JANT 한국항행학회논문지
Journal of Advanced Navigation Technology

항행 및 항법

J. Adv. Navig. Technol. 27(5): 574-579, Oct. 2023

레이다 비행 모의 장치 개발 및 시험 시나리오 기반 레이다 성능 검증

Development of Radar HILS System and Verification Radar Performance Scenario-based

곽 용 길
국방과학연구소

Yong-kil Kwak
Agency for Defense Development, Daejeon 34060, Korea

[요 약]

레이다 비행시험은 다양한 조건의 표적, 클러터, 재밍을 모의하는데 많은 제약 사항이 있다. 따라서, 본 연구에서는 운용 시나리오에 따라 운용 모의 기능을 수행하는 레이다 비행 모의 장치를 개발하였다. 개발된 레이다 비행모의 장치는 레이다 빔 운용 모의, 레이다 동작 제어, 모의 신호 발생, 비행자세모의를 통해 레이다의 다양한 임무 환경을 모의한다. 레이다 비행모의 장치는 레이다 임무 환경(클러터, 재밍 등)이 포함된 모의 표적(단일, 다중) 신호를 생성하고 변조하여 RF를 통해 레이다로 송신한다. 개발된 레이다 비행모의장치와 AESA 레이다를 연동하여, 다양한 비행 시나리오를 기반으로 하여 모의 표적을 탐지하고 탐지 결과 확인을 통해 레이다 성능을 검증하였다.

[Abstract]

The radar flight test has many restrictions on simulating various targets, clutter and jamming signal. Therefore, in this study, a radar HILS system that performs a radar operation simulation function according to an operation scenario was developed. Radar HILS simulates the radar mission environment through radar beam operation simulation, radar operation control, simulated signal generation, and flight attitude simulation.. HILS generates and modulates simulated target signals(single, multiple targets) containing radar mission environments(clutter, jamming etc.) based on flight scenarios, and transmits them to AESA radar over RF. And Scenario-based radar performance was verified by detecting simulated targets and confirming detection results.

Key word : AESA radar, Clutter, Flight scenario, HILS System, RGPO.

http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.574

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 26 September 2023; **Revised** 12 October 2023
Accepted (Publication) 24 October 2023 (30 October 2023)

***Corresponding Author; Yong kil Kwak**

Tel: +82-042-821-3136
E-mail: ykkwak7@gmail.com

Ⅰ. 서 론

레이다 비행 시험은 다양한 조건의 표적, 클러터, 재밍 신호를 모의하는 데에 많은 제약 사항이 있을 뿐 아니라, 많은 인력, 시간, 비용이 필요하다. 비행 시험을 통해 알고리즘 검증이나 디버깅이 매우 어렵기 때문에 지상에서 충분히 검증한 후 비행시험을 하는 것이 효과적이다[1]. 본 연구에서는 실험실 레벨에서 비행 시나리오 기반으로 개발한 AESA(active electronically scanned array) 레이다의 성능을 검증하기 위해 레이다 비행모의 장치를 개발하였다. 레이다 비행 모의 장치는 AESA 레이다, RF 송신배열안테나, 모의신호 발생기, 송신신호 벡터변조기, 비행자세 모의기 등으로 구성되어, 레이다 모의 신호발생 및 비행자세 모의 기능을 통하여 시나리오에 따른 레이다 운용 모의 기능을 수행한다. 개발된 레이다 비행모의장치를 활용하여 AESA 레이다의 성능을 검증하기 위해 표적의 도플러 주파수, RCS(radar cross section), 클러터, 재밍신호 등을 다양하게 설정하여 시나리오를 생성하였고, 다양한 표적 및 임무 환경에서 표적을 탐지하고, 탐지 결과를 확인하였다 [2], [3].

Ⅱ. 시스템 구성 및 설계

레이다 비행모의 장치는 AESA 레이다와 연동을 통하여 AESA 레이다의 운용 모드 및 기능 모드에 대해 연동이 가능하도록 구성하며, 이를 위해 다중 표적신호 모의, 주엽/클러터 신호 모의, 재밍신호 모의, 비행자세 모의 등 관련 기능을 제공한다. 연동 구성도와 형상은 그림 1, 그림 2와 같다.

레이다 비행 모의 장치는 RF 송신 배열 안테나, RF 모의 신호발생기, 송신 신호 벡터 변조기, 통합 모의 제어기, 비행 자세 모의기, 레이다 제어 시스템, AESA 레이다와 항전 연동 모의기를 포함하여 구성되어 근전계에서 원전계 레이다 빔 운용 모의, 레이다 동작 제어, 레이다 모의 신호 발생 및 비행 자세 모의 기능을 통하여 레이다 임무 환경을 모의하며, 운용 시나리오에 따른 레이다 운용 모의 기능을 수행하는 장치이다. RF 송신배열 안테나는 수직, 수평의 이중 편파 복사 구조로 총 400개의 소자로 구성되어 있으며, RF 모의 신호 발생기로부터 모의 신호를 입력받아 AESA 레이다로 RF 신호를 방사하는 기능을 가진다. RF 모의 신호 발생기는 입력 1 채널, 출력 3 채널로 구성되며, 송수신기로부터 입력된 파형으로 표적, 클러터, 재밍 등 RF 모의신호를 발생하여 송신신호 전력분배기로 채널 별 출력하는 기능을 가지며, 송신부는 필요한 레이다 송신 파형을 RF 모의신호 발생기로 출력하고, 레이다로부터 수신된 RF 신호를 I/Q 데이터로 변환하여 신호처리기로 전송한다. 신호처리기는 송수신기로부터 수신된 I/Q 데이터를 저장한다. 송신 신호 벡터 변조기는 전력 분배기로부터 입력된 RF 모의 신호를 감쇄/위상 제어하여 RF 송신 배열 안테나로 출력한다.

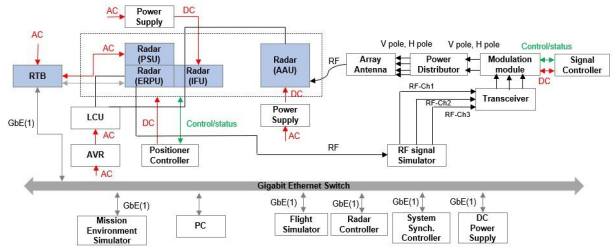


그림 1. AESA 레이다와 레이다 비행 모의 장치 연동 구성도
Fig. 1. Block diagram of AESA radar and radar HILS system

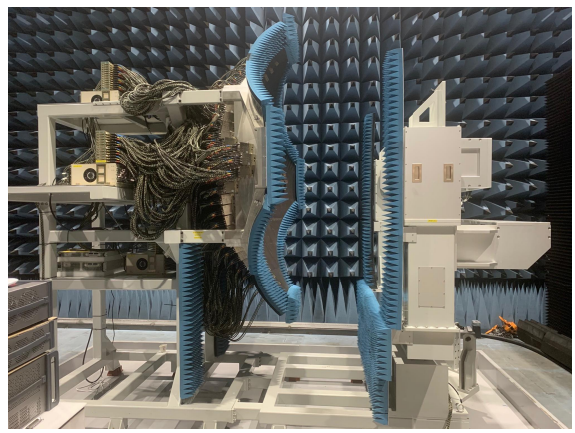


그림 2. 레이다 비행모의 장치 개발 형상
Fig. 2. Cinfiguration of radar HILS system

송신 신호 전력분배기는 RF 모의 신호 발생기로부터 입력된 3개의 신호를 각각 400개의 신호로 분기하여 2400개의 신호를 출력한다.

2-1 RF 송신배열안테나

RF 송신 배열 안테나는 TPAA(tapered slot array antenna) 형태로 4개의 단위 복사소자(V-Pol. 2개, H-Pol. 2개)가 총 400개의 안테나가 곡면형 격자 구조로 구성되며, X-Band의 운용 주파수 대역에서 4 dBi 이상의 단위 소자 이득 특성을 보유하도록 설계하였다.

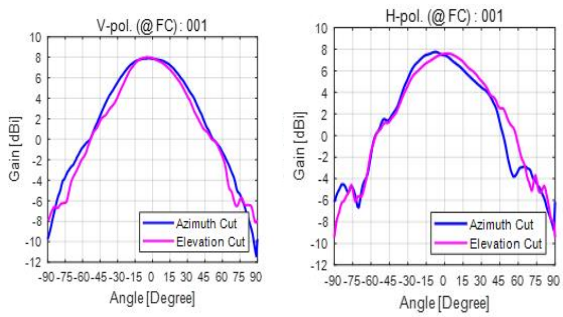


그림 3. 편파에 따른 RF 송신 배열 안테나 단위 소자 이득
Fig. 3. Gain of RF array antenna element in accordance with VH pole

그림 3은 개발된 RF 송신 배열 안테나의 이득 측정 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 수직 편파, 수평 편파 모두 설계 파라미터인 4 dBi 를 충족함을 알 수가 있다.

2-2 RF 모의 신호 발생기

RF 모의 신호 발생기는 송수신기로부터 입력된 운용 모드 파형에 표적신호, 클러터신호, 재밍/기만신호, REG(radar environment generator) 신호를 생성하여 다채널(3개 채널)로 선택적 또는 동시적으로 전송하는 기능을 보유하며, 제어조립체(시스템동기제어기)와 연동을 통하여 제어 및 상태 정보를 송수신하도록 설계하였고, 설계 파라미터는 표 1과 같다.

RF 모의 신호 발생기는 표적 신호 발생부와 주파수 상하향부로 구성되어 있다. 표적 신호 발생부는 표적의 도플러, RCS, 거리 모의 기능, 잡은 재밍신호, 클러터 생성을 할 수 있으며, JEM(jet engine modulation), RGPO(range gate pull off), VGPO(velocity gate pull off) 및 표적 Swerling case 적용 기능이 있다. 주파수 상하향부는 입력받은 X밴드의 신호를 S밴드로 하향 변화하는 기능과 광대역 재밍신호, 표적신호, 주엽클러터, 부엽 클러터 등의 신호를 합성할 수 있다.

표 1. RF 모의 신호 발생기 설계 파라미터
Table 1. Design parameters of RF simulated signal generator

Design parameters		specifications
EIRP		abover 0 dBm
Flatness		less than ±3 dB
Spurious		less than −40 dBc
Harmonics		less than −50 dBc
Instantaneous bandwidth		700 MHz
Target signal	Range	Range : 15~300 km
		Resolution : less than 1 m
		Accuracy : less than 1 m
	Doppler	Range : 0~1200m/s
		Resolution : 1m/s
		Accuracy : 1m/s
	Swerling	Swerling I, III
Clutter signal		point : Noise Spike
		surface : land/sea
		volume : cloud/rainfall
		MLB clutter
		SLB clutter
Noise/GPO signal		bandwidth : 500 MHz RGPO/VGPO
JEM signal		100~200 Hz

2-3 송신 신호 벡터 변조기

송신 신호 벡터 변조기는 RF 모의 신호 발생기로부터 인가된 표적/클러터/재밍 신호를 각각 위상/진폭 변조하여 수직/수평 편파을 갖는 RF 송신 배열 안테나에 동시 또는 선택적으로 전달하는 역할을 한다. 송신 신호 벡터 변조기는 송신 신호 제어반으로부터 전원 및 제어 신호를 인가받아 구동된다. 각 포트로 입력된 각각의 RF 신호를 2방향 전력 분배기, MFC(multi function chip), 가변 감쇠기, 3방향 전력 결합기 등을 통하여 진폭, 위상 변조하여 두 포트로 동시 또는 선택적으로 출력한다. 신호 변조 모듈 동작에 필요한 전원 및 제어신호는 송신 신호 제어반으로부터 공급받는다. 검파기 및 온도센서를 통하여 출력전력 및 온도 상태를 모니터링 한다. 2방향 전력 분배기의 성능 확인을 위해 Wilkinson 1:2 전력 분배기로 설계 및 제작하여 성능을 확인하였고, 그 결과가 표 2와 같다.

표 2. 2방향 전력 분배기 성능 측정 결과
Table 2. Performance measurements of 2 way power divider

	Unit	Objectives	Performance		
			f_l GHz	f_c GHz	f_h GHz
Insertion loss	dB	less than 1	0.62	0.62	0.64
Return loss	dB	above 15	19.74	20.67	22.32
Isolation	dB	above 15	30.07	31.86	25.72

가변 감쇠기는 입력된 신호를 0.25 dB 또는 30 dB 감쇠 제어하여 출력하는 역할을 한다. 소자 형상은 4×4 QFN(quad flat non-leaded) 패키지 형태이다. 제어 방식은 시리얼 통신을 사용하며 측정된 성능은 표 3과 같다.

표 3. 가변 감쇠기 성능 측정 결과
Table 3. Performance measurements of variable attenuator

		Unit	Performance		
			f_l GHz	f_c GHz	f_h GHz
Insertion loss		dB	11.41	11.30	11.10
Return loss		dB	8.22	8.93	9.78
Control range	0.25 dB atten.	dB	0.27	0.26	0.24
	30 dB atten.		30.66	30.51	30.61

MFC는 입력된 신호를 0~31dB 가변 감쇠 및 0~360° 위상 제어하여 출력하는 역할을 한다. 소자 형상은 5×5 QFN 패키지 형태이다. 제어방식은 시리얼 통신을 사용하며, 성능 측정 결과는 표 4와 같다.

표 4. MFC 성능 측정 결과
Table 4. Performance measurements of MFC

	Unit	Objectives	Performance		
			f_l GHz	f_c GHz	f_h GHz
Small signal gain	dB	27	27.1	24.1	25.1
P1dB	dBm	14	14.2	14.1	13.7
Attenuator range	dB	0~31	0 ~ 31		
Phase range	°	0 ~ 360	0 ~ 360		

3방향 전력결합기는 입력된 신호를 결합하여 출력하는 역할을 한다. 기판은 RO4003 12.7 mil을 사용하여 Wilkinson 3:1 전력 결합기로 설계 및 제작하여 성능을 확인하였다.

표 5. 3방향 전력결합기 성능 측정 결과
Table 5. Performance measurements of 3 way power combiner

	Unit	Objectives	Performance		
			f_l GHz	f_c GHz	f_h GHz
Insertion loss	dB	less than 1	0.69	0.70	0.75
Return loss	dB	above 15	16.41	17.90	20.23
Isolation	dB	above 15	24.18	26.25	28.65

Ⅲ. 비행시나리오 기반 레이다 검증

AESA 레이다와 항전 모의기, 개발된 레이다비행모의장치 간 연동을 통하여 운용 시나리오 기반으로 레이다 임무 환경이 포함된 모의 표적 신호를 생성하고 변조하여 레이다의 기능과 성능을 비행 시험 수행 전 실험실 환경에서 시험하였다. 레이다 임무 환경 설정은 표 6과 같다.

표 6. 레이다 및 레이다 비행 모의 장치 임무 환경 설정
Table 6. Radar and HILS system mission environment set up

Parameters	Set up
Frequency	Fc (GHz)
Pole	V-Pol, H-Pol
Operation mode	AAST Range : 160 NM Azimuth : AZ±10 ° BAR : 1 bar
Target velocity	+100 m/s, +300 m/s
Target RCS	1m2
Clutter(MLC)	Volume(Cloud), 10 km
Jamming(RGPO)	30 km, 50 km

3-1 시험 시나리오

운용 주파수는 중심 주파수를 기준으로 하였으며 운용 편파는 AESA 레이다의 안테나의 편파 특성을 고려하여 RF 송신 배열 안테나에서 V/H-Pol을 동시에 송신할 수 있도록 설정하였고 AESA 레이다의 운용 모드는 공대공 모드 중 AAST(All Aspect Search and Track)을 적용하였다.

또한, 항전 연동 모의기를 통하여 AESA 레이다의 공대공 설정을 160 NM, Azimuth AZ±10 °, 1 bar로 설정하여 적용하였고, RF 모의 신호 발생기에서 생성되는 모의 표적의 도플러 주파수는 멀어지는 표적을 기준으로 시험 시나리오에 따라 +100 m/s, +300 m/s를 적용하였다. 모의표적에 대한 RCS는 1 m2, 주엽 클러터(MLC, Main Lobe Clutter)는 체적(구름)을 적용하였으며 재밍기능은 거리 기만(RGPO, Range Gate Pull-Off)신호를 적용하였다. 주엽 클러터의 생성은 모의 표적의 위치를 기준으로 10 km 떨어진 거리에 생성하였고, 거리 기만 신호는 OS(own ship)의 위치를 기준으로 시험 시나리오에 따라 30 km, 50 km에 생성되도록 설정하였다. 레이다 비행 모의 장치의 시험 시나리오 좌표계는 위도/경도/고도 좌표계를 적용하였으며, OS는 고정하고 모의 표적이 기동하는 시험 시나리오를 구성하였다. 비행 시나리오는 총 3개로 구성하여 시험을 진행하였으며, 시나리오 별 구성 내용은 표 7과 같다.

표 7. 레이다 비행 모의 장치 시험 시나리오
Table 7. Test scenario of HILS System

Scenario	Set up
Test scenario #1	Single Moving Target (8～33 km) Doppler +100 m/s Clutter(MLC) Jamming(RGPO)
Test scenario #2	Single Moving Target (8～158 km) Doppler +300 m/s Clutter(MLC) Jamming(RGPO)
Test scenario #3	Dual Moving Target (8～20 km) - Target #1 : 8～14 km - Target #2 : 14～20 km Doppler +300 m/s

3-2 시험 결과

시험 시나리오 #1은 OS를 고정 위치로 설정하고, 모의표적으로부터 10 km 거리에 주엽 클러터를 발생시키며, OS로부터 50 km 거리에 모의표적에 대한 거리 기만 신호를 생성하고 단일 모의 표적(도플러 +100 m/s)이 8 km에서 33 km까지 멀어지는 방향으로 이동하는 시나리오를 설정하여 시험한 결과이다.

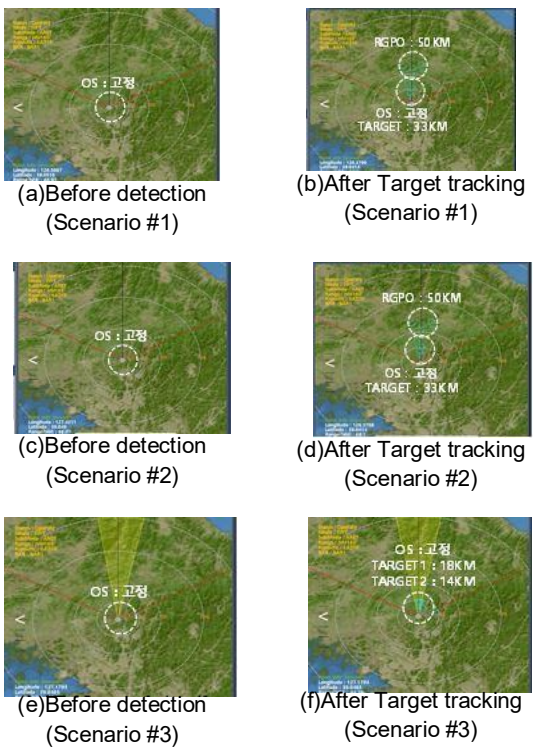
그림 4(a), (b)에서 보는바와 같이 시험 결과 단일 모의표적이 8 km부터 생성되어 33 km까지 이동 및 추적되는 결과를 확인하였다. 주엽 클러터는 항전모의기 지도에 도시되지 않았으며, 50 km 거리에 거리 기만 신호가 정상적으로 생성 및 도시되었으며, 단일 모의 표적이 8 km부터 생성되어 33 km까지 이동 및 탐지/추적되는 결과를 확인하였다. 그러나, 시험 간 단일 모의표적이 다수의 모의표적으로 중첩되어 도시되거나 다중 표적으로 도시되는 결과를 확인하였다. 이는 레이다 비행 모의 장치의 RF 송신 배열 안테나와 AESA 레이다간 운용 거리(1.5 m)로 인해, 안테나의 빔 조향 운용 간 빔 조향 시 빔별 빔폭 내에 동일한 모의 표적이 중첨되어 탐지되는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

시험 시나리오 #2은 OS는 고정위치로 설정하고, 모의표적으로부터 10 km거리에 주엽 클러터를 발생시키며, OS로부터 30 km거리에 모의 표적에 대한 거리기만 신호를 생성하고 단일 모의표적(도플러 +300 m/s)이 8 km에서 158 km까지 멀어지는 방향으로 이동하는 시나리오를 설정하여 시험한 결과이다. OS로부터 30 km 거리에 거리 기만 신호가 정삭적으로 생성되었으며, 단일 모의 표적이 8 km부터 생성되어 약 80 km까지 이동 및 탐지되는 결과를 그림 4(c), (d)에서 나타내었다.

시험 시나리오 #3은 OS는 고정 위치로 설정하고, 모의표적

(도플러 +300 m/s) 2개를 설정하여 모의 표적 1은 14 km에서 20 km까지 멀어지는 방향으로 이동하고, 모의 표적 2는 8 km에서 14 km까지 멀어지는 방향으로 이동하는 시나리오로 설정하였다. 그림 4(e), (f)에서 보는 바와 같이 시험 결과 모의표적 2개에 대한 생성 거리가 근접하여 시험 시작 지점에서는 구분하기 어려우나 모의 표적 2개가 각각 시작시점부터 이동 거리까지 정상적으로 이동 및 탐지/추적되는 결과를 확인하였다. 시험 간 단일 모의 표적이 다수의 모의 표적으로 중첩되어 도시되거나 다중 표적으로 도시되는 현상은 동일하게 확인되었다.

시나리오를 기반으로 AESA 레이다와 레이다 비행모의장치간 연동 시험을 한 결과, AESA 레이다의 운용 모드를 기반으로 RF 모의 신호 발생기 출력 채널별 특성을 활용한 단일/다중 모의 표적 생성, 레이다 임무환경 생성, 재밍 신호(거리기만) 생성으로 다양한 레이다 임무 환경을 모의하였으며, AESA 레이다 및 항전 연동 모의기를 통하여 이동하는 모의표적을 추적하고 도시함을 확인하였다. 다만, 시험간 단일/다중 모의표적이 다수 또는 다중 모의표적으로 중첩되어 도시되거나 시나리오와 관계없는 방향으로 이동하는 모의표적이 발생하는 등의 시험결과를 확인하였다. 이는 레이다 비행모의장치의 RF 송신배열안테나와 AESA 레이다의 안테나 간의 운용거리가 가까움에 따라 AAU의 빔조향 운용간 빔조향 특성에 기인한 것으로 판단된다.



(a)Before detection (Scenario #1)
(b)After Target tracking (Scenario #1)
(c)Before detection (Scenario #2)
(d)After Target tracking (Scenario #2)
(e)Before detection (Scenario #3)
(f)After Target tracking (Scenario #3)

그림 4. 시나리오 기반 레이다 성능 시험 결과
Fig. 4. Scenario based radar performance test results

Ⅴ. 결 론

개발한 AESA 레이다의 알고리즘 검증이나 디버깅을 위해 지상에서 충분히 검증한 할 수 있도록 실험실 레벨에서 임무 시나리오 기반으로 레이다의 성능을 검증하기 위해 레이다 레이다 비행모의장치의 각 구성품을 개발 및 통합하였다. 레이다 비행모의장치는 표적의 도플러 주파수, RCS, 클러터, 재밍신호(RGPO) 등을 다양하게 설정하여 시나리오를 생성 및 레이다와 연동이 가능하게 설계하였다. 개발한 AESA 레이다의 성능을 검증하기 위해 시나리오를 생성하여 다양한 표적 및 임무 환경에서 표적을 탐지, 추적하여 레이다의 성능을 확인할 수 있었다.

Acknowledgements

이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(274190001)

References

[1] D. J.Shin, J. H, Lee, “A Research on Naval Electronic warfare system engagement HILS,” *KIMST*, Vol. 13, No. 5, pp. 785-792, Oct. 2010.
[2] H. S. Tae, J. K. Kim : Radar cross section in airborne platforms, ADD: Technical Report ADDR-51-171633, 2017.
[3] Y. K. Kwak, *Radar system engineering,* 2th ed. : Cheongmoon, 2017.

곽 용 길 (Yong-Kil Kwak)
1997.2월 : 부산대학교 기계공학부(공학사)
1999.2월 : 부산대학교 기계공학부(공학석사)
2005.2월 : 부산대학교 기계공학부(공학박사)
2011.10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원
※관심분야 : 제어/계측, 레이다/전자전 시스템