

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.11.1123>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

3 방향 절환밸브의 공동현상 저감을 위한 형상최적화[§]

이명곤* · 임채석** · 한승호*†

* 동아대학교 기계공학과, ** (주)백산하이텍

Shape Optimization of Three-Way Reversing Valve for Cavitation Reduction

Myeong Gon Lee*, Cha Suk Lim** and Seung Ho Han*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

** Baek San Hi-Tech Co., Ltd.

(Received March 30, 2015 ; Revised July 13, 2015 ; Accepted August 9, 2015)

Key Words: Shape Optimization(형상최적화), Cavitation(공동현상), 3-Way Reversing Valve(3 방향 절환밸브), Automotive Washing Machine(자동차부품 세척장치), Cavitation Index(공동화지표)

초록: 자동차부품 세척장비는 엔진과 변속기 블록 등의 가공과정에서 잔류하는 기름때를 제거하며, 잦은 수류방향 전환과 고압수의 분사를 위해 한 쌍의 2 방향 밸브를 사용한다. 그러나 정교한 밸브제어장치 없이 2 방향 밸브를 사용하는 경우 급격한 수류방향 전환에 따른 맥동현상이 발생하여 사용에 어려움이 따른다. 대안으로 하나의 3 방향 절환밸브를 사용하는 방법은 정교한 제어장치 없이도 정확한 수류방향 전환이 원활히 이루어져 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 그러나 복잡한 유로 및 바텀플러그 형상으로 인해 유속변화가 심하게 발생하여 공동현상이 나타날 수 있다. 본 연구에서는 3 방향 절환밸브 내의 유동특성을 해석적으로 평가하였으며, 바텀플러그 하부에서 나타나는 공동현상을 공동화지표와 POC(Percent of cavitation)를 도입하여 정량화하였다. 공동현상의 저감을 위해 바텀플러그 형상을 매개변수화하고, 해석의 수렴성 개선과 해석시간을 단축시킬 수 있는 단순 유한요소모델을 이용하여 유동해석을 통한 형상최적설계를 실시하였다. 완전요인배치법을 통한 실험계획법과 인공신경망 기반 반응표면모델을 적용하여 공동현상이 발생하지 않는 POC 가 30% 미만인 바텀플러그의 형상을 제시하였다. 얻어진 최적해는 POC 27%에 대하여 바텀플러그의 허리길이가 각각 6.42mm 및 6.96mm 이다.

Abstract: A pair of two-way valves typically is used in automotive washing machines, where the water flow direction is frequently reversed and highly pressurized clean water is sprayed to remove the oil and dirt remaining on machined engine and transmission blocks. Although this valve system has been widely used because of its competitive price, its application is sometimes restricted by surging effects, such as pressure ripples occurring in rapid changes in water flow caused by inaccurate valve control. As an alternative, one three-way reversing valve can replace the valve system because it provides rapid and accurate changes to the water flow direction without any precise control device. However, a cavitation effect occurs because of the complicated bottom plug shape of the valve. In this study, the cavitation index and percent of cavitation (POC) were introduced to numerically evaluate fluid flows via computational fluid dynamics (CFD) analysis. To reduce the cavitation effect generated by the bottom plug, the optimal shape design was carried out through a parametric study, in which a simple computer-aided engineering (CAE) model was applied to avoid time-consuming CFD analysis and difficulties in achieving convergence. The optimal shape design process using full factorial design of experiments (DOEs) and an artificial neural network meta-model yielded the optimal waist and tail length of the bottom plug with a POC value of less than 30%, which meets the requirement of no cavitation occurrence. The optimal waist length, tail length and POC value were found to 6.42 mm, 6.96 mm and 27%, respectively.

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2015. 4. 2-3., 서귀포KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, shhan85@dau.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

- 기호설명 -

P_1 : 입구압력(Pa)

P_2 : 출구압력(Pa)

P_v	: 포화증기압(Pa)
R_B	: 기포의 반경(mm)
t_{ij}	: 난류응력항
u_i	: 속도성분
V_{elem}	: 요소의 체적(mm ³)
V_{vapor}	: 기포의 체적(mm ³)
μ	: 점도
ρ_f	: 밀도(kg/m ³)
σ	: 표면장력계수(N/mm)
σ_v	: 공동화지표

1. 서론

엔진과 변속기 블록 등과 같은 자동차부품의 가공정 중에 발생하는 기름때 및 이물질 등을 제거하기 위해서 자동차부품 세척장비⁽¹⁾가 사용되고 있다. 고압의 물을 분무하여 뿌려주는 스프레이 방식이 널리 이용되고 있으며 한 쌍의 2 방향 밸브를 이용한 유로절환으로 구현하고 있다. 그러나 정교한 밸브제어장치가 구비되지 않은 경우 밸브 작동 시간차에 의한 선형적인 유로절환이 이루어지지 않아 맥동(Surging)이 발생할 수 있다. 맥동은 유체의 운동상태가 급격히 변화하여 발생하는 압력파에 의해 나타나는 현상으로, 이로 인한 압력에너지의 변화가 소음 및 진동뿐만 아니라 기계적 손상을 초래한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 3 방향 절환 글로브밸브를 사용할 수 있다. 이는 정교한 밸브제어장치 없이도 즉각적인 유로절환이 가능하여 맥동현상을 크게 저감시킬 수 있다.⁽²⁾ 그러나 밸브 내부유로의 복잡한 트립형상으로 유동의 불규칙한 변화가 생기고, 그로 인하여 유동속도 및 압력의 변화가 나타나 공동(Cavitation)⁽³⁾이 발생할 수 있다. 공동은 유체압력이 포화증기압 이하로 떨어지는 경우 발생하는 현상으로 기포가 생성되어 공동을 이루고 공동이 포화증기압 이상이 되는 영역으로 이동하면서 급격히 붕괴되어 충격파를 야기시킨다. 이는 유량조절을 방해할 뿐만 아니라, 충격파가 유로표면에 손상을 주어 밸브의 수명을 단축시키므로 밸브의 초기설계 단계에서 공동현상을 최소화하는 노력이 요구되고 있다.

공동의 발생 유무에 대한 국제적인 기준은 ISA-RP75.23⁽⁴⁾에서 제안하는 공동화지표(Cavitation index) σ_v 가 있으며, 이를 이용하여 공동의 강도도 평가하고 있다. 이재혁 등⁽⁵⁾은 공동화지표를 이용하여 다공관을 설치한 중심형 버터플라이밸브의 공동현상 저감효과를 해석과 실험을 통해 분석하

였다. 한편, 조성희 등⁽⁶⁾은 최근 연구에서 해석적으로 얻어진 증기체적률(Vapor volume fraction)이 10^{-5} 에 도달되면 공동이 발생된다고 하였고, 공동에 의한 초기손상(Incipient damage)은 증기체적률이 0.5 이상에서 나타난다고 Kubo 등⁽⁷⁾이 보고한 바 있다. 글로브밸브에 나타나는 공동현상에 관한 연구는 김대권 등⁽⁸⁾에 의해 수행되었는데, 상용프로그램인 ANSYS-CFX⁽⁹⁾을 사용하여 유로 내부형상을 상세히 고려하여 유동해석을 실시하고 유체의 포화증기압을 고려한 공동현상 발생을 예측한 바 있다. 공동현상은 유체압력이 포화증기압 이하로 떨어지는 위험영역에서 나타나며 증기체적률이 적정 수준 이상에서 충격파에 의한 손상이 발생하므로, 위험영역을 고려한 공동현상의 정량화가 필요하다. 그러나, 위험영역을 고려한 공동현상의 정량화에 대한 연구가 충분히 이루어지지 않아 밸브 설계에 많은 어려움이 따르고 있다.

본 연구에서는 자동차부품 세척장비 배관계열에 사용되는 40A 3 방향 절환 글로브밸브를 대상으로 ISA-RP75.23⁽⁴⁾의 공동화지표 σ_v 를 이용하여 공동 발생 유무를 해석적으로 평가하여 이의 적용성을 확인하였다. 유로절환에 중요한 역할을 담당하는 밸브의 바텀플러그 하부에서 발생하는 공동의 증기체적률과 위험영역을 고려한 POC(Percentage of cavitation)를 도입하여 위험영역에서의 공동현상을 정량화하였다. 아울러 공동현상의 주요 원인인 바텀플러그 형상을 매개변수화하여 공동현상에 대한 영향을 살펴보고, 공동현상을 최소화하는 바텀플러그의 최적형상을 제시하였다.

2. 공동현상 평가기법

2.1 공동화지표(Cavitation index)

공동화지표는 공동발생 가능성과 이의 강도를 예측하기 위한 기준으로 여러 국제표준에서 이를 규정하고 있다. 본 연구에서는 그 중 가장 널리 사용되는 ISA-RP75.23⁽⁴⁾의 σ_v 를 사용하였다.

$$\sigma_v = \frac{P_1 - P_v}{P_1 - P_2} \quad (1)$$

공동현상은 유로의 변화가 심하여 유체속도가 최대가 되는 축류점(Vena contracta)에서 발생하는 데, 이곳의 압력을 예측하는 것은 현실적으로 불가능하여 밸브가 설치된 배관계의 입구단과 출구단의 차압으로 이를 예측한다. 공동의 발생과 강도는 공동화지표와 반비례하여, 공동화지표가 클수록 공동의 발생과 강도가 낮아진다. 공동현상은

차압이 크거나 유체의 포화증기압이 큰 경우 발생하는데, 식(1)로 표현하면 σ_v 는 작은 값을 갖게 된다. 공동화지표는 배관의 입구단과 출구단의 차압으로 얻어지는 결과이므로 국부적인 유동변화로 나타나는 공동의 특성을 나타내지 못하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 제조사에서 제시하는 수치로 제품간의 벤치마킹을 통해 성능을 평가한다.

2.2 POC(Percentage of cavitation)

국부적인 유동변화로 나타나는 공동의 특성을 평가하기 위하여 유한요소해석을 통한 다상유동해석기법을 이용하여 증기체적률(Vapor volume fraction)을 아래 식과 같이 계산한다. 증기체적률은 요소 하나의 체적에 증기가 차지하는 체적에 대한 비율을 의미한다.

$$\text{Vapor Volume Fraction} = \frac{V_{\text{vapor}}}{V_{\text{elem}}} \quad (2)$$

일반적으로 공동발생은 증기체적률이 10^{-5} 에 도달했을 때⁽⁶⁾로 정하고 있으나, 배관계에 초기손상을 야기시키는 공동의 증기체적률은 0.5 이상⁽⁷⁾으로 보는 것이 합리적이다. 공동은 유동흐름이 빠르게 변하는 영역에서 넓게 분포하여 나타나는 현상이므로 이를 정량적으로 평가하는 기법이 필요하다. 이를 위하여 POC를 도입하였다. POC는 초기손상을 야기시킬 수 있는 증기체적률이 0.5 이상인 공동발생영역을 공동현상 위험영역으로 나누어 계산한 값으로 공동영역을 정량화하여 백분율로 표시한 것을 의미한다.

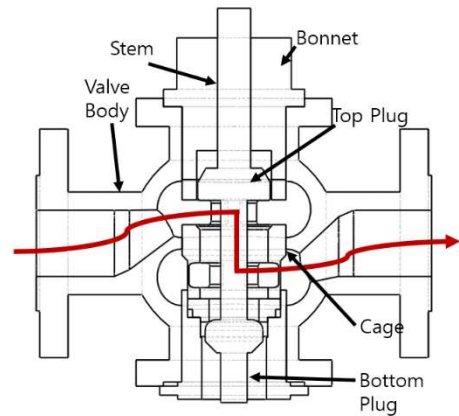
$$POC = \frac{\text{Cavitation Occurrence Zone with VOF} > 0.5}{\text{Volume of Cavitation Danger Zone}} \quad (3)$$

여기서, 공동현상 위험지역은 배관계에 손상위험이 있는 공동발생 구간을 의미하며, 일반적으로 공동이 가장 많이 발생하는 오리피스 이후의 체적을 사용하였다. 본 연구에서는 POC가 30% 이상⁽¹⁰⁾이면 배관계의 기계적 손상을 줄 것이라고 판단하였다.

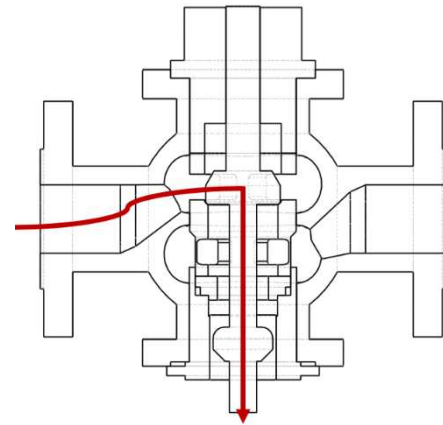
3. 공동현상의 수치적 평가

3.1 대상체

본 연구에 적용된 밸브는 자동차부품 세척장비 배관계열에 사용되는 40A 3 방향 절환 글로브밸브로서 Fig. 1 과 같이 본넷, 바디, 유로의 절환과 차단 기능을 담당하는 탑플러그와 바텀플러그 그리고 이를 지지하는 스템으로 구성되어 있다. 바디, 스템 및 플러그의 소재는 각각 SCS13, SUS304



(a) Straight flow



(b) Curved flow

Fig. 1 Configuration of three-way reversing valve and flow direction

및 SUS410 이다. 본넷 상부에 설치된 복동식 공압 가력기가 스템의 위치를 상, 하로 조절하여 탑플러그와 바텀플러그가 순차적으로 유로를 차단하여 Fig. 1(a)와 (b)와 같이 직선 및 곡선유로를 구현한다.

3.2 수치해석 모델

직선 및 곡선유로에서 유동특성을 분석하기 위해서 밸브 및 배관계의 형상을 CAD 모델로 제작하였다. ISA-RP75.23⁽⁴⁾에 의거하여 배관길이는 입구단의 경우 배관직경의 6 배로 그리고 출구단의 경우 배관직경의 10 배로 하였다. 유한요소모델은 ANSYS ICEM-CFD⁽⁹⁾를 사용하여 Fig. 2 와 같이 생성되었다. 유동해석 시 비교적 양호한 결과를 제공하는 Tetrahedral 요소를 사용하였고, 배관 표면부에서 나타나는 복잡한 벽면의 유동특성을 해석하기 위하여 Prism 요소를 사용하였다. 직선유로의 요소와 격자 수는 각각 1,450,000 개와 7,700,000 개이고, 곡

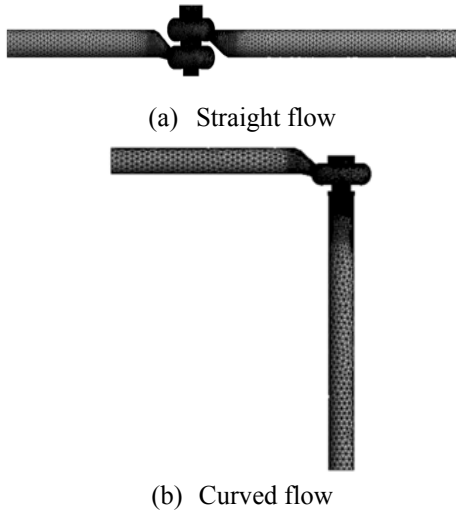


Fig. 2 FE-models for each flow direction

선유로의 경우 각각 1,100,000 개와 6,000,000 개이다. 유동해석시 일반적으로 압축성 Navier-Stokes 방정식이 사용되나, 난류 유동특성을 고려해야 하는 경우 유체속도의 섭동에 따른 난류응력항 t_{ij} 을 추가적으로 고려해야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 식을 사용하였다.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + t_{ij} \quad (4)$$

여기서, ρ 는 밀도, u_i 가 좌표축의 속도성분, p 는 압력 그리고 μ 는 점도이다. 난류응력항 t_{ij} 를 계산하기 위하여 사용되는 난류모델은 복잡한 난류유동의 예측에 용이하다고 알려진 SST(Shear stress transport)⁽¹⁰⁾ 모델을 적용하였다.

RANS 식으로 계산된 유동해석의 결과에서 공동의 크기 R_B 를 수치적으로 구하기 위하여 다음과 같은 Rayleigh-Plesset 식⁽¹¹⁾을 활용하였다.

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f} \quad (5)$$

여기서, R_B 는 기포의 반경, σ 는 표면장력계수, p_v 는 포화증기압, p 는 유체압력 그리고 ρ_f 는 유체밀도이다.

상용 전산유체역학 프로그램인 ANSYS-CFX⁽⁹⁾를 이용하여 유동해석을 수행하였다. 배관계에 유입되는 작동유체는 물과 증기 두 상으로 하였고, 경계조건으로 입구단의 질량유동은 6.5kg/s 그리고 출구단은 대기압으로 설정하였다. 작동유체의 온도는 25°C 이며, 물의 포화증기압 P_v 는 3,167Pa 로

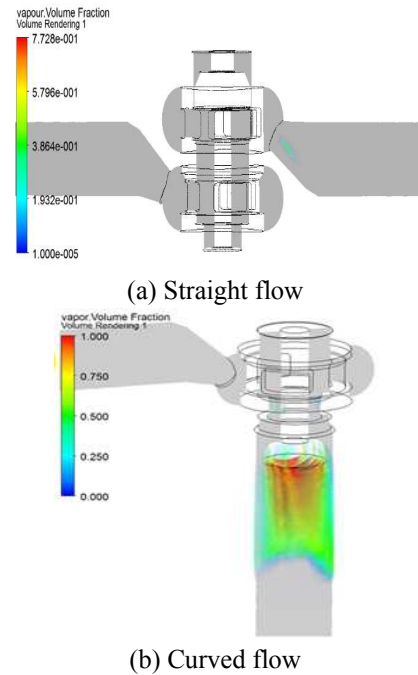


Fig. 3 Contour plots of vapor volume fraction for each flow case

하였다.

3.3 유동해석 결과 및 해석모델의 단순화

ISA-RP75.23⁽⁴⁾의 공동화지표 σ_v 를 구하기 위하여 유동해석에서 얻어진 압력분포에서 P_1 은 입구단 배관직경의 1 배 그리고 P_2 는 출구단 배관직경의 6 배의 위치에서의 값을 식 (1)에 적용하였다. 직선 및 곡선유로에 대하여 얻어진 σ_v 는 각각 1.26 및 1.05 이다. σ_v 가 클수록 공동의 발생과 강도가 낮아진다는 특징을 고려하면, 곡선유로의 경우 공동발생의 가능성이 높다는 것을 의미한다.

공동의 발생과 강도를 확인하기 위하여 유동해석의 결과를 증기체적률로 나타내었다. Fig. 3은 수평 및 수직유로의 증기체적률 분포이다. Fig. 3(a)와 같은 수평유로의 경우 증기체적률이 매우 작게 나타나 공동발생의 가능성이 매우 낮을 것으로 추정된다. 그러나, Fig. 3(b)의 수직유로의 경우 유체흐름이 크게 변하는 바텀플러그 하부에 증기발생영역이 넓게 나타났으며, 배관계에 초기손상을 야기시키는 증기체적률 0.5 이상⁽⁷⁾인 영역도 넓어 공동의 발생은 물론 강도도 클 것으로 예상할 수 있다. 식 (3)과 같이 증기체적률이 0.5 이상인 공동발생영역을 공동현상 위험영역으로 나누어 계산한 POC는 수평유로의 경우 0.08% 그리고 수직유로는 38.15%로 얻어진다. 이는 POC가 30% 이상이면 배관계의 기계적 손상을 야기시킨다는 연구⁽¹⁰⁾와 유사한

결과로서, 본 연구에 적용된 3 방향 절환밸브가 수직유료로 절환된 상황에서 바텀플러그 하부에 손상을 야기시킬 수 있는 공동이 발생하므로 이를 피하기 위한 형상최적화가 요구된다.

공동현상은 바텀플러그 형상에 의해 주로 영향을 받으므로 이를 매개변수화하고 각각에 대한 많은 양의 유동해석이 수행되어야 한다. 그러나, 복잡한 유로형상으로 인해 긴 해석시간뿐만 아니라 다상유동해석 특성상 낮은 수렴성 등과 같은 문제점을 가지고 있다. 따라서, 공동발생에 영향을 미치지 않는 국부적으로 복잡한 유로형상은 제거하고 관심영역만을 상세하게 고려한 단순모델을 만들었다. 수렴도의 기준인 잔차가 10^{-5} 이하에서 반복계산의 회수가 급격히 줄어들어 계산시간이 1/40 수준으로 단축되었고, 높은 수렴도를 달성하였다. Fig. 4는 실제 유로를 단순화하고, 스템과 바텀플러그를 상세하게 구현한 유한요소모델의 모습으로, 요소와 격자 수가 각각 43,000 개와 230,000 개이다.

한편, 실제 제품의 복잡한 유로를 상세하게 고려한 유한요소모델과 수렴성을 높인 단순모델의 유동해석 결과 간에 차이가 발생할 수 있으므로, 두 해석결과의 비교를 통해 단순모델의 유효성을

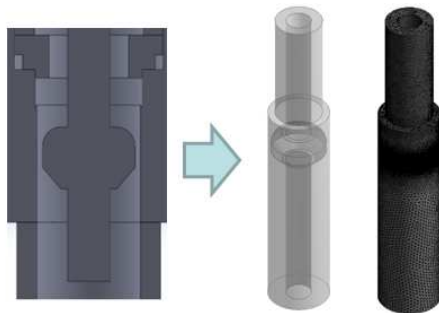


Fig. 4 Simple-model to reduce calculation-time and to improve convergence

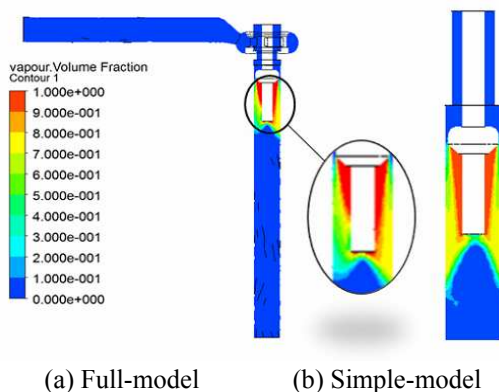


Fig. 5 Validation of simple-model for fluid analysis

확인해야 한다. Fig. 5는 두 모델의 증기체적률 분포로서 서로 유사함을 알 수 있다. 또한, 단순모델의 공동화지표 σ_v 는 1.048로서 복잡한 유로를 상세하게 고려한 유한요소모델의 결과인 1.05와 거의 차이가 없다.

4. 형상 최적설계

4.1 매개변수 연구

공동현상은 바텀플러그 형상에 의해 주로 영향을 받으므로 이를 매개변수화하여 공동현상 저감을 위한 형상설계를 수행하였다. 이때, 배관의 내경은 변경할 수 없으므로 고정값으로 하였다. Fig. 6은 3 방향 절환밸브의 바텀플러그의 형상 매개변수를 도시한 모식도로서 매개변수는 허리길이(Waist length)와 꼬리길이(Tail length) 두 가지로 지정하였다. 그림은 초기모델로서 허리길이가 꼬리길이가 각각 6.5mm 및 7mm이다.

초기모델을 기준으로 바텀플러그의 허리길이가 꼬리길이를 1.5, 3.5, 6.5, 9.5, 12.5mm 및 1, 4, 7, 9, 13mm로 변화시켰으며, 공동화지표 σ_v 와 POC를 정량적으로 평가하였다. Fig. 7은 형상 매개변수 변화에 따른 다상 유동해석으로 얻어진 증기체적률 분포의 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 7(a)는 꼬리길이가 7mm인 상태에서 허리길이를 변화시킨 경우의 결과로서 허리길이가 짧아질수록 증기체적률 분포가 넓어지고 강도도 커져 공동현상이 크게 나타난다. Fig. 7(b)는 허리길이가 6.5mm인 상태에서 꼬리길이를 변화시킨 것으로 꼬리길이가 짧아지면 허리길이의 경우와 마찬가지로 공동현상이 크게 나타난다. 따라서 허리길이가 꼬리길이를 모두 길게 하면 공동현상을 줄일 수 있다.

Table 1은 Fig. 7의 유동해석 결과에서 σ_v 와 POC를 계산하여 정리한 결과이다. 형상 매개변수의 변화에 따른 σ_v 와 POC의 경향을 살펴보면, 허리길이가 꼬리길이가 모두 길어짐에 따라 σ_v 는 커지고 POC는 감소하면서 공동현상이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 여기서, POC는 큰 폭으로 변화하지만 σ_v 의 변화는 매우 작은 것을 알 수 있다.

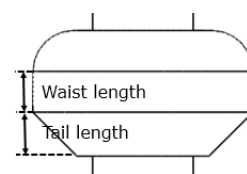
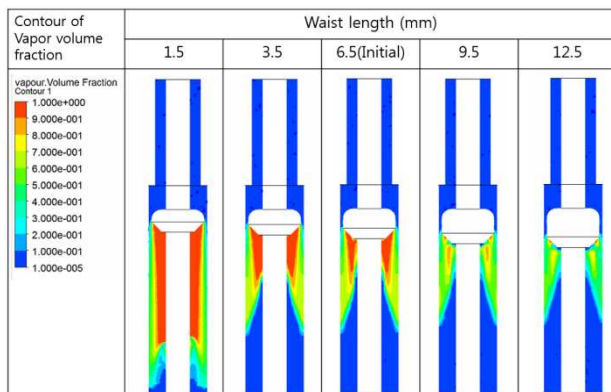


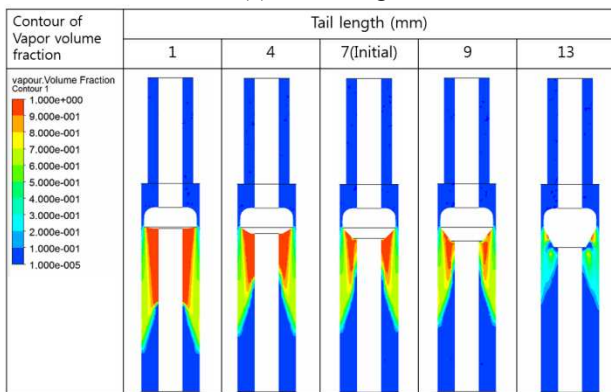
Fig. 6 Shape parameters selected from geometry of bottom plug, i.e., waist length and tail length

Table 1 Cavitation index and percentage of cavitation due to change of shape parameters

Trim shape (mm)	σ_v	POC (%)
Waist length	1.5	0.932
	3.5	1.009
	6.5(Initial)	1.009
	9.5	1.023
	12.5	1.094
Tail length	1	0.792
	4	1.005
	7(Initial)	1.009
	9	1.041
	13	1.042



(a) Waist length



(b) Tail length

Fig. 7 Vapor volume fraction due to change of shape parameters such as waist length and tail length

2.1 절에서 설명한 바와 같이 σ_v 는 배관의 입구단과 출구단의 차압으로만 얻어지는 결과로서 국부적인 유동변화를 나타내지 못하여 형상변수의 변

화에 따라 큰 변화가 없다.

4.2 형상최적화

바텀플러그의 허리길이를 기반으로 한 매개변수 연구에서 얻어진 결과를 기반으로 형상최적화를 실시하였다. 바텀플러그의 허리길이를 설계변수로 하고 목적함수를 POC로 하였으며, 공동에 의해 배관의 손상을 야기시키는 $POC=30\%$ 를 기준으로 이 값의 미만을 만족하는 경계조건을 부과한 최적설계 정식화를 수행하였다. 앞선 매개변수 연구에서 설계영역 탐색을 수행해 본 결과, POC가 특정한 꼬리길이에 대하여 매우 민감하고 강한 비선형적인 거동특성을 보였다. 따라서, 허리길이를 각각 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5mm 및 5, 6, 7, 8, 9mm로 나눈 5개 준위의 5x5 직교배열표를 만들고, 기존의 매개변수 연구에서 유동해석을 추가로 수행한 완전요인배치 실험계획법⁽¹²⁾을 실시하였다. Fig. 8은 상용프로그램인 JMP⁽¹³⁾와 내장된 인공신경망 모델로부터 두 설계변수에 따른 POC의 변화를 근사화시킨 반응표면 모델이다. 인공신경망으로 추정된 POC 반응표면 모델의 오차를 검증하기 위하여 JMP⁽¹³⁾에 내장된 Training과 Validation 과정이 진행된다. Training 과정을 통하여 반응표면모델의 매개변수를 추정하고, Validation 과정에서 이 모델의 유효성을 검사한다. 추정된 모델의 정확도는 RSquare(Coefficient of determination)로 평가되는데, 1에 가까울수록 추정된 모델과 실제 결과와의 차이가 적다는 것을 의미한다. RMSE(Root mean square error)는 RSquare와 더불어 추정된 모델과 실제결과와의 차이를 확인하는 값으로, 값이 작을수록 추정된 모델의 정확도가 높다. 나머지 값들은 이 회귀모델의 경향을 알아보는 값들로, MeanAbsDev(Mean absolute deviation)는 절대평균편차를 의미하고 평균에서 떨어진 정도를 나타낸다. LogLikelihood는 모형의 적합도를 나타내는 지표이고, SumFreq(Sum of frequency)는 인공신경망 모델의 조사회수로서 전체의 2/3를 Training으로 할당하고, 나머지 1/3은 Validation으로 사용한다. 근사화된 반응표면모델의 RSquare는 0.97로서 비교적 정확하게 추정된 것임을 알 수 있다. 한편, POC는 꼬리길이에 대해 매우 민감하게 변하며, 강한 비선형적인 거동특성을 보인다. 설계영역의 탐색을 통하여 최적설계 정식화를 충족시키는 바텀플러그의 형상은 POC가 27%로 만족하는 허리길이가 6.42mm와 꼬리길이가 6.96mm임을 알 수 있다. 아울러 Fig. 8은 설계자

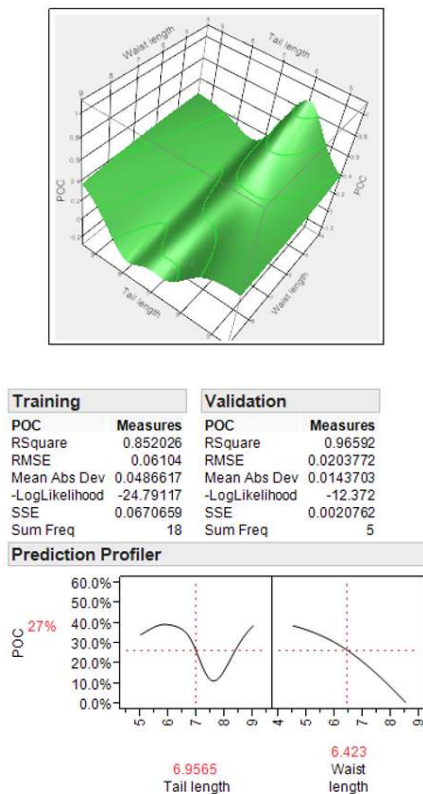


Fig. 8 Prediction profiler of optimal solution

에게 공동이 발생하지 않는 설계영역은 물론 POC를 최소화 하는 설계변수도 선정할 수 있는 정보를 제공하였다.

5. 결론

본 연구에서 자동차부품세척기에 사용되는 3 방향 절환밸브의 공동현상에 대해 유동해석 및 형상최적화를 수행하였으며, 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 수직유로에서 σ_c 는 1.05로 수평유로에 비해 낮게 나왔으며, 증기체적률 분포가 바텀플러그 하부에 넓게 나타나 공동현상이 크게 발생하였다.

(2) 바텀플러그 형상변화에 따른 유동특성을 살펴보기 위해 관심영역으로만 이루어진 단순 유한요소모델을 활용하였으며, 이를 통해 유동해석의 수렴성 문제를 해결하였으며 해석시간을 1/40 수준으로 단축하였다.

(3) 실험계획법 기반 인공지능망 근사모델을 이용하여 설계영역을 탐색한 결과, 27%의 POC를 만족하는 최적형상(허리길이=6.42mm, 꼬리길이=6.96mm)을 구하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 지정 지역혁신센터 사업(RIC) 고기능성밸브기술지원센터 지원으로 수행되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Proceco Ltd., Industrial parts washer, <http://www.proceco.com/industries/automotive/Aqueous-Parts-Cleaning/Automotive-Aqueous-cleaning -Engine-Components.php>.
- (2) Brian, N., 2007, *Handbook of Valves and Actuators*, Roles & Associates Ltd, UK, pp. 82~93.
- (3) Franc, J. P. and Michel, J. M., 2003, *Fundamentals of Cavitation*, Grenoble Sciences, France, pp. 20~82.
- (4) ISA-RP75.23, 1995, "Considerations for Evaluating Control Valve Cavitation," the Instrument Society of America.
- (5) Lee, J. H., Baek, S. H., Park, J. H., Park, S. I. and Park, Y. C., 2013, "Experimental and Numerical Investigation for Reducing Cavitation of Butterfly Valve with Perforated pate," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 9, pp. 176~177.
- (6) Jo, S. H., Kim, H. J. and Song, K. W., 2014, "A Numerical Study for Reducing Cavitation in a Butterfly Valve with a Perforated Plate," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 17, No. 3, pp.65~70.
- (7) Kubo, M., Araki, T. and Kimura, S., 2003, "Internal flow analysis of nozzles for DI diesel engines using a cavitation model," *JSAE Review 24*, pp.255~261.
- (8) Kim, D. K. and Sohn, C. H., 2013, "Numerical Study on Cavitation Reduction in Velocity-Control Trim of Valve with High Pressure Drop," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 9, pp. 863~871.
- (9) ANSYS Inc., <http://www.ansys.com>.
- (10) Park, K. H. and Kim, J. G., 2008, "Assessment of Turbulence Models for Engine Intake and Compression Flow Analysis," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 32, No. 8, pp. 1129~1140.
- (11) Kim, M. J., Jin, H. B., Son, C. H. and Chung, W. J., 2013, "Numerical Analysis on Cavitation of Centrifugal Pump," *KSFM Journal of Fluids Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 27~34.
- (12) Owen, A., 1992, "Orthogonal Arrays for Computer Experiments, Integration and Visualization," *Statistica Sinica*, Vol. 2, pp. 439~452.
- (13) SAS Institute Inc., 2010, JMP ver.10, http://www.jmp.com/en_us/software/jmp.html.