

폐쇄성 공압식 물류이송장치에서 캡슐 형상에 따른 운전능력 비교 연구

김형호* · 정영훈* · 강민우* · 서상호**†

A comparative Study on the Operation Capabilities according to the different Capsule Shapes in Pneumatic Capsule Pipeline

Hyung-Ho Kim*, Young Hoon Jung*, Min-Woo Kang*, Sang-Ho Suh**†

Key Words : Capsule Shape(캡슐 형상), Operation Capabilities(운전능력), Pneumatic Capsule Pipeline(폐쇄성 공압식 물류 이송장치)

ABSTRACT

Logistic services are very popular in Korea. Currently the most widely utilized logistic services is truck transportation. It cause a lot of problems such as air pollution, traffic jam and so on. PCP (Pneumatic Capsule Pipeline) might be one of the alternative transportation system. The operation capabilities of PCP is affected by piping configuration and capsule shapes. Thus, in this paper operation performances are investigated by using the different capsule shapes with guide wing and gap in the rubber wheel. It concluded that a capsule with two wings of which reinforced spring stiffness operated effectively to move.

1. 서 론

현대인의 삶은 급격하게 바뀌고 있다. 특히, 효과적인 물류 서비스는 도시의 삶을 변화시키는데 큰 영향을 미치고 있다. 그러나, 물류량의 급격한 증가로 인한 많은 문제점도 발생되고 있다. 우리나라의 물류서비스는 Fig. 1에 나온 것처럼 1992년부터 시작되어 2014년에는 그 비용이 4조원에 달할 정도로 크게 성장하였다. 늘어난 물류량을 해결하기 위해 가장 보편적으로 사용하고 있는 방법은 트럭과 같은 차량에 의한 운송이다.⁽¹⁾ Fig. 2와 같이 트럭의 수는 증가하고 있지만 교통정체, 환경오염 등과 같은 부작용도 동시에 나타나고 있다.⁽²⁾ 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구진은 국내 최초로 폐쇄성 공압식 캡슐형 물류이송장치(PCP)를 개발하였다. 이 장치는 환경친화적이고, 시공간의 제한 없이 화물을 운송할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구진은 이 시스템에 대한 기초설계 및 모델제작에 대한 연구를 진행하여 오고 있다.⁽³⁾ 폐쇄성 공압식 캡슐형 물류이송장치 모델은 Fig. 3과 같이 폐회로 시스템으로 구성되어 있다. 이 시스템이 잘 구

동되도록 하기 위해서는 캡슐 형상과 배관망 구성의 최적화가 필요하다.⁽⁴⁾ 그 이유는 캡슐 형상에 따라 운송에 필요한 동력이 달라지고 안정성 문제와 바로 연결되기 때문이다. 본 연구에서는 캡슐 형상과 배관망 로직의 적합성에 대한 연구를 캡슐형 물류이송장치 연구용 모델로 실험적으로 진행하였다. 연구를 통해 보다 적절한 캡슐 형상에 대한 설계자료와 배관망 로직에 대한 정보를 확보 할 수 있었다.

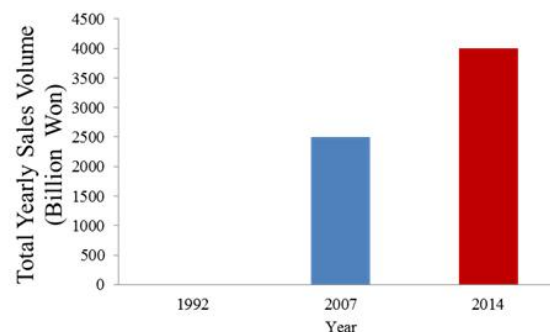


Fig. 1 Yearly total sales volume in Korea

* 송실대학교 대학원 기계공학과(Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Soongsil University)

** 송실대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Soongsil University)

† 교신저자, E-mail : suhsh@ssu.ac.kr

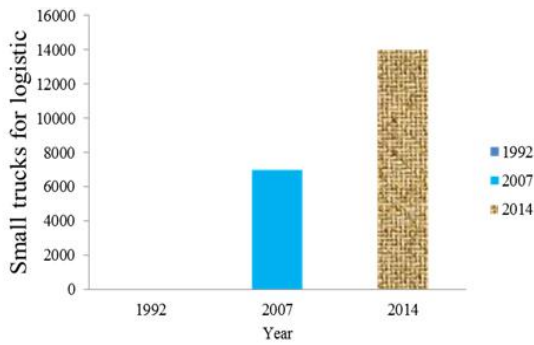


Fig. 2 Number of trucks in logistic service industry

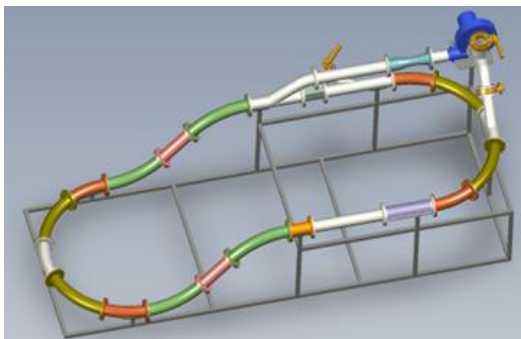


Fig. 3 Photo of the PCP test model

Table 1 Specifications of the test facility

Spec.	Pipe network			Fan	
	Dia.	Radius	Height	Type	Capacity
Value	150 mm	1075 mm	1200 mm	Turbo	11 kW

2. 실험장치

폐쇄성 공압식 캡슐형 물류이송장치의 실험 모델은 Fig. 3과 같고, 상세한 치수는 Table 1에 제시되어 있다. 개발하고자 하는 폐쇄성 공압식 캡슐형 물류이송장치의 설계기술 확보를 위해 배관망 구성이 용이한 1,000 mm 이하의 배관을 사용하는 폐회로시스템을 구성하였다. 총 배관의 길이는 13 m이고 캡슐의 이송을 위해 송풍기가 설치되어 있다. 이 모델은 스틸 배관과 투명한 아크릴 배관으로 구성되어 있다. 아크릴 배관은 캡슐이 정착하는 곳에 있고, 나머지 부분은 스틸 배관이다. 실험에서 평가하고자 하는 항목은 곡관부의 곡률반경과 캡슐 길이의 적합성, 높이 차이가 있는 경우 하강 및 상승 시 캡슐의 운송 능력 평가 등이다.⁽⁵⁾ 이러한 평가항목을 고려하여 배관망은 곡면부를 포함하고, 배관의 높낮이가 있는 구조로 제작하였다. 폐쇄성 물류이송장치이기 때문에 배관망 안에 송풍기가 포함되어 있어야 한다.⁽⁶⁾ 초기에는 캡슐 이동을 위해 Fig. 4 (a)와 같이 압력을 이용해 캡슐을 밀어주는 방법을 제안했으나 공기가 배출구로 빠져 나

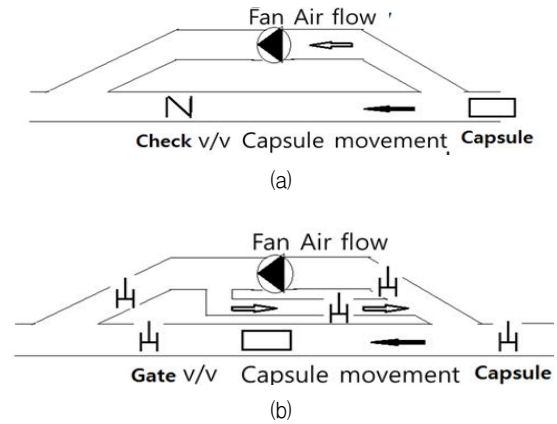


Fig. 4 Conceptual diagram of the new designed PCP facility

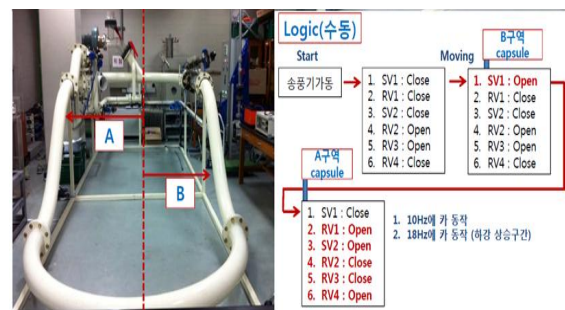


Fig. 5 Schematic diagram of the new designed facility model

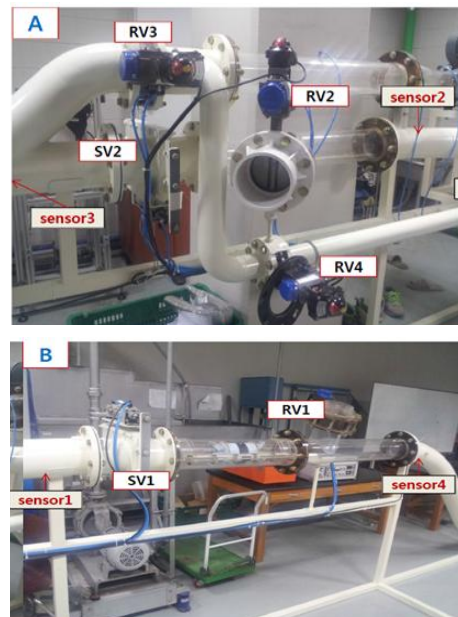


Fig. 6 Detailed PCP facility for the experiment

가서 캡슐이 움직이지 못하는 문제가 발생하였다. 따라서 Fig. 4 (b)와 같이 게이트밸브와 우회로 배관(bypass pipe)을 설치하여 공기방향을 제어하는 배관 구조로 변경하였다.

이렇게 만든 실제 배관망은 Fig. 5와 같이 A 부분과 B 부분으로 나누어져 있다. 송풍기는 Fig. 6 (a)와 같이 A 부분

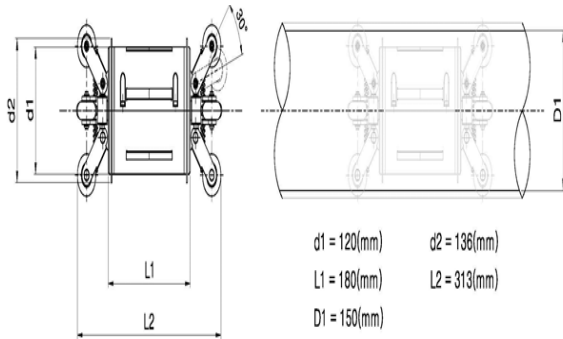


Fig. 7 Scaling of the designed capsule

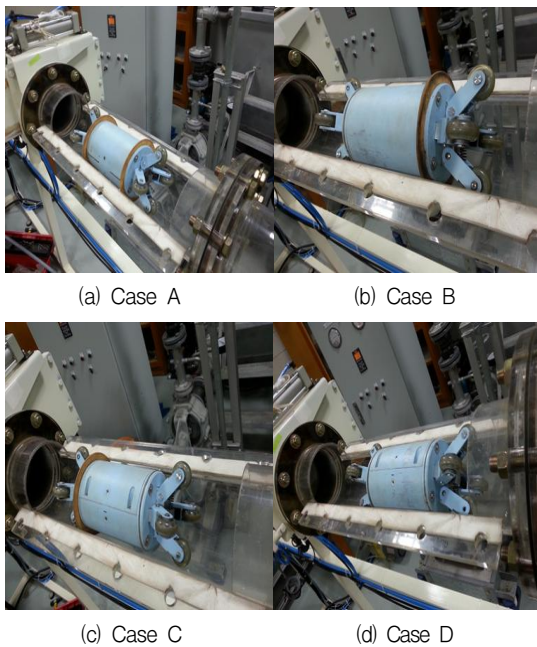


Fig. 8 Photos of the different shaped capsule models

의 상단에 있으며, 이 부분 아래에 우회 배관을 설치하여 캡슐이 원활하게 이동하도록 했다. 캡슐을 삽입하는 위치는 Fig. 6 (b)와 같이 B 부분의 아크릴 배관이 있는 부분이다. 캡슐이 B 부분에서 출발하면 SV1(Slide Valve 1)이 열리고 RV1(Rotation Valve 1)는 닫히게 된다. 반대로 A 부분에서 캡슐이 이동하면 SV1이 닫히고 RV1이 열리게 된다. 모든 움직임은 배관에 설치된 센서를 통해 감지되고, 내부에 설치된 제어로직에 의해 밸브의 개폐가 가능하도록 했다. 실험에 사용한 캡슐의 기본적인 형태는 Fig. 7과 같다. 캡슐은 앞바퀴와 뒷바퀴 각각 4개이고, 캡슐의 길이는 313 mm이며, 직경은 120 mm이다.^(7,8) 캡슐과 배관 사이의 마찰을 최소화하고 힘을 잘 받도록 앞뒤로 고무 날개 깃을 설치하였다. 바퀴는 곡관에서 움직일 수 있도록 스프링이 연결된 구조로 만들어졌으며, 캡슐 내부에는 화물을 담을 수 있는 문이 있다.⁽⁹⁾ 이송 능력은 캡슐 형상에 따라 달라진다. 그 중에서도 고무 날

Table 2 Transport capacities for the different shaped capsules

Model	Weight [kg]	Frequency [Hz]	Min/max power consumptions [kW]	Time for one turn [s]
Case A	1.5	41	0.58/0.97	9.17
Case B	1.5	42	0.62/1.11	7.116
Case C	1.5	43	0.66/1.16	8.056
Case D	1.5	-	-	-

개의 역할이 가장 중요하다.^(10,11) 그리고 실질적으로 배관과 맞닿아 있는 바퀴들의 역할도 무시할 수 없다.^(12,13)

3. 실험

3.1 날개 깃의 유무에 따른 운전 능력 실험

적절한 캡슐 형상에 대한 설계자료를 얻기 위해 캡슐의 운송 능력에 큰 영향을 미치는 고무 날개 깃의 존재 유무에 따른 성능실험을 수행하였다. 물류이송장치 모델에서 캡슐의 고무 날개 깃을 Fig. 8과 같이 4 가지로 구분하였다. 정상 깃 (Case A), 뒤쪽만 깃이 있는 경우(Case B), 앞쪽만 깃이 있는 경우(Case C), 깃이 없는 경우(Case D)로 제작하여 운송 능력을 실험하였다. 캡슐 내부에 1.5 kg 무게의 짐을 탑재하고 배관망을 한 바퀴 이동하는데 걸리는 시간과 동력 소모량, 송풍기의 가동 주파수를 측정하였다. 캡슐 내부의 공간 이용을 위해 적재하중이 1.5 kg보다 작은 경우도 실험을 수행해 보았지만 모델 사이의 큰 차이점이 보이지 않았다. Table 2는 고무 날개 깃의 위치에 따른 운송능력을 나타낸 표이다. Table 2에서 무게는 탑재한 화물의 무게를 나타내고, 주파수는 캡슐이 곡관과 상·하강 배관을 한 바퀴 회전할 수 있었던 값을 나타낸다. 좀 더 상세히 설명하면 Case A는 주파수가 40일 경우에는 배관망의 상승관으로 올라오지 못하고, 주파수를 41로 증가시켰을 경우에는 아무 문제없이 캡슐의 상향 이동이 가능하였다. 고무 날개 깃이 앞뒤로 있는 Case A의 경우 캡슐이 배관망을 한 바퀴 이동하는데 약 9.17 초정도 걸렸고, 동력은 0.58~0.97 kW 정도 소모하였다. Case B는 고무 날개 깃이 뒤쪽에 있는 경우로 가장 빠르게 배관망을 이동하였다. 하지만 소요 동력은 Case A보다 더 많았다. Case C는 고무 날개 깃이 앞쪽에 있는 경우로 이동 시간은 Case A보다 짧았고, Case B보다는 길었다. 하지만 소요 동력은 가장 많았다. Case D의 경우 고무 날개 깃이 앞뒤로 모두 없는 경우인데, 이 경우에는 캡슐의 이동이 불가능하였다. 운전시간과 소요 동력을 종합적으로 평가하였을 때 가장 적합한 캡슐 형상은 날개 깃을 앞뒤 모두 설치하는 것임을 알 수 있었다. 이번 실험을 통해 날개 깃이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 실험과정 중에 캡슐이 배관

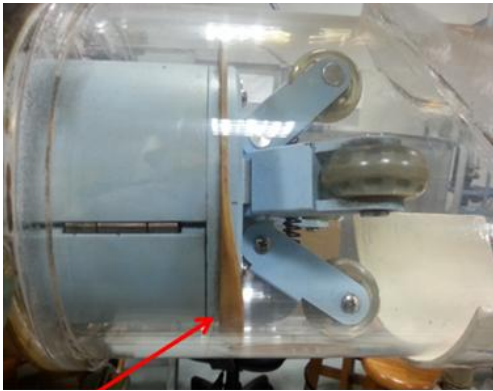


Fig. 9 Dragging the by rubber guide ring of the capsule

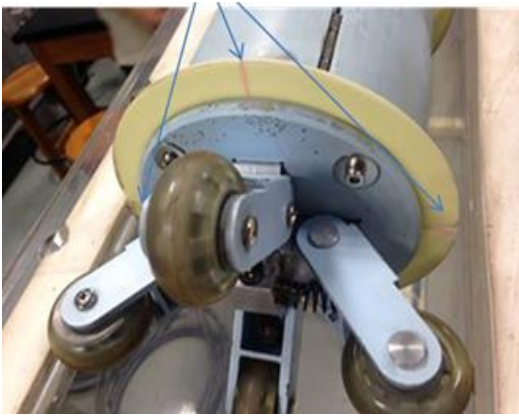


Fig. 10 4 Gaps in the capsule rubber wing

을 이동하면서 고무로 만들어진 날개 깃이 캡슐 내부의 화물 무게 때문에 Fig. 9와 같이 눌림 현상이 발생함을 알 수 있었다. 이렇게 날개 깃이 눌러져 캡슐의 아래 부분은 배관망과의 마찰이 발생하고, 캡슐의 윗부분에는 캡슐이 배관에 닿지 않아 바퀴가 제 역할을 하지 못하는 결과를 초래하였다. 이로 인해 운송 시간이나 소요 동력을 더 요구하게 만드는 것을 확인하였다.

3.2 날개 깃의 틈새 유무에 따른 운전능력 실험

위의 실험에서 찾아낸 문제점인 날개 깃의 눌림 현상을 최소화 하기 위해 날개 깃에 4 개의 틈새를 Fig. 10과 같이 만들어 운전능력을 시험하였다. 틈새를 만들면 적재물의 무게에 의해 날개 깃의 눌림 영역이 1/4 정도로 최소화된다. 틈새를 90° 간격으로 4개 만들어 걸린 시간은 실험한 결과는 Table 3에 나타나 있다. 이 실험에서는 보다 정확한 결과를 얻기 위해 한 바퀴가 아닌 5바퀴를 운송하는데 소요되는 시간을 측정하였다. 날개 깃에 틈새를 내지 않은 경우는 이전의 실험결과와 유사하게 5바퀴 이동 시 약 46.1초 정도 소요되었다. 날개 깃에 틈새가 있는 경우도 운송시간이 45.2초로 차이가 나지 않았다. 따라서 날개 깃의 틈새 효과가 거의 없

Table 3 Performance for with w/ or w/o gap of capsule

Model	Weight [kg]	Frequency [Hz]	Power consumptions [kW]	Time for 5 times turn [s]
w/gap	1	41	0.93	45.2
w/o gap	1	41	0.93	46.1

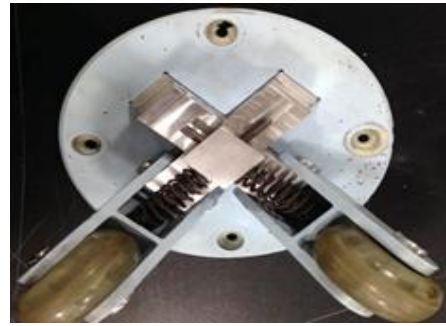


Fig. 11 Reinforced front wheels with attached springs

는 것으로 확인되었다. 그 이유는 캡슐이 배관망을 이동하면서 곡선 구간에서 회전하면서 하단 부분 전체가 눌리는 현상이 발생하였기 때문이다. 캡슐의 운송능력을 향상시키기 위한 다른 요인을 고려해 보았을 때 적재 하중에 의해 캡슐이 눌러지면 캡슐의 위쪽 2개의 바퀴가 배관 바닥에 닿지 않으므로 제 역할을 못하는 것을 찾아내었다. 이 점을 확인하고자 바퀴의 유무를 두고 실험을 추가적으로 진행하였다.

3.3 바퀴의 유무에 따른 운전능력 실험

이번 실험은 캡슐의 앞쪽이나 뒤쪽에서 총 4개의 바퀴 중 바퀴의 역할을 제대로 하지 못하는 부분을 제거하고 남은 2개의 바퀴의 강성을 강화하기 위해 스프링을 하나씩 추가하였다. Fig. 11과 같이 앞쪽 바퀴 2개만 설치된 캡슐에 4개의 틈새를 만들었을 경우와 뒤쪽 바퀴 2개만 설치하고 4개의 틈새를 만들었을 경우 그리고 앞뒤 바퀴에 2개만 설치하고 틈새가 없는 경우로 나누어 4가지 실험을 진행하였다. 틈새가 있고 앞쪽 바퀴만 있을 경우 송풍기의 주파수가 40 Hz로 지금까지 실험결과 중 가장 소요 동력이 작았고, 운행시간도 가장 작았다. 뒤쪽 바퀴만 설치하고 틈새가 있는 경우도 송풍기 주파수는 40 Hz로 소요 동력이 작았으나 운전시간이 조금 더 소요되었다. 반면에 틈새가 없는 경우는 앞쪽 바퀴만 설치되었던 뒤쪽 바퀴만 설치되었던 둘 다 배관망 내의 상승구간을 이동하지 못했다. 만약 송풍기의 주파수를 46 Hz으로 올리면 운송이 가능하지만 배관망 내의 캡슐의 속도가 너무 빨라 제어가 힘들고 밸브에 캡슐이 부딪히는 현상이 발생하여 캡슐의 안정성 때문에 추가 실험은 진행하지 못하였다. 이 실험을 통해 바퀴 또한 캡슐에서 상당히 중요한 역할

Table 4 Transportation performances of the reinforced capsule w/ and w/o the gaps

Number of gaps	Frequency [Hz]	Power consumption [kW]	Time for 5 times turn [s]
4	40	0.93	44.4
4	40	0.93	47.86
0	45	1.17	x
0	45	1.17	x

Table 5 Transportation performances of the capsules with front and rear attached wheels

Model	Number of crack	Frequency [Hz]	Power consumptions [kW]	Time for 5 times turn [s]
W/ front wheels	3	40	0.93	46.45
W/ rear wheels	3	40	0.93	48.73

을 하는 것을 알 수 있었고, 바퀴가 한쪽만 있을 경우는 날개 깃의 틈새가 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있었다. 바퀴의 내구성을 강화하기 위해서는 스프링의 강성이 강한 것을 사용하는 것이 좋다.

3.4 날개 깃의 틈새의 개수에 따른 운전능력 실험

바퀴가 한쪽만 있는 경우 날개 깃의 틈새가 중요한 역할을 한다는 점에 착안하여 날개 깃의 틈새가 3개로 줄어들면 어떤 영향을 미칠지 추가 실험을 진행하였다. 그 결과는 Table 5와 같다. 틈새가 4개 있는 경우와는 달리 틈새가 3개인 경우가 바퀴가 앞쪽에 달려있던 뒤쪽에 달려있던 더 소요시간이 길게 나왔으며, 소요 동력은 똑같이 나왔다. 따라서 바퀴가 앞쪽이나 뒤쪽에 달려있는 경우 틈새의 개수보다는 틈새의 유무가 더 중요한 변수임을 알았고 3개보다 4개의 틈새가 더 효율적이다. 이러한 이유는 캡슐이 화물을 적재하고 이동할 때 곡관 부분에서 회전이 발생하여 Fig. 12와 같이 캡슐이 뒤집히며 날개 깃의 하단 부분에 전체적으로 놀림이 발생하였기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 적재 하중을 늘려 캡슐의 회전이 발생하지 않도록 하는 방법도 있다.

4. 결 론

폐쇄성 공압식 캡슐형 물류이송장치 모델의 실험은 크게 4가지 항목에 대해 수행하였다. 첫 번째, 날개 깃의 유무에 따른 운전능력 실험인데, 이 실험에서는 폐쇄성 공압식 캡슐형 물류이송장치 모델에서 캡슐의 고무 날개 깃을 4 가지로



Fig. 12 Rotation of the capsule during the movement in the test facility

분류하여 정상 깃(Case A), 뒤쪽만 깃이 있는 경우(Case B), 앞쪽만 깃이 있는 경우(Case C), 깃이 없는 경우(Case D)로 운송능력을 실험하였다. 운전시간과 소요 동력을 종합적으로 평가하였을 때 가장 적합한 날개 깃을 앞뒤 모두 설치하는 것임을 알 수 있었다. 두 번째, 날개 깃의 틈새 유무에 따른 운전능력 실험이다. 실험 결과 날개 깃에 틈새를 만드는 것은 거의 효과가 없는 것으로 확인되었다. 세 번째, 바퀴의 유무에 따른 운전능력 실험이다. 실험을 통해 바퀴 또한 캡슐에서 상당히 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있었고, 바퀴가 한쪽만 있을 경우는 날개 깃의 틈새가 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있었다. 네 번째, 바퀴가 한쪽만 있는 경우 날개 깃의 틈새의 개수에 따른 운전능력 실험이다. 틈새가 4개 있는 경우와는 달리 틈새가 3개인 경우가 바퀴가 앞쪽에 달려있던 뒤쪽에 달려있던 소요시간이 많았으나, 소요 동력은 같았다. 본 연구를 통해 폐쇄성 공압식 캡슐형 물류이송장치의 배관망 로직의 적합성을 확인하였고, 캡슐의 형상에 대한 실험을 통해 날개 깃에 대한 정보와 바퀴의 중요성에 대한 데이터를 확보하였다. 따라서 캡슐의 날개 깃을 앞뒤로 설치하고 틈을 4개 만든 후 바퀴에 연결된 스프링 강성을 강화하는 것이 이전 캡슐 형상보다 적절한 모델임을 실험으로 확인하였다.

References

- (1) National Logistics Information Data, 2010, "Study about that optimizes size of parcel service vehicle during considering about carbon emission," kyonggi University, Korea.
- (2) Lee, S. H., 2009, "Study about that optimizes size of parcel service vehicle during considering about carbon emission," Master degree thesis, Department of industrial engineering, Kyonggi University, Seoul Korea, pp. 2.
- (3) Jung, Y. H., Kim, H. H., Kang, M. W., and Suh, S. H., 2015, "A Study on Shape Capsule in Closed Pneumatic Pipeline system (CPCP)," KSFPM summer conference, wonju, Korea.
- (4) Internet search information, Transportation Futuristics, http://www.lib.berkeley.edu/news_events/futuristics/pt/.

- (5) Stephen, S. R., Leslie, O., Jeffrey, W., Curtis, M., and Othon, R., 2000, "The technical and economic feasibility of a freight pipeline system in Texas-year 1 report," Report 1519-1, Texas Transportation Institute, pp. 7.
- (6) Egbunike, O. N. and Potter, A. T., 2011, "Are freight pipelines a pipe dream: A critical review of the UK and European perspective," *Journal of Transport Geography*, Vol. 19, pp. 500.
- (7) Plodpradista, W., 2009, "Dynamic performances of tubular linear induction motor for pneumatic capsule pipeline System," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 53, pp. 891.
- (8) Jung Y. H. and Suh, S. H., 2015, Korea Patent Application No. 10-2015-0049709.
- (9) Liu, H., 2000, "Pneumatic capsule pipeline-basic concept, practical constructions, and current research", *Mid-Continent Transportation Symposium Proceedings*, Columbia, Missouri, pp. 230~231.
- (10) Esaki, T. et al., 2002, "Comprehensive pneumatic transportation system for geological disposal facilities," *WM'02 Conference*, February pp. 24~28, Tucson, USA.
- (11) Liu, H. and Kosugi, S., 2004, "Use of pneumatic capsule pipeline for underground tunneling," the 12th *International Symposium on Freight Pipelines*, Prague, Czech Republic.
- (12) Egbunike, O. N., and Potter, A. T., 2011, "Are freight pipelines a pipe dream? A critical review of the UK and European perspective," *Journal of Transport Geography* Vol 19, No. 4, pp. 499~508.
- (13) Turkowski, M. and Szewczyk, R., 2009, "Transport dóbr konsumpcyjnych rurociągami - przyszłość systemów transportowych?," *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, Vol 13, No. 10, pp. 9~13.