

2중 실린더 구조를 갖는 인장 가스스프링의 마찰력 변화에 따른 피스톤 거동에 대한 연구

정남균
인하공업전문대학 기계과

A study on the behavior of the piston with varying friction force in the double cylinder-typed extension gas spring

Nam-Gyun Jeong

Division of Mechanical Engineering, Inha Technical College

요약 가스스프링은 가스가 압축될 때 가지게 되는 압력을 스프링과 같이 사용하는 형태로, 광범위한 산업분야에 사용되고 있고 그 수요 또한 증가하고 있다. 이 가스스프링은 압축 스프링과 인장 스프링으로 나눌 수 가 있는데, 압축 스프링과 달리 인장 스프링의 경우는 피스톤 속도 제어에 대한 연구가 많이 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 2중 실린더 구조를 갖는 인장 가스스프링에서의 압력 손실 계산을 통하여 피스톤 반발압력의 크기를 이론적으로 예측하였고, 피스톤과 실린더 사이의 마찰이 작은 경우와 큰 경우에 대하여 피스톤의 실제 거동을 모사해 보았다. 수치해석을 위해서는 유동해석분야에서 가장 널리 사용되고 있는 FLUENT를 이용하였고, 피스톤의 거동을 모사하기 위하여 FLUENT에서 제공하는 6-DOF 모델과 사용자정의함수(User Defined Function)를 사용하였다. 격자는 Layering 기법만으로도 Dynamic mesh가 성공적으로 구현되도록 피스톤 전후의 유동영역을 따로 분할하여 다른 형태의 격자를 생성하였다. 해석 결과 두 경우 다 최종적으로는 목표로 하는 속도로 피스톤이 복귀하는 결과를 보였으나, 최종 속도에 도달하는 과정에서 다른 차이를 보였다.

Abstract The function of gas springs is based on the compression of a gas. They are used in a wide variety of industries, and demand for them is increasing. Gas springs can be divided into compression and extension springs. Extension springs have not been studied much in relation to control of the piston speed, unlike compression springs. In this study, the magnitude of the piston rebound pressure was theoretically predicted by calculating the pressure loss in a double-cylinder extension gas spring. Numerical simulations of the piston behavior were carried out for small and large amounts of friction between the piston and the cylinder. FLUENT was used for the simulation with a 6-DOF model and UDF to simulate the behavior of the piston. The calculation regions of the front and rear of the piston were separated, and different types of grids were generated in the regions to implement a dynamic mesh using only a layering method. The results show that the piston returns with the target speed in both cases. However, the patterns of the piston behavior reaching the final speed are different.

Keywords : Double cylinder, Extension gas spring, Numerical simulation, Piston speed, Rebound pressure

1. 서론

스프링은 종류에 따라 코일스프링, 고무스프링, 팽스

프링, 가스스프링 등으로 구분할 수 있는데, 그중에서 가스스프링은 밀폐된 실린더에 고압의 가스를 주입하여 가스의 압력으로부터 반발력을 얻어 스프링으로 사용하는

본 논문은 한국산업단지공단 과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Nam-Gyun Jeong(Inha Technical College)

Tel: +82-10-7433-7210 email: nkjung@inhac.ac.kr

Received November 13, 2017

Revised December 22, 2017

Accepted February 2, 2018

Published February 28, 2018

형태로, 작은 사이즈로 큰 반발력을 얻을 수 있고 긴 행정에 걸쳐 거의 일정하게 반발력을 유지할 수 있다는 장점이 있다. 또한 사용 목적에 따라 다양한 설계가 가능하기 때문에 전반적인 산업분야에서 광범위하게 이용할 수 있다[1,2]. 뿐만 아니라 차량의 트렁크 및 본 네트 등에도 유용하게 사용되는 가스스프링은 최근 자동차의 급격한 수요 증가와 더불어 그 사용량이 날이 증가하고 있다[3].

가스스프링은 외부에서 힘을 가했을 때 압축되었다가 가스의 반발력으로 다시 복귀가 되는 압축 가스스프링과 이와 반대로 외력에 의해 인장된 상태의 피스톤이 외력이 제거 되었을 때 원상태로 복귀하게 되는 인장 가스스프링으로 나뉘게 되는데, 피스톤의 복귀 속도가 너무 빠르게 되면 가스스프링의 원활한 작동뿐만 아니라 안전에 문제가 발생할 수 있어 속도 제어 구현에 대한 연구 및 노력이 지속적으로 이루어지고 있다[4]. 그러나 대부분의 연구가 압축 가스스프링에 한정되어 있고, 인장 가스스프링의 경우는 속도제어와 관련된 기술을 찾아보기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 복귀 시 속도제어가 가능하도록 2종의 실린더 구조를 갖는 인장스프링을 제작했을 때, 피스톤의 복귀 속도가 원하는 목표치 이하가 되도록, 피스톤과 내부 실린더 사이의 마찰력에 따른 가스 압을 이론적으로 계산하고 피스톤 거동에 대한 전산해석을 통하여 결과를 확인하였다.

2. 본론

2.1 피스톤 반발압력 계산

인장 가스스프링의 피스톤 속도 제어는 피스톤이 인장된 후 복귀 되는 속도에 대하여 이루어진다. 피스톤이 복귀하는 동안에는 안쪽 실린더와 바깥쪽 실린더 사이 공간에 가압되어 있던 질소 가스가 피스톤의 로드(Rod)와 안쪽 실린더 사이의 틈새를 통하여 안쪽 실린더 내부로 유입되게 되는데, Fig. 1에서와 같이 대직경을 갖는 홀에는 볼타입의 체크밸브가 설치되어 가스가 통과하지 못하고, 소직경의 오리피스만을 통과하여 안쪽 실린더로 유입된다. 이때 유입된 질소가스의 압력으로 발생한 반발력으로 피스톤의 복귀 운동이 진행되게 된다.

바깥 실린더와 안쪽 실린더 사이에 압축되어진 질소 가스의 압력(반발압력)을 P_0 라 하고 피스톤로드 쪽의

압력을 P_R 이라고 하면, 질소가스가 소직경의 오리피스를 통과하여 흐르게 될 경우 P_R 은 식(1)과 같다.

$$P_R = P_0 - \sum_i \frac{1}{2} \rho K_i V_i^2 \quad (1)$$

여기서 K_i 는 질소가스가 안쪽실린더로 흐르면서 통과하게 되는 각 압력 손실부(Fig. 2)에서의 손실 계수이고, V_i 는 각 압력 손실부에서 가스의 평균유속을 나타낸다.

P_R 에 의하여 피스톤이 복귀하는 속도를 V_f 라 하고, 각 압력 손실부에서의 유통면적과 피스톤로드 쪽에서 바라본 피스톤의 면적을 각각 A_i , A_R 이라고 하면 식(1)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서 사용된 K_i 와 C_i 는 표1에 나타내었다.

$$P_R = P_0 - \sum_i \frac{1}{2} \rho K_i C_i^2 V_f^2, (C_i = A_R/A_i) \quad (2)$$

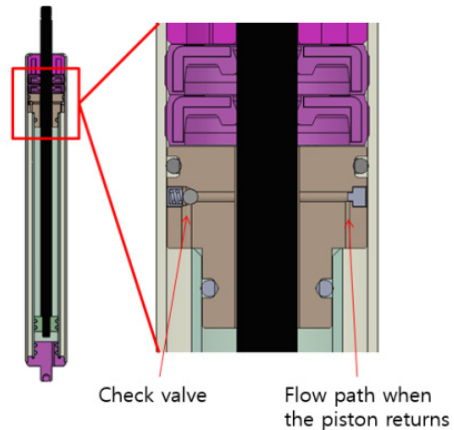


Fig. 1. Schematic diagram of extension gas spring

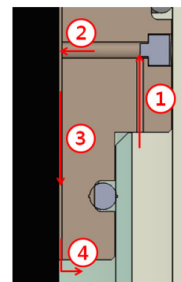


Fig. 2. Major regions where pressure loss occurs

Table 1. Calculation conditions

Position	#1	#2	#3	#4
K	1.5	1	1.96	1
C	1056.3	169.0	332.0	332.0

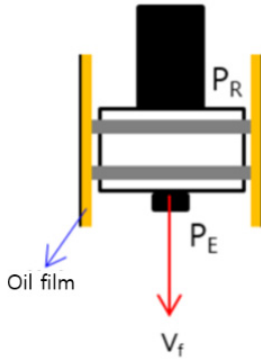


Fig. 3. Schematic diagram of piston and inner cylinder

Fig. 3과 같이 피스톤이 복귀하는 과정에 있을 때 피스톤과 안쪽 실린더사이에서 발생하는 마찰력을 F_s 라고 하면, 피스톤 주위에 가해지는 힘의 평형 방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum F = P_R A_R - P_E A_E + W - F_s = 0 \quad (3)$$

여기서 P_E 와 P_R 는 각각 피스톤 끝단과 로드 쪽에서의 압력을 나타내며, A_E 와 A_R 은 피스톤 끝단과 로드 쪽에서 가스의 압력을 받게 되는 면적을 나타낸다. 그리고 W 는 피스톤 구조물 중량의 복귀 방향 성분이다.

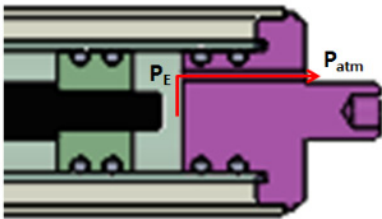


Fig. 4. Schematic diagram of piston and inner cylinder

P_E 는 복귀하는 피스톤에 밀린 공기가 가스스프링 바깥으로 빠져나가면서 발생하는 압력손실과 외부대기압의 합으로 계산될 수 있는데, 압력손실은 Fig. 4와 같이 안쪽 실린더 내부의 공기가 실린더 캡(cap)을 관통하는 홀 안쪽으로 유입될 때, 홀을 통과할 때, 그리고 외부로

분출될 때의 손실로 나눌 수가 있다. 이 세 경우에 대한 손실계수를 모두 더하면 $K = 1.9$ 이고, 유효면적 비 $C = 33.8$ 를 고려하면 P_E 는 600Pag로 계산된다.

피스톤과 안쪽 실린더의 상대운동으로 발생하는 윤활유의 거동은 윤활막의 두께가 실린더 직경 대비 매우 작기 때문에 두 평판 사이에서의 유체 거동으로 근사할 수 있고, 마찰력 F_s 는 식(4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$F_s = A_s \mu \frac{du}{dy} = A_s \mu \frac{V_f}{\delta} \quad (4)$$

여기서 A_s 는 유효단면적, μ 는 윤활제의 점성계수, 그리고 δ 는 윤활막의 두께이다.

식(1)-(4)를 이용하여 가스스프링 내부 구조 및 유로 설계에 따른 피스톤의 복귀 속도와 반발압력간의 상관관계를 정리하면 피스톤에 작용하는 반발 압력을 계산할 수 있게 된다.

피스톤이 복귀되면서 가스의 부피가 증가하면, 가스 로인한 반발압력이 감소하게 되는데 피스톤이 복귀가 끝난 시점의 반발압력 $P_{0,f}$ 는 초기 반발압력 $P_{0,i}$ 와 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$P_{0,f} = \frac{v_2}{v_1 + v_2} P_{0,i} \quad (5)$$

여기서 v_1 은 안쪽 실린더 내부 공간 체적이고, v_2 는 두 실린더 사이 공간의 체적이다.

식(5)를 이용하여 계산된 반발 압력 $P_{0,f}$ 가 가스스프링 조립 후 주입되는 질소가스의 압력이 된다.

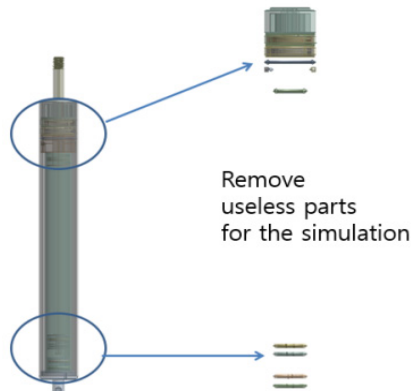


Fig. 5. 3D modeling for all parts of gas spring

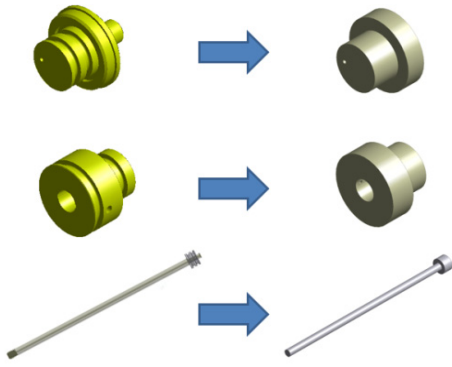


Fig. 6. Simplification for geometries of major parts



Fig. 7. Fluid domain for the calculation

2.2 형상단순화 및 격자생성

가스스프링 내부의 유동해석에서는 Fig. 5와 같이 실제 가스스프링을 설계하기 위한 모든 부품의 3차원 모델링 데이터가 불필요하다. 따라서 유동해석 수행을 위한 전처리 과정 중의 하나로 해석에 불필요한 부품을 제거하고 주요 부품에 대해서 Fig. 6과 같이 형상을 단순화하였다. 가스스프링 내부의 가스 유동해석에서 고체에 해당되는 부분은 해석 영역에 포함할 필요가 없기 때문에 앞에서 수행한 주요 부품들의 모델링 단순화작업을 이용하여 Fig. 7과 같이 해석에 필요한 유동영역을 추출하였다.

유동해석은 해석을 위한 격자를 어떻게 구성하느냐에 따라서 해석의 성공 여부 및 결과의 정확도가 크게 좌우하게 된다. 가스스프링의 피스톤거동을 모사하기 위해서는 피스톤의 움직임에 따라 피스톤의 경계를 나타내는 벽면이 이동해야 되고, 이러한 경계면 이동으로 인한 내부 공간의 변형이 수반되어야 하므로, Fig. 8과 같이 공간 변형에 따른 격자의 재생성이 유리하도록 피스톤 전후의 유동영역을 따로 분할하여 피스톤 주변의 공간에는

Hexahedral 격자를, 그 외에 복잡한 유로가 존재하는 부분은 Tetrahedral 격자를 사용하여 격자를 구성하였다.

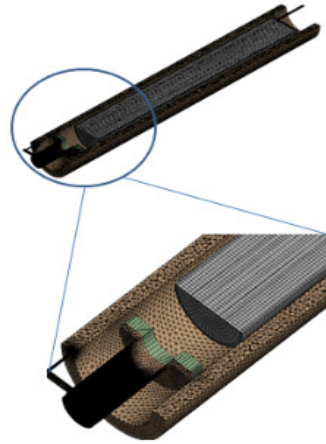


Fig. 8. Grid system for the calculation

2.3 피스톤 거동 모사

가스스프링에 대한 시뮬레이션에서 피스톤의 운동을 실제와 같이 모사하기 위해서는 피스톤의 이동 속도를 일정하게 가정하지 않고, 식(6)와 같이 피스톤에 작용하는 외력 및 마찰력에 의해 피스톤의 운동이 결정되게 해야 한다.

$$V^n = V^{n-1} + (F_E^n + F_S^n) \frac{dt}{m} \quad (6)$$

V^n : n 번째 time step에서의 피스톤 속도

F_E^n : n 번째 time step에서 피스톤에 가해지는 외력

F_S^n : n 번째 time step에서 피스톤에 가해지는 마찰력

m : 피스톤 및 피스톤-Rod 질량의 합

dt : time step

전산유동해석으로 가장 일반적으로 사용되고 있는 ANSYS-FLUENT에서는 피스톤의 거동 모사와 같이 경계 변위 모델링이 필요한 해석에 대하여 Dynamic Mesh Model을 제공하고 있는데, Dynamic Mesh Model에서 제공하는 경계 변위 모델링은 다음과 같다[5].

- In-cylinder 모델 : 차량엔진 등의 피스톤 운동 구현 등에 사용
- 6-DOF 모델 : 질량 및 관성 모멘트 설정을 통해, 경계면에 작용하는 외력과 유체의 점성저항 등에

이해 경계면의 변위가 결정되는 경우에 적용

- User Defined Function(사용자 정의 함수) 모델 : 사용자가 별도의 함수를 이용하여 경계면의 변위를 입력하는 모델

위에서 언급한 모델링 중, 본 연구에서는 피스톤의 변위가 피스톤에 가해지는 외력과 내부 유체가 피스톤에 작용하는 힘의 관계에 따라 결정되므로 6-DOF 모델과 더불어 User Defined Function 모델을 같이 사용하였다.

ANSYS-FLUENT의 Dynamic Mesh Model은 시간의 변화에 따른 경계면의 변화를 모델링하는 기법으로 경계면 부근의 격자 형상 또한 변하기 때문에 격자의 수정 및 재생성이 필요한데, ANSYS-FLUENT에서는 경계면 변화에 따른 격자 수정에 대하여 Smoothing Method 및 Dynamic Layering Method를 이용하거나 격자를 재생성하는 Remeshing Method를 이용하여 조절하게 된다. 본 과제에서는 격자의 재생성이 유리하도록 피스톤 전후의 유동영역을 따로 분할하였기 때문에 Layering 기법만으로도 Dynamic mesh가 성공적으로 구현될 수가 있었다.

2.4 해석결과

피스톤과 안쪽 실린더사이의 마찰력이 매우 작을 경우에 대한 피스톤 거동을 예측하기 위해서 마찰력을 복귀속도가 0.2m/s인 경우 6.5kg_f가 되도록 설정하여 해석을 수행하였다. 초기 반발압력은 식(1)~(4)에 의해서 111323Pa_g로 계산된다. Fig. 9는 시간에 따른 피스톤의 위치와 가스 스프링 내부의 질소 및 공기의 유동을 나타낸 것이다.

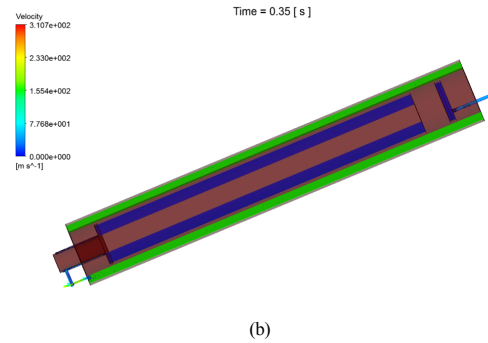


Fig. 9. Pressure and velocity distribution in the gas spring (Fs=6.5kgf) (a)t=0.08sec (b)t=0.35sec

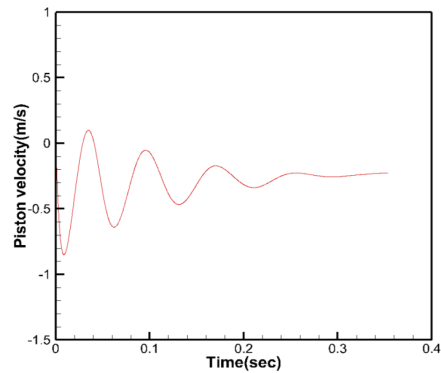
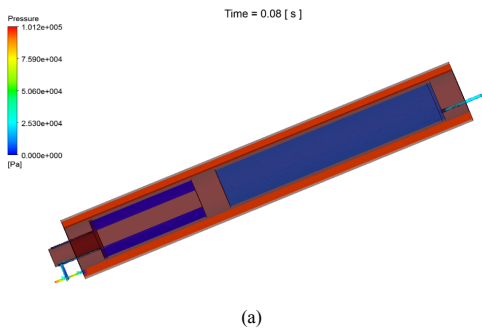


Fig. 10. Piston returning velocity along the time (Fs=6.5kgf)

Fig. 10에는 시간에 따른 피스톤의 속도를 그래프로 나타내었다. 피스톤이 초반에 진동하다가 점차로 0.2m/s 정도의 속도로 운동하게 되는데, 초반에 피스톤이 진동하게 되는 이유는 피스톤과 실린더사이의 마찰력을 너무 작게 가정했기 때문으로 판단된다.

피스톤과 실린더 사이의 마찰력이 피스톤 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 복귀속도가 0.2m/s인 경우 마찰력이 65kg_f가 되도록 변경하여 다시 해석을 수행하였다. 실린더 내부의 초기 반발압력은 식(1)~(4)에 의해서 681280Pa_g로 계산된다. Fig. 11에 가스스프링 내부의 유동에 대한 결과를 나타내었다.

Fig. 12에 나타낸 시간에 따른 피스톤 속도에 대한 결과를 보면, 초기에 반발압력에 의해 빠른 속도로 복귀하던 피스톤이 마찰로 인해 아주 짧은 시간 안에 속도가 0.2m/s정도로 줄어들게 되고 이후로는 점차 감소하게 되는 것을 알 수 있다.



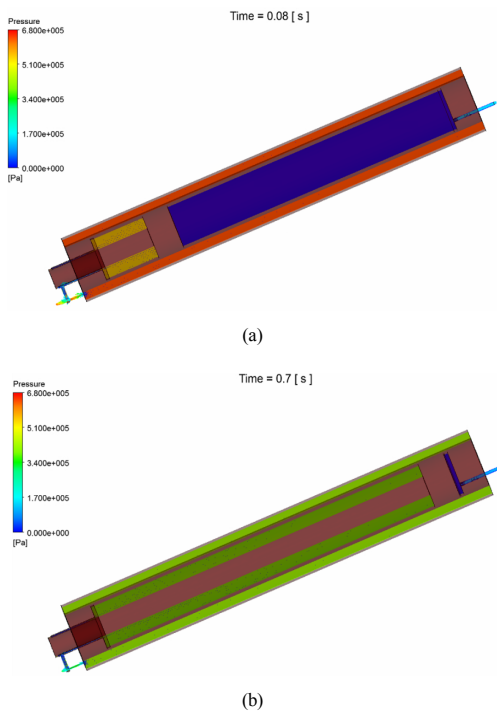


Fig. 11. Pressure and velocity distribution in the gas spring ($F_s=65\text{kgf}$)
(a) $t=0.08\text{sec}$ (b) $t=0.7\text{sec}$

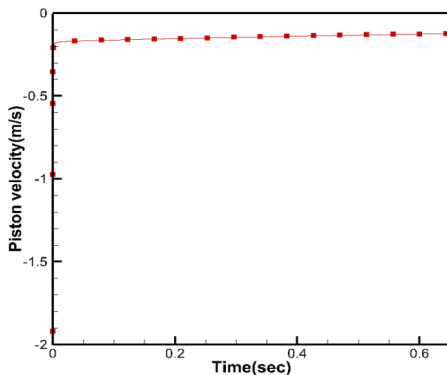


Fig. 12. Piston returning velocity along the time ($F_s=65\text{kgf}$)

3. 결론

본 연구에서는 2중 실린더 구조를 갖는 인장 가스스프링 내에서의 피스톤 거동을 전산유체해석을 통하여 예측해 보았다. 가스스프링 내에서 발생하는 압력 손실 계

산을 통하여 피스톤 반발압력의 크기를 이론적으로 예측하였고, 계산된 반발압력을 이용하여 피스톤의 실제 거동을 모사하였다. 해석 결과 두 경우 모두 최종적으로는 목표로 하는 속도로 피스톤이 복귀하는 결과를 보였으나, 최종 속도에 도달하는 과정에서 다른 차이를 보였다. 마찰력을 작게 가정한 경우는 피스톤 복귀과정 초반에 피스톤이 진동하는 모습을 볼 수 있었으며, 크게 가정한 경우는 진동하는 양상 없이 복귀가 시작되자마자 목표 값에 가까워졌다가 점차로 감소하였다.

References

- [1] I. S. Han, K. J. Choi, J. Y. Kim, Y. B. Lee, " The numerical analysis and experimental verification of the heat transfer effect on the highly pressured gas spring", *Trans. KSAE.*, vol. 21, no. 2, pp. 87-97, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7745>
- [2] S. K. Lim, C. H. Lee, I. Hwang, H. W. Kang, S. J. Park, "Design of high frequency casting machine for dental", *Proceedings of KSMTE Spring Meeting*, pp. 264-265, 2011.
- [3] C. W. Park, H. Y. Kim, "A study on the auto-mobile gas spring structural analysis using of bimetal", *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 131-137, 2013.
DOI: <https://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.1.131>
- [4] J. I. Lee, "A potimized structural design of piston on moving in gas spring elevation working", *J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc.*, vol. 16, no. 12, pp. 8274-8283, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8274>
- [5] ANSYS Inc., "ANSYS FLUENT User's Guide"

정 남 균(Nam-Gyun Jeong)

[정회원]



- 2001년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2010년 10월 : 삼성전자 책임연구원
- 2010년 11월 ~ 2015년 2월 : 한국원자력연구원 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과교수

<관심분야>

전산유체역학, 다상유동