

실험계획법을 이용한 자동차 트랜스미션 기어용 소재의 마찰특성에 미치는 마찰인자의 영향

박흥식[†] · 배효준 · 이상재 · 이찬규* · 김영희**

동아대학교 기계공학부, *거제대학 메카트로닉스 계열, **동아대학교 신소재공학부

An Influence of Frictional Factors on the Friction Characteristics of Automobile Transmission Gear Materials by using Design of Experiment

Heung-sik Park[†], Hyo-jun Bae, Sang-Jae Lee, Chan-kyu Lee* and Young-Hee Kim**

Division of Mechanical Engineering, Donga University

**Dept. of Mechatronics, Koje College*

***Division of Metallurgical & Chemical Engineering, Donga University*

Abstract – The fault of an automobile transmission gear occurs whenever moving tooth surfaces interact. Such a failure condition has an effect on the frictional factors such as applied load, sliding speed, frictional time and gear oil. However, it is difficult to know the mutual relation of these factors. In this study, the friction and wear tests were carried out to get the friction characteristics with carburized SCM420 and nitrocarburized NT100 have being used as automobile transmission gear materials. And it was undertaken to analyze the frictional factors that have effect on frictional characteristics by using design of experiment. From this study, the result showed that the applied load in frictional factors was the most important, next to frictional time, sliding speed. And the friction characteristics of nitrocarburized NT100 was more excellent than carburized SCM420.

Key words – friction coefficient, transmission gear, design of experiment, failure condition, taguchi design.

1. 서 론

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[1,2]. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 보다 새로운 표면개질 방법이 필요하게 된다. 이러한 새로운 표면개질 방법으로서 질화침탄법은 오스테나이트화하기 위한 침탄온도(925°C) 보다 훨씬 낮은 질화침탄온도(580°C)에서 처리하기 때문에 처리 후 변형이 적고, 또한 표면개질 처리비용이 기존의 침탄법보다 저렴하다는 장점을 가지고

있다[3].

그러나 자동차 트랜스 미션기어들은 기어박스 내에서 기어 치면들이 상호 접촉하여 윤활운동을 하므로 이들의 손상상태를 눈으로 관찰할 수 없다는 문제점을 가지고 있다. 이에 따라 자동차 회사들은 기어 소재의 성능검사를 위하여 실험실에서 기어들의 이상 마멸에 의한 손상상태를 조기에 예지할 목적으로 과혹한 실험조건을 설정하여 진동측정과 입력축과 출력축 사이의 토크를 측정하여 기어들의 손상상태를 분석한다. 그리고 시험 완료 후에는 트랜스미션을 분해하여 피팅의 진행 및 기어의 파손정도를 파악하고 있다[4].

이러한 기어 손상에 대한 분석을 위해서 실험조건으로 선정하는 마찰인자로서 기어 치면에 작용하는 하중, 미끄럼속도, 윤활조건 및 작동시간을 설정하여 시험을 행하고 있다. 그러나 이러한 마찰인자의 선정이 잘못되

[†]주저자 · 책임저자 : parkhs@daunet.donga.ac.kr

면 실험결과에 대한 신뢰성이 없으므로 마찰인자의 설정에는 많은 시간과 비용이 소요되고, 또한 기어 손상에 영향을 미치는 이들 마찰인자 사이에 측정 및 관찰된 데이터의 상관관계 분석을 위하여는 숙련된 기술자나 전문가의 지식을 필요로 한다. 그러므로 이러한 마찰인자의 설정에 의한 실험에서의 문제점을 보완하기 위하여 보다 범용적인 기법이 필요하다고 생각된다.

최근 다양한 분야에서 널리 사용되고 있는 실험계획법은 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 실험 데이터를 통계적 방법으로 분석하여 최소의 실험횟수만으로 최대의 정보를 얻을 수 있는 계획을 설정하는 것이며, 또한 실험인자간의 상관관계를 수학적 모형으로 구축함으로써 실험인자의 변화를 예측할 수 있다는 특징을 가지고 있다[5-9]. 그러나 현재까지 이 실험계획법을 이용하여 자동차 트랜스미션 기어 소재의 마찰 특성에 영향을 미치는 마찰인자들의 상관관계에 대한 연구는 아직 진행되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 침탄법에 의한 기어 소재와 새로운 질화침탄법에 의한 기어 소재를 사용하여 윤활 마찰 실험을 행한 후 실험계획법을 통하여 자동차 트랜스미션 기어 소재들의 마찰특성에 미치는 마찰인자의 영향을 제시하고자 하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험 방법

2-1. 표면개질 처리

본 연구에 사용한 재료는 현재 자동차 트랜스미션 기어용 소재로 많이 사용되고 있는 SCM420과 새로운 기어용 소재로 알려져 있는 질화강 NT100을 사용하였다. 그리고 이들 재료의 화학 조성을 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었으며, 이것은 제조회사에서 제공한 것이다. 여기서 NT100은 SCM420 보다 소량의 V이 0.33% 함유되어 있다.

여기서 SCM420의 경우는 기존의 침탄법을 사용하였으며, 이것은 오스테나이트 온도 925°C에서 2시간 동안 endothermic(20%C-40%H₂-40%N₂) 가스분위기

Table 2. Mechanical properties of materials

Material	NT100	SCM420
Yield strength (kg/mm ²)	100	85
Tensile strength (kg/mm ²)	115	100
Percentage of elongation (%)	18	12
Percentage of contraction (%)	50	45
value of impact energy (kg · m/cm ²)	>8	>6
Hardness (HV)	890	720

중에서 C₃H₈를 첨가하여 탄소포텐셜(carbon potential)을 0.8%에 도달하도록 자동제어장치가 부착된 밀봉 담금질 노에서 실시하였다. 침탄 후 850°C까지 확산처리 하면서 노냉 후 이 온도에서 30분 유지한 다음 30°C의 담금질 오일에 냉각하였다. 그리고 180°C에서 2시간 동안 뜨임한 후 공냉하였으며, 여기서 생성된 침탄층의 깊이는 1.2 mm이다.

그리고 질화강 NT100의 경우는 가스질화침탄(gaseous nitrocarburizing)한 것으로, 580°C에서 3시간 동안 60%NH₃-5%CO₂-35%N₂를 혼합한 가스분위기에서 질화침탄을 실시하였다. 여기에 사용한 노는 상하부에 교반 fan이 부착된 피트형이며, 이의 크기는 500 mmφ × 1000 mmH의 치수를 가지고 있으며, 총 유량은 1.2 m³/hr으로 제어하였다. 그리고 질화침탄 후 540°C까지 N₂ 가스분위기에서 후 산화처리(post oxidation)를 실시한 후 공냉하였다[10]. 여기서 질화침탄층의 깊이는 20 μm로 하였다.

2-2. 윤활마찰 실험

윤활 마찰실험을 위하여 볼 온 디스크(ball on disk)형 마찰시험기를 사용하여 디스크 시험편을 회전시켜 볼 시험편에 점 접촉에 의한 경계윤활시험을 하였으

Table 1. Chemical composition of materials

Material	Chemical compositions (wt.%)									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Cr	Ni
NT100	0.17	1.05	0.3	0.016	0.005	1.05	1.05	0.33	-	-
SCM420	0.04	0.65	0.3	0.016	0.005	1.10	0.21	-	0.30	0.42

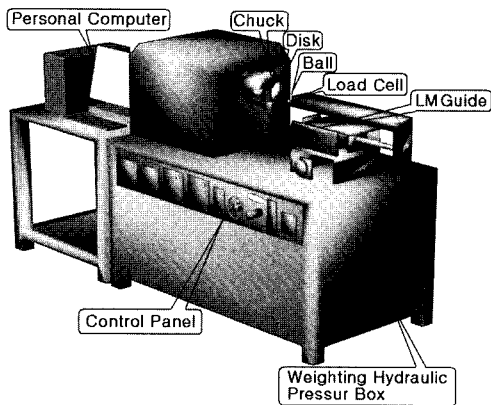


Fig. 1. Schematic diagram of ball on disk type wear tester.

며, Fig. 1에 이의 개요도를 나타내었다. 마찰실험에 사용된 핀 시험편은 직경 4.76 mm의 순도 99.7%인 알루미나 세라믹스(Al_2O_3)를 사용하였고, 디스크 시험편은 표면개질한 트랜스미션 기어 소재를 사용하였다. 디스크 시험편은 직경 50 mm, 두께 10 mm이며, 실험 전 표면조도를 $0.2 \mu m R_{max}$ 로 일정하게 하여 마찰실험을 행하였다.

실험에 사용한 윤활유는 자동차용 3종 SAE 75W인 기어오일을 사용하였으며, 시험편 접촉점 하부에 오일 베스(oil bath)를 설치하고 윤활유는 순환펌프로 시험편 접촉점에 공급하였다. 그리고 작동조건에 따른 두 가지 기어용 소재를 비교 분석하기 위하여 작용하중, 미끄럼속도 및 마찰시간으로 설정하여 실험을 실시하였다.

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

2-3. 실험계획법

본 연구에서 실험계획법에 의한 실험순서는 Fig. 2에서와 같이 먼저 윤활 마찰실험에 있어서 특성치라 할 수 있는 마찰계수에 가장 많은 영향을 미치는 작동 조건 즉, 마찰인자를 선정해야 한다. 따라서 윤활 마찰 실험에 있어서 마찰계수에 미치는 마찰인자와 수준은 Table 3에 나타내었다. 그리고 다구찌 기법의 직교배열 표[11]를 이용하여 실험계획을 수립하여 마찰실험을 실시하였다. 여기서 수준은 본 연구에서 설정한 마찰인

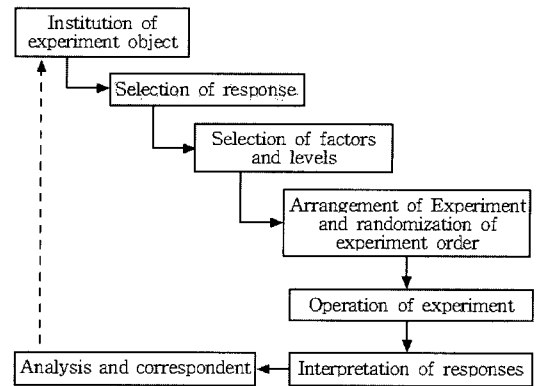


Fig. 2. Flow chart for experiment design.

Table 3. Experimental conditions

Factors	Level			
	1	2	3	4
A Materials	NT100	SCM420		
B Sliding speed (m/min)	20	40	60	80
C Applied load (kg)	2	4	6	8
D Frictional time (min)	40	80	120	160

자의 실험조건을 나타내고 있다.

다구찌 기법은 직교 배열에 의한 보통 완전요인설계 수준조합들의 일부분만을 요구하는 실험설계 방법이라 할 수 있다. 다구찌 설계에서 배열은 직교적인 데 이것이 의미하는 바는 요인 수준들에 동등한 가중치들이 부여되도록 설계가 균형되어 있다는 것이다. 이로 인하여, 직교 배열에서는 각 요인이 다른 모든 요인들과 독립적으로 평가될 수 있다. 따라서 최소의 실험을 통하여 최대의 정보를 얻을 수 있으므로 다른 실험계획에 비하여 시간과 비용면에서 효율적이다. 먼저 각 인자에 대한 분산분석(analysis of variance)[8,9]을 통하여 각 인자에 대한 주효과를 분석하고자 한다. 분산분석은 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)으로 나타내고, 이를 실험조건과 관련된 인자마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법이라고 할 수 있다.

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

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

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

Where x_i : experimental value
 \bar{x} : average of experimental value
 n : the number of times of experimentation
 y_i : value of smaller-the-better characteristics

자동차 트랜스미션 기어용 소재의 윤활 마찰실험에서의 특성치인 마찰계수는 마찰인자 즉, 미끄럼속도, 작용하중 및 마찰시간에 따라 많은 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 이를 분산분석 하였다. 그리고 각 마찰인자의 변화에 따른 마찰계수는 식 (1)의 표준편차(STDEV)를 이용하여 구하였고, 마찰계수를 식 (2)와 식 (3)의 다구찌 기법[11]에 의하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마찰계수의 변화 분석

Fig. 3은 질화침탄한 NT100의 경우, 미끄럼거리에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로, 실험조건은 미끄럼속도 4 m/min, 작용하중 2 kg, 마찰시간 80 min이다. 그림에서처럼 초기 마찰시간에서의 마찰계수는 불안정하게 변화하지만 그 이상에서는 안정된 마찰이 진행되고 있다는 것을 볼 수 있다. 이는 질화침탄강인 NT100의 경우 열처리 과정에서 후 산화층이 형성되어 있어 이것이 윤활 마찰초기에 탈락되는 런닝 인(running-in) 과정에 의하여 초기의 마찰계수가 불안정하고 높게 나타난다고 생각된다. 그러나 침탄한 SCM420 경우의 런닝 인 과정에 의한 마찰계수의 초기 진폭변화는 NT100

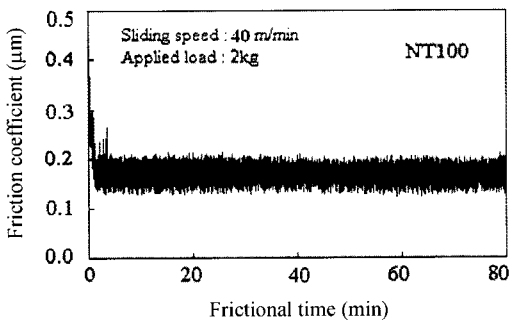
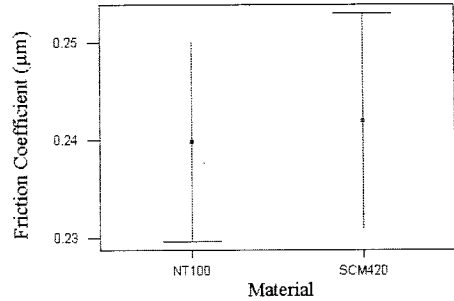


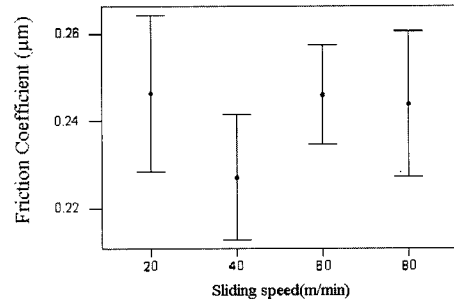
Fig. 3. Variation in friction coefficient with sliding distance for NT100.

에 비하여 훨씬 적게 나타났다.

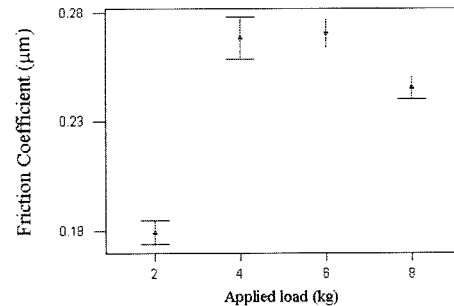
Fig. 4는 안정구간의 마찰계수에 대한 각 인자의 수



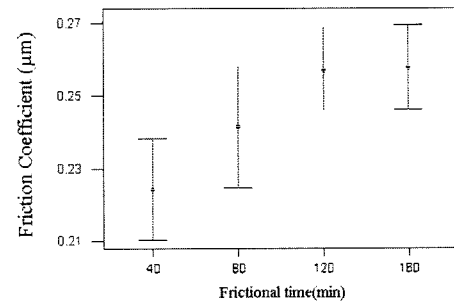
(a) Material factor



(b) Sliding speed factor



(c) Applied load factor



(d) Friction time factor

Fig. 4. Interval plots of friction coefficient for variation frictional factors.

준별 평균과 표준편차구간을 점과 구간으로 표시하였다. 그림에서 점은 평균 경향성을, 구간은 각 인자의 수준에 따른 마찰계수의 변동성을 나타낸다. Fig. 4 (a)의 기어 소재와 (b)의 미끄럼속도에 따른 마찰계수는 표준편차의 구간이 중복되고, 그 변화는 크지 않으므로 마찰인자인 기어 소재와 미끄럼속도는 마찰계수에 많은 영향을 미치고 있지 않다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)의 작용하중에 있어서는 수준에 따른 마찰계수의 변화가 크게 나타나고 있으며 이는 특성치에 많은 영향을 미치고 있는 마찰인자라 할 수 있다. 그리고 Fig. 4(d)의 마찰시간에 따른 변화는 수준간의 차이는 나타나고 있지만, 일부 편차구간이 중복되고 있으므로 특성치에 일부 영향을 주고 있다고 생각된다.

따라서 트랜스미션 기어용 소재의 윤활 마찰실험에서 마찰계수의 변화에 가장 많은 영향을 미치는 마찰인자는 작용하중이라 할 수 있다.

3-2. 마찰계수에 미치는 마찰인자의 영향

Table 4는 마찰인자에 대한 평균 마찰계수의 분산분석의 결과를 나타내고 있다. 특성치인 마찰계수의 분

Table 4. ANOVA for average friction coefficient

Factors	S	ϕ	V	F_0	P
A	0.0000350	1	0.0000350	0.17	0.687
B	0.0020610	3	0.0006870	3.28	0.041
C	0.0436153	3	0.0145384	69.48	0.000
D	0.0043149	3	0.0014383	6.87	0.002
Error	0.0043945	21	0.0002093		
Total	0.0544206	31			

Table 5. ANOVA for STDEV of friction coefficient

Factors	S	ϕ	V	F_0	P
A	0.0000301	1	0.0000301	1.55	0.226
B	0.0000646	3	0.0000215	1.11	0.367
C	0.0007595	3	0.0002532	13.08	0.000
D	0.0000110	3	0.0000037	0.19	0.902
Error	0.0004066	21	0.0000194		
Total	0.0012718	31			

where S : sum of squares
 ϕ : degrees of freedom
 V : variation
 F_0 : variation of factor / variation of error
 P : P-test

포상태를 표준정규분포로 나타낼 때, 이를 95% 신뢰 구간으로 선정하여 P 검정값이 0.05이하의 값을 가지는 마찰인자가 평균 마찰계수에 많은 영향을 주고 있다고 할 수 있다. 따라서 평균 마찰계수에 영향을 주고 있는 마찰인자는 미끄럼속도, 작용하중, 작용시간이라는 것을 알 수 있다.

Table 5는 마찰인자에 대한 마찰계수의 표준편차를 분산분석한 결과로서, 작용하중의 변화에 따라 마찰계수의 편차에 많은 영향을 미치고 있다. 그러나 평균마찰계수의 영향과는 달리 그 외의 마찰인자는 마찰계수의 편차에는 영향을 주고 있지 않다.

Fig. 5는 평균마찰계수에 대한 망소특성을 식 (2)의 S/N비로 나타낸 것이다. S/N비 그래프에서 그 값이 클수록 최적의 조건이며, 기울기가 클수록 특성치에 많은 영향을 미치고 있는 마찰인자라 할 수 있다. 그림에서 작용하중, 마찰시간, 미끄럼속도 순으로 평균마찰계수에 많은 영향을 미치고 있으며, 기어 소재에 따른 영향은 아주 작다는 것을 알 수 있다. 그리고 작용하중에 있어서 2 kg에서 4 kg까지는 마찰계수의 S/N비가 급격히 감소하다가 8 kg에서 다시 증가하고 있다. 이것은 작용하중이 증가할수록 윤활유의 점도 저하와 마찰면의 온도상승에 의한 결과라고 생각된다. 따라서 평균마찰계수에 있어서 자동차 트랜스미션 기어용 소재의 최적의

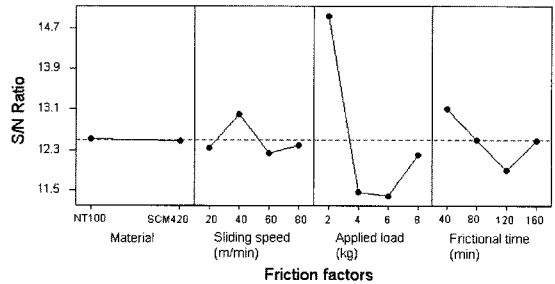


Fig. 5. S/N ratio of average friction coefficient.

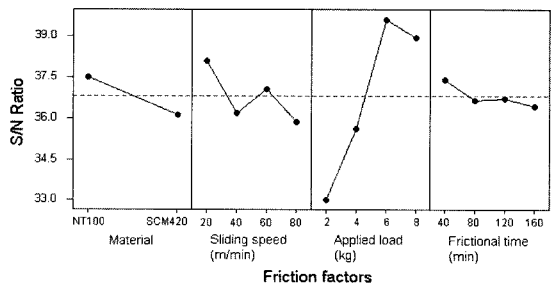


Fig. 6. S/N ratio for STDEV of friction coefficient.

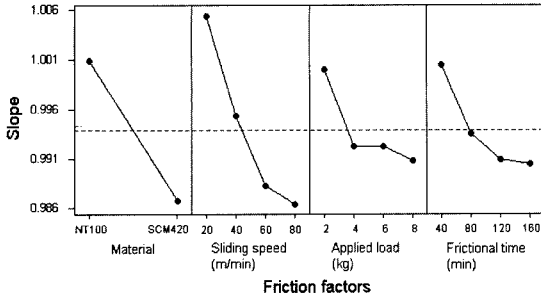


Fig. 7. Dynamic characteristics of friction coefficient.

작동조건은 미끄럼속도 40 m/min, 작용하중 2 kg, 마찰 시간은 짧을수록 평균마찰계수는 낮게 분포한다.

Fig. 6은 마찰계수 편차에 대한 S/N비를 나타내고 있으며 마찰계수 편차가 클수록 불안정한 윤활마찰 상태를 나타낸다고 할 수 있다. 마찰계수 편차에서는 작용하중, 미끄럼속도, 마찰부재, 작용시간 순으로 많은 영향을 미치고 있다. 여기서 작용하중에 대한 영향은 평균마찰계수와 반대의 경향을 나타내며 마찰부재에 있어서는 NT100이 SCM420에 비하여 마찰계수 편차가 낮게 분포되었다.

따라서 자동차 트랜스미션 기어용 소재의 마찰계수의 변화에 있어서 작용하중에 대한 영향이 가장 크며, 기어 소재에 있어서 평균마찰계수의 변화의 차는 적으나, 마찰계수 편차에 있어서는 NT100이 SCM420보다 낮게 분포됨으로 안정적인 마찰특성을 나타낸다.

3-3. 마찰계수의 동특성

Fig. 7은 마찰계수에 대한 동특성을 평균마찰계수를 신호인자(M)로 설정하고 각 마찰조건에 따른 마찰계수의 초기구간과 표준편차구간을 특성치(ν)로 설정하여 식 (3)에 의한 기울기(β)를 나타내고 있다. 기울기가 클수록 평균마찰계수를 기준으로 초기 마찰계수와 마찰계수의 편차가 크다는 것을 나타낸다. 전술한 S/N비와 비교하여 볼 때 S/N비가 높을수록 마찰계수는 작게 발생되며, 동특성에 있어서 기울기가 클수록 마찰계수의 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 마찰조건에 있어서 미끄럼속도, 기어 소재, 마찰시간, 작용하중 순으로 마찰계수의 변화가 크다는 것을 알 수 있으며, 미끄럼속도, 마찰시간 및 작용하중은 적을수록 마찰계수의 변화가 적다는 것을 알 수 있다.

따라서 마찰계수의 동특성에 있어서 미끄럼속도, 마찰시간, 작용하중이 적을수록 기어 소재는 NT100의

경우가 가장 변화가 적으며 안정적인 마찰계수를 나타낸다고 생각된다.

4. 결 론

자동차 트랜스미션 기어용 소재의 윤활·마찰실험을 통한 각 마찰인자와 수준에 따른 마찰계수의 변화를 다구찌 기법을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평균마찰계수에 영향을 미치는 마찰인자는 작용하중, 마찰시간, 미끄럼속도 순이며, 마찰계수 편차에는 작용하중이 가장 많은 영향을 미치며, 그 외의 마찰인자의 영향은 적다.

(2) 자동차 트랜스미션 기어용 소재인 NT100이 SCM420에 비하여 마찰계수 편차가 적고 안정적인 마찰특성을 나타낸다.

(3) 마찰계수의 동특성 변화는 미끄럼속도, 마찰시간, 작용하중이 적을수록, 기어용 소재에 있어서는 NT100의 경우가 마찰계수의 변화가 적었다.

(4) 실험계획법을 이용하여 마찰인자에 따른 마찰계수의 정상적인 통계적 분석이 가능하였다.

후 기

이 논문은 2003학년도 동아대학교 학술연구비(공모과제) 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. 박순철, “기어의 손상과 대책,” 월간기계설계, pp. 44- 54, 1990.
2. T. Bell, “Gaseous and Plasma Nitrocarburising,” ASM Handbook, Vol. 4, ASM International, pp. 425-436, 1991.
3. Y. Koetal, “Measurements of Power Losses in Automobile Drive Train,” SAE., Paper, 1988.
4. T. Bell, “Gaseous and Plasma Nitrocarburising,” ASM Handbook, Vol. 4, ASM International, pp. 425-436, 1991.
5. 박성현, “실험계획법,” 민영사, 2002.
6. R. E. Bechhofer and C. W. Dunnett, “Percentage points of multivariate Student distributions,” Selected Tables in thematical Studies, American Mathematical Society, Providence, R. I., Vol. 11, pp. 57-87, 1988.
7. M. B. Brown and A. B. Forsythe, “Journal of the American Statistical Association,” Vol. 69, pp. 364-

367. 1974.
8. 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.
 9. 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.
 10. 박재상, 류을현, 김동호, 김영희, 박홍식, "표면개질에 따른 자동차 트랜스미션 기어의 내마멸성 평가," 한국윤활학회, 제19권 제2호, pp. 78-84, 2003.
 11. G. Taguchi, "Introduction to Quality Engineering," American Supplier Institute, Inc., Michigan, pp. 58-110, 1987.