

세탁기 도어 거동 인자 설계 최적화를 위한 시뮬레이터 및 로봇형 도어 장치 개발

Development of Simulator and Robotic Door for Parametric Design Optimization of Washing Machine Door Motion

이 준 섭¹, 정 병 진², 문 형 필⁺

June-Sup Yi¹, Byung-Jin Jung², Hyungpil Moon⁺

Abstract A design methodology for parametric design optimization of washing machine door is presented. We develop a motion simulator and a robotic door to simulate the various motion of washing machine doors. The motion of the washing machine door is related to hinge parameters. Springs and dampers are usually used in the hinge of washing machine door for controlling motion of the door. A physical simulator of the door motion is used for finding candidate parameters of the hinge and a robotic door whose motion is controlled algorithmically is used for consumer tests. Through the consumer evaluation on the robotic motion, the optimized parameters are determined. We find the optimal parameters as a function of angle and angular velocity of the door.

Keywords Motion simulation, Emotion quality evaluation, Door parametric design

1. 서 론

소비재 제품을 개발하는 데 있어서 제품에 대한 소비자의 감성적인 영역을 이해하는 것은 마케팅 성공의 측면에서 더 나은 제품을 설계하는 데 도움이 된다^[1]. 이와 관련해 여러 분야에서 각종 도어의 개폐 동작의 느낌에 대한 연구가 이루어지고 있다^[2-4]. 특히 최근에는 가전제품 회사들이 이 감성 디자인에 대해 관심을 가지고 있다^[5]. 가전제품 중에서도 세탁기는 도어의 동작이 소비자의 안전 및 감성에 모두 영향을 끼치므로, 도어의 동작을 중요하게 여기는 분야이다.

세탁기 도어는 수동형 시스템(passive system)이기 때

문에 도어의 모션을 제어하기 위해서는 힌지 부분에 스프링과 댐퍼를 이용한다. 스프링과 댐퍼는 각각 탄성력과 감쇠력을 도어에 가해주어 중력으로 인해 떨어지는 도어의 동작을 더 부드럽게 만들어준다. 세탁기의 도어를 설계할 때에는 힌지의 다양한 스프링 및 댐퍼의 설계 인자를 고려하여 여러 가지 물리적인 시제품들을 만들어서 도어의 동작을 확인하는데, 이 방법은 많은 확인 과정과 시간과 비용이 소요된다는 것이 문제이다^[6]. 이런 문제점을 해결할 수 있는 방법은 디자인 과정을 가상의 과정으로 진행하는 것이다^[7,8]. 이와 같은 시뮬레이션을 진행하기 위한 도어의 동작을 예측할 수 있는 물리적 시뮬레이터를 개발하고, 더 나아가 실제 도어의 동작을 소비자가 관측할 수 있는 실험도구를 제작한다면 많은 시제품의 제작 없이 소비자의 만족도가 가장 높은 힌지 파라미터를 찾는 시스템을 구축할 수 있을 것이다. 따라서 제작 과정에 소요되는 비용과 시간도 획기적으로 줄

Received : Apr. 20. 2016; Revised : Jul. 20. 2016; Accepted : Aug. 29. 2016

※This project was funded by the Samsung Electronics.

⁺Corresponding author: Mechanical Engineering, Syungkyunkwan University, Seoburo 2066, Jangan-Gu, Suwon, Korea (hyungpil@me.skku.ac.kr)

¹Mechanical Engineering, Syungkyunkwan University (caro33@skku.edu)

²Mechanical Engineering, Syungkyunkwan University (jbsin@skku.edu)

일 수 있을 것이다.

본 논문에서는 실제 도어의 거동을 반영하여 세탁기 도어의 거동을 예측할 수 있도록 개발한 시뮬레이터를 소개하고, 예측한 거동을 실제로 관측할 수 있는 로봇형 도어 장치를 이용해 최적의 힌지 파라미터를 도출하는 방법을 제시하였다.

다음 2장에서 세탁기 도어의 실제 구조를 반영한 시뮬레이터의 작동 원리에 대해 설명하고, 3장에서는 시뮬레이터에서 만든 동작을 실제로 구현할 수 있는 로봇형 도어 장치에 대해 설명한다. 4장에서는 이 장치를 이용해 진행할 수 있는 소비자 감성 평가 방법을 기술하였고, 실험을 통해 얻은 최적 파라미터를 제시한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 시뮬레이터

시뮬레이터의 용도는 탄성 계수와 감쇠 상수, 도어의 질량 및 무게중심까지의 거리 정보가 포함된 프로파일 후보군을 만들어, 힌지 특성에 따른 도어의 거동을 예측하는 것이다. 또한 시뮬레이션을 통해 거동에 관련된 물리량을 분석하여 여러가지 힌지 특성을 비교할 수 있다.

시뮬레이션을 통해 도어의 거동을 정확하게 예측하려면 실제 세탁기 도어의 거동을 반영해야 한다. 실제 세탁기 도어 힌지는 스프링과 댐퍼를 부착하기 위해서 슬라이더-크랭크의 4-bar 링크 구조로 이루어져있다. 또한 실제 세탁기 도어 양쪽 힌지의 다른 파라미터에 의한 뒤틀림은 무시할 수 있는 수준이므로 도어의 거동을 단순 진자 모델로 바꾸어 생각하였다. 이 모델들은 Fig. 1에 도식화 하였다. 이 모델을 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$I \cdot \ddot{\theta}_1 = -D(\theta_1, \dot{\theta}_1) - K(\theta_1) + mg \sin \theta \cdot l \quad (1)$$

식 (1)에서 I 는 도어의 관성 모멘트, θ 는 도어의 무게 중심과 힌지가 이루는 각도, θ_1 은 도어가 회전한 각도, $\dot{\theta}_1$ 는 도어의 각속도, $\ddot{\theta}_1$ 는 도어의 각가속도를 나타낸다. $I \cdot \ddot{\theta}_1$ 는 도어의 거동을 의미한다. $D(\theta_1, \dot{\theta}_1)$ 는 힌지에 가해지는 감쇠력, $K(\theta_1)$ 는 탄성력을 의미한다. 이 두 항의

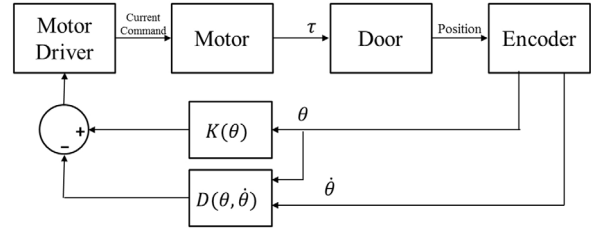


Fig. 1. The model of door of washing machine

합은 사용자가 도어의 거동을 조정하기 위해 가해주는 토크를 의미한다. 우측의 항은 진자 모델에서 중력에 의해 가해지는 힘을 나타낸다. m 은 세탁기 도어의 질량, g 는 중력 가속도, l 은 회전축에서 무게중심까지의 거리이다. 따라서 탄성력과 감쇠력에 해당하는 부분을 사용자가 조정해주게 되면 도어의 거동을 원하는대로 조절할 수 있다. 식 (1)에서 감쇠력과 탄성력은 힌지의 물리적 모델에 따라 달라진다. 단순히 힌지에 로터리 스프링과 로터리 댐퍼가 부착되어 있는 경우에 탄성력과 감쇠력은 각각 $k_s \cdot (\theta_1 - \theta_{origin})$, $k_d \cdot \dot{\theta}_1$ 이 된다. k_s 는 스프링 상수, k_d 는 감쇠 상수, θ_{origin} 은 스프링 원점을 의미한다. 그러나 Fig. 1과 같이 4-bar 구조로 이루어져 있을 경우는 폐루프식(loop closure equation)을 이용하면 도어에 걸리는 모멘트, 즉 탄성력과 감쇠력을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$K(\theta_1) = r_1 K_s \Delta x(\theta_1) (\cos \theta_1 \cdot \tan \theta_2(\theta_1) - \sin \theta_1) \quad (2)$$

$$D(\theta_1, \dot{\theta}_1) = r_1 \cdot K_d \cdot (-r_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - r_2 \dot{\theta}_2(\theta_1, \dot{\theta}_1) \sin \theta_2(\theta_1)) \cdot (\cos \theta_1 \cdot \tan \theta_2(\theta_1) - \sin \theta_1) \quad (3)$$

식 (2) 및 식 (3)에서 r_1, r_2 는 Fig. 2에서 표현된 바와 같이 링크 길이, K_s 는 리니어 스프링 상수, $\Delta x(\theta_1)$ 는 리니어 스프링의 변위, K_d 는 리니어 댐퍼의 감쇠 상수이다. θ_2 는 두 번째 링크의 각도를 의미하며 $\arcsin(y - r_1 \sin \theta_1 / r_2)$ 으로 나타낼 수 있고, $\dot{\theta}_2$ 는 두 번째 링크의 각속도를 의미하며 $-r_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 / r_2 \cos \theta_2(\theta_1)$ 로 나타낼 수 있다.

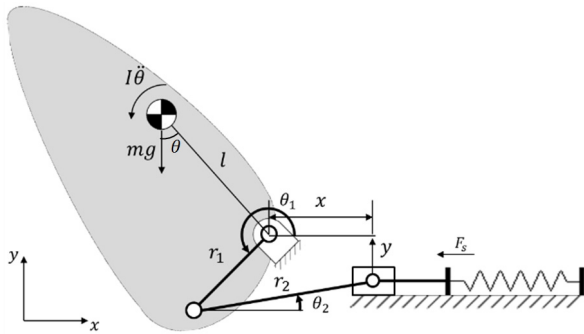


Fig. 2. Block diagram of the robotic door

3. 로봇형 도어 장치

로봇형 도어 장치의 역할은 2장의 시뮬레이션을 통해 만들어진 프로파일 후보군을 이용해 실제 도어의 움직임을 관찰하고 체험해볼 수 있게 하는 장치이다. 도어의 움직임을 프로그램을 통해 제어하기 위해 힌지에 모터를 사용한 시스템을 제작하였다. 시뮬레이션으로 계산한 힌지에 가해지는 탄성력과 감쇠력만큼의 힘을 모터에서 도어로 가하면, 실제로 스프링과 댐퍼가 부착된 것과 같은 효과가 발생한다. 따라서 사용자들은 이 장치를 이용해 도어의 거동을 평가할 수 있게 된다. 이 장치는 임피던스 컨트롤이 가능해 사용자가 도어를 직접 힘을 가해 움직여 시뮬레이션을 통해 도출된 파라미터가 힌지에 적용되었을 때의 느낌을 체험해 볼 수 있다.

3.1 로봇형 도어 장치의 제원 및 부품 선정 기준

힌지에 사용된 모터를 선정할 기준은 도어가 초기 위치까지 자동으로 열리는 데 1초의 시간이 소요되도록 선정하였다. 이 때 도어는 등가속도로 열린다고 가정하였다. Fig. 1과 같은 모델로 생각했을 때 관성으로 인해 힌지에 가해지는 토크는 $mr^2\alpha$ 이고, 중력에 의해 모터에 걸리는 최대 토크는 이다. 이 식들을 이용해 실제 수치를 대입해 계산하면 모터의 출력은 약 8 Nm가 필요하며, 안전계수를 2로 선정해 최소 16 Nm의 토크를 출력할 수 있는 모터와 감속기를 선정했다. 감속기어는 150:1의 모델을 선정하여 총 25.5 Nm의 토크를 낼 수 있는 모터 및 감속기를 사용하였다.

Table 1. The Specification of motor used in robotic door

Rated Voltage	24 V
No-load Speed	7580 rpm
No-load Current	137 mA
Rated Speed	6930 rpm
Rated Torque	170 mNm
Rated Current	5.77 A

Table 2. The list of parts in robotic door zig

Parts	Name of parts	Num.
Motor	RE 40 Ø40 mm	2
Motor Driver	G-SOL-WHI 20/100 EE	2
Reduction Gear	GP 42 C Ø42 mm	2
Encoder	1024 CPT, 3 Channel	2
Controller PC	Controller PC	1
Power Supply	SP-320-24	1

위의 계산 과정에서 사용한 수치들은 도어의 질량 $m=2.5$ kg, 무게중심까지의 거리 $l=0.3$ m, 도어가 90 deg의 각도까지 열리는 데 걸리는 시간이 1초가 될 때의 각속도 $\alpha=\pi\text{rad}/s^2$ 을 사용하였다.

3.2 로봇형 도어 장치의 구성 및 작동 원리

본 연구를 통해 개발된 로봇형 도어 장치에는 세탁기 도어의 닫힘 동작을 구현하기 위하여 액추에이터와, 도어 상태를 측정하는 센서, 그리고 센서값을 분석하고 액추에이터를 동작시켜주는 제어가 부착되어 있다. 제어용 PC에서 모터 드라이버로 위치 제어 명령을 전달한다. 위치 제어 명령은 시작점과 끝점, 소요되는 시간을 지정해주면 경로를 생성해 이동하는 명령이다. 도어의 이동 후, 제어용 PC에서 전류제어 명령을 보낸다. 모터 드라이버에서 이 명령을 이용해 모터를 제어하고, 모터가 외력을 도어에 가해 도어의 거동에 영향을 주게 된다. 도어가 실제로 움직이는 거동을 엔코더가 읽어와 다시 제어용 PC로 피드백을 한다. 이 과정이 반복되어 사용자가 원하는 거동을 구현할 수 있게 된다.

4. 최적 설계 인자의 도출

최적의 설계 인자는 사용자가 느끼기에 도어가 가장 부드럽으면서 안전하게 닫히는 설계 인자를 의미한다. 이러한 최적 설계 인자 도출을 위한 과정은 다음과 같은 과정으로 진행된다. 먼저 2장에서 개발한 시뮬레이터를 이용해 프로파일 후보군을 선정한다. 이후 3장에서 개발한 로봇형 도어 장치를 사용해 소비자 감성 평가를 진행한다. 이를 통해 소비자가 만족을 느끼는 조건을 얻을 수 있고, 이 조건에 부합하는 설계 인자를 도출할 수 있다. 4.1절에서는 이 과정 중 소비자 감성 평가 과정을 기술하였다.

4.1 소비자 감성 평가 과정 및 기준

소비자 감성 평가를 진행하기 위해서는 평가 기준과 항목을 선정하는 것이 필수적이다. 우선 도어의 개폐 동작을 평가하는 기준으로는 크게 두 가지 항목을 고려할 수 있다. 첫번째로는 도어의 개폐 동작이 얼마나 부드러운지, 두번째는 도어가 얼마나 안전하게 닫히는지를 고려할 수 있다. 이 항목들을 만족시키기 위해 필요한 요소들을 예상해볼 수 있다. 우선 개폐 동작의 고급화를 위해서는 도어가 닫히는 데 소요되는 시간이 필수적으로 고려해야 할 요소이다. 그리고 도어가 사용자의 부상 없이 안전하게 닫히게 하려면 닫히기 직전에 도어의 속도가 느려져야 하기 때문에 각속도의 변화 양상도 고려해야 할 요소이다.

소비자 감성 평가는 위의 과정을 통해 선정한 두 가지 분류 기준에 따라 로봇형 도어 장치가 움직이는 장면을 보여주고, 그에 대해 설문 항목을 답변하도록 진행한다. 설문 항목은 평가 기준과 연관된 항목으로 선정하였다. 소비자 선호도를 판단하기 위해 진행해야 할 설문 항목은 아래와 같다.

- 성별
- 전자동 세탁기 사용여부
- 도어가 부드럽게 닫히는가?
- 도어가 안전하게 닫히는가?
- 닫히는 동작이 고급스러운가?
- 닫히는 속도가 적당한가?

4.2 개발자 대상 감성 평가

실제 세탁기 소비자를 대상으로 감성 평가를 진행하기 앞서, 본 연구에 참여한 개발자들이 감성 평가 과정을 수행해보았다. 4.1절에서 선정한 설문 항목에 대해 각각 1~5점까지의 점수를 산출하였다. 설문 대상은 20대의 남성 5명, 여성 5명이었고, 10명 모두 전자동 세탁기 사용 경험이 있다고 응답했다.

4.2.1 각속도 양상이 다를 때

먼저 같은 시간에 대해 어떤 속도 양상이 적합한지를 판단하였다. 속도 양상이 다르다는 것은 도어가 어느 각도부터 느려지기 시작하는지를 의미한다. 시간이 같으며 속도의 양상이 다른 경우는 아래와 같이 3가지가 있다. 첫 번째 경우는 속도가 일정하게 증가했다 감소하는

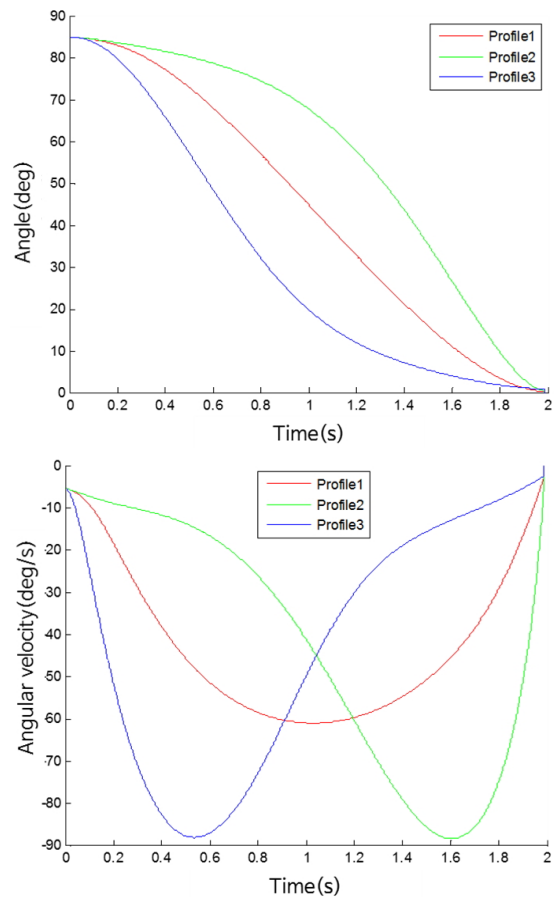


Fig. 3. The graph of the profile that varies form of angular velocity

프로파일, 두 번째 경우는 처음에 느리게 닫히다가 나중에 빠르게 떨어지는 프로파일, 세 번째 경우는 처음에 빨리 떨어지다 나중에 느리게 떨어지는 프로파일이다. 각각의 프로파일에 대한 시간-각도 그래프와 시간-각속도 그래프는 Fig. 3에 표시하였다.

위의 기준으로 만든 프로파일을 토대로 감성 평가를 진행하였다. 그 결과, 세번째 프로파일인 처음에 빠르게 떨어지다가 나중에 느리게 떨어지는 프로파일이 가장 적합한 것으로 나타났다. 설문지의 모든 항목에서 두번째 프로파일이 가장 낮은 점수를 얻었고, 세번째 프로파일이 가장 높은 점수를 획득하였다. 설문에서 얻어진 점수 결과는 Appendix의 Table A-1에 나타내었다.

4.2.2 닫히는 데 소요되는 시간이 다를 때

두 번째 평가 기준은 도어가 닫히는 데 소요되는 시간

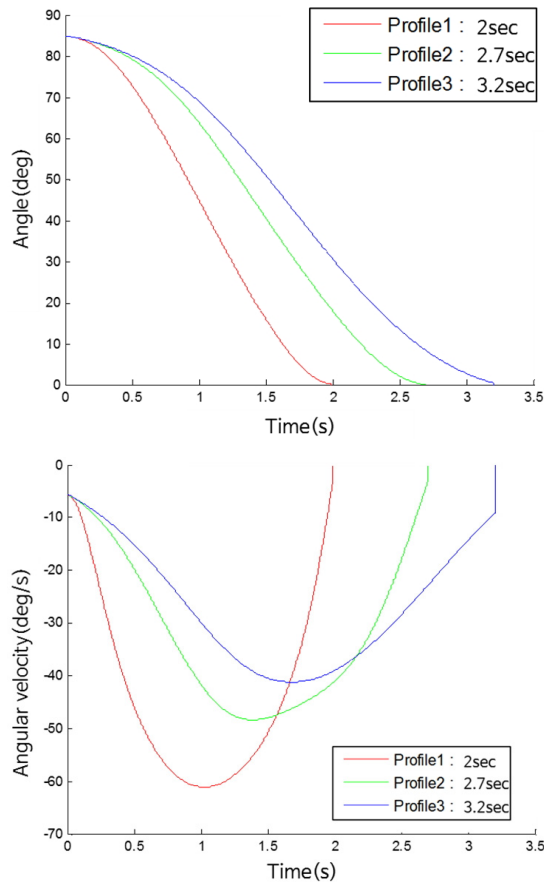


Fig. 4. The graph of the profile that varies time

을 기준으로 평가하였다. 이 기준에서는 닫히는 데 소요되는 시간이 2.0초, 2.7초, 3.2초인 프로파일 3개를 만들어 실험을 진행하였다. 각각의 프로파일은 속도가 일정하게 증가했다 감소하는 양상이다. 각각의 프로파일에 대한 시간-각도 그래프와 시간-각속도 그래프를 Fig. 4에 표시하였다.

이 3가지 프로파일에 대해 감성 평가를 진행하였다. 그 결과, 닫히는 시간이 2.7초일 때의 프로파일이 가장 적합한 것으로 나타났다. 도어가 부드럽게 닫히는지 여부와 안전성 부분에서는 세번째 프로파일이 가장 높은 점수를 획득하였고, 첫번째 프로파일이 가장 낮은 점수를 얻었다. 동작의 고급스러움에 대한 항목에서는 세 프로파일 모두 비슷한 점수를 획득하였다. 닫히는 속도의 적합한 정도는 두번째 프로파일이 가장 높았고, 세번째 프로파일이 큰 차이로 낮은 점수를 획득하였다. 도어가 부드럽게 닫히는지 여부와 안정성 측면에서는 두번째 프로파일과 세번째 프로파일이 비슷한 점수를 보이거나 속도 측면에서는 세번째 프로파일이 현저히 낮은 점수를 보여 두번째 프로파일을 적합한 프로파일로 선정하였다. 설문에서 얻어진 점수 결과는 Appendix의 Table A-2에 나타내었다.

4.3 개발자 대상 감성 평가 결과

4.2.1절과 4.2.2절의 설문 결과를 종합한 결과 개발자들이 느끼기에 가장 좋은 프로파일은 속도가 처음에 빠르게 움직이다가 나중에 서서히 닫히는 것이다. 구체적으로는 각도가 50~60도를 지나는 부근에서 각속도가 느려지기 시작하는 것이다. 그리고 시간 측면에서는 닫히는 데 걸리는 시간이 2.7초가 소요되는 프로파일이다.

위의 조건에 부합하는 프로파일은 여러 가지가 있다. 그 여러 가지 프로파일 중 하나를 예시로 구하였다. 이 조건을 만족하는 파라미터를 찾기 위해 시뮬레이터를 이용하였다. 시뮬레이션을 통해 하나의 예시로 찾아낸 프로파일의 탄성력은 $-5.23\theta^3 + 13.2\theta^2 - 2.33\theta$, 감쇠력은 $0.53\dot{\theta}^3 + 3.31\dot{\theta}^2 + 1.40\dot{\theta}$ 이다. 여기서 θ 는 도어의 회전 각도, $\dot{\theta}$ 는 도어의 각속도를 의미한다. 파라미터가 이와 같을 때의 프로파일은 Fig. 5와 같다.

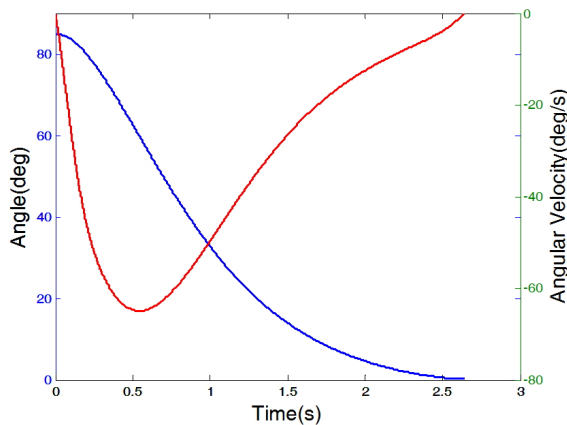


Fig. 5. The optimized parameters gotten from emotion quality evaluation

이렇게 새로 얻은 프로파일과 유사한 여러가지 프로파일을 시뮬레이터를 사용해 얻을 수 있으며, 위에서 서술한 일련의 과정들을 다양한 연령층과 많은 인원을 대상으로 반복한다면 최적의 힌지 설계 인자를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 또한 본 논문에서 개발한 로봇형 도어 장치는 임피던스 제어가 가능하며, 힌지 파라미터의 변화를 자유롭게 구현 가능하기 때문에 더 다양한 변인을 추가해 감성 평가를 진행할 수 있다.

본 논문에서는 파라미터를 추정하는 방법 및 과정에 대해 서술하였으나, 파라미터를 수식으로 나타내었다. 실제 세탁기 도어의 설계에 사용되는 스프링과 댐퍼를 사용해 이론적으로 얻은 프로파일을 구현하는 것이 앞으로 해결해야 할 과제이다.

5. 결 론

이 연구를 통해 개발된 시뮬레이터와 로봇형 도어 장치를 이용하여 최적 힌지 인자를 도출하는 방법을 본 논문을 통해 제시하였다. 따라서 제시된 방법을 이용한다면 다른 여러 가지 모델의 도어에서 최적의 힌지 파라미터를 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구를 통해 발생하는 기대효과는 도어 개폐 동작의 정량화된 평가를 통한 설계 개선, 실제 하드웨어 제작 없이도 개폐 동작 예측이 가능하다는 점, 감성 평가에 기반한 시스템 설계가 가능하다는 점이다.

References

- [1] L. Hvam, N.H. Mortensen, and J. Riis, "Product customization," Springer Science and Business Media, 2008.
- [2] F. Ferrise, M. Bordegoni, and S. Graziosi, "A method for designing users' experience with industrial products based on a multimodal environment and mixed prototypes," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 10, no. 3, pp. 461-474, 2013.
- [3] M. Stolz, A.M. Rtl, M. Gräf, and M. Buss, "Development, control, and evaluation of an actuated car door," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 2, no. 3, pp. 170-180, 2009.
- [4] S.-H. Shin, I. Lee, H.-J. Lee, G.-J. Han, K.-P. Hong, S.-H. Yim, J.-W. Lee, Y.-J. Park, B.K. Kang, D.H. Ryoo, D.W. Kim, S.-M. Choi, and W.K. Chung, "Haptic simulation of refrigerator door," *IEEE Haptics Symposium*, Vancouver, Canada, 2012, pp. 147-154.
- [5] F. Ferrise, S. Graziosi, G.P. Furtado, M. Bordegoni and D. Gongini, "Re-engineering of the Haptic Feedback of a Dishwasher Door," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 10, no. 6, pp. 995-1006, 2013.
- [6] M. Stolz, R. Groten, A. Peer, and M. Buss, "Development and evaluation of a device for the haptic rendering of rotatory car doors," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3133-3140, 2011.
- [7] O. Khatib, O. Brock, K.S. Chang, F. Conti, D. Ruspini, and L. Sentis, "Robotics and interactive simulation," *Communications of the ACM*, vol. 45, no. 3, pp. 46-51, 2002.
- [8] D.-J. Seo, N.-Y. Ko, S.-W. Jung, and J.-B. Lee, "Network Based Robot Simulator Implementing Uncertainties in Robot Motion and Sensing," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 5, no. 1, pp. 23-31, 2010.

Appendix

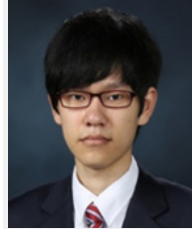
부록에는 개발자 대상 감성 평가 설문조사 결과를 수록하였다.

Table A-1. The list of parts in robotic door zig

Profile	No. 1	No. 2	No. 3
Softness	3.5	2.3	3.9
Safety	2.9	1.7	3.5
Quality	2.8	2.6	3.8
Speed	3.2	2.3	3.5

Table A-2. The score of the second evaluation

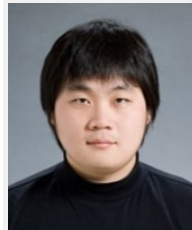
Profile	No. 1	No. 2	No. 3
Softness	3.4	3.8	4.2
Safety	3.1	3.9	4.4
Quality	3.8	3.4	3.7
Speed	3.5	3.8	2.4



이준섭

2014 성균관대학교 기계공학과(학사)
2014 ~ 현재 성균관대학교 기계공학과 석박
사통합과정

관심분야: 매니플레이션, 조립 로봇



정병진

2011 성균관대학교 기계공학과(학사)
2011 ~ 현재 성균관대학교 기계공학과 석박
사통합과정

관심분야: 매니플레이션, 안전 매니플레이터, 저가형 토크 센서, 유압
로봇 힘 제어



문형필

1996 포항공과대학교 기계공학과(학사)
1998 포항공과대학교 기계공학과(석사)
2005 University of Michigan, Ann Arbor
(박사)
2007 ~ 현재 성균관대학교 기계공학과 부교수

관심분야: 매니플레이션, 모바일 로봇 네비게이션, 유압 액츄에이터,
고분자 센서 및 액츄에이터