

Master's Thesis

Ergonomic Improvement Research of Diagnosis of  
Glaucoma Based on Visual Field Examination

Jihyoung Lee (이지형)

Division of Mechanical and Industrial Engineering

Pohang University of Science and Technology

2013

시야검사 기반 녹내장 진단의  
인간공학적 개선 연구

Ergonomic Improvement Research of Diagnosis of  
Glaucoma Based on Visual Field Examination

DMI 이지형, Jihyoung Lee  
20110940 Ergonomic Improvement Research of Diagnosis of Glaucoma Based on  
Visual Field Examination,  
시야검사 기반 녹내장 진단의 인간공학적 개선 연구,  
Division of Mechanical and Industrial Engineering (Human Factors and  
Ergonomics Program), 2013, 68P, Advisor: Heecheon You, Text in  
Korean.

### ABSTRACT

Glaucoma is an eye disease in which the optic nerve is damaged, permanently impairing vision and progressing to complete blindness if left untreated. Unfortunately, there is no optic nerve regenerative therapy. After early detection of glaucoma, continuous management and treatment is need to prevent blindness. In order to diagnose for glaucoma, it is needed the results which are founded optic nerve damages in structural and functional measurements. Visual field test is a key examination for testing the function of optic nerve through automated perimetry which is measured the damaged loaction and degree on the retinal nerve fiber layer (RNFL). To obtain precise testing results, it is important to fix examinee's eye on fixation target for testing time, however the existing perimetries don't have any gaze fixation induction methods. Diagnosis of glaucoma is needed comprehensive considerations of the results of visual field testing and structural measurements, it is possible by glaucoma specialists who have a lot of knowledge and

experiences in the clinics. Therefore, it is necessary to develop ergonomic gaze fixation induction methods for better reliability of visual field test and glaucoma diagnostic model for precise diagnosis of glaucoma.

This present study is intended to research ergonomic improvements of diagnosis of glaucoma based on visual field examination. First, in order to effective visual field testing we developed the gaze fixation induction methods by changing size, flash rate, and shape of fixation target and conducted experiments for performance and subjective evaluation. As the result, fixation loss rate (FLR) of medium (angular subtense =  $0.43^\circ$ ) size of fixation target was less 41% than that of other size of ones. Then, FLR of flashing dot (10 Hz) is less 11% than that of medium one. The reason was identified less concentration caused by the size differences between the size of fixation target and that of visual field testing targets. Because the flashing dot provide constant stimuli to examinee's eye, examinees can concentrate on the flashing dot during visual field testing.

Second, new glaucoma diagnostic model (PD/G-SVM) was developed and validated by using pattern deviation (PD) as learning sample and applying Gaussian support vector machine (G-SVM) to classify test sample, considering glaucoma diagnostic process in the clinic. The performance of ROC area (0.95) of PD/G-SVM is better than that of ROC area (0.91) of existing research diagnostic model which was used threshold sensitivity value (dB) as learning sample. Because the function of PD is to highlight localized visual field loss, it is being considered as more important measure than threshold

sensitivity value(dB) in the clinic. Missclassified samples from applying PD/G-SVM was classified by using vertical cup-to-disc ratio(  $> 0.713$ ) as cut-off. Consequently, the accuracy of final glaucoma diagnostic model has improved about 2% more than before.

In summary, the reliability of visual field test result is increased by using flashing dot for fixation target. The performance of glaucoma diagnostic model developed by using important factors which is being considered in the clinic is better than otherwise.

# TABLE OF CONTENTS

ABSTRACT .....	I
TABLE OF CONTENTS.....	IV
그림 목차.....	VII
표 목차.....	IX
1. 서론 .....	1
1.1. 연구의 배경 및 필요성.....	1
1.2. 연구 목적.....	12
1.3. Organization of the thesis.....	12
2. Literature Review .....	14
2.1. 녹내장 검사.....	14
2.2. 자동 시야검사기의 시선고정 방법 및 시선 유도 방법.....	20
2.2.1. 자동 시야검사기의 시선고정 방법.....	20
2.2.2. 시선 유도를 위한 시각적 주의 유도 연구.....	23
2.3. 녹내장 진단모형 개발 연구 동향.....	25
3. 인간공학적 시선고정 유도방법 개발 및 평가.....	29
3.1. 연구목적.....	29
3.2. 시선고정 유도방법 개발 및 평가 절차.....	29
3.2.1. 시선고정 유도방법 개발.....	30
3.2.2. 실험설계.....	32

3.2.3.	실험참여자.....	32
3.2.4.	실험 장비.....	33
3.2.5.	실험 절차.....	35
3.2.6.	분석.....	37
3.3.	결과.....	39
3.3.1.	크기(size).....	39
3.3.2.	점멸속도(flash rate)와 형태변형(multiple shapes).....	41
4.	시야검사 기반 녹내장 진단모형.....	43
4.1.	연구목적.....	43
4.2.	녹내장 진단모형 개발.....	43
4.2.1.	Input: 녹내장 검사 자료.....	44
4.2.2.	Process: 녹내장 진단모형.....	48
4.2.3.	녹내장 진단모형 성능 평가.....	50
4.3.	결과.....	50
5.	토의.....	55
5.1.	인간공학적 시선고정 유도방법.....	55
5.2.	녹내장 진단모형 개발.....	58
참고 문헌.....		62
부록.....		65
부록 A.	녹내장 검사 자료의 sample size.....	65

부록 B. PD/G-SVM 모형의 오분류 sample.....	66
부록 C. PD/G-SVM 모형의 오분류 sample 특성 분석(실제범주: 녹내장).....	67
부록 D. PD/G-SVM 모형의 오분류 sample 특성 분석(실제범주: 정상).....	68



## 그림 목차

그림 1-1. 눈의 구조와 전방각의 개폐여부에 따른 녹내장 분류.....	2
그림 1-2. 녹내장성 실명과 조기 진단을 통한 지연치료.....	3
그림 1-3. 녹내장의 구조적 검사와 기능적 검사의 예.....	4
그림 1-4 시야(visual field).....	5
그림 1-5. 야구경기 관람자의 중심시야와 주변시야.....	6
그림 1-6. 시야검사 방법.....	6
그림 1-7. 시야검사용 시표 위치(central 24-2 threshold test pattern, right eye).....	7
그림 1-8. 시야검사 시 유발되는 안구운동.....	8
그림 1-9. 임상에서의 녹내장 진단 모형(자문: 강동경희대학교병원 안과).....	10
그림 2-1. Humphrey® Field Analyzer.....	15
그림 2-2. HFA 시야검사 결과(Newkirk et al., 2006).....	16
그림 3-1. 시선고정 유도방법 개발 및 평가 연구절차.....	30
그림 3-2. 시선고정 유도 요소가 적용된 시선고정용 시표.....	31
그림 3-3. 실험참여자.....	32
그림 3-4. 시선고정 실험 장치.....	33
그림 3-5. 시선고정 평가 프로그램(right eye).....	34
그림 3-6. 시선고정 실험 절차.....	36
그림 3-7. 시선고정용 시표의 크기별 실험 결과.....	40
그림 3-8. 시선고정용 점멸시표와 형태변형 시표의 실험 결과.....	42

그림 4-1. Pattern deviation 산출 방법.....	45
그림 4-2. Hill of vision (right eye; Anderson, 1987) .....	45
그림 4-3. 녹내장 2 차 분류척도 VCD 의 적용기준.....	54

## 표 목차

표 1-1. 자동시야검사기의 시선고정용 시표.....	7
표 1-2. 녹내장 진단 검사의 예.....	9
표 2-1. 기존 자동시야검사기의 시선고정용 시표.....	22
표 2-2. HFA 의 gaze tracking system 과 Matrix 의 eye monitoring system.....	23
표 2-3. 주의 유도 요소.....	24
표 2-4. 기존 녹내장 진단모형 개발 연구의 한계.....	28
표 3-1. 이상치 제거 SRT 기준 산출 방법.....	38
표 4-1. 녹내장 검사자료.....	47
표 4-2. 녹내장 진단 모형 개발에 활용된 분류기법.....	49
표 4-3. 녹내장 진단 모형별 성능 비교.....	51
표 4-4. PD/G-SVM 모형의 cross validation.....	52
표 4-5. PD/G-SVM 에 의한 분류 결과.....	54
표 5-1. 녹내장 진단 모형 성능비교(본 연구 vs. Chan et al., 2002).....	59

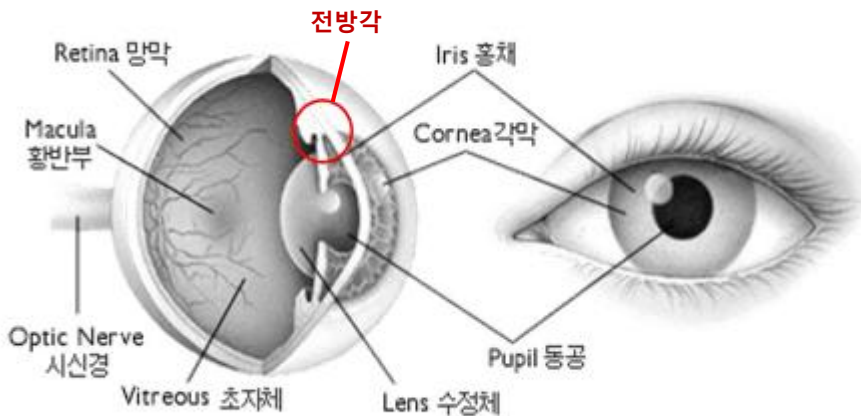
# 1. 서론

## 1.1. 연구의 배경 및 필요성

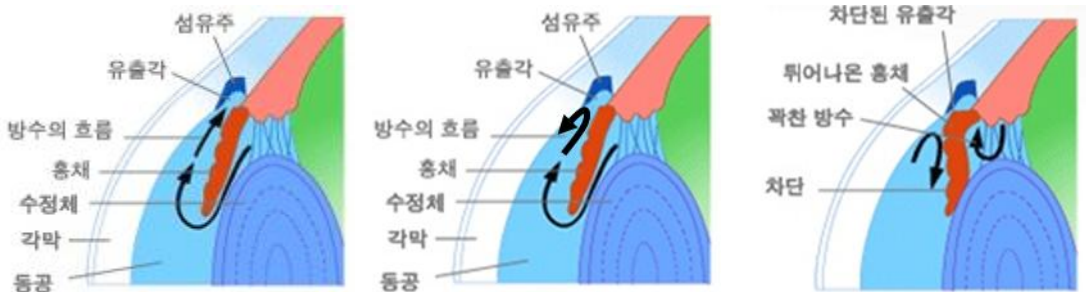
녹내장(glaucoma)은 망막신경섬유층(retinal nerve fiber layer, RNFL)을 포함하는 시신경의 비가역적 손상에 의해 유발된 녹내장성 시야결손이 진행되어 실명에 이르는 안과 질환으로 전세계적으로 환자수와 유병률이 증가하고 있다. 백내장(cataract), 황반변성(age-related macular degeneration, ARMD)을 포함하여 녹내장은 실명을 초래하는 안과 3대 질환으로 Quigley and Broman(2005)에 의해 추정된 2010년 전 세계 녹내장 환자 수와 유병률은 각각 6천만명, 2.65%, 2020년에는 8천만명, 2.86%로 추정되었다. Resnikoff and Keys(2012) 보고에서는 2010년 실명환자의 8%가 녹내장에 의해 실명이 되는 것으로 추정되었다. 국내 녹내장 환자 현황은 국민건강보험공단(2011)에서 발표한 보고에 따르면, 녹내장 환자 수는 전체 인구의 약 2%정도를 차지하고, 2002년에 비해 2009년 녹내장으로 진료를 받는 환자 수(약 40만명)가 2배로 증가하였으며 40대 이상 성인의 녹내장 유병률은 5%에 이르는 것으로 추정되었다.

녹내장을 조기에 발견하게 되면 외과적 수술 또는 약물 치료를 통해, 진행을 지연시켜, 생존 기간동안 실명을 예방할 수 있다. 녹내장은 눈의 체액이 눈 밖을 나가는 부위인 전방각의 개폐여부에 따라 개방각, 폐쇄각 녹내장으로 증상의 발현 속도에 따라 급성과 만성 녹내장으로 분류 되는데, 증상이 서서히

나타나는 녹내장은 만성 개방각 녹내장이다(경성은과 이종훈, 2003; 박기호, 2005; 그림 1-1 참조). 만성 개방각 녹내장 환자가 스스로 생활에 불편함을 지각할 정도가 되면, 환자의 시신경 손상정도는 90%에 이르는 상태이다.



(a) 눈의 구조 및 전방각의 위치



(b) 정상

(c) 개방각 녹내장

(d) 폐쇄각 녹내장

그림 1-1. 눈의 구조와 전방각의 개폐여부에 따른 녹내장 분류

(한국녹내장관리협회, 2009; 죽전안과, 2010)

## Progression of glaucoma



(a) 녹내장성 시야결손에 의한 실명



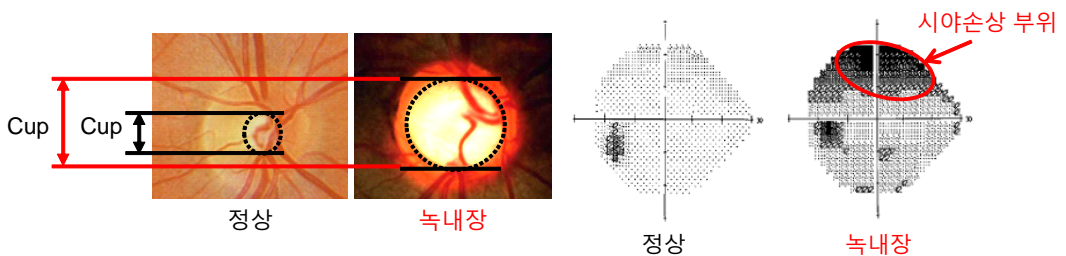
(b) 녹내장 조기진단과 지연치료 통한 시야 유지

그림 1-2. 녹내장성 실명과 조기 진단을 통한 지연치료

만성 녹내장에 의해 시신경 손상이 진행되면 그림 1-2a와 같이 시야가 서서히 좁아져 결국 실명에 이르게 된다. 그러나 녹내장성 시신경 손상을 조기에 발견하게 되면 그림 1-2b와 같이 외과적 수술(섬유주 절제술) 또는 약물 치료(안압하강제)를 통해 녹내장 진행의 지연이 가능하다(박기호, 2005).

임상에서는 녹내장 진단을 위해 시신경의 구조적 검사(structural measurements)와 기능적 검사(functional measurements)가 병행되고 있으나, 실생활을 하기 위해서는 시신경이 정상적으로 기능을 해야하므로 시신경의

기능적 검사가 중요하다. 구조적 검사는 시신경을 포함한 안구의 외부과 내부의 형태와 구조를 측정하는 검사로 시신경 유두 형태, 망막신경섬유층 두께, 전방각의 형태 검사 등이 그 예이다. 기능적 검사는 시신경 부위 별 빛의 민감도, 움직임 측정 등 시신경의 성능을 측정하는 검사로 시야검사가 대표적인 예이다(Caprioli, 1992). 그림 1-3a는 구조적 검사 결과 중 시신경 유두 사진으로 좌측의 정상 시신경 유두 cup의 직경에 비해 우측의 녹내장 환자의 시신경 유두 cup의 직경이 약 2배 증가되어 있다. 그림 1-3b는 기능성 검사인 시야검사 결과로 녹내장 환자의 경우 우측 그림과 같이 시야손상 부위가 검은 음영으로 표시된다. 녹내장 전문 의료진은 피검사자의 시신경을 대상으로 구조적 검사와 기능적 검사를 수행한 결과 각각 시신경 손상과 시야손상이 일관되게 발견된 피검사자의 대상 안구를 녹내장안으로 진단한다. 사람마다 외모와 각 신체기관의 외형에 차이가 있는 것과 같이 안구와 시신경의 형태에도 구조적 차이가 있을 수 있으나, 실제 생활에서 주변 물체와 사람을 인지하고 식별하는 것은 시신경의 성능에 의해 결정되므로 임상에서는 기능적 검사 결과도 중요하게 고려되고 있다.



(a) 시신경 유두 cup 크기

(b) 시야검사 결과(gray scale)

그림 1-3. 녹내장의 구조적 검사와 기능적 검사의 예

자동시야검사기(automated perimetry)로 시야를 측정하는 시야검사가 정확히 수행되기 위해서는 피검사자의 시선을 시선고정용 시표에 고정시킬 수 있는 시선고정 유도방법의 개발이 필요하다. 시야는 눈이 한 점을 주시할 때, 시각이 형성되는 전체적인 공간적 범위로, 정상인의 최대시야범위는 상방(superior) 60°, 하방(inferior) 75°, 내방(nasal) 60°, 외방(temporal) 110°에 이른다(Dersu et al., 2006; 그림 1-4 참조). 시야는 시선방향 안에서 뚜렷하게 보이는 범위인 중심시야(시야각  $\leq 30^\circ$ )와 시선방향 주변의 뚜렷하지 않으나 물체의 존재를 인지 가능한 범위인 주변시야(시야각  $> 30^\circ$ )로 나뉘지며 임상에서는 주로 중심시야 검사결과를 녹내장 진단에 활용하고 있다(그림 1-5 참조).

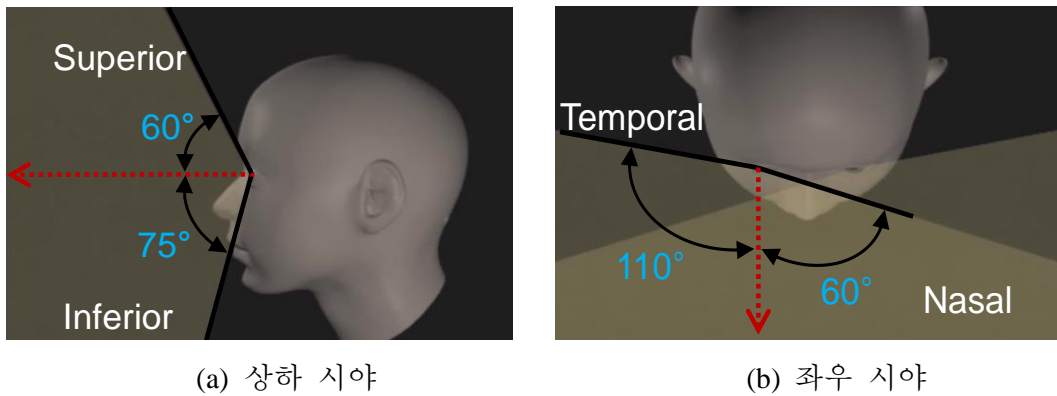


그림 1-4 시야(visual field)





그림 1-5. 야구경기 관람자의 중심시야와 주변시야



그림 1-6. 시야검사 방법

시야검사는 시신경 부위별 기능성을 정량적으로 측정하는 검사로 그림 1-6의 순서로 자동시야검사기에 의해 측정된다. 일반적인 자동시야검사기는 반구 형태의 화면 중심에 시선을 고정시킨 채, 상하좌우 30°영역을 포함하는 중심시야와 30 ~ 60° 또는 그 이상의 영역을 포함하는 주변시야를 측정할 수

있으며, 시야측정 범위에 따라 시야검사용 시표가 시선고정용 시표를 중심으로 지정된 위치에 무작위 순서로, 그리고 다양한 밝기로 제시된다(그림 1-7 참조). 정확한 시야검사를 위해서는 시선고정용 시표에 시선을 고정시키는 것이 중요하나 기존 자동시야검사기는 다양한 색상의 시선고정용 시표만 제공하고 있을 뿐 피검사자의 시선을 유도한 방법은 부재되어 있다(표 1-1 참조). 또한,

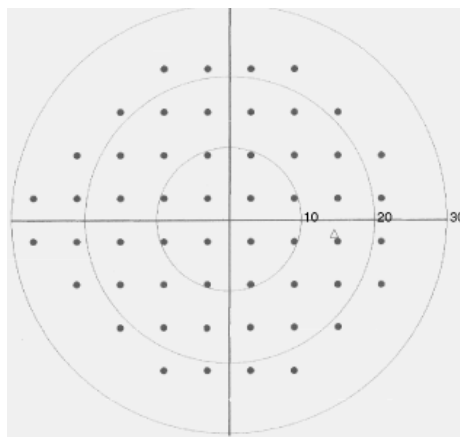
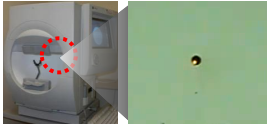
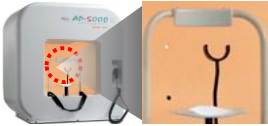
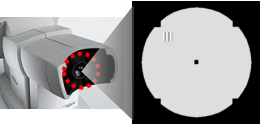
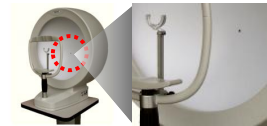
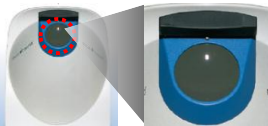


그림 1-7. 시야검사용 시표 위치(central 24-2 threshold test pattern, right eye)

표 1-1. 자동시야검사기의 시선고정용 시표

시선고정용 시표	Yellow dot	White dot	Black dot
사진			
모델명	HVF i-II series	AP-5000	Humphrey® Matrix™
사진			
모델명	M700	Easy field	

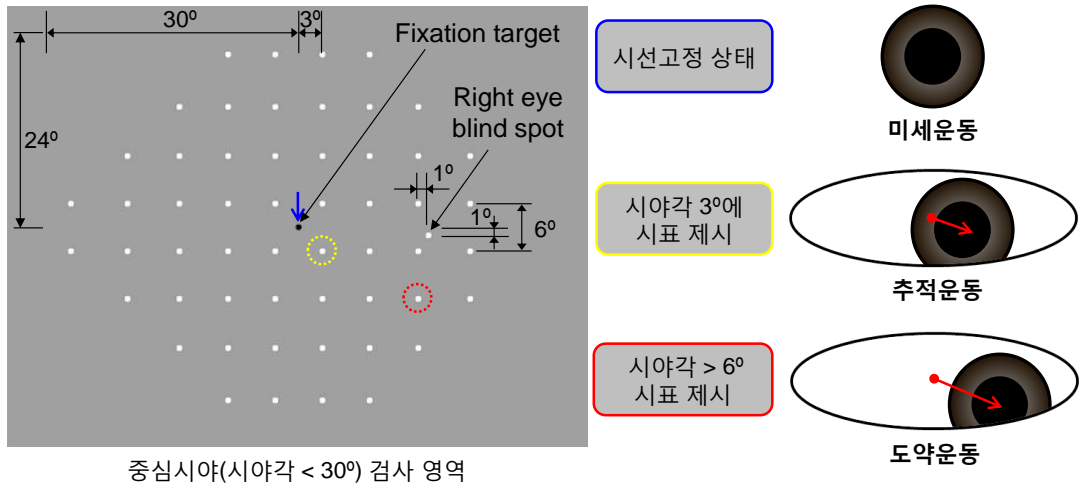


그림 1-8. 시야검사 시 유발되는 안구운동

안구의 미세(fine), 추적(pursuit), 도약(saccade) 운동에 의해, 시표가 제시될 때뿐만 아니라 시선고정을 유지하고 있을 때에도 안구움직임이 발생하기 때문에 시선고정을 유도할 수 있는 방법의 개발이 필요하다(김창희와 이동준, 1995; 그림 1-8 참조).

한편, 임상에서는 시야검사를 포함하여 녹내장 검사결과를 종합적으로 고려하여 녹내장을 정확하고 신속하게 진단할 수 있는 진단 모형의 개발이 필요하다. 녹내장을 정확히 진단하기 위해서는 안과기본검사를 포함하여 안구의 구조적 검사와 시신경의 기능적 검사를 통해 수집된 다양한 자료를 종합적으로 고려하는 것이 필요하다. 녹내장 진단을 위한 안과기본검사에는 시력(visual acuity)검사, 안압(intraocular pressure)검사 등이, 구조적 검사에는 안저촬영(fundus photography)결과를 통한 시신경 유두(optic nerve head, ONH),

표 1-2. 녹내장 진단 검사의 예

안과기본검사	녹내장 검사		
	구조적 검사		기능적 검사
			
시력검사	안저촬영 (시신경 유두 검사, 망막신경섬유층 형태 검사)	망막신경섬유층 두께 검사	시야검사
			
안압검사	전방각경검사	각막두께검사	

망막신경섬유층(retina nerve fiber layer, RNFL) 형태 검사, 망막신경섬유층 두께 (RNFL thickness)검사, 전방각경(gonioscopy)검사, 각막두께(corneal thickness)검사 등이, 그리고 기능적 검사에는 시야(visual field) 검사가 포함된다(표 1-2 참조). 임상에서 이루어지는 녹내장 진단 과정은 그림 1-10과 같이 다양한 검사 결과와 의사결정 과정을 거치도록 구성되어 있기 때문에 녹내장 검사결과가 종합적으로 고려된 정확한 녹내장 진단은 의학적 지식과 임상적 경험이 풍부한 의료진에 의해서만 가능하다.

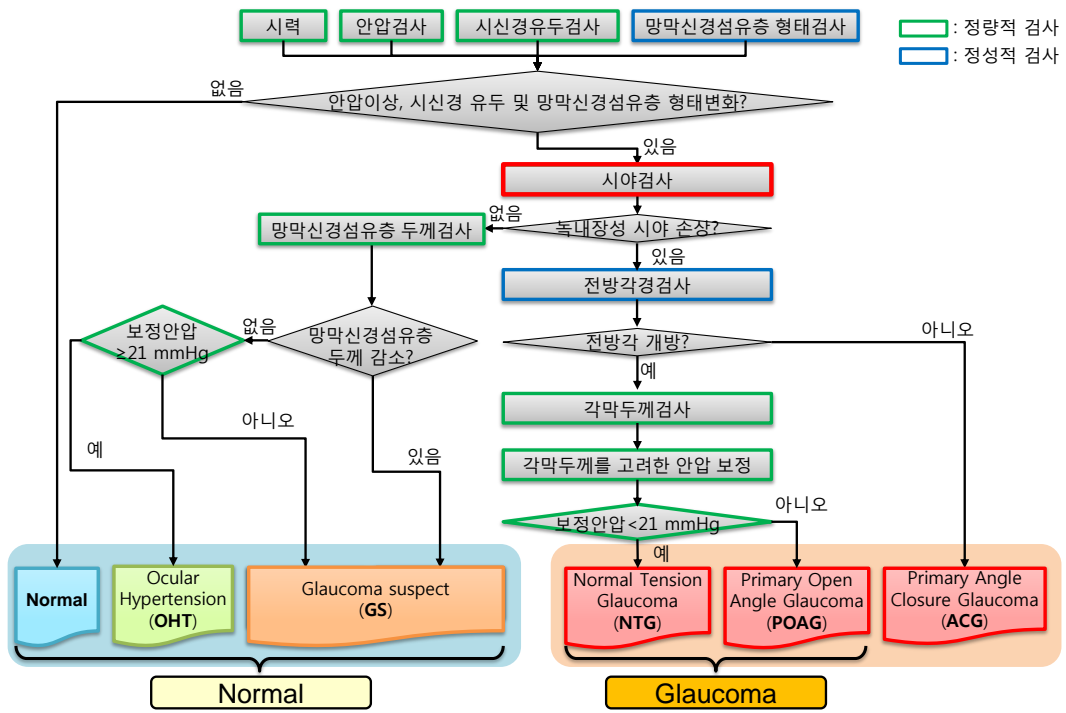


그림 1-9. 임상에서의 녹내장 진단 모형(자문: 강동경희대학교병원 안과)

따라서 다양한 검사자료를 활용하여 의료진의 녹내장 진단 결과를 정량적으로 뒷받침할 수 있는 통계적 진단 모형의 개발이 필요하다.

기존 연구에서는 단일 검사 결과 또는 인구학적 정보, 안과검사 결과, 그리고 녹내장 검사 결과를 함께 활용하여 녹내장 진단 모형을 개발하였으나 임상에서 녹내장 진단에 중요하게 고려되는 변수들이 적용된 연구는 미흡하였다. Moreno-Montanes et al. (2008)은 시신경 유두 형태를 검사하는 장비인 Heidelberg Retina Tomograph III(HRT, Heidelberg Engineering GmbH, Germany), Baskaran et al. (2012)은 망막신경섬유층 두께를 검사하는 장비인 Cirrus high-definition optical coherence tomography (HD-OCT, Carl Zeiss Meditec Inc.), 그리고

Wroblewski et al. (2009)은 시야를 측정하는 장비인 HFA에 활용된 수 있는 진단 모형에 대한 연구를 수행하였으며 각 녹내장 진단 모형의 성능 또한 우수한 편으로 분석되었으나, 실제 임상에서 중요하게 고려되는 검사 결과를 고려하여 적용하고 있지 않은 것으로 파악되었다.

기존 연구에서는 녹내장 진단을 위해 하나의 통계적 분류기법으로 모형을 개발하였으나 다양한 검사결과를 종합적으로 고려하여 정상인과 녹내장 환자를 명확히 분류하기에는 한계가 있어 다단계적 통계 분류 기법의 적용이 필요하다. 녹내장 진단은 다양한 검사결과가 고려되어 진단되기 때문에 단일 검사 결과인 안압, 시신경 유두 함몰비(cup-to-disc ratio, CDR), 각막두께, 시야검사 결과를 각각으로 정상인과 녹내장 환자를 구분하는 기준을 명확히 하는 것은 불가능하다. 예를 들어 정상안압녹내장 환자의 안압은 정상인의 안압 범위인 10 ~ 21 mmHg이내로 측정되어 안압만으로 녹내장을 진단하기에는 부족하며, 시야검사 결과에서 녹내장 진단을 위한 global index중 하나인 mean deviation(MD)은 - 2.0 dB이하일 때, 녹내장으로 의심되나 정상인 결과에서도 MD값이 -2.0 dB이하로 측정되는 경우가 잦아 단일 검사결과에 의존하는 녹내장을 진단하는 것은 삼가되고 있다(한의석 외, 2009). 본 연구에서는 다양한 검사 결과를 사용하여 녹내장을 분류하고 1차 통계 분류에서 오분류된 data 분석을 통해 1차 통계적 분류기법과 순차적으로 적용가능한 2차 분류 기법 또는 기준을 조사, 적용하여 보다 우수한 성능의 녹내장 진단모형을 개발하고자 한다.

## 1.2. 연구 목적

본 연구는 시야검사 기반 녹내장 진단의 인간공학적 개선을 하고자 한다. 첫째, 시야검사 결과의 신뢰성 향상을 위한 인간공학적 시선고정 유도방법을 개발하고 평가한다. 시각적 시선 유도 요소(크기, 점멸속도, 형태)를 적용한 인간공학적 시선고정용 시표를 개발하고, 시선고정 유도방법에 따른 시선고정 성능 및 주관적 만족도 평가를 수행한다. 평가결과를 통해 효과적인 시선고정용 시표를 도출한다.

둘째, 시야검사 결과 기반의 녹내장 진단모형 개발하고 평가한다. 안과기본검사, 구조적 검사, 기능적 검사 자료를 사용하여 녹내장 분류에 적합한 통계적 분류기법을 선별하고, 자료의 조합에 따라 적용된 통계적 분류 기법의 성능을 비교한다. 선별된 녹내장 분류 기법의 적용 결과 오분류된 테스트 표본의 특성을 파악하여 2차 분류가 가능한 테스트 표본의 기준 값을 찾고, 최종 판별 모형에 적용하여 성능을 평가한다.

## 1.3. Organization of the thesis

본 논문은 5개의 장과 4개의 부록으로 구성되어 있다. 제 1장은 연구의 배경, 필요성, 목적과 같은 연구의 전반적인 개요에 대해 서술하고 있으며, 제 2장은 본 연구의 진행을 위해 문헌 조사를 통하여 녹내장 검사, 기존 자동시야검사기의 시선고정용 시표와 한계, 시선고정 유도방법 개발 요소,

그리고 기존 녹내장 진단 모형 개발 동향과 한계점을 정리하고 있다. 제 3장은 인간공학적 시선고정 유도방법 개발 및 평가를 위한 실험 절차, 방법, 결과를 통해 효과적인 시선고정 유도방법 선정과정과 결과에 대해 기술하고 있다. 제 4장은 시야검사 기반의 녹내장 진단모형 개발을 위해, 수집되어 사용된 자료와 통계적 분류기법을 기술하고, 통계적 분류기법을 적용한 결과를 비교 평가하여 최적의 녹내장 진단모형을 도출한 결과를 보여주고 있다. 제 5장은 제3 장과 4장의 결과에 대한 토의 내용을 정리하고 있다. 마지막으로, 부록은 각 장에서 기술된 구체적인 분석 내용 또는 정보를 제시하도록 구성하였다.



## 2. Literature Review

본 장에서는 녹내장 진단을 위한 검사와 검사의 특성을 정리하고 효과적인 시야검사를 위한 시선고정방법 개발을 위해 기존 시야검사장비들의 시선고정방법과 한계를 파악하고 시선 유도와 관련된 기존 연구로부터 시선 유도 요소를 찾고 본 연구에 적합한 요소를 선정하는 과정을 기술하였다. 마지막으로 녹내장 진단 모형 개발 연구 동향과 한계점을 파악하였다.

### 2.1. 녹내장 검사

녹내장 검사는 시신경의 기능적 검사, 안구 및 시신경의 구조적 변화를 측정하는 구조적 검사로 구성된다. 첫째, 시신경의 기능성을 측정하는 시야검사(visual field test)는 망막에 분포된 시신경 세포의 기능적 손상 정도를 망막신경 분포 위치 별 정량적으로 측정하는 검사로 자동시야검사기를 통해 측정된다. 임상에 보급되어 사용되고있는 자동시야검사기의 표준장비는 Humphrey® Field Analyzer(HFA, Carl Zeiss Meditec Inc., USA)로 직경 30 cm의 bowl형태의 시야검사 화면, 피검사자의 머리와 턱을 지지할 수 있는 안면지지대, 시선고정용 LED 전구, 제시되는 시표를 확인여부를 입력할 수 있는 입력버튼으로 구성되어 있다(그림 2-1참조). HFA를 통해 진행되는 시야검사는 그림 1-6과 동일한 순서로 진행되며, bowl형태 화면중심에 위치한



그림 2-1. Humphrey® Field Analyzer

시선고정용 LED 전구에서 나오는 빛에 시선을 고정 시킨 상태에서 설정된 시야범위 내에서 무작위 순서로 제시되는 특정 밝기의 dot(●) 형태 시표에 대한 피검사자의 반응을 통하여 시신경의 밝기에 대한 threshold sensitivity value (TSV, dB)가 결정되는 검사이다. 시야검사용 시표의 밝기는 피검사자의 시표 밝기에 대한 TSV(dB)를 정확하고 효과적으로 검출될 수 있도록 구현된 algorithm에 의해 조정된다. 제시되는 시표의 밝기를 조절하는 algorithm은 피검사자의 반응 여부에 따라 밝기에 변화를 주는 방식을 채용하고 있으며 장비의 종류와 algorithm에 따라 조정되는 밝기의 범위에 차이가 있다. HFA에 사용되고 있는 시표 밝기 조절 algorithm은 SITA Standard™, SITA Fast™, full threshold, 그리고 FastPac™이 탑재되어 있으나 임상에서는 SITA Standard™ algorithm이 주로 사용되고 있다. 시표 밝기 조절 algorithm에 의해 최종 결정된

시신경의 TSV(dB)는 피검사자의 연령을 고려하여 동일 연령의 정상 시야 normative data와의 차이를 나타내는 total deviation(TD, dB)과 국소적인 시야손상 정도를 나타내는 pattern deviation(PD, dB)과 함께 검사결과에 출력된다(그림 2-2 참조).

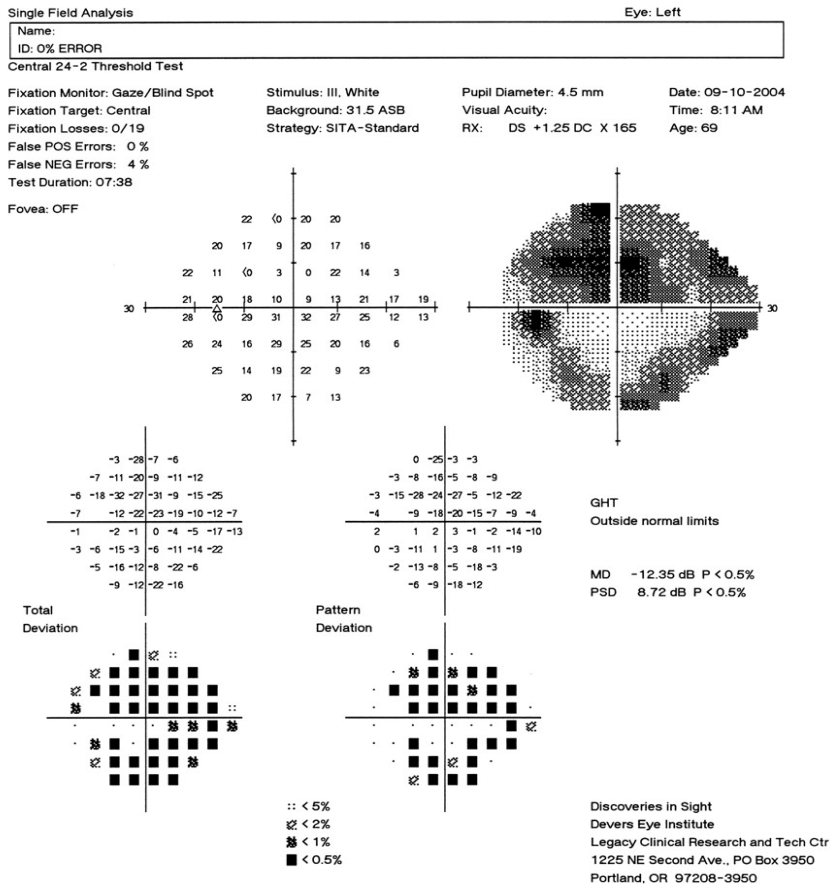


그림 2-2. HFA 시야검사 결과(Newkirk et al., 2006)

시야검사 위치별 TD(dB)는 식 2-1에 의해 통계값 mean deviation(MD, dB)으로 산출되며 임상에서 시야검사 결과 MD < -2.00 dB이면 녹내장성 안구일 가능성이 높은 것으로 판정된다.

$$MD_{HFA} = \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(x_i - z_i)}{S_{1i}^2} \right] / \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_{1i}^2} \right] \quad (\text{식 2-1})$$

Where,  $S_{1i}^2$ , variance of the normal field measurement at location  $i$

$z_i$ , normal reference threshold sensitivity value at location  $i$

$x_i$ , measured threshold sensitivity value of test location  $i$

$m$ , number of tested locations (excluding the blind spot)

시야검사 위치별 PD(dB)는 피검사자의 시야와 그 성능이 등고선으로 표현된 시야등고선(hill of vision)과 정상인의 시야등고선의 표준편차를 통해 국소적인 손상정도를 정량적으로 나타내는 pattern standard deviation(PSD, dB)값으로 계산되어 진다(식 2-2 참조).

$$PSD = \sqrt{\left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{1i}^2 \right] \cdot \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \frac{(x_i - z_i - MD_{HFA})^2}{S_{1i}^2} \right]} \quad \text{식 2-2}$$

Where,  $S_{1i}^2$ , variance of the normal field measurement at location  $i$

$z_i$ , normal reference threshold sensitivity value at location  $i$

$x_i$ , measured threshold sensitivity value of test location  $i$

$m$ , number of tested locations (excluding the blind spot)

$MD_{HFA}$ , mean deviation

식 2-2에 의해 산출되는 PSD 값은 수치가 높을 경우 시신경 손상의 원인이 노화 또는 백내장 등에 의한 전반적인 시야장애가 아니라 녹내장에 의한 시야장애의 가능성이 높음을 의미한다. 따라서, MD와 PSD는 임상에서 녹내장 진단의 중요한 measure로 고려된다(Dersu and Wiggins, 2006).

둘째, 안구 및 시신경의 구조적 변화를 측정하는 녹내장 검사는 시신경 유두 검사, 망막신경섬유층 형태검사, 망막신경섬유층 두께검사, 전방각경검사, 각막두께검사 등으로 구성된다. 시신경 유두검사는 안저촬영(fundus photography) 또는 시신경유두분석기를 통해 시신경 유두의 형태 파악 및 시신경 유두함몰비(cup-to-disc ratio, CDR)를 측정하는 검사로 일반적으로  $CDR \geq 0.7$  이면 녹내장성 시신경 손상일 가능성이 높다(Crowston, 2004). 망막신경섬유층 형태 검사는 안저촬영을 통해 얻은 흑백 사진의 음영을 통해 손상정도를 파악하는 검사이다. 망막신경섬유층 두께검사는 광간섭단층촬영(optical coherence tomograph, OCT)을 통해 비침습, 비접촉적 방법으로 망막내 해부학적 층의 위치를 확인하고 망막의 두께를 정량적으로 측정하는 검사이다(조병주, 2008). 전방각경검사 (gonioscopy)는 각막(cornea)과 홍채(iris)가 만나는 부분의 방수 (aqueous humor) 유출구인 섬유주(trabecular)가 홍채에 의해 개방되어

있는지 폐쇄되어 있는지 여부를 골드만 3면경 또는 자이스 4면경 등을 사용하여 관찰하는 검사이다(오종현 외, 2006). 관찰 결과 섬유주가 개방되어 있는 경우는 개방각녹내장, 섬유주가 폐쇄되어 있는 경우는 폐쇄각 녹내장으로 구분된다. 각막두께검사는 초음파를 사용하여 각막두께(corneal thickness)를 측정하는 검사로 녹내장 진단에는 측정된 각막두께 중 중심각막두께(central corneal thickness, CCT)가 사용되며, 김성욱 외(2009)의 보고에 의하면 한국인의 중심각막두께 정상 범위는 470 ~ 658  $\mu\text{m}$ 에 속한다고 한다. Ehler et al.(1975)과 Doughty와 Zaman(2000)은 중심각막두께에 의해 안압 측정값에 차이가 나타날 수 있으며, 녹내장 진단과 치료 방향 결정에 중요한 영향을 미칠 수 있다고 한다. Copt et al. (1999)은 개방각 녹내장 환자의 중심각막두께가 얇게 측정된 경우 정상안압녹내장으로, 정상인 사람의 중심각막두께가 두껍게 측정된 경우 고안압증으로 오진될 가능성이 높아 중심각막두께검사의 중요성 및 중심각막두께를 고려한 안압 보정의 필요성을 강조하였다.

셋째, 기본적인 안과검사는 시력검사(visual acuity test), 안압검사(tonometer)로 구성되며 시력검사는 일반적으로 안경 또는 안과 시력 교정용 장비를 이용해 시력을 교정시킨 상태에서 4 ~ 5 m 떨어진 위치의 시력검사표에 나타난 숫자 또는 글자 시표의 크기, 공인된 시표인 Landolt's Ring 또는 E 스벨렌 시표의 홈 방향을 사용하여 측정된다(송경석 외, 2005). 안압검사는 안구 내부의 압력을 비침습적 방법으로 직접 측정하는 검사로 정상안의 안압 범위는 10 ~ 21 mmHg에 속한다(김성욱 외, 2009). 안압은 검사

유형에 따라 함입 안압계(indentation tonometer)와 압평안압계(applanation tonometer)로 측정된다. 함입 안압계는 안압계 막대(plunger) 무게에 의해 각막이 눌리는 정도를 통해 안압을 측정하는 방법으로, Schioltz 안압계가 대표적인 장비로 사용되고 있으며, 측정이 간편하지만 오차가 큰 단점이 있다(이미혜와 김석동, 2002). 압평 안압계는 각막의 일정한 면적에 압력이 가해졌을 때, 각막을 다시 편평하게 만드는 힘을 측정하는 방법으로, Schioltz 안압계에 비해 오차가 적어 Goldmann 안압계가 임상에서 표준 장비로 인정되고 있다(김홍복 외, 1982). 그러나 안압은 피검사자의 각막 두께에 따라 측정 값의 보정되어야 정확한 안구내부 압력을 측정할 수 있기 때문에 각막두께검사 결과와 연계가 필요하다(김성욱 외, 2009).

## **2.2. 자동 시야검사기의 시선고정 방법 및 시선 유도 방법**

본 단락에서는 HFA장비를 포함하여 기존 시야검사 장비들에 탑재되어 있는 시선고정 방법에 대해 파악하고, 기존 연구 중 시선 유도와 관련된 연구를 바탕으로 시선고정 유도방법 개발을 위한 요소를 선별하였다.

### **2.1.1. 자동 시야검사기의 시선고정 방법**


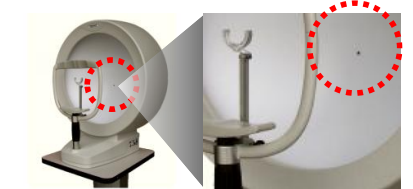
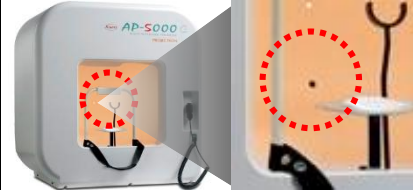
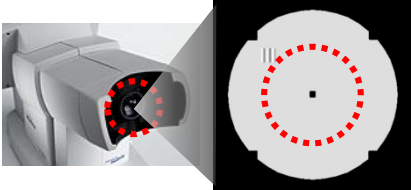
임상에서 사용되고 있는 기존 시야검사장비들은 다양한 색상의 시선고정용 시표를 제공하고 있으나 시선고정을 유도하는 방법은 부재되어 있다. 임상에서 시야검사가 진행되는 동안 피검사자의 시선을 고정시키기 위해,

의료진의 구두 지시가 병행되고 있으나 형태가 단순하고, 변화가 없는 시선고정용 시표로 인해 피검사자가 평균 5분 이상 진행되는 검사시간 동안 자발적으로 시선을 고정시키기 어렵다. 시야검사의 표준 장비인 HFA를 포함하여 4개의 자동시야검사기의 사용자 매뉴얼을 분석한 결과 표준 장비인 HFA와 M700(Medmont International Pty Ltd., Australia)은 yellow dot 형태의 LED, AP-5000(Kowa Company Ltd., Japan)는 red dot 형태의 LED, Humphrey® Matrix™(Matrix; Carl Zeiss Meditec Inc., USA)는 black dot 형태의 시선고정용 시표가 각각 사용되고 있었다(Carl Zeiss Meditec. Inc., 2005; Carl Zeiss Meditec. Inc., 2003; Medmont International Pty Ltd., 2010; Kowa Company , Ltd., 표 2-1 참조). 그러나 기존 시야검사기에 탑재된 시선고정용 시표들은 특정 색깔의 빛만 제공하고 있을 뿐 피검사자의 시선고정을 자발적으로 유도할 수 있는 방법은 개발되어 있지 않는 것으로 파악되었다.

기존 자동시야검사 장비들은 시선고정 유도방법의 부재에 대해 검사과정이나 사후 대안으로 동공 모니터링 또는 추적 시스템을 탑재하고 있기 때문에 보다 능동적으로 시선고정을 유도할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 대표적 자동시야검사기인 HFA는 동공의 움직임을 모니터링 하는 eye monitoring system과 동공의 움직임을 추적하여 그래프 형태로 결과를 제공하는 gaze tracking system을 탑재하고 있으며, Matrix는 eye monitoring 시스템만 탑재하고 있다. Eye monitoring system은 실시간 모니터링만 가능하고 별도의 정량적 결과를 제공하고 있지 않고, gaze tracking system에 의해 제공되는 실시간

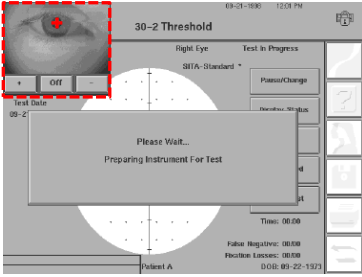
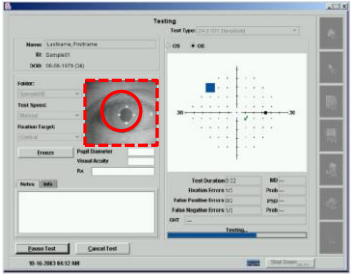
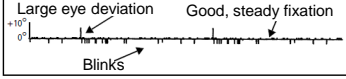


표 2-1. 기존 자동시야검사기의 시선고정용 시표

시선고정용 시표	Yellow dot	
사진		
모델명	Humphrey® Field Analyzer	M700
시선고정용 시표	Red dot	Black dot
사진		
모델명	AP-5000	Humphrey® Matrix™

tracking 결과 또한 정성적인 gaze graph만으로 제공되고 있어 근본적으로 시선고정을 유도하여 정확한 시야검사가 이루어지도록 하는데에는 한계가 있다 (Carl Zeiss Meditec. Inc., 2005; Carl Zeiss Meditec. Inc., 2003; 표 2-2 참조).

표 2-2. HFA의 gaze tracking system과 Matrix의 eye monitoring system

Name		Humphery <sup>®</sup> Field Analyzer	Humphery <sup>®</sup> Matrix <sup>TM</sup>
Method		<b>Gaze tracking:</b> 검사 시작 시 동공의 위치로부터 동공이 떨어진 정도가 자동적으로 추적되어 graph로 나타내는 방법	<b>Eye monitoring:</b> 환자의 동공이 장비 화면에 그려진 특정 크기의 원을 벗어나는지 모니터링 하는 방법
Test screen			
Result			-
Fixation Control function	eye monitoring	O	O
	Gaze tracking	O	X

### 2.1.2. 시선 유도를 위한 시각적 주의 유도 연구

시선유도 유관연구로부터 시야검사의 시선고정용 시표개발에 사용가능한 요소로 크기(size), 점멸속도(flash rate), 그리고 형태(shape)를 선정하였다. 정확한 시야검사를 위한 시선고정 유도방법에 대한 기존 연구는 부재하였으나 유관연구 중에서 주의를 끄는 시각적 요소에 대한 연구 결과를 찾아내었다. Sanders and McCormick(1993)의 시각적 코드화 요소 중에서는 형태의 크기(size of forms), 빛의 점멸속도(flash rate of lights), 기하학적 형태(geometric shape), 빛의 밝기(brightness of lights), 경사각(angle of inclination)

표 2-3. 주의 유도 요소

Factors	Attributes	# of levels	Preferable limit
Size of forms	- Use only when specifically appropriate	5 or 6	3
Flash rate of lights	- Possible use in combination with controlled time interval - Use to attract attention to specific areas	-	2
Geometric shapes	- Good for CRTs - Shapes used together need to be discriminable	15 or more	5
Brightness of lights	- Weaker signals may be masked	3-4	2
Angle of inclination	- Indication direction, angle, or position on round instruments	24	12

등의 요소가 시각적 주의를 끌 수 있다고 하였다(표2-3 참조). 이들 중 점멸속도에 대해, Woodson and Conover(1964)는 3 ~ 10 Hz 속도로 점멸하는 점멸등을 사용하면 사람의 주의를 끌 수 있다고 보고하였고, Connors(1975)는 NASA의 항공기 충돌방지시스템(collision avoidance system, CAS) 개발 기술 보고서에서 점멸하는 빛이 사람의 시선을 유도하여 인접 항공기를 정확하고 빠르게 검출함으로써 항공기 충돌을 방지 효과를 보임을 증명하였다. 시야검사는 밝기가 다른 시표를 제시하여 망막의 빛에 대한 민감도를 측정하는 검사로 밝기 요소 적용이 어렵고, 시표가 무작위로 제시되기 때문에 시계나 CRT와 같은 원형 계기에서 방향, 각도, 위치 등에 주의를 끄는 요소로 사용되는 경사각은 혼동을 야기할 수 있어 본 연구의 시선고정 유도방법의 개발 요소에서 제외하였다.

### 2.3. 녹내장 진단모형 개발 연구 동향

기존에 수행된 녹내장 진단모형 개발 연구는 단일 장비 중심의 진단모형과 임상에서 녹내장 진단 시 중요하게 고려되는 정보가 포함되지 않은 진단모형에 대한 연구로 나눌 수 있다. 첫째, 기존 연구에서는 시야검사, 시신경 유두 형태검사, 그리고 RNFL 두께검사 등 단일 검사 장비에서 측정된 데이터를 사용한 녹내장 진단 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이나, 녹내장은 다양한 검사결과를 종합적으로 고려하여 진단하는 질병이기 때문에 한계가 있다. 녹내장 진단 모형은 녹내장 진단 검사로부터 얻은 데이터를 활용하여 대상안의 상태를 정상 또는 녹내장으로 분류시키는 통계적 모형으로, Baskaran et al. (2012)은 망막신경섬유층 두께를 검사하는 장비인 Cirrus high-definition optical coherence tomography (HD-OCT, Carl Zeiss Meditec Inc.)에서 측정된 시신경 유두와 망막신경 섬유층 데이터를 linear discriminant analysis (LDA)와 classification and regression tree (CART) 기법을 사용하여 정상안과 녹내장 안을 판별하는 모델을 제안하고 성능을 비교 평가하였다. Townsend et al. (2008)은 시신경 유두 형태를 검사하는 장비인 Heidelberg Retina Tomograph III(HRT, Heidelberg Engineering GmbH, Germany)에서 측정된 이미지 분석에 linear discriminant analysis(LDA), linear-support vector machine(SVM), Gaussian- SVM, generalised additive model (GAM), Gaussian 오차가 고려된 generalised linear model(GLM-Gauss), 이항 오차가 고려된 Generalised Linear Model (GLM-bin), 그리고 recursive partitioning and regression trees (RPART)를 사용하여

녹내장 진단 모형을 개발하고 검증하였다. Chan et al.(2002)의 연구에서는 시야검사의 TSV(dB)를 사용하여 Multilayer perceptron (MLP), SVM, LDA,quadratic discriminant analysis(QDA), 그리고 Parzen Window 등 다양한 통계적 기법을 적용하여 녹내장을 분류하였다(표 2-4 참조). 위 3가지 연구에서 개발된 녹내장 진단 모형은 전반적으로 성능이 우수한 것(accuracy or ROC area  $\geq$  80%)으로 나타났으나 녹내장은 구조적 검사와 기능적 검사 양측을 복합적으로 고려해야 하는 질환이므로 단일 검사의 진단 결과로 녹내장을 판별하는 것은 정보의 일부를 확대해석하는 오류를 범하는 것이 될 수 있다.

둘째, 인구학적 정보, 안과 기본 검사 결과, 그리고 녹내장 검사 결과를 포함한 다양한 정보를 사용하여 녹내장 진단모형 개발한 연구에서는 녹내장 진단에 다양한 정보를 종합적으로 고려하고 있으나 실제 임상에서 녹내장 진단에 중요하게 활용되는 정보를 사용하고 있지 않았다. Wroblewski et al. (2009)은 HFA 시야검사 결과 중 TSV(dB), 인구학적 정보(나이, 성별), 안과검사결과(IOP, CCT, CDR), 그리고 가족력을 사용하여 support vector machines(SVM)기법을 통해 녹내장을 분류하였고, Park et al.(2001)은 인구학적 정보(나이, 성별), 안과검사 결과(IOP, CCT, VCD, CDR asymmetry), 녹내장 검사 결과(HRT classification), 그리고 가족력을 사용하여 multiple regression analysis기법을 통해 녹내장을 분류하였다(표 2-4 참조). 그러나 임상에서 녹내장 진단에 중요하게 고려되는 시야검사 결과인 pattern deviation(dB) 정보는 진단모형 개발에 사용하고 있지 않은 것으로 파악되었다. 따라서, 임상에서

의료진이 녹내장 진단에 중요하게 고려하는 정보들이 포함된 녹내장 진단모형의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 문헌 조사 결과를 바탕으로 녹내장 진단모형 개발에 임상에서 중요하게 다루어지는 검사결과를 포함시키는 것과 분류 기법 적용 후 오분류되는 sample로부터 추가 분류가 가능한 특성을 파악하는 초점을 맞추고자 한다.

표 2-4. 기존 녹내장 진단모형 개발 연구의 한계

No.	Study (year)	Classification				
		변수	통계적 기법	진단	성능	한계
1	Baskaran et al. (2012)	OCT results (normal, n = 508 eyes; glaucoma, n = 184 eyes)	LDA, CART	Normal/ glaucoma	ROC area: 0.89 ~ 0.96	- 단일 검사 장비에서 얻은 data만 사용하여 진단모형 개발  - 임상에서 녹내장 진단에 중요하게 고려되는 검사결과 사용 X
2	Townsend et al. (2008)	HRT images (normal, n = 60 eyes; glaucoma, n = 140 eyes)	LDA, linear-SVM, Gaussian-SVM, GAM, GLM-Gaussian, GLM-bin, RPART		Accuracy - RPART: 87.5%	
3	Chan et al. (2002)	HFA results: TSV (dB) (normal, n = 189 eyes; glaucoma, n = 156 eyes)	MLP, linear-SVM, Gaussian-SVM, LDA, QDA, Parzen Window		ROC area - Linear SVM: 0.893 - Gaussian SVM: 0.914 - LDA: 0.824	
4	Wroblewski et al. (2009)	Age, gender, IOP, CCT, CDR, family history, TSV (n = 2,017 eyes)	SVM, GLI	Normal/ glaucoma suspect/ glaucoma	Accuracy - GLI: 75.0%	- 임상에서 녹내장 진단에 중요하게 고려되는 검사결과 사용 X
5	Park et al. (2001)	Age, gender, VCD, CDR, asymmetry, HRT classification, IOP, DM, P100, retino-cortical time (normal, n = 49 eyes; glaucoma, n = 49 eyes )	Multiple regression analysis	Normal/ glaucoma	Accuracy: 60.0 ~ 70.0%	

### 3. 인간공학적 시선고정 유도방법 개발 및 평가

#### 3.1. 연구목적

본 연구는 시야검사 검사결과의 신뢰성 향상을 위해, 인간공학적 시선고정 유도방법을 개발하고 평가하고자 한다. 첫째, 시각적 주의 요소를 활용하여 시선을 유도할 수 있는 시선고정용 시표를 개발한다. 둘째, 개발한 시선고정 유도방법에 따른 시선고정 성능 및 주관적 만족도를 평가하고, 마지막으로 결과 분석을 통해 효과적인 시선고정용 시표를 도출한다.

#### 3.2. 시선고정 유도방법 개발 및 평가 절차

본 연구는 그림 3-1과 같이 3단계의 연구절차에 따라 시선고정 유도방법을 개발하고 평가하였다. 첫째, 시각적 주의 요소를 활용하여 시선을 유도할 수 있는 시선고정용 시표를 개발하였다(S1), 둘째, 개발된 시선고정 유도방법을 크기(S2-1), 점멸속도와 형태(S2-2) 요소로 나누어 성능과 주관적 만족도를 평가하였다(S2). 측정과 평가결과 분석을 통해 시야검사시 시선고정에 효과적인 시선고정 유도방법을 도출하였다(S3).



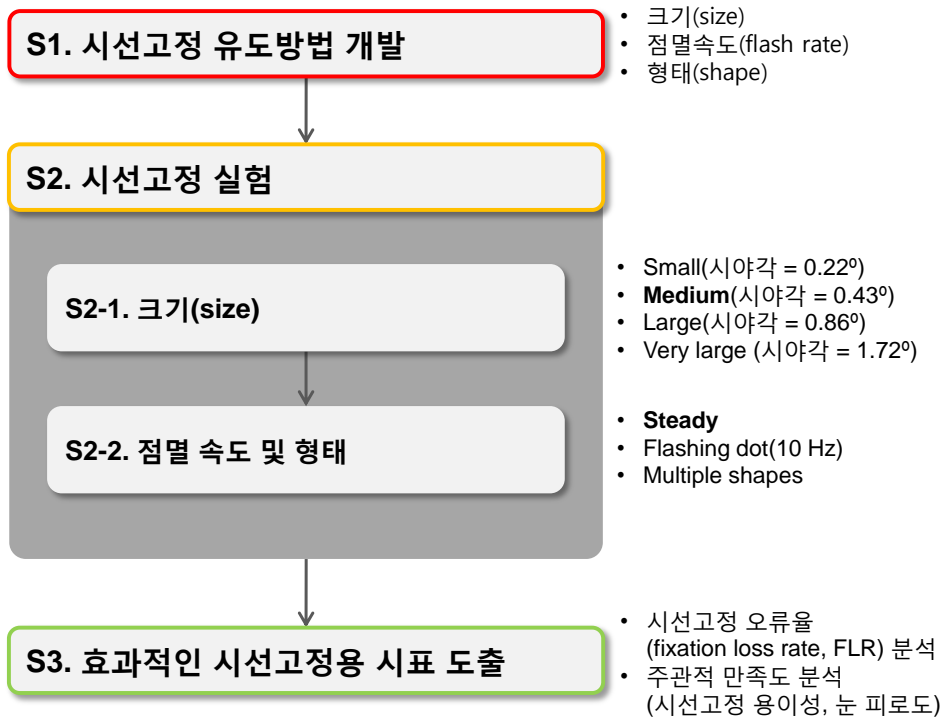
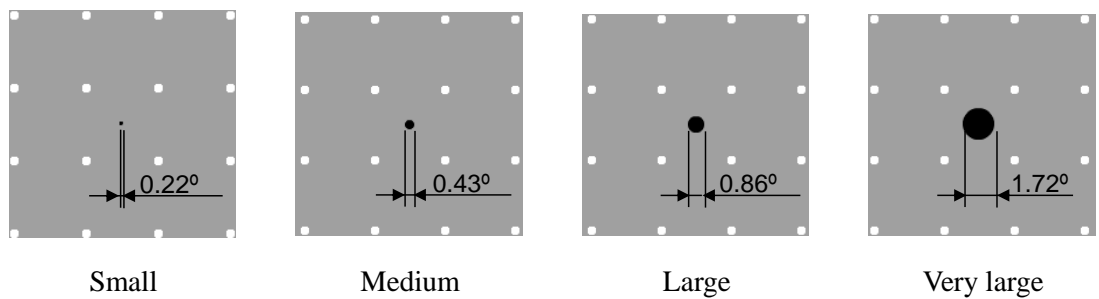


그림 3-1. 시선고정 유도방법 개발 및 평가 연구절차

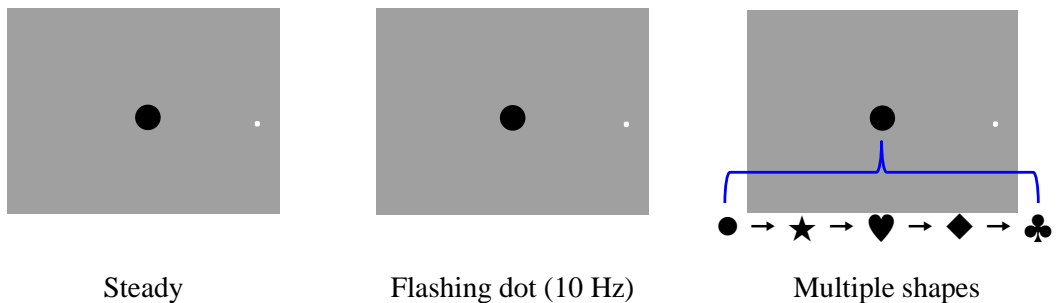
### 3.2.1. 시선고정 유도방법 개발

본 연구에서는 Sanders and McCormick(1993), Woodson and Conover(1964), 그리고 Connors(1975)의 연구결과를 바탕으로 크기, 점멸속도, 형태 요소를 활용하여 시선고정 유도방법을 개발하였다. Sanders and McCormick(1993)의 시각적 코드화 요소중 크기는 HVF에서 사용되고 있는 시표의 크기를 참조하여 small(시야각 = 0.22°), medium(시야각 = 0.43°), large(시야각 = 0.86°), 그리고 very large(시야각 = 1.72°) 네 가지 크기의 시선고정용 시표로 제작하였다(그림 3-2a 참조). 점멸속도와 형태 요소를 활용하여 점멸속도가 10 Hz인 dot(●)과 동일한

속도로 shape이 변형(● → ★ → ♥ → ◆ → ♣)되는 시선고정용 시표를 medium크기로 제작하여 시선을 유도하고자 하였다. 점멸시표의 점멸속도는 시야검사용 시표 제시간격(0.2초 → 5 Hz)보다 빠르며, 빛이 정상광으로 인지되는 임계융합빈도(critical fusion frequency, CFF > 30 Hz)이하의 속도 범위 내에서 10 Hz로 선정하였다(그림 3-2b 참조).



(a) 크기 별 시선고정용 시표



(b) 점멸속도와 형태 변형 시선고정용 시표

그림 3-2. 시선고정 유도 요소가 적용된 시선고정용 시표

### 3.2.2. 실험설계

개발된 시선고정용 시표에 대한 성능과 주관적 만족도 평가를 위해, 독립변수는 시선고정용 시표의 크기(small, medium, large, 그리고 very large), 그리고 점멸속도와 형태(steady, flashing dot, 그리고 multiple shapes)로, 종속변수는 시선고정 오류률(fixation loss rate, FLR), 주관적 만족도(시선고정 용이성, 눈 피로도; 7점 척도)로 정하여 실험 및 분석을 수행하였다.

### 3.2.3. 실험참여자

본 연구의 실험참여자는 녹내장성 시야 결손 또는 백내장이 없으며 우안의 교정시력이 0.8 이상인 정상인을 대상으로 선정하였다. 대상 연령과 성별 실험참여자 인원은 강동경희대학교 병원 녹내장 환자 현황을 바탕으로 녹내장 검진 환자 수가 급격히 증가하는 50대 이상의 남녀 각 10명(크기 실험: 남녀 각 5명, 점멸 실험: 남녀 각 5명)을 실험참여자로 정하였다(그림 3-3 참조).

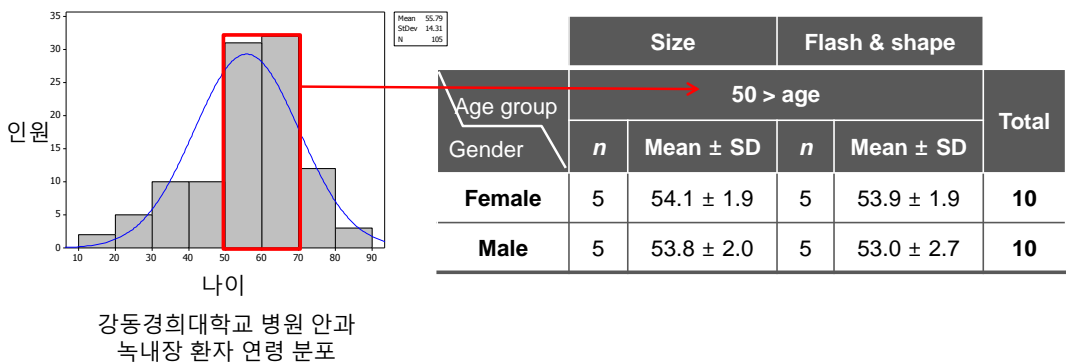


그림 3-3. 실험참여자

크기 별 시선고정용 시표의 성능과 주관적 만족도 평가 실험에 참여한 실험참여자 연령은 53.9 ± 1.9세, 점멸속도와 형태변형 시선고정용 시표의 성능과 주관적 만족도 평가 실험에 참여한 실험참여자 연령은 53.3 ± 2.4세였다.

### 3.2.4. 실험 장비

본 연구의 시선고정 실험을 수행하기 위해, 시선고정 성능 평가 프로그램이 탑재된 PC, 시야검사 영역과 시표가 제시되는 27 inch monitor(Shimian, Achieva Technologies Korea, Inc., Korea; pixel pitch = 0.233 mm), 실험참여자의 안면과 우안이 시선고정용 시표에 고정되도록 하기 위한 Ultra Precision Head Positioner(Arrinton Research, Inc., USA), 그리고 실험참여자가 제시되는 시표에 대해 인식여부를 입력할 수 있도록 keypad가 사용되었다(그림 3-4 참조).

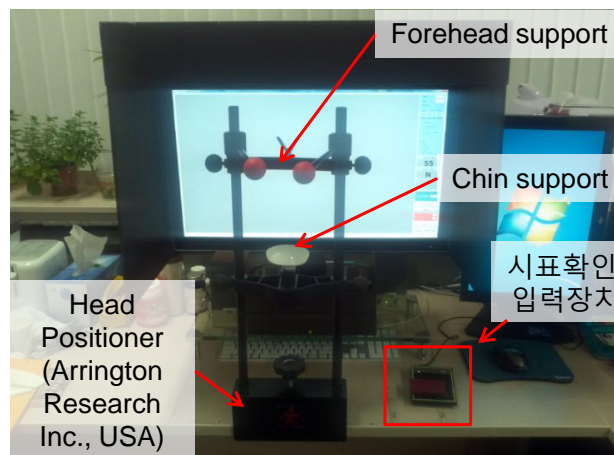


그림 3-4. 시선고정 실험 장치

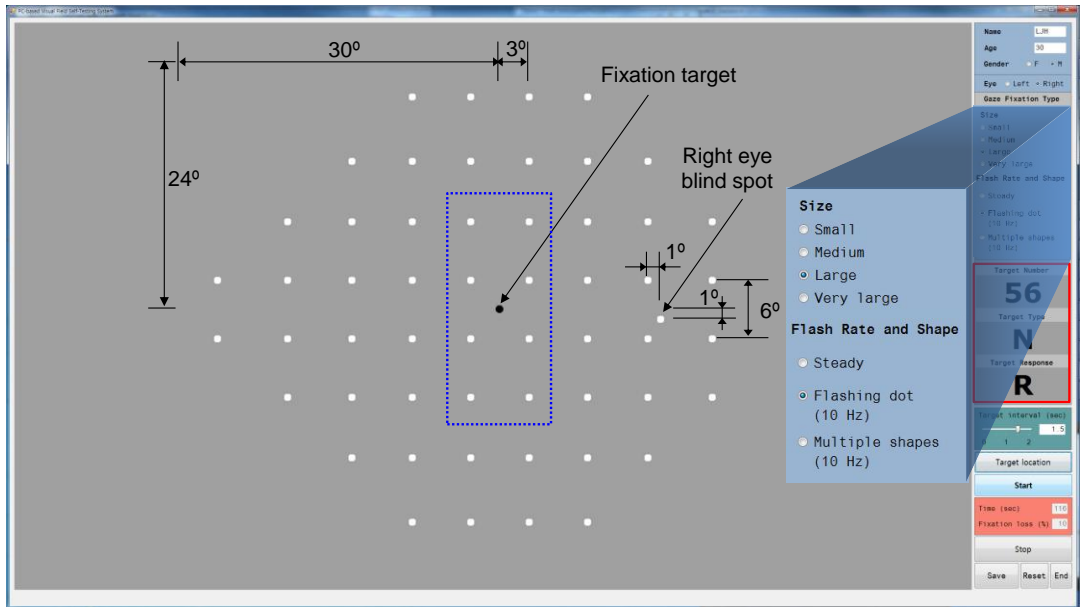


그림 3-5. 시선고정 평가 프로그램(right eye)

개발된 시선고정용 시표 별 성능을 평가하기 위한 시선고정 평가 프로그램(Gaze fixation testing software, GFT s/w)는 시선고정용 시표를 다양하게 선택하여 시야검사를 진행할 수 있도록 그림 3-5와 같이 제작되었다. 시표 위치 pattern은 HFA의 시표의 test pattern 중 현재 임상에서 보편적으로 사용되고 있는 central 24-2 pattern을 기준으로 시선고정용 시표, 시야검사용 시표, 맹점 시표의 크기와 위치를 구현하였다. GFT s/w의 우측 상단 패널에는 시험참여자의 이름과 나이가 기록되며, 성별과 검사안을 선택할 수 있다. 두 번째 패널에는 시선고정용 시표의 크기를 선택하거나 점멸 또는 형태가 변형되는 시선고정용 시표를 선택할 수 있도록 하였다. 세번째 패널에는 제시되는 시표의 번호와 제시되고 있는 시표가 시야검사용 시표(normal, N)인지 맹점시표(blind spot,

B)인지 제시되며, 실험참여자의 반응(response, R)이 표시되도록 하였다. 위의 세 패널 아래에는 시표제시 간격을 설정하는 조절바, 시표의 위치를 확인할 수 있는 target location 버튼, 시작 버튼, 경과시간과 FLR이 각각 표시되는 textbox, 정지, 저장, 재설정, 종료 버튼이 순차적으로 배치되어 있다.

총 제시되는 모든 시표의 횟수는 110회로 시야검사용 시표 100회, 맹점시표 10회로 구성되어 있다. 시야검사용 시표는 시선고정용 시표를 중심으로 상하좌우 방향으로 시야각 3°, 9°, 15°, 21°, 그리고 최대 27° 범위까지 측정되도록 배치되어 있다. 시선고정용 시표의 제시횟수는 그림 3-5의 청색 점선 내부 시표 8개는 각각 1회씩 제시되며, 외부 시표 46개는 각각 2회씩 제시되어 총 100회가 제시된다. 맹점시표는 우안의 경우 시선고정용 시표의 우측으로 16°, 아래쪽으로 1° 떨어진 위치에 배치하였으며, 총 10회 제시되도록 하였다.

### 3.2.5. 실험 절차

본 연구에서는 시선고정용 시표의 크기, 점멸속도, 형태에 따른 시선고정 성능 및 주관적 만족도 평가를 위한 시선고정 실험을 실험준비, 연습, 시선고정 실험, 사후 설문의 순서로 수행하였다. 실험을 위한 준비 단계에서는 실험참여자에게 실험을 설명하고 실험 수행에 대한 동의를 받은 후, 안대로 실험참여자의 좌안을 가리고, head positioner에 안면을 고정시켰다. 연습

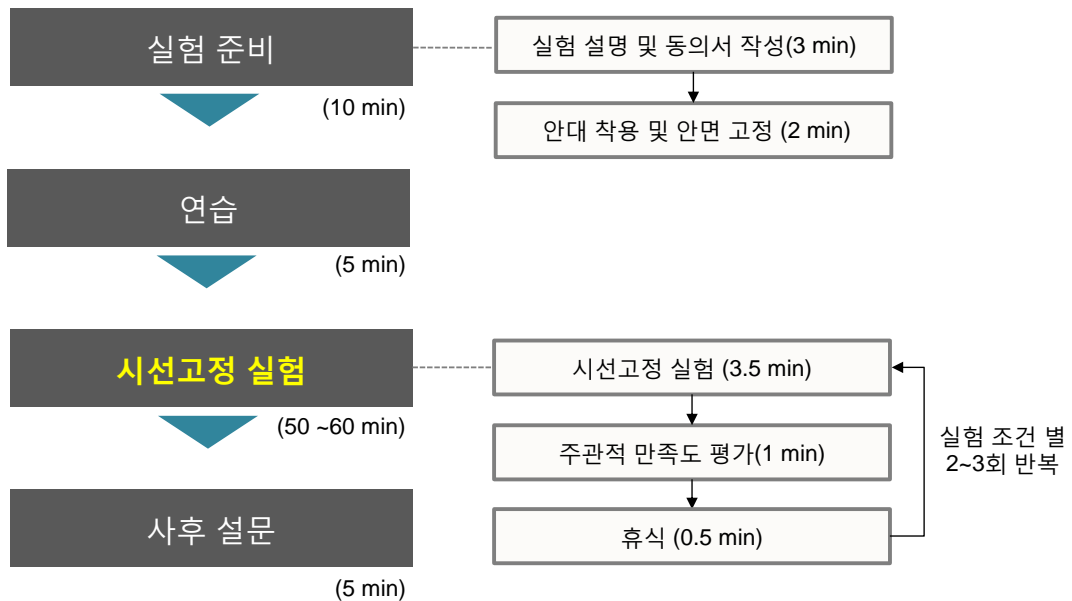


그림 3-6. 시선고정 실험 절차

단계에서는 실험참여자가 다양한 시선고정용 시표에 익숙해지도록 본 실험전 모든 유형의 시선고정용 시표에 대해 시야검사를 1분 정도 수행하였다. 본 실험인 시선고정 실험에서는 각 시선고정용 시표 별 시야검사를 수행한 뒤 시선고정용이성, 눈 피로도에 대한 주관적 만족도를 평가하였다. 실험과 실험사이에는 실험참여자의 피로도를 고려해 30초 정도 휴식을 취하도록 하였다. 반복실험은 2 ~ 3회를 수행하였다. 마지막으로 모든 실험이 끝난 후, 사후 설문을 통해 실험에 대한 실험참여자의 소견을 수집하였다(그림 3-6 참조).

### 3.2.6. 분석

시야손상이 없는 정상인 실험참여자의 경우 100회 제시되는 시야검사용 시표에 모두 반응하여야 하나 시야검사에 대한 이해와 경험부족 등으로 반응횟수가 낮은 실험결과는 적합하지 않기 때문에 이상치로 판단하여 제거하였다. 이상치 선별을 위해 실험참여자들의 시선고정 실험별 반응 시표 수의 총합(sum of responded targets, SRT)과 시표 위치별 반응횟수를 분석해 보았다. 시선고정용 시표 별 SRT는 맹점시표를 제외한 100개의 시야검사용 시표 중 반응한 시표의 총합으로 산출하였다(식 3-1 참조).  $R_i$ 는 시야검사자가  $i$ 번째 시야검사용 시표가 제시되었을 때, 반응한 경우 1회씩 추가되는 반응횟수이다.

$$SRT = \sum_{i=1}^n R_i \quad \text{식 3-1.}$$

Where,  $R_i = 1$ , responded at  $i^{\text{th}}$  target; 0, otherwise  
 $i = 1, \dots, n$ ,  $n^{\text{th}}$  normal target

SRT는 시선고정용 시표의 크기 별 시선고정 실험에서는 평균  $87.0 \pm 12.1$ (min. = 50; max. = 100), 점멸속도와 형태변형 시표에 대한 시선고정 실험에서는 평균  $82.3 \pm 13.6$ (min. = 48; max. = 100)으로 나타났다. 시표 위치별 반응횟수를 파악한 결과 최상단에 제시된 4개의 시표와 맹점 상단과 하단 2개의 시표에 대한 반응 횟수가 현저히 떨어짐을 파악하였다. 최상단 시표 4개와 맹점 주변



2개의 시표의 제시횟수는 2회 이므로 실험참여자가 모두 반응하지 못하였을 경우 총 12회를 반응할 수 없게 된다. 또한, 실험참여자가 시야검사 중 유발할 수 있는 실수 2회를 포함하여 14회의 실수를 제외한 86회의 반응 횟수를 이상치 제거 기준으로 정하였다(표 3-1 참조). 실험결과 중 100회 제시되는 시표에  $SRT \geq 86$ 인 결과만 선별한 결과 시선고정용 시표의 크기 별 실험에서는 84개의 결과에서 54개(64%), 점멸속도와 형태변형 시표에 대한 시선고정 실험에서는 92개의 결과에서 48개(52%)가 선별되었다.

표 3-1. 이상치 제거 SRT 기준 산출 방법

시표 위치 별 시표 제시횟수	시표의 수	최대 반응 횟수	합계	
	가로 3° 이내 세로 9° 이내	8	1	8
	그 외	46	2	92
시야검사 영역 내 총 시표 제시 횟수(①)			<b>100</b>	
시표 위치 별 반응횟수	시표의 수	최대 무반응 횟수	합계	
	최상단	4	2	8
	맹점 주위	2	2	4
	나머지 부분	-	2	2
시야검사 영역내 최대 무반응 시표 수(②)			<b>14</b>	
이상치 제거 기준(① - ②)			<b>86</b>	

시선고정용 시표에 따른 성능 평가에는 시선고정 오류율(fixation loss rate,

FLR)이 사용되었다. FLR은 시선고정 성능평가 실험이 진행되는 동안 총 10회 제시되는 맹점시표에 대해 시야검사자가 반응한 횟수를 비율로 산출하였다(식 3-2 참조).  $N_R$ 는 시야검사자가 제시된 맹점 시표에 반응한 횟수를 나타내고,  $N_B$ 는 시선고정 성능평가 실험이 진행되는 동안 제시되는 총 맹점 시표의 수( $N_B = 10$ )를 의미한다. 시선고정 용이성과 눈 피로도는 7점 척도의 주관적 만족도 평가 설문지에 의해 평가되었다.

$$FLR(\%) = \frac{N_R}{N_B} \times 100 \quad \text{식 3-2.}$$

Where,  $N_R = \#$  the responded blind spot

$N_B = \#$  the presented blind spot

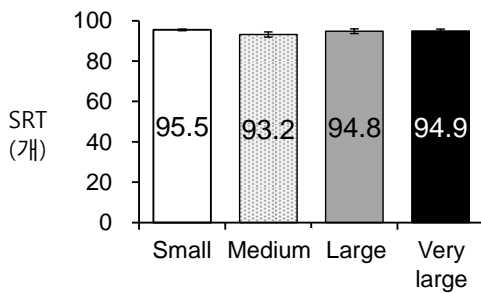
### 3.3. 결과

시야검사 결과의 신뢰성 향상을 위한 시선고정용 시표의 시선고정 성능 평가를 위해, 총 20명의 실험참여자(시선고정용 시표의 크기 별 실험: 10명; 점멸속도와 형태변형 시표 별 실험: 10명)에 대해 시선고정용 시표 별 실험참여자의 SRT, FLR, 그리고 주관적 만족도 평가(subjective evaluation)를 수행하였다.

#### 3.3.1. 크기(size)

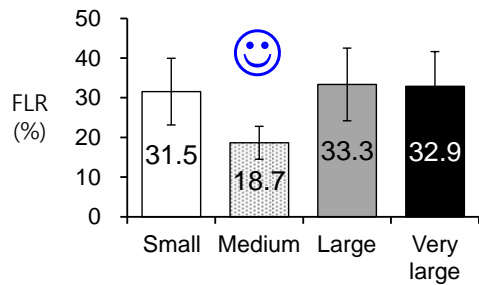
본 실험에서는 시선고정용 시표의 크기가 medium 크기일 때, 시선고정

성능과 주관적 만족도 평가 결과 모두 우수한 것으로 파악되었다. 시각적 주의 요소 중 크기를 고려하여 제작한 시선고정용 시표의 크기별 시선고정 성과와 주관적 만족도 평가 결과는 그림 3-7과 같이 나타났다. SRT는 이상치를 제거한 결과 평균  $94.6 \pm 3.8$ 개의 시표에 반응하였고, FLR은 시선고정용 시표의 크기가 medium 일 때 18.7%로 가장 낮게 나타났으나 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다. 나머지 small, large, 그리고 very large 크기의 시표는 각각 31.5%, 33.3%, 그리고 32.9%로 유사한 결과를 보였다. 시선고정



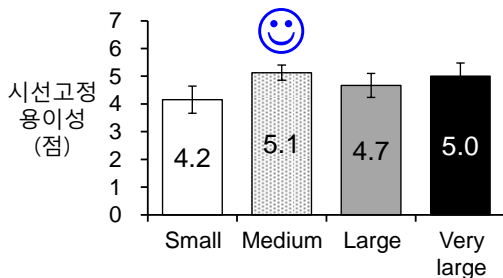
(a) SRT

( $n = 54$ ;  $F(3, 50) = .94$ ;  $p = .430$ )



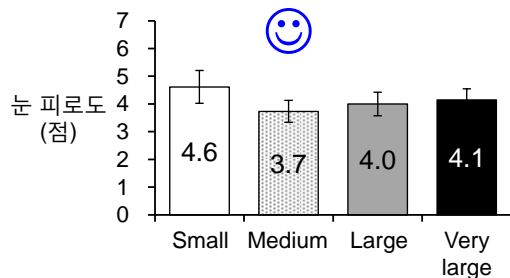
(b) FLR

( $n = 54$ ;  $F(3, 50) = .89$ ;  $p = .454$ )



(a) 시선고정 용이성

( $n = 54$ ;  $F(3, 50) = 1.08$ ;  $p = .366$ )



(b) 눈피로도

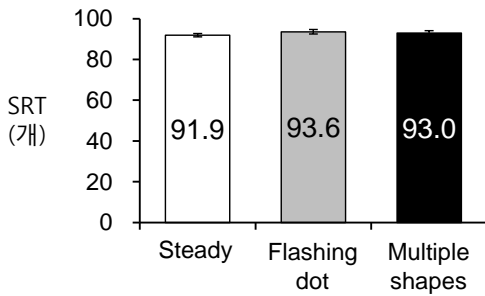
( $n = 54$ ;  $F(3, 50) = .66$ ;  $p = .581$ )

그림 3-7. 시선고정용 시표의 크기별 실험 결과

용이성에서는 medium이 5.1점으로 시선고정이 가장 쉬운 것으로 평가되었으며, very large(5.0점), large(4.7점), 그리고 small(4.2점)순으로 나타났다. 눈 피로도에서는 medium이 3.7점으로 가장 피로도가 적은 것으로 답변되었으며, large(4.0점), very large(4.1점), 그리고 small(4.6점) 순으로 피로도가 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 시선고정용 시표의 크기 측면에서는 medium 크기의 시표가 시선고정 성능 및 주관적 만족도가 가장 우수한 것으로 파악되었다.

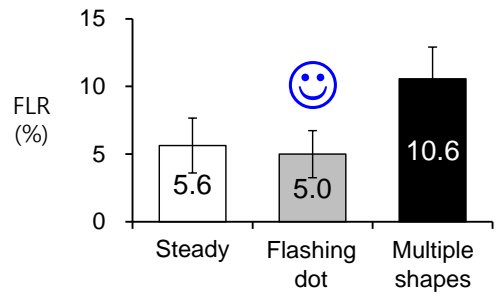
### 3.3.2. 점멸속도(flash rate)와 형태변형(multiple shapes)

본 실험에서는 10 Hz로 점멸하는 flashing dot 시표의 시선고정 성능이 과 시선고정 용이성이 높게 분석되었다. 시각적 주의 요소 중 점멸속도와 형태를 고려하여 점멸속도가 10 Hz인 flashing dot과 5가지 형태로 변형되는 multiple shapes 시표를 medium 크기의 dot 형태(steady)인 시선고정용 시표와 시선고정 성능, 시선고정 용이성, 그리고 눈 피로도 평가 결과를 비교하였다(그림 3-8 참조). FLR은 시선고정용 시표가 점멸하는 flashing dot일 때, 5.0%로 가장 낮게 나타났으나 steady(5.6%), multiple shapes(10.6%)와 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다. 주관적 만족도 평가 결과, 시선고정 용이성에서는 flashing dot이 5.6점으로 나머지 steady(4.4점), multiple shapes(5.2점)비해 높게 나타났으며 통계적으로 유의한 차이를 보였다( $F(2, 45) = 3.30; p = .046^*$ ; \*,  $p < 0.05$ ). Two-sample t-test를 통해 시표의 유형별 통계적 차이를 분석한 결과, steady시표에 비해 flashing dot이 통계적으로 유의하게



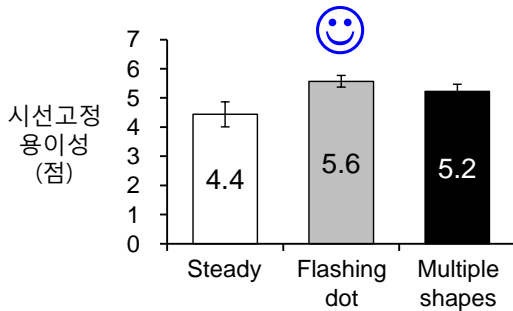
(a) SRT

( $n = 48$ ;  $F(2, 45) = .69$ ;  $p = .505$ )



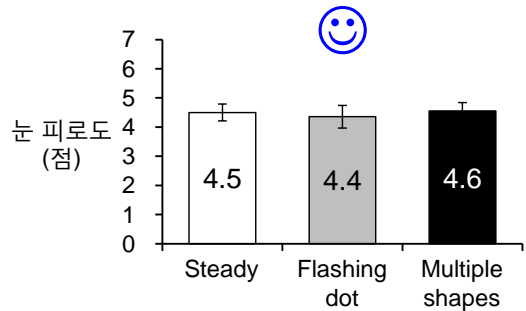
(b) FLR

( $n = 48$ ;  $F(2, 45) = 2.15$ ;  $p = .128$ )



(c) 시선고정 용이성

( $n = 48$ ;  $F(2, 45) = 3.30$ ;  $p = .046^*$ )



(d) 눈 피로도

( $n = 48$ ;  $F(2, 45) = .10$ ;  $p = .904$ )

그림 3-8. 시선고정용 점멸시표와 형태변형 시표의 실험 결과

시선고정용이성이 뛰어난 것( $t(23) = -2.44$ ;  $p = .023^*$ ; \*,  $p < 0.05$ )으로 나타났다. 눈 피로도 측면에서는 세 가지 시표유형 모두 유사하게 ‘약간피로’로 평가되었다. FLR, 시선고정용이성, 눈 피로도를 모두 고려했을 때, flashing dot의 시선고정 성능이 가장 우수한 것으로 분석되었다.

## 4. 시야검사 기반 녹내장 진단모형

### 4.1. 연구목적

본 연구에서는 시야검사 기반 녹내장 진단 모형의 인간공학적 개선을 하고자 한다. 첫째, 실제 임상에서 녹내장 진단에 중요하게 고려되는 검사 결과가 포함된 data를 사용하여 녹내장 진단모형을 개발한다. 둘째, 개발된 녹내장 진단모형에 의해 오분류되는 data의 특성을 파악하여 2차 분류 척도를 찾아내고 적용하여 다양한 녹내장 검사결과가 종합적으로 고려되는 녹내장 진단모형을 개발한다.

### 4.2. 녹내장 진단모형 개발

시야검사 기반 녹내장 진단모형의 인간공학적 개선을 위해, 임상에서 수행되는 녹내장 검사자료를 수집하고, data 유형에 따라 분류에 적합한 통계적 분류기법을 활용하여 성능이 우수한 진단모형을 개발하였다. 녹내장 검사 자료는 인구학적 정보, 안과검사 자료, 그리고 시야검사 자료로 구성되 시야검사 자료는 검사결과에서 얻는 모든 data를 포함하도록 수집하였다. 통계적 분류기법은 기존 연구에 주요하게 다루어진 분류기법 중 자료 유형에 적합한 통계기법을 선별하여 적용하고 성능을 비교 평가하였다. 통계적 분류기법의 적용결과 오분류된 data의 특성을 파악하여 분류에 사용되지 않은 data에서 2차 분류척도로 사용할 수 있는 data를 선별하여 적용하고 성능의

향상을 확인하였다. 통계적 기법과 2차 분류 특성을 활용하여 최종 녹내장 진단모형을 결정하였다.

#### 4.2.1. Input: 녹내장 검사 자료

본 연구에서는 시야검사 자료와 임상적 지표 포함하여 총 145 samples을 녹내장 진단모형 개발에 활용하였다. 첫째, 시야검사 자료는 threshold sensitivity value(TSV, dB), total deviation(TD, dB), 그리고 pattern deviation(PD, dB) 을 포함하는 raw test results와 MD, PSD를 포함하는 global indices로 구성되어 있다. TSV는 시야검사 시 시야검사용 시표 위치에서 제시되는 다양한 밝기의 시표 중 피검사자가 볼 수 있는 최소 밝기의 수치이다. TD은 TSV와 HFA II-i에 내장된 피검사자의 연령과 동일한 normative database와의 차이로, 피검사자의 시표 밝기에 대한 민감도 수치가 정상인 대비 어느정도 차이가 나타나는지 시표 위치별로 산출된 자료이다. PD는 노안 또는 백내장 등 전반적인 시야장애를 제외한 국소적 시야손상 부위를 찾기 위한 자료로, 맹점주위 시표 3개를 제외하고 7번째 값이 큰 TD 값과 각 시표위치 별 TD값과의 편차이다(그림 4-1 참조). MD는 total deviation의 평균으로 정상인 대비 시야 손상 정도를 정량적으로 수치화한 지표(global index)이다. MD < -2.00 dB일 경우 임상에서는 녹내장일 가능성을 고려된다. 시야는 망막 부위 별 시신경의 빛에

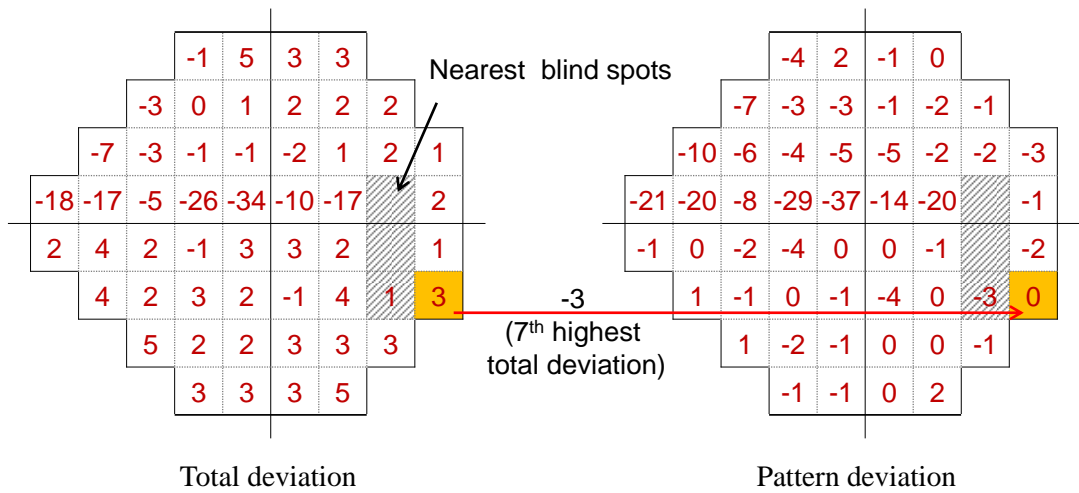


그림 4-1. Pattern deviation 산출 방법

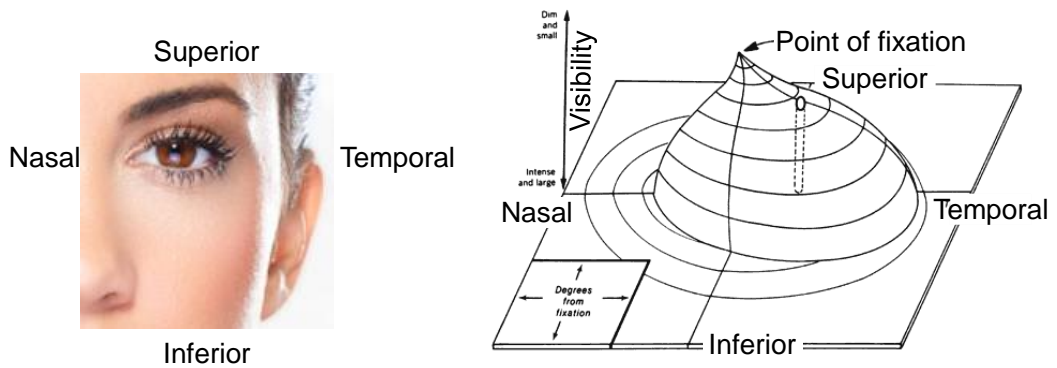


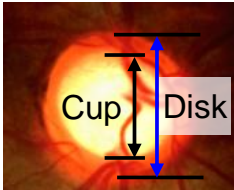
그림 4-2. Hill of vision (right eye; Anderson, 1987)

대한 민감도를 등고선으로 나타낸 hill of vision으로 표현될 수 있는데 PSD는 피검사자의 hill of vision과 정상인의 hill of vision의 표준편차를 산출한 global index로 녹내장에 의한 국소적 손상이 심한 부분의 경우 값의 크기가 커진다(그림 4-2 참조).



둘째, 임상적 지표는 나이(age)와 성별(gender)로 구성된 인구학적 정보와 안과 및 구조적 검사자료는 시력(VA), 안압(IOP, mmHg), 중심각막두께(CCT,  $\mu\text{m}$ ), 시신경 유두 함몰비(CDR) 네 가지 자료로 구성된 145개의 sample을 사용하였다. VA는 한천식 시력표를 기준으로 측정된 교정시력, IOP는 골드만 압평 안안계로 측정된 안구 내부의 압력, 그리고 CCT는 각막의 중심부 두께를 초음파 측정 장비를 통해 측정된 값이다. CDR은 optic nerve head(ONH)의 cup의 직경을 disc의 직경으로 나눈 비율값으로 본 연구에서는 안저촬영 장비를 사용하여 촬영한 RNFL 사진으로부터 산출된 CDR과 OCT에서 자동 측정된 CDR(OCD)을 사용하였다. RNFL 사진으로부터 산출된 CDR은 cup과 disc의 직경을 측정하고 비율 산출방법에 따라 vertical cup-to-disc ratio(VCD), horizontal cup-to-disc ratio(HCD), 그리고 average cup-to-disc ratio(ACD)로 나누어 수집되었다. VCD는 cup과 disc의 직경을 수직으로, HCD는 cup과 disc의 직경을 수평으로 각각 측정하여 비율로 산출된 자료이며 ACD는 VCD와 HCD의 평균으로 산출된 자료이다(표 4-1 참조).

표 4-1. 녹내장 검사자료

Data 범주		변수	설명	비고	
Visual field testing results	Raw test results	TSV	피검사자가 반응한 시표 밝기	HFA II-I series	
		TD	patient's response – expected normal (동일 연령의 정상인 검사결과와의 차이)		
		PD	Total deviation + overall sensitivity changes (국소부위의 손상정도)		
	Global indices	MD	Total deviation 값의 평균		
		PSD	정상인과 피검사자의 hill of vision 의 국소적 편차		
Clinical indices	Demographic information	Age	나이		
		Gender	성별		
	Ophthalmic data	VA	교정 시력		
		IOP	안구 내 압력		
		CCT	중심각막두께	Pachymeter	
		CDR	VCD	Cup 과 disc 길이를 수직으로 측정한 값의 비율	
			HCD	Cup 과 disc 길이를 수평으로 측정한 값의 비율	
			ACD	Vertical 과 horizontal 값의 평균	
OCD	OCT 장비로 측정된 값				

#### 4.2.2. Process: 녹내장 진단모형

녹내장 진단은 피검사자의 건강상태, 안과 검사 그리고 녹내장 검사 결과를 활용하여 피검사자가 정상 또는 녹내장 범주에 속하는지 분류하는 의학적 의사결정이다. 녹내장 진단을 위해서 임상에서는 시야검사, 시신경 유두 형태 검사, 그리고 망막신경섬유층 두께검사 등 다양한 검사를 통해 수집된 정량적, 정성적 데이터와 임상경험이 풍부한 의료진의 종합적 분석결과에 의해 진단되고 있으나 진단결과를 뒷받침하는 정량적 기준이나 방법적 근거는 미흡하다. 또한 다양한 검사결과를 활용하여 의사결정을 이끌어내는 진단과정에서 소수의 검사 결과에 편향된 판단을 하게 될 수 있다. 따라서 다양한 데이터를 사용하여 객관적 분석 결과를 산출할 수 있는 통계적 분류분석(classification analysis)기법의 활용이 필요하다.

녹내장 진단모형에 사용될 분류분석 기법은 다수의 속성(attribute) 또는 변수를 갖는 대상(object)을 사전에 정해진 그룹 또는 범주(class, category) 중의 하나로 분류하는 방법으로 분류성능을 향상시키려면 명확한 분류가 가능한 학습 표본과 분류규칙( $r(x)$  또는 classifier)을 만드는 것이 중요하다(전치혁, 2012). 분류를 위한 대표적인 방법으로는 다변량 통계이론에 바탕을 둔 로지스틱 회귀 분석(logistic regression), 판별 분석(discriminant analysis), 트리(tree)형태의 분지방법을 이용하는 classification and regression tree(CART), combined decision tree(C4.5), Chi Square Automatic Interaction Detection(CHAIID), 비선형 최적화 기법인 support vector machine(SVM) 그리고 기계학습(machine learning) 기법인 신경망(neural network) 기법 등의 블랙박스 형태의 기법 등이 다양한

분류규칙이 있다. 본 연구에서는 녹내장 진단모형 개발의 첫 번째 단계로 기존 녹내장 진단모형 개발 연구에서 사용 빈도가 높은 분류규칙인 linear SVM, Gaussian SVM, linear discriminant analysis(LDA), binary logistic regression(BLR), 그리고 CART 총 5개의 분류규칙을 녹내장 검사 자료의 조합에 따라 구성된 data set 별로 적용해 성능을 비교 평가하고자 한다(표 4-2 참조). 통계적 분류기법은 MATLAB (Mathworks, Natick, MA, USA)프로그램을 통해 구현되고 적용되었다.

표 4-2. 녹내장 진단 모형 개발에 활용된 분류기법

통계적 분류 방법	설 명
SVM	두 개의 범주를 하나의 선형 또는 비선형 함수로 분류하는 기법
LDA	범주들을 잘 구별하는 변수들의 하나 또는 다수를 사용하여 도출된 선형 함수를 사용하는 기법
BLR	종속변수가 2개의 범주를 가질 때 logit 변환을 통해 분류에 활용하는 기법
CART	종속변수가 범주형일 경우, 독립변수를 이분화하는 트리를 형성하여 분류 또는 회귀분석을 수행하여 분류하는 기법

### 4.2.3. 녹내장 진단모형 성능 평가

통계적 분류기법을 적용한 진단모형의 성능은 녹내장 검사 자료를 조합하여 다양하게 구성된 data set에 따라 정확도(accuracy), 민감도(sensitivity), 특이도(specificity), 그리고 Receiver Operating Characteristic (ROC) area 값으로 산출되었다. 145개의 data는 테스트 표본(test sample)을 분리하기에 sample의 수가 충분하지 않으므로 5-fold cross validation 방법을 적용하여 전체 자료의 1/5를 테스트 표본으로, 4/5는 훈련표본(train sample)으로 random sampling을 통해 선별하였다. 훈련표본은 linear-SVM, Gaussian-SVM, LDA, BLR, CART기법을 적용하여 분류규칙으로 만들고 테스트 표본에 대해 분류규칙을 적용하는 과정을 10회 반복 수행하여 얻은 평균 정확도, 민감도, 특이도, 그리고 ROC area를 성능 평가 지표로 사용하였다.

### 4.3. 결과

녹내장 검사 자료를 조합하여 구성이 가능한 학습표본(learning sample)을 대상으로 linear-SVM, Gaussian-SVM, LDA, BLR, CART기법을 각각 적용한 결과 표 4-3과 같은 성능의 차이를 확인하였다. 시야검사 결과 중 변수 PD를 학습표본으로 하여 Gaussian-SVM으로 분류한 진단모형(PD/G-SVM)에서는 정확도와 ROC area 측면에서 성능이 가장 우수한 것(정확도 = 87%, ROC area = 0.95)으로 나타났다. Global index와 임상적 지표로 구성된 학습표본을 LDA로

표 4-3. 녹내장 진단 모형별 성능 비교

Data category	Input			Process (model)	Output	Performance			
	variable	n (eye)	# of variables			Accuracy	Sensitivity	Specificity	ROC area
Raw test result	TSV	145	52	Linear-SVM	Normal /glaucoma	0.77	0.68	0.87	0.82
				Gaussian-SVM		0.85	0.80	0.90	0.92
				LDA*		0.65	0.64	0.68	0.46
	TD			Linear-SVM		0.76	0.68	0.84	0.80
				Gaussian-SVM		0.84	0.79	0.90	0.92
				LDA*		0.64	0.62	0.65	0.67
	PD			Linear-SVM		0.84	0.76	0.91	0.88
				Gaussian-SVM		<b>0.87</b>	<b>0.81</b>	<b>0.92</b>	<b>0.95</b>
				LDA*		0.66	0.63	0.69	0.71
Global index + clinical index	MD, PSD, age, gender, VA, IOP, CCT, VCD	145	8	Linear-SVM	Normal /glaucoma	0.84	0.73	<b>0.95</b>	0.91
				Gaussian-SVM		0.74	0.74	0.75	0.81
				LDA*		0.61	<b>0.94</b>	0.28	0.53
				BLR*		0.84	0.78	0.90	0.92
				CART*		0.86	0.85	0.87	0.88
Visual field testing results + clinical index	PD, MD, PSD, age, gender, VA, IOP, CCT, VCD	145	60	Linear-SVM	Normal /glaucoma	0.83	0.74	0.92	0.87
				Gaussian-SVM		0.84	0.89	0.79	0.91
				LDA*		0.67	0.62	0.73	0.49
				BLR*		0.67	0.60	0.74	0.71
				CART*		0.85	0.85	0.85	0.88

\*Cost ratio, normal : glaucoma = 1 : 5

분류한 진단모형에서는 민감도 측면에서 성능이 가장 우수한 것(94%)으로 나타났다. Global index와 임상적 지표로 구성된 학습표본을 linear-SVM으로 분류한 진단모형에서는 특이도 측면에서 성능이 가장 우수한 것(95%)으로 나타났다. 전반적으로 성능이 우수한 진단 모형은 정확도, 87%; 민감도, 81%; 특이도, 92%; ROC area, 0.95인 PD/G-SVM으로 선정되었다. PD/G-SVM의 성능을 검증하기 위하여 5-fold cross validation을 단일 수행한 결과 최대 10% 정도 성능의 변동을 보였으나 정확도, 민감도, 특이도 그리고 ROC area에서는 평균 성능이 80%이상으로 나타나 PD/G-SVM의 성능이 비료적 우수한 것으로 파악되었다(표 4-4 참조).

표 4-4. PD/G-SVM모형의 cross validation

No.	Data set (n = 145)				Performance			
					Accuracy	Sensitivity	Specificity	ROC area
1					0.90	0.82	0.94	0.92
2					0.86	0.93	0.80	0.92
3					0.86	0.78	1.00	0.98
4					0.79	0.67	0.93	0.98
5					0.90	0.81	1.00	0.87
Mean					0.86	0.80	0.93	0.93
SD					0.04	0.09	0.08	0.05
Min.					0.79	0.67	0.80	0.87
Max.					0.90	0.93	1.00	0.98

전반적인 성능이 우수하게 나타난 PD/G-SVM 진단모형의 성능을 한 단계 향상시키기 위해, 오분류 분석을 통해 도출된 2차 분류척도 VCD(> 0.713)를 적용한 결과 평균 분류 성능이 약 2.0% 향상되었다. 녹내장 검사자료를 PD/G-SVM 모형을 적용하여 분류한 결과 실제범주가 녹내장인데 정상으로 분류한 sample의 수가 10개, 실제범주가 정상인데 녹내장으로 분류한 sample의 수가 3개인 것으로 나타났다(표 4-5 참조). 실제범주를 기준으로 추정범주의 녹내장 그룹과 정상그룹의 사이에 통계적으로 차이가 나는 변수를 분석한 결과 실제범주가 녹내장일 경우 VCD, MD, PSD가 통계적으로 유의한 차이를 나타내었고, 정상일 경우 IOP, PSD가 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 통계적 차이가 나타난 변수의 sample 분포를 파악한 결과, 실제범주가 정상인 sample의 최대 VCD가 0.713인데 비해 실제범주가 녹내장이면서 추정범주가 정상인 sample의 분포에서는 VCD가 0.713을 초과하는 sample이 2개 발견되었다(그림 4-3 참조). 2차 분류척도로 VCD를 정하여 앞서 언급한 sample 2개를 녹내장으로 분류한 결과 기존 모형 대비 정확도가 약 1.3%, 민감도가 약 2.6% 향상되었다. 최종 시야검사 기반 녹내장 진단 모형으로 PD/G-SVM(1차 분류) + VCD(> 0.713; 2차 분류)가 도출되었다.



표 4-5. PD/G-SVM에 의한 분류 결과

		실제 범주		계
		녹내장	정상	
추정 범주	녹내장	64	<b>3</b>	67
	정상	<b>10</b>	68	78
계		78	71	145
통계적 차이가 나타난 변수		<b>VCD, MD, PSD</b>	IOP, PSD	

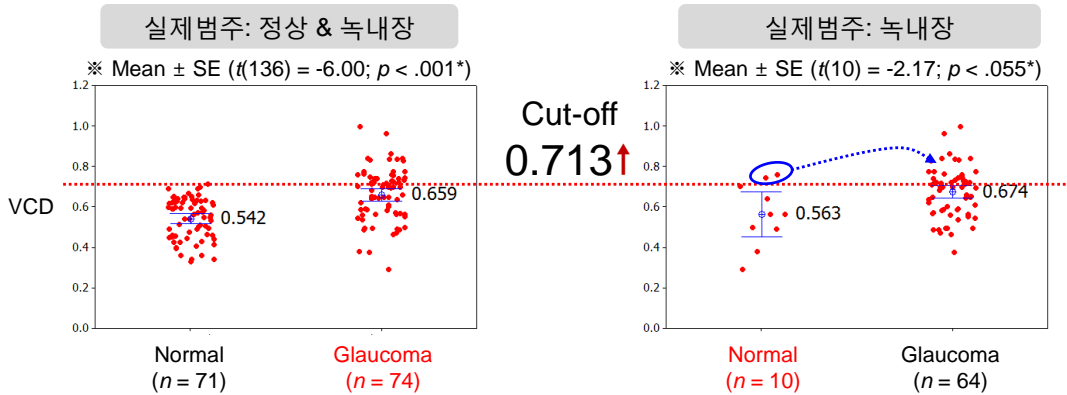


그림 4-3. 녹내장 2차 분류척도 VCD의 적용기준

## 5. 토의

### 5.1. 인간공학적 시선고정 유도방법

본 연구는 시야검사 기반 녹내장 진단의 인간공학적 개선을 위해 시각적 주의 유도 요소를 활용하여 기존 시야검사장비들의 시선고정용 시표보다 시선고정 유도성능이 우수한 방법을 개발하였다. 기존 시야검사장비들은 시선고정용 시표로 한 가지 색깔의 점이나 LED전구의 빛을 사용하고 있었으나 본 연구에서는 Sanders and McCormick(1993)의 시각적 주의 유도 요소 중 크기, 점멸속도, 그리고 형태를 활용하여 시선고정용 시표를 개발하였다. 개발된 시선고정용 시표의 성능과 주관적 만족도 평가를 수행한 결과 flashing dot의 시선고정 성능과 주관적 만족도가 가장 우수한 것으로 나타났다. Woodson and Conover(1964)의 보고에서 점멸하는 시표가 주의를 끄는 효과가 있는 것과 같이 시야검사에도 점멸하는 시선고정용 시표가 검사자의 시선을 유도하는 효과를 나타내었다. 왜냐하면, 시야검사에서 제시되어 있는 시간이 0.2초, 제시 간격이 1초인 시야검사용 시표가 주는 자극의 횟수에 비해 10 Hz의 속도로 점멸하는 시선고정용 시표의 자극의 횟수가 더 많기 때문에 시선을 유도할 수 있었던 것으로 사료된다. 또한 크기 측면에서는 기존 시야검사에서 사용되고 있던 medium 크기의 시선고정용 시표의 성능과 주관적 만족도가 높게 분석되었다. 그 이유는 첫째, 시야검사용 시표의 크기(medium)와 시선고정용 시표와 크기가 동일하여 다른 크기의 시선고정용

시표를 사용할 때 유발되는 상대적인 크기 차이가 없어, 검사자가 시야검사에 쉽게 집중할 수 있었던 것으로 판단된다. 둘째, 시선고정용 시표의 크기가 small일 경우, 50대 실험참여자의 시력으로는 시선고정용 시표의 확인이 어려워 시선고정 실험 진행 중 시야검사용 시표로 시선이 분산되었기 때문으로 파악된다. 마지막으로 시선고정용 시표의 크기가 medium보다 큰 large 또는 very large 경우, 시선고정이 쉽기 때문에 실험참여자가 시선을 검사화면 중심에 고정하기 보다는 시선고정용 시표의 외형선쪽으로 시선의 이탈이 잦았기 때문으로 사료된다. 실험결과에서도 시선고정오류율이 높게 나타난 것에 비해 주관적 만족도는 상대적으로 높게 평가된 이유와 연관된 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 시선고정 실험을 수행하는 동안 기존 시야검사 방법에서 고려되어야 할 사항으로 맹점 근처 시표제시의 불필요성과 시표위치별 가중치를 적용한 결과 분석의 필요성을 도출하였다. 첫째, 시야검사 시 맹점 근처에는 시야검사용 시표가 제시되지 않도록 하여 시야검사 시간을 단축시키는 것이 필요하다. 본 연구의 시선고정 실험에 적용한 시야검사의 central 24-2 threshold pattern에서 시야검사용 시표는 상하 시야각 24°, 좌우 시야각 24 ~ 30° 영역에 54개가 제시된다. 그러나 SRT를 사용하여 신뢰할 수 있는 실험결과의 선별 기준 수립과정에서 최상단 시표 4개(eye lid effect의 가능성이 높음)와 맹점 근처 시표 2개는 실험참여자가 반응하기 어려 위치의 시표로 간주되어 신뢰할 수 있는 시선고정 실험 결과의 SRT를 최대 86개로 낮추었다. 또한 시표 위치별 4 ~ 5회 시선고정용 시표가 제시되는 실제

시야검사 결과인 녹내장 검사 자료에서도 맹점 근처에 제시된 시표에 대해 반응하지 못하였거나 가장 밝은 시표에 반응한 검사자의 비율이 52.4%였다. 시야검사 결과 중 PD와 PSD를 산출할 때에는 맹점 근처 상하로 총 3개의 시표를 제외하고 51개의 시표에 대해서만 값을 나타내었다(그림 4-1 참조). 따라서, 시야검사 결과에서 사용되지 않는 맹점 근처의 시표를 제외한 51개의 시표만을 시야검사용 시표로 활용함으로써 시야검사 시간의 단축을 이끌어 낼 수 있을 것으로 사료된다.

둘째, 시야검사 결과 분석 또는 녹내장 진단 모형 개발 시 raw test results를 사용할 때에는 시표위치 별 가중치를 적용하는 것이 고려될 필요가 있다. 시선고정 실험 결과에서 시야검사 영역 중 최상단 영역의 4개의 시표는 검사자에 의해 확인 되기가 쉽지 않은 것으로 파악되었다. 그러나 실제 시야검사 결과가 포함된 녹내장 검사 자료에서는 최상단의 4개의 시표에 대해 정상인의 경우 100% 확인한 것으로 분석되었다. 실제 시야검사 결과는 검사자가 시표위치별 4 ~ 5회 제시되는 시표 중 최소한 1번이라도 반응하였을 경우 수치가 기록되도록 되어 있어 제시되는 모든 시표에 반응한 결과인지 알 수 없다. 따라서 시표 위치별 반응한 횟수에 따라 검사 결과에 가중치를 부여하여 global indices 산출 또는 추후 분석에 활용하는 것이 필요하다.

## 5.2. 녹내장 진단모형 개발

본 연구는 임상에서 녹내장 진단 시 중요하게 고려되고 있는 변수와 검사결과에 대한 종합적 고려가 이루어지도록 인간공학적으로 개선된 녹내장 진단모형을 개발하였다. Baskaran et al. (2012), Townsend et al. (2008), 그리고 Chan et al. (2002)의 연구에서는 각각 OCT, HRT, 그리고 HFA를 단일 녹내장 검사장비로 사용하여 얻은 검사 자료를 사용하여 비교적 성능이 우수한 진단모형을 개발하였다. 그러나 Park et al.의 연구에서와 같이 녹내장은 구조적 검사와 기능적 검사 결과 양측이 일치해야 진단되는 질환으로 단일 검사 결과만으로 녹내장을 진단하는 것에는 한계가 있다. Wroblewski et al. (2009)와 Park et al.(2001)는 녹내장 검사 결과와 임상적 지표를 훈련표본으로 사용함으로써 다양한 검사 결과가 반영된 진단모형을 개발하였으나 사용된 변수들이 임상에서 녹내장 진단에 중요하게 다루어지고 있는 변수를 선택적으로 사용되고 있지 않았다. 본 연구에서는 훈련표본 구성시, 임상에서 녹내장 진단에 중요하게 다루어지고 있는 PD를 Gaussian-SVM 기법을 사용하여 분류한 결과 우수한 성능의 녹내장 진단모형을 개발하였고 VCD를 이용하여 오분류된 sample을 추가 분류함으로써 녹내장 진단 성능을 평균 2%정도 향상시켰다. 기존 연구에서 개발된 진단모형에서 동일한 학습표본과 통계적 분류 기법이 적용된 녹내장 진단모형의 성능과 비교해 본 결과 기존 연구에 비해 최대 3% 정도 성능이 향상된 것을 확인할 수 있었다(표 5-1참조).

표 5-1. 녹내장 진단 모형 성능비교(본 연구 vs. Chan et al., 2002)

Variable	Study (year)	Process (model)	Performance			
			Accuracy	Sensitivity	Specificity	ROC area
TSV	Chan et al. (2002)	Linear-SVM	-	0.66	0.85	0.89
	본 연구		0.77	0.68	0.87	0.82
	Chan et al. (2002)	Gaussian-SVM	-	<b>0.78</b>	<b>0.88</b>	<b>0.91</b>
	본 연구		0.85	0.80	0.90	0.92
	Chan et al. (2002)	LDA	-	0.58	0.75	0.82
	본 연구		0.65	0.64	0.68	0.46
PD	본 연구	Linear-SVM	0.84	0.76	0.91	0.88
		<b>Gaussian-SVM</b>	<b>0.87</b>	<b>0.81</b>	<b>0.92</b>	<b>0.95</b>
		LDA*	0.66	0.63	0.69	0.71

\*Cost ratio, normal : glaucoma = 1 : 5

본 연구에서 PD/G-SVM 진단모형과 VCD로 2차 분류를 수행한 후에도 오분류되는 sample은 추후 경과를 지켜볼 필요가 있는 녹내장 의심군으로 분류하여 관리하는 것이 고려된다. 녹내장 진단모형에 의해 오분류되는 sample의 특성을 파악한 결과 시야검사 기반의 녹내장 진단모형인 PD/G-SVM에 의해 오분류될 가능성이 높았다. 왜냐하면, 실제범주가 녹내장에 속할 때 진단모형에 의해 정상으로 오분류된 sample의 특성은  $MD > -2.00$  dB,  $PSD < 2.30$ 으로 PD가 학습표본인 진단모형에서 MD는 높고 PSD가 낮게 나타날 경우 정상으로 오분류될 가능성이 높기 때문이다. 반대의 경우인 실제범주가 정상에 속할 때, PD/G-SVM에 의해 녹내장으로 오분류된 sample의 특성은  $MD < -2.00$  dB,  $PSD > 2.80$ 으로 PD가 학습표본인 진단모형에서 MD가 낮고 PSD가 높게 나타날 경우 녹내장으로 오분류될 가능성이 높아지기 때문이다. 위 결과에 대해, 강동경희대학교병원 안과 전문의 강자현 박사님과 각 sample에 대해서 논의한 결과 실제 임상에서도 진단을 명확히하기 어려운 검사 결과를 가지고 있는 sample로 판명되었다. 성능이 우수한 진단모형을 만들기 위해서는 명확히 분류가 되지 않는 sample들을 제외한 학습표본을 이용하면 좋으나 임상에서는 다양한 증상의 환자를 다루기 때문에 피검사자의 범주가 명확히 분류되는 학습표본으로 만든 진단모형은 임상에는 적합하지 않은 결과가 산출될 수 있다.

본 연구에서 만들어진 녹내장 진단 모형은 성능에 따라 녹내장 환자 screening 과정과 정밀 검진과정에 선별적으로 활용될 수 있다. 시야검사 결과의 global index와 임상적 지표들을 학습표본으로 하여 LDA기법을 적용한

진단모형은 민감도가 94%로 실제 녹내장 환자를 녹내장으로 분류하는 성능이 탁월하고, linear-SVM기법을 사용한 진단모형은 특이도가 95%로 실제 정상인을 정상으로 분류하는 성능이 우수한 것으로 파악되었다. 따라서 전자의 진단모형은 녹내장 환자를 screening하는 과정에 활용하여 녹내장 가능성이 있는 대상자를 선별하고, 후자의 진단모형은 선별된 대상자 중 정밀진단이 필요한 대상자를 선별하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서 진단모형을 학습표본에 적용할 시 cost-ratio 적용이 일부 모형인 LDA, BLR, 그리고 CART에만 적용이 되어, 추후 linear-SVM과 Gaussian-SVM에 cost ratio를 적용하게 되었을 때 성능이 변경될 수 있으므로 추후 연구를 통해 조건이 동일한 상황에서 진단모형의 성능을 비교할 필요가 있다.



## 참고 문헌

1. 경성은, 이종훈(2003). 폐쇄각녹내장 환자에서의 생체측정치 비교. *대한안과학회지*, 44(3), 685-691
2. 김명훈, 박성철, 이선희, 기창원 (2011). 정상안압녹내장, 고안압녹내장 및 정상 대조군 사이의 식생활 습관 비교. *대한안과학회지*, 52(2), 216-221.
3. 김창희와 이동춘 (1995). 한글 인식과정에서의 안구운동 특성분석. *대한인간공학회*, 199-208.
4. 김홍복, 최억, 유호민, 권오웅 (1982). 비접촉성안압계 , Applanation 안압계 및 Schiotz 안압계에 의한 안압의 비교. *대한안과학회지*, 23(2), 359-363.
5. 박기호 (2005). 녹내장의 약물치료. *약물요법*, 189-196.
6. 박준정, 이종욱, 이규원 (2008). 개방각녹내장 환자에서 아르곤레이저 섬유주성형술과 선택적 레이저 섬유주성형술의 임상효과 비교. *대한안과학회지*, 49(9), 1491-1500.
7. 박찬기, 한정원, 문정일, 안명덕. (2001). 한국인 녹내장 진단모델 개발과 그 유효성. *대한안과학회지*, 42(2), 297-303.
8. 송경석, 김태훈, 성아영. (2005). 자동 시력표 정확도에 관한 연구. *한국안과학회지*, 10(2), 111-118.
9. 오종현, 김용연, 정해륜 (2006). 세극등현미경과 전방각경을 이용한 전안부계측. *대한안과학회지*, 47(9), 1435-1443.
10. 이미혜, 김석동 (2002). Tono-Pen 안압계로 측정된 신생아의 정상 안압치. *대한안과학회지*, 43(7), 1212-1216.
11. 조병주, (2008). +90디옵터 렌즈와 공간섭단층촬영을 이용한 시신경유두 함몰비의 비교. *대한안과학회지*, 49(4), 611-616.
12. 조정우, 남운표, 김동윤, 강성용, 성경림, 국문석(2010). 녹내장 시야 지표의 임상적 유용성. *대한안과학회지*, 51(1), 49-51.
13. 이건명, 황경순, 김원재(2010). 데이터 클러스터 상세화 기반의 맞춤형 의료를 위한 환자 클래스 관리 기법. *한국지능시스템학회 20주년 기념 2010년도 추계학술대회 학술발표논문집*, 20(2), 323-324.

14. 한영상, 제승연, 김수진, 이주은, 이지은, 구기홍 (2009). 빛간섭단층촬영으로 발견하지 못한 국소적 망막신경섬유층 결손들의 분석. *대한안과학회지*, 50(4), 558-564.
15. 한의석, 김문정, 박기호 (2009). 정상안압녹내장에서 안압과 시야결손진행의 관계. *대한안과학회지*, 50(10), 1548-1554.
16. 국민일보. 녹내장환자 40만 명 7년간 2배 증가. Retrieved April 18, 2011 from <http://news.kukinews.com/article/view.asp?page=1&gCode=kmi&arcid=1303116726&cp=nv>.
17. Andersonm, D. R. (1987). Perimetry with and without automation. 2nd ed. St Louis: C.V. Mosby.
18. Baskaran, M., Ong, E. L., Li, J.L., Cheung, C. Y., Chen, D., Perera, S. A., Ho, C. L., Zheng, Y. F., and Aung, T. (2012). Classification algorithms enhance the discrimination of glaucoma from normal eyes using high-definition Optical Coherence Tomography. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 53(4), 2314-2320.
19. Caprioli Joseph (1992). Discrimination between normaland glaucomatous eyes. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 33(1),153-159.
20. Carl Zeiss Meditec Inc. (2005). Humphrey® Field Analyzer II-i series User Manual.
21. Carl Zeiss Meditec Inc. (2003). Humphrey® Matrix™ user's guide.
22. Chan, K., Lee, T. W., Sample, P. A., Goldbaum, M. H., Weinreb, R. N., and Sejnowski, T. J. (2002). Comparison of machine learning and traditional classifiers in glaucoma diagnosis. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 49(9), 963-974.
23. Connors, M. M. (1975). Conspicuity of target lights. the influence of flash rate and brightness. *NASA TN D-7961*, 1-17.
24. Copt, R. P., Thomas, R., Mermoud, A. (1999). Corneal thickness in ocular hypertension, primary open-angle glaucoma, and normal tension glaucoma. *Arch Ophthalmol*, 117, 14-6.
25. Crowston, J. G., Hopley, C. R., Healey, P. R., Lee, A., and Mitchell, P. (2004) The effect of optic disc diameter on vertical cup to disc ratio percentiles in a population based cohort: the Blue Mountains Eye Study. *British Journal of Ophthalmology*, 88(6), 766-770.

26. Dersu, I., and Wiggins, M. N., Luther, A., Harper, R., and Chacko, J. (2006). Understanding visual fields, part I; Goldmann perimetry. *Journal of Ophthalmic Medical Technology*, 2(2), 1-10.
27. Dersu, I., and Wiggins, M. N.(2006). Understanding Visual Fields, Part II; Humphrey Visual Fields. *Journal of Ophthalmic Medical Technology*, 2(3), 1-7.
28. Doughty, M. J., Zaman, M. L. (2000). Human corneal thickness and its impact on intraocular pressure measures: a review and meta-analysis approach. *Surv Ophthalmol*, 44, 367-408.
29. Ehlers, N., Bramsen, T., and Sperling, S. (1975). Applanation tonometer and central corneal thickness. *Acta Ophthalmol*, 53, 34-43.
30. Medmont International Pty, Ltd. (2010). Medmont automated perimeter user manual.
31. Mozaffarieh, M., Grieshaber, M. C., and Flammer, J. (2008). Oxygen and blood flow: players in the pathogenesis of glaucoma. *Molecular Vision*, 14(1), 224-233.
32. Quigley, H. A. and Broman, A.T. (2006). The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020. *British Journal of Ophthalmology*, 90(1), 262-267.
33. Resnikoff, S. and Keys T. U. (2012). Future trends in global blindness. *Indian Journal of Ophthalmol*, 60(5), 387-395.
34. Sanders, M., McCormick, E. J. (1993). Human factors in engineering and design, 7th (Ed.): McGraw-Hill.
35. Woodson, W. E. and Conover, D. W. (1964). Human engineering guide for equipment designers, 2nd (Ed.): Berkeley: University of California Press.
36. Wroblewski, D. Francis, B., Chopra, V., Kawji, A., Quiros, P., Dustin, L., and Massengill, R. (2009). Glaucoma detection and evaluation through pattern recognition in standard automated perimetry data. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmolog*, 247, 1517-1530.

## 부록

### 부록 A. 녹내장 검사 자료의 sample size

Normal vs. Glaucoma										■ F ■ M
		Normal			Glaucoma			Total		
Age (yr)	Gender	F	M	Total	F	M	Total	F	M	Total
	10s	-	4.4% (2)	2.8% (2)	-	-	-	-	2.3% (2)	1.4% (2)
	20s	3.8% (1)	8.9% (4)	7.0% (5)	3.0% (1)	4.9% (2)	4.1% (3)	3.4% (2)	7.0% (6)	5.5% (8)
	30s	3.8% (1)	17.8% (8)	12.7% (9)	6.1% (2)	9.8% (4)	8.1% (6)	5.1% (3)	14.0% (12)	10.3% (15)
	40s	19.2% (5)	6.7% (3)	11.3% (8)	6.1% (2)	4.9% (2)	5.4% (4)	11.9% (7)	5.8% (5)	8.3% (12)
	50s	23.1% (6)	35.6% (16)	31.0% (22)	24.2% (8)	36.6% (15)	31.1% (23)	23.7% (14)	36.0% (31)	31.0% (50)
	60s	46.2% (12)	26.7% (12)	33.8% (24)	24.2% (8)	39.0% (16)	32.4% (24)	33.9% (20)	32.6% (28)	33.1% (48)
	70s	3.8% (1)	-	1.4% (1)	21.2% (7)	4.9% (2)	12.2% (9)	13.6% (8)	2.3% (2)	6.9% (10)
	80s	-	-	-	15.2% (5)	-	6.8% (5)	8.5% (5)	-	3.4% (5)
	Total <i>n</i>	100% (26)	100% (45)	100% (71)	100% (33)	100% (41)	100% (74)	100% (59)	100% (86)	100% (145)
Mean ± SD		55.8±10.7	49.0±15.2	51.5±14.0	62.9±14.4	56.2±11.7	59.2±13.3	59.8±13.3	52.4±14.0	55.4±14.1
Min		29	13	13	29	27	27	29	13	13
Max		75	69	75	82	79	82	82	79	82
Histogram										

부록 B. PD/G-SVM 모형의 오분류 sample

추정범주	실제범주	Subj.	ID	Name	Age	Gender	Eye	VA	IOP	CCT	VCD	HCD	CDR	OCD	MD	PSD
정상	녹내장	16	114108	최승원	39	M	OS	1.0	13	501	0.759	0.695	0.727	0.800	-2.05	1.98
		18	132536	조순애	53	F	OS	0.9	15	514	0.491	0.450	0.471	0.600	-4.02	1.66
		20	145168	정종숙	57	F	OS	0.9	13	517	0.742	0.795	0.769	0.800	-1.81	1.73
		41	629781	최영근	79	M	OS	0.7	15	534	0.702	0.629	0.665	0.800	-0.22	1.74
		43	641098	황선유	55	M	OS	1.0	20	536	0.500	0.520	0.510	0.600	-1.05	1.9
		54	789305	이창남	64	M	OD	0.8	19	546	0.290	0.468	0.379	0.300	-6.3	1.92
		79	1210527	박종열	60	M	OS	0.8	29	556	0.642	0.610	0.626	0.609	-0.43	2.09
		121	2189487	배은화	35	F	OS	0.6	24	511	0.562	0.572	0.567	0.722	-1.01	1.77
		124	2432361	신미화	46	F	OS	0.9	22	577	0.564	0.415	0.490	0.569	-1.47	2.27
		128	2487089	김옥금	58	F	OD	0.8	14	562	0.381	0.527	0.454	0.294	-0.74	1.86
녹내장	정상	36	594555	임순희	68	F	OD	0.9	17	521	0.609	0.587	0.598	0.700	-5.11	2.89
		86	1406004	김용우	63	M	OD	0.9	16	533	0.691	0.677	0.684	0.806	-7.24	4.49
		91	1486350	이근복	54	M	OS	1.0	18	610	0.561	0.539	0.550	0.543	-2.27	2.85

 VCD > 0.713

부록 C. PD/G-SVM 모형의 오분류 sample 특성 분석(실제범주: 녹내장)

실제 범주 G-SVM 추정범주 Variables	녹내장(n = 74)						t-value	p-value (* < 0.1)
	정상(n = 10)			녹내장(n = 64)				
	Mean ± SD	Min.	Max.	Mean ± SD	Min.	Max.		
Age (yr)	59.9 ± 13.4	35	79	54.6 ± 4.0	27	82	t(12) = -1.22	p = .246
VA	0.8 ± 0.13	0.6	1.0	0.8 ± 0.18	0.4	0.1	t(15) = -.18	p = .857
IOP (mmHg)	16.9 ± 3.7	13	29	18.4 ± 5.4	12	28	t(10) = .87	p = .407
CCT (μm)	526.6 ± 42.8	501.0	577.0	535.4 ± 24.8	444.0	627.0	t(18) = .93	p = .365
VCD	0.674 ± 0.123	0.290	0.759	0.563 ± 0.154	0.377	0.996	t(10) = -2.17	p = .055*
HCD	0.620 ± 0.102	0.415	0.795	0.568 ± 0.118	0.350	0.820	t(11) = -1.31	p = .216
CDR	0.647 ± 0.095	0.379	0.769	0.566 ± 0.127	0.364	0.813	t(10) = -1.93	p = .082*
OCD	0.738 ± 0.153	0.294	0.800	0.609 ± 0.188	0.252	0.986	t(10) = -2.06	p = .066*
MD (dB)	-8.51 ± 5.66	-6.30	-0.22	-1.91 ± 1.88	-29.23	-1.60	t(40) = 7.13	p < .001*
PSD (dB)	8.27 ± 4.27	1.66	2.27	1.89 ± 0.19	2.09	16.33	t(64) = -11.86	p < .001*

부록 D. PD/G-SVM 모형의 오분류 sample 특성 분석(실제범주: 정상)

실제범주	정상( $n = 71$ )						t-value	p-value (* < 0.1)
	녹내장( $n = 3$ )			정상( $n = 68$ )				
	Mean $\pm$ SD	Min.	Max.	Mean $\pm$ SD	Min.	Max.		
G-SVM 추정범주								
Variables								
Age (yr)	61.7 $\pm$ 7.1	54	68	51.1 $\pm$ 14.1	13	75	$t(2) = -2.39$	$p = .139$
VA	0.9 $\pm$ 0.05	0.9	1.0	0.9 $\pm$ 0.12	0.5	1.0	$t(2) = .01$	$p = .991$
IOP (mmHg)	17.0 $\pm$ 1.0	16	18	19.0 $\pm$ 4.3	12	34	$t(2) = 2.54$	$p = .044^*$
CCT ( $\mu\text{m}$ )	554.7 $\pm$ 48.3	521	610	542.8 $\pm$ 34.1	474	621	$t(2) = -.42$	$p = .715$
VCD	0.620 $\pm$ 0.066	0.561	0.691	0.538 $\pm$ 0.103	0.329	0.713	$t(2) = -2.06$	$p = .176$
HCD	0.601 $\pm$ 0.070	0.539	0.677	0.550 $\pm$ 0.109	0.268	0.770	$t(2) = -1.21$	$p = .349$
CDR	0.611 $\pm$ 0.068	0.550	0.684	0.544 $\pm$ 0.100	0.299	0.719	$t(2) = -1.63$	$p = .245$
OCD	0.683 $\pm$ 0.132	0.543	0.806	0.541 $\pm$ 0.162	0.146	0.800	$t(2) = -1.80$	$p = .214$
MD (dB)	-4.87 $\pm$ 2.49	-7.24	-2.27	-1.47 $\pm$ 1.68	-7.5	2.25	$t(2) = 2.34$	$p = .144$
PSD (dB)	3.41 $\pm$ 0.94	2.85	4.49	1.74 $\pm$ 0.45	1.06	3.17	$t(2) = -3.08$	$p = .099^*$