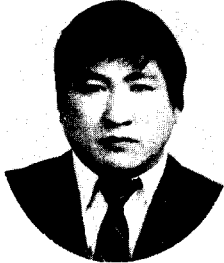


■ 總 說

트라이볼로지에 대한 고찰



권 오 관

• 한국과학기술원
기계윤활연구실장

1. 서 론

윤활은 모든 공업의 기본적인 기술로서 대부분의 기술자들이 직접적 또는 간접적으로 이 분야에 접하고 있으며, 공업의 발전사와 더불어 발달되어온 기술이다. 작금에 이르러서는 공업의 고도화, 첨단화를 기하는데 있어서 핵심적 기술로 평가되고 있으며, 그나라 공업수준을 나타내는 지표라 일컬고 있다.

윤활기술이 세계적으로 중요성을 인정받고 많은 연구와 응용이 이루어지고 있는 반면 국내에서는 윤활에 대하여 상대운동을 하는 두 물체 사이에 윤활제를 사용하여 운동을 원활히 하고 표면의 손상을 방지하는 것과 윤활제에 관한 문제라고 가볍게 생각하는 것이 이 분야에 종사하는 사람들 및 현장의 기술자들의 사고에 깊이 침투되어 있다.

윤활의 의미에는 앞에서 기술한 바와같이 상대운동을 용이하게 하는 공학 및 윤활제에 관련된 기술이라고 하는 좁은 범위의 해석도 있으나, 총괄적인 관점에서 생각할 때 마찰, 마모학을 포함하고 이와 관련된 기계, 금속, 화학, 물

리 등의 모든 분야까지 통칭하여 넓은 의미로 해석하고 있다.

즉, 윤활은 접촉과 마찰이 개재되는 기계 및 각종 장치의 기본문제로서 베어링, 기어, 캠, 시일 등의 기계요소 및 윤활유, 절삭유, 작동유 등에 관한 제반문제와 압연, 절삭, 표면처리 등의 가공기술, 더 나아가서는 기계 및 장치류의 신뢰성 유지, 수명증대 및 성능향상에 관한 기본기술이며 이와 관련된 응용기술에 이르기 까지 모두 그 대상으로 하고 있다.

국내에서는 윤활이 주로 윤활제 및 윤활관리 측면에서만 고려되어 왔으며 적당한 윤활제를 선정하여 사용하면 된다는 안일한 생각으로 자칫 경시되어온 감이 있으며, 이것이 우리나라의 공업수준이 선진외국에 뒤처지는 원인중의 하나로 생각 된다.

2. 윤활과 트라이볼로지

최근에 이르러서는 국내에서도 윤활 대신 트라이볼로지라는 용어를 접할 기회가 점차 증가되고 있다. 이 용어는 1966년 영국에서 처음으로 사용되기 시작한 말로서 근래에는 전세계에

서 통용되어 사용되고 있다. Tribology 라는 말은 그리스어의 Tribos(마찰하다)에서 유래되었으며, 학문적으로 상대운동을 하면서 서로 영향을 미치는 표면 및 이와 관련된 제반문제와 실제 응용에 관한 과학과 기술로 정의된다.

윤활이라는 전문 용어가 있음에도 불구하고 유사한 뜻의 트라이볼로지라는 용어를 새로 만들고 사용하게 된데에는 다음과 같은 경위와 이유가 있었다.

1964년 영국에서는 자국의 윤활교육과 윤활 연구 현황 및 산업계에서의 요구 정도를 국가적 차원에서 조사하여 대학, 연구기관, 기업체 등에 대한 현황 파악과 윤활을 개선함으로써 절약할 수 있는 에너지 등에 관하여 보고서를 작성하였는데 윤활의 개선에 의한 경제적 효과로 당시의 연간 영국 국가 예산의 약 10%에 상당하는 5.15억 파운드의 절감이 가능하다는 결과가 있어 전세계를 놀라게 하였다. 이러한 경제적인 효과를 얻을 수 있는 내역을 열거하면 보수 유지, 부품 교환 및 파손에 의한 비용 절감, 수명 연장에 의한 투자비 절감, 마찰의 감소에 의한 에너지 절감, 가동률 및 효율향상에 의한 투자비 절감, 윤활제 비용의 절감 및 인건비 절감 등이다.

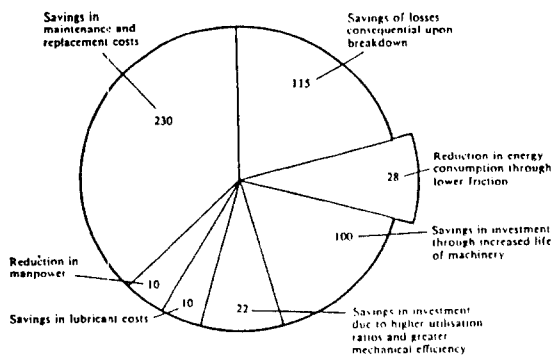


Fig 1. Energy savings through tribology (Jost report, unit=£ M, 1965 values)

그후 영국에서는 넓은 의미의 윤활을 하나의 전문적 학문 분야로서 조직적인 연구 및 교육 활동의 필요성을 촉진하기 위해 트라이볼로지라는 말을 사용하고, 이의 연구 및 교육의 확충을 획기적인 중요사업으로 추진하게 되었다. 그리고 구미, 일본 등에서도 트라이볼로지의 중요성을 인식하여 많은 연구 및 기술 개발이 수행되어 왔으며 그 결과 상당한 기술적, 경제적 효과를 얻게 되었다.

3. 트라이볼로지의 연구 과제

트라이볼로지의 연구분야는 익히 알고 있는 윤활, 마찰 및 마모를 포함하고 있으며, 이러한 연구대상의 요소들은 모든 기계장치에의 기본 핵심을 이루고 있다. 그리고 기계장치 이외의 전자장치 등과 같은 대부분의 기술적 장치도 트라이볼로지 측면의 요소들을 포함하고 있기 때문에 트라이볼로지는 현대 기계공업의 가장 중요한 기술의 하나로 연구되고 있다.

구미제국에서는 기계시스템의 연구 분야를 다음과 같이 크게 네가지로 분류하고 있다.

- Dynamic systems and control
- Design methodology and interactive graphic
- Machine dynamics
- Tribology

이 중 트라이볼로지의 연구 분야를 대상 기계 요소 부품 및 주재별로 정리하여 보면 Table 1과 같다. 여기에 제시된 바와같이 트라이볼로지는 대부분의 기계요소와 관련되어 있으며, 기계장치에서 불가피하게 수반되는 마찰, 마모 등의 제반 현상을 연구 주제로 다루고 있기 때문에 현장의 기술자들은 비록 그들이 느끼지 못할지라도 항상 트라이볼로지 문제를 접하고 있으며 이의 해결에 고심을 하고 있는 것이다.

Table1 AREAS OF TRIBOLOGY
(classified by ASME)

<input type="checkbox"/> Friction	<input type="checkbox"/> Bushings	<input type="checkbox"/> Seals
<input type="checkbox"/> Lubrication	<input type="checkbox"/> Splines	<input type="checkbox"/> Gears
<input type="checkbox"/> Wear	<input type="checkbox"/> Couplings	<input type="checkbox"/> Brakes
<input type="checkbox"/> Fretting	<input type="checkbox"/> Clutches	<input type="checkbox"/> Brushes
<input type="checkbox"/> Erosion	<input type="checkbox"/> Valves	<input type="checkbox"/> Tires
<input type="checkbox"/> Adhesion	<input type="checkbox"/> Fasteners	<input type="checkbox"/> Rings
<input type="checkbox"/> Filtration	<input type="checkbox"/> Tools	<input type="checkbox"/> Cams
<input type="checkbox"/> Metal Cutting	<input type="checkbox"/> Cables	<input type="checkbox"/> Dies
<input type="checkbox"/> Abrasion	<input type="checkbox"/> Rolling Bearings	<input type="checkbox"/> O-Rings
<input type="checkbox"/> Fatigue	<input type="checkbox"/> Engines	<input type="checkbox"/> Transmissions
<input type="checkbox"/> Materials	<input type="checkbox"/> Additives	<input type="checkbox"/> Inspection
<input type="checkbox"/> Lubricants	<input type="checkbox"/> Packings	<input type="checkbox"/> Failure Analysis
<input type="checkbox"/> Hydraulic Fluids	<input type="checkbox"/> Gaskets	<input type="checkbox"/> Diagnostics
<input type="checkbox"/> Wear Resistant Ctgs	<input type="checkbox"/> Surface Tempe- ratures	<input type="checkbox"/> Fluid Mechan- ics
<input type="checkbox"/> Hard Surfacing	<input type="checkbox"/> Lube Film Thick- ness	<input type="checkbox"/> EHD Lubrica- tion
<input type="checkbox"/> Solid Lubricants	<input type="checkbox"/> Load Capacity	<input type="checkbox"/> Traction
<input type="checkbox"/> Greases	<input type="checkbox"/> Life Prediction	<input type="checkbox"/> Oil Analysis

트라이볼로지의 또 하나의 중요한 분야는 condition monitoring 기술이다. 이것은 기계 및 장치류의 동작 기능을 계속적 또는 주기적으로 관찰하여 운전이나 작동에 결정적 영향을 미치는 파손을 미연에 예방조치 함으로써 생산량 손실을 줄이고, 보수유지비를 절감하며 장비의 가동률을 높이는 응용기술로 장치의 자동화, 무인화 추세와 더불어 급격한 발전을 이루고 있다.

트라이볼로지의 궁극적 목표는 모든 기계요소들의 마찰, 마모 및 윤활 측면의 연구를 통하여 요소의 효율을 향상시키고 이와 관련된 재료의 개발, 마모현상 규명 및 기계장치류의 파손을 방지하는 기술을 개발함으로써 기계장치류의 고품질화, 성력화 및 높은 신뢰성을 보증 하는데 있으며 순수한 공학적 측면만 아니라 경제적인 측면도 강력하게 고려되고 있는 것이 그 특징이라 할 수 있다.

1970년대의 오일파동은 에너지의 중요성을 절

실하게 인식하는 계기가 되었으며, 이의 일환으로 범 국가적인 트라이볼로지에 대한 연구계획이 수립되었다. Table 2는 1976년 미국에서 트라이볼로지의 연구 개발에 의한 에너지 절약 효과를 산출한 것이다. 이 결과를 보면 에너지의 절약이 약 210억 달러로 전체 에너지 소비량의 5.33%을 경감 시킬 수 있는 것으로 나타났으며, 연구투자 가치는 약 62 (benefit ratio)에 달하는 것으로 평가 되었다.

독일에서도 이와 유사한 조사 보고서를 정부 부처인 연구 기술성 (BMFT)에서 1976년 발표하였는데, Table 3에 나타나 있는 연구개발 수행으로 62.5억 마르크의 에너지 절감을 달성할 수 있다고 추정하였다.

4. 트라이볼로지 연구의 기본 방향

윤활, 마찰 및 마모는 트라이볼로지의 삼대 요소라 칭하여지고 있으며, 모든 트라이볼로지 문제의 근원으로 되어 있다. 마모는 물질 손실 및 표면 손상의 주요 원인이기 때문에 마모량의 감소는 곧 수명증대, 신뢰성 유지와 직결되며, 마찰은 에너지 소비의 대부분을 차지하고 있는 것으로 적절한 마찰조건의 개선으로 상당한 에너지를 절감할 수 있다. 그리고윤활은 마모와 마찰을 제어하는 중요한 역할을 한다.

윤 활 (Lubrication)

윤활의 목적은 상대운동을 하는 물체를 전단력이 적은 윤활막에 의하여 분리시킴으로써 표면의 손상을 방지하는 것이다. 윤활막 두께와 표면의 조도에 따라 윤활영역은 Fig. 2와 같이 구분되고 있으며 독특한 윤활특성을 나타나게 된다.

(1) 유체윤활 (Hydrodynamic lubrication)

유체윤활은 윤활막의 두께가 두 표면의 조도

Table2 Overview of U.S. R&D plan(1976)

R&D PROGRAM AREA • Technology	Type of Energy Used	Potential Energy Savings		Estimated R&D Cost Millions of 1980 Dollars	Benefit Ratio *
		%U.S. Consumption	Billions of 1980 Dollars Per Year		
Road Transportation • Adiabatic diesel • Transmissions • Piston rings • Lubricants	Oil	2.20	8.88	16.12	55
Power Generation • Bearings • Seals • Materials and wear	All types	0.23	0.93	3.15	30
Turbomachinery • Bearings • Seals • Materials and wear	All types	1.10	4.44	7.80	57
Industrial Machinery and Processes • Materials and wear • Metal processing • Lubricants	All types	1.80	7.20	7.65	93
*Benefit ratio = $\frac{\text{Savings}}{10 \times \text{R\&D cost}}$	Total	5.33	21.45	34.72	62

보다 상당히 큰 상태이며, 상대운동을 하는 두 표면은 연속적인 윤활막에 의하여 효과적으로 분리된다.

윤활특성 및 거동은 윤활유의 점도-압력, 점도-온도, 점도-전단율의 윤활제의 유동특성에 영향을 받게 되며, 마찰특성은 윤활유의 전단력에 의하여 결정된다.

유체윤활기구는 selfacting 베어링, squeeze film 베어링 및 외부가압식 베어링 등의 경우에서 볼 수 있다.

(2) 탄성유체윤활 (Elastohydrodynamic lubrication)

탄성유체윤활은 접촉하중에 의한 표면의 변형을 고려한 윤활현상으로 1960년 중반 이후 많은 연구와 실험이 진행되어 왔다. 탄성유체윤활로 취급되고 있는 기계요소들은 rolling element 베어링, 기어, 캠 등을 들 수 있다.

EHL에 영향을 미치는 인자들은 작용하중, 물체의 탄성특성, 운동속도와 윤활제의 특성 및 접촉하는 형태 등이며, 기어의 스크오링 강도 설계, 베어링의 설계 등에 직접적으로 응용되고 있다.

(3) 혼합윤활 (Mixed lubrication or partial EHL)

Table3 Recommended Co-operative R&D Projects by BMFT(1976)

Group	Sub-groub	Estimated R&D cost In ooos, DM(1975)
Dry friction	Friction of solids	10,210
	Abrasive wear	16,350
Fluid friction	Hydrodynamics	4,893
	Elastohydro dynamics	3,769
Boundary friction		2,120
Measuring and testing		12,673
Materials and lubricants	Materials	12,061
	Lubricants	2,453
Manufacturing processes		12,850
Tribologically correct design		5,844
Maintenance		4,800
Total		88,023
Energy savings		6,250,000

이 윤활 영역에서는 윤활막이 부분적으로 파괴되어 asperity끼리의 접촉이 일어나게 된다. 즉, 하중의 일부는 윤활막에서 담당하고 일부는 asperity의 접촉면에서 담당하게 된다. 혼합윤활 조건하에서는 화학적, 기계적, 열적 요인들의 상호작용 정도에 의하여 복잡한 현상의 마모가 발생하게 된다.

(4)계면윤활(Boundary lubrication)

윤전조건 등이 극심하게 변하거나 표면이 매우 조악한 경우에는 계면윤활 상태에 이르게 되어 asperity 접촉이 증가하게 되며 윤활막 두께는 감소되어 몇개의 sub-monolayer 층을 이룬다.

이 상태아래에서 윤활제의 특성은 그리 중요한 영향을 미치지 않고 접촉면의 물리적 화학적 상호작용이 시스템의 마찰 및 마모현상을 지배

하게 된다.

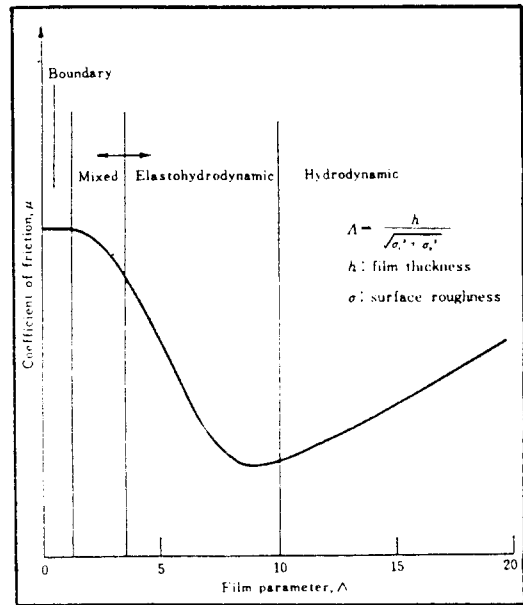


Fig 2. Modified lubrication regimes.

마 모(Wear)

마모는 표면의 상대운동 결과로 미세한 입자들이 접촉면에서 이탈되는 현상으로 정의되며, 모든 기계장치에서 불가피하게 발생하는 현상이다.

마모의 원인으로는 adhesion(고착), corrosion(부식), cutting, deformation, fatigue, fracture 및 화학적 상호작용 등이 알려져 있다. 그러나 대부분의 경우 마모는 한가지 원인에 의해서 발생하는 것이 아니라 여러가지 원인이 복합적으로 작용하여 나타나게 된다.

마모의 종류 및 발생기구를 간단하게 살펴보면 다음과 같다.

• Adhesive wear

asperity(표면의 미세돌기) cold-welding에 의하여 상대운동을 하는 접촉면에서 표면입자가 다

른 표면으로 응착하는 현상이며, 기계장치에서 가장 빈번하게 발생되고 방지가 어렵다.

- Abrasive wear

경도가 큰 입자나 경화된 asperity와의 접촉에서 발생하는 마모로 스크링이라 불리우는 표면의 긁힘 및 홈자국이 나타난다. 부품의 경도 조절 및 윤활유 여과를 통하여 방지할 수 있다.

- Fatigue wear

기어나 베어링 등에서 주로 발생되며, 반복하중에 의하여 입자가 표면에서 이탈하게 된다. 재료의 선택 및 최대응력을 줄이는 설계가 필요하다.

- Corrosion wear

주위의 환경조건 하에서 화학적 작용에 의하여 발생하는 현상이며, 매우 종류가 다양하고 발생원인이 복잡하다. 실제로 제일 빈도가 많은 양상은 대기중 습기 침식에 의한 것이다.

- Delamination wear

미끄럼 운동을 하는 두면에서 동적하중에 의한 응력으로 sub-surface에서의 크랙 발생 및 기구확산으로 판(laminar, plate)형상의 마모입자 생성.

- Thermally-activated wear

접촉표면에서 발생하는 마찰열이 sub-surface에 축적되며, sub-surface에 존재하는 Voids 및 cracks에 윤활제가 침투하여 thermal decomposition을 일으켜 막대한 에너지가 발생되며, 이 결과 금속의 조직상의 변화와 열응력에 의한 마모가 생성된다. scuffing 또는 fracture type의 가혹한 마모의 주된 원인이다.

마찰(Friction)

마찰이란 상대운동을 하는 두면에서 운동에

저항하는 현상을 말하며 모든 기계 및 장치류에서 가장 중요한 문제점 중의 하나로 취급되고 있다.

시스템의 에너지 손실의 대부분은 마찰에 기인되어 있기 때문에 설계의 개선, 최적합한 소재의 사용 및 윤활방법 등의 마찰손실을 줄이기 위한 기술은 현대의 가장 중요한 기술 중의 하나로 다루어지고 있다. 그러나 볼트, 스크류, 웨스너 등의 기계요소 및 산업용의 브레이크 등은 반대로 큰 마찰력을 요구하고 있으며, 자동차의 브레이크라던가 소성가공의 압연작업 등에서는 조건에 알맞는 적당한 마찰의 범위를 필요로 하고 있다.

마찰에 관한 최근의 기본적인 연구방향은 다음과 같다.

- 미끄럼 표면사이에서의 실제 접촉현상 연구
- 접촉면의 금속적, 기계적 변화
- 새로운 소재 및 coating기술 개발

시스템 해석방법 (System approach)

기계 및 장치들은 여러종류의 tribo-element의 복합체로 구성이 되어 있기 때문에 시스템의 특성을 파악하기 위해서는 일반적으로 Fig.3과 같은 단계를 거쳐야 한다. 각 단계에서 측정 분석된 자료들을 데이터 뱅크화하여 이를 종합함으로써 트리보 요소들의 유기적 운동 관계, 시스템의 성능 등을 파악할 수 있고 필요에 따라 효과적으로 시스템의 모니터링 수행, 성능향상 등의 트라블로지 기술들을 적용할 수 있다.

트리보 시스템의 해석에 있어서는 우선 구성 요소들의 역할과 기능을 파악하여야 한다. 즉, 어떤 요소로 구성되어 있으며, 주어진 입력에 따른 유기적인 운동과계들을 검토하므로써 이들

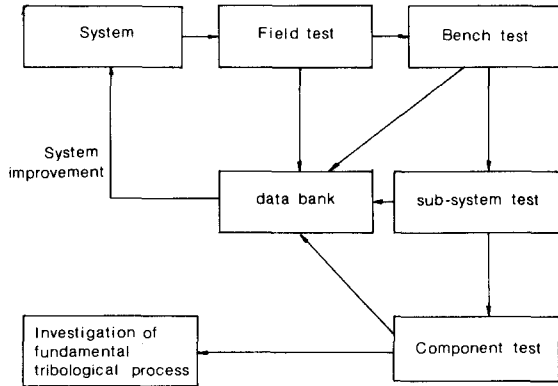


Fig. 3 System approach to tribology

의 성능을 지배하는 주요 인자를 추출할 수 있고 이것을 바탕으로 시스템의 해석에 착수하게 된다. 트리보시스템의 기능적 분류방법은 Table 4에 제시되어 있다. 여기서 운동은 일, 물질, 또는 정보등의 전달을 말하며 입력과 출력과의 관계는 기계 및 장치류의 용도로부터 결정된다.

TABLE 4. CLASSIFICATION OF TECHNICAL FUNCTIONS OF TRIBO-MECHANICAL SYSTEMS

Inputs and outputs needed for technical function		Primary technical function of the system	Examples
Main inputs {X}	Main outputs {Y}		
Motion +	Motion	Guidance of motion Coupling of motion Annihilation of motion	Bearings Clutches Brakes
	Work	Power transmission (mech., hydr., pneum.)	Gears
	Information	Generation of information	Clocks, Cams and followers
Reproduction of information		Data transducer (audio, video; tape or record)	
Motion + Materials	Materials	Transportation	Wheel/rail Pipeline
		Forming of materials	Wiredrawing

트리보, 시스템의 해석은 Fig 4에 도시되어 있는 바와 같이 입력된 동적특성이 시스템을 통하여 어떻게 바뀌는가를 해석하는 것이다. 이를 수행하기 위해서는 전술한 바와 같이 시스템의 구성요소를 파악하여야 하고, 요소의 특성 및 주위

조건을 검토하여야 하며, 요소간의 상관관계를 분석하여야 한다. 다음 단계의 작업은 측정 및 분석과 이론적 해석방법을 동원하여 시스템의 특성을 규명하는 것으로 해석목적에 따라 유효 상태 연구, 마모입자 분석, 사용소재의 분석등이 수행되며, 필요에 따라서는 시뮬레이션에 의한 실험실적 연구도 수행하게 된다.

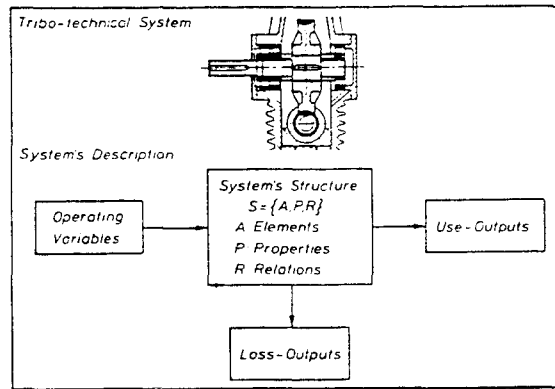


Fig. 4 Analysis and description of a tribo-technical system.

5. 결 론

본 소고를 통하여 외국의 트라이볼로지 기술에 대한 연구투자와 이의 중요성 및 기본 개념을 살펴보았다. 국내 공업이 경제개발 계획과 발맞추어 급진적인 성장을 달성한 이면에는 투자결과가 두드러지게 나타나지 않는 기본 기술에 대한 연구 및 개발이 소외시 되어왔다.

국내 기계공업이 결보기에는 어느정도 국제수준에 도달한 것처럼 보이나 기계의 성능이나 운전의 신뢰성에 있어서 국제수준보다 낮으며, 효율이나 수명이 뒤떨어지고, 잦은 고장으로 막대한 보수유지비가 소요되며, 이로 인하여 생산성이 불량하고 에너지 손실이 많은 점들은 현재

국내 대부분의 기업체가 안고 있는 공통적인 애로사항으로 지적된다. 이러한 문제점들은 직접 간접으로 트라이볼로지 기술에 관련된 것들이며 트라이볼로지의 연구 및 기술개발을 통해서만 극복할 수 있다.

국내의 트라이볼로지 기술은 도입단계에 있으며 아직도 그 중요성이 충분한 인식을 받지 못하고 있다. 트라이볼로지 기술은 단순한 기술 도입만으로는 결코 습득할 수 없으며 공업의 선

진화를 목표로 하는 한 반드시 자력으로 극복해야 하는 장벽이다. 또한 트라이볼로지는 그 대상이 매우 광범위 하며, 기계, 금속, 화학 및 물리 등의 중간영역으로 구성되어 있기 때문에 범국가적인 차원에서 종합적인 연구가 필요하며, 산업체에서도 트라이볼로지에 대한 올바른 인식 및 능동적인 연구개발 의욕을 가지고 참여해야 할 것이다.

