

천연 냉매용 압력제어밸브의 유동특성 평가

강효림*, 박형준*, 김가은*, 한승호*[#]

*동아대학교 기계공학과

The Flow Characteristics of Pressure Control Valves for Natural Refrigerants

Hyo-Lim Kang*, Hyung-Joon Park*, Ga-Eun Kim*, Seung-Ho Han*[#]

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

(Received 10 January 2020; received in revised form 15 January 2020; accepted 9 February 2020)

ABSTRACT

Research into natural refrigerants that use CO₂, instead of chlorofluorocarbons and hydrofluorocarbons, has increased due to the environmental problems caused by ozone depletion. CO₂ refrigerants are more environmentally friendly than conventional refrigerants because they have better latent heat of evaporation and heat transfer efficiency properties. However, they have very low critical temperatures and require high design pressures; therefore, pressure control valves, which reduce the pressure of the CO₂ refrigerant to a safe level and apply it to the refrigerant air conditioning system, are necessary to secure stability against high pressure. In the present study, we evaluated the flow characteristics and valve performance of the pressure control valve using a CO₂ refrigerant by measuring the pressure, velocity, and flow coefficient. In addition, we examined the applied forces caused by the internal pressure from the highly pressurized CO₂ refrigerant and required thrust characteristics.

Key Words : Natural Refrigerant(천연냉매), Pressure Control Valve(압력제어밸브), Flow Characteristics(유동특성), Thrust Characteristics(추력특성)

1. 서 론

심각한 오존층 파괴로 인해 세계는 1985년 비엔나 협약을 시작으로 대체 냉매 물질 개발에 주목하고 있다. CFC(Chloro-Fluoro-Carbon) 냉매계는 1995년 말부터 선진국에 의해 이미 전폐 되었고, 염소를 포함하지 않는 HFC(Hydro-Fluoro-Carbon) 냉매계가 대체 냉매로 사용되어 지고 있다. 하지

만 HFC계 냉매는 오존층 파괴에 영향을 미치지 않지만 지구 온난화에 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 대체 냉매제로 사용하기에 무리가 있다^[1-4]. 따라서 자연계에 존재하면서 생태계에 영향을 미치지 않는 천연 냉매에 대한 연구가 급격하게 진행되고 있는 추세이며, 이 중에서 안정된 화학적 성질을 가지는 이산화탄소가 세계적으로 주목받고 있다^[1]. 이산화탄소 냉매는 증발 잠열이 크고, 우수한 전열 효율을 가지고 있다. 하지만 기존 HFC계 냉매에 비해 포화 압력이 매우 높고 임계 온도가 매우 낮다. 그리고 기존의 냉매에 비해 설계

Corresponding Author : shhan85@donga.ac.kr
Tel: +82-51-200-7655, Fax: +82-51-200-7656

압력이 4배 정도 높아 고압에 의한 안전성 확보가 매우 중요하다. 따라서 천연 냉매를 사용하는 냉매 공조 시스템에서 압력제어밸브는 안전을 위한 필수적인 부품이다.

김옥중 등^[2]은 CO₂ 냉매 적용을 목적으로 개발되고 있는 전자팽창밸브의 기본 설계를 위하여 수행한 유동과 구조 해석 및 시제품으로 제작한 밸브의 개도에 따른 유량, 내압 특성 등을 실험적으로 고찰하였다. 최지아 등^[3]은 냉동 공조 설비에서 사용 가능한 밸브에 파일럿 유닛을 조합하여 여러 가지 기능으로 사용 가능한 CO₂ 냉매용 파일럿 조작식 제어밸브 시스템의 해석 모델을 개발하고 동작 모드별 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 대상체인 제어밸브에서 차압이 2 bar로 일정하게 유지된다는 것을 확인하였다. 김보현 등^[4]은 CO₂ 냉매용 제어밸브의 메인 피스톤 거동에 대한 모델링을 수행하고 부하압력 하에서 피드백 챔버 입구 및 출구 유로의 크기와 밸브의 평형 압력 변화가 메인 피스톤의 응답에 미치는 영향을 분석하였다.

상기 연구 사례에서 CO₂ 냉매를 이용한 파일럿 타입의 제어밸브에 대한 유동특성이나 응답특성에 관한 연구는 진행되었으나, 일반적으로 압력제어용 글로브 밸브를 이용한 밸브 내부의 유동 및 추력 특성에 관한 연구는 부족한 상황이다. 특히, 김보현 등^[4]은 CO₂ 냉매용 글로브 밸브 형태의 압력제어밸브에 대한 연구를 진행했지만, 압력변화가 메인 피스톤 응답에 미치는 영향에만 주목하여 밸브 성능에 대한 고찰은 부족한 것으로 보인다.

본 연구에서는 CO₂ 냉매용 압력제어밸브를 대상으로 전산유체해석을 진행하였으며, 밸브 내부의 압력, 속도 및 유량계수 등을 고려한 유동특성을 분석하였다. 아울러, 밸브 내부의 압력으로 각 부품에서 발생하는 작용력의 경향성을 확인하고, 이를 이용하여 압력제어밸브에서 요구되는 추력특성을 고찰했다.

2. 압력제어밸브의 유동특성

2.1 수치해석모델 및 경계조건

본 연구의 대상체 로 적용된 밸브는 2인치 배관

Table 1 Mechanical properties of SUS316

Density (kgf/mm ³)	E (GPa)	UTS (MPa)	Poisson's Ratio
7.87	190	480	0.265

Table 2 Operating conditions of pressure control valve

Opening rate(%)	Flow Coefficient(gpm)	Pressure(kPa)	
		Inlet	Outlet
100	140	27	20
50	70		
10	40		

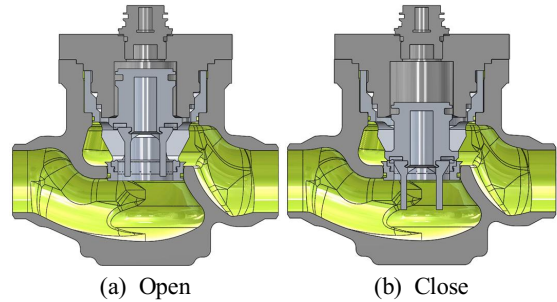


Fig. 1 Configuration of pressure control valve

의 유량 제어를 위한 행정거리 20mm의 글로브 밸브 형태를 갖는 압력제어밸브이다. 사용소재는 SUS316이며, 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 1은 밸브의 개방 및 폐쇄 상태의 단면도이다. 유체는 밸브 좌측에서 유입되어 밸브 몸체를 지나 우측 출구로 유출된다. 이때, 밸브의 플러그가 상하로 움직이며 유체가 통과하는 단면적을 변화시켜 유량을 조절한다. Table 2는 CO₂ 냉매용 압력제어밸브의 작동조건이며 플러그의 행정거리에 따른 세 가지 작동 조건으로 10% 개방(2mm), 50% 개방(10mm) 그리고 100%개방(20mm)으로 나누어지며, 각각에 대하여 CV(Flow Coefficient)값을 표기하였다.

밸브 내부의 압력, 속도 그리고 유량 등을 고려한 유동특성을 산출하기 위하여 상용해석 소프트웨어인 ANSYS CFX^[5]를 이용하였고, 밸브 내 정상상태 비압축성 유동특성을 수치적으로 예측하였다. 또한 밸브 내부 유동특성에 의해 발생하는 난류 유

동특성을 예측하기 위해 유동해석시 비교적 수렴성이 좋다고 알려진 SST⁶⁾ 난류 모델을 사용하였다.

2.2 해석 결과 및 분석

Fig. 2는 플러그 행정거리 개방에 따른 밸브 내부 압력분포의 결과이다. 행정거리 20mm가 모두 개방된 100% 개방률 조건에서 입구와 출구의 압력은 각각 28.59kPa 및 20.97kPa로 7.62kPa의 차압이 발생하였으며, 10mm 및 2mm가 개방된 개방률

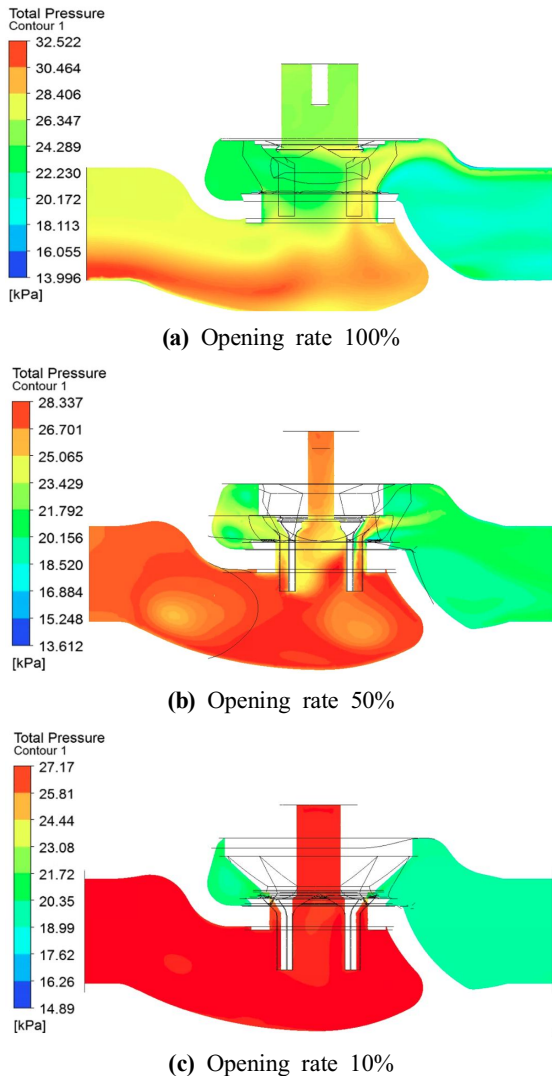


Fig. 2 Pressure drops regarding to opening rates

Table 3 Formulas for calculating forces applied in value

Packing Force	$F_{pack} = S \cdot D_s \cdot l_{pack} \cdot f \cdot Y$
Piston Force	$F_P = P_B \cdot A_s$
Disk Body/Cage Friction Force	$F_{DF} = 0.09 \cdot \Delta P \cdot A \cdot L \cdot OD_{SEAT}$
Differential Pressure Force	$F_{DP} = P_{plug} \cdot A_{diff}$
Sealing Force	$F_{SL} = (0.0667 \cdot P_{up} + 100) \cdot \pi \cdot B_{MS}$

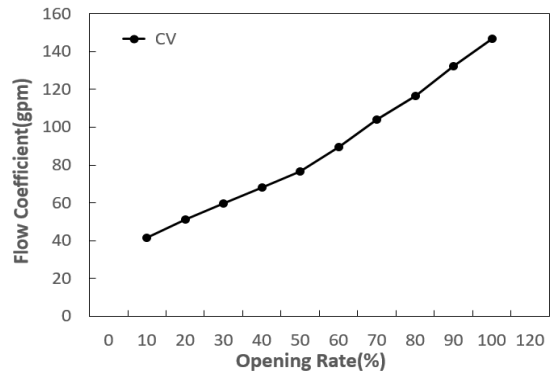


Fig. 3 Change of flow rates regarding to opening rates

50%와 10%에서는 차압이 7.32kPa 및 7.26kPa로 CO₂ 냉매용 압력제어밸브의 운용조건에서 제시한 차압성능 7kPa를 모두 만족하였다. 요구되는 차압성능에서 플러그 행정거리 개방률에 따른 유량계수를 확인하기 위하여 입구 및 출구에 요구되는 차압인 7kPa를 부여하고 전산 유동해석을 수행하였다. 이때, 차압에 따라 밸브를 통과하는 유량을 일반화하기 위해 일반적으로 사용되는 식(1)과 같은 유량계수(C_v) 식을 이용하였다. C_v 는 기준 압력 하에서 밸브를 통과하는 유량이며, 밸브에 따른 고유 특성을 나타낸다.

$$C_v = Q \sqrt{\frac{SG}{\Delta P}} \quad (1)$$

여기서, Q 는 유량(kg/s), SG 는 비중, ΔP 는 입출구 차압(kPa)이다.

유량 Q 는 다음과 같이 계산하였다.

$$Q = \rho \cdot V \cdot A \quad (2)$$

여기서, ρ 는 작동 유체의 밀도로서 1.976g/l이고, A 는 출구 단면적으로 $2.16 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 이다. 작동 유체의 속도 V 는 유동 해석으로 계산되며, 개방률에 따라 각각 19.14m/s(100%), 16.19m/s(50%) 그리고 10.21m/s(10%)로 얻어진다. 식(2)로 얻어진 유량 Q 를 이용하여 개방률을 10% 별로 식(1)의 유량계수를 나타낸 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 상기의 해석 결과를 통해 제어밸브 운용조건에서 제시한 유량 조건과 일치함을 보였고 밸브의 개방률이 커짐에 따라 유량계수 또한 이에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

- 기호설명 -

- C_v : 유량계수
- Q : 유량(kg/s)
- ρ : 작동유체 밀도(g/l)
- V : 유체속도(m/s)
- A : 출구단면적(m^2)
- SG : 비중
- ΔP : 입출구 차압(kPa)
- F_{pack} : 패킹힘(lbf)
- S : 직경방향 패킹응력(psi)
- D_s : 스템직경(in)
- l_{pack} : 패킹높이(in)
- fY : 패킹 마찰계수
- F_p : 피스톤힘(lbf)
- P_B : 본넷 압력(psi)
- A_s : 스템 단면적(m^2)
- F_{DF} : 디스크 몸체/케이징 마찰힘(lbf)
- L : 밸브 행정거리(in)
- OD_{SEAT} : 시트 외경(in)
- F_{DP} : 차압힘(lbf)
- P_{plug} : 구동부 상류 압력(psi)
- A_{diff} : 구동부 상하부 면적차이(m^2)
- F_{SL} : 밀봉힘(lbf)
- P_{up} : 밸브 상류 압력(psi)
- B_{MS} : 몸체 평균 접촉 직경(in)

3. 압력제어밸브의 추력특성

3.1 밸브 내부의 작용력

글로브 밸브 내부에서 발생하는 작용력은 패킹, 피스톤, 유동에 의한 차압, 밀봉 그리고 디스크-몸체/케이징의 마찰에 의하여 나타난다. 본 연구에서는 미국의 ASME B31.5^[7]에 따른 유동차단 및 기능입증 표준 규격을 고려하여 해석을 수행하였고, 이를 통해 밸브 내에 발생하는 작용력을 계산하였다. 그리고 유동해석시 입, 출구단의 유동 안정화를 위해 입구 및 출구단의 배관 길이는 배관 직경의 각각 20배 및 16배로 가정하여 모델링하였다.

작용력은 입출구단의 차압이 1psi일 때 얻어지는 값이며, 행정거리 개방별로 밸브 내부에 발생하는 작용력은 차압력 F_{DP} , 패킹력 F_{pack} , 피스톤력 F_p , 디스크 몸체/케이징 마찰력 F_{DF} 그리고 밀봉력 F_{SL} 과 같고 이의 계산식을 Table 3에 정리하였다. ASME B31.5^[7]에서 힘을 파운드 단위로 나타내었기 때문에, 본 연구의 밸브 내에 발생하는 작용력을 파운드 단위로 계산하였다. Fig. 4~8은 플러그 행정거리 개방률에 따른 밸브 내부 작용력의 계산 결과로서, 이와 유사한 글로브 밸브의 추력 특성 연구를 진행한 김재형 등^[8]의 연구결과와 비교하여 같이 나타내었다. 밸브의 작용력이 김재형 등^[8]의 논문과 비슷한 경향성을 보였으며, 이는 유동차단 및 기능입증 시험에 일어나는 현상과 동일함을 확인했다.

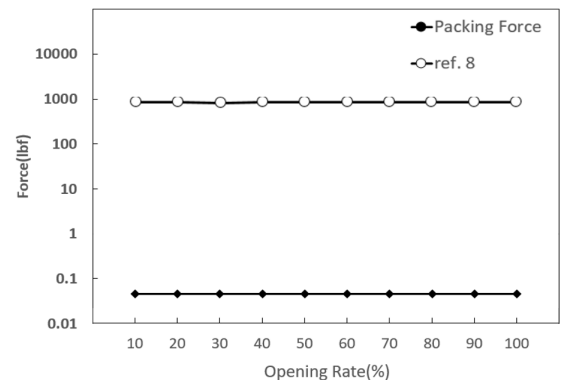


Fig. 4 Packing force regarding to opening rate

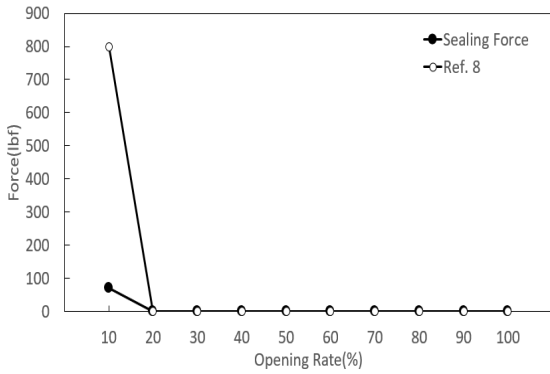


Fig. 5 Sealing force regarding to opening rates

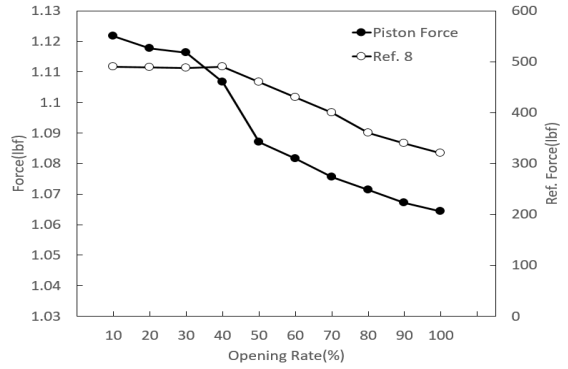


Fig. 8 Piston force regarding to opening rates

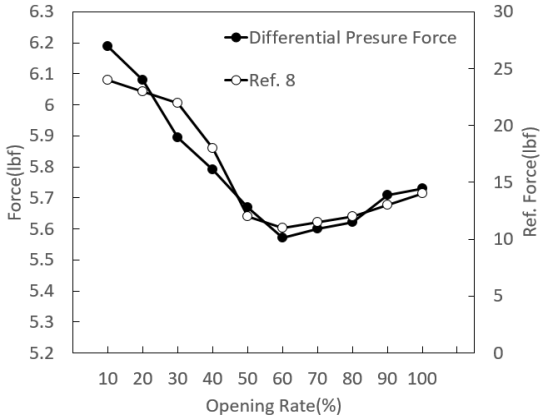


Fig. 6 Differential pressure force regarding to opening rates

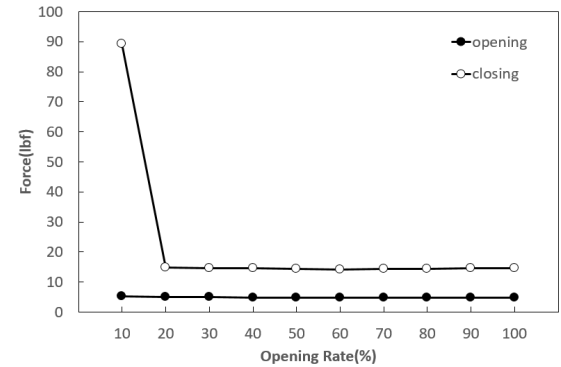


Fig. 9 Required force for operation of valve

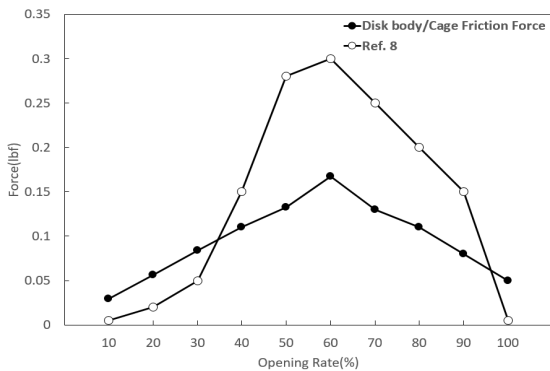


Fig. 7 Disk body/cage friction force regarding to opening rates

3.2 밸브 내압으로 인한 추력특성

밸브 내부 압력에 의한 모든 작용력을 고려했을 때 밸브를 개방 및 폐쇄하기 위해 요구되는 작용력은 식(3)에 의해 구해지며, 이를 개방률 별로 나타내면 Fig. 9와 같다.

$$\begin{aligned} F_{R, open} &= F_{pack} - F_P + F_{DP} + F_{DF} \\ F_{R, dose} &= F_{pack} + F_P - F_{DP} + F_{DF} + F_{SL} \end{aligned} \quad (3)$$

밸브의 개방 및 폐쇄에 필요한 작용력이 다르며 폐쇄 과정에서 최대 작용력이 요구됨을 확인할 수 있다. 해석 결과를 통해 밸브 내부의 작용력으로 발생하는 추력은 ASME B31.5^[7]에서 실시한 실제 실험 결과와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 이는 밸브의 개방 및 폐쇄에 문제가 없음을 해석적으로 검증하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 CO₂ 냉매용 압력제어밸브에 대하여 전산 유동해석을 실시하였다. 압력, 속도 및 유량계수를 이용하여 유동특성을 분석하였고, 밸브 내부의 압력으로 발생하는 작용력을 이용하여 요구되는 추력을 계산하였다. 이를 실제 실험 결과와 비교하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 플러그 행정거리 20mm로 모두 개방된 100% 개방률 조건에서 입구와 출구의 차압은 7.62kPa이었으며, 10mm 및 2mm가 개방된 개방률 50%와 10%에서는 차압이 7.32kPa 및 7.26kPa로 압력제어밸브의 운용조건에서 제시한 차압성능 7kPa를 모두 만족하였다.
2. 개방률이 증가함에 따라 유속이 증가하여 내부 압력이 낮아짐을 확인할 수 있으며, 유량계수 또한 이에 비례하여 증가함을 보였다.
3. 밸브 내부의 압력으로 인해 발생하는 작용력을 이용하여 요구되는 추력을 계산했으며, 이는 실제 유동차단 및 기능입증 시험결과와 동일한 형태를 보였고, 추력이 밸브의 개방 및 폐쇄에 문제가 없음을 해석적으로 검증하였다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부 '기업연계형 연구개발 인력양성사업(다학제기반 고성능 자동차-기계부품 설계인력양성 사업단, 과제번호 : N0001592)의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행되었으며, 대상품에 대한 기술정보를 제공해 주신 (주) BMT에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Pettersen, J., "An Efficient New Automobile Air-Conditioning System Based on CO Vapor Compression", ASHRAE Transactions, Vol. 100, Pt. 2, pp. 657-665, 1994.
2. Kim, O. J., Yoon, S. H., Hong, Y. J., Kim, J. Y. and Kang, S. I., "Analysis and Performance Test of an Electronic Expansion Valve for CO₂," The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 73, pp. 1491-1496, 2009.
3. Coi, J. A., Bae, J. W., Park, J. H., Kim, H. S., Lee, S. B. and Jang, J. S., "Development of Simulation Model for a Control Valve System CO₂ Refrigerant," Journal of Korean Society of Fluid Power & Construction Equipment, Vol. 21, pp. 86-87, 2019.
4. Kim, B. H. and Jang, J. S., "Transient Response Analysis of a Control Valve for CO₂ Refrigerant," Journal of Drive and Control, Vol. 15, No. 4, pp. 11-16, 2018.
5. ANSYS CFX, ANSYS Inc., <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx/>. (accessed on 12 August, 2019).
6. Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 269-289, 1994.
7. ASME B31.5, Refrigeration Piping and Heat Transfer Components B31.5, ASME, pp. 1-102, 2016.
8. Kim, J. H., Joe, W. S., Kim, D. H. and Lee, T. H., "A Numerical study on flow and thrust characteristics for a balanced globe valve used in nuclear power plants," Journal of Korean Society for Computational Fluids Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 81-88, 2017.