선박 엔진의 실린더 라이너용 합금주철의 부식마멸에 미치는 분위기의 영향

구현호[†] · 조연상^{*} · 조화영^{*} · 박흥식^{*‡}

두산엔진(주)

*동아대학교 기계공학과

Effect of Atmosphere on Corrosive Wear of Alloy Cast Iron for Cylinder Liner of Large Ship Engine

Hyunho Koo[†], Yonsang Cho^{*}, Hwayoung Cho^{*} and Heungsik Park^{*‡}

Doosan Engine co., Ltd.

^{*}Dept. of Mechanical Engineering, DongA University

(Received July 18, 2012; Revised September 2, 2012; Accepted September 5, 2012)

Abstract – The engine of a large ship operates under wet conditions using a fuel such as bunker C oil, which includes sulfur and many impurities. A cylinder liner made of cast iron is very susceptible to damage such as scuffing on the surface. This scuffing can reliably be attributed to the destruction of the oil film and the corrosion wear caused by water and sulfur included in the fuel, along with abrasion impurities and poor lubricants. In this study, a reciprocating friction and wear test was carried out with a cast iron specimen, which was used to simulate an engine cylinder in a corrosive environment. Base-oil and stirred oil containing distilled water, NaCl solution, and dilute sulfuric acid were used as lubricants. The friction surface was analyzed using a microscope and EDAX, and the friction coefficient was measured using a load-cell under each experimental condition. We then attempted to investigate the damage to the cylinder liner using the results.

Keywords – cylinder liner(실린더 라이너), cast iron(주철), scuffing(스커프), corrosion wear(부식 마멸)

1. 서 론

주철 소재는 윤활 마찰 특성이 우수하여 선박 엔진, 자동차 엔진 그리고 공작기계의 안내면 등의 재료로 널리 사용되고 있다. 특히, 대형 선박의 저속 디젤 엔진에 사용되는 주철제 실린더 라이너는 충분한 강도와 운전저동 그리고 낮은 마모율을 위하여 표면부는 경질상과 최적의 현미경 조직이 필요하다[1]. 따라서 이러한 대형 선박 엔진의 실린더 라이너는 펄라이트 조직과 흑연 이외에 경한 스테다이트 조직[2]이 포함된 합금주철 재료를 사용하고 있다. 그러나 선박의 엔진은 불순물과

황이 많이 포함된 벙커C유를 연료로 사용하고 습한 지역에서 가동되고 있기 때문에 실린더 라이너의 표면에 스커프(scuffing)[3,4]와 같은 손상이 매우 발생되기 쉬운 환경에 있다. 따라서 스커프와 같은 운전 중의 심각한 라이너 손상을 방지하기 위하여 다양한 연구가 되어 왔으며, 여러 가지 대책마련을 위해 노력하고 있다.

지금까지 조사된 스커프의 발생 원인은 연료에 포함된 물과 황, 마모성 불순물 및 윤활 불량으로 인한 유막파괴 및 부식마멸이 가장 유력시 되고 있다[3]. 따라서 스커프의 발생으로 인한 심각한 엔진의 손상을 방지하기 위하여 적당한 BN값과 점도를 가지는 윤활유를 사용하고, 운전 중에 라이너 표면 온도의 비정상적인 증가를 실시간으로 체크하고 있다. 또한 시간과 비

[†]주저자 : hyunho.koo@doosan.com

[‡]책임저자 : parkhs@dau.ac.kr

Fig. 1. Microstructure of alloy cast iron for cylinder liner (x200).

용을 많이 들어 라이너와 링의 마모 상태를 주기적으로 점검하고 있다. 그러나 이러한 대책에도 불구하고 스커핑이 갑자기 발생하여 엔진을 가동할 수 없는 상태가 될 수 있기 때문에 엔진을 제작하는 회사나 선박을 운용하는 회사의 입장에서는 여전히 이 문제에 대해 매우 민감한 실정이다. 이처럼 실린더 라이너에서 발생하는 스커핑의 문제는 아직까지도 자유롭지 못한 상태이며, 그 원인을 찾기 위해 많은 연구자[5-8]들이 노력하고 있다. 하지만 대부분 운전환경에 따른 스커핑의 발생빈도에 대한 통계적인 데이터와 경험적인 지식에 의존하여 대처하고 있는 실정이다. 따라서 운전 중에 발생될 수 있는 스커핑 문제를 보다 효과적으로 파악하여 빠르게 대응하기 위해서는 다양한 부식 환경에서 실린더 라이너 소재의 윤활마찰 및 마멸에 의한 표면 손상에 대한 여러 가지 자료를 구축할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 부식 환경에 따른 실린더 라이너의 손상을 살펴보기 위하여 실린더를 모의한 왕복동 윤활 실험 장치를 제작하였고, 부식 분위기에 맞는 실험 조건을 설정하여 마찰마멸 실험을 행하였다. 그리고 각 조건에 따른 마찰면의 상태를 분석하고 마찰계수의 변화 및 마멸량을 측정함으로써 다양한 부식 분위기가 윤활마찰 중인 합금주철 시험편의 마찰면에 어떠한 영향을 주는지 조사하였으며, 이를 통하여 부식 환경 하에서 가동되는 선박 엔진의 실린더 라이너의 손상에 대한 자료를 구축하고자 하였다.

2. 실험 방법

2-1. 실린더 라이너 용 주철 소재

본 연구에서는 대형 선박 엔진의 실린더 라이너용

Table 1. Chemical compositions of alloy cast iron

Element (%)								
C	Si	Mn	P	S	Cu	V	B	
3.1	1.14	0.79	0.26	0.03	1.24	0.01	0.025

Fig. 2. Schematic diagram of reciprocating friction wear tester of pin on disk type.

소재인 합금주철을 디스크 시험편으로 사용하였으며, 그 화학적 성분 및 기계적 성질과 현미경 조직을 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 연구에 사용된 시험편은 탄소(C) 3.1%, 규소(Si) 1.14%가 함유된 주철로 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 펄라이트와 편상 흑연, 그리고 경화조직인 시멘타이트 및 스테다이트로 구성되어 있다. 스테다이트는 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ - Fe_3P 삼원공정으로 펄라이트의 외곽에 연결망의 형태로 형성되어 있으며 매우 경한 특징을 가지고 있다[2]. 그리고 내마모성과 강도를 향상시키기 위하여 구리(Cu), 바나듐(V), 붕소(B) 등이 첨가되어 있으며, 인장강도는 약 273 MPa, 경도는 약 HB212를 나타내었다.

2-2. 부식 윤활 마찰 마멸 실험

본 연구에서는 선박 엔진의 피스톤과 실린더를 모의하여 윤활 마찰마멸 실험을 하기 위해 Fig. 2에 나타난 왕복동 마찰마멸 시험기를 이용하였다. 3:1 감속기가 부착된 400 W 서브모터를 사용하여 시험편을 상하운동 시켰으며, 핀 시험에 사하중을 가하고 로드셀로부터 마찰력을 측정하여 마찰계수를 구하였다. 윤활유는 교반기를 이용하여 수용액과 계속 혼합 상태가 유지되도록 하였고, 로터리 펌프를 이용하여 시험편의 표면에 공급하였다. 그리고 시험편 뒤에는 가열기를 부착하여 시험편이 일정한 온도가 되도록 가열하였다.

본 연구에서 사용한 주철 시험편의 형상은 400x

Table 2. Experiment conditions

Applied load	10 kgf
Sliding speed	Max. 0.08 m/s (30 rpm)
Oil	Base oil
	Base oil + 5% of H ₂ O
	Base oil + 5% of NaCl solution (concentration: 3.5%)
	Base oil + 5% of H ₂ SO ₄ solution (concentration: 15%)
Temp.	30°C, 90°C
Time	3 hr

650×7.5 mm 크기의 직육면체의 판재 형상으로 가공하였으며, 표면조도는 Ra0.2 μm 로 연마하여 왕복 마찰 실험을 하였다. 그리고 상대 재료인 핀 시험편은 기계 구조용강 SM45C 소재를 직경 3 mm, 길이 10 mm로 가공하였으며, 표면경화처리를 하여 표면경도가 HB730 이상이 되도록 하였다. 윤활유는 동점성계수 7cSt(40°C) -2.3cSt(100°C)인 기유에 Table 2에 나타난 바와 같이 증류수, 염화나트륨(NaCl) 수용액, 묽은 황산을 각 5% 씩 혼합하여 부식마멸 실험을 하였다. 실제 선박에서 사용하는 실린더 오일은 다양한 첨가제가 포함되어 있어 부식 및 유막파괴를 유발하는 인자들의 영향을 단 시간 내에 파악하기 힘들다. 그리고 실린더 라이너의 내벽 온도는 운전 중에 약 250°C로써 실린더 오일의 동점성계수는 6~8 cSt[1] 정도를 유지한다. 따라서 본 연구에서는 첨가제등의 영향을 배제하고 상온에서 비슷한 동점성계수를 가지는 기유를 사용하였다. 그리고 작용하중은 실린더 라이너와 피스톤링 사이에 가해지는 면압과 유사하도록 10 kgf의 사하중을 가하여 시험편과 핀 사이의 면압이 약 14.4 N/cm²이 되도록 하였다. 시험편의 표면 온도는 30°C와 90°C가 유지되도록 하였으며, 모터의 회전수는 30 rpm으로 고정하여 시험편의 최대 미끄럼 속도는 약 0.08 m/s가 되도록 설정하여 각각 3시간씩 실험을 하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3-1. 왕복 마찰 실험에서의 마찰계수 변화

Fig. 3은 시험편 온도를 30°C로 유지하였을 때 증류수를 첨가한 혼합유에서 1회 왕복운동시의 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로 미끄럼 속도가 0 m/s가 되어 운

Fig. 3. Variation of friction coefficient for 1 cycle, specimen temp. : 30°C.

Fig. 4. Variation of average of friction coefficient in H₂SO₄ solution, specimen temp. : 90°C.

동방향이 바뀌는 상하사점 부근에서 가장 높은 마찰계수를 나타내고 미끄럼 속도가 최대인 중간지점에서는 마찰계수가 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 방향이 바뀌는 상하사점에서 미끄럼 속도가 감소하여 유막이 쉽게 파괴됨으로써 직접적인 표면 접촉이 가장 많이 일어난 결과라고 생각한다. 본 연구에서는 조건에 따른 마찰계수의 변화를 살펴보기 위해 마찰계수의 절대값을 취하여 전체 구간에 대한 평균을 구하였고, 마찰력의 방향이 바뀌는 상하사점 부근에서 데이터를 이용하여 상하사점 마찰계수 평균을 구하였다.

Fig. 4는 시험편 온도를 90°C로 유지하였을 때 3시간의 실험시간 동안 묽은 황산 혼합유를 공급하여 상하사점 및 전체 마찰계수의 평균 변화를 나타낸 것이다. 여기서 실험초기 30분까지는 마찰계수가 증가하다가 그 이후부터는 점차 감소하여 일정 값을 유지하고 있다. 특히 초기에 마찰계수가 급격히 증가하는 것은

Fig. 5. Variation of friction coefficient in each oil condition, specimen temp. : 30°C.

초기 마멸과 함께 산화 및 부식이 진행되는 과정이라 생각되며, 그 이후는 부식막의 형성과 이탈이 반복되는 부식마멸[8,9]이 진행되는 과정이라고 생각한다. 그리고 상하사점에서의 마찰계수가 높게 나타나는 것은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 미끄럼 속도의 감소와 함께 운동방향이 바뀌면서 직접적인 표면 접촉과 함께 마찰력이 증가된 결과라고 생각한다.

또한 기유를 사용한 경우를 제외하고 대부분의 실험 조건에서 스틱슬립(stick slip)에 의한 소음과 함께 마찰면의 손상이 상하사점 부근에서 가장 심하게 일어났다. 따라서 본 연구에서는 각 실험조건에 따라 부식 및 손상상태가 심하고 마찰계수가 높게 나타나는 상하사점에서의 마찰계수 평균을 이용하여 그 변화를 검토하였다.

3-2. 시험편 온도에 따른 부식 마멸

Fig. 5는 시험편 온도를 30°C로 유지하였을 때 각 혼합유의 상하사점에서의 마찰계수 평균값의 변화를 나타낸 것으로 기유에서 실험한 경우에는 마찰계수가 약 0.2 정도로 정상적인 경계윤활 마찰이 진행되고 있다. 그러나 증류수를 혼합한 경우에는 마찰계수가 불안정하게 변화하고 있다. 이는 증류수에 의하여 마찰면에 지속적으로 유막이 형성되지 못하고 유막이 파괴된 결과라고 생각된다. 그리고 염화나트륨 수용액의 혼합유는 약 70분까지는 마찰계수가 증가하다가 그 이후에는 약 0.3 정도로 일정하게 진행되고 있으며, 묽은 황산 수용액의 혼합유는 마찰계수가 30분 정도까지 급격히 증가하고 그 이후에는 약 0.4 정도의 마찰계수로 일정하게 진행된다. 이처럼 초기에 마찰계수가 증가하는 것은 초기 마멸과 함께 묽은 황산과 염화나트륨 수

Fig. 6. Friction surface of 30°C specimen on emulsion oil in TDC.

용액에 의하여 부식이 진행된 결과라고 생각되며 그 이후에는 부식막 형성과 이탈이 지속적으로 반복된 결과라고 보여진다.

Fig. 6은 시험편 온도를 30°C로 유지하였을 때 혼합유에 따른 상사점에서의 마찰면 사진을 나타낸 것으로 여기에서 (a)기유와 (b)증류수 혼합유는 마찰표면에 산화막이 생성되어 마찰이 진행된 것을 볼 수 있다. 특히, (b)증류수 혼합유는 기유에 비해 산화막이 전면에 더 많이 형성되어 있다. 이는 혼합유 내에 포함된 증류수에 의한 유막파괴로 인하여 기유만 사용했을 때보다 접촉 온도가 더 높아졌기 때문이라고 생각한다. 그리고 (c)염화나트륨 수용액의 혼합유와 (d)묽은 황산의 혼합유를 사용한 경우의 마찰 표면은 부식과 함께 산화막이 이탈된 흔적이 있고 이탈된 입자에 의해 연삭 마멸이 일어난 흔적을 볼 수 있다. 이는 전형적인 부식 마멸 과정으로 부식으로 인한 부식막의 형성과 마찰에 의한 이탈 그리고 표면에 새로운 부식막의 생성이 반복적으로 일어난 결과라고 생각한다.

Fig. 7은 시험편 온도를 90°C로 유지하였을 때 상하사점에서의 마찰계수 평균값의 변화를 나타낸 것으로 Fig. 5의 30°C일 때보다 마찰계수가 높게 나타나고 있다. 이는 시험편 온도가 상승함에 따라 기유 및 혼합유의 점도저하와 함께 유막이 쉽게 파괴되고 부식물이 증가하여 산화 및 부식이 더 빠르게 진행된 결과라고 생각된다. 그리고 초기마멸 상태는 기유, 증류수, 염화

Fig. 7. Variation of friction coefficient in each oil condition, specimen temp. : 90°C.

나트륨 및 묽은 황산 순으로 짧아지고 있다. 이것은 묽은 황산의 부식 반응이 가장 빠르게 진행되고 다음으로 염화나트륨, 증류수, 기유 순으로 진행되기 때문이라고 생각된다.

특히, 증류수 혼합유의 경우 초기 마멸구간인 약 70분까지는 마찰계수가 급격히 증가하여 약 0.6 정도로 매우 높게 나타나고 있다. 이는 마찰면 전체에 걸쳐 유막이 거의 형성되지 못하고 온도 상승에 따른 증류수의 빠른 기화로 인하여 스틱슬립 마찰이 진행된 결과라고 생각된다. 그러나 염화나트륨 수용액의 혼합유는 Fig. 5의 30°C일 때의 마찰계수 변화에 비해 초기 50분까지는 마찰계수가 증가하지만 전반적으로는 크게 차이가 없고, 묽은 황산 및 증류수를 혼합한 경우보다도 현저히 낮다. 이는 Fig. 8의 마찰면의 에다스(EDAX) 성분 분석 결과에서 볼 수 있듯이 부식으로 인한 산화막 뿐만 아니라 표면에 염화나트륨이 생성되어 묽은 황산 및 증류수의 혼합유에 비해 마찰 전단력이 낮아진 결과라고 생각된다.

마찰면에 생성된 산화막 또는 부식막은 (a)증류수와 (b)묽은 황산을 혼합한 경우에는 철(Fe)과 산소(O)로 구성된 산화철 계열로 형성되어 있다. 그러나 (c)염화나트륨 수용액을 혼합한 경우에는 철(Fe)과 산소(O) 이외에도 나트륨(Na)과 염소(Cl) 성분이 다량 검출되어 마찰면에 산화철 계열의 막 뿐만 아니라 염화나트륨(NaCl)이 표면에 같이 생성되고 있음을 알 수 있다. 이는 높은 온도에서 염화나트륨 수용액이 기화되면서 이온상태로 있는 나트륨과 염소가 결정화된 결과라고 생각된다.

Fig. 9는 시험편 온도를 90°C로 유지하였을 때 혼합유에 따른 상사점에서의 마찰면 사진을 나타낸 것이다.

(a) base oil + H₂O

(b) base oil + NaCl solution

(c) base oil + H₂SO₄ solution

Fig. 8. Result of Edax analysis for friction surface of 90°C specimen in TDC.

사진에서 볼 수 있듯이 시험편의 온도 증가와 함께 산화막 또는 부식막이 전면에 걸쳐 매우 많이 형성되어 있다. 특히, (c)염화나트륨 수용액의 혼합유와 (d)묽은 황산의 혼합유의 경우 지속적인 부식마멸에 의해 마찰면이 매우 많이 손상되고 있다.

Fig. 10은 시험편 표면 온도 및 혼합유에 따른 마멸량을 나타낸 것으로 시험편의 온도가 90°C일 때 마멸량이 높게 나타나고 있으며, 묽은 황산의 혼합유가 가장 마멸량이 높다. 그리고 염화나트륨 수용액의 혼합유는 Fig. 7의 마찰계수 변화에서 증류수 혼합유 보다 마찰계수가 낮게 나타나고 있지만 염화나트륨 수용액의 혼합유를 사용하였을 때 부식의 진행이 빠르기 때

Fig. 9. Friction surface of 90°C specimen on emulsion oil in TDC.

Fig. 10. Wear loss in experiment conditions.

문에 그 영향으로 마찰면의 손상이 심해지면서 마멸량은 훨씬 많다고 생각된다.

이러한 결과에서 첨가물 등의 영향을 배제하면 시험편 온도를 30°C 및 90°C로 유지하였을 경우에는 묽은 황산의 혼합유가 부식마멸과 함께 마찰면의 손상이 가장 심하게 일어나고 있다. 그리고 염화나트륨 수용액의 혼합유는 시험편 온도 90°C에서는 비록 마찰계수는 약 0.3 정도로 낮지만 부식의 영향으로 마찰면은 심하게 손상되고 있으며, 증류수는 윤활유의 유막 파괴로 인한 마찰면의 손상에 큰 영향을 준다고 생각한다. 또한 부식 또는 유막 파괴로 마찰면의 손상이 증가하게 되면, 마찰계수는 대체로 0.3 이상 높게 나타나고 있다.

4. 결 론

부식 환경 하에서 가동되는 선박 엔진의 실린더 라이너의 손상에 대한 자료를 구축하고자 실린더를 모의하여 주철 시험편에 대한 왕복동 윤활 마찰마멸 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시험편의 온도가 30°C일 때보다 90°C일 때, 혼합유의 점도저하와 부식물의 증가로 산화막 또는 부식막이 전면에 걸쳐 매우 많이 형성되어 마찰면의 손상이 매우 심각하게 일어나고 있다.

2) 시험편의 온도가 90°C일 때 기유 및 혼합유의 점도저하와 함께 유막이 쉽게 파괴되고 산화 및 부식이 더 빠르게 진행되어 30°C일 때의 마찰계수보다 전반적으로 마찰계수가 높게 나타나고 있다.

3) 묽은 황산 혼합유가 마멸량이 많고 마찰면의 손상이 가장 심하게 일어나고 있다. 염화나트륨 수용액 혼합유의 마찰계수는 시험편 온도 90°C에서 증류수 혼합유 보다 낮지만 부식의 영향으로 마찰면은 심하게 손상된다. 그리고 증류수는 윤활유의 유막 파괴로 인한 마찰면의 손상에 큰 영향을 준다.

4) 부식 또는 유막 파괴로 인하여 마찰면의 손상이 증가하면, 마찰계수는 대체로 0.3 이상 높게 나오는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Doug W., *Marine Diesel Engines and Gas Turbines*, Ninth Edition, Dongmyung comp., 2011.
2. S. H. AVNER, *Introduction to Physical Metallurgy*, Second Edition, McGraw-Hill Book Comp. 1974.
3. Francesco M., Markus W., Matthias S., Konrad R., and Marco P., "Suction air humidity influence on piston running reliability in low-speed two-stroke diesel engines," CIMAC, No. 74, pp.1-15, 2010.
4. Hiroyuki Nagamatsu, Jun Tajima, Isao Takasu and Saito Yoshiyuki, "Study of Scuffing and Piston Deposits - Hardness of Inorganic Compound's Deposits," CIMAC, paper No. 243, 2004.
5. T. Yamada et al, "Monitoring of Cylinder Liner and Piston Ring on Low-Speed Diesel Engines,"

- CIMAC, 2004.
6. Cees Schenk, Jan Hengeveld and Kjeld Aabo, "The Role of Temperature and Pressure in Wear Processes in Low-Speed Diesel Engine," Proc. ISME, Tokyo, 2000 Vol. 2.
7. Saburi S., Saitoh Y., and Yamada T., "Tribology between piston rings and cylinder liners of marine diesel engines," IHI Eng.Review, Vol. 38, No. 1, pp. 11-18, 2005.
8. A.K. Van Helden, M.C. Valentijn, and H.M.J. Van Doorn, "Corrosive Wear in Crosshead Diesel Engines," Tribology International, Vol. 22, Butterworth & Co. Publishers, June 1989.
9. Mars G. F. *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill Book Comp. 1986.