

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.4.067>

흑연 씬의 비마모율 예측에 관한 수학적 모델 개발

김연욱^a · 김재훈^{a,*} · 박성환^b · 이환규^b · 김범근^c · 이성범^c · 곽재수^d

Development of Mathematical Model to Predict Specific Wear Rates of Graphite Seal

Yeonwook Kim^a · Jaehoon Kim^{a,*} · Sunghan Park^b · Hwangyu Lee^b ·
Beomkeun Kim^c · Seongbeom Lee^c · Jae Su Kwak^d

^aSchool of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Korea

^bAdvanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea

^cDepartment of Mechanical & Automotive Engineering, Inje University, Korea

^dDepartment of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

*Corresponding author. E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

ABSTRACT

The dry sliding wear behavior of graphite that is used as the sealing material to cut off hot gas was evaluated as a function of applied load, sliding speed and temperature. The reciprocating wear tests were carried out at room temperature and elevated temperatures. An attempt has been made to develop a mathematical model by response surface methodology and an analysis of variance technique was applied to confirm the validity of the developed model. Also, the wear mechanism was compared through the observation of the worn surface by SEM analysis.

초 록

고온고압의 밸브에서 연소가스의 유입을 방지하는 흑연 씬은 밸브 축의 구동으로 인한 마찰 및 마모에 노출된다. 흑연 씬의 마모로 인해 고온 가스 제어가 불가능해지기 때문에 씬의 마모 특성을 예측하는 것은 매우 중요하다. 본 논문은 비마모율을 마모 특성에 대한 척도로 설정하고 접촉하중, 미끄럼 속도, 온도 등을 변수로 하여 흑연의 왕복동 마모 시험을 수행하였다. 반응표면분석법에 근거하여 실험계획을 정립하고 시험 결과에 대하여 분산분석법을 통하여 유효한 수학적 모델을 제시하였다. 또한, 마모된 표면의 SEM 분석을 통해 특정 조건에서의 마모 메커니즘을 분석하고 비교하였다.

Key Words: Graphite(흑연), Reciprocating Wear Test(왕복동 마모 시험), Specific Wear Rate(비마모율), Response Surface Methodology(반응표면분석법), Analysis of Variance(분산분석법)

Received 9 December 2013 / Revised 4 July 2014 / Accepted 9 July 2014

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 추계학술대회(2013. 12. 4-5, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

내마모성이 뛰어난 흑연은 마찰 마모 기구에

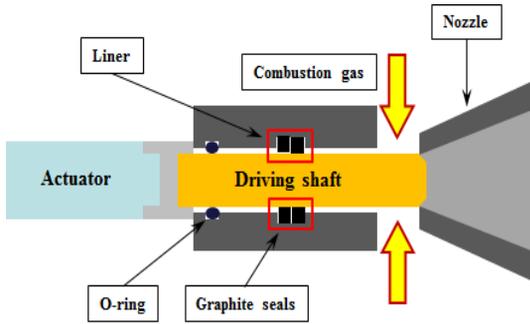


Fig. 1 The gas control valve system.

다양하게 적용되고 있다. 흑연이 갖고 있는 층상 결합구조로 인해 상대적으로 층상의 공유결합에 비해 층간 Van der Waals 결합력이 약해 전단이 용이하다. 이러한 이유로 흑연은 고체윤활제로도 사용되고 있다. 또한, 흑연이 갖고 있는 열분해와 열흡수같은 열적 특성 역시 뛰어나며 고온에서 변형이 적어 고온 환경에 적합하다[1,2]. 또한, 흑연 쉘은 고온의 가스를 조절하는 밸브에서 구동축(Driving shaft)과 라이너(Liner) 사이에 위치하면서 연소가스의 유입을 막는 기밀의 역할을 한다. Fig. 1은 구동기(Actuator)와 구동축 및 라이너로 구성된 가스 조절 밸브 시스템을 나타낸다. 구동축의 지속적인 움직임으로 인해 흑연 쉘은 마모가 발생하고, 마모가 지속되어 쉘의 기능을 잃게 되면 고온의 가스 차단이 어려워 구동기에 이상이 발생해서 전체 시스템의 문제로 이어진다. 국내·외적으로 흑연의 마모 특성에 관한 연구는 다양하게 발전되어 왔다. 주로 원자력발전에 흑연 구조물이 많이 사용되기 때문에 핵연료의 피복 간 마찰·마모 등이 연구되었으며 [3-5], 흑연의 첨가에 따른 내마모성 향상에 대한 연구가 주를 이뤄왔다[6,7]. 하지만 추진기관에서 사용되는 흑연 쉘의 형상을 고려한 마모 시험은 그 예가 많지 않으며, 마모의 특성상 마찰 상대 소재에 대하여 다른 결과를 나타낼 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 흑연 쉘의 작동 조건을 고려하여 마모시험을 수행하고, 시험으로부터 얻어진 데이터를 이용하여 마모를 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시하고자 한다. 소재의 마모에 영향을 미치는 인자를 연구한 선행연구[8]를 바

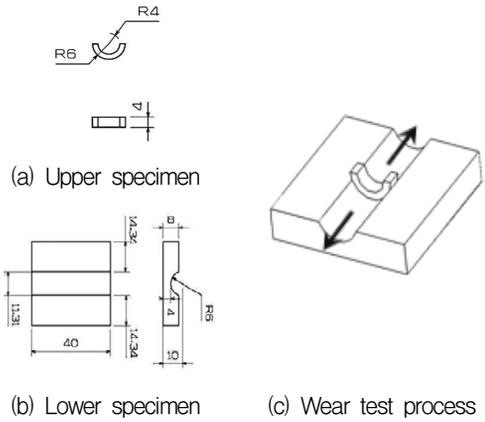


Fig. 2 Schematic diagram of test and process of wear test.

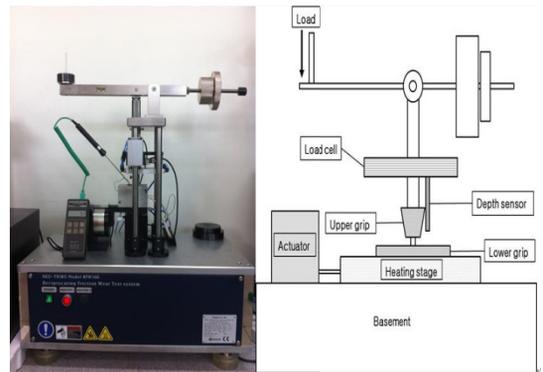


Fig. 3 Reciprocating friction wear tester, RFW-160 (Neoplus co. Ltd., Korea).

탕으로 온도와 작용하중 및 미끄럼 속도에 대한 왕복동 마모 시험을 수행하였다. 시험은 실험계 획법의 일환인 반응표면분석법 (response surface methodology, RSM)을 근거로 하여 수행하였으며, 변수간의 상관계수를 구하여 최종 수학적 모델식을 도출하였다. 상관계수의 유효성은 분산분리법(Analysis of variance, ANOVA)를 이용하여 검증하고 최종 도출된 수학적 모델식과 마모 시험으로 얻은 데이터를 비교하여 수학적 모델식의 유용성을 검증하였다. 또한, 마모 표면의 SEM분석을 통하여 마모 메커니즘을 고찰하였다.

Table 1. Mechanical properties of HK-6[4].

Density (g/cm ³)	Flexural strength (MPa)	Grain size (μ m)	Shore hardness
1.86	85	3	68

Table 2. Mechanical properties of W-25Re[5].

Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Poisson ratio	Shear modulus (MPa)	Shore hardness
19.7	1370	0.29	159	43

2. 시험 소재 및 시험 방법

2.1 소재 및 시편

본 논문의 마모 재료인 흑연은 Tokai carbon Co. Ltd.에서 제공하는 극초미세 결정립 흑연이며 마모 상대재로써 구동축 소재인 W-25Re를 사용하였다. W-25Re는 텅스텐을 기반으로 한 레늄 합금으로 열적 특성이 우수하여 고온 구조물에 이용되고 있다. Table 1과 2는 각각의 소재에 대한 기계적 특성을 나타낸다[9,10]. Fig. 2는 시편의 형상을 보여주고 있으며, (a)가 구동축 소재인 W-25Re이고 (b)는 흑연 시편이다. Fig. 2(c)와 같이 상부 시편에 하중을 가하여 하부 시편의 흠을 따라 왕복동으로 마찰함으로써 마모 시험되도록 설계하였다. 왕복동 마모 시험은 Fig. 3과 같이 RFW-160 왕복동 마모시험기를 이용하였다.

2.2 시험 설계

반응표면분석법은 하나 또는 그 이상의 반응변수와 정량적인 실험변수 또는 인자 집합과의 관계를 규명하는데 사용하는 실험 설계 방법으로 반응변수를 최적화할 수 있는 인자의 조건을 찾을 수 있을 뿐만 아니라, 정향적인 인자와 반응변수 사이의 관계를 모형화 할 때 사용할 수 있다. 반응변수간의 관계를 모형화 하기 위해 다음의 Eq. (1)과 같은 2차 다항회귀모형을 이용한

Table 3. Important factors and their levels for reciprocating wear tests.

Factor	Notation	Unit	Levels		
			-1	0	1
Temp.	T	°C	25	255	485
Applied load	P	N	50	125	200
Sliding speed	V	Hz	1	5.5	10

다[11]. 여기서 X 는 결과 Y 에 영향을 미치는 반응변수를 의미 하며, β 는 회귀식에 의해 계산되어지는 계수이고 ε 은 오차를 의미한다. Table 3은 본 연구에서 흑연 썰의 왕복동 마모 시험의 변수로 설정한 온도, 작용 하중, 미끄럼 속도에 관한 범위를 나타내고 있으며, 각 변수는 실제 작동 조건을 고려한 범위이다. 각각의 변수는 3수준으로 나뉘어 -1, 0, 1로 코딩하였다. 코딩을 하는 이유는 반응변수 값의 계산이 용이하기 때문이다. 코딩은 다음의 Eq. (2)를 이용하여 코딩할 수 있다[12].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon. \quad (1)$$

$$X_i = \frac{2X - (X_{\max} + X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})/2} \quad (2)$$

여기서, X_i 는 코딩 된 값이고, X 는 반응변수의 값, X_{\max} , X_{\min} 은 각각 반응변수 수준의 최대 값과 최소값을 의미한다.

일반적으로 마모 특성을 비교하기 위한 변수로 사용되는 비마모율(specific wear rate)은 Lancaster[13]가 Archard의 마모 모델로부터 제안한 것으로 미끄럼 거리 및 작용 하중에 따른 마모 부피량을 예측할 수 있는 계수로 사용된다. 비마모율은 다음의 Eq. (3)으로 계산된다.

$$\dot{W}_r = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{1}{\rho v F_N} \quad (3)$$

Table 4. Matrix of experiments with the specific wear rate results for the central composite design.

Expt. No.	T	P	V	Specific Wear rate ($\times 10^{-4}$ mm ³ /Nm)
1	0	-1	1	5.68
2	-1	0	1	0.41
3	0	0	0	6.31
4	0	1	-1	6.87
5	-1	0	-1	1.06
6	1	0	1	1.53
7	0	1	1	3.68
8	-1	1	0	0.73
9	-1	0	-1	1.16
10	1	1	0	1.62
11	1	1	0	1.46
12	1	0	1	1.79
13	0	0	0	6.42
14	1	0	-1	4.11
15	0	0	0	6.21

여기서, \dot{W}_r (mm³/Nm)은 비마모율이고, Δm (g)은 마모 손실량, Δt (s)는 시험 시간, v (m/s)는 미끄럼 속도이고 ρ (g/cm³)는 마모 소재의 밀도, F_N (N)은 작용 하중을 의미한다.

반응표면분석법을 수행하기 위해 MINITAB®을 사용하여 실험을 계획하고 비마모율의 결과값으로 흑연 셀의 비마모율 예측식을 도출하였다.

3. 시험 결과 및 수학적 모델 개발

3.1 왕복동 마모 시험 결과

Table 4는 중심합성법(central composite design)을 근거로 하여 계획된 실험과 그에 대한 시험 결과값을 나타낸 것이다. 각각의 T, P, V는 온도, 적용하중, 미끄럼 속도를 나타내며 Table 3에서 나타난 것과 같이 3수준의 값을 -1, 0, 1로 각각 코딩한 값을 나타내고 있다. 비마모율 결과는 255°C에서 큰 값을 나타내고 있으며 이

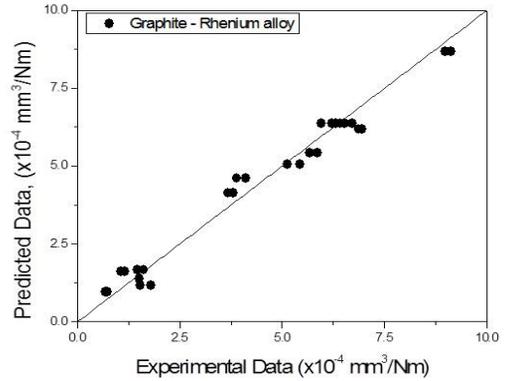


Fig. 4 The correlation graph between experimental and predicted data.

러한 이유는 소재 고유 특성으로 보여지며 25 5°C부근에서 고온 표면경도 변화에 의한 것으로 판단 되고 있다. 상온과 485°C에서는 비슷한 수준을 나타내고 있다.

3.2 수학적 모델 개발

흑연의 마모 특성인 비마모율은 온도와 적용 하중, 미끄럼 속도에 반응하기 때문에 비마모율 SW_r 에 대하여 $SW_r = f(T, P, V)$ 으로 표현되는 함수라고 할 수 있다. 따라서, 앞서 2.2절의 2차 다항회귀모형의 Eq. (1)에 적용하면 다음의 식 Eq. (4)로 나타낼 수 있다. 반응 변수인 T, P, V의 상관계수는 회귀분석에 의해 계산되며, 분산분석법(analysis of variance, ANOVA)에 의해 상관 계수로써 유효한 계수가 추출된다[6]. Table 5는 분산분석을 한 결과를 나타내었다. 추정된 2차 다항회귀모형에 대한 F-검정 결과와 P값의 결과로 보아 V^2 , TV , PV 의 반응 변수가 0.05 이상의 값을 나타내기 때문에 유효하지 않는 것으로 나타났다. 반응 변수에 대한 유효성 검증 결과로 보아 미끄럼 속도에 대한 영향이 크지 않은 것을 나타내고 있다. 최종적으로, 유효한 계수만을 채택하여 추정된 2차 다항회귀모형은 다음 Eq. (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 SW_r = & \beta_0 + \beta_1(T) + \beta_2(P) + \beta_3(V) \\
 & + \beta_{11}(T^2) + \beta_{22}(P^2) + \beta_{33}(V^2) \\
 & + \beta_{12}(TP) + \beta_{13}(TV) + \beta_{23}(PV)
 \end{aligned} \quad (4)$$

Table 5. Analysis of variance (ANOVA) test results.

Factors	S _{eq} SS	A _{adj} SS	A _{adj} Ms	F	P
T	19.184	19.184	19.184	47.42	0.000
P	14.516	14.516	14.516	35.88	0.000
V	28.143	28.143	28.143	69.57	0.000
T ²	130.728	130.433	130.433	322.43	0.000
P ²	0.136	0.085	0.085	0.21	0.000
V ²	0.986	0.985	0.985	2.43	0.652
TP	4.307	4.307	4.307	10.65	0.004
TV	1.304	1.304	1.304	3.22	0.088
PV	0.726	0.726	0.726	1.79	0.195
Error	8.091				

S_{eq}SS: Sequential sums of squares, A_{adj}SS: Adjusted sums of squares, A_{adj}Ms: Adjusted mean square, F : F-value, P : P-value

$$SW_r = [1.91002 + 0.0519466(T) - 0.0117437(P) - 0.110387(V) - 0.0000794(T^2) + 0.0000191(P^2) - 0.00004254(TP)] \quad (5)$$

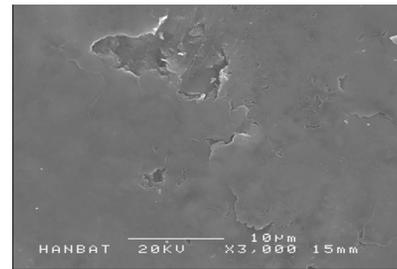
또한, 제안된 비마모율 예측의 수학적 모델에 대하여 결정계수(determination coefficient) R²를 사용하여 신뢰도를 평가하였다. 결정계수 R²는 1에서 square of sum의 합에 대한 error의 square of sum를 뺀 값이며 다음 Eq. (6)과 같다 [14].

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{total}}{SS_{error}} \quad (6)$$

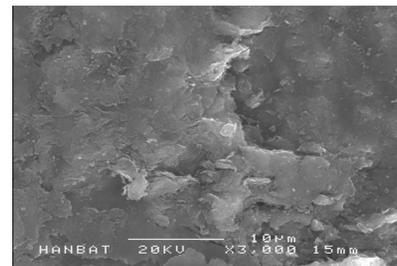
본 연구에서 제안된 비마모율 예측에 관한 수학적 모델은 95.96%으로 상당히 높은 신뢰성을 나타내고 있는 것으로 나타난다. Fig. 4는 제안된 수학적 모델의 비마모율 예측값과 실제 데이터 값을 비교한 그래프로 결정계수의 결과와 상응하게 높은 상관관계를 나타내고 있다.

3.3 SEM 분석 결과

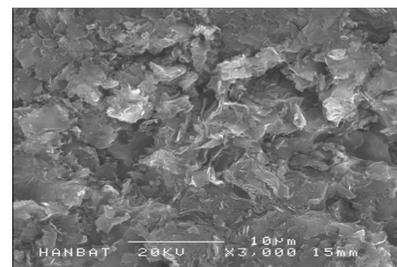
마모 표면의 SEM 분석을 통하여 마모 메커니즘을 분석하고 비교하였다. Fig. 5는 미끄럼 속도 5.5 Hz, 125 N에서 온도 변화에 따른 마모 시험을 수행한 마모 표면의 SEM 사진이다. 상온에서 마모과정에서 발생하는 박리(exfoliation)에



(a) 25°C



(b) 255°C



(c) 485°C

Fig. 5 SEM images of worn surface of graphite tested at 5.5 Hz and 125 N.

의한 결함을 보이고 있다. 미세한 크랙이 나타나는 것으로 보아 연삭에 의한 마모(abrasive wear)가 진행됨을 알 수 있다. 255℃에서 비마모율이 가장 높았으며 마모가 가장 많이 발생됐다. 마모 표면에서도 이와 같은 양상을 나타내고 있으며 상온에 비해 표면에 결함이 많으며 상대적으로 마모 과정에서 발생하는 마모 입자들이 많기 때문에 연삭이나 응착 마모에 비해 피로에 의한 마모(fatigue wear)로 표면의 결함이 많이 생겼다. 또한, 일반적으로 400℃ 이상에서 흑연이 산화되기 때문에 485℃의 마모 흔에서 산화에 의한 표면 경화가 일어났음을 확인 할 수 있다 [15].

4. 결 론

본 논문에서는 고온의 가스 조절 밸브의 고온 가스 유입을 차단하는 흑연 씬에 대하여 연구하였다. 반응표면분석법을 근거로 하여 왕복동 마모 시험을 수행하고 흑연의 비마모율을 예측하는 수학적 모델을 제시하였다. 또한, 마모 표면의 SEM 분석을 통해 마모 기구를 분석하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 온도, 적용하중 및 미끄럼 속도에 대한 영향으로 흑연 씬의 비마모율 예측에 대한 수학적 모델을 개발하고 이를 검증한 결과 실제 시험값과 수학적 모델의 예측값이 상당히 일치하고 있다.
2. 제안된 수학적 모델의 예측값과 시험의 결과값은 95.96%의 상관관계를 가지고 있으며, 이러한 예측식은 시험 조건의 범위 내에서 유효한 것으로 제한된다.
3. 마모 기구에 대한 SEM 분석결과, 255℃에서 피로 마모에 의해 마모가 심하게 진행되었고 485℃에서 산화에 의한 표면의 경화가 나타나고 있다. 표면은 각각 연삭 마모와 마모 입자에 의한 피로 마모 기구를 나타내고 있다.

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약번호 UD110093CD)

References

1. Wang, L.L., Zhang, L.Q. and Tian, M., "Effect of Expanded Graphite(EG) Dispersion on the Mechanical and Tribological Properties of Nitrile Rubber/EG Composites," *Wear*, Vol. 276-277, pp. 85-93, 2012.
2. Li, J.L. and Xiong, D.S., "Tribological Behavior of Graphite-containing Nickel-based Composite as Function of Temperature, Load and Conterface," *Wear*, Vol. 266, pp. 360-367, 2009.
3. Sheng, X., Yu, S., Luo, X. and He, S., "Wear Behavior of Graphite Studies in an Air-conditioned Environment," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 223, pp. 109-115, 2003.
4. Liu, J.J., Wang, M.Z., Zhang, Z.M., Zhang, Z.S. and He, S.Y., "Feature of Reactor Structure Design for 10MW High Temperature Gas-Cooled Reactor," *Institute of Nuclear Energy Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 53-56, 2001.
5. Luo, X.W., Yu, S.Y., Sheng, X.Y. and He, S.Y., "Wear Behavior of Graphite IG-11 in Different Gas Environments," *Institute of Nuclear Energy Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 17-177, 2005.
6. Moustafa, S.F., El-Badry, S.A., Sanad, A.M. and Kieback, B., "Friction and Wear of Copper-graphite Composites Made with Cu-coated and Uncoated Graphite Powders," *Wear*, Vol. 253, pp. 699-710, 2002.
7. Suresha, B., Ramesh, B.N., Subbaya, K.M., Ravi Kumar, B.N. and Chandramohan, G., "Influence of Graphite Filler on Two-body

- Abrasive Wear Behavior of Carbon Fabric Reinforced Epoxy Composites," *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 1833-1841, 2010.
8. Kim, Y.W., Kim, J.H., Yang, H.Y., Park, S.H., Lee, H.G., Kim, B.K., Lee, S.B. and Kwak, J.S., "A study of Wear Behavior for Sealing Graphite at Elevated Temperature," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 113-120, 2013.
 9. Tokai Carbon Co., Ltd. (2013. March 26), "Tokai's Isotropic Graphite Data Sheet," World Wide Web location, <http://en.tokaicarbon.eu/wp-content/uploads/HK-6-2.pdf>, 2013.
 10. Todd, L.H., "Properties of Tungsten-rhenium and Tungsten-rhenium with Hafnium Carbide," *Journal of Materials*, Vol. 61, No. 7, pp. 68-71, 2009.
 11. Farias, M.C.M., Souza, R.M., Sinatora, A. and Tanaka, D.K., "The Influence of Applied Load, Sliding Velocity and Martensitic Transformation on the Unlubricated Sliding Wear of Austenitic Stainless Steels," *Wear*, Vol. 263, pp. 773-781, 2007.
 12. Kumar, S. and Balasubramanian, V., "Developing a Mathematical Model to Evaluate Wear Rate of AA7075/SiC_p Powder Metallurgy Composites," *Wear*, Vol. 264, pp. 1026-1034, 2008.
 13. Juri, P., Mart, V. and Sergei, L., "Friction and Dry Sliding Wear Behaviour of Cermets," *Wear*, Vol. 260, pp. 815-824, 2006.
 14. Palanikumar, K. and Davim J.P., "Mathematical Model to Predict Tool Wear on the Machining of Glass Fibre Reinforced Plastic Composites," *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 2008-2014, 2007.
 15. Cho, K.Y., Kim, K.J., Lim, Y.S. and Chi, S.H., "Oxidation Behavior of Nuclear Graphite(IG110) with Surface Roughness," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 43, No. 10, pp. 613-618, 2006.