

CFD 해석을 이용한 판형 체크 밸브에 대한 스프링 강성의 설계 기준

박주용*, 백석흠**, 강정호#

(#, * 동아대학교, ** (주)DNDC)

Design Criteria of Spring Stiffness for Pan Check Valve Using CFD Analysis

Ju-Yong Park*, Seok-Heum Baek**, Jung-Ho Kang#

(Received 8 January 2014; received in revised form 8 April 2014; accepted 9 June 2014)

ABSTRACT

This paper examines the effects of spring characteristics and stiffness in relation to the characteristics of hydrodynamic force. Spring forces and stiffness determine the performance of this type of pan check valve and have an effect on the overall operation. The hydraulic efficiency of the pan check valve is relatively low compared to that of a common check valve. However, a pan check valve is structurally more stable than a common check valve. We implemented the optimum design to increase the flow rate and to resolve the suppression of the pressure drop according to the extent of the compression of the spring. From the results of a flow analysis, we demonstrate spring stiffness design criteria depending on the extent of the compression of the spring of pan check valve acting on the fluid at the inlet 1 MPa pressure

Key Words : Pan Check Valve(판형 체크 밸브), Spring Stiffness(스프링 강성), Hydrodynamic Force(동유체력), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

1. 서 론

판형 체크 밸브(pan check valve)는 디스크 형상을 가지고 있는 체크 밸브로써 일정 이상의 유압

의 유체는 흘러보내고 낮은 압의 유체의 흐름은 방지하여 펌프나 엔진 등의 기계부품을 보호하는 밸브이다.

Fig. 1은 W사의 일반적인 판형 체크 밸브의 사진을 나타낸 것이다. Fig. 2는 작동원리를 나타낸 것이다. 유체가 스프링 강성(spring stiffness)보다 큰 힘으로 디스크를 누르게 되면 밸브가 열리게 되고 이와 반대로, 압력이 사라지게 되면 수축되었던 스프링 압력이 원 상태로 돌아와 밸브가 닫게 되어 역류를 방지한다. 판형 체크 밸브는 매우 간단한

* Dong-A University, School of Mechanical Engineering

** DNDE Inc., EN3S Team

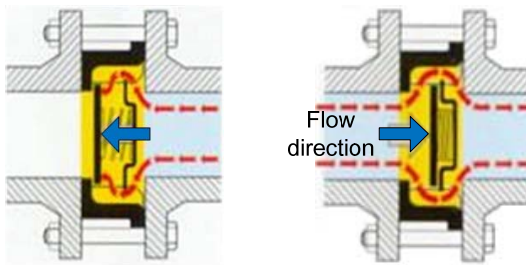
Corresponding Author :

Dong-A University, Dept. of Mechanical Engineering

E-mail : kangjh@dau.ac.kr



Fig. 1 Overall structure of pan check valve



(a) Closed (b) Opening

Fig. 2 Spring-operated pan check valve

구조이며 워터해머가 없고 스프링의 강성의 설정에 따라 수직, 수평 배관에 사용될 수 있다. 따라서 각종 플랜트, 선박, 기계 설비 분야에 광범위하게 사용되고 있는 부품이다.

일반적인 체크 밸브의 형태는 스윙형 체크 밸브이다. 저압에서 고압, 소형에서 대형까지 제작이 용이 하고 유량확보가 쉽고 및 압력강하가 적은 장점이 있다. 그러나 유체가 심하게 와류가 있는 곳에서는 디스크가 파손될 가능성이 있어 기계설비에 큰 위험성이 있다. 또한 디스크가 바디에 직접 접촉되므로 개폐시 높은 소음이 발생한다.

본 논문의 판형 체크 밸브는 스윙 체크 밸브보다 상대적으로 수력학적 효율이 낮지만 구조적 안전성과 소음이 적은 장점이 있다. 따라서 판형 체크 밸브의 요구되는 유량 및 압력강하 특성을 위해 판 디스크에 대한 스프링 강성의 설계 기준을 평가하였다. CFD(computational fluid dynamics) 해석을 이용해 동유체력(hydrodynamic force)^[1-3]과 스프링 압축 정도에 따른 유량 및 압력 변화를 분석하고 스

프링 상수의 결정 기준을 설명하였다.

2. 판형 체크 밸브의 유동해석

2.1 유동 모델의 설명

Fig. 3은 판형 체크 밸브의 해석 모델을 나타낸 것이다. 유동해석의 모델은 Solidworks를 이용하였다. 판형 체크 밸브는 디스크(disc), 바디(body), 지지부(supporting beam), 스템(stem), 시트(seat)로 구성되어 있다. Table 1은 판형 체크 밸브의 주요 재원을 나타낸 것이다. 밸브의 사이즈는 80A이며 주요 재질은 SUS304을 사용하였다.

Fig. 4는 판형 체크 밸브의 유동 해석을 위한 격자와 경계조건을 나타낸 것이다. 입구와 출구는 밸브 직경의 10D, 20D로 설정하여 유체가 완전 발달된 유동이 되도록 충분히 길게 설계하였다. CFD 해석의 측정 지점은 디스크 전,후면 각각 2D, 6D 지

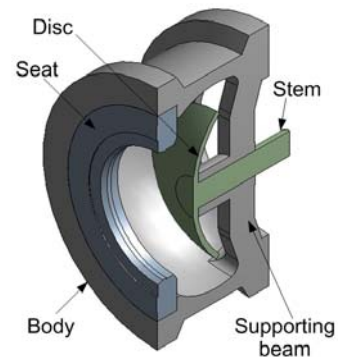


Fig. 3 Schematic of the pan check valve

Table 1 Main specifications of the pan check valve

Item	Spec.
Valve size	80A
Inlet pressure (MPa)	1
Relative pressure (MPa)	0.101
Operating fluid	Water
Density (kg/m ³)	997
Material properties	SUS304

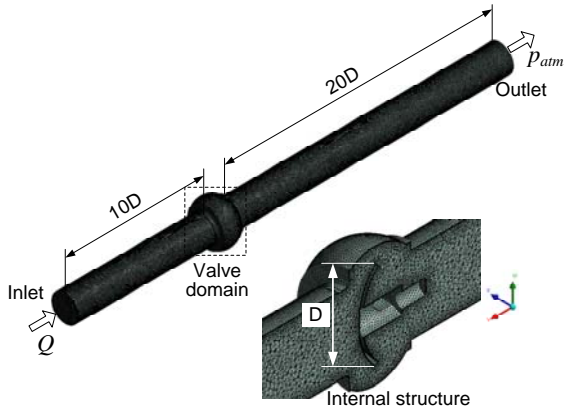


Fig. 4 Computational grids for the pan check valve

점이다. 유동해석과 격자는 ANSYS CFX ver.13^[4]을 사용하였다. 밸브의 절점과 요소 수는 각각 약 61만개, 205만개이다.

유동해석에 사용된 유체는 25℃ 물이고 입구는 정압력 1 MPa, 출구는 개방조건(opening)을 설정하였다. 짧은 시간에 작동하므로 중력은 무시했다. 난류 유동을 해석하기 위해 난류모델은 k-ε(k-epsilon)을 기반한 SST(shear stress transport) 모델을 사용했다. SST 모델은 두 난류 모델이 조합된 형태로서 벽면 근처에서는 k-ω 모델을 사용하고 바깥쪽(자유 전단 유동)은 k-ε 모델을 사용한다. 이는 경계층 안에서 계속되는 난류 운동에너지의 반동으로 인한 난류 전단응력을 강화시켜 난류 점성을 수정하고 강한 유동의 역 압력 구배와 박리의 예측을 향상시킨다.^[5] 경계조건은 모든 벽면에 대해서 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다. 목표 유량은 $6.3 \times 10^7 \text{ mm}^3/\text{s}$ 이며 출구측 목표 정압은 0.9 MPa이다.

2.2 CFD 해석

스프링의 강성에 따른 판형 체크 밸브의 목표 유량과 정압을 만족시키기 위해서 밸브가 완전 개폐시의 길이 20 mm를 10등분하여 2 mm 간격으로 10개의 모델을 유동해석을 실시했다. 스프링의 압축

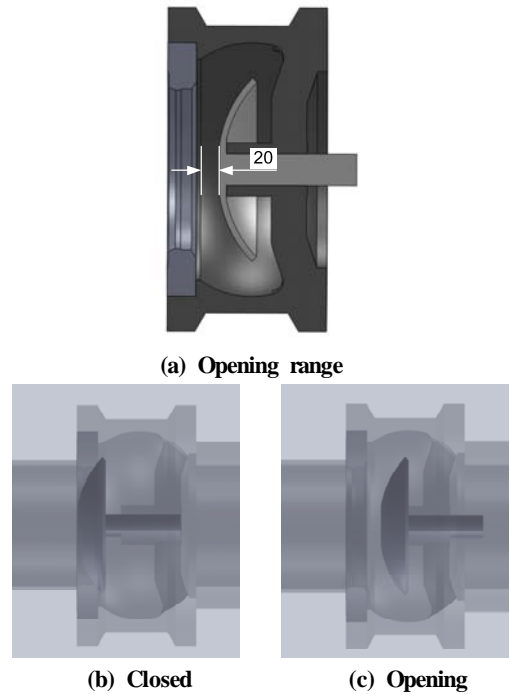
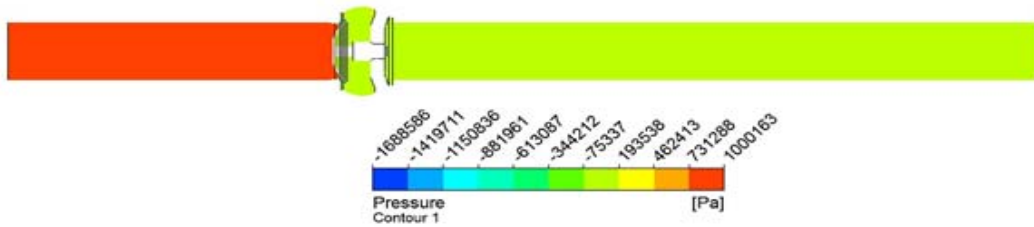


Fig. 5 Schematic illustration of the pan check valve for CFD analysis

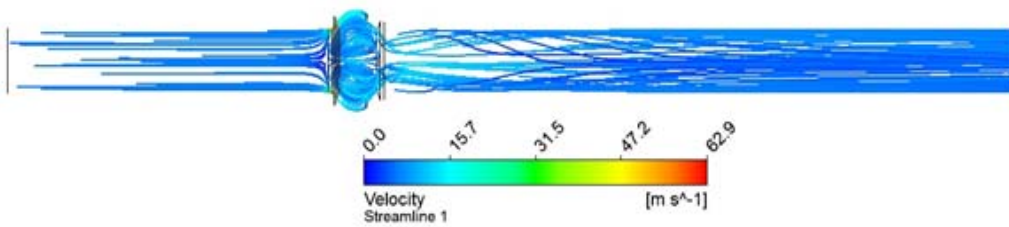
정도에 따른 출구에서의 속도와 압력을 분석하였다. Fig. 5(a)는 판형 체크 밸브가 완전 개폐상태의 길이를 나타낸 것이다. (b)는 밸브가 폐쇄상태, (c)는 완전히 개방된 상태의 해석 모델이다.

Fig. 6은 판 체크 밸브의 압력과 속도 분포에 대한 대표적인 CFD 결과를 나타낸 것이다. 디스크는 2 mm 열린 경우와 완전 개폐된 20 mm인 작동조건이다. 개폐조건에 변화에 대해 디스크 후면에서 최대 압력 및 속도가 2 mm 개방의 경우 $1.024 \times 10^5 \text{ Pa}$, 6.3 m/s이고 완전 개방의 경우 $1.116 \times 10^5 \text{ Pa}$, 19.81 m/s이다.

Fig. 7(a)는 판형 체크 밸브의 개방거리에 대한 압력의 변화를 나타낸 것이다. (b)는 속도 분포를 나타낸 것이다. 밸브가 폐쇄되어 있다가 밸브가 점점 개방되면서 유량이 급격히 증가하다가 14 mm 개방 되었을 때 완만하게 증가한다. 본 논문에서 목표로 하는 0.9 MPa의 압력이 출구로 배출될 때의

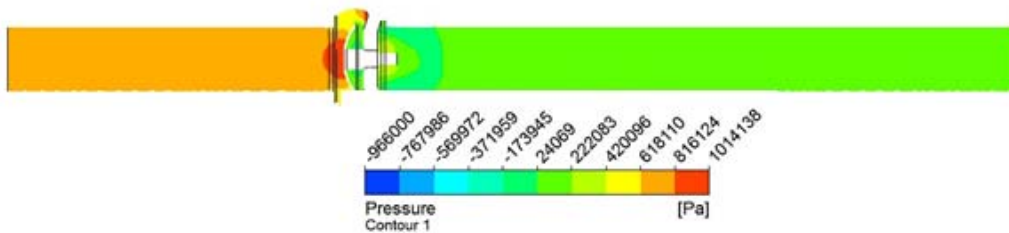


Pressure

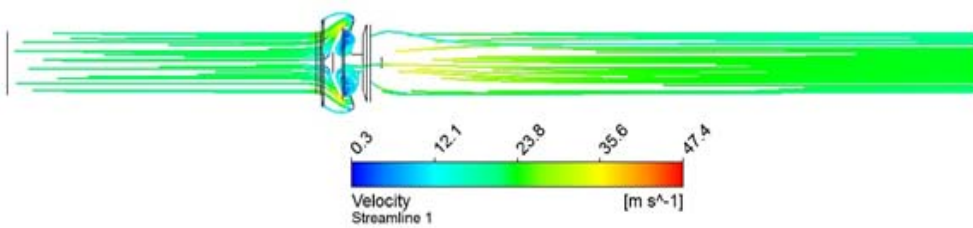


Velocity

(a) 2mm opening condition



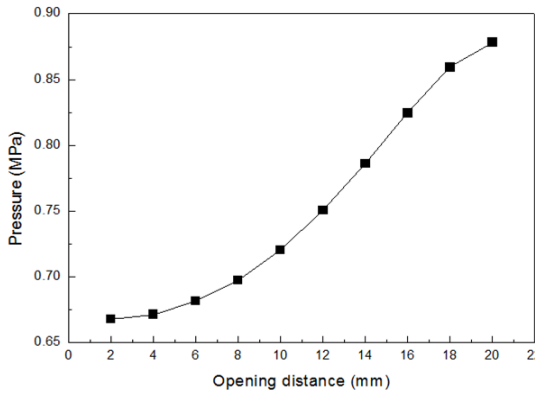
Pressure



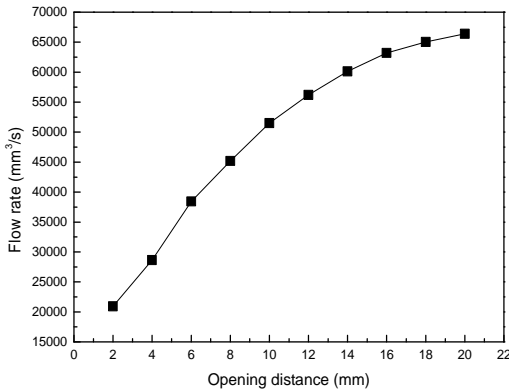
Velocity

(b) 20 mm opening condition

Fig. 6 CFD results of pan check valve



(a) Pressure



(b) Flow rate

Fig. 7 CFD results of different opening distance for valve disc

유량은 $6.3 \times 10^7 \text{ mm}^3/\text{s}$ 이다. Fig. 7의 (b)의 그래프를 사용하여 16 mm 개방일 때 목표 유량을 만족함을 알 수 있다.

3. CFD 해석을 통한 스프링 강성의 평가

3.1 동유체력의 계산

Fig. 8는 판형 체크 밸브에 작용하는 유동방향에

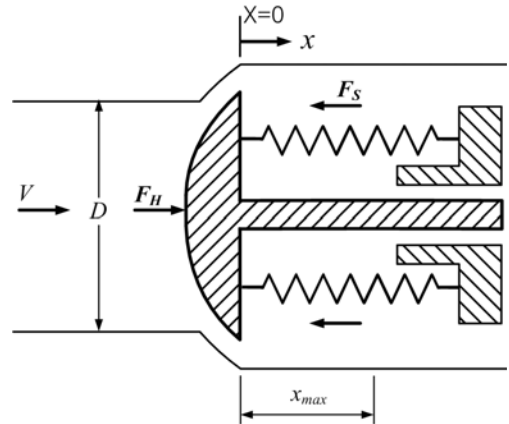


Fig. 8 Balance of hydrodynamic force for the pan check valve

대한 동유체력(hydrodynamic force), 스프링력(spring force)과 감쇠(damping)와 관련된 외력의 균형을 설명한 것이다.

동유체력은 유체에 의해 밸브 디스크에 작용하는 힘으로 시간에 따라 변동한다. 동유체력이 판형 체크 밸브 디스크에 압력을 가하면 균형을 유지하고 있던 스프링력은 반대방향으로 작용을 하게 된다. 동유체력에 비례하여 스프링은 압축을 하고 유체의 유입과 유출이 일어난다. 압축된 길이를 이용하여 스프링 상수를 계산 할 수 있다. 동유체력 F_H 와 입구 평균 유속 V , 유체 밀도 ρ , 입구 파이프의 직경 D 를 이용하여 동유체항력계수(hydronomic drag coefficient) C_D 의 관계를 식 (1)로 정의할 수 있다.^{[1],[7-9]}

$$(Re, \text{Geometry}) \quad (1)$$

$$C_D = \frac{F_H}{\rho V^2 D^2} = f$$

판형 체크 밸브의 최소 유량에서 완전 개방 상태까지의 유량에 대한 유입 및 유출 상태는 식 (1)로부터 아래 식으로 표현 할 수 있다.

$$C_D \times \rho \times V_0^2 \times D^2 = (F_s)_{\max} = (F_0) + kx_{\max} \quad (2)$$

여기서 F_0 는 판형 체크 밸브가 닫혀 있는 상태의 정적 스프링력, $(F_s)_{\max}$ 는 밸브에 작용하는 최대 스프링력, k 는 디스크에 작용되는 스프링 강성, x_{\max} 는 최대 압축 길이이다. 식 (2)에 의해 밸브 내부 유동에 작용하는 질량유량비(mass flow rate)와 스프링력의 관계를 계산 할 수 있다.

3.2 스프링 강성의 설계

판형 체크 밸브의 입구측 정압은 1 MPa이고 출구측 목표정압은 0.9 MPa이다. 본 논문의 스프링 설계는 특정 동유체력과 스프링 상수의 변형 범위를 결정해야 한다.

목표정압 0.9MPa에 대한 스프링 설계를 위해 최대 스프링력을 계산해야 한다. Fig. 7의 CFD 결과로부터 밸브 디스크가 16 mm 개방되었을 때 출구 목표 정압을 만족한다. 이때의 스프링의 길이가 최대 압축 길이가 된다. 식 (1)를 이용해 동유체력 F_H 를 계산할 수 있다.

C_D 와 V 는 판형 체크 밸브가 16 mm 개방상태에서의 값 : $C_D=0.377$, $V=18.3$ m/s이고, 유체 밀도 ρ 는 25 °C에서의 물로 997 kg/m³, 파이프 직경 D 는 0.063 m이다. 따라서 동유체력을 계산하면 $F_H=498.5$ N이다.

$$F_H = k \times \Delta x + F_0 \quad (3)$$

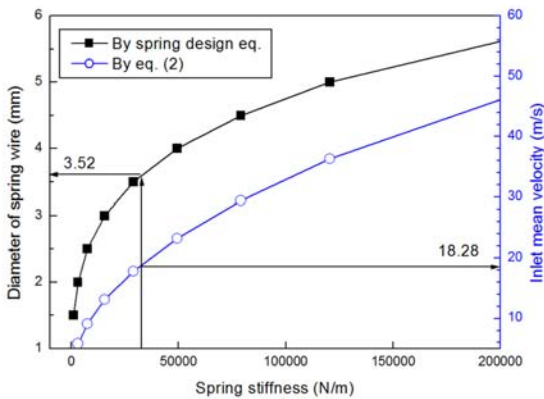


Fig. 9 Spring stiffness vs diameter of spring wire for inlet mean velocity

식 (3)를 이용하여 스프링의 압축 길이인 $x_{\max}=16$ mm일 때 스프링 강성을 계산하면 $k=31,157$ N/m이다. 일반적인 압축 헬리컬 스프링에 대한 작동구간의 대부분에서 선형을 나타내는 스프링 상수 k 를 갖는다($k=f/y = Gd^4/8N_aD^3$). 여기서 스프링의 평균 코일 지름 $D=20$ mm, 유효감긴수 $N_a=6$ 회, 전단탄성계수 $G=74$ GPa이다. 따라서 와이어(소선) 지름을 계산하면 $d=3.52$ mm이다.

Fig. 9은 스프링 소선의 지름 변화와 입구 평균 유속의 변화에 따른 스프링 강성을 나타낸 것이다. 스프링 강성은 입구 유입 평균 유속의 제곱에 비례하며 선형적으로 증가한다. 스프링 강성에 따른 소선의 지름 4 mm까지는 선형적으로 증가하지만 4 mm 이후는 비선형적인 형태이다. 스프링의 보수적인 선택은 압력강하 및 유량 확보저하의 요인이 된다. 유량의 밸브 내부 구조의 형상 최적화보다 압력의 변동과 유량 진동(flow oscillation)의 범위의 정밀한 조건에 의해 스프링 강성 결정을 하여 유량을 확보하는 것이 중요하다.

4. 결론

본 논문은 판형 체크 밸브의 동유체력에 대한 스프링 강성 설계 기준을 설명한 것이다. 일반적으로 판형 체크 밸브는 수력학적 성능은 스프링의 압축정도(스프링 강성)에 따른 유량 및 압력강하를 조절한다. ANSYS CFX를 이용하여 유동특성을 평가하고 동유체력이 밸브 디스크와 스프링에 작용하는 해석적인 모델을 설명하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 판형 체크 밸브에 작용하는 동유체력은 유동 방향에 대한 유속과 스프링력, 감쇠와 관련된 외력의 균형을 이용해 계산할 수 있다. 본 논문은 동유체력이 포함된 식 (2)으로부터 밸브 출구의 목표 정압 0.9 MPa에 만족하는 디스크 개폐 길이는 16 mm 이고 이때 동유체력은 498.5 N이다.

(2) 동유체력에 대한 디스크 개폐 길이를 이용해 스프링 상수를 계산하고 요구되는 유량에 대한 스프링 강성을 선택할 수 있다. 스프링 강성의 보수적인

선택은 압력강하 및 유량확보를 저해할 수 있다. 따라서 압력 변동과 유량 진동 범위의 정밀한 조건에 의해 스프링 강성을 선택해야 한다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 지정 지역혁신센터사업 (RIC) 고기능성밸브기술지원센터 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Botros, K. K., "Spring Stiffness Selection Criteria for Nozzle Check Valves Employed in Compressor Stations," ASME J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 133, pp. 122401, 2011.
2. Botros, K. K., Jones, J. B., and Roorda, O., "Effects of Compressibility on Flow Characteristics and Dynamics of Swing Check Valves-Part I," ASME J. Pressure Vessel Technol., Vol. 119, pp. 192-198, 1997.
3. Botros, K. K., and Roorda, O., "Effects of Compressibility on Flow Characteristics and Dynamics of Swing Check Valves-Part II," ASME J. Pressure Vessel Technol., Vol. 119, pp. 199-206, 1997.
4. ANSYS CFX, User Manual Release 10, SAS IP, Inc., 2007.
5. Baek, S. H., Jung, W. H., and Kang, S., "Shape Optimization of Impeller Blades for Bidirectional Axial Flow Pump," Trans. of the KSME(B), Vol. 36, No. 12, pp. 1141-1150, 2012.
6. Song, X. G., Wang, L., Baek, S. H., and Park, Y. C., "Multidisciplinary Optimization of a Butterfly Valve," ISA Trans., Vol. 48, No. 3, pp. 370-377, 2009.
7. Kruisbrink, A. C. H. and Thorley, A. R. D., "Dynamic Characteristics for Damped Check Valves," 2nd International Conference on Water Pipeline Systems, BHR Group Ltd., Edinburgh, Scotland, U.K., May 24-26, 1994.
8. Sibilla, S., and Gallati, M., "Hydrodynamic Characterization of a Nozzle check Valve by Numerical Simulation," ASME J. Fluids Eng., Vol. 130, pp. 121101, 2008.
9. Thorley, A. R. D., "Check Valve Behaviour Under Transient Flow Conditions: A State of-the-Art Review," ASME J. Fluids Eng., Vol. 111, pp. 178-183, 1989.
10. Norton, R. L., Machine Design-An Integrated Approach (3rd Edition), Prentice Hall, New Jersey, USA, 2005.