

P-delta 효과를 고려한 박판 스프링 형 체크밸브의 압력전달 해석 및 실험적 검증

황용하¹ · 응위웬 안 폭¹ · 황재혁^{2,†} · 배재성²

¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Pressure Transfer Analysis and Experimental Verification of Thin Plate Spring Type Check Valve Considering P-delta Effect

Yong-Ha Hwang¹, Nguyen Anh Phuc¹, Jai-Hyuk Hwang^{2,†} and Jae-Sung Bae²

¹Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School at KAU

²Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

In this paper, the calculation of the theoretical pressure transfer ratio due to the deformation of the thin-plate spring type check valve applied to the small piezoelectric-hydraulic pump was carried out. A thin-plate check valve is a flexible body that is deformed by an external force. The deformation of the check valve affects the rate at which the chamber pressure is transferred to the load pressure. The theoretical pressure transfer ratio for each model was calculated to compare the difference between the assumption that the thin-plate check valve is a rigid body and that of the flexible body model. The P-delta effect was considered for the calculation of the pressure transfer ratio of the flexible check valve model. In addition, a verification test for the calculated pressure transfer ratio obtained by considering the deformation of the flexible check valve model was carried out. The load pressure was measured by applying a thin-plate and ball-thin plate spring type check valves, respectively. The experimental pressure transfer ratio was calculated using the respective load pressure obtained from the experiments. The validity of the pressure transfer analysis of the check valve, taking into consideration the P-delta effect, was verified by comparing it with the theoretically calculated pressure transfer ratio.

초 록

본 논문에서는 소형 압전유압펌프에 적용된 박판 스프링 형 체크밸브의 변형에 의한 이론적인 압력 전달 비율을 계산하였다. 박판 체크밸브는 외력에 의해 변형이 발생하는 유연체이며, 체크밸브의 변형은 챔버 압력이 부하 압력으로 전달되는 비율에 영향을 미친다. 박판 체크밸브를 강체로 가정하였을 때와 유연체 모델일 때의 차이를 비교하기 위해 각각의 모델에 대한 이론적인 압력 전달 비율을 계산하였고, 유연체 체크밸브 모델의 압력 전달 비율 계산을 위해 P-delta 효과를 고려하였다. 또한, 유연체 체크밸브 모델의 변형을 고려하여 계산된 압력 전달 비율의 검증 실험을 수행하였다. 실험에는 박판 스프링 형의 체크밸브와 볼-박판 스프링 형의 체크밸브를 각각 적용하여 부하 압력을 측정하였다. 실험을 통해 얻어진 각각의 부하 압력을 이용하여 실험적인 압력 전달 비율을 계산하였다. 실험으로 얻어진 결과를 이론적으로 계산된 압력 전달 비율과 비교하여 P-delta 효과를 고려한 박판형 체크밸브 압력전달 해석의 타당성을 검증하였다.

Key Words : P-delta Effect(P-delta 효과), Check Valve(체크 밸브), Small Piezoelectric-Hydraulic Pump(소형 압전유압펌프), Pressure transfer ratio(압력 전달 비율)

Received: July. 18, 2018 Revised: Sep. 28, 2018 Accepted: Oct. 07, 2018

† Corresponding Author

Tel: +82-02-300-0109, E-mail: jhhwang@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

1. 서 론

항공기의 일반적인 유압계통을 이용한 브레이크 시스

템은 저유기, 서보밸브, 체크밸브 및 전자제어장치 등의 다양한 구성품으로 인해 매우 복잡하다. 그러나 중 소형 무인항공기에는 공간적 제약과 시스템의 복잡성으로 인해 일반적인 유압계통을 활용한 브레이크 적용이 효율적이지 못하다. 따라서, 브레이크 계통의 단순화 및 경량화가 필요하며, 무엇보다도 동력전달을 담당하는 펌프의 소형화가 필수적으로 이루어져야 한다 [1-4]. 선행연구에서는 고효율의 에너지 변환이 가능한 구동기인 압전 작동기를 이용하여, 중소형 무인기에 적용 가능한 소형펌프를 제안하였다 [4-9]. 이에 펌프 구성품에 대한 해석 및 시제품의 설계/제작을 진행하였고, 소형 압전유압펌프의 성능 검증을 위한 실험을 수행하였다 [8-11]. 개발된 소형 압전유압펌프는 챔버(chamber), 유로(flow), 체크밸브(check valve) 등의 구성품으로 이루어져 있으며, 이 중 체크밸브는 부하 압력 형성에 중요한 역할을 담당한다.

체크밸브는 펌프 부하부의 유압 폐회로에 형성된 압력을 유지할 수 있도록 역류를 방지하는 동시에, 챔버에서 압전작동기에 의해 발생한 압력을 부하 압력으로 전달하는 역할을 한다. 이 때, 부하 압력은 챔버에서 흘러 들어온 유량에 의해 급격히 상승하게 되며, 이는 챔버 압력과 평형을 이룰 때 까지 지속된다. 포화 상태에서 부하 압력과 챔버 압력이 각각 체크밸브에 작용하는 단면적 사이에는 차이가 있으며, 이 단면적 비에 의해 압력 전달 비율이 결정된다. 체크밸브를 변형이 발생하지 않는 강체로 가정할 경우, 부하 압력은 단순히 체크밸브의 플랩(Flap)과 유로의 단면적 비에 의해 결정된다. 하지만, 실제 체크밸브는 외력에 의해 변형이 발생하는 유연체이며, 체크밸브의 변형은 챔버 압력과 부하 압력 간 압력 전달 비율에 변화를 일으키게 된다.

본 논문에서는 포화 상태에서 챔버 압력과 부하 압력이 체크밸브에 작용하면서 발생하는 변형에 의한 이론적인 압력 전달 비율을 유도하였다. 이를 위해 체크밸브의 플랩을 단순지지된 원형 평판으로 가정하였고, 체크밸브의 반경 방향으로 작용하는 부하 압력이 체크밸브의 변형에 의해 발생하는 모멘트를 고려한 P-delta 효과를 고려하여, 체크밸브 변형 후에도 시트에서 떨어지지 않고 접촉을 유지하는 길이 δr 을 계산하였다. 이 δr 값은 이론적인 압력 전달 비율의 계산

을 위해 필요한 파라미터이다.

또한, P-delta 효과 및 원형 평판 방정식을 통해 얻어진 체크밸브의 압력 전달 비율을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 실험을 위해 선행 연구에서 개발된 박판 스프링 형 체크밸브와 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 각각 소형 압전유압펌프에 적용하여 부하압력을 측정하였다 [9,10]. 이 때 볼-박판 스프링 형 체크밸브는 챔버 압력과 부하 압력이 작용하는 단면적 비가 일치하도록 설계되어 챔버 압력을 100% 전달 가능하므로, 볼-박판 스프링 형 체크밸브 적용 시 측정된 부하 압력은 챔버 압력과 같다. 따라서 각각의 체크밸브 적용 시 측정된 부하 압력을 이용하여 실제 압력 전달 비율을 알 수 있고, 이론적으로 계산된 압력 전달 비율과 비교하였다. 이를 통해 P-delta 효과를 고려한 체크밸브 변형 해석에 대한 타당성을 검증할 수 있다. 실험은 저주파수인 50Hz , 고주파수인 120Hz 두 가지의 경우로 진행하였으며, 전압 입력의 크기를 압력이 충분히 발생하는 200V 부터 900V 까지 100V 간격으로 진행하였다.

2. 체크밸브 모델에 따른 압력 전달 비율의 변화

2.1 체크밸브 모델 : 강체로 가정

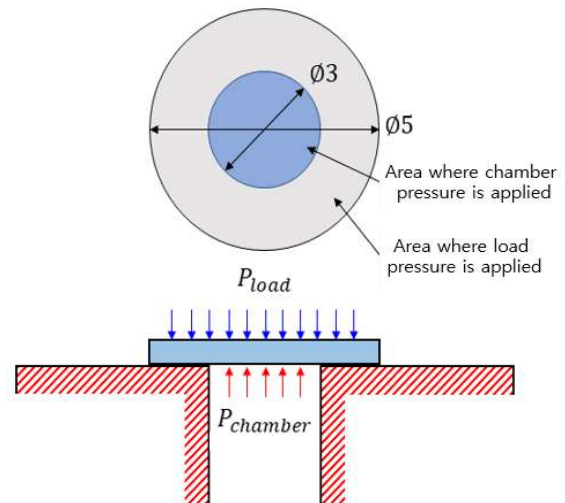


Fig. 1 Cross-sectional view of the sheet spring type check valve (rigid body)

제작된 박판 스프링 형 체크밸브는 시트에 고정되는 플랜지(flange), 개폐 작용을 하는 플랩, 플랜지와 플랩을 잇는 4개의 브릿지(bridge)로 구성되어있다[8,9]. Fig. 1은 압력 형성에 직접적인 영향을 미치는 체크밸브 플랩의 형상을 고려하여 체크밸브를 원형 평판으로 가정하고 체크밸브가 안착된 펌프의 단면형상을 나타낸 것이다. 이 때 체크밸브는 외력에 의한 변형이 발생하지 않는 강체로 가정하였다. Fig. 1에서 체크밸브에 작용하는 챔버 압력의 크기는 $P_{chamber}$ 이며, 부하 압력의 크기는 P_{load} 이다. 체크밸브 모델을 강체로 가정하였으므로 부하 압력이 포화 상태에 이르게 되면 체크밸브는 더 이상 열리지 않는다. 따라서 부하 압력은 직경 5mm인 체크밸브 플랩의 단면적 전체에 작용하게 되며, 챔버압력은 유로의 직경인 3mm에 해당하는 단면적 만큼 체크밸브에 작용하게 된다.

$$F_{equil} = P_{chamber} A_{chamber} = P_{load} A_{load} \quad (1)$$

$$\frac{A_{load}}{A_{chamber}} = \frac{P_{chamber}}{P_{load}} = 2.78 \quad (2)$$

Eq. (1), (2)는 체크밸브 양단의 압력에 의한 힘이 평형에 이르렀을 때 챔버 압력과 부하 압력의 관계를 나타낸 것이다. 이 때 F_{equil} 은 포화 상태에서 체크밸브의 양 방향에서 작용하는 힘이며, $A_{chamber}$ 와 A_{load} 는 각각 챔버 압력과 부하 압력이 체크밸브에 작용하는 단면적을 나타낸다. 이를 통해 강체 체크밸브 모델의 이론적인 압력 전달 비율을 계산할 수 있다. 하지만 실제 체크밸브는 변형이 발생하는 유연체이므로, 체크밸브의 변형을 고려한 압력 전달 비율을 다시 계산할 필요가 있다.

2.2 P-delta 효과를 고려한 유연체 체크밸브 모델의 압력 전달 비율

강체 모델은 체크밸브에 변형이 발생하지 않으므로 압력 형성에 영향을 미치는 수직 힘만 고려하였고, 반경 방향으로 작용하는 부하 압력에 의한 힘을 무시할 수 있었다. 그러나, 유연체 모델은 반경 방향의 힘에 의한 변형 또한 고려해야 한다. Fig. 2는 체크밸브에 작용하는 챔버 압력과 부하압력이 평형에 이르렀을 때

체크밸브의 굽힘에 의한 변형을 나타낸 것이다. 체크밸브 양단에 작용하는 압력에 의한 외력이 발생시키는 변형은 미소 변형으로 가정하였다. 따라서 r_o 는 체크밸브 플랩의 반지름으로 볼 수 있다. 또한, δr 는 체크밸브 변형 후 체크밸브와 시트가 서로 접촉을 유지하고 있는 길이로 정의하였으며, $r_i = r_o - \delta r$ 는 체크밸브에 변형이 일어난 부분의 반지름으로 정의하였다.

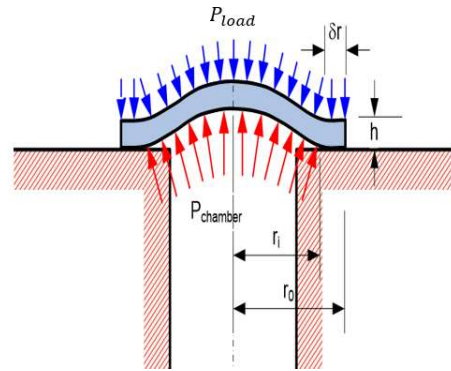


Fig. 2 Cross-sectional view of the sheet spring type check valve (flexible body)

체크밸브에 양단의 압력에 의한 변형이 발생하였으므로 반경방향으로 작용하는 부하압에 의한 모멘트가 발생하여 체크밸브의 변형을 더 크게 만들고, 이는 다시 더 큰 모멘트의 발생으로 이어진다. 이와 같이 체크밸브의 반경방향에 작용하는 힘에 의한 모멘트와 체크밸브의 변형이 연쇄적으로 영향을 미치는 현상을 P-delta 효과라고 한다[12,13]. 이러한 체크밸브의 변형은 반경방향으로의 힘이 체크밸브와 시트 사이에 발생하는 마찰력과 평형을 이룰 때까지 지속된다. 이를 통해 Eq. (3), (4)와 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$P_{load} \cdot h \cdot \pi \cdot d = P_{load} \cdot \mu \cdot \pi \cdot d \cdot \delta r \quad (3)$$

$$\therefore \delta r = \frac{h}{\mu} \quad (4)$$

Eq. (3)의 좌변은 반경 방향으로의 부하 압력에 의해 발생하는 힘이며, 우변은 체크밸브와 시트 사이의 마찰력이다. 여기서, $d=0.5mm$ (체크밸브 직경), $\mu=0.5$ (체크밸브와 시트의 금속 대 금속 접촉에 의한 마찰계수), $h=0.2mm$ (체크밸브 두께)이다. 또한 Eq. (4)에

의해 $\delta r = 0.4\text{mm}$ 이다. 체크밸브의 치수 및 외력을 알고 있으므로 이를 통해 원형 평판 방정식을 풀면 유연체 체크밸브 모델의 이론적인 변형을 알 수 있으며, 또한 압력 전달 비율을 계산할 수 있다. 이 때, 체크밸브의 플랩은 시트에 고정되지 않고 안착되어 있다. 따라서 원형 평판은 단순지지 되었다고 볼 수 있다. 원형 평판으로 모델링하여 시트에 단순지지된 체크밸브의 자유물체도를 Fig. 3에 나타내었다.

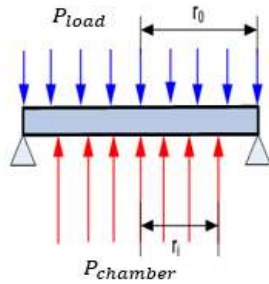


Fig. 3 Free body diagram of the check valve (simply supported circular plate)

이제 챔버 압력과 부하 압력에 의해 발생하는 체크밸브의 변위를 구하기 위해 다음 Eq. (5)와 같은 4차 원형 평판 미분방정식을 풀어야 한다.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right) \right] = \frac{q}{D} \quad (5)$$

여기서 q 는 챔버 압력 및 부하 압력에 의해 체크밸브에 가해지는 힘, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 이며, E 는 체크밸브의 영률(young's modulus of check valve), ν 는 체크밸브의 포아송 비(poisson's ratio)이다.

적분을 통해 Eq. (5)을 풀면 Eq. (6)을 얻을 수 있다.

$$w = \frac{qr^4}{64D} + C_1 r^2 \ln r + C_2 r^2 + C_3 \ln r + C_4 \quad (6)$$

$r \rightarrow 0$ 일 때 $\ln r \rightarrow \infty$ 이 되므로, Eq. (6)에서 $C_1 = C_3 = 0$ 이 되어야 한다. 또한, 체크밸브는 단순지지된 원형 평판이므로, 끝단에서의 변위 및 모멘트가 0임을 이용하여 나머지 적분상수를 구할 수 있다. 체크밸브의 변형

은 체크밸브에 부하 압력만 가해졌을 경우의 변형(w_{load}), 챔버 압력만 가해졌을 경우의 변형($w_{chamber}$)을 각각 구하여 이를 합함으로써 구할 수 있다. 각 압력에 의한 변형을 Eq. (7)로 나타내었다.

$$w_{load}(r) = -\frac{P_{load} r_o^4}{64D(1+\nu)} \left[2(3+\nu) \left(1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right) - (1+\nu) \left(1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^4 \right) \right] \quad (0 < r \leq r_o) \quad (7a)$$

$$w_{chamber}(r) = \frac{P_{chamber} r^4}{64D} + \frac{P_{chamber} r^2}{16D} \left[2 \ln \frac{r_i}{r_o} - \frac{2}{1+\nu} + \frac{r_i^2 (1-\nu)}{2r_o^2 (1+\nu)} \right] r^2 + \frac{P_{chamber} r_i^2}{16D} \left[\frac{(3+\nu)}{(1+\nu)} r_o^2 + r_i^2 \ln \frac{r_i}{r_o} - \frac{(7+3\nu)}{4(1+\nu)} r_i^2 \right] \quad (0 < r \leq r_i) \quad (7b)$$

$$\frac{P_{chamber} r_i^2}{32D} \left[(2r_i^2 + 4r^2) \ln \frac{r}{r_o} + \frac{2(3+\nu)r_o^2 - r_i^2(1-\nu)}{r_o^2(1+\nu)} (r_o^2 - r^2) \right] \quad (r_i \leq r \leq r_o) \quad (7c)$$

Table 1 Parameters affecting the pressure transfer ratio

Parameters	Meaning	Value
q	external force applied to the check valve	$P_{chamber}$, P_{load}
w	deformation of check valve	$w_{chamber}$, w_{load}
r_i	radius of area where chamber pressure is applied	2.1mm
r_o	radius of check valve	2.5mm
ν	poisson's ratio	0.27
δr	contact length after check valve deformation	0.4mm
E	young's modulus	197 GPa
h	thickness of check valve	0.2mm
μ	friction coefficient (metal-to-metal)	0.5

수식 전개 시 챔버 압력과 부하 압력에 영향을 미치는 파라미터를 Table 1에 나타내었다. 또한, Eq. (7)에서 w_{load} 는 부하 압력이 체크밸브에 균일하게 작용하여 Eq. (7a)와 같은 하나의 식으로 표현이 가능하나, $w_{chamber}$ 의 경우 챔버 압력이 작용하는 $0 \leq r \leq r_i$, 챔버 압력이 작용하지 않는 $r_i \leq r \leq r_o$ 로 식이 구분된다. 이를 Eq. (7b), (7c)에 각각 표현하였다. 이 때 $r=r_i$ 에서 체크밸브와 시트는 서로 부착되어 있으므로, Eq. (8)과 같은 경계조건이 성립될 수 있다.

$$w(r_i) = w_{load}(r_i) + w_{chamber}(r_i) = 0 \quad (8)$$

Eq. (8)의 경계조건을 Eq. (7)에 대입하면, P-delta 효과를 고려한 체크밸브의 변형 이후 챔버 압력과 부하 압력 사이의 관계식을 유도할 수 있다.

$$\frac{P_{chamber}}{P_{load}} = \frac{r_o^4 \left[\left(\frac{3+\nu}{1+\nu} \right) \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^4 \right) \right]}{r_i^2 \left[6r_i^2 \ln \frac{r_i}{r_o} + \frac{2(3+\nu)r_o^2 - r_i^2(1-\nu)}{r_o^2(1+\nu)} (r_o^2 - r_i^2) \right]} \quad (9)$$

체크밸브의 재질은 SUS-304H로 ν 값을 알 수 있으며, Eq. (9)에 나머지 파라미터를 대입하면 계산하면 압력 비는 1.09을 얻게 된다. Eq. (9)에 의해 얻어진 압력 전달 비율은 강체로 가정한 체크밸브 모델의 이론적 압력 전달 비율과 큰 차이를 나타낸다. 따라서 P-delta 효과를 적용한 유연체 체크밸브 모델을 통해 얻어진 이론적인 압력 전달 비율이 타당한 수치인지 확인할 필요가 있으며, 이를 검증하기 위한 실험을 수행하였다.

3. P-delta 효과를 고려하여 얻어진 이론적 압력 전달 비율의 검증 실험

3.1 압력 전달 비율의 실험적 검증 방법

전절에서 유도된 이론적 결과를 검증하기 위해 본 절에서는 압력전달 실험을 수행하였다.

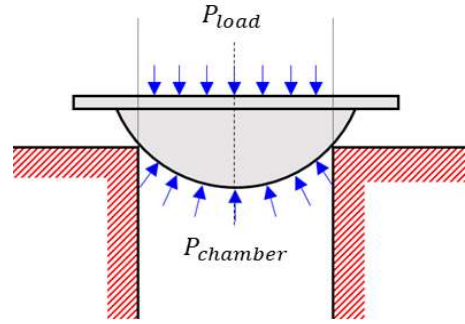


Fig. 4 Cross-sectional view of the ball-thin plate spring type check valve

실험을 위해 Fig. 1과 같이 체크밸브 플랩이 시트에 안착되는 박판 스프링 형 체크밸브와 Fig. 4와 같이 박판 스프링 형 체크밸브의 플랩 중앙부에 구 모양의 부가질량이 부착된 볼-박판 스프링 형 체크밸브[10]를 각각 실험대상으로 선정하였다. Fig. 4에서 챔버 압력의 유효 단면적은 유로의 단면적과 같으며, 부하 압력 또한 유로의 단면적만큼 작용하게 된다. 유로의 단면적 바깥에서 체크밸브에 작용하는 부하 압력은 서로 상쇄된다. 즉, 챔버 압력과 부하 압력이 작용하는 유효 단면적이 같으므로, 평형에 이르렀을 때 챔버 압력과 부하 압력은 같아지게 된다. 따라서 볼-박판 스프링 형 체크밸브가 적용된 펌프의 포화 부하 압력을 챔버 압력이라고 볼 수 있으며, 두 종류의 체크밸브를 적용하여 측정된 부하 압력을 통해 박판 스프링 형 체크밸브의 실험적인 압력 전달 비율을 구할 수 있다. 이를 Eq. (10)에 나타내었다.

$$\frac{P_{ball}}{P_{plate}} = \frac{P_{chamber}}{P_{load}} = \frac{A_{load}}{A_{chamber}} \quad (10)$$

Eq. (10)에서 P_{plate} 는 박판 스프링 형 체크밸브가 적용된 펌프의 포화 부하압력이며, P_{ball} 는 볼-박판 스프링 형 체크밸브가 적용된 펌프의 포화 부하압력이다. 이를 전절에서 얻어진 이론적 압력 전달 효율과 비교하면, P-delta 효과가 고려된 체크밸브 변형 해석의 타당성을 검증할 수 있다.

3.2 가압 실험을 위한 실험장치 구성 및 실험

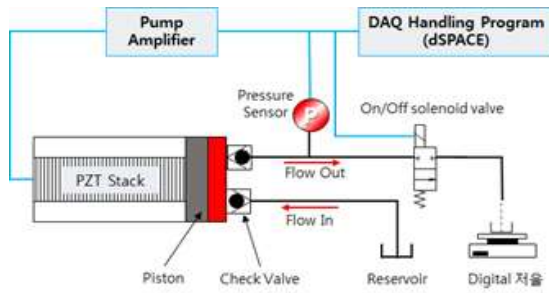


Fig. 5 Schematic diagram of experiment for the verification of the pressure transfer ratio

Eq. (10)의 관계식을 이용한 실험적인 압력 전달 비율을 계산하기 위해 펌프에 적용되는 체크밸브를 변경해가며 실험을 진행하였고, 실험장치의 구성을 Fig. 5에 나타내었다. 소형 압전유압펌프는 선행 연구에서 개발된 시제품을 사용하였으며[10], 실험 장치는 데이터의 생성 및 수집을 위한 DAQ Board, 압전작동기에 고전압을 인가하기 위한 고전압 앰프, 소형 압전유압펌프의 부하부에 설치되어 개폐를 통해 유압 폐회로 및 개회로를 구성하기 위한 온/오프 솔레노이드 밸브, 유압 폐회로에서 형성된 부하 압력을 측정하기 위한 압력센서로 구성되어 있다.

선행연구에서는 볼-박판 스프링 형 체크밸브가 적용된 압전유압펌프의 성능실험을 수행하였고, 이를 박판 스프링 형 체크밸브가 적용된 펌프의 성능실험 결과와 비교하여 볼-박판 스프링 형 체크밸브의 성능을 검증하였다. 본 연구에서는 200 V에서 900 V까지 100 V 간격으로 인가 전압을 바꾸어가며 실험을 진행하였다.

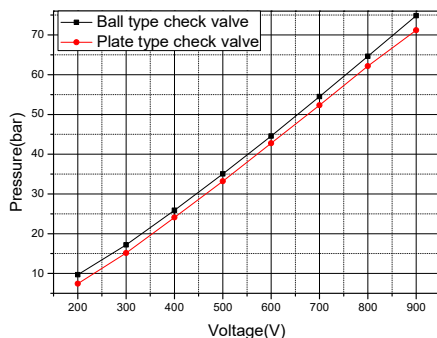


Fig. 6 Experimental results for the saturated load pressure (@120 Hz)

인가 주파수는 가장 뛰어난 성능을 보였던 120 Hz에서 수행되었다. Fig. 6에서 인가전압이 증가함에 따라 압력 형성 능력이 높아짐을 알 수 있다. 이는 압전작동기가 발생시키는 블로킹 힘(Blocking force)이 인가전압과 비례하기 때문이다[8]. 또한, 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 적용 시에 항상 더 뛰어난 압력 형성 능력을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 이에 저주파수에서도 같은 결과가 도출되는지 확인하기 위해 50 Hz에서 실험을 수행하였다.

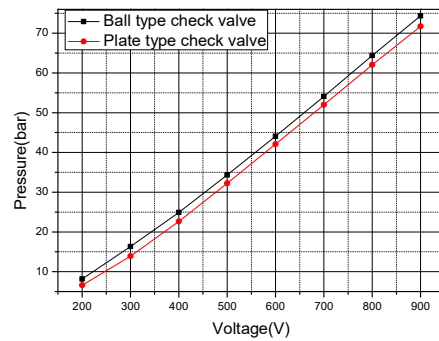


Fig. 7 Experimental results for the saturated load pressure (@50 Hz)

Fig. 6과 Fig. 7을 통해 인가 전압 및 주파수에 관계 없이 볼-박판 스프링 형 체크밸브가 적용된 펌프의 부하 압력이 박판 스프링 형 체크밸브를 적용하였을 때보다 항상 높은 것을 확인할 수 있다. 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 적용한 부하압이 챔버 압력이라는 결과와 측정된 두 경우의 압력비로부터 박판 스프링 형 체크밸브의 압력전달비는 1.09임을 실험적으로 확인할 수 있다. 즉, Eq. (10)에 의해 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\frac{P_{ball}}{P_{plate}} = \frac{P_{chamber}}{P_{load}} = 1.09 \quad (11)$$

따라서, Eq. (9)를 통해 계산한 이론적인 압력 전달 비율과 실험을 통해 얻은 압력 전달 비율이 일치하므로, P-delta 효과를 고려한 박판 스프링형 체크밸브의 압력전달 해석이 타당함을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 선행 연구에서 개발된 박판 스프링 형 체크밸브를 외력에 의한 변형이 발생하는 원형 평판으로 모델링하였고, 챔버 압력과 부하 압력에 의한 체크밸브의 변형을 고려하여 이론적인 압력 전달 비율을 계산하였다. 체크밸브 모델을 강체로 가정할 경우, 포화 상태에서 챔버 압력이 박판 스프링 형 체크밸브에 작용하는 면적은 유로의 단면적과 같으며, 부하 압력이 작용하는 단면적은 체크밸브 플랩의 단면적과 같다. 따라서, 챔버에서 발생한 압력의 1/2.78이 부하로 전달되는 것으로 해석된다. 그러나 체크밸브를 유연체로 모델링하여 외력에 의한 변형을 고려하게 되면 챔버 압력과 부하 압력 간 압력 전달 비율은 변화하게 된다.

유연체 체크밸브 모델의 압력 전달 비율을 구하기 위하여 체크밸브의 반경방향으로 작용하는 부하 압력에 의해 체크밸브에 발생하는 모멘트 및 이에 따른 변형을 고려하였다. 이러한 물리적 현상을 P-delta 효과라고 하며, 이를 고려하여 챔버 압력과 부하 압력 간 압력 전달 비율을 계산하면 강체 모델에서의 관계식과 현저히 다른 수치를 보이게 된다. 따라서, P-delta 효과를 고려한 체크밸브 모델을 통해 얻은 압력 전달 비율이 타당한 수치인지 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 박판 스프링 형 체크밸브와 챔버 압력을 100% 전달할 수 있는 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 각각 실험 대상으로 선정하여 얻은 부하 압력의 비를 유연체 체크밸브 모델을 통해 얻은 이론적인 압력 전달 비율과 비교하였다. 실험에서는 인가 전압 및 주파수를 변경해가며 진행되었다. 실험결과, 인가 전압과 주파수에 관계없이 볼-박판 스프링 형 체크밸브에 비해 박판 스프링 형 체크밸브의 부하 압력이 약 9% 낮은 것으로 확인되었다. 이는 P-delta 효과를 고려한 박판 스프링 형 체크밸브의 변형에 따른 챔버 압력과 부하 압력 간의 이론적 압력 전달 비율과 일치하는 수치이다. 따라서 체크밸브의 변형을 고려한 이론적인 압력 전달 비율 해석이 적절함을 실험을 통해 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구 연구비 지원(ADD-13-01-08-24)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- [1] Hsiao-Kan Ma, Bo-Ren Hou, Haiyuan Wu, Chin-Yuan Lin, Jing-Jhe Gao, Ming-Chien Kou, "Development and application of a diaphragm micro-pump with piezoelectric devices," *Journal of Microsystem Technologies*, Vol. 14, No. 7, 2008, pp. 1001~1007.
- [2] Junwu Kan, Zhigang Yang, Taijiang Peng, Guangming Cheng, Boda Wu, "Design and test of a high-performance piezoelectric micropump for drug delivery," *Journal of Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 121, No. 1, 2005, pp. 156~161.
- [3] John P Larson, Marcelo J Dapino, "Reliable, high-frequency miniature valves for smart material electrohydraulic actuators," *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 23, No. 7, 2012, pp. 805~813.
- [4] Youngbog Ham, Sungjin Oh, Woosuk Seo, Jungho Park, Sonam Yun, "A piezoelectric Micropump for Microscale Pumping Systems," *Journnal of Drive and Control*, Vol. 36, No. 2, 2009, pp. 17~25.
- [5] Daniel J. Laser, Juan G. Santiago, "A Review of Micropumps," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 6, 2004, pp. 35~64.
- [6] Brian D. Iverson, Suresh V. Garimella, "Recent Advances in Microscale Pumping Technologies: a Review and Evaluation," *Journal of Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 5, No. 2, 2008, pp. 145~174.
- [7] Anirban Chaudhuri, Norman Wereley, "Compact hybrid electrohydraulic actuators using smart materials : A review," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, No. 6, 2012, pp. 597~634.
- [8] Minji Jeong, Jaihyuk Hwang, Jaesung Bae, Junyong Kwon, "On the Pressurization Characteristics of Small Piezoelectric Hydraulic Pump for Brake System," *J.*

of the Korea Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 43, No. 11, 2015, pp. 963~970.

- [9] Yonghwi Joo, Jaihyuk Hwang, Juyoun Yang, Jaesung Bae, Junyong Kwon, "On the performance test of the Piezoelectric-Hydraulic Pump." *J. of The Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 9, 2015, pp. 706~711.
- [10] Yongha Hwang, Jaihyuk Hwang, Jaesung Bae, "Pressurization Characteristics of Piezoelectric-Hydraulic pump Adopting a Ball-Thin Plate Spring Type Check Valve," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 12, No. 2, 2018, April, pp. 15~22.
- [11] Yongha Hwang, Jaihyuk Hwang, "A Study on the Design of the Check Valve for Improving Load Pressure," *The Society for Aerospace System Engineering, Fall Conference*, pp. 102-103, 2017.
- [12] E. L. Wilson, A. Habibullah, "Static and Dynamic Analysis of Multi-Story Buildings, Including P-Delta Effects," *Journal of Earthquake Spectra*, Vol. 3, No. 2, pp. 289~298.
- [13] Christoph Adam, Luis F.Ibarra, Helmut Krawinkler, "Evaluation of P-delta effects in non-deteriorating MDOF structures from equivalent SDOF systems," 13th World Conference of Earthquake Engineering, No. 3407, 2004.