

비접촉 안압계, 리바운드 안압계, 토노펜, 골드만 압평안압계의 안압 비교

이경식 · 김세경 · 김응권 · 김태임

연세대학교 의과대학 안과학교실 및 시기능개발연구소

목적: 비접촉 안압계, 리바운드 안압계(Icare[®]), 토노펜(TONO-PEN AVIA[®])으로 측정된 안압을 골드만 압평안압계로 측정된 안압을 기준으로 비교하고 임상적 유용성을 고찰한다.

대상과 방법: 정상안 71안을 대상으로 비접촉 안압계, 리바운드 안압계, 토노펜, 골드만 압평안압계로 안압을 측정하고 안압계별 측정값 차이를 비교하였다.

결과: 리바운드 안압이 골드만 안압과 가장 높은 일치성을 보였고[ICC 0.811, 95%CI 0.712-0.878], Bland-Altman plot 결과, 비접촉 안압계에서 평균 차이값은 가장 적었으나(+0.2 mmHg) 신뢰구간은 가장 넓었고(95%CI: ±5.05 mmHg), 리바운드 안압계는 평균 차이 값이 다소 적고(-0.7 mmHg) 변동폭이 가장 좁았다(95%CI: ±3.75 mmHg).

결론: 리바운드 안압계로 측정된 안압은 골드만 압평안압계로 측정된 안압과 우수한 일치성을 보여 골드만 압평안압계로 안압측정이 어려운 경우 리바운드 안압계가 대체 검사법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

〈대한안과학회지 2014;55(1):47-53〉

안압 측정은 모든 안과 환자에게 시행하는 기본 검사 중 하나로서, 일반인의 녹내장 위험성 스크리닝, 녹내장 환자의 진단과 치료 효과 판단 및 경과 관찰에 매우 중요하다. 안압 측정에서 골드만 압평안압계는 현재까지 가장 표준이 되는 검사방법이다.¹ 골드만 압평안압계의 정확성은 각막 두께와 곡률과 생체공학적(biomechanical) 특성, 예를 들어 단단함(rigidity), 점도(viscosity), 탄성(elasticity), 수화(hydration)에 영향을 받는다.²⁻⁶ 그런데 이러한 생체공학적 특성들은 개개인마다 변동성을 갖고 각막의 병리학적 특성과 수술 여부에 따라 영향을 받는다.^{3,4,7-9} 뿐만 아니라 골드만 압평안압계는 점안마취제를 이용한 각막의 마취가 필요하고 각막과 접촉해야 측정이 가능한 침습적인 검사이며 측정 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 또한 세극등 현미경에 장착되어 있기 때문에 안과 검사실에서만 측정할 수 있어 이동이 힘든 환자나 소아의 경우에는 측정이 용이하지 않다.

그동안 골드만 압평안압계의 이런 단점을 극복하고자 여

러가지 대체 안압계들이 개발되었다. 그 중 하나인 리바운드 안압계(Icare[®] PRO; Icare Finland, Helsinki, Finland)는 유발과 충돌(inductive/impact)의 원리를 이용하는 최근에 소개된 안압계이다. 측정 말단부가 자성(磁性)을 가진 철선으로 이루어진 탐침과 솔레노이드(solenoid)로 구성되어 있으며, 탐침의 말단부는 둥근 플라스틱으로 싸여 있다. 솔레노이드 내 탐침의 끝이 초당 약 0.2미터의 속도로 각막에 충돌 후 제자리로 돌아오면 각막 충돌 시의 탐침의 감속 시간(deceleration time)이 안압으로 변환된다.¹⁰ 안압이 높을수록 탐침이 각막에 충돌되는 기간은 짧고 빠르게 감속되며 이 원리를 이용하여 안압을 계산하게 된다.¹¹ 리바운드 안압계는 각막난시나 표면의 요철(irregularity)에 의한 영향을 적게 받으며, 비교적 적은 숙련으로 정확한 안압을 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 세극등을 사용하지 않아 휴대가 가능하고 환자가 누워있는 자세에서도 사용 가능하며 점안마취제를 사용하지 않고 빠른 시간 내에 안압을 측정하면서 골드만 압평안압계와 유사하게 정확한 안압 측정이 가능하다고 보고되고 있다.¹⁰⁻¹⁴ 다른 안압계로서, 자동 비접촉 안압계는 접촉의 기회가 없고 점안마취가 불필요하며 측정이 간편하다는 장점이 있지만 안구박동이 안압 측정값 변동의 주요 원인이 될 수 있어 반복 측정된 안압값의 변동폭이 1-4 mmHg가 될 수 있다고 되어 있다.^{15,16} 또 다른 안압계로서, 토노펜 역시 측정이 간편하고 일회용 라텍스 덮개를 사용하므로 감염 전파를 막을 수 있는 장점

■ Received: 2013. 1. 26. ■ Revised: 2013. 8. 16.

■ Accepted: 2013. 12. 1.

■ Address reprint requests to **Tae Im Kim, MD, PhD**
Department of Ophthalmology, Severance Hospital,
#50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-752, Korea
Tel: 82-2-2228-3570, Fax: 82-2-312-0541
E-mail: TIKIM@yuhs.ac

이 있으나 낮거나 높은 안압 영역에서는 정확성이 떨어진다고 되어있다.¹⁷⁻²⁰

저자들은 본 연구를 통해 임상에서 흔히 사용되고 있는 비접촉 안압계와 리바운드 안압계, 토노펜으로 측정된 안압을 골드만 압평안압계로 측정된 안압과 비교하여 각 안압계와 골드만 압평안압계와의 일치성에 대해 알아보고, 임상적 유용성에 대해 조사하고자 하였다.

대상과 방법

2012년 10-12월 본원을 내원한 환자 중 굴절교정수술 과거력이 있거나, 녹내장 이외의 다른 안과적 질환, 안구표면 질환, 안내염증이나 외상의 병력이 있거나, 콘택트렌즈를 최근 2주 이내 착용한 경우를 제외한 남녀 41명(남자 19명, 여자 22명)을 대상으로 전향적 연구를 시행하였다. 정상안 71안을 대상으로 비접촉안압계(NT-530P, NIDEK, Aichi, Japan), 리바운드 안압계(Icare[®] PRO; Icare Finland, Helsinki, Finland), 토노펜(Tono-Pen AVIA[®], Reichert Inc., NY, USA), 골드만 압평안압계(AT 900[®], Haag-Streit, Bern, Switzerland) 순서로 안압을 측정하고 각각의 안압계에 따른 측정값을 비교하였다. 모든 대상군에게 병력조사, 시력측정을 한 후 비접촉 안압계로 양안 안압을 측정하고, 이후 리바운드 안압계를 이용하여 안압을 측정하였으며, 그 다음 점안 마취를 하고 토노펜으로 안압을 측정하고, 마지막으로 골드만 압평안압계로 안압을 측정하였다. 각기 다른 검사간에는 최소 5분간의 시간을 두고 측정하였다. 각 안압계 측정에서 검사자의 편견을 막기 위해 비접촉 안압계, 리바운드 안압계, 토노펜, 골드만 압평안압계 각각의 검사는 모든 대상자에 대해 한 사람의 검사자가 한가지 검사만 하는 방식으로 측정되었다.

비접촉 안압계는 양안을 1번씩 측정하였다. 측정과정에서 기계상 오류가 표시되거나 환자가 눈을 감아 검사가 안 되는 경우는 제외되었다. 이 과정에서 3안이 제외되었다. 리바운드 안압계는 환자에게 정면을 주시하게 한 후, 숙련된 검사자에 의해 두 번 측정하였다. 한 번 측정 시마다 Icare[®] 리바운드 안압계는 탐침이 6회 각막에 충돌되며 측정값 중 가장 높은 값과 가장 낮은 값을 뺀 나머지의 평균값이 안압계 화면에 보여지게 된다. 검사의 신뢰성이 4가지 형태(P, P⁻, P⁻ 또는 P₋)로 안압측정치 앞쪽에 표시되는데, 뒤로 갈수록 신뢰도가 떨어지는 값이다. 환자가 눈을 감거나 머리의 위치가 기울어져 있는 등 측정이 부정확하게 된 경우 P⁻ 또는 P₋로 나타난다. 본 연구에서는 P 또는 P⁻만을 측정치로 이용하였으며, P⁻ 또는 P₋가 나올 경우에는 P 또는 P⁻가 나올 때까지 다시 측정하였다. 이 과정에서 P

또는 P⁻가 나오는데 실패하여 제외된 안은 없었다. 토노펜은 0.5% 염산프로파라카인과 형광물질이 혼합된 용액을 결막낭에 점안하여 점안 마취 후 양안을 1회씩 측정하였다. 골드만 압평안압계는 토노펜으로 안압 측정 후 5분을 기다렸다가 추가적인 0.5% 염산프로파라카인 점안 없이 숙련된 검사자에 의해서 한 번 측정하였다.

환자 개인 특징의 기술통계 결과는 연속형 자료인 경우 평균±표준편차로 표기하였고, 범주형 자료는 빈도(%)로 표기하였다. 비접촉 안압계, 리바운드 안압계, 토노펜으로 측정된 안압과 골드만 압평안압계로 측정된 안압(이후 각각을 비접촉 안압, 리바운드 안압, 토노펜 안압, 골드만 안압으로 부른다)의 일치성을 Intraclass Correlation Coefficient (ICC)로 확인하였고, 특히 두 번 측정된 리바운드 안압은 ICC로 두 측정치 사이의 일관성을 확인한 후 두 측정치의 평균값과 골드만 압평안압과의 일치성을 확인하였다. 첫 번째 리바운드 안압과 두 번째 리바운드 안압의 차이, 골드만 안압과 위에 제안한 여러 안압계들의 안압 차이를 Bland-Altman plot으로 시각화하였다. 그리고 골드만 안압을 기준으로 삼아 각 안압계 안압의 차이 절대값을 <2.0, ≥2.0 to <4.0, ≥4.0 mmHg 3군으로 나누어서 각 군별로 안압계 분포도를 알아보았다. 검중력 80%을 목표로 할 경우 필요한 전체 연구 대상안 수는 53안이었으며 중도 탈락률 20%를 고려할 경우 필요한 연구 대상안 수는 66안이었다. 본 연구에서는 41명의 74안을 대상으로 연구하였으며 이중 비접촉 안압 측정에서 3명의 3안이 탈락하여 최종적으로 38명의 71안을 대상으로 연구를 하였다. 본 논문에 사용된 통계 패키지는 SPSS version 20.0 (SPSS Inc, Chicago, IL, USA)을 이용하였다.

결 과

전 대상자들의 평균 나이는 59.41 ± 15.85 (25-89)세였고, 남자 18명(32안), 여자 20명(39안)이었다. 비접촉안압

Table 1. Demographic characteristics of study subjects (n = 71)

Sex	
Male	32 (45.1%)
Female	39 (54.9%)
Age	59.41 ± 15.85
NCT	13.44 ± 3.09
Icare	14.23 ± 2.86
Tono-Pen	15.65 ± 3.42
GAT	13.56 ± 3.33

Values are presented as mean ± SD.

GAT = goldmann applanation tonometer; NCT = noncontact tonometer.

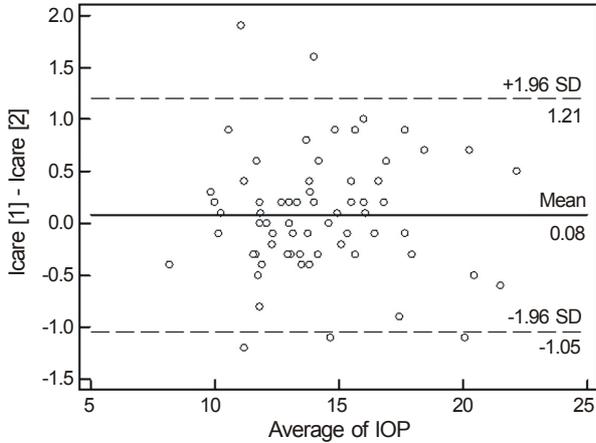


Figure 1. Bland-Altman plots of difference versus the mean plot illustrating the interseasonal repeatability of IOP measurements with the Icare tonometer. The solid line represents the mean bias and the dashed lines represent ± 1.96 SD confidence interval (CI) (i.e. 95% of the points should fall within these lines). SD = standard deviation.

Table 2. Intraclass Correlation Coefficient (ICC) of IOP measurements using different tonometers comparing with GAT as standard

	ICC	95%CI
NCT	0.679	0.530-0.788
Icare	0.811	0.712-0.878
Tono-Pen	0.749	0.625-0.837

NCT = noncontact tonometer.

계로 측정된 안압(비접촉 안압)은 13.44 ± 3.09 mmHg, 리바운드 안압계로 측정된 안압(리바운드 안압)은 14.23 ± 2.86 mmHg, 토노펜으로 측정된 안압(토노펜 안압)은 15.65 ± 3.42 mmHg, 골드만 압평안압계로 측정된 안압(골드만 안압)은 13.56 ± 3.33 mmHg였다(Table 1).

Icare로 두 번 측정된 리바운드 안압 값들을 비교 시, ICC 0.981, 95%신뢰구간(confidence interval; CI) 0.969-0.988으로 매우 높은 일치성을 보였으며 Bland-Altman plot를 시행한 결과, 두 번 측정된 리바운드 안압 간의 평균 차이 값은 0.08 mmHg였고, 변동폭(95%CI)은 ± 1.13 mmHg로 아주 우수하여 이 기계의 반복성(repeatability)이 좋음을 확인할 수 있었다(Fig. 1).

골드만 안압을 기준으로 비접촉 안압, 리바운드 안압, 토노펜 안압의 일치성을 확인해본 결과, 리바운드 안압(ICC 0.811, 95%CI 0.712-0.878)이 가장 일치성이 높았고 다음으로 토노펜 안압(ICC 0.749, 95%CI 0.625-0.837), 비접촉 안압(ICC 0.679, 95%CI 0.530-0.788) 순이었다(Table 2).

골드만 안압을 기준으로, 비접촉 안압, 리바운드 안압, 토

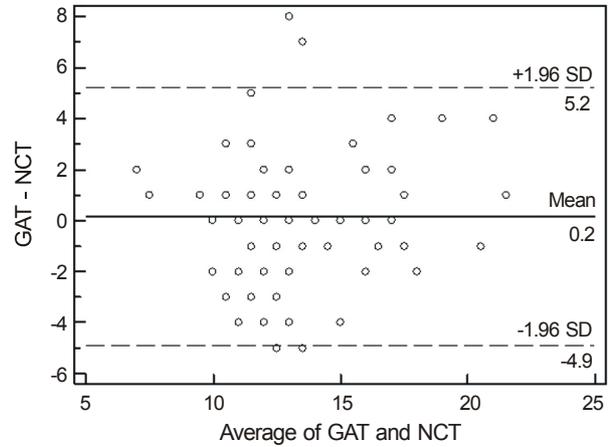


Figure 2. Bland-Altman plots of agreement between Goldmann applanation tonometer and noncontact tonometer for normal eyes. The differences in IOP of both tonometers (Goldmann applanation tonometer value minus noncontact tonometer value, mm Hg) are plotted against the average of the IOP of both tonometers. The solid line represents the mean bias and the dashed lines represent ± 1.96 SD confidence interval (CI) (i.e. 95% of the points should fall within these lines). SD = standard deviation.

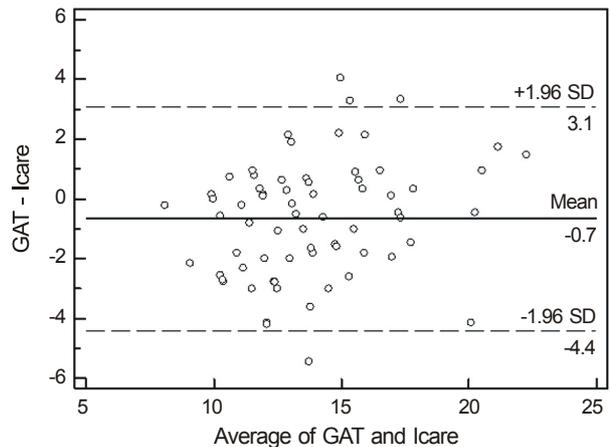


Figure 3. Bland-Altman plots of agreement between Goldmann applanation tonometer and Icare for normal eyes. The differences in IOP of both tonometers (Goldmann applanation tonometer value minus noncontact tonometer value, mm Hg) are plotted against the average of the IOP of both tonometers. The solid line represents the mean bias and the dashed lines represent ± 1.96 SD confidence interval (CI) (i.e. 95% of the points should fall within these lines). SD = standard deviation.

노펜 안압을 비교하는 Bland-Altman plot를 시행한 결과, 비접촉 안압은 평균 차이 값이 +0.2 mmHg로 골드만 안압과 가장 근사한 결과가 나왔고, 리바운드 안압은 -0.7 mmHg의 차이가 있었으며, 토노펜은 -2.0 mmHg로 가장 차이가 컸다. 또한 각 안압계의 95% 신뢰구간의 폭을 측정해본 결과, 토노펜은 ± 4.65 mmHg였고, 리바운드 안압은

고찰

본 연구는 정상안을 대상으로 순차적으로 측정된 비접촉 안압, 토노펜 안압, 리바운드 안압을 골드만 안압을 기준으로 비교하여 각각의 일치성을 평가하였다.

먼저, 본 연구에서는 Icare를 두 번 측정하여 리바운드 안압계의 반복성이 좋음을 확인하였고, 2회 측정 값의 평균 값을 타 안압계 안압과의 비교에 참여시키는 방식으로 연구를 진행하였다. 리바운드안압계의 반복성에 대한 이전 연구에 따르면 골드만 압평안압계보다는 반복성이 떨어지나 다른 상용화된 안압계들보다는 우수한 것으로 되어 있다.²¹ 그 연구에 따르면 골드만 압평안압계의 변동폭은 ± 3.15 mmHg, 리바운드 안압계의 변동폭은 ± 5.11 mmHg였다.²¹ 본 연구에서 두 번 측정된 리바운드 안압을 비교한 결과, ICC 0.981, 95%CI 0.969-0.988, Bland-Altman plot 상의 평균 차이값 0.08 mmHg, 변동폭(95%CI) ± 1.13 mmHg였으며, 이전 연구에서보다 더 우수한 반복성을 보여주었다.

본 논문에서 시행한 정상안 대상의 분석에서, 비접촉 안압, 리바운드 안압, 토노펜 안압 중 리바운드 안압이 골드만 안압과 가장 우수한 일치성을 보였다(ICC 0.811, 95%CI 0.712-0.878)(Table 2). Bland-Altman plot 분석에서, 골드만 안압과의 평균 차이 값은 비접촉 안압이 +0.2 mmHg로 가장 근사하였으나 95% 신뢰구간은 ± 5.05 mmHg로 가장 넓었으며, 리바운드 안압은 평균 차이 값이 -0.7 mmHg로 비접촉 안압 다음으로 근사하였으나 상당히 우수한 편이었고 동시에 95% 신뢰구간은 ± 3.75 mmHg로 세 가지 안압계 중에서 가장 좁고 우수함을 알 수 있었다(Figs. 2-4).

저자들은 골드만 안압과 다른 안압계를 이용한 안압의 평균 차이 값에서 +오차와 -오차가 서로 상쇄되어 통계적으로 오차평균이 0에 가깝게 나올 수 있는 오류 가능성을 해결하기 위해 골드만 안압을 기준으로 각 안압계 안압 값들의 오차 절대값을 <2.0 , $\geq 2.0 - <4.0$, ≥ 4.0 mmHg 3군으로 나누어서 분석해보았다. 그 결과 2.0 mmHg 미만으로 오차가 적은 군이 가장 많았던 안압계는 리바운드 안압계였다(Fig. 5). 이전의 연구를 보아도 리바운드 안압은 골드만 안압과 비교하여 상관성이 우수한 것으로 되어 있다($r=0.89$; $p<0.0005$).²¹ 한편 본 연구에서 골드만 안압과 4.0 mmHg 이상 차이가 나는 군이 가장 많았던 안압계는 토노펜이었는데 28.77%의 환자에서 4.0 mmHg 이상의 차이가 나게 측정되었다. Bandyopadhyay et al²²은 토노펜이 골드만 압평안압계와 전반적으로는 일치성이 좋지만 일부(7.4%)에서 큰 차이(± 5 mmHg)가 측정될 수 있으므로 주의해야 함을 지적한 바 있다.

한편 골드만 압평안압계가 반드시 이상적인 것만은 아니

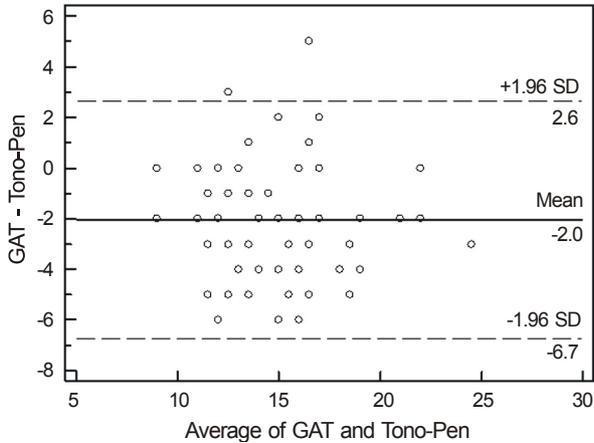


Figure 4. Bland-Altman plots of agreement between Goldmann applanation tonometer and Tono-Pen for normal eyes. The differences in IOP of both tonometers (Goldmann applanation tonometer value minus noncontact tonometer value, mm Hg) are plotted against the average of the IOP of both tonometers. The solid line represents the mean bias and the dashed lines represent ± 1.96 SD confidence interval (CI) (i.e. 95% of the points should fall within these lines). SD = standard deviation.

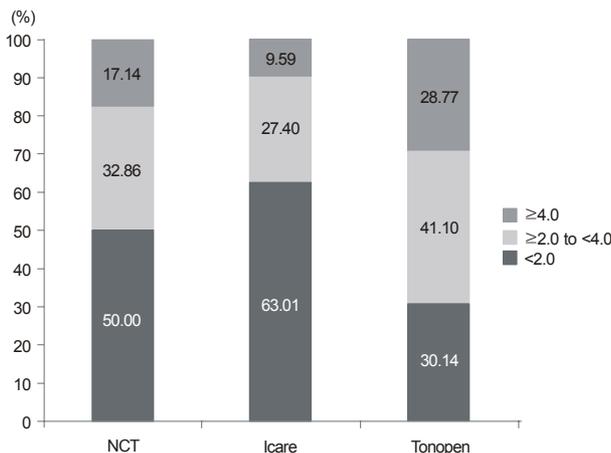


Figure 5. Incidence of absolute value for IOP differences between noncontact tonometer, Tono-Pen, or Icare and Goldmann applanation tonometer (considered as a reference) measurements.

± 3.75 mmHg로 가장 좁았으며, 비접촉 안압은 ± 5.05 mmHg로 가장 넓었다(Figs. 2-4).

골드만 안압을 기준으로 각 안압계 안압들의 오차 절대값을 <2.0 , ≥ 2.0 to <4.0 , ≥ 4.0 mmHg 3군으로 나누어서 분석한 결과, 오차 절대값 <2.0 mmHg 군이 가장 많았던 안압은 리바운드 안압이었고, 다음이 비접촉 안압, 토노펜 안압 순이었다(각각 63.01%, 50.00%, 30.14%). 오차 절대값 ≥ 4.0 mmHg 군이 가장 많았던 안압은 토노펜 안압이었고, 그 다음은 비접촉 안압이었으며, 리바운드 안압이 가장 적었다(각각 28.77%, 17.14%, 9.59%)(Fig. 5).

다. 골드만 안압계가 현재까지 안압의 표준 측정법이고 임상에서 널리 사용되고 있기는 하나,²³ 이 장비는 Goldmann and Schmidt¹가 520 μm 평균중심각막두께(mean central corneal thickness)를 기준으로 보정하였기 때문에 각막의 두께가 이 기준으로부터 벗어나게 되면 측정의 정확성에 영향을 받게 되어 있다.^{5,24} 각막 난시도 골드만 압평안압계에서 중요한 오차유발 요인이다. 이전의 연구에 따르면 각막 난시도와 골드만 안압 사이에 0.25²⁵-0.67²⁶ mmHg/diopter 정도의 오차 관계가 있다고 되어 있다. 이런 오차는 난시축에 수평과 수직방향으로 골드만 압평안압계로 안압을 측정하여 두 값의 평균값을 구함으로써 피할 수 있으나,²⁷ 난시형태가 불규칙하거나 각막의 모양이나 두께가 바뀌는 조건에서는 골드만 압평안압계 값이 부정확하거나 측정이 아예 불가하기도 하다.

한편 자동 비접촉 안압계는 Imbert-Fick 법칙을 이용한 것으로, 각막 중심에 공기 분사시 반사되는 빛이 최대가 되는 시점을 압평안압으로 기록하는 방식이다. 각막의 기계적 영향을 적게 받고 감염의 기회가 골드만압평안압계보다 적으며, 점안마취가 불필요하고 측정 시간이 짧고 간편하다는 장점이 있다. 하지만 심장주기의 1/500에 해당하는 5 ms 안에 안압을 측정하기 때문에 안구박동이 안압 측정값 변동의 주요 원인이 될 수 있으며 반복 측정한 안압값의 변동 폭이 1-4 mmHg가 될 수 있다고 되어 있다.^{15,16,28}

토노펜은 작고 가벼운 휴대가능한 전자안압계이다. 골드만 압평안압계처럼 토노펜도 압평안압방식이며 전지에 의해 작동되고 측정 수치가 화면에 바로 표시되는 디지털 방식이다. 사용이 간편하여 검사자에 의한 오차를 줄일 수 있고 일회용 라텍스 덮개를 사용하므로 환자간의 전염성 질환의 전파를 막을 수 있는 장점이 있다. 하지만 골드만 압평안압계와 비교시 낮은 안압영역에서는(≤ 9 mmHg) 낮게, 높은 안압영역에서는(≥ 30 mmHg) 높게 측정되는 경향이 있다는 한계가 있다.¹⁷⁻²⁰

마지막으로, 리바운드 안압계(Rebound tonometer, Icare[®], Helsinki, Finland)는 위에 언급한 골드만 압평안압계의 단점들을 극복하고자 비교적 최근에 도입된 것으로 유발과 충돌(inductive/impact)의 원리를 이용한다. 휴대성이 좋고 점안마취제 없이도 간편하게 측정 가능하면서도 골드만 압평안압계와 유사하게 정확한 안압 측정이 가능한 것이 장점이다.¹⁰⁻¹⁴ 각막난시나 표면의 요철(irregularity)에 의한 영향을 적게 받으며, 비교적 적은 숙련으로 정확한 안압을 측정할 수 있다. 또한 세극등현미경이 필요치 않아서 측정 자세가 자유로우므로 환자가 누워있는 경우도 측정이 용이하다.^{13,29} 탐침은 일회용이기 때문에 측정시마다 쉽게 교체 가능하고 따라서 기구의 각막 접촉으로 인한 감염전파의

위험성이 적으며, 무엇보다도 탐침의 말단부의 직경이 1 mm (골드만 압평안압계: 3.06 mm, 토노펜: 1.02 mm) 정도로 좁기 때문에 다른 안압계에 비해서 상대적으로 원추각막, 각막부종, 각막괴양, 각막흔탁 등의 각막 표면이 일정하지 않은 환자에서도 사용이 좋은 장점이 있다.^{30,31} 각막 표면의 요철에 영향을 받지 않는 이러한 특성은 수술 후 난시가 불규칙적으로 심하거나 표면이 매끄럽지 못한 눈에서 골드만 압평안압계의 대체 수단이 될 수 있는 장점이다.

이번 연구를 통해 저자들은 골드만 안압을 기준으로 비교시, 리바운드 안압이 비접촉 안압과 토노펜 안압 보다 더 우수한 일치성을 보이고, 평균 차이 값이 비접촉 안압보다는 조금 크나 비교적 우수하며 신뢰구간의 폭이 세 가지 안압계 중 가장 좁은 것을 확인하였다. 골드만 압평안압계로 안압측정이 어려운 경우 리바운드 안압계가 대체 수단이 될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- 1) Goldmann H, Schmidt T. [Applanation tonometry]. *Ophthalmologica* 1957;134:221-42.
- 2) Whitacre MM, Stein R. Sources of error with use of Goldmann-type tonometers. *Surv Ophthalmol* 1993;38:1-30.
- 3) Doughty MJ, Zaman ML. Human corneal thickness and its impact on intraocular pressure measures: a review and meta-analysis approach. *Surv Ophthalmol* 2000;44:367-408.
- 4) Liu J, Roberts CJ. Influence of corneal biomechanical properties on intraocular pressure measurement: quantitative analysis. *J Cataract Refract Surg* 2005;31:146-55.
- 5) Kohlhaas M, Boehm AG, Spoerl E, et al. Effect of central corneal thickness, corneal curvature, and axial length on applanation tonometry. *Arch Ophthalmol* 2006;124:471-6.
- 6) Broman AT, Congdon NG, Bandeen-Roche K, Quigley HA. Influence of corneal structure, corneal responsiveness, and other ocular parameters on tonometric measurement of intraocular pressure. *J Glaucoma* 2007;16:581-8.
- 7) Luce DA. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer. *J Cataract Refract Surg* 2005;31:156-62.
- 8) Vajaranant TS, Price MO, Price FW, et al. Intraocular pressure measurements following Descemet stripping endothelial keratoplasty. *Am J Ophthalmol* 2008;145:780-6.
- 9) Ceruti P, Morbio R, Marraffa M, Marchini G. Comparison of dynamic contour tonometry and goldmann applanation tonometry in deep lamellar and penetrating keratoplasties. *Am J Ophthalmol* 2008;145:215-21.
- 10) Fernandes P, Díaz-Rey JA, Queirós A, et al. Comparison of the ICare rebound tonometer with the Goldmann tonometer in a normal population. *Ophthalmic Physiol Opt* 2005;25:436-40.
- 11) Jorge J, Fernandes P, Queirós A, et al. Comparison of the IOPen and iCare rebound tonometers with the Goldmann tonometer in a normal population. *Ophthalmic Physiol Opt* 2010;30:108-12.
- 12) Nakamura M, Darhad U, Tatsumi Y, et al. Agreement of rebound

- tonometer in measuring intraocular pressure with three types of applanation tonometers. *Am J Ophthalmol* 2006;142:332-4.
- 13) Brusini P, Salvat ML, Zeppieri M, et al. Comparison of ICare tonometer with Goldmann applanation tonometer in glaucoma patients. *J Glaucoma* 2006;15:213-7.
 - 14) Martinez-de-la-Casa JM, Garcia-Feijoo J, Castillo A, Garcia-Sanchez J. Reproducibility and clinical evaluation of rebound tonometry. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2005;46:4578-80.
 - 15) Shields MB. The non-contact tonometer. Its value and limitations. *Surv Ophthalmol* 1980;24:211-9.
 - 16) Vernon SA. Intra-eye pressure range and pulse profiles in normals with the Pulsair non-contact tonometer. *Eye (Lond)* 1993;7(Pt 1):134-7.
 - 17) Whitacre MM, Emig M, Hassanein K. The effect of Perkins, Tono-Pen, and Schiötz tonometry on intraocular pressure. *Am J Ophthalmol* 1991;111:59-64.
 - 18) Frenkel RE, Hong YJ, Shin DH. Comparison of the Tono-Pen to the Goldmann applanation tonometer. *Arch Ophthalmol* 1988;106:750-3.
 - 19) Kao SF, Lichter PR, Bergstrom TJ, et al. Clinical comparison of the Oculab Tono-Pen to the Goldmann applanation tonometer. *Ophthalmology* 1987;94:1541-4.
 - 20) Minckler DS, Baerveldt G, Heuer DK, et al. Clinical evaluation of the Oculab Tono-Pen. *Am J Ophthalmol* 1987;104:168-73.
 - 21) Davies LN, Bartlett H, Mallen EA, Wolffsohn JS. Clinical evaluation of rebound tonometer. *Acta Ophthalmol Scand* 2006;84:206-9.
 - 22) Bandyopadhyay M, Raychaudhuri A, Lahiri SK, et al. Comparison of Goldmann applanation tonometry with the Tonopen for measuring intraocular pressure in a population-based glaucoma survey in rural West Bengal. *Ophthalmic Epidemiol* 2002;9:215-24.
 - 23) International Organization for Standardization. *Ophthalmic Instruments—Tonometers: ISO8612:2001*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2001.
 - 24) Grieshaber MC, Schoetzau A, Zawinka C, et al. Effect of central corneal thickness on dynamic contour tonometry and Goldmann applanation tonometry in primary open-angle glaucoma. *Arch Ophthalmol* 2007;125:740-4.
 - 25) Holladay JT, Allison ME, Prager TC. Goldmann applanation tonometry in patients with regular corneal astigmatism. *Am J Ophthalmol* 1983;96:90-3.
 - 26) Rask G, Behndig A. Effects of corneal thickness, curvature, astigmatism and direction of gaze on Goldmann applanation tonometry readings. *Ophthalmic Res* 2006;38:49-55.
 - 27) Mark HH. Corneal curvature in applanation tonometry. *Am J Ophthalmol* 1973;76:223-4.
 - 28) Shyn KH, Ahn SK, Cho HK, Kim BH. Comparison between intraocular pressures measured by non-contact tonometer and goldmann applanation tonometer. *J Korean Ophthalmol Soc* 1994;35:700-3.
 - 29) Abraham LM, Epasinghe NC, Selva D, Casson R. Comparison of the ICare rebound tonometer with the Goldmann applanation tonometer by experienced and inexperienced tonometrists. *Eye (Lond)* 2008;22:503-6.
 - 30) Moreno-Montañés J, Gosende I, Caire J, García-Granero M. Comparison of the new rebound tonometer IOPen and the Goldmann tonometer, and their relationship to corneal properties. *Eye (Lond)* 2011;25:50-6.
 - 31) Moreno-Montañés J, García N, Fernández-Hortelano A, García-Layana A. Rebound tonometer compared with goldmann tonometer in normal and pathologic corneas. *Cornea* 2007;26:427-30.

=ABSTRACT=

Comparison of Intraocular Pressure Measured by Non-Contact Tonometer, Rebound Tonometer, Tono-Pen, and Goldmann Applanation Tonometer

Kyung Sik Lee, MD, Se Kyung Kim, MD, Eung Kweon Kim, MD, PhD, Tae Im Kim, MD, PhD

Department of Ophthalmology, Institute of Vision Research, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Purpose: To compare the level of accuracy of intraocular pressure (IOP) measurements attained by non-contact tonometer (NCT), rebound tonometer (RT) Icare[®], and Tono-Pen (TONO-PEN AVIA[®]), using Goldmann Applanation tonometer (GAT) as a reference value and to explore their clinical usefulness.

Methods: In a prospective study of 71 normal eyes, IOP was measured with NCT, RT, Tono-Pen and GAT. The IOP values of were then compared between the eyes.

Results: RT showed statistically most significant agreement with the GAT [ICC 0.811, 95%CI 0.712-0.878]. In analysis of Bland-Altman plots, NCT showed the smallest mean bias (+0.2 mm Hg) and widest CI (95%CI; ± 5.05 mm Hg), RT showed relatively small mean bias (-0.7 mm Hg) and narrowest CI (95%CI; ± 3.75 mm Hg).

Conclusions: There was a significant agreement between the RT and the GAT measurements. We expect RT to be considered as a reliable alternative when IOP measurement with GAT is not feasible.

J Korean Ophthalmol Soc 2014;55(1):47-53

Key Words: Goldmann applanation tonometer, Rebound tonometer

Address reprint requests to **Tae Im Kim, MD, PhD**
Department of Ophthalmology, Severance Hospital
#50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-752, Korea
Tel: 82-2-2228-3570, Fax: 82-2-312-0541, E-mail: TIKIM@yuhs.ac