

터빈 액추에이터 오일 계통에서의 윤활유 열화 및 부식 메커니즘

송민지¹ · 이근형¹ · 김우철² · 김희산³ · 이수열^{1,†}

¹충남대학교 신소재공학과, 대전광역시 유성구 대학로 99

²한국지역난방공사 플랜트기술처 플랜트관리·QC부, 경기도 성남시 분당구 분당로 368

³홍익대학교 나노신소재학과, 세종특별자치시 조치원을 세종로 2639

(2026년 2월 04일 접수, 2026년 2월 12일 수정, 2026년 2월 12일 채택)

Lubricant Degradation and Corrosion Mechanisms in Turbine Actuator Oil Systems

Min Ji Song¹, Keun Hyung Lee¹, Woo Cheol Kim², Heesan Kim³, and Soo Yeol Lee^{1,†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

²Plant management & QC division, Korea District Heating Corporation, Seongnam-si 13585, Republic of Korea

³Department of Nanomaterials Engineering, Hongik University, Sejong 30016, Republic of Korea

(Received February 04, 2026; Revised February 12, 2026; Accepted February 12, 2026)

Hydraulic actuators in gas turbine (GT) inlet guide vane (IGV) systems are crucial for the stable operation of combined heat and power (CHP) plants. This study systematically investigates the internal damage and corrosion behavior of a GT IGV hydraulic actuator recovered after long-term service in a district heating CHP plant. The manifold block, cylinder tube, and piston were disassembled and analyzed to assess the effects of lubricant degradation and water contamination. Visual and cross-sectional examinations revealed localized corrosion pits, oxide accumulation, and uneven material thinning on lubricant-contacting surfaces, with maximum pit depths measuring 0.18 mm in the manifold block, 0.13 mm in the cylinder tube, and 0.07 mm in the piston. The chromium plating, approximately 18 μm thick, effectively suppressed degradation of the cylinder tube; however, localized coating damage led to interfacial corrosion and accelerated substrate degradation. Lubricant analysis showed fluctuations in water content, particle contamination, and PQ index, indicating a lubricant environment susceptible to hydrolysis, additive depletion, and tribo-corrosion. These findings demonstrate that monitoring lubricant properties alone is insufficient to accurately represent the evolution of internal damage and provide direct experimental evidence linking lubricant degradation and water contamination to the internal corrosion of hydraulic actuators.

Keywords: Lubrication system, Actuator, Corrosion, Water contamination, Tribocorrosion

1. 서론

지역난방 열병합발전소(combined heat and power, CHP)는 가스터빈(gas turbine, GT)과 스팀터빈(steam turbine, ST)을 연계 운전하여 전력과 열을 동시에 생산하는 설비로서, 터빈 설비의 운전 안정성은 설비 신뢰성과 열공급 안정성에 직접적인 영향을 미친다. 설비는 유압식 액추에이터로 구성된 제어계통에 의해 제어되며, 액추에이터는 마찰 저감 및 내부 청정도 유지를 위해

윤활유가 지속적으로 순환되는 조건에서 운전된다. 이러한 운전 조건에서 윤활유 상태는 마찰 특성 및 내부 오염도를 변화시켜 액추에이터의 응답 특성과 장기적인 성능 유지에 중요한 역할을 한다. 하지만 윤활유의 오염 및 열화는 액추에이터의 신뢰성을 저하시킬 수 있으며, 특히 수분 혼입은 윤활 성능 저하를 유발하는 주요 열화 인자로 보고되고 있다. 수분은 첨가제의 금속 표면 흡착과 트라이보필름(tribofilm) 형성을 저해하여 보호막의 안정성을 약화시키고, 윤활 조건을 경계윤활(boundary lubrication) 상태로 전이시켜 국부적인 금속 접촉과 마이크로피팅(micro-pitting)을 촉진한다 [1-7].

열병합발전소 제어계통에서는 운전 중 설비 내부를

[†]Corresponding author: sylee2012@cnu.ac.kr

송민지: 박사과정, 이근형: 석박사통합과정, 김우철: 책임연구원, 김희산: 교수, 이수열: 교수

직접 점검하는 데 한계가 있어, 윤활유 분석을 통한 간접적인 상태 평가가 유지관리의 주요 수단으로 활용되고 있다. 일반적으로 에스터계 및 인산에스터계 윤활유의 수분 함량, 산가(total acid number), 점도 변화, 입자 오염도 및 금속 마모 성분 등은 제어계 내부에서 발생하는 마찰·마모, 화학적 열화 및 부식 거동을 반영하는 지표로 사용된다 [8-12]. 이러한 윤활유 성상 변화는 보호막 안정성 저하, 유막 거동 변화, 슬러지 형성, 산성 부산물 생성으로 이어진다. 생성된 산성 부산물은 Fe 기반 금속의 부동태피막을 파괴하고 국부 부식을 유도하며, 이와 같은 조건에서는 마찰과 부식이 결합된 손상(tribocorrosion) 형태로 국부 감육이 진행될 가능성이 보고되고 있다 [6,8,10-14]. 특히 표면 보호막 또는 코팅층이 약화될 경우 금속 표면의 반응성이 국부적으로 증가할 수 있다 [15-17].

특히 열병합발전소 GT 제어계통에 적용된 inlet guide vane (IGV) 유압식 액추에이터는 폐회로 유압 시스템으로 구성되어 외부 오염 유입이 최소화되도록 설계되어 있으나, 장기간 운전 과정에서 오일의 열화, 미세 누설, 유지보수 과정 또는 운전 정지 시 온도 변화에 따른 내부 결로 등에 의해 수분이 점진적으로 축적될 수 있다. 이러한 수분 축적은 윤활 성능 저하와 함께 내부 부식 환경을 형성할 가능성이 있다.

실제 지역난방 열병합발전소 운영 현장에서는 GT 및 ST 제어계통에서 서보 밸브 막힘, 액추에이터 응답 지연 및 작동 불량 현상이 보고되고 있다. 현장 점검 결과, 필터 및 매니폴드 내부에 미세 금속 입자와 산화물이 혼재된 이물질이 관찰되었으며, 이는 윤활유 열화, 수분 혼입, 내부 부식 생성물의 복합적인 결과로 추정되었다. 그러나 기존의 유지관리 체계는 주로 윤활유 성상 분석(점도, 산가, 수분 함량 등)이나 외관 검사에 의존하고 있어, 실제 액추에이터 내부 구성품에서 발생하는 손상 형상과 그 메커니즘을 직접적으로 규명하는 데에는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 지역난방 열병합발전소에 적용된 GT IGV 유압식 액추에이터를 대상으로, 장기간 운전 후 회수된 구성품의 손상 상태를 정밀 분석하였다. 매니폴드 블록(manifold block), 실린더 튜브(cylinder tube), 피스톤(piston)을 중심으로 윤활유 접촉면 및 단면의 부식 형상, 국부 감육 깊이, 코팅층 손상 및 산화물 특성을 체계적으로 평가하였다. 이를 통해 윤활유 열화 및 수분 기반 환경이 액추에이터 내부 부식 거동에 미치는 영향을 실증적으로 규명하고, 윤활유 성상 분석만으로는 포착하기 어려운 내부 손상 메커니즘을 명확히 함으로써 제어 계통의 구조 건전성 및 장기 신뢰성 확보를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 액추에이터 고품 수집

본 연구에서는 실제 지역난방 열병합발전소 GT IGV에 적용된 유압식 제어밸브 액추에이터를 수집하였다. 해당 액추에이터는 MOOG JAPAN LTD.에서 제작되었으며, ISO VG 32 등급의 윤활유(Turbo J 32, Shell)가 약 1.5년 주기로 교체되는 조건에서 운전되었다. 그림 1은 액추에이터의 전체 구성과 수집된 샘플을 나타낸 것으로, 분석 대상은 매니폴드 블록(manifold block), 실린더 튜브(cylinder tube) 및 피스톤(piston)으로 구성된다. 매니폴드 블록에는 윤활유 내 불순물 제거를 위한 필터가 장착되어 있으며, 여과된 윤활유는 실린더 튜브를 통해 피스톤으로 공급되어 왕복 운동을 제어한다. 해당 액추에이터 구성품의 정확한 합금 조성은 공개 자료로 확인되지 않았으며, 본 연구에서는 재질 규명보다는 장기간 운전 및 윤활유 열화 환경에서 발생한 표면 손상 및 부식 거동 분석에 중점을 두었다.

내부 손상 상태 평가를 위해 회수된 GT IGV 유압식 액추에이터를 분해하고, 매니폴드 블록, 실린더 튜브 및 피스톤을 대상으로 전기방전가공(electrical discharge machining, EDM)을 이용하여 분석용 시편을 채취하였다. 가공된 시편은 윤활유 접촉면과 절단 단면을 포함하도록 제작되었으며, 이후 표면 및 단면 관찰을 위한 분석에 사용되었다.

2.2 손상 평가 및 분석 방법

부식 형상 및 감육 거동 평가는 광학현미경(optical microscopy)을 이용하여 수행하였다. 윤활유 접촉면과 절단 단면에서 관찰되는 국부 부식 피트(pit)를 중심으로 손상 형태를 분석하였으며, 피트의 깊이는 단면 관찰을 통해 정량적으로 측정하였다. 실린더 튜브의 경우, 내면 코팅층을 포함한 단면 관찰을 통해 코팅층의 두께, 연속성 및 국부 손상 여부를 평가하였다. 구성품의 화학 조성 및 부식 손상부의 조성 변화를 평가하기 위해 SEM-EDS 분석을 수행하였다. SEM을 이용하여 부식 부위의 미세 형상을 관찰하였고, EDS를 통해 주요 합금 원소의 조성과 분포를 분석하였다. 일부 대표 위치에 대해서는 point EDS 측정을 통해 국부 조성 특성을 비교하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 액추에이터 상태 진단

매니폴드 블록, 실린더 튜브 및 피스톤의 윤활유 접촉면에 대한 육안 관찰 결과를 Fig. 2-4에 정리하였다. 매니폴드 블록 내부 유로에서는 윤활유와 직접 접촉하

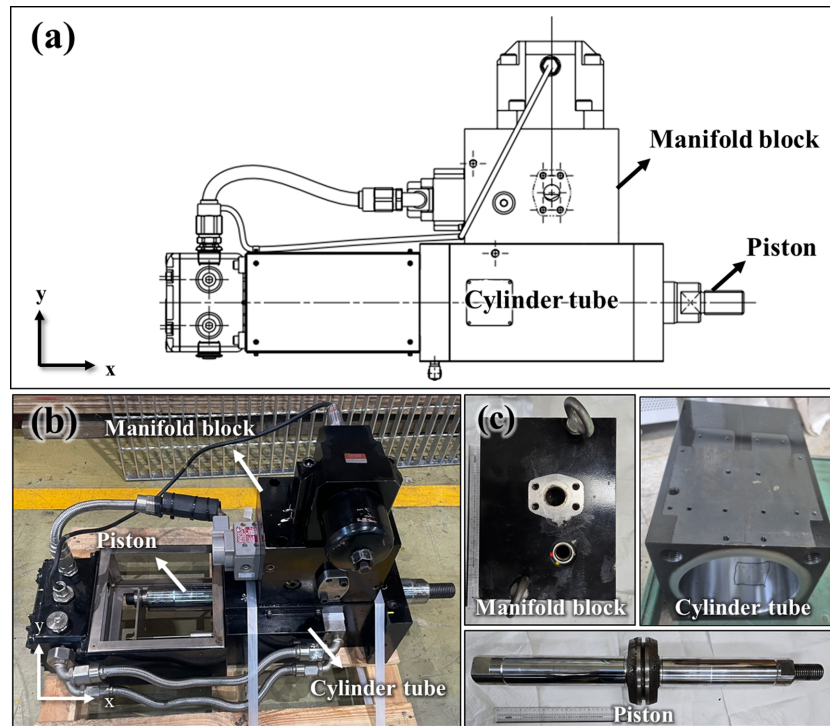


Fig. 1. Schematic overview and main components of the gas turbine hydraulic control valve actuator

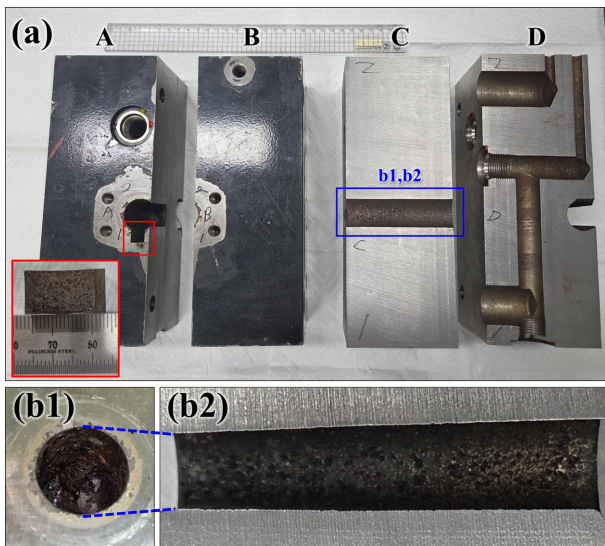


Fig. 2. Overall appearance of the manifold block and internal lubricant passages

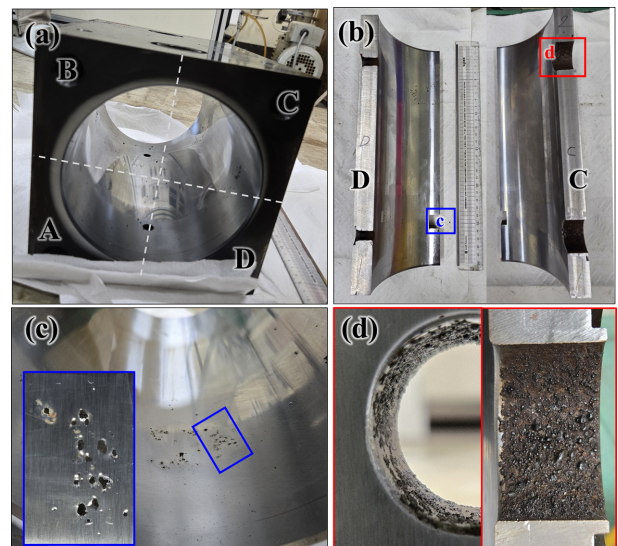


Fig. 3. Overall appearance of the cylinder and localized degradation observed on the inner surface and lubricant passage

는 표면으로 부식생성물과 국부적인 부식에 의한 손상이 관찰되었다(Fig. 2). 블록을 4개 구간(A-D)으로 분할하여 비교한 결과, 손상은 특정 구간에 국한되기보다는 내부 유로 전반에 걸쳐 유사한 양상으로 분포하는 경향을 보였다. 이는 부식 손상이 특정 결함 또는 국소적 요인에 의해 발생했다기보다는, 윤활유 유동 환경과 장기

간 운전 조건의 영향을 받아 점진적으로 형성된 결과로 판단된다. 유로 내부 특정 위치의 확대 관찰(Figs. 2b1, b2)에서는 짙은 색상의 침적물과 산화 생성물이 표면을 따라 불균일하게 분포하는 양상이 확인되었으며, 이러한 침적물은 장기간 운전 중 윤활유 열화 과정에서 생성된 부산물일 가능성이 있는 것으로 판단된다.

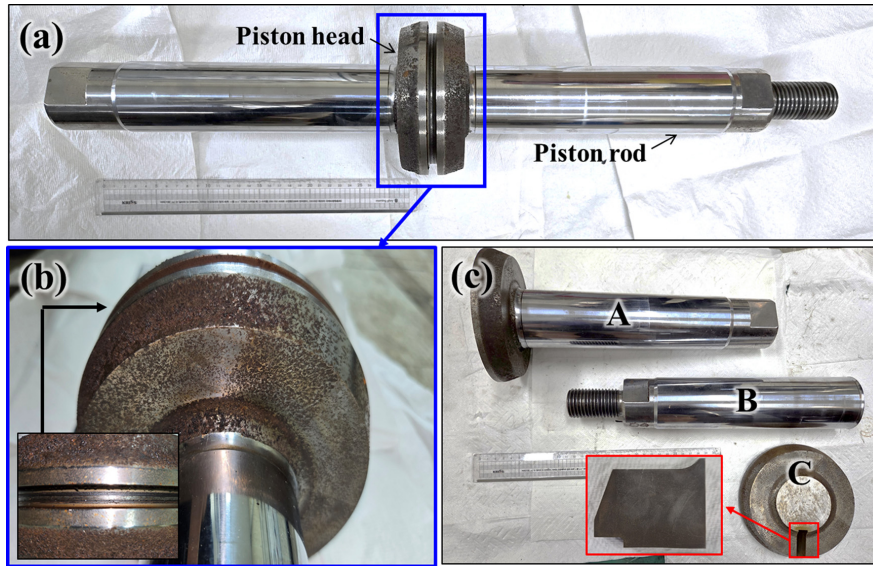


Fig. 4. Overall view of the piston and localized surface degradation observed near the piston head region

실린더 튜브의 윤활유 접촉면에서도 매니폴드 블록과 유사한 부식 흔적이 확인되었다(Fig. 3). 내면 전체를 관찰한 결과(Fig. 3a), 변색과 국부 손상이 길이 방향을 따라 여러 위치에서 관찰되었으며, 종방향 단면 관찰(Fig. 3b)에서는 윤활유와 접촉하는 영역을 중심으로 표면 열화 정도가 위치에 따라 차이를 보였다. 피스톤과의 접촉 면(Fig. 3c)에서는 국부적인 부식 피트가 불규칙하게 분포하고 있었고, 일부 영역에서는 인접한 피트가 서로 연결된 형태도 관찰되었다. 특히 유로 위치(Fig. 3d)에서는 상대적으로 손상이 두드러지며, 미세 피트 형상과 함께 조밀한 침적물이 표면을 따라 분포하는 양상이 관찰되었다. 해당 영역의 표면 상태는 다른 구간에 비해 상대적으로 거칠게 나타났다. 이러한 침적물은 장기간 운전 중 윤활유의 열화 과정에서 생성된 부산물일 가능성이 있으며, 이와 같은 환경에서 국부적인 표면 열화가 함께 진행된 것으로 판단된다.

피스톤의 윤활유 접촉면에서도 위치에 따라 표면 열화 양상이 다르게 나타났다(Fig. 4). 전체 형상을 관찰한 결과, 피스톤 로드부의 대부분은 비교적 양호한 표면 상태를 유지하고 있었으나, 피스톤 헤드 표면(Fig. 4b)을 따라 조밀한 침적물과 부식 피트가 분포하는 양상이 관찰되었다. 흡 및 단차부와 같이 형상 변화가 존재하는 영역에서 이러한 침적물이 상대적으로 집중되는 경향을 보였다. 절단한 피스톤 구성품(Fig. 4c)에서도 동일한 위치에서 유사한 표면 상태가 확인되었으며, 이는 윤활유 흐름의 국부적 정체나 접촉 조건 차이에 따른 환경 변화가 손상 분포에 영향을 미쳤을 가능성이 있는 것으로 판단된다.

3.2 단면 및 표면 관찰

단면 관찰을 통해 각 구성품에서 대표적인 손상 영역의 피트 깊이를 정량적으로 평가하였다(Fig. 5). 최대 피트 깊이는 매니폴드 블록에서 약 0.18 mm, 실린더 튜브에서 약 0.13 mm, 피스톤 헤드에서 약 0.07 mm로 측정되었다. 동일한 윤활유 환경에서 운전되었음에도 불구하고 구성품별로 감육 정도에 차이가 나타났으며, 이는 재질 특성, 표면 상태, 형상 및 윤활유 유동 조건의 차이가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 특히 실린더 튜브의 경우, 부식 손상은 특정 위치에 국한되어 관찰되었으며, 그 외 영역에서는 뚜렷한 감육이나 표면 열화가 확인되지 않았다. 이러한 차이를 보다 면밀히 검토하기 위해, 피스톤 접촉면의 코팅층 상태에 대한 추가 분석을 수행하였다.

실린더 튜브 표면에서 발생한 피트 주변에는 단순한 점부식 형상이 아닌 표면이 국부적으로 늘리거나 균열이 동반된 형상이 함께 관찰되었다(Fig. 6a). 표면이 국부적으로 늘리거나 균열이 동반된 형상은 단순한 전기화학적 점부식으로 설명하기 어렵고, 코팅층의 국부 손상 또는 계면 불안정과 연계된 기계적-화학적 복합 손상의 흔적으로 해석된다. 실린더 튜브와 피스톤 접촉면의 단면 관찰 결과, 손상이 관찰되지 않은 영역에서는 약 18 μm 두께의 크롬 코팅층이 연속적으로 유지되어 모재 표면을 보호하고 있음이 확인되었다(Fig. 6b). 반면, 피트가 형성된 위치에서는 코팅층의 국부적인 파손 및 박리가 발생하였으며, 코팅층과 모재의 계면을 따라 부식이 진행된 흔적이 확인되었다(Fig. 6c). 이를 통해 실린더 튜브에서의 손상은 코팅층의 국부적인 손상과 밀접하게 연관되어 있으며, 코팅층이 파괴된 이후 계면

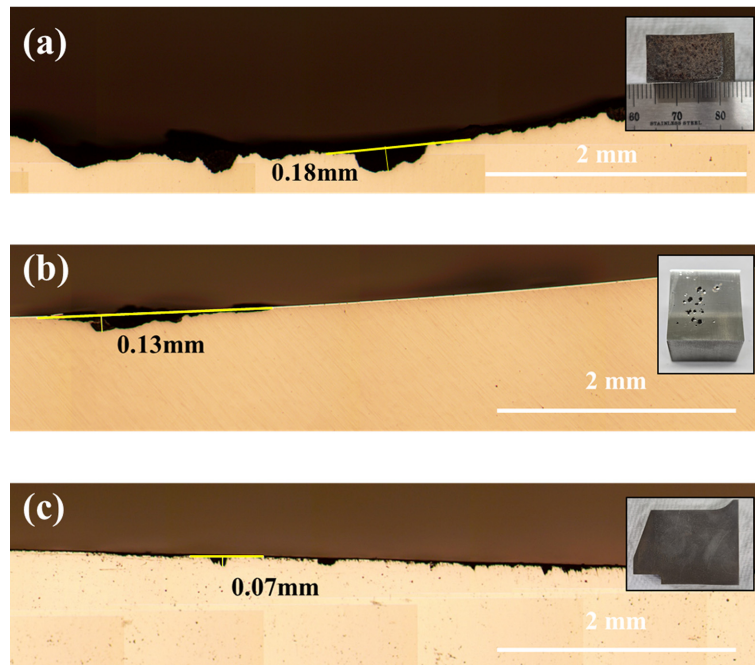


Fig. 5. Cross-sectional views showing the maximum pit depth measured in (a) the manifold block, (b) cylinder tube, and (c) piston head after long-term operation under lubricated conditions

부근을 따라 모재 손상이 점진적으로 확대되었을 가능성이 있는 것으로 판단된다.

3.3 재질 및 산화물 분석

EDS 분석을 통해 매니폴드 블록, 실린더 튜브 및 피스톤의 모재 조성을 우선적으로 평가하였다(Table 1). 세 구성품 모두 철을 주성분으로 하는 합금강 계열로 확인되었으며, 매니폴드 블록과 실린더 튜브는 실리콘 및 망간이 소량 포함된 유사한 조성을 나타냈다. 반면에 피스톤에서는 약 1.3 wt% 수준의 크롬이 검출되어, 다른 구성품과는 합금 조성 측면에서 차이를 보였다. 일반적으로 크롬은 표면에 안정한 산화피막을 형성하여 금속의 부동태 거동을 향상시키는 원소로 알려져 있으며, 이와 같은 합금 조성 차이는 운전 중 표면 반응 및 부식 저항성에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 판단된다. 합금 조성 차이는 Fig. 5에서 관찰된 구성품 간 손상 정도의 차이와도 일치하는 경향을 보인다. 매니폴드 블록에서는 깊고 거친 국부 감육 형상이 관찰된 반면, 크롬이 첨가된 피스톤에서는 상대적으로 얇은 감육이 관찰되었다. 이는 동일한 윤활 환경 조건에서도 합금 조성에 따른 부동태 안정성 차이가 국부 부식 거동에 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한, 모재 조성뿐만 아니라 표면에 적용된 크롬 코팅층이 손상 거동에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 실린더 튜브에 대해서는 표면 코팅층의 존재 여부와 성분을 추

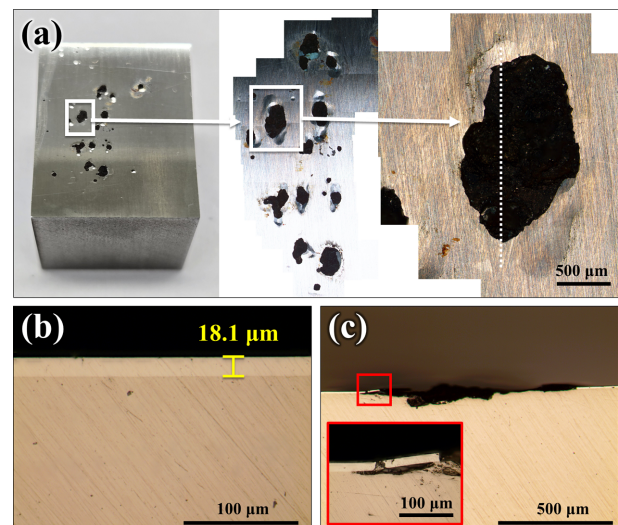


Fig. 6. Surface and cross-sectional observations of coating layer and corrosion pit of the cylinder tube

가로 확인하였다(Table 2). 분석 결과, 피스톤 접촉면에 형성된 코팅층은 거의 순수한 크롬으로 구성된 층으로 확인되었으며, 이는 내마모성 및 내식성 향상을 위해 적용된 크롬 도금층으로 판단된다. 앞선 단면 관찰 결과와 함께 고려하면, 해당 코팅층은 정상 영역에서는 모재를 보호하는 역할을 수행하고 있으나, 국부적인 손상이 발생한 위치에서는 보호 기능이 저하된 상태로 판단된다.

Table 1. EDS analysis of the base materials of the manifold block, cylinder tube, and piston

Location	Unit	Elements					
		O	Si	Cr	Mn	Ni	Fe
Manifold block	wt%	-	0.313	-	0.861	-	98.826
	at.%	-	0.621	-	0.872	-	98.507
Cylinder tube	wt%	-	0.380	-	0.898	-	98.722
	at.%	-	0.753	-	0.909	-	98.338
Piston	wt%	-	0.30	1.26	0.98	-	97.46
	at.%	-	0.60	1.35	0.99	-	97.07

Table 2. EDS analysis of the surface coating layer on the cylinder tube

Location	Unit	Elements					
		O	Si	Cr	Mn	Ni	Fe
Coating layer of cylinder tube	wt%	-	-	100	-	-	-
	at.%	-	-	100	-	-	-

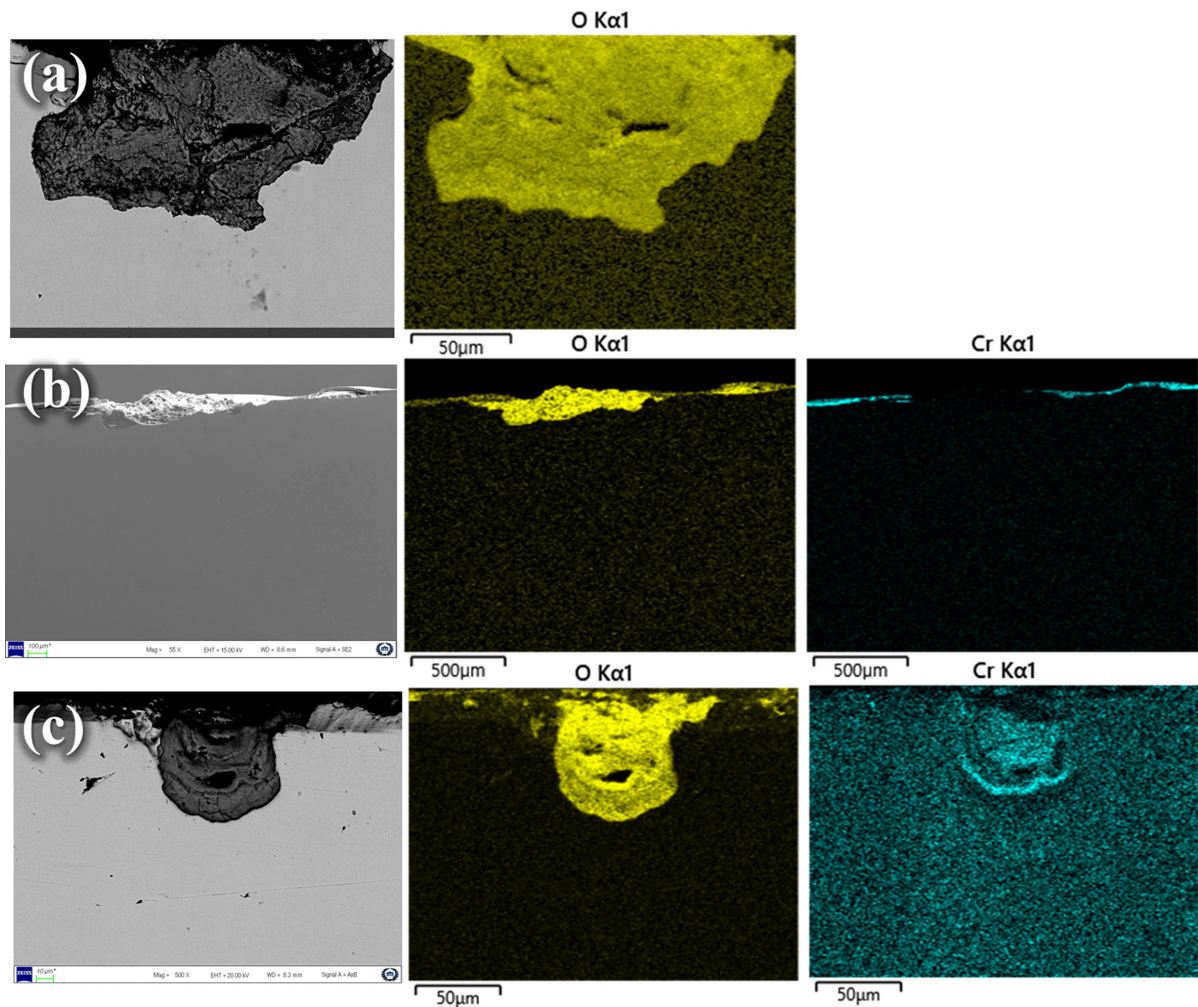


Fig. 7. SEM images and EDS elemental maps of corrosion products formed on (a) the manifold block, (b) the cylinder tube, and (c) the piston

이러한 재질 및 코팅층 특성을 바탕으로, 각 구성품에서 관찰된 부식 손상부의 산화물 분포 특성을 비교하였다(Fig. 7). 매니폴드 블록의 경우, 손상부 전반에 걸쳐 철 산화물이 비교적 두껍게 형성되어 있었고(Fig. 7a), 실린더 튜브는 코팅층이 파손된 위치에서는 철 기반 산화물이 국부적으로 분포하는 양상이 확인되었다(Fig. 7b). 피스톤 헤드의 손상부에서는 철과 크롬이 함께 분포하는 산화물이 관찰되었으며(Fig. 7c), 이는 Table 1에서 확인된 바와 같이 크롬이 첨가된 저합금강 재질 특성과 일치하는 결과이다.

동일한 윤활유 환경에서 운전되었음에도 불구하고 각 구성품에서 관찰된 산화물의 조성과 손상 분포는 모재 조성 및 표면 코팅 유무에 따라 차이를 보였으나, 이러한 차이는 단독 요인보다는 윤활유 환경에서 작용하는 화학적·기계적 영향이 반영된 결과로 판단된다. 이에 따라 본 설비에서의 부식 손상은 단순한 재질 차이나 표면 상태만으로 설명되기보다는, 윤활유 열화 및 수분 환경 하에서 보호막 붕괴와 산화물 형성, 피트 성장이 연속적으로 작용한 결과로 판단된다.

3.4. 윤활유 열화 및 수분 혼입에 따른 부식 메커니즘

GT IGV 액추에이터에서 관찰된 부식 손상의 원인을 규명하기 위해, 윤활유(Turbo J 32)의 상태 변화와 운전 환경 간의 연관성을 분석하였다. 이를 통해 운전 기간 동안 윤활유의 수분 함량, 산가 및 입자 오염도에서 반복적인 변동이 확인되었다(Table 3,4). 수분 함량은 측정 시점에 따라 약 11-35 ppm 범위로 변화하였으며, 산가는 대부분 0.02 mgKOH/g 수준을 유지하였으나 일부 시점에서는 증가하는 경향을 보였다. 또한 PQ index 및 입자 계수 분석 결과, 특정 시점에서 철 마모분 및 입자 계수의 증가가 확인되었다.

윤활유 내 수분 변동은 윤활유 자체의 열화뿐 아니라, 설비 운전 조건과 밀접하게 연관된 외부 요인의 영향을 함께 반영하는 것으로 판단된다. 실제로 액추에이터는 고온 부근에서 반복적으로 운전되며, 정지 및 기동 과정에서 온도 변화, 주변 습도 조건의 영향으로, 미량의 수분이 윤활유 계통 내로 유입될 가능성을 배제하기 어렵다. 이와 같은 조건에서는 윤활유 내 수분이 완전히 제거되지 못한 채 누적되거나 변동하는 환경이 형성될 수 있다. 수분이 존재하는 윤활 환경에서는 첨가제 기반 보호막(tribofilm)의 형성과 안정성이 저하되며, 특히 ZDDP 계열 첨가제의 분해 거동이 변화하는 것으로 보고되고 있다 [1,2,4]. 또한 에스테르계 윤활유의 경우, 수분에 의한 가수분해 반응을 통해 산성 부산물 및 슬러지 생성이 촉진될 수 있으며, 이는 금속 표면의 수동피막을 국부적으로 불안정하게 만들어 피트 형성 및 산화

물 축적을 용이하게 한다 [8,9].

본 연구에서 매니폴드 블록, 실린더 튜브 및 피스톤의 윤활유 접촉면에서 관찰된 침적물, 산화 생성물 및 국부 피트 형상은 윤활유 열화와 수분이 존재하는 환경에서 나타나는 손상 양상과 일치하는 것으로 판단된다. 특히 실린더 튜브의 경우, 크롬 코팅층이 유지된 영역에서는 부식 손상이 제한적으로 나타난 반면, 코팅층이 국부적으로 파손된 위치에서는 피트 형성과 함께 모재 부식이 집중적으로 진행된 것으로 관찰되었다. 이러한 코팅층의 국부 파손은 반복적인 기계적 접촉에 따른 마모 또는 미세 균열의 발생과, 수분이 존재하는 윤활 환경에서의 화학적 열화가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 이와 같은 조건에서는 보호막 및 코팅층의 안정성이 저하되어 국부적인 화학적 반응과 기계적 접촉이 결합되어 부식 손상이 가속될 수 있다 [6,13].

피스톤은 매니폴드 블록 및 실린더 튜브와는 다른 조성을 갖는 Cr 함유 저합금강으로 구성되어 있으며, Fig. 5에서 나타난 상대적으로 낮은 손상 정도는 이러한 재질 특성 차이에 따른 내식성 차이와 관련된 것으로 볼 수 있다. 다만, 재질 특성이 국부 부식 거동에 미치는 정량적 영향에 대해서는 향후 추가적인 검토가 이루어질 필요가 있다. 다만, 본 연구에서 관찰된 손상 양상은 주로 윤활유 열화와 수분 존재 환경과 밀접하게 관련된 것으로 판단된다. 따라서 GT IGV 액추에이터에서 관찰된 부식 손상은 단일 재질 요인에 의해 발생한 것이 아니라, 윤활유 열화, 수분 혼입, 보호막 및 코팅층의 국부적 붕괴가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

4. 결론

장기간 운전된 GT IGV 유압식 액추에이터 내부 구성품을 분석한 결과, 매니폴드 블록, 실린더 튜브 및 피스톤의 윤활유 접촉면에서 공통적으로 국부 부식 피트와 산화물이 관찰되었으며, 최대 감육 깊이는 각각 약 0.18 mm, 0.13 mm, 0.07 mm로 측정되었다.

실린더 튜브의 경우, 크롬 코팅층이 유지된 영역에서는 부식이 효과적으로 억제되었으나, 국부적인 코팅층 손상 또는 박리가 발생한 위치에서는 코팅층-모재 계면을 따라 부식이 진전되는 양상이 확인되었다. 이는 코팅층의 건전성이 이후 손상 확산 거동을 지배하는 중요한 요인임을 보여준다.

본 설비에서 관찰된 손상은 윤활유의 기본 물성 저하보다는, 수분 혼입과 이에 따른 윤활유 열화, 국부적인 윤활유 정체 환경이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 이러한 조건에서는 보호막 형성이 불안정해지고, 산화물 형성과 피트 성장이 반복되면서 손상이 점진적으

Table 3. Water content, viscosity, acid number, and PQ index of the lubricating oil used in the GT IGV actuator

No.	1st	2nd	3rd	4th	5th
Water content	13.0	34.9	11.2	14.0	15.7
Viscosity	29.7	29.7	29.6	29.7	29.6
Acid number	<0.02	<0.02	0.05	0.02	0.02
PQ index	N/A	11	13	11	N/A

Table 4. Particle count analysis of the lubricating oil used in the GT IGV actuator

No.	1st	2nd	3rd	4th	5th
>4 μm	2638	2012	161	264	8062
>6 μm	928	654	70	47	1192
>14 μm	63	22	11	4	63
>21 μm	6	1	3	1	9

로 확대된 것으로 보인다. 본 연구는 GT IGV 액추에이터의 장기 신뢰성 확보를 위한 윤활 환경 관리 및 유지관리 전략 수립에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국지역난방공사의 지원을 받아 연구를 수행하였습니다. 또한 본 연구는 충남대학교의 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

References

1. H. Cen, A. Morina, A. Neville, R. Pasaribu, and I. Nedelcu, Effect of water on ZDDP anti-wear performance and related tribochemistry in lubricated steel/steel pure sliding contacts, *Tribology International*, **56**, 47 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.06.011>
2. A. Dorgham, A. Azam, P. Parsaeian, T. Khan, M. Sleiman, C. Wang, A. Morina, and A. Neville, Understanding the effect of water on the transient decomposition of zinc dialkyldithiophosphate (ZDDP), *Tribology International*, **157**, 106855 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106855>
3. H. L. Costa, K. S. Evangelista, T. Cousseau, J. S. R. Acero, and F. Kessler, Use of XANES and XPS to investigate the effects of ethanol contamination on anti-wear ZDDP tribofilms, *Tribology International*, **159**, 106997 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106997>
4. H. Spikes, Mechanisms of ZDDP—An Update, *Tribology Letters*, **73**, 38 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11249-025-01968-3>
5. H. Qin and G. L. Doll, Effects of water contamination on micropitting and rolling contact fatigue of bearing steels, *Journal of Tribology*, **145**, 011501 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1115/1.4055181>
6. P. Parsaeian, A. Ghanbarzadeh, M. Wilson, M. C. van Eijk, I. Nedelcu, D. Dowson, A. Neville, and A. Morina, An experimental and analytical study of the effect of water and its tribochemistry on the tribocorrosive wear of boundary lubricated systems with ZDDP-containing oil, *Wear*, **358**, 23 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.017>
7. F. Cyriac, P. M. Lugt, R. Bosman, and C. H. Venner, Impact of water on EHL film thickness of lubricating greases in rolling point contacts, *Tribology Letters*, **61**, 23 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0642-6>
8. Y. Wu, W. Li, M. Zhang, and X. Wang, Oxidative degradation of synthetic ester and its influence on tribological behavior, *Tribology International*, **64**, 16 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.02.002>
9. E. Beran, Effect of chemical structure on the hydrolytic stability of lubricating base oils, *Tribology International*, **43**, 2372 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.09.001>
10. Z. Zhou, X. Zhou, Q. Huang, X. Liu, L. Wang, and S. Xing, Impact of oil-water emulsions on lubrication performance of ship stern bearings, *Scientific Reports*, **14**, 31478 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83253-2>

11. S. Hofmann, T. Lohner, and K. Stahl, Influence of water content on elastohydrodynamic friction and film thickness of water-containing polyalkylene glycols, *Frontiers in Mechanical Engineering*, **9**, 1128447 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1128447>
12. J. F. Luiz and H. Spikes, Tribofilm formation, friction and wear-reducing properties of some phosphorus-containing antiwear additives, *Tribology Letters*, **68**, 75 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01315-8>
13. A. Conzelmann, A. Gassner, and H. Mozaffari-Jovein, Tribo-corrosive material degradation: Method for the analysis of complex interactions, Wiley Analytical Science, Online publication (2022). <https://analytical-science.wiley.com> (Accessed: 2022-01-17)
14. D. H. Shin and S. J. Kim, Investigation on tribocorrosion characteristics of 316L stainless steel for seawater pumps in seawater desalination systems, *Corrosion Science and Technology*, **24**, 193 (2025). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2025.24.3.193>
15. M. J. Jung, S. H. Kim, J. M. Jeon, Y. S. Kim, and Y. C. Kim, Indentation tensile properties of seawater piping with cavitation and immersion degradation, *Corrosion Science and Technology*, **22**, 4198 (2023). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.6.419>
16. J. S. Park, J. W. Lee, and S. J. Kim, Corrosion mechanism according to localized damage of Zn–Al–Mg alloy coated steel sheet used in plant farm, *Corrosion Science and Technology*, **22**, 123 (2023). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.2.123>
17. D. H. Shin and S. J. Kim, Effects of thickness and defects of DLC coating layer on corrosion resistance of metallic bipolar plates of PEMFCs, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 235 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2024.23.3.235>