

선박기계용 실링 복합재료의 마모 및 마찰거동

이정규 · 고성위*

부경대학교 기계시스템공학과

Behavior on the wear and friction of sealing composite for ship machinery

Jung-Kyu LEE and Sung Wi KOH*

Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

In order to use PUR/CuO Composites as the sealing materials for ships equipment, this research has been performed. PUR/CuO composites are produced by using ultrasonic waves. The increase of CuO leads to increase in the tensile strength and shore hardness. The cumulative wear volume shows a tendency to increase in proportional to sliding distance. As the CuO particles of these composites indicated, the friction coefficient was slightly increased. The major failure mechanisms were lapping layers, deformation of matrix, plowing, debonding of particles and microcracking by scanning electric microscopy photograph of the wear tested surface.

Keywords : Friction coefficient, Wear characteristics, Cumulative wear volume, CuO particles, Failure mechanisms

서론

나노복합재료는 원자, 분자간의 상호작용을 고려하고 복합기술을 바탕으로 이질적인 소재를 미소한 척도 내에 공존시킴으로써, 원재료에서는 얻기 힘든 성질이 나타나며, 무기물의 특성과 유기 고분자의 장점을 겸비하여 기존 소재에 비하여 우수한 성질이 나타난다. 또한 소재설계를 통하여 구현되는 매우 다양한 제반 성질로 인하여 엔지니어링 플라스틱, 생체재료 및 다공질 재료 등의 개발이 가능하며, 전자전기, 통신, 건설, 자동차, 선박, 의료분야 등 그 응용범위가 매우 다양하므로 사회적 경제적으로 그 파급 효과가 매우 크다.

산업현장에서 실제로 생산되는 총에너지의 30% 정도가 마찰마모 과정에서 소실될 정도로 생산성과 밀접한 관계가 있으며, 에너지 절약에 직접적으로 연관되므로 마모에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Badmos

and Ivey, 2001; Chand et al., 2000, Dasari et al., 2009; Kim and Koh, 2008). 섬유강화 복합재료는 경량이기 때문에 과거에는 단지 구조물의 무게를 경감하기 위한 부재로 사용되었으나, 고강도이며 고강성의 성질을 가지는 열경화성 복합재료가 구조물의 주 부품으로 사용되었고, 최근 소형 선박에는 거의 전 구조물을 이러한 복합재료로 대체하기 시작하였다. 복합재료의 마찰 및 마멸 특성에 영향을 미치는 인자로는 강화섬유의 재질, 구성, 함유량, 섬유방향 및 수지의 미끄럼 거리 등 복잡한 인자들에 의해 좌우됨을 보이고 있다 (Kim et al., 2010a; Kim et al., 2014; Lee and Koh, 2013). 또한 복합재료의 마모기구는 응착마모 (Ren et al., 2001), 충전재료의 영향 (Kim et al., 2010b)에 의하여 발생한다고 하였다. 선박의 추진축에 사용되는 스텐튜브 (stern tube) 실 (seal)은 해수 침입 시 압력을 받기 때문에 운전 중

*Corresponding author: swkoh@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-6192, Fax: +82-51-629-6188

습동부에 마찰열이 발생한다. 스티튜브의 완벽한 실링(sealing)을 위하여 재료의 강도와 표면마모 등의 내구성이 증가된 재료의 개발이 요구되고 있다. 선박 실링재의 개발에 대한 연구로서 강도 증가를 위하여 유리섬유나 탄소 섬유를 첨가 (Choi et al., 2014; Larsen et al., 2008; Kim et al., 1999)하거나 표면처리 (Shi et al., 2008), 초임계 이산화탄소 이용법 (Kim et al., 2011) 등이 있으나 다양한 방법에 의한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 폴리우레탄 (polyurethane, PUR)을 선박기계 실링용 복합재료에 적용할 목적으로, 폴리에스테르계 다가알코올 (Polyol-85E, Polyol)과 경화제 (4,4-methylene-bis-2-chloroaniline, MOCA)를 사용하여 폴리우레탄을 합성하였다. 그리고 첨가제로 외부 오염물질 부착 방지 기능이 있는 이산화구리 (CuO)를 첨가하여 PUR/CuO 복합재료를 제조하였다. 우선 CuO의 함유량에 따른 PUR/CuO 복합재료의 인장강도 및 경도의 변화를 고찰하였고, 또한 마모저항의 변화를 고찰하기 위하여 누적마모체적과 마찰계수를 고찰하였고, 나노 복합재료의 마모기구를 주사현미경의 관찰을 통하여 고찰하였다.

재료 및 방법

본 실험에 사용한 재료는 초음파 분산에 의한 PUR/CuO 복합재료를 제조하여 사용하였다. PUR 수지는 강남화성(주)의 제품을 사용하였고, 첨가제인 CuO는 Jensei Chem. Co.의 제품으로 평균입자 크기가 47 μm , 순도 98% 이상인 분말을 사용하였다. 초음파 분산에 의한 PUR/CuO 복합재료의 제조 순서는 Fig. 1과 같다. PE-85E 100 g을 감압 (750 mmHg) 하에서 80 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열 교반하면서 1시간 동안 탈기시키고, 탈기가 완료되면 CuO 0.5~5.0 g을 첨가하고, 초음파 분산장치 속에서 1분간 초음파를 조사하여 CuO를 완전히 분산시킨다. 분산이 완료되면 MOCA 9~12 g을 첨가하여 1분간 감압 교반한다. 이렇게 제조된 혼합액을 시편 제조용 틀에 부어 120 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 동안 성형시키고, 시편의 형태가 갖추어지면 시편을 틀에서 분리한 후 다시 120 $^{\circ}\text{C}$ 에서 8시간 이상 충분히 경화시켜 시편을 제조한다.

인장시험은 5 mm/min 일정 크로스헤드 속도로 실온에서 만능시험기 (ASC-100G, 용량 10 kN, Shimadzu)를 사용하여 시험하였다. 시험은 ASTM D638로 하였고,

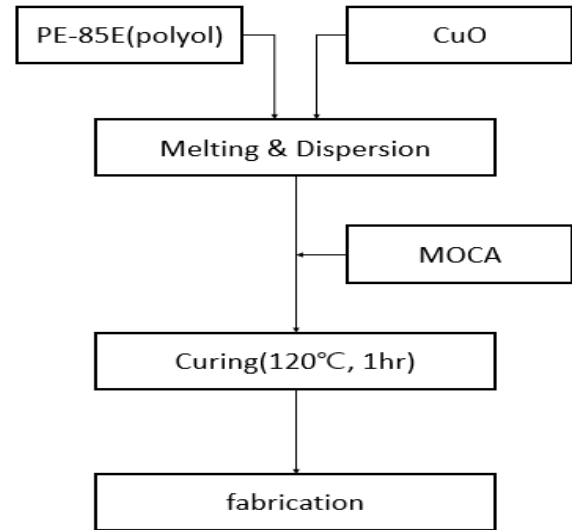


Fig. 1. The production flow of the CuO/PUR composite using a ultrasonic irrigator process.

도시험은 Sato 경도계 (최대높이 80 mm, 최대깊이 65 mm)를 이용하여 5회 이상 반복 측정하였다.

연삭마모시험은 핀온디스크형 시험기 (용량 50 N, KS Tester)를 사용하여 실시하였다. 시험편의 마찰력은 실시간으로 측정하여 시험을 실시하였고, 마모손실은 실험전후의 시험편의 질량을 측정하였다. 15 mm×4.5 mm×5.5 mm의 크기로 절단하고 표면을 사포로 연마하여 마찰과 마모시험의 시험편으로 사용하였다. 상대재인 SiC 연마지 (3M)를 부착하고 연삭마모시험을 1,000 m까지 실시하였다. Fig. 2는 SiC 사포를 디스크에 접촉한 것과 마모 시험편의 사진이다. 시험 전후 시험편의 질량손실은 Mettler 분석천칭 (감도 0.01 mg)으로 측정하여 같은 환경조건에서 3번 이상 측정하여 평균값을 구하였으며, 로드셀을 통하여 마찰력은 실시간으로 측정하여 마찰계수를 얻었다.

Fig. 3은 마모 시험과정을 개략적으로 나타낸 흐름도이다. 먼저 시험편이 준비되면 치수와 무게를 측정한 후 핀온디스크 마모시험기에서 1차 마모 시험을 한다. 마모시험 후 질량손실을 측정하고 2차 시험에 의하여 반복적으로 마모 시험을 행한 후 마찰계수와 마모체적 등을 컴퓨터에서 계산한다. 또한 마모면을 주사현미경 (SEM, 3.0 nano Tescan Co.) 사진 촬영하여 마모기구에 대하여 고찰하였다.



Fig. 2. Photograph of disc bonded SiC abrasive paper and wear specimens.

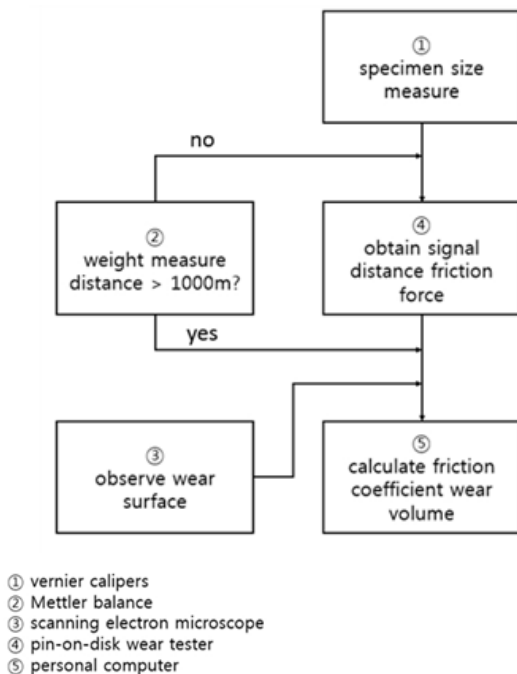


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

결과 및 고찰

Fig. 4는 첨가제인 CuO의 함유량에 따른 인장강도를 나타낸 것이다. CuO의 함유량이 증가함에 따라 인장강도는 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 증가의 폭은 점차 감소함을 알 수 있으며, CuO의 함유량이 2 g 이후에는 변화가 거의 일정함을 알 수 있다. CuO의

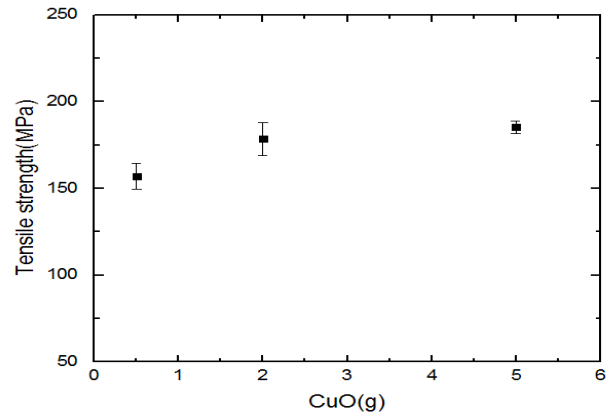


Fig. 4 Variations of tensile strength for the CuO/PUR composites.

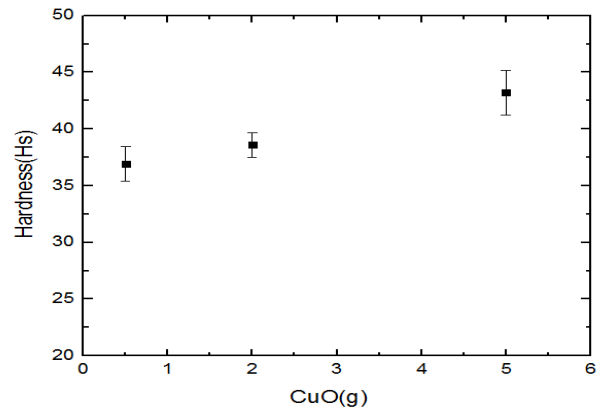


Fig. 5. Variations of shore hardness for the CuO/PUR composites.

함유량이 0.5 g인 경우 인장강도는 156.8 MPa이고, 5 g인 경우는 185.2 MPa로 약 18% 증가하였다. 이것은 PUR에 제2산화구리를 함유시키면 PUR 체인에 가교를 증가시키게 되는데, 이것은 인장강도를 향상시키는 것이라 생각되고 이러한 결과는 나노 복합재료에서 얻은 결과 (Masa et al., 2016)와 유사한 결과이다.

Fig. 5는 첨가제인 CuO의 함유량에 따른 쇼어경도 값을 나타낸 것이다. CuO의 함유량이 0.5, 2, 5 g으로 증가함에 따라 쇼어경도의 값은 36.9, 38.6, 43.2 Hs로 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 공업재료에서는 경도의 값과 인장강도의 값은 비례관계가 있다고 하여 경도의 값이 커지면 인장강도가 크게 나타난다고 하지만, CuO/PUR 복합재료는 이 관계가 성립되지 않음을 알 수 있다.

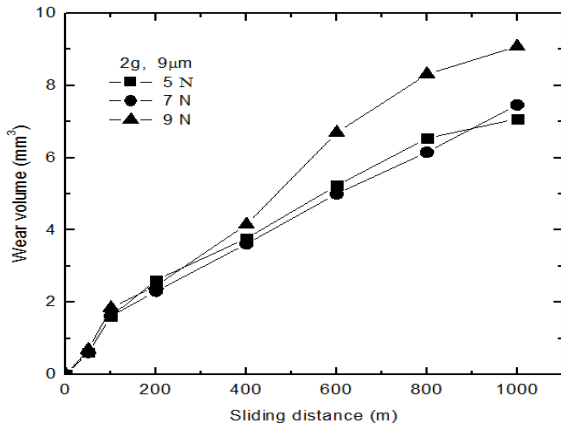


Fig. 6. Variation of wear volume as a function of sliding distance for the 2 g CuO/PUR composites.

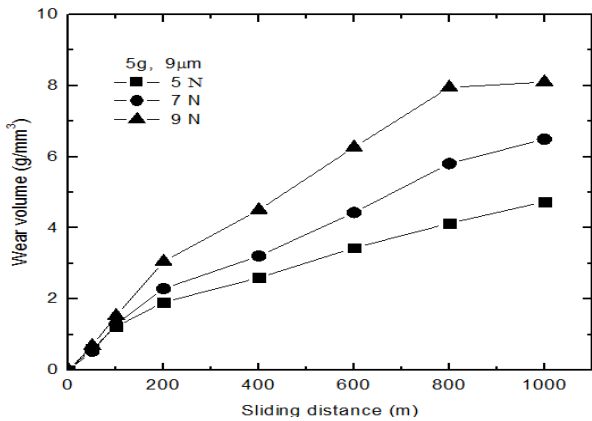


Fig. 7. Variation of wear volume as a function of sliding distance for the 5 g CuO/PUR composites.

Fig. 6은 첨가제 CuO의 함유량이 2 g일 경우 동일 미끄럼 속도에서 적용하중을 5, 7, 9 N으로 변화시킬 때 미끄럼 거리의 변화에 따른 누적 마모체적을 나타낸 것이다. 상대재의 평균입자크기 9 μm, 적용하중 5 N의 경우에 미끄럼 거리가 증가함에 따라 누적 마모체적은 점차 증가함을 알 수 있다. 그러나 적용하중 7 N인 경우에도 미끄럼 거리의 증가에 따른 누적마모체적을 거의 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 7은 첨가제 CuO의 함유량이 5 g일 경우 동일 미끄럼 속도에서 적용하중을 5, 7, 9 N으로 변화시킬 때 미끄럼 거리의 변화에 따른 누적 마모체적을 나타낸 것이다. 적용하중 5 N에서 미끄럼 거리가 50, 100, 200 m로

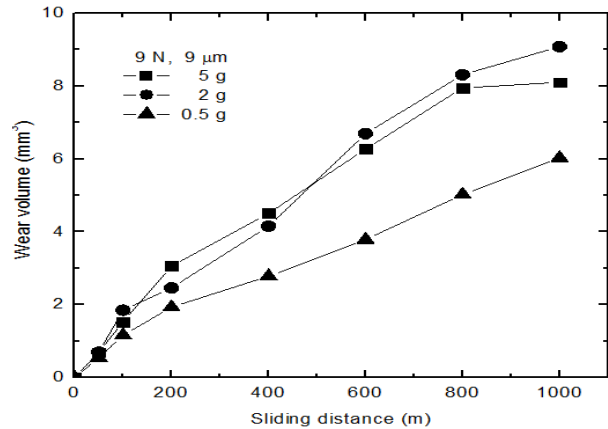


Fig. 8. Variation of wear volume as a function of sliding distance for the CuO /PUR composites tested on 9 μ m SiC paper at applied load of 9 N.

증가함에 따라 누적 마모체적은 0.6, 1.2, 1.9 mm³로 급격히 증가하다가 미끄럼 거리가 400, 600, 800, 1,000 m로 증가해 감에 따라 2.6, 3.4, 4.1, 4.7 mm³로 완만하게 증가하여 그 차이가 적게 되는 것을 알 수 있다. 적용하중이 7 N과 9 N인 경우에도 그 값의 차이는 있으나 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

따라서 각각의 적용하중에 따라 미끄럼 거리의 증가에 따라 누적마모체적은 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 선형적으로 증가한다는 결과 (Chand et al., 2000)와는 상이하지만 비선형적으로 증가한다는 다른 결과 (Ravikiran and Jahanmir, 2001, Kim et al., 2014)와 일치함을 알 수 있다.

Fig. 8은 적용하중 9 N일 때 각각의 첨가제 CuO의 함유량에 대하여 미끄럼 거리에 따른 누적 마모체적을 나타낸 것이다. 미끄럼 거리에 따른 누적 마모체적은 점차 증가하는 경향을 나타내고 있으나 특이한 사항은 첨가제 CuO의 함유량이 0.5 g일 경우 누적마모체적의 양이 현저히 작다는 것이다. 이는 첨가제가 작은 경우 연성이 너무 커서 매트릭스의 변형이 많이 발생하여 일어나는 결과라 생각할 수 있다.

Fig. 9는 각각의 CuO의 함유량과 적용하중에 대하여 마찰계수를 나타낸 것이다. 적용하중이 5 N일 때 첨가제의 함유량이 0.5, 2, 5 g으로 증가함에 따라 마찰계수는 0.76, 0.85, 0.9로 미세하게 증가함을 알 수 있다. 또한 동일 첨가제의 함유량에 대하여 적용하중이 증가함에

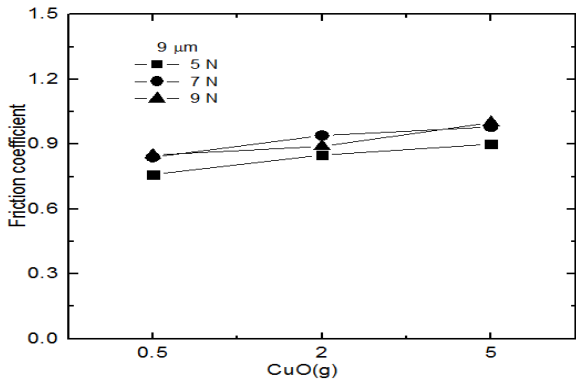


Fig. 9. Variations of friction coefficient with load for the CuO/PUR composites.

따라 마찰계수는 증가하기도 하고 미세하게 감소하는 경향이 나타나, 일의적으로 정하는 것은 어렵고 이에 대해서는 좀 더 상세한 연구가 필요하다. 이때 마모면은 각각의 경우에 미끄럼 거리가 1000 m까지 마모시험을 행한 상태를 SEM 사진 촬영한 것이다.

나노 사이즈의 CuO 입자를 첨가한 복합재료에서 핀 온디스크 마모시험기를 사용하여 적용하중이 5, 9 N, 상대재인 SiC 연마지의 평균입자지름이 9 μm 그리고 미끄럼 속도를 0.38 m/s로 하였을 때 시험한 마모면 사진이 Fig. 10이다. Fig. 10(a)는 CuO 함유량이 0.5 g, 적용하중 9 N, 상대재의 평균입자지름이 9 μm인 경우에 대한 마모면을 나타낸 것으로서 전체적으로 마모막이 형성되었다는 것을 알 수 있다. 일부는 CuO 입자가 디본딩 (debonding)되어 탈락되고, 또한 매트릭스의 변형이 많이 발생하였음을 알 수 있다. 매트릭스의 변형이 많이 발생하여 매트릭스 변형이 지배적임을 확인할 수 있고, 이것은 Fig. 8에서 설명한 누적마모체적을 적게 발생하는 결과라 생각한다. 또한 미끄럼 방향으로 미시크랙 (microcracking)이 발생하였음을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 CuO의 함유량이 2 g인 경우로서, 미끄럼 방향으로 미시크랙과 쟁기질 (plowing)의 흔적이 많이 있으며 연삭마모 형태의 흔적이 많이 발생함을 알 수 있다. CuO의 함유량이 더욱 많은 5 g인 경우에는 매트릭스의 변형으로 인한 쟁기질의 흔적이 많이 발생하고 또 미시균열과 디본딩이 다수 있음을 확인할 수 있으며 (Fig. 10(c) 참조), 적용하중이 9 N인 경우에는 쟁기질의 흔적의 폭이 매우 적게 촘촘히 나타나고 있는 것이 다른 현상이다.

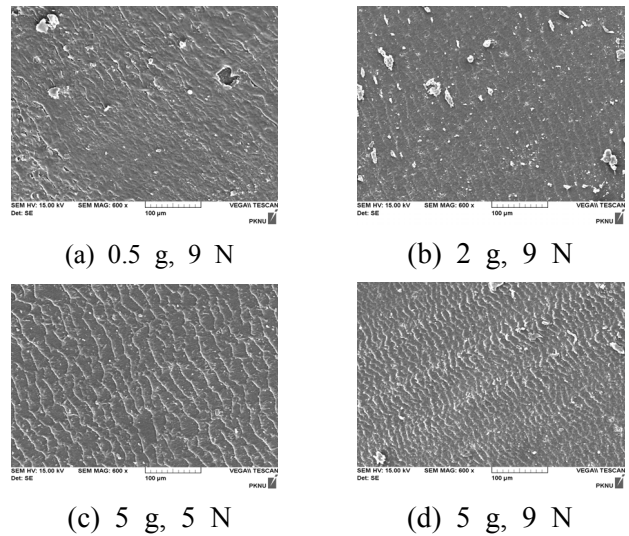


Fig. 10. SEM photographs of worn surface for the CuO/PUR composites on 9 μm SiC paper at applied load of 5, 9 N.

파괴기구를 종합한다면 CuO의 함유량이 적은 재료에서 마모막이 형성이 많이 되고 또 매트릭스의 변형이 지배적이며, 전체적으로는 마모막이 형성되었다가 쟁기질이 발생하고 입자의 디본딩, 입자의 파괴, 기지의 변형, 미소균열이 발생하고 성장하는 것을 확인할 수 있었다.

결론

선박기계용 실링 복합소재 개발을 위해 초음파를 이용하여 CuO/PUR를 제작하였다. 나노 사이즈의 CuO 입자를 첨가한 PUR 기지 나노 복합재료에서 CuO 함유량이 증가함에 따라 인장강도와 쇼어 경도의 값은 증가하는 것으로 나타났다. CuO 함유량이 증가함에 따라 CuO/PUR 나노복합재료의 누적 마모 체적은 미끄럼 거리가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. CuO 함유량이 증가함에 따라 마찰계수는 미세하게 다소 증가함을 알 수 있었다. 마모 시험에서 파괴기구는 CuO의 함유량이 적을수록 매트릭스변형이 지배적이며, 전체적인 마모기구는 마모막이 형성되었다가 쟁기질이 발생하고 입자의 디본딩, 입자의 파괴, 기지의 변형, 미소균열이 발생하고 성장하는 것을 파면의 SEM 사진을 통해 확인할 수 있었다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2016년)에 의하여 연구되었음.

References

- Badmos AY and Ivey D. 2001. Characterization of structural alumina ceramics used in ballistic armour and wear application. *J Mat Sci* 36, 4995-5005. (DOI:10.1023/A:1011885631876)
- Chand N, Naik A and Neogi S. 2000. Three-body abrasive wear of short glass fibre polyester composite. *Wear* 242, 38-46.
- Choi SH and Jeong YJ. 2014. Carbon nanotubes reinforced poly(ethylene terephthalate) nanocomposites. *Polymer(Korea)* 38, 240-249.
- Dasari A, Yu ZZ and Mai YW. 2009. Fundamental aspect and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites. *Mat Sci Tech* 63, 31-80.
- Kim BT and Koh SW. 2008. A study on abrasive wear characteristics of side plate of FRP ship. *J Korean Soc Fish Technol* 44(3), 250-256. (DOI:10.3796/KSFT.2008.44.3.250)
- Kim EB, Kim JT, Kim SY and Ju CS. 2011. Synthesis of copper-poly tetrafluoro-ethylene composite by supercritical impregnation process, *Kor J Chem Eng* 28(2), 440-444. (DOI:10.1007/s11814-010-0374-5)
- Kim HY, Lee JK and Koh SW. 2014. An experimental study of the friction and wear on counterpart roughness of silica particle reinforced nano composites, *J Korean Soc Fish Technol* 50, 162-168. (DOI:10.3796/KSFT.2014.50.2.162)
- Kim JD, Kim HJ, Koh SW and Kim YS. 2010a. Wear properties of epoxy matrix nanocomposites. *J Kor Soc Pow Sys Eng* 14(6), 83-88.
- Kim SY, Kim EB, Yoo Q and Ju CS. 2010b. Tribological wear behavior of PTFE impregnated with Cu nano particles. *J Kor Soc Pow Sys Eng* 14(4), 50-55.
- Kim YZ, Eum SH and Kim YH. 1999. Effect of additives on the friction and wear properties of PTFE composites. *Proc Kor Soc Comp Mat Conf*, 88-94.
- Larsen T, Anderson TL and Vigild E. 2008. Changes in the tribological behavior of an epoxy resin by incorporating CuO nano particles and PTFE micro particles. *Wear* 265, 203-213.
- Lee HY. 2013. Effect of combination of the load and the apparent area of contact on sliding wear behavior of mild steel in a pin-on disc type apparatus. *J KSTLE* 29, 85-90. (DOI:10.9725/kstle.2013.29.2.085)
- Lee JK and Koh SW. 2013. Wear characteristics on particle volume fraction of nano silica composite materials. *J Korean Soc Fish Technol* 49, 492-499. (DOI:10.3796/KSFT.2013.49.4.492)
- Masa A, Saito R, Saito H, Skai T, Kaesaman A and Lopattananon N. 2016. Phenolic resin-crosslinked natural rubber/clay nanocomposites: Influence of clay loading and interfacial adhesion on strain-induced crystallization behavior. *J Appl Polym Sci* 133, 43212.
- Ravikiran A and Jahanmir S. 2001. Effect of contact pressure and load on wear of alumina. *Wear* 251, 980-984.
- Ren JR, Kim KY and Kim SS. 2001. Tribological evaluation of dental composite resins containing prepolymerized particle fillers. *KSME Int J* 15(6), 727-734.
- Shi Y, Feng X and Lu X. 2008. The effect of surface modification on the friction and wear behavior of carbon nano fiber filled PTFE composites, *Wear* 264, 934-939.
- Youn JH and Kaang S. 2014. Wear behavior of C/B filled NR compounds using a blade-type abrader. *Ela Comp* 49, 73-81. (DOI:10.7473/EC.2014.49.1.73)

2017. 02. 19 Received

2017. 03. 17 Revised

2017. 03. 20 Accepted