

나노섬모 자연모사 기술개발

김완두, 김정엽

1. 서론

본 연구는 자연에서 영감을 얻은 나노구조를 모방하여 개발된 나노섬모 기술의 응용 가능성을 탐구한다. 자연에서 영감을 얻은 나노구조 (nature inspiration)는 다양한 분야에서 응용되고 있다. 예를 들어, 나노구조를 모방하여 개발된 나노섬모 기술은 Micro Structure, (self - cleaning), (self - healing), (self - assembly), (shark skin), (lotus leaf) 등 다양한 분야에서 응용되고 있다. 본 연구는 이러한 나노구조를 모방하여 개발된 나노섬모 기술의 응용 가능성을 탐구한다.

2. 나노섬모 자연구조물 및 응용분야

2.1 Stereocilia (부동섬모)

가 (1, 2). 가 Stereocilia (hair cell) Stereocilia 가 Stereocilia Tip 가 3 가 3 Stereocilia Tip

Stereocilia Rice W. E. Brownell, Rockefeller A. J. Hudspeth, Minnesota P. Santi, Oregon R. G. Walker, Nottingham K. P. Steel가 Stereocilia가 (compact)가 , (noise) 가 Stereocilia Nanotube Array 가 Flabio N^[1] 가

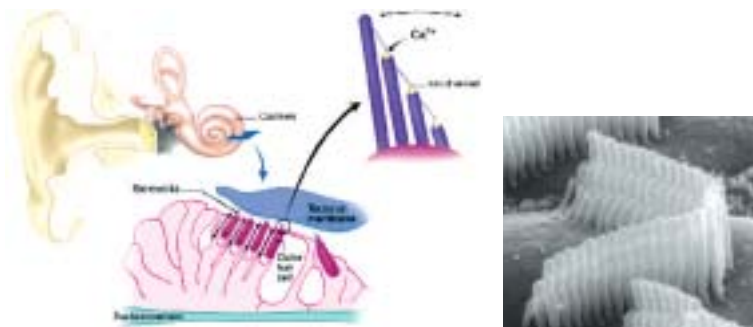


그림 1. 달팽이관속의 Stereocilia

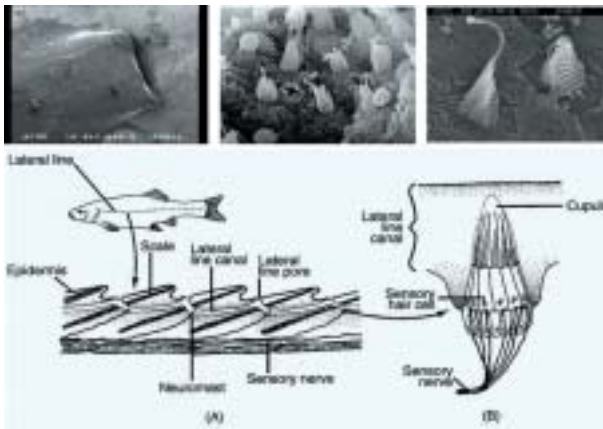


그림 2. 물고기 측선의 Stereocilia의 구조

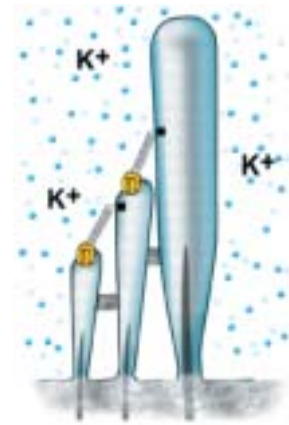


그림 3. Stereocilia의 모식도

2.2 Nano Seta (나노강모)

Gecko() 가 . 가 van der Waals 2000 Nature (4)^[2]. Gecko Setae 가 , 가 . Gecko (seta) Adhesion Tape Glue Gripper 가 .

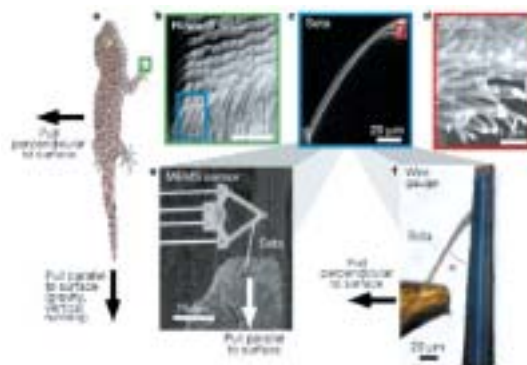


그림 4. Gecko Setae에 관한 실험적 관찰

2.3 Nano Turf (나노돌기)

1991 Wilhelm Barthlott 가 . 가

5, 6 가 가 2
 (hydrophobic) 가 (6) Lotus-effect가
 가
 가 (self cleaning) 가
 100 가

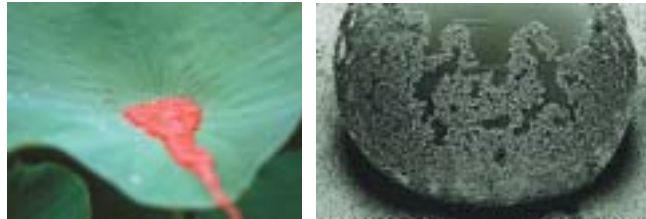


그림 5. 연꽃잎과 그 위에 먼지가 묻어있는 물방울

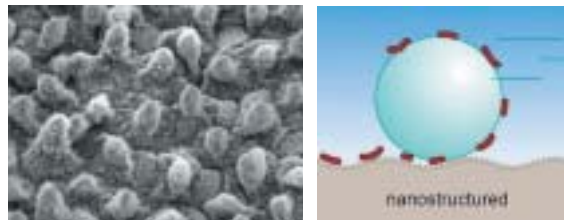


그림 6. 연꽃잎 표면 확대 사진과 Self-cleaning의 원리

(drag force)
 vortices [3]. Speedo 33 27
 (7).



그림 7. 상어 비늘 및 이를 이용하여 제작된 수영복

3. 나노섬모 자연모사 기술동향

, Multi Scale Multi Physics

3.1 해석기술

Scale (continuum equation) Multi Scale Macro Multi Physics MD (molecular dynamics) . Multi

가 . Multi Physics

가

A. Salt^[4] Stereocilia Cochlear Fluid(lymph) Endocochlear
 Potential Duncan RK^[5] Stereocilia Bundle
 Svrcek - seiler WA^[6] Brownian Motion Stereocilia
 8 2 가 가

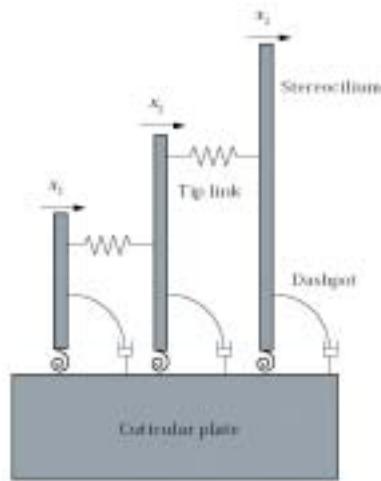


그림 8. Stereocilia의 수학적 모델

Kondrachuk, A.V.^[7] Stereocilia

9

. J.H. Walther^[8]

10

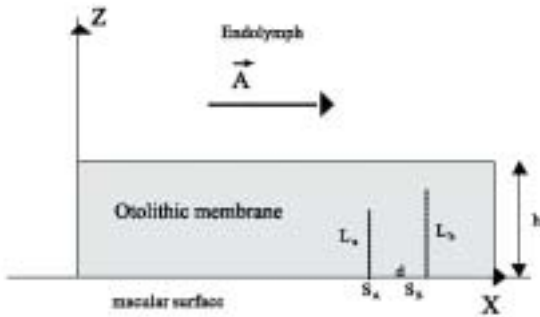


그림 9. Stereocilia의 점탄성 모델

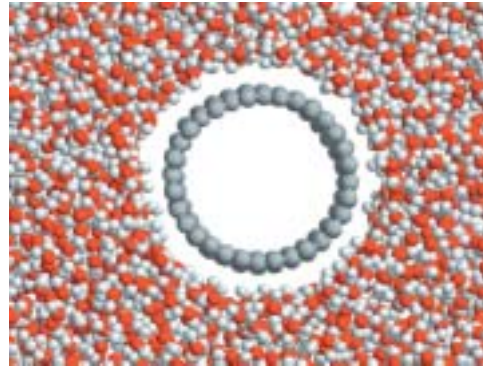


그림 10. Stereocilia 분자동역학 해석 모델

32 측정기술

(1) Stereocilia

AFM(atomic force microscope) SEM(scanning electron microscopy)

| | | | |
|---------------------------------------|----------|---|--|
| 가 | | Stereocilia | 가 |
| · Langer MG ^[9] | SEM | Stereocilia | · Silver RB ^[10] Confocal Light |
| Microscopy, SEM | | | |
| · Furness DN ^[11] | | | 가 |
| TEM(transmission electron micrograph) | | · Valk ^[12] Guinea Pig Stereocilia SEM | |
| TEM | , 11, 12 | Stereocilia Glycocalyx | Link |

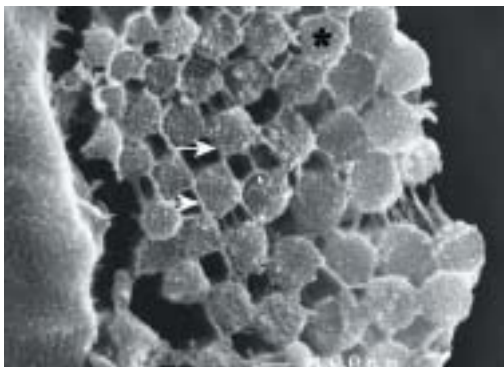


그림 11. Stereocilia의 SEM 관찰 사진

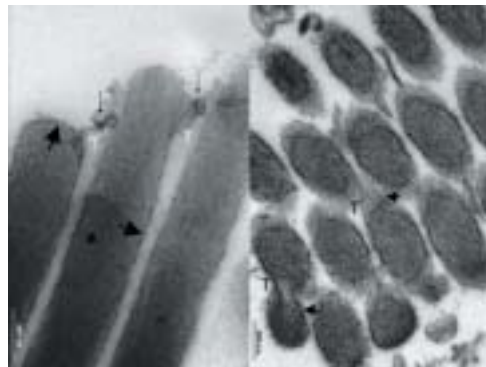


그림 12. Stereocilia의 TEM 관찰 사진

Langer^[13] Postnatal Rats
 Stereocilia $2.5 \pm 6 \times 10^{-3}$ N/m
 (13, 14).

AFM Tip
 , Stereocilia

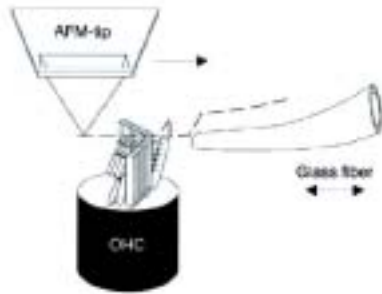


그림 13. 전달력을 측정하기 위한 OHC 번들의 배열

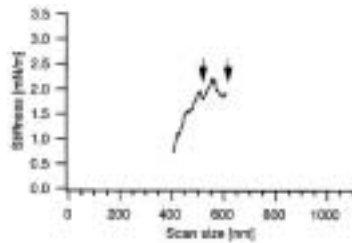


그림 14. Stereocilia의 강성 측정 결과

Frederix^[14] AFM Biomolecule
 . AFM Biomolecule
 (15, 16).

, Sub - nano Scale

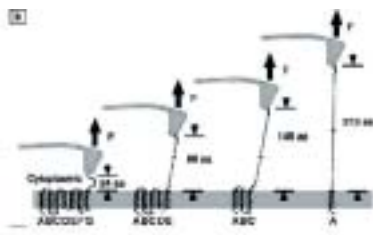


그림 15. Biomolecule의 단분자 조작

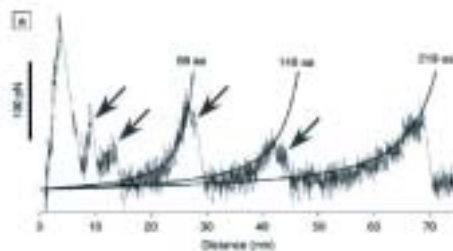


그림 16. Biomolecule의 상호작용력 측정 결과

(2) Nano Seta

Urbakh^[15] Gecko Single Seta 1,000
 16 uN 가 70 uN , Gecko Binding
 Unbinding Force Mili - second Binding Unbinding Process가 (17).

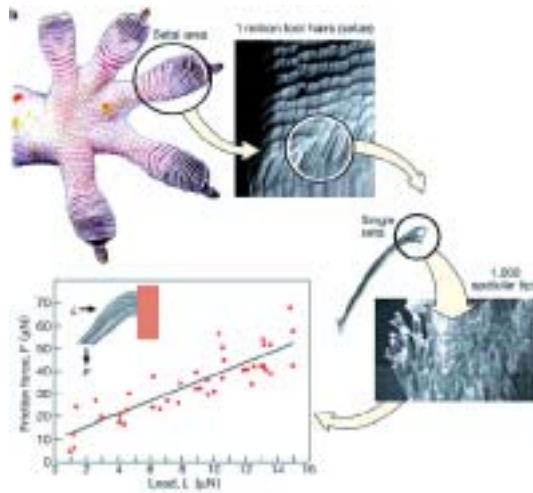


그림 17. Measurement of Adhesion and Friction for Gecko Foot-hair

Hui^[16]

가 Pull - off
 , PDMA Polyimide
 가
 (18, 19).

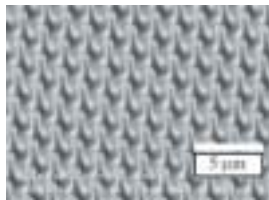


그림 18. Patterned Polyimide for Nano Seta

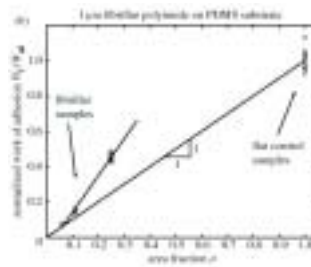


그림 19. Measurement of Adhesion Energy

Mettin Sitti^[17]

Gecko Foot - hair
 Pore Membrane
 (100 nN)

Adhesion

AFM Probe

가 Gecko Foot - hair
 (20, 21).

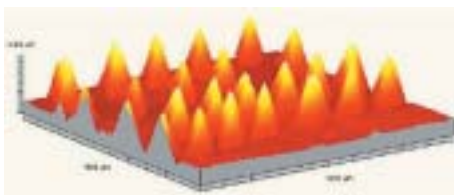


그림 20. Patterned PDMS for Nano Seta

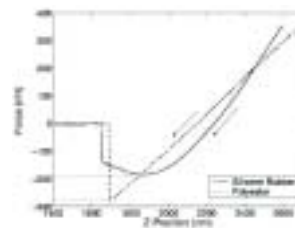


그림 21. AFM에 의한 Nano Seta의 접착력

(3) Nano Turf

MIT 50nm 2 μ m CNT
(22). Quere

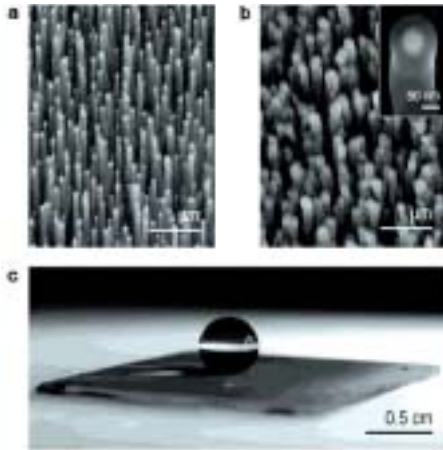


그림 22. 탄소 나노 튜브의 SEM 사진 및 표면 소수성

Roughness가

(23).

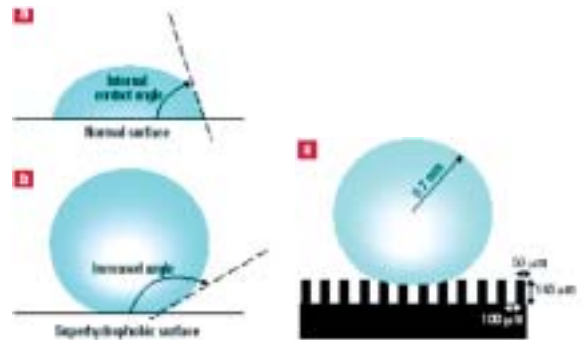


그림 23. 소수성과 나노구조물이 유체방울에 미치는 영향

Illinois
Wetting

Roughness가

No - slip/slip

Roughness가

(24).

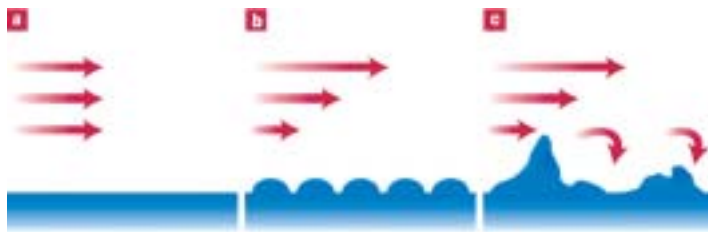


그림 24. 표면 경계에 따른 유동분포

3.3 공정기술

Stereocilia 가

가

CNT

SAM(Self Assembled Monolayer)

가

Open

가

가

Stereocilia

(25).

1998

Hot - Filament PECVD

, New York

Stanford Dai Thermal CVD Porous Si Fe
 CVD Thermal
 NASA F. Noca CNT Stereocilia (electrical
 potential)
 Li^[18] AAO CNTs (26) J. Liang^[19]
 (AAO)

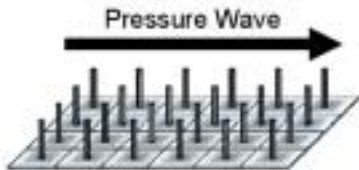


그림 25. 나노튜브를 이용한 Stereocilia 모사 개념도

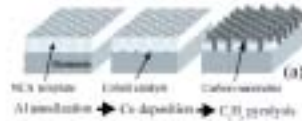


그림 26. AAO를 이용한 CNT어레이의 제작

Bell

Gombert^[20] UV Embossing 350nm 7μm 20
 27 1 Moth-eye

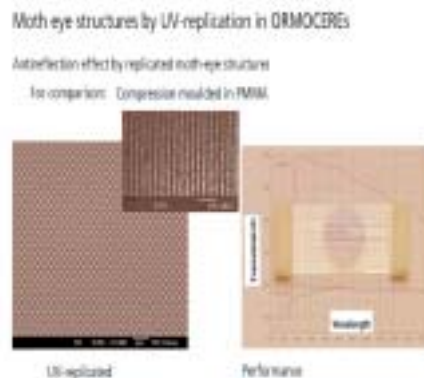
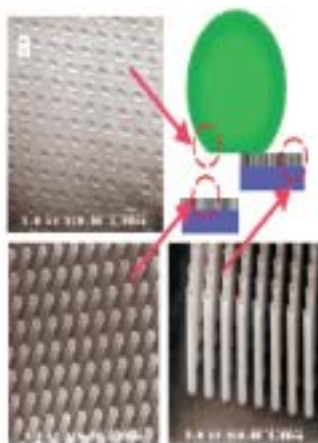


그림 27. 전자빔 노광과 실리콘 건식 식각공정을 통해 제작된 실리콘 나노 포스터(좌), Embossing 공정을 통해 제작된 Moth-eye Structure: UV 경화성 수지(우)

Morariu^[21] Anodic Aluminum Oxide(AAO) Plate 가 200nm
 30 μ m 가 Polystyrene , KOH
 AAO (28).

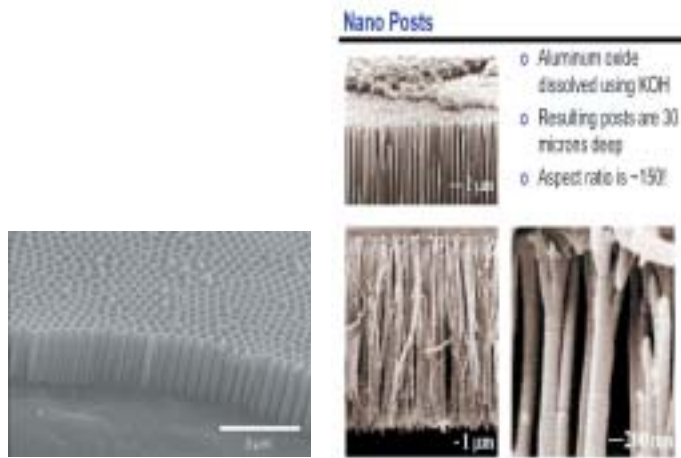


그림 28. AAO 템플레이트의 전자현미경 사진 및 Polystyrene을 사출한 결과

POSTECH^[22] AAO Template PDMS
 (29)



그림 29. SAM으로 개질된 AAO Plate를 이용하여 제작된 PDMS Replica

4. 결 론

- 가

❁ 참고 문헌

- [1] Flavio N, " Acoustic sensors based on artificial stereocilia ", GSA annual meeting, Nov 5 - 8, 2001.
- [2] K. Autumn, " Adhesive Force of a Single Gecko Foot - hair ", Nature, 405, 681 - 685
- [3] Choi, H., Reactive control for skin - friction reduction. In The CRC Handbook of MEMS (Ed. M. Gad-el - Hak), 2001.
- [4] Salt, A. N., I. Melichar, and R. Thalmann. " Mechanisms of endocochlear potential generation by stria vascularis ", Laryngoscope, 97, 984 - 991, 1987.
- [5] Duncan, R.K., Grant, J.W., " A finite - element model of inner ear hair bundle micromechanics ", Hearing Research, 104, 15 - 26, 1999.
- [6] Wolfgang A., " Micromechanical Models for the Brownian Motion of Hair Cell Stereocilia ", J. theo. Biol., 193, 623 - 630, 1998.
- [7] Kondrachuk, A.V., " New model of hair cell bundle functioning in otoliths ", Advances in space research : the official journal of the Committee on Space Research (COSPAR), v.32 no.8, 2003, pp.1605 - 1610.
- [8] Walther, J. H., " Carbon Nanotubes in Water: Structural Characteristics and Energetics ", J. Phys. Chem. B., 2001
- [9] Langer, M.G., " Mechanical stimulation of individual stereocilia of living cochlear hair cells by atomic force microscopy ", Ultramicroscopy, 82, 1/4, p269 - 278 2000.
- [10] Silver R. B., " Examination of the cupula and stereocilia of the horizontal semicircular canal ", J. of c. neurology, v.402, n.1, p48 - 61, 1998.
- [11] Furness, D. N., " Kinematic analysis of shear displacement as a means for operating mechanotransduction channels between adjacent stereocilia of mammalian cochlear hair cells ", Biological sciences, v.264, no.1378, 1997, p45 - 51.
- [12] Valk, W. L., " The Glycocalyx and Stereociliary Interconnections of the Vestibular Sensory Epithelia of the Guinea Pig. ", ORL(journal for oto - rhino - laryngology and its borderlands), v.64 no.4, p242 - 246, 2002.
- [13] Langer, M. G., " Lateral Mechanical Coupling of Stereocilia in Cochlear Hair Bundles "; Biophysical Journal, v.80 no.6, pp.2608 - 2621,2001.
- [14] http://www.mrs.org/members/bulletin/2004/jul/july04_frederix.pdf.
- [15] Michael Urbakh, " The Nonlinear Nature of Friction ", Nature, 430, 525 - 528.
- [16] CY Hui, " Design of a biomimetic fibrillar interfaces: 2. Mechanics of enhanced adhesion ", J. R. Soc. Lond. Interface, 2004.
- [17] Sitti, M., " Synthetic gecko foot - hair micro/nano - structures for future wall - climbing robots ", ICRA ' 03, p1164 - 1170, 2003.
- [18] J. Li, " Highly - ordered carbon nanotube arrays for electronics applications ", Applied Physics Letters,

75, p367 - 369, 1999.

- [19] Liang, J., " Two - dimensional lateral superlattices of nanostructures : Nonlithographic formation by anodic membrane template "J. of applied physics, v.91 no.4, p2544 - 2546, 2002.
- [20] Andreas Gombert, " Some application cases and related manufacturing techniques for optically functional microstructures on large areas " Optical engineering, November 2004 ,v43, 11, p. 2525 - 2533
- [21] Morariu, M. D., " U. Hierarchical Structure formation and pattern replication induced by an electric Field ", Nature Materials 2, 48 - 52 (2003).
- [22] Dae Ho Lee, Dohwan Kim, Taeyoung Oh, Kilwon Cho, " Phase State Effect on Adhesion Behavior of Self - Assembled Monolayers ", Langmuir, 20, 8124 - 8130, 2004.



김 완 두

· 한국기계연구원 미래기술연구본부장
· 관심분야 : 자연모사, 고무역학, 신뢰성설계
· E-mail : wckim@kimm.re.kr



김 정 업

· 한국기계연구원 나노공정장비연구센터 선임연구원
· 관심분야 : MEMS, 자연모사, 구조해석
· E-mail : jykim@kimm.re.kr