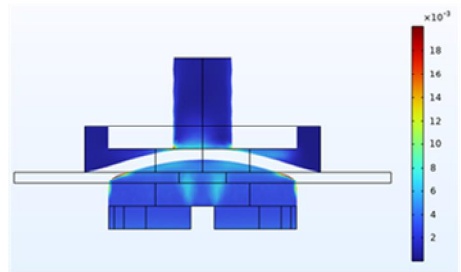
(a) Case 1 - Inlet pressure 0.005 bar



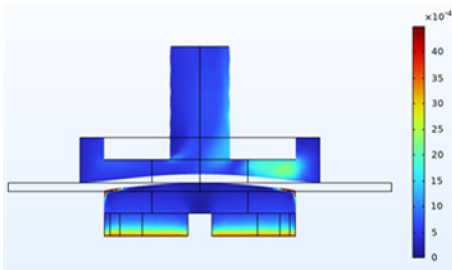
(b) Case 1 - Inlet pressure 0.032 bar



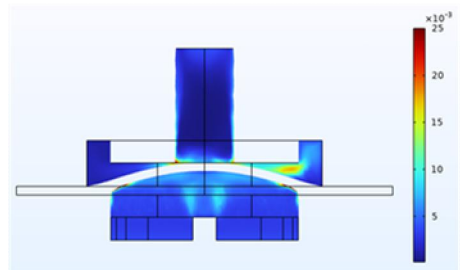
(c) Case 2 - Inlet pressure 0.005 bar



(d) Case 2 - Inlet pressure 0.030 bar

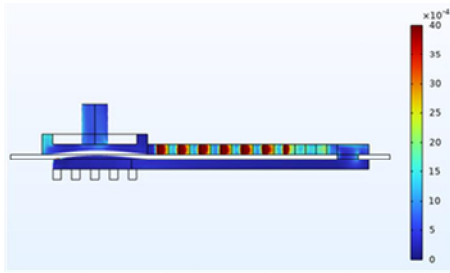


(e) Case 3 - Inlet pressure 0.005 bar

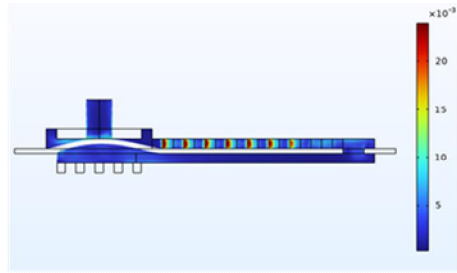


(f) Case 3 - Inlet pressure 0.050 bar

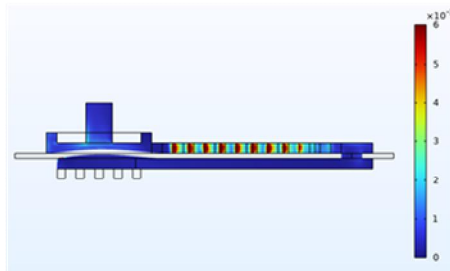
Fig. 4.18 Contour plots of kinetic turbulence energy at front view according to inlet pressure and cases.



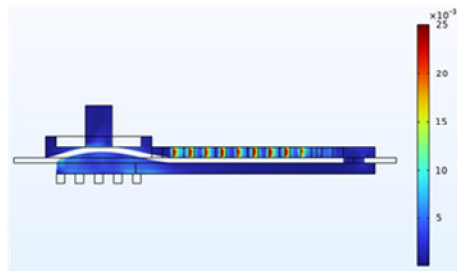
(a) Case 1 - Inlet pressure 0.005 bar



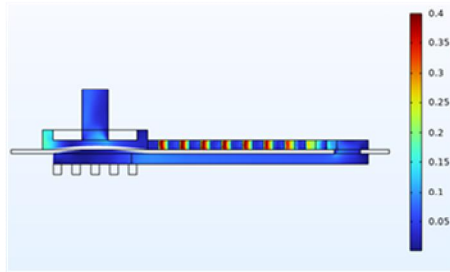
(b) Case 1 - Inlet pressure 0.032 bar



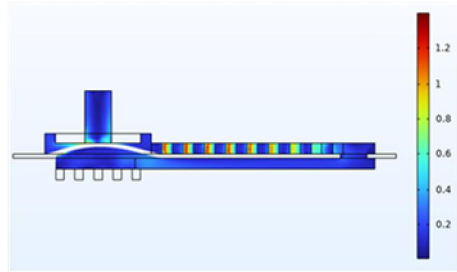
(c) Case 2 - Inlet pressure 0.005 bar



(d) Case 2 - Inlet pressure 0.030 bar



(e) Case 3 - Inlet pressure 0.005 bar



(f) Case 3 - Inlet pressure 0.050 bar

Fig. 4.19 Contour plots of kinetic turbulence energy at side view according to inlet pressure and cases.

4.3 압력보상 이미터 최적 설계 인자 고찰

압력보상 이미터를 실제 농업에 적용할 때는 농경지의 가압 조건과 작물 특성을 고려하여, 이에 적합한 압력보상 구간 및 최대 유량을 가진 점적 관개 시스템을 설계하는 것이 필요하다. Shock et al. (2005)는 노지에서 양파를 대상으로 0.25와 0.50 L/hr의 점적 관 유출 유량 조건에 따른 생산량과 작물 품질을 비교하였으며, 0.50 L/hr 점적 관이 생산량과 작물 품질 측면에서 유리하였다고 보고하였다. Kumar et al. (2015)는 노지에서 토마토를 대상으로 2, 4와 8 L/hr 점적 관에 의한 생산량을 비교하여 2 L/hr 점적 관의 생산 효율이 높았다고 보고하였다. 점적 관개 시스템 기업에서는 이러한 작물 특성에 적합한 압력보상 이미터를 선택할 수 있도록 다양한 작동 유입 압력과 목표 유출 유량의 압력보상 이미터를 판매하고 있다 (Table 4.3).

Table 4.3 Performance specifications of commercial pressure-compensating emitters (Netafim, 2022; Jain Irrigation Systems, 2022; Rivulis Irrigation, 2022; Metzer, 2022; Namkyung, 2022).

Corporation	Netafim	Jain Irrigation Systems	Rivulis Irrigation	Metzer	Namkyung
Product	DripNet PC HWD	Turbo Cascade PC	D5000 PC	ASSIF	Waterline-PC
Range of inlet pressure (bar)	0.5 - 4.0	0.5 - 4.0	0.5 - 3.5	1.0 - 4.0	1.0 - 1.5
Uniform flow rate (L/hr)	0.4, 0.6, 1.0, 1.6, 2.0, 3.0, 3.8	1.1, 1.6, 2.0, 2.2, 3.8	0.65, 1.0, 1.5, 2.0, 3.5	0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.1, 3.4	1.8

그러나, 상술한 기업의 압력보상 이미터의 수리학 실험 연구에서는 균일 유량이 유지되는 압력 범위가 제시된 것보다 짧다고 보고하였으며 (Nam et al., 2021; Sokol et al., 2019), 유사한 형태로 설계된 본 연구의

압력보상 이미터의 압력보상 구간 및 압력에 따른 유량 관계는 다르게 나타났다. 미래 정밀 관개를 위해서는 정확한 균일 유량과 압력 범위 제시가 필요하며, 이를 위한 압력보상 이미터의 성능 예측 모델 개발과 최적화 설계가 필수적인 것으로 판단된다.

본 연구의 대상 압력보상 이미터의 모형 실험 결과를 원형의 결과로 환산하였을 때 case 1·2·3 압력보상 이미터의 압력보상 구간은 종류별로 각각 1.54 - 3.84, 1.28 - 3.65와 1.86 - 4.67 bar로 나타났으며, 최대 유량은 각각 3.62, 2.90과 4.13 L/hr로 상용 압력보상 이미터의 유량보다 높게 나타났다. 압력보상 이미터의 모형 실험 결과에서 설계 인자의 성능 영향을 분석하였을 때 미로 유로의 형상이 유출 유량의 증가·감소와 압력보상 구간의 변경에 영향을 미쳤으나, 주로 유출 유량 변화에 더 민감한 것으로 판단된다. 반면에 탄성막 강성은 압력보상 구간 변경에 더 민감한 것으로 판단된다. 미로 유로 형상과 탄성막 강성 이외에도 압력보상 이미터는 압력보상 구간에서 챔버 영역에 의한 난류 운동 에너지 및 압력 저하 경향이 컸으며, 챔버 치수, 랜드 높이와 유출구 단면적 등이 압력보상 이미터 성능에 주요할 것으로 판단된다. 설계인자 변경에 따른 결과를 고려하면, 농경지 지형과 가압 조건에 따른 전체 압력 수두의 범위가 압력보상 구간 내에 포함되면서, 최대 유량이 대상 작물에 적합한 유량을 만족하도록 압력보상 이미터를 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

제 5 장 요약 및 결론

본 연구에서는 압력보상 이미터의 유체-구조 상호작용 원리를 도출하기 위해 상사 법칙을 적용한 확대 모형 실험을 수행하였으며, 양방향 유체-구조 연계해석 모델을 설계하여 국부적인 거동을 분석하였다. 압력보상 이미터의 주요 설계 인자인 미로 유로와 탄성막 강도를 변경 설계하여 실험 결과를 비교하였으며, 양방향 유체-구조 연계해석을 이용하여 최대 유출 유량을 비교적 정확하게 예측하였다. 이에 대한 연구 결과를 다음과 같이 요약하였다.

압력보상 이미터의 확대 모형 실험을 통해 유입 압력에 따른 유출 유량과 탄성막 변형을 관찰하였다. 압력보상 이미터의 유입 압력에 따른 유출 유량 증가 경향이 둔화되는 것은 유출구 시작부의 단면적 변화가 주요하였다. 또한, 설계된 압력보상 이미터의 형상에 따라 탄성막에 진동이 발생하여 유출 유량을 불안정하게 하므로, 이를 방지하기 위한 압력보상 이미터 설계가 필요한 것으로 분석되었다.

압력보상 이미터의 설계 인자별 성능에 대한 영향을 분석하였다. 미로 유로 형상과 탄성막 강성의 변경은 모두 최대 유출 유량을 증가·감소시키고, 최대 유출 유량이 나타나는 압력 지점을 포함한 압력보상 구간을 이동시켰다. 특히, 미로 유로 형상은 주로 최대 유출 유량 변화에 주요하였으며, 탄성막 강성은 압력보상 구간의 변화에 주요하였다.

양방향 유체-구조 연계해석 모델을 설계하여 압력보상 이미터의 최대 유출 유량이 나타나는 압력 구간까지 해석하였다. 수치해석의 예측 결과는 실험 결과와 비교하여 10 % 이내로 나타났으며, 특히 압력보상 구간을 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 따라서, 초기 압력 구간의 오차 원인으로 분석된 난류 운동 에너지 관련 인자를 수정하거나, 매개변수 모델을 개선하면 추후 완전한 압력보상 이미터의 성능 예측 모델을 개발할 수 있을 것으로 생각된다.

높은 예측 정확성을 나타내어 신뢰성이 있다고 판단된 수치해석 결과를 바탕으로 압력보상 이미터 유체-구조 영역을 국부적으로 분석하였

다. 전체 압력 구간에서 미로 유로에 의한 압력 저하와 난류에 의한 운동 에너지 손실이 컸으며, 압력보상 구간에서는 유출구 시작부 단면과 챔버 내 주 흐름 위치에서 손실이 컸다.

연구 대상인 case 1·2·3의 압력보상 구간은 각각 1.54 - 3.84, 1.28 - 3.65와 1.86 - 4.67 bar로 나타났으며, 최대 유량은 각각 3.62, 2.90와 4.13 L/hr로 나타났다. 대상 압력보상 이미터가 정밀 관개에 적용된다면, 작물의 최적 유량에 근접한 최대 유량을 나타내면서 농경지 지형과 가압 조건에 따른 지점별 압력 수두가 압력보상 구간 내에 들어오도록 점적 관개 시스템을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

모형 실험과 수치해석 결과 분석을 종합하면, 압력보상 구간에서는 성능에 대하여 챔버 영역의 영향이 비교적 클 것으로 예상된다. 따라서, 기존의 압력보상 이미터 연구에서 성능에 주요할 것으로 예상되었던 미로 유로 형상과 탄성막 강성에 더하여 챔버의 치수, 랜드 높이와 유출구 직경을 최적화 설계 인자로 고려할 수 있으며, 이를 고려한 최적화 설계를 통해 농경지 조건에 적합한 점적 관개 시스템 설계 및 정밀 관개를 실현할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. AL-agele, H. A., Nackley, L., and Higgins, C. (2021). Testing novel new drip emitter with variable diameters for a variable rate drip irrigation. *Agriculture*, 11(2), 87. doi.org/10.3390/agriculture11020087.
2. Al-Muhammad, J., Tomas, S., and Anselmet, F. (2016). Modeling a weak turbulent flow in a narrow and wavy channel: case of micro-irrigation. *Irrigation science*, 34(5), 361-377. doi.org/10.1007/s00271-016-0508-6.
3. Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., and Pumo, D. (1997). Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*, 123(1), 1-7. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:1(1).
4. Brown, G. O. (2002). *Environmental and water resources history*. Chapter: The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance. doi.org/10.1061/40650(2003)4.
5. Celik, H. K., Karayel, D., Caglayan, N., Rennie, A. E., and Akinci, I. (2011). Rapid prototyping and flow simulation applications in design of agricultural irrigation equipment: case study for a sample in-line drip emitter: the paper is to study CFD and RP application samples on the design issues associated with agricultural irrigation equipment. *Virtual and Physical Prototyping*, 6(1), 47-56. doi.org/10.1080/17452759.2010.525215.
6. Chen, J., Wang, M., and Fan, S. (2013). Experimental investigation of small scaled model for powerhouse dam section on shaking table. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(5), 740-752. doi.org/10.1002/stc.1489.
7. Chen, X., Wei, Z., and He, K. (2022). An Estimation of the Discharge Exponent of a Drip Irrigation Emitter by Response

- Surface Methodology and Machine Learning. *Water*, 14(7), 1034. doi.org/10.3390/w14071034.
8. Chen, X., Wei, Z., Ma, C., and Wei, C. (2021). Flow characteristics and diaphragm deformation of pressure compensating drip irrigation emitters. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 996–1009. doi.org/10.1002/ird.2601
 9. de Jesus Souza, W., Sinobas, L. R., Sánchez, R., Botrel, T. A., and Coelho, R. D. (2014). Prototype emitter for use in subsurface drip irrigation: Manufacturing, hydraulic evaluation and experimental analyses. *Biosystems engineering*, 128, 41–51. doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.011.
 10. Demir, V., Yurdem, H., and Degirmencioglu, A. (2007). Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integrated in-line and on-line emitters using dimensional analysis. *Biosystems Engineering*, 96(4), 617–631. doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.01.002.
 11. Demir, V., Yürdem, H., Yazgi, A., and Günhan, T. (2019). Measurement and prediction of total friction losses in drip irrigation laterals with cylindrical integrated in-line drip emitters using cfd analysis method. *Journal of Agricultural Sciences*, 25(3), 354–366. doi.org/10.15832/ankutbd.433830.
 12. Feng, J., Li, Y., Wang, W., and Xue, S. (2018). Effect of optimization forms of flow path on emitter hydraulic and anti-clogging performance in drip irrigation system. *Irrigation science*, 36(1), 37–47. doi.org/10.1007/s00271-017-0561-9.
 13. Gent, A. N. (1958). On the relation between indentation hardness and Young's modulus. *Rubber Chemistry and Technology*, 31(4), 896–906. doi.org/10.5254/1.3542351.
 14. Gent, A. N. (2012). *Engineering with Rubber: How to Design*

- Rubber Components Edition (3rd Edition)*. Carl Hanser Verlag Gmbh & Co. KG.
15. Hsiao, T. C., Fereres, E., Acevedo, E., and Henderson, D. W. (1976). Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. In *Water and plant life* (pp. 281–305). Springer, Berlin, Heidelberg.
 16. Jain Irrigation Systems. (2022). *Jain Turbo Cascade PC, PCAS & PCNL*. Retrieved from <https://www.jains.com>.
 17. Jung, S., Kang, J., Hong, I., and Yeo, H. (2012). Case study: Hydraulic model experiment to analyze the hydraulic features for installing floating islands. *Engineering*, 4(2).
doi.org/10.4236/eng.2012.42012.
 18. Kang, W. B., Kim, J., Mo, H., Eum, D., Lee, S., Kim, J., and Kim, S. (2022). A fluid–structure interaction analysis of design factor of subsurface irrigation PC dripper. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(7), 3469–3475.
doi.org/10.1007/s12206-022-0624-6.
 19. Kim, J. H., Woo, M. H., Choi, J. M., Kim, S. S., Kim, D. G. (2018). A study on the improvement of PC dripper for drip irrigation and the effect of silicone hardness. *Agricultural Life Science Research*, 52(3), 123–131.
doi.org/10.14397/jals.2018.52.3.123.
 20. Kim, R. W., Lee, I. B., Yeo, U. H., and Lee, S. Y. (2019). Estimating the wind pressure coefficient for single–span greenhouses using an large eddy simulation turbulence model. *Biosystems engineering*, 188, 114–135.
doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.009.
 21. Kumar, D., Kumar, A., Sarkar, S., Mohodi, D., Thakuria, P., and Das, J. (2015). Optimal design of flow rate in drip irrigation

- system to enhance the tomato cultivation. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 8(1), 11-19.
22. Kwon, K. S., Kim, D. W., Kim, R. W., Ha, T., and Lee, I. B. (2016). Evaluation of wind pressure coefficients of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land using a large-sized wind tunnel. *Biosystems Engineering*, 141, 58-81. doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.007.
 23. Landau, L. D., Lifšic, E. M., Lifshitz, E. M., Kosevich, A. M., and Pitaevskii, L. P. (1986). *Theory of elasticity: volume 7 (Vol. 7)*. Elsevier.
 24. Larock, B. E., Jeppson, R. W., and Watters, G. Z. (1999). *Hydraulics of pipeline systems*. CRC press.
 25. Lee, I. B., Okushima, L., Ikeguchi, A., Sase, S., and Short, T. H. (2000, July). Prediction of natural ventilation of multi-span greenhouses using CFD techniques and its verification with wind tunnel test. *In Proceedings of the 93rd Annual Meeting of ASAE, Paper* (No. 005003, pp. 9-12).
 26. Li, Y. K., Yang, P. L., Ren, S. M., and Xu, T. W. (2006). Hydraulic characterizations of tortuous flow in path drip irrigation emitter. *Journal of Hydrodynamics, ser. B*, 18(4), 449-457. doi.org/10.1016/S1001-6058(06)60119-4.
 27. Li, Y. K., Yang, P. L., Xu, T. W., Liu, H. L., Liu, H. S., and Xu, F. P. (2009). Hydraulic property and flow characteristics of three labyrinth flow paths of drip irrigation emitters under micro-pressure. *Transactions of the ASABE*, 52(4), 1129-1138.
 28. Liu, H. S., Li, Y. K., Liu, Y. Z., Yang, P. L., Ren, S. M., Wei, R. J., and Xu, H. B. (2010). Flow characteristics in energy dissipation units of labyrinth path in the drip irrigation emitters with DPIV technology. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(1), 137-145.

- doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60038-X.
29. Love, A. E. H. (1888). XVI. The small free vibrations and deformation of a thin elastic shell. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.(A.)*, (179), 491-546.
doi.org/10.1098/rsta.1888.0016.
 30. Mattar, M. A., Alamoud, A. I., Al-Othman, A. A., Elansary, H. O., and Farah, A. H. H. (2020). Hydraulic performance of labyrinth-channel emitters: experimental study, ANN, and GEP modeling. *Irrigation Science*, 38(1), 1-16.
doi.org/10.1007/s00271-019-00647-1.
 31. Mattar, M. A., and Alamoud, A. I. (2015). Artificial neural networks for estimating the hydraulic performance of labyrinth-channel emitters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 189-201. doi.org/10.1016/j.compag.2015.04.007.
 32. Metzger. (2022). *ASSIF Anti-Siphon PC Dripper product page*. Retrieved from <https://www.metzer-group.com>.
 33. Moody, L. F. (1944). *Friction factors for pipe flow*. Trans. Asme, 66, 671-684.
 34. Namkyung. (2022). *Product manual of Namkyung*. Retrieved from <http://www.irrigation.co.kr>.
 35. Nam, W. H., Choi, J. Y., Choi, S. G., Hong, E. M., Jeon, S. M., and Huh, S. O. (2012). Irrigation uniformity and performance evaluation of drip irrigation facilities. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(4), 29-38 (in Korean).
doi.org/10.5389/KSAE.2012.54.4.029.
 36. Narain, J., and Winter V, A. G. (2019). A hybrid computational and analytical model of inline drip emitters. *Journal of mechanical design*, 141(7). doi.org/10.1115/1.4042613.
 37. Netafim. (2022). *DripNet PC HWD product sheet*. Retrieved from

<https://www.netafim.com>.

38. Ogden, R. W., Saccomandi, G., and Sgura, I. (2004). Fitting hyperelastic models to experimental data. *Computational Mechanics*, 34(6), 484–502. doi.org/10.1007/s00466-004-0593-y.
39. Park, S. J., Lee, C. G., Lee, J., and Choi, W. (2018). Scaled-Down Experiments and Numerical Simulations for the Design of a Retention Tank with Rotatable Bucket. *Journal of Environmental Engineering*, 144(9), 04018092. doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001436.
40. Pence, T. J., and Gou, K. (2015). On compressible versions of the incompressible neo-Hookean material. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 20(2), 157–182. doi.org/10.1177/1081286514544258.
41. Philipova, N., Nikolov, N., Pichurov, G., and Markov, D. (2011). Regression equations of pressure losses of rectangular labyrinth channel and bi-objective optimization. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*, 64(12), 1749–1756.
42. Provenzano, G., Pumo, D., and Di Dio, P. (2005). Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation laterals. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(6), 525–532. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:6(525).
43. Rettore Neto, O., Botrel, T. A., Frizzone, J. A., and Camargo, A. P. (2014). Method for determining friction head loss along elastic pipes. *Irrigation Science*, 32(5), 329–339. doi.org/10.1007/s00271-014-0431-7.
44. Rivulis Irrigation. (2022). *D5000 PC/AS/ND Drip Line Product Brochure*. Retrieved from <https://www.rivulis.com>.
45. Safi, B., Neyshabouri, M. R., Nazemi, A. H., Massiha, S., and Mirlatifi, S. M. (2007). Water application uniformity of a subsurface drip irrigation system at various operating pressures

- and tape lengths. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 31(5), 275–285.
46. Shamsbery, P., and Winter, A. G. (2018). Shape and form optimization of on-line pressure-compensating drip emitters to achieve lower activation pressure. *Journal of Mechanical Design*, 140(3). doi.org/10.1115/1.4038211.
47. Shamsbery, P., Wang, R. Q., Tran, D. V., and Winter V, A. G. (2017). Modeling the future of irrigation: A parametric description of pressure compensating drip irrigation emitter performance. *PLoS One*, 12(4), e0175241. doi.org/10.1371/journal.pone.0175241.
48. Shock, C. C., Feibert, E. B., and Saunders, L. D. (2005). Onion response to drip irrigation intensity and emitter flow rate. *HortTechnology*, 15(3), 652–659.
49. Sokol, J., Amrose, S., Nangia, V., Talози, S., Brownell, E., Montanaro, G., Naser, K. A., Mustafa, K. B., Bahri, A., Bouazzama, B., Bouizgaren, A., Mazahrih, N., Moussadek, R., Sikaoui, L., and Winter, A. G. (2019). Energy reduction and uniformity of low-pressure online drip irrigation emitters in field tests. *Water*, 11(6), 1195. doi.org/10.3390/w11061195.
50. Sokol, J., Narain, J., Costello, J., McLaurin, T., Kumar, D., and Winter, A. G. (2022). Analytical model for predicting activation pressure and flow rate of pressure-compensating inline drip emitters and its use in low-pressure emitter design. *Irrigation Science*, 40(2), 217–237. doi.org/10.1007/s00271-022-00771-5
51. Wang, L. P., Wei, Z. Y., Zhou, X., and Yuan, W. J. (2012). Rapid stereotype of cylindrical drip emitter based on computational fluid dynamics and rapid prototyping manufacturing. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 190, pp. 390–394). Trans Tech Publications Ltd.

- doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.190-191.390.
52. Wang, W., Bralts, V. F., and Wang, J. (2012). A hydraulic analysis of an online pressure compensating emitter using CFD-CSD technology. In 2012 Dallas, Texas, July 29–August 1, 2012 (p. 1). *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
 53. Wei, Q., Shi, Y., Dong, W., Lu, G., and Huang, S. (2006). Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics. *Agricultural Water Management*, 84(1-2), 130–136. doi.org/10.1016/j.agwat.2006.01.016
 54. Wei, Z., Du, J., Yuan, W., and Zhao, G. (2014). Fluid-structure interaction analysis on pressure-compensating emitters. *Applied Engineering in Agriculture*, 30(5), 783–788.
 55. Wei, Z., Tang, Y., Zhao, W., and Lu, B. (2003). Rapid development technique for drip irrigation emitters. *Rapid Prototyping Journal*. doi.org/10.1108/13552540310467112.
 56. Weigand B, Simon V (2007) *Laws of similarity in fluid mechanics*. Flow phenomena in nature 1:20–35.
 57. Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD (Vol. 2, pp. 103–217)*. La Canada, CA: DCW industries.
 58. Yong-nian, H., and Ya-dong, H. (1989). On the transition to turbulence in pipe flow. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 37(1-3), 153–159.
 59. Zhang, J., Zhao, W., and Lu, B. (2011). New method of hydraulic performance evaluation on emitters with labyrinth channels. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 137(12), 811–815. doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000365.
 60. Zhang, J., Zhao, W., Wei, Z., Tang, Y., and Lu, B. (2007). Numerical and experimental study on hydraulic performance of

- emitters with arc labyrinth channels. *Computers and electronics in agriculture*, 56(2), 120–129. doi.org/10.1016/j.compag.2007.01.007.
61. Zhou, X., Wei, Z., Yuan, W., and Wang, L. (2013). Fluid–structure interaction analysis method for pressure compensating emitter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(2), 30–36.

Abstract

Fluid-Structure Interaction

Mechanism of Elastic Membrane for Pressure-Compensating Emitter

Seo, Byunghun

Major in Rural Systems Engineering
Department of Landscape Architecture and
Rural Systems Engineering
The Graduate School
Seoul National University

It is expected that global climate change induces an instability of water resource and increases water requirement of crop. Drip irrigation system is an irrigation method that directly supplies water to individual crop, so that improves not only quality and yield of crop, but also efficiency of water consumption. Flow rate to individual crop generally increases according to inlet pressure of water at each orifice, so that amount of irrigation water to each crop is irregular. PC (Pressure-Compensating) emitter attached to drip irrigation pipe can regulate the flow rate uniformly. For precision irrigation, it is

essential to design PC emitter that discharges target flow rate within supplied inlet pressure range. Prior to design optimization, the derivation of mechanism and reliable performance prediction must be preceded. However, it is difficult to observe deformation of elastic membrane pressurized by water, due to the small size of PC emitter. Because domain of fluid and structure are simultaneously deformed, computational fluid dynamics cannot analyze the PC emitter. In this study, an enlarged model experiment and two-way FSI (Fluid-Structure Interaction) analysis model were designed to analyze the interaction mechanism between the water and elastic membrane. By matching the flow rate and deformation according to inlet pressure of experiment, the flow rate of PC emitter was uniform at the pressure range that deformed elastic membrane reduced the cross-sectional area of outlet. The catastrophe phenomenon (i.e. vibration of elastic membrane) occurred at the specific PC emitter. Because the vibration of elastic membrane destabilized the flow rate, it is necessary to design the PC emitter preventing vibration. The model of PC emitter (Case 1) was compared with the PC emitter that geometry of labyrinth channel (Case 2) and stiffness of elastic membrane (Case 3) were changed. Through the results of experiment, the geometry of labyrinth channel mainly affected the maximum flow rate, and the stiffness of elastic membrane mainly affected pressure range of PC. The two-way FSI analysis model could analyze up to the inlet pressure of maximum flow rate, but cannot predict decrease section. The prediction error was within 10 % compared with the experiment, especially accurate at PC section. By analyzing the simulation results of pressure decrease and turbulence kinetic energy at fluid domain, the chamber domain were main factor for uniform flow rate at the PC section. Along with the geometry of labyrinth

channel and stiffness of elastic membrane, the chamber geometry was the main design parameter. The PC section of original model of case 1,2, 3 were 1.54 - 3.84, 1.28 - 3.65 and 1.86 - 4.67 bar, respectively. The maximum flow rates were 3.62, 2.90 and 4.13 L/hr, respectively. The yield and quality of crop were different according to the flow rate of drip irrigation pipe. Therefore, the PC emitter has to be designed that PC section includes the pressure range of target site and the maximum flow rate meet the optimal flow rate of target crop. Based on the results of this study, it is expected that the development of performance prediction model and optimization design of drip irrigation system will be possible.

**keywords : Pressure-compensating emitter; Similarity law;
Model experiment; Two-way fluid-structure interaction
analysis; Drip irrigation system**

Student Number : 2021-22890