

시뮬레이션을 통한 군용 망원경 미러 알루미늄 코팅 주기 예측 연구

최효준*, 박준수, 이정훈, 오영일
(주) LIGNex1

Military Telescope Mirror Aluminum Re-Coating Prediction Study by Simulation

Hyo-Jun Choi*, Jun-Su Park, Jung-Hoon Lee, Young-Il Oh
LIGNex1 Co. Ltd

요약 망원경의 성능 유지를 위해서 중요한 것 중 하나가 미러의 재코팅이다. 미러에 코팅된 금속은 빛을 반사시키는 역할을 하며 반사율이 떨어지게 되면 망원경의 성능이 저하되므로 주기적으로 재코팅을 해야 한다. 군 무기체제로 개발되는 망원경은 성능 뿐만 아니라 임무 수행을 위한 무기체계 가용도와 장기간 사용을 위한 운용유지비 관점에서 미러의 재코팅 주기를 예측하고 정비계획을 수립하는 것이 필요하다. 그러나 대부분 천문 연구용으로 사용되는 유사 망원경들은 예측이 아닌 경험치와 운용 환경에 따라 재코팅 주기를 결정한다. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션을 활용하여 무기체제로 개발되는 망원경 미러의 세척 주기와 재코팅 주기를 예측하였다. 첫째, 국내외 천문연구원들의 유사 사례를 분석 및 코팅의 필요성과 코팅 주기 예측의 필요성을 확인하였다. 둘째, 데이터 분석과 모델링을 통해 미러 세척 빈도와 코팅 주기를 예측하는 시뮬레이션을 설계하였다. 마지막으로 성능을 만족하기 위한 반사율 감소 조건을 5%, 10%, 15%, 20%로 설정하고, 세척 조건 3개월, 6개월, 1년, 2년 단위로 다양화 하여 해당 조건 별 세척 주기 및 재코팅 주기를 예측하였다. 이를 통해 본 연구는 군 무기체제로서 망원경을 개발하며 정비계획을 수립하는 데 참고할 수 있는 기준을 제시하였다.

Abstract Re-coating of the mirror is one of the important things to maintain the performance of a telescope. The metal coated on the mirror reflects light, and if the reflectance decreases, then the telescope's performance decreases, so the mirror must be periodically recoated. It is important to predict re-coating cycles for military telescopes and to develop maintenance plans not only for performance, but also for the telescope's availability for missions and the maintenance costs for long-term use. However, most similar telescopes used for astronomy research determine recoating cycles based on experience and operating conditions, and not for prediction of recoating. Therefore, this study predicts the cleaning cycles and re-coating cycles of a military telescope's mirror by using simulation. First, this study analyzed similar cases of domestic and foreign astronomy research institutes and the study also reviewed the need for re-coating and predicting re-coating cycles. Second, this study developed simulation for predicting cleaning and re-coating cycles according to data analysis and modeling. Finally, the study predicts cleaning cycles and re-coating cycles according to varying reflectance reduction (5%, 10%, 15%, 20%) and cleaning conditions (per 3 months, 6 months, 1 year and 2 years). As a result, this study suggests reference criteria to develop the planning for military telescopes and their maintenance.

Keywords : Military-Telescope, Cleaning-Cycle, Mirror Re-Coating Cycle, Simulation, Maintenance Planning

*Corresponding Author : Hyo-Jun Choi(LIGNex1 Co. Ltd)

email: hyojun.choi@lignex1.com

Received September 5, 2019

Revised September 30, 2019

Accepted January 3, 2020

Published January 31, 2020

1. 서론

광학 망원경은 미러를 이용하여 가시광선, 적외선, 자외선 등의 전자기파를 모아 멀리 있는 물체를 관측하는 장치이다. 망원경은 주로 천문학에 많이 사용하며 군용으로는 하늘의 위성을 탐색 및 추적하기 위해 사용한다. 본 논문에서는 군용으로 사용하는 망원경의 가용도와 운영유지 전략을 최적화 하기위한 미러의 정비계획 전략을 도출하고자 한다.

광학 망원경은 일반적으로 미러를 이용하여 물체에서 나오는 빛 에너지를 모아 상을 만들고 검출기(CCD : Charge Coupled Device, CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor 등)를 통해 영상을 검출한다. 광학 망원경의 가장 중요한 성능 요소는 집광능과 분해능으로 미러의 크기 및 지름에 따라 결정된다. 집광능은 어두운 피사체를 볼수 있게 해주는 것이고, 분해능은 멀리있는 피사체를 더욱 세밀하고 뚜렷하게 볼 수 있게 해주는 것이다.

광학 망원경의 설계가 끝나면 미러의 크기나 검출기의 성능은 고정되게 된다. 운용유지 단계에서 미러의 반사율은 광학 망원경의 성능에 큰 영향을 미친다. 미러는 빛의 반사를 위해 알루미늄, 은, 금 등으로 코팅을 한다. 알루미늄 코팅을 수행한 직후에는 200 nm ~ 1000 nm 파장대역에서 80% 이상의 반사율을 보인다. 그리고 은 코팅의 경우 350 nm 이상에서 80% 이상의 반사율을 보이며, 금 코팅의 경우 700 nm 이상에서 98% 이상의 높은 반사율을 보인다. 따라서 운용목적에 따라 주로 관측하는 파장대역에서 높은 반사율을 가지는 재료로 코팅을 하게 된다. 본 논문에서는 넓은 파장대역에서 80% 이상의 높은 반사율을 보여 범용적으로 사용하는 알루미늄 코팅 미러를 대상으로 연구하였다.

미러 코팅은 외부로 노출되어 시간이 경과함에 따라 산화 및 오염이 발생한다. 산화는 대기중에 노출됨에 따라 금속 고유의 성질에 의해 산화되는 것을 의미한다. 오염이란 대기에 있는 먼지 등의 이물질에 의해서 발생하게 된다. 미러의 산화 및 오염은 반사율을 저하하게 하는 주된 요인이며 성능 유지를 위해 미러 에어세척(Air-Cleaning), 특수세척(Wash-Cleaning) 및 재 코팅을 수행하게 된다.

미러 에어세척이란 미러 표면의 이물질을 제거하기 위해 압축 질소(N₂) 및 이산화탄소(CO₂)를 이용하여 불어내는 것을 말한다. 특수세척은 미러 전용 세척액을 표면에 발라 이물질을 직접 제거하는 방법을 말한다. 재 코팅

은 미러에 증착되어 있는 코팅(알루미늄, 은, 금 등)을 용해액으로 완전히 제거한 이후 코팅기를 이용하여 다시 코팅을 증착하는 방법을 말한다.

에어세척은 망원경을 별도로 분해하지 않고 외부에서 먼지를 불어내는 방법으로 짧은 작업 시간과 저비용의 이점이 있다. 하지만 먼지가 유히얇거나 혹은 송진가루에 의해 눌러 붙어 있는 경우 제거가 쉽지않아 세척효과에 한계가 있다. 특수세척은 미러 전용세척액으로 직접 세척하는 방식으로 에어세척보다 높은 세척능력을 발휘한다. 하지만 필요에 따라 망원경을 부분 분해해야하며 세척을 위해 미러를 직접 접촉해야 하기 때문에 미러의 손상을 야기하는 위험이 있다. 따라서 숙련된 기술자가 필요하며 에어세척에 비해 상대적으로 오랜 시간과 장비 손상의 리스크가 있다. 재 코팅은 망원경에서 미러를 완전 분해하여 코팅 제거 후 새로 코팅 물질을 증착하기 때문에 최초의 높은 반사율을 복원할 수 있다.

Fig. 1은 미러의 재코팅 전(a) 후(b)를 비교한 사진이다. 육안으로도 반사율 차이를 확인 할 수 있으며, 재코팅의 효과와 필요성을 알 수 있다[1].

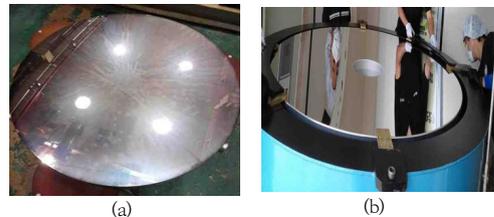


Fig. 1. Bohyunsan Telescope's Mirror[1]
(a) Before Re-Coating (b) After Re-Coating



Fig. 2. Reflectivity Graph Gemini Optics's GN Telescope's M2 Mirror[2]

Fig. 2와 Table 1은 2주 단위의 에어세척과 반기의 특수세척으로 유지보수하고 있는 해외 망원경의 2008년~2013년까지의 반사율 변화를 나타내는 자료이다. 에어세척 및 특수세척을 주기적으로 해주더라도 반사율은

감소하고 있다. 2008년과 2012년 재코팅을 통해 반사율이 크게 상승하였다. 따라서, 재코팅이 필요하며 일반적으로 4년에서 5년 주기로 재코팅을 하고 있음을 확인할 수 있다[2].

Table 1. Reflectivity Data Gemini Optics's GN Telescope's M2 Mirror[2]

Date	Reflectivity	Event
7-Aug-2008	0.8832	
20-Aug-2008	0.8870	
3-Sep-2008	0.8971	
23-Oct-2008	0.9187	After Re-Coating
25-Nov-2008	0.9203	
17-Sep-2009	0.9148	
22-Oct-2009	0.9140	
5-Nov-2009	0.8964	
18-Nov-2009	0.9132	
9-Dec-2009	0.9129	
1-Feb-2010	0.9054	
22-Feb-2010	0.9048	
11-Mar-2010	0.9091	
18-Mar-2010	0.9140	
7-Apr-2010	0.9041	
6-May-2010	0.9100	
12-May-2010	0.9117	
2-Jun-2010	0.9041	
17-Jun-2010	0.9097	
26-Jan-2011	0.8960	
6-Jan-2012	0.8697	
7-Jan-2012	0.9310	After Re-Coating
16-Feb-2012	0.9273	
23-Aug-2012	0.9244	
12-Sep-2012	0.9160	
19-Dec-2012	0.9192	
13-Mar-2013	0.9216	
10-Apr-2013	0.9239	
10-Jul-2013	0.9164	
15-Aug-2013	0.9142	
4-Apr-2014	0.9106	
29-Oct-2014	0.8849	
9-Feb-15	0.9053	

재코팅은 성능유지의 관점에서 가장 이상적인 유지보수 방법이다. 하지만 미러를 분해하기 위해 많은 작업소요시간과 미러가 손상받을 수 있는 높은 리스크가 있다. 작업소요시간은 짧게는 1주일에서 길면 1달 이상 소요될 수 있다. 이러한 작업소요 시간은 군 운용체계에서 가용도에 치명적이며 재코팅을 위해서는 분해 및 조립, 정렬 등의 고난이도 기술이 필요하며 많은 경제적 비용을 야기한다.

위성을 감시하는 임무 수행 목적의 군무기체계로서 개발하는 망원경은 상시 임무가 하달될 수 있으며 높은 운용가용도로 안보 공백을 최소화 하여야 한다. 성능만을 위해 너무 짧은 간격으로 재 코팅을 수행할 수 없고 정비

비용의 최적화가 필요하다.

본 연구는 세척 주기와 목표 반사율에 따른 망원경 미러의 재코팅 주기를 시물레이션을 통해 예측하였다. 2장 본문에서 국내 및 해외 망원경들의 코팅 주기에 대한 사례 조사와 재코팅을 하는 기준에 대하여 검토하고, 데이터를 분석하여 코팅 주기 예측 모델을 만들어 코팅 주기를 예측하고, 3장 결론으로 마무리 한다.

2. 본론

2.1 유사 망원경 코팅 사례

2.1.1 국내 사례

국내 보현산 천문대의 망원경은 장마 기간인 7~8월 간 망원경 운영을 중단한다. 눈이나 비가 오거나 날씨가 매우 흐린 경우 관측이 불가능하기 때문이다. 매년 이 기간은 운영을 중지하므로, 이 기간에 재코팅을 수행한다 [1]. 별도의 예측이나 데이터 분석을 통해 코팅 주기를 판단하지 않고 운영 개념에 맞춰 효율적으로 코팅을 수행한다고 볼 수 있다.

2.1.2 해외 사례

미국 애리조나와 칠레 북쪽에 위치한 NOAO(National Optical Astronomy Observatory) 망원경의 알루미늄 재 코팅은 4년 주기로 계획하고 수행한다. 기존에 2년 주기로 수행했으나, 분기마다 세척액을 사용하는 특수 세척(Wash-Cleaning)을 통해 반사율 감소량을 낮추고 먼지 등을 제거 하면서 재코팅 주기를 2년에서 4년으로 길게 가져가고 있다[3].

2.2 데이터 분석

2.2.1 반사율 감소 영향 요소 분석

국/내외 코팅 주기 선정 사례를 살펴본 결과 망원경 설치 전 코팅 주기에 대한 예측을 한 연구 사례는 없었다. 군 무기체계는 정비 주기에 대한 예측 분석이 필수적이다. 정비 계획을 통해 인원 배치, 예산 편성 등의 활동을 수행하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 기존 연구 결과의 데이터를 활용하여 요구 조건에 따라 코팅 주기를 선정하여 정비계획을 수립할 수 있도록 시물레이션으로 제시하고자 한다.

망원경 미러의 반사율을 감소시키는 요소는 2가지로

구분할 수 있다. 첫째는 코팅 금속 자체의 부식이다. 금속 자체가 부식되면서 반사율이 낮아질 수 있다. 둘째는 환경 조건이다. 먼지 등의 이물질이 코팅 금속 표면에 자리 하면서 반사율이 낮아지게 된다. 위 두 가지 원인을 제거 및 완화하여 반사율을 유지시키거나 높일 수 있고 이를 통해 코팅 주기를 조절 할 수 있다.

시뮬레이션 모델링에 앞서 알루미늄의 부식률과 빛 반사율의 상관 관계를 분석하였다.

알루미늄의 부식률은 환경운동연합에서 진행한 대기 오염물질에 의한 금속의 부식도 조사 연구결과를 참고하였다. 인천, 부산, 여천, 신도림, 울산, 대구 등 국내 각 지역에 3종류(알루미늄, 동판, 철)의 실험용 금속시편을 두어 1995년에 시작하여 1998년까지 3년간 3개월, 6개월, 9개월, 12개월, 18개월, 24개월, 30개월, 36개월 마다 측정하여 분석하였고, 알루미늄의 부식은 지역 특성에 큰 영향을 받지 않는다는 연구 결과를 도출하였다. 이 결과를 토대로 부식을 통한 반사율 감소는 망원경이 설치되는 장소에 상관없이 유사할 것으로 가정하였다. Table 2는 국내 여러 지역의 알루미늄, 철, 동판의 3년 동안 외부에 노출시켰을 때 3년 째의 부식률 데이터이다. Table 2의 부식률을 분석한 계산식은 Eq. (1) 과 같다.

$$R = (W1 - W2) / W1 \times 100 \quad (1)$$

Where, R denotes Corrosion Rate, W1 denotes metal weight before exposure, W2 denotes metal weight after exposure

Table 2. Corrosion Rate(%) of Aluminum, Steel, Copper in KOREA[4]

Region	Corrosion Rate(%), Aluminum	Corrosion Rate(%), Copper	Corrosion Rate(%), Steel
Incheon	1.8901	2.3897	17.3245
Busan	1.9498	1.8102	18.4234
Yeocheon	1.5233	1.6919	19.1005
Sindorim	1.6024	1.5002	15.2318
Ulsan	1.9005	2.6498	19.2538
Daegu	1.4932	2.8672	17.1824
Jeonju	1.4821	1.0808	15.8976
Kwangju	1.3918	1.3887	14.3157
Daejeon	-	-	-
Cheonju	1.4439	1.4312	14.9725
Hankookilbo	1.7396	1.6012	14.4197
Chuncheon	1.6214	1.1952	15.6872
Pocheon	1.4027	1.3296	14.9094

금속별 부식률이 가장 높은 지역과 낮은 지역의 비율을 통해 환경이 해당 금속의 부식에 미치는 영향을 판단하였다. 철은 1.3배, 알루미늄은 1.4배, 동판은 2.2배로

써 철과 알루미늄의 부식은 동판 대비 환경 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있다[4].

먼지 등 이물질에 의한 알루미늄의 반사율 영향성은 하와이 마우나케아 산에서의 실험 데이터를 통해 확인할 수 있다[5].

Table 3. Cleaning Experiment Witness Mirrors[5]

Case	Witness Mirror	Cleaning Treatment
1	T30DA	Protected standard, stored in desiccated container
2	C1	Never cleaned, exposed in dome
3	C2	CO2 clean every month, exposed in dome
4	C3	Wash clean every month, exposed in dome

실험용 미러를 망원경 돔 도어 근처에 33개월 간 놓아 두고, Table 3에서 보는 바와 같이 보호, 보호나 세척을 하지 않는 경우, 이산화탄소(CO2) 세척, 액체 세척 적용 총 4개의 경우로 반사율 데이터를 측정하였다. 측정 결과는 Table 4와 같으며, 측정 기간 동안 Case 1은 반사율이 거의 일정하게 유지되었고, Case 2와 Case 3은 지속적으로 감소하였다. Case 4는 월별 반사율 변화 폭은 크지만 전체 기간 관점에서 반사율은 유지되었음을 확인할 수 있다.

Table 4. Reflectivity Degradation Data by Witness Mirrors

Month	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1	89.5	89.5	89.8	89.6
2	89.5	89.2	87.2	87.6
3	89.5	89	89.9	90.4
4	89.5	89.2	89.9	90.2
5	89.5	88.8	89.7	89.6
6	89.5	88.2	89.2	89.7
7	89.5	88.1	89.2	89.6
8	89.2	88.1	89	89.9
9	89.2	88.1	89.2	90
10	89.2	87	88.7	90.2
11	89.2	86.8	87.7	89
12	89.2	86.6	86.9	88.2
13	89.2	87.1	87.5	90
14	89.2	87.5	88	90.5
15	89.2	86	86.9	90.1
16	89.2	85.6	87.5	90.1
17	89.2	84.6	86.2	89
18	88.8	83.6	84.6	88.2
19	88.8	83.3	84.2	88.5
20	88.8	84.8	86	90.3
21	88.8	83.7	85.5	88.3
22	88.8	82.2	83.3	89
23	88.9	83	84	89
24	88.9	81.9	84.5	89.3
25	88.9	82.1	85.3	91.4

Month	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
26	88.9	81.2	84.5	89.7
27	88.9	81.5	84	88.3
28	88.9	81.9	85.3	88.4
29	89	81.1	85	90.6
30	89	80.7	84.4	89.5
31	89	80.4	83.7	89.8
32	89	81	83.9	90
33	89	81.7	84	90.5

Case 1에 해당하는 건조된 용기에 보관한 알루미늄 코팅 미러는 먼지 등의 이물질에 영향을 받지 않았으므로, 코팅된 알루미늄의 부식이 반사율 감소에 영향을 미치는 조건이다. 환경운동연합의 연구 결과알루미늄의 부식은 지역 및 환경의 영향을 적게 받으므로, 동일한 환경에서의 데이터는 아니지만 환경운동연합 연구의 알루미늄 부식률과 Case 1의 알루미늄 코팅 미러의 반사율의 상관관계를 Matlab을 통해 분석해보았다. 알루미늄의 부식률과 반사율의 관계는 Fig. 3을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 3의 그래프를 분석하면 부식률 감소 경향과 Case 1의 반사율의 R은 0.9102, 기울기는 -1.115을 갖는 1차 선형 관계로 표현이 가능하다. Table 3에서와 같이 3년 이상이 되어야 부식률이 1.5 이상을 갖게 되는데 이 기간 동안 반사율은 2% 이내로 감소한다. 따라서 환경적으로 보호가 되는 상황에서의 알루미늄 코팅의 부식 정도는 반사율에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단할 수 있다. 노출된 환경에서의 반사율 감소는 먼지 등의 이물질의 영향이 크고 알루미늄 부식의 영향성은 적다고 볼 수 있다.

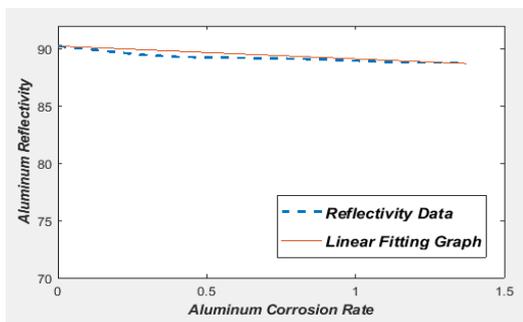


Fig. 3. Relationship Graph between Corrosion Rate and Reflectivity Rate

알루미늄의 부식률이 반사율에 미치는 영향이 적다면, 알루미늄의 반사율을 유지하고 코팅 주기를 계획하는데는 이물질을 제거해주는 세척의 횟수가 중요 요소가 될 것이다. 망원경이 설치되는 실 사이트에서 측정한 데이터가 있다면 최선이겠지만, 현재는 불가능한 관계로 하와이

마우나케아 산에서 측정한 데이터를 모델링하여 시뮬레이션 분석을 진행하였다.

2.2.2 시뮬레이션 모델링

Table 3의 Case 3과 Case 4를 보면 각각 세척하는 방법이 다르다. Case 3의 경우 CO2를 분사하여 먼지 등 이물질을 제거하는데, 에어세척(Air-Cleaning)으로 표현한다. Case 4의 경우 특수용액을 발라 물로 씻어내듯 알루미늄 코팅 표면을 세척하는 방법으로 특수세척(Wash-Cleaning)으로 표현한다.

국내 무기체계로 개발되는 망원경에는 두 가지 방법을 모두 사용하고자 하기 때문에 두 데이터를 모델링하여 Matlab으로 시뮬레이션 하였다. 모델링 방법은 시계열 분석 모델 중 Random Walk with Drift 모델을 적용하였다[6].

Eq. (2)는 에어세척에 따른 반사율 감소량을 모델링한 수식이다. 여기서 δ (delta)는 상수이고, $W1(t)$ 는 가우스 분포를 따르는 에어세척을 통한 변화 값이다. t 는 시간을 의미하며, 단위는 월 단위이다.

$$X(t+1) = \delta + X(t) + W1(t) \quad (2)$$

Where, t denotes time(month), δ denotes constant, $x(t)$ denotes reflectivity, $W1(t)$ denotes Air-Cleaning variable

Eq. (3)은 특수세척에 따른 반사율 감소량을 모델링한 수식이다. 여기서 δ (delta)는 상수이고, $W2(t)$ 는 유니폼 분포를 따르는 특수세척을 통한 변화 값이다. t 는 시간을 의미하며, 단위는 월 단위이다.

$$X(t+1) = \delta + X(t) + W2(t) \quad (3)$$

Where, t denotes time(month), δ denotes constant, $x(t)$ denotes reflectivity, $W2(t)$ denotes Wash-Cleaning variable

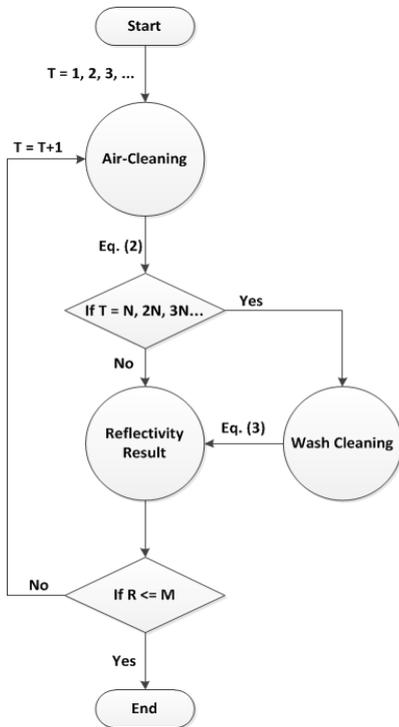
본 무기체계는 망원경이 위치한 사이트에는 사람이 없는 무인 시스템이며, 계획정비의 최소 단위는 한달이다. 따라서 에어세척 주기는 한달에 1회로 설정하여 모델링하였다.

특수세척을 자주 할 수 있다면 자주 해주는 것이 매우 좋으며 한달에 1회 세척 시 최초 코팅 수준을 유지할 수 있을 정도이다. 하지만 특수세척 시 단점은 코팅 표면에 기스를 내거나 코팅 금속이 벗겨질 가능성이 있다. 세척 시간 역시 오래 걸리며 전문가 수준의 작업자가 진행해야 하므로 균에서 직접 하기 어렵고 비용이 발생한다. 따라서, 특수세척 횟수 역시 적절하게 계획해야 한다. 본 시

물레이션에서는 한달에 1회도 할 수 있지만 현실적으로 불가능하므로 3개월, 6개월, 12개월, 24개월 마다 1회 특수세척을 수행하는 것으로 모델링하여 연구 분석하였다.

연구 목적인 재코팅 주기를 예측하기 위해서는 반사율에 대한 목표치가 필요하다. 일반적으로 알루미늄으로 코팅된 미러를 반사율이 10% 이상 감소 시점에 재코팅하고 있다[7]. 이는 천문 관측의 목적과 해당 연구소의 필요에 의해 결정된 사항으로 반드시 지켜야할 기준은 아니다. 현재 개발하고 있는 무기체계에서 보유한 기준이 없으므로 동일하게 10% 이상 감소 시점에 재 코팅하는 것으로 가정하였다. 다만, 군 임무 목적 상 무기체계의 성능유지를 위하여, 더 높은 요구도인 5% 이상 감소 시점에 재코팅이 필요 할 수도 있고, 반대로 더 낮은 요구도인 20% 이상 감소 시점에 재코팅이 필요 할 수도 있다. 따라서 목표치를 다양하게 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

에어세척, 특수세척 주기 조건, 재코팅을 위한 반사율 감소 요구 시점 조건을 반영한 시뮬레이션 모델 구성도는 Fig. 4와 같다.



T = Time (Month)N = Wash Cleaning Cycle (Month)
 R = Reflectivity (%)
 M = Reflectivity for Re-Coating(%)

Fig. 4. Simulation Model

2.2.3 시뮬레이션 결과

재코팅 시기 선정 여부에 대한 기준 반사율, 세척 주기를 Table 5와 같이 분류하여 결과를 도출하였다.

Case 1부터 4까지 Air-Cleaning 의 빈도는 월 1회로 설정하였고, 재코팅 시점의 기준이 되는 반사율 감소 기준치를 5%부터 20%로 분류하였다. 각 Case 별로 Wash-Cleaning을 분기, 반기, 연 1회, 2년 마다 1회로 구분하여 재코팅 시기를 예측하였다. 재코팅 시기는 군 계획 정비 기준에 따라 연 단위로 정해지며, 장비의 성능 유지의 관점을 고려하여 소수점을 버림한 값으로 판단하였다.

Table 5. Simulation Condition

Case Number	Reflectivity Degradation Rate(%) for Re-Coating	Air-Cleaning	Wash-Cleaning
1	5	per 1 month	per 3 month
			per 6 month
			per 12 month
			per 24 month
2	10	per 1 month	per 3 month
			per 6 month
			per 12 month
			per 24 month
3	15	per 1 month	per 3 month
			per 6 month
			per 12 month
			per 24 month
4	20	per 1 month	per 3 month
			per 6 month
			per 12 month
			per 24 month

Case 1의 Wash-Cleaning 빈도 별 100회 씩 시뮬레이션을 수행한 결과 재코팅 수행 시점인 반사율이 5% 이상 감소하는 시점의 평균 값은 Table 6에서 보는바와 같다.

재코팅 시점은 Wash-Cleaning 빈도에 따라 큰 차이가 없었다. Case 1의 결과를 기준으로 본다면 5% 감소 시 재코팅을 계획하고 있는 경우에는 Wash-Cleaning 빈도를 무리하게 3개월 또는 6개월로 계획할 필요가 없다. 마찬가지로, 연간 1회와 2년간 1회의 결과 역시 큰 차이가 없다. 따라서, 2년 간 1회 Wash-Cleaning을 하는 것이 효과적이라 볼 수 있다. 하지만 재코팅 시기가 2.26년으로 예측됨에 따라 굳이 짧은 기간 내에 Wash-Cleaning 과 재코팅을 연속으로 수행하는 것보다 2년마다 재코팅을 수행하는 것이 가장 성능을 유지하는데 효율적인 유지보수 방법으로 예측할 수 있다.

Table 6. Simulation Result of Case 1

Case No.	Reflectivity Degradation Rate(%) for Re-Coating	Wash-Cleaning	Average (Year)	Re-Coating Cycle (Year)
1	5%	per 3 month	2.65	2
		per 6 month	2.38	2
		per 12 month	2.34	2
		per 24 month	2.26	2

Case 2의 Wash-Cleaning 빈도 별 100회 씩 시뮬레이션을 수행한 결과 재코팅 수행 시점인 반사율이 10% 이상 감소하는 시점의 평균 값은 Table 7에서 보는바와 같다. Wash-Cleaning의 빈도를 분기, 반기, 1년 마다 1회 수행함에 따라 재코팅 시점이 차이가 있다. 하지만 1년 1회와 2년 1회 간 차이는 거의 없다. 본 결과를 통해서 알 수 있는 부분은 Wash-Cleaning 주기가 1년 이상이 되면 재코팅 시점에 영향을 미치지 않을 수 있다는 점이다. 재코팅 주기 예측 결과 값이 시뮬레이션을 통한 평균 값이므로 1년 또는 2년 마다 1회 Wash-Cleaning을 수행하는 경우에는 5년 보다 더 빠른 시기에 10% 이상 반사율이 감소 할 수 있다. 이러한 점을 감안하여 6개월 마다 Wash-Cleaning을 수행하는 것이 효과적이고 재코팅 주기는 5년으로 예측할 수 있다. 본 결과에서는 3개월마다 Wash-Cleaning을 수행하는 것이 재코팅 주기를 더 길게 가져갈 수 있다. 하지만, Wash-Cleaning을 수행하면서 발생하는 코팅 자체의 손상이라는 리스크가 존재하며, 이를 감안한 비용분석이 추가로 필요하다. 재코팅 주기가 1년 차이라면 리스크를 2배로 가지고 가는 것은 위험하다고 판단하여, 3개월 보다 6개월 마다 Wash-Cleaning으로 재코팅 주기 예측 결과를 선정하였다.

Table 7. Simulation Result of Case 2

Case No.	Reflectivity Degradation Rate(%) for Re-Coating	Wash-Cleaning	Average (Year)	Re-Coating Cycle (Year)
2	10%	per 3 month	6.56	6
		per 6 month	5.73	5
		per 12 month	5.10	5
		per 24 month	5.00	5

Case 3 과 Case 4의 결과는 각각 Table 8과 Table 9에서 볼 수 있다. Case 2의 결과와 유사하게 3개월 마다 Wash-Cleaning 하는 것이 재코팅 기간을 길게 가져갈 수 있고 6개월 마다 Wash-Cleaning 하는 것과의 차이는 더욱 벌어진다. 하지만, 앞서 Case 2와 동일한 이유로 3개월 마다 Wash-Cleaning을 수행하는 것은 최적일 수 없을 것으로 판단하여 제외하였다. 두 결과 모두 6개월, 1년 마다 1회 Wash-Cleaning을 수행 했을 때 동일한 기간의 재코팅 계획을 수립할 수 있다. 그러나 Case 1과 동일하게 1년에 1회 Wash-Cleaning을 수행하는 경우에는 예측한 기간 보다 반사율이 빠르게 감소할 확률이 높아 오랜 기간 임무 수행을 위한 성능 유지가 불가능 할 수 있다. 따라서, 최적의 예측 값은 6개월 마다 Wash-Cleaning을 하고 각각 8년, 11년 마다 재코팅을 수행하는 것이다.

Table 8. Simulation Result of Case 3

Case No.	Reflectivity Degradation Rate(%) for Re-Coating	Wash-Cleaning	Average (Year)	Re-Coating Cycle (Year)
3	15%	per 3 month	10.76	10
		per 6 month	8.85	8
		per 12 month	8.00	8
		per 24 month	7.65	7

Table 9. Simulation Result of Case 4

Case No.	Reflectivity Degradation Rate(%) for Re-Coating	Wash-Cleaning	Average (Year)	Re-Coating Cycle (Year)
4	20%	per 3 month	14.5	14
		per 6 month	11.37	11
		per 12 month	11.09	11
		per 24 month	10.63	10

위와 같이 4가지 Case 로 시뮬레이션을 수행한 결과를 분석해보면 재코팅 시점의 기준이 되는 반사율 감소 목표치가 가장 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 반사율 감소 목표치와 Wash-Cleaning의 빈도 그리고 재코팅 주기 간의 관계를 알아보기 위하여 그래프를 활용하였다.

Fig. 5의 그래프를 통해서 첫 번째로 반사율 감소 목표치별 Wash-Cleaning 빈도의 영향성은 반사율 감소 목표치가 작을수록 적게 받는다라는 것이다. 반사율 감소 목표치가 5%일 때는 Wash-Cleaning 빈도에 재코팅 주기가 거의 영향을 받지 않았지만, 목표치가 20%일 때는 Wash-Cleaning 빈도의 영향을 크게 받고 있음을 확인할 수 있다. 두 번째로 반사율 감소 목표치와 무관하게 Wash-Cleaning의 빈도를 3개월 단위에서 6개월 단위, 6개월 단위에서 1년 단위로 줄여갈수록 재코팅 주기 차이의 폭은 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5의 그래프에서 볼 수 있듯이 6개월 단위의 Wash-Cleaning 이후로는 재코팅 주기가 큰 차이가 없다.

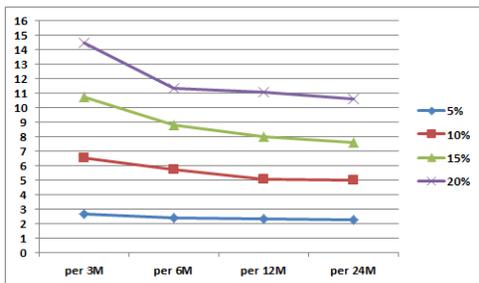


Fig. 5. Relationship Graph between Wash Frequency and Re-Coating Reflectivity Degradation Rate(%)

시뮬레이션을 통한 최적의 예측 결과는 Table 10과 같다. Wash-Cleaning은 Case 1을 제외하고 6개월 단위로 수행하는 것이 가장 경제적이고 효율적이며, 재코팅 주기는 반사율 감소 목표치에 따라 다르다.

Table 10. Prediction Result

Case No.	Reflectivity Degradation Rate(%) for Re-Coating	Air-Cleaning	Wash-Cleaning	Re-Coating Period (Year)
1	5	per 1 month	-	2
2	10		per 6 month	5
3	15		8	
4	20		11	

Table 10에서의 시뮬레이션 예측 결과와 Table 4에서의 실제 데이터를 비교하였다. 시뮬레이션에서 예측하고자 하는 조건과 동일한 실제 데이터가 없으므로 가장 유사한 패턴을 보이는 데이터와 비교하여 그 의미를 분석하였다. 실제 데이터에서는 반사율이 10% 이상 감소하

는 케이스가 없기 때문에, Table 11에서 보는바와 같이 반사율이 5% 이상 감소하는 시점에 재코팅을 수행하는 경우의 개월 수를 비교하였다.

Table 11. Comparison between Real Data and Simulation Prediction Result

Comparison List	Real Data	Simulation Result
Reflectivity Degradation Rate(%) for Re-Coating	5%	5%
Air-Cleaning	per 1 Month	per 1 Month
Wash-Cleaning	-	3, 6, 12, 24 Month
Re-Coating Cycle	1.5 year	2 year

실제 데이터의 경우 재코팅 시점이 1.5년이었고, 시뮬레이션의 결과는 2년이였다. 특수세척 유무의 차이에 따라 5%이하로 반사율이 감소하는 시점이 더 늦어진 것으로 분석할 수 있다. 10% 이상 감소하는 경우의 데이터는 비교할 수 없었지만, Table 11에서의 결과를 통해 특수세척을 통해 재코팅 주기를 길게 가져갈 수 있다는 점을 충분히 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 망원경 미러의 알루미늄 재코팅 주기를 예측하였다. 특수세척은 6개월 마다 수행하는 것이 가장 최적이며, 반사율 10%, 15%, 20% 감소에 따라 각각 5년, 8년, 11년의 재코팅 주기를 계획하는 것으로 예측하였다. 군 장비의 특성 상 운용가용도가 매우 중요하고 항상 임무 준비태세를 유지해야 하기 때문에 정비 계획을 세우는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구는 군 목적으로 사용될 망원경의 정비 계획을 세우는 데 참고가 될만한 예측 분석임에 그 의미가 있다.

실환경 데이터가 부족하고 요구되는 반사율 감소 목표치가 불명확한 한계가 존재한다. 이 부분은 장비 배치와 함께 데이터 수집을 시작하여 실환경 데이터를 확보하고 반사율 감소치와 임무 성능 간의 데이터 분석을 통해 구체화 할 수 있을 것이다. 다음 연구에서는 이 데이터를 추가하여 개선된 시뮬레이션 모델을 통해 더 정확한 재코팅 주기를 예측할 수 있을 것이다. 비용 분석 까지 추가하여 2~30년간 운용할 장비의 최적의 운용유지비 산출 까지 연구할 계획이다.

References

- [1] Korea Astronomy and Space Science Institute, Operating Project for Astronomical Equipments, Research Report, Korea Astronomy and Space Science Institute, Korea, pp.94-96.
- [2] Gemini Observatory, Gemini Optics Reflectivity Data, Gemini Observatory, 2015 April 22, Available From: <https://www.gemini.edu/sciops/telescopes-and-sites/optics>
- [3] National Optical Astronomy Observatory, Mirror Cleaning, National Optical Astronomy Observatory, Last updated on 14th of July 2010, Available From : <https://www.ctio.noao.edu/telescopes/opteng/optics.html>
- [4] Y. S. Kim, T. S. Park, W. W. Choi, E. H. Jeon, S. J. Keum, A Study on the metals corrosion by air pollutants, Research Report, Korean Federation for Environmental Movement, Korea, pp.19-26.
- [5] B.Magrath, "Reflectivity Degradation Rates of Aluminum Coatings at the CFHT". *Publications of the Astronomical Society of th Pacific*, pp.303-306, March 1997
DOI: <https://dx.doi.org/10.1086/133891>
- [6] Dewei Wang, Time Series Analysis, Lecture Notes, Department of Statistics University of South Carolina, United States of America, pp.9.
- [7] Gemini Observatory, Coating Gemini's Mirrors With Protected Silver, Newsletter #29, Gemini Observatory, pp.13

최 효 준(Hyo-Jun Choi)

[정회원]



- 2011년 8월 : 고려대학교 산업시스템정보공학과(학사)
- 2011년 8월 ~ 2014년 7월 : 삼성 SDS
- 2015년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 ILS연구소 선임연구원

<관심분야>

국방/과학, 최적화, 데이터분석, 시뮬레이션

박 준 수(Jun-Su Park)

[정회원]



- 2013년 2월 : 한양대학교 산업경영공학(학사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 ILS연구소 선임연구원

<관심분야>

국방/과학, 데이터분석, 광학

이 정 훈(Jung-Hoon Lee)

[정회원]



- 2006년 8월 : 한양대학교 정보경영공학(공학학사)
- 2008년 8월 : 한양대학교 대학원 산업공학(공학석사)
- 2008년 7월 ~ 현재 : LIG 넥스원 선임연구원

<관심분야>

국방/과학, 통계/품질, 신뢰성

오 영 일(Young-Il Oh)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한양대학교 전기전자공학과(학사)
- 2004년 4월 ~ 현재 : LIG넥스원 ILS연구소 수석연구원

<관심분야>

국방/과학, 체계공학