

무윤활 수직-수평 복합하중 조건에서 재료조합에 따른 마모특성 변화에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Wear Behavior of Material Pairs under Normal and Sliding Mixed Loading Conditions

최성우¹, 민준기², 정일욱³, 박상후^{4,✉}
Sung-Woo Choi¹, June Kee Min², Il-Wook Jeong³ and Sang-Hu Park^{4,✉}

1 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템대학원 (School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.)

2 롤스로이스-부산대 대학기술센터 (Rolls-Royce PNU UTC)

3 LG 전자 냉장고사업본부 (LG Electronics)

4 부산대학교 정밀금형 및 금형가공연구소/기계공학부 (ERC/NSDM, School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.)

✉ Corresponding author: sanghu@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-1011

Manuscript received: 2009.6.8 / Accepted: 2009.9.18

A pair of connectors for transferring torque is widely used in various types of a mechanical system. By the repetition of mechanical contact between a pair of connector, wear occurs easily. This kind of defect sometimes can cause a serious problem of health in case of the connector is used in a refrigerator. In this work, the material combination of connectors was experimentally studied to reduce the amount of wear; for the combination of connectors, various types of engineering materials including polyacetal, polycarbonate, stainless steel (STS-304), NiP coated STS-304, and STS-310 were evaluated to check each wear behavior. Also an effective method of wear test was suggested for precise controlling of wear conditions such as contact area, contact force, and relative motion speed. From the test results, it was found out that a pair of polyacetal to STS-304 and STS-310 showed the lowest specific wear rates among other pairs.

Key Words: Wear (마모), Wear Rate (마모율), Adhesion (응착), Polycarbonate (폴리카보네이트), Polyacetal (폴리아세탈), STS (Stainless Steel, 스테인리스 스틸), Connector (커넥터)

1. 서론

동력전달 장치에서 필수적으로 요구되는 커넥터(connector) 부품은 대형 기계시스템에서부터 가전제품에 이르기까지 다양한 형태와 용도로 이용되고 있다. 그 중에서 가정용 냉장고 사례를 보면, 각얼음을 자동으로 만들어 방출하는 제빙기(ice maker) 부분의 동력전달 장치에 커넥터가 사용된다. 이러한 제빙기용 커넥터의 경우 마찰 마모에 의해 불순물이 발생할 경우 얼음 배출구에 불순물

이 같이 배출될 가능성이 있기 때문에 문제가 될 수 있다. 따라서 사용기간 동안 불순물이 전혀 발생하지 않도록 커넥터의 재질에 대한 연구가 필수적으로 요구된다.

Fig. 1 에는 일반적인 냉장고 문에 부착되는 제빙기의 형태를 나타낸 것이다. 냉장고 문의 두께가 일정하게 유지해야 되므로 제빙기의 동력 발생부와 커넥터의 형상도 최소화 하여 설계하는 것이 원칙이다. 이러한 조건에 의해서 실제 동력전달면적의 부족으로 많은 응력이 작용하게 되며, 또

한 윤활제를 사용할 수 없는 환경이므로 마찰 마모현상이 가속화되는 실정이다. 마찰 마모에 대한 정확한 메커니즘 분석은 실제 윤활조건, 표면거칠기, 부가되는 하중, 재료의 화학적 친화성, 확산계수 등 다양한 변수를 면밀하게 파악하여야만 가능하다.

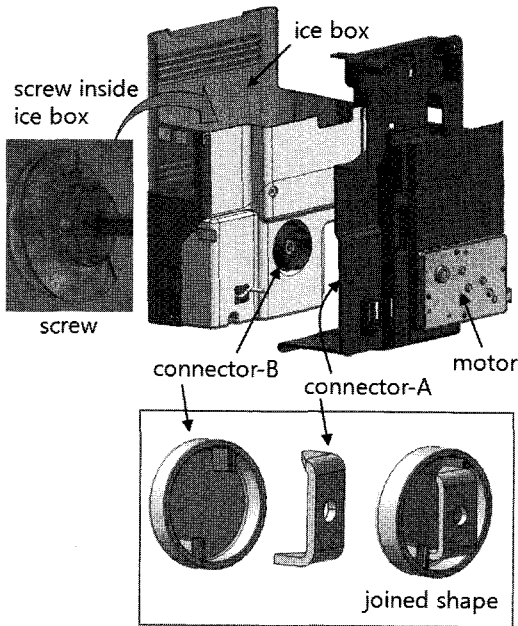


Fig. 1 Schematic view of connectors in the ice maker

본 연구에서 사용한 커넥터의 경우 원동축에 있는 커넥터(Fig. 1 참조, connector-A)의 두께가 2 mm 로 좁은 면적이 종동축 커넥터(Fig. 1 참조, connector-B)의 상대적으로 넓은 면적에 가압하는 조건이므로 상대적인 마모특성 평가를 위한 모사 실험방법에서도 이러한 접촉현상을 구현할 수 있는 방법론에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실용적으로 접근할 수 있도록 커넥터의 형상설계부분과 가속실험에서 발생하는 마모현상으로부터 마모 메커니즘을 분석하며 또한 그에 따른 재료조합에 의한 마모현상을 파악하기 위하여 효과적으로 마모 실험하는 방법을 제안하였다.

2. 현상분석 실험

2.1 가속 시험장치 구성 및 조건

일반적으로 냉장고용 제빙기의 구조는 얼음을

만드는 부분(제빙부분)과 만들어진 얼음을 보관하고 원하는 얼음 량을 밖으로 배출하는 아이스박스 부분으로 구성된다. 아이스박스 부분은 외부로 분리가 가능하도록 하여 세척이나 다량의 얼음을 배출하도록 되어 있으며, 이러한 아이스박스에서 표준규격 각얼음(크기 2×2×2cm)이 서로 엉키지 않고 쉽게 배출될 수 있도록 스크루(screw)가 위치되어 있다. 이러한 스크루를 회전시키기 위하여 모터의 회전동력을 전달하는 커넥터가 연결이 되어 있다(Fig. 1 참조). 각얼음이 오랫동안 보관이 될 경우 서로 2~3 개가 엉켜 붙어 하나의 큰 얼음 덩어리로 존재하게 되어 스크루와 끼움이 발생하여 스크루 회전을 위한 커넥터에 큰 하중으로 작용한다. 그러나 실제 작동조건에서는 얼음이 엉켜 붙는 일이 자주 발생하지 않기 때문에 커넥터 마모에 의한 이물질 발생을 관찰하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 각얼음의 크기를 직경 5cm, 높이 3cm 를 가진 원통형태로 만들어서 가속실험을 실시하였다. 이러한 가속실험은 실제 각얼음이 6~7 개 정도 서로 붙은 크기이며, 얼음을 아이스박스에서 장기간 보관할 때 발생하는 조건 중에서 가장 큰 형태이다.

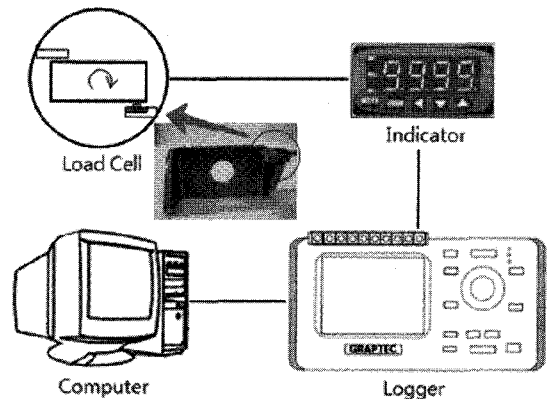


Fig. 2 Schematic process for measuring contact load between connector-A and -B

부피가 큰 각얼음을 사용한 가속조건의 정도를 평가하기 위하여 실제 커넥터 사이에 걸리는 하중을 커넥터-A 에 압력센서를 부착하여 Fig. 2 와 같이 시스템을 구성하였다. 실험에 사용한 장치의 각 모델과 제조사는 logger (model- midi LOGGER GL200, Graphtec), indicator (model- A5112-LO, ASAHI KEIKI), load cell (model- LBS 25, INTERFACE)이다.

커넥터가 장착된 제빙기에 실질적으로 작용하는 동적 부하 하중을 측정하기 위해 직경 9.6mm, 높이 3mm 인 로드 셀을 커넥터에 부착시키고, 케이블을 표시장치(indicator)에 연결하여 하중이 걸리는 힘을 실시간으로 확인하였다.

실험조건은 표준규격의 각얼음을 먼저 사용하여 얼음이 실제 배출될 때 하중 변화를 살펴보고록 하였다. 얼음의 상태와 량에 따라 스크루에 걸리는 부하가 변하여 결국 커넥터 사이에 걸리는 하중도 달라지게 된다.

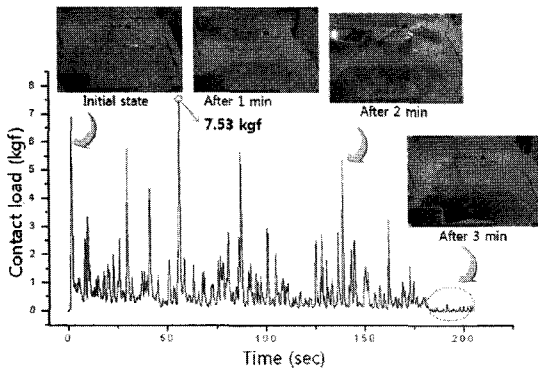


Fig. 3 Experimental results of connector load variation according to the amount of ice pieces

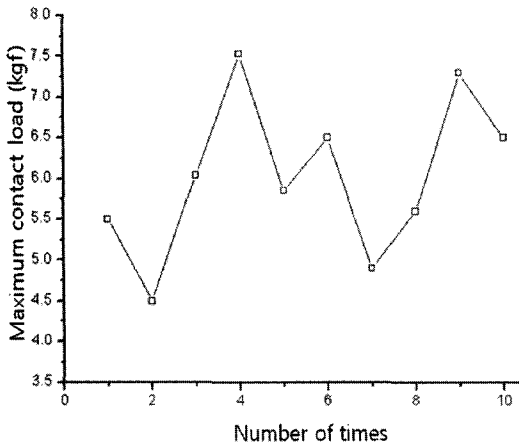


Fig. 4 Variation of maximum connector load during 10 times experiments

Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 아이스박스 에 남아 있는 얼음의 량에 따라 스크루에 걸리는 부하의 차이로 인하여 커넥터 부분에서 측정되는 가압력이 달라지게 된다. 표준얼음의 경우 배출실험 3min 이 경과한 경우 얼음이 거의 배출되어 무부하 상태로

됨을 알 수 있다. 또한 최대 하중은 배출실험에서 약 1min 뒤에 나타났지만 이것은 배출시에 얼음이 스크루 사이에 끼움현상이 발생하여 순간적으로 하중을 증가시킨 결과로 판단된다. 실제로 이러한 최대 하중값은 반복실험을 할 때 Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 불규칙적으로 변함을 알 수 있으며, 10 회 반복실험에서 표준규격 각얼음을 사용시 약 7.53 kgf 로 나타났다.

가속실험 조건의 각얼음을 사용할 경우 실제 얼음이 크기가 배출구의 입구보다 크기 때문에 배출은 발생하지 않고 계속적으로 아이스박스 내부에서 스크루와 회전운동을 하면서 부하로 작용하게 된다. 10 회 의 반복실험을 통하여 불 때 배출되는 표준 규격 각얼음을 사용하는 경우와 달리 가속실험에서는 얼음이 배출되지 않아 아이스박스 내에 있는 얼음 량에 따라서는 크게 하중 변화가 없었으며, 최대 하중의 경우 약 17.56kgf 로 나타났다. 따라서 가속실험 조건이 실제 표준상태의 조건에 비하여 약 2.5 배의 큰 하중으로 커넥터 부에 작용함을 알 수 있다.

2.2 가속 실험을 통한 마모현상 분석

커넥터의 접촉회전에 의한 마모현상을 분석하기 위하여 얼음의 크기를 제빙기 배출구보다 큰 가속실험 규격으로 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 커넥터 재질은 Fig. 5 와 같이 구성되어 있다. 시험 방법으로는 각각 30, 35, 50, 60, 120, 200min 연속 작동 후 마모에 의한 불순물을 육안으로 확인하고 불순물이 확인되는 경우 수집하여 성분분석을 하였다.

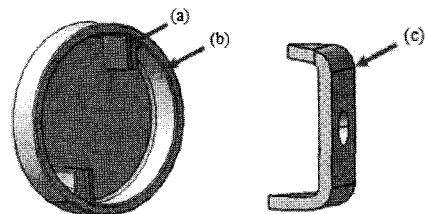


Fig. 5 Connector materials; (a) Ni-P coated STS-304 (coating thickness of 10 μm), (b) Nylon 66, (c) STS-304 only

Table 1 의 현상분석 결과에서 나타낸 바와 같이 가속실험조건에서 40min 이 경과한 경우에 모두 커넥터 주변에 불순물이 관찰되었다. 여기서 발생한 불순물을 수집하여 EDS(Energy Dispersive

Spectroscopy)를 사용하여 성분을 분석한 결과 커넥터-B 부분(Ni-P 코팅된 STS-304)에서 Ni-P 도금 층이 반복적인 운동으로 인한 피로마모 현상¹으로 박리되어 떨어진 것으로 나타났다[Fig. 6(a, b) 참조]. 또한 중동축에 연계된 커넥터-A의 경우 실제 육안검사 및 현미경 검사에서 불순물을 발견되지 않았다.

Table 1 Detection cases of metal particles by naked eye-inspection

min	30	35	40	45	50	60	120	200
Powder	⊗	⊗	○	○	○	○	○	○

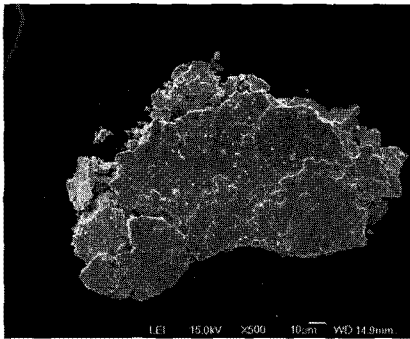


Fig. 6(a) SEM image of metal particle

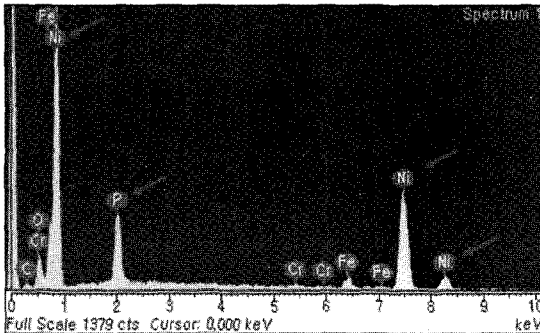


Fig. 6(b) result of EDS analysis on the particle

가속조건 실험에서 최대 200min 연속으로 작동시킨 뒤, 취약한 커넥터-B를 수거하여 표면을 확인한 결과 커넥터 사이의 상대운동 모드가 수직하중과 미끄럼 하중조건이 같이 발생함을 알 수 있었다. 따라서 무윤활 상태에서 수직과 수평방향의 복합하중에 의한 마모로 불순물이 발생함을 알 수 있었다. 또한 마모 메커니즘을 분석해 보면 Fe와 Ni-P 간의 상호 용해도가² 약 1% 정도 됨에 따라

친화성이 높다고 판단된다. 이러한 재료간 높은 친화성과 수직, 수평하중 반복 조건에 의해 응착³ 및 피로마모(fatigue and adhesive wear)로 판단된다 (Fig. 7 참조).

$$V = ZL(P/Hv) \quad (1)$$

응착마모의 경우 식(1)과 같이 마모량은 접촉하중에 비례하고 재료경도에 반비례한다(Holm-Archard 식).⁴ 여기서 V는 마모체적, Z와 L은 각각 접촉횟수에 대한 응착발생확률과 마찰거리를 나타낸 것인데 Z의 경우 재질, 마찰조건에 따라 변하는 상수이다. 또한 P와 Hv는 접촉면에 가해지는 하중과 비커스 경도를 의미한다. 따라서 식(1)에 의하면 마모량을 줄이기 위해서는 접촉하중을 줄이고 두 물체간에 마찰거리를 최소화하거나 Z 값을 낮추는 방법이 있다. 접촉하중을 줄이는 방법으로는 접촉면적을 크게 하거나 커넥터 부분의 접촉부 개수를 증가시켜 접촉하중 분산을 통한 하중집중을 방지하는 방법이 있다. 그러나 이런 경우에는 커넥터간의 분리 및 체결성이 떨어져서 사용상에 문제가 된다. 따라서 본 연구에서는 Z 값을 낮추는 방법으로 접근하고자 하였다. Z 값은 응착발생확률이기 때문에 재료간의 상호 친화성이나 윤활과 같은 마찰조건에 따라 달라지게 된다. 따라서 새로운 재료조합을 통하여 Z 값을 낮출 수 있다고 판단된다.

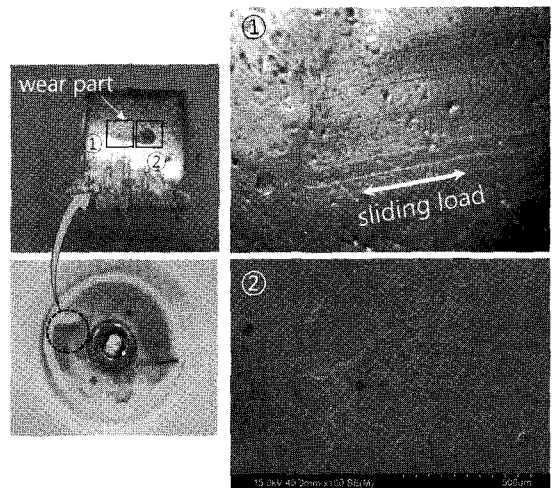


Fig. 7 Images of wear part on connector-B: optical image of ① and SEM image of ②

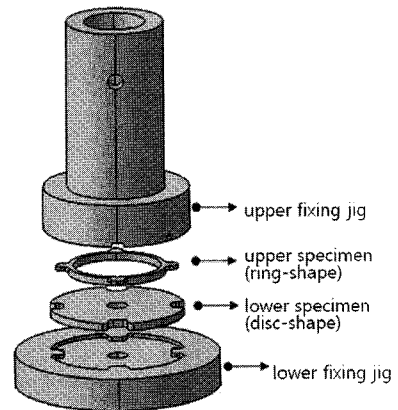
본 연구에서 사용하는 커넥터의 경우 인체 유해성과 관련이 있기 때문에 불순물량이 0%가 될 수 있도록 재료조합을 유도할 필요가 있다. 그리고 이러한 재료조합에 의한 마모현상을 규명하기 위하여 수직 및 수평 하중이 동시에 작용하면서 본 연구에 사용하는 커넥터 형상과 같이 좁은 모서리 면과 넓은 면적이 상호 접촉하여 작용하는 실제 조건을 구현할 수 있는 마모실험 방법을 제안하였다.

3. 수직-수평 복합하중 마모실험

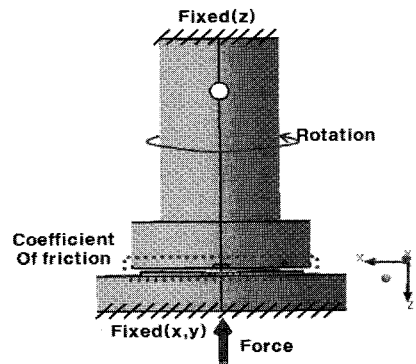
3.1 실험장치 설계 및 구성

마모시험방법으로는 마모조건에 따라 roller-on-roller, pin-on-disc, pin-on-roller, pin-on-disc, pin-on-roller, block-on-roller, pin-on-plate 등⁵ 다양한 방법이 제안되어 사용되고 있다. 일반적으로 마모시험에서는 접촉형태, 마모형태 등에 따라 용도에 맞는 마모시험방법을 선택하는 것이 중요하다. 그러나 대부분의 실험방법은 냉장도용 커넥터 접촉형태와 같이 면적이 좁고 수평, 수직하중이 동시에 작용하는 경우에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 실제 커넥터에 걸리는 하중과 접촉면적을 유사하게 나타낼 수 있는 링-디스크 형태의 마모실험법을 Fig. 8(a, b)와 같이 제안하였다.

제안한 마모시험장치는 상,하 시편 고정용 지그에 링 형태 및 평판 형태의 시편을 부착하도록 되어 있으며, Fig. 8(b)에 나타낸 것처럼 상부 지그는 회전운동을 하고 하부 지그는 가압하는 형태로 하중제어를 하여 시편 사이에 수평 및 수직하중이 부가되도록 하였다. 이러한 방식은 핀과 디스크(pin-on-disc)를 이용한 마모실험방식과도 유사하지만 접촉면적을 제어하기 쉽고 또한 시편이 핀 형태와 달리 링 형태로 되어 있어 마모실험 도중 안정된 하중전달이 가능하도록 하였다. Fig. 9에는 제안한 장치와 시편에 대한 자세한 크기와 모양을 나타내었으며 링의 폭을 2mm로 하여 커넥터-A의 접촉면 폭과 동일하게 설계하였다. 실험에 사용된 시편은 동일한 거칠기를 가지도록 실험 전에 연마페이퍼(#200 abrasive paper)로 거칠기를 조절하여 평균 거칠기 (R_a)가 $0.25\mu\text{m}$ 로 동일하게 하였다. 또한 모든 실험은 상온에서 무윤활 조건으로 실험하였으며 시편의 실험 전과 시험후의 중량을 정밀저울로 측정하여 마모량을 산출하였고 광학현미경으로 표면관찰도 부가적으로 실시하였다.

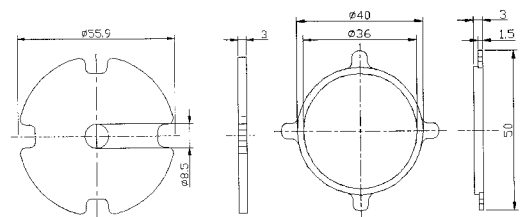


(a) view of separated parts

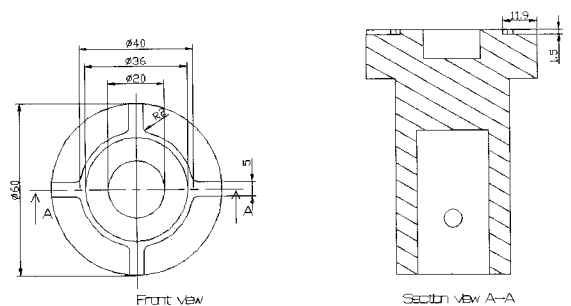


(b) assembled state

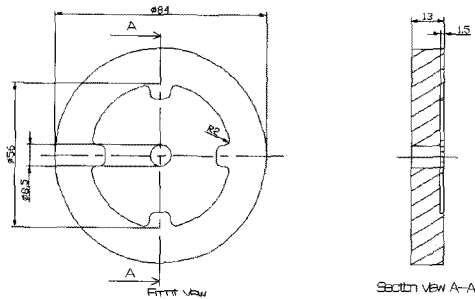
Fig. 8 Schematic diagram of ring-on-disc test method



(a) disc and ring specimen



(b) upper fixing jig



(c) lower fixing jig

Fig. 9 Details of specimens and jigs

3.2 복합하중 실험조건과 재료조합 선정

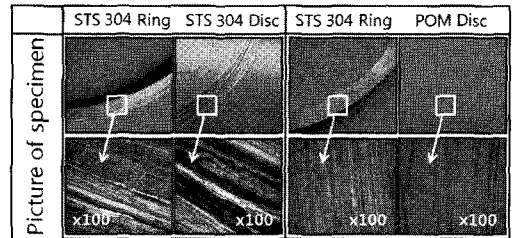
재료조합에 의한 마모실험에서 실험조건은 제빙기의 가속실험에서 걸리는 최대하중보다 큰 값인 25kgf 로 두고 구동속도는 현재 제빙기에서의 커넥터 구동속도와 같은 25rpm 으로 미끄럼 회전을 하며, 구동시간은 180sec 로 하였다. 링 형태의 시편으로 제작하였기 때문에 실제 제빙기용 커넥터의 접촉 길이보다 약 14 배 정도 길고, 부가 하중도 최대 가속조건 하중보다 약 1.4 배 크기때문에 식(1)에 나타난 Holm-Archard 관계식에 의한 경도와 마모발생조건이 동일하다는 가정하에서 마모량(V)은 19 배 정도 증가되는 실험조건을 선정하여 짧은 시간에 마모를 측정하도록 하였다.

재료 조합 선정은 Table 2 와 같이 인체에 유해성이 적은 폴리아세탈(POM),⁶ 폴리카보네이트(polycarbonate),⁷ STS-304, STS-310 의 재료조합을 만들었다. 폴리아세탈은 내마모성, 내구성 등 물리적 특성이 좋으며 자기윤활 성질이 뛰어나고, 폴리카보네이트는 금속대체 및 광학용의 정밀 부품과 내충격성, 투명성이 좋으며,⁵ 그리고 STS-304, STS-310 은 내부식성이 뛰어나다.

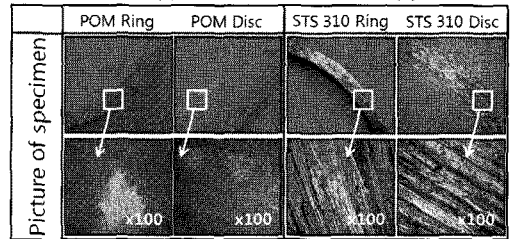
Table 2 Various types of test pairs

Pairs (ring-disc)
STS 304 - STS 304
STS 304 - Polycarbonate
STS 310 - STS 310
Ni-P STS 304 - STS 304
STS 304 - POM
STS 310 - POM
STS 310 - Polycarbonate
POM - POM

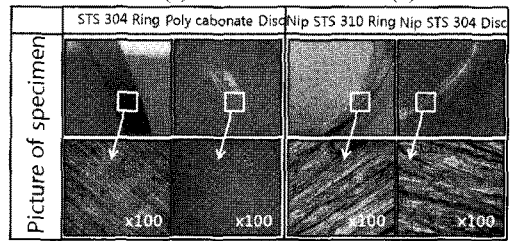
Table 2 에 기술한 재료조합 조건에 따라 시편을 각각 제작하여 마모실험을 수행하였으며, 실험 후 표면을 현미경으로 촬영하여 각각의 재료쌍의 마모 후 표면상태를 비교하였다.



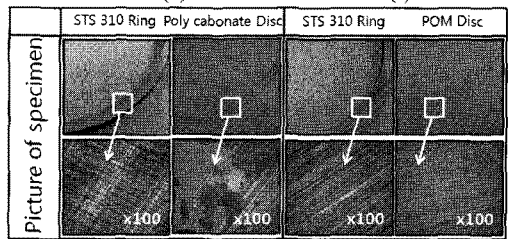
(a) (b)



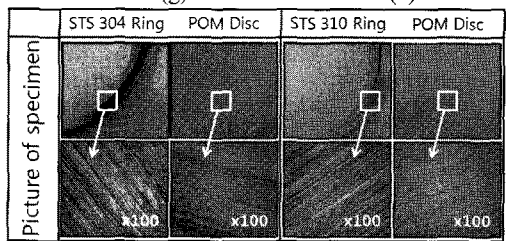
(c) (d)



(e) (f)



(g) (h)



(i) (j)

Fig. 9 Optical micrographs on worn surface of materials

4. 결과 및 토의

Table 3 Results of wear weight after 180 sec

Pairs (ring-disc)	Ring(g)	Disc(g)
STS 304 - STS 304	0.001	0.004
STS 304 - Polycarbonate	0.001	0.001
STS 310 - STS 310	0.005	0.001
Ni-P STS 304 - STS 304	0.003	0.001
STS 304 - POM	0.000	0.000
STS 310 - POM	0.000	0.000
STS 310 - Polycarbonate	0.000	0.000
POM - POM	0.000	0.000

Table 4 Results of wear weight after 600 sec

Pairs (ring-disc)	Ring(g)	Disc(g)
STS 304 - POM	0.000	0.000
STS 310 - POM	0.000	0.000
STS 310 - Polycarbonate	0.001	0.004
POM - POM	0.001	0.002

Table 3 에서 나타난 각각의 재료쌍에 대한 마모량을 살펴보면 링과 평판시편을 각각 STS-304 또는 STS-310 으로 동일재료로 제작한 경우에 Halling⁷ 의 응착마모에 의하여 많은 마모량을 나타내고 있다. 그리고 각각의 재료조합에서 마모실험 후 시편 표면을 관찰해 보면 일반적으로 STS 계열과 폴리머 계열의 재료조합에서 표면의 형상이 양호하게 나타났다. Table 4 에는 Table 3 에서 마모량이 거의 없는 재료 조합에 대하여 실험조건을 동일하게 하고 다만 마모시간을 600sec 로 늘려 마모실험을 추가로 하여 마모량을 재측정 하였다. 그 결과 STS-310 와 Polycarbonate 조합, POM 과 POM 조합에서 마모량이 측정되었으며 STS-304 와 POM 및 STS-310 과 POM 조합에서는 마모량의 변화가 미세하여 마모량 측정이 불가능하였다. 따라서 8 가지 재료조합에서 STS-304 또는 POM, STS-310 와 POM 이 수평, 수직하중 조건하에서 가장 적합한 재료조합으로 판단된다.

5. 결과

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) 제빙기용 커넥터와 같이 좁은 면적과 넓은 면적이 접하는 조건에서는 링-디스크 타입의 마모 실험방법을 통한 마모량 평가방법이 효과적임을 알 수 있었다.

(2) 무윤활 조건에서 동일재질을 사용한 재료

조합이 이종재질을 사용한 조합보다 응착마모 현상에 의해 마모량이 증가하였다.

(3) 제빙기 커넥터와 같이 마모에 의한 불순물이 발생하지 않아야 하는 조건에서는 STS-304 또는 STS-310 과 POM 의 재료조합이 가장 적합함을 알았다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Lee, H. Y., "Discussion on Rolling Contact Fatigue with Wear Amount by X-ray Reflection," Journal of KSTLE, Vol. 10, No. 2, pp. 51-55, 1994.
2. Lee, H. Y., "Friction and Wear Engineering," Taeil, p. 118, 2005.
3. Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., "Engineering Tribology," Butterworth-Heinemann, pp. 533-552, 2001.
4. Archard, J. F., "Contact and rubbin of flat surface," Journal of Applied Physics, Vol. 24, No. 8, pp. 981-988, 1953.
5. Kim, C. K., "Tribology," Hyungseul, p. 458, 2006
6. Kim, C. H., Ahn. H. S. and Chong, T. H., "Reciprocating Sliding Wear of Nylon and Polyacetal Against Steel," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 24, No. 3, pp. 786-793, 2000.
7. Jang, C. S., Kim, C. S., Park, B. G. and Kim, J. K., "An Evaluation of Probabilistic Strain-Life Curve in Polyacetal," Journal of KSME, Vol. 30, No. 11, pp. 1417-1424, 2006.