

스틱-슬립을 발생저감을 위한 고분자 소재간 실험적 미끄럼 마찰특성 분석

이동규 · 박희진 · 박상후*[†]

부산대학교 기계공학부, *부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공연구소
(2013년 5월 18일 접수, 2013년 6월 27일 수정, 2013년 6월 30일 채택)

Experimental Study on Friction Characteristics between Sliding Polymer Plates for Reduction of Stick-and-Slip Abnormal Noise

Dong-Gyu Lee, Hee-Jin Park, and Sang-Hu Park*[†]

Graduate School of Mechanical Eng., Pusan Nat'l Univ., Busandaehak-ro, 63beon-gil, Busan 609-735, Korea

*School of Mechanical Eng./ERC NSDM, Pusan Nat'l Univ., Busandaehak-ro, 63beon-gil, Busan 609-735, Korea

(Received May 18, 2013; Revised June 27, 2013; Accepted June 30, 2013)

초록: 이상소음은 고분자 판재가 상호간에 미끄럼 운동을 할 때 마찰에 의한 스틱-슬립 메카니즘에 의하여 발생한다. 본 연구에서는 실험적 방법을 통하여 이상소음을 줄이기 위하여 가전제품에 많이 사용되는 ABS, PP, MIPS, POM 고분자 소재에 대하여 ABS를 기초로 하여 소재간의 조합이 이상소음에 미치는 영향을 알아보았다. 소재간 마찰에 의한 이상소음을 평가하기 위한 실험방법과 장치를 제안하였으며, 실험변수로는 소재의 조합뿐만 아니라 고분자 판재의 표면 거칠기, 수직 접촉하중, 상대운동 속도 등을 두었다. 본 연구를 통하여 이상소음 저감을 위해서 ABS 소재와 POM 소재 조합이 가장 좋음을 알 수 있었으며, 다른 재료조합에 대한 결과도 상호 비교하였다.

Abstract: There is a kind of abnormal noise known to come from the stick-slip mechanism induced by frictional impulses during the sliding of two polymeric plates. In this work, quantitative analysis of abnormal noise is carried out based on experimental results. Some combinations of polymer plates, such as an ABS base-plate contacted to ABS, PP, MIPS, and POM plates, which are well-known materials used in home-appliances, are studied to obtain the best combination of polymer plates in order to reduce the abnormal noise. For the experiments, a rig for the test was set up and a methodology was proposed. In addition, the effects of the surface roughness of the plate, the normal loading force, and the relative sliding speed between the two contact plates were evaluated in order to understand the reason for the abnormal noise. Through this experimental work, the optimal combination of materials was ABS/POM system to reduce the noise in real industrial applications.

Keywords: stick-and-slip noise, sliding friction, polymer plate, sound pressure level, ABS/MIPS/POM/PP.

서 론

전자제품의 경우 경량화, 내부식성 등의 요구에 따라 다양한 고분자 소재를 사용한다. 이러한 고분자 소재는 전자제품의 외관이나 냉장고의 내부구조(inner case)나 선반(shelf)같은 곳에 많이 사용되고 있다. 사용환경에 따라 고분자 부품간에 상대운동이 발생하게 되고 이것에 의하여 마찰음인 스틱-슬립(stick-slip) 음이 발생하기도 한다. 최근 소비자의 요구조건으로 제품의 질적 향상뿐만 아니라 쾌적성에 영향을 주는 이상소음(abnormal noise)에 대한 불만 사항이 높아지고 있다. 냉장고의 경우, 대부분 실내에 위치해 있으며, 냉장고 문을

열고 닫음에 의해서 내부로 유입된 고온의 실온이 냉각되면서 음압(negative pressure)이 발생하게 된다. 이것에 의하여 냉장고 내부구조물 사이에 상대변위가 발생되면서 스틱-슬립 음이 생성된다.

최근 스틱-슬립에 의한 기계적 마멸, 소음해결을 위하여 다양한 연구가¹⁻⁵ 진행되어 많은 부분이 개선되어 적용되고 있지만 이상소음에 대한 해결책은 미미한 편이다. 특히, 가전제품의 부품간 마찰음에 대한 연구는 진행된 것이 거의 없으며, 그 원인에 대한 정확한 메카니즘 분석과 고분자 재료선정에 관한 연구가 이루어지지 않았다.

현재까지 발표된 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. 고분자 소재에 관한 마찰 현상이나 스틱-슬립 마찰에 대한 이론적인 연구는 1995년 Edward에⁶ 의해 고분자 소재의 기계적 성질, 마찰 메카니즘과 마찰에 의한 진동에 관한 실험적 연

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sanghu@pusan.ac.kr

구를 통해 마찰에 영향을 주는 각 요소들에 관한 실험적 분석을 수행하였고, 1996년 Berman^{7,8} 의해 소재간의 다양한 특성에 의해 기준을 분류하면서 조건에 따른 스틱-슬립 모델을 제시하였다. 1999년 Bouissou⁹ 의해 같은 소재간의 접촉 강성과 하중에 따른 정지 마찰계수(static friction coefficient), 운동 마찰계수(kinetic friction coefficient) 차이에 대한 실험적 연구를 실시하였다. 이후 많은 고분자 분야의 발전이 진행되었고, 2001년 Jibiki,¹⁰ Briscoe¹¹ 마찰소음이 소재간의 상대 변형에 의한 내부 에너지 소산에 의해 발생하는 문제로서 미끄럼 속도(sliding velocity)와 정지마찰에서 동마찰로의 전이 시 마찰소음에 영향을 준다고 밝혔다. 2001년 Hunt,¹² 2005년 Choi¹³ 자동차 부품으로 많이 사용되는 고분자 소재의 마찰소음에 관한 실험적 연구결과를 발표하였다. 또한 마찰과 표면거칠기의 관계에 대해 연구가 발표되었다.¹⁴

본 연구에서는 일반 가전제품의 부품제작에 많이 사용되는 ABS(acrylonitrile-butadiene-styrene), PP(polypropylene), POM (polyoxymethylene), MIPS(medium impact polystyrene) 고분자 소재간의 마찰특성에 대해 실험방법과 장치를 제안하고 실험적 방법을 통하여 고분자 판재의 표면 거칠기, 상대속도, 수직 접촉하중, 고분자 소재의 조합 등에 따라 달라지는 마찰계수 특성과 이에 따른 실제 소음에 미치는 영향에 대하여 분석하고 가장 적합한 고분자 소재조합을 제안하였다.

실 험

물질. 본 연구에서 사용된 고분자 재료는 실제 냉장고 제작에 주로 사용되는 ABS, PP, POM, MIPS를 사용하였다. 각 소재는 판재 형태로 사출성형(injection molding) 공정으로 제작하였으며, 냉장고 내부구조에 사용되는 ABS 평판을 기준 시편으로 하고 나머지 소재를 ABS와 미끄럼 접촉에 의한 마

	<chem>N#CC=C</chem> acrylonitrile <chem>H2C=CH-CH=CH2</chem> 1,3-butadiene <chem>C6H5-CH=CH2</chem> styrene $(C_8H_8)_x(C_4H_6)_y(C_3H_3N)_z$	$(C_8H_8)_n$	$(CH_2O)_n$	$(C_3H_6)_n$
	ABS	MIPS	POM	PP
Supplier (maker)	LG Chem	LG Chem	LG Chem	GS Caltex
Model	RS657L	MI750	N109LD	M540
Rockwell hardness	101	110	86	82
Tensile strength (kgf/cm ²)	470	380	620	280
Specimen size (mm)	100×170×3 (63×100×3)	63×100×3	63×100×3	63×100×3
Roughness, Ra (μm)	0.05	0.05	0.05	0.04

Figure 1. Molecular formula and major material properties of ABS, MIPS, POM, and PP.

찰음 특성분석 비교시편으로 하였다. 기초적인 시편에 대한 고분자 구조와 주요 정보를 Figure 1에 나타내었다.

시편의 크기는 기준시편인 ABS의 경우만 크기가 폭 100 mm, 길이 170 mm, 두께 3 mm로 두었고, 비교시편은 모두 동일하게 제작하였다. 또한 시편의 표면 거칠기의 경우도 초기 조건으로 모두 중심선 평균 거칠기(arithmetical average roughness, R_a)가 0.04~0.05로 동일한 상태가 되도록 하였다.

실험장치 구성. 고분자 소재간의 스틱-슬립에 의한 마찰음을 분석하기 위하여 Figure 2와 같이 하중, 표면거칠기, 상대 미끄럼 속도 제어가 가능한 실험장치를 구성하였다. 본 연구에서 제안한 실험장치는 규격화된 실험장치는 아니며, 일반적으로 마찰계수를 측정하는 장치와 유사하다.

기준 고분자 시편(specimen-B)은 ABS 소재로 동일하게 하고 아래 면에 고정된 뒤 그 위에 상대운동을 하는 고분자 시편(specimen-A)을 놓은 다음 원하는 수직하중(W)을 위치시킨다. 변위와 속도조절이 가능하도록 와이어와 도르래를 이용한 당김 장치를 구성하고 상부 시편을 당겨서 고분자 소재간의 마찰특성을 분석하도록 하였다. 당기는 하중의 크기를 측정하기 위하여 로드셀(load cell, UU-k2 > 2 kgf, Dacell)을 설치하고 시간에 따른 하중의 변화를 모니터링하도록 하였다. 또한 고정시편과 이동시편에는 가속도계(Type-4517, B&K)를 설치하여 상대 변위시 상하방향 가속도 값을 측정할 수 있도록 데이터 수집기(NicDAQ-9174, sensor module: NI9234, national instruments)를 구성하였다.

결과 및 토론

미끄럼 속도에 따른 마찰특성. 고분자 소재간의 미끄럼 속도에 의한 마찰특성을 알아보기 위하여 Figure 2 실험장치에서 2 kgf 무게 추에 의한 수직하중이 유지되는 상태에서 두 시편의 접촉시간을 10분간 주었다. 실제 접촉시간은 고온조건에서는 마찰력에 영향을 주지만 실온에서는 큰 영향이 없

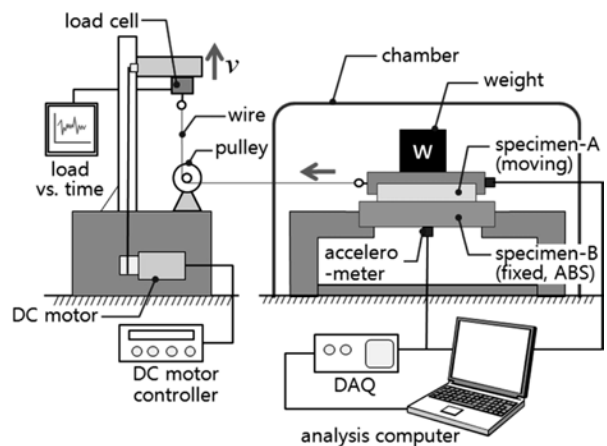


Figure 2. Schematic diagram of experimental setup.

기 때문에 임의의 시간으로 정하였다. 그 뒤에 당기는 속도 (v)를 각각 0.5, 1.0, 3.0, 10.0 mm/min로 4가지 조건으로 일정한 속도로 당겼다. 각 경우마다 총 5회 측정 후 평균치를 구하였다. 실험은 상온조건과 일반적인 습도조건 하에서 실시하였다.

Figure 3(a)에는 스틱-슬립 현상에 유사할 것으로 생각되는 가장 저속인 0.5 mm/min 속도로 당길 때의 고분자 소재조합에 따른 마찰력 변화를 나타낸 것이다. 고분자 소재 조합간 미끄럼 마찰운동을 할 때 마찰력의 차이는 두 표면의 접촉 과정에서 표면의 돌기들이 탄성 접촉하여 서로 달라 붙으려는 응착현상이 발생하고 서로 당기는 힘이 강하게 작용하여 마찰저항력을 증가시키는데 고분자 소재간의 물리적 결합으로 분자 사이에서 발생하는 결합력(Van der Waals' force)이 응착력에 영향을 미친다.

그러므로 동일한 시편의 크기와 미끄럼 조건일 때 소재 조합간 재질에 따라 친화적 성질이 마찰력에 영향을 줄 것으로 사료된다. ABS와 ABS 소재조합의 경우 같은 재질의 소재간 미끄럼 마찰 시 응착력에 의한 마찰력이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 Figure 3(a)의 ①번 곡선과 같이 전형적인 스틱-슬립 모션을 보여준다. MIPS와 ABS 조합 (Figure 3(a)의 ②)에서도 두 소재가 스티렌계 고분자(styrenic polymer)의 분자 구조가 동일하고, 모두 비정질로 분자 구조가 규칙적이지 않으며 사슬모양의 얽혀있는 형태로 서로간의 결합력이 크게 되어 스틱-슬립 거동을 잘 나타나는 것으로 사료된다. 따라서 이러한 재료조합의 경우 마찰소음 발생가능성이 다른 조합에 비하여 높다고 볼 수 있다. 반면에 PP, POM 소재는 고정시편인 ABS 소재와의 물리적 결합력에 의한 응착력은 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 또한 POM과 ABS의 조합에서는 스틱-슬립의 현상이 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다.

고분자 소재 조합간의 미끄럼 속도에 대한 정지 마찰력과 마찰계수를 Figure 3(b)에 나타내었다. 또한 스틱-슬립 거동을 상대적으로 확인하기 위하여 정지 마찰력과 동 마찰력의 차이(S-K friction force)를 Figure 3(c)에 비교하였다. 동일한 조건에서 접촉표면의 응착력이 큰 조합인 ABS와 ABS, MIPS와 ABS일 때 정지 마찰력과 마찰계수가 가장 크게 나타났으며, 미끄럼 속도가 증가할수록 비례적으로 증가하였다. 또한 정지 마찰력과 동 마찰력의 차이를 비교해 보아도 ABS와 ABS, MIPS와 ABS 조합인 경우가 다른 경우에 비하여 높은 값을 나타내었다. POM과 ABS, PP와 ABS 조합에서는 최대 정지 마찰력에 도달한 후 동 마찰력으로 전환되어 그 차이가 다른 경우에 비하여 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서 기준 시편 ABS에 대하여 비교시편이 ABS>MIPS>PP>POM 순서로 소재간 미끄럼 마찰력이 크게 나타났으며 이것은 표면에 발생하는 소재간의 친화성에 의한 응착력의 크기에 의한 영향으로 분석된다.

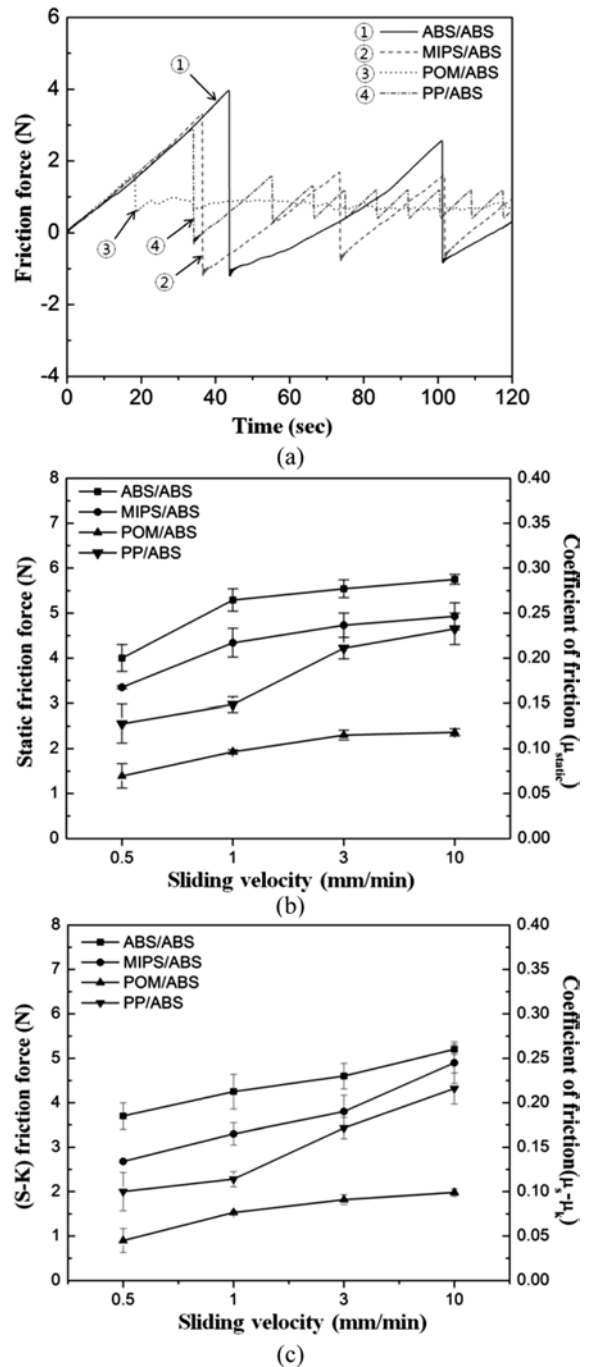


Figure 3. (a) Variation of friction force by combination of polymer plates (at sliding velocity of 0.5 mm/min); (b) static friction force and coefficient of friction according to diverse sliding velocities; (c) difference between static and kinetic friction force, and difference between static and kinetic coefficient of friction.

수직하중 크기에 따른 마찰특성. 수직하중은 두 시편의 접촉면에서 실제 접촉면적에 직접적인 영향을 주게 되므로 결과적으로 마찰저항에 영향을 주게 된다. 수직하중과 마찰특성을 알아보기 위하여 미끄럼 속도가 0.5 mm/min으로 일정

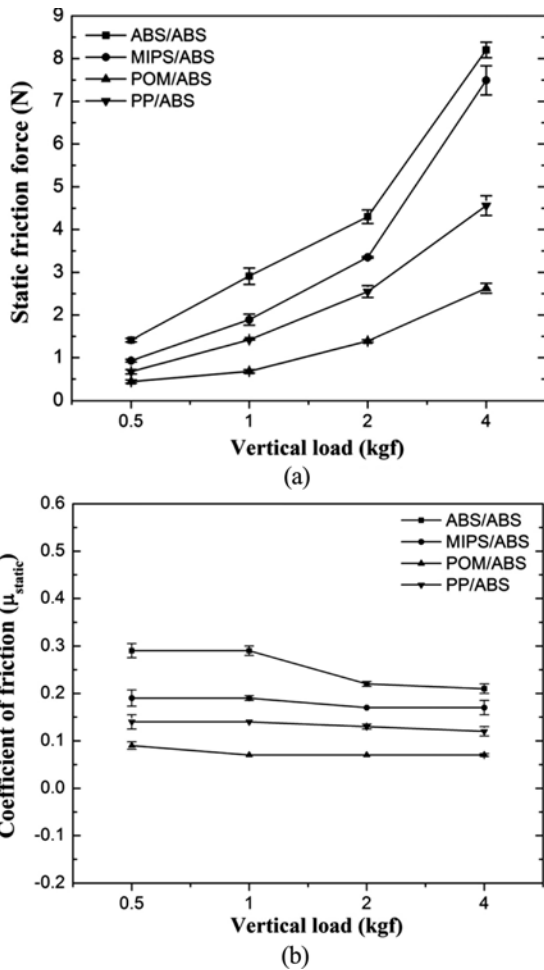


Figure 4. (a) Variation of static friction force according to the change of vertical load from 0.5 to 4 kgf; (b) change of static coefficient of friction depending on the same loading conditions.

한 조건에서 무게 추를 0.5, 1, 2, 4 kgf로 각각 달리하면서 실험을 실시하였다.

실험결과에서 수직하중의 크기가 증가할수록 접촉면적 증가와 소재간 응착력의 증가로 인하여 마찰력이 증가하였다. Figure 4(a)에 나타난 것처럼 모든 소재 조합의 경우에 하중 증가에 따라 최대 정지 마찰력이 증가하였다. 하지만, Figure 4(b)와 같이 마찰계수 입장에서 보면 하중의 증가에 따라 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. ABS와 ABS 소재가 접하는 경우에는 오히려 수직하중의 증가로 인하여 접촉면적이 증가하여 균일한 하중이 가해지는 형태가 되어서 마찰계수가 20% 줄어드는 경향이 나타났다.

표면 거칠기에 따른 마찰특성. 고분자 시험편의 표면의 거칠기 정도를 달리하여 소재간의 마찰실험을 실시하여 스틱-슬립 현상에 미치는 영향을 알아보았다. 실제 접촉 표면의 미세 돌기들의 영향은 마찰이론의 거칠기 가설과 응착이론의 복잡한 형태로 소재간의 마찰과 마멸과의 관계가 복잡하

Table 1. Surface Roughness Conditions

Surface, R_a (μm)	ABS	MIPS	POM	PP
Specimen-A	0.05	0.05	0.05	0.04
Specimen-B	0.26	0.25	0.20	0.22
Specimen-C	3.3	2.3	2.1	3.4

다. 하지만, 본 연구에서는 가전제품에 들어가는 고분자 소재를 다루기 때문에 대체적으로 저속 상대운동, 저하중 조건일 때 수행한 실험으로 단순 표면 거칠기 조건에 따른 마찰경향만 파악하고자 하였다. 실험 방법으로 고정 시편인 ABS 소재의 표면 평균거칠기는 일정한 값($R_a=0.05$)으로 두고 비교 시편을 사포(sand paper, No.600)로 표면을 거칠게 한 다음 기계적으로 폴리싱하여 거칠기 조건을 변경하였다. 상대 미끄럼 속도 0.5 mm/min, 수직하중 2와 4 kgf 조건에서 각각 실시하였다. 실험에 사용된 표면 거칠기 조건에 대하여 Table 1에 나타내었다.

실험 결과 소재간의 결합력이 상대적으로 큰 ABS, MIPS 소재에 관하여 동일한 조건에서 표면거칠기 값을 증가시켰을 때 평균거칠기 값이 두 소재 모두 약 0.2 μm 부근에서 마찰력이 감소하는 경향을 나타낸다(Figure 5(a)와 5(b)). 이것은 기준시편인 ABS의 경우 표면거칠기가 매우 높은 상태로 유지하고 비교시편만 거칠기가 조금 올라감에 따라 접촉면적이 오히려 줄어들어서 마찰계수가 줄어드는 경향이 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 하중이 4 kgf로 증가하는 경우에는 유의차 없이 마찰계수가 거의 일정함을 알 수 있었다. 그러나 표면거칠기가 2~3 μm 로 크게 증가할 경우에는 마찰계수가 증가하는 경향을 나타내는데 이러한 현상은 표면거칠기가 초기상태에 비하여 약 40배 이상 증가함에 따라 시편접촉면 사이에서 실제 접촉하는 면적이 급격히 줄어들고 이에 따라 수직하중에 의한 거칠기 돌기당 집중 하중값이 증가하게 된다. 따라서 미끄럼 마찰 접촉 운동시 응착에 의한 결합력이 크게 작용하여 마찰계수가 증가하는 것으로 사료된다. 특히 하중이 증가하는 Figure 5(b)의 경우 거칠기가 증가할수록 마찰계수가 뚜렷하게 증가됨을 보여준다.

기준시편 ABS와 결합력이 상대적으로 약한 POM, PP 소재는 하중이 2 kgf 일 때 표면거칠기 증가에 따른 마찰계수의 크기변화가 크지 않을 것을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때 저속, 저하중 조건($v=0.5$ mm/min, $W=2$ kgf)일 때 마찰력에 기인하는 요소는 소재의 표면 돌기들에 의한 실제 접촉면적 영향보다는 소재간의 친화성에 의한 결합력의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 또한 POM, PP 소재가 수직하중이 4 kgf 조건에서 ABS와 미끄럼 운동을 할 경우 다른 소재와는 다르게 표면거칠기 2~3 μm 수준으로 크게 증가함에 따라 실제 접촉 면적의 감소로 마찰계수가 줄어드는 경향이 나타났다. 이것을 통하여 마찰계수는 접촉하는 두 고분자 소재의 친화

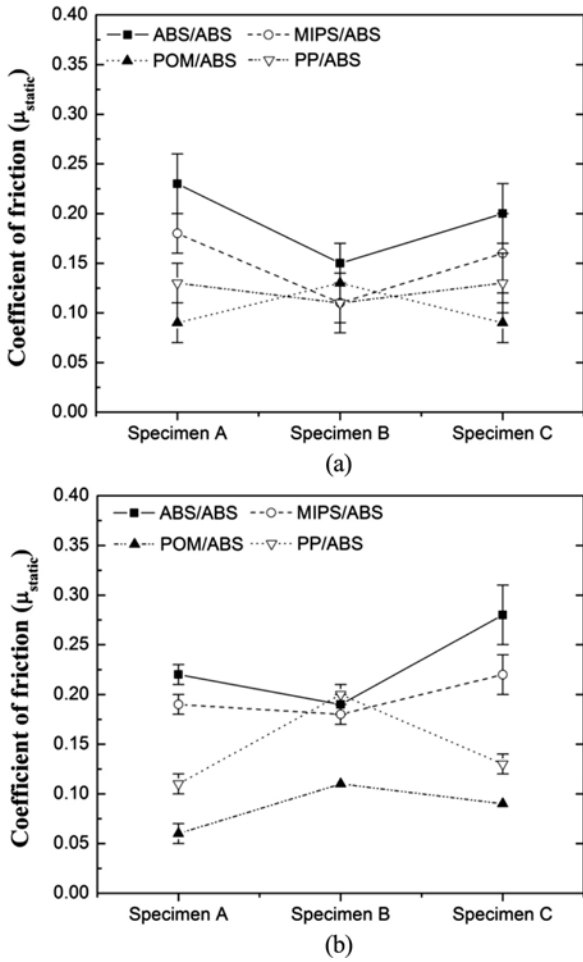


Figure 5. Variation of static friction coefficient according to surface roughness in case of (a) vertical loading of 2 kgf; (b) 4 kgf.

성에 영향을 받아서 표면거칠기가 증가함에 따라 친화성이 큰 소재의 경우는 마찰계수가 응착력에 의해 증가하고 친화성이 작은 경우는 오히려 실제 접촉면적의 감소로 인해서 마찰계수가 줄어드는 것으로 사료된다.

마찰특성에 따른 스틱-슬립을 변화. 고분자 소재의 접촉부에서 미끄럼이 발생하는 경우에 에너지가 발산되면서 스틱-슬립을 만들게 된다. 따라서 고분자 소재의 조합에 따라 마찰에 의한 진동이 실제 스틱-슬립에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 가장 스틱-슬립이 잘 발생하는 소재 조합인 ABS와 MIPS의 미끄럼 거동에 대하여 알아보았다. 기준시편인 ABS($R_a = 0.05 \mu m$)의 접촉 뒷면에서 수직방향 가속도를 측정하였으며, 이동시편(MIPS, $R_a = 0.05 \mu m$)에서는 수평방향 가속도를 측정하였다(Figure 2 참조). Figure 6(a)-(c)와 같이 시간 축을 동일하게 두고 접촉하고 있는 두 소재를 미끄럼 운동시켰을 때 발생하는 마찰력 곡선과 정지상태에서 수평가속도(Figure 6(b)), 수직가속도(Figure 6(c))을 비교해 보면 정지마찰에서 운동마찰로 전환시 시편의 수평 미끄럼 가

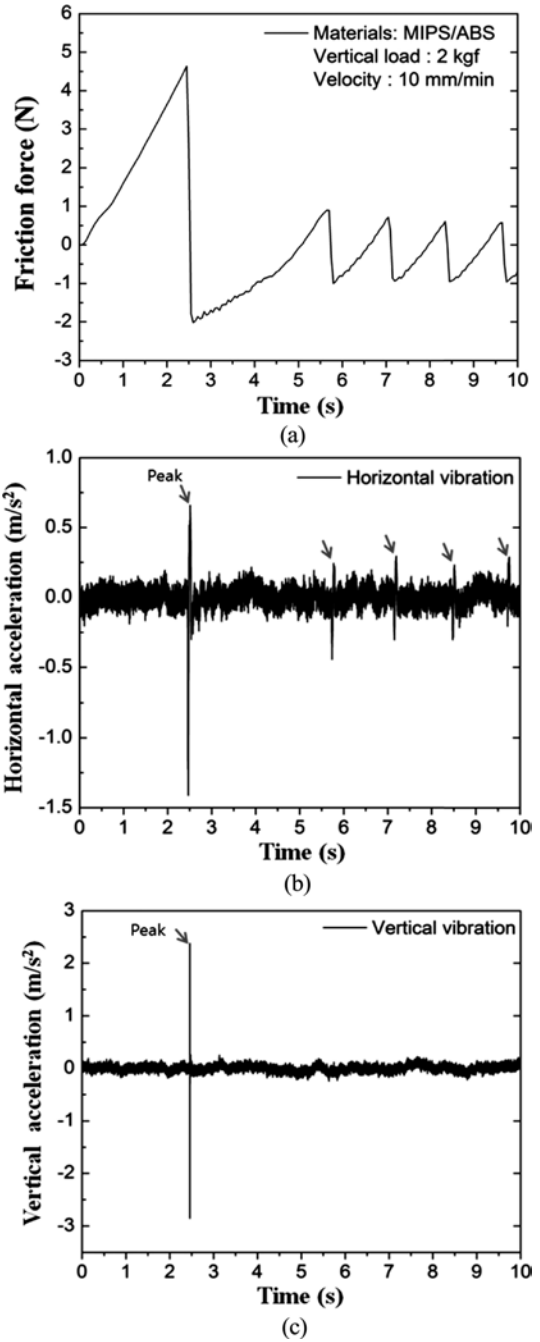


Figure 6. (a) Variation of friction force between MIPS and ABS plates; (b) horizontal; (c) vertical acceleration values between them.

속도가 표면 마찰력의 변화(Figure 6(a))와 정확하게 일치하는 것을 알 수 있었다. 이것은 미시적인 측면에서 볼 때 마찰 표면의 돌기들이 미끄럼 운동을 하면서 상호간에 받는 충격력이 진동으로 표현됨을 알 수 있다. 상하방향의 수직가속도의 경우는 고정된 ABS 기준시편에서 측정을 하였으며, 정지 마찰력이 가장 큰 첫 번째 피크에서만 가속도 값이 측정되었다. 이것은 스틱-슬립 거동시에 상대적으로 약한 정지 마

찰력을 보인 나머지 조건에서는 시편의 고정된 경계조건에 의하여 반응을 보이지 않은 것으로 사료된다.

고분자 소재간의 평판 마찰에 의해 스틱-슬립 거동이 발생할 때 진동의 형태는 최대 정지 마찰력에서 운동 마찰력으로 전환 시 가장 크게 발생하였고 이후 발생하는 스틱-슬립 구간에서 미끄럼 속도에 따라 마찰형태는 다르게 나타나지만 진동크기는 마찰력의 크기에 따라 비례하게 발생하는 것을 알 수 있었다. 진동가속도레벨(vibration acceleration level, VAL)은 진폭을 나타내는 단위로 dB를 사용하여 표현할 수 있는데 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$VAL(dB) = 20 \log(A_{rms} / A_{ref}) \quad (1)$$

여기서, A_{rms} 는 측정된 가속도 실효치가 되며, A_{ref} 는 기준 가속도 값이 되는데, 여기서는 일반적으로 사용하는 기준값인 $10^{-5} m/s^2$ 으로 두었다.¹⁵ 또 다른 측정치로 소음레벨(sound pressure level, SPL)을 나타내면 식 (2)와 같으며, 여기서 P_e 와 P_0 은 각각 마이크로 폰에서 측정된 음압과 기준음압을 의미하며 기준음압의 경우 통상적으로 사용하는 값인 $2 \times 10^{-5} Pa$ 로 두었다.¹⁵

$$SPL(dB) = 20 \log(P_e / P_0) \quad (2)$$

앞에서 구한 실험결과를 이용하여 측정된 마찰력에 따른 진동 및 소음크기를 최대 정지마찰력에 대하여 나타내면 Figure 7과 같다. 마이크로 폰을 이용하여 실험환경에서의 고분자 두 평판이 접촉하여 미끄럼 운동이 발생할 때의 VAL값과 SPL값을 측정해 보면 각각 평균치로 67, 52 dB로 나타났다. 따라서 정지마찰에서 동마찰로 변환되면서 발생하는 스틱-슬립은 최대 정지마찰력이 5 N 이상에서 수평방향 가속도가 증가하고 이에 따른 VAL과 SPL 값도 증가됨을 알 수

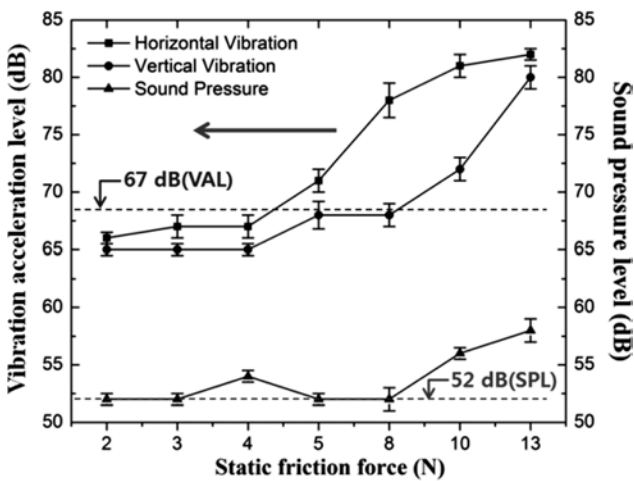


Figure 7. Comparison of sound pressure level (SPL) and vibration acceleration level (VAL) according to the variation of static friction force.

있다. 따라서 스틱-슬립은 최대 정지마찰력이 5 N 이상에서 잘 발생하는 것으로 판단된다. 또한 최대 정지마찰력의 크기가 클수록 미끄럼이 발생할 때 많은 에너지가 순간 발산되면서 스틱-슬립이 크게 발생하는 것으로 분석된다.

결론

고분자 소재의 재료조합에 따른 평판마찰 실험을 실시한 결과 소재별 조합에 따라 최대 정지마찰력이 동일한 표면조건에서 달라짐을 알 수 있었다. 또한 최대 정지마찰력에서 동마찰력으로 전환되면서 미끄럼이 순간 발생하면서 스틱-슬립을 만들게 되는 것을 실험적으로 확인하였다. 본 연구에서 실제 가전제품에 주로 사용되는 소재 중심으로 마찰특성을 분석한 결과 ABS와 ABS 조합, MIPS와 ABS 조합의 경우 소재간의 친화성 높아서 응착력이 크기 때문에 스틱-슬립 현상이 잘 발생하고 마찰력의 크기 또한 다른 소재 조합에 비하여 높음을 알 수 있었다.

반면에, 소재간 친화성이 상대적으로 작은 PP와 ABS 조합, POM과 ABS 조합인 경우에는 마찰력의 크기도 작으며, 스틱-슬립이 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다. 또한 기계적 특성에 따라 POM과 ABS 소재 조합일 때 가장 마찰력이 작게 발생하고 마찰계수 또한 낮아 스틱-슬립 현상에 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

접촉한 고분자 판의 상대 미끄럼 속도에 따라 최대 정지마찰력의 변화가 모든 소재 조합에 있었으며, 미끄럼 속도가 0.5에서 10.0 mm/min으로 증가할 경우 대체적으로 정지마찰력이 대부분의 소재 조합에 따라 약 50% 정도 증가하였다. 하중의 크기가 증가할수록 동일한 표면조건 조건에서 최대 정지마찰력의 크기가 증가하였으며, 4 kgf 수직하중 조건에서 POM과 ABS의 조합은 MIPS와 ABS 조합에 비하여 최대 정지마찰력이 약 2.9배 정도 작음을 알 수 있었다. 표면 거칠기를 변화시켜서 소재 조합에 따른 마찰력의 변화를 알아본 실험에서는 거칠기가 증가할수록 마찰력이 증가하는 경향은 보이지만 수직하중이 작은 경우에 표면 거칠기는 실제 접촉하는 면적에 영향을 주게 되어 POM과 ABS 소재 조합의 경우 마찰력이 표면 거칠기가 증가함에 따라 오히려 감소하는 경향을 보였다. 실험적 연구를 통하여 얻어진 마찰력의 변화와 가속도 값의 변화를 살펴본 결과 수평방향의 가속도와 피크 위치가 정확하게 일치함을 알 수 있었다. 이것을 통하여 스틱-슬립에 의한 이상소음이 발생하는 것을 가속도 측정을 통하여 예측 가능함을 알 수 있었다. MIPS와 ABS 소재 조합의 경우에 최대 정지마찰력이 5 N 이상에서 주변 평균소음보다 더 크게 스틱-슬립에 의한 이상소음이 잘 발생됨을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 스틱-슬립 저감을 위한 고분자 소재 조합 실험방법이 타당함을 보였으며, 실제 냉장고 등 전자제품에 자주 사용되는 네 가지의 고분자 소재간의 조합을

통하여 마찰특성을 비교하였다. 그 중에서 POM과 ABS 소재 조합이 스틱-슬립에 의한 이상소음 방지를 위해 가장 특성이 우수함을 알 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 한국에너지기술평가원 연구과제(No. 20101720200020-12-3-01)로 수행되었으며, 또한 해외우수연구기관유치사업(No. K20701002274-12E0100-05710)의 지원으로 수행됨을 알려드립니다.

참 고 문 헌

1. A. Takushima, Y. Shinobu, S. Tanaka, M. Eguchi, and K. Matsuki, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **28**, 287 (1992).
2. S.-H. Jeong, S.-J. Yong, and Y.-Z. Lee, *J. KSTLE*, **21**, 16 (2005).
3. D. G. Lee, J.-H. Park, K. H. Park, B.-K. Ha, H.-S. Kim, and S. H. Park, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **37**, 249 (2013).
4. K. Shin, M. J. Brennan, J.-E. Oh, and C. J. Harris, *J. Sound Vibration*, **254**, 837 (2002).
5. A. R. Crowther and R. Singh, *Noise Control. Eng. J.*, **56**, 235 (2008).
6. C. L. Edward, Thesis in Master of Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995.
7. A. D. Berman, W. A. Ducker, and J. N. Israelachvili, *Langmuir*, **12**, 4559 (1996).
8. T. Kuhl, Y. Guo, J. L. Alderfer, A. D. Berman, D. Leckband, J. Israelachvili, and S. W. Hui, *Langmuir*, **12**, 3003 (1996).
9. S. Bouissou, J. P. Petit, and M. Barquins, *Tribol. Lett.*, **7**, 61 (1999).
10. T. Jibiki, M. Shima, H. Akita, and M. Tamura, *Wear*, **251**, 1492 (2001).
11. B. J. Briscoe, A. Chateauminois, J. Chiu, and S. Vickery, *Tribology Series, 39 D*, 673 (2001).
12. K. Hunt, B. Redlers, R. Brlnes, R. McCormick, T. Lelst, and T. Artale, *SAE Technical Paper*, 2001-01-1547 (2001).
13. D. Choi and S. Lee, *Proc. Korean Soc. Automo.*, Fall Meeting, 1986 (2005).
14. M. T. Bengisu and A. Akay, *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**, 194 (1999).
15. D. A. Bies and C. H. Hansen, *Engineering Noise Control: Theory and Practice*, 3rd Ed., E&FN Spon, London, 2003.