บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาค ในรูปร่างและรูปแบบการจัดเรียงต่างๆ ทั้งทางทฤษฎีและทางการทดลอง เพื่อให้ได้องค์ความรู้สำหรับนำไปพัฒนาวิธีการยึดจับอนุภาค สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง. การศึกษาในโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นที่ผลของรูปร่างของอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลม, ผลของเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมของตัวกลาง และบทบาทที่น่าจะเป็นไปได้ของการถ่ายเทประจุระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโตรด ที่มีต่อพื้นฐานทางกลศาสตร์ไฟฟ้าของอนุภาคในระบบฉนวน.

สำหรับการศึกษาในขั้นแรก คณะผู้วิจัยใช้ทรงคล้ายทรงกลมแบนข้างวางตัวอยู่บนอิเล็กโตรด เพื่อศึกษาหาบทบาทพื้นฐานของรูปร่างที่ไม่เป็นทรงกลม ที่มีต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า. สนามไฟฟ้าที่อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ E_M ถูกวัดในห้องปฏิบัติการ และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี. โครงการวิจัยนี้พบพฤติกรรมของอนุภาคที่ E_M ซึ่งแตกต่างไปจากการคาดการณ์ทางทฤษฎี. มุมยกตัวของอนุภาคจากอิเล็กโตรดมีค่าสูงกว่าที่คาดไว้มาก ซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมการหมุนตัวของอนุภาค. เมื่ออนุภาคอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงมากขึ้น การเคลื่อนที่เชิงเส้นในแนวดิ่งมีบทบาทมากขึ้น. อย่างไรก็ตาม อนุภาคอาจมีการสัมผัสซ้ำกับอิเล็กโตรดอีกครั้ง หลังจากที่ยกตัวขึ้นจากอิเล็กโตรดได้. ผลการศึกษาส่วนนี้มีประโยชน์ในการประมาณค่าประจุสนามไฟฟ้า และแรงบนอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมได้.

ในขั้นต่อไป คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบผลของการจัดเรียง และรูปร่างปลายของอนุภาค ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางกลศาสตร์ไฟฟ้า. การศึกษาใช้อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง และอนุภาคลวดทรงกระบอก. ผลการศึกษาแสดงว่า เมื่ออนุภาคอยู่บนอิเล็กโตรดเปลือย เราสามารถสังเกตการยกตัวขึ้นของอนุภาค หรือการกลิ้งตัวของอนุภาคเข้าสู่บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงขึ้นได้. ขนาดของสนามไฟฟ้าเริ่มเคลื่อนที่ของอนุภาคลดลงตามความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น. เมื่ออนุภาควางตัวอยู่บนอิเล็กโตรดที่มีฉนวนคั่น อนุภาคลวดทรงกระบอกแสดงการเคลื่อนที่แบบหมุนกลิ้งเป็นหลัก ในขณะที่อนุภาคทรงคล้ายทรงกลมอาจเกิดการหมุนในแนวระดับ เพื่อเรียงตัวตามทิศทางของเกรเดียนต์ของสนามไฟฟ้า.

คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบจำลองเชิงตัวเลข ในการอธิบายผลการทดลองที่ได้. การคำนวณใช้วิธีเอลิเมนต์ขอบเขตมาคำนวณสนามไฟฟ้า แรงไฟฟ้า และแรงบิดที่กระทำบนอนุภาค. ผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่า สนามไฟฟ้ายกตัวของอนุภาคลวดทรงกระบอก มีขนาดต่ำกว่าค่าที่ประมาณได้ด้วยแบบจำลองความยาวอนันต์. ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำมาอธิบายแนวโน้มการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ. การวิเคราะห์แรงบิดบนอนุภาค ทำให้เรา

ทราบกระจ่างถึงบทบาทของแรงบิดไฟฟ้าสถิต และแรงบิดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ที่มีต่อพฤติกรรมการยกตัวของอนุภาคลวดทรงกระบอก.

สำหรับการศึกษาผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมของตัวกลางและชนิดวัสดุ คณะผู้วิจัยดำเนินการโดยใช้อนุภาคตัวนำทรงกลมในตัวกลางฉนวนก๊าซ. การทดลองใช้อนุภาคที่ทำจากวัสดุ และมีขนาดแตกต่างกัน. ตัวกลางก๊าซที่ใช้เป็นอากาศ หรือก๊าซผสมระหว่างอากาศกับไนโตรเจน หรืออากาศกับ SF_6. ผลการศึกษาที่ได้แสดงบทบาทของความดันก๊าซที่มีต่อแรงดันยกตัวของอนุภาคอย่างชัดเจน. คณะผู้วิจัยพบว่า แรงพื้นผิวระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโตรดเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นกับ ผลคูณของความดันก๊าซและพื้นที่ผิวของอนุภาค. นอกจากนี้ การศึกษาขั้นตอนนี้ ยังแสดงให้เห็นถึงผลของขั้วประจุ ที่มีต่อสนามไฟฟ้ายกตัวของอนุภาค.

งานวิจัยส่วนสุดท้ายในโครงการนี้ เป็นการตรวจสอบวิเคราะห์ผลของการถ่ายเทประจุระหว่างอนุภาคกับอิเล็กโตรด เพื่อศึกษาเชิงปริมาณ ถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้น. ความหนาแน่นของประจุที่ถูกถ่ายเทถูกสมมติให้เป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าที่ป้อน. หากไม่มีการถ่ายเทประจุ แรงไฟฟ้าสถิตที่กระทำกับอนุภาคที่ถูกอัดประจุขั้วลบ ซึ่งยึดระหว่างอนุภาคกับระนาบ มีขนาดเพิ่มสูงขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้าที่ป้อนมีทิศทางพุ่งขึ้นจากระนาบ. อย่างไรก็ตาม หากมีการถ่ายเทประจุเกิดขึ้น แรงไฟฟ้าสถิตอาจแปรเปลี่ยนเพียงเล็กน้อยตามสนามไฟฟ้าที่ป้อน หรือแม้แต่แสดงแนวโน้มในทางตรงข้ามได้ หากประจุที่ถ่ายเทมีขนาดขึ้นอย่างมากกับสนามไฟฟ้าที่ป้อน.

คำสำคัญ

ระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง กลศาสตร์ไฟฟ้า อนุภาคตัวนำ อนุภาคฉนวน อนุภาครูปร่างไม่เป็นทรงกลม ทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง ความดันก๊าซ แรงดันยกตัว การถ่ายเทประจุ

Abstract

This research studies the electrical and electromechanical behavior of particles for different particle shapes and ending profiles by using both analytical and experimental methods. The objectives of this research is to obtain the fundamentals of particle behavior, which can be applied to develop particle manipulation for the high-voltage insulation systems. The studies in this research project focus on the effects of non-psherical particle shapes, the effects of insulating/particle media, and the possible roles of charge transfer between particles and electrodes. They have an implication on the electromechanics of particles in insulation systems.

The first step of the studies deals with the electromechanics of prolate spheroidal conducting particles on a conducting plane to clarify the fundamental role of the non-spherical shape of particles on their behavior under electric field. The electric field E_M initiating particle motion is measured and compared with the theoretical field strength of the particle for rotation. The lift-off behavior of the particles at E_M is different from the theoretical prediction. The particles depart from the conducting plane at significantly larger angles than the theoretical prediction. The discrepancy of the departing angle is possibly due to the predominant rotating motion of particles. With higher electric field, the experimental results show that the linear vertical motion of particles became dominant. However, re-contact might occur after lift-off between the particles and the lower electrode, and increase the particle charge as a result. The results from this part of the studies are useful for estimating charges, electric field and force on nonspherical particles.

In the next step, we carry out experiments for investigating the electromechanical behavior of the non-spherical conducting particles for different particle orientations and different tip profiles. Spheroidal and wire-shaped particles are used for the experiments. The results show that on a bare electrode, the particles exhibit the liftoff motion or rolling motion to the region of stronger electric field. The motion onset electric field decreases with increasing field nonuniformity. On the insulated electrode, the wire-shaped particle shows exclusively the rolling motion, whereas the spheroidal particle may rotate horizontally so as to align its axis with electric field gradient.

We apply a numerical analysis to explain the experimental results obtained in this work. The boundary element method is used to analyze the electric field, forces and torques on the particles. The calculated liftoff electric field of wire-shaped particle is smaller than the estimated value based on a model of infinitely long cylinder. The numerical results can explain the the tendency of particle movement observed in the experiments. The numerical calculation clarifies that both electrostatic and gravitational torques contribute to the liftoff behavior of wire-shaped particles.

For the effects from the conditions of media and material types, we carry out experiments on conducting spheres in insulating gases. The experiments use particles having different radii and materials. The gas media are air, air/N2 or air/SF6 mixtures. The results show clearly the effects of gas pressure on the liftoff electric field. The surface force between particles and electrodes increases linearly with the product of pressure and particle surface area. In addition, we have found an effect of charging polarity on the liftoff electric field.

The last section of this research is the analysis of the effects of charge transfer between a particle and an electrode to make a quantitative investigation of the force variation. Without the charge transfer, the electrostatic adhesive force on a negatively charged particle increases when the applied field is in the upward direction from the plane. However, in the presence of charge transfer, the force may vary only slightly with the applied field or even show a reverse tendency if the transfer charge density depends significantly on the applied field.

Keywords:

High-voltage insulation system, electromechanics, conducting particle, dielectric particle, nonspherical particle, prolate spheroid, gas pressure, liftoff voltage, charge transfer