

발전소용 유압기기의 마모특성 연구§

이용범^{*†} · 이기천^{*} · 장무성^{**}

* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

Study of Wear Characteristics of Hydraulic Equipment Used in Power Plants

Yong Bum Lee^{*†}, Gi Chun Lee^{*} and Mu Seong Chang^{**}

* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received April 12, 2013 ; Revised July 1, 2013 ; Accepted July 2, 2013)

Key Words: Hydraulic Equipment(유압 기기), Wear Characteristics(마모 특성), Design of Experiments(실험계획법), Full Factorial Design(완전요인실험)

초록: 발전소에서 발생하는 고장은 인명 및 재정적 손실에 대한 파급효과는 매우 크므로 발전소에 사용되는 유압기기의 신뢰성은 특히 중요하다. 본 연구에서는 발전소용 유압밸브의 스푼과 슬리브 재질을 사용하여 시편을 제작, 열처리한 후 인산에스테르계열 유압작동유 침전상태에서 다양한 조건에서 실험한다. 시편의 마모량에 영향을 주는 인자들의 유의성을 평가하기 위해 2³ 완전 요인 실험계획법을 적용하였으며, 고려된 인자들은 하중, 속도, 온도이다. 실험결과로부터 마모량에 대한 주효과 및 2 인자 교호작용에 대한 유의성 평가를 실시한 후 마모량과 인자들간의 수학적 모델을 도출하고자 한다.

Abstract: The reliability of hydraulic equipment used in power plants is especially important because failures that occur in the power plant can have a great ripple effect on human lives and financial losses. In this study, specimens using the materials used in the spool and sleeve of hydraulic valves of power plants have been produced, heat-treated, and tested under the precipitation conditions of phosphate ester hydraulic fluid with a variety of conditions. 23 full factorial designs have been applied to evaluate the significance of factors that affect the wear loss of the specimen, specifically, the load, velocity, and temperature. The significance evaluation was performed on the main effects and two-way interactions for wear loss based on the experiment results, and the mathematical equations between the wear loss and the three factors were derived from the analysis results.

1. 서 론

원자력 및 화력발전소에서는 고온의 스팀터빈 출력제어와 비상정지 등을 위하여 다수의 유압장치를 사용하고 있다. Fig. 1 과 같이 스팀 제어밸브는 유압 서보 액추에이터로 구동되며 고속 (1800~3600 rpm)으로 회전하는 터빈이나 발전계통에 이상이 발생했을 때는 터빈의 과속 방지를 위하여 터빈에 공급되는 스팀을 즉시 차단해야 하는 것으로서 매우 높은 신뢰성이 요구된다. 고온에서 사용되는 유압기기들은 화재방지를 위하여 인화점이 높은 난연성 유압작동유인 인산에스테르(phosphate

ester)계열의 Fyrquel EHC 을 사용한다. 그러나 인산에스테르계열의 유압작동유가 누유 되어서 스팀라인과 접촉하여 고온으로 기화되었을 때 독성을 내포하고 있다. 따라서 선진국들에서는 친환경 오일(EcoSafe oil)을 개발하여 사용 중에 있다. 그러나 국내의 일부 발전소도 친환경오일로 유압작동유 교체를 검토하였지만 유압기기의 마모고장을 우려하여 시도 하지 못하는 실정이다.

김남석 등⁽¹⁾은 유압 피스톤 펌프의 피스톤에 사용되는 SACM645 소재를 다양한 방법으로 열처리한 후 건조상태⁽¹⁾와 상온 및 고온 유회상태⁽²⁾에서 마모 특성을 연구하였다. 김범석 등^(3,4)은 유압 펌프의 마모 특성 향상을 위해 다양한 종류의 PVD 박막에 대한 영향을 평가하였다. 이용범 등⁽⁵⁾은 유압 펌프 및 모터의 정압베어링 소재로 시편을 제작하여 건식 및 습식에서 마찰계수와 마모량을 비

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013 년도 춘계학술대회 (2013. 3. 27.-29., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, lyb662@kimm.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

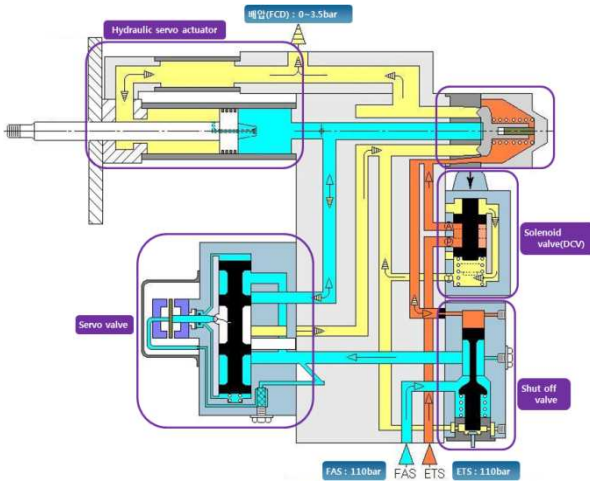


Fig. 1 Flow diagram of turbine power control device

교하였다. 김성대와 이상윤⁽⁶⁾은 유압 펌프의 소재인 AISI 4340의 플라즈마 질화의 최적조건을 찾기 위해 가스비, 온도, Pulse 파워 인자를 고려하였다. 또한 EHA(Electro-Hydrostatic actuator)용 유압 펌프의 CrN 박막의 윤활을 향상시키기 위해 Si 함량에 따른 마모 특성을 분석하였다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 시험시간과 비용을 줄이고, 마모의 영향을 확인하기 위해 발전소용 유압밸브의 스푼(spool)과 슬리브(sleeve) 재질을 사용하여 시편을 제작한다. 이후 시편을 열처리한 후 인산에스테르 계열 유압작동유 침전상태에서 실험한다. 따라서 본 연구의 마모량 결과는 향후 친환경 오일에서의 시험결과와 비교하는데 있어서 기준이 되어 오일에 따른 마모량의 차이를 확인할 수 있을 것이다.

그리고 시편의 마모량에 영향을 주는 인자들의 유의성을 평가하기 위해 2³ 완전 요인 실험계획법을 적용하였으며, 고려된 인자들은 하중, 속도, 온도이다. 실험결과로부터 마모량에 대한 주효과 및 2인자 교호작용에 대한 유의성 평가를 실시한 후 마모량과 인자들간의 수학적 모형을 도출하고자 한다.

2. 유압기기 특성 및 시험장비

2.1 유압기기의 특성

유압기기의 성능은 용적효율과 기계효율의 곱으로 표시되는데 기계효율저하의 대부분은 마찰에 의해 발생되고, 마찰이 크면 마모가 증가하여 유막(oil film)을 파괴함으로써 용적효율을 저하시켜 고장이 된다.⁽⁵⁾ 따라서 유압기기의 성능향상과 고장발생을 줄이기 위해서는 최적의 정압 배어링 설계나 윤활설계를 하고, 배어링금속의 사용이나 고

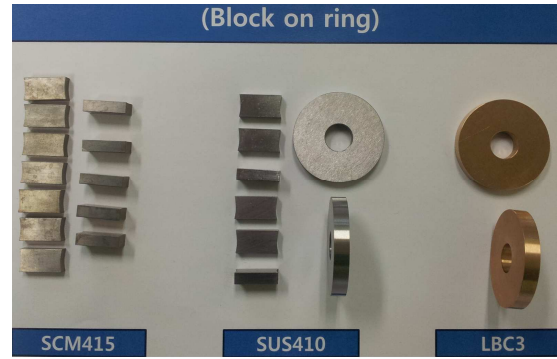


Fig. 2 Samples of friction & wear test

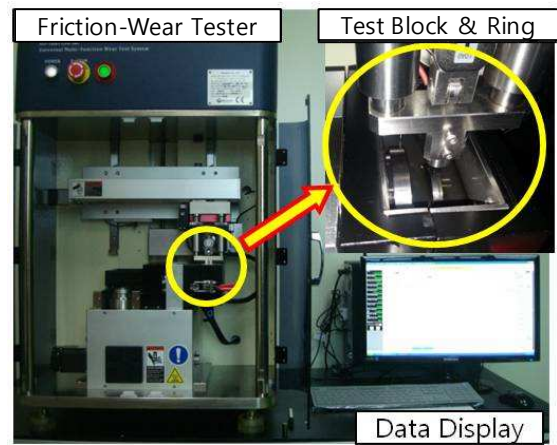


Fig. 3 Test equipment of the friction & wear test

강도 코팅 및 열처리를 하며, 특히 유압작동유의 다양한 첨가제를 개발하여 윤활을 개선하고 있다.

2.2 시험 샘플

윤활유 변경이 마모에 미치는 영향을 분석하기 위해 발전소용 유압밸브의 스푼과 동일한 재질인 SCM 415로 블록(block) 시편을 제작하였고, 밸브 슬리브와 동일한 재질인 SUS 410으로 링(ring) 시편을 Fig. 2와 같이 제작하였으며, 블록 시편의 크기는 16W-10L-5H 이고, 링 시편은 지름 40mm-두께 6mm이다.

시험윤활유는 최근 미국에서 친환경 오일로 개발된 EcoSafe EHC 46을 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 1과 같고 온도변화에 따른 점도 변화는 Fig. 4와 같다.

2.3 시험 장비

마찰 마모 시험장비는 Fig. 3과 같이 핀-디스크(pin on disc) 시험, 블록-링(block on ring) 시험 및 왕복동(reciprocating) 시험이 가능하며, 고속 시험시 오일 침전이 가능한 블록-링 모듈을 사용하여

Table 1 Physical properties of the test fluid

Viscosity	@ 100 °F, SUS	220
	@ 210 °F, SUS	53.3
Viscosity Index		185
Pour Point, °F		- 55
Density (lbs./gal) @ 60 °C		8.2
Flash Point, °F, COC		525

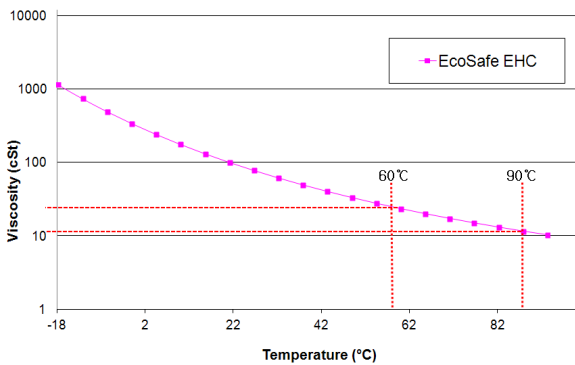


Fig. 4 Viscosity index of the test fluid

시험하였다.

마찰 마모 시험장비는 Pin on disc, Block on disc의 Test Mode 가 있으며, 초기접촉 및 부하하중은 고정밀(200N +0.001) 하중센서의 출력 값으로 계측하였으며, 마모량은 초정밀(50mm±0.0001) 비접촉식 레이저변위센서를 이용하여 계측하였다. 압력, 온도, 속도 및 마모량에 대한 시험장비 계측은 Fig. 4 와 같다.

3. 실험계획 및 분석결과

3.1 실험계획법

실험이란 출력(output)의 변화에 대한 원인을 관찰할 수 있도록 공정이나 시스템의 입력변수(input)에 계획된 변화를 가하는 일련의 시험을 말한다. 실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 특성치에 대해서 이에 영향을 미치고 있는 원인이 어떻게 관계되어 있는가를 이론적으로 또는 경험적으로 명백히 밝히기는 힘들다. 일반적으로 특성치에 영향을 미치는 원인이 매우 많고, 원료, 실험장치, 숙련도 등의 차이, 환경조건의 변동, 표본오차 등에 의해서도 영향을 받기 때문이다.⁽⁸⁾

일반적으로 우리가 실험을 통해 얻고자 하는 주된 목적은 아래와 같다.

- 어떤 원인이 특성치에 유의한 영향을 주는지, 그리고 그 정도가 어느 정도인지 확인

Table 1 2³ full factorial design

No	Load (N)	Speed (rpm)	Temperature (°C)	Sample Size
1	90	300	60	3
2	150	300	60	3
3	90	400	60	3
4	150	400	60	3
5	90	300	90	3
6	150	300	90	3
7	90	400	90	3
8	150	400	90	3

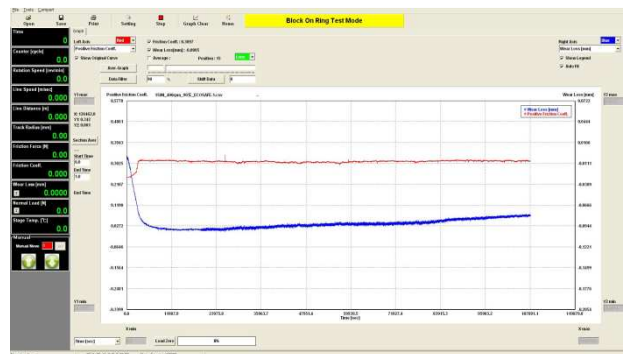


Fig. 4 Test results of the friction & wear test

- 유의한 영향을 주는 원인들이 어떤 조건일 때 가장 원하는 특성치를 얻을 수 있는지 확인
여기서, 많은 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 원인을 인자(factor)라고 부른다.

3.2 실험인자와 수준 결정

본 연구에서 특성치는 시편의 마모량(mm)이며, 마모량에 영향을 주는 인자는 과거 경험을 통해서 하중(N), 속도(rpm), 온도(°C)로 선정하였다. 각 인자의 수준 수는 2 개이며, 하중의 수준은 90N, 150N 이며, 속도의 수준은 300rpm 과 400rpm, 그리고 온도의 수준은 60°C와 90°C로 정하였다. 하중과 속도 크기의 결정은 한국기계연구원에서 보유하고 있는 복합 마찰 마모시험장비의 최대 사양으로 결정하였고, 유압유의 온도는 발전소의 실사용 조건을 고려하였다.

3.3 2³ 완전 요인 실험계획

실험계획의 선택은 실험의 목적과 예산 등을 고려하여 스크리닝 실험, 부분 요인 실험, 완전 요인 실험, 반응표면실험 등을 선택할 수 있다.

요인 실험은 인자들의 식별에 상당한 유동성을 제공하고 인과 관계를 파악하는데 사용하는 설계 기법 중 한 종류이다. 가장 많은 양의 정보는 완전 요인 실험에서 얻을 수 있다. 이를 위해서는 많은 자원(시간과 비용)이 필요하다. 만약 4 또는 5 가지 인자 이상을 연구한다면 필요한 실험 수는 크게 증가한다. 부분 요인 실험은 적은 실험으로 많은 수의 인자를 연구할 때 사용된다. 일부 고차의 교호 작용에 대한 정보를 구할 수 없기 때문에 얻을 수 있는 정보량은 완전 요인 실험에 비해 감소한다. 스크리닝 실험은 6 개 이상의 많은 인자가 있는 경우에 중요 인자를 식별하기 위해 사용하며, 반응표면실험은 2~3 개의 중요 인자를 식별한 다음 각 인자들의 최적조건을 찾기 위해 사용된다.

본 연구에서는 3 개의 인자를 고려하였으며, 또한 비교적 시간 및 샘플에 여유가 있으며, 또한 마모량에 영향을 주는 인자들의 주효과 외 2 인자 교호 작용을 추정하기 위해 2³ 완전 요인 실험계획을 사용하였다. 즉, 인자의 수는 3 개, 각 인자의 수준 수는 2 개이다. 본 연구의 2³ 완전 요인 실험계획은 Table 1 과 같으며,⁽⁸⁾ 각 실험조건에서 3 회 반복하여 총 24 개의 시편을 실험하였다. 각 조건에서 시험한 샘플의 마모량은 Table 2 와 같다. Table 2 의 시험조건 번호는 Table 1 의 번호와 동일하다. 각 조건의

Table 2 Wear of each test condition

Test condition	Wear (mm)
1	0.0212 / 0.0193 / 0.0233
2	0.0517 / 0.053 / 0.0513
3	0.0294 / 0.0342 / 0.045
4	0.0554 / 0.0578 / 0.0554
5	0.0609 / 0.0678 / 0.0575
6	0.0785 / 0.079 / 0.0861
7	0.0699 / 0.0721 / 0.074
8	0.0914 / 0.0969 / 0.0914

Table 3 Estimated effect and coefficients for Wear

Term	Effect	Coefficient	T	P value
Constant		0.058721	89.84	0.000
A	0.023875	0.011937	18.26	0.000
B	0.009175	0.004587	7.02	0.000
C	0.036808	0.018404	28.16	0.000
A*B	-0.00106	-0.00053	-0.81	0.431
A*C	-0.00369	-0.00185	-2.82	0.013
B*C	0.001808	0.000904	1.38	0.187
A*B*C	0.002108	0.001054	1.61	0.128

대표 샘플의 마모 부위 사진은 Fig. 5 와 같다.

3.4 분석결과

최초 분석은 총 24 개의 데이터에 대해서 실시하였으며, 분석결과로부터 1 개의 이상치(3 번 조건)가 확인되어 제외한 후 분석을 다시 실시하였으며, 분석결과는 Table 3 과 같다. 여기서, Table 3 의 A 는 하중, B 는 속도, C 는 온도를 의미한다.

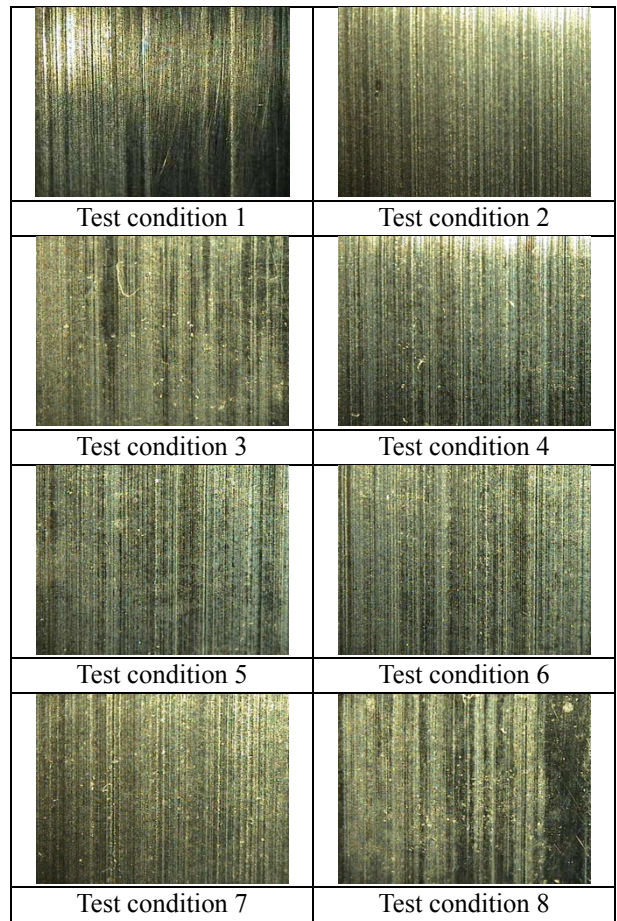


Fig. 5 Wear surface of each test condition

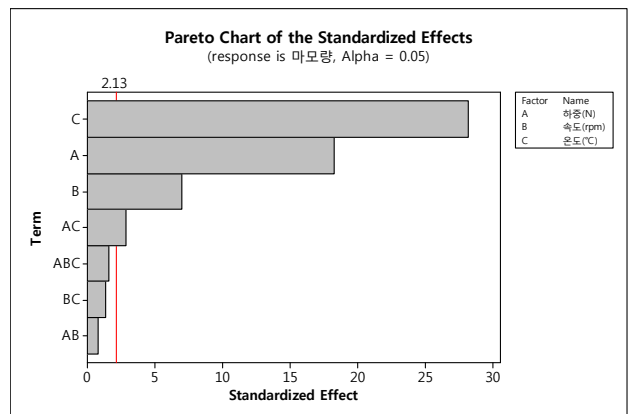


Fig. 6 Pareto chart of effects for wear

Table 4 Estimated effect and coefficients after pooling for Wear

Term	Effect	Coefficient	T	P value
Constant		0.058685	84.66	0.000
A	0.023946	0.011973	17.27	0.000
B	0.009104	0.004552	6.57	0.000
C	0.036880	0.018440	26.60	0.000
A*C	-0.003763	-0.001882	-2.71	0.014

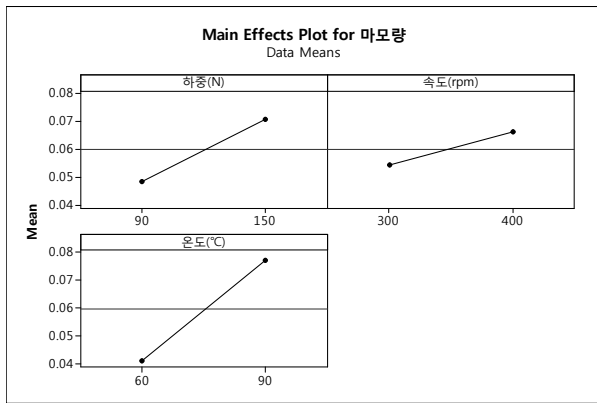


Fig. 7 Main effects plot for wear

주효과 및 교호작용의 유의성 판단은 유의수준 5%를 기준으로 하였다. 즉, P value가 0.05보다 작으면 주효과 및 교호작용은 유의한 것으로 판단한다. Table 3의 결과로부터 주효과와 A*C(하중*온도)의 2인자 교호작용만 유의함을 알 수 있다. Table 3과 동일하게 각 효과에 대한 파레토 그림인 Fig. 6을 통해서도 각 효과에 대한 유의성을 판단할 수 있다. 그림에서 붉은 선의 오른쪽에 있는 효과들은 유의한 것으로 볼 수 있다. 파레토 그림을 통해서 온도, 하중, 속도, 온도와 하중의 교호작용 순으로 마모량에 영향을 주는 것을 알 수 있다. Table 3에서 Effect는 각 인자의 수준 차이에 따른 효과를 나타내며, Coefficient는 마모량과 인자들간의 수학적 모형의 계수이며, T는 t 분포의 검정통계량이다. 본 연구의 통계적인 분석은 MINITAB 프로그램을 사용하였다. Table 3과 Fig. 6의 결과로부터 유의하지 않은 2, 3차 교호작용은 오차 항에 풀링 한 후 최종결과를 얻을 수 있으며, 그 결과는 Table 4와 같다. 분석결과로부터 마모량에 영향을 주는 인자는 하중, 속도, 온도, 그리고 하중과 온도의 교호작용이며, 영향의 정도는 Effect의 크기로 해석할 수 있다. 따라서, 온도가 마모량에 가장 큰 영향을 주며, 다음으로는 하중, 속도, 하중과 온도의 교호작용 순이다. 그리고 마모량에 대한 주효과 및 교호작용에 대한 플롯은 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다.

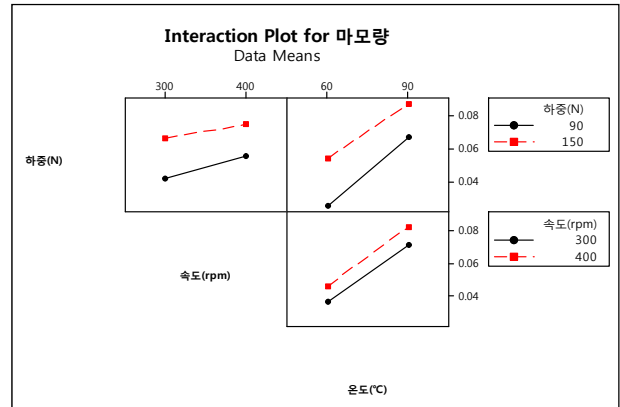


Fig. 8 Interaction plot for wear

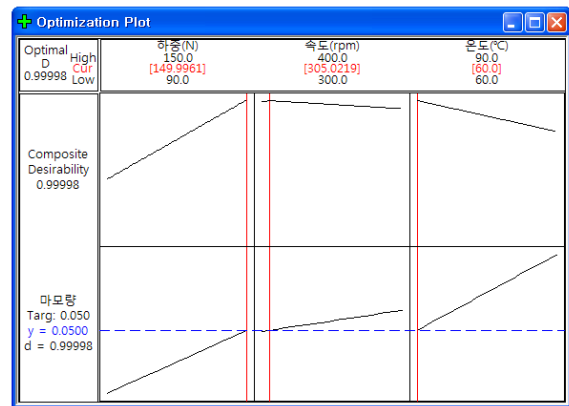


Fig. 9 Optimization plot for wear = 0.05

마모량에 대한 주효과 플롯(Fig. 7)에서 모든 인자의 높은 수준에서 마모량이 많으며, 특히 온도에서 수준 차이에 따른 마모량 차이가 가장 크다. 2인자 교호작용 플롯(Fig. 8)에서 2개의 선이 그래프 상에서 교차되거나 2개의 선을 그래프 밖으로 연장하여 교차하더라도 교호작용이 유의한 것으로 볼 수 있다. 반대로 2개의 선이 서로 평행하면 2인자 교호작용은 유의하지 않는 것으로 본다.

본 연구에서는 2인자 교호작용 플롯으로 교호작용의 유무를 쉽게 알기는 어려운 것을 알 수 있다. 이 경우 Table 4와 같이 수치적인 분석 결과를 참조할 수 있다.

분석결과로부터 마모량 Y와 인자들간의 수학적 모형을 도출할 수 있으며, 식 (1)과 같다.⁹⁾ 식 (1)은 코드화(coded)되어 있으며, 즉 각 인자의 높은 수준은 1, 낮은 수준은 -1로 대입하여 Y를 추정한다. 이러한 수학적 모형에 의해 설명되는 변동 비율인 결정계수(R²)는 98.3%로 높게 나타났다.

$$Y = 0.0587 + 0.012 \text{ 하중} + 0.0046 \text{ 속도} + 0.0184 \text{ 온도} - 0.0019(\text{하중} \times \text{온도}) \quad (1)$$

식 (1)를 이용하여 하중 150N (1), 속도 400rpm (1), 온도 90℃ (1)의 마모량을 계산하면 약 0.092 mm 가 된다. 그 외 다양한 실험조건 범위 내에서의 마모량도 추정할 수 있다.

MINITAB 분석결과에는 코드화된 값 이외에 언코드(uncoded)된 계수 값도 동시에 제공한다. 따라서 코드화된 값(1 또는 -1)이 아니라 실제 수준값을 입력할 수 있는 관계식은 얻을 수 있으며, 식 (2)와 같다.

$$Y = -0.1509 + 0.0007 \text{ 하중} + 0.0001 \text{ 속도} + 0.0017 \text{ 온도} - 0.000004(\text{하중} * \text{온도}) \quad (2)$$

만약 임의의 마모량을 만족하는 3 가지 인자의 최적 조건을 결정하기 위해서는 MINITAB 의 최적화 플롯(optimization plot)을 사용할 수 있다. 가령 본 연구에서 마모량이 0.05 가 되는 하중, 속도, 온도의 조건은 Fig. 9 를 참고하면 하중은 약 150N, 속도 305rpm, 온도는 60℃가 된다.

최적화 플롯(Fig. 9)에서 d(desirability) 값은 목표 값에 대한 달성 정도로 볼 수 있으며, 최대값은 1 이며, 최소값은 0 이다. 플롯의 붉은 선을 조정하여 각 인자의 수준을 조정할 수 있으며, 그에 따라 d 값을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 발전소용 유압밸브의 스펠과 슬리브 재질을 사용하여 시편을 제작한 후 인산에스테르계열 유압작동유 침전상태에서 실험하였다. 시편의 마모량에 영향을 주는 인자로 하중, 속도, 오일온도를 고려하였으며, 2³ 완전 요인 실험을 실시하였다. 실험계획 분석결과로부터 주효과(하중, 속도, 온도)는 모두 마모량에 유의한 영향을 주었으며, 2 인자 교호작용 중에서는 하중과 온도의 교호작용만 유의한 영향을 미쳤다.

마모량에 유의한 인자들 중에서 가장 큰 영향을 주는 인자는 유막 두께에 영향을 주는 오일의 온도였으며, 다음으로는 하중, 속도, 하중과 온도의 교호작용 순이다. 그리고 식 (1) 또는 (2)와 같이 마모량과 인자들간의 수학적 모형을 도출하였으며,

최적화 플롯을 이용하면 목표 마모량에 대한 최적 조건을 알 수 있다.

본 연구의 분석결과로부터 향후 가속시험을 실시할 때, 시험여건 상 고려할 수 있는 스트레스 인자 수가 2 개라면 온도와 하중을 고려할 수 있다. 또한 본 연구의 마모량 결과는 향후 친환경 오일에서의 시험결과와 비교하는데 있어서 기준이 되어 오일에 따른 마모량의 차이를 확인할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Kim, N. S., Kim, H. S., Seong, K. Y., Ahn, S. H. and Nam, K. W., 2009, "A Study on Wear Property of Oil Hydraulic Pump Material," *The Journal of KSOE*, 23(3), pp. 30~34.
- (2) Kim, H. S., Kim, N. S., Seong, K. Y., Ahn, S. H. and Nam, K. W., 2009, "A Study on Wear Property of SACM645 Material in Lubrication Conditions," *The Proceedings of KSPSE*, pp. 372~376.
- (3) Kim, B. S., Kim, J. T. and Lee, S. Y., 2006, "Study on the Tribological Property Improvement of Hydraulic Pump Parts by Different PVD Thin Film," *The Proceedings of KISE*, p. 159.
- (4) Kim, B. S., Kim, J. T. and Lee, S. Y., 2007, "Improvement of Tribological Properties of Cr-X-N(X=Si, Zr) Coatings Deposited on Hydraulic Pump Part," *The Proceedings of KISE*, pp. 59~60.
- (5) Lee, Y. B., Kim, K. M. and Park, J. H., 2012, "Analysis on the Friction and Wear Characteristics of Materials for Hydraulic Pump and Motor," *The Proceedings of the KSME*, pp. 227~228.
- (6) Kim, S. D. and Lee, S. Y., 2003, "Development of Surface Treatment Technique for the Improvement of Wear Characteristics on EHA Hydraulic Pump," *The Proceedings of KISE*, pp. 59~60.
- (7) Kim, S. D. and Lee, S. Y., 2004, "Study on the Tribological Property Improvement of EHA(Electro Hydrostatic Actuator) Pump Parts by Cr-Si-N Coatings," *The Proceedings of KISE*, pp. 125~126.
- (8) Park, S. H., 1997, "Modern Design of Experiment," *Minyoungsa*, pp. 356~365.
- (9) MINITAB Inc., 2010, MINITAB 16 Software StatGuide