


CNF 복합 절연지의 제조 및 전기적·기계적 특성 분석

황서희¹, 이찬용², 조한구², 이재형² 

¹ 성균관대학교 반도체융합공학과

² 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Fabrication and Analysis of Electrical and Mechanical Properties of CNF Composite Insulation Papers

Seohee Hwang¹, Chanyong Lee², Hanguo Cho², and Jaehyeong Lee²

¹ Department of Semiconductor Convergence Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received October 10, 2025; Revised November 4, 2025; Accepted November 5, 2025)

Abstract: Cellulose nanofiber (CNF) has attracted significant attention as a next-generation insulating material due to its eco-friendly nature and outstanding functionalities. However, conventional kraft insulation paper suffers from limited dielectric breakdown strength and long-term reliability under high-voltage conditions, highlighting the need for alternative materials. In this study, kraft pulp was combined with five types of CNFs (A, B, C: wood-based / D, E: non-wood-based) to fabricate composite insulation papers, and their electrical and mechanical properties were systematically evaluated. The results showed that CNF incorporation generally enhanced density and tensile strength, while certain types contributed to lowering dielectric constant and improving breakdown strength. Among the wood-based CNFs, type C exhibited the most balanced performance in terms of dielectric stability and mechanical reinforcement. Among the non-wood-based CNFs, type E demonstrated notable improvements in structural compactness and tensile strength, suggesting favorable reliability. Therefore, this study identifies CNF C among wood-based types and CNF E among non-wood-based types as the most promising candidates for insulation performance enhancement, suggesting their applicability as next-generation insulating materials for power equipment and eco-friendly electronic devices.

Keywords: Cellulose nanofiber (CNF), Insulation paper, Dielectric properties, Mechanical properties, Composite materials

1. 서론

전력기기 및 전자소자의 안정적인 동작을 위해 고성능 절연재는 필수적이다. 특히 변압기, 케이블, 발전기 등과

✉ Jae Hyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

Copyright ©2026 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

같은 전력설비에서 사용되는 절연지는 높은 전기 절연 성능과 충분한 기계적 강도를 동시에 확보해야 한다. 현재까지 크라프트 펄프 기반 절연지가 널리 활용되어 왔으나, 고전압 환경에서 절연 파괴 강도의 한계와 열·습도 조건에서의 장기 신뢰성 저하 문제가 지속적으로 제기되어 왔다 [1,2]. 이러한 한계는 차세대 절연 소재 개발의 필요성을 뚜렷하게 보여준다 [3,4].

최근 친환경성과 기능성을 동시에 갖춘 셀룰로오스 나노

섬유(cellulose nanofiber, CNF)가 차세대 절연 소재 후보로 주목받고 있다. CNF는 직경 수십 나노미터, 길이 수 마이크로미터 수준의 1차원 나노섬유로, 높은 비표면적과 다량의 수산기(-OH) 작용기에 의한 강력한 수소 결합력을 지닌다. 또한 반결정성 구조를 유지하여 우수한 기계적 강도를 발휘할 수 있으며, 이러한 특성은 절연지의 구조적 안정성과 전기 절연 성능 향상에 기여할 수 있다 [5,6]. CNF 네트워크는 펄프 섬유 사이의 공극을 효과적으로 메워 치밀한 구조를 형성함으로써 전기적 경로의 균일성을 개선하고 절연 파괴 강도를 높일 수 있다는 장점이 보고되었다 [7,8].

CNF는 제조 공정 및 표면 개질 방식에 따라 상이한 특성을 나타낸다. 예를 들어, 효소 처리 CNF는 섬유 손상을 최소화하며 에너지 효율적인 생산이 가능하고 [9], 아세틸화 CNF는 표면 소수성을 갖게 되어 수분 흡착을 억제하고 전기적 안정성을 강화할 수 있다 [10]. 또한 기계적 분쇄 기반 CNF는 단순 공정으로 대량 생산이 가능하다는 장점이 있으며 [11], 이러한 제조법 차이는 절연지의 전기적·기계적 성능에 직접적인 영향을 미친다. 실제로 투명 CNF 필름은 낮은 유전율과 높은 절연 파괴 강도(70~80 kV/mm)를 나타낸다는 보고가 있으며 [5], CNF 복합 절연지는 상용 절연지보다 높은 체적저항과 내열성을 보유하는 것으로 확인되었다 [3,7].

이에 따라 본 연구에서는 380 CSF로 고해된 크라프트 펄프와 서로 다른 제조 공정을 통해 얻어진 다섯 종류의 CNF를 복합화하여 절연지를 제작하였다. 또한 제작된 복합 절연지의 전기적 및 기계적 특성을 체계적으로 평가하고, CNF의 종류와 첨가율이 절연 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 절연지의 기초 원료는 여수도 380 CSF로 고해된 크라프트(UKP, Model: S25C-0i2412191 2270, Moorim P&P Co., Ltd., Ulsan, Republic of Korea)와 다섯 종류의 CNF를 사용하였다.

CNF는 제조 공정에 따라 물성이 상이하며, CNF A는 화학적 전처리인 산화반응을 통하여 제조하였다. CNF B, C는 기계적 분쇄(mechanical fibrillation)와 표면 처리 공정을 통해 얻어졌고, D는 아세틸화 처리된 CNF이며, E는 효소 전처리 공정을 통해 제조한 CNF이다. 최종 시편의 평량은 100 g/m², 크기 25 × 25 cm (0.0625 m²)로 고정하였으며, 이에 따른 총 건조형은 6.25으로 고정하였다. CNF 첨가 비율은 펄프 대비 5, 10, 15, 20, 25, 30 wt%로 조절

Table 1. Types of cellulose nanofibers (CNFs) used in the experiment.

Type	Treatment Method	Fiber Length (nm)	Manufacturer
CNF A	Chemical	555	Hansol
CNF B	Mechanical	742	Hansol
CNF C	Mechanical	165	Hansol
CNF D	Chemical	30~60	KOTMI
CNF E	Chemical	20~500	KOTMI

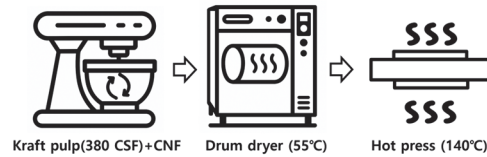


Fig. 1. Manufacturing process of CNF composite insulation paper.

하였다. 펄프와 CNF는 각각 평량을 고정하고, 고형분 농도에 따라 습량으로 환산하여 계량하였다.

펄프와 CNF를 정해진 비율로 계량한 뒤, 2 L 용기에 투입하여 3,000 rpm에서 10분간 교반하였다. 이 과정에서 충분한 분산을 유도하기 위해 탈이온수(DI water)를 사용하여 현탁액을 조제하였다 [12,13]. 혼합된 현탁액은 수초지기(hand sheet former, TAPPI standard type)를 이용하여 초지를 제조하였다. 초지 과정은 일정한 진공 압력 하에서 수행하여 균일한 섬유를 형성하도록 하였으며, 제조된 습지는 드럼 드라이어(55°C)에서 1차 건조하였다.

건조된 초지는 열압착기(hot press)를 이용하여 140°C에서 2분 30초 동안 가압하여 최종 절연지를 제작하였다. 열압착 조건은 예비실험을 통해 최적화되었으며, 과도한 압력은 시편 파손을 유발하고 부족한 압력은 밀도 저하를 초래하므로 제한된 범위 내에서 유지하였다.

제작된 모든 시편은 IEC60641-2 규격에 따라 23 ± 1°C, 50 ± 2% RH의 표준 환경에서 48시간 이상 조습 처리한 후 시험에 사용하였다 [14]. 전기적 특성은 ASTM D149 규격을 준용하여 절연 파괴 강도를 측정하였으며, ASTM D257에 따라 체적저항을 평가하였다. 또한 IEC IEC60641-2 규격을 기반으로 유전율과 손실탄젠트(tan δ)를 측정하였다.

기계적 특성의 경우, KS M ISO1924 규격에 따라 인장 강도를 평가하였다. 시편은 폭 15 mm, 길이 250 mm로 절단하여 만능재료시험기(UTM)를 사용하였다. 인장 속도는 20 mm/min으로 고정하였으며, 동일 조건에서 최소 8회 반복 측정 후 평균값과 표준편차를 산출하였다. 두께는 디지털 마이크로미터(Mitutoyo, Japan)로 8개 지점을 측정하여 평균값을 계산하였으며, 밀도는 측정된 두께와 평량을 통해 산출하였다 [3,4].

3. 결과 및 고찰

3.1 밀도 변화

펄프 단독 시편의 밀도는 약 0.712 g/cm^3 이었으며, CNF 첨가 시 전반적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 CNF C (0.763 g/cm^3)와 CNF E (0.774 g/cm^3)는 가장 높은 값을 보여, 펄프 섬유 사이의 공극을 효과적으로 메워 치밀한 네트워크를 형성했음을 알 수 있다. 이러한 구조적 치밀화는 절연 경로의 균일성을 높여 전기적 안정성 확보에 긍정적으로 작용한다. 반면 CNF B (0.688 g/cm^3)는 오히려 밀도가 감소하였는데, 이는 분산성 부족으로 인한 국소적 응집이 섬유 매트릭스의 균일성을 저하시킨 결과로 해석된다.

3.2 유전 특성

펄프 단독 시편의 유전율은 1.32였으며, CNF 첨가 시 종류에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. CNF C는 1.26으로 가

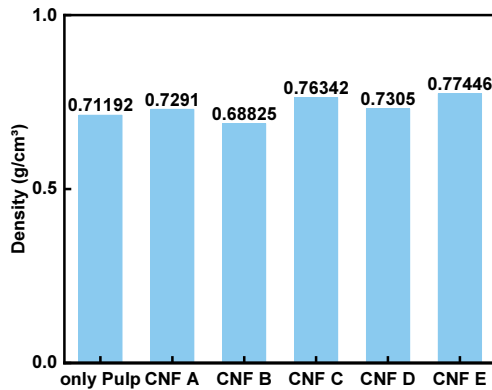


Fig. 2. Density of insulation papers with different CNF types.

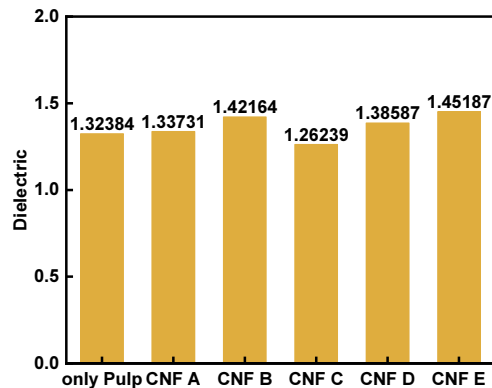


Fig. 3. Dielectric constant of insulation papers with different CNF types.

장 낮은 값을 기록하였으며, 이는 수분 흡착 억제와 전계 균일화에 효과적인 네트워크 구조가 형성되었음을 의미한다. 절연지로 활용하기 위해서는 낮은 유전율이 필수적이라는 점에서 CNF C는 전기적 절연 안정성 확보에 가장 유리한 후보이다. 반면, CNF E (1.45)와 CNF B (1.42)는 유전율이 오히려 상승하였는데, 이는 잔여 친수성으로 인한 수분 흡착이 전기적 성능에 부정적으로 작용했음을 시사한다. CNF D (1.39)와 CNF A (1.34)는 중간 수준의 값을 나타냈다. 섬유 네트워크가 조밀하게 형성되면 국소적인 전계 집중이 완화되고, 전하 이동이 안정화되어 전체적인 유전 손실이 감소하는 경향을 보인다 [15].

유전율은 절연체의 전기적 특성을 평가하는 주요 지표 중 하나이지만, 낮은 유전율이 반드시 우수한 절연 성능을 의미하는 것은 아니다 [16]. 절연 파괴 강도와 체적 저항은 재료 내부의 전계 분포, 공극 구조, 계면 결합력, 수분 함량 등 다양한 요인의 복합적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다 [17]. 또한, 섬유 네트워크가 조밀하고 전계 분포가 균일한 구조에서는 절연 신뢰성이 향상되는 경향이 보고되었다 [18]. 따라서 본 연구에서 관찰된 절연 성능의 변화는 단순한 유전율 값의 차이보다는, CNF 복합화에 따른 미세 구조의 조밀화와 전계 분포의 균질화 효과가 더 큰 영향을 미친 것으로 해석하였다.

3.3 절연 파괴 강도

절연 파괴 강도는 펄프 단독 시편이 75 kV/mm 이었으며, CNF 첨가 후 전반적으로 증가하였다. CNF A와 CNF C는 각각 80.8 kV/mm 으로 가장 높은 값을 기록하여 절연 안정성을 강화하였다. 이는 CNF가 공극을 메우고 전계가 집중되는 것을 억제하여 전기적 균일성을 확보했기 때문으로 해석된다. 반면 CNF E는 74.6 kV/mm 으로 펄프

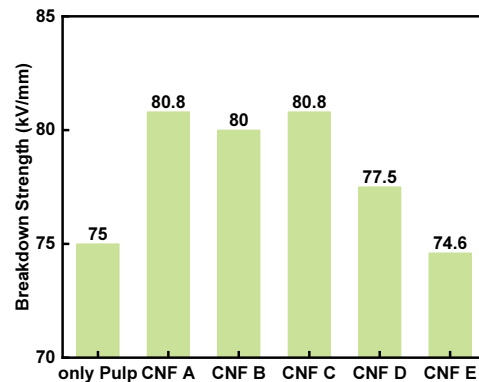


Fig. 4. Breakdown strength of insulation papers with different CNF types.

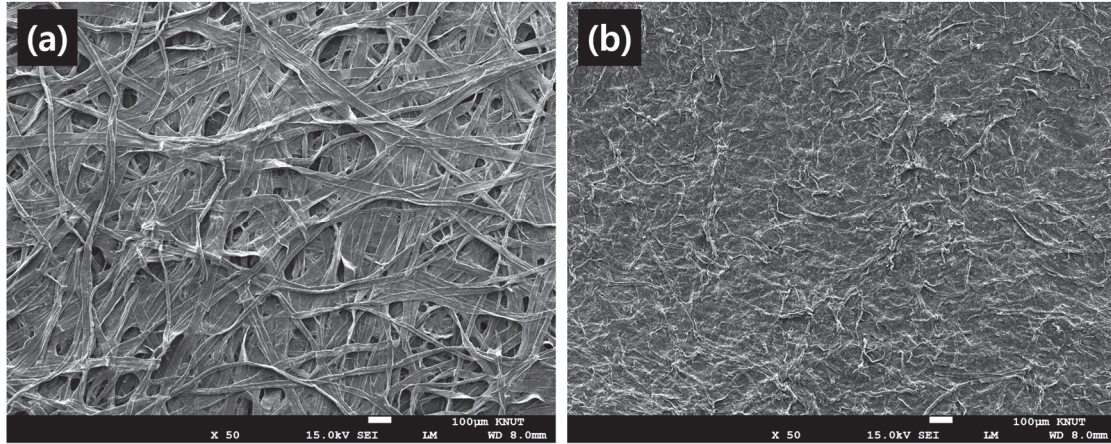


Fig. 5. SEM images of (a) kraft insulation paper and (b) CNF composite paper.

단독 시편보다 낮아, 절연 특성 측면에서는 불리하게 작용하였다. 그러나 CNF E는 다른 CNF 대비 기계적 특성과 밀도 향상 효과가 크다는 점에서, 절연 특성 보안을 위한 복합 설계가 필요함을 보여준다.

복합화 전후의 미세구조 변화를 확인하기 위해 시편의 표면 및 단면을 주사전자현미경으로 관찰하였다. 형태 변화를 명확히 비교하기 위해 50 wt%의 CNF 복합화 시편을 제작하였다. CNF 복합화 이전의 펄프는 섬유 간 결합이 약하고 공극이 많아 거칠고 비균질한 표면을 보인다. 복합화 후에는 CNF가 공극을 효과적으로 메우고 연속적이며 조밀한 네트워크 구조를 형성하였다. 이는 복합화 전의 펄프와의 미세구조 차이를 명확히 보여준다. 이러한 조밀한 형상은 공극을 감소와 섬유 결합력 증가에 기인하며, 기계적 강도 및 절연 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

3.4 인장 강도

펄프 단독 시편의 인장강도는 36.9 MPa이었으며, CNF 첨가 시 모든 시편에서 강화 효과가 나타났다. 특히 CNF C는 63 MPa로 가장 높은 값을 기록하여 약 70% 향상을 보였으며, 이는 나노섬유가 섬유 간 결합을 강화하고 네트워크의 기계적 지지력을 극대화했음을 의미한다. CNF B (55 MPa)와 CNF E (52 MPa)도 우수한 강화 효과를 나타냈다. CNF A (42 MPa)와 CNF D (50 MPa)는 상대적으로 낮았으나, 펄프 단독보다는 충분히 높은 값을 유지하였다. CNF 첨가량이 적정 수준일 때 섬유 간 수소결합이 극대화되며, 과잉 첨가 시에는 오히려 응집으로 인해 균일성이 저하되는 것을 의미한다 [6,8].

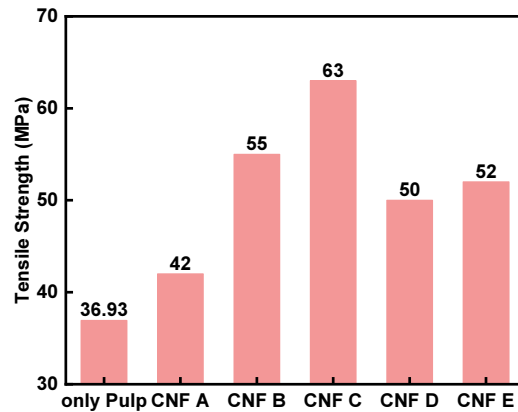


Fig. 6. Tensile strength of insulation papers with different CNF types.

4. 결론

본 연구에서는 380 CSF로 고해된 크라프트 펄프와 다섯 종류의 CNF (A, B, C, D, E)를 복합화하여 절연지를 제작하고, 전기적 및 기계적 특성을 평가하였다. 제작된 절연지는 평균 100 g/m² 기준으로 5-30 wt%의 CNF를 첨가하여 제조되었으며, 드럼 드라이어 건조와 핫프레스 공정을 거쳐 절연지를 제조, 분석하였다.

분석 결과, CNF 첨가에 따라 전반적으로 절연지의 전기적·기계적 성능이 향상되었다. 두께 감소와 밀도 증가로 공극률이 줄어들면서 절연 파괴 강도와 체적저항이 개선되었고, 일부 CNF는 낮은 유전율을 유지하여 절연 안정성 확보에 기여하였다. 기계적 특성은 적정 첨가율에서 인장강도가 향상되었으나, 과도한 첨가 시에는 응집으로 인한 성능 저하가 관찰되었다.

본 연구에서 사용된 CNF는 크게 목질계(A, B, C)와 비목질계(D, E)로 구분되며, 두 그룹 모두 절연 성능 개선에 기여했으나 특성 차이가 뚜렷하게 나타났다. 목질계 CNF 중에서는 CNF C가 가장 우수한 성능을 보였다. 균일한 분산성과 치밀한 네트워크 구조 형성을 통해 낮은 유전율과 높은 절연 안정성을 동시에 확보하였으며, 인장강도 역시 가장 높은 값을 나타냈다. 비목질계 CNF 중에서는 CNF E가 주목할 만하다. 절연 파괴 강도는 상대적으로 낮았으나, 밀도와 인장강도에서 뚜렷한 향상 효과를 보여 장기 신뢰성과 내구성 측면에서 강점을 지녔다. 이는 효소 처리 공정이 섬유 구조를 효과적으로 보존하면서 치밀한 네트워크 형성을 유도했기 때문으로 해석된다.

따라서 본 연구에서는 목질계 그룹에서 CNF C, 비목질계 그룹에서 CNF E를 절연지 제작에 가장 적합한 후보로 선정하였다. CNF C는 전기적 안정성과 기계적 특성의 균형이 뛰어나 차세대 전력기기 절연재로서 유망하며, CNF E는 친환경 기반과 기계적 안정성을 바탕으로 전자소자 절연재로 활용 가능성이 크다. 향후 연구에서는 두 소재를 활용한 절연보드 제작 및 장기 신뢰성 평가를 통해 실제 응용 가능성을 검증할 계획이다.

ORCID

Jae Hyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7775-1142>

감사의 글

This work was supported by the Technology Innovation Program (No. RS-2024-00427007, Development of CNF composite insulation boards with dielectric strength of 40 kV/mm and high efficiency transformers) funded by Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology.

REFERENCES

- [1] A. D. French, *Cellulose*, **21**, 885 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0030-4>
- [2] Y. Nishiyama, *J. Wood Sci.*, **55**, 241 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10086-009-1029-1>
- [3] R. J. Moon, A. Martini, J. Nairn, J. Simonsen, and J. Youngblood, *Chem. Soc. Rev.*, **40**, 3941 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1039/c0cs00108b>
- [4] A. Isogai, *J. Wood Sci.*, **59**, 449 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10086-013-1365-z>
- [5] H. Fukuzumi, T. Saito, T. Iwata, Y. Kumamoto, and A. Isogai, *Biomacromolecules*, **10**, 162 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1021/bm801065u>
- [6] T. Pullawan, A. N. Wilkinson, and S. J. Eichhorn, *J. Mater. Sci.*, **48**, 7847 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7404-8>
- [7] H. Sehaqui, N. E. Mushi, S. Morimune, M. Salajkova, T. Nishino, and L. A. Berglund, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **4**, 1043 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1021/am2016766>
- [8] M. C. Hsieh, H. Koga, K. Suganuma, and M. Nogi, *Sci. Rep.*, **7**, 41590 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep41590>
- [9] T. Saito, M. Hirota, N. Tamura, S. Kimura, H. Fukuzumi, L. Heux, and A. Isogai, *Biomacromolecules*, **10**, 1992 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1021/bm900414t>
- [10] Y. Habibi, *Chem. Soc. Rev.*, **43**, 1519 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1039/C3CS60204D>
- [11] H. Fukuzumi, R. Tanaka, T. Saito, and A. Isogai, *Cellulose*, **21**, 1553 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0180-z>
- [12] TAPPI T 205 sp-02, Forming Handsheets for Physical Tests of Pulp, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA (2002).
- [13] TAPPI T 402 sp-08, Standard Conditioning and Testing Atmospheres for Paper, Board, Pulp Handsheets, and Related Products, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA (2008).
- [14] ISO 187:1990, Standard Atmosphere for Conditioning and Testing of Paper, Board and Pulps, ISO, Geneva, Switzerland, (1990).
- [15] D. Trache, A. F. Tarchoun, M. Derradji, T. S. Hamidon, N. Masruchin, N. Brosse, and M. H. Hussin, *Front. Chem.*, **8**, 392 (2020).
doi: <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00392>
- [16] H. Luo, F. Wang, R. Guo, D. Zhang, G. He, S. Chen, and Q. Wang, *Adv. Sci.*, **9**, 2202438 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/adv.202202438>
- [17] Q. Luo, H. Shen, G. Zhou, and X. Xu, *Carbohydr. Polym.*, **303**, 120449 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120449>
- [18] J. Huang, Y. Zhou, Z. Zhou, and R. Liu, *AIP Adv.*, **6**, 095026 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4964151>