

녹색 신교통 시스템 바이모달트램의 친환경성 선로형 전용포장



류 명 찬 | 정회원 · 명지전문대학 교수

박 영 곤 | 비회원 · 한국철도기술연구원 바이모달트램 수송시스템연구단 선임연구원

김 익 환 | 정회원 · 현대엔지니어링 인프라 · 환경사업본부 부장

김 량 균 | 비회원 · 현대엔지니어링 기술혁신개발실 차장

1. 바이모달트램 전용차량 소개

현재 국내에서는 도시 교통, 도로 및 환경 등의 인프라 관련 시설이 첨단화되면서 바이모달트램(bimodal tram)과 같은 미래 신교통수단이 지속적으로 연구 중에 있다. 바이모달(bi-modal)이라 함은 2개의 모드(도로+철도) 특성을 가지고 있는 교통시스템으로 철도의 장점인 정시성과 버스의 장점인 유연성을 하나로 합친 새로운 대중교통 수단이다. 즉, 전용 주행로를 통하여 빠른 속도(80km/h)로 이동이 가능하면서 궤도를 벗어나면 일반버스와 같이 일반 도로도 운행할 수 있는 새로운 개념의 교통수단이다. 전용주행선로 운행시 다른 차량의 교통방해를 받지 않고 일반버스에 비해 차량의 크기를 확장할 수 있기 때문에 보다 많은 인원을 수송할 수 있다. 또한, 바이모달트램 전용차량은 기본적으로 자기유도방식(magnetic guide system)의 궤도를 적용하여 통합 운행정보시스템에 의한 실시간 운행제어가 가능하다. 마그네틱 바가 설치된 전용선로 위에서 운전자의 조정없이 자동으로 운행되기 때문에 난폭운전이나

사고 가능성이 없고 전용선로는 도심부를 관통하는 지역이나 차량정체가 심한 구간에만 설치가 가능하

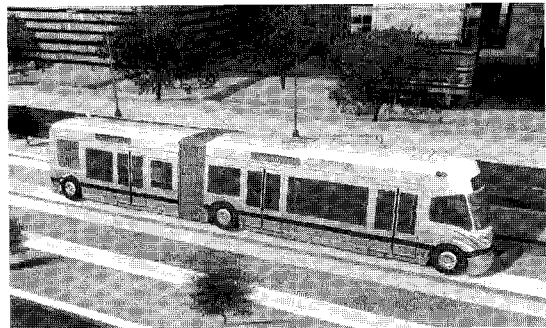


그림 1. 바이모달트램 전용차량 내·외부 전경

기 때문에 매우 효율적이다.

지하철은 많은 사람을 한 번에 이동시키는 장점이 있지만 노선선정과 공사기간을 합쳐 10년 가량 소요되는 단점이 있다. 또한 공사기간 중에 일반도로에 상당한 교통혼잡이 발생하는 부작용이 있다. 바이모달트램은 경전철에 비해 비용이 40%에 불과하고 공사기간도 크게 단축할 수 있다. 동력원은 수소연료전지나 CNG(압축천연가스) 하이브리드를 이용하기 때문에 환경오염 저감 및 에너지 절감효과가 있으며, 트램 차체 높이가 낮은 초저상 차량으로 계단이 없이 수평승차가 가능하다. 따라서 어린이나 노약자가 쉽게 탑승할 수 있으며, 유모차나 휠체어도 쉽게 탑승할 수 있다. 또한, 차체가 낮은 저상차량으로써 트램 안에서의 움직임이 자유롭고 커브에 의한 기울임이 적은 장점이 있다. 본 기사에서는 한국형 녹색 신호통 시스템 바이모달트램 차량에 적용되는 신형식의 친환경성 선로형 전용포장 형식을 소개하고 최적의 공용성 및 기능성을 갖춘 포장을 적용할 수 있도록 방향을 제시하고자 한다.

표 1. 대중교통 수송 수단별 비교

구 분	바이모달트램	경 전 철	지 하 철
수송용량	0.5~2.0만명/hr	1.5~4.0만명/hr	4.0~10.0만명/hr
건 설 비	100~300억원/km	500~800억원/km	1,200억원/km

2. 주행 전용선로 포장형식 개발

기존 도시의 내부 및 외곽도로와 국도의 도로포장 형식은 거의 아스팔트 포장이고 기존 고속도로의 포장형식은 콘크리트 포장이 주로 적용되고 있다. 도심지에서 도로포장은 운전자 피로감 증대, 뜨거운 지열 또는 복사열에 의한 열섬현상, 차량소음 및 도시미관 저해 등이 현대의 도시교통환경 부문에서 사회문제로 대두되고 있다. 대도시에서 열섬현상이 일어나는 가장 큰 원인은 1차적으로 콘크리트와 아스팔트 구조물로 뒤덮여있는 도시여건이며, 2차적으로 공장,

주택, 자동차들에서 발생하는 많은 열량 때문이다. 이를 해결하기 위한 가장 확실한 방법은 녹지 확충과 도심지내에서 발생하는 열량을 감소시키는 것이다.

기존 도로의 경우에 일반차량들은 주행 편심오차가 일정하지 않고 차선변경이 자유로워 식재와 포장을 결합하는 것이 불가능하지만 바이모달트램 전용 차량주행 전용선로의 특성상 획기적인 접근이 가능하다. 바이모달트램 차량 주행선로는 규격화된 전용선로로 운행하기 때문에 기존 포장형식에 녹지공간을 조성할 수 있어 열섬현상을 완화시킬 수 있다. 도로포장에서 도로의 요구조건을 만족시키면서 회색조의 포장표면을 줄이는 방법은 아래 그림과 같이 도로의 차로에서 주행 편심오차를 확보하는 폭내의 바퀴가 접하는 면을 도로의 노면으로 남기고 나머지 부분에 잔디식재(천연잔디, 인조잔디 등)의 환경을 개선하는 재료를 설치하는 것이다.

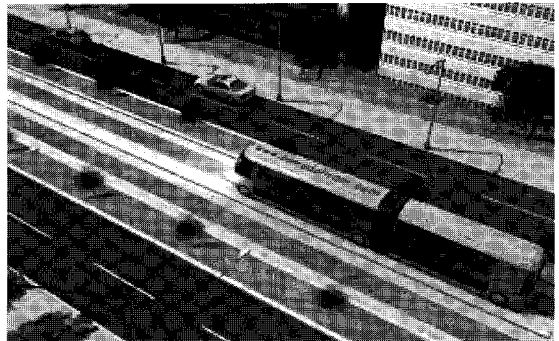


그림 2. 바이모달트램 주행 전용선로 전경

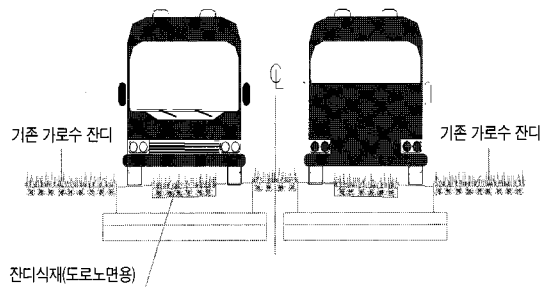


그림 3. 바이모달 포장 단면도

3. 친환경성 선로형 전용포장의 특징

포장에 녹지공간을 조성하기 위해서는 다각적 측면에서 고려되어야 할 사항이 있다. 크게 내구성, 식재의 생존성, 기후에 대한 적응성으로 구분되며, 다음과 같다.

바이모달트램 전용차량의 특성은 주행시 바퀴가 도로 포장면 또는 선로면의 일정한 부분에만 접하는 것이다. 즉 윈더링 현상이 전혀 발생하지 않는다. 따라서, 바퀴가 접하는 포장면에만 하중이 집중되므로 가요성의 특성을 갖는 아스팔트 포장은 소성변형 및 전단변형이 발생하므로 적용하기 어려우나 강성포장인 콘크리트 포장은 선로차량의 집중하중에도 변형 없이 포장면을 유지할 수 있다. 이에 따라 선로차량의 포장형식은 콘크리트 포장으로 구성하는 것이 바람직하다.

현재 차량의 주행 편심오차는 레일유도형식 "0", 광학유도형식 "30cm 내외", 전자기유도형식 "30cm 내외"이다. 따라서 선로노면에 노출된 포장면의 폭은 30cm에서 80cm까지 확보가 가능하며, 바퀴가 접하는 포장면을 제외하고 잔디를 식재하므로 잔디의 식생이 가능하도록 단차(바퀴가 접하는 포장면과 잔디가 식재되는 포장면 사이의 단차)를 두어 표토를 깔고 수분이 공급될 수 있도록 하여야 한다. 일반적으로 콘크리트 등에 의해 고립된 곳(수분공급이 있어야 식생가능)에서 잔디의 식생이 가능한 표토 최소높이는 15cm 이상이므로 기본적으로는 선로형식 포장의 바퀴가 접하는 포장면과 잔디가 식재되는 포장면 사이의 단차는 15cm 이상으로 하여야 한다. 최근 개발된 잔디종을 적용하는 경우는 단차를 5cm 이하로 설정할 수 있기 때문에 각 잔디 종류에 대한 검토가 필요하다. 또한, 수분이 공급될 수 있도록 수분공급장치를 잔디식재 포장면에 설치하거나 부직포로 감싼 유공관을 설치하여 하면(노상, 노체)의 수분이 잔디식재에 공급되도록 하여야 한다. 자연 수분 공급홀은 포장체의 구조적 안전성을 확보하도록 일정 간격을 두고 설

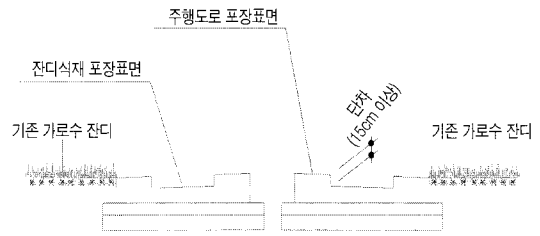


그림 4. 친환경성 선로형 전용포장의 구조

치하는 것이 바람직하다.

중간 잔디부분에 대하여 제설 및 강우와 같은 상황에서 배수가 원활하게 이루어져야 한다. 일반적으로 침투한 우수가 선로의 횡단경사를 통해 선로 측면의 측구 또는 배수구로 배출되는 형식을 갖는다. L형 측구, U형 측구 등을 적용하며 배수를 위한 별도의 공간을 시공하기 어려운 경우는 배수구를 설치하여 우수를 처리하는 방법도 적용되고 있다. 본 포장단면의 경우 중간에 잔디부분이 포함되기 때문에 차별화된 배수시스템이 필요하며, 다양한 배수구 형식에 대한 분석이나 중간층인 CTB(cement treated base) 층의 투수성을 강화하는 등 여러 가지 대안검토가 필요하다. 또한, 중간 잔디부분과 콘크리트 접합부에 방수재 검토 등도 고려하여야 한다. 이는 중간 잔디부분 수분이 콘크리트 슬래브 표면으로 침투되는 것을 방지하기 위함이다. 장기간 미세균열로 수분침투균열이 진전될 가능성이 있으며, 균열폭이 일정 이상 확대될 경우 조인트부나 슬래브 내부에 잔디 뿌리까지 침투할 수 있어 이와 같은 경우 공용성과의 상관관계에 대한 검증이 필요하다.

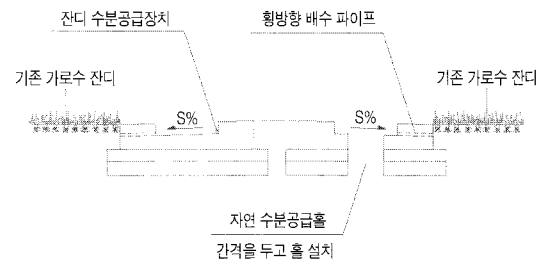


그림 5. 친환경성 선로형 전용포장의 배수구조

다음 그림 6은 현재까지 진행된 바이모달트램 전용차량의 기본제원(안)이다. 바이모달트램 전용차량의 하중은 축당 62~103kN(6.3~10.5ton)이며, 총하중은 250~367kN(25.5~37.4ton) 수준으로 현행 과적기준과 유사하다. 승객정원 150%일 경우 축당 중량을 등가단축하중계수 산정식에 대입하여 바이모달 차량의 등가단축하중계수(ESALF) 산출결과 4.885로 나타났으며, 이는 트럭트레일러(5A이하) 수준에 해당하는 것으로 일반차량에 비해 매우 높은 수준이다. 바이모달 차량은 5:00~24:00까지 2분 간격으로 운행되어 일일 570 회 운행하는 것을 목표로 하고 있다. AASHTO 포장 설계법에 의해 개략적으로 포장 두께를 산출한 결과 20년 교통량의 경우 슬래브두께는 약 26cm 이상이 소요되는 것으로 나타났으나 포장구조의 특이성과 우회도로가 없는 특성을 고려하면 이보다 슬래브두께를 강화하여야 한다. 따라서 차량하중과 횡수를 고려하면 콘크리트 슬래브는 고속도로 무근 콘크리트(JCP) 포장과 동일한 수준인 최소 30cm 이상 두께를 적용하는 것이 적절하며, 30cm 이하로 될 경우는 구조상의 문제가 발생할 가능성이 높다. 바이모달트램 특성상 전용선로가 유지보수에 의해 차단

되는 경우는 정시성에 큰 영향을 미치기 때문에 대규모 유지보수 없이 20년 이상 공용 가능할 수 있도록 포장단면 및 설계기준을 제시하여야 한다. 여기서, 포장의 구조상 횡방향 타이바는 반드시 설치할 필요성이 없으나, 종방향 다웰바는 기존과 동일하게 설치해야 한다.

콘크리트 슬래브 상에서 상대적으로 취약한 부분에 교통하중이 집중될 경우 우각부 균열이나 스폐링 등의 파손이 발생할 가능성이 크다. 특히 슬래브 상부의 표면온도(또는 습도)가 높은 상태에서는 슬래브 중앙부가 볼록하게 들뜨는 컬링현상(positive curling)이나 반대로 표면온도(또는 습도)가 낮은 상태에서는 슬래브가 오목하게 가장자리가 들뜨는 컬링현상(negative curling) 발생시 모서리부에 양방향(종방향, 횡방향)응력이 집중되기 때문에 파손 가능성이 높아진다. 스폐링에 대한 파손 메커니즘도 줄눈부에 실링제의 파손이나 펌핑 등에 의해 줄눈부에 비압축성 물질이 침투하게 되고 온도변화에 따라 슬래브 팽창·수축을 유발하여 축방향으로 응력을 발생시킨다. 이때 비압축성 물질이 줄눈 및 모서리쪽의 팽창을 방해하게 되고 모서리부 콘크리트 탈리가 발생한다. 특히 본 포장단면의 경우 중간 식재부분이

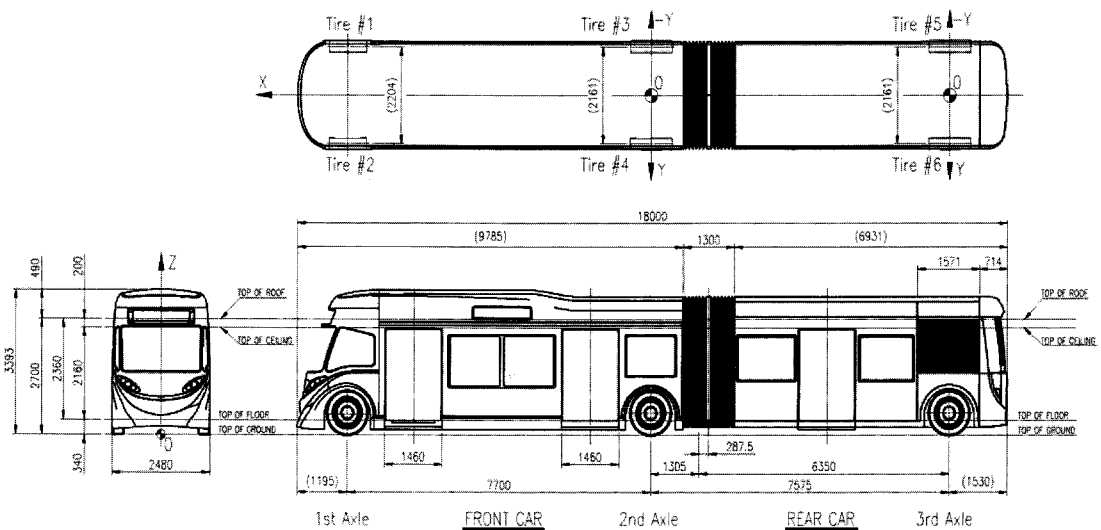


그림 6. 바이모달트램 전용차량의 기본제원(안)

변단면 구조를 갖기 때문에 컬링발생이나 취약단면에서 균열이 발생할 가능성이 높다. 또한 교차로 등 평면선형조건에 따른 단면취약부에서도 일정 이상의 내구성을 보장하여야 한다. 따라서, 단차를 결정함에 있어 다양한 검증이 필요하다. 이는 3차원 수치 해석과 포장가속시험에 의한 분석결과로 검증할 수 있다. 3차원 수치해석에서 나타난 응력과 변형률을 기존에 개발된 피로모델에 적용하고 20년간 바이모달 차량의 교통하중과 비교함으로써 구조적 한계를 파악하여야 한다. 실제 적용되기 전 다양한 시험을 통해 포장단면을 검증하여야 한다. 포장가속시험기는 새로운 설계기법, 공법, 재료 등을 개발하기 위한 이론적인 검토와 함께 실제 현장에 적용하기 전에 공용성을 파악하기 위해 수행하며, 여러 가지 변수의 제어가 가능한 실내에서 시험체를 제작하고 특정 하중이 트럭을 주행함으로써 실시되는 시험이다. 짧은 기간 내에 검증하기 위하여 필수적으로 요구되는 장비로 국내 극히 일부 기관에서만 구비하고 있다. 포장가속시험은 실외시험 시공시 발생할 수 있는 문제점을 사전에 파악할 수 있기 때문에 많은 시간과 비용을 절약하는 장점이 있어 바이모달트램 전용선로 포장의 검증에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 토압계, 변형률계, 균열계 등 각 포장층별로 다양한 계측기를 매설함으로써 다양한 거동과 특정 포장단면과의 상관관계를 정립하여 피로파손이나 모서리부 균열발생을 최소화할 수 있는 최적의 설계를 도모하여야 한다. 토압계는 포장체에 발생하는 수직압을 파악하며, 균열계 및 변형률계는 슬래브자체의 수축팽창으로 인해 발생하는 거동과 교통하중에 대한 슬래브 횡방향 거동 등을 파악할 수 있어 각 부분별 파손 가능성을 정량화할 수 있다.

중간부 식재의 경우 제설작업과의 연관성을 면밀히 검토하여야 한다. 국내에서 적용중인 제설방식은 적설량 3cm 이상일 경우 제설 삽날이 장착된 장비로 밀어내기 작업 후 제설체를 살포하는 방식이다. 이 경우 중간부 식재가 손상을 받을 가능성이 매우 높기 때문에 다양한 검토가 필요하다. 제설장비 적용시 식

재구간, 포장단차, 연결 이음새부분에서 부분파손 방식에 주안점을 두고 적용성을 검토하며 식재의 높이와 지면에서 제설 삽날에 대한 높이 차, 제설체에 대한 식재의 영향 및 생존가능성을 파악하여 식재를 보전할 수 있는 방법을 고려하여야 한다. 다양한 검토 결과 식재에 대한 손상이 필연적이라면 차선택으로 기후적 특성을 고려하여 강설량이 많은 구간은 인조잔디로 대체하는 방안이 적절하다.

4. 결론

바이모달트램의 전용선로 포장은 현재 아스팔트 및 콘크리트 포장이 가지고 있는 운전자 피로감 감소, 지열 또는 복사열 최소화를 통한 도심내부 온도 하강, 소음 등 도시교통환경의 문제점을 개선할 수 있다. 그러나, 실제 적용된 사례가 없기 때문에 구조적 안전성, 기후에 대한 안전성 등이 검증되어야 한다. 이는 선로와 환경을 복합한 새로운 분야로 본 기술이 최근 환경친화적 건설요구와 연계되면 큰 사회적 파급효과를 거둘 수 있을 것으로 기대되며, 기존 포장에 비해 도시미관 측면에서 매우 우수하기 때문에 사회적 측면에서 큰 호응을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김연복 외, 한국형 포장설계법 개발 및 포장성능 개선 방안 연구, 건설교통부, 2003
2. 김지원 외, 시험도로의 건설과 운영에 관한 연구, 연구보고서, 한국도로공사, 도로교통기술원, 2002
3. Casey, Robert F., and John Collura. Advanced Public Transportation Systems: Evaluation Guidelines, FTA-MA-0007-94-2, DOT-VNTSC-FTA-93-9. Washington, DC: Federal Transit Administration, January 1994.
4. Kain, John F., with Ross Gittell, Amrita

- Daniere, Sanjay Daniel, Tsur Somerville, and Liu Zhi. Increasing the Productivity of the Nation's Urban Transportation Infrastructure. Graduate School of Design, Harvard University, Cambridge, Massachusetts. January 1992.
5. Maekawa K, An X. Shear Failure and Ductility of RC Columns after Yielding of Main Reinforcement. In: Engineering fracture mechanics, vol. 65. New York: Pergamon, 2000.
 6. NCHRP, Guide for Mechanistic-Empirical Design, 2004
 7. Transit Cooperative Research Program, Transportation Research Board. Transit and Urban Form. Washington, D.C.: National Academy Press. 1996

토목 상식

수(數) 이야기

흔히 승률을 따지는 운동경기 특히 야구경기에서 팀 승률이나 타자의 타율을 말할 때 'A선수가 오늘 경기에서 안타 3개를 보태 통산 3할 7푼 5리의 타율이면 금 시즌 타격왕에 오른다' 라고 할때 여기서 타율을 측정하는 할(割), 푼(分), 리(里), 모(毛)의 단위가 자주 듣는 낯설지 않은 수이다. 매년 연초가 되면 신문지상에 자주 오르내리는 정부 예산이나 프로 선수의 연봉 등을 이야기 할 때 억(億)이나 조(兆)라는 단위의 숫자가 자주 등장하는 것을 볼수 있다.

하지만 다음 단위인 경(京)은 자주 대하기 어렵고 그 이상은 또 어떻게 읽고 어떻게 사용되며 어떠한 수가 있을까. 궁금할 것이다. 해(咳)·차(穰)·구(溝)·정(正)·재(載)·극(極)이 그 이상을 나타내는 단위로 한 단계마다 1만배(萬倍)가 된다. 즉 해는 경의 1만배, 숫자로 표시하면 10이 나 된다. 그러나 불교에서는 극 이상도 안하사(恒河沙), 아승기(阿僧祇), 나유타(那由他), 불가사의(不可思議), 무량수(無量數)로 나타낸다. 항하사는 무한(無限)·무수(無數)한 이란 뜻이며 만항하사(萬恒河沙)라고도 한다. 아승기는 범어(梵語) Asamkhyā에서 유래된 말이며 나유타를 거쳐 불가사의로 이어진다. 보통 생각으로는 짐작할 수도 추측할 수도 없는 것을 "불가사의하다"라고 하며 숫자의 단위가 아닌 개념적인 뜻으로 쓰이고

있다. 또한 헤아릴 수 없이 많은, 한도 끝도 없는 것을 무량수라고 하는데, 그럼 무량수와 반대되는 말은 무엇일까? 할, 푼, 리, 모, 사(絲), 홀(忽), 미(微), 섬(纖), 사(沙), 진(塵), 애(埃), 묘(渺), 막(漠)의 단위로 나타내며 각각의 간격은 1/10이 된다. 즉 푼은 1/100로 대개 말하는 퍼센트(%)와 같은 뜻이다. 막을 넘으면 불교용어로 모호(模糊), 준순(逡巡), 수유(須臾), 순식(瞬息), 탄지(彈指), 찰나(刹那), 육덕(六德), 허공(虛空), 청정(淸淨)까지 나아가는데 청정을 우리가 쓰는 숫자로 나타내면 10가 된다.

일상적으로 많이 사용하는 말 중의 하나인 '순식간'이나 '찰나'는 이같이 시간의 단위인 것이다. 수유는 잠시 잠깐, 순식은 눈 깜짝할 새, 숨 한번 쉴 사이라는 한문 그대로의 뜻이다. 찰나는 'Ksana'란 범어로 손가락 하나 뺏기는 시간을 말하는데 불교에서는 한 찰나에 구백생멸(九百生滅)이 있다고 한다. 허공은 모양과 빛이 없는 상태, 청정은 모든 번뇌(煩惱)나 허물로부터 벗어난 말 그대로 맑고 깨끗함을 말한다.

이렇듯 최대·최소의 단위는 보통의 인간으로서 감히 짐작할 수도 없는 지경이나 상태를 말한다. 이들은 정반대이면 서로 같은 맥락 즉, 숫자로는 헤아릴 수 없는 어떤 순수하고 맑은 것을 말하고 있다.