

## 항공용 EO/IR 센서의 EO GRD 분해능 실험실 측정 연구

허 준<sup>\*,1)</sup> · 김창우<sup>1)</sup> · 김성수<sup>1)</sup> · 김병완<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제3기술연구본부

<sup>2)</sup> 삼성탈레스(주) ISR/PGM R&D 연구소

### A Study of Laboratory Measurement of EO GRD Resolution for Airborne EO/IR Sensor

Joon Huh<sup>\*,1)</sup> · Chang-Woo Kim<sup>1)</sup> · Sungsoo Kim<sup>1)</sup> · Byoung-Wan Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

<sup>2)</sup> ISR/PGM R&D, Samsung Thales Co., Ltd., Korea

(Received 20 May 2014 / Revised 2 October 2014 / Accepted 7 November 2014)

#### ABSTRACT

EO GRD(Ground Resolved Distance) resolution of airborne EO/IR(Electro-Optical/Infrared) sensor is a critical factor in test and evaluation for EO sensor performance. We propose the laboratory measurement set-up for EO GRD by constructing optical collimator which includes integrated sphere, blackbody, equivalent 3-bar target and 6 DOF motion simulator. GRD is measured in the photographic imagery of bar targets by 3 different distances for 3 EO/IR sensors and the measured results were analyzed statistically. We found that at least 7 sheets of imagery are needed in order to obtain meaningful EO GRD. The result of statistical analysis shows that the distribution of the measured GRD is nearly symmetric about the average GRD, and the better imagery ratio above the average GRD is about 40~70%. Also from the best GRD analysis, it is estimated that the design goal for EO GRD should be 30% superior to the required GRD.

Key Words : EO/IR(Electro-Optical/Infrared), Sensor(센서), GRD(Ground Resolved Distance), Imagery(영상)

#### 1. 서론

항공용 EO/IR 센서는 기본적으로 장거리에서 고해상도 영상을 촬영한 후 영상정보를 지상에 실시간 전송

할 목적으로 운용된다<sup>1-3)</sup>. 항공용 EO/IR 센서를 개발하기 위해선 먼저 M&S를 통한 시스템 성능분석을 통해 경량/소형의 고품질 광학계, 고감도 EO/IR 검출기, 강건한 시선 안정화의 요구조건이 충족되도록 설계된다. 또한 선명한 영상을 구현하기 위한 다양한 영상 정보 개선 기술도 필요하다. 뿐만 아니라 항공기 운용 환경이 가혹한 경우 시스템 설계시 환경규격이 중요

\* Corresponding author, E-mail: jinuh@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

한 인자로 포함되어야 한다. 이러한 시스템 요구규격 및 설계과정을 거쳐 제작된 항공용 EO/IR 센서는 운용환경에서 시험평가를 수행하기 전에 지상에서 유사한 항공기 운용환경을 구축한 후 다양한 시스템 성능 시험을 수행하여 목표성능 달성 여부를 확인하게 된다. 따라서 지상시험평가 기법도 항공용 EO/IR 센서 개발에 필수적으로 확보되어야 한다.

항공용 EO/IR 센서의 최종적인 성능은 GRD(Ground Resolved Distance) 분해능으로 결정되며, GRD는 거리별로 설치된 흑백으로 구성된 3쌍의 막대표적을 촬영한 영상으로부터 분해 가능한 최소 막대표적 크기로 판정된다<sup>4-6)</sup>. 항공용 EO/IR 센서는 장거리 표적획득용이므로 표적거리가 증가할 때 대기중 산란광의 영향이 지배적으로 나타난다. 또한 시계가 고배율인 광학계를 사용하므로 영상성능은 미소한 외부 진동영향에도 민감하다. 따라서 항공용 EO/IR 센서의 영상성능은 영상수량, GRD 산출방식 등을 통계적 처리로 평가되어야 한다.

본 논문은 국내 최초로 항공용 EO/IR 센서의 GRD EO 분해능 성능을 실험실에서 수행하기 위한 지상 시험평가 환경 구성 기법과 분해능 시험에 대한 통계적 분석 결과를 기술하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 항공기 탑재와 유사한 환경을 구성하기 위해 고려되어야 하는 요소인 항공기 고도 및 표적 거리에 따라 대기영향이 반영된 표적 대조비, 거리에 따른 표적크기 등을 분석하고 3장에서는 촬영된 GRD 영상성능의 통계적 분석평가에 대한 결과를 기술하고 결론을 맺는다.

## 2. 지상 시험평가 환경 구성

EO/IR 센서의 영상성능을 나타내는 인자는 GRD 이외에 GSD(Ground Sampling Distance)가 있다. GSD는 식 (1)과 같이 센서 초점거리  $f$ , 표적거리  $R$  및 검출기 화소크기  $p$ 에 의해 결정되는 설계인자이다.

$$GSD = \frac{p \times R}{f} \tag{1}$$

일반적으로 GRD와 GSD는 식 (2)와 같은 관계가 있다.

$$GRD = k \times 2 \times GSD \tag{2}$$

여기서  $k > 1$ 이며 영상 촬영중에 지상 시정거리, 태양 고각 등에 의한 대기영향과 EO/IR 센서의 진동에 따라 달라진다.

$k = 1$ 일 때 GRD는 GSD에 2배가 되며 이때 GRD는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$GRD = \frac{R}{f_{nyq}} \tag{3}$$

여기서  $f_{nyq}$ 는 Nyquist 주파수이다. 그러나 대기영향과 진동을 고려하면 GRD는 식 (4)와 같다. GRD는 값이 작을수록 좋은 분해능 성능을 나타낸다.

$$GRD = \frac{R}{f_x}, f_x < f_{nyq} \tag{4}$$

여기서  $f_x$ 는 신호대잡음비가 문턱치에 도달하는 공간 주파수이다. 설계 및 제작된 항공용 EO/IR 센서의 GRD 성능 측정은 항공기 탑재 비행시험을 수행하기 전에 실제 비행시험과 유사한 환경을 실험실에 구축하여 지상 모의시험을 수행한다.

이를 위해 성능분석을 통해 Table 1과 같이 특정 고도를 기준으로 대기영향에 따른 거리별 표적에 대한 EO 대조비 및 IR 온도차와 GRD에 해당하는 표적크기가 산정된다. 또한 장거리 표적이므로 평행광을 만들어주는 항공용 광학시준기가 필요하며, 여기에 EO, IR 표적광원인 적분구, 흑체가 각각 설치된다. 또한 항공기 비행에 따른 센서요동도 고려되어야 한다.

Table 1. Equivalent condition of flight and laboratory environment

등가 항목		비행환경	지상환경
표적대조비	EO	5:1	1.05:1
온도차	IR	3°C	0.73°C
표적크기 (GRD)	EO	E	E'
	IR	I	I'
표적광원	EO	태양광	시준기 적분구
	IR	표적 열원	시준기 흑체
항공기 운동		항공기비행	6자유도모사기

※ 표적거리 : C\_dis(EO), C'\_dis(IR)

Fig. 1은 Table 1의 등가 항목을 고려하여 분해능 시험을 위한 비행시험 환경과 실험실 환경을 비교한 것이다. 특정고도에서 EO의 경우 거리  $C_{dis}$ 에서 GRD가 E인 5:1 대조비의 막대표적은 실험실에서는 GRD E', 검은 막대의 투과율이 95%인 대조비 1.05:1인 막대표적으로 환산된다. IR의 GRD도 EO와 동일한 방법으로 계산되며, 표적 대조비 대신에 온도차로 변환된다. 3°C인 표적온도차는 거리  $C_{dis}$ 를 통과한 후에는 온도차가 0.73°C로 감소된다.

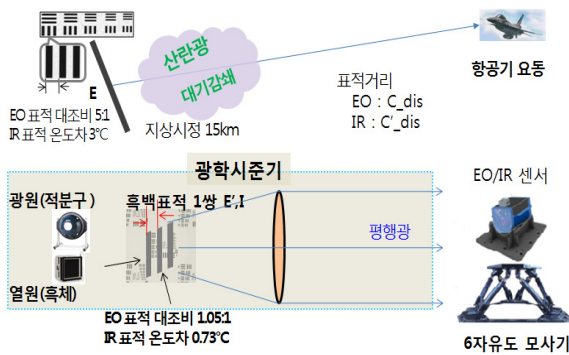


Fig. 1. Equivalent relation between flight and laboratory imaging resolution test

EO 광원은 균일한 세기의 광량을 발생시키는 적분구, IR 광원은 미세한 온도 조절이 가능한 흑체를 각각 사용한다. EO 및 IR 광원은 광학시준기에 포함되어 있으며 이 시험장비는 고배율의 항공용 EO/IR 센서 전용 광학시준기로는 국내 최초로 개발되었다. 또한 항공기가 비행하므로 EO/IR 센서에 가해지는 요동 환경 모사는 6자유도 모사기를 사용한다. 따라서 실험실 구성은 EO/IR 센서, 평행광을 생성하는 시준기, 거리 영향이 반영된 막대표적 그리고 6자유도 모사기로 구성된다.

항공기 요동 데이터는 항공기의 특정속도를 기준으로 가장 가혹한 고도 및 돌풍속도에 따른 항공기 거동해석 결과를 바탕으로 Fig. 2과 같이 돌풍에 의해 지속 가능한 가혹한 조건으로 각변위량을 산정하여 적용되었다. 그림에서 보는 바와 같이 롤 및 피치 요동을 주기 4초, 최대치 2°도로 6자유도모사기를 연속적으로 요동시킨다.

실험실에서 EO/IR 센서의 GRD 분해능 성능을 측정하기 위한 시험 구성도는 Fig. 3과 같다. 실제 비행환경에서 EO/IR 표적을 촬영하여 영상을 지상으로 전송

하는 일련의 항공기 체계 연동은 각종 모사기를 개발하여 적용하였다. 6자유도 모사기에 EO/IR 탑재센서부를 장착한 후 요동을 인가한다.

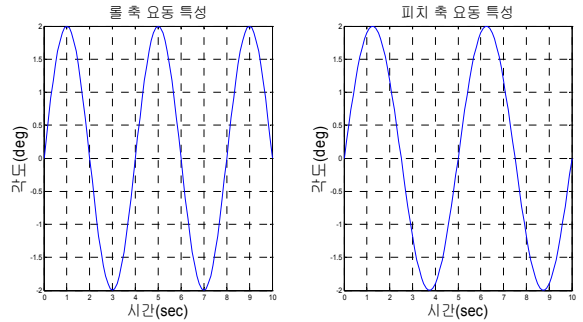


Fig. 2. Rolling and pitching condition of aircraft

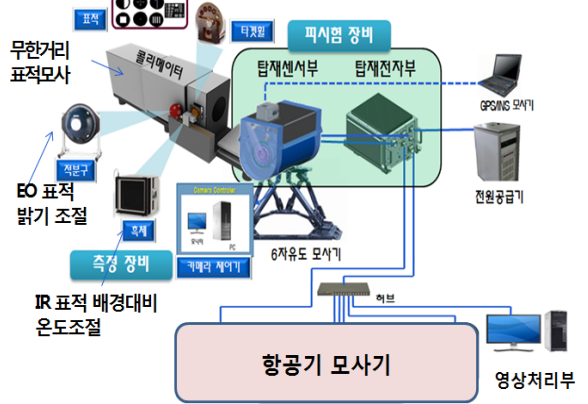


Fig. 3. Experimental set-up for GRD resolution

탐재센서부는 연동된 탐재전자부의 영상촬영 명령에 따라 광학시준기에 설치된 막대 표적에 시선을 지향하여 촬영한다. 촬영된 영상은 체계 모사기를 통해 지상으로 전송되며, 지상 모니터에 전시된 영상으로부터 대조비 처리를 수행한 후 분해능을 확인한다.

### 3. EO 분해능 측정시험결과 분석

항공용 EO/IR 센서의 EO 영상 분해능을 측정하기 위해 3가지 거리별 등가 막대표적을 광학시준기에 설치하여 각 거리별로 EO 영상을 촬영하였다. EO 분해능 측정은 실험실의 외부 진동 및 공기 유동 영향이 최소화되는 환경에서 수행되었다.

3.1 영상 매수별 평균 분해능

Fig. 4는 A\_dis, B\_dis, C\_dis의 3종류 거리별 등가 표적으로부터 촬영된 30매 각 영상에 대해 영상 전문가가 판독한 EO 평균 GRD( $GRD_{avg}$ )를 나타낸다. x축은 영상번호를 나타내고 y축은 각 영상에 대한 판독 관들의  $GRD_{avg}$ 이다. 점선은 각 영상의 평균값으로부터 30매 영상의 전체 평균값이다. 각 측정 영상마다 전체 평균값 기준으로 불규칙한  $GRD_{avg}$ 가 측정된 이유는 영상센서가 고배율이므로 측정시마다 분해능 성능이 6자유도 모사기 요동에 따라 촬영 노출시간동안 센서에 유입된 미세진동에 의한 입사각 변화와 공기유동 등의 측정 환경조건으로 인해 민감한 영향을 받기 때문으로 판단된다.

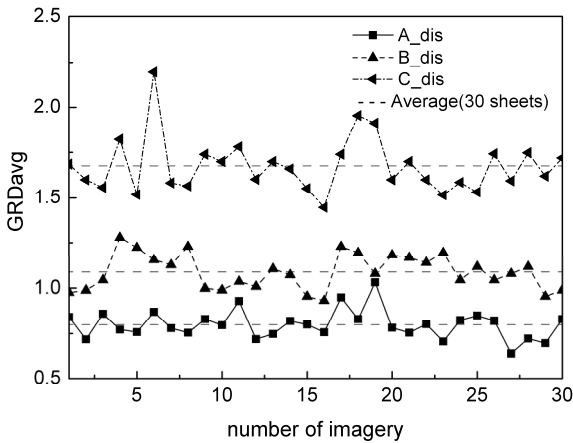


Fig. 4.  $GRD_{avg}$  resolutions relative to 3 different target distances

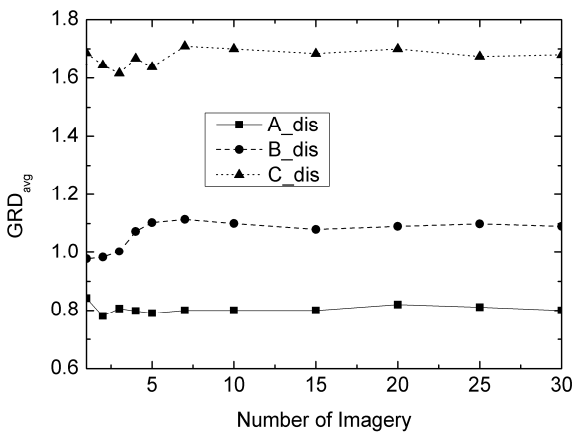


Fig. 5.  $GRD_{avg}$  by the number of average imagery

Fig. 5는 영상매수에 따른  $GRD_{avg}$ 은 나타낸다. 6개 이하의 영상매수에서는 영상매수에 따라  $GRD_{avg}$ 가 급격한 차이를 보이고 있으나 약 7매 이상에서는 거의 일정한  $GRD_{avg}$ 을 나타낸다. 따라서 EO 영상 분해능 성능은 7매 정도의 영상으로도 판단 가능하지만 데이터의 신뢰성 확보 측면에서는 30매 이상의 촬영 영상이 신뢰성 있는 통계적 성능분석에 적절한 수준으로 판단된다.

3.2 센서별 영상 평균 분해능

Table 2는 EO/IR 센서 3조에 대해 3종류 거리별 표적의 촬영영상에 대한 EO GRD 분포를 나타낸다. 우수한 영상 성능인  $GRD_{avg}$  이하의 최소/최대비율은 A\_dis 56.3%/63.7%, B\_dis 47%/65.6%, C\_dis 38%/71.5%이다. 따라서 EO 센서가  $GRD_{avg}$  이상의 분해능 성능을 확보하기 위해선 우수한 성능인  $GRD_{avg}$  이하 비율이 대략적으로 40~70% 내외가 되어야 한다. 그러나 이 비율은 영상촬영시 대기조건이 크게 변화하지 않는 실험실 환경이므로 실제 비행환경과는 차이가 있을 수 있다. 또 다른 특징으로는 최대 비율의 GRD를  $GRD_{mr}$ 라 할 때  $GRD_{mr}$  초과비율이  $GRD_{mr}$  미만비율보다 높다. 따라서 일반적으로 낮은 성능의 GRD 측정 확률이 우수한 성능의 GRD 측정 확률보다 상대적으로 높다.

Table 2. EO GRD ratio distribution of 3 EO/IR sensors

EO GRD	EO/IR 센서(비율, %)		
	1호기	2호기	3호기
$GRD_{mr_a}+0.32$	2.0	0.33	0
$GRD_{mr_a}+0.2$	11.33	10.00	9.63
$GRD_{mr_a}+0.1$	30.33	27	26.67
<b><math>GRD_{mr_a}</math></b>	<b>35.33</b>	<b>46.0</b>	<b>36.30</b>
$GRD_{mr_a}-0.08$	17.33	16.67	22.22
$GRD_{mr_a}-0.15$	3.0	0	5.19
$GRD_{mr_a}-0.22$	0.67	0	0
$GRD_{mr_a}$ 초과	43.66	37.33	36.3
$GRD_{mr_a}$ 미만	21	16.67	27.41
$GRD_{avg_a}$ 이하	56.33	62.67	63.71
$GRD_{avg_a}$	0.8	0.79	0.78

(a) A\_dis

EO GRD	EO/IR 센서(비율, %)		
	1호기	2호기	3호기
GRD <sub>mr_b</sub> +0.48	0	3.0	4.07
GRD <sub>mr_b</sub> +0.3	0	17.67	2.22
GRD <sub>mr_b</sub> +0.14	17.0	30.00	28.15
<b>GRD<sub>mr_b</sub></b>	<b>36</b>	<b>42.00</b>	<b>49.26</b>
GRD <sub>mr_b</sub> -0.12	31.67	7.33	13.70
GRD <sub>mr_b</sub> -0.23	13.67	0	2.59
GRD <sub>mr_b</sub> -0.33	1.67	0	0
GRD <sub>mr_b</sub> 초과	17.0	50.67	34.44
GRD <sub>mr_b</sub> 미만	47.01	7.33	15.66
GRD <sub>avg_b</sub> 이하	47.01	49.33	65.55
GRD <sub>avg_b</sub>	1.09	1.24	1.18

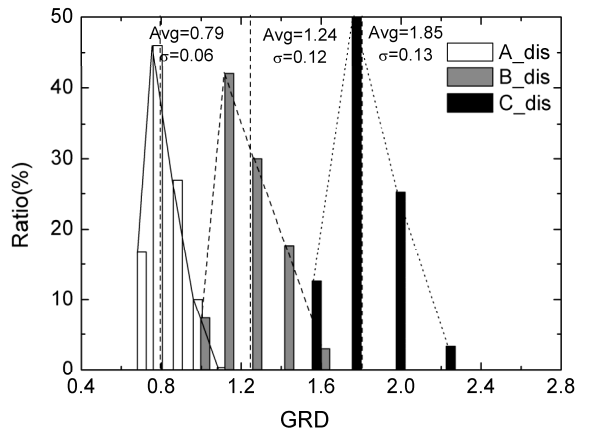
(b) B\_dis

EO GRD(m)	EO/IR 센서(비율, %)		
	1호기*	2호기	3호기
GRD <sub>mr_c</sub> +0.75	0	0	1.17
GRD <sub>mr_c</sub> +0.47	2.33	3.33	4.09
GRD <sub>mr_c</sub> +0.22	6.67	25.19	10.53
<b>GRD<sub>mr_c</sub></b>	<b>29.67</b>	<b>58.89</b>	<b>45.61</b>
GRD <sub>mr_c</sub> -0.2	45.67	12.59	35.09
GRD <sub>mr_c</sub> -0.37	15.33	0	3.51
GRD <sub>mr_c</sub> -0.53	0.33	0	0
GRD <sub>mr_c</sub> 초과	38.67	28.52	15.79
GRD <sub>mr_c</sub> 미만	15.66	12.69	38.6
GRD <sub>avg_c</sub> 이하	61.33	71.48	38.6
GRD <sub>avg_c</sub>	1.68	1.85	1.77

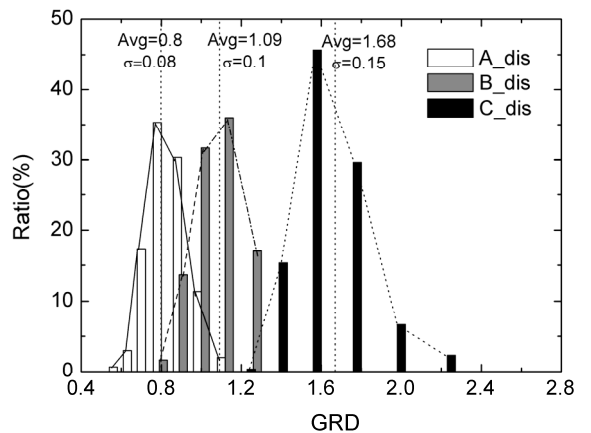
\* 1호기의 GRD<sub>mr\_c</sub>는 GRD<sub>mr\_c</sub>-0.2임

(c) C\_dis

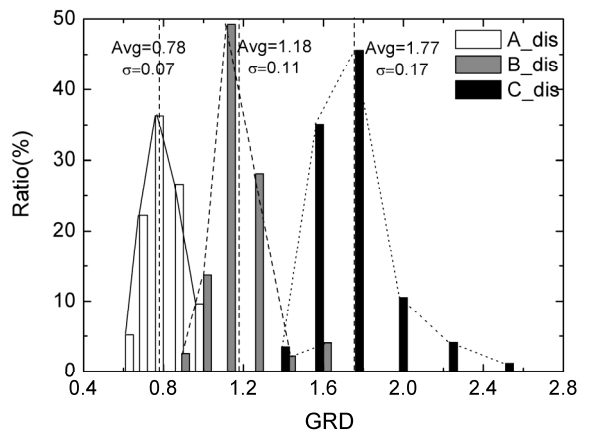
Fig. 6은 3조 EO/IR 센서에 대한 거리별 EO GRD 비율 분포를 그림으로 나타낸 결과이다. x축은 평균 GRD값이고 y축은 각 GRD값에 해당하는 영상매수 비율을 나타낸다. 3조 EO/IR 센서 측정결과는 평균값을 중심으로 좌우 대칭 형태를 보이고 있다. EO/IR 센서 3조의 거리별 표준편차( $\sigma$ )는 거리가 증가하면서 다소



(a) EO/IR sensor #1



(b) EO/IR sensor #2



(c) EO/IR sensor #3

Fig. 6. Tri-bar GRD statistical distribution by target distance

넓어지고 있는데 거리가 약 2배 증가될 때 표준편차도 2배 정도 확대되었다. 또한 평균 EO GRD와 표준편차 크기는 대략적으로 비례관계를 보이고 있으므로 평균값을 알면 표준편차가 예측 가능하다.

Table 3은 Table 2의 3조 EO/IR 센서에 대해 3종류 거리별 GRD 평균값( $GRD_{avg}$ )에 대한 최대값( $GRD_{max}$ ) 및 최소값( $GRD_{min}$ )의 비율을 나타낸다. 1호기의 A\_dis의 경우 가장 낮은 성능인  $GRD_{max}$ 는  $GRD_{avg}$ 에 비해 35%을 저하된 성능이며, 가장 우수한 성능인  $GRD_{min}$ 은 유사한 비율인 32%로 이하로 측정되었다.

실제 비행조건과 유사한 환경을 구축한 실험실에서 수행된 EO/IR 센서의 요동에 따른 해상도 변화 분포는 실제 비행시험을 통해 측정된 해상도 분포와 유사한 결과를 나타낸다<sup>[6,7]</sup>. 따라서 실험실에서 해상도 측정 결과는 향후 센서 성능설계와 과도한 비용과 시간이 많이 소요되는 비행시험평가의 성능 예측자료로 활용될 수 있다.

Table 3. The ratio of  $GRD_{max}$  and  $GRD_{min}$  divided by  $GRD_{avg}$  for 3 EO/IR sensors

센서명	거리	$GRD_{max}/GRD_{avg}$	$GRD_{min}/GRD_{avg}$
1호기	A_dis	1.35	0.68
	B_dis	1.17	0.74
	C_dis	1.35	0.76
2호기	A_dis	1.37	0.86
	B_dis	1.31	0.82
	C_dis	1.23	0.86
3호기	A_dis	1.24	0.78
	B_dis	1.37	0.77
	C_dis	1.44	0.81

센서별  $GRD_{avg}$ 와  $GRD_{max}$  및  $GRD_{min}$ 를 분석한 결과는 평균값 기준으로  $GRD_{max}$ 는 약 20~40% 저하된 성능이며  $GRD_{min}$ 는 대략 10~30% 향상된 성능이 측정되었다. 따라서  $GRD_{avg}$ 를 성능목표로 설정할 경우에 EO 센서는 약 30% 이상의 성능을 충족하도록 설계되어야 할 것으로 예측된다.

#### 4. 결론

본 논문은 국내 최초로 항공용 EO/IR 센서의 GRD 성능을 실험실에서 수행한 결과를 제시하고 통계적으로 분석하여 평균값에 의한 성능평가와 EO/IR 센서의 설계 목표의 연관성을 기술하였다. 이를 위해 실제 비행시험 수행하기 이전에 실험실에서 시험할 수 있도록 비행시험과 유사한 환경 구축 결과를 기술하고 영상성능 시험평가 결과를 분석하였다. 실험 환경은 무한광을 모사하는 광학시준기, 거리별 대기영향을 반영한 모의 등가 막대표적, 항공기 요동을 위한 6자유도 모사기로 구성되었다. 여기서 시준기는 EO 광원 생성을 위한 적분구와 IR 표적 열원을 위한 흑체가 포함되어 있다. 막대표적의 대조비는 5:1인 막대표적을 기준으로 대기감쇄 영향을 반영하여 거리별 대조비 감소비율을 계산하여 제작되었다.

이와같은 실험 환경에서 항공용 EO/IR 센서 3조에 대한 분해능 성능인자인 GRD를 측정하였다. 먼저 통계적으로 의미있는 분해능 성능판정에 필요한 최소한의 영상매수는 약 7매 이상으로 분석되었다. 또한 영상매수에 대한 GRD 측정결과는 매 측정시마다 불규칙한 값을 보이고 있는데 이는 고배율 센서로 인해 촬영 노출시간 동안 요동시 센서에 유입된 진동으로 인해 입사각 미세 변화와 공기유동 등의 측정환경 조건에 민감한 영향을 받기 때문으로 판단된다.

EO/IR 센서 3조에 대한 GRD 분해능 성능을 측정된 결과의 분포형태는 평균값을 중심으로 좌우 대칭형태를 보이고 있으며 평균값 이상 비율이 대체적으로 40~70% 범위로 비교적 넓은 분포를 나타내고 있다. 따라서 전체 영상중에서 평균값 이하의 영상 비율은 대략적으로 최대 70% 근방이 되어야 가능할 것으로 분석되었다.

센서별  $GRD_{avg}$ 와  $GRD_{max}$  및  $GRD_{min}$ 를 분석한 결과에 따르면  $GRD_{avg}$ 를 목표로 설정할 경우에는 센서 성능은 약 30% 성능을 나타낼 수 있도록 설계 되어야 할 것으로 분석되었다. 지금까지 기술된 본 논문의 해상도 실험실 측정 연구결과는 향후 항공용 EO/IR 센서 성능 설계와 지상 및 비행시험 영상 성능 평가/예측에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 실제 비행시험을 통해 획득된 다양한 영상을 분석하여 실험실 해상도 측정시험의 신뢰성을 확보할 예정이다.

## References

- [1] Kwang-Woo Park, Jeong-Yeol Han, Jongin Bae, Sug-Whan Kim, and Chang-Woo Kim, "Novel Compact Dual-Band LOROP Camera with Telecentricity," *Optics Express* Vol. 20, pp. 10921-10932, 2012
- [2] Kwang-Woo Park and Chang-Woo Kim, Hyng-Gyo Rhee and Ho-Soon Yang and Eun-Jong Lee "Stress-Relieved Assembly Method for a High-Resolution Airborne Optical System," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 60, pp. 1032-1036, 2012.
- [3] Kwang-Woo Park, Sang-Yeong Park, Young-Soo Kim, Ki-Ho Kim, and Young-Soo Choi, "Dual Band Optical Window(DBW) for Use on an EO/IR Airborne Camera," *Journal of the Optical Society of Korea*, Vol. 16, pp. 63-69, 2012.
- [4] John L. Minor, "Flight Test and Evaluation of Electro-Optical Sensor System," *SFTE 33<sup>rd</sup> Annual International Symposium*, IV-5-1.
- [5] Raymond E. Hanna, "Modeling EO Sensor Performance for Flight Test Scenarios," *SPIE Vol. 2555*, pp. 104-118, 1995.
- [6] Raymond E. Hanna, "Using GRD to Set EO Sensor Design Budgets," *SPIE Vol. 3128*, pp. 110-119, 1997.
- [7] John L. Minor, "Advanced Tactical Air Reconnaissance System Development Test and Evaluation RF-4C Final Flight Test Results," *SPIE Vol. 2272 Airborne Reconnaissance XVIII*, pp. 2-27, 1994.