

Posturography를 이용한 신경계 독성에 대한 건강 감시

아주대 산업의학과
이 경 종

1. 서론

최근 외국에서는 낮은 농도의 유기용제에 만성적으로 노출되는 근로자들에서 신경계 건강 영향 감시(health effect monitoring)를 위하여 Posturography의 적용이 연구되고 있다. 미국 신시내티 의과대학 환경보건대학원의 Biomechanic Laboratory의 Battacharaya 교수팀은 인간공학 및 산업환경보건분야에서 이 기법을 이용하여 활발히 연구를 하고 있는 팀이다. 저자도 이곳에서 같이 연구를 할 기회가 있었는데, 현재 유기용제에 의한 건강 감시 프로그램에서 마땅한 조기 경고를 위한 대책이 없던 차에 이 Posturography는 하나의 좋은 대안이 될 수 있을 것으로 보여 소개한다.

Posturography는 과거에 의사들이 환자를 진단할 때 사용하던 Romberg test라는 것을 정량화하였다고 생각하는 것이 이해하기 쉽다. 우리 몸은 두 발로 몸의 균형을 유지한다. 우리 발은 우리 몸에 비하여 대단히 작고 또한 다른 포유동물과 달리 두 발로 직립하여 생활하므로 몸의 균형을 유지하는 것은 노력이 필요한 일이다. 따라서 우리는 가만히 서 있으려고 하여도 끊임

없이 몸이 흔들리게 된다. 이것은 우리 몸이 눈, 귀에 있는 전정기관, 발에서부터 오는 감각과 이에 따른 소뇌 및 대뇌 피질을 통하여 계속 우리의 자세를 바로 교정하고 있기 때문이다. Posturography는 이러한 몸의 흔들림(body sway)의 정도를 전기적 신호로 잡아 내어 컴퓨터로 계산하고 형상화하는 작업이다.

많은 유기용제들이 신경계 독성 영향을 가지고 있다. 예를 들면, 톨루엔, 크실렌, 스티렌, 알콜 등에 threshold limit values(TLV)보다 높은 농도로 급성 또는 만성적으로 노출되면 중추신경계와 말초신경계에 영향을 받게 된다. 특히 만성적으로 노출될 때 이들 유기용제는 비가역적인 중추신경계 영향을 주게 되어 증상이 발현되기 전에 이들 유기용제의 영향을 찾아내는 것은 중요한 일이다. 그런데 문제는 중추신경계 영향을 증상만으로 조기에 발견하기 어렵다는 점이다. 유기용제에 의한 신경계 증상들은 거의 대부분 비특이적이기 때문에 직업적으로 유기용제에 노출되는 경우에도 흔히 간과하기 쉽다는 것과 증상이 발견될 시점에는 이미 비가역적 중추신경계 손상이 발생된 경우가 많기 때문이다.

증상이 발생되기 전에 보다 일찍 신경계 손상

을 찾는 일과 모니터링으로 사용할 수 있는 방법의 개발은 산업보건분야에서 대단히 중요한 일이다. 게다가 유기용제에 대한 특수건강진단의 효과가 거의 없는 현실을 감안하면 더욱 그 필요성이 절실하다. 이러한 방법들은 조기에 신경계 영향을 발견할 수 있어야 함은 물론이고 비침습적이어야 하면 검사 시간이 적고, 비용이 적게 들어야 하는 방법이어야 할 것이다.

Posturography는 이러한 조건들을 충족시키는 방법이라고 판단된다. 증상 이전에 신경계 독성을 찾아낼 수 있으며, 비용이 저렴하고, 검사 시간이 3분 이내로 짧게 걸리며, 해석이 쉽고, 비침습적인 방법이다. 그리고 장비가 간단하여 이동성을 갖춘 장비도 개발되어 있다. 게다가 작업장 공기를 측정하는 작업환경 모니터링이나 내부용량(internal dose)을 감시하는 생물학적 모니터링이 아닌 건강영향에 대한 모니터링(effect monitoring)이라는 특징을 가지고 있다.

2. 이론적 배경

Posturography는 전술한 바와 같이 우리 몸이 서 있는 경우 어쩔 수 없이 흔들리는 것을 전기적 신호로 잡아내어 형상화하는 기술이다. 여기서 몸의 흔들림(body sway)은 특히 biomechanics에서 흔히 사용되는 가정이지만 발목 관절만을 사용하여 몸의 자세를 바로 잡는데 사용하도록 피검자에게 요구하여 발목을 제외한 나머지 몸(다른 관절들을 포함하여)은 마치 막대기와 같다고 가정하게 된다.

몸의 자세를 평형으로 유지하려면 우선 지속적인 구심성 신경과 운동회로로 정보를 보내는 소뇌와 균형이 이루어져야 한다. 공간에서 우리가 몸의 평형을 유지하기 위한 구심성 체계는 세 가

지, 즉 눈으로부터 오는 평형에 대한 감각, 귀에 위치하는 세반고리관이라 불리는 전정기관, 발과 발목의 관절, 인대에서 오는 proprioception 및 피부 감각으로 이루어져 있다. 이러한 생물학적 수용체들은 척수(spinal) 및 척수 상위(supra-spinal) 수준에서 처리된다. 구심성 신호에 반응하여 소뇌와 운동피질은 원심성 신호를 내려보내 자세에 대한 근육 반사를 일으킨다. 구심-원심성 고리(afferent-efferent loop)는 우리 몸의 중심점(center of pressure)을 두 발이 지지 받는 경계내(base of support)에 두려고 한다. 그런데 우리 몸은 이 base of support에 비하여 너무 크므로 직립으로서 있게 하기 위하여 신경계는 끊임없이 근육에 명령을 내려 자세를 바로 고쳐야 한다. 이러한 과정이 body sway가 발생하는 이유이며 정상적 기전이고 2Hz 이내의 진동수를 가진다.

표 1. posturography 관련된 용어의 정리

Center of Mass(COM): 삼차원 공간에서 몸의 총 질량의 점, 몸의 각 부분의 weighted average의 공간상의 위치 점.
Center of Pressure(COP): 체중에 대한 ground reaction force vector의 점 위치. 만약 한발로서 있으면 COP는 발을 통과하나, 두발로서 있는 경우 두 발의 사이(만약 두 발이 똑같은 힘으로서 있다면 중심)를 통과한다.
Base of Support(BOS): 발 밑의 면적 또는 몸과 환경과의 접촉하는 base(면적)

3. 검사 방법

제품에 따라 다를 수 있으나 이동성이 있는 제품의 경우 대개 가로 50cm, 세로 50cm, 높이 약

5cm, 무게 약 9kg의 force platform(힘 판)과 노트북 컴퓨터가 전부이다. force platform의 네 모퉁이에 sensor가 있어 이를 통하여 3차원 공간에서 힘과 모멘트를 측정하는 기기이다. 피검자가 이 force platform에 올라서면 검사자의 의도에 따라 20초 내지 40초 정도 가만히 서 있는 자세에서 COP의 움직임을 통하여 body sway를 간접적으로 평가한다. 이 때 피검자는 말하거나 팔, 머리, 척추 등의 관절은 움직이지 않도록 하여야 한다. 단지 발목 관절만을 이용하여 평형을 유지하도록 하여야 한다. 평형을 잃고 넘어지는 안전상의 위험을 대비하여 보조원이 뒤와 옆에서 부축할 준비를 갖추는 것이 필요하다. force platform 위의 COP의 움직임은 힘 판 네 귀퉁이 밑에 있는 감지기(sensor)를 통하여 힘과 모멘트의 변화로서 전기적 신호로 변환된다. 이 신호는 다시 연결된 컴퓨터의 프로그램을 통하여 디지털화하여 여러 가지 응용 통계 패키지를 이용하여 분석할 수 있다. sway는 일반적으로 전후 방향과 좌우 방향으로 표시된다.

이 기기는 응용 분야가 다양한데 검사자나 연구자가 원하는 대로 여러 가지로 응용하여 검사를 시행할 수 있다. 많은 경우 눈을 뜬 상태와 눈을 감은 상태로 각각 검사한다. 보다 많은 정보를 원할 경우 스펀지 위에 올라서서 발에서 오는 proprioception을 변화시키거나 정적 자세만이 아닌 동적 자세, 나아가서 보행에도 응용할 수 있다. 일반적으로 눈을 뜨거나 감게 하고, 다시 스펀지 폼 위에 오르거나 폼 없이 검사하는 네 가지 경우의 측정을 사용한다. 눈을 감는 경우 눈으로부터 얻게 되는 평형의 정보가 없으므로 보다 평형을 유지하는데 어려움을 겪을 것이다. 또한 스펀지 폼 위에 올라서는 경우 발에서부터 오는 심부 감각(proprioception)의 왜곡으

로 인하여 평형 유지에 어려움이 생긴다. 눈을 감고 폼 위에 서서 몸의 평형을 유지하는 것은 거의 전정 기관에 의존하여야 하므로 더욱 많은 노력을 들여 평형을 유지하려고 하니 보다 body sway가 커질 것이다. 이러한 변화를 주는 이유는 연구자의 의도에 좌우되며 보다 큰 body sway를 유도하여 작은 차이를 크게 관찰할 수 있는 장점도 있다.

4. 산업보건에서의 예

가. 유기용제에서의 신경독성

산업장에서 사용되는 많은 유기용제들은 거의 급성 또는 만성 신경독성을 가지고 있다. 이러한 신경계 독성에 의한 증상들은 피로, 어지럼증, 우울, 인지 기능 장애, 쉽게 술에 취하는 경향, 운동 기능 장애, 평형 기능 장애 등이 관찰된다. 그런데 흔히 이러한 증상들은 비특이적이기 때문에 간과하는 경우가 많다. 많은 유기용제가 중추신경계는 물론이고 말초신경계에도 영향을 주기 때문에 신경계에 대한 종합적 평가가 필요해 보인다.

유기용제와 이 기법을 이용한 body sway와의 관계에 대한 연구는 아직 많이 이루어져 있지 않으나 약 10년 전부터 연구들이 산업보건분야에서 보고되고 있는데, 농약 살포 작업자, 하수 처리장 근로자, 도장 작업자, 항공기 정비사 등에 대한 연구들이 있어 왔다.

미국의 2곳의 공군 비행장에서 비행기 보수 및 유지를 하는 27명의 근로자들에서 여러 가지 탄화수소류, 특히 방향족 탄화수소물이 5~25%의 부피 비율로 구성되어 있는 제트 연료에 노출되고 있었다. 공기중의 벤젠, 톨루엔, 크실렌, 나프

타를 측정하고 작업자의 노출 연수를 고려한 누적 노출을 이용하여 body sway와의 관련성을 다른 변수들(연령, 키, 체중, 음주, 흡연, 카페인 음용)을 통제된 후에 관찰 분석하였다. 검사는 눈을 뜬 상태와 눈을 감은 상태, 약 10cm되는 스폰지 폼 위에서, 폼을 제거한 후에 측정하여 네 가지로 구분하여 실시하였다. 종속 변수들은 30초 동안의 sway length와 sway area를 사용하였다. 각 유기용제의 누적 노출 농도는 벤젠 21.2±5.7, 톨루엔 23.8±6.1, 크실렌 22.7±5.4, 나프타 1308±292이었다. 분석 결과 body sway 종속 변수 중의 하나인 sway length는 유기용제 노출과 결정계수(r^2) 0.44-0.64의 높은 대수 선형 관계를 보였다. 이는 이러한 유기용제의 노출이 전정기능과 proprioception의 기능에 영향을 미쳤다는 것을 암시하고 있다. 그림 1은 제트 엔진 연료에 노출된 두 사람을 그 노출 정도에 따라 각각 눈을 감고 검사한 양상을 예로 제시한 것이다.

나. 혈중 납과의 관련성

미국 신시내티에서 납에 대한 연구(Cincinnati Lead Program Project) 중에 혈중 납 농도와 body sway와의 관련성을 확인하는 연구가 진행되었다. 63명의 어린이들이 이 연구에 참가하였는데 어머니가 알코올 중독, 당뇨, 약물 중독인 자녀들과, 정신지체, 정신질환, 귀 질환, 신경계 질환 등을 앓고 있는 어린이는 제외하였다. 평균 연령은 5.7±0.5세였고 평균 최대 혈중 납은 20.7 µg/dL(범위: 9.2~32.5)이었다. 이러한 농도는 이때 당시 CDC(Center for Disease Control)의 권고 기준인 25µg/dL(현재는 10µg/dL) 이하로 이 농도 이하에서는 건강상 영향이 없는 것으로 알려져 있었다. 물론 어른에서도 40µg/dL 이상이면 납에 대하여 과노출 되었다고 한다. 그런데 이 연구에서는 혈중 납의 최대치의 평균도 1980년대 말인 당시에 CDC가 제시하는 25µg/dL보다 높지

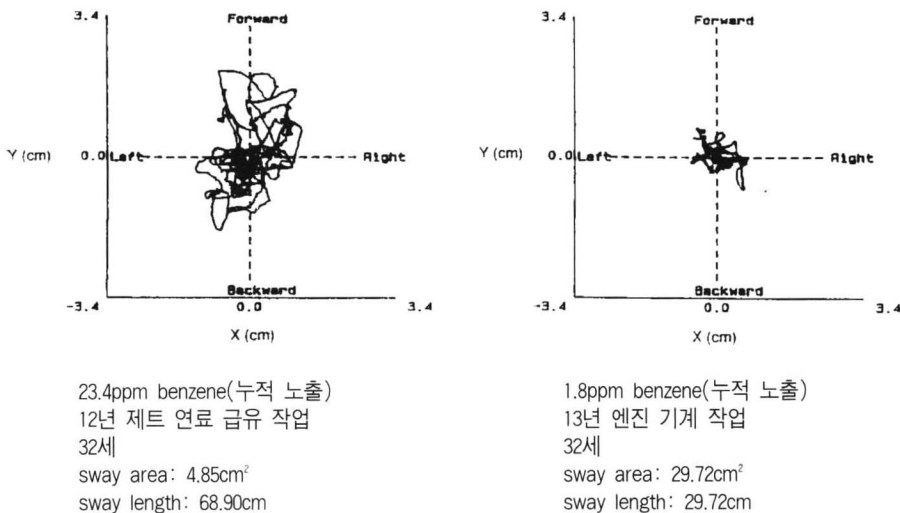


그림 1. 유기용제에 노출된 두 사람의 결과(눈을 감은 상태)의 비교

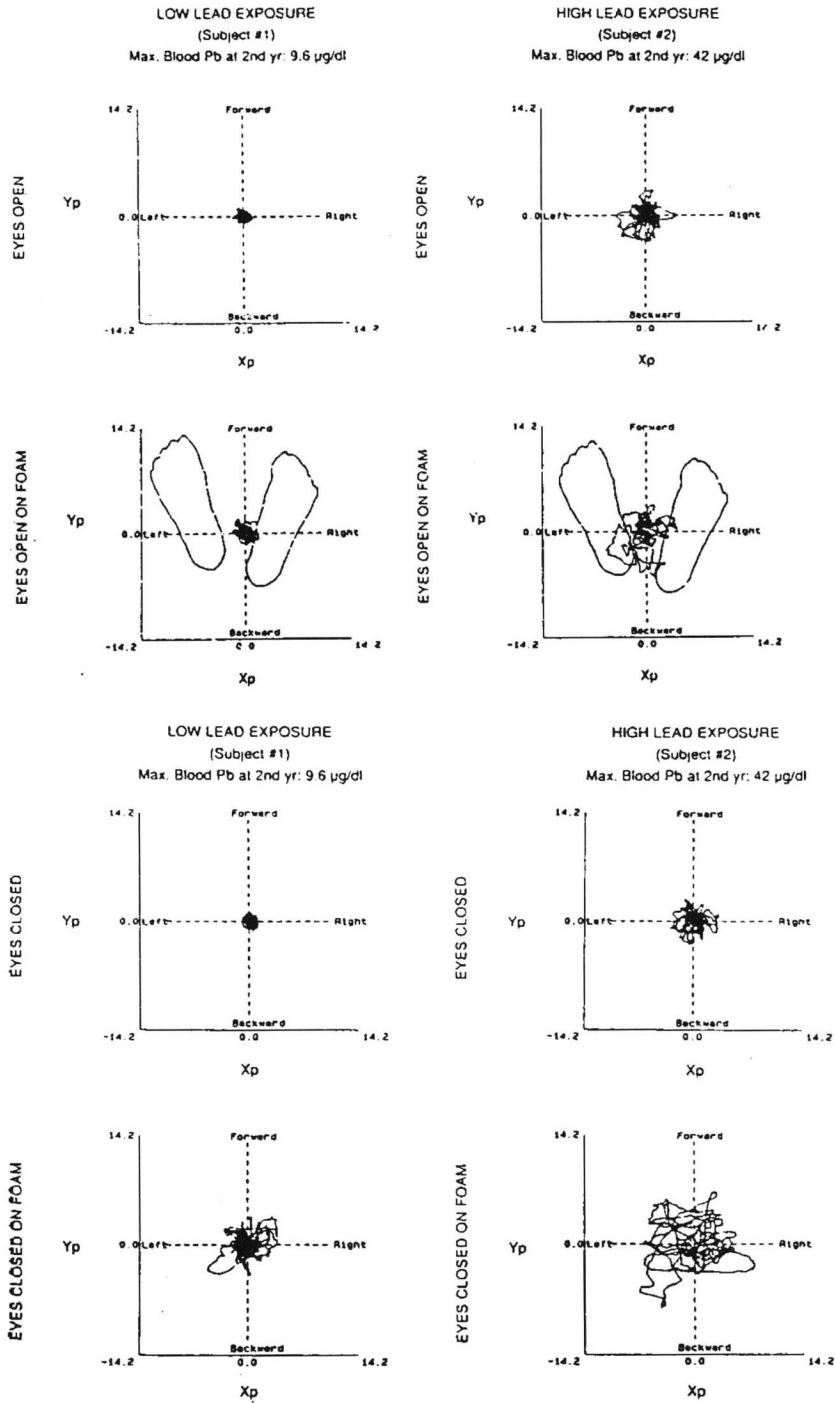


그림 2. 만성 납 노출에 의한 postural stability의 body sway 양상 (Battacharaya로부터 인용, Neurotoxicology 9(3):327-340, 1988)

양음에도 신경계에 악영향을 확인하여 보고하였다. 즉 증상 발생 이전의 낮은 농도에서도 혈중 납 농도와 신경계 영향을 입증한 것이었다.

이 연구에서는 눈을 뜨고 폼 없이, 눈을 감고 폼 없이, 눈을 뜨고 폼 위에서, 눈을 감고 폼 위에서 각각 30초간 검사를 실시하였다. 그림 2는 이러한 네 가지 경우에 있어서 혈중 납 농도가 낮은 어린이와 높은 어린이 각 1 예를 시각적으로 그 차이를 보여주고자 제시하였다.

5. 결론

정량적인 posturography는 산업 및 환경보건분야에서 신경계 영향을 조기에 평가하는데 유용한 방법이 될 수 있다. 지금까지 유기용제나 중금속에 대한 특수건강진단이 거의 실효를 거두지 못하고 있는 점을 고려할 때 이 기기를 이용한 연구와 그 구체적 적용 방법에 대한 연구가 필요해 보인다.

유기용제에 노출되는 근로자들은 거의 한 가지 물질에만 노출되는 것이 아니라 복합적으로 노출되고 있다. 작업장의 공기중 유기용제의 모니터링은 물론이고 생물학적 모니터링을 시행하려 하여도 몇 가지 가능한 생물학적 지표에만 의존해야 하기 때문에 여러 경로의 다양한 종류의 유기용제에의 신경계 영향을 거의 판별하기 어렵다. 이 기법은 비교적 단순하고 저가의 기기를 사용하며, 비침습적이고, 검사 시간이 짧은 것은 물론 이동성도 갖추어 mass screening도 가능하여 산업보건분야에서의 활용 가능성이 높아 보인다. 아직 많은 연구가 이루어져 있지 않고, COP 자체가 body sway를 직접 관찰하는 것이 아니라 간접적인 지표라는 단점이 지적되고 있다. 그러나

이러한 단점에도 불구하고 이 기법은 납이나 유기용제에 대하여 낮은 노출에 대하여 용량-반응의 관계를 보여 산업보건분야에서 그 효용성이 높다고 하겠다. 또한 다른 신경계 평가 방법과 함께 사용하는 경우 더 많은 활용과 발전이 기대된다.

참고 문헌

Battacharaya A, Shukla R, Dietrich KN, Miller J, Bagchee A, Bornchein RL, Cox C, Mitchell T. Functional implication of postural disequilibrium due to lead exposure. *Neurotoxicology* 1993; 14(2-3): 179-190

Battacharaya A, Shukla R, Bornchein RL. Postural disequilibrium quantification in children with chronic lead exposure: A pilot study. *Neurotoxicology* 1988; 9(3): 327-340

Bagchee A, Battacharaya A. Postural stability assessment during task performance. *Occupational Ergonomics* 1998; 1(1): 41-53

Battacharaya A, Morgan R, Shukla R, Ramakrishnan HK, Wang L. Non-invasive estimation of afferent inputs for postural stability under low levels of alcohol. *Annals of Biomedical Engineering* 1987; 15: 533-550

Smith LB, Battacharaya A, Lemaster G, Succop P, Puhala E, Medvedovic M, Joyce J. Effect of chronic low level exposure to jet fuel on postural balance of US Air Force. *J Occup Env Med* 1997; 39(7): 623-632

Triebig G, Schaller KH, Weltle D. Neurotoxicity of solvent mixtures in spray painters. *Int Arch Occup Environ Health* 1992; 64: 353-359

Peter Arlien-Soborg. Solvent neurotoxicity. CRC Press, Boca Raten, Florida, 1992