

해양플랜트용 수직 보상기의 유공압 시스템 해석 Analysis of Hydraulic-Pneumatic System for Offshore Plant Heave Compensator

정용길* · 황성구** · 김귀남** · 윤영환*** · 현장환**** · 허선철*†

Yong-Gil Jung*, Sung-Gu Hwang**, Gwi-Nam Kim**, Yung-Hwan Yoon***,
Jang-Hwan Hyun**** and Sun-Chul Huh*†

(Received 21 November 2014, Revision received 28 January 2015, Accepted 28 January 2015)

Abstract: An analysis model is developed using a commercial software 'simulationX' for designing hydraulic-pneumatic system of heave compensator for offshore drilling operations. Reliability verification of the analysis model for the test equipment of 1/5 scale compensator was conducted by comparing test results and simulation results. An analysis of full scale heave compensator is developed on the basis of verified a model. Then, the results of simulation were analyzed to obtain following conclusion. The displacement of crown block about excitation input amplitude ($\pm 3,000\text{mm}$) of the steward platform using a 'simulationX' is attenuated under $\pm 35\text{mm}$, and the compensation rate is 98.7%. In this study, goal of a compensation rate is more than 95%. The previously results are satisfied with the objectives of compensation rate.

Key Words : Heave compensator, SimulationX, Drillship, Analysis, Hydraulic cylinder

— 기 호 설 명 —

A_x : 면적 [m^2]
 C_d : 유량계수
 F : 힘[N]
 P : 압력 [MPa]

Q : 유량 [m^3/s]
 V : 체적 [m^3]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]
 β : 체적 탄성률 [MPa]

*† 허선철 : 경상대학교 에너지기계공학과 교수

E-mail : schuh@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9111

*정용길 : 경상대학교 에너지기계공학과 교수

**황성구, 김귀남 : 경상대학교 에너지기계공학과 대학원

***윤영환 : J&F Solution

****현장환 : ㈜칸

*† Sun-chul Huh(corresponding author) : Department of

Energy & Mech. Eng. Gyeongsang National University

E-mail : schuh@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9111

*Yong-Gil Jung : Department of Energy & Mech. Eng.

Gyeongsang National University

**Sung-Gu Hwang, Gwi-Nam Kim : Department of Energy

& Mech. Eng. Gyeongsang National University

***Yung-Hwan Yoon : J&F Solution

****Jang-Hwan Hyun : KHAN Co., LTD

1. 서 론

해양플랜트용 수직 보상기(heave compensator)는 해상에서 시추(drilling)작업 중 파도에 의한 시추선(drill ship)의 상하운동(heave motion)에 기인한 드릴 비트(drill bit)의 상하운동을 보상하는 역할을 하는 드릴 비트 보호 장치이다. 시추작업 중 파도에 의한 시추선의 상하운동이 드릴 비트에 전달 되면 드릴 비트와 지하 암석과의 충돌로 인한 드릴 비트 손상이 가중되어 시추 작업이 불가능하게 된다.

수직 보상기는 DSC(drill string compensator)와 AHC(active heave compensator)로 구성된다. DSC는 데릭(derrick) 상부에 설치되는 수동형 수직 보상기(passive heave compensator)이며, 시추선으로부터 드릴 비트에 전달되는 상하운동을 약 90%까지 감소시킨다. AHC는 DSC의 보조역할로서, 시추선으로부터 드릴 비트에 전달되는 상하운동의 미세조정을 위하여 능동적인 유압서보 제어가 수행된다.¹⁾

수직 보상기에 대한 연구는 국내보다는 해외에서 많이 이루어졌으며, 수직 보상기의 주 기능이 감쇠역할이기 때문에 동역학적 해석 연구가 선행되어졌다. Jorgen Haao 등은 두 개의 AHC 실린더로 이루어진 보상기의 전자 유압시스템을 연구하였으며, Shaojun Liu 등은 실린더와 어큐뮬레이터로 작동하는 보상기의 운동을 연구하였다. 또한 J.T. Hatleskog 등은 실린더에 동역학적 수식을 적용하여 실린더의 동적연구를 수행하였다.^{2,3,4)}

수직 보상기의 성능시험을 위한 성능시험장비 구축의 어려움 등으로 수직 보상기의 성능시험은 부하에 따른 쿠션 압력 측정 정도만 이루어지고 있는 실정이다.^{5,6)}

본 논문은 수직 보상기를 유공압시스템으로 설계하고, 상용프로그램인 시뮬레이션X (Simulation X)를 이용한 시스템 모델링 및 동역학 해석을 수행하였으며, 1/5 크기의 축소모델을 제작하여 성능시험 한 결과와 시뮬레이션 한 결과를 비교하여 수직 보상기의 최적화 설계 및 제어기 설계에 활용할 수 있는 시뮬레이션X를 이용한 해석 모델을 제안한다.

2. 실험장치

수직 보상기는 파도에 의해 발생하는 시추선의 상하 운동이 드릴 비트로 전달되는 것을 보상하는 역할을 하는 것으로, 4개의 DSC실린더와 1개의 AHC실린더로 구성되어 있다. 본 논문에서는 실제 시추선에 설치되는 수직 보상기를 실물 크기 수직 보상기(full scale heave compensator)로 표기하며, 동일한 구조로서 크기기준 1/5 크기로 축소한 모델을 1/5 축소 수직 보상기(1/5 scale heave compensator)로 표기한다.

Fig. 1은 6축 스튜어트 플랫폼(steward platform)으로 구성되는 수직 보상기 성능시험장치 위에 본 연구에서 제작한 1/5 축소 수직 보상기가 설치되어 있는 것을 나타내고 있다.

실물 크기 수직 보상기의 설계사양을 검증하기 위해서는 실물 크기 수직 보상기를 제작하여야 하지만 제작비 및 성능시험장치 구축 등의 어려움으로 1/5 축소 수직 보상기를 설계, 제작하여 성능시험 하였다. 1/5 축소 수직 보상기는 실물 크기 수직 보상기와 동일한 구성으로 제작하였으며, 파도에 의한 상하운동은 스튜어트 플랫폼으로 재현하였다. 스튜어트 플랫폼은 1/5 축소 수직 보상기

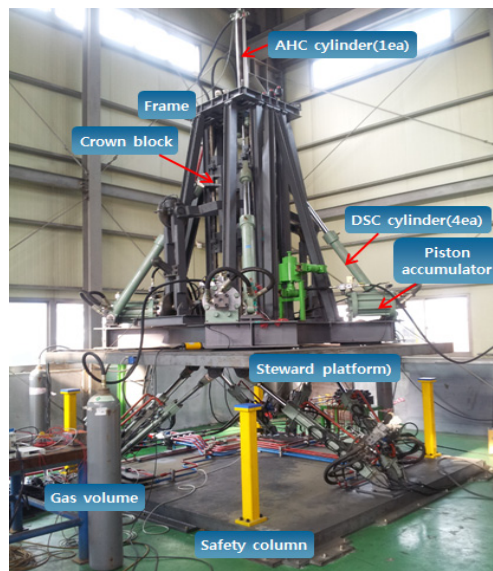


Fig. 1 Test rig for 1/5 scale compensator

에 대한 상하운동의 다양한 주파수와 진폭 크기를 임의로 조정할 수 있다.

Fig. 2는 수직 보상기의 DSC 및 AHC의 유공압 회로도이다. DSC의 동작은 그림에 나타난 바와 같이 질소가스관을 통하여 피스톤 어큐물레이터로 공급된 고압 질소가스가 피스톤 반대쪽의 유압을 생성한다. 이 유압은 DSC 실린더 램을 상승 운동 시킨다. 시추선에서는 고압 공기 또는 질소가스가 사용되고 있으며, 1/5 축소 수직 보상기에서는 질소가스를 사용하였다. DSC 실린더 램의 하강운동은 DSC 실린더 램의 끝단에 연결된 크라운 블록에 작용하는 시추 파이프 등의 자중에 의해 이루어진다. AHC는 능동적인 유압서보 제어회로로 구성하였다.

Fig. 3은 성능실험장치 변위측정 개념도이다. 스튜어트 플랫폼 가진 입력(B)에 대해 크라운 블록 변위(A+B)의 상관관계를 이용하여 성능평가를 수행하였다. 가장 이상적인 제어조건은 가진 입력(B)이 인가되는 상태에서 크라운 블록의 변위(A+B)가 일정 값을 유지하는 것이다. 실험에 사용된 변위센서는 레이저센서를 사용하였다.

3. 해석모델

3.1 1/5 축소 수직 보상기

1/5 축소 수직 보상기의 유공압 시스템에 대한 해석모델은 보상기 유공압 시스템의 각 기능 부품의 모델을 구성하고, 구성된 부품의 모델을 조합하여 모델링하였다. 유압부품 및 시스템의 모델링은 기본적으로 움직이는 물체를 통한 유체의 흐름을 구하는 것이기 때문에 운동방정식, 연속방정식, 오리피스 방정식에 필요한 설계변수는 다음 식과 같다.⁷⁾

$$\sum F = 0 \tag{1}$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\beta}{V} \sum Q \tag{2}$$

$$Q = C_d A_x \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \tag{3}$$

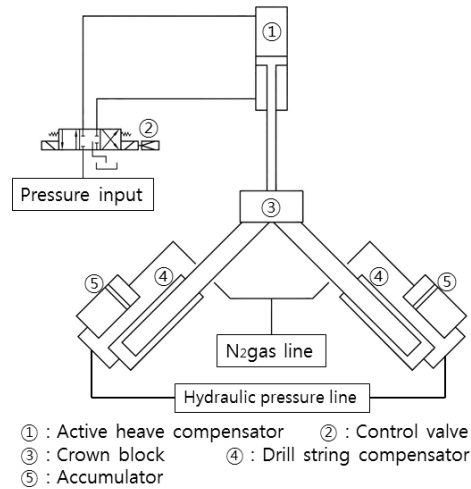


Fig. 2 Hydro-pneumatic circuit of heave compensator

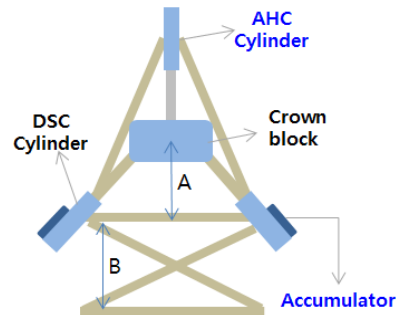


Fig. 3 Schematic of test rig to position measurement

Fig. 4는 스튜어트 플랫폼 위에 설치된 1/5 축소 수직 보상기에 대하여 시뮬레이션X를 이용하여 모델링한 해석모델이다. 스튜어트 플랫폼 동작모의는 실제 스튜어트 플랫폼 실험 데이터를 해석 모델 상에 반영하여 동일한 조건에서 비교할 수 있도록 구성하였다. 해석모델의 신뢰성 검증을 위해 성능시험결과와 해석결과를 비교분석하며, 스튜어트 플랫폼의 가진 입력조건은 성능시험 조건과 동일하게 설정하였으며, DSC 어큐물레이터 내의 가스 초기압력은 4 bar로 설정하였다.

시뮬레이션X를 이용한 수직 보상기의 해석모델

은 각 유공압부품의 파라미터 변화특성 분석 및 제어기 설계 등에 활용할 수 있다. 수직 보상기의 제어는 AHC 제어용 서보밸브를 제어함에 의해 수행된다. DSC 실린더 제어는 DSC용 어큐뮬레이터 내의 가스압력이 설정되면, DSC 실린더 내의 부하압력과 가스압력의 상호 완충작용에 의해 수동적으로 제어가 수행된다. 1/5 축소 수직 보상기의 AHC 제어기는 비례-미분 제어기를 사용하였으며, 제어기 전달함수는 다음 식과 같다.

$$G_c = K_p(1 + T_d s) \quad (4)$$

여기서 G_c 는 제어기 전달함수이며, K_p 는 비례 게인, T_d 는 미분 시간을 나타내고, s 는 라플라스 연산자이다. 본 연구에서 사용한 제어기 파라미터는 $K_p = 35$, $T_d = 0.005$ 이다.

3.2 실물 크기 수직 보상기

Fig. 5는 스튜어트 플랫폼 위에 설치된 실물 크기 수직 보상기에 대하여 시뮬레이션X를 이용하여 모델링한 해석모델이다. 스튜어트 플랫폼의 가진 입력은 사인(sine)파를 해석모델에 반영하여 비

교할 수 있도록 구성하였다. 주요 설계 파라미터의 경우 Table 1과 같이 전역변수 화하여 쉽게 설계변수를 변경하여 해석을 수행 할 수 있도록 해석모델을 개발하였다.

Table 1 Specifications of full scale heave compensator model

Parameter	Value	Unit
Oil initial volume	10	L
Initial gas pressure	11.5	MPa
Piston accumulator diameter	500	mm
Initial oil pressure	11.5	MPa
DSC cylinder inner diameter	500	mm
DSC cylinder rod diameter	350	mm
DSC cylinder max stroke	7600	mm
Damping coefficient	2000	kNs/m
Piston accumulator stroke	6850	mm
Additional gas volume	2250	L

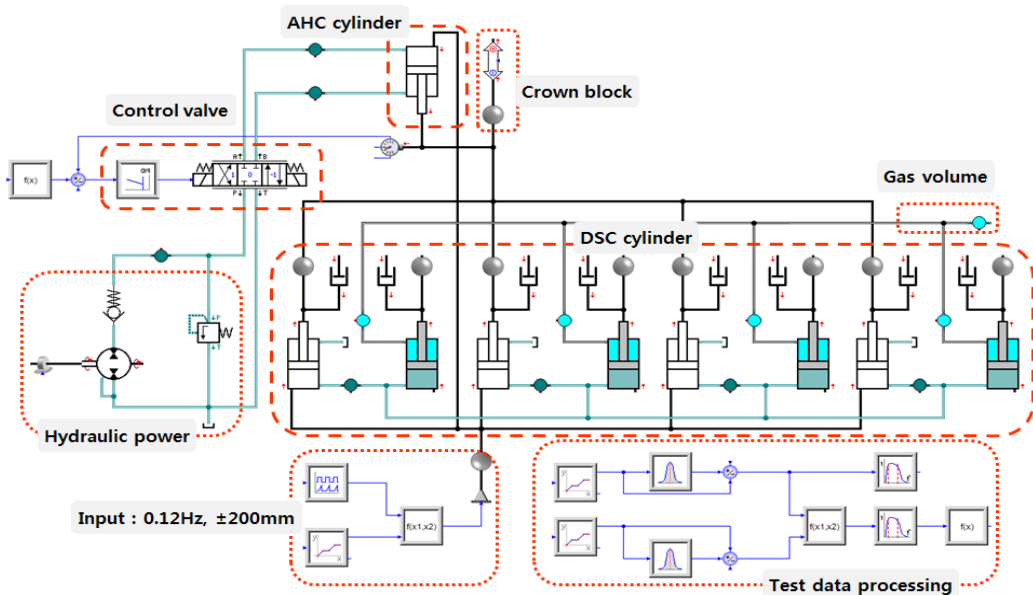


Fig. 4 Simulation model of 1/5 scale heave compensator and Stewart platform

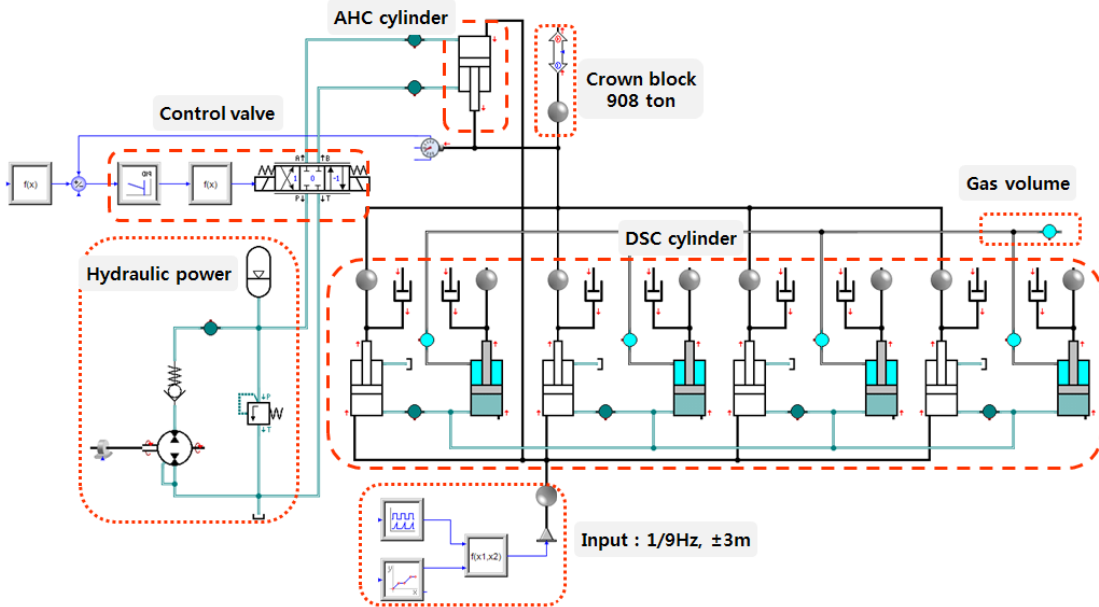


Fig. 5 Simulation model of full scale heave compensator and steward platform

4. 결과 및 고찰

4.1 1/5 축소 수직 보상기

Fig. 6은 스튜어트 플랫폼 위에 설치된 1/5 축소 수직 보상기에 대하여 스튜어트 플랫폼의 가진 입력 시험결과와 해석결과를 비교한 것이다. 스튜어트 플랫폼의 가진 입력 조건은 진폭 $\pm 200\text{mm}$, 주파수 0.12Hz 이다. 그림에서 테스트(test)는 스튜어트 플랫폼의 가진 입력 진폭의 실험결과이며, 시뮬레이션(simulation)은 시뮬레이션

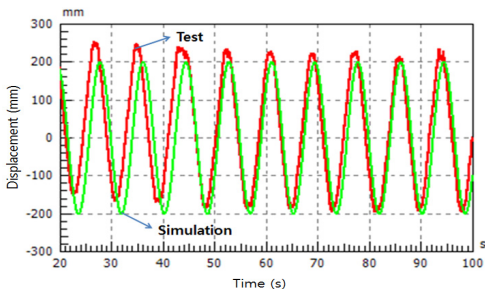


Fig. 6 Comparison of test and simulation for input signal of steward platform

X를 이용한 스튜어트 플랫폼의 가진 입력 진폭 해석결과를 나타내고 있다. 스튜어트 플랫폼이 정상상태에 도달하는 시간은 약 45초이며, 45초 이후에는 스튜어트 플랫폼에 인가되는 가진 입력의 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 스튜어트 플랫폼의 가진 입력 진폭이 $\pm 200\text{mm}$ 조건에서 스튜어트 플랫폼 위에 설치된 보상기가 최대진폭 $\pm 200\text{mm}$ 로 상하운동을 하는 상태에서 DSC 실린더 및 AHC 실린더의 제어에 의해 보상기의 크라운 블록 변위가 감소되는 현상을 나타내었다. 그림에서 테스트는 보상기의 크라운 블록 변위의 실험결과를 나타내고 있고, 시뮬레이션은 시뮬레이션X를 이용한 보상기의 크라운 블록 변위의 해석결과이다. 그림에서 크라운 블록 변위의 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 시뮬레이션X를 이용한 1/5 축소 수직 보상기의 해석모델 결과는 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다.

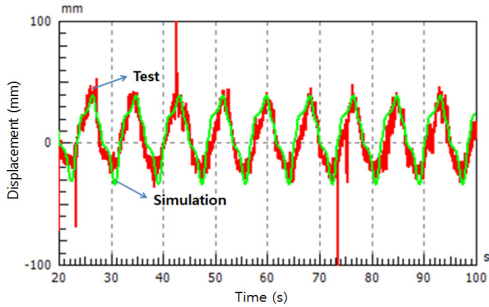


Fig. 7 Comparison of test and simulation for the displacement of crown block

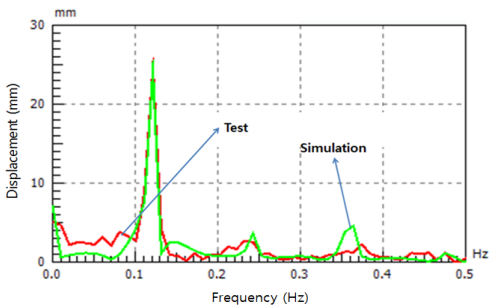


Fig. 8 Comparison of the displacement of crown block in test and simulation

Fig. 8은 Fig. 7의 실험결과와 해석결과에서 크라운 블록 변위 값을 구하기 위하여 주파수 특성을 분석하여 크라운 블록의 주파수에 따른 변위 값을 나타낸 것이다. 그림에서 테스트는 크라운 블록 변위의 실험결과를 주파수 분석한 변위 값을 나타내고 있고, 시뮬레이션은 크라운 블록 변위의 해석결과를 주파수 분석한 변위 값을 나타내고 있다. 약 0.12Hz 부근에서 최대 26mm의 변위를 나타내고 있으며, 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 1/5 축소 수직 보상기에 대하여 시뮬레이션 X를 이용한 해석모델의 해석결과는 실험결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였으며, 시뮬레이션 X를 이용한 해석모델의 신뢰성도 확인하였다.

4.2 실물 크기 수직 보상기 모델

Fig. 9는 1/5 축소 수직 보상기에 대하여 신뢰성이 확인된 시뮬레이션 X를 이용한 해석모델을

실물 크기 수직 보상기에 확장 적용하여, 스텐더트 플랫폼의 가진 입력 조건에 따라 스텐더트 플랫폼 위에 설치된 실물 크기 수직 보상기가 상하운동을 하는 상태에서 DSC 실린더 및 AHC 실린더의 제어에 의해 보상기의 크라운 블록 변위가 감소되는 현상의 해석결과를 나타내었다. 그림에서 입력(input)은 스텐더트 플랫폼의 상하운동 최대진폭 $\pm 3,000\text{mm}$, 주파수 $1/9\text{ Hz}$ 인 가진 입력에 대한 변위 변화의 해석결과를 나타내며, 크라운 블록은 실물 크기 수직 보상기의 크라운 블록 변위 변화의 해석결과를 나타내었다. 실물 크기 수직 보상기의 해석에는 크라운 블록에 최대부하 908ton이 인가되는 것으로 하여 해석하였다. 해석 결과에서는 스텐더트 플랫폼의 가진 입력상태 및 크라운 블록의 변위변화 등을 예측할 수 있으며, 실물 크기 수직 보상기의 최적 성능 확보가 가능함을 확인하였다.

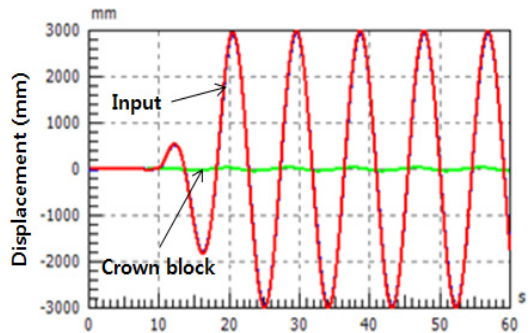


Fig. 9 Results of full scale compensator analysis

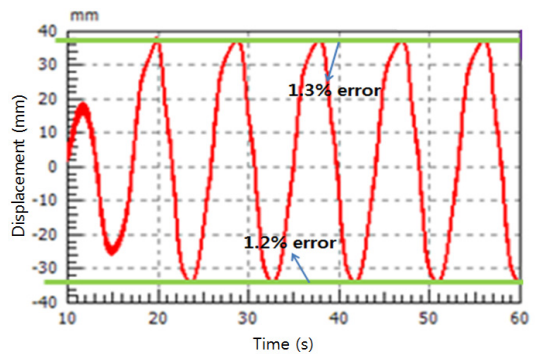


Fig. 10 Displacement of crown block for full scale heave compensator

Fig. 10은 Fig. 9의 해석결과에서 크라운 블록의 변위 변화만을 확대하여 나타낸 것이다. 스텔러트 플랫폼의 가진 입력 진폭 $\pm 3,000\text{mm}$ 에 대한 크라운 블록의 변위 변화는 $\pm 35\text{mm}$ 이하로 감소되어 보상 정확도 비율이 약 $\pm 98.7\%$ 임을 확인하였다. 본 연구에서 목표로 하는 보상 정확도 비율은 $\pm 95\%$ 이상이며, 보상 정확도 목표치를 만족하고 있음을 알 수 있다. 그림에 나타낸 오차(error)는 크라운 블록의 변위 변화와 가진 입력 진폭의 비를 나타낸 것으로 크라운 블록 변위 변화의 오차비율을 의미한다. 본 연구에서는 이 오차비율이 $\pm 5\%$ 이하가 되도록 실물 크기 수직 보상기를 설계하였으며, 오차비율 목표치를 만족하고 있음을 확인하였다.

5. 결 론

해양플랜트용 수직 보상기의 유공압시스템 설계를 위해 시뮬레이션X를 이용한 유공압해석모델을 개발하였으며, 1/5 축소 수직 보상기 실험장치를 구성하여 해석모델의 신뢰성을 검증하였다. 또한 검증된 해석모델을 확장하여 실물 크기 수직 보상기의 해석모델을 개발하고, 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 1/5 축소 수직 보상기에서 진폭 $\pm 200\text{mm}$, 주파수 0.12Hz 의 가진 입력 조건에 대한 실험결과와 해석결과는 비교적 잘 일치하였다.

(2) 스텔러트 플랫폼이 최대진폭 $\pm 200\text{mm}$, 주파수 0.12Hz 로 상하 운동하는 상태에서 크라운 블록의 변위 값은 26mm 로 감소됨을 확인하였으며, 실험결과와 해석결과는 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 따라서 1/5 축소 수직 보상기에 대하여 시뮬레이션X를 이용한 해석모델의 신뢰성을 확인하였다.

(3) 시뮬레이션X를 이용한 해석모델을 실물 크기 수직 보상기에 확장 적용하여 스텔러트 플랫폼의 가진 입력진폭 $\pm 3,000\text{mm}$ 에 대한 크라운 블록의 변위 변화는 $\pm 35\text{mm}$ 이하로 감소되어 보상 정확도 비율은 약 98.7% 임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업(No.10035350)의 지원을 받아 수행된 연구결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1. N. K. Ku, S. Ha and M. I. Roh, 2013, "Study on the Applicability of a New Multi-Body Dynamics Program Through the Application to the Heave Compensation System", COSEIK J. Comput. Struct. Eng., Vol. 26, No. 4, pp. 247-254
2. H. Jorgen, V. Steffen, T. Ilya, C. Martin, H. Geir and R. H. Michael, 2012, "The Effect of Friction in Passive and Active Heave Compensation of Crown Block Mounted Compensators", Proceedings of the 2012 IFAC Work shop, Norway, May 31~ June 1
3. S. J. Liu and L. J. Li, 2010, "Control Performance Simulation on Heave Compensation System of Deep-Sea Mining Based on Dynamic Vibration Absorber", ICDMA, International Conference, pp. 441-445
4. J. T. Hatleskog and M. W. Dunnigan, 2007, "Passive Compensator Load Variation for Deep-Water Drilling", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 593-602
5. S. H. Cho, 2013, "Modeling and Motion Control for Hydraulic Cylinder-Toggle Servomechanism", Korean Soc Fluid Power Constr Equip, Vol. 10, No. 3, pp. 21-26
6. Y. B. Lee, J. M. Ko and J. H. Park, 2008, "Study of The Cushion Characteristics in accordance with Shapes of Cushion Ring of Hydraulic Cylinder", Transactions of the Korea fluid power systems society, Vol. 5, No. 2, pp. 14-19
7. Y. B. Lee and Y. H. Yoon, 2013, "Modeling & Simulation of The Hydraulic Servo Actuator Cushion for Power Plant", KSTLE, Vol. 29, No. 1, pp. 7-12