

# 디지털 디자인 핵심기술

2010 - 03호

DNA Computer

# DNA Computer

## 1. 배경

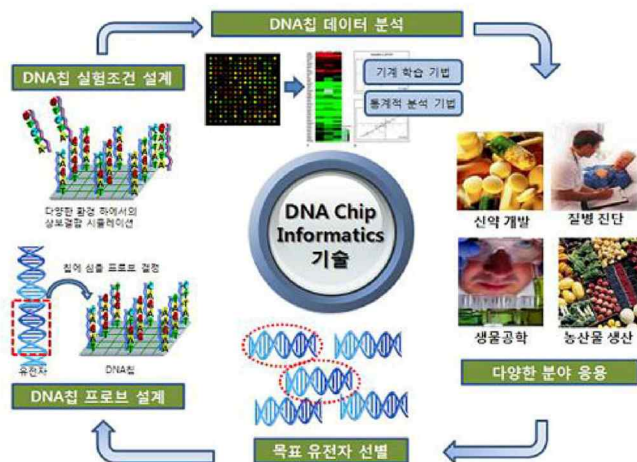
1970년대 들어 개발된 DNA 재조합 기술에 의하여 맞이하게 되었다. 이 기술로 인하여 생명의 정보를 담고 있는 DNA를 인간이 원하는 대로 변화시킬 수 있게 되었다. 많은 분야에 응용되고 있으며, 가장 먼저 산업화된 분야가 의약품 분야로서 DNA 재조합 기술의 이용하여 생산된 많은 종류의 의약품들이 이미 시장에서 판매되고 있다. 바이오테크놀로지는 최근에 수행된 인간 게놈 프로젝트(human genome project)를 계기로 하여 또 다른 전기를 맞이하고 있다. 현재까지 DNA를 다루는 매우 다양한 분자생물학적 실험 기법들이 개발되어, 여러 분야에서 유용하게 이용되고 있으며 새로운 분야가 속속 등장하고 있다. 그 중의 하나가 'DNA 컴퓨팅'이다. 현재 DNA 컴퓨팅 기술을 기반으로 한 최초의 DNA 컴퓨터라고 할 수 있는 프로토 타입이 일본의 올림푸사에서 개발되어 공개되었다. 이는 기존의 DNA chip 기술에 기반 하여 질병을 진단하는 논리 연산의 기능을 추가하여 자동화 시킨 것이다.<sup>01</sup>

### DNA 칩(DNA chip)

DNA 칩은 새로운 개념이 아니라 기존의 필터 또는 나이론 membrane 대신에 손톱만한 크기의 작은 유리 또는 반도체 등의 기반 위에 세포내의 기능이 밝혀진 수백 개의 DNA를 작은 공간에 단일 나선의 형태로 고정시켜 놓은 DNA검출용 소자로 동시에 많은 수의 유전자 발현 양상을 탐색할 수 있게 하여 유전자의 발현 해석, 유전자 진단, 유전자 돌연변이, 의약품의 스크린 및 질환 진단용 등에 널리 응용될 수 있는 새로운 차원의 분석 시스템이라고 할 수가 있다.

DNA칩은 1990년대에 전 세계가 함께 참여하여 시작했던 분자생물학계 사상 최대 규모의 사업인 인간 게놈 프로젝트에서는 30억 개의 염기조합으로 이루어진 이들의 전체 유전정보를 해독하여 대부분 완성한 것이다. 하지만 3만 개에 이르는 유전자에 대해서는 그 유전자가 어떤 역할을 하는지 완전히 밝혀지지 않았으며, 이는 다른 종에서 유사한 서열을 가진 DNA와의 혼성화 반응(hybridization)을 통하여 점차 밝혀지고 있다. DNA 칩은 이러한 혼성화 반응을 한꺼번에 많은 양을 할 수 있게 고안된 장치이다.<sup>02</sup>

DNA Chip 정보학 기술 전개도 (바이오지능 기술의 변화)



## ① DNA칩 개요

- 현재 DNA칩은 DNA를 칩위에 고정하여 DNA 발현패턴을 분석하는 것으로 사용되고 있으나, 초기에 상상했던 DNA 칩은 전자장비에 들어가는 칩이었음.
- 이렇게 상상하던 DNA칩의 한 형태인 저장장치 형태의 DNA칩이 개발되고 있으나, 아직까지는 해결해야 할 문제점이 많은 상태임.
- 1994년 Leonard Adleman 교수는 'Science'지에 '분자컴퓨팅을 이용한 조합문제 해결'이라는 논문을 게재하면서, DNA를 연산을 수행할 수 있는 칩으로 개발할 수 있다는 가능성을 보여주었음.
- 그 후, 2001년 와이즈만 연구소(Weizmann Institute)가 DNA가닥을 칩에 고정하여 계산기처럼 작동하도록 만들었다는 성과를 보였으나, 아직까지 연산을 위한 알고리즘이나 DNA칩을 구동할 수 있는 시스템 개발 문제 등 원론적인 문제가 해결되지 않은 상태임.
- 또한, DNA를 저장장치로서 개발하는 연구들도 지속적으로 발전하고 있으나, 아직까지는 여러 문제점을 가지고 있음.
- 하지만, DNA칩이 연산장치로 개발될 가능성보다는 유전정보의 저장장치로서의 DNA는 데이터저장을 위한 저장장치로서 개발이 훨씬 가능성이 있다고 할 수 있음.

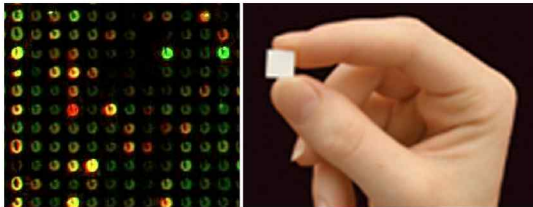
## ② DNA칩 사례

- 2003년 북서태평양 국립연구소는 인공 DNA서열로 동요가사를 암호화하여 박테리아 DNA에 부착함으로써, 박테리아가 지속적으로 복제할 수 있는 저장형태로 선보임.
- 2007년 일본 게이오 대학은 바이러스 균을 이용하여 "e=mc<sup>2</sup>1905"를 DNA로 암호화하는 특허를 출원하였음.
- 미국 캘리포니아 리버사이드 대학은 고가의 sequencing 기계없이 DNA에 디지털 정보를 코딩화 하는 방법을 개발하는 성과를 발표하였음.

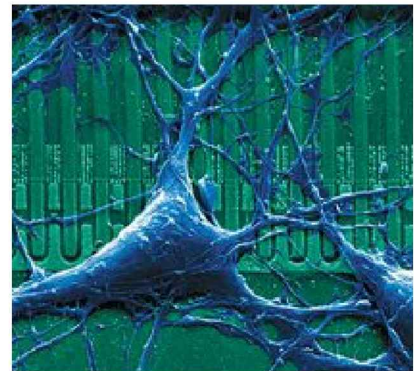
## ③ DNA칩 향후 전망

- DNA는 원래가 생물체의 유전정보를 저장하는 역할을 하는 것으로 대용량 데이터의 저장측면에서 가능성을 가지고 있음.
- 하지만, 판독이 어려우며, 지금의 컴퓨터와 연계할 수 있는지가 미지수이고, DNA의 돌연변이 가능성이 있어서 장기간 저장에는 한계가 있다는 지적을 받고 있음.
- 우선은 저장에 관련한 연구개발이 있겠지만, 컴퓨터와의 연계할 수 있는 가능성만 보인다면 빠르게 산업화로 진행될 수 있다는 점에 이 분야의 연구개발 트렌드를 주목할 필요가 있음.<sup>03</sup>

생명체의 가장 기본적인 구조인 DNA(Deoxyribonucleic Acid) 구조를 이용한 컴퓨터 칩의 아이디어가 제기되었고 2003년 3월 4일에 DNA컴퓨터가 최초로 개발되었다고 미 국립과학원 회보(PNAS)에 발표되었다. 1994년 미국의 레오나르도아들만 교수에 의해 이 새로운 개념이 제기 된지 거의 10년 만에 첫 결실을 맺은 것이다.<sup>04</sup>



DNA 칩의 예 (컴퓨터와 미래사회)



신경세포의 신호를 읽는 DNA 칩의 예 (나노바이오 융합기술)

3. 수천 년 지속될 수 있는 DNA 저장장치, NDSL 동양분석  
4. 네이버 백과사전



## 2. 개요

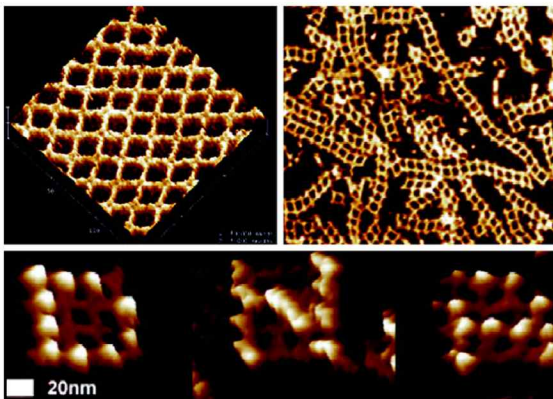
### DNA 컴퓨터

전통적으로 쓰여 왔던 실리콘 기반의 컴퓨터 기술을 사용하지 않고, DNA, 생화학, 분자생물학을 사용하는 컴퓨터 처리의 한 형태이다. 컴퓨터의 주기억장치(CPU)와 메모리를 DNA로 만든다는 뜻이다. 현재 우리가 쓰고 있는 실리콘반도체 컴퓨터는 전기가 이어지고(1) 끊어지는(0) 두 가지 신호로 구성되어 있다. 그러나 DNA컴퓨터는 네 가지 신호(A, T, C, G)로 구성되기 때문에 한꺼번에 많은 용량을 가질 수 있다.

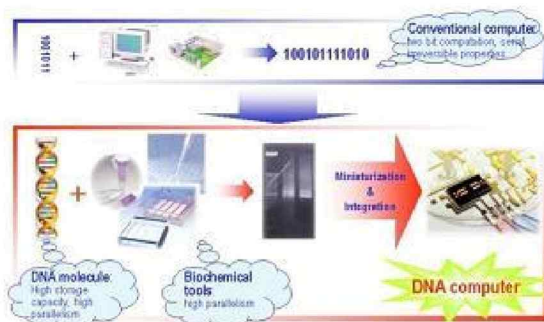
또 DNA는 여러 가지 반응이 한꺼번에 일어날 수 있는 특성을 가지고 있다. 기존 컴퓨터는 연산이 순차적으로 일어날 수밖에 없지만 DNA 컴퓨터는 여러 가지 연산을 한꺼번에 수행 할 수 있다는 이점이 있다. 처음 DNA컴퓨터를 고안한 사람은 미국 에드먼 교수이다. 그는 1994년 사이언스 저널에 '여행하는 판매원' 으로 알려진 수학문제를 DNA가 어떻게 풀어낼 수 있는지 발표해 주목을 받았다. 7개의 도시를 같은 길을 건너지 않고 가장 빠른 시간 안에 통과하는 방식에 대한 해법을 내놓았는데 DNA컴퓨터는 기존 컴퓨터에 비해 엄청나게 짧은 시간 안에 이 문제를 해결할 수 있었다. 에드먼 교수의 이론이 학계에 반향을 불러일으키면서 DNA컴퓨터에 대한 본격적인 개발이 시작됐다.

1997년 미 로체스터대학 연구팀은 DNA로 구성된 논리 회로를 만들었다. 논리연산을 수행하기 위해 DNA논리 회로들은 DNA 코드에 의존한다. 입력된 정보를 유전학적 회로로 인식해 특정 부위는 연결하고 특정 부위는 연결하지 않는 특이성을 보이며 DNA마이크로칩의 초석이 될 것으로 기대 됐다. 또 미 위스콘신대 화학과 스미스 교수는 2000년 DNA 가닥들이 특수한 방법으로만 서로 결합한다는 점을 이용해 DNA컴퓨터를 만들었다. '문제가닥' 을 짚을 가닥에 노출시킨 뒤 서로 맞물리게 하는 과정을 지속적으로 되풀이하자 컴퓨터의 용량이 훨씬 커지는 DNA컴퓨터 개발이 가능해졌다.<sup>05</sup>

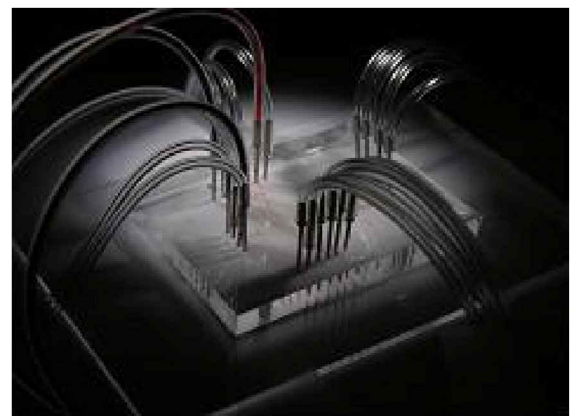
그리하여 현재의 100 나노미터에 해당하는 전선을 2 나노미터 두께로 제작이 가능 해졌으며, 기존의 컴퓨터보다 연산능력을 10의 몇 제곱까지 향상시킬 수 있으며 1리터 물에 용해되어 있는 6그램의 DNA(200bp) 에는  $3 \times 10^8$  ' 바이트의 정보도 저장 가능하게 되었다. 또한 인간유전체 30억 염기쌍은 초당 160만 bp 속도로 복제되는 속도를 이용, 결합률은 거의 0에 가까우며 DNA의 4염기 증가시키거나 변형시킬 경우 상상을 초월하는 연산능력을 부여할 수 있게 되었다.



자기조립 성질을 이용해 만든 DNA 구조물 (hani.co.kr)



상용 컴퓨터에서 DNA 컴퓨터로의 발전 (세포 및 미생물 공학 연구실)



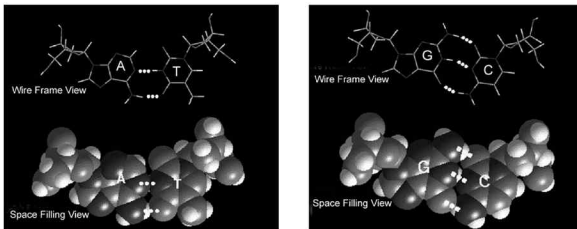
바이오칩 과 DNA 컴퓨팅 (세포 및 미생물 공학 연구실)

## DNA 컴퓨터의 원리

실제 생체 분자인 DNA나 RNA를 응용한 기술로, 화학적으로 합성된 DNA를 계산의 수단 및 정보 저장의 매체로 사용한다. DNA는 당(deoxyribose)과 인산(phosphate)이 번갈아 가면서 연결된 방향을 갖는 긴 사슬 두 개와 이 사슬이네 가지 종류의 염기(base)를 사이에 두고 나선처럼 꼬여 있는 이중 나선 구조(double helix strand)로 이루어져 있다. 네 가지 염기의 구성은 A(Adenine), T(Thymine), C(Cytosine), G(Guanine)로 이루어져 있으며, 아래 그림은 DNA의 결합 구조와 각 염기를 보여준다. 이들 염기는 대용량 데이터를 저장할 수 있는 메모리 기능을 가지고 있으며, A는 T, G는 C와 상호 보완적인 Watson-Crick 결합을 하고 있다. 그리고 복잡한 염기 조합의 패턴은 하나의 유전 정보를 담고 있으며, 인체 내에서 자연 발생하는 효소에 의해 읽혀지고 있다. 효소는 생물학 실험 방법들과 함께 DNA 컴퓨팅의 연산자로 사용되고 있다. DNA 컴퓨팅은 기존의 실리콘 기술과는 대조적인 여러 가지 특징을 갖는다.

- DNA는 10억 tera-bits(10<sup>12</sup>)의 정보저장 능력으로 방대한 양의 정보를 저장 할 수 있다.
- DNA 컴퓨터는 보통 초당 1014번 이상의 계산이 가능하므로 초 병렬적인 정보처리 능력을 갖는다.
- DNA의 막대한 병렬성을 이용해서 문제의 탐색 공간을 전부 탐색하는 방법으로 일반적인 알고리즘에서 풀지 못하는 문제를 해결할 수 있다.

다음 표에서는 DNA 컴퓨터와 기존 컴퓨터의 특성을 비교 하였다.<sup>06</sup>



(A) A와T 간의 수소 결합  
(B) G와C 간의 수소 결합 염기들 간의 수소 결합  
(세포 및 미생물 공학 연구실)

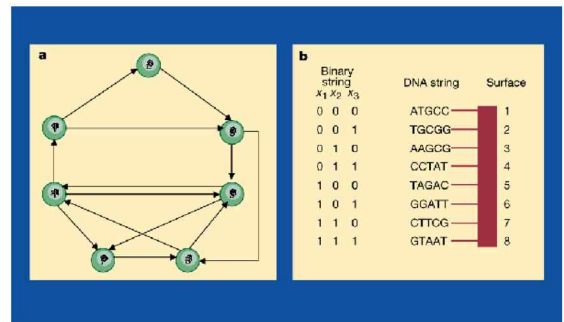
	DNA 컴퓨터	기존 컴퓨터
처리 방법	발리스틱 (Ballistic) <sup>07</sup>	하드와이어 (Hardeired) <sup>08</sup>
사용 매체	액체 또는 가스 (Liquid(wet) or Gaseous(dry))	고체 (Solid(dry))
신호전달 방법	3차원 충돌 방법 (3D collision)	2차원 스위치 방법
회로의 구성	비동기적 (Amorphous (asynchronous))	동기적 (Fixed (synchronous))
병렬성	초 병렬적 (Massively parallel)	순차적 (Sequential)
속도	Fast (millisecc)	Ultra - fast (nanosec)
신뢰도	Low	High
직접도	Ultrahigh	Very high
재생산성	확률적 (Probabilistic)	결정론적 (Deterministic)

DNA 컴퓨터와 기존 컴퓨터의 특성 비교

## DNA 컴퓨팅 기술

모든 NP 문제는 많은 수의 논리적 조건들을 동시에 만족하는 해를 찾는 것으로 고려할 수 있다. 각 논리 조건은 3개의 변수(참 또는 거짓의 값을 가짐)들로 구성되고 이 변수들은 'OR'의 논리관계로 연결된다. 예를 들면, [X1OR X2OR (NOT X3)] AND [(NOT X4) OR X5 OR (NOT X6)] 등이다. 3-SAT로 알려진 이 문제는 모든 NP 문제 중에서도 가장 어려운 것이다. Wisconsin대 Smith 교수 연구팀은 3-SAT의 간단한 경우에 대하여 DNA 컴퓨팅 기법의 병렬적 특성을 이용한 방법으로 적절한 시간 내에 해를 구하는 데에 성공한 것이다. 연구팀은 3-SAT 식의 변수들을 이진수의 서열로 표현하였다. 이러한 이진수 서열은 DNA한 가닥이 지닌 특유의 핵산 서열로 볼 수 있다. 예를 들면, TGCGG는 001을 의미한다. n개의 변수가 있다면 2n개의 해답(또는 Watson) 가닥이 존재하므로, 세 개의 변수를 표기하기 위해서는 여덟 개의 Watson 가닥이 필요하다. 각 Watson 가닥에 대해 해당 짝(A는 T와 C는 G와 짝을 지음)을 갖는 Crick 가닥도 존재한다. 특정 3-SAT 식(아래 그림 b 참조)의 모든 논리조건들을 만족하는 여덟 개 Watson 가닥에 해당하는 Crick 가닥을 알아내는 것이 목표이다

연구팀은 우선 가능한 해의 후보들인 Watson DNA 서열들을 금 표면에 부착하였다. 다음으로, 첫 번째 논리조건에 해당하는 Watson 서열과 짝 지을 수 있는 가능한 모든 Crick 가닥들을 투입하였다. 이러면 이중나선 DNA가 형성된다. 짝을 형성치 못한 DNA 가닥들은 첫 번째 조건을 만족하지 못하는 것들이므로 효소에 파괴한다. 그리고 나서 표면을 가열하여 짝 가닥을 용해시켜 떼어내어 새로운 Crick 가닥 라이브러리를 만들고 두 번째 조건에 해당하는 서열과 짝을 이루도록 한다. 이 과정을 나머지 조건들에 대하여 반복하면, 궁극적으로 모든 논리조건을 순차적으로 만족하는 가닥들만 남게 된다. 이 시스템에서 DNA '해답들'은 질서정연하게 표면에 배열되기보다는 불규칙적으로 부착되므로 답을 판독하기 위해서 polymerase 연쇄반응을 통해 잔류한 가닥들을 증폭시켜야 한다. 그들이 무엇인가는 원래의 가닥 서열 순서를 갖는 DNA array와 짝지어 결정할 수 있다. 대상 DNA 분자를 생산하는 데에 필요한 단계의 수를 세는 것이 아니므로, 이 알고리즘에 의해 2n개의 가능한 해들을 검색하는 데에는 논리조건 수를 k라 할 때 단지 (3k+1)개의 단계만 필요하다. 기존의 고안된 가장 우수한 알고리즘이 1.33n개의 단계를 필요로 하는 것에 비하면 이 방법은 엄청난 개선이라 할 수 있다. 예로, 30개의 논리조건과 50개의 변수를 갖는 3-SAT 문제의 경우 기존의 계산 알고리즘은 1.6백만 개 단계가 필요하지만 Smith 교수 연구팀이 고안한 DNA 컴퓨터는 단지 91개 단계만 필요할 뿐이다.<sup>08</sup>



Hamiltonian 경로 문제의 해법(a)과 DNA 컴퓨팅을 이용한 3-SAT 문제의 해법(b)

06. 김은경, DNA 컴퓨팅과 진화 모델을 이용하여 조합 최적화 문제를 풀기 위한 DNA 서열 생성 시스템, 공주대학교 2006년 11p~13P

07. 발리스틱(Ballistic) : 탄도, 에너지의 전환을 이용하는 방법

08. 하드와이어(Hardeired) : 배선을 이용하는 방법  
09. Nature, 403, 143 (2000)]



## 3. DNA 컴퓨팅 모델 사례

DNA 컴퓨팅에 대한 응용 사례로는 크게 세 가지 방향인 IT, NT, BT로 나눌 수 있다.

IT 분야에서는 기존의 컴퓨터로 해결하기 힘든 조합 최적화 문제에 응용, NT 분야에서는 나노 수준에서 DNA의 자기 조립 특성을 이용한 새로운 나노 구조를 만드는데 응용한다. 그리고 BT 분야에서는 생명과학, 의학학 분야에서 새로운 분자 진단이나 치료 등에 응용하는 사례를 볼 수 있다.

### 1) Travelling Salesman Problem (TSP)

TSP는 앞 절에서 언급하였듯이 여러 개의 도시에서 각 도시간의 여행 거리가 주어지고, 그 도시간의 최단거리를 찾는 문제이다. Narayannan과 Zorbalas은 [그림1]의 4개의 도시와 5개의 거리로 이루어진 TSP 그래프를 [표 1]의 DNA 컴퓨팅 알고리즘을 사용하여 처음으로 TSP를 해결하였다. 이처럼 TSP는 여행 거리(가중치)가 가장 짧은 최단 경로를 찾는 문제이며, 위의 방법으로 정점과 간선을 생성한다. 이때 간선은 가중치를 포함한다. 하지만 Narayannan과 Zorbalas의 방법은 간선의 염기 서열을 가중치에 비례해서 결정하였다. 그러므로 마지막 가중치를 표현하기 위해서는 앞의 간선 보다 매우 긴 염기 서열이 필요하다. 예를 들어 가중치가 20, 40, 60, 80, 100 %이라면 마지막 가중치의 100을 표현하기 위해서는 앞의 가중치 보다 매우 긴 서열이 필요하다. 그러므로 매우 비효율적이고, 실수를 표현하기도 어렵다. 이러한 가중치 표현 방법의 문제를 해결하기 위해 가중치를 농도에 따라 표현하거나, GC 함량, Melting Temperature (Tm) 값에 따라 표현 하는 방법들이 사용되고 있다.

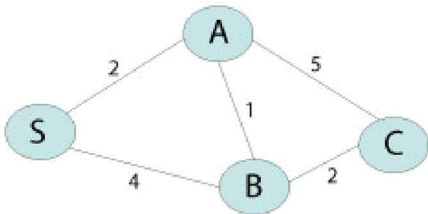


그림 1 > TSP 그래프

1. 거리 D에 의해 짧은 경로들을 생성한다. ( $D = \{1, 2, 3, 4\}$ )
2. 랜덤한 서열로 장점과 가중치를 생성. 이때 가중치 서열은 거리에 비례하여 생성한다.
3. 모든 경로를 표현한 서열로 만든다.
4. 모든 경로와 상보적 가닥을 tube에 넣고 ligase 연산을 실행 한다.
5. tube 안에 있는 가닥을 amplify 한다.
6. melt 와 affinity-purify를 이용해 바라는 정점들을 찾는다.
7. 찾는 경로들 중 짧은 거리의 경로를 결과로 나타낸다.

표 1 > Narayannan과 Zorbalas의 알고리즘

### 2) Satisfiability (SAT)

DNA 컴퓨팅에서 벤치마크 문제로 많이 연구되고 있으며, 이 문제는 OR( $\vee$ ) 연산으로 이루어져 있는 논리절(logical clause)들이 다시 AND( $\wedge$ ) 연산으로 연결되어 있을 때, 이 전체 논리식(logical formula)을 참이 되게 하는 해의 존재 여부를 묻는 것이다. SAT를 풀기 위해 Liu는 DNA를 고체 표면에 고정화시켜 네 개의 변수로 이루어진 SAT 문제를 반복적인 논리 절 확인 과정을 통해 문제를 해결했다. 하지만 문제의 크기가 커지게 되면 시간 복잡도가 증가하여 문제를 해결하기 어려워진다.

### 3) 3-SAT

세 가지 변수의 논리합들이 논리곱으로 표시되는 논리식을 참으로 만드는 이진 변수들의 진리값을 찾는 문제로서, SAT 문제 중의 하나이다. Adleman은 Liu의 SAT 문제의 크기를 확장하여 20개의 변수를 포함한 3-SAT를 해결하였다. 이는 매우 복잡한 논리식으로 전기영동을 이용한 affinity separation 과정을 semi-auto-mation하는 새로운 실험 방식을 사용한 것이다.

### 4) Maximal Clique Problem(MCP)

Ouyang 등이 해결한 MCP는 다른 도메인에서 중요한 애플리케이션들을 찾는 조합 최적화 문제이다. Clique란 그래프상의 모든 정점이 간선에 의해 서로 연결된 하위 그래프를 말하며, 어떤 연결된 그래프에서 가장 큰 사이즈의 Clique를 찾는 문제를 MCP라 한다. MCP는 문제의 크기가 커지면 시간복잡도가 증가하여 해를 구하기 어려운 문제이지만, DNA 컴퓨팅을 이용한 간단한 알고리즘과 제한효소 반응 등을 사용한 실험 툴로 문제를 해결할 수 있다.

### 5) 기타

Mao 등의 연구에서는 sticky end를 가지는 여러 번 교차된 형태의 단위체를 이용하여 논리 연산 문제인 cumulative XOR 연산을 구현하였다. 그리고 Guarnieri 등은 DNA에 기반한 알고리즘을 이용하여 실리콘 컴퓨터의 덧셈기와 같은 이진수 덧셈을 구현하기 위한 연구를 수행하였다. Sakamoto 등은 논리식을 표현하고 증명하는 정리증명(theorem proving) 문제를 위해 DNA의 hairpin 구조를 이용한 연구를 수행하였다. 이러한 연구들은 기존의 전산학 분야의 인공지능 개념학습 알고리즘과 DNA 컴퓨팅 기술을 결합한 개념 학습 모델에 대한 연구들로 볼 수 있다.

## 4. 기술 구현 시 나타나는 여러 관련 유의 사항 제시 및 반영

첫 번째는 **연산자의 신뢰성 문제**이다. 대부분의 실험들은 전문가의 손에 의해서 직접 이루어지며, 실제 생물학 실험 방법을 연산자로 사용하기 때문에 실험에 의한 불확실성과 오류의 가능성을 갖는다. 이러한 실험 오류는 곧 컴퓨터로서의 계산 오류를 의미하며, 이는 컴퓨터로서 치명적인 문제점이 될 수 있기 때문에 새로운 연산자인 실험 방법의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다.

두 번째는 **DNA의 안정적이지 못한 표현 방법**이다. NA를 이용한 그래프 문제의 문제 표현방법은 DNA의 특성을 정확하게 반영할 수 없기 때문에 결과에 대한 신뢰도를 요구하는 컴퓨터의 특성을 만족하지 못하므로 DNA의 다양한 특성인 계산 속도와 집적도를 활용할 수 있는 유전자 알고리즘을 이용한 모델이 연구가 진행 중 이다.

세 번째는 **정보 처리 과정에서의 속도문제**이다. 이는 각 실험 단계에서 분자의 초병렬성을 활용할 수 있으나, 단계간의 작업은 주로 수작업으로 이루어지기 때문에 전체 연산 시간이 오래 걸리며 조합 최적화 문제의 해를 찾는 데 또한 많은 시간과 노력이 요구되어 실험 과정을 자동화함으로써 실험 장치들의 속도를 향상하는 기술이 개발이 되고 있다.

네 번째는 **다른 조합 최적화 문제로의 확장성 문제**이다. 현재의 DNA 서열 생성 시스템은 서열에 대한 신뢰성, 사용자의 친밀성, 분석 능력, 서열의 재사용성 등과 같은 요구조건을 충족하지 못하고 있으며, 또한 여러 가지 조합 최적화 문제로의 확장이 곤란하며 평가 기준에서의 범용성 또한 문제이다. 생물학적 실험을 위한 표준적인 시뮬레이터가 제공되지 않아, 경제적인 실험과 실험 결과에 대한 비교 분석이 곤란하다. 이에 해결하기 위한 연구가 시도되고 있으나, 아직까지 최적의 해결 방법은 제시되고 있지 않아 연구자들마다 사용하고 있는 다른 평가 기준을 통합한 표준적인 시뮬레이터의 개발이 필요한 실정이다.<sup>10</sup>

## 5. 핵심 기술 적용 사례

### 1) 1만일이 몇 시간으로 단축

기능 유전체학이나 비교 유전체학은 인간 게놈 프로젝트의 결과물을 인간에게 실질적으로 활용할 수 있는 길을 열고 있다. 그러나 속도가 문제다. DNA컴퓨터는 각 꼭지점과 변에 특정 염기서열을 가진 DNA 가닥을 부여한 다음 서로 반응을 시켜 각각의 꼭지점과 변들이 연결된 가장 짧은 길이의 DNA를 화학적으로 찾아낸다. 이것은 시험관 내에서 한꺼번에 일어나기 때문에 기존의 슈퍼컴퓨터에 비해 1000배 이상의 속도를 갖게 된다.<sup>11</sup>

### 2) DNA를 음악으로

인간의 DNA 데이터와 소프트웨어 프로그램의 개발로 이제 DNA를 음악으로 전환하는 것이 가능하다. 최근 개발된 소프트웨어는 일련의 DNA 텍스트를 디지털 데이터로 전환하면 컴퓨터가 읽고 플레이를 할 수 있다. 프로그램은 이 컨버전을 위해 서로 다른 룰(규칙)을 사용하거나 두 가지 모두를 함께 만들어 이용하는데, 뉴클레오타이드(핵산의 구성성분, Nucleotides)를 이용하여 DNA를 만들거나 단백질(Protein)을 만드는 아미노산(Amino acids)을 만들어, 이를 이용하여 피치(음악의 높이, Pitch), 리듬(Rhythm) 그리고 편곡(Instrumentation)을 하게 된다.<sup>12</sup>



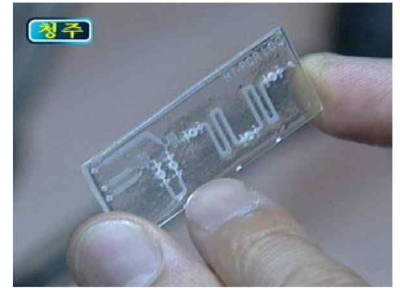
DNA를 음악으로 전환하는 가상 모식도 (studybusiness.com)

10. 김은경, DNA 컴퓨팅과 진화 모델을 이용하여 조합 최적화 문제를 풀기 위한 DNA 서열 생성 시스템, 공주대학교 2006년 19p~23P  
 11. 메경 이코노미, 2008  
 12. 국민소득 3만 달러 시대를 열어 갈 미래의 기술-비즈니스 혁신(1994~2006)



### 3) 돌연변이 검색에 효과

에이즈의 원인이 되는 HIV 바이러스는 스스로 끊임없이 돌연변이를 만드는데, 그 양상이 동일하지 않아 현재 60가지 이상의 돌연변이체가 발견됐다. 따라서 환자에게 일률적으로 동일한 치료법을 적용할 수 없다. 그런데 어피메트릭사의 HIV용 DNA칩은 환자들 서로 다른 돌연변이를 어렵지 않게 검사해 각자에게 적절한 약물이나 치료법을 적용할 수 있게 해준다. 칩에서 나타난 반응 결과들을 비교해보면 환자들 간의 미세한 차이점을 알아낼 수 있기 때문이다. 칩을 이용한 검사는 기존의 최신 검사보다 10배 이상 더 빠르다.<sup>13</sup> 청주의 한 벤처기업인 시드바이오칩스는 세계 최초로 한 방울의 혈액으로 에이즈 감염 여부를 확인할 수 있는 휴대용 에이즈 진단 칩(Aids Chip)개발했다고 2006년 06월 21일 SBS 보도했으며 2006년 10월에 마이크로 타스학회에 논문 게재발표 하였다. 앞으로는 조만간 치매를 진단하는 바이오칩에 도전할 것이라 전했다



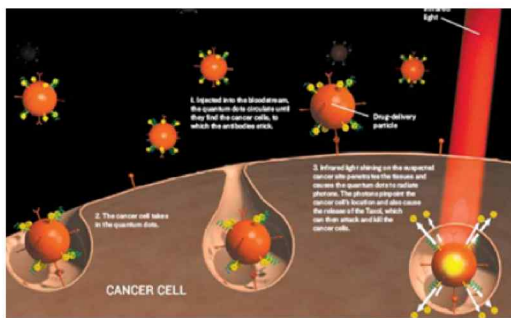
에이즈 진단 칩 (studybusiness.com)

### 4) 범인 용의자 확인에 사용

미국의 경우 앞으로 2년 후에는 모든 경찰차에서 DNA칩을 용의자 확인에 쓰기로 결정했다고 한다. DNA칩은 이처럼 질병의 검사와 치료 차원 외에도, 사람의 신원이나 친자확인에도 사용될 것이다. 정상적인 사람들이라 해도 각자 조금씩 다른 DNA 구조를 가지고 있기 때문에 가능한 일이다.<sup>14</sup>

### 5) 질병치료 사용

DNA컴퓨터를 약처럼 몸 속에 투여하면 스스로 혈관을 타고 몸 속을 돌면서 세포 속의 질병 표지를 찾아내 치료한다는 것이다. 종양이 형성되기 전 초기단계의 암을 치료할 수 있을 뿐 아니라 암세포가 투약이 어려운 곳에 전이되어도 이를 찾아 공격할 수 있다.<sup>15</sup> 2007년 7월 10일 식품 의약품 안전청으로부터 'HPV Genotyping DNA Chip'에 대한 품목허가를 받은 HPV 진단용 DNA칩은 여성의 자궁경부암을 유발하는 것으로 알려져 있는 인유두종 바이러스(HPV)의 고유한 유전자를 진단하는 것으로, 이제까지 알려져 있는 100여 종의 HPV 종류 중 자궁경부암과 연관되어 있다고 알려진 22개의 가장 핵심적인 유전형에 대한 검사가 가능하다.<sup>16</sup>



암 치료의 작용 원리의 예를 보여주는 상상도  
(나노바이오 융합기술)

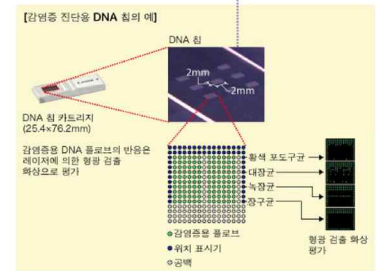
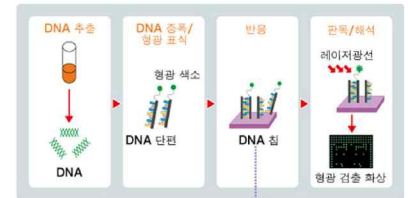


바이오코아 HPV 진단용 DNA칩 (yonhapnews.co.kr)



## 6) DNA 컴퓨터 제품의 개발

DNA 칩 제조 분야에서 캐논은 1,000종류에 달하는 DNA 플로브가 고정된 극소 탱크를 탑재한 DNA 전용 잉크젯 헤드를 개발하였다. 1,000종류의 DNA 플로브를 한 번에 프린트할 수 있어, 정확한 고성능 DNA 칩의 대량 정밀 제조가 가능하다. 더 나아가 세계 최초로 유리 기판 표면상의 DNA 플로브를 가시화하는 기술도 개발하였다.<sup>17</sup>



에이즈 진단 칩 (studybusiness.com)

## 7) DNA 바코드

나노(10억분의 1m) 기술과 유전자(DNA) 기술을 접목해 상품 유통에 혁명을 가져올 수 있는 '나노DNA 바코드 시스템'이 국내 연구진에 의해 세계 최초로 개발됐다. 서울대 화학부 최진호 교수 팀은 11일 인공으로 합성한 DNA를 나노 격자 안에 캡슐 화해 상품에 흡착시킴으로써 기존 바코드에 비해 안정성과 신뢰성을 대폭 향상시키고 정보 저장도 획기적으로 늘린 차세대 바코드 시스템을 개발했다고 밝혔다.

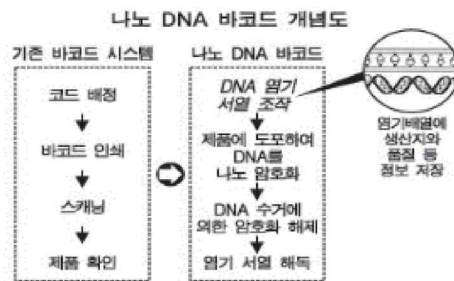
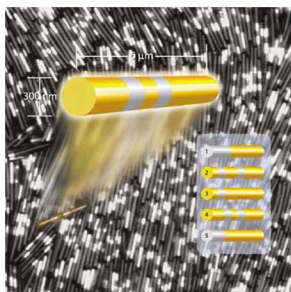
DNA 바코드는 상품정보를 DNA 사슬(암호)로 처리해 캡슐 형태로 상품에 흡착시킨 뒤 제품 판별이 필요한 시기에 캡슐을 분리, DNA 판독기를 통해 정보를 해독하게 된다.

DNA는 원래 열이나 효소 등에 의해 변형되거나 파괴될 가능성이 높으나 최 교수 팀은 DNA를 나노 격자 안에 캡슐화 시켜 안정성을 높였다. 특히 기존 바코드 시스템은 운송·유통 중 복제나 제거가 가능하기 때문에 농축산물 의 경우 원산지 구별이 어렵고 골동품·명품도 모조품과 구별이 쉽지 않다.

업계에서는 이런 점을 극복하고 보다 많은 정보를 담기 위해 반도체칩을 적용한 전자태그 (RFID) 기술을 상용화하는 단계다.

DNA 바코드는 반도체 칩 대신 DNA를 사용하는 점에서 기존의 RFID 기술과 구별되고 1mm<sup>2</sup> 정도의 좁은 부피에도 거의 무한대에 가까운 정보를 저장할 수 있다는 점에서 차세대 바코드 기술의 주도권을 확보할 것으로 기대하고 있다.

현재 연구진은 DNA를 안정화시키는 기술을 국내외에 특허등록하고 DNA 농축 기술과 바코드 기술을 특허 출원한 상태다.<sup>18</sup>



나노 바코드 시스템 (studybusiness.com) /

나노 바코드 개념도 (mk.co.kr) /

나노 바코드 시스템 (studybusiness.com)

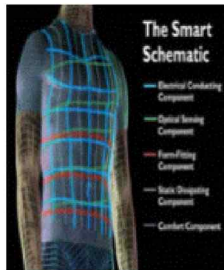
17. canon.co.kr  
18. 매일경제신문, 2004

## 6. 새로운 변화와 영향

### A. 향후 전망과 기대효과

DNA를 다루는 매우 다양한 분자생물학적 실험기법들이 개발되어, 여러 분야에서 유용하게 이용되고 있으며 새로운 분야가 속속 등장하고 있다. 그 중의 하나가 'DNA 컴퓨터'이다. DNA 컴퓨터는 DNA를 분자 기계 형태로 만들어 트랜지스터, DNA 전선 등으로 활용하는 것을 말하는데 아직은 DNA컴퓨팅을 이용한 제품에 많은 문제점과 그에 대한 해결책이 필요한 상황이다. 이에 우리는 새로운 방법의 개발과 새로운 방향으로 실험을 적용하는 것이 필요할 것이다. DNA컴퓨팅은 여러 실험들이 소형화, 자동화 되어야만 하기 때문에 생화학적인 실험들을 통해서 구현되고, 이를 위해서는 MEMS 기술에 기반하고 있는 lab-on-a-chip(LOC)<sup>19</sup> 기술과의 접목할 수 있는 방향을 찾아야 할 것이다.

이에 **앞으로의 컴퓨터는 엄청난 속도를 가지며, 인체에 삽입이 가능할 정도의 소형화되고, 지금보다 더 방대한 양을 저장할 수 있는 대용량화가 실현** 될 것이다. 그리하여 위의 그림과 같이 일상생활에서의 활용이 확대되어 갈 것이다.



의(衣)\_ WC : 옷, 안경, 귀걸이, 약세서리 등 (2015년경) (studybusiness.com)



식(食)\_ EC : 나노봇, 나노캡슐/바코드/리포터/마커(2020년경)(studybusiness.com)



주(住)\_ LC : 생체인식, 생체진단, 인공생체공학, 생체모방 등 인공 생체컴퓨터기계와 인간의 융합으로 몸이라는 구조와 기능의 주거시설을 복구, 대체, 재생하는 살아있는 컴퓨팅으로 발전할 것임(2050년경부터 융합 현실화 될 것임) (studybusiness.com)

19. NEWS & INFORMATION FOR CHEMICAL ENGINEERS, Vol. 20, No. 5, 2002, 박태현·이지연·장병탁

## B. 디자이너를 위한 분석 및 시사점

DNA컴퓨팅을 이용한 문제 해결은 아직 미흡한 상태이다. 여러 문제들을 해결해 내고 그 가능성을 보여주고 있지만 많은 변수의 문제를 풀어내기 위해서는 아직 해결해야 할 문제들이 많다. 이에 우리는 새로운 방법의 개발과 새로운 방향으로 실험을 적용하는 것이 필요할 것이다. 실제로 연구되어 학회에 발표되고 있는 DNA를 주소록으로 이용 하려는 가능성을 보이고 있다. 그래서 전화번호나 주소록 등이 담긴 DNA를 판매할 지도 모르며, 쉽게 휴대하고 다니는 손목시계, 휴대폰, 노트북등 방대한 양의 정보가 저장된 초소형 제품들이 백화점등에 전시되어 판매될지도 모르겠다. 결국 이러한 것들이 작은 칩이나 기계에 소형화, 자동화, 직접화 되어야 궁극적인 DNA 컴퓨터가 구현 될 수 있다.

지금 현재의 기술은 기술 그 자체로만 존재하는 것이 아니라 일상생활 속에 사용되는 제품으로 변화해가고 있는 추세이다. 그렇기 때문에 **기술을 과학자나 엔지니어에게 의존을 하기보단 새로운 기술을 개발할 수 있도록 제품의 사용성, 활용성에 대한 많은 아이디어를 제공**할 수 있어야 할 것이며, 개발된 기술의 접목하기 위한 방안도 모색 해보아야 할 것이다. 이렇듯 우리는 이런 기술 발전에 있어 ‘정보들을 어떻게 연결하고 공유할 것인가?’ ‘정보들을 어떻게 외부와 연결할 것인가?’ 등을 염두 하여 두고 적용해야 할 것이다.