실험 제목	실험교사 서명
유전자분석을 활용한 질병진단(제2형 당뇨병)	

학교	학년	반	번호	이름

1. 실험 목표

1. DNA 조각 (모의실험: 염료분자)을 크기 별로 분리하는 agarose 전기영동에 대해 학습한다.
2. 유전자 분석을 활용한 질병진단의 원리를 이해한다
3. 당뇨병을 정확히 이해하고, GLUT4 (당 수송체)유전자의 발현 농도에 따라 당뇨병을 진단한다.

2. 배경 이론

1) DNA와 질병진단

모든 생명체는 DNA를 가지고 있다. DNA는 세포의 핵안에 존재하고 생명체의 유전정보를 저장하며, 세포는 유사분열과정을 통해 자신과 똑같은 DNA를 가지는 딸세포들을 만든다. 또한 생식세포는 감수분열을 통해 자신이 가진 DNA를 자식에게 물려주면서 하나의 종을 유지시킨다. 하지만 유전정보를 저장하는 중요한 기능을 하는 DNA는 자외선, 방사선, 다양한 화학약품 또는 세포호흡에 의해 생성된 활성산소에 의한 손상을 항상 받는다. DNA가 손상되면 세포주기(cell cycle)를 멈추고 DNA 손상을 복구하는 자신만의 DNA 복구시스템을 작동시킨다. 그러나 손상된 DNA의 복구가 어려우면 세포는 스스로 세포사멸(apoptosis)을 유도한다.

DNA 손상이 원암 유전자(proto-oncogene) 또는 억제유전자에 일어나고 복구과정에 실패한다면 비록 전체 게놈에 비해 매우 적은 부분의 DNA가 손상될지라도 궁극적으로 암이 생길 가능성이 높아지게 된다. 결국 많은 질병의 원인이 DNA 손상으로 인해 발생한다고 알려져 있다. 따라서 손상된 DNA를 이용한 질병 진단에 대하여 많은 사람들이 연구를 진행하고 있다.

분자 진단은 인체로부터 채취된 대상물을 검사에 사용하는 체외 진단법에 속하며, 박테리아, 바이러스 등 질병의 원인이 될 수 있는 감염체 및 환자의 유전자 (DNA, RNA)를 분석하여 질병을 정확하게 진단하는 검사 방법으로 진단 방법 중에 유일하게 조기 진단이 가능하다.

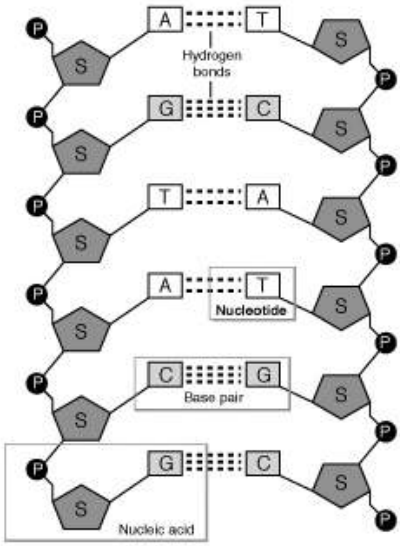
〈 분자 진단 기술의 발전 〉

〈 분자 진단 시장 규모 전망 〉

Year	2012	2013	2014	2015	2016	2017	CAGR (%)
Gloabal ($B)	5.0	5.6	6.3	7.3	8.1	9.1	12.6
Korea ($M)	57.7	64.9	73.0	82.6	93.5	106.4	13.0

Analysis of the Global In Vitro Diagnostics Market, Frost & Sullivan(2013),
Analysis of the Asia-Pacific Molecular Diagnostics Market, Frost & Sullivan(2013)

분자 레벨에서의 정확한 진단을 가능하게 하는 다양한 분자 진단 검사 기술의 발전은 신속 정확한 진단과 진단 기기의 소형화를 가능하게 하여, 개인 맞춤형 진단과 치료의 기반을 제공하고 있다. 현재 분자 진단은 진단의 정확도가 높아 두드러진 성장세를 보여 체외 진단법 중에서도 가장 높은 연평균 성장률이 예상되는 분야이며, 한국, 중국 및 인도 등에서 임상 시험 및 분석 수요가 증가하면서 성장세가 두드러지게 나타난다. 분자 진단법은 주로 중합효소연쇄반응(Polymerase Chain Reaction, PCR)을 기반으로 한다. 다음은 분자진단에 대한 이해를 돕고자 DNA 구조에 대하여 먼저 살펴보자.



2) DNA의 구조

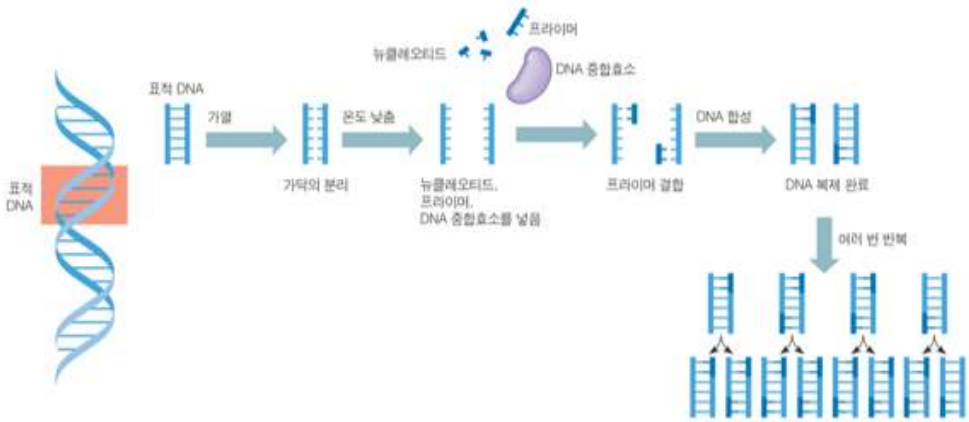
DNA는 스위스의 생물학자 프레드릭 미셔(Frederick Miescher)에 의하여 1869년에 처음으로 발견되었다. 백혈구로부터 핵 성분을 분리 추출하였으며, 이 성분은 강한 산성을 나타내고 인을 함유하는 유기화합물이었다. 이 후 핵 속에 들어있는 산성 물질이라는 뜻에서 핵산이라 불리게 되었다. 핵산의 기본단위는 당. 염기, 인산으로 이루어진 뉴클레오티드이다. 뉴클레오티드는 아데닌(A), 구아닌(G), 시토신(C), 티민(T)의 4가지 염기중 하나를 갖는다. 인산은 생체 pH조건에서 뉴클레오티드마다 하나씩 있으며 (-) charge를 갖고 있어 거대한 분자량을 가진 핵산이 물에 잘 녹을 수 있다.

DNA는 2개의 폴리뉴클레오티드를 포함한 이중나선 구조이다. 이중나선 중심에 있는 염기가 A는 항상 T와 쌍을 이루고 C는 항상 G와 쌍을 이룬다. 이와 같이 상보적인 염기쌍을 이루는 DNA의 구조적 특징이 있으므로 세포가 분열할 때마다 동일한 유전정보가 각각의 딸세포에게 전달될 수 있고, DNA 손상시 복구가 가능하다. 또한 생명공학에는 상보적 염기쌍의 원리를 이용한 많은 실험 기법도 개발되고 있다. 중합효소연쇄반응(PCR)과 DNA 탐침은 상보적 염기쌍을 이용한 대표적인 시험법이다. 본 실험에서는 이들 실험법 원리를 이해하고 질병진단에 어떻게 사용되는지 살펴볼 것이다.

3) 중합효소연쇄반응 (Polymerase Chain Reaction, PCR)과 전기영동

중합효소연쇄반응

중합효소연쇄반응(PCR)은 특정 DNA 부위를 특이적으로 반복 합성하여 시험관내에서 원하는 DNA 분자를 증폭시키는 방법으로서, 아주 적은 양의 DNA를 이용하여 많은 양의 DNA 합성이 가능하므로 분자 생물학적으로 제한효소의 발견만큼 획기적인 것이라고 할 수 있다. PCR의 기본적인 원리는 매우 단순하다. 표적 DNA에 뉴클레오티드, 시발체(primer1, primer2), DNA 중합효소가 필요하다. 시발체는 길이가 15~20개의 단일가닥 뉴클레오티드 분자로 이루어져



있으며, 표적 DNA의 양쪽 끝 서열과 상보적인 염기서열을 가진다. 시발체 하나는 표적 DNA의 한쪽 끝에 있는 한 가닥과 상보적이며, 두 번째 시발체는 다른 쪽 끝에 있는 다른 가닥과 상보적이다. 따라서 시발체는 표적 DNA의 양쪽 끝에 있는 서열과 결합하여 표적 DNA 조각의 시작과 끝부분으로 이 부분이 증폭될 DNA 조각이 된다.

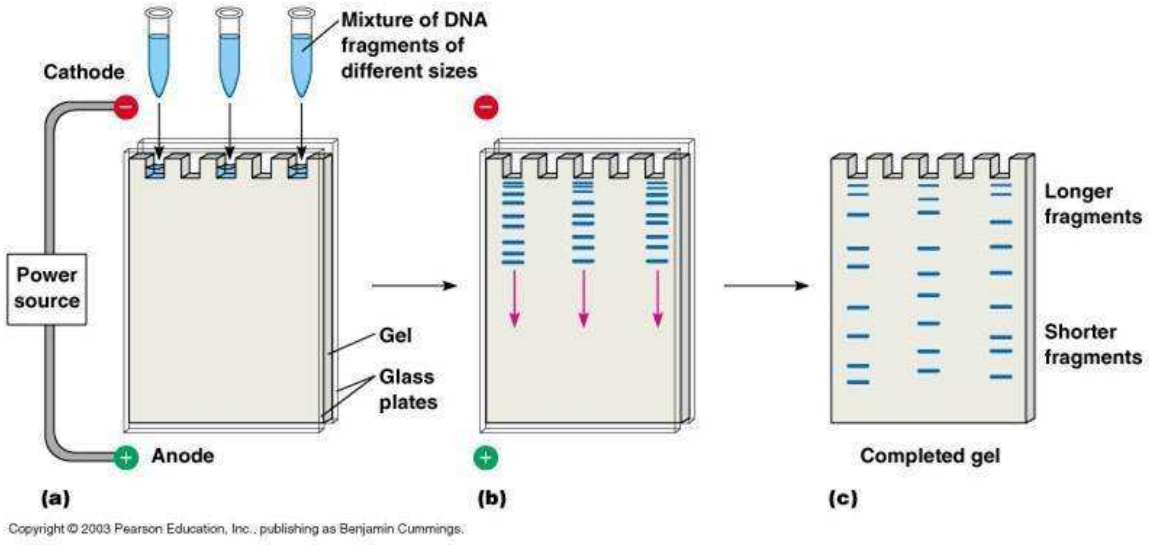
PCR은 3단계로 진행된다. ①표적 DNA를 열처리하여 외가닥으로 분리시키고, ②표적 DNA와 시발체의 결합시킨 후, ③중합효소에 의해 상보적 DNA를 합성한다. 이러한 3단계가 계속 반복되면 각 주기가 반복될 때마다 표적 DNA는 2배가 된다. 증폭된 표적 DNA는 일반적으로 사용되는 전기영동 상에서 뚜렷하게 보이는 band로 확인할 수 있고, 유전자 재조합 및 질병 진단 등 많은 분자생물학적 실험에 기반이 되고 있다.

전기영동

전기영동이란 고분자 물질을 전기적 전하나 크기에 의해 전기장을 띤 매질(gel)에서 물리적으로 이동 분리시키는 방법으로 핵산(DNA, RNA)이나 단백질을 눈으로 확인할 수 있는 매우 기본이 되는 실험이다.

납작한 직사각형 판의 gel 한 끝에 홈을 만들어 이 홈에 샘플을 넣고 전극을 걸어주면 고

분자들은 이동을 하여 gel 상에 여러 개의 밴드를 확인할 수 있다. 핵산의 전기영동 원리는 DNA내 인산기의 전하에 기반을 둔다. DNA의 인산기는 전기영동에 사용되는 완충액 속에서 음전하를 가진다. 그러므로 DNA를 전기장(electric field)에 놓으면 양의 전극 쪽으로 서로 다른 속도로 이동할 수 있는 것이다.



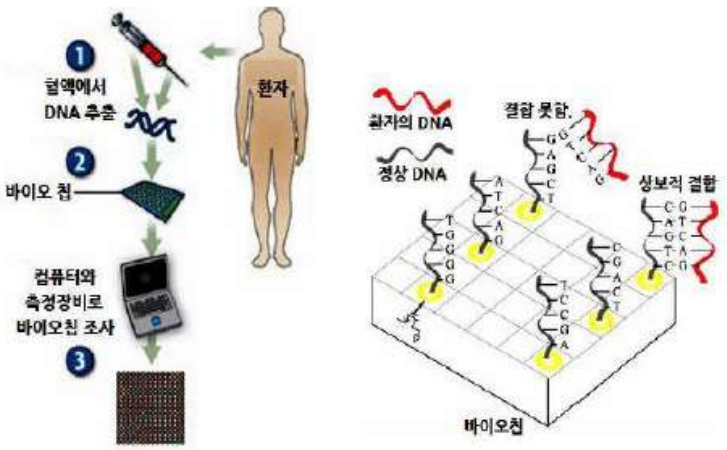
일반적으로 DNA의 크기와 전기장에서의 이동성(mobility)은 로그함수로 반비례한다. 큰 분자는 작은 분자보다 gel의 구멍으로 지나가기 어렵기 때문이다. 따라서 작은 DNA 조각은 큰 DNA 조각보다 더 빠르게 이동하여 양전극 가까이에 위치되어 검출된다. 길이가 같은 DNA라면 DNA의 형태와 agarose의 농도에 따라 이동속도는 달라진다. Plasmid DNA는 그 모양이 선형, 환상형 그리고 끊어진 환상형 등 3가지가 있으며 이는 동일한 염기쌍을 지니고 있지만 모양이 다르므로 gel 위에서 다른 이동속도를 보인다. 그러므로 둥근 환상형 DNA는 선형 DNA 보다 빨리 이동한다.

Agarose gel은 실들이 얽혀 있는 형태의 그물 구조를 가지고 있어 체와 같은 역할을 한다. agarose의 농가 높으면 gel의 그물구조가 촘촘해지므로 이동속도가 느려진다. 작은 DNA 조각은 큰 DNA 조각에 비하여 gel이 더 촘촘해야 더 잘 분리될 수 있다. 따라서 agarose의 농도에 따라 DNA의 분리범위가 다르다. Agarose의 농도가 0.3%(w/v)로 낮을 때는 5 ~ 60 kb의 비교적 큰 DNA를 분리하며, agarose 농도가 2.0%(w/v)로 높을 때는 0.1 ~2 kb의 작은 DNA를 분리한다.

전기장에서 DNA의 이동성은 완충용액의 이온 강도(=농도)와 조성도 영향을 받는다. 이온 강도가 너무 낮으면 DNA 이동이 너무 느리고, 이온 강도가 너무 높으면 열이 발생하여 심한 경우 겔이 녹거나 DNA의 구조가 변형된다. 또한 부하되는 전압이 높을수록 DNA 조각의 이동속도가 빠르게 나타난다.

4) DNA 탐침 (DNA probe)

전기영동 실험법은 DNA를 염색하는 몇 종류의 염색시약에 의해 band로 가시화 할 수 있다. 그러나 염기서열과 관계없이 모든 DNA분자들이 염색되기 때문에 특정 유전자를 탐색하는 의학에서의 사용은 한계가 있다. 그래서 특정 유전자 조각(표적 DNA)을 찾기 위해 표적 DNA서열과 상보적인 서열로 이루어진 작은 단일가닥의 DNA에 표지인자(방사선, 색을 띤 분자)를 붙여 DNA 탐침을 만든다. 여러 유전자들을 심어놓은 DNA chip(여러 유전자들의 조각들을 좁은 면적의 특정 위치에 심어 놓은 것)을 DNA 탐침이 포함된 용액에 담근다. DNA chip위의 여러 유전자들 중 표적 DNA가 있는 곳에서만 DNA 탐침과 염기쌍을 이루며 결합한다. DNA 탐침에 표지를 확인함으로써 DNA chip에서 찾고자 하는 표적 DNA가 존재하는지 알 수 있다.

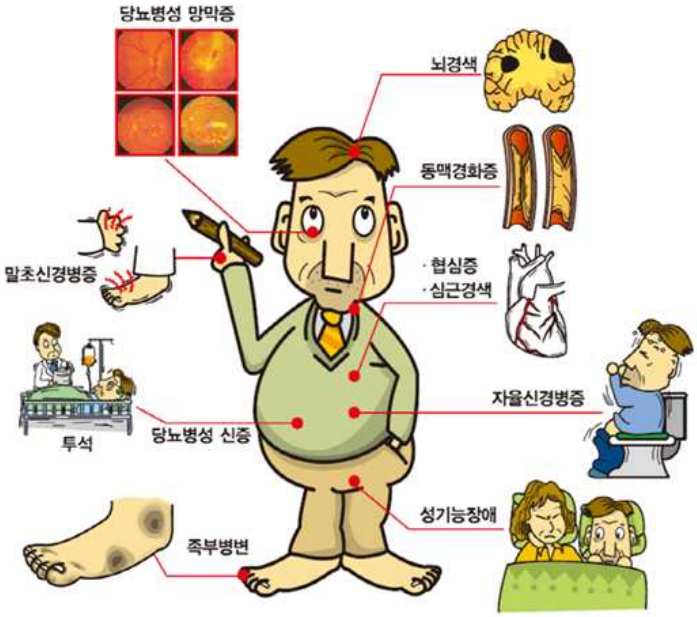


DNA 탐침은 마이크로어레이(microarray)를 이용한 mRNA의 유전자 발현에도 많이 이용된다. 유전자 혹은 그 일부분을 중합효소연쇄반응 (PCR)으로 증폭한 DNA 단편이나, 유전체 염기서열을 기반으로 합성된 올리고뉴클레오티드를 일정한 패턴으로 고정시켜 마이크로어레이를 만든다. 이런 유전자 단편들은 특정 조건의 세포로부터 추출한 mRNA과 염기쌍 반응을 일으키는데, 이를 컴퓨터를 이용해 읽어 mRNA의 유전자 발현을 확인할 수 있다. 이 마이크로어레이 칩에 어떤 유전자를 부착하느냐에 따라 여러 가지 분석을 진행할 수 있다. 또한 동시다발적으로 일어나는 수 천 개 유전자의 발현을 정성, 정량적으로 빠르게 분석할 수 있다. 그리고 생물체 내 유전자 발현을 분석하는 것 외에도 마이크로어레이는 미생물을 동정하는데 사용될 수 있다. 이 경우 마이크로어레이에 다양한 생물체나 바이러스의 특징적인 DNA 서열을 부착시키고, 시료를 혼성화함으로써 시료 내 균주들을 동정하거나, 임상 시료에서 병원성 바이러스나 세균의 감염 여부를 빠르게 동정하는데도 사용될 수 있다.[네이버 지식백과]

5) 당뇨병

당뇨병은 높은 혈당 수치가 오랜 기간 지속되는 대사 질환군을 말한다. 혈당이 높을 때의 증상으로는 소변이 잦아지고, 갈증과 배고픔이 심해진다. 이를 치료하지 않으면 다른 합병증을 유발할 수 있다. 급성의 합병증으로는 당뇨병케톤산증, 고혈당성 고삼투성 비케톤성 혼수 등이 포함된다. 심각한 장기간 합병증으로는 심혈관질환, 뇌졸중, 만성신부전, 당뇨병성 궤양, 당뇨망막병 등이 포함된다. 당뇨병은 췌장이 충분한 인슐린을 만들어 내지 못하거나 우리 몸의 세포가 인슐린에 적절하게 반응하지 못하는 것이 원인이 된다.

당뇨병은 크게 3 가지, 즉 제1형 당뇨병, 제2형 당뇨병, 그리고 임신당뇨병으로 분류된다.



제1형 당뇨병 : 제1형 당뇨병은 췌장에서 인슐린을 생성하는 랑게르한스섬의 베타 세포의 손상으로 충분한 인슐린을 만들어내지 못하는 것에 기인하므로 '인슐린의존당뇨병'이라고도 한다. 이는 T세포 매개의 자가 면역시스템이 베타 세포를 공격함으로써 발생한다. 제1형 당뇨병은 어린이나 어른 모두에서 나타날 수 있지만, 대부분 어린이들에서 발생하므로 전통적으로 '소아당뇨병'이라 부르기도 한다. 제1형 당뇨병은 인슐린 주사로 관리되어야 한다.

제2형 당뇨병 : 제2형 당뇨병은 세포가 인슐린에 적절하게 반응하지 못하는 인슐린저항으로 시작된다. 병이 진행되면서 인슐린 부족이 발생할 수도 있다. '인슐린-비의존 당뇨병' 또는 '성인 당뇨병'이라고도 한다. 체세포의 인슐린에 대한 반응 결손은 인슐린수용체와 관련이 있는 것으로 여겨진다. 제2형 당뇨병의 드러지는 초기 이상은 인슐린 감수성의 감소이다. 이

단계에서는 인슐린 감수성을 향상시키거나 간의 포도당 생산을 줄이는 투약과 다양한 조치로 고혈당증이 역전될 수 있다. 제2형 당뇨병은 주로 생활방식의 요소나 유전에 의한다. 비만(체질량 지수 30 초과로 정의), 운동 부족, 부실한 식사, 스트레스, 도시화 등을 포함한 몇 가지 생활방식 요소들은 제2형 당뇨병의 발생에 있어 중요하다고 알려져 있다.
당뇨병의 예방과 치료로 보건식, 운동, 금연, 정상 체중 유지가 포함된다. 혈압 조절과 적절한 발 관리 또한 당뇨병 환자들에 있어 중요하다. 제2형 당뇨병은 투약으로 치료하는데, 인슐린이 포함될 수도, 그렇지 않을 수도 있다. 인슐린과 일부 경구 투약은 저혈당을 일으킬 수 있다. 비만증이 있는 제2형 당뇨병 환자에는 체중감량 수술이 효과적인 조치일 수 있다.

임신당뇨병 : 당뇨병의 병력이 없는 임신한 여성에 고혈당으로 발전하는 경우에 발병한다.
 임신당뇨병은 인슐린 분비와 반응이 상대적으로 불충분한 증세의 조합과 관련되어 있으며, 여러 면에서 제2형 당뇨병과 닮았다. 이 병은 임신부의 약 2~10%에서 발병되며, 출산 후에는 증세가 좋아지거나 사라진다. 임신당뇨병은 완전히 치료할 수 있으나, 임신 기간 동안 주의 깊은 의학적 관리가 필요하다. 관리에는 식습관 개선, 혈당감시, 경우에 따라서는 인슐린이 필요할 수 있다. 일시적이기는 하지만, 임신당뇨병을 치료하지 않으면 태아나 산모의 건강을 해칠 수 있다. 태아에 있을 수 있는 위험으로는 거구증, 선천적인 심장과 중추신경계 이상, 골격근 기형 등이 포함된다.

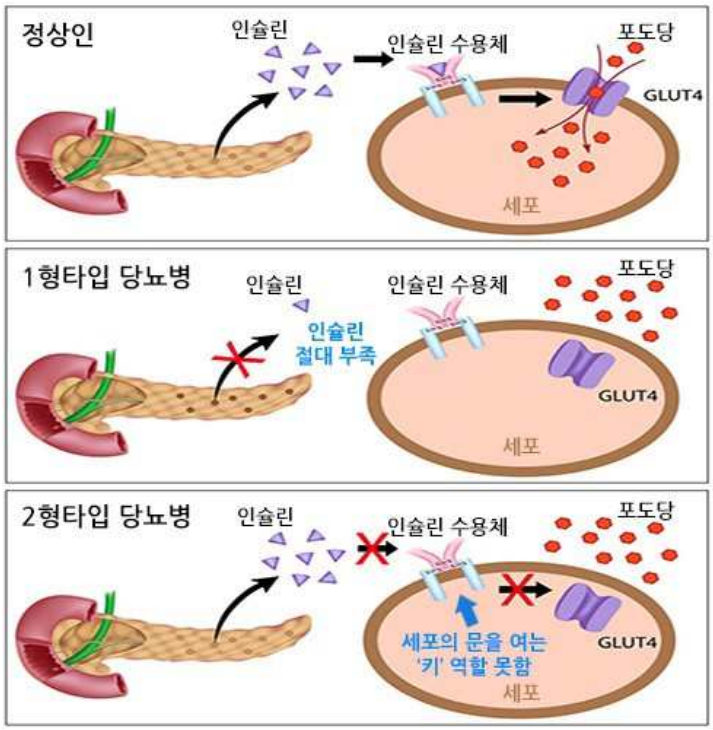
인슐린과 GLUT4 (포도당 운반체)

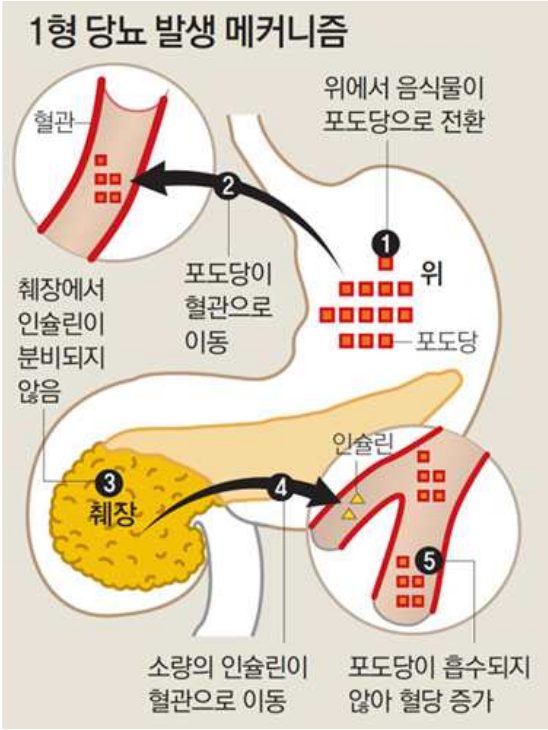
세포 안으로 분자를 운반하기 위해서는 세포막에 운반체가 필요하다. GLUT4는 대표적인 포도당 운반체이다. 세포막에 존재하는 일반 수송체와 다르게 GLUT4 운반체는 평소 세포내 소포 막에 존재한다. 췌장으로부터 인슐린이 분비되면 세포막에 존재하는 인슐린 수용체가 이를 인지하고 GLUT4 운반체가 세포막으로 이동하는 것을 촉진시킨다. 세포막으로 이동된 GLUT4 운반체는 포도당을 세포 안으로 이동시켜 혈액 내 포도당의 농도를 낮춘다.

제1형 당뇨는 베타세포의 파괴로 인슐린이 절대적으로 부족하고 그래서 인슐린 수용체를 자극하지 못하기 때문에 나타난 질병이다.

제2형 당뇨는 인슐린이 작동하는데 필요한 신호경로가 방해됨으로써 나타나는 질병으로 우리는 이것을 인슐린 저항이라 말하기도 한다. 혈액 내 유리지방산이 많으면 인슐린이 있어도 인슐린 수용체가 인슐린에 적절하게 반응을 못하기 때문이다. 그러면 혈액내 당의 수치를 낮추기 위해 췌장의 베타세포는 더 많은 인슐린을 계속 생산하므로 혈액내 인슐린 수치는 점점 높아져 고인슐린혈증이 된다. 계속되는 인슐린 분비는 베타세포의 기능부전과 결국은 세포손상이 되고 당뇨질환으로 이어진다.

인슐린의 증가는 GLUT4 운반체의 유전자발현을 증가시킨다. GLUT4 운반체 mRNA의 양을 전체 평균과 비교해보면 제2형 당뇨발병 가능 여부를 판단할 수 있다.





본 실험은 GLUT4의 mRNA을 PCR로 증폭시켜 전기영동의 밝기로 당뇨 유무를 진단할 수 있고 또한 GLUT4의 발현 정도에 따른 당뇨 유무를 DNA 칩을 이용하여 진단할 수 있음을 보여주는 실험이다. PCR과 DNA 칩을 이용한 실험결과를 분석함으로써 그 원리를 이해고 습득해보자.

3. 실험 기구 및 재료

DNA kit 3종, 전기영동 장치, Hot plate, 전자저울, 마이크로피펫(10ul~100ul) & 팁, 1XTAE buffer, Agarose gel powder, gel red, 유산지. 약수저, 삼각 플라스크, 비이커, 메스실린더, 부피플라스크, 증류수, 목장갑, 라텍스장갑, 채혈침, 채혈기, 채혈솜,

4. 실험 방법

실험 1) 0.8% agarose gel 만들기

① 1X TAE (또는 TBE) 완충용액 50ml을 삼각플라스크에 넣는다.

* 50X TAE stock solution 제조:
Tris base 242g, Glacial acetic acid 57.1ml, 0.5M ETDA 100ml 용액에 증류수를 첨가하여 최종 1L를 만든다.

② 0.4g의 agarose powder를 넣은 후 hot plate에서 완전히 용해될 때까지 끓여준다.

③ agarose 용액을 50℃ 정도 식힌다.

④ comb이 꽂아진 gel 틀에 기포가 생기지 않도록 천천히 붓고 남은 용액은 비닐봉지에 버린다.

⑤ gel이 굳을 때까지 기다린다.

실험 2) 전기영동의 원리와 연습

① 마이크로파이펫으로 샘플 이동하기(연습하기)

가. 마이크로파이펫의 용량을 적당히 설정하고 오염되지 않은 팁을 마이크로파이펫에 연결한다. 버튼을 1단계까지 누르고 팁을 샘플에 담근다.

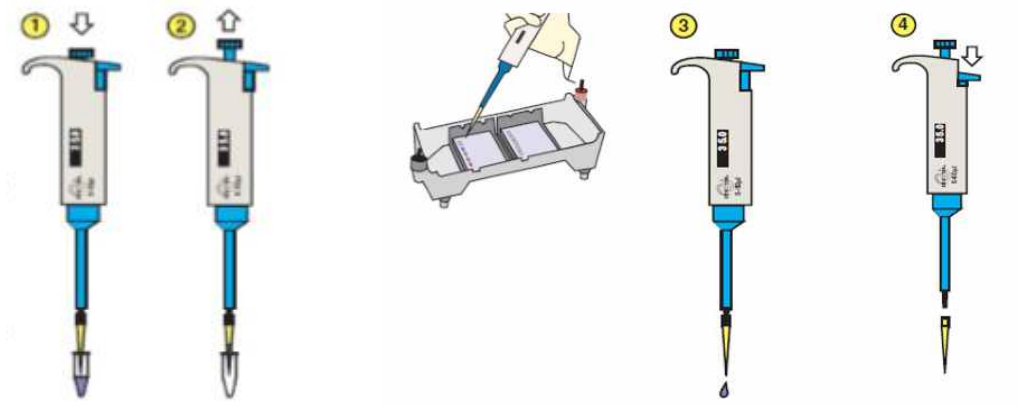
나. 팁이 샘플에 잠기면 버튼을 천천히 놓아 샘플을 팁으로 빨아들인다.

ㄱ. 파이펫을 팁을 들어올려 겔의 홈에 이동시킨다. 이 때 팁이 홈을 상하지 않도록 조심한다.

ㄴ. 파이펫 버튼을 눌러 샘플을 분주시킨 후 내용물을 완전히 비운다.

ㄷ. 샘플을 이동시킨 후 팁이 버퍼에서 완전히 나올 때까지 피펫 버튼을 놓지 않는다.

다. 버튼을 눌러 팁을 제거한다. 다음 샘플에는 새 팁을 사용한다.



② 굳은 gel을 전기영동 장치에 넣고 gel의 홈이 잠길 때까지 1X TAE 완충용액을 붓는다.

<u>주의) DNA는 “-”전극에서 “+”전극으로 이동하므로 홈의 방향이 “-”전극쪽으로 오도록 gel을 놓는다.</u>

③ A ~ E 튜브에 있는 염료 샘플을 각각 순서대로 gel 홈에 10 ul 정도 넣는다.

④ 전기영동 장치를 작동(Full, 15~20분)시키고 10분 후 염료가 분리되는 모습을 관찰한다.

⑤ 전기영동이 끝나면 전원을 끄고 gel의 패턴 결과를 해석해본다.

실험3) PCR의 원리의 효과 학습

① 굳은 gel을 전기영동 장치에 넣고 gel의 홈이 잠길 때까지 1X TAE 완충용액을 붓는다.

주의) DNA는 "-"전극에서 "+"전극으로 이동하므로 홈의 방향이 "-"전극쪽으로 오도록 gel을 놓는다.

② A ~ E 튜브에 있는 염료 샘플을 각각 순서대로 gel 홈에 10 ul 정도 넣는다.

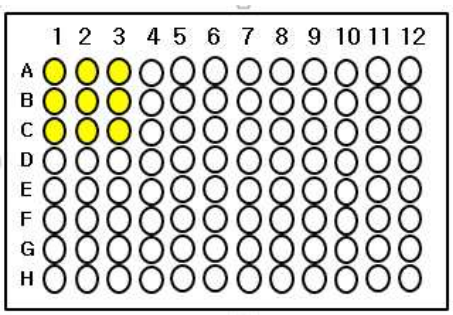
③ 전기영동 장치를 작동(Full, 25~30분)시키고 10분 후 염료가 분리되는 모습을 관찰한다.

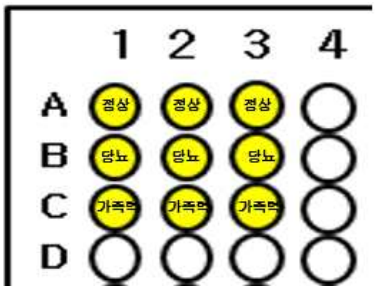
④ 전기영동이 끝나면 전원을 끄고 gel의 패턴 결과를 해석해본다.

실험4) 당뇨 진단 실험

① 장갑을 착용하고 다음 샘플 병에 담겨있는 DNA시료를 준비한다.

② well plate에 염색 시약(당뇨표지 유전자, 투명한 병)을 9개의 well에 10ul씩 넣는다. (A1~A3, B1~B3, C1~C3)





③ 정상, 당뇨환자, 당뇨 가족력이 있는사람의 DNA를 각 well에 10ul씩 넣는다.

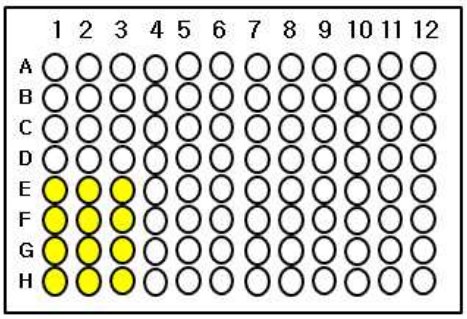
④ DNA 반응시약을 10ul씩 넣는다.

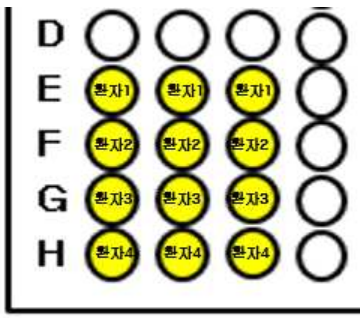
⑤ 당뇨병 유무에 따른 각 DNA의 색깔 변화를 확인한다.

⑥ 당뇨로 의심되는 환자 DNA 4개를 준비한다.

⑦ 위의 경우와 똑같이 염색 시약(당뇨표지 유전자, 투명한 병)을 10ul씩 well에 먼저 넣는다. (E1~H3)

⑧ 당뇨로 의심되는 4명의 환자 시료를 각 well에 10ul씩 넣는다.



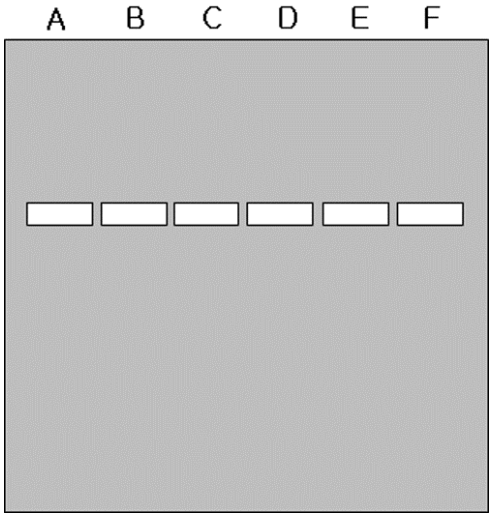


⑨ DNA 반응시약을 각 well에 10ul씩 넣는다.

⑩ 5번 결과를 통한 색깔변화를 통해, 당뇨 의심 4명의 환자에 대한 당뇨 여부를 최종 판정한다.

5. 실험 결과 및 고찰

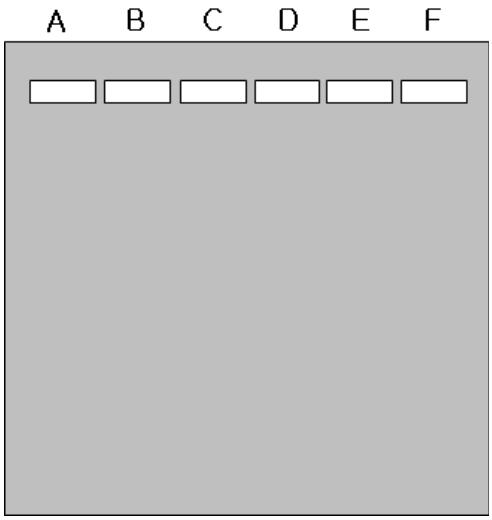
1. 실험2)의 전기영동 결과를 그림으로 그려보고, 결과를 해석해 보자.



실험2) 전기영동의 원리

2. 전기영동에서 DNA의 이동 속도에 영향을 주는 요인에 대하여 생각해 보자.

3. 실험3)의 전기영동 결과를 그림으로 그려보고, 결과를 해석해 보자.



실험3) PCR의 원리의 효과학습

4. 실험4)에서 정상, 당뇨환자, 당뇨가족력이 있는 사람을 실험한 결과에 따른 당뇨 유무의 색깔 변화를 기록하여라.

정상인 사람 : 색
당뇨 환자 : 색
당뇨 가족력이 있는 사람: 색

5. 실험4)에서 환자 4명의 당뇨 유무를 판정하여라.

6. GLUT4 역할은 무엇인가?

7. 3가지로 분류되는 당뇨병의 차이를 설명해 보자.

고찰이란?

실험을 통하여 결과를 얻었을 때, 실험 과정과 결과에 대해 생각하고 연구하는 것을 의미한다. 실험 결과가 좋던 나쁘던 관계없이 실험 과정에서 발생할 수 있는 오류에 대해 생각하여 기재하고, 실험 결과에 대해 전체적인 정리를 하고, 더 나아가 실험과정과 결과를 이용하여 더 깊이 연구할 수 있는 실험에 대해 생각하고, 어떤 분야에 응용할 수 있는지에 대해 생각해보도록 하자.

6. 토론

1. PCR의 개념과 원리를 다시 한번 생각해보고 PCR의 이용분야에 대하여 토론해 보자.

2. 당뇨병은 혈중 포도당 함량이 높은 것이 원인이지만, 당뇨병 자체보다 당뇨로 인한 합병증이 더 인체에게 악영향을 미친다고 알려져 있다. 혈중 내 당 함량이 높아짐으로 인해 발생할 수 있는 다양한 현상에 대해 토론해 보자.

7. 실험 후 배운점 및 느낀점