

# Photoplethysmogram을 이용한 경막외 스테로이드 주사의 성공여부 평가

울산대학교 의과대학 서울아산병원 마취통증의학과, \*서울대학교 의과대학 마취통증의학과

김희영 · 안원식\* · 정유선 · 심지연

## Assessment of successful epidural steroid injection using photoplethysmogram

Hee-Yeong Kim, M.D., Wonsik Ahn, M.D., Ph.D.\*, Yu-seon Choeng, M.D., and Ji-Yeon Sim, M.D., Ph.D.

Department of Anesthesiology and Pain Medicine, Asan Medical Center, College of Medicine, Ulsan University, \*Department of Anesthesiology, College of Medicine, Seoul National University, Seoul, Korea

**Background:** One of effective treatment methods for back pain and radiculopathy is epidural steroid injection (ESI). However, its effectiveness is hard to judge. So, it is strongly urged to develop a method to evaluate the proper injection of ESI. Photoplethysmogram (PPG) is known as a technique to measure blood oxygen saturation. We were intended to study the PPG for the evaluation of the ESI instantaneously.

**Methods:** All patients were explained for the study protocol to get informed consent. Twenty volunteers were recruited for this study and four of them were allocated in one of 5 ESI levels; L2-3, L3-4, L4-5, L5-S1 and caudal. They were in the lateral position with 4 PPG probes in their both 2<sup>nd</sup> fingers and 2<sup>nd</sup> toes. The PPG signals were collected to a device and converted digitally. PPG signal has two components, total absorbance (TA) and oscillating pulse component (OPC). We compared the both toe PPG signals before and after ESI based on the finger PPG.

**Results:** TA changed in 60% of ESI volunteers and L4-L5 and L5-S1 groups had high change rate compared to L2-L3 group. Also, the symptom relief rate of TA and OPC change volunteers of L4-L5 and L5-S1 were 100% but other level had variable relief rate.

**Conclusions:** It is possible to use the PPG signal to predict ESI success based appropriate signal change. It is also needed to

develop other level signal detection method and to modify appropriate guideline for the decision of change of PPG. (*Anesth Pain Med* 2009; 4: 197~202)

**Key Words:** epidural steroid injection, photoplethysmogram.

### 서론

통증 치료실에서 통증이 있는 환자를 치료하기 위해 경막외 스테로이드 주사(epidural steroid injection, ESI)는 자주 시행하는 시술이지만 시술 도중에 적절히 투약되었는지 여부를 파악할 수 없는 경우가 대부분이다. 하지만, 만약 약제 투입 직후에 적절히 원하는 신경 부위에 약제 도달여부를 판정할 수 있다면 환자의 통증 경감을 통한 만족도 증가와 의료의 신뢰성 증가, 국가적 의료비 감소 등 다양한 효과를 볼 수 있어서 이러한 장비의 개발과 진료 기술의 개발이 필수적이다. 특히, 요추 통증이 있는 환자는 경막외강에 유착(adhesion)이 있는 등 한 번 투약에 원하는 곳으로 약제 침윤이 안 되는 경우가 많아 이러한 장비 개발이 필요한 환자군이다.

한편 Herzman<sup>1)</sup>이 처음으로 광채적 흡광도(photoplethysmogram, PPG)를 손가락과 발가락에서 측정 한 이후로 PPG의 의료에 활용은 70여 년의 역사를 가지고 있고, 다양한 방면에서 활용되고 있다.<sup>2-7)</sup> 광채적 흡광도란 발광부의 광원으로 부터 인체의 특정 부위에 특정 파장의 빛을 조사한 후, 조사 부위를 투과한 빛의 광량신호를 시간적으로 기록한 것을 말한다. PPG를 이용하는 기술은 비침습적 혈중 산소 포화도(blood oxygen saturation) 추정이라는 획기적 진단 방법을 제공하여 임상적으로도 많이 알려져 있다.<sup>8)</sup> 하지만 산소 포화도 측정에 사용되는 신호는 박동하는 부분만 뽑아서 별도의 알고리즘을 사용하여 계산한 것이고 총 흡광도 변화에서 작은 부분을 추출한 것으로, 추출 과정에서 직류 신호를 포함한 다량의 저주파 성분이 단순 제거된 것이다. 이렇게 PPG 신호는 혈중 산소 포화도(blood oxygen saturation) 뿐만 아니라 심박수(heart rate), 혈압(blood pressure) 등의 순환계에 대한 많은 정보를 제공할 수 있기 때문에 현재 연

논문접수일 : 2009년 5월 4일  
책임저자 : 심지연, 서울시 송파구 풍납동 388-1  
울산대학교 의과대학 서울아산병원 마취통증의학과  
우편번호: 138-736  
Tel: 02-3010-3868, Fax: 02-470-1363  
E-mail: jysim@amc.seoul.kr  
석사학위 논문임.

구에서 관심 있는 주제이다.<sup>9)</sup> PPG 기술은 초진환자에서부터 수술중의 환자까지 모든 환자의 범위에 적용할 수 있는 비침습적이며, 쉽고, 안전하며 경제적인 장점을 갖고 있어, 이를 이용한 진단의 폭을 넓히는 경우 임상진료의 넓은 분야에서 매우 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구에서는 PPG의 박동성 성분을 위주로 산소 포화도와 박동수를 진단하는 연구의 범위를 넘어, 총 흡광도(total absorbance) 성분을 포함함으로써 순환계 및 신경계의 기능 진단에 유용한 지표를 얻고자 한다.

이러한 특성을 가진 PPG를 이용하면 요추 통증 환자에게 ESI를 시행할 때 성공여부를 신속하게 판단할 수 있을 것이다. 이러한 활용 가능성을 확인하기 위해 특정 환자에서 ESI를 시행하였을 때 다리의 PPG 변화가 있는가를 알아보는 것이 이 연구의 목적이다.

**대상 및 방법**

이 연구는 본원 임상연구심의위원회 심의를 거쳐 승인 받았으며 시술 전 환자에게 연구 방법을 설명하고 동의를 얻었다.

환자는 허리와 다리에 통증이 있어 ESI를 시행하는 27-72세의 성인 남녀를 대상으로 하였다. 대상자 중 혈관질환을 동반하거나 다리나 발에 상처가 있어서 PPG를 얻는데 있어서 이상 반응을 보일 가능성이 있는 피험자는 제외하였다.

동意的한 피험자 20명을 대상으로 주입 높이 별로 4명씩 배당하였다. 측와위로 누워 있는 상태에서 양쪽 두 번째 손가락과 양쪽 두 번째 발가락에 PPG probe를 끼우고, 이를

PPG를 받는 장치에 연결하였다. PPG를 5분 측정 후 요추 2번-천추 1번에 22 G Tuohy 바늘을 사용하여 0.5% lidocaine 10 ml와 triamcinolon 40 mg을 혼합 주입하였다. 측와위 자세에서 PPG를 5분간 더 측정하였다.

PPG 신호는 RS232 통신 방식을 이용하여 컴퓨터에 저장하였다(Fig. 1). 보통 임상에서 맥박산소 포화도를 측정하기 위해서는 필터링을 하지만, 본 연구는 필터링을 하지 않으면서 원래 흡광도를 저장할 수 있게 특수 제작한 것을 사용하였다. 동시에 PPG 중 맥박 성분(alternating current, AC)은 하드웨어적으로 분리하여 총 흡광도 성분과 동시에 자료 출력을 배출할 수 있도록 제작되어 있다. 양 쪽 손가락, 발가락 총 4곳에서 측정된 값을 맥박성분, 총 흡광도 성분으로 분리하여 8개의 신호를 만들어 자체 내장된 analog digital converter (300 Hz sampling)를 사용하여 디지털 신호로 변환하였으며, 표준 RS232 통신 방식을 이용하여 컴퓨터로 전송하였다. 컴퓨터로 전송된 8개의 신호는 컴퓨터 내장 시계의 시각 설정을 받아들여 총 9개의 컬럼을 가진 디지털 신호로 변환하여 실시간으로 Labview 6.1 (National Instruments Co., Texas, USA)로 작성된 프로그램을 이용하여 PC에 저장하였다.

자료는 총 흡광도 부분과 pulse 부분으로 나누어 분석을 시행하였다(Fig. 2). 왼쪽 그래프는 총 흡광도 부분 중 pulse 부분을 뽑아서 진동 부분만을 기록한 것이고, 오른쪽 그래프는 총 흡광도 성분을 그대로 표시한 것이다. 위로부터 왼손가락, 오른손가락, 왼발가락, 오른발가락 순으로 되어 있고 화살표로 표시된 부분이 epidural steroid injection을 시행한 시점이다. 투여 직후에 진동부분과 총 흡광도 부분에서 변화를 보이고 있다. 그래프의 가로축은 시간을 나타내는

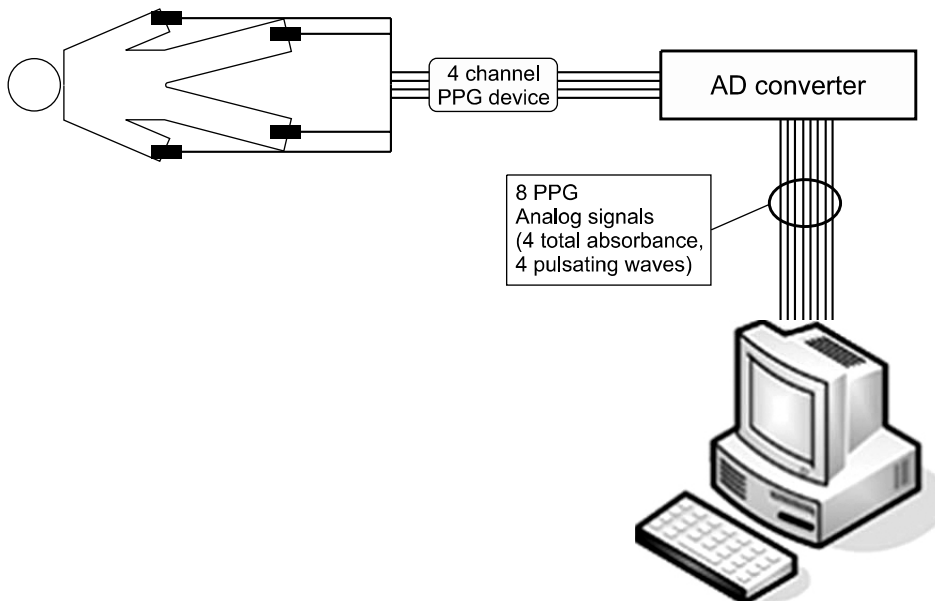


Fig. 1. The device for data collection and computer arrangement. PPG: photoplethysmogram.

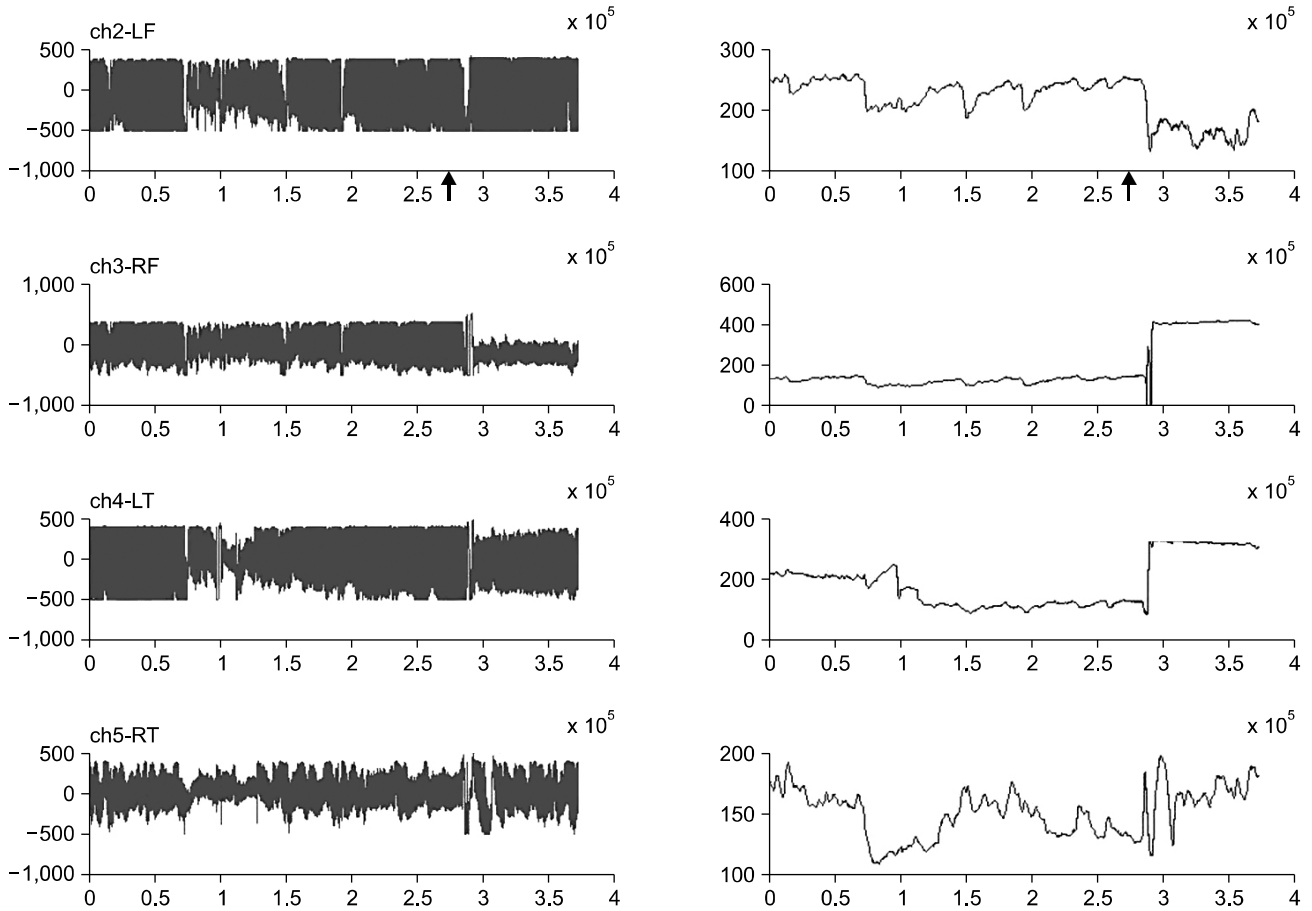


Fig. 2. These graphs show example of the seventy one years old female patient with low back pain and left sciatica. Epidural steroid injection (L4-5) was performed in left decubitus position. The arrow means the time of being performed ESI. LF: left second finger, RF: right second finger, LT: left second toe, RT: right second toe.

것으로 약 17분의 자료를 초당 300개의 점을 취해서 총 37만 여개로 표시한 것이다. 왼쪽 그래프의 세로축은 임의적인 단위로 서로 다른 곳에서 측정된 것을 비교할 수는 없지만 한 곳에서 시점을 달리하여 비교하는 것은 의미가 있을 수 있다. 우측 그래프의 세로축도 임의의 흡광도를 기술한 것으로 절대값은 의미가 없고 시점별로 상대적으로 비교한 것만 의미가 있다.

총 흡광도 부분은 손가락의 PPG 성분이 변화없는 상태에서 발가락의 PPG 성분이 5% 이상 변화하였을 때 유의하게 변화하였다고 판정하였다. 즉, 다음과 같은 식을 계산하여 95% 이하이거나 105% 이상으로 계산될 때 차이가 있는 유의한 변화로 판단하였다.

$$\text{총 흡광도 변화율} = (\text{ESI 전 총 흡광도} - \text{ESI 후 총 흡광도}) / (\text{ESI 전 총 흡광도}) \times 100$$

또한 박동성 부분에서는 손가락의 PPG 성분이 변화 없는 상태에서 발가락의 PPG 성분이 10% 이상 변화하였을 때 유의하게 변화하였다고 판정하였다. 즉, 다음과 같은 식을

Table 1. Rate of Change of PPG in the Toe

Injection site	Total absorbance (%)	Pulsatile PPG (%)
L2-L3	25	50
L3-L4	75*	75
L4-L5	75*	100*
L5-S1	75*	100*
Caudal	50*	75
Total	60	80

\*: significant difference compared to L2-L3 (P < 0.05). PPG: photoplethysmogram.

계산하여 90% 이하이거나 110% 이상으로 계산될 때 차이가 있는 유의한 변화로 판단하였다.

$$\text{박동성 흡광도 변화율} = (\text{ESI 전 박동성 흡광도 진폭} - \text{ESI 후 박동성 흡광도 진폭}) / (\text{ESI 전 박동성 흡광도 진폭}) \times 100$$

**Table 2.** Change of Total Absorbance in the Toe and Rate of Reduction in Symptom

Injection site	Concordance percentage (NIS/NCT)	Disconcordance percentage (NIS/NOT)
L2-L3	100% (1/1)	33% (1/3)
L3-L4	67% (2/3)	100% (1/1)
L4-L5	100% (3/3)	0% (0/1)
L5-S1	100% (3/3)	0% (0/1)
Caudal	100% (2/2)	50% (1/2)
Total	92% (11/12)	38% (3/8)

Concordance means the ratio of improvement of symptom in patient with change of total absorbance. Disconcordance means the ratio improvement of symptom in patient without change of total absorbance. NIS: numbers with improvement of symptom, NCT: numbers with the change of total absorbance, NOT: numbers without change of total absorbance.

또한, 각 부위별로 환자의 증상 경감을 1주일 후 환자 외래 방문시에 점검하여 PPG 파형 변화 유무와 연관성을 확인하였다. 더불어 신호의 변화 여부를 주사 부위, 환자의 나이, 성별, 주된 증상과 상관 관계가 있는가를 알아보아 분석하였다.

분석한 결과는 카이제곱 검정을 SAS 8.12를 이용하여 시행하였고, P 값은 0.05 미만을 채택하였다.

### 결 과

두 번째 발가락에 끼운 PPG probe의 경우 대한통증학회의 권장 피부 분절을 참조하면 요추 5번째 피부 분절에 해당된다. 요추 경막외 스테로이드 주입시 관찰되는 PPG의 변화율은 Table 1과 같다. 총 흡광도 변화는 L5 주변에 ESI를 시행하였을 때 많이 있었으나, 모든 환자에서 생겼던 것은 아니었다. 변화의 양상은 증가하거나 감소하는 등 다양한 변화를 보였는데 임상적 호전이 있는 환자는 주로 증가하는 경우에 일치하였다. PPG의 박동성 변화는 총 흡광도의 변화보다 더 많은 빈도를 보였으며, 마찬가지로 임상적 호전이 있는 환자는 주로 증가하는 경우에 일치하였다.

전반적으로 1주 후에 관찰한 임상적 호전과 총 흡광도 변화와의 관계, 박동성 흡광도 변화와의 관계는 Table 2, 3과 같다. 카이 제곱 검정을 통한 결과를 보면, 총 흡광도와 박동성 흡광도의 변화가 있는 환자 군에서 임상적인 호전을 보였다( $P < 0.05$ ).

나이와 성별로 상기 결과에 차이가 있는가를 알아본 결과 통계적으로 유의한 차이를 관찰할 수 없었다( $P > 0.05$ ).

**Table 3.** Change of Oscillating Pulse Component in the Toe and Rate of Reduction in Symptom

Injection site	Concordance percentage (NIS/NCP)	Disconcordance percentage (NIS/NOT)
L2-L3	100% (2/2)	0% (0/1)
L3-L4	67% (2/3)	0% (0/1)
L4-L5	100% (4/4)	—
L5-S1	100% (4/4)	—
Caudal	67% (2/3)	0% (0/1)
Total	88% (14/16)	0% (0/4)

Concordance means the ratio of improvement of symptom in patient with pulse component. Disconcordance means the ratio improvement of symptom in patient without change of pulse component. NIS: numbers with improvement of symptom, NCP: numbers with the change of pulse component, NOP: numbers without change of pulse component, —: no patients.

### 고 찰

본 연구는 허리와 다리에 통증이 있는 환자 20명을 대상으로 PPG가 ESI의 성공여부를 판단할 수 있는가에 대해서 평가하였다. 그 결과 PPG는 ESI의 성공여부를 판단하는데 유용했고 성공한 경우 환자의 증상 경감 효과는 더 좋은 것으로 나타났다.

경막외 스테로이드 주입은 간단한 시술일 수도 있으나 제대로 시행되지 않으면 경막천자를 일으켜 두통 등의 합병증을 초래하거나 경막외로 도달하지 못하는 경우에는 시술자체가 효과가 적을 수 있다는 문제점을 안고 있다. 따라서 외래에서 PPG와 같은 많은 정보를 가지고 있는 생체 신호를 이용하여 그 정확성을 알아낸다면, 임상적으로 유용한 결과예측 도구가 될 수 있으리라 판단된다.

임상에서 ESI가 성공했는지 알아보는 가장 일반적인 방법으로 냉감의 소실 혹은 바늘을 이용한 침통각의 소실 방법이 있다.<sup>10)</sup> 하지만 PPG가 다른 확인 방법보다 좋은 이유는 경막외 마취 시 교감 신경 섬유가 처음 차단되기 때문에 PPG가 다른 방법보다 빠르고 진폭 변화가 커서 쉽게 알아볼 수 있기 때문이다.<sup>11)</sup>

이전의 연구들에서 Sinha 등은<sup>11)</sup> 발가락에 PPG probe를 부착하고 요추 2번과 3번 사이에 경막외 마취를 0.5% bupivacaine 10 ml와 2% lidocaine 5 ml를 혼합하여 시행하여 PPG 파형의 진폭이 급격히 증가하는 것을 보고 ESI의 성공여부를 판단하였는데, ESI 10분 후 82명의 환자 중 79명의 진폭이 200% 증가하였다. Peduto 등은<sup>12)</sup> 40명 성인 남자 환자에게 0.5% bupivacaine 15 ml를 이용하여 요추 경막외 마취를 시행하였을 때 손가락과 발가락의 PPG를 비교하였는데 손가락에서 감소된 결과를 보였다. 이것은 본 연구에서 발가

락에서 PPG의 변화가 주로 증가하는 양상을 보인 것과 유사한 결과였다. 비슷한 방법으로 Mineo 등은<sup>13)</sup> 13명의 환자를 대상으로 실험하였고 발가락에서 진폭이 8배 증가한 반면 손가락에서는 50% 감소한 결과를 보였다. 그러나 두 연구 모두 PPG 파형을 총 흡광도와 박동성 성분으로 구분하지 않았는데 이번 연구는 두 가지를 분리하여 결과를 생각했다는 점에서 의미가 있다. 또한 이전부터 PPG에 의한 pulse 파형 관찰은 하지의 교감신경 차단 시작을 아는데 유용하다고 알려져 왔다.<sup>14,15)</sup>

이렇게 ESI 시행 후 PPG 파형이 변화는 이유를 살펴보면, ESI를 하게 되면 교감신경이 차단되는데 교감신경계는 혈관 크기를 조절하기 때문에 이에 따라 여러 가지 혈액학적인 변화와 관련된다.<sup>16)</sup> 교감신경계는 피부와 내장 혈관을 수축시키고 근육에 있는 혈관은 이완시키는데 ESI 이후 하지에 있는 피부 혈관들의 수축을 막아 혈류량을 많게 하고 소동맥의 저항을 감소시키며 혈관의 유순도를 높인다.<sup>17)</sup> 혈관벽의 근육긴장도 감소로 인해 동맥의 유순도가 증가하게 되고 이것이 PPG의 진폭을 증가시킨다.<sup>18-20)</sup> 또한 교감신경의 원심성 유출로를 막아서 발가락과 손가락에 있는 동맥 문합을 개방시키는데 이런 이유로 인해 진폭이 증가하게 된다.<sup>13)</sup>

PPG 파형의 진폭은 혈류나 혈량, 동맥 혈색소 농도 등에 관해 많은 정보를 담고 있는데<sup>21)</sup> 여러 가지 원인에 의해 변화될 수 있다. Nitroprusside와 같은 약물이나 가운, 진정 (sedation), 또는 척추마취나 경막외 마취처럼 국소적인 교감신경 차단이 생기면 혈관확장이 일어나 진폭이 증가하고 반대로 phenylephrine, ephedrine과 같은 약물이나 추위, 수술적 스트레스 등의 혈관 수축이 생기면 진폭은 감소할 것이다.<sup>22)</sup>

이번 연구와 같은 결과가 나오게 된 기전을 추론해 보면 보통 혈관은 자율신경계에 의해 수축과 이완이 조절되고 있는데, 경막외로 투여된 국소마취제와 스테로이드에 의해 혈관에 분포하는 자율신경도 일부 차단이 되어 조절 기전에 변화가 생기는 것으로 생각된다. 즉, ESI에 의해 특정 자율신경계의 조절에 변화가 생겨서 PPG의 총 흡광도와 진동부분의 흡광도 성분이 변화하는 것으로 추정된다. 아직 요부의 몇 번 신경이 각 다리의 혈관에 분포하는지에 대한 연구 결과가 없어 추정하기는 어렵고, 많은 연구 결과가 축적되어야 다리나 발가락 혈관 지배에 대해 이해할 수 있을 것으로 생각되나 이번 연구가 다리 혈관 조절에 대한 한가지 연구 결과도 되리라 생각된다.

이외에도 PPG는 다양한 방면에서 임상적 유용성의 가능성에 대한 연구가 진행되고 있다. Erts 등은<sup>23)</sup> 다리에 동맥 협착이 있는 환자에게 양쪽 손가락과 발가락에 PPG를 부착하여 pulse wave transit time이 길어지는 것을 협착을 진단하는데 이용 가능하다고 하였고 Shariati 등은<sup>24)</sup> 건강한 사람

과 당뇨가 있는 사람을 대상으로 하여 당뇨가 있는 사람의 혈관 상태를 PPG를 이용해 평가하였다. 또한 Knorr-Chung 등은<sup>25)</sup> 기도 막힘을 확인하는 비침습적인 방법으로 사용가능하다고 보고하였다.

PPG는 여러 가지의 주변요소에 대해 예민하고, 특히 움직임에 의한 artifact의 영향을 많이 받는다. 이에 따라 PPG 신호의 측정 위치,<sup>26)</sup> 나이에 따른 waveform의 변화, 센서와의 contacting force에 의한 신호의 변화와<sup>27)</sup> 움직임에 의한 artifact를 줄이기 위한 방법에 대한 연구가 수행되고 있다.<sup>28)</sup> 본 연구에서도 체위가 바뀌는 것으로 인한 artifact를 최소로 하고자 주입 전에도 측위에서 PPG 측정을 시행하였다.

이것 말고도 대부분의 PPG에 관련한 연구들은 다음과 같은 여러 문제점을 가지고 있다. 첫째, PPG 신호는 측정 신체부위의 혈류에 의해 탐지되는데 정상인 외의 환자 집단군에 대한 연구가 많지 않으면서 정상인의 자료를 외삽 (extrapolation)하여 환자군의 상태를 파악하려고 하였다. 둘째, 나이에 따른 PPG waveform의 변화가 체계적으로 이루어지지 않아 청년집단군(20-30대군)의 자료를 신생아나 나이 많은 노인에게 적용하였다. 셋째, 기존의 연구는 맥박산소포화도 측정이나 PPG 중 박동성 부분만을 연구대상으로 하였기에 센서의 contacting force를 명시하면서 연구가 수행되지 않았다. 넷째, PPG waveform을 구성하는 부분들(예: notch)에 대한 정확한 원인이 규명되지 않았다. 다섯째, PPG의 총 흡광도 성분의 변화에 대한 의학, 공학적인 연구가 없었다. 이러한 다양한 문제점들을 하나씩 살펴보면 특성들을 명확히 한다면 다양한 방면에서 임상적으로 적용시킬 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구의 제한점으로 두번째 발가락에서 측정했으므로 요추 5번에 해당하는 증상이 있는 환자만 대상으로 ESI를 시행한 후 PPG 변화를 관찰하여 환자의 증상경감 효과와 비교하여야 하는데 이번 연구에서는 허리와 다리에 통증이 있는 환자를 구분 없이 포함시켰다. 따라서 실험 대상군을 더 세분화시켜 PPG 변화와 치료효과를 비교하는 연구가 필요하다. 또한 ESI의 성공적 시술에도 불구하고 효과가 없는 경우와 부분적 유착이 있는 경우 어떻게 평가해야 할 것인지에 대해 해결하지 못해 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

주입된 국소마취제의 양과 경막외 마취 범위와의 관계에 대한 많은 연구들이 있어 왔다.<sup>29-31)</sup> 이번 연구에서 lidocaine을 10 ml 주사하였는데 용적(volume)은 마취 범위에 영향을 줄 수 있고 실제 많은 양의 약은 더 많은 level을 차단할 수 있다고 한다.<sup>32)</sup> 보통 성인에서 국소마취제 1-2 ml면 한 피부분절을 차단할 수 있는 양이기 때문에 10 ml를 주었을 경우 경막외 마취를 시행하고자 하는 범위를 벗어나 차단이 생겼을 가능성을 배제할 수 없다.

이번 연구 결과 성별과 나이와는 상관 없이 주사액 투여가 적절하여 치료 효과가 있는 경우 PPG 파형에 변화

가 있는 것으로 나왔다. 이를 잘 활용하면, 시술 당일 ESI의 성공여부를 판단할 수 있어 치료 효과 판정에 유용하게 사용할 수 있다. 따라서, 이번 연구 결과를 토대로 더 좋은 측정 변수를 만들어간다면 시술 즉시 그 정확성을 판단하여 치료효과를 예측하는데 유용한 지표로 사용할 수 있을 것이다. 또한 ESI 뿐만 아니라 통증치료에 사용되는 여러 가지 치료법에 대해서도 적용시켜 보아, 그 효과를 예측할 수 있는 지표로서 사용할 수 있는지의 가능성을 알아보는 것도 임상적인 의의가 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

1. Herzman AB: Photoelectric plethysmography of the fingers and toes. *Proc Soc Exp Biol Med* 1937; 37: 529-34.
2. Hertzman AB: The blood supply of various skin areas as estimated by the photoelectric plethysmograph. *Am J Physiol* 1938; 124: 328-40.
3. Hertzman AB, Spielman C: Observations on the finger volume pulse recorded photoelectrically. *Am J Physiol* 1937; 119: 334-5.
4. Allen J, Overbeck K, Nath AF, Murray A, Stansby G: A prospective comparison of bilateral photoplethysmography versus ankle-branchial index for detecting and quantifying lower limb peripheral arterial disease. *J Vasc Surg* 2008; 47: 794-802.
5. Crerar-Gillbert AJ, Kyriakon PA, Jones DP, Langford RM: Assessment of photoplethysmographic signals for the determination of splanchnic oxygen saturation in humans. *Anaesthesia* 2002; 57: 442-5.
6. Frey B, Waldvogel K, Balmer C: Clinical applications of photoplethysmography in paediatric intensive care. *Intensive Care Med* 2008; 34: 578-82.
7. Knorr-Chung BR, McGrath SP, Blike GT: Identifying airway obstructions using photoplethysmography. *J Clin Monit Comput* 2008; 22: 95-101.
8. Szocik JF, Barker SJ, Tremper KK: Fundamental principles of monitoring instrumentation. In: *Miller's anesthesia*. 6th ed. Edited by Miller RD: Philadelphia, Elsevier. 2005, pp 1212-5.
9. Reisner A, Shaltis PA, McCombie D, Asada HH: Utility of the photoplethysmogram in circulatory monitoring. *Anesthesiology* 2008; 108: 950-8.
10. Stevens RA, Bray JG, Artuso JD, Kao TC, Spitzer L: Differential epidural block. *Reg Anesth* 1992; 17: 22-5.
11. Sinha PK, Dubey PK, Gaur A, Singh PK, Singh S: Plethysmographic pulse oximeter waveform variation as an indicator of successful epidural blockade: a prospective study. *Anesthesiology* 1999; 91: 899-901.
12. Peduto VA, Tani R, Pani S: Pulse oximetry during lumbar epidural anesthesia: reliability of values measured at the hand and the foot. *Anesth Analg* 1994; 78: 921-4.
13. Mineo R, Sharrock NE: Pulse oximeter waveforms from the finger and toe during lumbar epidural anesthesia. *Reg Anesth* 1993; 18: 106-9.
14. Mustafa K, Milliken RA, Bizzari DV, Pravin S: Photoplethysmography as an indicator of onset of epidural block. *Reg Anesth* 1983; 8: 114-6.
15. Meijer J, de Lange JJ, Ros HH: Skin pulse wave monitoring during lumbar epidural and spinal anesthesia. *Anesth Analg* 1988; 67: 356-9.
16. Babchenko A, Davidson E, Ginosar Y, Kurz V, Faib I, Alder D, et al: Photoplethysmographic measurement of changes in total and pulsatile tissue blood volume, following sympathetic blockade. *Physiol Meas* 2001; 22: 389-96.
17. Breivik H, Cousins MJ, Lofastrom JB: Neural blockade in clinical anesthesia and management of pain. Philadelphia, Lippincott-raven. 1998, pp 411-45.
18. Been TK, Eggers GW Jr: Use of pulse monitor for determining sympathetic block in the arm. *Anesthesiology* 1974; 40: 412-4.
19. Gielen MJ, Slappendel R, Merx JL: Asymmetric onset of sympathetic blockade in epidural anesthesia shows no relation to epidural catheter position. *Acta Anaesthesiol Scand* 1991; 35: 81-4.
20. Kim JM, Arakawa K, VonLintel T: Use of the pulse-wave monitor as a measurement of diagnostic sympathetic block and of surgical sympathectomy. *Anesth Analg* 1975; 54: 289-96.
21. Wickramasinghe Y, Spencer SA: Photoplethysmography: a futuristic view for neonatal care. *Acta Paediatr* 2000; 89: 769-70.
22. Shelley KH: Photoplethysmography: beyond calculation of arterial oxygen saturation and heart rate. *Anesth Analg* 2007; 105: S31-6.
23. Erts R, Spigulis J, Kukulis I, Ozols M: Bilateral photoplethysmography studies of the leg arterial stenosis. *Physiol Meas* 2005; 26: 865-74.
24. Shariati NS, Zahedi E, Jajai HM: Classification of vascular function in upper limb using bilateral photoplethysmographic signals. *Physiol Meas* 2008; 29: 365-74.
25. Knorr-Chung BR, McGrath SP, Blike GT: Identifying airway obstruction using photoplethysmography (PPG). *J Clin Monit Comput* 2008; 22: 95-101.
26. Allen J, Murray A: Similarity in bilateral photoplethysmographic peripheral pulse wave characteristic at the ears, thumbs, and toes. *Physiol Meas* 2000; 21: 369-77.
27. Teng XF, Zhang YT: The effect of contacting force on photoplethysmographic signals. *Physiol Meas* 2004; 25: 1323-35.
28. Hayes MJ, Smith PR: Artifact reduction in photoplethysmography. *Appl Opt* 1998; 37: 7437-46.
29. Bromage PR: Spread of analgesic solutions in the epidural space and their site of action: a statistical study. *Br J Anaesth* 1962; 34: 161-78.
30. Bromage PR: Aging and epidural dose requirements. segmental spread and predictability of epidural analgesia in youth and extreme age. *Br J Anaesth* 1969; 41: 1016-22.
31. Bromage PR: Mechanism of action of extradural analgesia. *Br J Anaesth* 1975; 47: 199-212.
32. Hadzic A: Text book of regional anesthesia and acute pain management. New York, McGraw-Hill Companies. 2007, pp 244-5.