

항해자료기록기 캡슐의 극한환경시험 해석 및 시험에 관한 연구

이병호[†] · 이석규¹ · 박석환¹ · 최지호¹

(원고접수일 : 2010년 8월 25일, 원고수정일 : 2010년 10월 19일, 심사완료일 : 2010년 11월 16일)

Crash survival analysis and tests for the capsule of voyage data recorder

Byoung-Ho Lee[†] · Sock-Kyu Lee¹ · Suk-Hwan Park¹ · Ji-Ho Choi¹

요 약 : 항해자료기록기(VDR) 캡슐은 항해사고와 같은 극한환경에서 저장된 정보를 안전하고 재사용이 가능한 형태로 보존하는 것을 목적으로 한다.

본 연구에서는 VDR 캡슐에 대하여 관통저항력과 고온 및 저온내화의 극한환경시험에 대한 구조 및 방열측면의 모델링, 해석, 실험을 통한 검증에 대하여 기술하였다. 특히 관통시험에서 캡슐을 보호하는 캡슐하우징의 두께에 따른 영향성을 LS-DYNA를 이용한 모델링과 해석을 통하여 검토하였으며, 고온 및 저온내화시험에서 VDR 캡슐을 보호하기 위해 사용되는 상변화물질과 단열재의 체적비에 따른 열적특성을 Icepak을 이용한 열해석을 통하여 수행하였다. 또한 실험을 통하여 VDR 캡슐의 구조 및 열적신뢰성을 검증하였다.

주제어 : 항해자료기록기, 캡슐(자료보호모듈), 극한환경시험

Abstract: The purpose of VDR capsule is to maintain a stored information securely and retrievably in the extreme environment like voyage incident. This study shows the modellings, the analyses and the experiments of the survivability test of penetration, high and low temperature fire. The capsule housing is used to protect capsule against penetration and the influences of its thickness are studied by the modelling and analysis of penetration using LS-DYNA. The phase change material and thermal insulation material are used to protect capsule against high and low temperature fire test. The thermal characteristics of various volume ratios of phase change material to thermal insulation material were conducted. Also the tests were conducted to confirm the structural and thermal reliability.

Key words: Voyage data recorder, Capsule (Crash Protected-memory Module), Crash survivability test

1. 서 론

항해자료기록기(VDR, Voyage Data Recorder)는 항해데이터, 엔진의 상태, 운항정보, 기상정보 등의 정보를 저장하여 해상사고 시 사고분석을 위하여 사용된다. 동일한 해난사고예방을 위하여 Solar 5장에 정의된 선박에 설치하게 되어 있다.

특히 본 논문에서 다루고 있는 캡슐은 해양사고와 같은 극한환경에서도 저장된 정보를 안전하고 재생가능하게 보존하는 기능을 담당하는 구성품이다.

국내의 개발현황은 LIG넥스원에서 2006년에 소형 항공기용 블랙박스를 처음 개발하여, 2009년에 KUH헬기에 탑재하였으며, 현재 무인항공기용 블

[†] 교신저자(LIG넥스원 기계연구센터, E-mail: bhleebe@lignex1.com, Tel: 031-288-9222)

¹ LIG넥스원 기계연구센터

랙박스, VDR을 개발 중에 있다.

본 연구에서는 VDR 캡슐에 대하여 관통저항력과 고온 및 저온내화의 극한환경시험에 대한 모델링, 해석과 실험을 실시하였다. 특히 캡슐하우징의 두께에 따른 관통저항력시험에 대한 영향성과 상변화물질의 체적비에 따른 고온 및 저온내화시험에 대한 열적특성을 분석하고 시험을 통해 검증한 내용에 대해서도 기술하였다.

2. VDR 및 극한환경시험개요

2.1 VDR의 구조

현재 LIG넥스원에서 개발 중인 VDR은 **Figure 1**과 같으며 캡슐, 제어/전원부(Controller/Power), 항해사고시 위치추적을 가능하게 해주는 음향신호를 발생하는 수중신호장치(Beacon), 캡슐을 쉽게 분리가능하게 하는 클램프로 구성된다.

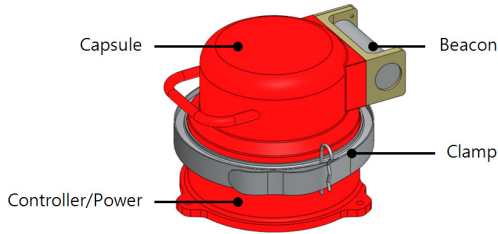


Figure 1: VDR

극한환경시험 대상품인 캡슐은 **Figure 2**와 같으며 하우징, 단열재, 상변화물질, 메모리보드로 구성되며, 하우징은 관통, 충격 등의 극한환경조건을 고려하여 고강도합금을 사용하며, 단열재는 외부열원을 1차로 차단하며, 상변화물질은 고체에서 액체로, 액체에서 기체로의 상변화시 잠열을 이용하여 외부에서 유입된 열원을 흡수하여 메모리보드를 보호하는 기능을 한다.

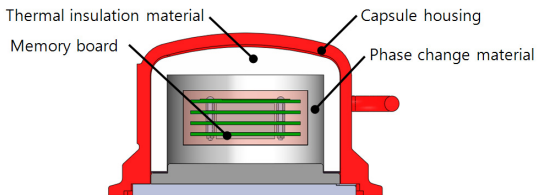


Figure 2: VDR Capsule

2.2 극한환경시험 개요

VDR 캡슐의 극한환경시험(Crash Survival Tests)은 IEC 61996-1(1)에 규정되어 있으며, **Table 1**의 5가지 시험으로 구성되며, 해양사고의 상황을 고려하여 **Table 2**의 시험순서에 따라 수행한다.

Table 1: Crash Survival Tests

Test	Specifications
Shock	Half Sine 50g 11ms
Penetration	250Kg weight dropped from a height of 3m
Low temp. fire test	10hr at 260℃
High temp. fire test	1hr at 1100℃
Deep-sea immersion	1.Sea water immersion at a pressure of 60MPa (equivalent to a depth of 6000m) for 30 days 2.Sea water immersion at a depth of 3m for 30 days

Table 1: Crash Survival Test Sequence

Capsule	Test sequence
#1	Shock → Penetration → Low Temp. Fire Test → Deep-Sea Immersion
#2	Shock → Penetration → High Temp. Fire Test → Deep-Sea Immersion

3. 실험방법 및 장치

3.1 관통저항력시험

IEC 61996-1에 규정되어 있는 관통저항력시험은 **Figure 3**과 같이 3m 높이에서 핀(직경 100mm, 길이 40mm)이 장착된 250kg의 부하(Weight)를 캡슐의 가장 취약한 부위로 낙하시켜 관통 저항력을 검증하는 시험이며, 캡슐은 모래 위 6.35mm두께의 철판(Steel Plate) 위에 놓이며, 최소 0.06m²의 넓이와 0.5m의 깊이를 갖는 모래 중앙에 위치한다. 모래는 **Table 3**의 입도분포규격을 만족하며, 모래 15ℓ 당 물 1ℓ의 비율로 수분을 유지해야한다.

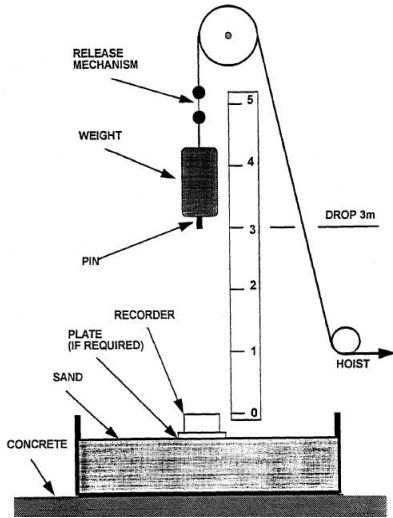


Figure 3: Penetration apparatus

Table 2: Sand fineness specification

% by Mass	Particle size(Micrometers)
1 Max	Greater than 710
2 ~ 4	500 ~ 710
10 ~ 14	355 ~ 500
25 ~ 35	250 ~ 355
25 ~ 35	180 ~ 250
15 ~ 23	125 ~ 180
4 ~ 7	90 ~ 125
2 Max	Less than 90



Figure 4: Penetration apparatus

관통저항력시험은 항공우주연구원에 설치되어 있는 Figure 4의 관통저항력시험장치를 이용하였으며, 캡슐은 Figure 5와 같이 정자세와 측면으로 고정한 후 시험을 수행하였다.

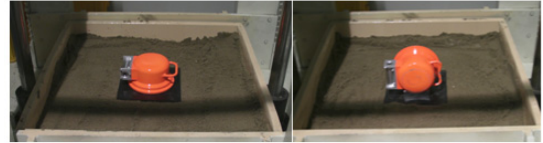


Figure 5: Capsule in penetration test

3.2 고온내화시험

IEC 61996-1에 규정되어 있는 고온내화시험은 Figure 6과 같은 시험장치에 캡슐을 설치하고 158kW/m²의 열용량에 1시간 연속적으로 노출하며, 시험 중 캡슐의 표면에서 25mm떨어진 곳의 측정온도는 공칭 1100℃(온도범위 950~1100℃)가 되어야 하며, 시험 후 장비는 공기 중에서 공랭한다.

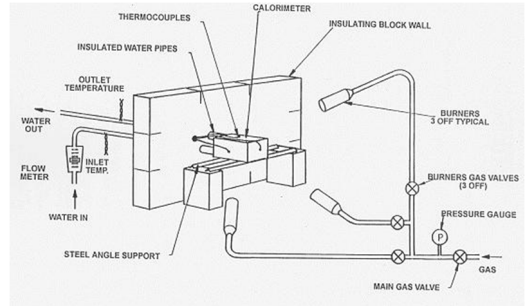


Figure 6: High temperature fire test apparatus

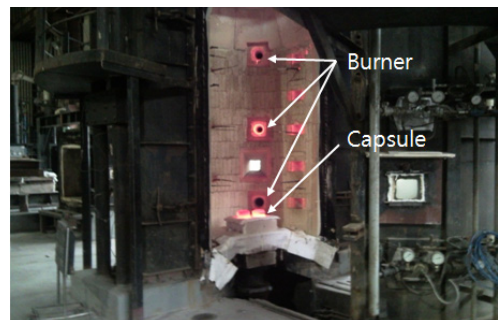


Figure 7: High temperature fire test set-up

그러나 국내에는 **Figure 6**과 같은 고온내화시험을 할 수 있는 시설이 없기 때문에, 유사한 형태의 시험을 수행할 수 있는 방제시험연구원에서 **Figure 7**의 시험장비를 이용하여 1100℃, 1시간 기준을 적용한 고온시험을 실시하였다.

3.3 저온내화시험

저온내화시험은 캡슐을 260℃에 10시간 동안 유지하는 것으로 IEC 61996-1에 규정되어 있으며 **Figure 8**과 같이 오븐에서 260℃ 10시간 시험을 수행하였다.

고온 및 저온내화시험 시 캡슐내부의 메모리보드를 **Figure 9**에 나타냈으며, 온도센서와 온도테이프를 부착하여 메모리보드의 온도를 측정하였다.



Figure 8: Low temp. fire test set-up

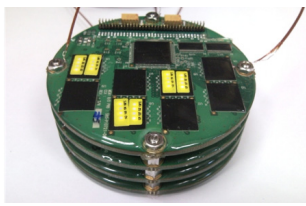


Figure 9: Memory board

4. 수치해석방법

4.1 관통저항력 해석

관통저항력시험은 매우 짧은 시간의 동적인 현상을 수반하며 구조물에 파손 및 대변형을 유발한다. 핀의 충격에 의한 캡슐의 관통해석은 자동차와 선박의 충돌해석에 많이 사용하는 비선형 충돌 및 대변형 해석 프로그램인 LS-DYNA[2]를 사용하여 수행하였다.

유한해석모델은 **Figure 10**과 같이 대칭모델로 구성하였으며, 부하(Weight)는 점질량 요소로 분

포시켰고, 핀은 강제요소로 모델링하였다. 캡슐의 크기는 직경 145mm, 높이 100mm, 두께 6.5mm이다.

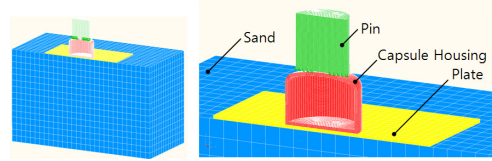


Figure 10: Finite Element Model

해석에 적용된 핀, 플레이트, 캡슐하우징의 물성치는 캡슐의 관통여부를 결정하는 중요한 부분이며, **Table 4**에 나타낸 바와 같다. 핀과 플레이트는 Ryabov 등[3]의 응력-변형률 곡선을 참고하였고, 캡슐하우징은 일반티타늄(Ti-6Al-4V)의 응력-변형률 곡선을 참고하였다.

Table 4: Properties for capsule housing, pin and plate

Property	Capsule housing	Plate	Pin
Young's modulus(GPa)	170	200	200
Poisson's Ratio	0.3	0.3	0.3
Yield strength(MPa)	1100	270	1200

모래의 응력-변형률 곡선은 모래조건 규격에 따른 모래입도분포와 모래의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구[4] 및 항공기용 블랙박스의 관통저항력 해석 시뮬레이션[5] 연구결과를 참조하였다.

경계조건은 모래의 최외곽 부위는 모든 자유도를 구속하였으며 대칭부위는 단면의 수직방향 변위만 구속하였다. 그리고 모든 요소에 중력가속도 9.8m/s²를 적용하였으며, 부하(Weight)의 초기 속도는 3m 높이에서의 자유낙하를 고려하여 7.7m/s를 적용하였다. 전체모델에 대하여 접촉조건은 Automatic surface to surface을 적용하였다.

4.2 고온 및 저온 내화시험 열해석

고온 및 저온내화시험에서 메모리보드의 보호는

캡슐내의 상변화물질이 고체에서 액체로, 액체에서 기체로의 상변화시 발생하는 잠열로 외부에서 유입된 열원을 흡수함으로써 가능해진다.

VDR 캡슐의 열해석은 **Figure 11**과 같이 외부에서는 복사 및 대류, 내부에서는 전도 및 상변화물질의 잠열로 모델링하여 FLUENT Solver를 사용한 Icepak12.0 S/W를 이용하여 수행하였다.

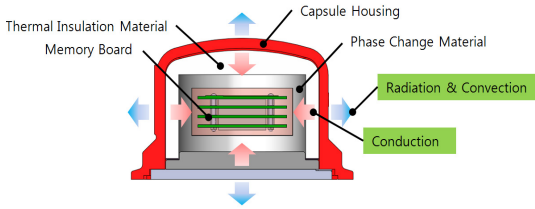


Figure 11: Thermal modelling of capsule

상변화물질의 열적특성은 Icepak12.0에서는 직접 모사하기가 어렵기 때문에 “Lumped Slope Method”[6]의 개념을 도입하여 상변화물질의 열특성을 유한한 온도범위 내에서 잠열을 고려한 등가비열을 구하여 열해석을 수행하였으며, 등가비열은 식 (1)과 같이 같다.

$$C_{eq} = C + \frac{h}{\Delta T} \quad (1)$$

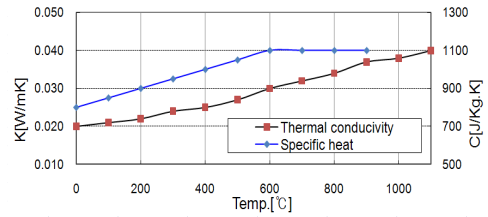
여기서

C_{eq} : 등가비열 [KJ/KgK], C : 비열 [KJ/KgK]
 h : 잠열 [KJ/Kg] ΔT : $T_2 - T_1$

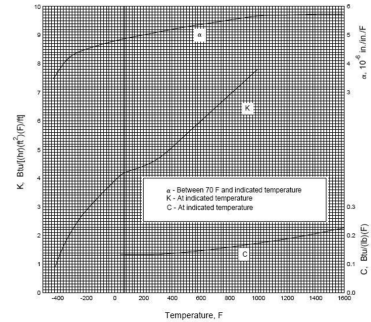
열해석에 사용된 상변화물질의 열적물성치는 **Table 5**와 같고, 단열재 및 캡슐하우징의 열적물성치는 **Figure 12**와 같으며, 온도에 따른 변화값을 사용하였다.

Table 5: Thermal properties for phase change material

Density(ρ)	7903.0 Kg/m ³
Latent heat(h)	822.79 KJ/Kg
Specific heat(C_p)	1214.3 J/KgK
Heat conductivity(K)	1.6 W/mk



(a) Thermal insulation



(b) Capsule housing

Figure 12: Thermal properties

5. 해석 및 실험결과

5.1 하우징두께 영향

캡슐하우징 두께를 0.5mm 간격으로 변화시키며 LS-DYNA로 해석을 수행한 결과는 **Table 6**이며, **Figure 13**의 티타늄의 응력변형률 곡선[7]과 비교하면, 관통저항력시험을 만족하는 최소두께는 6.5mm임을 예상할 수 있다.

Table 6: Summary of penetration analysis

Capsule housing thickness(mm)	Thickness deformation(mm)	Effective strain
7.5	0.14	0.1
7.0	0.21	0.13
6.5	0.26	0.17
6.0	1.07	0.31
5.5	1.24	0.38

두께 6.5mm 캡슐하우징에 대하여 핀의 속도가 0이 된 t=0.025sec의 해석결과는 **Figure 14**이며 핀의 충돌부위에 최대응력집중이 발생하고 있으나

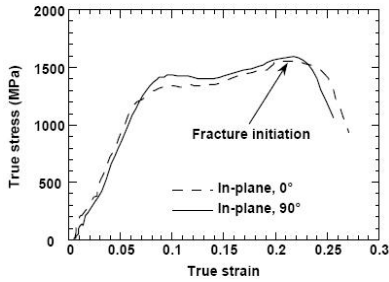


Figure 13: Stress-strain curve of titanium

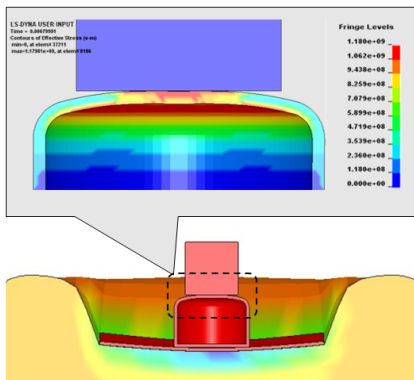


Figure 14: Contours of effective strain

있으나 캡슐 표면은 관통되지 않았으며, 모래의 깊이는 88mm의 결과를 얻었다.

두께 6.5mm인 캡슐하우징의 시험결과는 Figure 15와 같으며 핀 접촉 부위가 일부 손상되었으나, 캡슐하우징 표면은 관통되지 않았다.



Figure 15: Penetration test results

5.2 상변화물질과 단열재의 체적비 영향

Figure 16과 Figure 17은 메모리보드를 제외한 하우징 내부체적에서 상변화물질의 체적비가 20%, 30%, 40%, 50%의 경우에 대하여 Fluent Solver를 이용하여 Icepak12.0으로 수행한 고온

및 저온내화시험 해석결과이다. Figure 16의 고온해석결과는 상변화물질의 체적비가 적으면 단열재의 체적증가에 따른 전도열 저항이 커지기 때문에 온도 증가율이 낮아지고, 상변화의 시작온도 120℃까지 도달하는데 오랜 시간이 소요됨을 보여준다. Figure 17의 저온해석결과는 상변화물질의 체적비가 너무 작거나 큰 경우 10시간이 경과하기 전에 상변화물질의 상변화가 모두 이루어져 온도가 급격하게 증가함을 보여주고 30~40%의 상변화물질의 체적비가 바람직함을 알 수 있다.

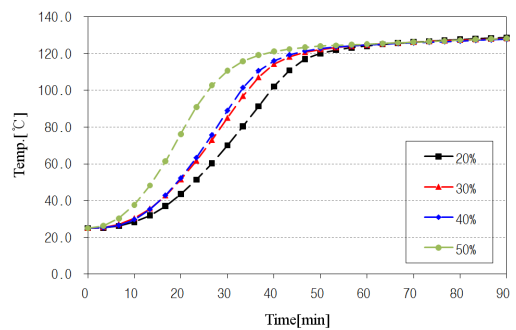


Figure 16: High temp. fire simulation

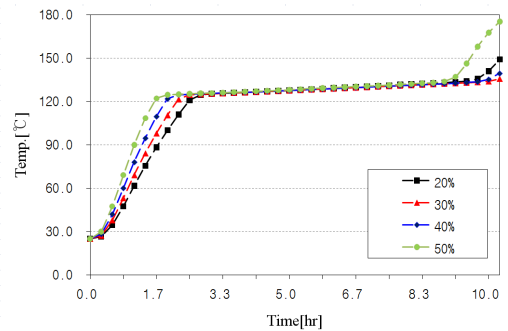
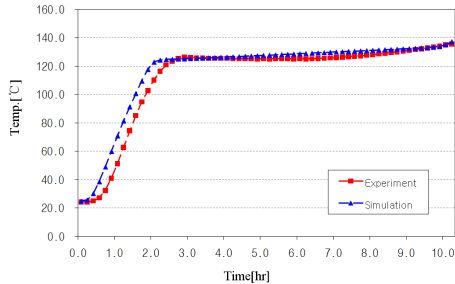


Figure 17: Low temp. fire simulation

방제연구원에서 수행한 고온내화시험과 해석결과는 Table 7과 같으며, 약 4℃의 차이를 보이고 있으며, 오븐에서 수행한 저온내화시험과 해석결과는 Figure 18과 같으며, 약 5℃의 온도 차이를 보였다. 상변화물질의 열특성을 "Lumped Slope Method"의 개념을 도입하여 수행한 열해석 결과는 실험값과 유사함을 보여주고 있다.

Table 7: High temp. simulation and test result

	Simulation	Experiment
High Temperature	135.7°C	132°C

**Figure 18:** Low temp. simulation & test result

6. 결 론

본 연구에서는 VDR 캡슐 설계에 대하여 관통, 저온 및 고온내화 극한시험을 만족하기 위한 모델링, 해석, 실험을 수행하였으며, 캡슐하우징의 두께에 따른 관통저항력에 대한 영향성과 상변화물질과 단열재의 체적비에 따른 고온 및 저온내화시험에 대한 열적특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 관통저항력시험에 대한 해석을 기술하였고, 관통규격을 만족하는 최소 두께를 LS-DYNA를 이용한 시뮬레이션을 통하여 구하였고, 실제 관통시험을 통하여 해석결과를 검증하였다.

(2) 캡슐의 단열 특성은 고온내화시험보다는 저온내화시험을 만족하기 어려움을 알 수 있으며, 상변화물질의 체적비에 따른 해석을 통하여 30~40% 일 때 열적성능이 가장 우수함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2008년도 지식경제부 지원으로 수행하는 “항공용 통합형 기록장치 개발”사업의 일환으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- [1] IEC, Maritime navigation and radio communication equipment and systems - Shipborne voyage data recorder

(VDR) - Part 1: Voyage data recorder (VDR) - Performance requirements, methods of testing and required test results, IEC, 2007.

- [2] LSTC, LS-DYNA keyword user's manual, Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [3] Alexander A. Ryabov, Vladimir I. Romanov, Sergey S. Kukanov and Dmitry V. Roschihmarov, “Numerical Simulation of a Flight Recorder's Protective Case Penetration Resistance Test”, 4th European LS-DYNA Users Conference, pp. 23-31, 2003.
- [4] 이영생, 최재원, “K₀ 상태에서 모래의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회학술발표회 논문집, 제2권, pp. 463~466, 2000.
- [5] 박종호, “항공용 블랙박스의 관통저항력 해석 시뮬레이션”, 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, pp. 291-294, 2009.
- [6] Gauche Paul and Shidore Sarang, “Thermal performance comparison of a microprocessor using phase change materials in various configurations”, IMAPS Internation Symposium on microelectronics, vol. 4339, pp. 375-380, 2000.
- [7] Donald R. Lesuer, Experimental Investigations of Material Models for Ti-6Al-4V Titanium and 2024-T3 Aluminum, Federal Aviation Administration, 2000.

저 자 소 개



이병호(李秉濤)

1989년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사), 1994년 동대학원 졸업(공학석사), 1997년 -현재 LIG넥스원 기계연구센터(수석연구원)



이석규(李錫奎)

1995년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1997년 동대학원 졸업(공학석사), 1997년 -현재 LIG넥스원 기계연구센터(수석연구원)



박석환(朴奭桓)

2004년 순천대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2006년 연세대학원 기계공학 대학원 졸업(공학석사), 2008년 -현재 LIG넥스원 기계연구센터(선임연구원)



최지호(崔至鎬)

1998년 성균관대학교 기계설계학과 졸업(공학사), 1998년 -현재 LIG넥스원 기계연구센터(수석연구원)