

중량물 운반을 위한 에어쿠션 이송장비의 개발 Development of the Air Cushion Carrier Equipment for Carrying Heavy Loads

윤동원** · 박희창*† · 김병인** · 이성휘** · 장성익*** · 홍익표****
Dongwon Yun**, Hee-Chang Park*†, Byung-In Kim**, Sung-Hwi Lee**,
Seung-Ik Jang*** and Ik-Pyo Hong****

(Received 17 April 2015, Revision received 12 August 2015, Accepted 17 August 2015)

Abstract : In this paper, the development of an air cushion transporter has been studied. To do this, theoretical analysis is introduced to design the equipment and computational fluid dynamics is also conducted. Design of an air cushion transporter for heavy load carriage is completed and a prototype is manufactured. Through the analysis and experiment of the developed the prototype, it can be known that the developed transporter can levitate the load of about 1 ton at the applied pressure of 0.2 MPa and the maximum lifting height at this condition is 17mm.

Key Words : Air cushion, Transporter, Heavy load

1. 서 론

최근 들어 시스템이 점차 복잡해지고, 대형화 되어감에 따라, 고중량 하중물의 이송에 대한 수요가 나날이 증가하고 있다. 이를 위해서 기존에는 중장비 차량을 이용하거나, 천장용 크레인을 주로 이용하였다. 그러나 중장비를 이용한 방법은 장비가 고가이며, 부피가 커서 현장에 적용하는데 많은 제약이 있다. 또한 천장형 크레인은 운반하려는 하물의 상부에 구조물을 반영구적으로 설치하여야 하며, 제한된 작업영역, 크레인간의 간섭,

안정상의 문제 등의 단점이 있다. 항구 근처나 넓은 공장내부에는 철로와 같은 궤도를 설치하여 사용하기도 하나, 이러한 궤도는 공장 내부의 작업경로나 생산시설의 변화로 인한 재배치 시에 장애가 되는 등의 단점이 있어 오랜 기간 사용에는 적합하지 않다.

이와 같은 고중량 화물에 대해 보다 효율적인 운반을 위해 최근에 고압의 공기를 이용한 에어쿠션 장비에 대한 관심이 증가하고 있다. 에어쿠션 장비란, 고압의 압축공기의 압력을 바닥으로 분사하여 그 반발력을 이용하여 고중량물을 들어

*† 박희창 (교신저자) : 한국기계연구원 성과확산본부
E-mail : hcpark@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7433

** 윤동원, 김병인, 이성휘 : 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구소

*** 장성익 : (주)효광

**** 홍익표 : 범아기전(주)

*† Hee-Chang Park (corresponding author) : R&D Commercialization & Cooperation Division, Korean Institute of Machinery and Materials.

E-mail : hcpark@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7433

** Dongwon Yun, Byung-In Kim, Sunghwi Lee : Department of Robotics and Mechatronics, Korean Institute of Machinery and Materials.

*** Seung-Ik Jang : Hyogwang

**** Ik-pyo Hong : Bumah mech-elect Co.Ltd.

올려 화물과 바닥의 마찰력을 줄인 후 이송하는 장비를 말한다. 임시 또는 영구적으로 에어쿠션 이송장비위에 장비나 화물을 올리고, 공기를 불어 넣으면 에어쿠션 이송장비와 바닥사이에 압력이 발생하고 남는 여분의 공기는 빠져나가게 된다. 이렇게 형성된 에어필름은 화물과 바닥사이의 마찰을 하중의 0.001% 정도 수준으로 떨어뜨리게 되어 한사람의 힘으로 수십 톤의 화물을 이동시킬 수 있게 한다. 예를 들어 1,000 kg의 화물을 에어쿠션 이송장비를 활용하면 손가락 하나의 힘으로 움직일 수 있게 된다.

국내에서는 압축공기 또는 에어필름을 이용한 장비는 주로, 정밀 기계의 고정밀 미세 이송장치에 관한 연구 개발이 주를 이루어 왔다. 차세대 FPD 이송을 위한 대형 글라스의 공기부양 장치에서 노즐 압력을 측정하는 등 공기부양방식 장치에 대한 연구가 활발히 진행되었으며,^{1,2)} 정밀 이송을 위하여 공기정압식 커플링 메카니즘이 제안되어 정확한 위치 정밀도 뿐만 아니라, 채터링, 런아웃과 같은 모션에러를 줄이기 위한 연구가 진행되었다³⁾. 또한 추진 노즐의 설계를 위하여 노즐의 설치 위치에 따른 추진 성능을 해석하고 실험을 통하여 해석을 검증하기도 하였다.⁴⁾ 고정밀 스테이지를 공기 베어링을 이용하여 지지하는 연구가 진행되었으며, 사용되는 센서의 종류에 따른 정밀도의 비교를 수행하기도 하였다⁵⁾. 공기를 이용한 부상 기구는 결국 바닥과의 마찰력을 줄이기 위한 수단이므로, 공기를 이용하여 부상력을 발생 시 마찰력의 감소성능을 필히 측정하여야 한다.⁶⁾ 최근 들어서는 보다 정밀하고 정확한 해석을 위해서 CFD를 이용한 해석을 수행하기도 하고 있으며,⁷⁾ 공기를 이용한 부상의 개념은 롤투롤 연속 공정에서 필름의 연속적인 이송 시 필름의 지지를 위한 방안으로도 사용되고 있는 등⁸⁾ 그 응용처가 나날이 증가하고 있다. 이와 같이 국내에서는 공기를 이용한 부상은 주로 정밀 동작기계에서 가공물의 이송을 위한 수단으로 주로 사용되어져 왔다. 외국에서는 SEAQX(벨기에), DELU(독일), Aircaster사(미국), Aerofilm Systems사(네덜란드), AVT(네덜란드) 등 여러 전문업체 등에 의해

서 중량물 운반을 위한 공기부양 시스템이 널리 개발되고 상용화된 반면, 국내에서는 이 분야에 대한 기술개발 및 상용화가 미약하다. 몇몇 대기업에서 자체적인 수요에 의해서 연구가 진행되어 왔음을 관련 특허 등을 통하여 알 수는 있으나, 상용화 등은 되지 않았으며, 2000년도에 들어서 일부 중소기업과 대학을 중심으로 연구가 진행되고 되었으나, 이 또한 상용화로 이어지지 못하였다.

본 논문에서는 중량물의 안전한 취급 및 운반을 위한 에어쿠션 이송장비를 개발하기 위한 연구에 대해서 다룬다. 이를 위해서 2절에서는 에어쿠션 장비의 기계적 강인성 및 부상력에 대해 이론적 해석을 수행하였으며, 3절에서는 이론적 해석을 바탕으로 실제 에어쿠션 장비를 설계, 제작하고 실험한 내용에 대해 설명한다. 마지막으로 4절에서 고찰 및 결론을 논한다.

2. 에어쿠션 이송장비의 설계

에어쿠션 장비는 Fig. 1과 같이 기본적으로 화물을 올리기 위한 플레이트와 같은 프레임 구조와 공기의 힘으로 화물과 프레임을 부상시키는 에어쿠션으로 구성되어 있다. 이때, 에어쿠션 이송장비는 그 형태 및 기능에 따라 다양하게 분류될 수 있으나, 그림과 같이 부상을 결정하는데 결정적인 에어쿠션 패드의 형상에 따라 Full torus와 Half torus의 2가지로 구분가능하다.

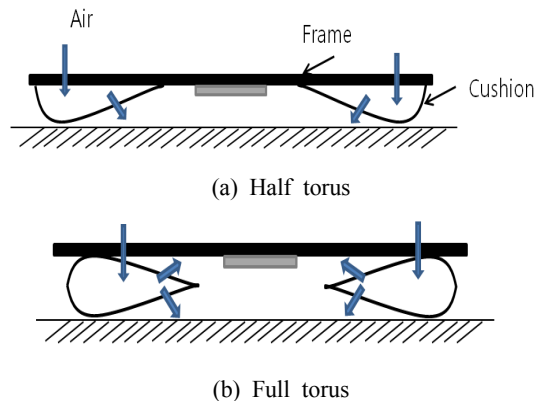


Fig. 1 Types of air cushion transporter.

Full torus의 경우 에어쿠션이 고압인가 형상특성을 가지며 부상 시 변형량이 크기 때문에 Lifting 과 부상기능을 동시에 구현할 수 있으나, Half Torus type은 에어쿠션이 저압인가 형상특성을 가지며 부상 시 변형량이 상대적으로 작아 Lifting 거리가 짧은 특성을 가진다. 본 연구에서는 Full torus 형상의 에어쿠션 장비를 개발하였으며, 본 논문에서는 그의 설계 및 제작에 대해 소개하고자 한다.

Fig. 2에 개발하고자 하는 에어쿠션 이송장비의 구성 및 개념을 보여주고 있다. 그림과 같이, load 가 가해지는 판상 구조물 있으며, 이를 부양시키기 위한 에어쿠션 (Bellow element)이 그 아래에 놓이게 된다.

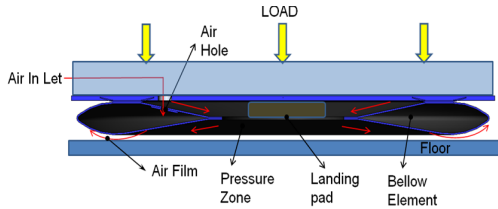


Fig. 2 Schematic of the air cushion transporter.

그림에서 압축 공기는 에어쿠션 이송장비의 가운데 흡입구를 통하여 공급되며, 그림의 빨간색 화살표를 따라 흐르게 된다. 즉, 흡입구를 통해 들어온 공기는 에어쿠션 내부를 거친 후, 중앙부를 통해서 에어쿠션 아래 부분을 반경방향으로 빠져 나가게 된다. 이를 통하여 에어쿠션 내의 압력을 유지하면서, 바닥과 에어쿠션 사이의 실링을 유지하고자 하였다.

이러한 에어쿠션을 설계하기 위해서는 목표 하중을 부상시키기 위한 에어쿠션의 사양 및 플레이트의 구조적 강건성 등이 주요한 설계인자가 된다. 이때 에어쿠션의 압력에 따른 부상 특성, 재질에서 발생하는 응력 등을 고려하여 설계하여야 한다.

먼저, 하중이 가해지는 상판의 두께를 선정하여야 한다. 이를 위하여 Fig. 3과 같은 평판에 대해서 굽힘 모멘트를 구해 보았다.



Fig. 3 Design of the base plate.

평판의 형태는 평면이 정사각형의 형태이며, 평판의 굽힘허용 응력은 152 MPa, 한 변의 길이 b는 310 mm, 인가되는 하중은 평판에 균일한 면에 대해 10000 N이라 가정하면, 최대 모멘트 M_{max} 는

$$M_{max} = wl^2/8 = 60.063 \times 10^3 N \cdot mm \quad (1)$$

과 같이 된다. 따라서 응력과 모멘트 사이의 관계에 의해서 평판의 두께 t는

$$t = \frac{2[\sigma_b]}{(M_{max}/I)} = 2.778 mm \quad (2)$$

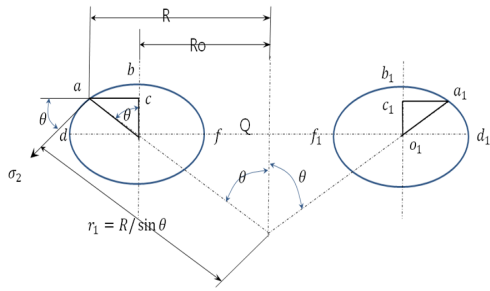
가 되므로, 평판의 두께는 3 mm로 선정하였다. 여기서 σ_b 는 6061-T4의 인장응력으로 152MPa이며, I는 단면 관성모멘트이다.

다음으로 에어쿠션에 대해 치수를 선정하였다. 에어쿠션의 유효직경 D를 250 mm라 가정하면, 인가 하중 5000 N, 10000 N에 대해 에어쿠션 내부에 발생하는 최대 압력은 하중과 면적의 관계에 의해서 각각 0.1 MPa, 0.2 MPa이 된다.

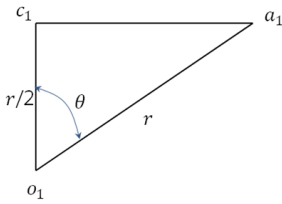
에어쿠션의 단면의 형상은 Fig. 4와 같이 표현할 수 있으며, 쿠션의 단면은 타원형이 된다. 이때 장축과 단축의 비는 제작의 편의상 2:1로 가정하였다. $r=21.21 mm$, $R_o = 125 mm$ 라고 주어져 있으므로, Fig. 4(b)에서 $\theta \approx 60^\circ$ 가 된다. Hoop stress 원주 응력, σ_2 을 구해 보면,

$$\sigma_2 = (Pr2R_o) + (rsin\theta)/(2tR_o) + (rsin\theta) = 4.02 MPa \quad (3)$$

이 된다. 여기서 내압 P는 2 MPa을 사용하였다. Fig. 4(a) 서 원점에서 힘이 작용하는 점까지의 거리, R은



(a) Geometrical modeling of the air cushion.



(b)

Fig. 4 Design of toroidal shaped vessel.

$$R = R_0 + (r \sin \theta) = 143.17 \text{ mm} \quad (4)$$

이므로, 수직응력 σ_1 은 두께가 1 mm일 때

$$[(\sigma_1 \sin \theta) / R] + (\sigma_2 / r) = (p / t) \quad (5)$$

에서 $\sigma_1 = 1.72 \text{ Mpa}$ 이 된다. 이 수치는 재료의 허용응력보다 훨씬 낮으므로 안전영역에 들어올 수 있었다. 제작의 편의성 등을 따져 보았을 때 두께를 1 mm로 선정하였다.

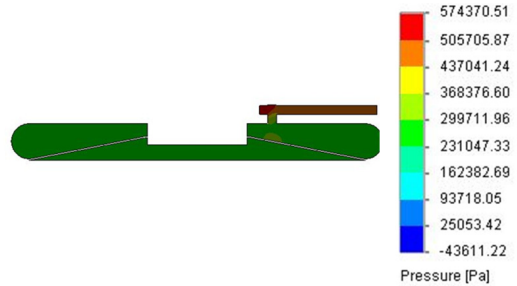
다음으로 공기 부양을 위해 필요한 공기 유량을 구하여 보았으며, 이는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$Q_{\max} = (237.6 / r) \times (ACP / \sqrt{T_1}) \quad (6)$$

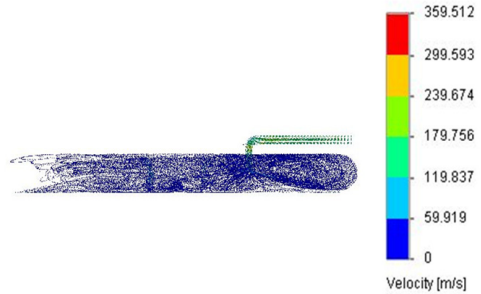
여기서 A는 토출부 단면적, P는 절대 압력, C는 유량 계수, T_1 은 절대온도, γ (1.2 kg/cm^2)는 비중량이다. 이 식을 이용하면 유량은 232.05 l/min 이 된다.

다음으로, 구해진 에어쿠션의 치수를 기준으로 CFD 해석을 수행해 보았다. 해석을 위해서 입력

공기의 최대 압력은 0.5 MPa 로 가정하였으며, 토출 압력은 대기압으로 가정하였다. 또한 Air film의 두께는 최소 $50 \mu\text{m}$ ~ 최대 $100 \mu\text{m}$ 로 가정하였다.



(a) Pressure distribution

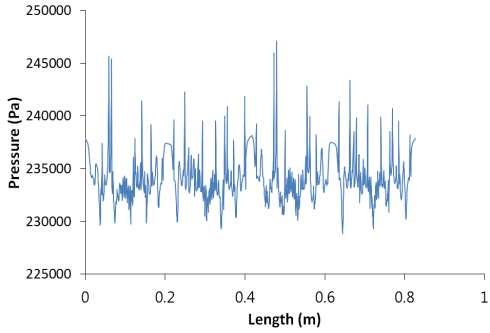


(b) Flow trajectory

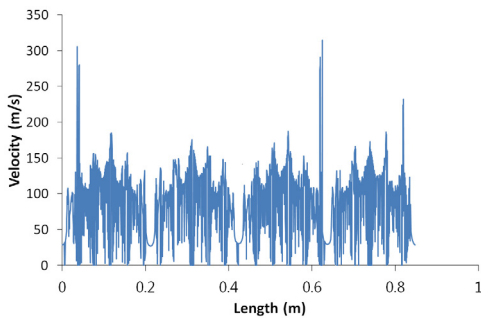
Fig. 5 The results of CFD.

CFD 해석결과가 Fig. 5와 6에 나와 있다. 공급되는 공기의 압력이 0.5 MPa 일 때, 에어쿠션 내부에서 형성되는 압력은 평균 0.23 MPa 임을 알 수 있었으며, 토출부에서 공기의 평균 속도는 150 m/s 로 체적유량으로 환산시 353 l/min 의 공기를 소모함을 알 수 있었다. 실제 프로토타입 실험에서 공급 압력이 약 0.4 MPa 이하로 운전되는 것을 확인하였으며, 실제 공기 소모량은 해석보다는 약간 감소함을 알 수 있었다.

다음으로 설계된 에어쿠션 이송 장치에 부하가 놓일 때의 응력 해석을 수행하였다. 이를 통하여 고무 재료의 에어쿠션에서 발생하는 최대 응력을 확인하고자 하였다. 해석을 위해서 인가되는 하중은 12.5 kN , 에어쿠션 내부의 공기의 압력은 0.2 MPa 로 가정하였다.



(a) Pressure distribution.



(b) Velocity.

Fig. 6 Analysis results of pressure and velocity.

Fig. 7에 응력 해석결과가 보여지고 있으며, 그림에서 알 수 있듯이 에어쿠션의 고무에서 발생되는 응력은 약 4.02 MPa 정도임을 알 수 있었으며, 이는 앞서의 이론적인 해석과 유사한 수치였다. 그러나 원형 라운딩의 가장자리 부위에서 응력 집중이 발생하였으며, 최대 9 MPa 정도라는

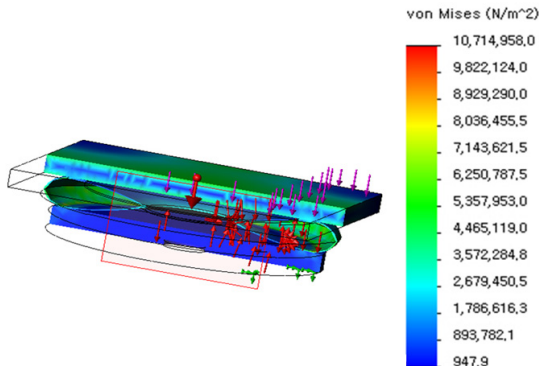


Fig. 7 Stress in the air cushion transporter.

것을 알 수 있었다. 따라서 제작 시 가장자리 부위의 응력 집중 부위를 유의해서 제작하여야 함을 알 수 있었다.

3. 에어쿠션 이송장비의 제작 및 실험

본 절에서는 앞 절에서 해석한 에어쿠션 장비의 프로토타입을 제작해 보았다. Fig. 8에 설계된 에어쿠션 장비의 프로토타입의 구조를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 부하가 올려지는 base plate의 하부에 에어쿠션 패드가 부착이 되며, 에어쿠션에 공기를 공급하기 위한 center plate 와 bellows가 에어쿠션의 중앙부에 부착된다. 또한 실험이나 운용 시에 에어쿠션의 마찰이나 충돌에 의한 손상을 방지하고자 네모서리에 stopper가 설치되어 있다.

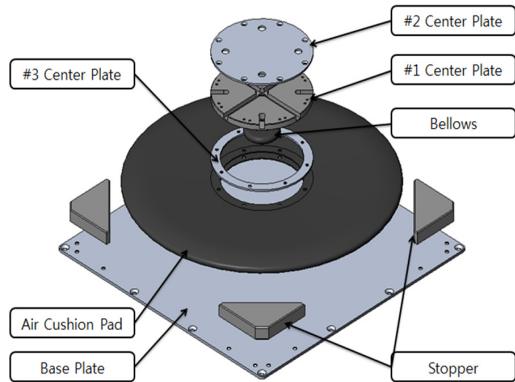


Fig. 8 Components of the prototype.

에어쿠션 이송장비에서는 고무재질의 에어쿠션이 가장 큰 압력을 받게 된다. 따라서 고무재질의 기계적 강도가 장비의 신뢰성에 중요한 역할을 하므로, 고무재질의 강도를 측정해 보기로 하였다. 사용하고자 하는 고무의 재질은 다음과 같이 2 종류를 제작하였다.

- 시편 A : Chipped rubber+ fabric 0.9t
- 시편 B : 폴리우레탄 + fabric 1t

시험은 각 재질에 대해 인장강도를 측정하였으

Table 1 Test results of tensile strength.

| Specimen | Run | Tensile strength (MPa) | Strain (%) |
|----------|---------|------------------------|------------|
| A | 1 | 19.75 | 44.58 |
| | 2 | 21.33 | 40.36 |
| | 3 | 23.28 | 45.24 |
| | SD | 1.77 | 2.64 |
| | CV(%) | 8.24 | 6.09 |
| | Average | 21.46 | 43.39 |
| Specimen | Run | Tensile strength (MPa) | Strain (%) |
| B | 1 | 88.30 | 18.24 |
| | 2 | 89.67 | 18.84 |
| | 3 | 94.38 | 18.64 |
| | SD | 3.19 | 0.31 |
| | CV(%) | 3.51 | 1.64 |
| | Average | 90.78 | 18.57 |

며, 시험 방법은 ASTM D412, 시험 속도는 500 mm/min으로 설정하였다.

Table 1에 재료의 인장강도 실험 결과가 나와 있다. 이 표에서 알 수 있듯이, 두 가지 재료의 인장강도의 평균값은 각각 43 MPa, 18 MPa로서, 앞서의 이론적 해석에서 구해진 최대 응력보다 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 두 가지 시험 모두 설계된 에어쿠션 이송장치에 사용될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9에 제작된 에어쿠션 이송장치의 프로토타입을 보여주고 있다.

다음으로, 제작된 에어쿠션 이송장치에 대한 성능 테스트 실험을 수행하였다. Fig. 10과 같은 테스트 장비를 제작하였으며, 이 장비를 이용하여 제작된 에어쿠션 장비에 일정 로드를 가한 상태에서, 인가 공기압을 제어하면서 에어쿠션의 내압, 부상 높이, 소모유량 등의 데이터를 측정할 수 있었다. 실험 과정과 데이터 측정 개념이 Fig. 11에 정리되어 있다.



Fig. 9 Completed air cushion transporter.

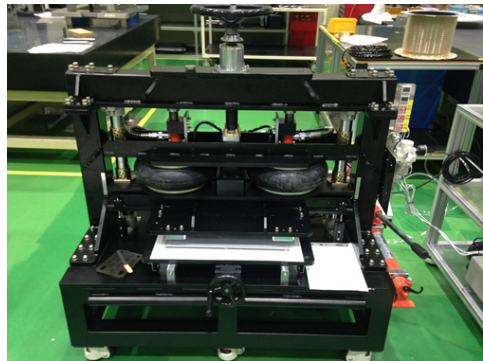


Fig. 10 Test equipment.

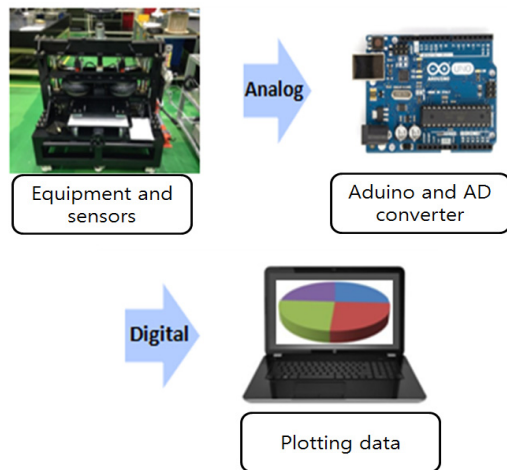


Fig. 11 Data measurement system.

먼저 데이터 측정에 앞서, 압축공기를 인가 시 부상이 되는지를 확인하기 위하여, 빛과 초고속 카메라를 이용하여 부상상태를 관찰하였다. Fig. 12에 공기압을 가했을 때 에어쿠션과 지면의 간격을 시간에 따라 촬영한 사진을 보여주고 있으며, 이를 통하여 가압되는 공기에 의해 개발된 에어쿠션이 제대로 부상함을 알 수 있었다.

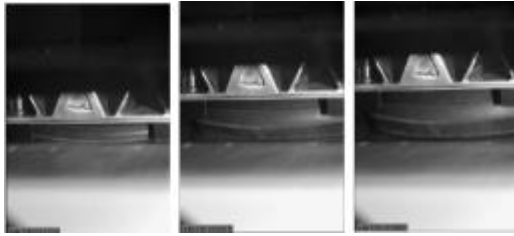


Fig. 12 Image about levitation.

Fig. 13에 가압되는 압력에 따른 에어쿠션의 실험 데이터가 보여지고 있다. 본 실험에서는 가압력을 0~0.205 MPa까지 가압하였으며, 이때의 에어쿠션의 부상높이, 부상력, 공기의 유량 등을 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 개발된 에어쿠션은 최대가압력 0.2 MPa 일 때, 약 17 mm의 부상높이를 가지며 이때, 가반하중은 약 1 ton 정도가 된다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 중량물의 안전한 이송을 위한 에어쿠션 이송장비에 대한 개발에 대해 다루었다. 목표 가반하중이 수 ton 정도의 고하중이므로, 설계시에 기구부의 기계적 강도, 에어쿠션의 내압력 등의 구조적 강건성과 목표로 하는 하중을 부상시키기 위한 부상 성능 등을 모두 만족시켜야 하므로, 이를 위하여 이론적 해석, 전산유체해석 등의 해석을 수행하여, 초기 설계를 수행하였다. 이때, 이론적 해석과 전산 유체해석을 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다. 이러한 해석을 바탕으로 에어쿠션 이송장비를 설계하였으며, 프로토타입을 완성하였다. 완성된 프로토타입의 성능을 분석하고자 자체적인 성능 실험장비를 제작하였으

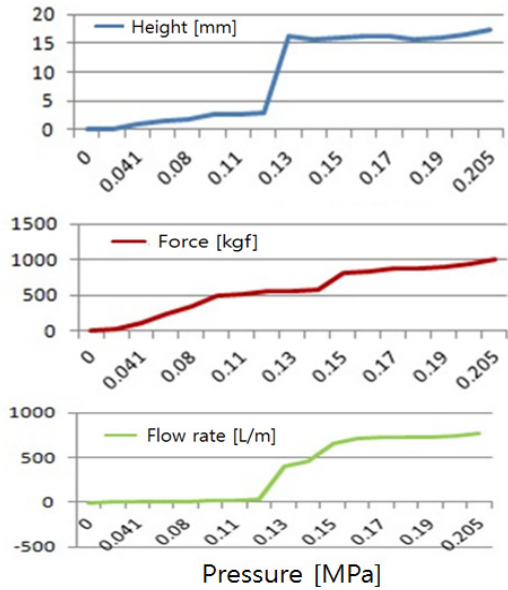


Fig. 13 Experimental results.

며, 이를 바탕으로 개발된 에어쿠션 이송장비의 성능을 측정한 결과, 인가 압력 0.2 MPa에서 부상력은 약 1 ton, 부상높이는 17 mm 정도 됨을 알 수 있었다. 본 연구를 바탕으로 향후 연구를 계속하여 가반하중 350 kN 급의 에어쿠션 이송장비를 완성할 계획이다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 국토 R&D사업 교통물류연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. H. S. Jeong, K. S. Kim, Y. J. Oh, T. J. Lho, H. C. Choi, T. Y. Son and B. S. Park, 2006, "Development of Nozzle Pressure Measurement System for Air-Floating FPD Conveyor Using LabVIEW," Proceeding of KSPE, pp. 363-364.
2. T. G. Lee, J. S. Y, H. J. Jung, J. H. Kim and J. H. Kim, 2013, "Development of the Air

- Floating Conveyor System for the Large Glass Sheet,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 22, No. 4, pp. 635-642.
3. S. C. Hwang, D. H. Jeon and D. W. Lee, 2002, “The Couplings for ball-screw on high precision positioning,” Proceeding of KSMTI, pp. 161-166.
 4. I. H. Moon and Y. K. Hwang, 2006, “Evaluation of a Wafer Transportation Speed for Propulsion Nozzle Array on Air Levitation System,” Journal of the KSME, Vol. 30, No. 4, pp. 306-313.
 5. J. H. Hwang, C. H. Park, C. K. Song and J. C. Kim, 2000, “A Study on the Positioning Characteristic of Aerostatic Stage,” Proceeding of KSPE, pp. 668-671.
 6. I. H. Moon, Y. K. Hwang, S. J. Cho and D. K. Kim, 2003, “A Study on the Effect of Friction Coefficient of Semiconductor Wafer Transportation for Air Levitation System,” Proceeding of KSPE, p. 196.
 7. H. S. Chang, Y. J. Park, Y. S. Chang, J. B. Choi, Y. J. Kim, P. H. Chun and J. Y. Kong, 2006, “CFD Analysis for Concept Design of Air Levitation Transport System,” Proceeding of KSPE, pp. 81-82.
 8. E. K. Lee, N. S. Kim, M. D. Dai and C. W. Kim, 2010, “FSI Analysis of Air-turn-Bar System in Roll-to-Roll Continues Process,” Proceeding of KSPE, pp. 269-270.