

전동트라이볼리지 설계에 관한 연구

韋雲隆[†] · 류성기* · 盧龍[‡] · 정광조 · 임주석** · 曹興進***

중국 중경공학원, *경상대학교 기계항공공학부 항공기부품연구소, **경상대학교 대학원 기계설계학과
***중국 중경대학교 기계전동국기중점실험실

Research into Transmission-Tribology Design

Yun-long Wei[†], Sung-ki Lyu*, Long-Lu[‡], Kwang-jo Jung, Ju-suck Lim** and Xing-jin Cao***

Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400-050, China

*School of Mechanical & Aerospace Eng., ReCAPT, Gyeongsang Nati. Univ., Jinju 660-701, Korea

**Graduate School, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

***Chongqing University, Chongqing 400-044, China

Abstract – We propose a new concept of transmission-tribology design based on the investigation of development and existing problem of the gear drive and tribology. The content of transmission-tribology and transmission-tribology design is probed. Some effective methods of transmission-tribology design is probed. Some effective methods of transmission-tribology design are put forward. Partial achievements in this research are introduced tersely.

Keywords – tribology, lubrication design, transmission-tribology design.

1. 연구배경

동력전달장치의 핵심요소기술인 기어에 관한 기계전동학과 기계트라이볼리지는 기계공학의 중요한 분야이다. 이 두 분야의 연구 범위와 영역은 매우 명확해서 근래 우리는 기계전동학과 기계트라이볼리지를 유기적으로 결합시킬 것을 주장하면서 이 두 분야의 교차영역인 기계전동 트라이볼리지의 연구를 수행하여 기계전동 트라이볼리지를 전개하는데 어느 정도 성과를 거두었다[1-14, 18-22].

기계전동 트라이볼리지를 진행하게 된 주요한 이유는 기계전동설계의 발전이 트라이볼리지의 발전과 각별한 관계가 있기 때문이다. 근래 기계장비의 대형화 발전과 함께 기계장비의 주요 기계요소의 안전성과 신뢰성에 대한 요구가 날로 높아지고 있다. 정확한 설계와 고풍력전동장치의 우수한 윤활 및 내마모 등의 문제를 해결하는 것은 에너지를 절약하고 신뢰성을 높이며 수명을 향상시키므로 매우 중요하다.

현재 트라이볼리지의 관점에서 볼 때 트라이볼리지 설계에서 운동접촉면의 최적화설계는 매우 중요하다. 널리 알려진 바와같이 기계전동(특히 기어전동)의 접촉면은 베어링 혹은 실린더처럼 단순한 곡면이 아니라 접촉면이 탄성변형의 3D 공간의 복잡한 맞물림 곡면이므로 기어의 치면 최적화설계는 매우 어려운 분야이다. 그리고 기어(특히 워머)치면 사이의 윤활상태는 윤활이론에서 제일 복잡하고 어려운 3D 공간 변곡률 접촉과 불안정한 열역학과 유체역학의 문제로서 고전 윤활이론은 잘 적용되지 않으므로 운동접촉면의 윤활성능 해석 및 윤활성능의 최적화설계는 극히 어렵고 복잡하며 중요한 부분이다. 그 복잡성과 중요성 정도는 반드시 기계전동학과 기계 트라이볼리지가 유기적으로 결합되어야만 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서 기계 전동 트라이볼리지를 연구하게 된 또 다른 동기중 하나이다. 기계전동 트라이볼리지는 전동기계(특히 대형기계장비의 전동기계요소)를 대상으로 하고 기어가 최적상태에서 작동하도록 하는데 목적을 두고 있다. 그리고 전동기구의 설계과정에서 기계트라이볼리지와 관련되는 각종 문제들을 강조하였다. 70년대 Sakai와 Zhang 등이 세계에서 처음으로 우수

[†]주저자 : ylwei@cqit.com.cn

[‡]책임저자 : lulong1122@hanmail.net

한 윤활성능을 갖고 있는 워기어(double enveloping hourglass worm gear)전동을 제안한 후 세계 각국에서 각종 워기어전동에 대하여 깊은 연구를 하기 시작하였다[15,17]. 워기어전동의 출현은 기계전동 트라이볼러지의 발전을 촉진시켰으며, 우수한 윤활 성능을 갖고 있는 동력전달장치의 개발과 그에 대한 많은 연구는 기계전동 트라이볼러지의 설계를 가능하도록 하였다.

2. 기어의 맞물림이론과 윤활이론의 결합

이전에는 기어 전동성능을 연구할 때 맞물림 성질과 윤활성질을 기계전동학자와 트라이볼러지학자가 각각 따로 연구하였다. 윤활을 분석할 때 트라이볼러지학자는 보통 치면의 접촉상황을 윤활이론으로 분석 할 수 있는 간단한 모델을 만들어 연구하였기 때문에 완전히 기어의 전동 맞물림 특성과 다를 뿐만 아니라 정확한 결과를 얻을 수가 없었다. 맞물림 이론과 윤활이론의 결합된 연구는 기어 맞물림이론과 윤활이론의 유기적인 융합을 연구하는 동시에 두 이론이 결합되어 발생되는 새로운 문제와 새로운 방법을 연구하게 되었다. 기어전동에 대하여 윤활원리를 해석할 때 윤활성질에 영향을 주는 맞물림과 접촉특성의 연구를 근거로 기어의 윤활특성에 따른 윤활해석의 이론과 방법을 확립하였다.

워기어의 맞물림이론과 윤활이론의 결합연구를 통하여 다음과 같은 기초적인 성과를 얻었다[13,14].

2-1. 이동좌표시스템이론을 이용한 치면간의 간격 계산법

윤활이론에 따르면 상대운동을 하는 법선평면에서 거의 선접촉을 하는 접촉 치면간의 간격형상이 윤활유막을 형성하는데 많은 영향을 미치므로 윤활해석을 위하여 정확한 치면간의 간격을 구하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 이동좌표시스템을 기초로 치면간의 간격을 계산하고자 한다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 곡선 Σ_1 과 Σ_2 의 접촉선이라 할 때 주어진 접점 P 를 지나는 단위 벡터 \vec{e}_1 과 \vec{e}_3 는 각각 접촉선 C 의 접선방향과 치면의 법선방향을 가리키며, 단위 벡터 $\vec{e}_2 = \vec{e}_3 \times \vec{e}_1$ 는 접촉선 C 가 치면 Σ 접평면의 법선방향을 가리킨다. 따라서 점 P 에 대한 이동좌표 시스템 $\sigma(\vec{r}(t), \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ 를 작성할 수 있다.

P 점의 이동좌표시스템은 치면 Σ 및 접촉선 C 와 밀

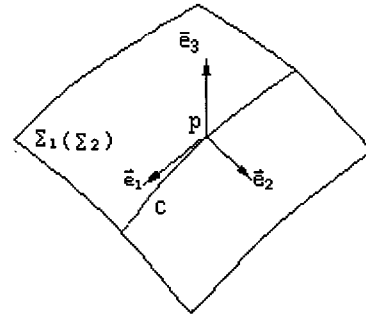


Fig. 1. Moving coordinate system.

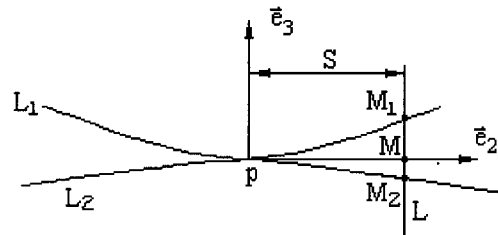


Fig. 2. Curves of conjugating tooth surfaces in normal plane.

접한 관계를 가지고 있다. 이동좌표시스템에서 이동좌표 벡터 \vec{e}_1 과 \vec{e}_3 가 구성하고 있는 평면은 접촉선의 법평면이다. 이 법평면과 두 치면 및의 교차선은 각각 L_1 과 L_2 이다(Fig. 2). 접촉 P 점의 법선방향을 따라 P 점과 거리 S 만큼 떨어진 위치에서 좌표축 \vec{e}_2 와 수직되는 직선 L 을 긋고 직선 L 과 곡선 L_1, L_2 와의 교점을 M_1, M_2 라면 점 M 위치에서의 치면간격은 다음 식과 같다.

$$h = M_1M_2 = MM_1 + MM_2 \tag{1}$$

이동좌표시스템에서 M_1 과 M_2 의 좌표를 각각 $(X_{M_1}^\sigma(u, v), Y_{M_1}^\sigma(u, v), Z_{M_1}^\sigma(u, v))$ 과 $(X_{M_2}^\sigma(u, \varphi), Y_{M_2}^\sigma(u, \varphi), Z_{M_2}^\sigma(u, \varphi))$ 라하고, u, v, φ 를 각각 치면의 변수라면 아래 식과 같다.

$$h = |Z_{M_1}^\sigma(u, v) - Z_{M_2}^\sigma(u, \varphi)| \tag{2}$$

$$\text{여기서 } \begin{cases} X_{M_1}^\sigma(u, v) = X_{M_2}^\sigma(u, \varphi) = 0 \\ Y_{M_1}^\sigma(u, v) = Y_{M_2}^\sigma(u, \varphi) = S \end{cases} \text{ 이다.}$$

2-2. 워기어전동의 유입효과와 스퀴징효과와 윤활메카니즘

워기어전동에서 치면이 맞물리면서 치면 사이에 상대미끄럼운동이 발생하는데 이 상대운동은 윤활유의 유입효과를 발생시킨다. 그리고 동일한 치면에 있는 두 개의 접촉선은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 접촉상태

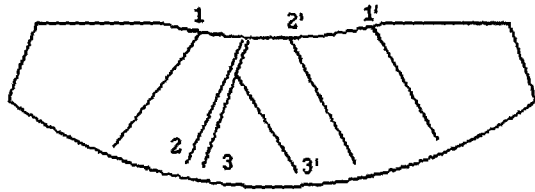


Fig. 3. Contact lines distribution on worm tooth.

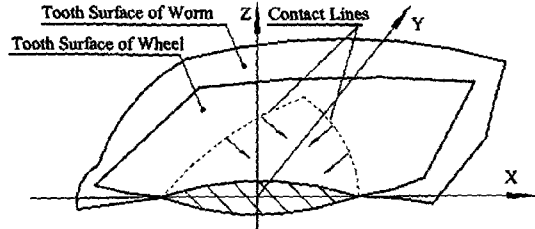


Fig. 4. Oil pocket between conjugating tooth.

초기에 2개의 접촉선은 서로 분리된다. 맞물림이 일정한 속도로 진행될 때 두 접촉선은 기어의 치면에서 서로 교차하고, 치면 사이의 반밀폐된 오일 포켓을 형성한다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 맞물림이 계속 진행됨에 따라 오일 포켓은 축소되고, 오일포켓 내에서는 스퀴징효과가 일어난다. 따라서 맞물림 상태에서 치면간의 윤활유막은 유입효과와 스퀴징효과로부터 형성된다.

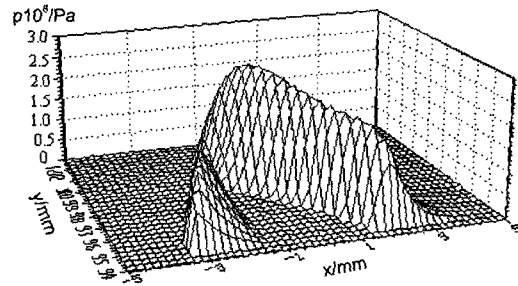
Fig. 5는 유입효과와 스퀴징효과가 단독으로 작용할 때와 함께 작용할 때 치면간의 오일 포켓내의 압력분포도이다. 오일 포켓내의 유입효과와 스퀴징효과와의 작용은 두 접촉선으로 에워싸인 오일 포켓내에서 일정한 하중을 받게 하는 동시에 일차 접촉선 부근의 부하능력을 제고시키고, 압력분포를 균일하게 하여 치면의 부하능력을 제고하는데 유리하다.

Fig. 6은 유입효과와 스퀴징효과가 각각 작용할 때와 동시에 함께 작용 할 때의 하중곡선이다. 스퀴징효과만 작용 할 때 치면의 부하능력은 아주 작다. 유입효과와 스퀴징효과가 동시에 작용 할 때의 부하능력은 약간 크게 변하며, 각각 단독으로 작용할 때 부하능력의 합보다 크다.

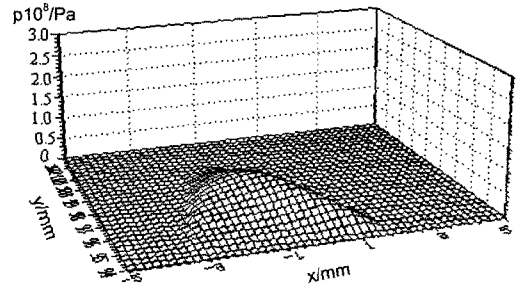
맞물림 후기 치면에 오일 포켓 면적이 축소되므로 양자의 공동작용에 따라 작아진다. 오일 포켓내에 있는 스퀴징효과가 존재하고 특별히 유입효과와 스퀴징효과와의 공동작용은 치면의 부하능력을 크게 증가시킨다.

3. 전동 트라이볼리지 설계의 내용과 방법

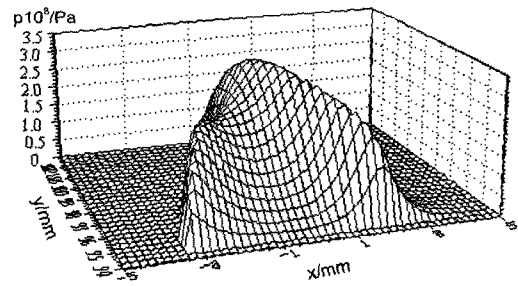
전동 트라이볼리지설계는 기계전동의 구성요소를 대



(a) Entraining effect



(b) Squeezing effect



(c) Coupled effect of them

Fig. 5. The pressure distribution in oil film when rotating angle of worm is when.

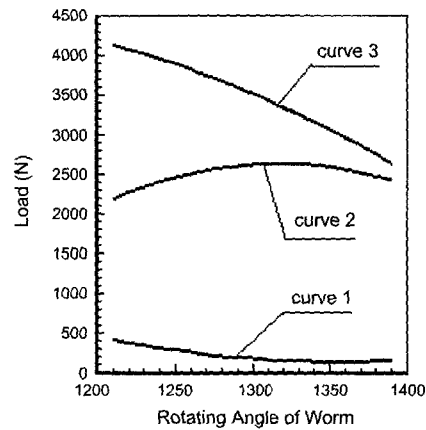
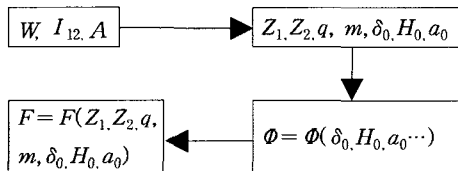


Fig. 6. Curves of load capacity.

상으로 하고 그 대상에 특정된 전동 트라이볼리지설계를 진행하여 제일 좋은 전동효과와 트라이볼리지 효과를 얻기 위한 설계이다. 트라이볼리지는 기계전동학과 기계트라이볼리지의 유기적인 결합 및 기어 맞물림이론과 트라이볼리지 윤활이론의 결합연구의 필연적 생성물이다.

3-1. 트라이볼리지 이론을 기초로한 기계전동 치면의 기하학적 설계

예전부터 기계전동 요소인 치면을 설계할 때 마찰, 마모, 윤활 등의 성질을 고려하지 않고, 치형을 설계할 때 거의 트라이볼리지 성과를 응용하지 않았다. 다시 말하면 치형설계의 근거와 규정은 보통 동력전달 출력, 강성, 강도의 요구를 기초로 제정되었다. 워기어 전동설계를 예로 들어보면, 워기어의 기하학적 설계는 요구되는 전달동력 W , 속도비 I_{12} , 중심거리 A 에 근거하여 워의 줄수 Z_1 , 워기어 특성계수 q , 워기어의 잇수 Z_2 , 모듈 m 을 결정하였다. 설계과정에서 트라이볼리지 관련 조건을 설계의 요소로 고려하지 않았다. 즉, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

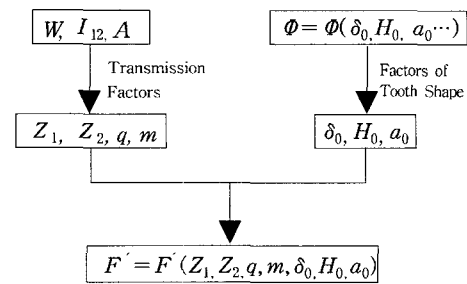


Φ 를 윤활상태를 나타내는 함수라고 하면, 치면의 분리 그리고 분리정도를 나타내는 압력함수 또는 윤활유막 두께함수가 된다. 함수 F 는 치형의 기하 특성을 나타내는 치면 특성 함수이다.

지금까지 윤활조건하에서 운동과 동력을 전달하기 위하여 양호한 윤활상태를 목적함수 Φ 로 나타내고, 이 함수를 만족시키는 기하학적 설계 변수의 해를 구한다. Φ 는 목적함수로서 치면의 분리에 소요되는 동력함수 또는 유막 두께함수로 표현할 수 있다. 목적함수에서 얻은 해와 치형요소 δ_0, H_0, a_0 와 전동요소 Z_1, Z_2, q, m 을 근거로 치형 특성함수 $F=F(Z_1, Z_2, q, m, \delta_0, H_0, a_0)$ 를 구할 수 있다.

3-2. 윤활 제어 설계방법

지금까지 기어전동장치의 윤활유시스템에서는 치면 사이의 윤활상태 제어설계를 하지 않았다. 윤활효과는 윤활유성능, 윤활유공급방식, 공급량 등에 관련되지만



더 중요한 것은 치면의 실제 윤활상태와 관련된다는 것이다. 그러므로, 치면 사이의 윤활상태의 제어방법은 매우 중요하다.

전동 트라이볼리지는 방법은 기어 맞물림원리와 치형설계에 익숙하다는 전제하에서 윤활이론에 근거하여 기어에 대하여 치형의 새로운 설계, 치형의 수정, 치면의 접촉상태를 변화시켜 윤활효과를 제어하는 것이 목적이다.

워기어전동은 널리 알려진 아키테터 원통 워기어전동을 대체하였다. 워기어의 치면 접촉과 치면 상대운동 방향사이의 각이 90°에 접근하고 또 접촉선이 포물선형으로 되어서 맞물림 과정에 반 밀봉 오일 포켓을 형성하기 때문에 일반 원통 워기어의 접촉선과 상대운동 방향이 일치하여 윤활유막을 형성하기 어려운 상황을 크게 개선하였다. 이는 치면접촉선의 분포, 방향 및 길이를 변화시켜 치면 윤활성능을 향상시키는 방법이다.

위에서 언급한 반밀봉 오일 포켓은 기어 맞물림 과정에서 점점 작아지며, 오일 포켓 내의 압력은 증가한다. 그리고 이 효과는 마치 치면 사이에 소형의 “오일 펌프”를 가한 것과 같다. 이 “오일펌프”의 유량과 유압을 제어하는 방법이 윤활제어설계이다. 치면사이에 “펌프효과”를 발생시켜 치면사이의 접촉선의 형태, 분포, 길이 등과 같은 요소를 변화시킴으로써 “펌프효과”를 제어한다. 치면의 윤활제어는 바로 이렇게 실현된다. 즉, 윤활효과의 제어는 치형설계로부터 실현된다고 할 수 있다. 이 방법이 바로 우리가 말하는 윤활상태 제어설계법인데 윤활상태의 제어문제는 실질적으로 접촉선 또는 접촉점을 제어하는 문제이다.

저자는 새로운 형상의 워기어를 개발하였고 자체 제작한 신행 워기어 전동의 감속기에 대하여 실제 실험을 통하여 뛰어난 실용효과를 얻었다[17]. 이 전동의 주요특징은 워기어전동에 대하여 복합치면법을 채용하였는데, 포물선형태인 반밀봉 오일 포켓의 입구가 복합치면의 두 번째 치형 접촉선에 의하여 부분적으로

막히게 된다. 따라서 반밀봉 오일 포켓의 입구 크기가 유효하게 제어되어 압력을 증가시킨다. 이렇게 치형 설계를 통하여 의식적으로 윤활상태를 제어하는 방법이 바로 저자가 말하는 윤활 제어 설계법이다.

$$\Phi_{\text{optimized pressure}} = \Phi_1(\delta_0 H_0 a_0 \dots) + \Phi_2(\alpha, \beta, \zeta) \quad (3)$$

여기에서 복합치형법을 채용하였기 때문에 워기어 치면이 형성한 반 밀봉 오일 포켓은 부분봉합의 형식을 실행하게 되며 반 밀봉 오일 포켓의 입구는 막혀서 오일 포켓내의 윤활유 유동이 억제되어 결국에는 오일 포켓내의 압력이 증가 된 것이다. 증가한 부분압력은 $\Phi_2(\alpha, \beta, \zeta)$ 로 나타났다. 이렇게 복합치형의 방법을 통하여 트라이볼리지의 가장 좋은 효과에 도달하는 것도 트라이볼리지를 응용한 기계전동치면의 기하학적 설계의 전형적인 사례이다.

3-3. 내마모를 위한 재료성분 설계

3-3-1. 기어의 표면처리 및 존재하는 문제점

기계요소(예: 기어)는 표면 열처리를 통하여 기계요소 표면경도와 강도를 높여 각종 요구성능을 만족시킬 수 있다. 화학 열처리는 화학방법을 통하여 기계요소의 표면을 표면경화처리하는 방법이다. 이런 방법은 기계요소를 일정한 화학물질에 넣어 일정한 온도까지 가열하여 화학물질의 성분이 기계요소의 표면에 침투되게 함으로써 표면층의 화학성분을 변화시켜 기계요소 표면층의 조직구조와 재료성능을 변화시켜 기계요소의 표면을 표면경화처리하는 것이다.

그러나, 전달동력과 운동과정에서 새로 조립한 기어의 원래 치형은 동력과 운동을 부드럽게 전달하는 최적 치형이라고 보증할 수 없고, 기계장치에서 기어는 시험가동과정을 거쳐야만 정상적으로 사용할 수 있다. 그런데, 기어표면은 열처리 또는 화학열처리를 하였기 때문에 시험 가동하는데 소요되는 시간이 비교적 길다. 이 밖에 치면이 일단 시험가동과정을 거치면 열처리와 화학열처리를 통하여 형성된 표면층은 마모되어 버린다. 이때 치면은 비록 평온하게 동력과 운동을 전달하는 최적 치형으로는 보증되었지만 실제로 필요한 경도와 내마모성을 갖고 있지 않다.

기어의 사용현장에서 이런 현상이 매우 많은데 이는 귀중한 재료와 에너지를 많이 낭비하게 된다. 이상의 문제점을 해결하기 위하여 저자는 Dong 등의 이론[9]과 연구성과를 바탕으로 하여 온라인 기어마찰화학처리의 재료성분 설계법을 제시하여 기어표면 온라인처

리의 연구를 전개하였다.

3-3-2. 온라인 기어마찰화학처리에 의한 재료성분의 설계법

Dong은 재료의 내마모성을 향상시키기 위하여 하나의 원소 또는 여러 원소를 침투시키는 원리와 무기봉 산업이 마찰과정에서 붕소(Boron)가 침투되어 기계요소의 내마모성이 향상된다는 실험을 근거로 “마찰화학처리”이라는 새로운 개념을 제안하였다.

“마찰화학처리”는 윤활유의 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 접촉조건에 따라 윤활제가 분해시킨 원소가 침투되어 기계요소의 표면을 경화시킬 수 있다.

마찰접촉표면에 탄소를 침투시키면 트라이볼리지 성능이 현저히 향상된다. Dong 등이 처음으로 발표한 마찰화학처리에 의한 붕소침투, 금속원소와 비금속원소 침투처리방법은 특수 기계요소표면방법으로써 기어의 온라인 마찰화학처리를 통하여 치면 성분의 설계를 완성하였다[9].

이 방법은 기어를 동력전달장치에 조립하기 전에 치면에 대하여 엄격한 경화 열처리를 할 필요가 없고, 사용초기에 비교적 좋은 시험가동 특성을 갖게 되고 또 실제 수요에 따라 윤활유속에 시험가동 특성을 향상시키는 원소를 넣을 수도 있다. 시험가동과정이 끝난 후 윤활유에 적합한 원소를 첨가하는 것은 바로 “마찰화학처리” 방법을 채용하는 것으로서 윤활유 속의 어떤 성분이 치면 접촉면에서 마찰열효과와 화학효과가 일어날 때 기계요소 표면 층에 침투되어 화학열처리가 기계요소표면에 대하여 경화처리되는 효과에 도달한다.

이렇게 윤활유에 적합한 원소를 첨가하여 이미 시험가동된 기어 접촉면에 대하여 온라인경화화학처리 방법으로서 유효한 재질표면의 성분을 개선할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 아래와 같이 전동트라이볼리지설계 이론과 설계방법을 검토하였다.

(1) 기계전동학의 맞물림 이론과 트라이볼리지의 윤활이론은 전동트라이볼리지설계의 이론기초이며, 맞물림 이론과 윤활이론의 유기적 결합은 전동트라이볼리지의 특징이다.

(2) 마찰학을 응용하여 치형을 설계하고 전동트라이볼리지의 관점에서 기계전동치면의 워기어설계법을 제안하였다.

(3) 기어의 맞물림 원리와 윤활이론에 익숙하다는 전

제하에 치면 접촉상태를 변화시켜 윤활효과를 제어하는 목적에 도달하고, 치면 간의 윤활을 제어하는 설계 방법을 제안하였다.

(4) 기어 열처리에 존재하고 있는 문제에 대하여 실제 수요에 맞는 기어 표면경화처리법 즉, 온라인 기어 내마모 성분 설계를 제안하였다.

후 기

본 연구는 중국 국가자연과학기금과 한국 경상대학교 BK 21 지역대학육성사업단과 경상대학교 항공기부품기술연구센터의 연구비지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Wei Yunlong and He Huinong, "The content and methods of Transmission-Tribology design," *Progress in Natural Science*, Vol. 7 No. 5, pp. 513-519, 1997.
2. Wei Yunlong, Kato M. and Takatsu N., "The Idea of Transmission-Tribology and Its Development," *Proceeding of the 68th National Conference of the Japan Science of Mechanical engineers (in Japanese)*, 990(59), Sendai, pp. 75-77, 1990.
3. Wei Yunlong, Kato M. and Cao Xinjing, "The Study on Lubrication Design of Hourglass Worm Gearing," *Proceeding of the 68th National Conference of the Japan Science of Mechanical engineers (in Japanese)*, 990(59), Sendai, pp. 78-81, 1990.
4. Wei Yunlong, Kato M. and Cao Xinjing, *et al.*, "The Theoretical and Experimental Study on Hourglass Worm Gearing," *Proceeding of the 68th General Conference of the Japan Society of Mechanical engineers (in Japanese)*, C, Tokyo, pp. 140-142, 1990.
5. Wei Yunlong, M. Kato and Wen Shizhu, *et al.*, "Design of hourglass Worm gearing on the Stand Point of Improving Lubrication Ability," *MPT'91*, Hirashima, pp.1118-1122, 1991.
6. Wei Yun Long, Kato M. and Wen ShiZhu, *et al.*, "A Study of Pin-Wheel Globlidal Worm Gearing," *JSME International Journal Series III*, 31(2), 1988.
7. Wei Yunlong and Kato M., "Development of Pin-Wheel Globlidal Worm Gearing. International Conference on Gearing," Vol.1, ZhengZhou, 1988.
8. Young-Hun Chae and Seock-Sam Kim, "Tribological Performance of Al₂O₃/NiCr Coating", *KSME Int. Journal*, Vol. 16, No. 7, pp. 911-918, 2002.
9. Dong Junxiu, Chen Guoxu and Luo Xinmin, *et al.*, "A New Concept-Formation of Permeating Layers from Nonnative Antiwar Additives," *STLE Lubrication Eng.*, 50(1), pp. 17-22, 1994.
10. Wu Anping, Wei Yunlong and Huang Sgaglian. "Analysis of Contact Property of Double Enveloping Tooth Profile and Squeeze Characteristics Between Tooth Surfaces," *CJME*, 6(3), pp. 210-214, 1993.
11. Cao Xinjing, Wei Yunlong and Wang Jian, *et al.*, "The Experimental Study of Lubrication Property of Hourglass Worm Gearing," *CJME (in Chinese)*, 129(6), pp. 42-46, 1993.
12. Dan Xiaowei, Wei Yunlong and Cao Xinjing, *et al.*, "Analyses of the Heat Effect for Sliding Friction Deputy," *CJME (in Chinese)*, 129(6), pp. 93-96, 1993.
13. He Huinong, Wei Yunlong and Zhou Yinsheng, *et al.*, "Calculation of Gap Between Tooth Surfaces in Worm Gearing by Using Theory of Moving Coordinate System," *CJME'93*, Beijing, pp. 340-345, 1993.
14. He Huinong, Wei Yunlong and Zhou Yinsheng, *et al.*, "A Study of Lubrication of Double Enveloping Hourglass Worm Gearing," *Pro. of the Inter. Symp. on Trib*, Beijing, pp. 330-335, 1993.
15. Duan Fanfli, DuanYurong and Wei Yunlong, "The Research into Optimization of Involute Gear Tooth Profile Modefication for Improving Lubrication Ability," *Proceeding of National Advanced Manufacture Technology Conference*, Beijing, 1996.
16. Sakai T. and Maki M., "A Study on Hourglass Worm Gearing with Developable Tooth Surfaces," *JSME*, 41(351), pp.3285-3294, 1975.
17. Zhang Guanghui, *et al.*, "The Researches into the Plane Double Enveloping Hourglass Worm Gearing and Its Application," *Science Report (in Chinese)*, Chongqing University, 1973.
18. Kato M and Sakai T., "An Investigation on Secondary Action on Skew Gears," *JSME Journal Series(in Japanese)*, 38(311), pp. 1895, 1972.
19. Ihn-Sung Cho, Seok-Hyung Oh and Jae-Youn Jung, "Lubrication Characteristics Between the Vane and the Rolling Piston in a Rotary Compressor Used for Refrigeration and Air-Conditioning," *KSME Int. Journal*, Vol. 15, No. 5, pp. 562-568, 2001.
20. Wei Yunlong, "Manufacture Tool And Grinding Wheel Of Rotary Curve Surface Double Enveloping Hourglass Worm Gearing," *Patent for Discovery in China*, No: 92108209.6
21. Wei Yunlong, Cao X. J. and He H. N., "Manufacture Tool And Grinding Wheel Of Rotary Curve Surface Double Enveloping Hourglass Worm Gearing," *Patent for Discovery in China*, No: 98111819.4
22. Wei Yunlong, "Transmission-Tribology and Transmission-Tribology Design," *Progress in Natural Science*, 2(6), pp. 491-497, 1992.