

실험계획법을 이용한 기계구조용 특수강의 손상상태 예측

배효준[†] · 이상재* · 김영희** · 박흥식***

[†] 동아대학교 대학원, **동아대학교 재료금속화학공학부,
***동아대학교 기계산업시스템공학부

Prediction of Failure Condition for Alloy Steel for Machine Structural Use by Design of Experiment

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

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

***Division of Metallurgical & Chemical Engineering, Dong-A University*

****Division of Mechanical & Industrial system Engineering, Dong-A University*

Abstract - Wear volume was used generally to analyze the moving state of lubricated machine. But It is difficult of getting the correct wear volume because wear volume of it is progressed always unstably with a large amplitude on working condition. If correct analysis of wear volume on working condition for lubricated machine can be possible, it can be effect on diagnosis of failure condition. The purpose of this study is carried out to analysis friction factors affecting on wear volume for prediction of failure condition of alloy steel for machine structural use by design of experiment. The results show that the most important friction factors affecting on wear volume was applied load, neat sliding distance, sliding speed and materials.

Key words - Wear volume, Lubricated machine, friction factor, Design of experiment

1. 서 론

최근의 과학과 공업의 발전과 더불어 서로 상호 운동하는 재료의 작동 환경이 점점 가혹하게 되고 특히 재료강도나 기능을 이용하는 재료이용법 중에서 재료표면을 이용하는 분야가 극히 많다. 표면의 운동과 관계되는 트라이볼로지(tribology)적 현상 가운데 하나인 마멸은 상호 접촉 운동하는 두 재료사이에서 필연적으로 나타나는 현상으로 다양한 인자가 복잡하게 상호 관련하고 있지만 그 발생기구는 아직 충분히 해명되어 있지 않고 있다.

특히 기어[1-2]의 경우는 기어오일 중에서 기어 치면들이 상호 접촉하여 윤활운동을 하면서 동력을 전달하기 때문에 기어설계 및 제작에 있어서는 높은 충격강도와 정

속성, 저진동 그리고 생산비용 저감 등이 요구되고 있다. 이러한 사항을 만족시키기 위해서 높은 내마멸성과 피로강도 등을 향상시키기 위하여 트랜스미션 기어에 사용되는 소재는 침탄처리에 의하여 표면을 고탄소를 침투시켜 표면만 경화시켜 담금질하는 표면개질 방법을 사용하고 있다. 이러한 기어 제작에는 침탄경화 처리시에 변형에 대한 문제로 인하여 최종적으로 피니싱(finishing)가공을 행하므로 시간과 비용이 많이 소요되며, 환경문제를 고려해 볼 때 현재의 표면처리 방법은 증기의 발생과 냉각제의 처리와 과다한 생산비용 등이 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 기존의 침탄법에 의한 트랜스미션 기어의 변형을 줄이고 처리시간과 제조공정을 단축하고, 내마멸성이 우수한 청정공정에 의한 새로운 기어 소재와 표면개질 방법이 절실히 필요한 실정에 있다.

현재 트랜스미션 기어에 사용되고 있는

표면개질 방법을 대체하고자 하는 침탄질화법은 낮은 침탄질화온도(580°C)에서 처리하기 때문에 처리 후 변형이 적고, 또한 표면개질 처리비용이 기존의 침탄법보다 저렴하다는 장점을 가지고 있다.^{3,4)} 이처럼 새로운 표면개질 방법의 양부를 결정하기 위해서는 내마멸성의 평가가 우선되어야 한다.

이를 위하여 최근 컴퓨터 영상처리 기술을 적용하게 되면 매우 빠르고 간편하고 또한 직접 눈으로 관찰하는 것이 곤란한 작동 중인 트랜스미션 기어의 내마멸성을 분석하고자 한다. 즉, 기어오일내의 기어들로부터 발생하는 마멸량을 측정하고 분석함으로써 손상여부 및 건전성을 판단케 하는 마멸분의 분석을 통한 상태진단 기술은 다른 진단 방법의 제반 단점들을 보완함과 동시에 다른 측정기술에서 얻을 수 없는 귀중한 정보를 추출할 수 있는 장점들을 가지고 있다.

따라서 실험계획법[5-6]을 이용하여 다양한 작동조건에 따라 발생하는 마찰계수와 컴퓨터 영상해석을 통한 마멸량을 분석하고 이를 이용하여 마찰계수와 마멸량에 영향을 미치고 있는 마찰인자의 상관관계를 분석하여 수학적모형으로 구축하고 마찰인자의 변화에 따른 정량적인 마멸량을 이용하여 트랜스미션기어의 작동상태를 예지, 판정을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험방법

2-1. 표면개질 처리

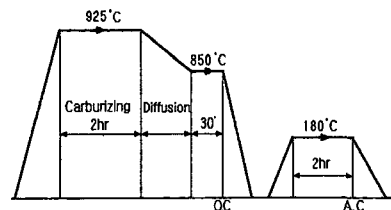
본 연구에 사용한 시편으로는 SCM420과 NT100이며, 이 재료의 화학 조성을 Table 1에 나타내었으며, 이것은 제조회사에서 제공한 것이다. 여기서 NT100은 소량의 V이 0.33% 함유되어 있다.

Fig. 1은 기존의 침탄법과 침탄질화법의 열처리 사이클을 나타낸 것으로, (a) 침탄법의 경우는 SCM420 소재를 925°C에서 2시간 동안 endothermic(20% C - 40% H₂ - 40% N₂) 가스분위기 중에서 C₃H₈를 첨가하여 탄소포텐셜(carbon potential)을 0.8% C에 도달하도록 자동제어장치가 부착된 밀봉 담금질 노에서 실시하였다. 침탄 후 850°C까지 확산 처리하면서

노냉 후 이 온도에서 30분 유지한 다음 30°C의 담금질 오일속에 냉각하였다. 그리고 180°C에서 2시간 동안 뜨임한 후 공냉하였다. 여기서 생성된 침탄층의 깊이는 1.2 mm이다. 그리고 (b) 침탄질화의 경우는 NT100의 소재를 가스침탄질화(gaseous nitrocarburizing)한 것으로, 580°C에서 3시간 동안 60% NH₃ - 5% Co₂ - 35% N₂를 혼합한 가스분위기에서 가스 침탄질화를 실시하였다. 여기에 사용한 가스 노는 상하부에 교반 fan이 부착된 피트형으로 이의 크기는 직경 500 mm, 높이 1000 mm의 치수를 가지고 있으며, 총 유량은 1.2m³/hr으로 제어하였다. 가스 질화침탄 후 540°C까지 N₂ 가스분위기에서 후산화(post oxidation)을 실시한 후 공냉하였다.

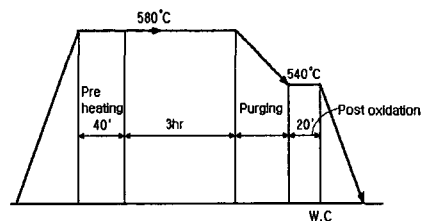
Table. 1 Chemical composition of materials

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	0.20	0.65	0.3	0.016	0.005	1.10	0.21	-	0.30	0.42



Gas atmospheres : 20% CO - 40% H₂ - 40% N₂ + C₃H₈

(a) Carburizing



Gas atmospheres : NH₃ - CO₂ - N₂

(b) Nitrocarburizing

Fig. 1 Heat treatment cycle of carburizing and nitrocarburizing

2-2. 윤활마찰·마멸 실험

본 연구에서는 표면개질 조건의 변화에 따른 변속기 기어 소재의 마멸특성의 비교를 위하여 볼 온 디스크(ball on disk)형 윤활마찰·마멸 실험장치를 사용하였으며 Fig. 3과 같다. 이는 실험재료인 디스크 시험편에 상대재료인 볼 시험편을 압착하여 마찰하는 것으로 볼은 직경 4.76 mm인 순도 99.7% 알루미나 세라믹스(Al_2O_3) 볼을 사용하였고, 디스크는 두 가지로 표면개질하여 산화처리 한 것과 표면의 산화물 층을 제거한 것의 두 가지로 하였다. 이러한 디스크 시험편은 직경 50 mm, 두께 10 mm이며, 실험 전 정밀 연마기를 이용하여 표면조도를 $0.2 \mu m R_{max}$ 로 일정하게 하여 실험하였다.

실험에 사용한 윤활유는 자동차용 3종 SAE 175W인 기어오일을 사용하였으며, 시험편 접촉점 하부에 오일 베스(oil bath)를 설치하고 윤활유는 순환펌프로 시험편 접촉점에 공급하였다. 그리고 실험은 작용하중, 미끄럼속도 및 미끄럼거리를 마찰인자로 설정하였으며 Table 3과 같은 실험조건으로 실험횟수를 최소화하기 위하여 다구찌 기법의 $L_{32}(2^2 \times 4^2)$ 직교배열표를 이용하여 실험을 행하였다.

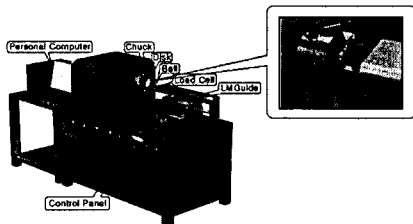


Fig. 3 Schematic diagram of ball on disk type wear tester

Table 3 Experiment conditions

Factors	Experiment condition
Material	NT100, SCM420
Applied load (kgf)	2.5, 5.0, 7.5, 10.0
Sliding speed (mm/sec)	47, 94, 141, 188
Sliding distance (m)	255, 509

2-3. 작동조건에 따른 마멸분 영상처리

윤활 마찰실험 후 발생된 시험편의 마멸분의 마멸체적을 계산하기 위하여 컴퓨터 영상처리를 행하였다. 이것은 실험조건 별로 채취한 윤활유(20ml) 중의 마멸분을 마멸입자 채취여과기에 부착된 멤브레인 필터(공경 $0.45 \mu m$)로 채취하여 각 필터별로 컴퓨터 영상처리를 행하였다[7]. 컴퓨터 영상처리는 반사조명 및 투과조명의 2가지 할로겐램프와 현미경 상부에 부착된 CCD 카메라에 의하여 관측된 영상은 컴퓨터내의 프레임 그래브(frame grabber)에 저장된다. 프레임 그래버는 화소수 640×480 이고, 정방향 1 화소의 길이는 $0.2445 \mu m$ 이다. 컴퓨터 영상처리 시스템의 프레임 그래버의 제어 및 이의 처리는 모두 C++언어(일부는 기계어)로 행하였다.

여기서 실험 후 총 마멸체적의 계산은 마멸입자의 두께를 대표경과 대등하다고 가정하고, 마멸입자의 면적에 이 대표경을 곱하여 총 마멸체적을 추정하였다. 여기서 대표경은 영상처리한 마멸분 한 개 면적의 평방근을 의미한다. 즉, 마멸체적은 마멸분이 분포되어 있는 1 화면내의 하나의 마멸입자체적을 V_{ij} 라 하고, 1 화면내의 입자개수를 n 으로 두었을 때 20화면 전체의 총 마멸체적 V_t 를 식 (1)로부터 구하였다.

$$V_t = \left(\sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^n V_{ij} \right) \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

3-2. 마찰인자에 따른 마멸체적 변화

Fig. 8는 작용하중의 변화에 따른 두 소재간의 마멸체적 변화를 나타내고 있다. 작용하중이 증가할수록 마찰체적은 증가하고 있으며 작용하중 5.0kg까지는 마멸체적의 증가폭이 적으나 그 이상의 작용하중에는 급격히 증가하고 있다. 그리고 작용하중 2.5kg과 5.0kg에서는 칩탄질화 처리한 NT100의 마멸체적이 칩탄 처리한 SCM420

의 마멸체적 보다 적다는 것을 볼 수 있으며 7.5kg 이상에서는 오히려 칩탄질화 처리한 NT100의 마멸체적이 칩탄 처리한 SCM420에 비하여 크다는 것을 볼 수 있다. 이는 작용하중이 7.5kg 이상이 되면 칩탄질화 처리한 NT100의 경화층 최하부까지 마멸이 진행되어 거의 모재 부분이 부분적으로 마멸이 진행되었기 때문이다. 이 결과는 실험완료 후 시험편을 절단하여 현미경조직 검사하여 확인하였다.

따라서 칩탄질화 처리한 NT100의 경우 작용하중 7.5kg 이상의 조건에서는 경화층이 대부분 파괴된다고 생각되며 이 이상의 압력에는 바람직하지 않다고 생각된다. 그러나 대체로 5.0kg 이하의 작용하중에서는 칩탄 처리한 SCM420보다 칩탄질화 처리한 NT100이 보다 우수한 내마멸 특성을 나타내어 준다고 생각된다.

Fig. 9 은 칩탄 처리한 SCM420과 칩탄질화 처리한 NT100의 두 소재에 대한 윤활마찰실험을 통하여 마멸체적에 대한 마찰인자의 영향을 SN비로 나타내고 있다. 두 소재

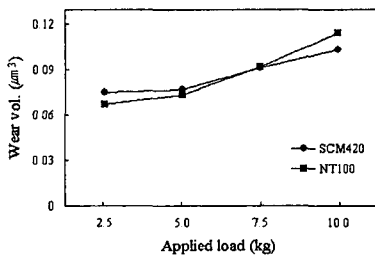


Fig. 8 Variation of wear volume for applied load

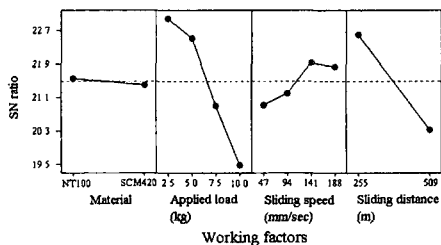


Fig. 9 SN ratio of wear volume with working factors

의 마찰체적에는 작용하중, 미끄럼거리, 미끄럼속도, 마찰소재 순으로 많은 영향을 미치는 마찰인자라 할 수 있다. 그리고 작용하중이 2.5kg일 때, 미끄럼거리가 255m일 때, 미끄럼속도가 141mm/sec일 때, 소재는 NT100일 때가 마멸체적이 가장 적은 조건이라 생각되어진다.

3-3. 회귀분석을 통한 수학적모형

칩탄 처리한 SCM420의 윤활마찰실험한 후 마멸분을 컴퓨터 영상처리하여 마멸체적에 대한 마찰인자의 상관관계를 중회귀분석하여 수학적 모형으로 구축하였다. 추정된 마멸체적의 회귀방정식은 x_1 을 작용하중(kg), x_2 를 미끄럼속도(mm/sec), x_3 를 미끄럼거리(m)라 할 때 다음 식 (2)과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Wear Volume} = 0.0454 + 0.00396 x_1 - 0.000125 x_2 + 0.000082 x_3 \quad (2)$$

이 추정된 회귀방정식으로부터 칩탄 처리된 SCM420은 작용하중(x_1)과 미끄럼거리(x_3)가 증가할수록 마멸체적은 증가하고, 미끄럼속도(x_2)가 증가할수록 마멸체적은 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Table 8 은 칩탄 처리된 SCM420의 마멸체적에 대한 중회귀의 분산분석을 나타낸 것으로 이를 통하여 추정된 회귀방정식의 정도를 측정할 수 있다. 또한 결정계수 R^2 를 통하여 총 변동 중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율을 나타낼 수 있다. 따라서 회귀분석에 의하여 구축된 식 (2)은 Table 8의 P -검정결과 마찰인자의 수준변화에 따른 마멸체적을 충분히 설명되

Table 8 ANOVA of multiple linear regression model for SCM420

Factors	S	ϕ	V	F_0	P
Regression	0.0043917	3	0.0014639	16.10	0.000
Residual Error	0.0010912	12	0.0000909		
Total	0.0054830	15			

어지며 결정계수 R^2 는 80.1%의 정도를 나타내었다. 그리고 MSE 가 9.09×10^{-5} 로 데이터의 산포가 작으므로 신뢰성이 양호하다고 생각된다.

침탄질화 처리한 NT100의 중회귀분석에 의한 수학적 모형은 x_1 을 작용하중(kg), x_2 를 미끄럼속도(mm/sec), x_3 를 미끄럼거리(m)라 할 때 다음 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Wear Volume} = 0.0186 + 0.00636 x_1 - 0.000109 x_2 + 0.000102 x_3 \quad (3)$$

이 추정된 회귀방정식으로부터 침탄질화 처리된 NT100은 마찰인자의 수준변화에 따른 경향은 SCM420과 같다고 볼 수 있다. 그러나 회귀분석의 상수값이 NT100이 적고 작용하중(x_1)과 미끄럼거리(x_3)에 의한 마멸체적의 크다는 것을 나타내어 주고 있다.

Table 9은 침탄질화 처리된 NT100의 마멸체적에 대한 중회귀의 분산분석을 나타낸 것으로 이를 통하여 추정된 회귀방정식의 정도를 측정할 수 있다. 회귀분석에 의하여 구축된 식 (3)은 Table 9의 P -검정결과 마찰인자의 수준변화에 따른 마멸체적을 충분히 설명되어지며 결정계수 R^2 는 89.2%의 정도를 나타내었다. 이는 SCM420에 비하여 정도가 높다고 할 수 있다. 그리고 MSE 가 8.68×10^{-5} 로 신뢰성이 양호하다고 생각된다.

따라서 회귀분석을 통한 침탄 처리된 SCM420과 침탄질화 처리된 NT100의 운할 마찰에 있어서 회귀분석을 통한 수학적 모형을 구축할 수 있었으며 구축된 수학적 모형은 NT100이 SCM420에 비하여 높은 정도와 신뢰성을 나타내었다. 그리고 SCM420

Table 9 ANOVA of multiple linear regression model for NT100

Factors	S	ϕ	V	F_0	P
Regression	0.0085811	3	0.0028604	32.95	0.000
Residual Error	0.0010417	12	0.0000868		
Total	0.0096228	15			

에 비하여 NT100이 마찰인자의 영향을 많이 받고 있다.

3-4. 실험을 통한 예측 검정

전술한 회귀분석을 통하여 구축된 회귀식을 이용하여 미끄럼거리를 증가시켰을 경우 예측마멸량과 실제 마멸량을 검정하기 위하여 미끄럼거리를 1018m까지 설정하고 그 외의 마찰인자는 동일하게 설정하여 실험을 실시하였다.

Fig. 10는 미끄럼거리 1018m까지 침탄 처리한 SCM420에 대한 작용하중 변화에 따른 마멸체적을 평균과 표준편차 구간으로 나타내고 있으며 전술한 수학적 모형인 회귀식 (2)에 의한 예측 마멸체적을 나타내고 있다. 작용하중이 증가할수록 마멸체적은 비례적으로 증가하고 있으며 마멸체적의 편차도 일정하게 발생되고 있다는 것을 볼 수 있다. 이는 작용하중의 증가에 따른 마찰면의 온도상승과 마찰면의 표면하부이 전단강도의 저하 때문이라 생각되며, 마멸체적의 편차가 작용하중의 변화에도 일정하게 분포하고 있다는 것은 작용하중 이외의 마찰인자의 영향이 적음의 결과라 생각된다. 그리고 회귀식에 의하여 마멸체적을 계산하여 평균한 그래프에서 실제 실험한 마멸체적의 평균과 다소 오차는 있으나 표준편차 범위에 안정적으로 나타나고 있으므로 회귀식에 의한 마멸체적의 예측이 가능하며 그 신뢰성도 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11는 미끄럼거리 1018m까지 침탄질화 처리한 NT100에 대한 작용하중 변화에 따른 마멸체적을 나타내었고 회귀식 (3)에 의한 예측 마멸체적을 나타내고 있다. 작용하중의 증가에 따른 마멸체적은 증가하고 있으며 Fig. 10의 침탄 처리한 SCM420에 비하여 증가폭이 크다는 것을 알 수 있으며 작용하중이 7.5kg이상 일 때 침탄질화 처리된 경화층의 마멸이 보다 빨리 진행되어 모재 부분이 부분적으로 연삭마멸이 진행되어 SCM420에 비하여 마멸체적이 크게 발생된다고 생각된다. 그리고 회귀식에 의한 예측 마멸체적에 있어서는 실험을 통한 마멸체적의 평균과 거의 일치하고 있다는 것은 SCM420

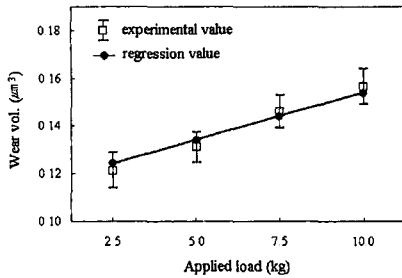


Fig. 10 Variation of wear volume for applied load for carburized SCM420 (sliding distance : 1018m)

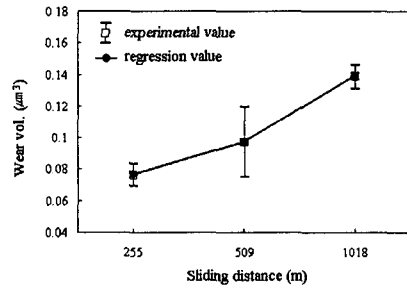


Fig. 12 Variation of wear volume for sliding distance for carburized SCM420

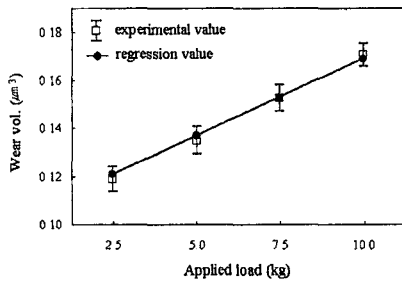


Fig. 11 Variation of wear volume for applied load for nitrocarburized NT100 (sliding distance : 1018m)

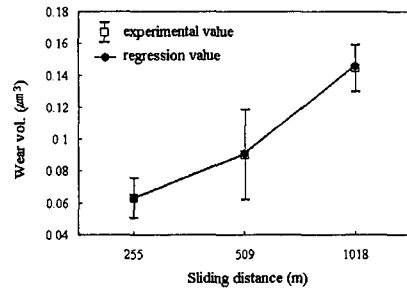


Fig. 13 Variation of wear volume for sliding distance for nitrocarburized NT100

에 비하여 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

Fig. 12은 미끄럼거리의 증가에 따른 침탄 처리된 SCM420의 마멸체적을 나타내고 있으며 회귀식 (2)에 의한 예측 마멸체적을 나타내고 있다. 미끄럼거리가 증가할수록 마멸체적은 증가하고 있으며 미끄럼거리 509m에서 표준편차의 구간의 폭이 크게 발생되고 있다. 이는 미끄럼거리가 증가할수록 마찰면에서 탈락된 마멸입자에 의한 연삭마멸의 진행과 마멸면의 증가에 따른 결과라 생각되며 미끄럼거리가 509m에서 표준편차 구간의 범위가 크게 나타나는 것은 마찰인자인 작용하중과 미끄럼속도에 의한 영향으로 인한 결과라 생각된다. 그리고 회귀식에 의한 예측 마멸체적은 실험치와 거의 일치하고 있다. 이는 회귀식에 의한 마멸체적의 예측이 신뢰성이 높다는 것을 나타내어 주고 있다.

Fig. 13은 미끄럼거리의 증가에 따른 침탄질화 처리된 NT100의 마멸체적을 나타내고 있으며 회귀식 (3)에 의한 예측 마멸체적을 나타내고 있다. 미끄럼거리에 따른 마멸체적은 침탄 처리된 SCM420과 유사한 경향을 나타내고 있으며 회귀식에 의한 마멸체적의 예측도 신뢰성이 높다는 것을 나타내고 있다. 그리고 미끄럼거리가 1018m까지의 마멸체적에 있어서 침탄 처리한 SCM420과 침탄질화 처리한 NT100은 큰 차이를 보이지 않으나 NT100이 마멸체적의 표준편차의 범위가 크다는 것을 볼 수 있다.

따라서 침탄 처리한 SCM420과 질화침탄 처리한 NT100의 윤활마찰실험을 통한 마멸체적의 변화에 있어서 작용하중 5.0kg이하에서는 침탄질화처리한 NT100이 적게 발생하고 7.5kg 이상에서는 침탄 처리한 SCM420이 적게 발생된다. 그리고 본 연구에서 회귀분석을 통한 수학적 모형인 회귀식에 의한 마멸체적의 예측에 있어서

NT100이 SCM420 모두 높은 신뢰성을 나타내었다.

4. 결 론

기계구조용 특수강인 두 소재의 작동상태 예지 및 판정을 위한 마멸분의 형태식별을 행할 목적으로 윤활마찰·마멸 실험장치를 이용하여 다양한 작동조건에 따라 발생하는 마멸체적을 통계적 분석을 통하여 마찰인자와의 상관관계를 수학적 모형으로 구축함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마멸체적에는 마찰인자인 작용하중, 미끄럼거리, 미끄럼속도 순으로 영향을 미치고 있었다.
2. 작용하중이 5 kg이하에서는 침탄질화 처리한 NT100이 침탄 처리한 SCM420 보다 마멸체적이 적으며 7.5kg이상에서는 SCM420이 적게 발생한다.
3. 회귀분석을 통하여 마찰인자에 대한 마찰체적변화를 수학적 모형인 회귀식으로 구축할 수 있었으며 신뢰성이 높게 나타났다.
4. 실험계획법을 이용한 기어 소재의 마찰특성 및 마멸체적의 판정 및 예측이 가능하였다.

참고문헌

1. 박순철, "기어의 손상과 대책," 월간기계설계, pp.44-54, 1990.
2. Y. Ko et al, "Measurements of Power Losses in Automobile Drive Train," SAE, Paper, 840054.
3. Dawes C., "Nitrocarburising and its influence on design in the automotive sector", Heat Treatment of Metals, 18, pp. 19-30, 1991.
4. Dawes C. and Tranter D. F., "Nitrotec surface treatment its development and application in design and manufacture of automobile component", Heat Treatment of Metals, 9, pp. 85-90, 1982.
5. R. V. Lenth, "Quick and Easy Analysis of Uncomplicated Factorials", Technometrics,

Vol. 31, pp. 469~473, 1989.

6. T. M. Little, "Interpretation and Presentation of Result", HortScience, Vol. 19, pp. 637~640 1981.
7. 서영백, 박홍식, 전태욱, 김형자, "화상처리에 의한 기계윤활운동면의 마멸분 형태 해석", 한국윤활학회지, 제12권, 제3호, pp.72-78, 1996.