Spin Nernst magnetoresistance in ferromagnet/heavy metal bilayer structures

김동준[1*], 전철연[1], 최종국[1], 이재욱[1], Srivathsava Surabhi[2], 정종율[2], 이경진[3,4], 박병국[1]
[1]Department of Materials and Science Engineering, KAIST, Daejeon 34141, Korea
[2]Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea
[3]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea
[4]KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, Seoul 02841, Korea

스핀 전류는 자화 반전 및 자구 벽 운동을 제어하기 위한 핵심 기술로서 사용될 수 있어 이를 생성하는 방법이 스핀트로닉스 분야에서 많은 관심을 받고 있다.[1] 이런 스핀 전류 생성 기술들 중 가장 많이 연구되고 있는 것이 스핀 홀 현상(spin Hall effect)인데, 강한 스핀-오빗 상호작용을 가지는 중금속 물질에 수평 전류를 인가할 때 수직한 방향으로 스핀 전류가 생성이 되는 현상을 말한다. 이론적으로 수평 전류를 수평 온도구배로 대체하였을 때, 스핀 너른스트 효과(spin Nernst effect)에 의해 열에 의한 스핀전류가 생성될 수 있다는 예측이 있어왔으나 아직 실험적으로 보고된 바는 없다.[2]

본 연구에서는 다향한 중금속/강자성 이층접합구조에서 스핀 너른스트 자기저항(spin Nernst magnetoresistance)으로 명명되는 열적 자기저항 변화 양상을 보고함으로써, 실험적으로 스핀 너른스트 현상을 증명하고자 한다. 중금속/강자성 구조에서 수평 전류를 인가할 때, 중금속 물질 내에서 스핀 홀 현상과 연속되어지는 역스핀홀 현상에 의해 발생하는 스핀 홀 자기저항(Spin magnetoresistance)처럼,[3] 수평 온도구배를 중금속/강자성 구조에 인가하면 다음과 같은 거동으로 열적 자기 저항의 변화가 생성될 수 있다: (i) 스핀 너른스트 효과에 의해 스핀 너른스트 각도(θ_{SN})로 정의되는 양만큼 열적 스핀전류가 생성되어 중금속/강자성 계면에서 반사되고, (ii) 반사된 스핀 전류가 중금속 내에서 역스핀 홀 현상에 의해 스핀 홀 각도(θ_{SH})로 정의되는 양만큼 전류로 변환되어 자기저항의 변화를 생성할 수 있다.[Fig. 1 (a)] 이에 의해 생성되는 스핀 너른스트 자기저항의 크기는 θ_{SN}와 θ_{SH}의 곱으로서 정의될 수 있다.

이런 거동을 확인하기 위해 다음과 같은 실험을 진행하였다. 10 μm × 1 mm의 중금속/강자성 구조에 55mW의 국소 CW 레이저를 인가하여 온도구배를 인가하였고, 100mT 자기장을 x-y방향으로 회전시켜 측정되는 y방향으로의 스핀 열전 신호를 관측하였다. 레이저의 위치를 변화시킴에 따라 여러 수직 ($\triangle T_z$) 및 수평 온도구배 ($\triangle T_x$) 환경이 Fig. 1 (b)처럼 생성될 수 있었다.

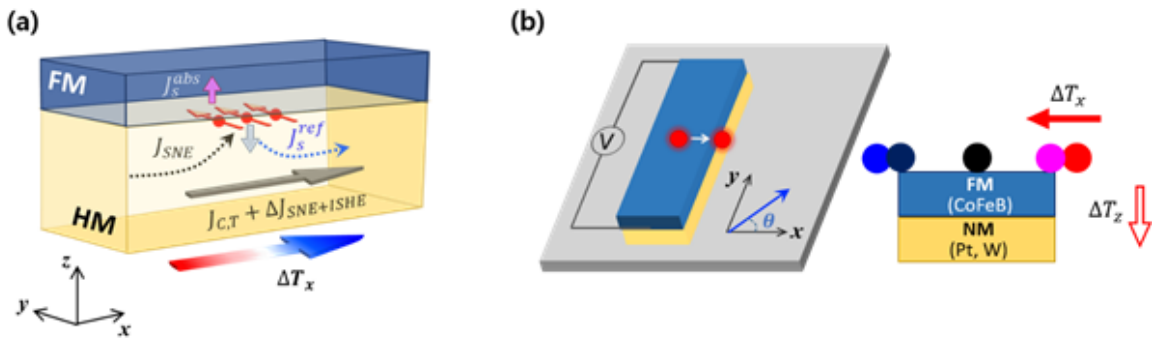

그림 1. (a) 스핀 너른스트 자기저항 현상, (b) 다른 레이저 위치에서 열전 측정 개략도

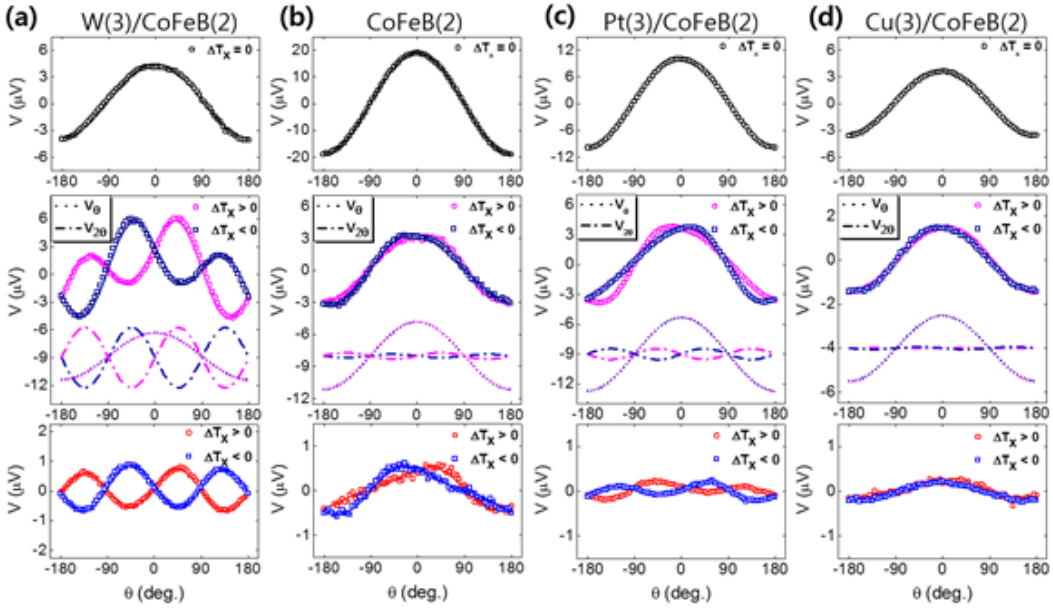

그림 2. (a) W/CoFeB, (b) CoFeB, (c) Pt/CoFeB, (d) Cu/CoFeB 구조 내 다른 레이저 위치에서의 스핀 열전신호 비교도. (top panel : 정중앙, middle panel : 모서리, bottom panel : 샘플 옆)

먼저 W/CoFeB 구조에 샘플의 정중앙에 레이저를 위치시켜 $\triangle T_x$는 상쇄되고 오직 $\triangle T_z$ 만 남아있는 상황의 열전신호를 관측하였다.[Fig. 2 (a) 상단] 측정된 열전신호는 $\triangle T_z$에 의해 생성되는 스핀 제백 신호(spin Seebeck effect)와 비정상 너른스트 효과(anomalous Nernst effect)로 설명할 수 있는 cosθ 거동을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 레이저가 구조의 모서리로 향하여 $\triangle T_x$가 더 이상 상쇄되지 않게 된 상황에서는, 감소된 cosθ 신호와 더불어 추가적인 매우 큰 sin2θ 신호가 관측된다는 것이 Fig. 2 (a)의 중단 및 하단 그래프에서 확인되었다. sin2θ 신호는 강자성 CoFeB 층으로부터 평면 너른스트 효과 (Planar Nernst effect)에 의해 생성될 수 있으나, 평면 너른스트 효과만이 존재하는 CoFeB 단일 구조와 비교해보았을 때 매우 큰 신호의 증대가 있다는 것이 관측되었다.[Fig.2 (b)] 이 증대가 중금속 층으로부터 발생한 스핀 너른스트 자기저항에 의한 것으로 생각되어, 추가적으로 Pt와 Cu의 전극들을 가지는 구조를 분석해보았다. Pt는 W과 반대부호의 θ_{SH}, Cu는 무시할 만한 크기의 θ_{SH}을 가지기 때문에, 스핀 너른스트 자기저항 모델을 평가하기 위한 W의 대조군 샘플로서 사용될 수 있었다. 흥미롭게도 Pt/CoFeB의 경우에 W/CoFeB 과 비교하여 반대부호의 sin2θ 신호가 관측되었고 [Fig. 2 (c)], Cu/CoFeB에서는 무시가능한 정도의 sin2θ 신호가 관측되었다.[Fig. 2 (d)] 이를 통해 측정된 신호가 θ_{SH}와 관계가 있는 스핀 너른스트 자기저항 모델을 따르는 것을 확인할 수 있었다. 이는 단일 중금속 물질 내에서 수평 온도구배에 의해 스핀 전류가 생성될 수 있는 스핀 너른스트 효과를 실험적으로 증명한 결과이기 때문에, 스핀전류 생성기술로서 스핀트로닉스 분야에 매우 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

Reference

[1] G. E. W. Bauer, et al., Nature Mater. **11**, 391 (2012). [2] K. Tauber, et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 026601 (2012). [3] Y.-T. Chen, et al., Phys. Rev. B **87**, 144411 (2013).