

유한요소해석법을 적용한 다중경도 트레킹화의 생체역학적 성능평가

Seung Bum Park^{1*}, Kyung Deuk Lee¹, Dae Woong Kim¹, Jung Hyun Yoo¹, Kyung Hun Kim¹,
Young Min Jang¹, Jong Jin Park², Ji Sung Jeong³, Dong Hwa Lee⁴, Kyoung Tae Han⁴

¹Footwear Biomechanics Team, Footwear Industrial Promotion Center, Busan Economic Promotion Agency,
Busan, Korea, 46757

²Division of Sport & Health Science, College of Arts, University of Kyungsoo, Busan, Korea, 48434

³Management Support Team, Business Plan Division, Koryo TTR, Busan, Korea, 47020

⁴Applied Engineering Team1, DNDE, Busan, Korea, 48059

ABSTRACT

Objective: 본 연구는 유한요소해석법(FEM)을 적용한 다중경도 미드솔 개발을 통한 트레킹화 시제품에 대한 생체역학적 성능평가를 통해 보행 시 인체의 영향에 대해 알아보고자 한다. **Background:** 등산은 일반 생활에 있어 많은 각광을 받아오고 있으며 대중적인 여가활동으로 자리잡았다. 등산로의 대부분은 지면이 딱딱하거나 고르지 못한 지형으로 보행 시 발의 보호가 중요시 되고 있다. 이에 최근 발의 편안함뿐만 아니라 다양한 기능성을 가진 등산화 종류가 개발되어 지고 있다. **Method:** 실험은 하지에 상해가 없는 신체 건강한 20명의 남성을 대상(족저압력분석 : 10명, 3차원동작분석 : 10명)으로 실시하였다. 실험에 사용된 신발은 다중경도 미드솔이 적용된 트레킹화 3가지 모델과 국내 아웃도어 브랜드사 트레킹화 3가지 모델을 선정하였다. 압력분포 분석을 위해 발바닥을 전족부(Mask 1), 중족부(Mask 2), 후족부(Mask 3)로 나누어 최대힘, 최대압력, 평균압력, 접촉면적 분석을 실시하였으며 3차원동작분석을 통해 무릎 및 발목 관절의 내외전 모멘트, 내외측 지면반력 분석을 실시하였다. **Results:** 분석 결과 다중경도 미드솔 적용 트레킹화의 경우 접촉면적과 최대힘에서 우수한 기능성을 나타내었으며, 3차원동작분석 결과 무릎 관절 원발 외전 모멘트에서 우수한 기능성이 나타났다. **Conclusion:** 다중경도 미드솔을 적용한 트레킹화 개발 시제품에 대한 생체역학 성능평가 결과 좌우 경도 조합에 따른 다양한 기능성을 나타내고 있다. **Application:** 유한요소해석법을 적용한 미드솔 및 아웃솔 시제품을 대상으로 더욱 명확한 좌우 경도 조합이 필요할 것으로 보이며 이를 통해 더욱 우수한 기능성을 가지는 다중경도 트레킹화를 개발하여야 할 것으로 보인다.

Keywords: Multiplex Stiffness, Midsole, Finite Elements Method, Trekking Shoes, Foot Pressure Analysis, Motion Analysis

1. Introduction

보행은 인간의 움직임에서 가장 기본이 되며 인체의 중심을 이동시키는 동작을 수행하며, 신경계와 근골격계의 협응이 연속적으로 반복되는 동작이다(Perry & Dabvids, 1992).

보행은 일상생활에 있어 가장 기본이 되는 동작이며, 가장 빈번히 발생하는 움직임이다(Neumann, 2013). 이러한 보행은 남녀노소 누구나 즐길 수 있으며, 상해의 위험성이 가장 낮은 유산소 운동으로써 체지방 감소, 산소섭취량 증대, 심장기능 강화, 신진

대사 촉진, 병에 대한 저항력 증가 등 다양한 운동효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 최근 건강에 대한 관심으로 유산소 운동의 다양한 효과가 알려지면서 등산을 통한 여가생활을 즐기는 인구가 증가하고 있는 추세이다(Gallup Korea, 2014). 등산은 체중지지 운동으로써 골밀도를 높여주며, 보행 빈도나 보행 속도 조절을 통해 개인 스스로가 운동강도를 쉽게 조절할 수 있는 다양한 장점을 가지고 있다(Lee et al., 2014).

하지만 등산로의 대부분은 고르지 못한 다양한 지면의 특성을 가지고 있다. 이에 등산이라는 여가생활을 원활하게 누릴 수 있기 위해서는 발의 편안함은 가장 중요한 요소가 된다. 발의 편안함을 좌우하는

것은 등산화의 선택이며 등산화는 등산에서 가장 중요한 장비이다(Lee and Park, 2007). 등산이라는 다양한 지면환경에서 발목관절의 상해 요인 중 발목의 과도한 내외번을 감소시켜 주는 중요한 장비인 신발은 지면에 의한 급격한 내번 상황에서 근수축력을 증가시켜 발목 외측 인대의 상해 유발을 감소시켜 주는 역할을 함에 있어(Keer, Arnold, Kochrane, Drew, and Abboud, 2006) 등산화의 중요성은 더욱 강조되고 있으며 상해 방지 등을 위하여 신발의 미드솔에 다중경도를 적용하여 하지 관절의 부하 등을 줄여주는 신발이 개발되어지고 있으며 기능성 등이 검증되고 있다(Park, Lee, Kim, Yoo, Kim, Lee, Tech, Jang, and Luthi, 2014). 하지만 기존 기능성 신발들의 개발에 있어 정량적인 구조해석 등의 한계로 인해 시제품 개발에 시간적, 비용적 소요가 높은 것은 사실이다. 이에 본 연구에서는 트레킹화의 미드솔 개발에 있어 유한요소해석법(FEM)을 통해 강성도비를 해석하여 정량적인 데이터를 산출함으로써 기존 신발 개발에 있어 보다 우수한 기능성을 가지는 신발 개발이 가능할 것으로 보인다.

본 연구는 유한요소해석법을 적용한 다중경도 트레킹화에 개발 시제품에 대한 족저압력 분석 및 3차원 동작분석을 통해 기능성을 검증하고자 한다.

2. Method

2.1 Tested shoes

실험에 사용된 유한요소해석법을 적용한 다중경도 트레킹화는 좌우 미드솔 경도 조합이 다른 개발 시제품 Type A, Type B 그리고 Type C(Table 1)와 현재 시판중인 국내 아웃도어 브랜드 3사 트레킹화 3종류(Type D, Type E 그리고 Type F) 총 6족을 족저압력 분석 및 3차원동작분석을 실시하였다(Figure 1).

Table 1. Stiffness of tested shoes(Type A, B, C)

Type	Fore foot		Rear foot		
	Medial	Lateral	Medial	Lateral	
A	Left	53.2	57.2	58.6	64.2
	Right	53.8	58.0	59.0	62.6
B	Left	52.0	55.4	62.8	64.6
	Right	54.8	57.6	58.8	64.0
C	Left	54.8	58.4	55.6	59.4
	Right	50.0	58.2	56.0	61.4



Figure 1. Tested shoes

2.2 Subject

본 연구는 20~30대 신체 건강한 성인 남성을 대상으로 하였으며, 하지와 발에 질환 경력이 없고 정상적인 보행 형태를 보이는 피험자로 선정하였다.

신발 사이즈 변화에 따른 변인을 최소화 하기 위해 발 사이즈 270 mm로 동일한 피실험자를 선정하였으며 족부의 변형유무를 판단하기 위해 족부경검사(podoscope)를 실시하여 평발 등과 같은 발의 형태학적 변형이 의심되는 피실험자는 배제하였다. 최종 실험은 1차 족부경검사를 통과한 피실험자 중 하지와 발에 통증이나 질병을 경험한 적이 없고, 정상적인 보행형태를 가지는 일반 성인 총20명을 대상으로 족저압력 실험 10명, 3차원 동작분석 실험 10명을 대상으로 각각 실험을 실시하였다(Table 2).

Table 2. Characteristics of the subjects(Mean \pm S.D.)

	Height(cm)	Weight(kg)	Age(year)	Size(mm)
Foot pressure	176.0 \pm 3.2	76.0 \pm 3.7	24.5 \pm 1.2	270
3D motion analysis	176.2 \pm 4.4	77.2 \pm 4.2	23.5 \pm 0.7	270

2.3 Data collection

2.3.1 Foot pressure

족저압 실험은 피험자들이 충분한 보행 연습 후 실험 신발을 랜덤으로 선정하여 트레드밀에서 4.2 km/h 보행속도로 보행을 실시하였으며, 데이터 수집

시점을 인지하지 못하도록 한 후 측정하였다.

족저압력 분석은 Novel Gmbh사(novel, pedar mobile)의 pedar-X mobile system을 사용하여 인솔형 압력센서를 오른쪽 신발에 삽입 후 발전체(Total), 전족부(Mask 1), 중족부(Mask 2), 후족부(Mask 3)로 나누어 접촉면적(contact areas), 최대힘(maximum force), 최대압력(peak pressure) 그리고 최대평균압력(maximum mean pressure)을 데이터를 수집하였다.

2.3.2 3D Motion analysis

3차원 동작분석은 Raptor-E 모션 캡처 시스템 및 Bertec 사의 4060-10-2000 지면반력측정 장비를 사용하여 하지에 반사마커를 부착 후 보행 시 지면반력(ground reaction forces) 및 발목, 무릎관절 내외전 모멘트(knee and ankle moment)를 측정하였다(Figure 2).



Figure 2. 3D Motion analysis & Force plates system

3. Results

본 연구는 유한요소해석법을 통해 산출된 미드솔 내외측의 강성도비를 적용한 트레킹화 개발 시제품 3종류에 대한 생체역학적 성능평가를 수행하였다. 이를 통해 최적의 압력분산 효과 및 하지 부하 감소 효과를 가지는 미드솔의 강성도비를 도출하고 그 기능성을 검증하고자 하였다.

3.1 Foot pressure

3.1.1 Contact areas(unit : cm²)

다중경도 트레킹화 개발 시제품 3종류에 대한 발전체의 접촉면적 분석 결과 대조군(Type F) 147.68 > 다중경도 트레킹화(Type B) 146.97 > 다중

경도 트레킹화(Type C) 146.71 > 대조군(Type D) 143.31 > 다중경도 트레킹화(Type A) 142.76 > 대조군(Type E) 136.13의 순으로 나타났다(Figure 3).

3.1.2 Maximum force(unit : N)

다중경도 트레킹화 개발 시제품 3종류에 대한 발전체의 최대힘 분석 결과 다중경도 트레킹화(Type A) 703.34 < 다중경도 트레킹화(Type B) 705.16 < 다중경도 트레킹화(Type C) 726.33 < 대조군(Type D) 726.48 < 대조군(Type F) 730.56 < 대조군(Type E) 806.10의 순으로 낮게 나타났다(Figure 3).

3.1.3 Peak pressure(unit : kPa)

다중경도 트레킹화 개발 시제품 3종류에 대한 발전체의 최대압력 분석 결과 대조군(Type D) 227.69 < 대조군(Type F) 247.57 < 다중경도 트레킹화(Type C) 258.70 < 다중경도 트레킹화(Type B) 274.98 < 다중경도 트레킹화(Type A) 275.67 < 대조군(Type E) 277.01의 순으로 낮게 나타났다(Figure 3).

3.1.4 Maximum mean pressure(unit : kPa)

다중경도 트레킹화 개발 시제품 3종류에 대한 발전체의 최대평균압력 분석 결과 대조군(Type D) 81.47 < 대조군(Type F) 83.06 < 대조군(Type E) 92.55 < 다중경도 트레킹화(Type C) 92.66 < 다중경도 트레킹화(Type B) 92.68 < 다중경도 트레킹화(Type A) 98.55의 순으로 낮게 나타났다(Figure 3).

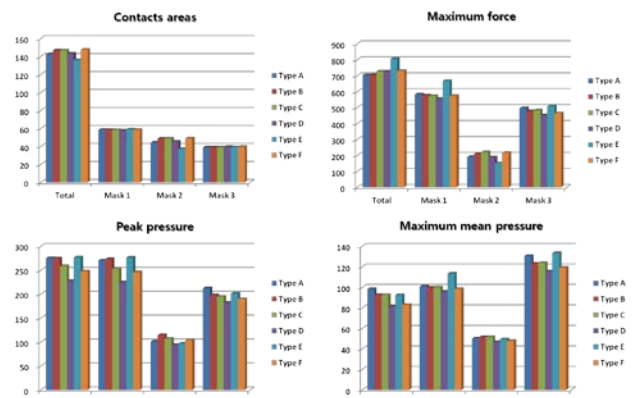


Figure 3. Results of foot pressure

3.2 3D Motion analysis

3.2.1 Kinetics Analysis

무릎관절의 오른발 외전 모멘트 분석 결과 대조군(Type F) 0.250 < 대조군(Type D) 0.295 < 대조군(Type E) 0.303 < 다중경도 트레킹화(Type A) 0.374 < 다중경도 트레킹화(Type C) 0.385 < 다중경도 트레킹화(Type B) 0.414의 순으로 낮게 나타났으며, 무릎관절의 오른발 내전 모멘트 분석 결과 대조군(Type E) -0.030 < 대조군(Type F) -0.034 < 대조군(Type D) -0.039 < 다중경도 트레킹화(Type A) -0.054 < 다중경도 트레킹화(Type B) -0.055 < 다중경도 트레킹화(Type C) -0.058의 순으로 낮게 나타났(Figure 4). 무릎관절의 왼발 외전 모멘트 분석 결과 다중경도 트레킹화(Type A) 0.375 < 다중경도 트레킹화(Type C) 0.388 < 다중경도 트레킹화(Type B) 0.397 < 대조군(Type F) 0.399 < 대조군(Type D) 0.437 < 대조군(Type E) 0.449의 순으로 낮게 나타났으며, 무릎관절의 왼발 내전 모멘트 분석 결과 대조군(Type F) -0.043 < 다중경도 트레킹화(Type C) -0.048 < 다중경도 트레킹화(Type B) -0.050 < 다중경도 트레킹화(Type A) -0.052 < 대조군(Type D) -0.053 < 대조군(Type E) -0.054의 순으로 낮게 나타났(Figure 4).

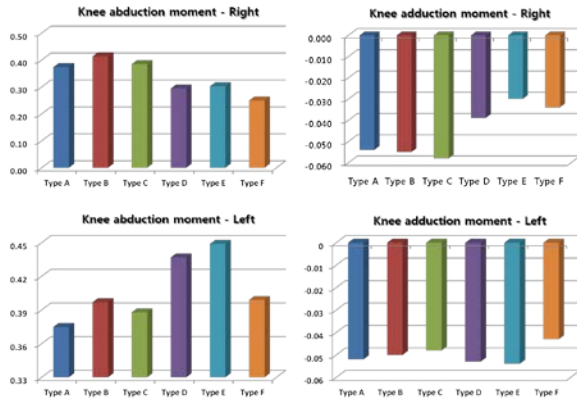


Figure 4. Results of knee moment

발목관절의 오른발 외전 모멘트 분석 결과 대조군(Type F) 0.042 < 대조군(Type E) 0.047 < 대조군(Type D) 0.059 < 다중경도 트레킹화(Type A) 0.118 < 다중경도 트레킹화(Type C) 0.126 < 다중경도 트레킹화(Type B) 0.140의 순으로 낮게 나타났으며, 발목관절의 오른발 내전 모멘트 분석 결과 다중경도 트레킹화(Type B) -0.033 < 대조군(Type E) -0.038 < 다중경도 트레킹화(Type A) -0.039 < 대

조군(Type F) -0.044 < 다중경도 트레킹화(Type C) -0.046 < 대조군(Type D) -0.051의 순으로 낮게 나타났(Figure 5). 발목관절의 왼발 외전 모멘트 분석 결과 대조군(Type F) 0.059 < 대조군(Type D) 0.071 < 대조군(Type E) 0.078 < 다중경도 트레킹화(Type A) 0.080 < 다중경도 트레킹화(Type B) 0.088 < 다중경도 트레킹화(Type C) 0.114의 순으로 낮게 나타났으며, 발목관절의 왼발 내전 모멘트 분석 결과 다중경도 트레킹화(Type C) -0.046 < 대조군(Type D) -0.048 < 대조군(Type E) -0.055 < 대조군(Type F) -0.062 < 다중경도 트레킹화(Type B) -0.065 < 다중경도 트레킹화(Type A) -0.072의 순으로 낮게 나타났(Figure 5).

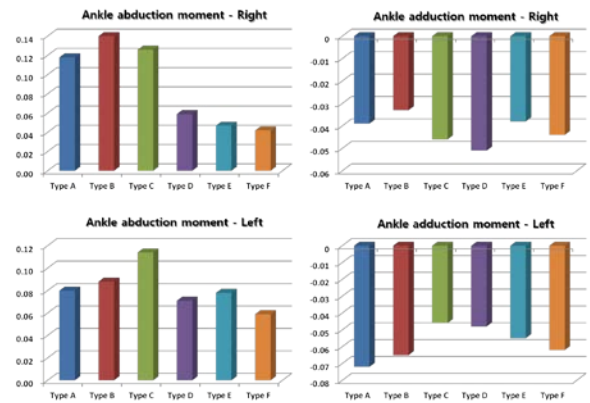


Figure 5. Results of ankle moment

3.2.2 Mediolateral Ground Reaction Forces(GRF)

오른발 내측 지면반력 분석 결과 대조군(Type F) 0.036 < 대조군(Type E) 0.042 = 대조군(Type D) 0.042 < 다중경도 트레킹화(Type A) 0.118 < 다중경도 트레킹화(Type C) 0.126 < 다중경도 트레킹화(Type B) 0.140의 순으로 낮게 나타났으며, 오른발 외측 지면반력 분석 결과 대조군(Type E) -0.031 < 대조군(Type D) -0.032 < 다중경도 트레킹화(Type B) -0.033 < 대조군(Type F) -0.036 < 다중경도 트레킹화(Type A) -0.039 < 다중경도 트레킹화(Type C) -0.046의 순으로 낮게 나타났(Figure 6). 왼발 내측 지면반력 분석 결과 대조군(Type F) 0.057 < 다중경도 트레킹화(Type A) 0.058 = 다중경도 트레킹화(Type B) 0.058 = 다중경도 트레킹화(Type C) 0.058 < 대조군(Type E) 0.061 < 대조군(Type D) 0.062의 순으로 낮게 나타났으며, 왼발 외측 지면반력 분석 결과 대조군(Type E) -0.036 < 대조군(Type D) -0.037 < 다중경도 트레킹화(Type C)

-0.038 = 대조군(Type F) $-0.038 <$ 다중경도 트레킹화(Type B) $-0.042 <$ 다중경도 트레킹화(Type A) -0.045 의 순으로 낮게 나타났다(Figure 6).

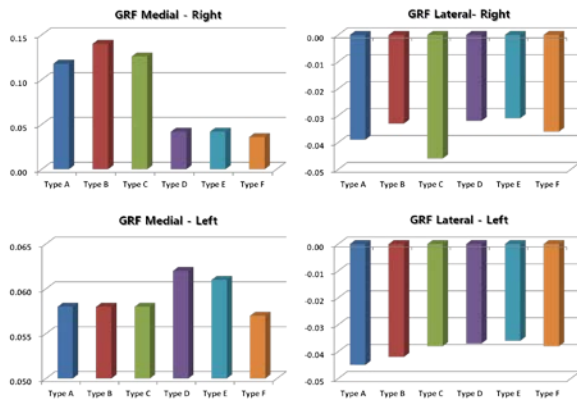


Figure 6. Results of GRF

4. Conclusion

접촉면적의 발전체 분석결과 개발 다중경도 트레킹화 중 Type B, C의 경우 대조군 Type D, E보다 접촉면적이 증가하였으며 다중경도 트레킹화 중 Type B가 가장 높은 접촉면적을 나타내었다. 최대힘의 경우 발전체에서 대조군 Type D, E, F보다 개발 다중경도 트레킹화 시제품 Type A, B, C 모두 감소하였으며 다중경도 트레킹화 중 Type B가 가장 낮은 최대힘을 나타내었다. 최대압력의 경우 발전체 분석결과 개발 다중경도 트레킹화 시제품 Type A, B, C 모두 대조군 Type D, E, F보다 높은 값을 나타내었으며 대조군 Type E보다 낮은 값을 나타내었고, 다중경도 트레킹화 중 Type C가 가장 낮은 최대압력을 나타내었다. 최대평균압력의 경우 발전체 분석결과 개발 다중경도 트레킹화 시제품 Type A, B, C 모두 대조군 Type D, E, F보다 높은 값을 나타내었으며 다중경도 트레킹화 중 Type C가 가장 낮은 최대평균압력을 가졌다.

다중경도 트레킹화의 3차원동작분석 결과를 살펴보면 Type A, B, C 모두 왼발 경도 조합에 대한 기능성과 오른발의 경도 조합의 기능성이 다른 경향을 나타내고 있음에 따라 추후 개발 시제품에서는 유한요소해석법이 적용된 아웃솔 및 미드솔 시제품을 대상으로 더욱 명확한 다중경도 조합에 대한 성능평가를 수행하여 우수한 기능성을 가지는 다중경도 트레킹화를 개발하고자 한다.

Acknowledgements

본 연구는 2014년도 중소기업청 융복합기술개발사업 지원에 의하여 수행되었음(과제번호 : S2178231).

References

- Perry, J., & Davids, J. R., Gait analysis: normal and pathological function, *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 12(6), 815, 1992.
- Neumann, D. A., *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for physical rehabilitation*, 1st edition, St Louis: Mosby, Inc, 2002.
- Gallup Korea, The hobby which Korean like most, Retrieved from www.gallup.co.kr, 2014.
- Lee, H. S., Chae, W. S., Jung, J. H., Kim, D. S., Lim, Y. T., & Jang, J. I., The influence of angle change of the forefoot's adhesive outsole designs on the electromyographic activity of the erector spinae and selected lower limb muscles during downhill walking, *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 24(2), 139-149, 2014.
- Lee, J. S., and Park, S. B., *The Study of the Performance Test of the Hiking Boots on the Foot Pressure Distribution*. Ergonomics Society of Korea Conference, 211-221, 2007.
- Kerr, R., Arnold, G., Cochrane, L., Drew, T., and Abboud, R., The effect of shoes on ankle injuries. *Journal of Biomechanics*, 39(1), 110, 2006.
- Park, S. B., Lee, K. D., Kim, D. W., Yoo, J. H., Kim, K. H., Lee, T. Y., Tech, J. C., Jang, Y. M., and Luthi, S., *Investigation of the Biomechanical Effect of Variable Stiffness Shoe(VSS) on Externational Knee Adduction Moment(EKAM) of Lower Extremity in Walking*. Proceedings of 2014 International Conference of Korean Society of Sport Biomechanics, 2014.

Author listings

Seung Bum Park: sbpark@shoenet.org

Highest degree: Ph. D., Department of Physical Education, Pusan National University

Position title: Head of Team, Footwear Biomechanics Team, Footwear Industrial Promotion Center, Busan Economic Promotion Agency

Areas of interest: Footwear Biomechanics

Kyung Deuk Lee: leekd79@shoenet.org

Highest degree: Master, Department of Industrial and Management Engineering, Dong-Eui University

Position title: Manager, Footwear Biomechanics Team, Footwear Industrial Promotion Center, Busan Economic Promotion Agency

Areas of interest: Footwear Biomechanics

Dae Woong Kim: dwkim@shoenet.org

Highest degree: Master, Department of Industrial and Management Engineering, Dong-Eui University

Position title: Assitant Manager, Footwear Biomechanics Team, Footwear Industrial Promotion Center, Busan Economic Promotion Agency

Areas of interest: Footwear Biomechanics

Jung Hyeon Yoo: jhyoo@shoenet.org

Highest degree: Master, Department of Industrial and Management Engineering, Dong-Eui University

Position title: Assitant Manager, Footwear Biomechanics Team, Footwear Industrial Promotion Center, Busan Economic Promotion Agency

Areas of interest: Footwear Biomechanics

Kyung Hun Kim: kimkh@shoenet.org

Highest degree: Master, Department of Physical Education, Kyungsung University

Position title: Assistant Manager, Footwear Biomechanics Team, Footwear Industrial Promotion Center, Busan Economic Promotion Agency

Areas of interest: Footwear Biomechanics

Young Min Jang: min3032@shoenet.org

Highest degree: Master, Department of Physical Education, Silla University

Position title: Assitant Manager, Footwear Biomechanics Team, Footwear Industrial Promotion Center, Busan Economic Promotion Agency

Areas of interest: Footwear Biomechanics

Jong Jin Park: jjpark@ks.ac.kr

Highest degree: PhD, Department of Physical Education, Seoul National University

Position title: Professor, Division of Sport & Health Science, University of Kyungsung

Areas of interest: Sport Biomechanics

Dong Hwa Lee : dhlee@dnde.co.kr

Highest degree: Ph. D. , Mechanical Engineering, Dong-A University

Position title: General Manager, Applied Engineering Team 1, DNDE Inc

Areas of interest: Mechanics, Finite Element analysis

Kyoung Tae Han: kthan@dnde.co.kr

Highest degree: Master , Mechanical Engineering, Dong-A University

Position title: Manager, Applied Engineering Team 1, DNDE Inc

Areas of interest: Mechanics, Finite Element analysis