

## 유체-구조 연성해석을 통한 축류펌프의 진동 연구

이보람\*, 윤태종\*, 오원빈\*, 이충우\*, 김학형\*\*, 정영재\*\*, 김일수\*,#

\*목포대학교 기계공학부

\*\*전남테크노파크

### A Study of the Vibration of an Axial Flow Pump through FSI Analysis Method

Bo-Ram Lee\*, Tae-Jong Yun\*, Won-Bin Oh\*, Chung-Woo Lee\*, Hak Hyoung Kim\*\*,  
Yeong Jae Jeong\*\* and Ill-Soo Kim\*#

\*Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo National University. \*\*Jeonnam Technopark

(Received 12 November 2020; received in revised form 23 November 2020; accepted 30 November 2020)

#### ABSTRACT

Pressure, which is a dynamic characteristic of a floodgate, is predicted using an FSI analysis method. A fluid analysis model and a hydrology analysis model were used as analysis models. As a result of the analysis, we found that a warped model has smaller acceleration than a square model. Additionally, this numerical analysis technique was applied to the actual hydrology, and the analysis results were compared with the results of the vibration tests. As a result, we confirmed that there is a small difference between the results of the vibration tests and the results of the FSI analysis. Through this analysis, the applicability and reliability of the FSI analysis method were verified. We concluded that the pressure of a floodgate can be measured through an FSI analysis method.

**Key Words** : Axial Pump(축류 펌프), Floodgate(수문), FSI(유동-구조 연성), Modal Analysis(모달 해석)

#### 1. 서 론

농지의 침수예방 및 안정적인 농업용수 확보를 위한 수문 배수과정은 지역적 조건에 따라 다르게 나타나며, 이에 따라 모델링 요소와 해석 기법도 다르다. 국내 농업 유역은 논과 배수로를 포함하는 관개지구와 농업용 저수지가 존재하는데, 이는 국

외에서 개발된 모형의 지역·환경적 조건과 다르다. 최근 국내에서는 모델링 기술의 발전과 더불어 수문 모니터링 기술 또한 전문장비의 확보, 체계적인 교육 등을 통해 발전하였다. 유량조사사업단이 2007년에 수립된 이후로 국토교통부에서 제공하는 하천유량 자료의 품질이 개선되었고<sup>[1]</sup>, 한국농어촌공사 농촌용수종합정보시스템이 2006년에 개발된 이후로 유효저수량 10만톤 이상 1,200여개의 저수지에 대해 수위 자료를 연속적으로 측정하고 있다. 하지만 농업유역 수문 원리는 복잡하고, 기상, 작

# Corresponding Author : [ilsookim@mokpo.ac.kr](mailto:ilsookim@mokpo.ac.kr)

Tel: +82-61-454-3455, Fax: +82-61-452-6376

물, 토양 등의 물리적 요소와 유체 등의 수압이 인위적 요소가 작용하기 때문에 모니터링만을 통해서 관측자료<sup>[2]</sup>에 내재되어 있는 여러 수문요소를 구분하기 어렵다.

농지의 침수예방에서 사용되는 수문의 수중 축류펌프는 비속도가 크고 대유량 저양정이 요구되는 경우에 많이 쓰인다. 원심펌프의 형식과 달리 비속도가 크면 펌프의 회전자 형상이 익형이 다른 형상이 나타난다. 수중 축류펌프는 물속에서 운전하며 모터와 펌프가 일체형으로 되어있으며, 안내케이싱, 흡입케이싱, 프로펠러, 프로펠러 보스, 축, 브라켓, 베어링, 헤드커버 등으로 구성되어있다. 구동에 의해 주축 및 프로펠러 보스와 결합되어있는 프로펠러가 회전하며 흡입케이싱을 통해 유체가 흡입되며, 프로펠러의 회전을 지나 안내케이싱, 출구로 이동한다. 축류 프로펠러의 경우 저양정, 고성능 설계가 요구되며 프로펠러에 가해지는 수압이 상승하면 프로펠러 변형 또는 진동에 영향을 끼치게 된다. 이러한 현상은 수중 축류펌프의 성능과 내구성에 영향을 주게 된다. 단순한 하천유량에 대한 유동해석을 통해서 그 속에 포함되어 있는 수문에 가해지는 인자를 추정하기 어렵고, 요구하는 양정 및 성능을 관측할 수는 있으나 안정적인 구조적인 수문에서 개별적으로 산정하는데 한계가 있다. 그러므로 수문에서의 펌프의 구조적 안정성을 위해서는 수학·물리적인 모델링을 통한 해석이 병행되어야 한다.<sup>[3]</sup>

또한, 수치 해석적 방법은 실험적 방법에 비하여 결과를 산출하는 시간을 단축할 수 있으며, 단시간 내에 다양한 대안에 대하여 검토할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 수압에 의한 모델의 구조적인 특성에 대하여 수치 해석적 접근을 통해 수압 및 진동 예측을 통하여 계획 설계 단계에서 구조적 안정성을 가진 형상을 결정할 수 있게 된다.<sup>[4]</sup>

펌프는 회전에 의해 다양한 주기의 수력학적, 기계적 가진이 발생하기에 펌프의 고유진동수와 중첩될 때 야기될 수 있는 공진을 회피하기 위한 설계가 필수적으로 요구된다. 이를 위해 펌프의 고유진동수를 파악해야 하며, 이 때 수중에서 운용되는 수차의 특성을 고려하여 유체와 접한 상태의 고유진동수를 구해야 한다. 해석 방식은 유동-구조, 진

동 one-way 연성해석 방식을 사용하고 전달행렬법을 이용하여 크랙을 가진 티모센코 보의 모델링 및 보의 고유진동수를 구하고 실험을 통하여 그 결과를 검증하였다.<sup>[5]</sup> 본 연구는 프로펠러의 작업유체를 고려하여 프로펠러의 유동해석을 하고 유동 압력에 의한 수문의 구조진동 해석을 하였고, 본 방법을 실제 펌프일체형수문을 제작하였다. FSI해석법을 이용하여 수문의 동적 특성인 수압을 예측하였다. 해석모델로는 펌프와 수문을 사용하였다. 이 수치 해석 기법으로 실제 수문에 적용하였다. 그리고 해석 결과를 진동해석의 결과와 비교하고자 하였으며 이를 통해 공진현상에 대한 적용성을 목표로 하고자 한다.

## 2. 이론 해석

FSI해석법이란, 유체와 구조체의 상호작용을 해석하는 수치 해석적 방법이다. FSI해석에서 유체는 일반적으로 압력, 온도, 하중을 구조체에 전달하여 구조체 변형이 발생하며 이에 대한 정보가 다시 유체의장에 전달되어 이에 따라 유체의 해석결과에 영향을 주게 되면서 양방향 연성해석이 가능한 수치 해석적 방법이다. 지배방정식은 다음 식 (1)과 같다.  $[R]$ 은 유체-구조체의 인터페이스에서 각 절점과 관련된 유효표면적을 나타내는 결합행렬(Coupling Matrix)이며, 법선 벡터의 방향을 고려한다. 유체-구조체 인터페이스에 생성된 유체와 구조물의 하중은 절점자유도가 미지수인 함수이다. 여기서,  $R$ 은 결합행렬,  $\rho_0$ 는 유체의 밀도,  $K_s, M_s$ 는 구조요소의 강성, 질량 행렬,  $K_f, M_f$ 는 유체요소의 강성, 질량 행렬,  $U$ 는 변위벡터,  $P$ 는 압력,  $F_s$ 는 구조체의 표면력,  $F_f$ 는 유체의 표면력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} [M_s]\{\ddot{U}\} + [F_s]\{U\} &= \{F_s\} + [R]\{P\} \\ [M_f]\{\ddot{P}\} + [K_f]\{P\} &= \{F_f\} + \rho_0[R]^T\{U\} \end{aligned} \quad (1)$$

수치해석기법이나, 기계, 항공, 선박의 경우에서와 같이 유체와 밀접한 관계를 갖는 구조체의 해석에서 많이 적용된다. FSI해석은 시스템 내에서 유체와 구조체 두 영역의 해석이 가능함으로 구조체의 물

질적 특성을 고려하여 해석함으로써 유체에 의한 구조체의 거동을 보다 정확하게 파악할 수 있다. 따라서 수압에 의한 수문의 구조적 안전성을 파악하기에는 매우 유용한 수치 해석 기법이라 사료된다.

펌프일체형수문에서의 성능 향상 및 안전성 확보를 위한 FSI 해석은 유체-구조 연계문제에서는 거의 대부분 유체의 흐름에 의해 유발되는 동수압(Hydrodynamic pressure)이 접하고 있는 구조체에 하중으로 작용하고, 반면 구조체의 움직임은 유체가 차지하고 있는 기하학적 영역을 변화시킨다. 따라서 유체가 구조물에 미치는 동수압은 구조물에 하중 경계조건으로 반영되는 반면, 구조물의 거동은 유체 유동의 경계영역 및 경계에서의 속도로 반영된다.

개발한 펌프일체형수문의 사용처는 유체와 구조물의 상호작용이 발생하므로 수문의 구조적 안정성을 평가하기 위해서는 FSI 해석기법을 적용하였으며, Fig. 1은 FSI 해석의 절차를 나타낸다.

### 3. FSI해석용 모델 구축

유동해석에서 정상상태로 계산된 수중 축류펌프의 표면 압력 값들을 ANSYS CFX를 활용하여 확인하고, 구조해석을 하여 변형량과 등가응력을 계산하였다. CFD방법에 의해 계산된 시간에 따른 압력변화 값을 Ansys Transient Structural 코드의 입력값으로 넣어서 유체유동으로 유발된 진동을 계산하고자 한다. 해석방식은 유동-구조, 진동 one-way 연성해석방식을 사용한다.

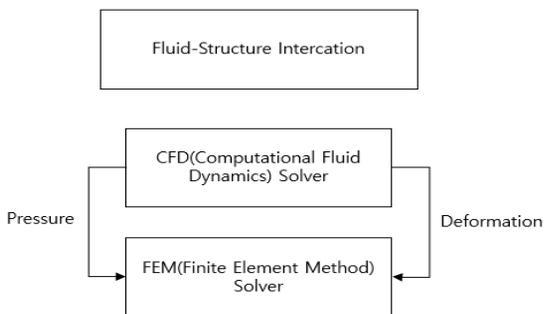


Fig. 1 Step of FSI analysis

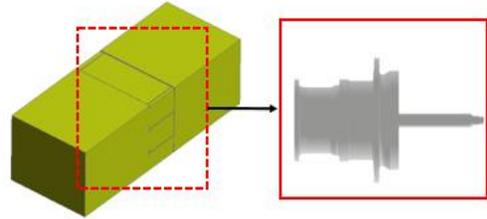


Fig. 2 3D-modeling of axial pump

하서산업(주) 현장에서 적용된 모델을 이용하여 FSI해석 및 구동부품의 사양선정에 활용하였다. FSI 해석을 통하여 요구되는 성능과 기준을 검증하기 위해 적합한 해석모델을 다른 물리계의 상호작용을 고려하는 연성해석도 같은 환경 내에서 실행가능하다. 물인 유체와 수문인 구조의 상호작용을 고려한 연성 해석을 도입하였다. FSI 해석에 사용된 모델인 Fig. 2는 수중축류펌프의 유체영역의 해석모델을 나타낸다. 연성해석은 ANSYS사의 CFX와 구조해석을 사용하였으며, CFX 해석에서의 수문 내부 유동장의 정상상태에 대한 계산을 수행한다.

계산 결과값으로 구경 500mm의 수중축류펌프의 프로펠러가 4EA로 구성되며, 회전수 691RPM, 유량은 운전점인 33.0m<sup>3</sup>/min를 갖는다. 펌프일체형수문을 구성하는 각 부품의 재질은 Guide casing, Suction tube은 GC200, Propeller는 SSC13으로 Table 1은 GC200과 SSC13의 기계적 물성치를 나타낸다.

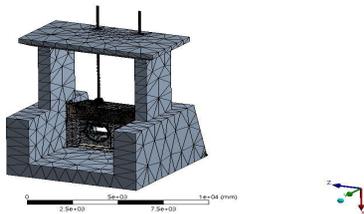
FSI 해석을 수행하기 위해 CFX해석의 해석모델 중 유체 영역은 일반적으로 사용되는 Domain Type으로 설계하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 Polyhedral mesh이며, 다면체 격자는 Tetra mesh보다 50%의 격자 개수를 절감할 수 있으며, 동일한 정확도를 유지하며 탁월한 quality를 가진다. 사용한 격자의 수는 약 120만개이며, 유동 해석을 위한 유동장은 길이가 5.5m인 사각형으로 구성되어 있다. 수중 축류 펌프 주위의 3차원 비압축성 유동을 계산을 위해 내부 유동을 3차원 정상상태의 난류 유동으로 가정하였으며, 난류모델은 SST로 선정하였다. 사용된 물의 밀도는 998.2kg/m<sup>3</sup>으로 인가한다.

실제 펌프일체형수문의 사용처인 배수펌프장의

접근 유속 기준으로 1m/s로 선정하였으며, 실제 유량보다 20% 높게 적용하여 구조적인 안정성에서 신뢰성을 입증하기 인가하였다. 경계조건은 흡입구 쪽에 유속을, 토출구 쪽에 유량제어를 위해 Mass flow outlet을 인가하였다. 선정된 유속의 유동흐름에 의한 수문에 가해지는 압력 값을 도출하였다. Table 2은 유동해석을 위한 세부적인 해석조건을 나타내며, Fig. 4는 펌프와 일체된 수문에 작용하는 압력을 확인하기 위하여 설정한 Domain Type을 나타낸다.

**Table 1 Mechanical properties of base metal**

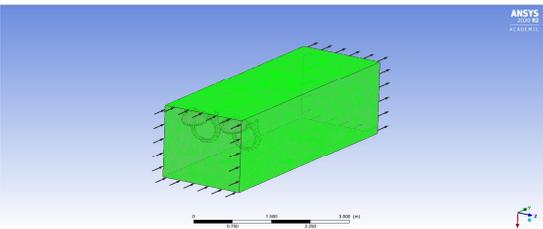
Material	GC200	SSC13
Elastic Modulus (GPa)	105	193
Poisson's Ratio	0.28	0.29
Modulus of Elasticity(GPa)	162	193
Density(g/cc)	7.34	8.00
Yield Stress (MPa)	572	205
Component	Casing	Impeller



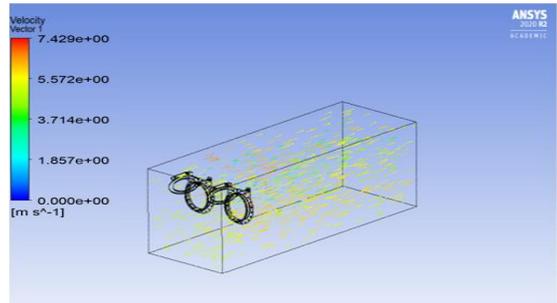
**Fig. 3 Mesh generation of pump assembly**

**Table 2 Boundary condition for CFX analysis**

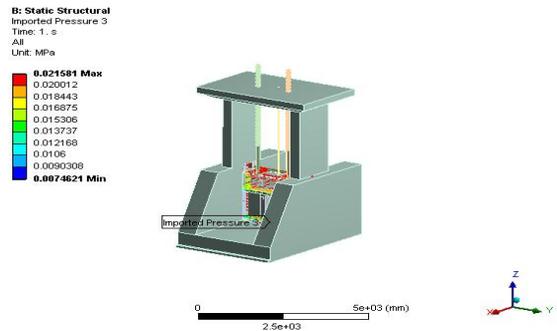
Boundary Condition	Value	Boundary Condition	Value
Domain Type	Fluid Domain	Material	Water
Pressure	1 atm	Water Velocity	1m/s
Turbulence	SST	Domain Length	5.5m



**Fig. 4 Domain type designed for CFX analysis**



**Fig. 5 CFX analysis results (Velocity distributions)**



**Fig. 6 Load extracted by CFX analysis**

축류팬의 구조와 진동을 해석하기 위하여 정상상태와 비정상상태를 모두 계산하였다. ANSYS CFX 프로그램을 이용하여 유동해석을 수행한 결과, 본체에 발생하는 속도분포는 Fig. 5와 같으며, 유체의 유동으로 인해 발생하는 최대속도 7.429m/s로 계산되었다. 유동해석 결과 플랩게이트 후면부에 최대압력이 작용하였다. 유동해석 결과로 도출된 압력데이터를 구조해석의 동일한 부분에 적용하여 하중데이터를 매핑(mapping)하였다. Fig. 6은 유동해석의 결과를 ANSYS Structure 구조 해석의 입력조건으로 설정한 사항으로 유체 유동에 의한 펌프일체형수문의 내부 압력분포이다. 본체와 밸브가 연결되는 부분에 최대 압력 0.021MPa이 발생하였다. 산출된 유동해석 결과인 유동영역과 구조영역의 경계면에서 발생하는 압력 데이터를 구조해석 모델과 매핑하여 하중이 전달되도록 하였다. 실제 환경과 비슷한 조건에서 해석을 수행하기 위해 해석모델의 경계조건으로써 Standard Earth Gravity를 -Z방향으로 적용하였으며, 밑바닥 면을 Fixed support로 구속하였다.

#### 4. 해석 결과

유동해석에서 정상상태로 계산된 수중 축류펌프의 표면 압력값들을 Ansys Transient Structural 코드의 입력하여 구조해석을 하여 변형량과 등가응력을 계산하였다. 유체유동으로 유발된 진동을 계산하였다. 이때 해석방식은 유동-구조, 진동 one-way 연성해석 방식을 사용하였다. 펌프일체형수문의 FSI해석 결과인 Fig. 7과 같이 총 변형량은 플랩게이트 상단부의 플랩밸브에 2.0989 mm의 미세한 변형을 확인하였다. Fig. 8과 같이 최대응력 확인결과 플랩밸브 및 플랩게이트 체결부위에서 최대응력 67.178MPa이 작용함을 확인하였다. Fig. 9와 같이 펌프일체형수문에 발생하는 최대 응력이 Table 1으로부터 구조물의 재료인 SUS304의 항복강도는 약 215MPa이므로 펌프일체형수문시스템은 안정성을 가진다고 판단할 수 있다. 주요 수문부의 안전을 확인결과 최대응력이 발생한 지점과 동일한 지점은 유동에 의해 직접적으로 수문의 배수구동이 이루어지는 수문과 펌프의 결합된 후면부가 3.8113로 최소 안전율을 확인할 수 있었다. 일반 기계구조용 강재의 허용안전율 기준 2.0을 만족하는 수준으로 펌프일체형수문시스템의 구조적 안전성을 입증하는 결과를 확인할 수 있었다.

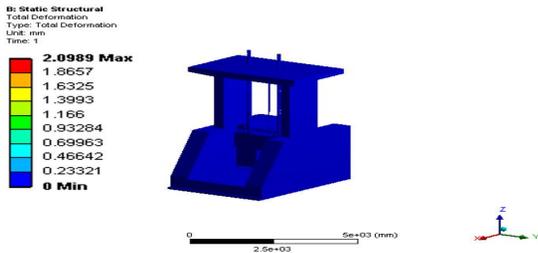


Fig. 7 Deformation of Floodgate

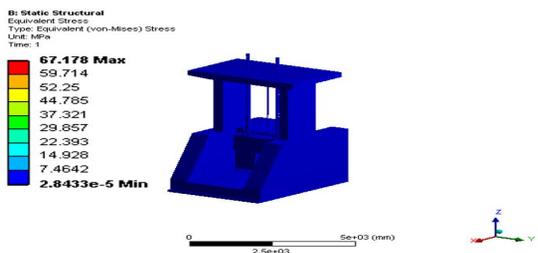


Fig. 8 Stress of Floodgate

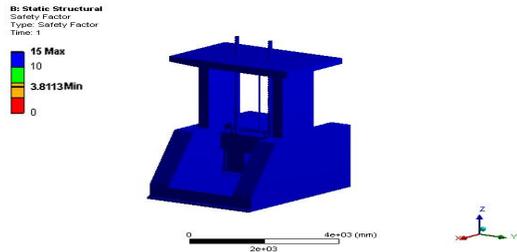


Fig. 9 Safety of Floodgate

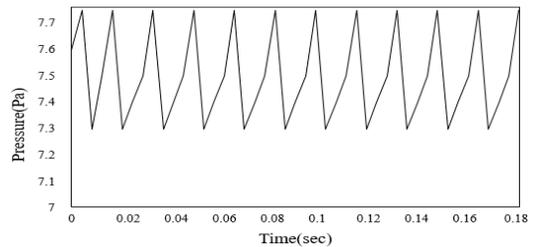


Fig. 10 Pressure of time variations

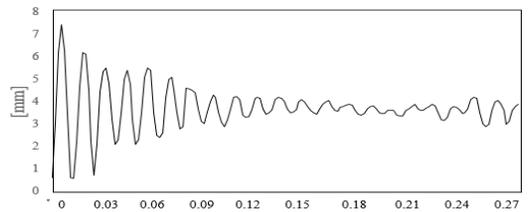


Fig. 11 Displacement of time variations

프로펠러의 표면에 작용하는 응력은 블레이드 회전에 의한 원심력과 유체의 압력의 영향을 받는다. 수문과 결합된 프로펠러의 최대응력의 분포는 허브에서 최대 응력이 발생하며 프로펠러 보스의 근처로 갈수록 응력이 줄어든다. 프로펠러가 회전하면서 익형에 정체되어 가장 큰 압력을 받는다. 반면에 응력은 프로펠러가 고정되어있는 부분에서 가장 적게 영향을 받는다. 구조적인 계산으로 시간에 따른 프로펠러 표면의 응력변동 곡선은 수중 축류펌프의 표면 응력이 주기적으로 변화되며 진동을 유발하는 것을 확인하였다. 이러한 프로펠러 표면응력 변동의 계산 결과는 앞서의 유속의 변동의 계산결과와 같은 주기(0.02 sec)를 가지고 동기화되어 있는 것으로 보이며, 이는 수중 축류펌프의 표면에 진동이 유속의 변동에

의해 발생된다. 이때 진동의 최대 진폭은 250 kPa에 이른다. Fig. 10은 수중축류펌프의 계산한 시간에 따른 압력변화를 나타내었으며, 주기적인 압력분포가 나타난다. Fig. 11은 변형의 수중 축류펌프에서의 진동 특성을 보여주고 있다. 선정된 일반 강재의 특성에 따라 프로펠러가 회전하면서 익형에 정체되어 가장 큰 압력을 받게 되고, 고유 과도 상태를 지나 주기 특성을 나타낸다.

## 5. 결론

본 연구에서는 펌프일체형수문의 개발을 위해 FSI 기법을 적용하여 유동해석과 구조해석을 수행하였으며, 진동해석을 통하여 수압에 따른 구조적 안전성을 얻어진 결과를 통하여 해석하고 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 펌프일체형수문 시스템을 대상으로 유동해석을 수행한 결과, 수문에 추가되는 총 변형량은 플랩 게이트 상단부의 플랩밸브에 2.0989mm의 미세한 변형을 확인하였다.
2. 유동해석 결과를 활용하여 구조해석을 수행한 결과, 최대응력은 67.178MPa로 구조물의 항복강도인 215MPa 보다 작다.
3. 펌프일체형수문의 수중 축류펌프의 표면에 가해지는 유체 압력의 영향을 계산한 결과 프로펠러의 끝단 부분에서 변형량이 가장 크게 나타났다. 이는 프로펠러가 회전하면서 익형에 정체되어 가장 큰 압력을 받게 되고, 고유 과도 상태를 지나 주기 특성을 나타낸다.

## REFERENCES

1. Jeong, S. W., "Current Status and Prospect of Flow Survey", Journal of Korea Water Resources Association - Water for Future, Vol. 41, No. 8, pp. 10-14, 2008.
2. Im, S. J., "Modeling Irrigation Return Flow from Paddy Fields on Agricultural Watersheds", A Thesis for a Doctor's Degree, Seoul National

University, Republic of Korea, 2000.

3. Song, J. H., "Hydrologic Analysis System with Multi-Objective Optimization for Agricultural Watersheds", A Thesis for a Doctor's Degree, Seoul National University, Republic of Korea, 2017.
4. Jo, J. H., "A Study on The Numerical Analysis for The Dynamic Response Characteristics of Tall Building to Wind Loads Using FSI Analysis", A Thesis for a Master's Degree, Inha University, Republic of Korea, 2013.
5. Son, I. S., Kim, C. H. and Cho, J. R., "Coupled Bending and Torsional Vibrations Analysis of Cracked L-shaped Beam", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 4, pp. 8-15, 2011.
6. Lee, C., Kim, H. S. and Kil, H. G., "Evaluation on the Blade Vibration Characteristics of a Plastic Axial Flow Fan Using Flow-Structure Coupled Analysis Technique", Korean Society for Fluid Machinery, Vol. 22 No. 5, pp. 21-27, 2019.
7. Kim, K. S., Kang, Y. J. and Ko, H. K., "Fluid-Structure Coupling Analysis of the Solenoid Valve with Spool", Proceedings of the KSMPE Conference, pp. 107-17, 2011.
8. Kim, S. P., Lee, J. H., Lee, K. H., Jeon, R. W. and Do, T. W., "Thermal-structural Coupled Field Analysis for Fire Safety Type Ball Valve", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 3, pp. 28-32, 2011.
9. Kim, K. S., Kang, Y. J. and Ko, H. K., "Fluid-Structure Coupling Analysis of the Solenoid Valve with Spool", Proceedings of the KSMPE Conference, pp. 10, 2011.