

# 요인배치법에 의한 기어용 소재의 마찰계수 분석

배효준\*, 조연상(동아대원),  
우규성(거창기능대학), 박홍식(동아대)

## Analysis of Friction Coefficient for Hydraulic Actuator Materials using Statistical Techniques

H. J. Bae\*, Y. S. Cho  
G. S. Woo, H. S. Park

**Abstract** - The average frictional coefficient was used generally to analyze the moving state of lubricated machine. But It is difficult of getting the correct friction coefficient because the average frictional coefficient of it is progressed always unstably with a large amplitude on driving condition. If correct analysis of frictional coefficient on working condition for lubricated machine can be possible, it can be effect on diagnosis of lubricated machine. The purpose of this study is carried out to get the working condition with a minimum frictional coefficient of transmission gear materials using statistical techniques.

**Key words** : Statistical techniques, Friction coefficient, Transmission gear, Working condition, Factorial design, Taguchi design

### 1. 서론

자동차 트랜스 미션기어의 설계 및 제작에 있어서는 높은 충격강도와 정숙성, 저진동 그리고 생산비용 저감 등이 요구되고 있다. 이러한 사항을 만족시키기 위해서 높은 내마멸성과 피로강도 등이 요구되며 일반적으로 트랜스미션 기어는 설계, 제작, 재료, 열처리, 조립 및 윤활작용 등이 적절할 경우에는 장기간 동안 사용할 수 있다[1,2].

현재 자동차의 트랜스미션 기어에 사용되는 소재의 표면개질 방법은 주로 침탄하여 사용하고 있지만 최근 환경문제와 고려해 볼 때 기존의 표면처리 방법인 침탄법은 처리시 증기의 발생과 냉각제의 처리와 과다한 생산비용 등이 문제점으로 되어 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 보다 새로운 표면개질 방법이 필요하게 된다.

이를 위하여 본 연구에서는 기존의 기어소재를 침탄에 의한 것과 새로운 기어소재를 질화침탄한 것과의 내마멸성을 검토함으로써 기존의 표면개질 방법을 대체할 수 있는 방

법을 제시하고자 한다.

질화침탄법은 침탄에 사용되는 오스테나이트화하기 위한 침탄온도(925℃) 보다 훨씬 낮은 질화침탄온도(580℃)에서 처리하기 때문에 처리 후 변형이 적고, 또한 표면개질 처리비용이 기존의 침탄법보다 저렴하다는 장점을 가지고 있다[3].

이와 함께 일반적으로 트랜스미션의 기어의 작동 중 이상마멸 상태를 진단하기 위하여 진동측정과 이때의 동력전달효율을 구하기 위한 입력축과 출력축 사이의 토크 측정을 행하고, 시험기간 완료 후에는 트랜스미션을 분해하여 기어들을 직접 조사함으로써 피팅의 진행 및 기어의 파손정도를 파악하고 있는 실정에 있다.

그러나 이러한 방법들은 기어의 손상상태 평가에 많은 시간이 소요되고, 또한 측정 및 관찰된 데이터를 분석하기 위하여 숙련된 기술자나 전문가의 지식을 필요로 할 뿐만 아니라 이러한 데이터들은 정성적인 데이터의 범위에 지나지 않기 때문에 명확한 분석을 위한 자료의 정립이 매우 곤란하여 보다 새로운 기어의 손상상태 평가 기법이 요구되고

있다.

이를 위하여 트랜스미션 기어용 소재의 마찰상태를 정확히 분석하여 그 작동상태를 예지하기 위한 마찰계수는 기어용 소재와 열처리 상태에 따라 매우 불규칙하게 큰 진폭을 가지며 진행되므로 마찰계수의 측정은 통상적으로 그 평균값을 취하여 측정하는 것이 일반적인 방법이다.

그러나 평균값에 의한 마찰계수의 측정은 보다 정확한 기어용 소재의 작동상태를 알기 어렵고 또한 최소의 마찰계수와 최적의 작동조건을 갖는 작동상태를 찾기는 더욱 어렵다. 또한 마찰에 관련된 어떠한 인자가 마찰계수에 가장 영향을 미치는가에 대한 정량적인 data를 제시한 연구는 거의 진행되고 있지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 윤활 마찰 실험을 통해 불안정하게 진행되는 마찰계수의 변화를 통계적 기법을 적용하였다. 이를 통하여 트랜스미션 기어의 마찰 진행상태를 보다 명확하게 분석하고 이에 따른 작동조건에 영향을 미치는 유의한 마찰인자를 선정을 통하여 마찰계수를 분석함으로써 최적의 작동조건을 선정하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 표면개질 처리

본 연구에 사용한 시편으로는 NT100이며, 이 재료의 화학 조성을 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었으며, 이것은 제조회사에서 제공한 것이다. 여기서 NT100은 소량의 V이 0.33 % 함유되어 있다.

새로운 표면개질 방법인 질화침탄법의 열처리하는 가스질화침탄(gaseous nitrocarburizing)한 것으로, 575°C에서 3시간 동안 60% NH<sub>3</sub>-5% Co<sub>2</sub>-35% N<sub>2</sub>를 혼합한 가스분위기에서 실시하였다. 여기에 사용한 노는 상하부에 교반 fan이 부착된 피트형이며, 이의 크기는 500mm φx1000mmH의 치수를 가지고 있으며, 총 유량은 1.2m<sup>3</sup>/hr으로 제어하였다. 질화침탄 후 560

Table. 1 Chemical composition of materials

Material	Chemical compositions (wt.%)							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
NT100	0.17	1.05	0.3	0.016	0.005	1.05	1.05	0.33

Table. 2 Mechanical properties of materials

Material		NT100
Mechanical property	Yielding point (kg/mm <sup>2</sup> )	100
	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	115
	Percentage of elongation (%)	18
	Percentage of contraction (%)	50
	value of impact energy (kg · m/cm <sup>2</sup> )	> 8
	Hardness (HV)	890

°C에서 1hr 동안 N<sub>2</sub> 가스분위기에서 후 산화(oxidation)처리를 실시한 후 수냉하였다.

### 2-2. 윤활 마찰실험

윤활 마찰실험을 위하여 볼 온 디스크(ball on disk)형 pin on disk형 마찰시험기를 사용하였으며, Fig. 1에 이의 개요도를 나타내었다. 마찰실험에 사용된 핀 시험편은 직경 4.76mm의 순도 99.7%인 알루미늄나 세라믹스(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 구를 사용하였고, 디스크 시험편은 본 연구에서는 표면개질한 트랜스미션 기어 소재를 사용하였다. 이러한 디스크 시험편은 직경 50mm, 두께 10mm이며, 실험 전 정밀 연마기를 이용하여 표면조도를 0.2 μmR<sub>max</sub>로 일정하게 하여 실험하였다.

실험에 사용한 윤활유는 자동차용 3중 SAE 75W인 기어오일을 사용하였으며, 시험편 접촉점 하부에 오일 베스(oil bath)를 설치하고 윤활유는 순환펌프로 시험편 접촉점에 공급하였다. 작용하중 조건은 2kg, 3kg, 4kg, 5kg 및 6kg으로 설정하였으며, 접촉부의 미끄럼속도를 2m/min, 4m/min, 6m/min 및 8m/min로 설정하였고, 미끄럼거리는 총 5,760m(마찰시간 24hr)로 일정하게 하여 실험을 행하였다. 그리고

표면개질 조건을 달리한 두 시험편의 마멸특성을 비교하기 위한 마찰계수는 시험기의 볼 시험편 홀더에 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하여 이의 마찰력 신호를 PC 내의 자체 구축한 마찰계수 측정 알고리즘을 이용하여 측정하였다.

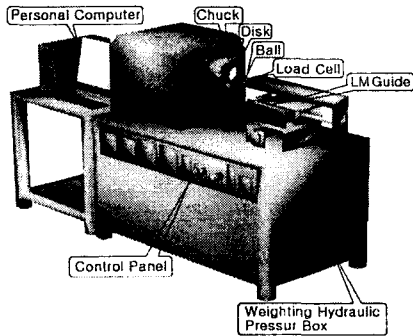


Fig. 1 Schematic diagram of ball on disk type wear tester

### 2-3. 통계적 기법

여러 가지 통계적 방법으로 윤활 마찰실험 조건에 따른 마찰계수에 대한 통계적 분석을 통하여 최소의 실험횟수로 최적의 마찰조건에 대한 정보를 얻을 수 있는 것이 실험계획법이라 할 수 있다. 이에 대한 실험계획법에 의한 실험순서는 Fig 2와 같다. 먼저 윤활 마찰실험에 있어서 특성치라 할 수 있는 마찰계수에 가장 많은 영향을 미치는 작동조건 즉, 마찰인자를 선정해야 한다. 따라서 윤활 마찰실험에 있어서 마찰계수에 미치는 마찰인자로는 유압구동부재, 작용하중, 미끄럼속도, 미끄럼거리, 윤활유 등 여러 가지 인자들이 있으며[4] 본 실험에서는 유압구동부재, 작용하중, 미끄럼속도를 마찰인자로 선정하였고, 각 인자에 대한 수준은 Table 3에 나타내었으며 요인배치법(factorial design)[5]을 이용하여 실험계획을 수립하여 마찰실험을 실시하였다.

요인 설계는 여러 마찰인자들이 특성치에 줄 수 있는 영향을 동시적인 연구를 가능하게

게 해 준다. 실험을 수행할 때, 동시에 여러 가공인자 수준들을 변화시키는 것은 한 번에 하나의 인자 수준을 변화시키는 것에 비해 시간과 비용 면에서 효율적일 뿐만 아니라, 인자들간의 상호작용(interaction)에 대한 연구도 가능하게 해 준다. 먼저 각 인자에 대한 삼원배치법에 의한 분산분석(Analysis of variance)[6,7]을 통하여 각 인자에 대한 주효과를 분석하고자 한다. 분산분석은 특성치의 산포를 제곱합(Sum of squares)으로 나

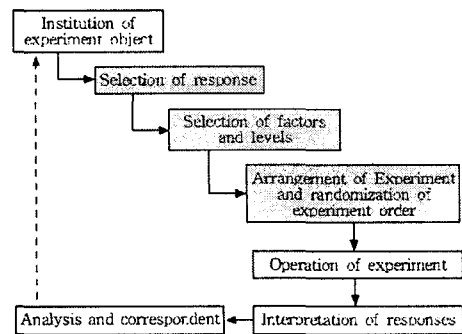


Fig. 2 Flow chart for experiment design

Table 3 Experimental conditions

Factors	Level				
	1	2	3	4	5
A Specimen	Non Oxidation	Oxidation			
B Sliding speed (mm/sec)	2	4	6	8	
C Applied Load (kg)	2	3	4	5	6

타내고 이를 작동조건과 관련된 인자마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법이라고 할 수 있다.

트랜스미션 기어용 소재의 윤활 마찰실험에서의 특성치인 마찰계수는 일정한 변화를 나타내고 있으며 마찰인자, 즉 구동부재, 작용하중, 미끄럼속도에 따라 마찰계수의 변화에 대한 많은 영향을 미치는 인자를 분산분석을 통해 분석하고 또한 각 인자의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 식(1)의 표준편차

(STDEV)를 이용하여 분석하고 다구찌 기법을 이용하여 비례식 (2)와 식(3)의 S/N비를 이용하여 동특성을 분석하고자 한다.

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

여기서  $x_i$ 는 각 실험에 따른 특성치,  $\bar{x}$ 는 특성치의 평균,  $n$ 은 실험횟수를 나타낸다.

$$S/N = 10 \log \left[ \frac{S_\beta}{r^* \times V_e} \right] \quad (2)$$

$$y = \beta M \quad (3)$$

여기서  $r^*$ 는 유효반복수,  $S_\beta$ 는 회귀의 변동,  $V_e$ 는 오차분산,  $y$ 는 특성치,  $\beta$ 는 기울기,  $M$ 은 신호인자를 나타내고 있다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3-1. 마찰인자의 주 영향

Table 2는 마찰인자에 대한 평균마찰계수의 분산분석의 결과를 나타내고 있다. P검정을 통하여 마찰인자 중 작용하중과 재료의 산화처리에 따라 평균마찰계수는 많은 영향을 받고 있으며 미끄럼속도의 변화와 마찰인자의 상호작용에 따른 영향은 적다는 것을 알 수 있다. 이는 작용하중의 변화에 따른 마찰면의 접촉부 면적과 윤활막의 산화물의 형성에 영향을 미치므로 평균마찰계수의 변화가 크다고 생각된다.

Fig. 3은 각 마찰인자와 수준변화에 따른 평균마찰계수의 변화를 나타내고 있으며 마찰인자의 영향을 기울기로 알 수 있다. 평균마찰계수는 작용하중의 변화에 따른 영향이 가장 크며 작용하중에 비하여 산화처리의 유무와 미끄럼속도는 그 영향은 적다는 것을 알 수 있다. 작용하중에 있어서는 5kg까지는

Table 4 ANOVA for Average of friction coefficient

Factors	S	$\Psi$	V	$F_0$	P
A	0.0016211	1	0.0016211	5.23	0.041
B	0.0008886	3	0.0002962	0.96	0.445
C	0.0539454	4	0.0134864	43.55	0.000
A×B	0.0021112	3	0.0007037	2.27	0.132
A×C	0.0012792	4	0.0003198	1.03	0.430
B×C	0.0064754	12	0.0005396	1.74	0.175
Error	0.0037161	12	0.0003097		
Total	0.0700371	39			

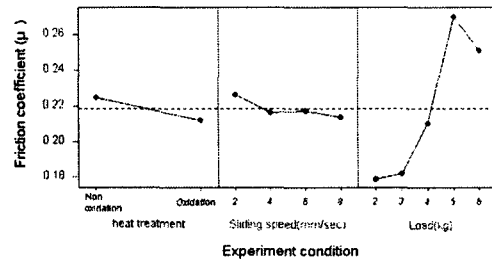


Fig. 3 Average friction coefficient with factors

비례적으로 증가하고 6kg에서는 감소하며 미끄럼속도가 증가할수록 감소하며, 산화처리한 재료가 마찰계수가 적다는 것을 알 수 있다. 작용하중에 있어서 6kg에서 감소하는 것은 작용하중의 증가에 따른 윤활·마찰면의 온도상승으로 인하여 윤활막의 점도가 감소하여 평균마찰계수가 감소되었다고 생각된다.

#### 3-2. 마찰계수의 표준편차

Fig. 4는 식(1)을 이용하여 작용하중에 따른 마찰계수의 편차를 나타내고 있다. 마찰계수의 편차에 있어서 산화처리를 하지 않은 재료는 작용하중의 변화에 따라 불규칙한 변화를 보이고 있으나 미끄럼속도 변화에 따라 작용하중 3, 4, 5kg 일 때의 마찰계수 편차가 적다는 것을 알 수 있다. 산화처리한 재료는 미끄럼속도 변화에 따라 작용하중 2kg에서 큰 변화를 보이고 있으며 이상의 하중에서는 불규칙하지만 변화폭이 크지 않다.

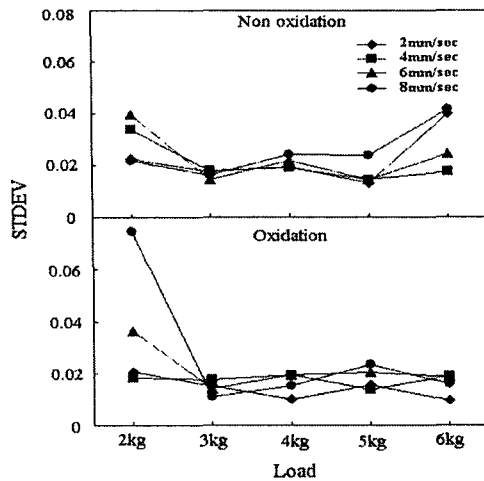


Fig. 4 STDEV of friction coefficient for applied load

것을 알 수 있다. 또한 산화처리한 재료는 산화처리 하지 않은 재료에 비하여 작용하중 2kg에서 마찰계수의 편차가 크다는 것을 알 수 있다.

따라서 마찰계수의 편차의 변화에 있어서 산화처리하지 않은 재료는 미끄럼속도 변화에 따라 작용하중이 2kg와 6kg, 산화처리한 재료의 경우 2kg에서 변화가 가장 크며 마찰특성에 있어서 불안정한 마찰계수의 변화폭을 가진다 할 수 있다.

Table 5는 마찰계수의 표준편차에 대한 분산분석의 결과를 나타내고 있다. 이를 통하여 본 연구에서 설정한 마찰인자는 마찰계수의 표준편차에 많은 영향을 미치고 있지 않다고 할 수 있다. 그러나 작용하중에 따른 영향은 무시할 수 없다는 것을 알 수 있다.

Table 5 ANOVA for STDEV of friction coefficient

Factors	S	$\Psi$	V	$F_0$	P
A	0.0000113	1	0.0000113	0.08	0.786
B	0.0007405	3	0.0002468	1.64	0.200
C	0.0014812	4	0.0003703	2.46	0.066
Error	0.0046630	31	0.0001504		
Total	0.0068961	39			

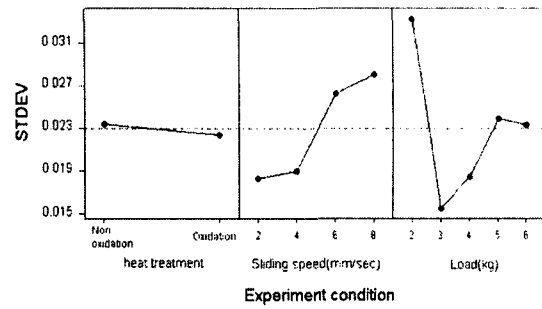
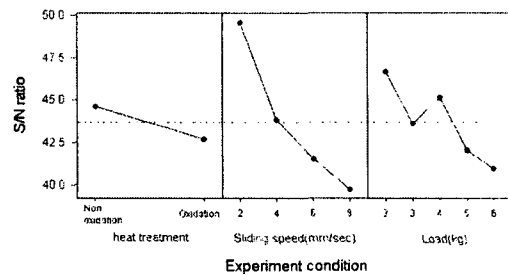


Fig. 5 STDEV of friction coefficient with level

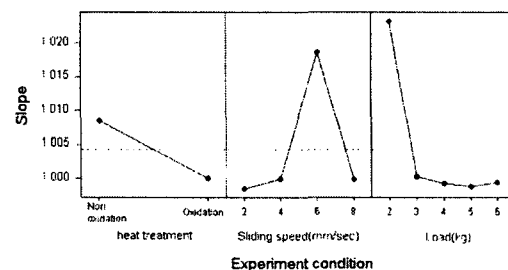
Fig. 5는 각 마찰인자와 수준변화에 따른 마찰계수의 편차를 나타내고 있다. 마찰계수의 편차에는 작용하중, 미끄럼속도, 산화처리 유무의 순으로 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 작용하중 3kg, 미끄럼속도 2mm/sec, 산화처리한 재료가 마찰계수의 편차가 가장 적게 발생하는 마찰조건이라 할 수 있다.

### 3-3. 마찰계수의 동특성

Fig. 6은 마찰계수에 대한 동특성을 평균 마찰계수를 신호인자(M)로 설정하고 미끄럼



(a) S/N ratio



(b) Slope

Fig. 6 Dynamic characteristics of friction coefficient

거리를 3구간으로 설정하여 구간에 따른 마찰계수의 평균을 특성치( $y$ )로 설정하고 식 (2)에 의한 S/N비를 (a)에 나타내었고 식 (3)에 의한 기울기( $\beta$ )를 (b)에 나타내고 있다. 그림 (a)에서 미끄럼거리에 따른 마찰계수의 변화는 산화처리하지 않은 재료, 미끄럼속도 2mm/sec, 작용하중 2kg일 때가 가장 산포가 적다는 것을 알 수 있으며 (b)에서 미끄럼속도가 6mm/sec, 재료와 작용하중은 S/N비와 동일한 마찰조건에서 가장 기울기가 크다는 것을 알 수 있다.

따라서 미끄럼거리의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 산화처리하지 않은 재료, 미끄럼속도 2mm/sec와 6mm/sec, 작용하중 2kg일 때가 가장 변화가 적다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

트랜스미션 기어용 소재의 윤활·마찰실험을 통한 각 마찰인자와 수준에 따른 마찰계수의 변화를 통계적 기법을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 각 마찰인자와 수준변화에 따른 평균 마찰계수와 마찰계수의 표준편차는 산화처리한 소재가 낮다.

(2) 트랜스미션 기어용 소재의 평균 마찰계수는 작용하중 변화가 가장 큰 영향을 미친다.

(3) 미끄럼속도의 변화에 따라 산화처리하지 않은 소재의 경우 작용하중이 2kg와 6kg에서, 산화처리한 소재의 경우 작용하중이 2kg가 가장 마찰계수의 표준편차가 크다.

(4) 미끄럼거리의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 산화처리하지 않은 소재, 미끄럼속도 2mm/sec와 6mm/sec, 작용하중 2kg일 때가 가장 변화가 적다.

본 연구는 한국과학재단(kosef) 지정 신소재형 재가공청정공정개발연구센터(R12200205802 00402003)지원으로 수행되었습.

#### 참고문헌

1. 박순철, "기어의 손상과 대책," 월간기계 설계, pp.44-54, 1990.
2. Y. Ko et al, "Measurements of Power Losses in Automobile Drive Train," SAE, Paper, 840054.
3. T. Bell, "Gaseous and Plasma Nitrocarburising," ASM Handbook, Vol.4, ASM International, pp. 425-436, 1991
4. R. E. Bechhofer and C. W. Dunnett. "Percentage points of multivariate Student distributions", Selected Tables in Mathematical Studies, American Mathematical Society, Providence, R.I. Vol. 11, pp. 57-87, 1988.
5. M. B. Brown and A. B. Forsythe. "Journal of the American Statistical Association", Vol. 69, pp. 364-367. 1974
6. H. L. Harter. "Order Statistics and Their Uses in Testing and Estimation, U. S. Government Printing Office, Washington", D.C., Vol.1, pp. 78-102, 1970.
7. A. J. Hayter, "A proof of the conjecture that the Tukey-Kramer multiple comparisons procedure is conservative", Annals of Statistics, Vol. 12, pp. 61-75. 1984.

#### 후 기