

보행 시 분리형 미드솔의 생체역학적 효과

통계상담 2조

서울대학교 통계학과 석사과정 류환감

서울대학교 통계학과 석사과정 현승엽

서울대학교 통계학과 석박사통합과정 신민섭

1. 연구 주제

본 연구의 목적은 밑창의 형태가 다른 두 가지 신발이 보행 과정에 관여하는 신체 부위들의 움직임에 미치는 영향을 규명하는 것이다.

구체적으로, 대조군으로 쓰인 중창이 평평한 일반 신발(Single-sole)에 대해, 중창의 가운데 부분이 분리되어 있는 분리형 미드솔(Split-sole) 신발을 신었을 때 무릎, 고관절, 발목, 발 등의 관절의 움직임과 근활성도에 유의미한 차이가 있는지 알아보기 위한 통계적 분석을 진행하였다.



(a) Split-Sole shoes (Narzio)

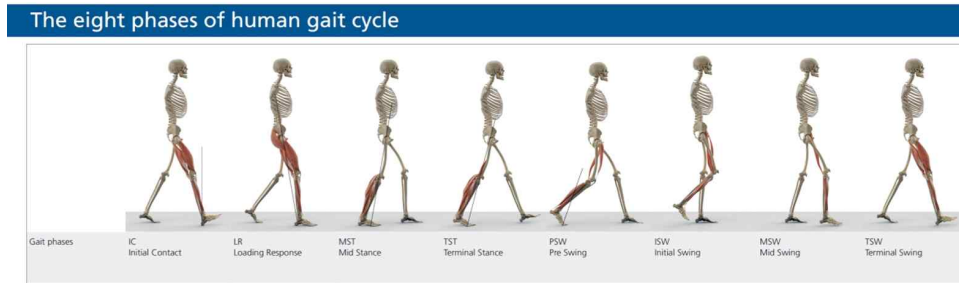


(b) Single-Sole shoes (control)

그림 1 실험군(좌)와 대조군(우) 신발의 모습.

2. 연구 배경 및 목적

본 연구에서는 20명의 대학생들이 각각 실험군과 대조군 신발을 신고 보행을 했을 때 수집된 3차원 동작분석 데이터와 근활성도 데이터를 사용하여 분석을 수행하였다. 3차원 동작분석 데이터는 좌우 다리의 무릎, 고관절, 발목, 발 등 각 신체부위에 대해 위치, 회전각, 장력 등 다양한 움직임에 관한 측정치들이 각각 하나의 변수를 이루어 총 100개 이상의 변수로 구성되어 있고, 근활성도 데이터는 5가지 변수로 구성되어 있다. 모든 데이터는 공통적으로 시간에 따른 측정치를 기록하는 시계열 데이터로 수집되었는데, 사람이 한 걸음을 걷는 하나의 보행주기를 100개의 시간 프레임으로 나누어 각 변수마다 100개의 측정치가 존재한다.



Jacquelin Perry, 『GAIT ANALYSIS - Normal and Pathological Function』, SLACK, 1992, 12~15쪽

| Initial Contact | Load Response | Mid Stance | Terminal Stance | Pre-swing | Initial Swing | Mid Swing | Terminal Swing |
|-----------------|---------------|------------|-----------------|-----------|---------------|-----------|----------------|
| 0~2% | 0~10% | 10~30% | 30~50% | 50~60% | 60~73% | 73~87% | 87~100% |

그림 2 8개의 보행구간의 구분

선행연구¹⁾에 따르면 한 보행주기는 통상적으로 위와 같은 8개의 보행구간으로 나뉜다. 본 연구에서 수행하는 분석은, 실험군과 대조군 신발을 신은 경우에 대해 보행과 관련된 변수들 중 어떤 변수가 통계적으로 유의미한 차이를 드러내며, 특히 전체 보행주기 중에서도 어떤 구간에서의 차이가 유의미한지 알아보는 것을 목적으로 한다.

3. 모형 및 이론적 배경

각각의 변수는 시간에 따른 100개의 측정값으로 구성되어 있지만, 본 연구에서는 8개의 보행구간별 효과만을 분석하고자 하기에 100개의 측정값 대신 각 구간별로 하나씩 8개의 값을 추려낼 필요가 있다. 선행연구를 참조해, 각 구간을 구성하는 측정값들(그림 2 아래 참조)의 평균값과 최댓값을 택해 대푯값으로 설정하여 각각 분석을 진행하였다.

이 경우 각 변수, 각 구간에 대해 실험군과 대조군 각각 20개의 값이 존재하는데, 실험자별로 paired되어 있으므로 paired two sample test를 적용할 수 있다. Two sample test를 위해서는 기본적인 t-test와 비모수적 방법인 wilcoxon rank sum test 등을 사용할 수 있는데, 여기서는 분포가정과 무관한 permutation test(순열검정)을 사용하여 각 변수와 구간별로 p-value를 도출하고 두 신발간에 유의미한 차이가 있는지 분석하였다.

정리하면, 본 연구에서 가정하는 통계모형은 다음과 같다.

$$y_{ijkl} = \mu_{ijk} + \alpha_{ijl} + \epsilon_{ijkl}$$

1) Jacquelin Perry, 『GAIT ANALYSIS-Normal and Pathological Function』, SLACK, 1992, pp. 12~15

$i = 1, 2, \dots, I$ (변수), $j = 1, 2, \dots, 8$ (구간), $k = 1, 2$ (신발의 종류) $l = 1, 2, \dots, 20$ (실험자)

μ_{ijk} 는 i 번째 변수가 j 번째 구간에서 신발 k 를 신었을 때 갖게 되는 기댓값이고, α_{ijl} 은 l 번째 실험자가 해당 변수와 구간에 대해 발생시키는 차이, ϵ_{ijkl} 은 각 실험에서 통제 불가능한 오차를 의미한다. 우리는 각각의 가능한 i, j 조합에 대해 $H_0: \mu_{ij1} = \mu_{ij2}$ 를 검정하는데, 실험자에 따른 영향을 받는 α 의 효과를 제거하기 위해 pairedness를 가정하여 분석을 수행한다. (즉, $z_{ijl} = y_{ij1l} - y_{ij2l}$ 들에 대한 one sample test와 같이 취급한다.)

3-1) Permutation test (순열 검정법)

일반적으로 t-test와 같은 두 집단의 차이에 대한 가설 검정을 하기 위해서는 데이터가 독립성, 정규성 등 특정 성질을 만족해야 한다는 가정이 필요한데, 실제 사용되는 데이터는 이를 만족하지 않는 경우가 많다. Permutation test는 이러한 상황에서 분포가정 없이도 이용할 수 있는 비모수적인 검정 방법이다.

본 연구에서 다루는 데이터의 경우, 한 명의 피실험자가 대조군과 실험군에 해당하는 신발을 신고 각각 한 번씩 실험을 해서 얻은 paired data이다. 두 집단의 차이를 확인하기 위한 검정이지만 paired data를 사용하기 때문에 차이에 대한 one sample permutation test를 진행한다.

각각의 고정된 (i, j) 조합에 대해, 변수 i 와 보행구간 j 에서 대푯값으로 뽑은 평균(or 최댓값)이 대조군, 실험군 각각에 대해 20개씩 존재한다. X, Y 가 각각 대조군과 실험군에 대응한다고 하면 데이터는

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{20}, y_{20})$$

와 같이 표현된다. 두 그룹 X, Y 간에 차이가 존재하는지 관심이 있기 때문에 $D = X - Y$ 로 두 그룹의 차이를 계산한 새로운 데이터

$$d = d_1, d_2, \dots, d_{20} \quad (d_i = x_i - y_i, \quad i = 1, 2, \dots, 20)$$

를 permutation test에 이용한다. 이때 귀무가설은 $H_0: E(D) = 0$ 이다.

우선 기존의 데이터 $d_i (i = 1, 2, \dots, 20)$ 로부터,

$$\bar{d} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} d_i$$

를 검정통계량으로 사용한다.

이제 $|d| = (|d_1|, |d_2|, \dots, |d_{20}|)$ 라 할 때, $|d|$ 의 값들에 무작위하게 1 or -1 을 곱하여 새로운 벡터

$$d_1^* = (s_1|d_1|, s_2|d_2|, \dots, s_{20}|d_{20}|), \quad s_i = \begin{cases} 1 & \text{with probability } 0.5 \\ -1 & \text{with probability } 0.5 \end{cases}$$

를 생성한다. 또 이렇게 얻어진 d_1^* 로부터 계산된 표본 평균을 $\overline{d_1^*}$ 라고 하자. 이제 충분히 큰 B 에 대해, 위의 샘플링 과정을 B 번 진행하면

$$\overline{d_1^*}, \overline{d_2^*}, \dots, \overline{d_B^*}$$

를 얻는다.

귀무가설 하에서, d_i 들은 평균이 0인 분포에서 생성되었기에 무작위하게 부호를 변경해도 $\overline{d_k^*}$ 들은 \overline{d} 와 동일한 분포를 따를 것이다. 그렇기에 만약 \overline{d} 의 절댓값이 $\overline{d_k^*}$ 들에 비해 상대적으로 크다면 이는 대립가설을 지지하는 근거로 볼 수 있다. 따라서 One sample permutation test에서는, 이렇게 얻어진 $\overline{d_1^*}, \overline{d_2^*}, \dots, \overline{d_B^*}$ 의 분포에서 우리가 관측한 검정통계량 \overline{d} 의 절댓값이 극단적인 값을 갖는다면 귀무가설을 기각한다. 이때 기각의 기준이 되는 p-value는 아래와 같이 계산된다.

$$p\text{-value} = \frac{n \left\{ |\overline{d_i^*}| \geq |\overline{d}| \right\}}{B}, \quad i = 1, 2, \dots, B$$

4. 데이터 처리

1) 결측치 및 0 값에 대한 처리

의뢰자로부터 받은 데이터에서는 결측치는 따로 존재하지 않았다. 그러나 모든 시간에 대해 0인 값을 갖거나 혹은 일부 구간에서 0이 지속적으로 나오는 변수들이 있었다. 측정된 값이 모두 0인 변수는 의미가 없으므로 분석에서 제외하였고, 일부만 0인 변수에 대해서는 초기에 결측치로 생각해 이를 별도의 방식으로 처리해야 한다고 판단했으나, 의뢰자와 논의한 결과 이는 보행의 특성으로 인해 나타나는 근본적인 특성(예컨대, 오른발을 땅에 디디고 보행을 할 때 왼쪽 다리에 걸리는 힘은 0으로 측정되는 현상)으로 볼 수 있기 때문에 별도의 처리 없이 분석하기로 결정했다. 이런 과정을 거쳐 데이터에 포함된 130개 이상의 변수들 중 분석에 포함시킬 변수들을 선정하였는데, 3차원 동작분석 데이터에서 93개, 근활성도 데이터에서 5개의 변수에 대한 분석을 진행하였다.

| | | | | | | |
|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 0.11 | 0.127 | -0.008 | 0.033 | 0.007 | 0.161 | -0.027 |
| 0.065 | 0.102 | -0.005 | 0.038 | 0.008 | 0.181 | -0.077 |
| 0.033 | 0.076 | -0.004 | 0.032 | 0.007 | 0.143 | -0.114 |
| 0.009 | 0.055 | -0.003 | 0.022 | 0.005 | 0.087 | -0.141 |
| -0.006 | 0.037 | -0.002 | 0.031 | 0.01 | 0.133 | -0.159 |
| -0.016 | 0.024 | -0.001 | 0.019 | 0.008 | 0.086 | -0.17 |
| -0.021 | 0.014 | -0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.011 | -0.174 |
| -0.023 | 0.008 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.174 |
| -0.024 | 0.005 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.171 |
| -0.024 | 0.003 | 0.001 | 0 | 0 | 0 | -0.165 |
| -0.023 | 0.003 | 0.001 | 0 | 0 | 0 | -0.157 |
| -0.022 | 0.003 | 0.001 | 0 | 0 | 0 | -0.149 |
| -0.021 | 0.004 | 0.002 | 0 | 0 | 0 | -0.14 |
| -0.02 | 0.004 | 0.002 | 0 | 0 | 0 | -0.133 |
| -0.019 | 0.003 | 0.003 | 0 | 0 | 0 | -0.127 |
| -0.019 | 0.002 | 0.004 | 0 | 0 | 0 | -0.121 |
| -0.019 | 0.001 | 0.005 | 0 | 0 | 0 | -0.118 |
| -0.02 | 0 | 0.005 | 0 | 0 | 0 | -0.115 |

그림 3 데이터 내에 0 값이 연속해서 나타나는 구간

2) 구간별 데이터 분석의 정당성

데이터를 보면, 어떤 변수들의 경우 의뢰자가 제시한 한 구간 안에 해당 변수의 최댓값 및 최솟값이 모두 들어있는 경우가 있어, 구간별로 평균을 내서 분석하는 것이 의미가 있을지에 대한 고민이 필요했다. 그러나 교수님과의 면담 시간을 통해, 의뢰자가 연구하고 있는 분야에서의 특수한 이론적 배경이나 혹은 개별 프레임 대신 구간별로 나누는 것에 대한 합당한 근거가 있을 때에는 구간별로 평균을 통해 분석하는 것이 충분한 근거가 있다는 결론을 내리게 되었다. 의뢰자에게 문의한 결과 해당 분야의 학자 Jacquelin Perry에 의해 구분된 보행구간²⁾이 있어 근거로 활용해서 분석하기로 했다.

3) 코드 구성

모든 분석은 통계 패키지 R을 사용하여 진행되었다. 데이터 전처리 과정에서 데이터마다 변수명이 조금씩 다르거나 열별로 순서가 다른 부분이 많아 실제 분석에 앞서 sorting 및 변수명 변경 작업이 필요했고, 오른쪽 움직임에 대한 데이터와 왼쪽 움직임에 대한 데이터가 모두 따로 나와 있어 분석하고자 하는 데이터에 맞는 변수 문자열을 따로 추출해내는 과정이 필요했다.

또한, 20명의 데이터에 대해서 각 구간별로 평균값 혹은 최대값을 뽑되, 이를 대략 70개가 되는 변수별로 다시 따로 정리를 해야했기 때문에 순차적으로 알고리즘 구조를 짜는 것이 중요했다.

5. 분석 결과

Permuation test를 활용한 3차원 동작분석 데이터와 근활성도 데이터에 대한 분석결과를

2) 주석 1 참조

아래에 첨부한다. 다만, 지면상의 한계가 있기에 예시로 일부 변수들의 결과만 보인다.

아래 plot들은 3차원 동작분석과 근활성도 데이터에 포함된 각 변수에 대해 8개의 보행구간에서의 permutation test 결과 유의수준 0.05에서 가설이 기각되는 구간을 1로, 그렇지 않은 구간을 0으로 표시해서 나타낸 것이다. 또한, 단순히 기각 여부를 제시하는 것에서 나아가 각 변수가 어느 정도로 유의한지를 나타내기 위해 p-value 값을 같이 표기했다.

1) 동작분석 데이터 중 ANK_Abd_MOM 변수에 대해 구간별 mean 값과 max 값을 기준으로 분석한 결과는 다음과 같다.

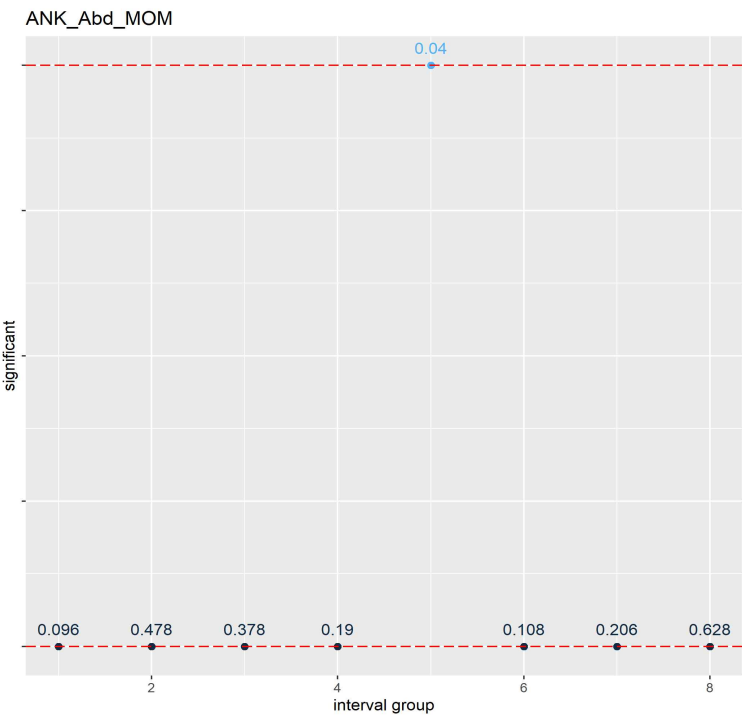


그림 4 <ANK_Abd_MOM 변수, 구간별 평균값에 대한 검정 결과>

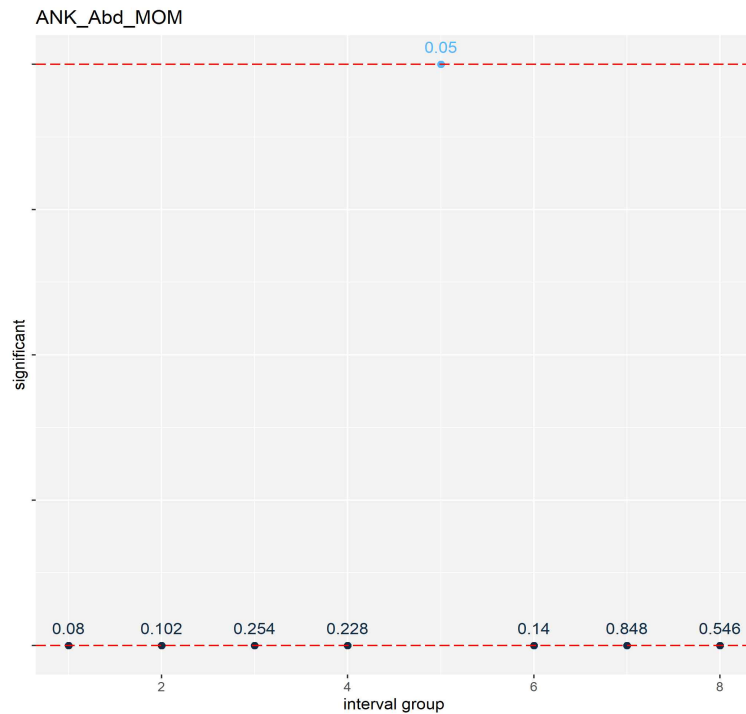


그림 5 <ANK_Abd_MOM 변수, 구간별 최댓값에 대한 검정 결과>

구간별 평균값과 최댓값을 사용했을 때의 permutation test 결과에는 거의 차이가 없었는데, 구간 5를 제외하고는 귀무가설을 기각하지 못했고 구간 5에서도 p 값이 0.05에서 크게 벗어나지 않았다. 따라서 이 변수의 경우 실험군과 대조군에서 큰 차이가 발견되지 않았다는 결론을 내릴 수 있었다.

의뢰자는 여러 가지 변수 중에서 특히 ANK_Flex_ANG 변수에 대해 실험군과 대조군에서 차이가 나는 구간이 있는지 분석을 요청했다. Permutation test를 사용한 분석에서는 ANK_Flex_ANG 변수에 대해 전 구간에서 차이가 존재함을 확인했다. 다만 분석 결과 모든 구간에서 p-value가 매우 낮아, 실험군과 대조군으로 나눠 분석하는 과정에서 이미 인과관계에 의해 차이가 내재된 변수일 가능성이 있다.

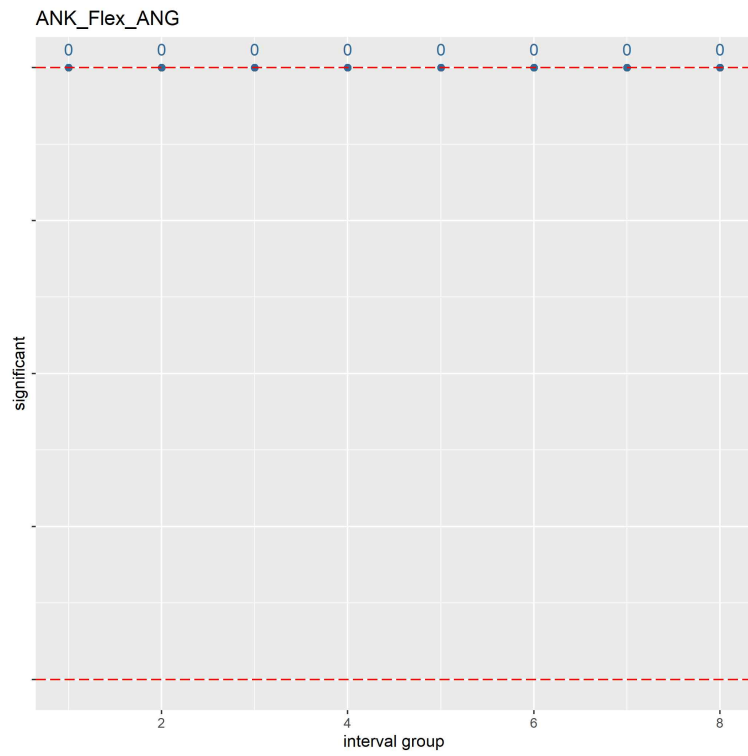


그림 6 <ANK_Flex_ANG 변수, 구간별 평균값에 대한 검정 결과>

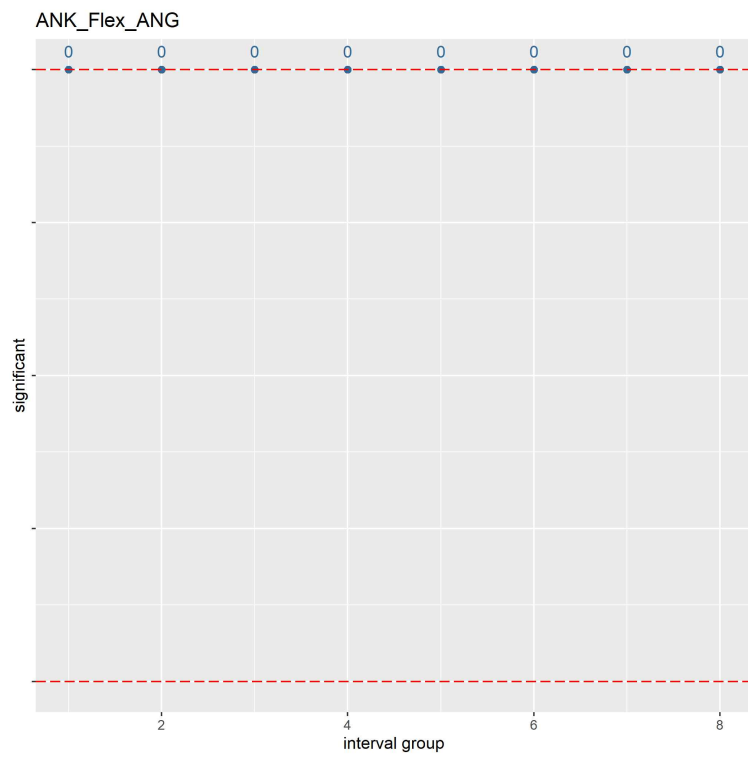


그림 7 <ANK_Flex_ANG 변수, 구간별 최댓값에 대한 검정 결과>

2) 동작분석 데이터 중 의뢰자가 특별히 요구한 발 데이터에 대한 분석 결과를 제시한다. Fore Foot Dorsiflexion 변수에 대해 구간별 mean 값과 max 값을 기준으로 분석한 결과는 다음과 같다.

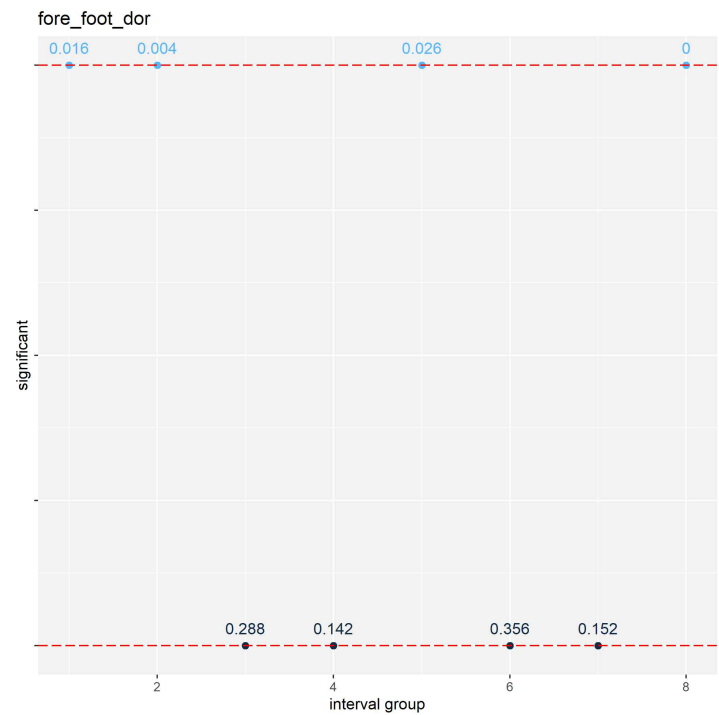


그림 8 <Fore Foot Dorsiflexion 변수, 구간별 평균값에 대한 검정 결과>

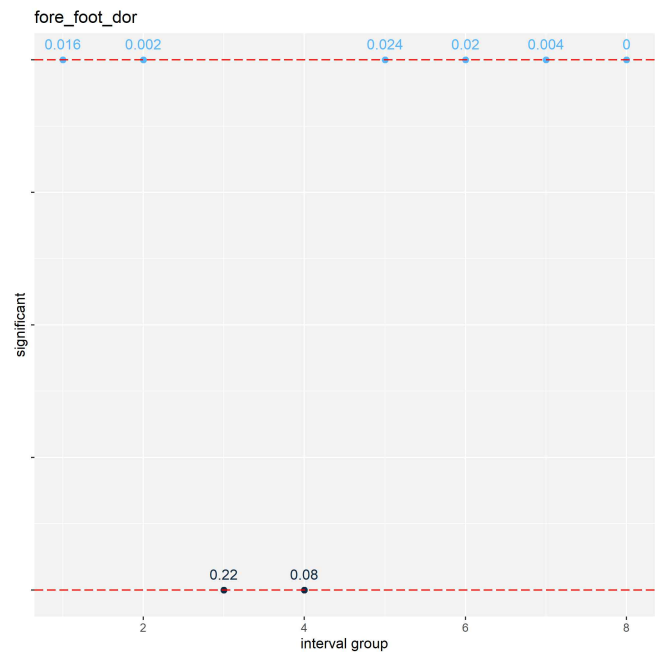


그림 9 <Fore Foot Dorsiflexion 변수, 구간별 최댓값에 대한 검정 결과>

Permutation test 결과, 발의 움직임에 대해서는 실험군과 대조군에서 상당 구간 차이가 있음을 확인했다. 특히 구간별 최댓값을 기준으로 분석했을 때 실험군과 대조군의 차이가 돋보임을 알 수 있다.

3) 근활성도 데이터 중 BICEPS FEM. LT 변수에 대한 permutation 분석 결과이다. 근활성도 데이터는 총 5개의 변수로 구성되어 있는데, 그 중 BICEPS FEM. LT 변수에 한해서만 실험군과 대조군에서의 유의미한 차이를 확인할 수 있었다.

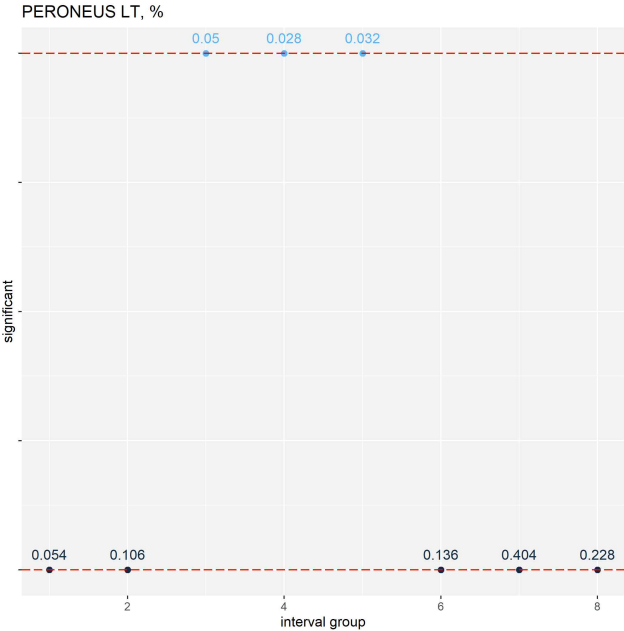


그림 10 <BICEPS FEM. LT 변수, 구간별 평균값에 대한 검정 결과>

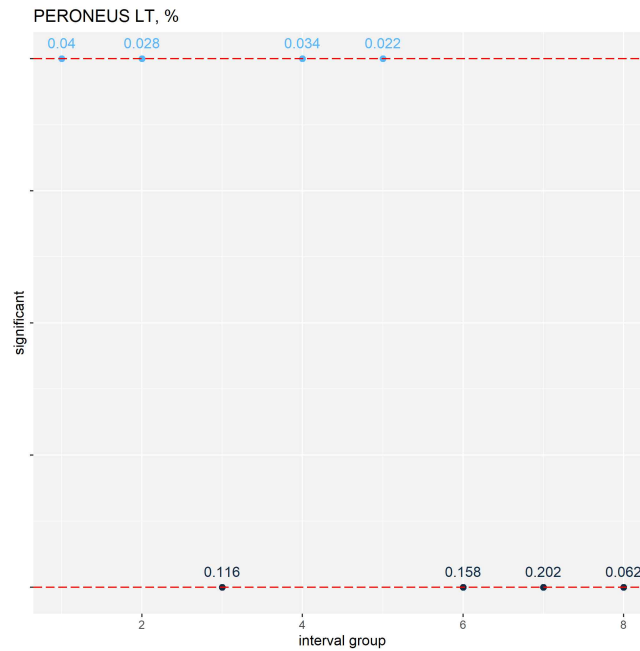


그림 11 <BICEPS FEM. LT 변수, 구간별 최댓값에 대한 검정 결과>

마지막으로, 모든 변수의 mean값과 max값에 대한 구간별 분석 결과를 한눈에 알아볼 수 있도록 다음과 같은 표의 형태로 정리하여 의뢰자에게 제시하였다. 1구간부터 8구간까지 중 분석 결과 유의수준 0.05에서 귀무가설이 기각되어 차이가 있다고 나타난 구간들을 표기하였고, 차이가 나는 구간의 개수에 따라 색깔을 다르게 표시하였다.

| | left_mean | left_max | right_mean | right_max |
|------------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|
| Ankle Flex FRC | 1 | 1 | 3,4 | 3 |
| Ankle Flex MOM | 3,4 | 3,4,5,8 | 4,5,8 | 4,5,8 |
| Ankle Abd ANG | 0 | 0 | 3,6,7 | 3,4,6,7 |
| Ankle Abd FRC | 3,4,5 | 3,4,5,6 | 3,4,5 | 3,4,5 |
| Ankle Abd MOM | 5,6 | 5 | 0 | 0 |
| Ankle Flex ANG | 1,2,3,4,5,6,7,8 | 1,2,3,4,5,6,7,8 | 2,3,4,5,6,8 | 1,2,3,4,5,6,7,8 |
| Ankle PWR | 0 | 4 | 0 | 3 |
| Ankle Rot ANG | 4 | 6 | 0 | 0 |
| Ankle Rot FRC | 0 | 2,4 | 4 | 0 |
| Ankle Rot MOM | 6 | 3,6 | 3,4,7,8 | 4 |
| Foot Null 38(35) | 1,3,4,5,6,7,8 | 1,3,4,6,7,8 | 3,4,7 | 3,4,6,7 |
| Foot Orientation | 1,2,3,4,6,7 | 1,2,3,4,7,8 | 1,7,8 | 7 |
| GRF FWD | 2 | 0 | 0 | 0 |
| GRF LAT | 3 | 0 | 0 | 2 |
| GRF VRT | 2,4 | 2 | 4 | 3 |
| Hip Abd ANG | 2,3 | 2 | 2 | 2 |
| Hip Abd FRC | 5 | 0 | 5 | 5,6 |
| Hip Abd MOM | 2,5 | 2,5 | 2,3,4 | 2,4,5 |
| Hip Flex ANG | 3,4 | 4 | 0 | 0 |
| Hip Flex FRC | 4 | 0 | 2,3,4,5,7 | 3,4,5,7 |
| Hip Flex MOM | 0 | 5 | 5 | 0 |
| Hip PWR | 4 | 0 | 0 | 0 |
| Hip Rot ANG | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hip Rot FNC | 1,2,4 | 1,8 | 4 | 0 |
| Hip Rot MOM | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Knee Abd ANG | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Knee Abd FRC | 2,4 | 2,4 | 1,2 | 1 |
| Knee Abd MOM | 5 | 5 | 4,5 | 4,5 |
| Knee Flex ANG | 1,2,5 | 1,2 | 2,5 | 0 |
| Knee Flex FRC | 3 | 0 | 0 | 0 |

그림 12 각 변수별 귀무가설이 기각되는 구간들 표 일부

6. 결론 및 제언

본 연구에서는 통계적 기법들을 이용하여 single-sole 신발에 대해 split-sole 신발을 신었을 때 걷기동작의 변화와 근활성도의 차이를 구간별로 분석하였다. 그 과정에서 별도의 분포 가정이 없는 대응비교 모형을 가정하고 paired two sample permutation test를 이용하였다. 그 결과 전 구간에서 통계적으로 유의미한 차이가 나타나는 변수, 차이가 나타나지 않는 변수, 특정 구간에서만 차이가 나타나는 변수 등 변수별로 다양한 결과가 나타남을 확인할 수 있었고, 의뢰자가 본인의 연구주제에 맞게 해석하여 활용할 수 있는 통계적 정보들을 제공하였다.

여기서는 permutation test 기반으로 모든 검정을 수행하였는데, 먼저 데이터가 정규분포를 따르는지 확인하고 따른다면 t-test를 사용했을 때 다른 결과가 나타나는지 연구해 볼 수 있을 것이다. 또한 구간을 어떻게 나누는지에 따라 매우 다른 결과가 얻어질 수 있는데, 같은 데이터를 가지고 해당 분야의 다른 선행연구들을 참조하여 다른 방식으로 구간을 나누었을 때 어떤 차이가 나타나는지도 분석해 볼 수 있고, 만약 더 명료한 결과가 얻어진다면 구간을 나누는 방식에 대한 정당성을 부여해주는 근거로도 사용될 수 있을 것이다.

7. 참고문헌

Jacquelin Perry, 『GAIT ANALYSIS-Normal and Pathological Function』, SLACK, 1992.