

류마티스 관절염 환자의 수중운동 원리 규명을 위한 발 주위 유동 특성 연구

최지현¹, 박성영^{2*}

¹공주대학교 일반대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

A Study on Flow Characteristics around Foot to Investigate Principle of Underwater Exercise for Rheumatoid Arthritis Patients

Ji-Hyun Choi¹, Sung-Young Park^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Kongju National University

²Div. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

요 약 류마티스 환자들이 수중운동을 하면 통증이 감소되는 등 긍정적인 효과가 발생되지만, 통증이 감소되는 원인은 확실치 않고 이에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 수중운동 시, 발 표면에 흐르는 유동을 분석해 통증이 감소되는 원리를 규명하고자 한다. 본 연구에서는 유동의 흐름을 분석하기 위해 Unsteady 해석을 진행하였으며, 다리를 들어 올리는 동작과 내리는 동작을 총 3회 반복설정하여 해석을 수행하였다. 또한 통증이 있는 부위에 압력점을 지정하여 압력 변동 및 주파수를 분석했다. 그 결과 전반적으로 양압과 음압이 약 $\pm 500\text{Pa}$ 의 압력이 가해지고, 운동 방향을 전환할 때에는 약 $\pm 2000\text{Pa}$ 의 압력이 가해지는 것을 확인했다. 또한 류마티스 통증이 빈번하게 발생하는 부위에 약 35 ~ 80Hz 정도의 주파수가 발생하였다. 지속적인 압력변동과 주파수가 통증부위에 반복적으로 가해지면 혈액순환이 증진되고, 통증이 감소되는 효과를 예측할 수 있다. 본 연구의 결과는 수중운동의 효과 및 원리를 이해하는 자료로 활용이 가능할 것으로 사료되며, 수중운동의 프로그램 개발을 보조하고, 관련 의료 보조기 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract There are positive effects, such as pain reduction, when rheumatism patients exercise in water, but the cause of the pain reduction is unclear, and research on this is inadequate. This study examined the flow of the surface of the foot and the principles of pain relief. Unsteady simulations were conducted to analyze the flow, which was performed by repeatedly setting the movement of the foot raising and descending three times. Pressure fluctuations and frequencies were analyzed by designating pressure points at the painful location. The results showed that a positive and negative pressure of approximately $\pm 500\text{Pa}$ was applied overall. A pressure of approximately $\pm 2000\text{Pa}$ was applied when the direction of movement was changed. A frequency of approximately 35 to 80Hz was generated in the area where rheumatoid arthritis pain frequently occurs. The effects of reducing pain could be predicted when continuous pressure fluctuations and frequencies are applied repeatedly to the painful location, blood circulation promotion. The results could be used as basic data to understand the principles of aquatic exercise and support the development of underwater exercise programs and developing related medical equipment.

Keywords : Rheumatoid arthritis, Underwater Exercise, Flow Characteristic, Pressure Fluctuations, Foot

*Corresponding Author : Sung-Young Park(Kongju National Univ.)

email: sungyoung@kongju.ac.kr

Received February 2, 2021

Accepted May 7, 2021

Revised February 23, 2021

Published May 31, 2021

1. 서론

류마티스 관절염은 가장 흔한 염증성 관절 질환의 하나이다. 이 질환은 만성적인 관절염에 기인한 관절의 통증과 변형으로 인하여 Fig. 1[1-3]발 주위에 통증 등과 같은 신체 장애가 발생한다. 하지만 류마티스 관절염의 직접적인 원인은 아직 명확히 규명되어 있지 않다[4].

최근의 임상연구에 따르면, 수중운동을 수행한 류마티스 관절염 환자의 통증이 경감되고 있다는 보고가 있다. 수중운동은 부력의 도움을 받으면서 물속에서 동작하는 운동으로, 하지의 손상에 의해 체중부하를 감당하기 어려운 경우에도 적절한 운동 환경을 제공 할 수 있는 장점이 있다[5]. 또한 수중운동은 부력의 도움으로 하지의 부하를 감소시키면서, 만성 류마티스 관절염 환자들의 운동을 가능하게 한다[6]. 특히, 대기 중에서의 운동과는 다르게, 부력, 저항, 온도, 압력 등의 물의 특성이 환자의 신체에 치료 및 운동효과를 부여하고 있다 [5]. 수중운동은 류마티스 환자들이 지상에서 근력의 약화로 수행하지 못했던 운동 동작을 수중에서 가능하게 한다. 이러한 운동은 환자들의 근육대사 증진, 혈액순환 촉진, 통증 감소, 근육 경련 감소 등의 효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다 [7,8]. 류마티스 관절염 환자를 위한 수중운동 프로그램을 실시하여, 다수의 긍정적인 임상 효과를 확인하였지만, 수중운동 프로그램 자체의 원리는 명확히 검증되지 않고 있다[9-13]. 최근 들어, 수중 운동의 효과에 대한 원리를 규명하기 위해, 상지의 압력변동 특성을 분석하는 연구를 보고한 바가 있다[14]. 또한 G. H. Choi의 연구에서 수중운동 시 팔에 관한 유동특성을 분석하는 연구를 진행하였고, 해석방법은 이를 참고하였다[15]. 하지만 하지에 대한 해석적 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 수중운동 시 발 표면에서 발생하는 유동특성을 분석하여, 수중운동의 효과에 대한 원인을 규명하고자 한다.

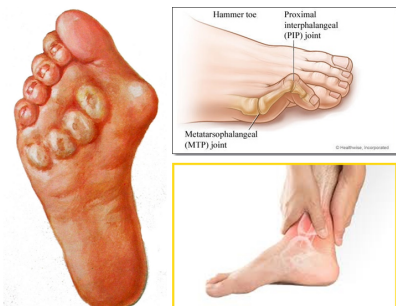


Fig. 1. Rheumatoid arthritis painful area

2. 연구방법

본 연구는 수중 운동이 인간의 피부에 작용하는 자극을 수치적으로 확인하기 위하여, 실제 사람의 발과 다리를 스캔하여 모델링하였다. 모델링은 실제 성인의 다리를 3D scanner 장비인 EinScan-Pro를 사용하여 스캔 후 역설계하였다. 본 연구에 사용된 발과 다리 모델은 1989년생, 신장 173cm, 체중 80kg의 체격을 가진 한국인 남성의 다리를 적용하였다.

2.1 해석 조건

본 연구에서는 수중운동의 유동특성을 분석하기 위하여, 상용 전산유체해석 소프트웨어[14]를 이용하여 유동 해석을 수행하였다. Standard K- ϵ 난류 모델을 적용하고, Unsteady 유동해석을 수행하였다. 수영장 영역의 상면은 대기압으로 설정하고, 측면과 하면은 정지유체로 정의하였다.

실제로 사람이 수중에서 제자리 걸음하는 형상을 모사하기 위하여, Fig. 2와 Fig. 3과 같이 다리의 상세한 움직임을 설정하였다. 다리는 총 세번의 왕복운동을 하며, 50cm의 높이를 상향 45°의 각도로 0.6m/s의 속도로 움직이도록 설정하였다. 또한 실제 다리의 움직임을 고려하여 10°의 시계방향 회전을 움직임 중에 추가로 부여하였다.

관절부위의 압력변화를 확인하기 위하여, 압력점을 Fig. 4와 같이 설정하였다. Fig. 4(a)는 엄지발가락부터 소지의 앞부분과 발목왼쪽의 압력점 들을 나타내고, Fig. 4(b)는 엄지발가락부터 소지의 뒷부분과 발목 오른쪽의 압력점 들을 나타내고 있다.

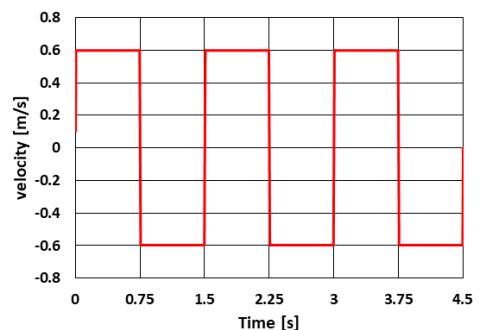


Fig. 2. The leg moving velocity with time

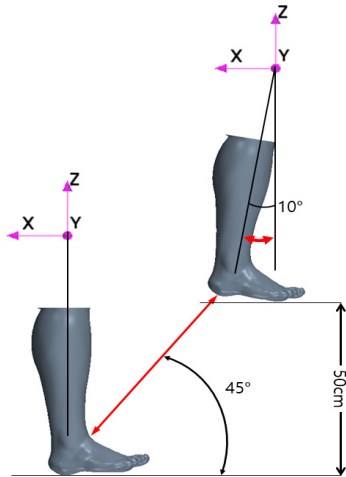


Fig. 3. Moving condition

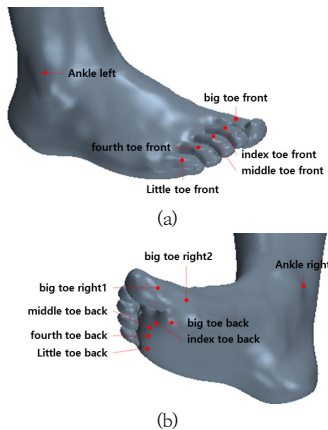


Fig. 4. Pressure measuring position
(a) View A (b) View B

2.2 계산 격자

본 연구에서는 STAR-CCM+[15]의 Overset mesh 기법을 적용하여, 발의 움직임을 모사하였다. Overset mesh 기법은 중첩되는 격자 간의 유동정보 교환을 통해 Unsteady 유체유동을 계산하는 기법이다[16]. 발과 다리 영역의 움직임을 모사하기 위하여, 수영장 영역과 다리 영역을 분리해 유동영역을 형성하였다. 해석 계산격자 설정 조건은 Table 1과 같이 적용하였으며, 수영장 영역은 약 42만개, 발 영역은 약 150만개의 계산 격자를 생성하였다. 생성된 발과 다리 영역의 계산격자는 Fig. 5에 나타났다.

Table 1. Grid setting for leg aquatic exercise

Region	Properties	Value
Swimming pool	Mesh type	Trimmed cell mesh
	Base size [mm]	6.0
	Number of prism layers [-]	3
	Minimum surface size [mm]	7.5
	Maximum cell size [mm]	25
leg	Mesh type	Trimmed cell mesh
	Base size [mm]	3.0
	Number of prism layers [-]	2
	Minimum surface size [mm]	0.3
	Maximum cell size [mm]	2.7



Fig. 5. Calculation grid and applied model

3. 연구결과 및 고찰

상하운동을 반복적으로 진행할 때, 발 옆면에서는 유체가 물체 표면에서 분리되기 시작하는 유동 박리가 시작된다. 박리점 이후 역압력 구배로 인하여, 발의 진행 방향 뒷부분에서 소용돌이 형태의 후류가 발생된다. 따라서 시간에 따른 후류를 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 물의 유선과 속도 분포를 나타냈다. 상향 운동시에는 발바닥 부분과 소지의 왼쪽 부분에서, 하향 운동시에는 발가락 위쪽 부분과 엄지의 오른쪽 부분에서 약 0.6m/s 이상의 속도분포 및 후류가 발생하였다.

전단응력과 표면마찰계수는 식(1)과 같은 관계로 정의된다.

$$\left| \vec{\tau}_w \right| = C_f / \left(\frac{1}{2} \rho_{ref} v_{ref}^2 \right) \quad (1)$$

ρ_{ref} 는 reference density이고, v_{ref} 는 reference velocity를 의미한다. 여기서 전단응력은 표면마찰계수와 비례 관계를 가진다.

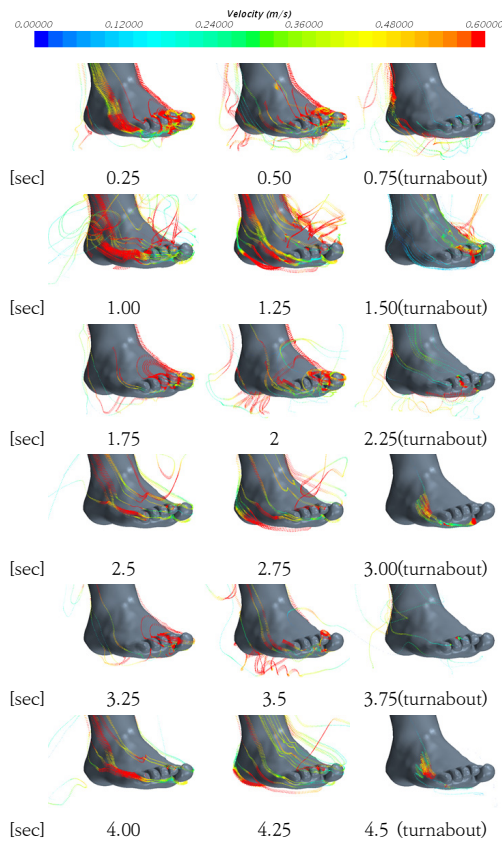


Fig. 6. Velocity field

Fig. 7은 시간에 따른 표면마찰계수를 나타내었으며, 상향운동에서 발가락 위쪽 부분은 약 7 ~ 10 정도, 소지 왼쪽 부분에는 약 28 ~ 30 정도로 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 하향운동에서는 발바닥 부분에 약 9 ~ 12 정도, 엄지 오른쪽 부분에 약 18 ~ 20 정도로 발생하는 것을 확인하였다. 수중운동 시, 발의 움직이는 속도에 비례하여 발 측면에서 유동속도가 증가하고, 속도의 제곱에 비례하는 마찰계수도 따라서 증가하게 된다.

Fig. 8은 시간에 따른 전단응력을 보여주고 있다. 전단응력은 표면마찰계수와 비례하기 때문에 Fig. 7과 유사한 경향을 보였다. 상향운동에서는 발가락 위쪽 부분은 약 5 ~ 6Pa, 소지 왼쪽부분에 약 9 ~ 10Pa의 응력이 발생된다. 하향운동에서는 발바닥 부분에 약 4 ~ 5Pa, 엄지 오른쪽 부분에 약 7 ~ 9Pa의 응력이 발생하는 것을 확인했다. 운동 진행 방향 뒷부분인 발바닥과 발등에 전단응력이 가해지는 이유는 박리점 이후 생성되는 후류에 의하여 수평방향의 힘이 발생되기 때문이다. 따라서 측면부에는 점성에 의해, 발바닥과 발등부에는 후류에 의해 전단응력이 생성된다.

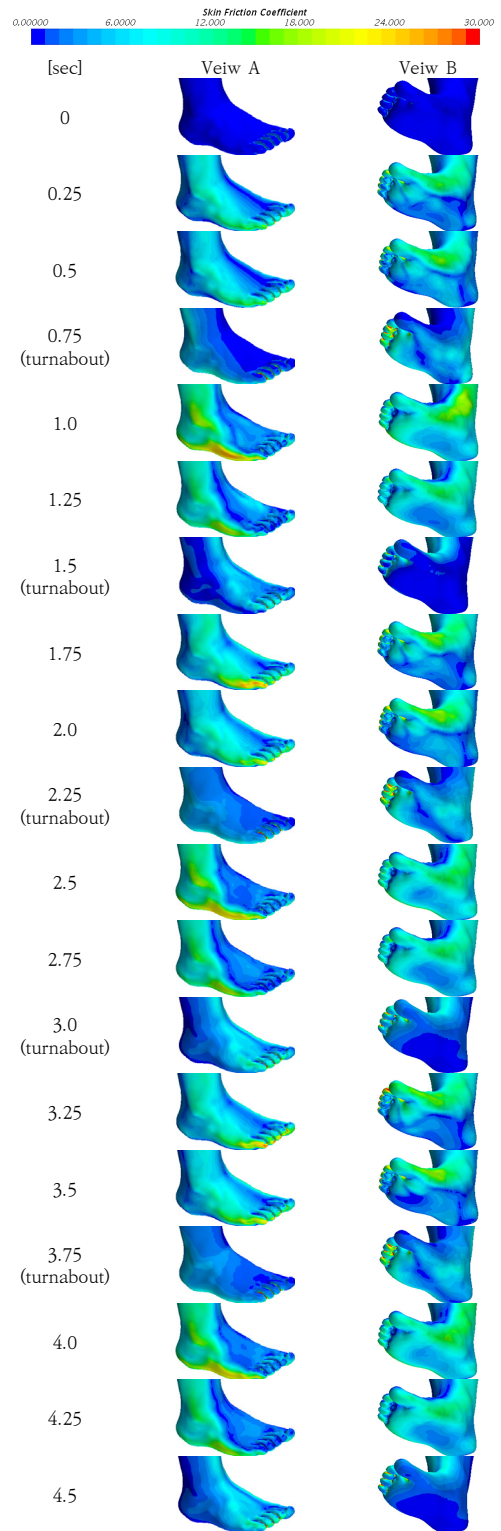


Fig. 7. Skin friction coefficient

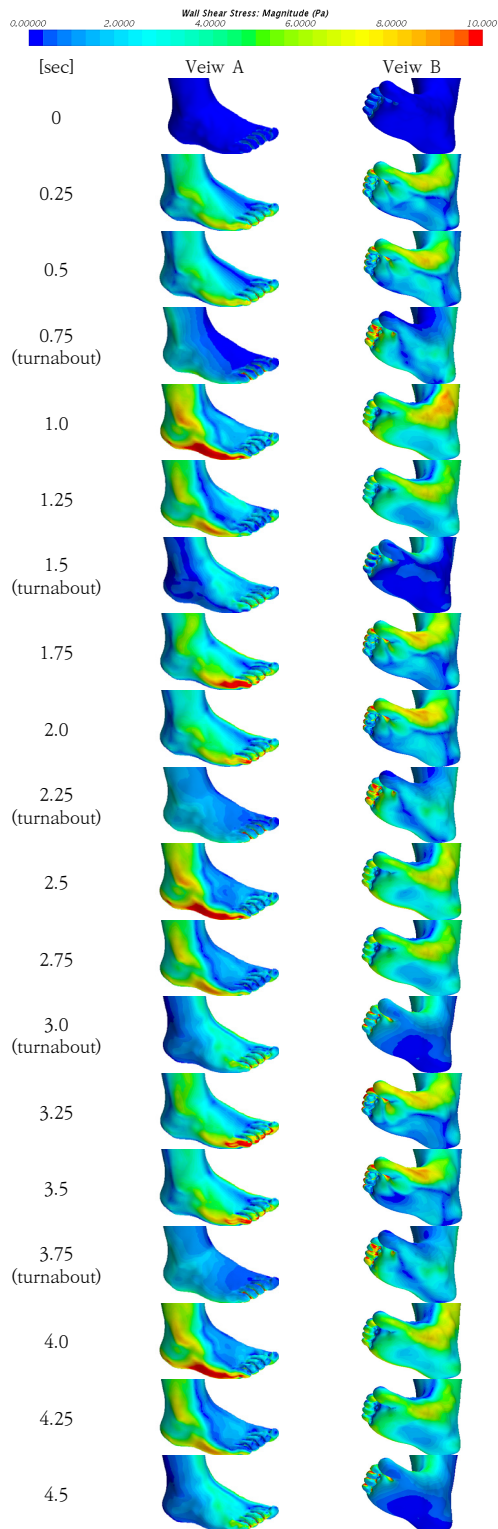


Fig. 8. Wall shear stress

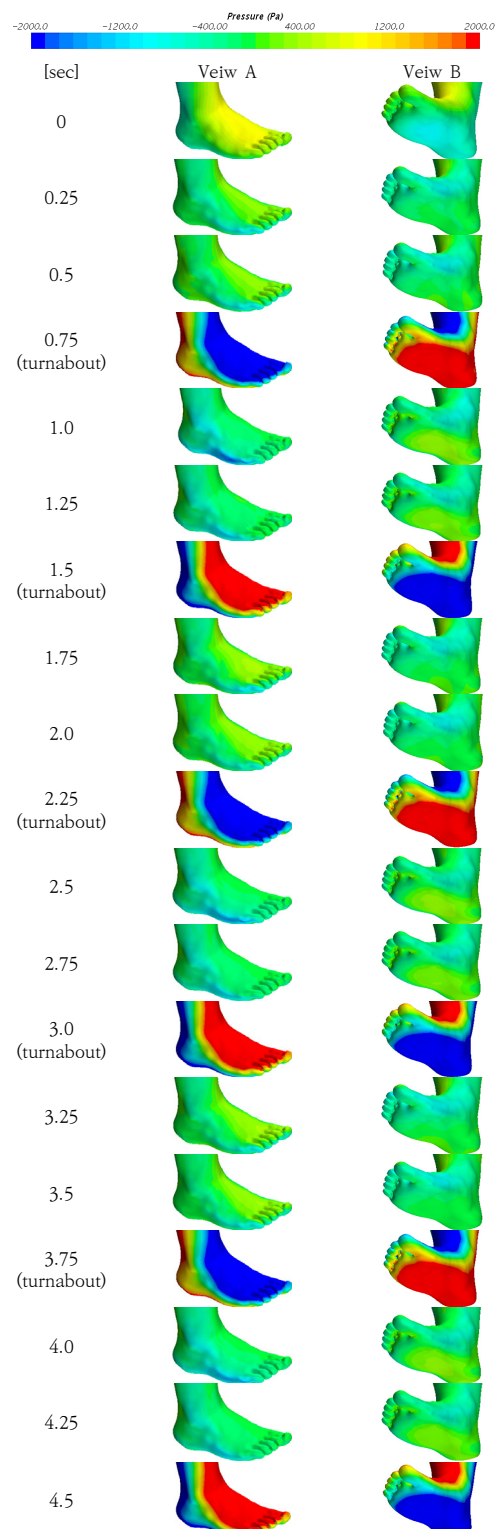


Fig. 9. Pressure

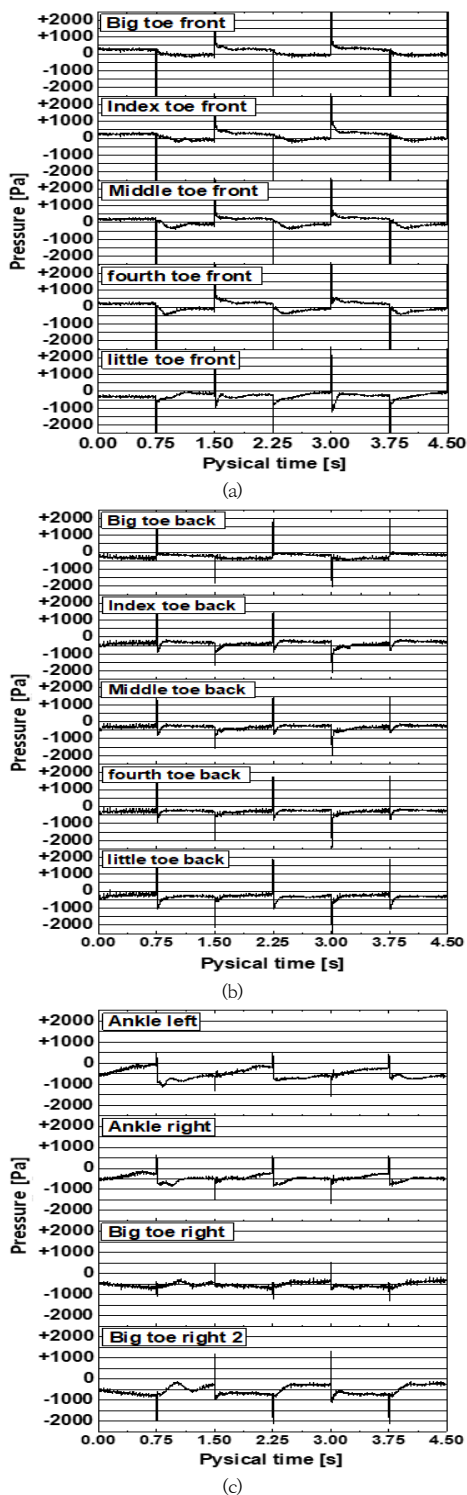


Fig. 10. Frequency position for each toe
(a) Toe front (b) Toe back (c) Side

Fig. 9는 수중운동 시 발의 표면에 가해지는 압력 분포를 나타냈다. 상향운동에서는 발등에서 약 700Pa, 발바닥에서 약 -400Pa 정도의 압력이 가해진다. 하향운동에서는 발등에서 약 -400Pa, 발바닥에서 약 700Pa 정도의 압력이 가해진다. 발의 양 옆은 -1200Pa 정도의 압력이 가해진다. 또한 방향을 전환하는 부분에서는 발등과 발바닥에 약 ± 2000 Pa 정도의 압력이 가해진다. 이는 물에 의한 저항력 때문에 운동방향으로 수직압력이 강하게 발생하여 나타난 현상으로 판단된다.

추가적으로 관절염 환자들이 주로 통증을 받는 부위에 압력점을 지정하여, Fig. 10과 같이 그래프로 각점의 압력 변동을 가시화하였다. Fig. 10에서 약 ± 500 Pa 정도의 압력변동이 발생하였고, 방향을 전환하는 부분에서는 약 ± 2000 Pa 정도의 압력변동이 확인되었다. 또한 수중운동 시 양압과 음압이 반복적으로 가해지는 것은, 방향을 전환하는 부분에서 남아있던 반대방향의 후류와 진행방향의 후류가 합쳐지면서 좀 더 복잡한 유동현상이 형성된다. 이러한 복잡한 유동현상은 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 복잡하고 반복적인 압력의 반복적 변동으로 나타나게 된다.

Fig. 11은 Toe front, Toe back, Side의 구간별 평균값을 나타내고 있다. 이때 Side는 Ankle left, right, 그리고 big toe right1, 2를 포함한다. Toe front는 약 -200 ~ +200Pa, Toe back는 약 -300 ~ +50Pa, Side는 약 -600 ~ -450Pa 정도의 평균압력이 가해졌다. 이를 통해 순간적으로 가장 높은 압력은 방향 전환 시 발바닥 부위에 나타나지만, 평균적인 압력은 발 측면에 높게 나타나는 것을 확인하였다.

관절염 환자들이 주로 통증을 느끼는 부위에 작용하는 압력의 주파수를 Fig. 12에 나타냈다. 류마티스 통증 부위에 약 35 ~ 80Hz 정도의 주파수가 가해진다. 이러한 주파수가 발 표면에 지속적으로 가해지면 마사지 효과가 있다고 판단된다.

류마티스 관절염에 대한 수중치료의 가장 큰 장점은 물의 부력으로 인하여 큰 힘을 들이지 않고, 압력과 응력이 피부 표면에 지속적으로 가해진다는 점이다. 이는 발 표면에 지속적인 자극을 주어 혈액순환에 긍정적 효과 및 통증 감소에 도움이 될 것으로 사료된다.

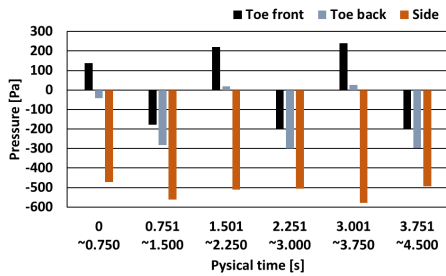


Fig. 11. Average pressure for each part as time

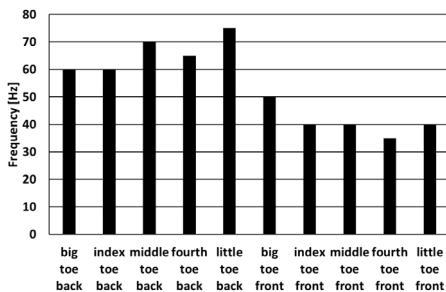


Fig. 12. Average frequency for each part

4. 결론

수중운동이 류마티스 환자에게 긍정적인 효과가 있다는 다양한 보고들이 있지만, 그 원리에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 발 표면에서 발생하는 수중운동의 효과에 대한 원리를 규명하기 위해, 발 표면에 가해지는 압력변동과 주파수를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상향운동에서는 발가락 위쪽 부분과 소지 왼쪽부분에서, 하향운동에서는 발바닥 부분과 엄지오른쪽 부분에 와류, 표면마찰계수 및 전단응력의 최대치가 발생되었다.
- 2) 상향운동에서는 발등에서 약 700Pa, 발바닥에서 약 -400Pa의 압력이 가해졌고, 하향운동에서는 발등에서 약 -400Pa, 발바닥에서 약 700Pa의 압력이 가해졌다. 발의 양 옆은 약 -1200Pa의 음압이 가해졌다.
- 3) 전반적으로 약 ± 500 Pa의 양압과 음압이 반복되는 압력변동이 발생하였고, 방향을 전환하는 부분에서는 발등과 발바닥에 약 ± 2000 Pa의 압력변동이 발

생하였다. 양압과 음압이 반복적으로 가해지는 원인은 방향을 전환하는 부분에서 남아있던 와류가 진행방향의 와류와 합쳐지면서 더욱 복잡한 와류동이 형성되기 때문이다.

- 4) 류마티스 통증 부위에 약 35 ~ 80Hz의 압력 변동 주파수가 발생하였다. 이러한 압력 변동주파수가 발 표면에 지속적으로 가해지면 마사지 효과를 가질 수 있고, 이는 류마티스 환자에게 긍정적인 효과로 작용할 것으로 판단된다.

수중운동 시 반복적인 압력변동이 발 표면에 지속적으로 가해지면, 혈액순환에 긍정적 효과 및 통증 감소에 도움이 될 것이라 판단된다. 본 연구의 결과는 수중운동의 효과 및 원리를 이해하는 자료로 활용이 가능할 것으로 사료되며, 수중운동의 프로그램 개발을 보조하고, 관련 의료 보조기 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] G. J. Choi, If you have rheumatoid arthritis, you should be careful about your foot health [Internet], c2013 [cited 2013 October 18], Available From: <https://blog.naver.com/ha4119woo/60201927563> (accessed Jan. 6, 2020)
- [2] My love rheumatism, Early Symptoms and Features of Toe Rheumatoid Arthritis [Internet], c2019 [cited 2019 April 16], Available From: <https://ra7575.blog.me/221514693195> (accessed Jan. 6, 2020)
- [3] WallsHeaven, Foot bones pain Wall mural, [Internet], c2013 [cited 2013 January 1], Available From: <https://wallsheaven.com/wall-murals/foot-bones-pain-A168674071> (accessed March. 25, 2021)
- [4] D. H. Yoo, "Recent Trend in the Treatment of Rheumatoid Arthritis", *The Journal of the Korean orthopaedic association*, Korea, Vol.45, No.10, pp.419-425, 2010. <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01573396>
- [5] S. B. Hong, H. G. Cho, T. W. Jung, *The Effects of Underwater Exercises Program with Buoyancy Appliances on Hemiplegies' Gait of Patients with Hemiplegia*, Master's thesis, Yongin University of Special sports, Yongin, Korea, pp.81-96, 2016.
- [6] K. S. Hyun, *(The) effects of rehabilitation exercise programs on muscular function and body composition of anterior cruciate ligament reconstruction surgery*

patients , Ph.D. dissertation, Korea University of Physical Education, Korea, 2000.

- [7] D. W. Han, *Effects of aqua exercise program on the improvement of physical function, body compositions and blood components in the older adults*, Ph.D dissertation, Daegu University Rehabilitation Science and Physical Treatment, Korea, p. 101, 2002.
- [8] H. C. Cho, Y. K. Kwon, B. Y. Kim, M. Y. Lee, J. S. Kim, H. S. Kang, "(The) effects of aquatic rehabilitation exercise on physical fitness, peripheral circulation, and bone mineral density of hemiplegic", *Korean Association of Athletic Physiology*, Korea, Vol.18, No.4, pp.559-566, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.15857/ksep.2009.18.4.559>
- [9] J. I. Kim, "An Effect of Aquatic Exercise Program with Self-help Group Activities and Strategies for Promoting Self-efficacy on Pain, Physiological Parameters and Quality of Life in Patients having Rheumatoid Arthritis", *The Journal of Muscle and Joint Health*, Korea, Vol.1, No.1, pp.1-30, 1994.
- [10] J. I. Kim, K. S. Cho, H. S. Sim, E. N. Lee, I. O. Lee, Y. Eun, D. S. Lee, H. S. Kang, W. S. Bak, J. H. Lee, "Analysis of Studies on the Effect of Aquatic Exercise Program", *The Journal of Muscle and Joint Health*, Vol.18, No.2, pp.257-269, November, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.5953/JMJH.2011.18.2.257>
- [11] G. Caminiti, M. Volterrani, G. Marazzi, A. Cerrito, R. Massaro, et al., "Hydrotherapy added to endurance training versus endurance training alone in elderly patients with chronic heart failure: a randomized pilot study", *International Journal of Cardiology*, Vol.148, No.2, pp.199-203, April. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2009.09.565>
- [12] M. G. Neto, C. S. Coniao, F. L. Arcanjo de Jesus, V. O. Carvalho, "Hydrotherapy on exercise capacity, muscle strength and quality of life in patients with heart failure: A meta-analysis", *International Journal of Cardiology*, Vol.198, No.1, pp.216-219, November. 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcard.2014.10.132>
- [13] O. K. Moon, J. G. Yoon, H. S. Jeong, "Effect of Arthrokinematic Treatment on the Cartilage of Knee Joint of Rabbit", *International Journal of Cardiology*, Korea, Vol.198, No.9, pp.225-232, 2007.
- [14] J. H. Choi, S. Y. Park, "Numerical Study on the Characteristics of Fluid Flow and Pressure Fluctuation around Human Knuckle in Hydrogymnastics", *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Korea, Vol.20, No.6, pp.390-395, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcard.2014.10.132>
- [15] J. I. Kim, K. H. Choi, "Computation Fluid Flow Study on the pressure Fluctuation Caused by the Vortex Flow Arising From Underwater Exercises of Arthritis Patient", *Defect and Diffusion Forum*, Vol.390, pp.8-20, 2019.19.
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDE.390.8>
- [16] CD-Adapco, Star-CCM+ ver. 11.04 User Guide, 2016.

최 지 현(Ji-Hyun Choi)

[준회원]



<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발

- 2019년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 석사과정

박 성 영(Sung-Young Park)

[정회원]



<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발

- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부, 정교수