

# 풍동실험을 위한 자기 부상 비접촉식 밸런스 Magnetic Suspension and Balance System for Wind Tunnel Tests

한재홍 이동규 이준성 정상준\*  
Jae-Hung Han Dong-Kyu Lee Jun-Seong Lee Sang-Joon Chung\*  
한국과학기술원 항공우주공학과, 대전 305-701  
\*국방과학연구소 제7기술본부  
042-350-3723, jaehunghan@kaist.edu

## Abstract

Wind tunnel test are often employed to measure aerodynamic forces and moments acting on an aerodynamic body or to observe air flow around the body. The aerodynamic body should be fixed at the center of the test section of the wind tunnel during tests and some kinds of mechanical supports are generally used for this purpose. But these mechanical supports disturb air flow around the aerodynamic body, MSBSs(Magnetic Suspension and Balance Systems) can be proper solutions to eliminate disturbances caused by mechanical supports. This paper introduces key technologies for development and construction of an MSBS as a contactless balance and actuator and the state of the art of MSBS.

**Keywords :** Magnetic Suspension, Noncontact Type Balance, MSBS, Wind Tunnel Test

## 1. 서 론

풍동실험이란 여러가지 형상을 갖는 실험 대상체 주위에 인위적으로 공기의 흐름을 발생시키고 이에 따른 실험 대상체 주변의 변화를 관찰하는 실험으로, 지주(支柱) 등의 지지장치를 사용해 실험 대상체의 각 축 방향으로 작용하는 힘을 측정할 수 있다. 하지만 지주와 같은 장치들은 풍동의 측정부 내부의 공기 흐름을 교란시켜 높은 정밀도의 실험 결과를 얻는데 방해가 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 와이어 밸런스 등을 이용하기도 하지만[1], 실험 대상체 주변에 여러 가닥의 와이어가 설치되어야만 하기 때문에 이와 관련된 문제를 완벽하게 해결하지는 못한다. 또한 초음속 풍동의 경우에는 지지장치에 의해 발생하는 충격파가 실험 대상체 주변에 영향을 미쳐서 실험의 정확도를 떨어뜨리는 원인이 되기도 한다. 한편 대부분의 풍동 실험의 경우 실험 대상체의 다양한 자세각에 대해 반복적인 실험을 수행하게 되는데 일반적인 지지장치를 사용한다면 수많은 경우의 자세각 조합을 수동적인 방법으로 변경해야 하며 이는 실험의 효율과 정확도를 떨어뜨리는 주된 요인이다. 실험 대상체의 자세각을 편리하게 변경하는 방법으로 HARS(High Attitude Robotic Strut)등을 이용하기도 하지만, 이 경우 지지장치에 의한 간섭효과가 커지게 된다.

이처럼 기존의 지지장치를 사용하여 풍동실험을 수행할 경우 높은 정밀도의 실험 결과를 얻기 어려운 점이 있으며, 이와 같이 풍동실험시 지지장치에 의한 영향을

차단하기 위해 고안된 것이 자기 부상 비접촉식 밸런스(이하 MSBS: Magnetic Suspension and Balance System)이다. MSBS는 자화된 실험 대상체 혹은 영구 자석이 내장된 실험대상체에 전자석을 이용한 자기력을 작용시켜 실험 대상체를 공중에 부양시키는 장치이다. 따라서 전자석에 의해 발생하는 자기장을 제어하여 실험 대상체의 움직임을 조종할 수 있으며, 각 축 방향 제어 명령에 따라 전자석에 입력되는 전류의 양을 측정하면 각 축 방향의 힘을 측정할 수 있다[2]. 이러한 MSBS를 이용하여 풍동실험을 수행하면 지지장치에 의한 영향을 차단한 상태에서 실험 대상체의 자세각을 다양하게 변화시키며 작용하는 공력을 정밀하게 측정하는 것이 가능하게 된다. 본 연구에서는 풍동실험에 적용 가능한 비접촉식 작동기이자 밸런스인 MSBS를 개발하고 제작하기 위해 가장 중요한 기술인 전자석 관련 기술, 위치 검출 센서 관련 기술에 대해 조사하였고, 실제 풍동실험에서 MSBS가 적용된 사례를 살펴보았다.

## 2. MSBS 개발 및 제작을 위한 기술 분석

### 가. 전자석 관련 기술

MSBS는 전자석에서 발생하는 자기장을 이용하여 자화된 혹은 영구자석이 내장된 실험 대상체의 위치 및 자세각을 제어할 수 있다. 따라서 전자석 관련 기술은 MSBS를 개발 및 제작하기 위해 가장 중요한 기술 중 하나이다. Massachusetts Institute of Technology의 Eugene E. Covert는 실험 대상체의 종류 및 전자석 배열에 따른 MSBS의 종류를 체계적으로 분류하였으며

[3], 경험적으로 대칭적인 코일의 배치가 실험 대상체 주변에 형성되는 자기장의 선형성을 증가시켜서 위치 및 자세각 제어에 유리하다고 알려져 있다[4]. 그림 1은 각각 NASA Langley Center의 13-inch MSBS와 NAL의 60cm×60cm MSBS의 전자석 배열을 나타내는 개형도이다.

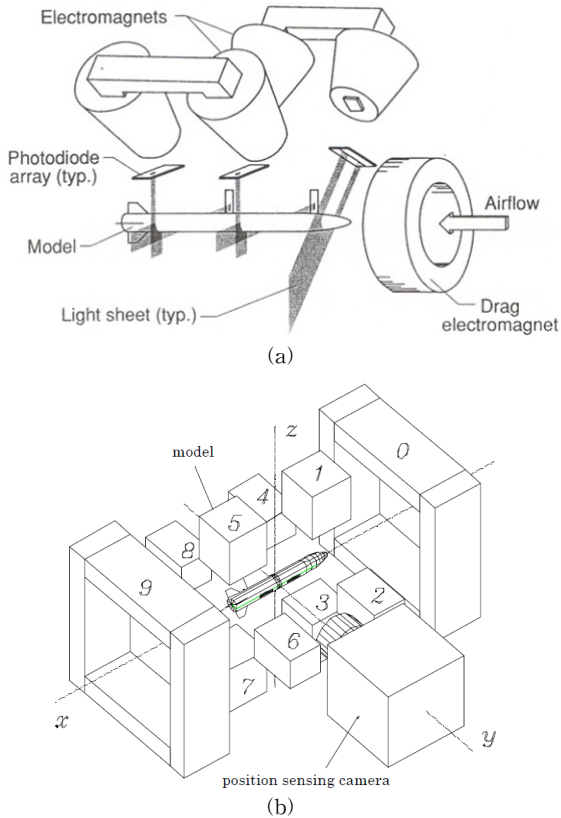


그림 1. Electromagnet and sensor arrangement of 13-inch MSBS in NASA Langley Center [5](a) and 60cm×60cm MSBS in NAL [6](b)

이와 같은 MSBS의 성능 및 효율을 높이기 위해서는 전자석의 효율을 높여야 하며 이를 위해 MSBS에 초전도체 소재의 전자석을 사용하고자 하는 연구도 진행되었다. University of Virginia의 R. R. Humphris 등은 초전도체를 적용한 초음속 풍동의 성능 평가를 수행하였다. 마하 3의 유동에 노출되어 있는 단순한 형상의 실험 대상체에 작용하는 3방향 공력을 측정하기 위해 초전도체 소재의 전자석이 사용되었는데, 초전도체 소재의 전자석을 사용함으로써 시간이 MSBS 구동 여부를 결정하는 주요 변수가 되었다. 초전도체를 적용한 초음속 풍동 실험을 수행하기에 앞서 액화 헬륨을 효율적으로 주입하기 위해 36시간동안 약 800리터의 액화질소를 사용하여 precooling을 수행해야 하며, 이후 액화 헬륨을 주입하기 시작해서부터 실험이 가능할 때까지 약 4시간이 소요된다. 첫 실험을 시작하고부터 추가적인 액화 헬륨의 주입 없이 8시간동안 실험이 가능하며, 이틀동안 실험을 할 경우 소모되는 액화 헬륨은 약 40

0~500리터이고 실험 가능한 시간은 12~16시간이다. 따라서 장비의 경제적인 사용을 위해 실험계획을 좀 더 세밀하게 수립해야 한다고 보고하였다[7].

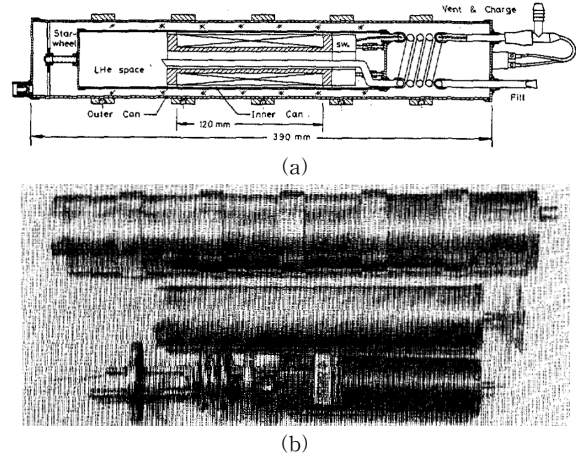


그림 2. Schematic of prototype superconducting model core(a) and components of prototype superconducting model core(b) [5]

R. W. Boom 등은 NASA Langley Research Center의 2.4m×2.4m 풍동에 적용하기 위해 실험 대상체 내부에 초전도체 소재의 전자석을 삽입하는 연구를 수행하였다. 실제로 축소 모형을 제작(그림 2)하여 University of Southampton에 설치된 소형 MSBS에 적용해 보았으며 실험 결과 실험 대상체 내부에 초전도체 소재의 전자석을 삽입할 경우 영구자석을 삽입했을 때와 비교해서 소모되는 전류량은 약 44%, 에너지는 약 47% 감소하는 것을 확인하였고 감소된 전류량 및 에너지 만큼의 추가적인 구속력이 작용하는 것이 가능함을 실험을 통해 확인하였다[5].

한편 일본에서도 초전도체 소재의 전자석을 활용한 MSBS에 관한 연구가 진행되었다. NAL의 H. Sawada 등은 높은 레이놀즈 영역의 초음속 풍동에 사용하기 위해 기존의 60cm×60cm MSBS의 크기를 증가시킨 새로운 MSBS를 설계하였고, 이러한 영역에서의 구속력 확보를 위해 실험 대상체 내부에 초전도체 소재의 전자석을 탑재하고자 하였다. 이를 위해 설계된 초전도체 소재의 전자석은 80kA/m<sup>2</sup>의 전류 밀도를 가지며 길이 900mm, 지름 74mm의 원기둥 형태를 띄고 있다. 설계된 초전도체 소재 전자석의 가능성을 확인해 보기 위해 길이 300mm, 전류밀도 45kA/m<sup>2</sup>의 축소 모형을 설계 및 제작하였다[8].

나. 위치 검출 센서 관련 기술

MSBS의 최대 장점은 물리적인 접촉 없이 실험 대상체를 공중에 고정시킬 수 있다는 점이기 때문에 실험 대상체의 위치 및 자세각을 검출하는 센서의 경우 대부분 그림 3과 같이 광학적인 방법을 이용한다.

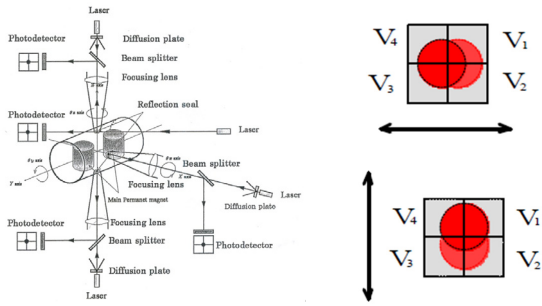


그림 3. Position and attitude measurement method for FIT MSBS using multi-element photodiode [9]

그림 3은 FIT(Fukuoka Institute of Technology)에서 개발한 MSBS의 실험 대상체 위치 검출 방법을 나타낸다. 실험 대상체에 포인트 레이저를 비추면 반사된 빛을 포토다이오드를 이용하여 검출하는 방식을 통해 실험대상체의 위치와 자세각을 측정하게 된다. 이때 사용된 포토다이오드는 총 4개의 구성성분으로 이루어져 있고 각 구성성분은 입력되는 빛의 세기에 비례하는 전압을 출력하며 이들 출력 신호의 조합으로 실험 대상체가 움직인 정도를 측정할 수 있다[9].

한편 Old Dominion University의 C. P. Britcher는 초고레이놀즈수(Ultra High Reynolds Number) 영역에서의 풍동실험에 관한 연구를 수행하면서 이 연구를 통해 초고레이놀즈수 영역에서의 풍동실험에 MSBS를 적용하기 위해 고려해야 할 점들을 정리하였다. Britcher가 제안한 풍동실험은 대부분 극저온의 헬륨을 이용한 레이놀즈수  $4 \times 10^8$  영역에서의 실험이며 이러한 조건에서 MSBS를 적용하기 위해서 고려해야 할 중요한 요소 중 하나로 실험 대상체의 위치 및 자세각을 검출하는 센서를 꼽았다. 위에서 언급한 바와 같이 일반적으로 MSBS에서는 위치 검출 센서로 광학적인 방법을 이용하지만 극저온의 헬륨을 이용한 실험에서는 굴절률 및 산란 문제로 광학적 방법을 통한 계측이 어렵게 된다. 때문에 이와 같이 광학적 방법을 통한 위치검출이 어려운 조건에서는 EPS(Electromagnetic Position Sensor)를 사용할 것을 권장하였다.

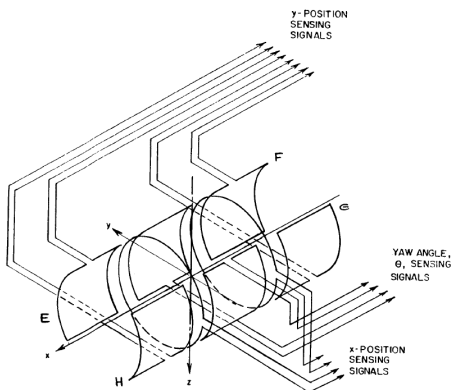


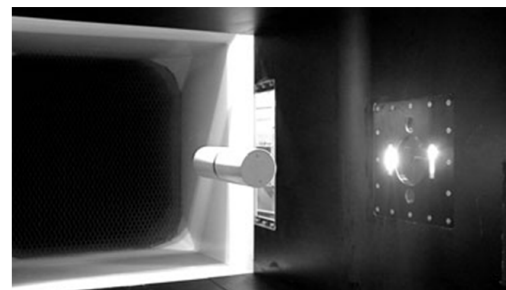
그림 4. Three degree of freedom EPS(Electromagnetic Position Sensor) coil arrangement [10]

EPS는 1966년 V. V. Basmajian *et al.*에 의해서 제안된 센서로 그림 4와 같이 풍동의 시험부 주변에 설치된 Helmholtz 코일의 조합으로 이루어져 있는데, 자화된 실험 대상체 혹은 실험 대상체 내부에 삽입된 영구 자석의 움직임에 의해 발생하는 전류를 측정하고 이를 통해 실험 대상체의 위치 및 자세각을 유추해 내는 기술이다. 기존의 광학적인 방법을 사용할 경우 측정 영역이 제한적이라는 단점이 있는 반면에 EPS를 사용하면 측정 영역이 훨씬 넓어지는 효과를 얻게 된다. 하지만 EPS가 실험 대상체의 움직임 뿐만 아니라 MSBS의 전자석에 의한 영향도 받게 되어 원하는 신호를 얻어내기 위한 필터를 설계하는데 어려움이 따르고 정확도 또한 광학적인 방법에 미치지 않는다는 단점이 있다[10].

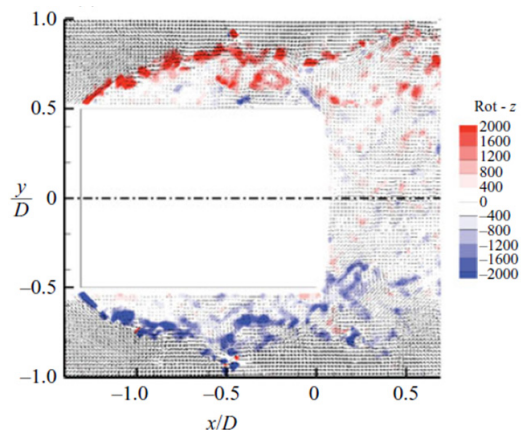
### 3. 풍동실험에서의 MSBS 적용 사례

#### 가. 유동장 가시화 실험

H. Higuchi 등은, NAL의 60cm×60cm MSBS 풍동을 이용하여 풍동 방향으로 정렬된 원기둥 주변의 유동 흐름을 관찰하기 위해 PIV를 적용한 실험을 수행하였다. 기존의 풍동실험과 달리 MSBS를 이용한 풍동 실험에서는 지지장치에 의한 교란이 없기 때문에 실험 대상체 주변의 유동 흐름을 정확히 관찰할 수 있었고 실험을 통해 원기둥의 fineness ratio에 따른 shear flow reattachment 현상을 가시화하였다[11].



(a)



(b)

그림 5. Experimental setup of shear flow reattachment visualization using 60cm×60cm MSBS in NAL(a), Instantaneous vorticity and velocity field(b) [11]

나. 공력 측정 실험

NASA Langley Research Center의 David A. Dress는 MSBS를 활용하여 낮은 레이놀즈수 영역에서 회전 타원체에 작용하는 항력계수를 측정하는 실험을 수행하였다. Dress는 레이놀즈수 변화에 따른 항력계수 변화를 관찰하기 위한 실험을 수행하였는데, 실험 결과 레이놀즈수가 증가함에 따라 항력계수가 약간 감소하는 것이 관찰되었으며 실험 대상체의 뒤편에 가상 지지대를 설치하고 같은 실험을 반복 수행하여 가상 지지대의 영향으로 인해 실험 대상체의 항력계수가 최대 10% 작게 측정되는 것을 확인하였다. Dress는 항력계수가 작게 측정된 원인으로 크게 두 가지 추측을 하였는데, 먼저 가상 지지대에 의해 실험 대상체의 fineness ratio가 증가한 것과 같은 효과를 냈을 수도 있다고 예상했으며, 또 한 가지 원인은 가상 지지대에 의해 실험 대상체 뒤쪽의 박리현상이 흐트러져서 압력 회복이 일어났을 것으로 추측하였다[12].

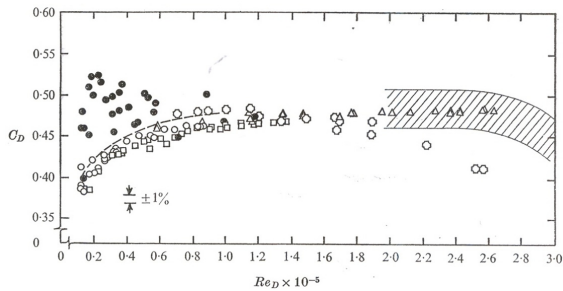


그림 6. Drag coefficient measurement due to Re using MSBS, Present data: ○, D=0.75 in.; □, D=1.00 in.; △, D=1.50 in.; ●, Roos & Willmarth (1971); ---, ballistic range, Bailey & Hiatt (1971) and Gain & Lawrence (1968); /////, free flight, Millikan & Klein (1933) [13]

다. 압력분포 측정 실험

H. Higuchi 등은 세계 최초로 지지장치의 영향 없이 원기둥 주변의 압력 분포를 측정하는데 성공하였다. 실험 대상체 내부에 압력을 측정하여 무선으로 전송하는 무선 압력 측정 장치를 삽입하였으며 MSBS를 이용한 풍동실험에 적용하여 원기둥 주변의 압력분포 정보를 얻을 수 있었다. 이때 사용된 무선 압력 측정 장치는 JAXA와 NEC(社)의 공동 연구에 의해 개발된 것으로 12.5kHz의 샘플링 주파수를 가지며 12-bit 정밀도의 A/D 변환기가 내장되어 있다[13].

4. 결론

MSBS는 비접촉식 작동기이자 밸런스이기 때문에 이를 풍동실험에 적용하면 어떠한 물리적 접촉 없이 실험 대상체를 풍동 시험부 내에 고정하는 것이 가능하고, 동시에 실험 대상체에 작용하는 공력을 측정하는 것이

가능하다. 현재까지 많은 연구자들이 MSBS를 풍동실험에 적용하고자 하였고, 성능 향상을 위해 초전도체 소재의 전자석에 관련된 연구, 전원공급 시스템, 위치 검출 센서 및 제어기법 등 MSBS에 관련된 연구가 광범위하게 진행되었다. 하지만 대부분의 경우 MSBS를 사용함으로써 지지장치에 의한 간섭효과를 차단하는데 주목하고 있으며, 이를 바탕으로 구, 원기둥, 원뿔과 같이 간단한 형상의 물체에 작용하는 공력을 측정하거나 PIV 등의 방법을 통해 유동장 가시화 실험을 수행하고 있다. 비접촉식 작동기인 MSBS의 장점을 더욱 잘 활용한다면 움직임이 큰 날개에 작용하는 비정상 공력을 측정하는 등 그 활용 가능성이 더욱 커질 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소(계약번호 UD090082JD)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 제 1, 2 저자는 두뇌한국(BK21) 사업의 대학원생 지원 프로그램에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 이영빈, 김우례, 김규홍, 김종암, 한국항공우주학회지, 제34권, 제11호, pp.9-17 (2006).  
 [2] Y. Kawamura, *ながれ*, vol.22, pp.309-315 (2003).  
 [3] E. E. Covert, IEEE aerospace and electronic systems magazine, vol.3, no.5, pp.14-22 (1988).  
 [4] 이 해, ReSeat 모니터링 분석 보고서, pp.1-7 (2006).  
 [5] M. H. Tuttle, Deborah L. Moore, Robert A. Kilgore, NASA Technical Memorandum 4318 (1991).  
 [6] H. Sawasa, T. Kohno, T. Kunimasu, Fifth International Symposium on Magnetic Suspension Technology, pp.659-674 (2000).  
 [7] R. R. Humphris, R. N. Zapata, C. H. Bankard, IEEE Transactions on Magnetics, vol.MAG-11, no.2, pp.598-601 (1975).  
 [8] H. Sawada, T. Kohno, T. Kunimasu, the Fourth International Symposium on Magnetic Suspension Technology, pp.425-439 (1998).  
 [9] K. Torii, Y. Kawamura, Nihon Kikai Gakkai Nenji Taikai Koen Ronbunshu, vol.2004, no.5, pp.241-242 (2004).  
 [10] V. V. Basmajian, A. b. copeland, T. stephens, NASA Technical Report, NASA-CR-66233 (1966).  
 [11] H. Higuchi, P. van Langen, H. Sawada, C. E. Tinney, Journal of Fluids and Structures, vol.22, pp.949-959 (2006).  
 [12] D. A. Dress, Journal of Aircraft, vol.27, no.6, pp.523-528 (1990).  
 [13] H. Higuchi, H. Sawada, H. Kato, Journal of Fluid Mechanics, vol.596, pp.49-52 (2008).



군사과학기술의 녹색성장!



# 한국군사과학기술학회 2010년 종합학술대회



유체공학 부문



[ 유체공학 부문 ]

제 목	저 자	페이지
방빙 기능을 위한 다기능 대기 자료 센서 히터 설계	박영민, 최인호, 김성찬, 황인희, 이대성 (한국항공우주연구원)	1483
연소식 공기가열기 개발과 성능평가	이정민, 강경택, 이규준, 임진식(국과연)	1487
무인항공기 환경제어계통 시스템 해석	홍재표, 문우용[삼성탈레스(주)], 이인우, 정유석[(주)대한항공], 박성순, 고한영(국과연)	1491
풍동실험을 위한 자기 부상 비접촉식 밸런스	한재홍, 이동규, 이준성(KAIST), 정상준(국과연)	1495
공기흡입식 비행체의 흡입구에서 발생하는 분출 항력에 대한 고찰	김민규, 정석영, 변우식, 이광섭(국과연)	1499
전산해석기법을 이용한 발사관 전방부의 단열도로 적용에 관한 연구	박철용, 권기영, 김성일, 오정택 [두산DST(주)], 김 룡, 안진수(국과연)	1503
만타형 UAV의 조종성능추정을 위한 구속모형시험에 관한 연구	김형동, 천세종, 정재훈, 이창훈, 이성중, 김시홍, 김희수, 이승건(부산대), 문병영(군산대)	1507
열진공 시험을 통한 탑재임무장비의 열설계 검증	이민규, 홍주성[삼성탈레스(주)], 신소민, 오현웅(국과연)	1511
유도 미사일의 사거리 민감도 연구	양영록, 정성기, 강태우, 조태환, 명노신 (경상대)	1515
서울대 초음속 풍동의 마하수 2.0과 3.8에서의 성능 평가 및 검증	이영빈, 이재호, 이준우, 김규홍(서울대), 최종호, 윤현걸(국과연)	1519
120MM 자주 박격포 조명탄용 낙하산 설계 및 해석	김선희, 황의창, 정현성[(주)한화]	1523
무인 위그선(U-WIG)의 설계에 관한 연구	최정규, 안병권, 김형태(충남대)	1527
양압장치 CFD 성능검증	소일호, 김아라[두산DST(주)], 권기조(부산대)	1531
항공용 포드 내부 열해석 및 실험	박정훈, 조진우, 유구현[LIG넥스원(주)]	1535
고섬광탄을 위한 아르곤 플라즈마의 수치 해석	이기태, 임창환(한국원자력연구원), 권미라, 방기복, 김대기[(주)한화], 김성식(국과연)	1538
ACM 시동 특성 분석	진상욱, 유영준, 민성기(국과연)	1540
낮은 압력에서 동작하는 소형 버터플라이밸브의 유동특성 연구	박기범, 김영진, 변영만, 최희주 [(주)퍼스텍], 백낙곤, 이재윤(국과연)	1544
항공전자장비용 냉각장치 설계	변영만, 김영진, 오광윤, 최희주[(주)퍼스텍]	1548
물 분사를 이용한 함정 추진기의 수중방사소음 저감기술 연구	안병권, 장현길, 이창섭(충남대), 한재문[(주)삼성중공업]	1551
초음속 공동유동의 압력진동 저감을 위한 보조공동의 설계 방법	이영기[(주)풍산], 신춘식, 김희동(안동대)	1555
파형유로를 갖는 마이크로채널 PCM 열교환기의 전산해석 연구	유영준, 오창목, 민성기(국과연)	1559

제 목	저 자	페이지
헬리콥터 발사 유도탄의 초기 안정성 및 화염영향 수치해석	강경태, 이광섭(국과연), 김유진, 권장혁(KAIST)	1563
발사체의 동안정 미계수 계산을 위한 정상 및 비정상 해법 비교연구	박수형(건국대), 허기훈, 이광섭(국과연)	1567
플래핑 날개의 구조적 유연성이 공력특성에 미치는 영향	이근배, 김진호, 홍우람, 김종암(서울대)	1571
수중에서 진동하는 2차원 튜브구조물의 유체부가질량	이희남, 김기희(순천대)	1575
알루미나 입자를 고려한 발사체의 추력변화 연구	이준우, 김재관, 김규홍(서울대)	1577
대형 환경시험조 내의 복합무기체계 유동 분석을 위한 수치해석 연구	김성대, 유성열, 김철주, 고한서(성균관대), 백상화, 이정용(국과연), 박소진(충남대)	1581