

Master's Thesis

Steering Wheel Torque Pattern Design for  
Lane Departure Warning

Inseok Koh (고 인 석)

Department of Computer Science and Engineering

Pohang University of Science and Technology

2018



# 차선 이탈 경고를 위한 운전대 토크 패턴 디자인

Steering Wheel Torque Pattern Design for  
Lane Departure Warning

# Steering Wheel Torque Pattern Design for Lane Departure Warning

by

Inseok Koh

Department of Computer Science and Engineering  
Pohang University of Science and Technology

A thesis submitted to the faculty of the Pohang University of  
Science and Technology in partial fulfillment of the  
requirements for the degree of Master of Science in the  
Computer Science and Engineering

Pohang, Korea

12. 29. 2017

Approved by

Seungmoon Choi

Academic advisor

A handwritten signature in black ink, reading "Seungmoon Choi". The signature is written in a cursive style with a large, sweeping flourish at the end.



# Steering Wheel Torque Pattern Design for Lane Departure Warning

Inseok Koh

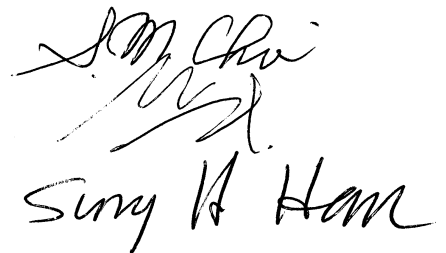
The undersigned have examined this thesis and hereby certify  
that it is worthy of acceptance for a master's degree from  
POSTECH

12. 29. 2017

Committee Chair Seungmoon Choi

Member Minsu Cho

Member Sung H. Han



Handwritten signatures of the committee members: Seungmoon Choi, Minsu Cho, and Sung H. Han.

MCSE                    고 인 석. Inseok Koh  
20162352              Steering Wheel Torque Pattern Design for Lane Departure  
Warning,  
차선 이탈 경고를 위한 운전대 토크 패턴 디자인  
Department of Computer Science and Engineering , 2018,  
73p, Advisor : Seungmoon Choi.

## ABSTRACT

A huge part of the fatal accidents is occurred by lane departure. To reduce the rate of accidents caused by lane departure, manufacturers developed the Lane Departure Warning System (LDWS). Especially, manufactures use the steering wheel haptic based warning systems as LDWS. However, many drivers turned off steering wheel haptic based LDWS because of intrusive feeling of haptic warning.

In this thesis, torque oscillation patterns that considered the subjective preference are proposed to solve that problem. Torque patterns which can nudge the directional information to driver and rhythm based torque oscillations are used for LDWS.

The equal level of stimulus intensity function for the frequencies between 5 Hz to 60 Hz was obtained and the adjective rating and subjective preference test for frequencies and amplitudes were conducted to design the rhythm based torque oscillation. Drivers prefer the 40 Hz and middle level of perceived intensity rather than low level of perceived intensity. The results also show that high preference for torque oscillation provide a clear, light and urgent feeling. Torque oscillation

pattern with regular rhythm such as the ratio between the torque oscillation time and rest time is 5:5 resulted high preference. The oscillation without the rest showed the lowest preference.

In the case of the directional oscillation pattern, the recognition rate of directionality shows high recognition rate when the oscillation period is long and the duration ratio difference between the left and right is large. The subjective preference for directional oscillation pattern scores high when the recognition rate is also high.

These results will be useful guidelines for designing a steering wheel haptic based lane departure warning system.



# 목 차

표 목 차 . . . . .	V
그 립 목 차 . . . . .	VI
<b>I. Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 차선 이탈 경고 시스템 (Lane Departure Warning System) . . . . .	2
1.2 차량에서의 경고 제공 방식 . . . . .	2
1.3 차량에서의 햅틱 경고 신호에 관한 선행 연구 . . . . .	3
1.4 스티어링 휠을 통한 차선 이탈 경고 햅틱 피드백 . . . . .	4
1.5 스티어링 휠 토크 진동 기반 경고 신호 . . . . .	6
1.6 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 . . . . .	9
1.7 토크 진동 제어 파라미터에 따른 감성 품질 . . . . .	10
1.8 노면 진동 . . . . .	13
1.9 Contribution . . . . .	15
<b>II. 토크 진동 패턴</b>	<b>16</b>
2.1 Stimulus Intensity Function (Equal Sensation Contour)	16
2.1.1 피실험자 정보 . . . . .	16
2.1.2 장비 정보 . . . . .	16
2.1.3 실험 절차 . . . . .	18
2.1.4 결과 및 토론 . . . . .	18
2.2 토크 진동의 진폭 (인지 강도) 및 주파수에 따른 선호도 평가 및 형용사 평가(Adjective Rating) . . . . .	20
2.2.1 피실험자 및 장비 정보 . . . . .	20
2.2.2 실험 절차 . . . . .	21
2.2.3 결과 . . . . .	24
2.3 토크 진동 패턴 (리듬)에 대한 주관적 선호도 평가 . . . . .	31
2.3.1 피실험자 및 장비 정보 . . . . .	33
2.3.2 실험 절차 . . . . .	33
2.3.3 결과 . . . . .	34
2.4 토론 . . . . .	48

<b>III.</b>	<b>스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴</b>	<b>51</b>
3.1	비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 . . . . .	51
3.2	스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴에 대한 방향 인식을 평가 . . . . .	54
3.2.1	피실험자 및 장비 정보 . . . . .	54
3.2.2	실험 절차 . . . . .	54
3.2.3	결과 . . . . .	55
3.3	스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴에 대한 주관적 선호도 평가 . . . . .	59
3.3.1	피실험자 및 장비 정보 . . . . .	59
3.3.2	실험 절차 . . . . .	59
3.3.3	결과 . . . . .	60
3.4	토론 . . . . .	63
<b>IV.</b>	<b>결론</b>	<b>65</b>
	<b>참 고 문 헌</b>	<b>67</b>

# 표 목 차

1.1	토크 기반 경고와 진동 모터 기반 경고의 비교 . . . . .	5
2.1	SENSO-Wheel SD-LC 장비 사양 . . . . .	17
2.2	주파수별 인지 강도에 따른 진폭의 크기 . . . . .	22
2.3	Adjective Rating에 사용된 형용사 . . . . .	23
2.4	주파수 및 진폭(인지 강도)에 대한 주관적 선호도 2-way ANOVA, 종속 변수: Preference . . . . .	25
2.5	진폭 (인지 강도)을 고정한 주파수에 대한 Simple Effect test 결과 . .	26
2.6	선호도와 Adjective Rating간의 Correlation Matrix . . . . .	30
2.7	Period와 Ratio에 따른 A와 B의 시간 . . . . .	33
2.8	Total Time, Period, Ratio에 대한 3-way ANOVA 결과 . . . . .	37
2.9	Ratio를 기준으로 한 Total Time ANOVA 결과, 종속 변수: Preference	39
2.10	Total Time을 기준으로 한 Ratio ANOVA 결과, 종속 변수: Prefer- ence . . . . .	40
2.11	Ratio 를 기준으로 한 Period ANOVA 결과, 종속 변수: Preference .	42
2.12	Period 를 기준으로 한 Ratio ANOVA 결과, 종속 변수: Preference .	45
3.1	Period, Ratio의 조합에 따른 주파수 및 진폭, $T_1, T_2$ 의 길이 및 Cor- rect Answer rate . . . . .	53
3.2	Directional Torque Oscillation Correct Answer Rate에 대한 2-way ANOVA 통계 분석 결과, 종속 변수: Correct Answer Rate . . . . .	55
3.3	Correct Answer Rate와 Preference간의 Correlation Matrix . . . . .	60
3.4	Period와 Ratio에 대한 2-way ANOVA . . . . .	60

# 그림 목 차

1.1	스티어링 휠 토크 기반 경고 제공 방식 및 진동 모터 기반 경고 제공 방식에 대한 비교 . . . . .	5
1.2	스티어링 휠 토크 진동 기반 경고 신호 . . . . .	6
1.3	Steering Wheel Oscillation and Steering Wheel Oscillation with Torque Offset 출처: Beruscha et al. [1] . . . . .	7
1.4	비대칭 토크 펄스 진동 예제 시계 반대 방향으로 50 ms 동안 sin파 형태의 $A_1(1000 \text{ mN}\cdot\text{m})$ , $f_1(10 \text{ Hz})$ 을 가하고, 시계 방향으로 250 ms 동안 sin파 형태의 $A_2(200 \text{ mN}\cdot\text{m})$ , $f_2(2 \text{ Hz})$ 를 가할 경우, 핸들이 돌아간 정도에 대한 묘사는 과장되게 표현되었음 . . . . .	9
1.5	토크 펄스를 이용한 스티어링 휠 진동 예제, 출처 [2] . . . . .	10
1.6	주파수에 따른 4 Channel 별 threshold 출처 [3] . . . . .	11
1.7	3 축 가속도계로 측정된 노면 진동 및 DFT 321을 통해 가공된 1축 노면 진동 . . . . .	13
1.8	노면 진동을 묘사하기 위해 운전 시뮬레이터의 스티어링 휠에 부착된 웨이커 . . . . .	14
2.1	운전 시뮬레이터에 장착된 스티어링 휠: SENSO-Wheel SD-LC . . . . .	17
2.2	약한 크기의 인지 강도에 대한 Stimulus Intensity Function, 에러바는 표준편차를 의미 . . . . .	19
2.3	중간 크기의 인지 강도에 대한 Stimulus Intensity Function, 에러바는 표준편차를 의미 . . . . .	19
2.4	운전 시뮬레이터가 설치된 모습 . . . . .	20
2.5	시각 경고 기반 차선 이탈 경고 시스템이 더해진 운전 시뮬레이션 화면	21
2.6	토크 진동에 대한 주관적 선호도 평가지 . . . . .	21



2.7	Adjective Rating 예시 . . . . .	23
2.8	주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 선호도 조사 결과, 파란색 바: 인지강도 약, 노란색 바: 인지강도 중, 에러 바는 표준 오차를 의미 . . . . .	24
2.9	진폭의 크기에 따른 선호도 사후 검정(Tukey's grouping) . . . . .	25
2.10	주파수에 따른 선호도 사후 검정 (Tukey's grouping), 인지 강도(진폭): 중 . . . . .	26
2.11	주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Clear) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미 . . . . .	27
2.12	주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Rhythmical) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미 . . . . .	28
2.13	주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Urgent) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미 . . . . .	28
2.14	주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Soft) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미 . . . . .	29
2.15	주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Heavy) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미 . . . . .	30
2.16	토크 진동 패턴 제작에 사용한 파라미터 . . . . .	32
2.18	Period, Ratio의 조합에 대한 토크 진동 패턴 선호도 결과(Total Time=1초), 에러 바는 표준 에러를 의미 . . . . .	34
2.17	Period, Ratio, Total Time의 조합에 대한 토크 진동 패턴 선호도 결과, 에러 바는 표준 에러를 의미 . . . . .	35
2.19	Period, Ratio의 조합에 대한 토크 진동 패턴 선호도 결과(Total Time=2초), 에러 바는 표준 에러를 의미 . . . . .	36
2.20	Period, Ratio의 조합에 대한 토크 진동 패턴 선호도 결과(Total Time=3초), 에러 바는 표준 에러를 의미 . . . . .	36
2.21	Period의 길이에 따른 선호도 사후 검정(Tukey's grouping) . . . . .	37

2.22	Period의 Ratio에 따른 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0 . . . . .	38
2.23	Total time에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Ratio = 10:0 . . . . .	40
2.24	Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Total time = 2, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0 . . . . .	41
2.25	Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Total time = 3, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0 . . . . .	42
2.26	Period에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Ratio = 2:8 . .	43
2.27	Period에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Ratio = 5:5 . .	44
2.28	Period에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Ratio = 8:2 . .	45
2.29	Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Period=0.5s, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0 . . . . .	46
2.30	Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Period=0.75s, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0 . . . . .	47
2.31	Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Period=1.0s, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0 . . . . .	48
3.1	비대칭 토크 펄스 기반 진동 패턴 제작에 사용된 변수 및 제작 원리 .	52
3.2	Directional Torque Oscillation Correct Answer Rate, 에러 바는 표 준 편차를 의미 . . . . .	56
3.3	Period에 대한 Correct Answer Rate사후 검정(Tukey's grouping), Score: % . . . . .	57
3.4	Ratio에 대한 Correct Answer Rate사후 검정(Tukey's grouping), Score: %, 6: 6:4, 7: 7:3, 8: 8:2, 9: 9:2 . . . . .	58
3.5	Directional Torque Oscillation Preference 실험 결과, 에러 바는 표 준 오차를 의미 . . . . .	61

3.6 Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Period=1.0s, 6:  
6:4, 7: 7:3, 8: 8:2, 9: 9:2 . . . . . 62

# I. Introduction

1769년 최초의 자동차인 증기 자동차가 발명되고, 증기 자동차를 최초로 시연하던 해인 1771년 최초의 자동차 사고가 발생하였다. 즉, 자동차 사고의 역사는 자동차가 발명된 순간부터 시작되었다고 할 수 있다. 자동차 사고는 생명과도 직결(대한민국의 경우 매년 4천명 이상이 자동차 사고로 인해 사망 [4])될 수 있기 때문에 자동차 안전에 관한 연구는 제조사와 연구기관들에 의해 자동차가 탄생한 순간부터 현재까지 꾸준히 연구되고 있다.

자동차 안전에 관한 연구를 살펴보면 주로 사고가 발생했을 때 충돌 에너지를 흡수하여 차량 탑승객에게 전달되는 충격을 줄이거나, 제동의 성능을 높이는 등에 관한 연구와 전자 기술을 기반으로 운전자에게 경고를 제공하거나 자동 제어를 통해 사고를 예방하거나 피해를 줄이는 연구로 분류할 수 있다.

전자 기술 기반 안전 보조 장치에 관한 연구는 Lee et al. [5] 에서 보이듯 60년전부터 꾸준히 연구되고 있고, 이미 차량의 안전성과 편리성을 효과적으로 향상시키기 위해 다양한 종류의 보조 장치들이 차량 내에 적용되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

대표적 안전 보조 시스템으로는 크게 차선 이탈 경 시스템(LDWS: Lane Departure Warning System), 전방 충돌 경고 시스템(FCWS: Forward Collision Warning), 사각 지대 경고 시스템(BSWS: Blind Spot Warning System)이 있으며 현재 차량에 적용되어 상용되고 있고, 최근에는 이러한 안전 보조 시스템 탑재가 의무인 국가도 찾아볼 수 있었다.

본 연구에서는 대표적 안전 보조 시스템 중 하나인 차선 이탈 경고 시스템에 대해 살펴보고, 스티어링 휠을 통해 감성 품질을 고려하고 리듬감을 제공하는 토크 진동 패턴을 제시하고, 방향성 정보를 제공할 수 있는 토크 진동 패턴을 제시하고자 한다.

## 1.1 차선 이탈 경고 시스템 (Lane Departure Warning System)

차선 이탈 경고 시스템은 차량 내부에 설치된 카메라가 전방의 차선을 인식하여 운전 도중 의도치 않게 차선을 이탈했을 경우에 경고를 제공하여 운전자에게 위험 상황을 알리는 시스템이다. 차선 이탈은 충돌 사고를 일으키는 주 원인 중 하나로, 2007년 발표된 Pohl et al. [6]에 의하면 유럽의 경우 전체 사고의 14.5%이상이 차선 이탈로 인해 발생한다고 보고 된 바 있고, 차선 이탈로 인해 발생한 사고의 35% 이상이 대형사고로 이어졌다는 보고를 확인할 수 있었다. Najm et al. (NHTSA, 2007) [7] 에 따르면 북미를 기준으로 전체 사고 중 약 27% 이상이 차선 이탈로 인해 발생되고 있으며, 2005년의 경우 치명적 사고의 28%가, 2015년의 경우 6.9%가 차선 이탈로 인해 발생되었다는 조사 결과도 확인할 수 있었다 [8], [9]. 이러한 위험성을 인지한 유럽에서는 이미 차량에 차선 이탈 경고 시스템의 장착을 의무적으로 강제하고 있으며, 북미에서도 2019년 전 차종에 차선 이탈 경고 시스템을 의무로 장착하는 안에 대해 논의 중이라고 알려져 있다(NHTSA, 2009). 이에 본 연구에서는 차선 이탈 경고 시스템을 제공하는 방식에 대해 살펴보고, 해당 시스템을 효과적이며 효율적으로 제공하는 방식에 대한 연구를 수행하고자 한다.

## 1.2 차량에서의 경고 제공 방식

차량에서의 경고는 크게 시각, 청각 그리고 촉각을 통해 운전자에게 제공되고 있으며, 시각과 청각을 통한 경고가 폭넓게 사용되고 있다. 대표적으로는 Head Up Display(HUD), 계기판의 메시지, 계기판에 설치된 LED 막대의 깜박임, 음성 안내 혹은 경고음, 스티어링 휠을 통한 토크 피드백, 스티어링 휠에서의 진동, 안전벨트의 떨림 등을 통해 경고가 제공됨을 확인할 수 있었다 [10], [11], [12], [13], [14], [1], [2].

이 중 시각과 청각을 이용한 전달 방식의 경우 가장 많이 사용하는 감각 채널이기 때문에 인지 능력이 높아 경고로써 널리 사용되고 있지만, 주변 환경에 영향을

받기 쉽고, 운전에서 가장 큰 인지 부하를 요구하는 감각기관이기 때문에 인지 과부하를 발생시켜 운전자가 경고를 인지하지 못하는 문제가 발생할 수 있다는 단점을 갖는다. 뿐만아니라 청각 기반 경고 신호의 경우 동승자에게 불안함을 줄 수 있다는 단점도 확인할 수 있었다. 반면, 안전벨트의 떨림 혹은 스티어링 휠에서 발생하는 진동 등과 같은 햅틱을 이용한 경고 시스템의 경우 시각, 청각과는 다른 촉각이라는 감각 채널을 사용하여 신체와 접촉한 부위에만 집중적으로 경고 신호를 전달하기 때문에 시각, 청각처럼 운전자 외의 탑승자에게 방해가 되지 않는 운전자 전용 채널(Private channel)로서 운전자에게 보다 효과적으로 안정적인 경고를 제공할 수 있다는 장점을 갖는다.

### 1.3 차량에서의 햅틱 경고 신호에 관한 선행 연구

차량에서 햅틱을 통한 연구의 경우 경우 안전벨트를 떨게 하는 연구, 스티어링 휠에서 진동을 제공하는 연구, 시트에 별도의 액추에이터를 설치하여 경고 신호를 제공하는 방식에 대한 연구 [15], 스티어링 휠에 토크를 가해 경고를 제공하고 강제로 차선 변경을 막는 연구 [16], 토크를 가해 운전을 교정하도록 도와주는 방법을 제시한 연구 [17] 등이 선행되었음을 확인할 수 있었다.

햅틱기반 경고 신호의 효율성에 관련된 연구도 아래와 같이 찾아볼 수 있었다. 먼저, 전방 충돌 경고 시스템의 경우 안전벨트에 진동을 주는 것보다 스티어링 휠에 방향성 있는 단순 진동 신호를 제공하는 것이 충돌 회피율을 크게 높여주었다고 보고된 연구를 찾을 수 있었으며 [10], 같은 경고 상황에서 시각과 가속 페달에 햅틱 피드백을 제공하는 경우에는 햅틱을 통한 경고 신호를 제공하는 것이 시각 경고 제공에 비해 빠른 응답 속도를 낸다는 연구도 확인할 수 있었다. 그 외에도 경고 신호를 전달하기 위해 촉각 채널을 시각 채널과 함께 사용하는 것이 시각만 사용하는 것 보다 반응 속도 측면에서 빠른 속도를 보인다는 연구를 발견할 수 있었다 [18], [19]. 이렇듯 다양한 경고상황에 대해서 햅틱기반 경고제공이 보다 효율적임을 선행 연구를 통해 확인할 수 있었다.

## 1.4 스티어링 휠을 통한 차선 이탈 경고 햅틱 피드백

스티어링 휠을 통한 햅틱 피드백의 종류를 살펴보기에 앞서 스티어링 휠을 통한 햅틱 피드백을 제공함으로써 얻을 수 있는 장점을 살펴보도록 하겠다. 먼저 근본적으로 촉각(Tactile) 자극을 제공할 때 반응 속도는 시각에 비해 빠르고, 청각과 비슷하다는 연구는 속설처럼 통용되고 있다. Ng et al. [20]의 연구에 의하면 촉각 자극을 제공할 때의 반응 속도가 청각 자극에 비해 28%, 시각 자극에 대해 34%정도 빠른 반응 속도를 보인다는 것을 확인할 수 있었고, Lylykangas et al. [18], Burke et al. [19]의 연구를 통해 촉각을 활용한 차선 이탈 경고 시스템의 반응속도면에서 유용하다는 점을 확인할 수 있었다. 또한 Kozak et al. [21]에 의해 스티어링 휠을 통한 진동을 제공할 때, HUD를 통한 시각 경고, 소리를 통한 경고 신호 제공보다 스티어링 응답 속도가 빠르고, 인지율이 높다는 사실을 확인할 수 있었다. Suzuki et al. [22] 팀은 이에 대한 이유에 대해 운전자에게 차선 이탈 경고로써 스티어링 휠을 통한 햅틱 피드백을 전달했을 때 운전자가 느끼는 멘탈 모델과 차선을 이탈했을 때의 멘탈 모델이 유사하기 때문에 차선 이탈 경고 신호로써 스티어링 휠에 햅틱 피드백을 제공하는 것이 경고음에 비해 빠른 스티어링 반응 시간(Steering reaction time: 경고가 발생하고 스티어링 휠을 조작하는데 까지 걸린 시간)을 보인다고 주장하였다. 이렇듯 햅틱(촉각)을 이용한 경고 신호 제공은 시각 채널에 비해 빠른 반응 속도를 보이고, 청각 채널과 비슷한 수준의 반응 속도를 보인다는 장점을 갖는다. 뿐만 아니라 스티어링 휠을 통한 햅틱 경고 제공 방식은 다른 감각 채널을 통해 경고를 제공하는 것 보다 높은 주관적 선호도를 보였음을 Hoc et al. [23], Navarro et al. [24]의 연구를 통해 확인할 수 있었다. 이러한 장점을 살려 본 연구에서는 스티어링 휠을 통한 차선 이탈 경고 햅틱 피드백을 제공하고자 한다.

Steering Wheel Torque Warning	Eccentric Motor Warning
낮은 주파수 영역에서만 사용가능	비교적 높은 주파수까지 사용가능
추가 비용과 별도 공간이 필요 없음	고르게 퍼지지 않고, 추가 비용과 별도 공간이 필요

Table 1.1: 토크 기반 경고와 진동 모터 기반 경고의 비교

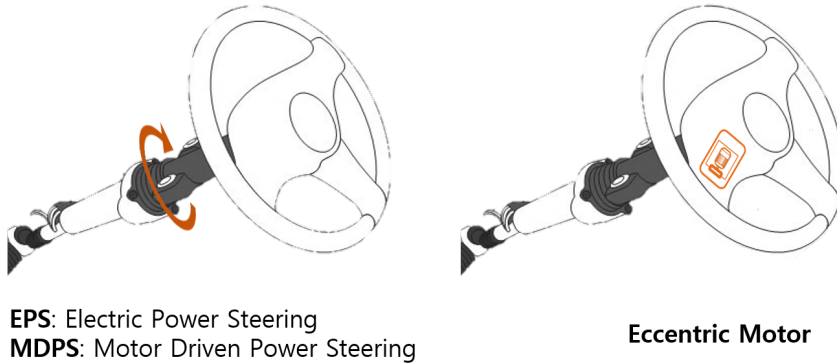


Figure 1.1: 스티어링 휠 토크 기반 경고 제공 방식 및 진동 모터 기반 경고 제공 방식에 대한 비교

다음으로 스티어링 휠을 통한 햅틱 피드백을 제공하는 방식에 대해 살펴보도록 하겠다. 스티어링 휠을 통해 운전자에게 햅틱 피드백을 제공하는 방식은 Figure 1.1 와 같 스티어링 휠에 편심 모터(Eccentric motor)와 같은 별도의 액추에이터(Actuator)를 넣어 진동을 생성하는 방식과 최근 상용차에서 사용되는 전자식 파워 스티어링 휠(EPS: Electric Power Steering 또는 MDPS: Motor Driven Power Steering)에 부착된 제어 모터를 사용하여 토크 피드백을 제공하는 방식으로 분류된다 [1].

두 방식은 Table 1.1과 같은 특징을 갖는다.

스티어링 휠 내부에 별도의 액추에이터를 부착한 경우는 전자식 파워 스티어링 휠 제어 모터에 비해 높은 영역까지의 진동을 낼 수 있다는 장점을 갖지만 [1], 스티어링 휠 전체에 경고 신호(진동)가 고르게 퍼지지 않는다는 단점과 별도의 액추에이터(진동모터)를 설치해야 하는 추가 비용이 든다는 단점 그리고 스티어링 휠 내에 부가적인 공간이 필요하다는 단점을 갖는다. 반면 전자식 파워 스티어링 휠을



제어하는 모터를 사용할 경우 기존 시스템을 그대로 사용할 수 있기 때문에 별도의 액추에이터를 부착하는 방식에 비해 별도의 비용과 공간이 필요 없다는 장점을 갖는다. 이에 본 연구에서는 전자식 파워 스티어링 휠을 제어하는 모터를 기반으로 햅틱 토크 진동을 효율적으로 제공하는 방법에 대한 연구를 수행하고자 한다.

## 1.5 스티어링 휠 토크 진동 기반 경고 신호

일반적으로 스티어링 휠 토크 진동은 크게 파형, 토크 펄스의 진폭(이하 진폭), 토크 펄스의 주파수 파라미터의 조합으로 제작할 수 있다 [2].

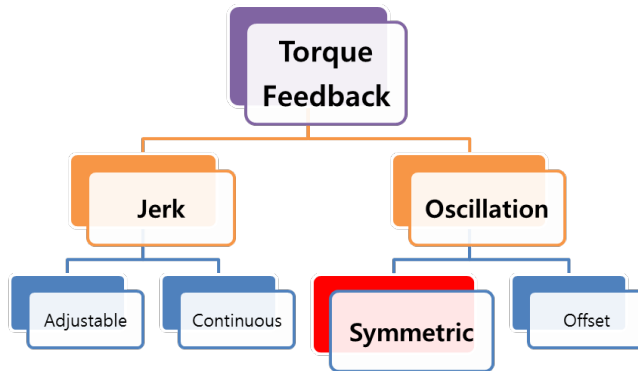


Figure 1.2: 스티어링 휠 토크 진동 기반 경고 신호

스티어링 휠 토크 진동은 Figure 1.2과 같이 크게 Jerk방식과 Oscillation방식으로 분류할 수 있다 [1].

먼저 Jerk기반 토크 진동에 대해 살펴보도록 하겠다. Jerk기반 토크 진동은 경우 스티어링 휠에 적절한 크기의 토크를 가해 핸들을 움직여 운전자가 핸들을 따라가게 하는 방식인 Adjustable jerk 방식과 한 방향으로 지속적인 토크를 가해 운전자가 핸들을 돌리도록 유도하는 Continuous jerk 방식으로 나뉘며, 방향성 정보를 제공하기 위해 한쪽 방향으로 토크 펄스를 가하는 연구, 차선에서 이탈한 정도에 맞춰 스티어링 휠에 토크를 가하는 연구, 스티어링 휠에 큰 토크를 가해 차선을 강제로 맞추도록 하는 연구 등 다양한 형태로 연구가 진행되었음을 확인할 수 있었다 [2], [25], [6], [26], [27].

Sato et al. [26] 는 스티어링 휠에 펄스 형태의 토크 경고 (Pulse-like steering torque warning) 를 제공했을 때 효과적으로 차선 이탈을 줄인다고 발표하였다. 하지만, 펄스 형태의 Jerk 신호로써 운전자에게 차선 이탈 경고를 제공할 경우 약 50%의 운전자가 의도한 반대 방향으로 스티어링 휠을 돌리는 양상을 보였다는 보고도 확인할 수 있었다 [22], [27]. 즉, Jerk형태의 토크 피드백은 효과적이지만, 상대적으로 안전성이 떨어지는 단점을 갖는다.

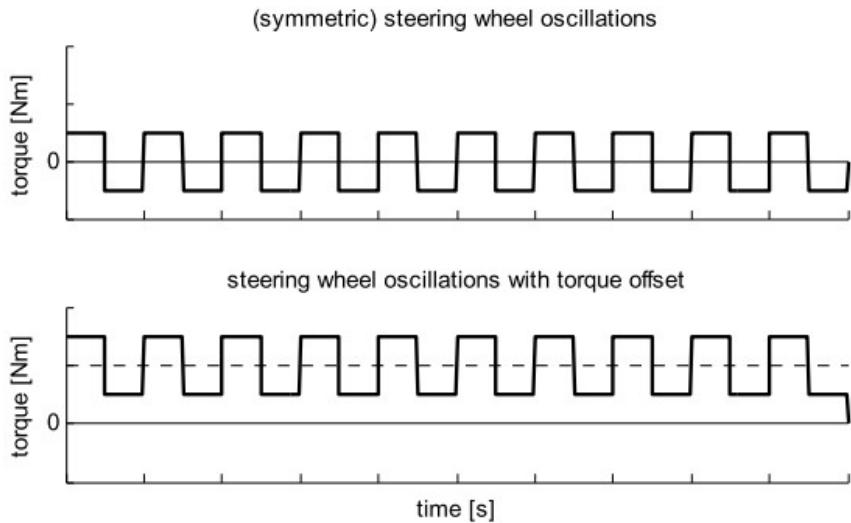


Figure 1.3: Steering Wheel Oscillation and Steering Wheel Oscillation with Torque Offset 출처: Beruscha et al. [1]

다음으로 Oscillation 방식에 대해 살펴보도록 하겠다. 해당 방식은 Figure 1.3 과 같이 좌, 우로 같은 크기의 토크를 가해 스티어링 휠이 좌우로 떨며 운전자에게 경고를 제공하는 Symmetric oscillation 방식과 한쪽 방향에 Offset을 더해 차선에서 이탈한 방향으로 스티어링이 편향되며 좌, 우로 떠는 경고 신호를 제공하는 Steering wheel oscillation with torque offset 방식으로 분류된다 [12], [22], [28], [23], [29], [30], [31], [24].

좌, 우에 가해지는 토크의 크기가 같아 스티어링 휠이 좌우로 떠는 Symmetric oscillation 방식은 Ziegler et al. [32] 와 Rothe et al. [29] 의 연구에서 처음으로

수행되었으며, 일부 논문에서 Symmetric oscillation방식의 토크 진동을 Vibration으로 표현하고 있음을 확인할 수 있었다. 이에 대해 Beruscha et al. [1]는 진동 모터로 생성되는 진동과 토크를 통한 진동의 구분이 명확하지 않기 때문에 Vibration이라는 표현이 잘못되었다고 밝힌바 있다.

Offset이 없는 Symmetric oscillation의 경우 토크 진동을 통해 방향 정보를 제공하기 어렵다는 단점이 있는 반면 [29], Jerk방식이나 Offset이 있는 Steering wheel oscillation방식에 비해 비교적 조향(핸들 조작)에 영향을 미치지 않는다는 장점을 갖는다.

다음으로 Offset이 더해진 Steering wheel oscillation방식에 대해 살펴보도록 하겠다. Offset을 더한 Steering wheel oscillation방식은 말 그대로 한쪽 방향으로 Offset이 더해져 한쪽 방향으로 점차 움직이며 스티어링 휠이 흔들리는(떠는) 형태를 의미한다. Figure 1.3처럼 한쪽방향으로 토크의 크기를 조절하며 토크를 가하는 방식을 확인할 수 있었고, Offset방식과 조금 다르기는 하지만 핸들의 좌, 우에 가하는 토크의 크기를 다르게 제공하여 핸들의 좌, 우로 움직임을 다르게 한 연구(Navarro et al. 팀은 해당 방식을 Motor priming 방식이라고 정의하였다.)도 확인할 수 있었다.

이에 본 연구에서는 실제 차량에도 적용 가능할 수 있도록 조향에 영향을 많이 미치는 Jerk방식을 피해 조향에 최대한으로 영향을 미치지 않고 보다 안전한 경고를 제공할 수 있는 Steering wheel oscillation 방식을 기반으로 인지율이 높으며, 주행성능에 영향을 적게 미치고, 운전자의 주관적 만족도를 높일 수 있는 스티어링 휠 기반 토크 패턴을 제시하고자 한다. 뿐만 아니라 Navarro et al [28], Jordan et al. [33], Deroo et al. [30], [31]에서 사용된 Motor priming 방식에서 영감을 얻어 스티어링 휠에 좌, 우로 가하는 토크의 크기와 토크 펄스의 길이를 다르게 하여 스티어링 휠을 통해 방향 정보를 제공 할 수 있는 토크 진동에 대한 연구를 수행하고자 한다.

## 1.6 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동

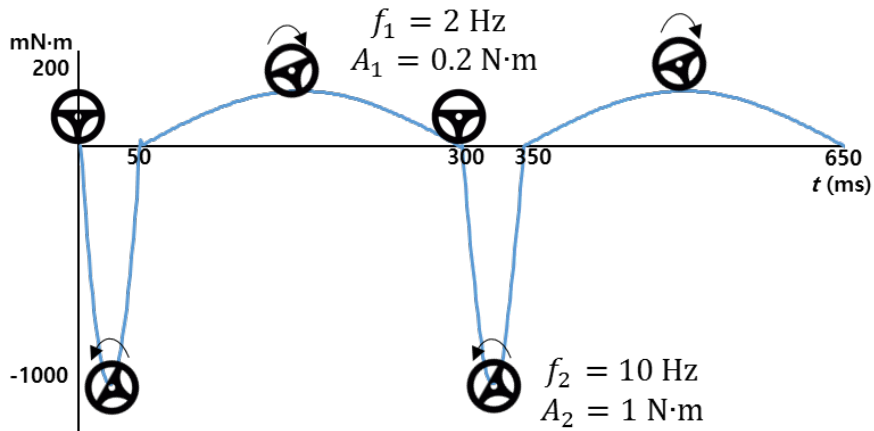


Figure 1.4: 비대칭 토크 펄스 진동 예제 시계 반대 방향으로 50 ms 동안 sin파 형태의  $A_1(1000 \text{ mN}\cdot\text{m})$ ,  $f_1(10 \text{ Hz})$ 을 가하고, 시계 방향으로 250 ms 동안 sin파 형태의  $A_2(200 \text{ mN}\cdot\text{m})$ ,  $f_2(2 \text{ Hz})$ 를 가할 경우, 핸들이 돌아간 정도에 대한 묘사는 과장되게 표현되었음

Navarro et al. [28] 가 제안한 방식인 비대칭 토크 펄스 진동방식은 스티어링 휠에 좌, 우로 가하는 토크의 크기와 주파수가 서로 다르다. 즉, 스티어링 휠의 오른쪽 방향으로 주파수  $f_1$  토크의 크기(진폭)를  $A_1$  를 가하고, 왼쪽 방향으로  $f_2$ ,  $A_2$ 를 가해 운전자에게 방향성 정보를 제공한다. 일반적으로 Figure 1.4과 같은 패턴의 토크 진동을 스티어링 휠을 통해 제공할 경우 운전자는 토크 진동이 왼쪽(시계 반대 방향)을 향한다는 사실을 인지한다. 즉, 운전자는 시간이 짧고 진폭(토크의 크기)이 큰 방향으로 방향성 정보를 인지한다. 이를 응용하여 본 연구에서는 다양한 주파수와 진폭의 조합으로 좌, 우로 비대칭 토크 펄스형태의 토크 진동을 제공했을 때의 방향 정보를 인지하는 비율과 해당 진동에 대한 만족도 평가를 수행하고자 한다.

## 1.7 토크 진동 제어 파라미터에 따른 감성 품질

일반적으로 사용되는 진동 주파수 영역에 대해서 주파수가 높을 수록 그리고 진폭이 작을수록 긍정적인 느낌을 제공한다는 연구 결과가 있다 [34], [35]. 해당 연구의 경우 비교적 낮은 주파수에 대한 연구를 수행하지 않았기 때문에 토크를 기반으로 한 연구에 대해서도 조사를 수행해 보았다. Huang et al. [2] 연구 팀은 진폭: 1.5N·m, 3N·m, 주파수: 3, 10, 20Hz, 파형: Triangular, Square wave 형태의 조합에 따른 토크 패턴에 대해 주관적 평가를 수행하였다. 해당 연구에 따르면 Triangular wave 형태로 토크를 제공하는 것이 Square wave 형태의 토크를 제공하는 것보다 높은 선호도를 보였다고 밝혔으며, 10Hz의 토크 파형과 진폭(크기)이 작은 패턴에 대해 높은 선호도를 보였음을 확인할 수 있었다. 하지만, 차선을 이탈한 방향에 맞춰 Figure 1.6과 같이 한쪽 방향으로 토크 펄스를 제공하는 주파수의 범위가 한정적이고 토크의 크기 역시 제한적이라는 한계를 확인할 수 있었다.

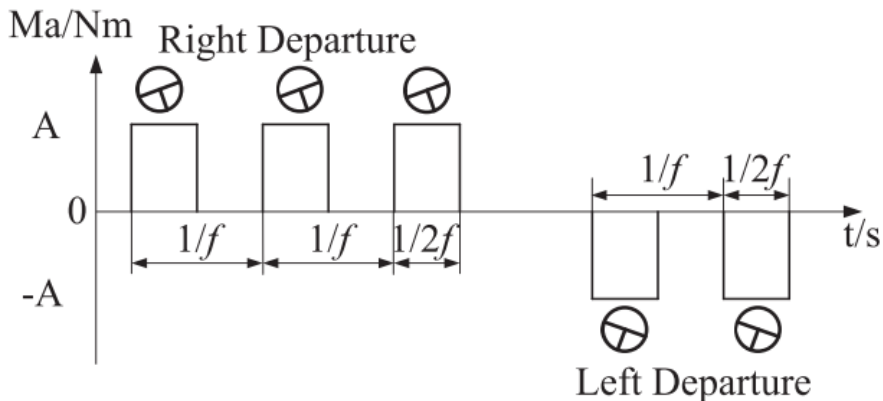


Figure 1.5: 토크 펄스를 이용한 스티어링 휠 진동 예제, 출처 [2]

다음으로는 스티어링 휠에 진동의 주파수, 강도, 손의 위치, 쥐는 힘을 변화시켜 사람이 느끼는 정도, 불편함 등을 파악한 Morioka et al. [36]의 연구를 확인할 수 있었다. 해당 연구에서는 편안함의 정도는 진동의 강도에 큰 영향을 받고 그 다음 쥐는 힘에 영향을 받는다고 발표하였으며, 쥐는 위치는 해당 조건에 영향이 없음을 보였다. 그 외에도 Symmetric oscillation에 대한 연구는 일 존재하였으나, 주로

20Hz 미만의 저주파수 영역 [12], [28], [33] 에서 경고신호에 대한 효율성 관련 연구가 주를 이루었고, 운전자가 느끼는 선호도에 대한 연구는 미흡하였음을 확인할 수 있었다.

상용차에 적용된 스티어링 휠 햅틱 피드백의 경우, 신호가 유발하는 불쾌감 때문에 운전자가 해당 기능을 사용하지 않는 경우가 보고되고 있다는 점을 고려하여 Symmetric oscillation 방식으로 토크 진동을 제공할 때, 경고에 대한 효율성이 높고 운전자가 선호하며 불쾌감이 적은 토크 파라미터를 찾고, 해당 파라미터에 따른 토크 진동 패턴을 제작하고자 한다. 즉, 본 연구에서는 토크 진동 제어 파라미터 및 패턴에 따른 감성 품질에 대한 조사와 고찰을 수행하고자 한다.

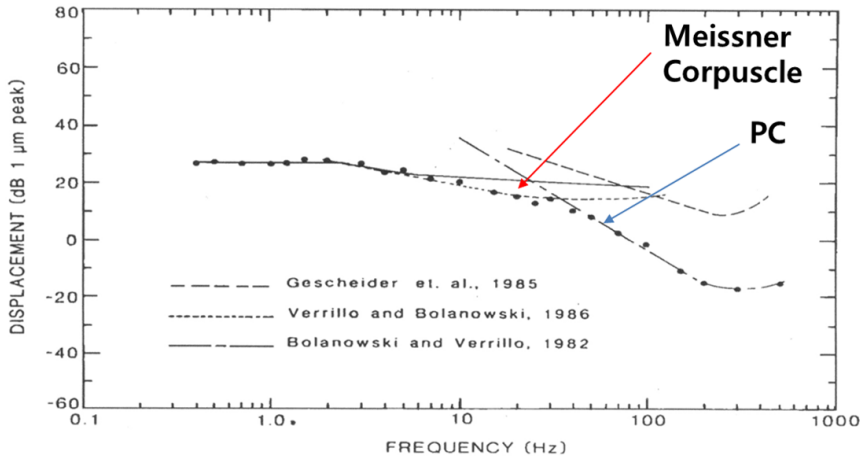


Figure 1.6: 주파수에 따른 4 Channel 별 threshold 출처 [3]

Four Channel Theory에 따르면 주파수에 따라 자극되는 Mechanoreceptor(진동의 경우 Meissner Corpuscle과 Pacinian Corpuscle(PC)를 자극, 3- 100 Hz의 자극은 Meissner Corpuscle를 자극해 펄떡거리는 듯한(Flutter) 감각을 느끼고, 10 - 500 Hz의 자극은 Pacinian corpuscle을 자극하여 떠는 듯한 감각을 느낌, [37], [38])들이 다르다고 한다. 이 때문에 토크 피드백 역시 주파수와 토크의 크기(Amplitude)에 따라 느껴지는 선호도 역시 다를 것이다. Gescheider [39], Bolanowski et al. [3]에 따르면 2-40Hz의 자극의 경우 Non-Pacinian Channel의 Meissner Corpuscle에서

자극을 수용하고 40Hz이상의 자극부터는 PC의 Absolute Limen (AL or Detection Threshold) 이 급격히 낮아져 PC에서 민감하게 자극을 수용한다고 한다.

토크 진동에 대한 주관적 만족도 조사는 주로 20Hz 미만에서의 토크 신호에 대한 평가만 수행하였고, 해당 주파수(20Hz 미만)의 경우에는 non-PC의 threshold가 낮아 자극에 대해 non-PC에서 민감하게 자극을 수용하기 때문에 주파수에 따른 토크 진동에 대한 정확한 내용을 확인하기 어렵다는 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 기존 연구에서 사용했던 주파수의 범위보다 더 높은 주파수까지 고려하여 non-PC와 PC에서 수용하는 토크 진동에 대한 주관적 선호도 평가를 수행하고, 가장 적합한 주파수를 찾은 다음 해당 주파수를 기반으로 토크 패턴을 제작하여 사용자가 느끼는 주관적 선호도(만족도)에 대해 알아보고자 한다. 또한 각 주파수에 따른 인지 강도(Perceived intensity)를 구하고, 각 주파수에 따른 선호도, 주관적 느낌에 대한 조사를 Psychophysics 방식 [3] 및 Adjective rating [40]을 사용하여 수행하고자 한다.

## 1.8 노면 진동

본 연구에서 사용되는 축각 기반 차선 이탈 경고는 운전 시뮬레이션 환경에 장착되어 있는 스티어링 휠에 좌우로 토크를 가해 생성되는 토크 진동을 기반으로 디자인 되었다. 경고 신호 인지에 있어 충분한 토크 패턴을 디자인하고, 보다 사실적인 시뮬레이션 환경을 꾸미기 위해 노면으로 부터 발생하는 진동을 시뮬레이션 시스템에 추가하였다. 노면 진동은 자동차 전용도로의 직진 구간에서 시속 60Km 로 주행하며 스티어링 휠에 부착된 가속도계를 통해 수집하였다. 수집된 데이터는 3축(x, y, z축) 데이터를 모두 포함하기 때문에 이를 1축 데이터로 변환할 필요가 있었다. 이에 Figure 1.7과 같이 3축으로 측정된 노면 진동에 대해 Landin et al. [41]에서 소개한 DFT321방식으로 한 축(z 축)데이터로 가공 하여 시뮬레이션 시스템에 부착된 웨이커에 적용하였다. 웨이커가 부착된 시뮬레이션 환경은 Figure 1.8 에서 확인할 수 있다.

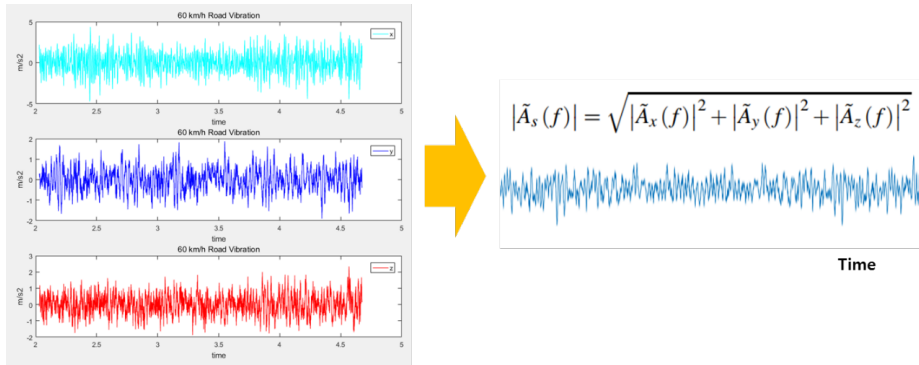


Figure 1.7: 3 축 가속도계로 측정된 노면 진동 및 DFT 321을 통해 가공된 1축 노면 진동



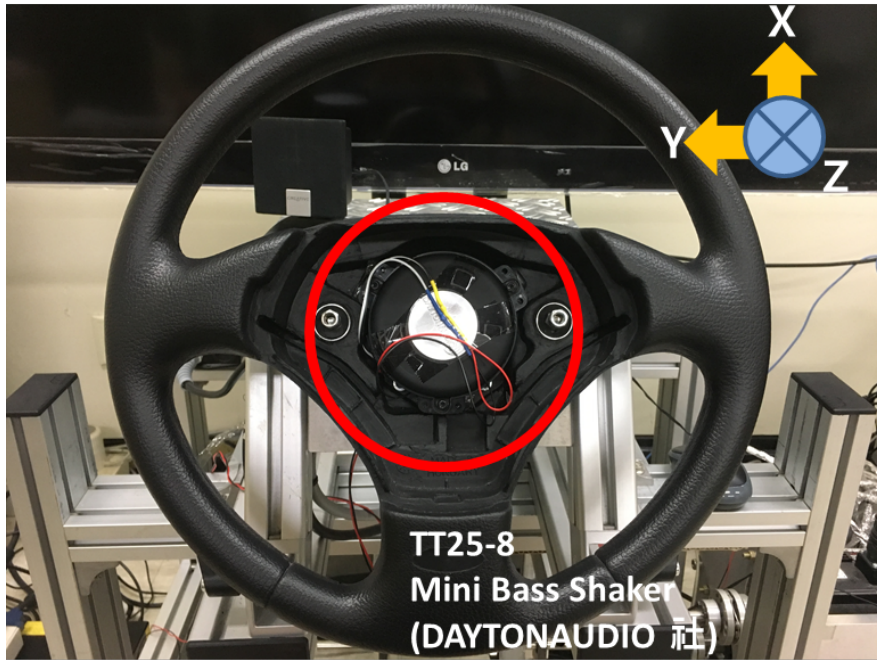


Figure 1.8: 노면 진동을 묘사하기 위해 운전 시뮬레이터의 스티어링 휠에 부착된 쉐이커

## 1.9 Contribution

관련 연구 및 기술들을 조사한 결과 차선 이탈 경고 시스템에 촉각을 활용하는 것에 대해 경고 시스템으로 성능은 충분히 검증이 되어 있으나, 토크 진동에 대한 파라미터의 종류에 대해서는 깊게 연구된 바가 없고 주관적 만족도에 대한 감성 평가 역시 충분한 수준으로 이루어지지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 경고 신호를 충분히 인지할 수 있는 동시에 조향에 영향을 미치지 않으며, 다른 Modality에 비해 반응 속도가 우수하고, 감성 품질이 높은 Steering wheel oscillation 토크 패턴을 통해 운전자에게 효과적이며 효율적으로 경고 패턴을 제공할 수 있는 방법을 찾자는 목표로 아래와 같은 연구를 수행하였다.

1. 기존에 연구되었던 토크 진동 파라미터인 주파수, 파형, 진폭(세기)를 기점으로 패턴을 제작할 파라미터의 범위를 설정하기 위해 각 주파수에 따른 진폭(토크의 크기)의 인지 강도를 조절한다.
2. 각 주파수 및 인지강도가 고려된 진폭의 세기에 따른 Adjective rating 및 주파수 및 진폭의 조합에 따른 주관적 선호도(만족도) 조사를 수행한다.
3. 운전자가 가장 선호하는 주파수 대역과 토크의 세기를 찾고, 해당 조건을 기준으로 리듬 기반의 토크 진동 패턴을 제작하여 운전자의 주관적 선호도 조사를 수행한다.
4. 비대칭 토크 펄스 방식을 응용한 방향성을 제공할 수 있는 토크 진동을 디자인하고, 방향성 정보 인지율을 찾기 위해 좌, 우 각각에 가하는 토크 진동의 주파수의 범위 변수로 하여 토크 진동을 통한 방향성 정보 인지율을 찾고, 조합된 형태의 방향성 진동에 대한 주관적 선호도 조사를 수행한다.

본 연구는 토크 진동 피드백을 기반으로 방향성 정보를 제공할 수 있는 진동의 범위를 찾는다는 점과 기존 연구에서 주로 수행하지 않았던 경고 신호 감성 품질에 초점을 맞춰 연구를 수행했다는 점에서 의의를 갖는다고 볼 수 있다.

## II. 토크 진동 패턴

### 2.1 Stimulus Intensity Function (Equal Sensation Contour)

주파수와 진폭에 따른 선호도를 측정하기에 앞서 진동의 주파수에 따른 인지 세기(강도)를 맞추기 위한 실험이 필요했다. 이에 인지 강도 실험을 진행하기 위한 기준 자극 설정을 아래와 같이 분류하고 수행하였다. 인지 강도는 약, 중으로 분류하고, 50 Hz sin파를 기준으로 설정한 뒤, 토크 진동에 대한 인지 강도의 DL을 정신 물리학 실험 중 하나인 Method of adjustment 방식을 통해 0.1 N·m씩 증감하며 수행하였다 [39]. 해당 실험은 Stimulus intensity function 도출을 위한 기준 자극을 찾는 실험으로, 2명(27세 남성, 30세 남성)의 파일럿 실험을 통해 기준을 설정하였다. 그 결과 50 Hz sin파를 기준으로 인지 강도 크기가 중인 진폭(토크의 크기)은 5 N·m로, 인지 강도 크기가 약인 진폭은 2 N·m로 결정되었다.

#### 2.1.1 피실험자 정보

23에서 30세(평균 25.7세, 남자 9명 여자 1명)의 감각기관에 문제가 없는 총 10명의 피실험자가 참여하였다. 피실험자에게 Methods of adjustment 방식에 대한 설명을 충분히 이해시킨 뒤 실험을 진행하였다.

#### 2.1.2 장비 정보

실험에 사용한 장비는 독일 SENSODRIVE 社의 SENSO-Wheel SD-LC (Figure 2.1)이고, 해당 장비에 대한 자세한 스펙은 Table 2.1과 같다.



Figure 2.1: 운전 시뮬레이터에 장착된 스티어링 휠: SENSO-Wheel SD-LC

<b>Rated torque</b>	7.50 N·m
<b>Maximum torque</b>	16.58 N·m
<b>Torque resolution</b>	0.03 N·m
<b>Cogging torque</b>	Very low
<b>Angle resolution</b>	0.009° incr. + index
<b>Gear ratio</b>	direct drive
<b>Backlash</b>	none
<b>Max.speed</b>	>200 rpm
<b>Interface</b>	CAN (1 Mbaud)
<b>Cycle time</b>	normal mode 1 ms basic mode 0.3 ms

Table 2.1: SENSO-Wheel SD-LC 장비 사양

SENSO-Wheel 이 낼 수 있는 최대 토크의 크기는 16.58 N·m이고, 정격 사용 토크의 크기는 7.5 N·m이다. SENSO-Wheel은 스티어링 휠의 토크 (Torque) 값과 댐핑 (Damping) 값 그리고 마찰력 (Friction) 값과 스프링 강성 (Spring stiffness)

값을 프로그램 할 수 있다는 장점을 갖는다. 실험을 위해 800 Hz로 토크 명령어를 SENSO-Wheel에 전달 할 수 있도록 수정하였다.

### 2.1.3 실험 절차

기준 자극(50 Hz, 인지 강도 중: 5 N·m; 인지 강도 약: 2 N·m)을 기준으로 본격적인 Stimulus intensity function을 구하기 위해 실험 주파수의 범위를 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 18, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70 Hz로 나눈 뒤, 각 주파수에 따라 기준 자극과 인지 강도가 같은 진폭을 찾는 실험을 진행하였다. 피실험자는 운전 시뮬레이터에 앉아서 실험 내용에 대한 설명을 듣고, 두 손으로 핸들을 10시 10분 각도로 잡도록 하였다. 기준 자극을 3초간 느낀 다음 실험 주파수에 대해 기준 자극과 인지 강도가 같은 진폭을 찾도록 하였다. 기준 자극은 횡수에 상관없이 자유롭게 느낄 수 있도록 디자인 되었으며, 기준 자극과 실험 자극을 번갈아가면서도 느낄 수 있도록 설계하였다. 실험 자극 역시 3초를 기본으로 제공하였으며, 자극을 더 느끼고 싶을 경우 자유롭게 토크 진동을 느낄 수 있도록 하였다. 실험은 약 45분정도 소요되었다. 피실험자는 up/down을 말하면 실험 진행자가 진폭의 크기를 0.1 N·m씩 더하거나 빼는 형태로 진행되었다

### 2.1.4 결과 및 토론

실험 결과를 말하기에 앞서 인지 강도의 레벨을 약, 중으로 구분한 이유에 대해 설명하겠다. 토크 진동의 경우 스티어링 휠모터의 제어 성능 한계로 진동 모터에 비해 낮은 주파수 대역을 사용한다. 낮은 주파수와 큰 진폭을 기반으로 디자인된 진동에 대해 상대적으로 부정적인 느낌을 제공한다는 Yoo et al. [34], [35]의 연구 결과를 기반으로 이번 실험에서는 인지 강도 레이 강한 진동은 배제하고 실험을 수행하였다. 이번 실험을 통해 도출한 결과는 Figure 2.2, Figure 2.3과 같다. x축은 주파수를 의미하고, y축은 토크 진동의 진폭 값을 의미한다. 같은 레벨의 인지 강도에 대해 주파수에 따라 진폭의 크기가 비례하는 것을 확인할 수 있었다. 피실험자들은 10Hz이하의 토크 진동에 대해 진동이 아닌 흔들림 같다는 의견을 제시하였고, 비슷한 진동이 여러 번 나오는 것 같다는 의견을 제시하였다.

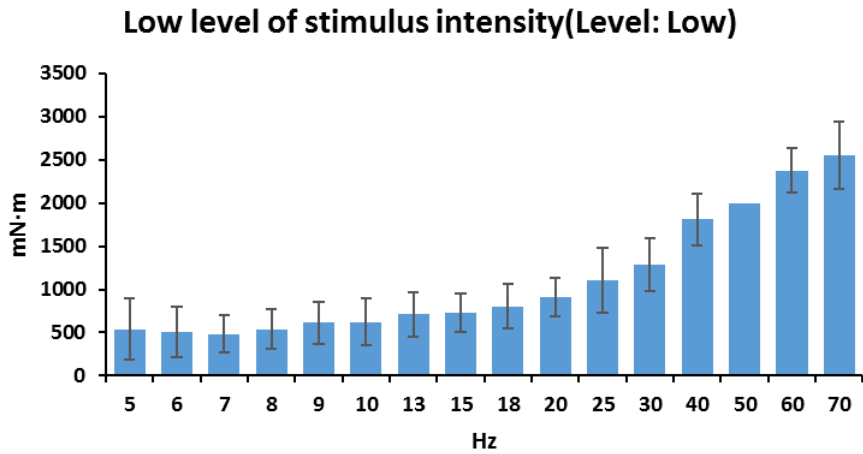


Figure 2.2: 약한 크기의 인지 강도에 대한 Stimulus Intensity Function, 에러바는 표준편차를 의미

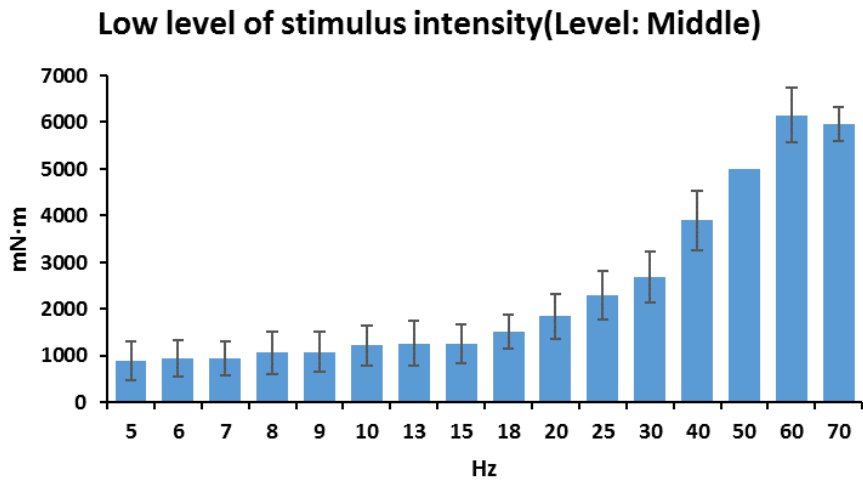


Figure 2.3: 중간 크기의 인지 강도에 대한 Stimulus Intensity Function, 에러바는 표준편차를 의미

## 2.2 토크 진동의 진폭 (인지 강도) 및 주파수에 따른 선호도 평가 및 형용사 평가(Adjective Rating)

이번 실험은 토크 패턴 디자인을 하기 위한 준비 실험으로, 이번 실험을 통해 주파수와 진동의 세기에 대한 운전자의 선호도를 알아보고, 각 토크 진동에서 느껴지는 느낌을 형용사 평가 (Adjective rating) 통해 알아보고자 설계 되었다.

### 2.2.1 피실험자 및 장비 정보

감각기관에 문제가 없고, 운전 경험이 있는 22세에서 52세(평균 36.6세, 남자 25명 여자 14명)인 39명의 피실험자가 참여하였다. 피실험자는 모두 한국인이었다. 실험은 약 한시간 정도 소요되었으며, 실험에 참여한 피실험자에게 2만원의 수고비를 지급하였다. 실험에 사용한 장비는 Stimulus intensity function 실험에 사용한 장비와 동일하고, 운전 시뮬레이터는 Figure 2.4과 같이 설치 하였다.



Figure 2.4: 운전 시뮬레이터가 설치된 모습

### 2.2.2 실험 절차

피실험자는 운전 시뮬레이터에 앉아 실험 방식에 대한 설명과 설문 항목을 듣고, 운전 시뮬레이터의 화면을 응시하며 스티어링 휠에 손을 10시 10분 각도에 맞춰 잡도록 하였다. 다음으로 차선 이탈 경고 시스템에 대한 이해를 돕기 위해 차선 이탈 경고 기능에 대한 이해를 돕기 위해 Figure 2.5와 같은 시뮬레이션을 확인하도록 하였다.



Figure 2.5: 시각 경고 기반 차선 이탈 경고 시스템이 더해진 운전 시뮬레이션 화면

시뮬레이션에서 사용된 차선 이탈 경고는 시각을 통한 경고 시스템이다. 피실험자가 차선 이탈 경고에 대한 충분한 이해가 되었다고 판단되면, 실험을 시작하였다. 실험에 사용한 주파수와 진폭의 조합은 Table 2.2와 같다.

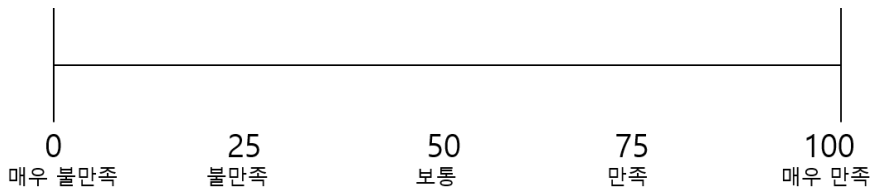


Figure 2.6: 토크 진동에 대한 주관적 선호도 평가지

총 8개의 주파수에 대해 각각 인지 강도를 중간 세기와 약한 세기로 나눠 조합



	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz	60 Hz
Low Level of Perceived Intensity (mN·m)	538	622	733	911	1100	1288	1811	2000	2377
Middle Level of Perceived Intensity (mN·m)	888	1222	1266	1844	2300	2677	3900	5000	6155

Table 2.2: 주파수별 인지 강도에 따른 진폭의 크기

된 16가지 진동에 대한 평가를 수행하였다. 진동이 나오는 순서는 임의로 순서로 구성하였다. 피실험자는 진동을 3초동안 느끼게 되고 해당하는 진동에 대한 주관적 선호도(만족도)를 Figure 2.6와 같이 0점부터 100까지의 점수로 표현하도록 하였다. 점수 아래에는 가이드 점수(0: 매우 불만족, 25: 불만족, 50: 보통, 75: 만족, 100: 매우 만족)를 제공하였다. 양손을 스티어링 휠에 올려두고 실험을 진행해야하기 때문에 피실험자는 화면을 응시하며 해당 진동에 대한 점수를 구두로 표현하도록 하였다. 피실험자가 진동을 더 느끼고 싶을 경우에는 자유롭게 진동을 느끼도록 하였다. 선호도와 적합도 평가가 끝나면, 동일 진동을 한번 더 느낀 후 해당 진동에 대한 형용사 평가를 수행하도록 하였다. 형용사 평가의 경우 Hwang et al. [40]에서 수행한 바와 유사하게 진동을 자유롭게 느끼게 하고, 해당하는 진동의 느낌을 형용사로 평가하도록 하였다. 형용사 평가에 사용된 형용사들은 Table 2.3에 정리되어 있다. 즉, Figure 2.7과 같이 상반되는 형용사를 양 옆으로 보이고, 해당하는 정도를 구두로 표현하도록 하였다. 예를 들어 실험진동에 대한 무거움에 대한 평가 진행 시 (Figure 2.7) 피실험자에게 무거운 느낌이 강하게 든다면 100에 가까운 숫자를 입력하고, 가벼운 느낌이 강하게 든다면 0에 가까운 숫자를 입력하도록 하였다.



Figure 2.7: Adjective Rating 예시

Adjective 1	Adjective 2
Clear	Unclear
Rhythmical	Arrhythmic
Urgent	Non-urgent
Smooth	Bumpy
Heavy	Light

Table 2.3: Adjective Rating에 사용된 형용사

총 5 블록의 주관적 선호도 평가와 형용사 평가를 수행하였고, 한 블록이 끝나면 쉬는 시간을 갖도록 하였다. 처음 2 블록의 결과는 예비실험으로 분류하여 분석에 포함하지 않았다.

### 2.2.3 결과

평가 결과는 Figure 2.8과 같다. y축의 값은 선호도 점수를 의미한다. 50 Hz의 토크 진동의 경우 실험 도중 장비의 내구성 문제로 공진이 발생하여 분석에서 제외하였다. 주관적 선호도의 경우 진폭이 크고(인지 강도의 세기가 중인) 비교적 높은 주파수에 대해 높은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다. 특히, Figure 2.8에서 확인할 수 있듯이 40 Hz, 인지 강도의 세기가 중인 항목에 대해 65.7점(보통과 만족 사이의 점수)으로 가장 높은 점수를 보임을 확인할 수 있었다.

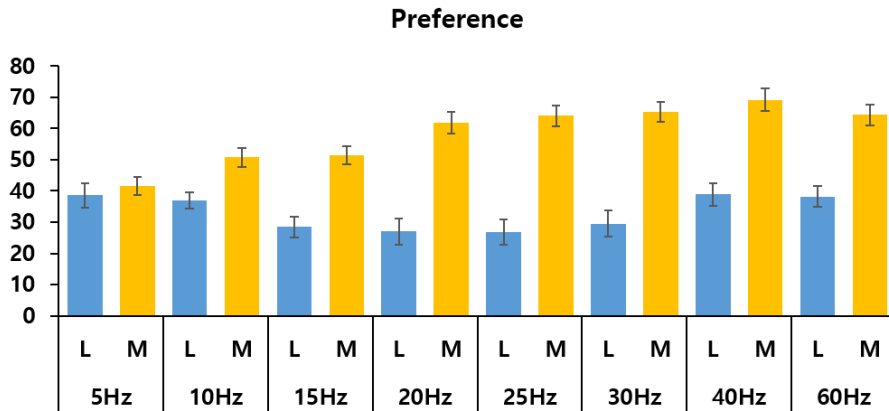


Figure 2.8: 주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 선호도 조사 결과, 파란색 바: 인지 강도 약, 노란색 바: 인지강도 중, 에러 바는 표준 오차를 의미

주파수와 진폭에 대해 2-way ANOVA를 통해 통계 분석을 수행한 결과는 Table 2.4과 같다.

Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
FREQ	F(7, 266) = 12.68	<.0001
AMP	F(1, 38) = 94.10	<.0001
FREQ*AMP	F(7, 266) = 32.53	<.0001

Table 2.4: 주파수 및 진폭(인지 강도)에 대한 주관적 선호도 2-way ANOVA, 종속 변수: Preference

통계분석 결과 주파수와 진폭 모두  $p < 0.05$  의 결과를 보임을 확인할 수 있었다. 이에 주파수와 진폭에 대해 Tukey's HSD test를 사용하여 사후 검정을 수행하였다. 해당 결과는 Figure 2.9, 2.10을 통해 확인할 수 있다. Box plot의 y축은 선호도 점수를 의미한다. 먼저 진폭 (인지 강도)에 대한 분석결과를 보면 진폭이 큰(인지 세기가 중간) 토크 진동이 58.2점(보통과 만족 사이의 점수)으로 진폭이 작은 토크 진동에 대한 확실한 차이를 보임을 확인할 수 있었다.

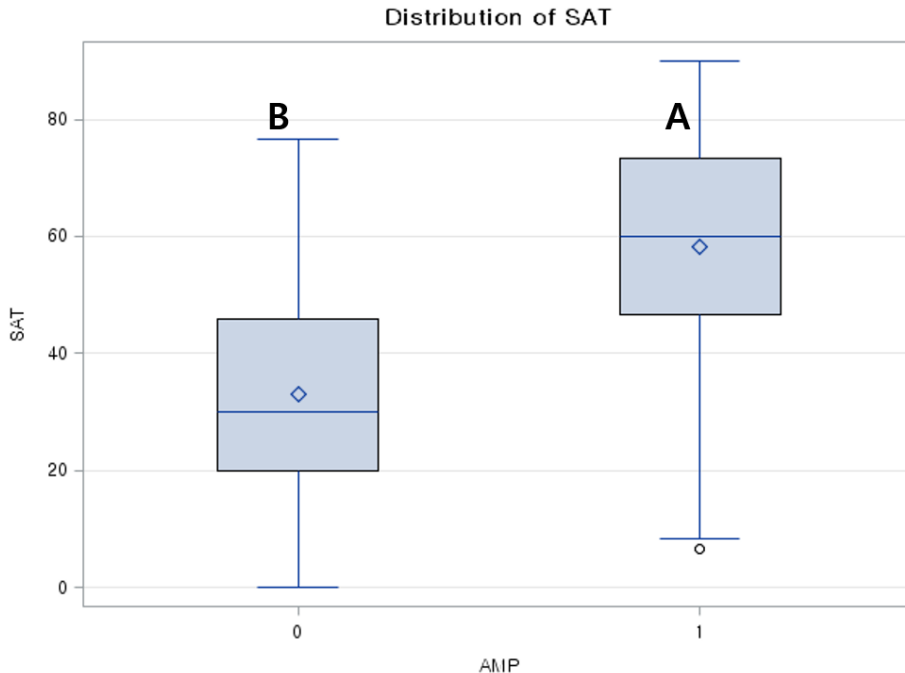


Figure 2.9: 진폭의 크기에 따른 선호도 사후 검정(Tukey's grouping)

	Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
Amp: low	FREQ	F(7, 266) = 9.36	<.0001
Amp: mid	FREQ	F(7, 266) = 30.18	<.0001

Table 2.5: 진폭 (인지 강도)을 고정한 주파수에 대한 Simple Effect test 결과

다음으로 진폭의 크기에 따른 (인지강도의 세기가 중간인) 주파수에 대한 Simple effect test를 수행하였다. 해당 결과는 Table 2.5에서 확인할 수 있다. 높은 만족도를 보이는 진폭이 큰 진동을 기준으로 주파수에 따른 차이를 보기 위해 진폭이 큰 진폭에 대한 주파수 사후 검정을 수행하였다. 결과는 Figure 2.10과 같다. 주파수에 대한 주관적 선호도는 보통과 만족 사이의 그룹 A( $\geq 20$  Hz)와 보통의 그룹 B(10, 15 Hz) 그리고 불만족에 가까운 그룹 C(5 Hz)로 나뉠 수 있었다.

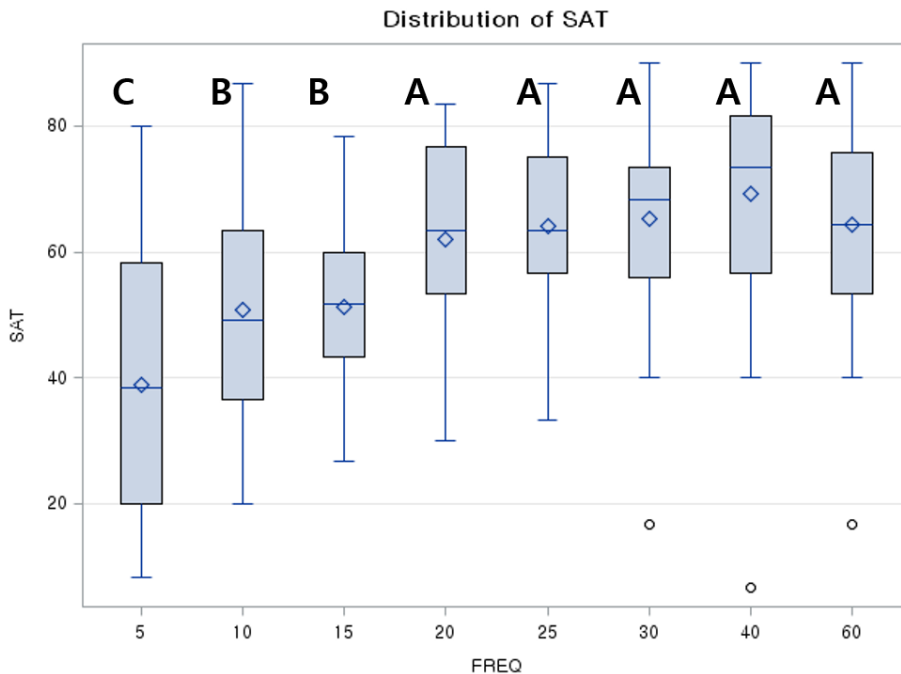


Figure 2.10: 주파수에 따른 선호도 사후 검정 (Tukey's grouping), 인지 강도(진폭): 중

다음으로 형용사 평가 (Adjective rating)에 대한 결과 도표를 보이도록 하겠다. 먼저 토크 진동의 명확한(Clear) 정도(0: 불명확함 없음, 100: 명확함)에 대한

평가 결과 주파수에 대한 큰 차이를 확인하지 못하였으며, Figure 2.11과 같이 인지 강도가 큰 진동에 대해 명확한 정도가 높음을 확인할 수 있었다. 피실험자들은 5 Hz의 토크 진동에 대해 핸들의 움직임이 좌우로 흔들리는 듯한 형태의 진동이기에 때문에 진폭이 작더라도 비교적 명확한 느낌을 받았다고 답변하였다.

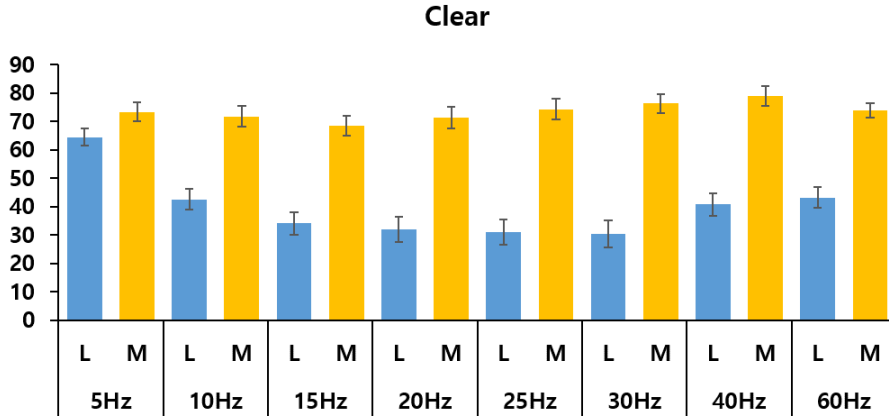


Figure 2.11: 주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Clear) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미

다음으로 진동의 느낌의 경쾌한(Rhythmical) 정도(0: 경쾌하지 않다, 100: 경쾌하다)에 대한 평가 결과를 살펴보도록 하겠다. Figure 2.12에서 확인할 수 있듯이 경쾌함에 대한 평가 결과는 만족도와 유사한 양상을 보임을 확인할 수 있었다. 즉, 큰 진폭의 높은 주파수일수록 경쾌한 정도가 높음을 확인할 수 있었다.

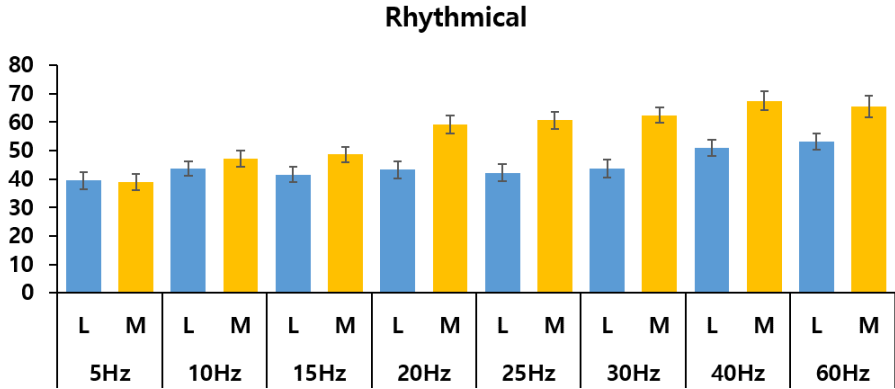


Figure 2.12: 주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Rhythmical) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미

다음은 급박한(Urgent) 정도(0: 급박하지 않다, 100: 급박하다)에 대한 평가 결과이다(Figure 2.13). 급박한 진동의 경우 역시 경쾌한 정도와 유사한 양상을 보임을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 약한 진폭의 5 Hz 토크 진동에 대해 상대적으로 높은 점수를 보임을 확인할 수 있었다

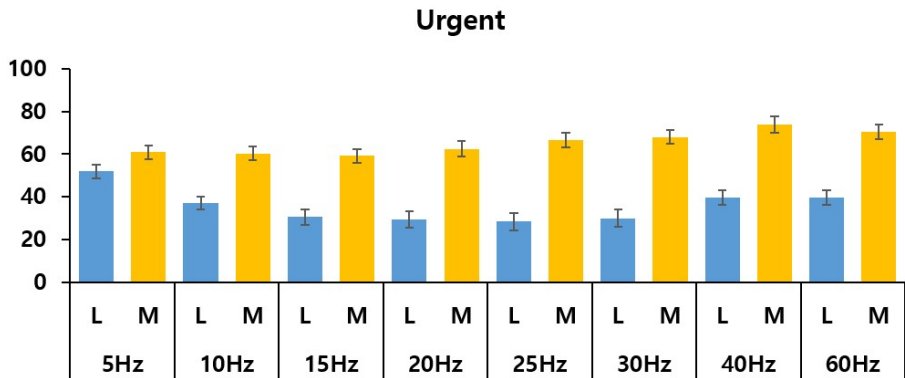


Figure 2.13: 주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Urgent) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미

부드러운(Soft) 정도(0: 거칠다, 100: 부드럽다)에 대해서는 진폭이 크고 낮은 주파수에 대해 부드러운 정도가 높았음을 확인할 수 있었으며, 진폭이 낮은 영역에 대해서도 진폭이 큰 영역과 유사한 양상을 보임을 확인할 수 있었다(Figure 2.14).

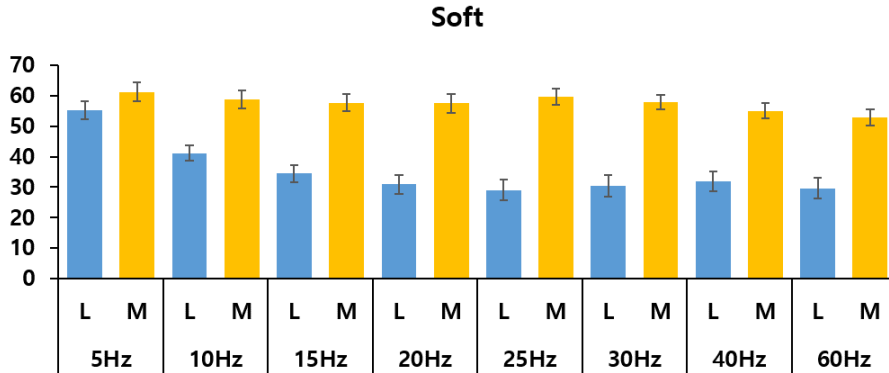


Figure 2.14: 주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Soft) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미

다음으로 진동의 무거운(Heavy) 정도(0: 가볍다, 100: 무겁다)에 대한 평가 결과 이다(Figure 2.15). 진동의 무거운 정도에 대해서는 다른 형용사들과는 다르게 진폭이 작은 토크 진동에 대해 무거운 느낌을 제공하였음을 확인할 수 있었다. 주파수에 대해서는 높은 주파수일수록 비교적 진동이 무겁다고 답변한 결과를 확인할 수 있었다.

진동에 대한 주관적 만족도와 Adjective rating간의 상관관계를 분석하기 위해 Correlation matrix를 구해 상관 분석을 수행해보았다. 해당 결과는 Table 2.6와 같다.



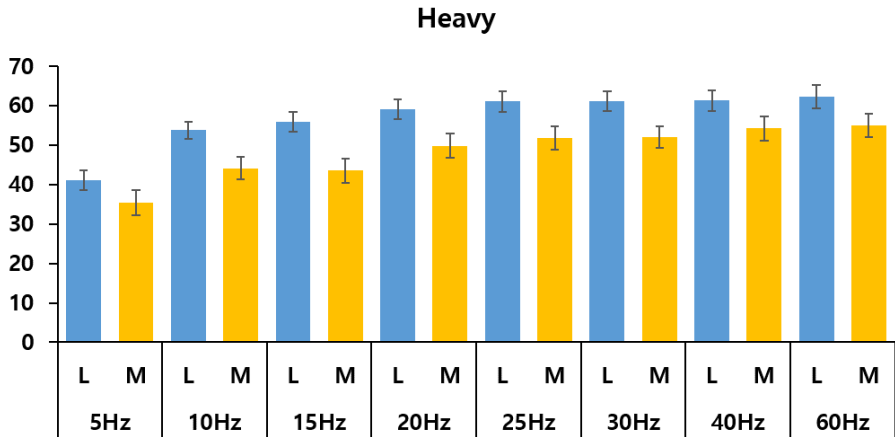


Figure 2.15: 주파수 및 진폭(인지 강도)에 따른 Adjective rating(Heavy) 조사 결과, 에러 바는 표준 오차를 의미

	SAT	CLEAR	RHYTHM	URGENT	SOFT	HEAVY
SAT	1					
CLEAR	0.79	1.00				
RHYTHM	0.95	0.60	1.00			
URGENCY	0.87	0.99	0.71	1.00		
SOFT	0.64	0.96	0.39	0.90	1.00	
HEAVY	-0.10	-0.67	0.18	-0.55	-0.82	1.00

Table 2.6: 선호도와 Adjective Rating간의 Correlation Matrix

상관 분석 결과 만족도와 분명한 정도 그리고 급박한 정도에 대해 약 0.8 이상의 높은 상관 관계가 있음을 발견할 수 있었다. 즉, 차선 이탈 경고를 위한 토크 진동에 대한 선호도는 분명하고 경쾌하며 급박한 느낌을 제공하는 진동일수록 높은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다.

## 2.3 토크 진동 패턴 (리듬)에 대한 주관적 선호도 평가

다음으로 이전 Chapter에서 찾은 선호도가 가장 높은 주파수인 40 Hz와 높은 선호도를 보인 큰 진폭을 기준으로 제작된 토크 진동 패턴에 대한 주관적 선호도 조사를 수행하였다. 토크 진동 패턴은 Figure 2.16과 같이 Period, Period에 대한 진동 비율(이하 Ratio), 그리고 총 재생시간(Total Time) 3개의 파라미터로 제작하였다.

전체 재생 시간은 1초, 2초, 3초로 구성하였고, Period와 Ratio는 Table 2.7와 같이 구성하였다. 즉, 전체 재생시간이 2초이고 Period가 0.25초 이고 Ratio가 8:2 일 경우 0.2초간 토크 진동을 재생하고 0.05초 동안 진동을 제공하지 않는 형태를 총 8번( $0.25\text{ s} \times 8 = 2.0\text{ s}$ ) 반복한다. Period 0.75초에 대해서는 전체 재생 시간이 끝날때 Period 진동이 같이 끝나지 않는 경우가 발생하는데(재생중에 끝나는 경우) 이에 대해서 전체 재생 시간이 끝나는 순간 가하는 Torque의 크기가 0 N·m일 경우 이기 때문에 중간에 끝나더라도 스티어링 휠이 멈춘 상태가 유지된다. 예를 들어 총 재생시간이 1초일 때, Period가 0.75초이고 Ratio를 8:2인 경우 한 Period가 끝나고 두번째 Period에 대해 0.3초 동안만 진동을 재생한다. 하지만 이번 실험에서 사용하는 주파수는 40 Hz로 0.3초가 되는 순간 토크의 크기는 0 N·m 이므로 윈도우(Window)를 씌워 평활화(Smoothing) 시킬 필요가 없다. 즉, 모든 파라미터 조합들은 위와 같이 평활화없이 재생해도 전체 재생 시간이 끝나는 순간의 토크 크기는 0 N·m이 된다.

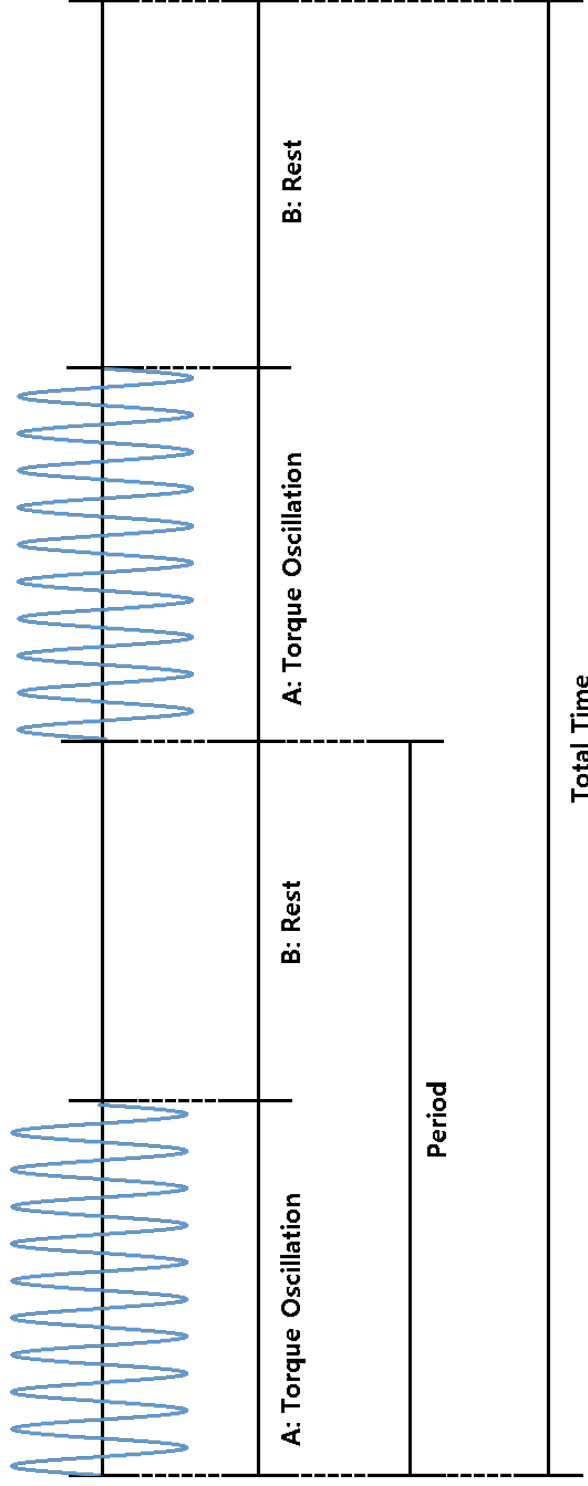


Figure 2.16: 토크 진동 패턴 제작에 사용한 파라미터

Period(s)	Ratio(A:B)	Length of A(s)	Length of B(s)
0.25	2:8	0.05	0.2
	5:5	0.125	0.125
	8:2	0.2	0.05
0.5	2:8	0.1	0.4
	5:5	0.25	0.25
	8:2	0.4	0.1
0.75	2:8	0.15	0.6
	5:5	0.375	0.375
	8:2	0.6	0.15
1.0	2:8	0.2	0.8
	5:5	0.5	0.5
	8:2	0.8	0.2
Full	10:0	Full	0

Table 2.7: Period와 Ratio에 따른 A와 B의 시간

### 2.3.1 피실험자 및 장비 정보

감각기관에 문제가 없고, 운전 경험이 있는 20에서 30세(평균 25.1세, 남자 13명 여자 8명)인 21명의 피실험자가 참여하였다. 실험은 약 30분 정도 소요되었으며, 실험에 참여한 피실험자에게 7천원의 참여비를 지급하였다. 실험에 사용한 장비는 Stimulus intensity function 실험에 사용한 장비와 동일하다.

### 2.3.2 실험 절차

피실험자는 운전 시뮬레이터에 앉아 차선 이탈 경고 시스템에 대한 설명과 실험의 목적 및 선호도 평가에 대한 설명을 듣고, 운전 시뮬레이터의 화면을 응시하며 스티어링 휠에 손을 10시 10분 각도에 맞춰 잡도록 하였다. Period와 Ratio의 13가지 조합에 대해 전체 재생시간 1, 2, 3초 3개의 조합을 가해 총 39가지 토크 진동에 대한 평가를 진행하였다. 실험 방식은 다음과 같다. 39가지 진동 중 임의로 선택된 진동을 재생하고, 해당하는 진동에 대한 주관적 선호도를 Figure 2.6처럼 0-100점의 점수를 구두로 말하도록 하였다. 39가지의 토크 진동은 임의로 재생되도록 하였다.

실험 블록은 5개로 구성되었으며, 이 중 처음 2개의 실험 블록은 결과로 사용하지 않았다.

### 2.3.3 결과

전체 조합에 대한 실험결과는 Figure 2.17에서 확인할 수 있다. Figure 2.18, 2.19, 2.20는 전체 재생 시간에 따른 Period와 Ratio의 조합을 나타낸다. y축 값은 각 토크 진동에 대한 주관적 선호도 점수를 의미한다. 피실험자들은 대부분 스타 카토와 같은 느낌을 제공하는 진동과 Full 진동에 대해 불쾌하다고 표현하였으며 Rest와 Torque oscillation의 비율이 같거나 Torque oscillation의 비율이 약간 더 긴 진동이 좋다고 표현하였다. 이에 대한 검증을 수행하기위해 3-way ANOVA test를 수행하였다. 수행 결과는 Table 2.8와 같다.

분석결과 전체 재생 시간에 대해서는 차이가 없음을 확인할 수 있었으며, Period에 대해 통계적으로 차이가 있음을 확인할 수 있었다. Ratio에 대해서는 p-value 0.0613으로 가설 기각의 유의 수준(<0.05)에는 미치지 못하지만, 유사치에 가깝기에 해당 파라미터에 대해서도 사후 분석을 수행하였다. Interaction term에 대해서는 Total \* Period, Total \* Ratio, Period \* Ratio에 대해 유의 수준 이하의 값이 나왔음을 확인할 수 있었다. 이에 대한 사후 분석은 Tukey's HSD test를 사용하였다.

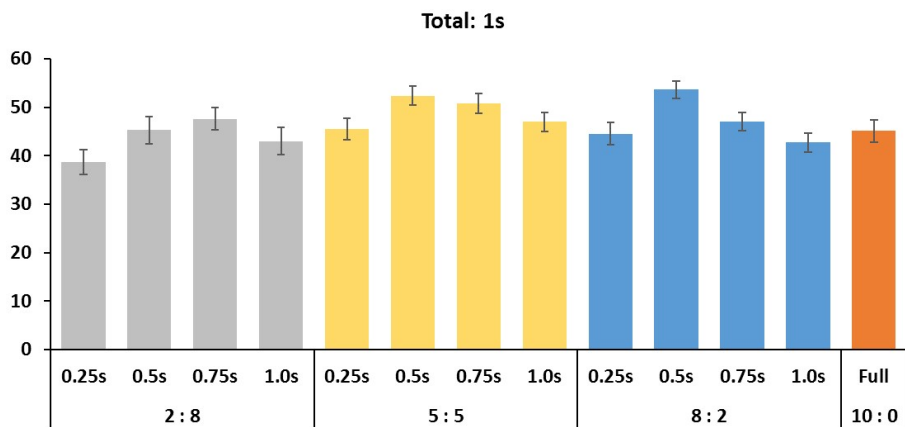


Figure 2.18: Period, Ratio의 조합에 대한 토크 진동 패턴 선호도 결과(Total Time=1초), 에러 바는 표준 에러를 의미

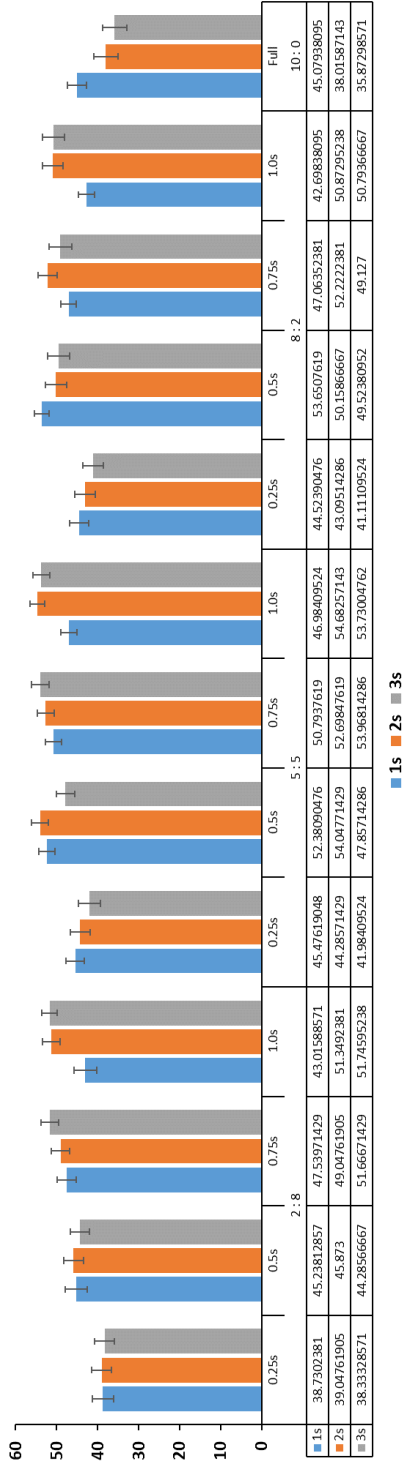


Figure 2.17: Period, Ratio, Total Time of the combination to 대한 토크 진동 패턴 신호도 결과, 에리 바는 표준 에리를 의미

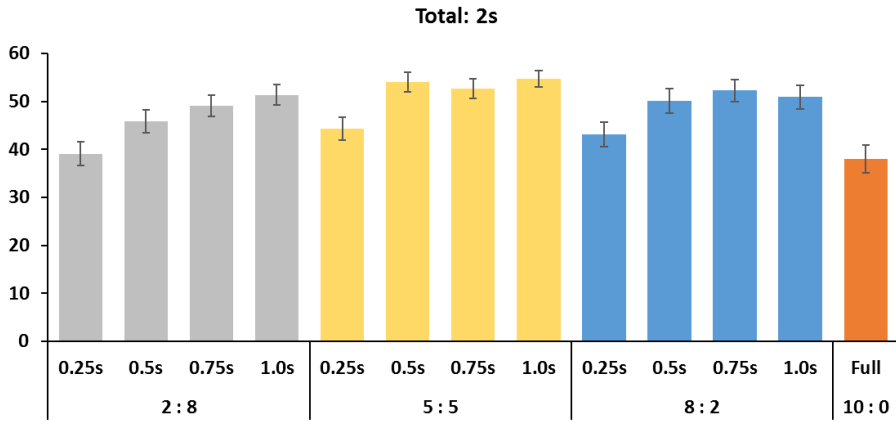


Figure 2.19: Period, Ratio의 조합에 대한 토크 진동 패턴 선호도 결과(Total Time=2초), 에러 바는 표준 에러를 의미

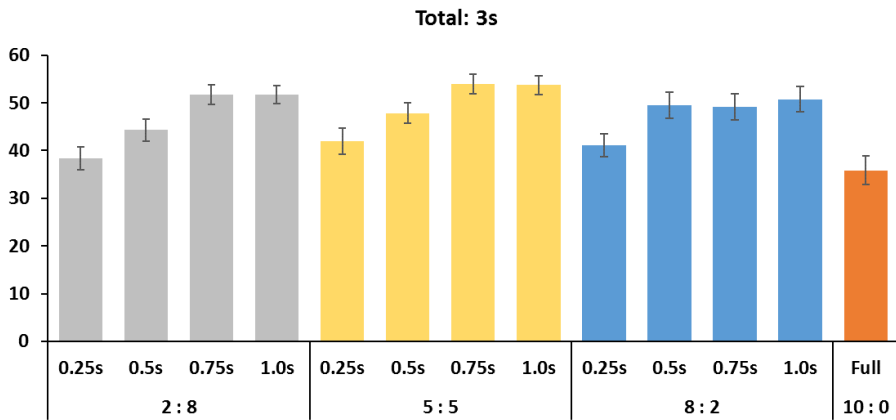


Figure 2.20: Period, Ratio의 조합에 대한 토크 진동 패턴 선호도 결과(Total Time=3초), 에러 바는 표준 에러를 의미

Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
Total Time	$F(2, 40) = 0.26$	0.7688
Period	$F(3, 60) = 6.02$	0.0012
Ratio	$F(3, 60) = 2.59$	0.0613
Total * Period	$F(6, 120) = 4.33$	0.0005
Total * Ratio	$F(6, 120) = 6$	<.0001
Period * Ratio	$F(9, 180) = 3.78$	0.0002
Total * Period * Ratio	$F(18, 360) = 0.65$	0.857

Table 2.8: Total Time, Period, Ratio에 대한 3-way ANOVA 결과

먼저 Period에 대한 사후 분석 결과를 살펴보겠다(Figure 2.21).

Period의 경우 가장 짧은 0.25초에 대해 선호도가 불만족에 가까운 결과 보임을 확인할 수 있었고 0.25 보다 긴 Period에 대해서는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

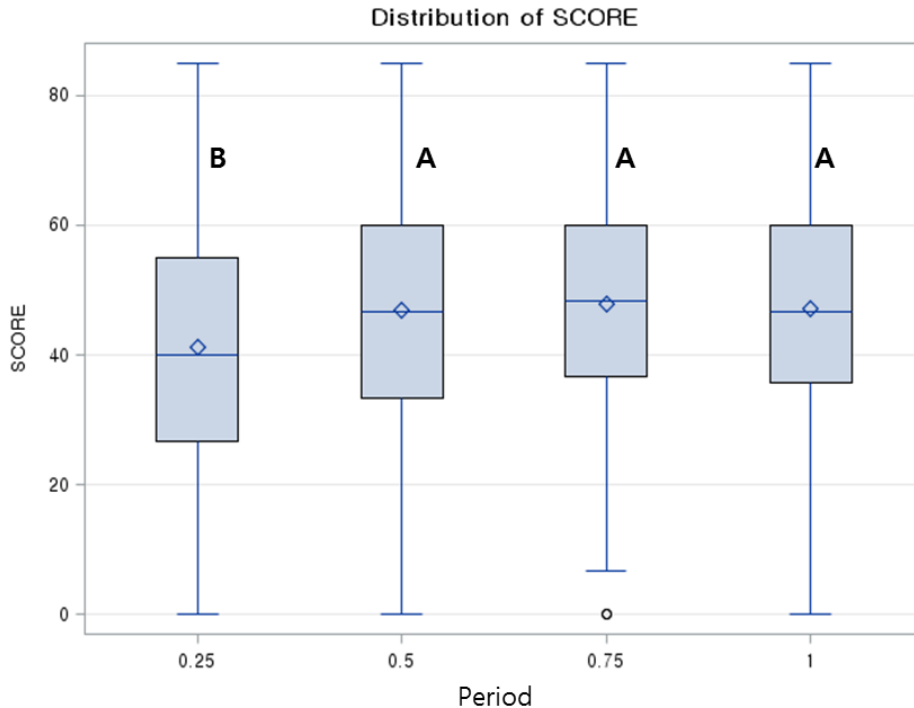


Figure 2.21: Period의 길이에 따른 선호도 사후 검정(Tukey's grouping)

다음으로 Ratio에 대한 사후검정결과를 살펴보도록 하겠다(Figure 2.22). Ra-



tio의 경우  $p < 0.05$  에 미치지지는 못하지만  $p = 0.06$ 으로 유사치에 가깝기 때문에 분석을 수행하였다. 분석 결과 Torque oscillation과 Rest의 비율이 5:5일 때 상대적 선호도가 높음을 확인할 수 있었고, 다음으로 8:2, 2:8, 10:0 순으로 토크 패턴에 대한 높은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다.

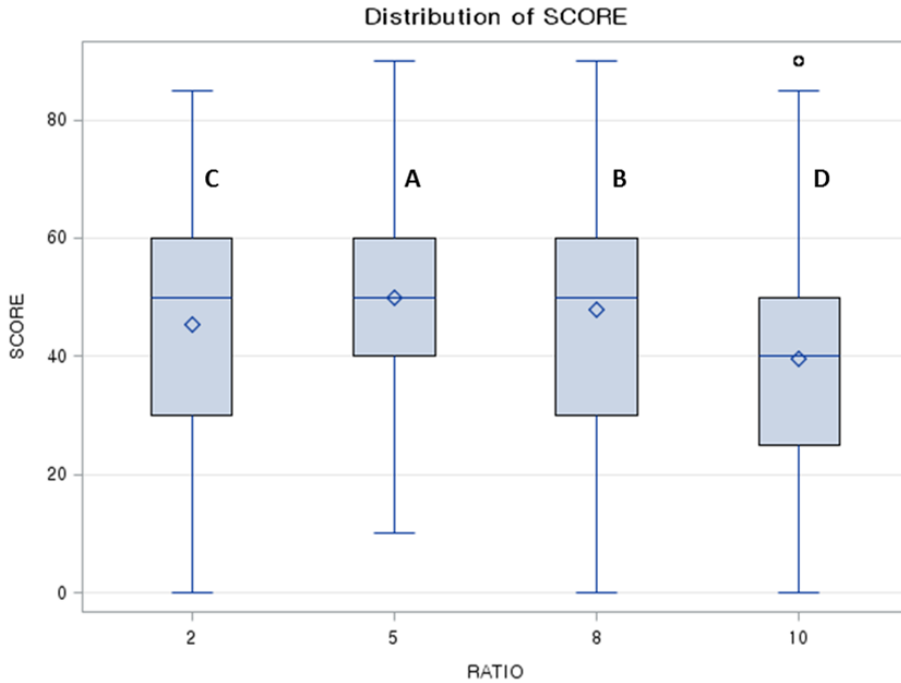


Figure 2.22: Period의 Ratio에 따른 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0

다음으로 Interaction term에 대해 Simple effect test를 수행하였다. Table 2.9은 Ratio를 기준으로 했을 때 전체 재생 시간에 대한 ANOVA 통계분석 결과이다.

	Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
Ratio 2:8	Total time	$F(2, 40) = 1.36$	0.2677
Ratio 5:5	Total time	$F(2, 40) = 0.49$	0.6137
Ratio 8:2	Total time	$F(2, 40) = 0.27$	0.761
Ratio 10:0	Total time	$F(2, 40) = 6.44$	0.0038

Table 2.9: Ratio를 기준으로 한 Total Time ANOVA 결과, 종속 변수: Preference

먼저 Ratio가 10: 0일 경우에 대해 ( $F(2, 40) = 6.44$ ,  $p = 0.0038$ ) 사후 검정 (Tukey's HSD test)을 수행하였다. 사후 검정 결과는 Figure 2.23 같다. 전체 시간 동안 진동을 주는 Ratio 10:0에 대해서 1, 2, 3초 중 가장 짧은 시간 동안 토크 진동을 제공하는 1초가 가장 높은 선호 점수(mean = 45.1)를 보였고, 2, 3초동안 연속적으로 지속되는 토크 진동에 대해서는 통계적 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 즉, Rest없이 지속적으로 진동을 제공할 경우 시간이 짧을수록 불쾌도가 낮음을 확인할 수 있었다.

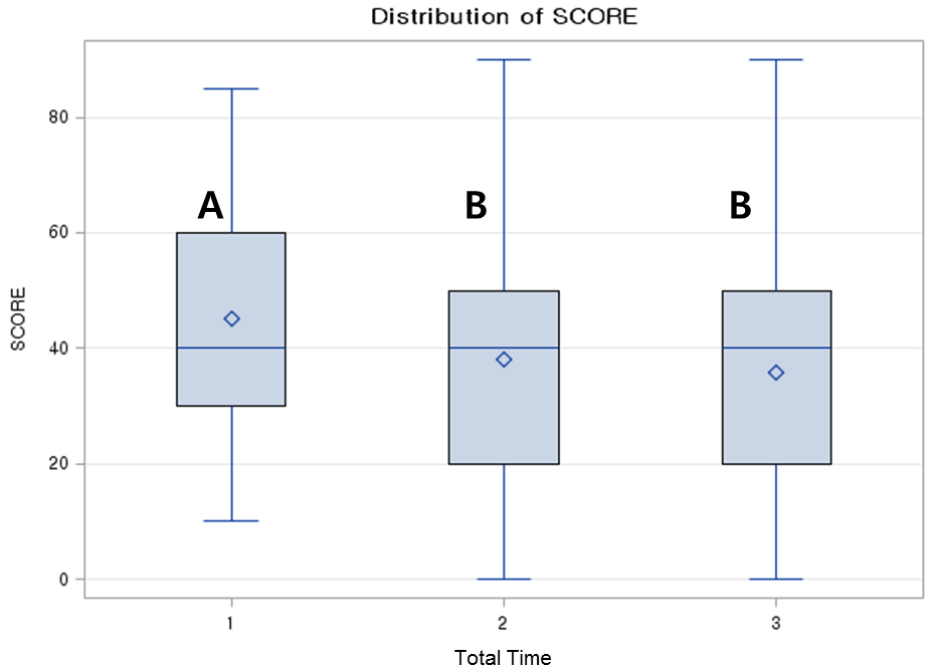


Figure 2.23: Total time에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Ratio = 10:0

다음으로 전체 재생 시간을 기준으로 해석을 진행해 보도록 하겠다. Table 2.10는 전체 재생 시간을 기준으로 뒀을 때 Ratio에 대한 통계분석 결과이다(종속 변수: Preference).

	Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
TOTAL 1	RATIO	$F(3, 60) = 0.84$	0.4771
TOTAL 2	RATIO	$F(3, 60) = 3.29$	0.0266
TOTAL 3	RATIO	$F(3, 60) = 3.95$	0.0122

Table 2.10: Total Time을 기준으로 한 Ratio ANOVA 결과, 종속 변수: Preference

분석결과 전체 재생시간 2초( $F(3, 60) = 3.29, p = 0.0266$ ), 3초( $F=3.95, p=0.0122$ )에 대해 귀무 가설이 기각됨을 확인할 수 있었다. 이에 두 항목에 대해 Tukey's HSD test를 사용하여 사후 검정을 수행하였다. Figure 2.24는 전체 재생시간이 2초일 경우에 대한 사후 검정 결과이다. 분석 결과 Torque oscillation과 Rest의 비가 5:5인 경우에 대해 비교적 가장 높은 선호도(mean = 51.4)를 보였음을

확인할 수 있었고, 지속적으로 진동을 제공하는 10:0의 비율에 대해서는 가장 낮은 선호도(mean = 38)를 보임을 확인할 수 있었다.

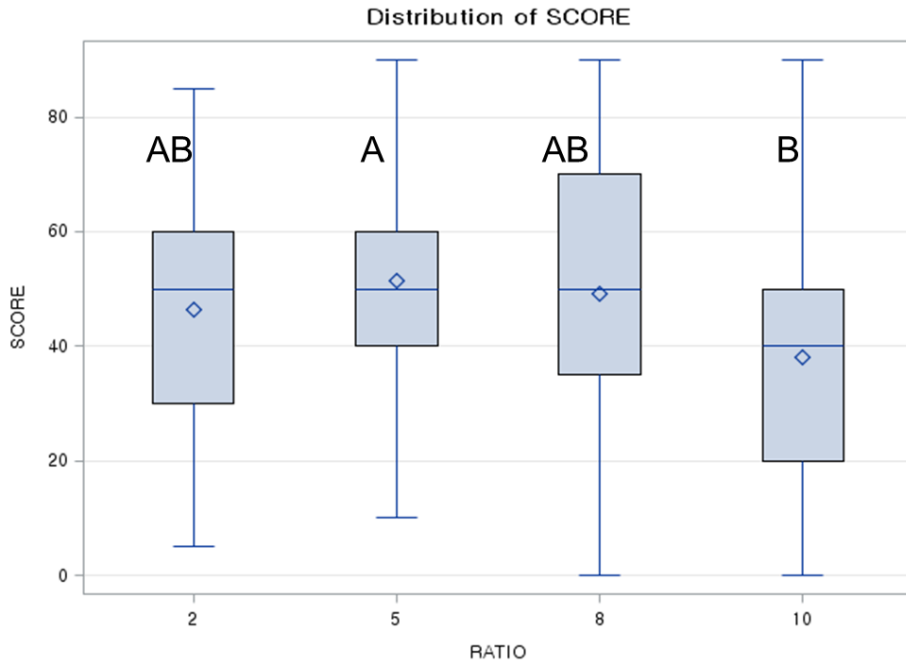


Figure 2.24: Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Total time = 2, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0

2.25은 전체 재생시간이 3초일때의 분석 결과이다. Torque Oscillation의 비율과 Rest의 비율이 5:5인 항목(mean = 49.8)과 8:2인 항목(mean = 48.2)에 대해 높은 점수를 보였으며, Rest 없이 3초동안 지속적으로 진동을 재생하는 10:0의 비율에 대해서는 가장 낮은 점수를 보임을 확인할 수 있었다.

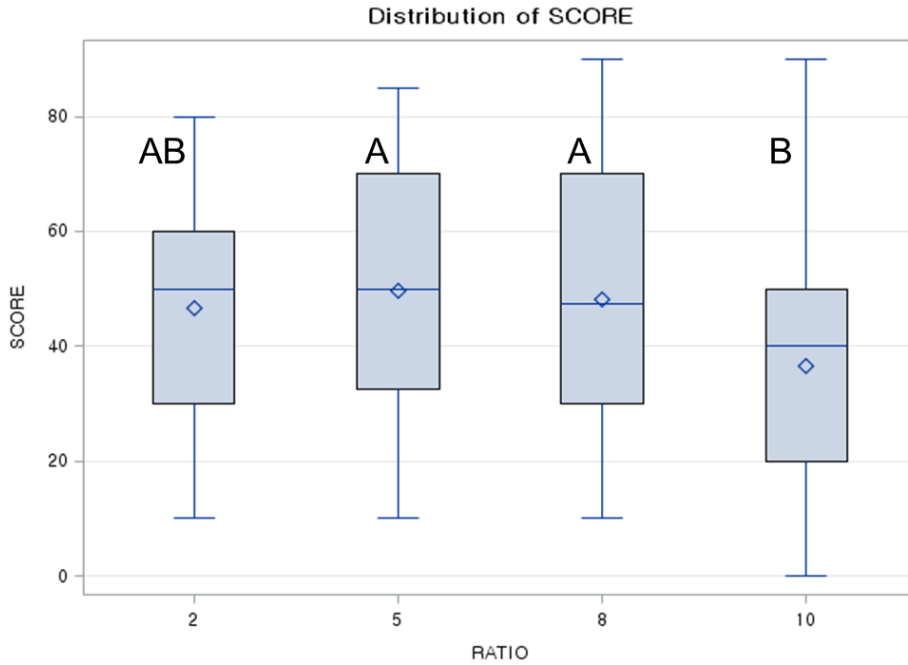


Figure 2.25: Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Total time = 3, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0

다음은 Period와 Ratio에 대한 Interaction term에 대한 Simple effect test에 대해 살펴보도록 하겠다.

Table 2.11 Ratio를 기준으로 했을 때 Period에 대한 ANOVA 통계분석 결과이다.

	Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
Ratio2:8	Period	$F(3, 60) = 7.35$	0.0003
Ratio5:5	Period	$F(3, 60) = 4.51$	0.0064
Ratio8:2	Period	$F(3, 60) = 3.51$	0.0206

Table 2.11: Ratio 를 기준으로 한 Period ANOVA 결과, 종속 변수: Preference

Torque Oscillation과 Rest의 비가 2:8, 5:5, 8:2인 항목에 대해 모두 귀무가설이 기각됨을 확인할 수 있었다. 이에 모든 항목에 대해 Tukey's HSD test를 사용하여 사후검정을 수행하였다. Figure 2.26은 Ratio가 2:8인 경우에 대한 사후 검정 결과이다. 확인 결과 Period가 0.75 초인 항목(mean = 49.4)와 1초인 항목(mean

= 48.7)에 대해 높은 선호도 점수를 보였으며, 가장 짧은 0.25초에 대해 가장 낮은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다. 즉, Period가 긴 토크 진동에 대해 비교적 높은 선호도를 보임을 보였다.

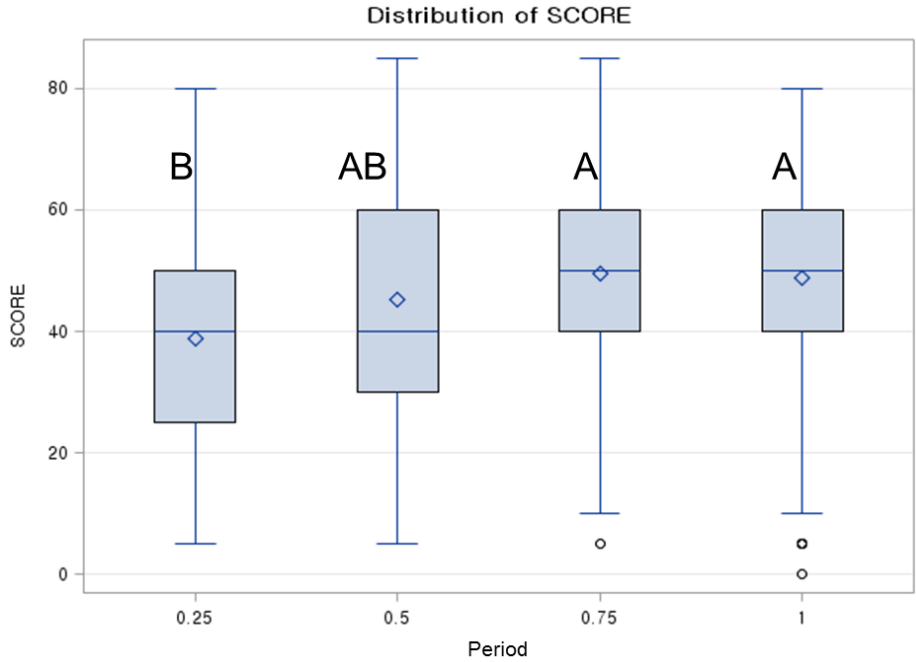


Figure 2.26: Period에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Ratio = 2:8

다음은 5:5 비에 대한 사후 검정 결과이다. Figure 2.27을 통한 분석결과 Period가 가장 짧은 0.25초인 경우(mean = 43.9)가 제일 낮은 선호도를 모임을 확인할 수 있었고 나머지 Period에 대해서는 통계적 상관관계를 확인할 수 없었다.

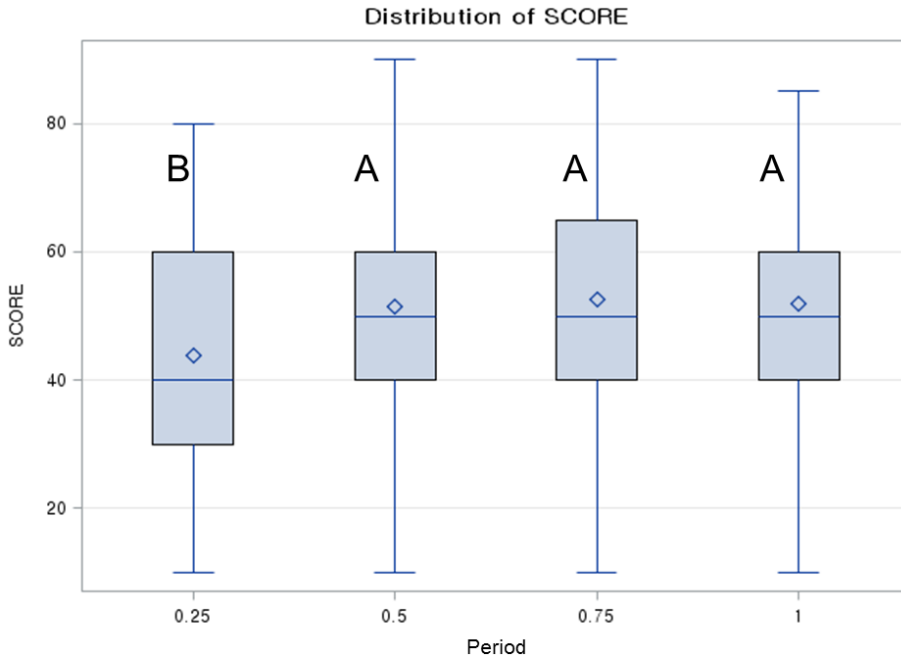


Figure 2.27: Period에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Ratio = 5:5

마지막으로 Figure 2.28과 같이 8:2 비율에 대한 분석결과 Period 0.5초인 경우에 가장 높은 선호도 점수(mean = 51.1)를 보임을 확인할 수 있었고, 0.25초인 경우에 대해 가장 낮은 선호도 점수를 보였음을 확인할 수 있었다. 분석결과 모든 Ratio에 대해 Period가 0.25초인 토크 진동의 선호도 점수가 낮다는 공통점을 확인할 수 있었고, 대체로 Period가 긴 토크 진동에 대해 높은 선호도 점수를 보임을 확인할 수 있었다.

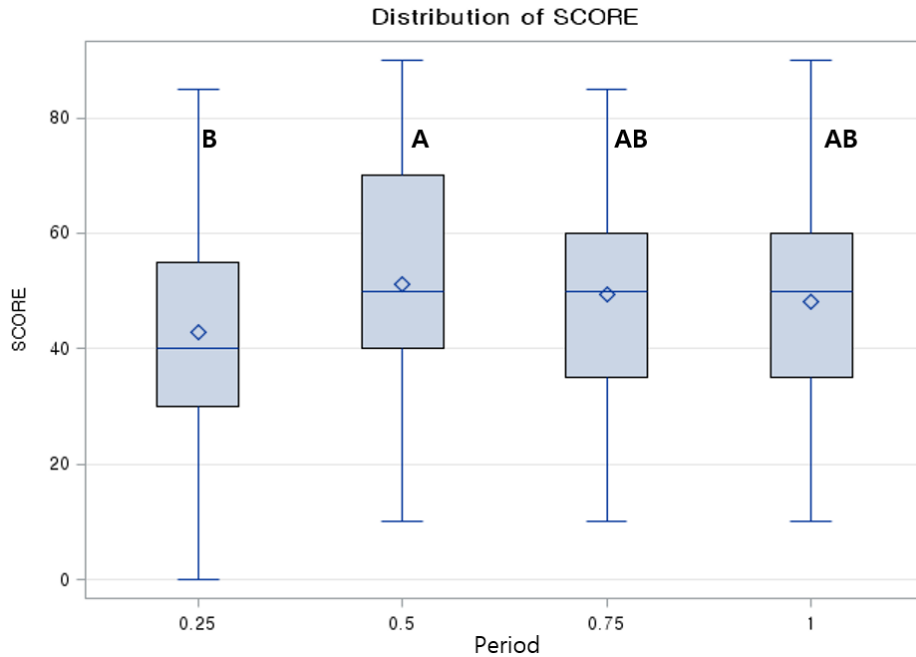


Figure 2.28: Period에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Ratio = 8:2

다음은 반대로 Period를 기준으로 했을 때 Ratio에 대한 ANOVA 분석 결과를 살펴보도록 하겠다.

	Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
Period 0.25s	RATIO	$F(3, 60) = 0.68$	0.5694
Period 0.5s	RATIO	$F(3, 60) = 3.51$	0.0205
Period 0.75s	RATIO	$F(3, 60) = 3.56$	0.0194
Period 1.0s	RATIO	$F(3, 60) = 3.29$	0.0267

Table 2.12: Period 를 기준으로 한 Ratio ANOVA 결과, 종속 변수: Preference

Table 2.12을 통한 분석결과 Period의 길이가 0.5초( $F(3, 60) = 3.51, p=0.0205$ ), 0.75초( $F=3.56, p=0.0194$ ) 1초( $F(3, 60) = 3.29, p=0.0267$ )인 경우에 대해 의미 있는 결과를 보였( $p < 0.05$ ) 확인할 수 있었다. 따라서 세 항목에 대해 Tukey's HSD test를 통한 사후 검정을 수행하였다. 먼저 Period 0.5 초를 기준으로 했을 경우에 대한 분석 결과를 살펴보도록 하겠다. 결과는 Figure 2.29에서 확인할 수 있다. 분석결과 Torque Oscillation과 Rest의 비가 5:5 인 항목(mean = 51.6)과, 8:2인



항목(mean = 51.3)에 대해 높은 선호도를 보임을 확인할 수 있었고, Period 전체가 진동인 10:0의 비율에 대해서는 가장 낮은 선호도 점수를 보임을 확인할 수 있었다.

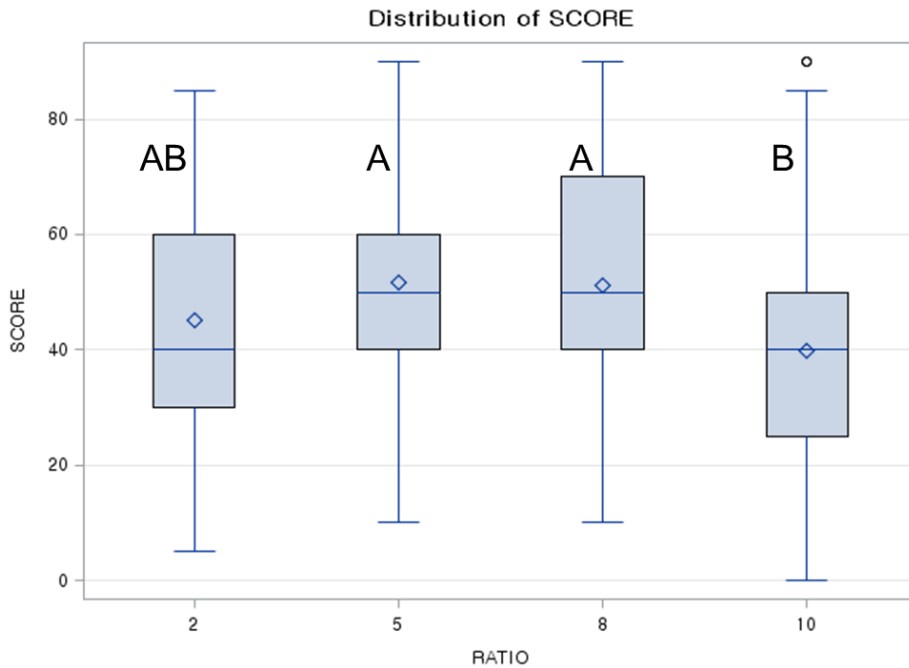


Figure 2.29: Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Period=0.5s, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0

Figure 2.30은 Period 0.75초를 기준으로 했을 경우에 대한 사후 검정 결과이다. 분석결과 5:5 비율에 대해 가장 높은 선호도(mean = 52.7)를 보임을 확인할 수 있었고, Period 전체가 진동인 10:0의 비율에 대해서는 가장 낮은 선호도 점수를 보임을 확인할 수 있었다.

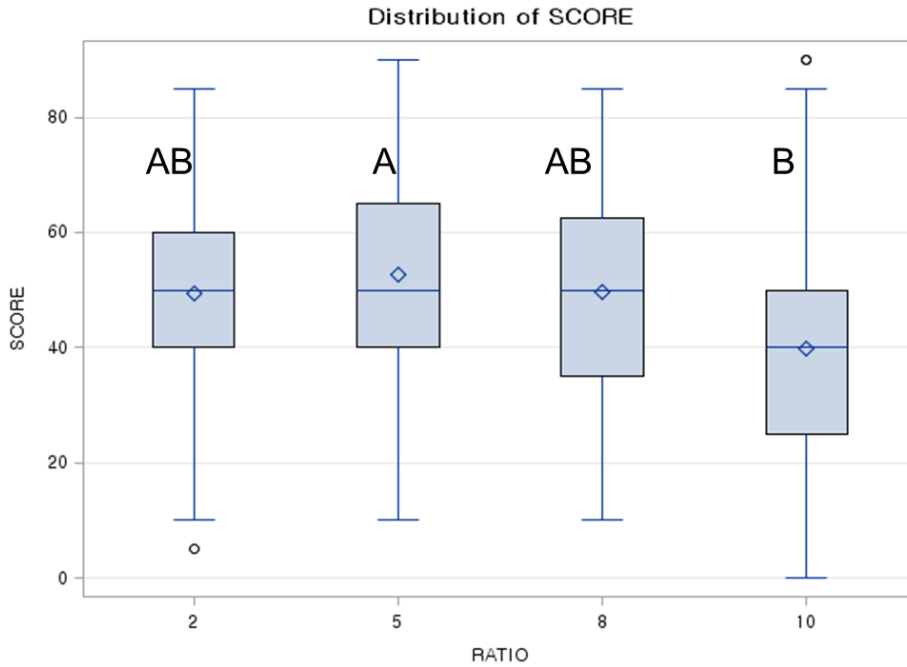


Figure 2.30: Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Period=0.75s, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0

마지막으로 Period 1초를 기준으로 했을 경우에 대한 사후 검정 결과는 Period 0.75초를 기준으로 했을 경우와 비슷한 결과를 분석결과를 보였다. 5:5 비율에 대해 가장 높은 선호도(mean = 51.9)를 보임을 확인할 수 있었고, Period 전체가 진동인 10:0의 비율에 대해서는 가장 낮은 선호도 점수를 보임을 확인할 수 있었다. 결과는 Figure 2.31에서 확인할 수 있다.

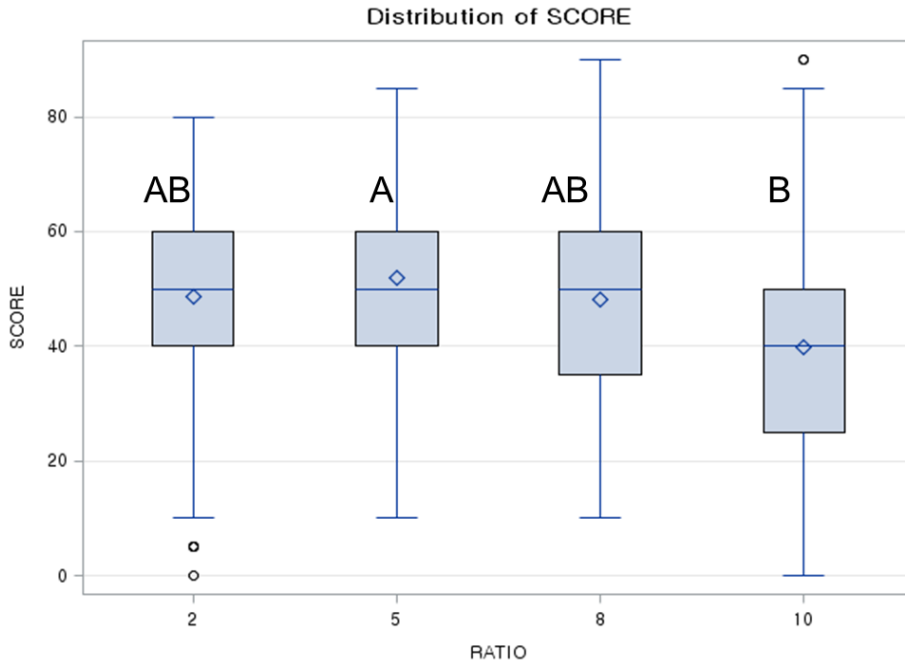


Figure 2.31: Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Period=1.0s, 2: 2:8, 5: 5:5, 8: 8:2, 10: 10:0

분석결과 Period의 Torque oscillation과 Rest의 Ratio 가 5:5인 항목에 대해 대체로 높은 선호도 점수를 보임을 확인할 수 있었고 간혹 8:2인 경우에 대해 5:5의 비와 비슷하거나 약간 낮은 선호도 점수를 보임을 확인할 수 있었다. 또한 전체가 진동인 10:0의 비에 대해서는 절대적으로 낮은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다.

## 2.4 토론

먼저 토크 진동에 대한 Stimulus Intensity Function의 경우 Ryu et al. [42]의 연구에서 도출한 결과와 유사하게 낮은 주파수의 토크 진동에 대해 Equal sensation contour가 주파수에 따라 점차 상승하는 양상을 보임을 확인할 수 있었다. Ryu et al. [42]의 연구는 한 손에 휴대전화를 잡고 실험을 진행하였고, 이번 실험은 두 손을 스티어링 휠에 올리고 실험을 진행하였으나 두 결과에 대한 차이를 발견하지 못했다. 즉, 토크 피드백을 통한 진동과 휴대 전화에서 사용되는 진동에 대해(한 손과 양손에 대해) Equal sensation contour면에서 유사한 결과를 보임을 확인할 수

있었다.

다음으로 진동에 대해 주파수와 진폭에 대한 평가에 대해 살펴보도록 하겠다. 일반적으로 사용하는 진동에 대한 주관적 평가를 수행해 보면 높은 주파수, 작은 진폭에 대해 긍정적인 느낌을 제공하고, 낮은 주파수 그리고 큰 진폭에 대해 부정적인 느낌을 제공한다는 Yoo et al. [34], [35] 연구를 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 큰 진폭의 토크 진동에 대해서는 거슬리는 느낌과 공격적인(거친) 느낌을 제공하기 때문에 낮은 진폭의 토크 진동에 대해 높은 선호도를 보였다는 결과도 확인할 수 있었다 [2], [24]. 하지만, 이번 실험결과 토크 진동의 경우 일반 진동을 사용한 [34], [35] 의 결과와는 다르게 토크 진동의 경우 높은 주파수와 큰 진폭을 갖는 파라미터의 조합에 대해 높은 주관적 선호도를 보임을 확인할 수 있었다. 이에 대해서는 Yoo et al. [34], [35] 이 사용한 진동의 범위(60-300 Hz)보다 낮은 주파수 대역에서 수행하였기 때문에 해당 진동을 인지하는 Mechanoreceptor가 달라(PC와 Meissner Corpuscle) 다음과 같은 결과가 나왔을 것으로도 추정된다.

토크 진동을 사용한 [2], [24]의 결과와도 다른 결과를 도출할 수 있었다. Huang et al. [2], Navarro et al. [24] 의 경우 실험에 사용한 주파수의 범위가 다양하지 못하고, 20 Hz이하의 낮은 주파수에 대한 결과만 도출하였기 때문에 위와 같은 차이가 난 것으로 추정된다. 특히, 본 실험에서 사용한 일부 토크 진동에 대해 많은 피실험자들은 흔들리는 듯한 진동(15 Hz 이하의 진동)에 대해서 진동 같은 느낌이 들지않고 흔들리는 듯한 느낌을 받는다고 답했으며, 해당 진동이 높은 불쾌감을 제공한다고 답변하였다. 즉, 떨리는 진동(>15Hz)에 비해 흔들리는 진동( $\leq 15\text{Hz}$ )이 낮은 선호도를 보였다는 점이 하나의 원인이 될 것으로 추정된다. 뿐만 아니라 토크 진동에 대한 선호도 실험은 차선을 이탈할 경우에 발생한다라는 조건이 있는 상태로 수행되었기 때문에 경고의 인지가 확실한 큰 진폭에 대해 높은 선호도를 보였을 것으로도 추정된다.

다음으로 Rhythm(Pattern)에 대해 살펴보도록 하겠다. 패턴의 경우 Rest가 없는 진동에 대해 낮은 선호도를 보였음을 확인할 수 있었고, 스타카토 같은 진동(Period 0.25s, Ratio 2:8, 5:5)은 불규칙적인것 같고 느낌이 좋지 않다는 의견을 확인

할 수 있었다. 반면 Rest와 Torque oscillation의 비가 5:5인 토크 진동 패에 대해서는 규칙적인것 같다는 의견을 확인할 수 있었으며, 가장 높은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다. 이는 Ternes et al. [43]에서 언급한 진동의 길이와 Rest의 길이에 따라 불규칙적 혹은 규칙적인 느낌을 제공한다는 부분에 있어 같은 결과를 보였음 확인할 수 있었다.

본 실험에서 사용한 40 Hz의 주파수는 PC와 RA1(Meissner Corpuscle)채널에 대한 민감도가 비슷한 수준 [3]인 지점이다. 고로, PC와 RA1 채널의 감각을 비슷한 수준으로 인지하여 일반적인 진동과는 다른 느낌을 제공할 것으로 추측된다. Gescheider et al. [44]에 따르면 PC채널에 대해 Temporal summation의 영향으로 짧은 시간(1초 미만) 동안 진동을 제공할 경우 그 인지능력이 긴 시간(1초 이상)의 진동과 다르다는 점도 하나의 원인이 될 수 있을 것으로 추정된다.

스타카토와 같은 느낌을 제공하는 진동 패턴에 대해서 상대적으로 불쾌한 느낌을 제공하는 원인이 Temporal summation이 충분히 이루어 지지않아 보통의 토크 진동에 비해 상대적으로 낮은 선호도를 보였을 것이라고 생각된다. 즉, Temporal summation과 토크 진동에 대한 선호도는 서로 관련이 있을 것이라고 생각된다. 마지막으로 Period의 Torque oscillation과 Rest의 Ratio 가 5:5인 항목에 대해 대체로 높은 선호도 점수를 보임을 미루어 볼 때, 규칙적인 리듬을 제공할 때 비교적 높은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다.

결과적으로 40 Hz 중간 크기의 인지강도를 갖는 진폭(3.9 N·m)에 대해 Period가 0.25초 보다 크고, 규칙적인 느낌을 제공하는 5:5, 8:2 비의 조합으로 패턴을 제작하는 것이 운전자에게 높은 선호도를 제공할 수 있을 것이다. 또한 Full Oscillation(진동)과 스타카토(Period: 0.25초, Ratio: 2:8, 5:5)와 같은 진동은 피해 패턴을 제작하는 것이 좋다고 말할 수 있다.

# III. 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴

## 3.1 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동

이번 장에서는 좌, 우로 가하는 토크의 주파수와 크기를 다르게 하여 토크 진동을 통해 방향성 정보를 제공하는 방법에 대한 설명을 진행한다. Navarro et al. [28]연구팀은 해당 방식을 처음 제안하였다. Navarro et al. [28] 연구팀의 경우, 방향성을 느낄 수 있는 토크 진동을 만들기 위해 특별한 규칙 없이, 단순히 왼쪽과 오른쪽으로 가하는 토크 진동의 주파수와 진폭의 차이를 크게 하여 방향성 정보를 제공하는 경고신호를 디자인한 반면, 이번 연구에서는 Figure 3.1과 같이 총 2.4초 길이에 대해 한 Period의 비율을  $T_1$ 과  $T_2$ 로 나뉘 (좌, 우 혹은 우, 좌로 가하는 토크 크기의 비) Equation 3.1를 만족하는  $(f_1, A_1), (f_2, A_2)$ 를 사용하였다(Equation 3.2를 만족할 때, Equation 3.1 성립).

$$\int_0^{\frac{1}{2f_1}} A_1 \sin(2\pi f_1 t) dt = \int_0^{\frac{1}{2f_2}} A_2 \sin(2\pi f_2 t) dt \quad (3.1)$$

$$\frac{A_1}{f_1} = \frac{A_2}{f_2} \quad (3.2)$$

해당 조건을 만족할 경우 한 Period가 끝난 상태에서 스티어링 휠의 각속도는 0이 되고, 스티어링 휠의 스프링 강성 값(Spring stiffness term)에 의해 스티어링 휠의 위치가 원점으로 돌아오는 것을 확인 할 수 있다. 실험에 사용한 Period, Ratio는 Table 3.1과 같고, 표를 통해 Period와 Ratio에 대한 길이인  $T_1, T_2$ 와 주파수  $f_1, f_2$ 도 확인할 수 있다.

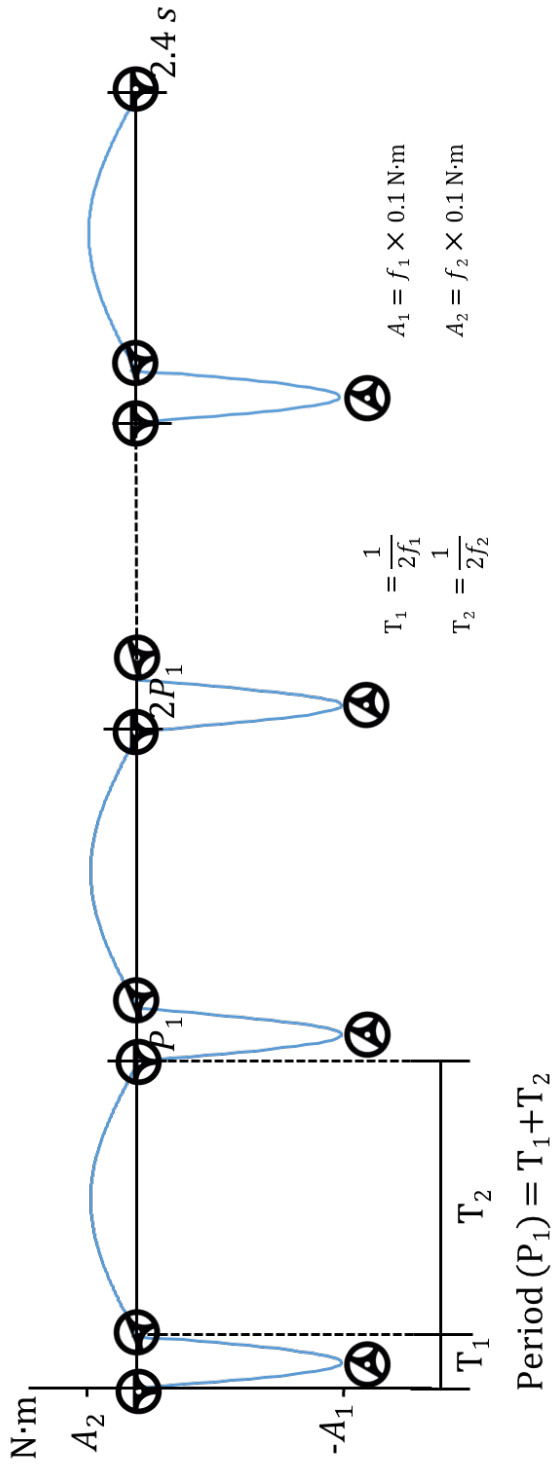


Figure 3.1: 비대칭 토크 펄스 기반 진동 패턴 제작용에 사용된 변수 및 제작 원리

Period(s)	Ratio	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$A_1$ (N·m)	$A_2$ (N·m)	Correct Answer Rate(%)	stdev
0.1	6:4	0.06	0.04	8.33	12.50	0.833	1.250	56.90	22.58
	7:3	0.07	0.03	7.14	16.67	0.714	1.667	64.52	22.76
	8:2	0.08	0.02	6.25	25.00	0.625	2.500	69.05	21.62
	9:1	0.09	0.01	5.56	50.00	0.556	5.000	69.29	19.93
0.15	6:4	0.09	0.06	5.56	8.33	0.556	0.833	61.43	20.79
	7:3	0.105	0.045	4.76	11.11	0.476	1.111	79.52	16.37
	8:2	0.12	0.03	4.17	16.67	0.417	1.667	84.05	17.54
	9:1	0.135	0.015	3.70	33.33	0.370	3.333	82.62	16.54
0.2	6:4	0.12	0.08	4.17	6.25	0.417	0.625	68.10	22.44
	7:3	0.14	0.06	3.57	8.33	0.357	0.833	83.81	18.60
	8:2	0.16	0.04	3.13	12.50	0.313	1.250	88.81	13.29
	9:1	0.18	0.02	2.78	25.00	0.278	2.500	90.95	12.06
0.3	6:4	0.18	0.12	2.78	4.17	0.278	0.417	70.48	18.47
	7:3	0.21	0.09	2.38	5.56	0.238	0.556	83.33	16.03
	8:2	0.24	0.06	2.08	8.33	0.208	0.833	93.10	11.58
	9:1	0.27	0.03	1.85	16.67	0.185	1.667	96.67	6.50
0.4	6:4	0.24	0.16	2.08	3.13	0.208	0.313	72.14	18.42
	7:3	0.28	0.12	1.79	4.17	0.179	0.417	88.10	13.11
	8:2	0.32	0.08	1.56	6.25	0.156	0.625	96.67	8.46
	9:1	0.36	0.04	1.39	12.50	0.139	1.250	97.14	9.18

Table 3.1: Period, Ratio의 조합에 따른 주파수 및 진폭,  $T_1, T_2$ 의 길이 및 Correct Answer rate



## 3.2 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴에 대한 방향 인식률 평가

이번 실험은 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴에 대한 방향성을 인지할 수 있는 정도를 파악하기 위해 설계되었다. Period의 좌, 우 비(왼쪽으로 가하는 토크 진동의 주파수와 진폭, 오른쪽으로 가하는 토크 진동의 주파수와 진폭; 진폭 = 주파수  $\times$  0.1 N·m)를 다르게 하여 토크 진동을 가했을 때, 토크 진동을 통한 좌, 우 구분 정도를 확인하기 위해 수행되었다.

### 3.2.1 피실험자 및 장비 정보

감각기관에 문제가 없고, 운전 경험이 있는 만 20에서 45세(평균 28세, 남자 14명 여자 7명)인 21명의 피실험자가 참여하였다. 실험은 약 1시간 정도 소요되었으며, 실험에 참여한 피실험자에게 1만 5천원의 참여비를 지급하였다. 실험에 사용한 장비는 Stimulus intensity function 실험에 사용한 장비와 동일하다.

### 3.2.2 실험 절차

피실험자는 운전 시뮬레이터에 앉아 차선 이탈 경고 시스템에 대한 설명과 실험의 목적 및 평가방식에 대한 설명을 듣고, 운전 시뮬레이터의 화면을 응시하며 스티어링 휠에 손을 10시 10분 각도에 맞춰 잡도록 하였다. Period 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4 초와 Ratio 6:4, 7:3, 8:2, 9:1의 비에 대한 조합으로 실험이 진행되었고, 실험에 사용된 파라미터는 Table 3.1과 같다. 예를 들어 의도한 토크 진동의 방향이 왼쪽이고, Period 0.1초, Ratio 9:4라면 시계 반대 방향(왼쪽)으로 50 Hz, 5 N·m의 토크 진동을 0.01초간 가하고, 시계방향(오른쪽)으로 5.56 Hz, 0.556 N·m의 토크 진동을 0.09초간 가하는 토크 진동 패턴을 제공한다. 총 2.4초동안 토크 진동을 제공하였으며, 토크 진동은 한번만 제공하도록 하였다. 피실험자는 제공된 토크 진동 패턴에 대한 방향을 구두로 말하도록 하였다. 총 좌, 우 방향에 대해 각각 20가지 총 40가지의 토크 진동 패턴을 하나의 실험 블록으로 설정하였고, 피실험자에게 토크 진동 패턴을 임의로 재생하였다. 실험 블록은 10개로 구성하였고, 10개의 블록에

대한 평균을 결과로 사용하였다. 블록이 끝날 때 마다 쉬는 시간을 갖도록 하였다.

### 3.2.3 결과

실험결과 Figure 3.2과 같은 결과를 도출할 수 있었다. 아래 도표는 피실험자가 토크 진동에 대한 방향을 맞춘 확률이다. 실험결과 Period가 길고 좌, 우(혹은 우, 좌)비가 크게 벌어질수록 토크 진동을 통한 방향구분율이 높음을 확인할 수 있었다. 특히, Period 0.1초를 제외한 나머지 Period(0.15, 0.2, 0.3, 0.4초)에 대해서 7:3 비율 이상을 가했을 때(8:2, 9:1) 대한 방향을 맞춘 확률이 80%이상으로 나타남을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 Period 0.3, 0.4초에 대해 좌, 우(혹은 우, 좌)의 비를 8:2, 9:1비율로 제공할 경우 93%이상의 높은 확률로 의도한 방향을 인지함을 확인할 수 있었다. 이에 대한 2-way ANOVA 통계 분석 결과는 Table 3.2와 같다.

Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
PERIOD	F(4, 80) = 45.76	<.0001
RATIO	F(3, 60) = 161.21	<.0001
PERIOD*RATIO	F(12, 240) = 2.22	0.0114

Table 3.2: Directional Torque Oscillation Correct Answer Rate에 대한 2-way ANOVA 통계 분석 결과, 종속 변수: Correct Answer Rate

통계 분석 결과 Period, Ratio 및 Interaction term에 대해 모두 통계적 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 이에 대해 Tukey's HSD test를 통해 사후 분석을 수행해 보았다. 먼저 Period에 대한 사후 분석을 수행해본 결과 Figure 3.3과 같이 Period의 길이가 길수록 Correct Answer rate가 높음을 확인할 수 있었다.

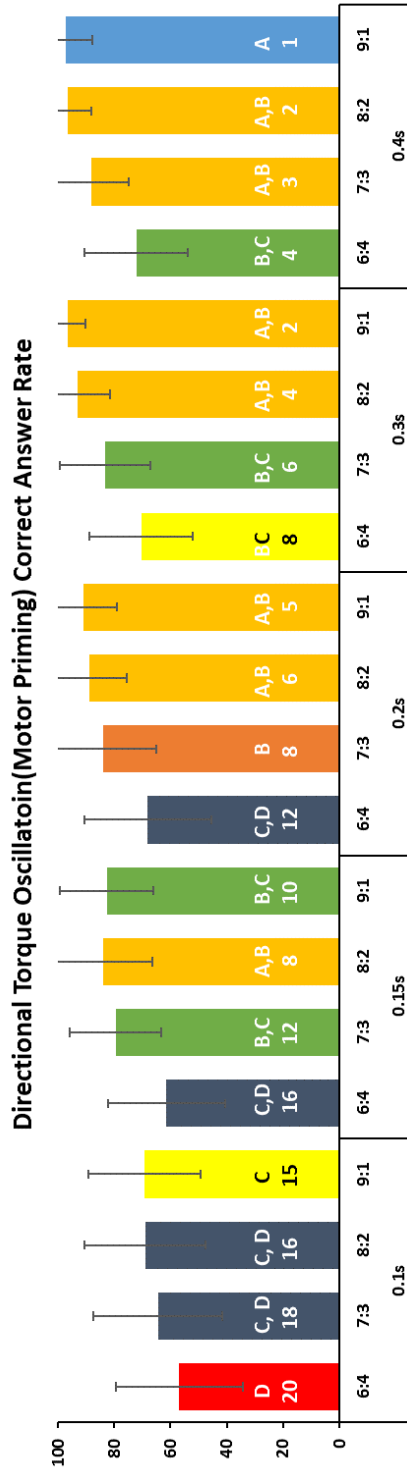


Figure 3.2: Directional Torque Oscillation Correct Answer Rate, 에리 바는 표준 편차를 의미

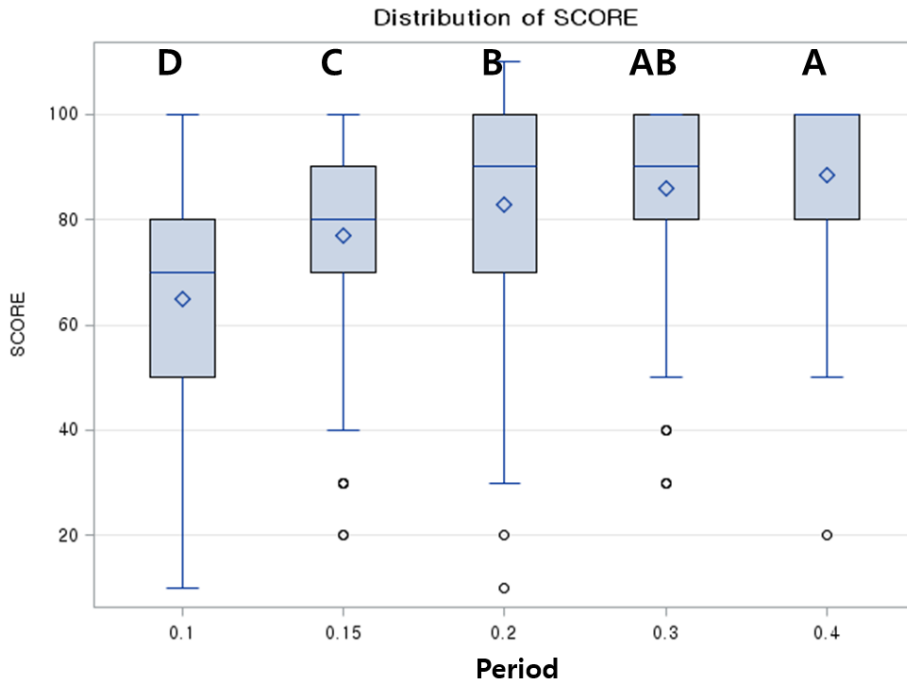


Figure 3.3: Period에 대한 Correct Answer Rate사후 검정(Tukey's grouping), Score: %

다음으로 Ratio에 대한 사후 검정 결과를 살펴보도록 하겠다. Figure 3.4과 같이 좌, 우 혹은 우, 좌의 비의 차이가 클수록 높은 확률로 방향을 구분함을 확인할 수 있었다. 특히 8:2, 9:1에 대해서는 86% 이상의 확률로 방향성을 구분함을 확인할 수 있었으며, 7:3의 비율에 대해서는 약 80%의 비율로 방향을 구분함을 확인할 수 있었다. 또한 6:4의 비율에 대해서는 약 66% 확률로 방향을 구분함을 확인할 수 있었다.

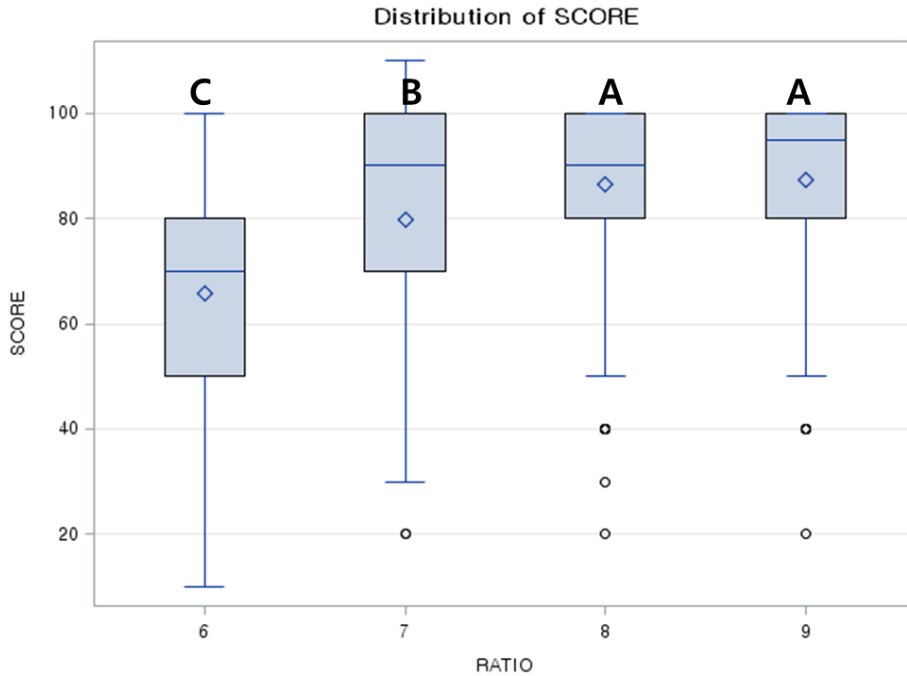


Figure 3.4: Ratio에 대한 Correct Answer Rate사후 검정(Tukey's grouping), Score: %, 6: 6:4, 7: 7:3, 8: 8:2, 9: 9:2

마지막으로 Interaction term에 대한 사후 분석결과는 Figure 3.2에서 확인할 수 있다. 막대 그래프 안에 적힌 숫자는 Correct Answer Rate에 대한 순위를 의미한다. Interaction term에 대한 분석결과 Period가 길고 Ratio의 비의 차가 확실할수록 높은 방향 인식률을 보임을 확인할 수 있었다. 특히 Period 0.2초 이상이며 Ratio가 7:3 이상으로 벌어지는 항목에 대해서는 83.3% 이상의 높은 확률로 방향을 구분할 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 3.3 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴에 대한 주관적 선호도 평가

이번 실험은 이전 Chapter에서 수행한 방향성을 인지할 수 있는 방향성 진동 패턴에 대한 주관적 선호도 조사를 알아보기 위해 수행되었다. 실험에 사용한 토크 패턴은 3.2와 동일하다.

#### 3.3.1 피실험자 및 장비 정보

감각기관에 문제가 없고, 운전 경험이 있는 만 21에서 29세(평균 24.6세, 남자 14명 여자 7명)인 21명의 피실험자가 참여하였다. 실험은 약 30분 정도 소요되었으며, 실험에 참여한 피실험자에게 7천원의 참여비를 지급하였다. 실험에 사용한 장비는 Stimulus intensity function 실험에 사용한 장비와 동일하다.

#### 3.3.2 실험 절차

피실험자는 운전 시뮬레이터에 앉아 차선 이탈 경고 시스템에 대한 설명과 실험의 목적 및 평가방식에 대한 설명을 듣고, 운전 시뮬레이터의 화면을 응시하며 스티어링 휠에 손을 10시 10분 각도에 맞춰 잡도록 하였다. Period 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4 초와 Ratio 6:4, 7:3, 8:2, 9:1의 비에 대한 조합으로 실험이 진행되었고, 실험에 사용된 파라미터는 Table 3.1 같다. 예를 들어 의도한 토크 진동의 방향이 왼쪽이고, Period 0.1초, Ratio 9:4라면 시계 반대 방향(왼쪽)으로 50 Hz, 5 N·m의 토크 진동을 0.01초간 가하고, 시계방향(오른쪽)으로 5.56 Hz, 0.556 N·m의 토크 진동을 0.09초간 가하는 토크 진동 패턴을 제공한다. 총 2.4초동안 토크 진동을 제공하였으며, 토크 진동은 한번만 제공하도록 하였다. 피실험자는 제공된 토크 진동 패턴에 대한 선호도를 0-100점 사이의 점수로 말하도록 하였고, 점수 아래에는 다음 (0점: 매우 불만족, 25점: 불만족, 50점: 보통, 75점: 만족 100점: 매우 만족)과 같은 가이드 점수가 표시되어 있었다. 좌, 우 방향에 대해 각각 20가지 총 40가지의 토크 진동 패턴을 하나의 실험 블록으로 설정하였고, 피실험자에게 토크 진동 패턴을 임의로 재생하였다. 실험 블록은 5개로 구성하였고, 이 중 처음 2개의 블록은

실험결과에 포함 하지 않았다. 블록이 끝날 때 마다 쉬는 시간을 갖도록 하였다.

### 3.3.3 결과

실험결과 Figure 3.5과 같은 결과를 도출할 수 있었다. Figure 3.5는 피실험자가 대답한 토크 진동에 대한 만족도 점수이다. 실험결과 좌, 우(혹은 우, 좌) 비가 크게 벌어질수록 토크 진동을 통한 만족도가 높음을 확인할 수 있었다. 이는 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴에 대한 방향 인식을 평가 실험과 비슷한 결과를 보였고, 이에 대해서 Table 3.3과 같이 Correct answer rate와 Preference간의 상관 분석을 통해 (0.87) 유사한 결과를 보였음을 검증 할 수 있었다.

	Correct Answer Rate	Preference
Correct Answer Rate	1	
Preference	0.87397	1

Table 3.3: Correct Answer Rate와 Preference간의 Correlation Matrix

즉, 방향성 구분율이 높을수록 높은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다. 다음으로 2-way ANOVA를 통해 Period와 Ratio에 따른 통계 분석을 수행하였다. 수행 결과는 Table 3.4과 같다.

Source	F(d.f.1, d.f.2)	p
Period	$F(4, 84) = 0.81$	0.5201
Ratio	$F(3, 63) = 6.07$	0.0011
Duty*Ratio	$F(12, 252) = 3.59$	<.0001

Table 3.4: Period와 Ratio에 대한 2-way ANOVA

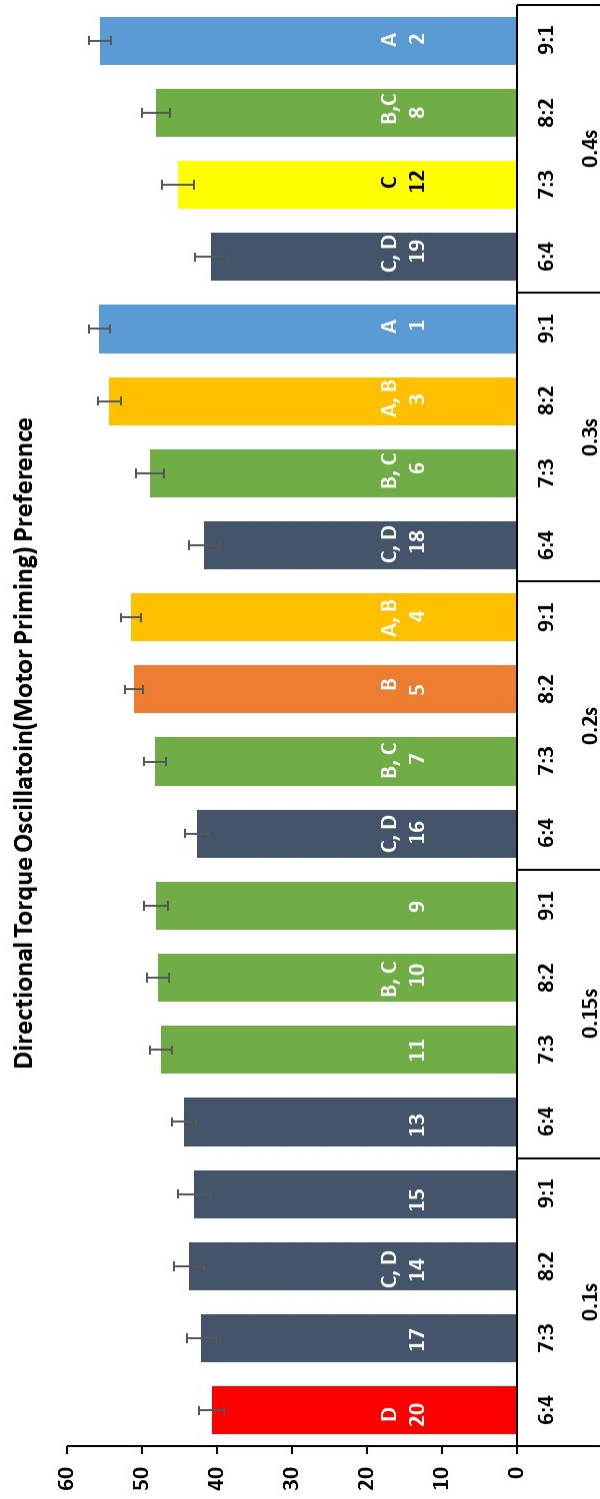


Figure 3.5: Directional Torque Oscillation Preference 실험 결과, 에리 바는 표준 오차를 의미



통계분석결과 Period에 대해서는 통계적 차이가없음을 확인할 수 있었고, Ratio와 Interaction term인 Duty\*Ratio에 대해서는 통계적 차이( $p < 0.05$ )가 있음을 확인할 수 있었다. 먼저 Ratio에 대해 Tukey's HSD test를 통해 사후 분석을 수행한 결과는 Figure 3.6과 같다. Figure 3.6을 통해 좌, 우 혹은 우, 좌로 가하는 Period의 시간의 비(Ratio의 비)가 클수록(9:1 > 8:2 > 7:3 > 6:4) 주관적 선호도가 높음을 확인할 수 있었다.

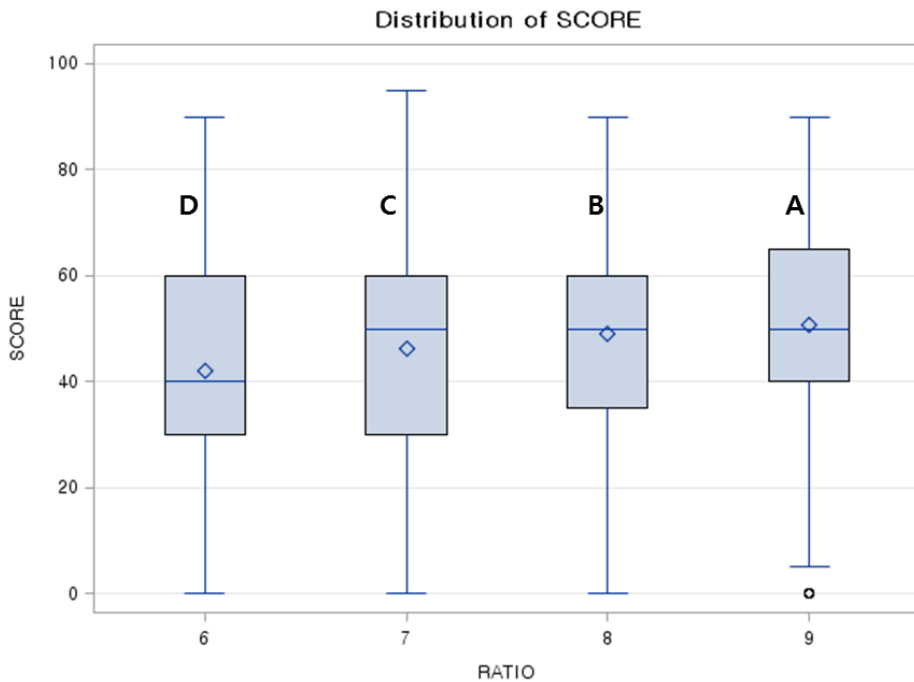


Figure 3.6: Ratio에 대한 선호도 사후 검정(Tukey's grouping), Period=1.0s, 6: 6:4, 7: 7:3, 8: 8:2, 9: 9:2

Interaction term에 대한 사후 검정 결과는 Figure 3.5에 도식하였으며, Figure 3.5에 적힌 숫자는 선호도 결과에 대한 점수를 내림차순으로 정렬한 결과이다. 분석결과 Period 0.25초 이상에 대해서는 Ratio의 비가 클수록 높은 선호도를 보임을 확인할 수 있었고, 이를 통해 앞서 언급한 방향 구분율이 높을수록 높은 선호도를 보임을 통계적으로 확인할 수 있었다.

### 3.4 토론

스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴(방향에 따른 토크 크기와 가하는 시간을 다르게 제공) 경고를 제공했을 때 운전자가 반응하는 시간에 대한 연구 [11], [28], [24]는 일부 찾아볼 수 있었으나, 그 범위가 어디까지 인지 확인한 연구는 없었으며, 다양한 진동 패턴에 대해 선호도 조사를 수행한 연구는 찾아볼 수 없었다. 본 연구에서는 Period의 길이와 Period의 좌, 우 혹은 우, 좌의 시간 비의 조합에 따른 토크 패턴에 대한 방향 인지율에 대해 살펴보았고, 이 패턴에 대한 주관적 선호도를 조사해 보았다. 대체적으로 Period의 길이가 길며, 좌, 우로 가하는 토크 진동에 대한 좌, 우 비의 차이가 클수록 방향에 대한 인지율이 높음을 확인할 수 있었고, 높은 인지율을 보이는 진동에 대한 주관적 선호도 역시 높음을 확인할 수 있었다.

Navarro et al. [11] 에서 언급한 바와 같이 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 진동 패턴은 스티어링 휠을 특정 방향으로 움직인 다음 원점으로 돌아오는 형태이기 때문에 차선 이탈 경고로의 기능과 비록 그 범위가 좁으나 Lane Keeping Assistance System(LKAS)의 기능을 동시에 수행한다고도 볼 수 있다. Navarro et al. [11] 연구팀의 경우 차선 이탈이 발생하고 운전자가 스티어링 휠을 놓았을 때 Motor priming의 영향으로 느리게 원래 차선으로 회복되는 양상을 확인할 수 있었다고 발표하였고, 스티어링 휠을 잡은 채로 Motor Priming을 발생할 경우 이로 인해 Trajectory가 변경되는 부분(조향에 영향을 미치는 경우)은 거의 무시할만한 수준이라고 발표한 바 있다. 본 토크 패턴에 대해서도 스티어링 휠에서 손을 떼고 VPP [45]를 기반으로 제작된 운전 시뮬레이터를 통해 확인한 결과 토크 패턴이 발생했을 때 차선을 회복해가는 양상을 확인할 수 있었으며, 스티어링 휠을 잡은 채로 토크 패턴을 제공했을 경우에는 조향에 거의 영향이 없음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 차선 이탈의 경우 졸음 운전이나 주의 태만으로 발생하는 경우가 많아 스티어링 휠을 잡지 않는다는 가정을 할 필요성이 작지만, 제안하는 토크 패턴 방식의 경우 스티어링 휠에서 손을 떼더라도 차선을 일부 회복 할 수 있다는 점에서 장점을 갖는다고 할 수 있다.

결과적으로 가장 높은 선호도를 제공하면서 방향 인지율이 높은 토크 패턴을 제공하고 싶을 경우, Period 0.4초, Ratio 9:1을 사용하는 것이 가장 효과적이라고 할 수 있으며, 비교적 높은 선호도와 높은 방향 인지율을 사용하고 싶을 경우 Period: 0.2 이상, Ratio: 9:1 의 경우에 대한 패턴을 사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 또한 높은 방향 인식률을 원할 경우 Period: 0.2s 이상, Ratio: 8:2 이상의 차이를 보이는 패턴을 사용하는 것이 효율적이라고 할 수 있다.

## IV. 결론

본 학위 논문에서는 토크 진동 패턴 기반 차선 이탈 경고에 대한 운전자의 만족도에 대한 연구를 수행하였고, 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴의 방향 인지율 및 해당 토크 진동에 대한 주관적 선호도에 대한 연구를 수행하였다. 단순한 경고로의 의미전달이 아닌 감성 품질을 고려한 경고 제공이라는 점에서 기존 연구들과는 차별성을 갖고 동시에 방향성 진동 패턴을 제작하는 가이드라인을 제시했다는 점에서 기존 연구의 한계를 해결하였다.

먼저, 각 주파수에 따른 진폭(토크의 크기)의 인지 강도를 확인하였고, 5-60 Hz의 범위 내에서 같은 인지 강도 세기에 대해 주파수가 높아질수록 진폭의 크기가 커짐을 확인할 수 있었다.

둘째, 인지 강도와 주파수에 따른 형용사 평가 및 주관적 선호도(만족도) 조사를 수행하였고, 40 Hz의 중간 레벨의 인지 세기에 대해 높은 만족도를 보임을 확인할 수 있었으며, 분명하고 경쾌하며 급박한 느낌을 제공하는 토크 진동에 대해 높은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다.

다음으로 패턴(리듬)에 대한 조사를 수행하였다. 규칙적인 리듬을 제공하는 진동(Period의 Torque oscillation과 Rest의 Ratio 가 5:5인 항목)에 대해 높은 선호도 점수를 보임을 확인할 수 있었으며, Rest가 없는 진동에 대해 제일 낮은 선호도를 보임을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 스타카토 같은 진동(Period 0.25s, Ratio 2:8, 5:5)은 불규칙적이고 좋지 않은 느낌을 준다는 의견을 확인할 수 있었다.

마지막으로, 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동 패턴에 대해서는 Period의 길이가 길고, 토크 진동에 대한 좌, 우 비의 차이가 클수록 방향에 대한 인지율이 높음을 확인할 수 있었고, 높은 방향 인지율을 보이는 토크 진동에 대해 주관적 선호도가 높음을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 토크 진동 피드백을 기반으로 기존 연구에서 주로 수행하지 않았던 토크 진동 경고 신호에 대해 감성 품질에 초점을 맞춰 연구를 수행하였으며, 스티어링 휠 비대칭 토크 펄스 기반 방향성 진동

패턴에 대한 인지율 및 주관적 선호도를 확인하였다.

본 논문의 결과는 감성 품질을 고려한 토크 진동 기반 차선 이탈 경고 시스템 디자인에 좋은 가이드라인이 될 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Frank Beruscha, Klaus Augsburg, and Dietrich Manstetten. Haptic warning signals at the steering wheel: A literature survey regarding lane departure warning systems (short paper). 2011.
- [2] Zhi Huang, Yiwan Wu, and Jian Liu. Research on effects of pattern, amplitude and frequency of pulse steering torque warnings for lane departure. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 31:67–76, 2015.
- [3] Stanley J Bolanowski Jr, George A Gescheider, Ronald T Verrillo, and Christin M Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical society of America*, 84(5):1680–1694, 1988.
- [4] 교통사고 현황(사망, 부상), 경찰청, 2017.
- [5] John D Lee. Fifty years of driving safety research. *Human Factors*, 50(3):521–528, 2008.
- [6] Jochen Pohl, Wolfgang Birk, and Lena Westervall. A driver-distraction-based lane-keeping assistance system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 221(4):541–552, 2007.
- [7] Wassim G Najm, John D Smith, and Mikio Yanagisawa. Pre-crash scenario typology for crash avoidance research. In *DOT HS*. Citeseer, 2007.

- [8] NHTSA. *Traffic Safety Facts 2005*. NHTSA's National Center for Statistics and Analysis, 2006.
- [9] NHTSA. *Traffic Safety Facts 2015*. NHTSA's National Center for Statistics and Analysis, 2016.
- [10] Jaemin Chun, Sung H Han, Gunhyuk Park, Jongman Seo, Seungmoon Choi, et al. Evaluation of vibrotactile feedback for forward collision warning on the steering wheel and seatbelt. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(5):443–448, 2012.
- [11] Jordan Navarro, Franck Mars, and Jean-Michel Hoc. Lateral control assistance for car drivers: a comparison of motor priming and warning systems. *Human Factors*, 49(5):950–960, 2007.
- [12] Louis Tijerina, James L Jackson, Dean A Pomerleau, Richard A Romano, and Andrew D Petersen. Driving simulator tests of lane departure collision avoidance systems. In *Intelligent Transportation: Realizing the Benefits. Proceedings of the 1996 Annual Meeting of ITS America.*, 1996.
- [13] Laura M Stanley. Haptic and auditory cues for lane departure warnings. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 50, pages 2405–2408. Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2006.
- [14] Jack J Ference, Sandor Szabo, and Wassim Najm. *Performance evaluation of integrated vehicle-based safety systems*. US Department of Transportation, 2006.
- [15] Louis Tijerina and Thomas Pilutti. Haptic seat notification system, September 5 2002. US Patent App. 10/064,979.

- [16] Tokihiko Akita. Lane keeping assist device for vehicle, May 8 2007. US Patent 7,216,023.
- [17] Frederick J Berg, Timothy J Bennett, Alan C Davis, Richard K Riefe, Ronald H Dybalski, and Timothy M Phillips. Steering system with haptic driver warning, October 9 2007. US Patent 7,280,046.
- [18] Jani Lylykangas, Veikko Surakka, Katri Salminen, Ahmed Farooq, and Roope Raisamo. Responses to visual, tactile and visual–tactile forward collision warnings while gaze on and off the road. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 40:68–77, 2016.
- [19] Jennifer L Burke, Matthew S Prewett, Ashley A Gray, Liuquin Yang, Frederick RB Stilson, Michael D Coovert, Linda R Elliot, and Elizabeth Redden. Comparing the effects of visual-auditory and visual-tactile feedback on user performance: a meta-analysis. In *Proceedings of the 8th international conference on Multimodal interfaces*, pages 108–117. ACM, 2006.
- [20] Annie WY Ng and Alan HS Chan. Finger response times to visual, auditory and tactile modality stimuli. In *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, volume 2, pages 1449–1454, 2012.
- [21] Ksenia Kozak, Jochen Pohl, Wolfgang Birk, Jeff Greenberg, Bruce Artz, Mike Blommer, Larry Cathey, and Reates Curry. Evaluation of lane departure warnings for drowsy drivers. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 50, pages 2400–2404. Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2006.



- [22] Keisuke Suzuki and Håkan Jansson. An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system. *JSAE review*, 24(1):65–70, 2003.
- [23] JM Hoc, M El Jaafari, JF Forzy, J Navarro, and F Mars. User acceptance and effectiveness of warning and motor priming assistance devices in car driving. In *Proceedings of European conference on human centred design for intelligent transport systems*, page 311, 2008.
- [24] Jordan Navarro, Franck Mars, Jean-François Forzy, Myriam El-Jaafari, and Jean-Michel Hoc. Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3):904–912, 2010.
- [25] Mauro Montiglio, Stefania Martini, and Vincenzo Murdocco. Development of a lane keeping support system for heavy trucks. In *13th ITS World Congress*, 2006.
- [26] Kunihito Sato, T Goto, Y Kubota, Y Amano, and K Fukui. A study on a lane departure warning system using a steering torque as a warning signal. In *Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*, pages 479–484, 1998.
- [27] Anke Kullack, Ingmar Ehrenpfordt, Karsten Lemmer, and Frank Eggert. Reflektas: lane departure prevention system based on behavioural control. *IET Intelligent Transport Systems*, 2(4):285–293, 2008.
- [28] Jordan Navarro, Franck Mars, Jean-Michel Hoc, Robert Boisliveau, and Fabrice Vienne. Evaluation of human-machine cooperation applied to lateral control in car driving. In *Proc. 16th World Congress of the International Ergonomics Society*, pages 4957–4962, 2006.

- [29] S Rothe. Fahrerwarnsystem-einschlafwarner. *VDI-Berichte*, (1188), 1995.
- [30] Mathieu Deroo, Jean-Michel Hoc, and Franck Mars. Influence of risk expectation on haptically cued corrective manoeuvres during near lane departure. *Ergonomics*, 55(4):465–475, 2012.
- [31] Mathieu Deroo, Jean-Michel Hoc, and Franck Mars. Effect of strength and direction of haptic cueing on steering control during near lane departure. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 16:92–103, 2013.
- [32] Walter Ziegler, U Franke, G Renner, and A Kühnle. Computer vision on the road: A lane departure and drowsy driver warning system. Technical report, SAE Technical Paper, 1995.
- [33] Navarro Jordan, Mars Franck, and Hoc Jean-Michel. Lateral control support for car drivers: a human-machine cooperation approach. In *Proceedings of the 14th European conference on Cognitive ergonomics: invent! explore!*, pages 249–252. ACM, 2007.
- [34] Taekbeom Yoo, Yongjae Yoo, and Seungmoon Choi. An explorative study on crossmodal congruence between visual and tactile icons based on emotional responses. In *Proceedings of the 16th International Conference on Multimodal Interaction*, pages 96–103. ACM, 2014.
- [35] Yongjae Yoo, Taekbeom Yoo, Jihyun Kong, and Seungmoon Choi. Emotional responses of tactile icons: Effects of amplitude, frequency, duration, and envelope. In *World Haptics Conference (WHC), 2015 IEEE*, pages 235–240. IEEE, 2015.

- [36] Miyuki Morioka and Michael J Griffin. Equivalent comfort contours for vertical vibration of steering wheels: effect of vibration magnitude, grip force, and hand position. *Applied ergonomics*, 40(5):817–825, 2009.
- [37] E Bruce Goldstein and James Brockmole. *Sensation and perception*. Cengage Learning, 2016.
- [38] Seungmoon Choi and Katherine J Kuchenbecker. Vibrotactile display: Perception, technology, and applications. *Proceedings of the IEEE*, 101(9):2093–2104, 2013.
- [39] George A Gescheider. *Psychophysics: the fundamentals*. Psychology Press, 1997.
- [40] Inwook Hwang and Seungmoon Choi. Perceptual space and adjective rating of sinusoidal vibrations perceived via mobile device. In *Haptics Symposium, 2010 IEEE*, pages 1–8. IEEE, 2010.
- [41] Nils Landin, Joseph M Romano, William McMahan, and Katherine J Kuchenbecker. Dimensional reduction of high-frequency accelerations for haptic rendering. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 79–86. Springer, 2010.
- [42] Jonghyun Ryu, Jaehoon Jung, Gunhyuk Park, and Seungmoon Choi. Psychophysical model for vibrotactile rendering in mobile devices. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 19(4):364–387, 2010.
- [43] David Ternes and Karon E Maclean. Designing large sets of haptic icons with rhythm. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 199–208. Springer, 2008.

- [44] George A Gescheider, John H Wright, and Ronald T Verrillo. *Information-processing channels in the tactile sensory system: A psychophysical and physiological analysis*. Psychology press, 2010.
- [45] VPP. <http://vehiclephysics.com/>.

## Acknowledgements

연구자가 되고 싶다는 목표를 갖고 진행하던 사업을 포기하고 포항공대에 입학하기로 결심한게 엇그제 같은데 어느덧 2년이라는 시간이 흘러 드디어 졸업을 눈앞에 두고 있습니다. 졸업을 지난 2년동안 하루도 빠짐없이 기대했는데 막상 이날이 되니 뿌듯하기도 하고 모든게 아쉽고 부끄러운 느낌도 드는 설명 못 할 복잡한 느낌이 듭니다. 이곳에서의 삶은 여러 의미로 새로운 도전이었고, 모든게 새로웠습니다. 그래서인지 돌이켜 보면 아쉬운 점이 정말 많습니다. 아쉽고 많이 부족하지만 이곳에서의 경험은 지금의 저를 길러준 소중한 밑거름이 되었습니다. 뿐만 아니라 이곳에서 제 부족함을 하나씩 메울 수 있는 힘을 기를 수 있었던것 같습니다. 이 모든게 HVR 연구실 여러분 덕분입니다. 이곳에서의 모든 순간들은 제 삶에서 가장 소중한 순간으로 기억될 것입니다.

가장 먼저 아는 것도 별로 없고 부족함도 많은 저에게 연구 뿐만 아니라 대학원 생활 그리고 인생에 대해서도 아낌없는 조언과 가르침을 주신 최승문 교수님께 큰 감사를 드립니다. 교수님 덕에 여기까지 올 수 있었고, 행복한 대학원 생활을 할 수 있었습니다. 지난 2년간 지도해 주셔서 정말 감사드립니다. 앞으로도 가르침에 부응할 수 있는 멋진 제자가 되도록 앞으로도 노력하겠습니다.

2016년 1월 4일 침구도 가져오지 않은 채 낫선 포항에 와 연구실에 들어오고, 특별한 선배님들과 처음보자마자 친근한 느낌이 들던 성호 그리고 호준이를 만났던 날이 아직도 생생합니다. 감사의 글을 쓰고 있는 이 순간이 너무나 아쉽습니다. 첫날부터 지금까지 도움을 주신 모든 분들께 감사의 인사를 전합니다. 저 혼자서는 절대 여기까지 올 수 없었을 것입니다.

낫선 포항 생활에 있어 라이딩이라는 커다란 즐거움을 주신 성훈이 형, 멋진 마무리를 보여주시고 독일에서 멋진 삶을 살고 계신 건혁이 형 잘 챙겨주시고 아낌없이 조언해주셔서 감사합니다. 연구실 생활을 어색해하는 저에게 먼저 다가와 주시고 보드도 알려주신 종만이형, 연구뿐만 아니라 인생 상담도 마다하지 않고 아낌 없이

조언해 주신 호진이형, 입학전부터 지금까지 여러분분 꾸준히 챙겨주시고 친절하게 이것저것 알려주신 용재형, 멋지게 연구하고, 운동도 잘하시는 언젠간 강남에서 만나야 할 성환이형, 아낌없이 설명해주시고, 매순간 노력하시고 뭐든 꼼꼼하신 승재형에게 감사드립니다. 여기까지 올 수 있었던건 모두 선배들 덕분입니다. And Reza, I appreciate your kindness, Good luck with your new life in England! 동기이자 석사과정에 있어 가장 친한 친구였던 성격 좋고 재밌는 든든한 성호, 이것저것 함께 할 수 있었던게 많았던 호준이, 뭐든 열심히하고 멋진 의사선생님이 될 한슬이, 부품 박사이자 같이 베드민턴 치고싶은 종호형, 잘생기고 못하는게 없는 상윤이, 악기도 잘다루고 그림도 잘그리고 연구도 잘하는 못하는게 없는 겨레, 머리 좋고 게임도 잘하고 마라톤도 같이 나간 선웅이, VBand로 고생만 시킨 성원이, 짜증내는 모습 없이 항상 즐거운 모습이 멋진 혜진이, 실험비, 출장비 등 여러가지로 부탁만 드렸던 송이선생님 모두에게 감사 인사 드립니다.

마지막으로 언제나 저를 믿고 응원해 주신 어머니와 동생 민수, 부족한 저를 믿고 아낌없이 지원해주시고 기다려주신 장인어른 장모님 그리고 하늘에 계신 아버지에게 감사 드립니다. 못난 제 선택을 응원해주고, 낯선 곳으로 이사와서 힘든 시간을 함께 해준 제 사랑하는 아내 이슬이와 포항에서 얻게 된 가장 큰 선물 사랑하는 딸 서연이에게 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 이슬아, 서연아 사랑하고, 그동안 고생했어. 마지막으로 여기까지 올 수 있게 도와주신 하나님 감사합니다.

# Curriculum Vitae

Name : Inseok Koh

## Education

2010. 3. – 2016. 2. Department of Information Technology Engineering, Chonbuk National University (B.S.)

2016. 3. – 2018. 2. Department of Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (M.S.)

## Experience

2015. 3. – 2015. 12. CEO, NEP: No Electrical Plug

2014. 7. – 2015. 6. Trainee, SW Maestro

2013.8 – 2014. 2. International Research Scholar, M2M Lab. Purdue Univ.

