임베디드 서모커플 센서 제조 및 미끄럼 마찰 계면온도 측정에 관한 실험적 연구

장범택[†] · 임영헌 · 김석삼^{*}

경북대학교 기계공학과

Fabrication of Embedded Thermocouple Sensor and Experimental Study on Measurement of Interface Temperature for Dry Friction

Beomtaek Jang[†], Youngheon Lim and Seocksam Kim^{*}

Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

(Received September 10, 2013 ; Revised October 31, 2013 ; Accepted November 7, 2013)

Abstract – This study investigated the interface temperatures for the sliding friction of three types of pins fabricated with thermocouple wires by the suction casting method. Optical microscopy was used to examine the surrounding material state at the bonding interface with the thermocouple wires. Friction tests were performed under dry sliding conditions against stainless steel 304 at nominal stresses of 1.42-4.25 MPa and sliding speeds of 0.5-1.25 m/s. Tribological data were collected using a custom-made pin-on-disk apparatus that measured the interface temperature and corresponding friction coefficient. Static tests were performed to demonstrate the functionality and reliability of the thermocouple wires-combined temperature sensor (TCTS). Each TCTS showed good linearity and sensitivity and very similar response times for the thermocouple and critical temperature during sliding friction.

Keywords – sliding friction (미끄럼 마찰), suction casting method (흡입 주조법), embedded thermocouple (임베디드 서모커플), interface temperature (계면온도), frictional heating (마찰열)

1. 서 론

최근에 급속냉각법(Rapid cooling method)을 이용하여 제조된 벌크 비정질합금들(Bulk amorphous alloys)은 제조공정 특성상 무질서한 원자 구조와 변형기구를 가진다[1]. 이에 우수한 내모성과 부식 저항성을 나타내는 비정질 형성능이 큰 비정질합금은 새로운 마모 코팅재료로서 고려될 수 있다[2]. 그러나 비정질상은 열

역학적으로 준안정상태이기 때문에 지속적인 일정 압력 하에 천이온도(T_g) 이하에서도 조직변화가 발생한다고 알려져 있다. 일반적으로 마찰열(Frictional heating)은 재료의 경도, 접촉면의 형상, 접촉압력, 마찰속도에 크게 의존하므로[3], 유망한 마모 코팅재료로서 비정질합금의 실질적 적용을 위해서는 마찰운동 동안에 접촉계면의 실제온도 변화를 측정할 필요가 있다.

기존에 알려진 마찰열에 의한 계면온도 측정은 다이내믹 서모커플(Dynamic thermocouple technique)[4]과 임베디드 서모커플기법(Embedded thermo-couple technique)이 대표적인데[5], 그 중에서 서모커플 와이어를 시편에 구멍을 뚫어 삽입한 후 무기시멘트와 같은 접착제로 고

[†]Author : btjang@knu.ac.kr

^{*}Corresponding author : sskim@knu.ac.kr

© 이 논문은 한국윤활학회 2013년도 추계 학술대회(2013. 10. 16~18 히든베이 호텔) 발표논문임.

정하는 임베디드 서모커플기법이 주로 사용되어 왔지만, 이 측정법은 실질적으로 제한적 실험조건으로 인해 실제 실험결과를 도출하는데 한계점을 가지고 있다. 게다가 홀 내부에 삽입된 서모커플과 홀 자체는 미끄럼 방향에 수직한 열 유동 분포를 방해할 수 있어 측정된 온도값이 서모커플이 없는 경우와 비교했을 때 동일지점에서의 온도측정이 상이할 수 있다. 그리고 섬광온도(Flash temperature)가 관심의 대상이 아닌 미끄럼 물체 내부의 벌크 온도(bulk temperature)를 측정하는 것은 해석적 연구와 두 접촉 물체간 마찰열 분포를 계산하기 위한 경계조건을 결정하는데 실질적으로 사용될 수 있다.

따라서 서모커플은 비교적 저렴한 가격에 정확한 센서로써 광범위한 온도범위에서 작동가능하기 때문에 온도 측정을 위해 가장 보편적으로 사용되는 센서다. 이에 본 실험에서는 흡입 주조법을 활용한 서모커플 와이어와 모합금(Mother alloy)을 금속학적 결합으로 비정질 핀을 제조한 후에 핀 온 디스크 마찰 시험을 통한 실시간 계면온도를 측정하였고 단일성분을 모재(Mother metal)로 만든 시편의 측정 결과값과 비교하였다.

2. 실험절차

2-1. 임베디드 서모커플의 원리

제백효과는 전도체에 전류가 흐르지 않아도 에너지의 흐름에 의해 전압의 차이가 생기고 기전력이 발생한다는 원리다. 측온 접점에서 많은 전자가 충돌대에서 전도대로 이동되고 참고접점으로 확산되어 상대적으로 측온 접점에서 참고접점으로 향하는 전기장이 생기므로 회로 내부의 에너지준위가 경사를 이루고 양측 금속의 페르미 준위 사이에 온도차가 생겨 양전위의 열기전력이 발생한다. 서모커플은 특성이 다른 두 종류의 도체의 양단을 접합해 폐회로를 만들고 한쪽을 일정한 기준점으로 만들고 측정하고자 하는 접점을 미지 온도차로 하여 측정하고자 하는 접촉점의 온도가 변하면 미지의 온도에 대응되는 열기전력만을 정확히 측정으로써 온도측정이 가능하다.

임베디드 서모커플은 이러한 서모커플 원리를 이용하여 정지체(Stationary body)의 미끄럼 표면 아래에 홀을 뚫어 작은 서모커플을 표면과 동일한 위치나 부표면에 삽입한 후에 무기시멘트나 에폭시로 접착하여

고정시킨 후에 미끄럼접촉 계면온도를 측정하는 기법으로이다.

2-2. 센서 소재 및 제조 방법

본 실험을 위한 모합금은 공업용 합금철과 순금속을 이용하여 아크 용해로에서 제작되었다. 아크 용해를 위해 로터리 펌프를 이용하여 챔버는 저진공을 유지하고 고온산화를 최소화하기 위해서 3회 이상의 퍼지공정을 실시하였다. 또한 모합금 제작 시 합금 내부의 편석을 없애기 위해 용해된 모합금을 뒤집어서 3회 용해 하였다.

실제 접촉 계면온도를 정확하게 측정하기 위하여 본

Table 1. Surrounding materials

TCTS Chemical composition (wt.%)
Alloy 76.76Fe1.82C1.92Si1.32B-5.54P2.46Cr9.07Mo1.13Al
Pure-Fe > 99.5Fe
Pure-Ni > 99.5Ni

Fig. 1. (a) Photograph of thermocouple wires-combined temperature sensor and (b) enlarged cross-section of (a).

Table 2. K-type thermocouple

K-type Chemical composition (wt.%)
Chromel 90Ni10Cr
Alumel 95 Ni3Mn2Al1Si

Fig. 2. Photograph of the static tester equipped with hot plate and DAQ system.

연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 온도 측정 범위가 넓은 직경이 0.38 mm인 K형 서모커플 와이어 (Table 1 참조)를 서로 S꺾임을 한 후에 진공 흡입주조기 내부에 고정되는 구리몰드에 장착하였다. 그리고 다원계로 구성된 모합금을 주조기 내부에 넣고 아크팁으로 고온에서 용융시킨 후에 순간적인 흡입력으로 모합금 재료와 와이어간 금속학적인 결합으로 급속냉각을 시켜 직경 3 mm와 길이 50 mm인 봉상형 시편으로 제조하였다. Fig. 1(a)는 서모커플 와이어와 모합금이 주조되어 완성된 온도센서(Thermocouple combined-temperature sensor) TCTS를 나타낸다. Fig. 2는 핀을 마운팅한 후에 폴리싱 처리한 센서의 단면으로 확대 촬영한 현미경사진을 나타낸다. 와이어 표면과 용융 후 재 응고된 모합금간 계면접착이 잘 이루어 졌음을 알 수 있다.

2.3. 센서보정 및 온도측정 장치

서모커플 제백 전압 측정은 서모커플 와이어를 측정 시스템에 연결하면 추가의 열전기 회로가 발생하기 때문에 서모커플을 볼트미터 또는 기타 측정 시스템에 연결하면 안 된다. Table 2에 나타난 상용 K-type 서모커플 와이어의 출력 전압값은 제조사에서 제시한 전압값과 열 기전력의 상관표를 참고하여 보정하였다.

Fig. 3. Schematics of the interface temperature measuring system applied with pin-on-disk test.

그리고 선행실험으로 본 실험을 위해 제조된 TCTS의 기능성, 정확도, 민감도를 측정하기 위해 인두팁 (Soldering iron tip)을 활용하여 서모커플 접점과 TCTS의 측온 접점부를 동시에 열을 공급하여 온도상승 추이를 관찰하였다. 또한 접점부의 영향을 고려하여 보다 큰 열원(열탕)의 환경에서 측온 접점부를 담근후에 온도변화도 확인하였다. 마지막으로 높은 온도 조건에서 센서간의 기능성을 비교하고자 Fig. 2와 같이 대면적 열원인 핫플레이트(Hot plate)를 이용하여 실시간 정적실험을 실시하였다.

Fig. 2는 pin-on-disk 형태의 마찰실험기로 크게 실험 구동부와 데이터 획득부로 나눈다. 구동부에는 서모커플 와이어가 결합된 핀을 고정할 수 있는 홀더(holder), 상대재(Counterpart)를 고정하는 회전체(Rotary body)와 수직하중을 가하고 마찰력을 감지하는 로드셀이 부착된 고정체(Stationary body)로 구성된다. 그리고 데이터 획득부로 전압신호를 증폭기를 통하여 아날로그/디지털 변환기(NI cDAQ-9127)로 변환시키는 DAQ 시스템과 그래픽 기반 프로그래밍 소프트웨어인 랩뷰(Labview)가 설치된 컴퓨터로 실시간 데이터를 수집하였다.

3. 실험결과 및 토의

3-1. 정적반응

Fig. 4는 상대적으로 열원면적이 좁은 인두와 대면적의 열원을 가진 열탕(Water bath)을 사용하여 각각의 온도변화를 측정한 그래프이다. 먼저 열탕에 잠긴 TC와 TCTS의 측온 접점의 온도변화를 보면 거의 동일하게 온도상승이 발생하였다. 이는 열탕에 잠긴 TCTS센서가 TC가 가진 센서특성을 거의 동일하게 반응한다는 것을 의미한다. 그리고 상용 온도측정기와와의 보정을 위해서 인두팁과 접촉한 TCTS의 측온 접점부

Fig. 4. Calibrating results in both small heat source at soldering iron and larger heat source in water bath.

Fig. 5. Static response results in a hot plate.

를 적외선 온도기를 이용하여 온도상승을 측정된 결과에서도 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 5는 상대적으로 큰 접촉면적을 가진 열원으로 TC를 비롯해 모든 TCTS센서들이 다른 온도상승분포를 보였다. 열을 가한 후 온도감지가 시작되면서 각 센서별로 온도 상승 기울기가 시간이 지남에 따라 조금씩 달라짐을 확인 할 수 있었다. 그중에서 Fe-TCTS센서가 가장 높은 온도값을 보이고 TC는 가장 낮은 최고값을 나타냈다. 그리고 냉각영역에서도 TC가 가장 빠르게 거의 수직하게 냉각곡선을 보였다. 이는 TC와 응고한 모재들(Fe, Ni, Alloy)이 가진 고유한 열전달계수의 영향으로 판단되는데 열원표면과 접촉하는 계면내부에 존재하는 크고 작은 돌기들간의 열전도와 돌기간의 공간상에서 대류현상에 의한 열교환이 발생한 것으로 판단

Fig. 6. Variations of the interface temperature of Fe-TCTS pin at various normal stresses and speeds as a function of the sliding time.

Fig. 7. Variations of the interface temperature of Ni-TCTS pin at various normal stresses as a function of the sliding time.

된다.

3.2. 동적반응

성분이 다른 3종류의 모재인 Fe-TCTS, Ni-TCTS, Alloy-TCTS센서들을 다양한 수직하중과 미끄럼속도 하에서 마찰실험을 수행하였다.

먼저 Fig. 6는 Fe-TCTS센서를 1.42~4.25 MPa의 수직하중과 0.75~1.25 m/s의 미끄럼속도에서 실시간으로 측정된 온도상승 곡선들이다. 모든 실험조건에서 거의 동일한 형태로 온도상승 경향을 보이는데 초기에는 온도가 급격하게 상승하다가 천이지점 이후에는 아주 완만하게 상승 또는 정상상태값을 보였다. 특히, 4.25 MPa와 1.25 m/s의 중한실험조건에서는 순간적으로 계

Fig. 8. Variations of the interface temperature of Alloy-TCTS pin at various sliding speeds as a function of the sliding time.

Fig. 9. Theoretically calculated flash temperatures by equation (2).

면온도 값이 최대 200°C에 육박하는 것을 알 수 있었다. 그리고 정상상태에서 동일한 접촉응력(4.25 MPa) 하에 저속과 고속간의 온도차이가 약 120°C정도였다.

Fig. 7은 Ni-TCTS센서를 일정한 미끄럼속도에서 1.42~4.25 MPa 수직응력에 따른 계면온도 측정값들이다. 특이한 점은 길들이기 구간이 지난 후에도 모든 하중조건하에서 크고 작은 스틱슬립현상이 발생하였는데, 이것은 스윙(Squeal)이나 채터링(Chattering)의 형태로 에너지의 발산현상이 나타나 마찰 접촉면의 운동을 불안정하게 한다.

Fig. 8는 Alloy-TCTS센서로 일정한 수직응력하에 0.5~1.25 m/s의 다양한 미끄럼속도로 실험하여 얻은 온도값들이다. 다른 센서들과 마찬가지로 미끄럼속도 별로 뚜렷한 계면온도 차이를 보이는 반면에 가장 악

한 실험조건에서 최고 계면온도값이 약 240°C 까지 상승하였다가 다시 감소하였다.

Fig. 9는 본 실험에서 얻은 Alloy-TCTS로 측정된 계면온도를 이용한 접촉돌기 수(N)와 섬광온도(Tf)의 관계 그래프이다. 섬광온도는 Ashby[3]에 의해 유도된 다음 식에 의하여 계산된다.

$$T_b = T_o + \frac{\mu T_c^* \beta}{2 + \beta(\pi \bar{V}/8)^{1/2}} \bar{F} \bar{V} \quad (1)$$

식 (1)에서 벌크온도(Tb)에 실험으로부터 측정된 계면온도 값을 대입하면 β 값을 얻을 수 있고, 이를 식 (2)에 대입하면 Fig. 9와 같이 섬광온도(Tf)와 돌기 수 간의 관계 그래프를 유도 할 수 있다.

$$T_f = T_b + \frac{\mu T_c^* \beta}{2} \left(\frac{\bar{F}}{N} \right)^{1/2} \bar{V} \quad (2)$$

여기서, 마찰계수(μ)는 0.4로 평균값을 적용하고, 실제 상당온도(T_c^*)는 2856K, 무차원 상수값은 $\bar{F} = F/A_o H_o$, $\bar{V} = V r_o/a$ 식에서 구하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 미끄럼 접촉 계면온도를 측정하기 위해서 흡입주조법을 활용한 서모커플와이어가 결합된 온도센서 핀을 제조하였고, 임베디드 서모커플기법을 이용하여 마찰실험간 접촉 계면온도를 측정하였다. 또한 Ashby의 유도식을 이용한 벌크온도와 섬광온도 관계식에서 측정하기 어려운 변수를 고려하지 않고 섬광온도를 예측할 수 있었다.

따라서 본 논문에서 사용한 실험적 방법은 마찰열로 인한 계면에서 열확산기구와 열적 효과의 규명과 해석적 연구에서 경계조건에 사용될 수 있을 것으로 기대되며 추가연구가 요구된다.

References

- [1] Yoon, S. H, Kim, J. H., Kim, B. D., Lee and C. H., "Tribological behavior of B4C reinforced Fe-based bulk metallic glass composite coating," Surface & Coatings Technology, Vol. 25, pp.1962-1968, 2010.
- [2] Jang, B. T., Yi, S. H. and Kim, S. S., "Tribological behavior of Fe-based bulk metallic glass," Journal of Mechanical Science and Technology Vol. 24, pp.89-92, 2010.

- [3] Ashby, M. F., Abulawi, J. and Kong, H. S., "Temperature maps for Frictional Heating in Dry sliding," Tribology Transactions, Vol. 34, No.4, pp. 577-587, 1991.
- [4] Lee, S. D. and Cho, Y. J., "Analysis and Measurement of Rough Surface Temperature Rise in Lubricated Condition," Journal of the KSTLE, Vol. 23, No. 2, pp. 56-60, 2007.
- [5] Bhushan, B., Principles and Applications of Tribology, Chap. 7, pp. 462-464, John Wiley & Sons, New York, 1999.