

◆ 解說 ◆

미래 Tribology의 연구 방향에 대하여 (Future Directions in Tribology Research)

강 석 춘

공군사관학교 교수

요 약

미국 과학재단의 주최로 Tribology에 관한 심포지움이 개최되어 산업계, 학계 및 공사립 연구기관에서 종사하는 세계적으로 저명한 Tribology 전문가들이 Tribology의 기본연구에 관해 토론하고 장차 연구의 방향을 설정한 바 있다. 이때 작성된 보고내용을 요약하여 정리하였다.

토론된 많은 내용중에 다음의 4개 분야가 연구의 중심대상이 되어야 함에 의견을 모았고 그들은 아래와 같다.

1. 마찰, 마모 및 손상에 대한 Model 예측
2. 윤활에 관한 미시적 및 화학적 관점에서의 해석
3. 미시적 관점에서 마모 메카니즘 해석과 그 예방
4. 높은 온도에 사용하기 위한 재료와 윤활제 개발

이들 연구는 매우 복잡하므로 학계, 연구소 및 산업계에서 공동으로 연구하는 것이 바람직하고 그 연구결과는 산업전반에 걸쳐 기여도가 매우 클 것으로 결론지었다.

1. 서 론

Tribology 연구는 최근 10여년간 매우 활발해져서 매년 6000여 편의 관련 논문이 세계적으로 발표되고 있다. 미국에서는 과학재단, 에너지성과 각 군 연구소의 활발한 지원하에 연구되어지고 있고 대학에서 Tribology 연구팀의 수도 점점 증가하고 있다. 또 산업계에서도 전반적으로 Tribology

의 중요성을 인식하고 있고 별도 연구실 등을 운영하면서 필요한 연구를 추진중에 있다.

연구발전은 과학주도형과 기술주도형이 있는데 Tribology는 기술주도형의 분류에 들어간다. 왜냐하면 과거 Tribology 발전이 다음의 예와 같이 기술 발전의 필요에 의해 주요한 발전이 이루어졌기 때문이다. 즉, 철도산업 및 수력 기술에서의 윤활상태를 개선시키기 위해 유체윤활의 발전을 이루었고, 내연기관의 발전이 윤활 첨가제의 발전을 유도하였으며 터빈엔진의 윤활문제에 의해 EHD 이론과 합성윤활제의 발전을 가져왔다. 또 우주비행에 따른 필요성에 의해 고체윤활제 개발과 사용이 본격화 되었다. 마지막으로 고속 공작에 필요한 절삭 공구의 수명 연장을 위해 높은 경도, 내마모 물질의 코팅 기술이 발전되었다.

Tribology의 미래 연구방향을 토론하기 위한 심포지움은 1986년 7월 21-22일과 1986년 10월 22일 2번에 걸쳐 개최되었고, 참가자는 세계적으로 권위있는 학자 및 전문 연구원을 중심으로 구성하였으며 그 명단은 표1에 제시하였다. 전반적인 Tribology 문제와 기본적인 주요 과제를 토론하였고 여기에 포함된 주요분야는 마찰의 성격, 마모 메카니즘과 마모과정, 윤활화학, 기술적인 Modeling, Tribo - Systems의 Modeling Tribo - material 윤활제, 각 윤활시험 및 손상예방 기술 등 주요 문제들이다.

2. 마찰의 성질

마찰은 Tribology에서 핵심이 되는 문제다. 비록 과거의 연구에서 진접촉 면적(real contact area), 점착(adhesion) 및 굽힘(plowing)과 같은 유용한 개념을 제시하였지만 마찰을 예측하는데 전반적으로 통용될 수 있는 이론은 아직 없다. 주요问题是 마찰이 접촉부분에서 일어나는 많은 복잡한 과정에 의존한다는 사실이다. 마찰의 특성을 설명하는데 필요한 주요 연구 문제들이 표2에 제시되어 있다. Tribology에서 중요한 성질은 접촉되는 진 면적에 의해 발생된다. 즉, 열발생과 확산, 점착, 굽힘 및 피막 형성 등 두 상대면의 접촉부분에서 일어나는 것이다. 최근 표면 조도가 이론적으로 분석되고 진 접촉 면적을 예측하게 되었지만 그러나 두 고체사이에 진 접촉 면적을 결정하는 만족할 만한 실험기술은 존재하지 않으므로 앞으로 더 많은 연구가 필요하다.

많은 Tribological 접촉에서 서로 구조나 화학적 성분이 다른 분명한 층이 접촉면에서 발견된다. 이들 층은 표면이나 환경에 따라 마찰면의 전이현상에 의해 Tribo - chemical 반응을 통하여 형성된다. 이를 층은 두 접촉면의 마모입자나 산화물 같은 화학반응 물질로 구성되어 있다. 마찰이나 마모는 이를 층의 형성과 이탈에 의해 영향을 받는다. 따라서 체계적 연구에 의해 접촉면을 확실하게 규정하고 표면층의 영향이 고려되어야 한다. 중요한 문제들은 Tribo - layer (마찰과정에서 만들어진 피막)에 관련을 갖고 있고 표3에 열거하였다.

Tribo - chemical 반응은 성적 반응에 비해 훨씬 빨리 일어난다. 이러한 현상의 원인을 정확히 파악하지는 못했지만 몇 가지 학설을 살펴보면 순수한 금속(산화물이 아님)의 노출, exo - electron emission, 표면 결합 및 국부온도 증가현상 등이다. 또 마모에 의한 반응 층의 제거나 얇아짐, 온도증가에 의한 화학물질의 확산현상의 증가, 소성 변형에 의한 확산토의 생성등이다. Tribo - chemical 반응과 표면층 형성의 운동학 성질은 피막의 마찰계수와 마모율에 영향을 미친다.

3. 마모 메카니즘과 마모과정

지난 과거 오랫동안 마모 메카니즘과 마모과정은 점착(adhesion), 연마(abrasion), delamination, 피로 및 부식 등으로 설명되어 왔다. 이들은 대부분 실험실 실험결과를 통해 뒷받침 되었다. 그러나 각 마모 과정의 적용범위는 정의되지 못했다. 대부분 마찰 응용에서 마모과정은 한가지 이상의 메카니즘이 관여된다. 따라서 각각의 경우를 적절히 설명하는 것은 쉽지 않다. 그러나 마찰을 연구하고 마모 메카니즘을 정리하며 분류하는 것은 매우 중요하므로 근본적인 마모 메카니즘과 실제 마모과정 사이의 관계를 정의 할 필요가 있다.

아마 마모 메카니즘을 분류하는데 가장 좋은 방법은 마모 도표(지도) 같은 조직적인 형태를 이용하는 것이다. 이 마모 도표에는 마모 메카니즘에 영향을 주는 조건(하중, 온도, 속도 등)의 범위와 마모 결과 자료와의 관계를 포함하여야 한다. 또 이 도표는 유탄 응용에도 확대 발전되어야 할 것으로 예를 들면 내연기관의 캠과 lifter 접촉에 대한 일련의 마모 도표는 마모 메카니즘과 작동변수, 유탄화학 및 재료등 각 계통의 효과를 포함하여야 한다.

마모과정의 세부적인 것은 접촉표면의 화학조성, 구조 및 특성(물리적, 화학적)에 의존되어야 한다. 따라서 접촉면의 특성과 마모입자가 마찰층이나 혹은 구성물질과 같은 조성 및 구조를 가진 표면에서 생겼는지 결정하는 것이 중요하다. 많은 경우에 표면층의 형성과 파괴가 마모율을 지배하는 것으로 보고있다. 또 열 및 주변환경에 영향을 받음을 중요시 해야한다. 과거에는 대부분 마모 메카니즘에서 10^{-6} 보다 큰 마모 계수를 다루었지만 유탄계에서 신뢰성을 높이고 수명을 증대시키기 위해서는 이보다 훨씬 적은 마모 계수도 연구되어야 한다. 즉, 유탄접촉이나 자기기록장치 같은 미시적 수준에서 일어나는 마모 메카니즘을 정의하는 것도 매우 중요하다.

4. 유탄 화학(Lubrication Chemistry)

상업용 유탄유는 일반적으로 기유와 여러 성능 특성을 지배하는 다양한 첨가제로 구성되어 있다.

어떤 것은 백여 가지 서로 다른 문자들로 구성되기도 한다. 윤활 화학에 관련된 중요한 연구과제가 표5에 열거되어 있다. 윤활과정을 이해하기 위한 첫 단계로 용액 상태에 있는 윤활제 종류의 물리적, 화학적 상태가 결정되어야 한다. 고체표면에서 이들 분자의 흡착과정과 표면과 윤활유와의 상호작용 성질이 경계 윤활 접촉하에서 윤활 작용을 지배한다. 이점에서 흡착의 역할과 마찰계수에 대한 흡착층의 구조 및 생성의 영향등이 규명되어야 한다.

대부분 전이금속은 탄화수소의 산화에 의한 열화과정에서 촉매제로 작용한다. 이 상호작용은 윤활유의 전반적인 수명에 이롭지 않을 수 있다. 그러나 만약 적당히 조절된다면 마찰과 마모를 조절하는데 유리한 효과를 얻을 수 있다. 일반적으로 마찰 고분자물(friction polymers)이 금속표면과 탄화수소 및 주변의 산소 사이에서 산화 반응을 통하여 접촉표면에 형성되는 것으로 알려져 있다. 그래서 산화 메카니즘과 운동학 및 표면 피막 형성의 연구는 열 및 환경 효과, 상호 접촉면 사이에서의 비평형반응, 고압접촉시 tribo - chemical 반응의 효과를 포함해야 한다.

현재까지 윤활제는 탄화수소와 금속표면 (대부분 철) 사이에 상호 작용에 관한 지식을 바탕으로 제조 되어 왔다. 그러나 높은 온도의 응용과 뉴 세라믹용 특수 윤활유 개발에 관심이 요구된다.

5. Tribological Process의 Modeling

과거에 완전 유체 윤활, EHD, 가스피막 윤활 같은 유체 윤활현상을 Modeling 하는데 많은 발전이 이루어졌다. 그러나 마찰, 마모 및 경계 윤활에 대한 일반적인 Modeling에는 별로 진전이 없다. 이 분야의 모델설정이 힘드는 이유는 여러 이론이 종합되는 접촉면의 상호작용의 복잡성 때문이다. Tribological Process의 Modeling 하는데 필요한 연구가 표6에 열거되어 있다. 모델은 알고 있는 물리적 원리에 바탕을 두고 전형적인 Tribological 접촉의 현상을 예측할 수 있어야 하고 그것은 설계나 재료선정에 상용될 능력을 가져야 한다. 즉, 마찰계수, 마모율과 부품의 수명이 예측되어야 한다.

이때 가능한 연구방법은 경험적 모델작업과 이론적 모델작업의 두 종류가 있다. 경험적인 접근 방법은 경험적 자료수집에 바탕을 두고, tribological 자료수집, 산업현장에서의 자료수집, 경험적 모델설정 및 계속된 수정 변경을 거쳐 장시간에 이루어 질 수 있는 것이다. 그러나 이론적인 접근 방법은 물리적, 화학적 법칙을 이용하는 것으로 두가지 절충식이 바람직하다. 이때 여러 현상 및 자료를 얻기 위하여서는 각종 실험자료수집, 문자모델, 화학반응, 피막형성 연속체 역학 분야등 여러 계통의 전문가 들에 의한 팀을 형성하여 연구하는 것이 바람직하다.

6. Tribo - system 의 Modeling

현재 유체 윤활분야에서의 모델은 윤활 관련 부품 및 계의 설계에 이용가능한 충분한 자료를 제공 할 수준으로 발전되고 있다. 그러나 장차 기술적 필요에 부합하도록 하기 위해서는 이러한 모델을 확대하고 정확하게 개발시킬 필요가 있다. 이 분야에 관한 연구 과제가 표7에 열거되어 있다. 현재의 유체 윤활 모델에 표면조도 효과를 포함하고 표면 접착을 예측할 수 있는 능력을 제시할 수 있어야 한다. 또 뉴튼 유체역학 모델은 계의 천이효과 (transient effects)를 포함하고 비 뉴튼 유체의 경우까지 포함시켜야 한다. 기타 열효과, 난류전이, 윤활막 파괴 및 마모입자의 영향도 포함시킬 필요가 있다. 대부분 이용가능한 모델들은 단순한 Tribo - component (윤활 부품)에 대하여 개발되었기 때문에 몇 가지 요소를 갖는 계에 대한 개발이 필요하고 설계 및 성능 예측에 충분한 정보를 제공할 수 있어야 한다. 그들은 작동 한계를 제시 할 수 있어야 하고 손상의 예측이 가능하며 여러 부품으로 구성된 윤활계의 개발을 단계적으로 이루어 서로 다른 요소간의 상호작용, 계의 동적 분석 및 전반적인 윤활 요구 조건을 충족 시켜야 한다.

7. Tribo - Materials 과 윤활제

기술개발에 따라 윤활계통의 성능을 높이고 신뢰 할 수 있는 수명을 증대할 필요성이 항상 요구 된다. 이것은 재료의 마모저항을 높이고 좋은 성

능을 갖는 윤활제를 연구 개발함으로써 가능해진다. 여기에 관련된 연구과제를 표8에 열거하였다. 높은 성능을 유도하기 위해 고온이나 고속 같은 가혹한 조건에서 마모를 억제하기 위한 혁신적인 방법이 요구된다. 즉, 뉴 세라믹, 복합재 코팅과 표면 형상변형 기술을 개발 시키고, 이들에 대한 윤활 성능의 한계를 정하여 이용 가능성을 연구하여야 한다.

고체 윤활제는 높은 온도에서 사용되는 윤활제로써 또는 고속 윤활유 첨가제로써 사용이 늘고 있다. 이제까지 고체 윤활제의 연구는 경험적으로 실시되었고 정확한 윤활작용 메카니즘을 이해하는 데는 미진하다. 따라서 얇은 막에서 유동학적인 모델을 정의 및 평가하도록 연구가 진행되어야 한다.

앞으로의 윤활유 개발은 높은 온도용 윤활제 개발이다. 이때 현재 이해되는 윤활유 반응 메카니즘을 바탕으로 연구되어야 하고 합성유 쪽으로써 산화 방지에 관심을 갖어야 할 것이다. 여기서 기유의 화학성질을 보다 정확히 이해하고 고온 적응을 위한 이론적 배경을 가져야 한다.

〈표 1〉

토론에 참가한 윤활 관련 전문가

- D. H. Buckley, H. Okabe, H. S. Cheng, C. H. T. Pan,
- H. Czichos, M. B. Peferson, D. Dowson, D. A. Rigney,
- N. S. Eiss, A. W. Ruff, T. E. Fischer, N. P. Suh,
- M. Godet, A. Z. Szeri, S. M. Hsu, D. Tabor,
- E. E. Klaus, W. O. Winer, K. C. Ludema

〈표 2〉

마찰에 관련된 중요한 연구과제

1. 접촉에서 진 접촉 면적에 관한 실험적 측정
2. 열 발생과 그의 마찰에 미치는 영향
3. 에너지 확산의 모드
4. 상호 접착력과 접착 부분의 증가
5. 접착과 손상과의 상호관계
6. 경계 윤활에서 흡착의 역할
7. 흡착층의 생성과 구조

〈표 3〉

윤활층(Tribo - layers)에 관련된 중요한 연구과제

1. 윤활화학 (Tribo - chemistry)
2. 표면 피막 형성과 파괴 현상
3. 표면층의 구조 및 성분과 역할
4. 표면 피막의 물리적 화학적 성질

5. 마모 입자가 미치는 역할

〈표 4〉

마모 메카니즘과 마모과정에 관련된 중요 연구과제

1. 마모 메카니즘의 응용 범위
2. 마찰계에서 마모 메카니즘과 그에 관련된 기본 메카니즘
3. 마모 전이의 메카니즘과 그 원인
4. 재료의 미세 조직과 화학성질의 영향
5. 열 및 환경의 영향
6. 부식과 마찰 마모와의 복합 효과
7. 마모 과정에서 마모입자의 작용

〈표 5〉

윤활 화학에 관련된 주요 연구과제

1. 윤활유나 고체 표면에서 첨가제의 물리적 상태
2. 윤활유나 고체 표면에서 첨가제의 상호작용
3. 마모시 윤활 성분의 역할
4. 윤활유-금속 상호작용 메카니즘
5. 산화와 열화의 운동학
6. 마찰 마모에서 윤활유 산화작용의 효과
7. 비평형 반응의 효과
8. 접촉 압력에서 반응 효과
9. 윤활 피막 형성의 메카니즘
10. 윤활 피막의 형성과 파괴 메카니즘
11. 고온에서 경계 윤활의 메카니즘
12. 열 및 환경에 따른 윤활유 변형
13. 세라믹 표면에서 윤활성분의 상호작용

〈표 6〉

윤활과정에 관한 Modeling에 필요한 연구

1. 마찰 마모와 윤활에서 다음에 관련된 예측되는 모델(분자해석, 화학반응 및 연속체 역학)
2. 표면 피막 형성과 파괴에 관한 모델
3. 고체 윤활 피막의 파손

〈표 7〉

윤활계의 Modeling에 관계된 중요한 과제

1. 혼합 윤활 구역해석-표면조도 효과 고려
2. HL 접촉에서 마찰력 크기
3. 계의 전이 효과
4. 비 뉴톤 유체 모델
5. 유체 윤활에서 열전달 모델
6. 난류 전이와 2차유동 효과
7. 유체 윤활 피막의 파손
8. 마모입자의 유동성
9. 윤활계의 순상 예측
10. 윤활 정보에 바탕을 둔 설계 기준

〈표 8〉

윤활재료와 윤활제에 관련된 중요한 연구과제

1. 마모 저항을 개선 시키기 위한 새로운 방법
2. 내 마모성 재료 개발
3. 표면 형상 변형 기술
4. 복합재 코팅에 의한 성능 향상법
5. 고체 윤활 피막의 접착력 향상
6. 고체 윤활 피막의 유동성 모델
7. 코팅과 고체윤활에서의 마모메카니즘
8. 고체피막에서 습기등 환경의 영향
9. 상업용 윤활첨가제의 작용
10. 높은 온도용 윤활제