

## 고차원 초등각장론과 막 모형

● 글\_김성수·고등과학원 물리학부 연구원



초대칭(supersymmetry)이란 상호작용을 매개하는 보손(boson)과 물질을 이루는 페르미온(fermion)을 서로 바꾸는 대칭이다. (가까운 미래에 LHC 가속기에서 발견될 수도 있지 않을까 하는 기대를 해보지만, 현재까지는 가설적인 대칭이다.) 초대칭성을 가지는 끈을 초끈(superstring)이라 하는데, 끈의 종류에는 두가지가 있다. 닫힌 끈(closed string)과 열린 끈(open string). 닫힌 끈은 원과 같은 모양이지만, 열린 끈은 두개의 끝점을 가진다. 열린 끈의 두 끝점이 사는 공간을 D-막(D-brane)이라 하고, 이런 막의 도입은 초끈이론 발전에 중요한 역할을 했다.

끈이론은 중력 그리고 양자장론(quantum field theory)을 모두 포함한다. 예를 들자면, 닫힌 끈의 진동은 중력자(graviton)을, 열린 끈 진동은 게이지 보손(gauge boson)을 준다(각각의 초대칭 짝도 함께 기술한다). 물론 중력과 양자장론 모두 초끈을 고려하지 않고 생각할 수 있다. 하지만, 중력과 양자장론의 자명하지 않은 재미있는 현상들이, 초끈의 입장에서 볼 때 종종 자연스럽게 설명되곤 한다. 또한, 이들 이론에 나타나는 새로운 현상들이 초끈으로 부터 예견되기도 한다.

고차원 초등각장론 역시 초끈이론과 밀접한 관계를 가진다. 우선, 등각(等角)이란 각을 보존하는 변환에 대한 불변의 의미로 영어의 conformal을 번역한 것인데, 같은 한자문화권의 나라들인 중국과 일본에서는 이를 모양을 보존하는 확대/축소의 의미인 공형(共形)으로 번역하고 있다(초끈이론 역시 중국과 일본에서는 초현(超弦)이론으로 불린다). 다시 말하자면, conformal은 등각 혹은 공형으로 이해할 수 있다. 초대칭이론이 등각 대칭까지 가지는 이론이 초등각장론(superconformal theory)이다. 고차원 초등각장론은 5차원과 6차원에서만 가능하며, 초끈 혹은 M-이론(M-theory)과 깊은 관계를 가진다. 특히 5차원 양자장론의 경우, 아주 강한 상호작용을 할 때 초등각성을 가지게 되고, 그 초등각이 발현되는 정점(fixed point)에서 온곳 대칭(global symmetry)이 증대되는 현상이 나타난다는 흥미로운 추측이 초끈 이론을 부터 제기되었다[1]. 필자는 최근에 이러한 5차원 초등각이론의 온곳 대칭 증대(global symmetry enhancement)를 정량적으로 보이는 연구를 해왔고, 초등각지수(superconformal index) 라는 물리량을 통해 대칭 등대가 일어남을 구체적으로 보였다[2].

그런데 손에 잡히지도, 그려지지도 않는 고차원에서의 물리 현상은 어떻게 연구할까? 여러 방



법이 있겠으나, 그림 혹은 도형을 이용하면 더 쉽게 접근할 수 있다. 여분의 차원에 중점을 맞추면서 말이다. 그 대표적인 예가 타입 IIB 끈이론에 존재하는 막들, 특히 5-막 (5-brane)들이 상호작용하면서 만드는 막도형-(brane web diagram)이다. 숫자 '5'의 의미는 앞서 언급한 열린 끈의 끝점들이 사는(시간을 제외한) 공간이 5차원이라는 뜻이다. 따라서, 5-막위에 정의된 이론은 시간차원을 합하여 6차원 이론이 된다. 5-막들의 특성 중 하나는 전기적 혹은 자기적 전하를 가지고 있다는 것이다. 다른 전하를 가지는 두 개의 5막들을 생각해보자. 막들의 펼쳐진 공간중에 만약 이 두 5-막들이 4차원을 공유하고 있다면, 그 공유된 공간 위에서 정의된 이론은 이제 시공간이 5차원인 이론이 된다. 그리고, 공유되지 않은 각각의 1차원을 평면위에 배열한 도형이 5-막도형이다. 가장 간단한 도형은 [그림1]로 물질과 상호작용하지 않는 순수한 5차원 초대칭 SU(2) 게이지이론을 기술한다. 물질의 종류를 맛깔(flavor)이라 하는데, 맛깔을 가지는 5-막도형은 맛깔의 수가 많은 수록 더 복잡한 도형을 이룬다. 이러한 막도형을 이용하면 비섭동적인 물리현상과 온곳 대칭을 더 직관적으로 이해할 수 있다.

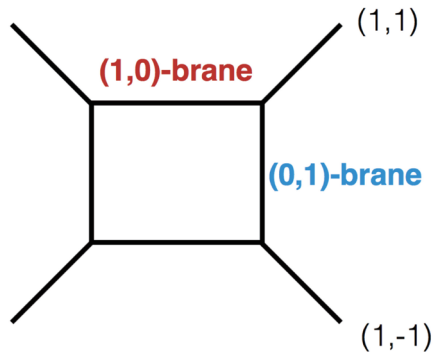


그림1: 가장 간단한 5-막도형. 빨간 색으로 표현된 전하가 (1,0)인 막은 D5막이고, 파란색으로 표현된 전하가 (0,1)인 막은 NS5막이다. 다른 전하를 가지는 막들은 D5와 NS5의 결속상태들이다. 이 5-막도형은 5차원 순수한 초대칭 SU(2) 양-밀즈 이론을 기술한다.

5-막도형은 또한 M-이론이 특정한 칼라비-야우 다양체(a Calabi-Yau threefold with a vanishing four-cycle)에 축소화(compactification)된 것으로 이해될 수 있다. 이런 해석으로부터 위상 끈 분배함수(topological string partition function)를 계산할 수 있고, 위상 끈 분배함수 역시 5차원 초등각이론의 온곳 대칭 증대를 잘 보여주고, 초등각지수의 결과와 일치한다.

최근 필자는 맛깔의 개수가 8인 경우에 막도형이 놀라운 모양을 만든다는 것을 발견했다[그림 2]. 이 경우에 막도형은 무한히 돌아가는 나선 모양을 이루고, 아울러 한번 돌아올 때 마다 일정한 거리(주기)를 가지고 떨어져 있는 모양이 된다. 생긴 모양이 마치 도교의 상징을 연상케하여 도(道)도형 (Tao diagram)이라 이름 지었다 [3]. 더욱 놀랍고 흥미로웠던 것은 이 Tao도형이 6차원에 정의된 E-끈(E-string)이 원 위에 축소되어 5차원에 기술될 때 나타나는 성질을 그대로 반영하고 있다는 것이다. 고차원 이론이 원 위에 축소될 때, 무한히 많은 KK상태들(Kaluza-Klein





states)이 나타난다. 축소된 E-끈의 경우, 이런 KK상태들과 원의 반지름은 Tao 도형에 나타나는 무한히 돌아가는 막들과 일정한 주기에 대응한다는 것을 발견했다. 정량적으로도 E-끈의 분배함수와 Tao 도형에서 얻은 위상끈분배함수가 같다는 것을 확인할 수 있었다.

이처럼 Tao 도형은 5차원과 6차원 연결하는 고리가 되어, 6차원 초등각이론에 대한 새로운 관점을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 더 나아가 필자는 Tao 도형이 M-이론을 더 깊게 이해할 수 있도록 도와주는 다른 한 방법이 될 것으로 믿고 있다. 필자는 고등과학원의 연구원들과 공동 연구를 통해 다른 게이지 대칭을 가지는 5차원 이론들 역시 맛깔의 개수가 임계값을 가질 때 Tao 도형을 이론 이론다는 것을 보였고, 이에 해당하는 6차원 초등각장론이 무엇인가를 찾고(search) 또 찾으며 연구(research) 중이다[4].

#### 참고문헌

- [1] N. Seiberg, "Five-dimensional SUSY field theories, nontrivial fixed points and string dynamics," arXiv:hep-th/9608111.
- [2] H.-C. Kim, S.-S. Kim, and K. Lee, "5-dim Superconformal Index with Enhanced En Global Symmetry," arXiv:1206.6781.
- [3] S.-S. Kim, M. Taki, and F. Yagi, "Tao Probing the End of the World," arXiv:1504.03672.
- [4] H. Hayashi, S.-S. Kim, K. Lee, M. Taki and F. Yagi, "A new 5d description of 6d D-type minimal conformal matter," arXiv:1505.04439.

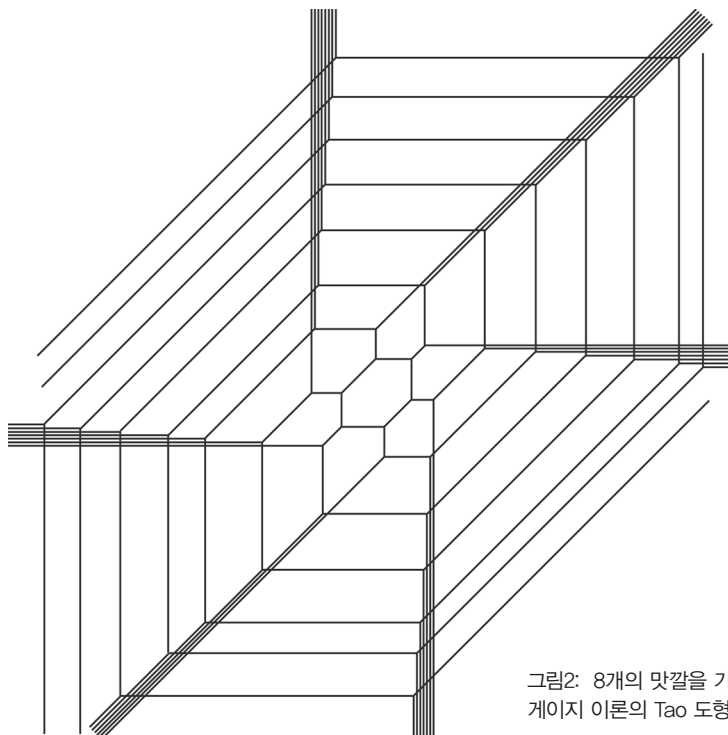


그림2: 8개의 맛깔을 가지는 5차원 SU(2) 게이지 이론의 Tao 도형.

