

정지궤도 기상 영상기 MTF 특성 분석

조영민*

MTF Characteristics of GEO Meteorological Imager

Young-Min Cho*

Abstract

Communication Ocean Meteorological Satellite(COMS) for the hybrid mission of meteorological observation, ocean monitoring, and telecommunication service is planned to be launched onto Geostationary Earth Orbit (GEO) in 2008 according to the Korea national space program. For the development of the meteorological payload of COMS, imager, the characteristics of Modulation Transfer Function (MTF) for GEO meteorological imager is investigated and the theoretical MTF limit is analyzed for each spectral channel of the imager in the both cases of a currently operating GEO instrument technology and an advanced GEO instrument technology under development. This study shows that MTF value can be considerably low in the infrared channels with longer wavelength than $10\mu\text{m}$ due to diffraction effect so that the MTF performance of long wavelength infrared channels should be paid attention to for the development of the imager.

초 록

국내 최초로 통신, 해양, 기상 3분야 복합 임무를 수행하는 정지궤도 위성인 통신해양기상위성이 2003년부터 개발되어 2008년 발사 예정이다. 본 연구에서는 통신해양기상위성의 기상관측 탑재체인 기상 영상기(Imager)의 개발을 위해 정지궤도 위성 기상 영상기의 Modulation Transfer Function (MTF) 특성을 연구하고 현재 운영 또는 개발 중인 정지궤도 기상 영상기 기술을 고려하여 기상 영상기의 분광 채널별 MTF 한계값을 분석하였다. $10\mu\text{m}$ 이상의 장파장 적외선에서 회절 현상으로 인해 현저히 낮은 MTF가 얻어질 수 있으므로 기상 영상기의 개발시 장파장 적외선 채널의 MTF 성능에 대한 주의가 요구된다.

키워드 : 통신해양기상위성(communication ocean meteorological satellite), 기상 영상기 (meteorological imager), 변조전달함수(modulation transfer function), MTF

1. 서 론

국내 최초로 통신, 해양, 기상 3분야 복합 임무를 수행하는 정지궤도 위성인 통신해양기상위

* 위성응용그룹/ymcho@kari.re.kr

성이 2003년부터 개발되어 2008년 발사 예정이다.[1,2] 통신 분야 임무는 차세대 통신 탑재체 기술 우주검증, 위성통신 및 위성방송 시험서비스이고, 해양 분야 임무는 조기 적조 감시, 첨단 수산정보 제공을 통한 해양공간 및 수산자원의 효율적 관리, 한반도 주변국의 해양활동 및 환경 감시, 한국영해의 해양활동 감시이고, 기상 분야 임무는 기상예보 정확도 향상을 위한 대기정밀구조 관측, 태풍, 집중호우 등 한반도 악기상 특별 관측, 황사 및 대기오염 탐지, 국내외 기상정보 위성통신망 구축 등이다. 통신해양기상위성에는 3가지 탑재체, 통신 탑재체, 해양관측 탑재체, 기상관측 탑재체가 탑재된다. 통신해양기상위성은 국내 최초로 기상 임무를 수행하는 위성으로 기상 관측 탑재체 역시 국내 최초로 도입된다. 기상 관측 탑재체로서 기상 영상기(Imager)가 고려되고 있으며 기상 영상기로부터 생성되는 기상 영상 자료는 기상청 협업에 사용될 계획이다.

통신해양기상위성의 기상 영상기에 대해서 GMS-5 VISSR[3], GOES I-M Imager[4]과 같이 현재 운영 중인 기존 정지궤도 영상기보다 분광 채널 수 증가, 공간 해상도 향상, 신호대잡음비 향상, 전체 관측 소요 시간 축소 등의 성능 향상이 요구되고 있다. 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio: SNR) 향상, 전체 관측 소요 시간 축소(빈번한 관측) 등의 성능 향상을 위하여 최근에는 기상 영상기에 새로운 광검출 개념이 도입되고 있다.[5] 신 개념에서는 광검출기의 개수를 현저히 증가시키고 광학계의 시야를 넓혀 한 번에 많은 수의 지상 화소를 관측함으로써 주사 속도를 현저히 줄여 SNR 향상과 전체 관측 소요 시간 축소를 달성한다.

기상 영상의 공간 해상도는 기상 영상기의 주요 성능 요소인 지상 화소 크기와 Modulation Transfer Function (MTF)에 의해 주로 결정된다. 본 연구에서는 통신해양기상위성 기상 영상기 개

표 1. 기상 영상기 채널

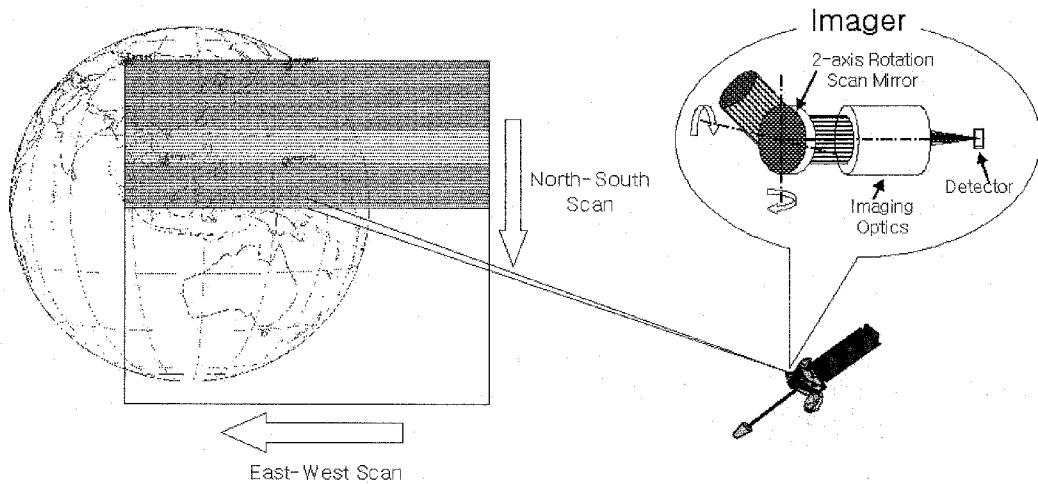


그림 1. 3축 안정화 정지궤도 위성에서 기상 영상기의 영상 주사

발을 위해 정지궤도 기상 영상기의 MTF 특성을 연구하고 MTF 한계값을 분석하였다. 우주급 신뢰성이 검증된 기술만을 사용하는 위성 개발의 특성을 고려하여 기존 광검출 개념의 영상기와 차세대 광검출 개념의 향상된 영상기의 2가지 경우 모두에 대해 기상 영상기의 MTF 한계값을 분석하였다. 현재까지 진행된 통신해양기상위성 기상 영상기의 요구사항을 고려하여 영상기의 분광채널을 표 1로 가정하고 MTF를 분석하였다.

2. 기상 영상기 MTF 성분 특성

지구 표면 위를 비행하는 저궤도 위성과는 달리 지표에 대해 상대적으로 정지해 있는 정지궤도 위성에서 2차원 영상 생성하는 방법은 위성체의 자세 제어 방식에 따라 다르다. 정지궤도 위성은 위성체가 한 축에 대해 자전하는 자전 형과 위성체 자세가 고정되어 위성체 한 면이 지구를 고정적으로 바라보는 3축 안정화 형으로 나누인다. 자전 형의 경우 위성 자전에 의해 한 방향(예: 동서 방향)으로 주사 관측이 이루어지고 다른 수직 방향(예: 남북 방향)으로 영상기 주사경이 1축 회전 주사를 수행하여 2차원 영상이 얻어

진다. 3축 안정화 형에서는 영상기 주사경이 서로 수직인 2가지 방향으로 회전하여 관측 대상을 주사함으로써 2차원 영상이 얻어진다(그림 1). 통신해양기상위성에서는 여러 복합 임무를 수행하기 위해 3축 안정화 위성체를 사용한다.

기상 영상기에서 영상을 생성하는 주요 구성 요소는 주사경, 망원경계, 광검출기, 전자신호처리회로이다. 3축 안정화 위성체 경우 주사경의 회전에 의해 관측 위치가 선정되고 선정된 위치의 관측 대상으로부터 영상기에 입사하는 복사광이 망원경계에 의해 광검출기에 결상되고 광검출기는 복사에너지를 아날로그 전자신호로 변환시키고 전자신호처리회로는 디지털 신호 생성 및 지상 전송을 위한 신호처리를 수행한다.

영상기의 각 구성 요소는 각각 성능에 직접적인 영향을 주는데 일반적으로 영상기의 각 구성 요소별로 성능 성분 산출이 가능하고 각 성분으로부터 전체 성능을 구할 수 있다. 영상기의 공간 해상 능력을 결정하는 MTF는 임의의 공간주파수에서 관측 물체 에너지의 공간적 변조(Modulation)에 대한 영상 변조의 비율로서 공간주파수의 감소함수이다. 영상기의 각 구성 요소별로 MTF 성분 산출이 가능하고 영상기 전체 MTF는 각 성분 MTF의 곱으로 얻어진다.

일반적으로 정지궤도 기상 영상기에서 고려되고 있는 주요 MTF 성분은 광학계 MTF, 광검출기 MTF, 주사 운동 MTF이다(표 2). 본 연구에서는 탑재체 기기 차원에서 영상기의 MTF 성능을 다루고자 하며 우주환경, 영상 압축, Image Navigation Registration, 지상국 영상 처리 및 보정에 관련된 MTF 특성은 고려하지 않는다. 광학계 MTF는 불완전한 광결상에 의한 것으로 회절, 수차, 제작 공차, 조립/정렬 오차, 환경 변형 등의 요인이 있다. 광검출기 MTF에 대해서는 주로 Spatial Sampling MTF이 고려되는데 Spatial Sampling MTF는 물체의 공간적 광분포가 검출기 소자 크기 단위씩 이산적으로 광검출기에 의해 추출되는 과정에서 검출기 소자의 유한한 크기 내에서 공간적 평균화로 인한 기하 성능 감소를 나타낸다. 주사 운동 MTF에 대해서는 영상기 차원에서 Temporal Sampling MTF가 주로 고려되는데 Temporal Sampling MTF는 광검출기의 노출 시간 동안 주사 운동에 의해 물체의 공간적 광분포가 적분되어 발생하는 기하 성능 감소를 나타낸다.

영상은 공간적으로 2차원이므로 MTF 또한 2차원으로 표현된다. 일반적으로 기상 영상기는 동서 (East-West: E-W) 방향으로 한 줄을 주사하고 남북(North-South: N-S) 방향으로 줄을 바꾸어 다시 동서 방향으로 주사하는 것을 전체 시야에 걸쳐 반복하여 2차원 영상을 만든다. 동서 방향 주사 한 줄의 폭(남북 방향)은 주로 검출기 소자 수에 의해 결정된다. 따라서 주사 운동 MTF는 동서 방향으로만 고려되고 전체 시스템 MTF에 대해 두 방향 중에서 동서 방향 MTF가 더 낮은 값을 갖는다.

표 2. 기상 영상기 MTF 주요 성분

MTF 성분	E-W 방향	N-S 방향
Optics MTF	○	○
Detector MTF (Spatial Sampling MTF)	○	○
Scan Motion MTF (Temporal Sampling MTF)	○	×

기상 영상기 MTF 성분 별로 이론적 한계값을 구할 수 있다. 광학계 MTF는 광학회절한계 MTF로 주어지는 이론적 한계값을 갖는다. 광학계의 유한한 구경 크기에 의해 발생하는 회절 효과 때문에 영상 흐림이 나타나는 데 이를 MTF으로 표현 한 것이 광학회절한계 MTF이다.[6] 잘 알려진 Rayleigh 해상도[7]는 결상 광학계의 광학 회절만을 고려하여 정한 해상도 기준으로서 일종의 회절한계 해상도이며 광학회절한계 MTF와 관련이 있다. 광검출기 MTF의 이론적 한계값은 검출기 소자의 유한한 크기에 기인하는 Spatial Sampling MTF[6]으로 정할 수 있다. 주사 운동 MTF에 대해서는 광검출기의 노출 시간 동안의 주사 거리에 의해 결정되는 Temporal Sampling MTF가 이론적 한계값이 된다. 동서 방향의 영상기 전체 MTF 한계값은 3가지 주요 성분의 이론적 한계 MTF 모두 (광학회절한계 MTF, Spatial Sampling MTF, Temporal Sampling MTF)를 곱하여 얻을 수 있고, 남북 방향의 영상기 전체 MTF 한계값은 광학회절한계 MTF와 Spatial Sampling MTF를 곱하여 얻어 진다.

3. 기상 영상기 MTF 한계값 분석

우주급 신뢰성이 검증된 기술단을 사용하는 것이 위성 개발의 특성이므로 우주 비행 품질이 확실하게 검증된 기존 운영 광검출 개념의 영상기와 개발 중인 차세대 광검출 개념의 향상된 영상기 2가지 경우 모두에 대해 기상 영상기 성능을 검토할 필요가 있다. 정지궤도 기상 영상기에 대해 우주급 기술 검증 뿐 만아니라 수 년 동안의 긴 개발 일정과 막대한 개발 비용이 소요되는 방대한 개발 프로그램이 요구되기 때문에 모범적인 다른 영상기들의 기술 사례 적용은 현실적인 성능 예측 및 개념 설계에 많은 도움이 된다. 본 연구에서는 현재 운영중인 기존 영상기와 개발 중인 차세대 향상된 영상기에 대해 대표적인 사례를 각각 선정하고 각 사례 기술 적용시 표 1의 영상기에 대한 MTF 특성을 비교 분석하였다.

운영 중인 기존 정지궤도 기상 영상기 사례로서 잘 알려진 GOES I-M Imager[4]를 선택하였고 차세대 향상된 정지궤도 기상 영상기에 대해서는 현재 개발 중이며 2004년 발사 예정인 Japanese Advanced Meteorological Imager (JAMI)[5]를 선택하였다. GOES I-M Imager는 지상 해상도 1km의 가시광 채널 1개, 지상 해상도 4km 적외선 채널 3개, 지상 해상도 8km 적외선 채널 2개를 가지며 구경 31.1cm의 주면경의 땅원경이 장착되어 있다. JAMI는 영상 획득시 지상 해상도 0.5km, 지상국 자료처리 후 지상 해상도 1km의 가시광 채널 1개와 영상 획득시 지상 해상도 2km, 지상국 자료처리 후 지상 해상도 4km의 적외선 채널 4개를 가지며 광학 구경은 20cm이다.

해상도 및 MTF에 대한 이해를 돋기 위해 30cm와 20cm의 두 가지 구경에 대해 지상에서의 Rayleigh 해상도를 표1의 분광 채널 파장별로 구하였다(그림 2). 두 구경 모두 가시광선 및 근적외선 영역에서는 주어진 해상도 1km보다 훨씬 작은 Rayleigh 해상도를 보이지만 적외선 영역에서는(특히 장파장의 적외선에서) Rayleigh 해상도가 주어진 해상도 2km 근처에 있다. 구경 20cm에서는 표1의 분광채널 중에서 9 μ m 이상의 파장 3개(WIN1, WIN2, CO2 채널)에 대해 Rayleigh 해상도가 2km보다 큰 반면, 구경 30cm에서는 표1의 모든 적외선 파장에서 Rayleigh 해상도가 2km보다 작다.

기존 운영 영상기 GOES I-M Imager와 차세대

개발 영상기 JAMI의 기술을 적용하는 경우 각각에 대해 표1의 기상 영상기 채널에서 각 성분 MTF의 이론적 한계값을 구하고 동서 방향의 영상기 전체 MTF의 한계값을 구하였다(그림 3, 4). 광점출기 MTF 한계(Spatial Sampling MTF)에서 검출기 화소 크기는 표 1의 지상 해상도에 해당하는 것으로 가정하였다. 주사 운동 MTF 한계(Temporal Sampling MTF)에서 가시광선 및 근적외선의 노출 시간은 화소 길이의 0.5배 주사 시간으로 가정하였고 적외선의 노출 시간은 화소 길이의 0.1배 주사 시간으로 가정하였다. 두 경우 모두 가시광선 및 근적외선에서는 MTF 성능이 주로 광점출기 한계로 결정되고, 장파장 적외선에서는 MTF 성능이 주로 광학계 회절 한계로 결정됨을 알 수 있다. 가시광선과 근적외선 영역에서는 두 경우 MTF 한계값의 차이는 적지만 적외선 영역에서는 파장이 클수록 차이가 많아서 10.8 μ m 이상의 파장에서는 현저하게 차이가 나타나고 있다. 이 것은 가시광선과 같이 짧은 파장에서는 회절 효과가 적어 영상기 전체 MTF가 광점출기 한계 특성을 보이면서 광학 구경에 민감하지 않는 반면, 적외선의 긴 파장에서는 회절 효과가 상당히 커져 영상기 전체 MTF가 회절한계 특성을 보이면서 광학 구경에 매우 민감하기 때문이다.

두 경우 모두 가시광선에서는 화소 Nyquist 주파수에서 대략 0.5의 높은 MTF 한계값이 얻어지지만, WIN2와 CO2 채널(파장 12 μ m와 13.35 μ m)에 대해 화소 Nyquist 주파수에서 GOES I-M Imager 경우 0.3 정도, 구경이 적은 JAMI의 경우 0.2 정도의 MTF 한계값이 얻어져 상당한 MTF 저하가 발생하는 것을 알 수 있다. 본 연구의 MTF 한계값은 일부 주요 성분만을 이론적으로 구한 이상적인 최대값이므로 채널 응답 분광 곡선, 전체 검출기 시야, 주사 오차, 설계 오차, 제작 공차, 조립/정렬 오차, 측정 오차, 환경 영향 등의 모든 요인이 고려되면 MTF 저하가 추가로 발생하여 실제 MTF는 MTF 한계값 보다 더 낮아 질 수 있다. 따라서 통신해양기상위성의 기상 영상기 개발시 WIN2와 CO2 채널의 MTF 성능에 대해 상당한 주의가 요구된다.

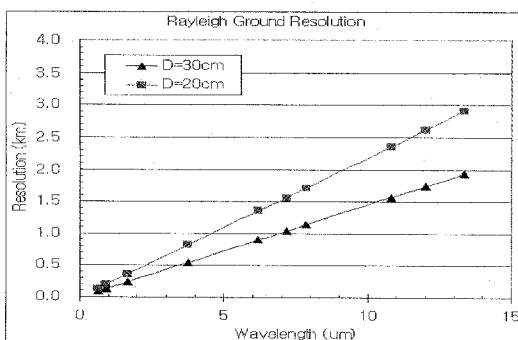
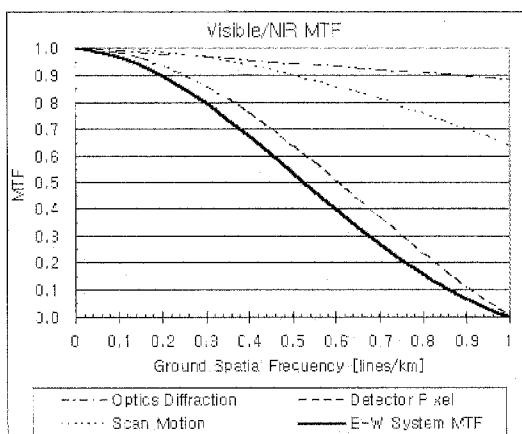
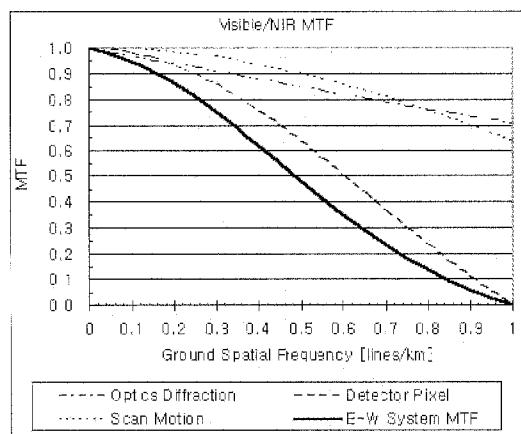


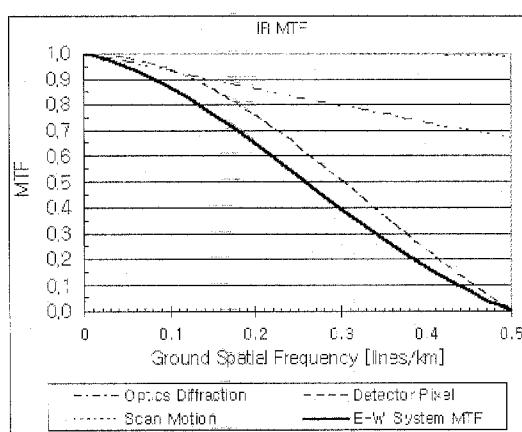
그림 2. 광학 구경(D)과 파장에 대한 지상에서의 Rayleigh 해상도 변화



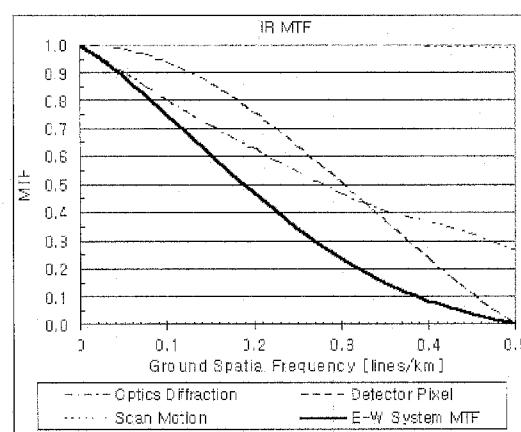
(a) VIS1 채널 (파장 0.63μm)



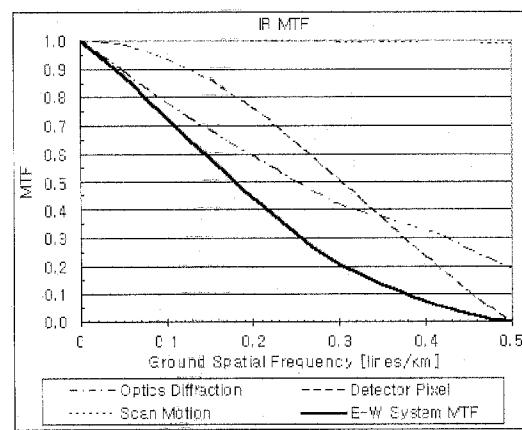
(b) NIR 채널 (파장 1.64μm)



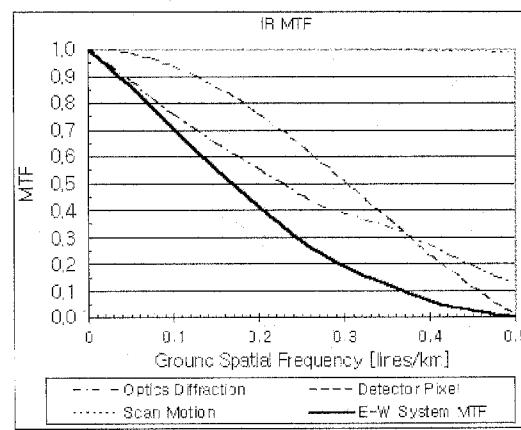
(c) SWIR 채널 (파장 3.75μm)



(d) WIN1 채널 (파장 10.8μm)

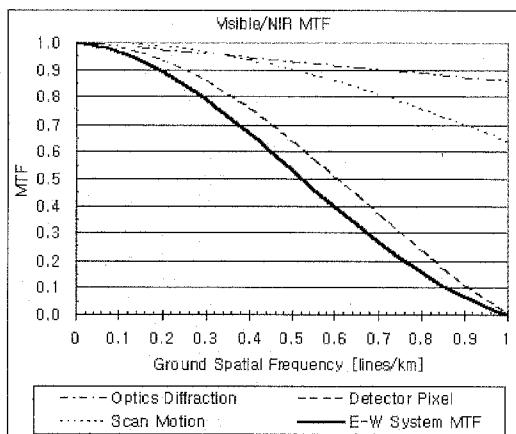


(e) WIN2 채널 (파장 12μm)

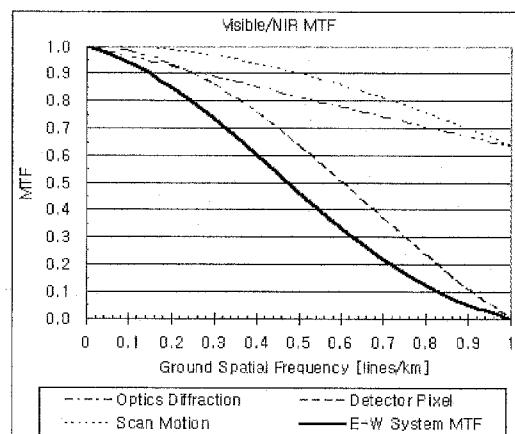


(f) CO2 채널 (파장 13.35μm)

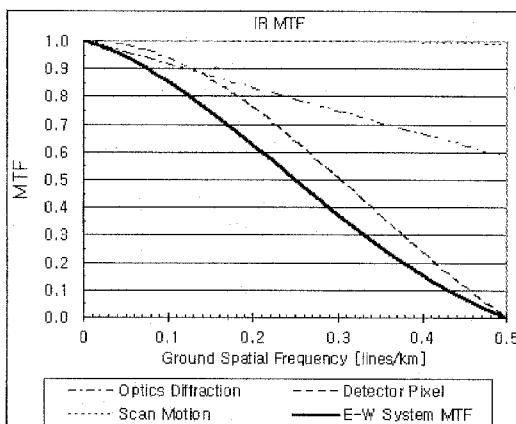
그림 3. 운영 중인 기준 영상기(GOES I-M Imager) 기술 사례 적용시 분광 채널별 MTF 한계값



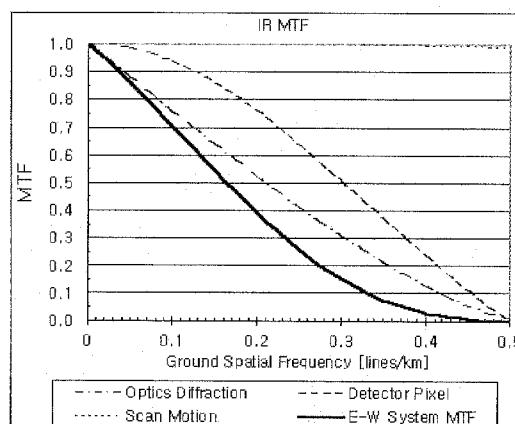
(a) VIS1 채널 (파장 0.63μm)



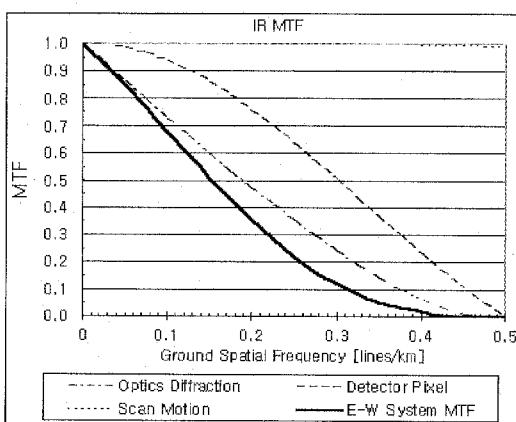
(b) NIR 채널 (파장 1.64μm)



(c) SWIR 채널 (파장 3.75μm)



(d) WIN1 채널 (파장 10.8μm)



(e) WIN2 채널 (파장 12μm)

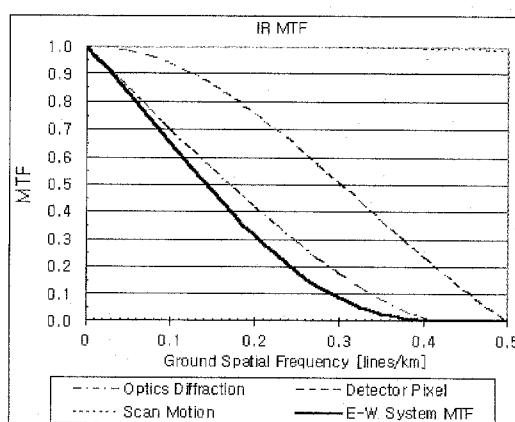

 (f) CO₂ 채널 (파장 13.35μm)

그림 4. 개발 중인 차세대형 영상기(JAMI) 기술 사례 적용시 분광 채널별 MTF 한계값

4. 결 론

통신해양기상위성 기상 영상기 개발을 위하여 정지궤도 기상 영상기의 MTF 특성을 연구하고 MTF 한계값을 분석하였다. 현재 운영 및 개발 중인 정지궤도 기상위성 영상기 기술을 고려하여 기상 영상기 분광 채널 별로 각 성분 MTF의 이론적 한계값을 구하고 영상기 전체 MTF의 한계값을 구하였다.

가시광선 및 근적외선에서는 MTF 성능이 주로 광검출기 한계로 결정되고, 장파장 적외선에서는 MTF 성능이 주로 광학계 회절 한계로 결정됨을 알 수 있었다. $10\mu\text{m}$ 이상의 장파장 적외선에서 회절 현상으로 인해 현저히 낮은 MTF가 얻어질 수 있으므로 통신해양기상위성의 기상 영상기 개발시 파장 $10\mu\text{m}$ 이상의 적외선 채널의 MTF 성능에 대해 상당한 주의가 요구된다.

본 연구에서 얻어진 기상 영상기 MTF 특성 분석 결과는 통신해양기상위성 개발을 위한 기본 개념 설계에 유용하게 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. 최성봉, 통신방송기상위성 개발 기획연구, 대전, 한국항공우주연구원, 2002.
2. 최성봉, 기상관측위성 개발 선행연구, 대전, 한국항공우주연구원, 2002.
3. <http://mscweb.kishou.go.jp/general/activities/gms/index.htm>
4. Space Systems Loral, GOES I-M Databook Revision 1, 1996, pp.20-38.
5. Seiichiro Kigawa, "Overview of MTSAT-1R Imager", Meteorological Satellite Center Technical Note, No. 39, 2001, p.33.
6. S. B. Campana, The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook Vol. 5, Bellingham, 1993, pp.76-85.
7. W. J. Smith, Modern Optical Engineering, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, 1990, pp.151-152.