

지구 규모의 네트워크 만드는 법

A Bottom-Up Approach



고양우 / 오픈넷 시민학교 강의 자료로 작성된 문서입니다. / 2013년 7월 26일

주의: 이 글에 삽입된 그림 자료 중 URL이 표기된 것은 인터넷 검색을 통하여 가져온 자료로서 저작권 문제가 있을 수 있습니다.

이 글의 목적: 어떻게 하면 전 지구 모든 컴퓨터를 연결한 거대한 네트워크를 만들 수 있을지 생각해보자. 거기에서 생겨나는 기술적인 어려움을 생각하고 (천재들이 이미 발견한) 해결책을 인터넷의 사례를 통해 알아보자.

1 배경 또는 Layer 1

1.1 실 전화기 - 연결되어야 통신이 된다.

초등학교 때 종이컵으로 실 전화기를 만들어본 사람들이 많을 것이다. 두 사람이 서로 대화를 하려면 두 사람을 연결하는 한 줄기 실이 있어야 한다. 즉, 어떤 두 개체가 서로 통신을 한다는 것은 어떻게든 연결이 되어 있다는 것이 전제가 되어야 한다. 물론 연결은 직접 되어 있을 수도 있고 다른 개체를 통하여 한 다리 두 다리 건너서 되어 있을 수도 있지만 어쨌든 연결이 되어 있어야 한다. 실 전화기로 생각을 해본다면 중간에 있는 사람은 실 전화기 두 개를 하나는 왼손에 하나는 오른손에 들고 왼손의 전화기에서 들은 얘기는 오른손 전화기로 말해주고 그 반대도 마찬가지로 함으로써 멀리 있는 사람들끼리도 전화가 되게 할 수 있을 것이다. (진짜 전화기도 이렇게 동작한다.)



그림 1 실 전화기¹

여기서 연결은 물론 유선으로 될 수도 있고 무선으로 될 수도 있다. 선이 있느냐 없느냐 하는 것은 연결에서 사용하는 매체가 손으로 만질 수 있고 볼 수 있는 구리 전선이나 유리섬유를 사용하는 것이냐 아니면 전파 즉, 전자기파를 매체로 사용하느냐 일뿐 어떤 매체를 통하여 연결되어야 한다는 점에는 변함이 없다.

이때 실제로 통신을 하려는 두 개체를 통신의 당사자라는 의미에서 피어(peer)라고 하기도 하고 종단(end, endpoint)라고 하기도 한다. 그래서 이들 양 당사자간의 연결을 E2E 연결(종단간 연결, end-to-end 연결)이라 한다. 한편, 여러 다리를 건너 가는 경우 한 칸 건너는 것을 홉(hop)이라고 하며 이 한 칸 한 칸의 연결을 HBH 연결(hop-by-hop 연결)이라고 한다. 즉, 하나의 E2E 연결은 대개 여러 HBH 연결의 연쇄로 구성된다. 또한, 각각의 HBH 연결은 유선일 수도 무선일 수도 있다.

1.2 코드

실 전화기에서 내가 전하려는 말은 그 자체로가 아니라 말소리(음성)로 표현되어 공기의 울림 또는 종이컵이나 실의 떨림으로 바뀌어 전달된다. 왜냐하면 말 그 자체는 공기나 종이컵이나 실이 잘(은 커녕 전혀) 전달할 수 없지만 이를 소리(즉, 물질이 특정한 주파수로 떠는 것)으로 바꾸면 그 주파수로 떨어주는 행위로 전달이 가능하기 때문이다. 이렇듯 내가 표현하려는 메시지를 (전달하기 편한) 다른 형태로 바꾼 것을 코드(부호)라고 하며 그 행위를 코딩(부호화)이라고 한다. "사랑"이라는 말을 소리 내었을 때 그 소리와 글로 적었을 때 그 글자는 같은 정보를 다르게 코딩한 것이다. 코드의 가장 중요한 원칙은 서로 약속이 되어 있어서 같은 뜻으로 해석되어야 한다는 것이다. 그러지 않으면 사랑한다고 했다가 뽀 맞는다. (합의가 되어 있어도 맞는 경우는 있다.)

설명을 간단히 하기 위해서 앞에서는 생략했지만 굳이 따지자면 말도 코드라고 할 수 있다. 즉, 내 맘속에 있는 사랑한다는 감정을 "사랑"이라는 두 음절의 말로 바꾸는 것도 코딩이고 코딩의 결과인 "사랑"을 두 음절의 소리나 두 글자로 표현하는 것도 코딩이라고 할 수 있다. 즉, 우리의

¹ 그림 출처. <http://file10.uf.tistory.com/image/124312364FED5F5E046201>

메시지는 실은 코딩된 것을 또 코딩하고 또 코딩하는 과정을 여러 차례 거쳐서 전달되는 것이다.

개념/정보/데이터를 코딩하기 위해서 컴퓨터에서는 코드 테이블을 쓰는데 그 중 가장 흔히 쓰이는 것이 아스키(ASCII, American Standard Code for Information Interchange)나 KS X 1001 이며 특히 글자의 경우에는 유니코드(Unicode)가 널리 쓰인다. 예를 들어, 아스키 코드 체계를 따르자면 알파벳 대문자 'A'에 해당하는 코드는 이진수로 나타내면 1000001 이다. 그럼 이 이진수를 어떻게 구리선을 통해 전달할까? 간단히 생각해보면 전기를 흐르고 안 흐르게 하는 것이다. 전기가 흐르면 1 아니면 0을 나타내는 것으로 약속하는 것이다. 그럼 보내는 쪽에서 전기를 "흐안안안안안흐" 르게 하면 상태가 "아! A" 라고 알아 듣는 식이다. (물론 이 방식에는 문제가 많다. "안~~~~"하고 있을 때 이게 0이 몇 개인지 정확하게 세려면 보내는 쪽과 받는 쪽이 단위 신호의 길이에 대하여 아주 정확하게 약속을 해야 한다. 또한, 무슨 이유에서건 중간에 연결이 끊기고 나면 어디서 끊어 읽어야 할 지 문제가 될 것이다. 잘못 끊어 읽으면 아버지가 가방에 들어가시고 예수가 까마귀를 쫓는 사태가 발생한다.

이때까지 살펴본 바와 같이 어떤 매체를 통해 전달하려고 할 때 그 매체에서 전달하기 좋게 코드로 표현하는 방식을 다루는 규격을 물리적 계층 또는 L1(layer 1)이라고 부른다. 즉, 물리적 계층은 하나의 홑에서 양 쪽이 서로 어떤 식으로 신호를 흘려 보낼까를 책임지는 계층이라고 보면 되겠다.

1.3 회선 vs. 패킷

앞서 실 전화기 이야기를 하면서 결국 전화기도 마찬가지로 두 전화기 사이에 선이 연결되어 통화가 된다고 설명하였다. 그럼 여기서 의문. 그런 식으로 선이 연결되어 있다면 한 쌍의 전화기는 통화가 되겠지만 또 다른 집하고는 어떻게 통화하나? 그래서 (요즘 어린이들은 들어본 적이 없겠지만) 전화교환양² 필요하다. 전화교환양은 전화국에 앉아서 일한다. 각 가정의 전화기는 전화교환양의 전화기와 (실 전화기처럼) 곧바로 연결되어 있다. 내가 집에서 전화기를 들면 전화교환양과 바로 연결된다. 그 상태에서 "순돌네랑 연결해주세요"라고 하면 전화교환양은 내 집 전화기 선과 순돌네 전화기 선을 전선으로 연결해준다. 그럼 내 전화기와 순돌네 전화기가 직접 연결된 상태가 되고 통화가 가능한 것이다.

² 이 표현에 대하여 성차별 또는 특정 직업을 비하한다는 지적도 있으나 실제 이 직업이 있었을 당시의 표현을 그대로 쓴 것임을 이해해주시기 바란다.



그림 2 탄나라 전화교환양 사진. 앞에 있는 패널(패치 패널이라고 부름)에 있는 구멍 각각이 가정의 전화기와 연결되었다고 보면 된다. 통화하려는 두 전화기 구멍을 손으로 잡고 있는 전선(패치 코드라고 부름)으로 서로 연결하면 두 전화기는 서로 연결된 상태가 된다.³

만 집과 통화하고 싶다면 (전화교환양에게 부탁해서) 또 만 집으로 선의 연결 상태를 바꾸면 된다. 이러한 방식을 회선을 바꾸는 연결하는 것이므로 **회선** 교환 방식이라고 부른다. 물론 요즘은 말로 상대방을 얘기하는 대신 숫자판을 누르고 전화국에는 전화교환양 대신 숫자판 누리는 소리를 듣고 회선을 교환해주는 장치 즉, 전자교환기가 있을 뿐 원리상으로는 똑같다.

여기서 주목할 점은 내가 순돌네랑 통화하고 있을 때 내 전화기 ↔ 전화국 ↔ 순돌네 전화기 사이에는 하나의 회선처럼 연결된 상태이며 이 회선을 통해서는 “오직 내 통화만” 전달된다는 것이다. 하지만 조춘자-장소팔 커플이(이 분들을 모르는 젊은 독자를 위해서라면 속사포 래퍼 아웃사 이더 같은 사람 둘이) 통화를 하고 있는 것이 아니라면 그 회선은 많은 시간을 놓고 있을 것이다. 앞의 예에서는 설명을 간단히 하기 위해서 나와 순돌네가 같은 전화국에 연결되어 있다고 (즉, 한 동네에 산다고) 가정했지만 만약 멀리 떨어져 있다면 전화국과 전화국 사이의 회선도 우리의 통화를 위해 “전용으로” 할당되어 있어야 한다.

이런 낭비를 피해서 하나의 회선을 공유할 수는 없을까? 그게 바로 **패킷** 교환 개념이다. 패킷 교환 방식에서는 보내려는 데이터를 적절한 크기로 조각 내서 각각의 조각을 네트워크를 통하여 전송한다. 시간을 정해놓고 그 시간 동안은 나만 미끄럼을 타는 것이 회선 교환 방식이라면 착한 아이들처럼 번갈아 가면서 미끄럼을 타는 것이 패킷 교환 방식이다. 그래서 미끄럼틀 하나만 있어도 여러 아이가 모두 행복할 수 있다. 하지만 내가 딱 타고 싶을 때 탈 수 있다는 보장이 없다는 것이 패킷 교환 방식의 단점이다. 예를 들어, 인터넷에서 파일을 내려 받을 때 지금 받아도 되고 1/10초 뒤에 받아도 되지만 말을 그런 식으로 지연시켜서 전송한다면 아마 짜증 나서 통화가

³ 그림 출처. <http://tpmdc.talkingpointsmemo.com/2011/07/voters-jam-capitol-phone-lines.php>

안될 것이다. 따라서, 패킷 교환 방식은 굳이 실시간으로 데이터를 보낼 필요가 없는 컴퓨터 통신에 적합하고 회선 교환 방식은 실시간으로 보내야 하는 음성 통화에 적당한 기술이라고 할 수 있다. (물론 기술의 발전으로 이러한 차이는 지금으로선 큰 의미가 없다.)

패킷 교환 방식의 가장 큰 장점은 하나의 회선을 공유하여 회선의 활용도가 높아진다는 것이지만 또 한가지 주목할 점은 통신을 하고 있는 양 당사자를 단 하나의 회선으로 연결할 필요가 없다는 점이다. 그림 3에서처럼 어떤 구간을 연결하는 회선이 둘이 있다면 이 둘을 다 이용할 수 있으므로 일부는 이쪽으로 일부는 저쪽으로 가도 되고 심지어 둘 중에 한 회선이 망가지면 평소에 안가던 길로 돌아가도 된다.

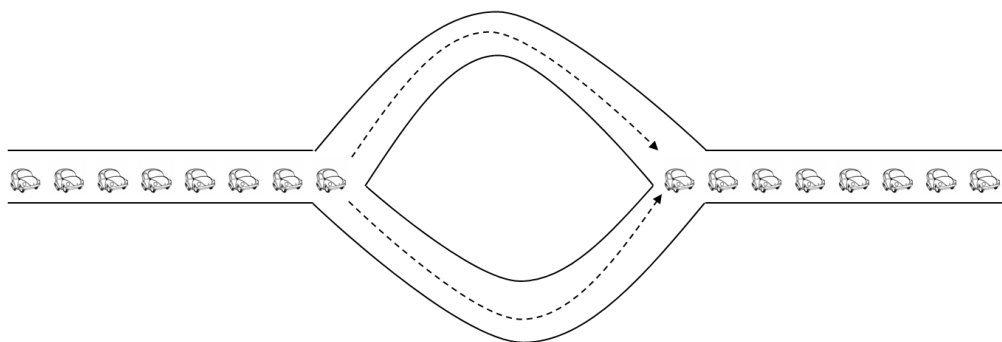


그림 3 길을 골라서 갈 수 있는 자유

즉, 패킷 교환 방식은 회선의 활용도를 높일 뿐만 아니라 여러 회선을 뒤섞어서 이용할 수 있으므로 일부 회선이 망가지더라도 돌아서라도 가는 길이 있으면 연결될 수 있다는 장점이 있어서 현재의 컴퓨터 네트워크는 패킷 교환 방식을 쓰고 있다.(고 대략 생각해도 크게 틀리는 않다.)

그럼 패킷 교환 방식은 누가 발명했을까? MIT(메사추세츠 공과대학)의 레너드 클라인락은 패킷 교환 방식을 다룬 최초의 논문을 1961년에 발표하였다. 한편, 같은 시기에 영국의 NPL(국립물리연구소, National Physical Laboratory)의 도널드 데이비스와 로저 스캔틀베리는 물론이고 RAND(랜드) 연구소의 폴 바란도 같은 생각을 갖고 연구를 하고 있었다는 점이다. 즉, 세 군데 연구소에서 같은 연구를 우연히 하고 있었다. 심지어 폴 바란은 미국 공군의 요청으로 생존 통신 기술 즉, 일부 회선이 끊어지는 등의 상황이 벌어져도 계속 통신할 수 있는 기술을 연구한 결과로서 패킷 통신 기술을 1961년 여름에 미공군에 제공한 바 있다. 우리가 현재까지 쓰고 있는 패킷이라는 용어는 영국 국립물리연구소에서 쓰던 용어를 따온 것이다.

2 MAC 또는 Layer 2

2.1 혼선을 피하는 법

무전기를 써보지 않은 사람이라도 이 말은 알고 있을 것이다. "오바". 할 말을 다 했으면 끝에 꼭 "오바"를 붙여줘야 된다. 그럼 이쪽에서 할 말을 다 했다는 것을 상대가 알고 자기가 할 말을 시작한다. 왜 이런 절차가 필요한가?

앞에서 설명한 시스템으로 생각해보자. 한 쪽에서 데이터를 보낼 것이 있어서 "안흐흐안"이라고 했는데 반대편도 보낼 데이터가 있다고 동시에 "흐안안흐"르게 해버리면 결과적으로는 "흐흐흐흐"

르게 되어 완전 다른 얘기가 되어 버린다. 즉, 신호의 혼선이 발생하는 것이다. 따라서, 코드를 전송하는 회선이 공유되는 상황에서는 혼선을 막기 위해서 한쪽이 다 보냈다는 것이 확인할 수 있도록 끝에 “오바”를 붙이게 하는 새로운 약속이 필요한 것이다. 그렇다면 이 새로운 약속으로 문제는 해결되는가? 그렇지 않다.



그림 4 눈치껏 빨리 번호 붙이기 놀이⁴

이름은 모르겠는데 아이들의 놀이 중에서 번호를 차례로 붙이며 일어서는 놀이가 있다. 누군가 “1” 하고 일어섰다 앉으면 눈치보고 있다가 “2” 하고 일어섰다가 앉는 식이다. 여기서 눈치를 보는 이유는 두 사람이상이 동시에 번호를 붙이며 일어나면 그 사람들 모두가 벌칙을 받는다. 동시에 번호를 붙이는 일 없이 끝까지 가면 아직 번호를 외치지 못하고 남은 한 사람이 벌칙을 받는다.

이 놀이에서 알 수 있듯이 상대방 말의 끝을 알 수 있어도 여전히 혼선은 생긴다. (심지어 둘이 대화해도 마찬가지다. “오바”라고 했는데 한참 기다려도 상대방이 아무 말도 안 해서 내가 얘기를 시작하는 순간 상대가 마침 얘기하면 또 혼선이 된다.) 그럼 혼선을 막으려면 어떻게 하면 되나? 추가의 약속과 희생(다르게 표현하자면 낭비)이 필요하다.

예를 들어, 순번을 정해서 보내면 된다. 매시 0분, 2분, 4분,... 에는 내가 보내고 1분, 3분, 5분, ... 에는 네가 보낸다. 그럼 혼선 생길 일은 없지만 대신 한쪽이 다른 쪽에 비하여 수다스러운 경우 (예를 들어, 인터넷에서 자료를 내려 받는다면 서버 쪽에서 내 컴퓨터 쪽으로 데이터를 보낼 일은 많아도 내 쪽에서 보낼 일은 없으므로 전체 통신 가능한 용량의 대략 절반은 허비하게 될 것이다.) 물론 사용자 수가 늘어난다면 다 쪼개면 된다. 사람 수가 늘어나도 쉽게 나눌 수 있고 혼선을 확실히 피할 수 있지만 허비되는 영역이 많다는 단점이 있다. 이러한 분배 방식을 시분할

⁴ <http://www.old-picture.com/american-legacy/001/pictures/Children-Sitting-Circle.jpg>

방식(TDMA, time division multiple access)에서 사용한다.⁵

그런데 시분할 방식을 하려면 정확하게 몇 명이 동시에 쓸 것인지를 알아야 하고 어떤 식으로 배분되는지를 모두가 정확하게 알아야 한다. 따라서, 사용자수가 들쭉 날쭉하면 적용하기가 곤란할 뿐만 아니라 모든 사용자가 골고루 사용하는 경우가 아니라면 낭비가 심하다는 단점이 있다. 그렇다면 이렇게 해보면 어떨까? “아무도 안 보내고 있으면 일단 보내고 혼선이 생긴 것 같으면 기다렸다 또 보낸다” 이 기막힌 아이디어로 하버드 대학에서 1973년에 박사학위를 받은 사람이 메트칼프의 법칙으로도 유명한 메트칼프다.⁶ 그 발명이자 제품인 이더넷(Ethernet)에서는 CSMA/CD라는 기법을 사용하는데 그 의미는 다음과 같다.

- CS: carrier sense 남이 보내나 안 보내나 느껴 보고 안 보내면 내가 보낸다.
- MA: multiple access 이런 짓을 여러 놈이 동시에 할 수 있다. 즉, 하나의 매체를 여러 놈이 공유한다.
- CD: collision detection 충돌(혼선)이 났는지 확인해서 충돌 나면 전송을 중지했다가 나중에 보낸다.

이 방식은 실은 우리가 일상 생활에서 많이 보는 방식이기도 하다. 예를 들어, 회사에서 화장실을 쓸 때 일단 누군가 쓰고 있나 본다. (CS) 쓰고 있으면 자리에 갔다가 좀 있다 다시 가본다. (이때 다시 가볼 때까지 지연 시간을 일정하게 하면 많은 사람이 계속 같은 시간에 화장실에 갔다가 허탕치는 것을 반복할 수 있으므로 지연 시간은 랜덤으로 해야 된다. 이더넷에서도 랜덤을 되어 있다.) 아무도 안 쓰는 것 같아서 들어가려고 하는데 누군가 동시에 들어가려고 하면 한쪽이 양보한다. (CD)

⁵ 비슷한 개념으로서 우리나라의 휴대폰에 쓰이는 CDMA 방식이 있다. 여기서 C 는 code 로서 시간을 나누는 대신 코딩 방식을 다르게 하는 것이다. 즉, 각 사용자가 동시에 신호를 보내되 각기 다른 (하지만 혼선을 일으키지 않는) 코딩 방식을 쓰게 하는 것이다. 혼선을 일으키지 않게 하는 코딩 방식 중 우리나라의 휴대폰에서 쓰는 방식이 스프레드 스펙트럼 방식이다. CDMA는 아래의 CSMA/CD와 다른 것이므로 혼동하지 말 것.

⁶ 현재 가장 널리 쓰이는 랜(LAN, local area network, 근거리 네트워크) 기술인 이더넷(Ethernet)을 발명한 사람. “PC와 LAN이 널리 보급되면서 인터넷 발전의 기반이 되는데 그 중에 특히 1973년 제록스 파크(Xerox PARC, Palo Alto Research Center)의 메트칼프가 만든 이더넷 기술이 결정적이다. 이로 인해 이전의 적절한 수의 시분할 컴퓨터가 연결되는 아르파넷 모델에서 많은 네트워크가 연결되는 인터넷 모델로 바뀌게 된 것이다.” (그래서 등장한 개념이 A/B/C 클래스 개념) [1] 또한 랜 전문기업인 3Com을 창업했다. 주력 상품은 XNS 기반의 이더시리즈(EtherSeries). 참고로, 메트칼프의 법칙은 메트칼프가 만든 것이 아니다.

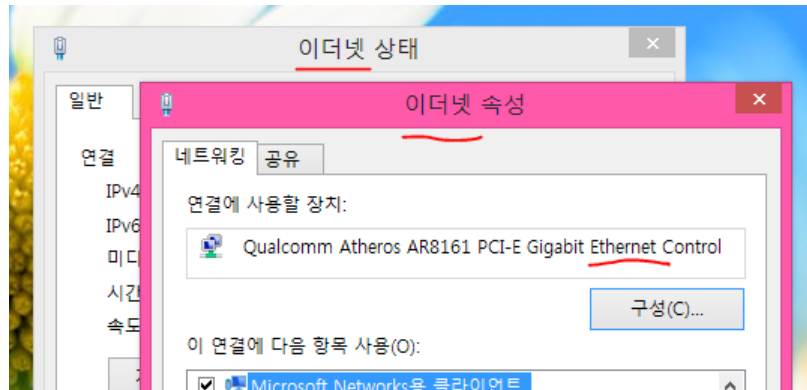


그림 5 이더넷이 대세입니다.

이 방식은 같은 매체를 공유하는 컴퓨터의 수가 많아지면 거의 항상 충돌과 대기가 일어나게 되어 통신이 마비가 될 수 있는 단점이 있지만 그런 특별한 경우를 제외한다면 아주 효율적인 방식이라고 할 수 있다. 컴퓨터 네트워크의 역사에 초기에는 전송률을 보장해줄 수 있는 TDMA 방식이 더 널리 쓰였지만 점차 효율도 높고 설치하기도 편리한 CSMA가 대세가 되어 지금은 시중에서 랜이라고 하면 다 이더넷 방식을 쓰고 있다고 봐도 무방하다.⁷ CSMA나 TDMA처럼 매체를 공유하는데 나타나는 문제를 해결하기 위한 규격을 싸잡아서 MAC(medium access control, 매체 접근 조정) 계층 규격 또는 L2(layer 2, 2계층) 규격이라고 하며 이 계층에서 데이터 전송은 당연히 패킷 단위로 이뤄지며 각각의 패킷은 MAC 패킷이라고 부른다.

2.2 왜 MA를 해야 되나?

앞서 하나의 매체를 여러 컴퓨터가 공유할 때 나타나는 문제와 해결 방법을 살펴보았다. 그렇다면 이렇게 복잡하게 할 것 없이 매체를 공유하지 않으면 될 것 아닌가? 맞다. 공유하지 말고 전용 직통 회선을⁸ 뚫어버리면 내가 보내고 싶을 때 막 보내도 충돌이 날 것 없다. (그림 6에서 fully connected가 그런 경우다.) 그렇게 안 하는 이유는? 땅이 좁아서. 진짜? 계산을 해보자.

⁷ 랜의 초창기에 많이 쓰였던 토큰 링 방식과 이더넷 방식을 비교하면 딱 것은 차치하고서라도 회선의 구성과 일부 회선에 문제가 생겼을 때 해결의 편의성 면에서 비교가 안될 정도이다. 하지만 이는 이 글에서 다루기에는 너무 긴 얘기라 생략.

⁸ 남북한 당국자간에 맨날 꿇었다 이었다 하는 직통회선(또는 핫 라인)이 이런 방식이다. 회선을 공유하지 않고 두 전화기를 전용으로 직통으로 잇기 때문에 전화를 걸 필요도 없이 들기만 하면 통화가 된다고 생각한다).

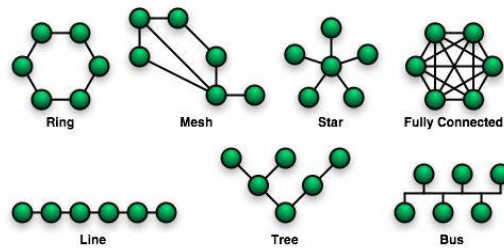


그림 6 네트워크를 연결하는 여러 방법 - 전문 용어로 토폴로지라고 한다.⁹

전 세계에 백 억 대의 컴퓨터가 있다고 하자. 내 컴퓨터에서 백억에게 연결하려면 내 컴퓨터로 백 억 개의 회선이 들어와야 한다. 백 억 개의 회선을 가로 세로 100 마이크로(즉, 0.1 밀리미터)를¹⁰ 차지하는 회선으로 만들면 가로 세로 10미터가 된다. 이런 선을 지구 둘레만큼 돌려서 깔아야 되니 그 가로 세로 10미터에 길이가 4만 킬로미터짜리 케이블이 컴퓨터 한대 마다 필요하다. 그런데 정작 문제는 그래 봤자 나 혼자 쓸 수 있을 뿐이다. 그런 컴퓨터가 다시 백 억 대가 있으니 케이블의 단면적은 (높이는 세로 즉, 10미터로 가정하면)

4만 킬로미터 x 10 x 10 미터 x 100 억 = 4,000,000,000,000 제곱 킬로미터

가 되고 지구의 표면적이 500,000,000 제곱 킬로미터쯤 되므로 전 지구에 펼쳐 놓으면 높이가 대략 8만 킬로 미터가 된다. (땅을 아무 파도 물을 곳이 없다.) 그래서 현재는 그림 6의 여러 방식 중 버스(bus) 방식 즉 하나의 매체(전선)를 모든 컴퓨터가 공유하는 방식이 일반적으로 쓰이고 있다.

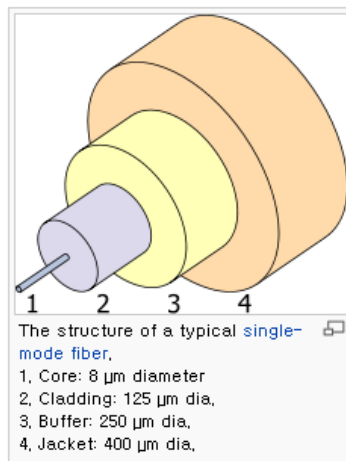


그림 7 광 케이블의 구성 ¹¹

⁹ 그림 출처. http://wiki.laptop.org/images/2/2b/Network_topologies.jpg

¹⁰ 광 케이블의 굵기가 머리카락과 비슷한 굵기로서 대략 125 마이크로 즈름 된다. 겉에 껍데기 씌운 부분 등을 빼고.

¹¹ 그림 출처. https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber

2.3 MAC 주소는 뭐임?

그래서 혼선이 나는 것을 감수하고서라도 하나의 매체(대개는 전선)을 수 십 대의 컴퓨터가 공유해서 네트워크를 쓰는 것이다. 그런데 하나의 매체를 여러 컴퓨터가 공유하면 혼선 문제만 생기는 것이 아니다. 내가 보내려는 데이터를 누구에게 보내는 것인지 표시를 해야 된다. 그러지 않는다면 듣는 쪽에서 들어야 할 애기와 듣지 않아도 될 애기가 뒤죽박죽 되어 무슨 애긴지 알 수 없게 되어버릴 것이다. 그래서 데이터를 보낼 때는 꼭 그 데이터를 받을 상대 컴퓨터가 누군지를 표시해야 한다. 이 때 데이터를 받아야 할 각 컴퓨터(더 정확히는 그 컴퓨터의 특정 네트워크 카드)의 고유한 이름을 MAC 계층에서 사용한다고 하여 MAC 주소라고 한다. MAC 주소는 네트워크 카드마다 고유하며 네트워크 카드를 생산할 때 공장에서 고유한 번호를 펌웨어에¹² 구워 넣는다. (MAC 주소는 펌웨어에 들어 있으므로 실제로는 언제든지 변경 가능하며 특별한 경우에 이를 수정하는 경우도 있다.) 그럼 MAC 주소를 이용하여 어떻게 데이터가 뒤죽박죽 되는 것을 피할 수 있나?

컴퓨터가 데이터를 보낼 때는 그 데이터만 보내는 것이 아니라 여기에 MAC 주소를 앞에 붙여서 보낸다. 흡사 편지를 보낼 때 편지를 봉투에 담고 봉투에는 받을 상대의 주소(와 보내는 사람의 주소)를 적는 것과 같은 원리이다. 컴퓨터 네트워크에서는 봉투에 해당하는 부분은 헤더(header, 머리)라고 하고 편지에 해당하는 부분을 페이로드(payload, 짐)라고 한다. 헤더에는 MAC 주소 외에 다른 정보도 들어가지만 이 글의 범위를 벗어나므로 생략한다. 헤더와 페이로드를 한 덩어리로 전송하는데 이것이 앞서 설명한 MAC 패킷이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 실제 보내려는 데이터(DATA)의 앞 부분에 헤더가 붙어 있다. 그리고 맨 뒤에는 4바이트의 확인용 정보가 붙어 있어서 전송 중에 패킷이 깨졌는지 따위를 알 수 있다.

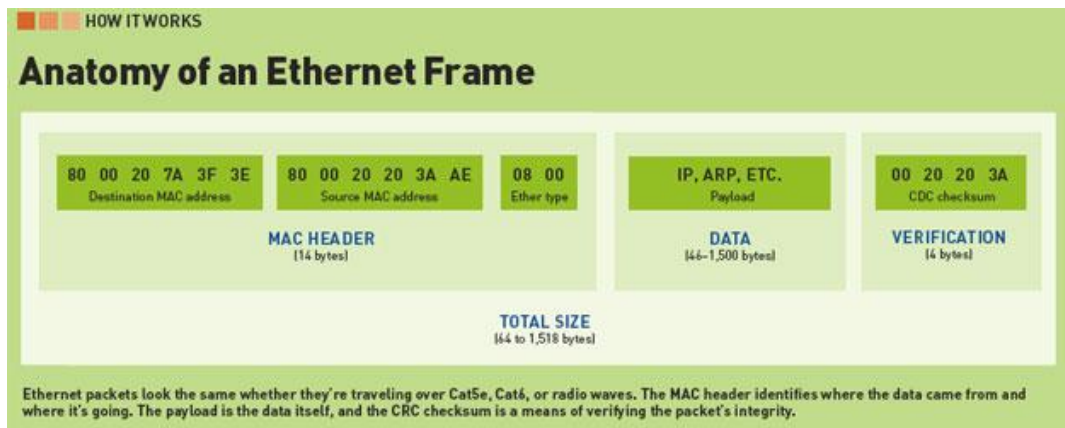


그림 8 이더넷에서 MAC 패킷의 모습¹³

데이터는 누구에게 보내려는 것인지 헤더를 달고 오므로 받는 쪽에서는 헤더를 보고 자기 것이면

¹² 비휘발성 메모리에 저장된 프로그램과 데이터. 특별한 장치와 프로그램을 쓰면 소프트웨어처럼 변경 가능하지만 일반 사용자 입장에서는 하드웨어처럼 변경이 불가능하다고 대개는 인식한다.

¹³ 그림 출처. <http://www.tech-juice.org/wp-content/uploads/2011/06/ethernetframe.png>

받고 아니면 그냥 버리면 된다. 헉? 잠깐.

받지 않아야 할 데이터를 거르는 것은 받는 쪽의 책임이다. 즉, 굳이 버리지 않는다면 모든 데이터를 다 받을 수 있다는 얘기다. 따라서, 현재의 컴퓨터 네트워크에서는 내게 보낸 데이터가 아닌 것을 버리는 기능을 꺼버리면¹⁴ 남들이 주고 받는 모든 데이터를 다 볼 수 있다. 별도의 도청 기능이 필요한 것이 아니다. 말하자면 광장 같은 데서 큰 소리로 서로 얘기하는 것과 같다고 생각하면 된다. 남의 얘기를 들을까 말까 하는 것은 듣는 사람의 재량이다. 다시 한번 말하지만 컴퓨터 네트워크에서 당신이 보내는 모든 것은 남들이 다 보고 있다. (그럼 비밀스럽게 통신하려면 어떻게 해야 되나? 이는 제5장에서 다룬다.)

3 서브 네트워크, IP 그리고 Layer 3

3.1 왜 네트워크를 쪼개야 하나?

여기까지 배운 기술 즉, 버스와 MAC 규격을 이용해서 전 지구를 연결하는 네트워크를 만들었다고 하자. 즉, 그림 9에 나온 것처럼 하나의 엄청나게 긴 전선을 깔고 모든 컴퓨터를 이 전선에 연결했다고 하자. 그럼 어떻게 될까? 통신이 거의 불가능하다. 왜? 너무 많은 컴퓨터가 다들 데이터를 보내고 싶어 하니 서로 눈치고 줄 서고 기다리다가 날새는 것이다. 명절 연휴 마지막 날 휴게소 화장실을 생각해보라.

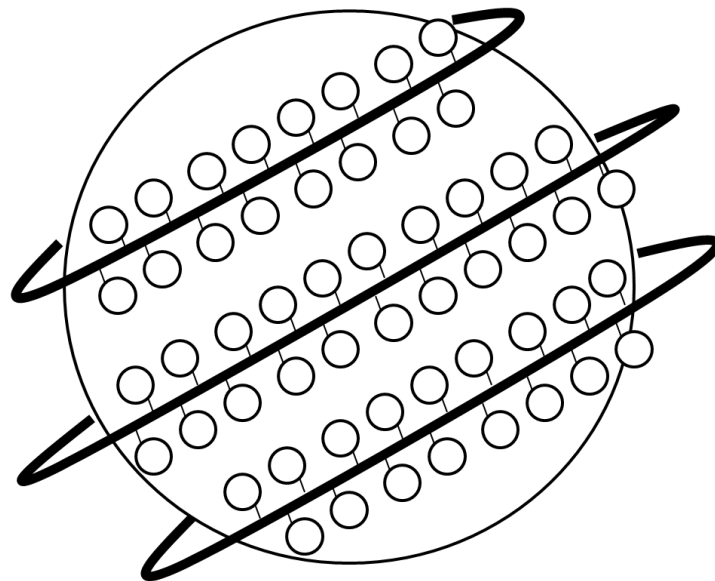


그림 9 전 지구 단일 회선 네트워크 (그리느라 고생 했음)

¹⁴ 이렇게 꺼버리고 다 받는 것을 프로미스큐어스 모드(promiscuous mode, 난잡 모드 ^^)라고 한다. 이 글의 범위를 훌쩍 벗어나는 얘기지만 비싼 네트워크 스위치에서는 매체를 공유하지 않게 함으로써 속도를 높인다. (대신 스위치 내부 구성이 복잡해지고 그래서 가격이 비싸다.) 따라서, 프로미스큐어스 모드로 하더라도 모든 데이터를 다 볼 수 없게 된다. 보안 관제를 위하여 대개 이러한 스위치에서는 프로미스큐어스 포트를 따로 제공해서 여기에 컴퓨터를 연결하면 모든 데이터를 볼 수 있게 된다.

만약 컴퓨터들이 데이터를 보낼 일이 거의 없어서 줄을 설 일은 거의 없다고 하면 될까? 그래도 안 된다. CSMA/CD 방식의 첫 단계는 CS 즉, 누가 데이터를 보내고 있는지 아닌지 확인하는 단계인데 이게 너무 오래 걸린다. 왜? **빛이 너무 느리기 때문이다.** 대부분의 사람들에게 생소하겠지만 컴퓨터를 하는 사람들에게 빛은 너무 느리다. 물리학의 이론에 따르면 빛 보다 빠를 수는 없다는 데 앞날이 참으로 암담하다. 얼마나 느린지 보자.

어렸을 때 많이들 들어본 이야기. “빛은 1초에 지구를 일곱 바퀴 반이나 돈다.” 빛의 속도가 대략 초속 30만 킬로미터이고 지구의 둘레가 대략 4만 킬로미터이기 때문에 저 산수가 맞다. 그렇다면 한 바퀴 도는 데는 1/7.5 초(= 0.1333초)가 걸린다는 얘기고 내가 네트워크 버스에 쏜 신호가 전기 또는 빛의 형태로 지구 반대편 누군가에게 전달되는데 (직선으로 반듯이 간다고 해도) 대략 0.1초는 걸린다는 얘기도. 즉, 누군가 데이터를 보내고 있는지 아닌지 확실히 확인하려면 대략 0.1초 이상은 기다려봐야 된다는 얘기도. 요즘 네트워크 카드가 대개는 초당 몇 기가비트를 전송할 수 있고 좀 성능이 떨어지는 것도 초당 100메가비트의 데이터를 보낼 수 있으므로 0.1초면 대략 1메가바이트의 파일을¹⁵ 전송할 시간인데 그런 정도의 시간을 그냥 속절없이 기다린다? 속 터질 노릇이다. 마찬가지로 CD 단계에서 충돌이 났는지 아닌지 확인하려면 대략 0.2~0.3 초 정도를 기다려야 한다.

이러한 비효율을 다 참을 수 있다고 하더라도 만약 그 선이 어디선가 끊어진다면 지구 전체의 네트워크가 한꺼번에 중단된다. 이는 도저히 용서할 수 없는 사태다. 그 외에도 아직 설명하지 않은 (아래에서 설명할) 여러 이유 때문에 버스 형태의 공유 매체는 너무 길면 안 된다.

3.2 일단 쪼개보자

로마의 카이사르나 프랑스의 나폴레옹이 즐겨 사용했다는 “쪼개서 정복한다(divide and conquer)”라는 작전은 실로 다양한 곳에 적용된다. 지구 규모의 네트워크도 당연히 쪼개서 풀어야 한다.

그럼 네트워크를 적절한 크기로 다 쪼갰다고 하자. 즉, 공유 되는 버스를 짧게 만들고 가까이 있는 컴퓨터끼리 여기에 다 연결했다고 하자. 그럼 그 버스에 연결된 컴퓨터끼리는 통신이 잘 될 것이다. 하지만, 이렇게 하면 서로 다른 버스에 연결된 컴퓨터끼리는 통신이 될 수 없다.

그럼 어떻게 하나? 떨어진 네트워크를 서로 연결해주는 녀석이 필요하다. 그런 녀석을 우리 네트워크와 다른 네트워크 사이의 관문 역할을 한다고 하여 게이트웨이(gateway)라고 부른다. 직접 네트워크 설정을 해 본 사람들은 다들 들어본 말일 것이다. 그럼 게이트웨이가 뭘 할까?

¹⁵ MP3로 된 짧은 노래 한 곡쯤 되는 분량.

일반

네트워크가 IP 자동 설정 기능을 지원하면 IP 설정이 자동으로 할당되도록 할 수 있습니다. 지원하지 않으면, 네트워크 관리자에게 적절한 IP 설정값을 문의해야 합니다.

☐ 자동으로 IP 주소 받기(O)

☒ 다음 IP 주소 사용(S):

IP 주소(I): 10 . 23 . 10 . 81

서브넷 마스크(U): 255 . 255 . 255 . 0

기본 게이트웨이(D): 10 . 23 . 10 . 1

☐ 자동으로 DNS 서버 주소 받기(B)

☒ 다음 DNS 서버 주소 사용(E):

기본 설정 DNS 서버(P): 10 . 20 . 10 . 253

보조 DNS 서버(A): . . .

☐ 끝낼 때 설정 유효성 검사(L) 고급(V)...

그림 10 마이크로소프트 윈도우8의 네트워크 설정 화면에서 게이트웨이 지정 부분

떨어진 두 네트워크를 연결해야 되니 한 네트워크 당 하나씩 네트워크 카드가 달린 즉, 네트워크 카드가 두 개 달린 컴퓨터라고 생각하면 된다. 그림 11에서 게이트웨이는 한 쪽의 네트워크 카드로는 네트워크1에 또 한 쪽으로는 네트워크2에 **속해 있음으로써** 두 네트워크를 연결한다. 뭐 그렇다고 덜렁 이렇게 연결만 하면 된다고 하면 너무 쉽지? 게이트웨이는 뭘 해줘야 할까?

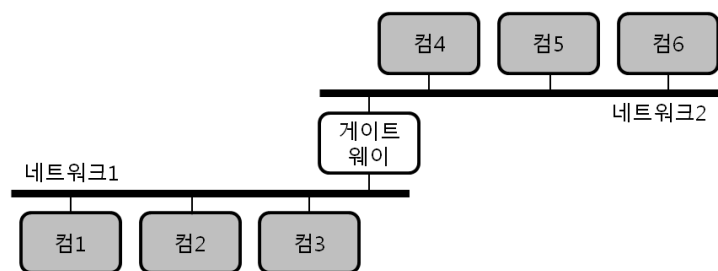


그림 11 게이트웨이는 두 네트워크를 연결할 수 있다

당연히 게이트웨이는 네트워크1에서 전송된 패킷을 받아서 네트워크2로 보내고 네트워크2에서 전송된 패킷을 받아서 네트워크1로 보내야 할 것이다. 그럼 되나? 처음에는 된다. 하지만, 규모가 커지면 안 된다. 달랑 두 네트워크만 서로 연결하면 되는 것이라면 그렇게 해도 된다. (이렇게 무작정 연결하는 것을 “브릿지”라고 부른다. 집으로 들어온 하나의 전화 회선에 여러 대의 전화기를 연결해서 쓰는 경우가 있(었)는데 그것도 브릿지다.)

예를 들어, 한 네트워크에서 평균 초당 10개의 패킷이 전송되고 대략 100 개가 전송될 때까지는 문제가 없고 그 이상이 되면 서로 충돌이 나서 쓸 수 없다고 하자. 두 네트워크를 브릿지하게 되면 이웃 네트워크의 패킷까지 나 우리 네트워크에 돌아다니니 초당 20개의 패킷이 보일 것이다.

이런 식으로 한 네트워크를 추가로 브릿지할 때 마다 돌아다니는 패킷의 수가 늘어나서 결국 네트워크를 10개쯤 붙이면 쓸 수 없게 될 것이다.

이 장면에서 문제의 원인을 분명히 해보자. 원인은 우리 네트워크에 꼭 전송되지 않아도 될 패킷까지 브릿지를 통하여 넘어온다는데 있다. (만약, 꼭 전송되어야 할 패킷의 총량이 우리 네트워크가 감당할 수 없을 정도로 많다면 다른 기술을 쓰던지 사용자들을 잡아서 족쳐야지 네트워크가 어떻게 해줄 수 있는 문제는 아니다.) 그럼 우리 네트워크에 꼭 전송되어야 할 패킷만 받으면 된다. 즉, 우리 네트워크에 연결된 컴퓨터의 목록을 알고 있다면 그 컴퓨터로 가야 할 패킷만 다른 네트워크에서 보내주면 된다.

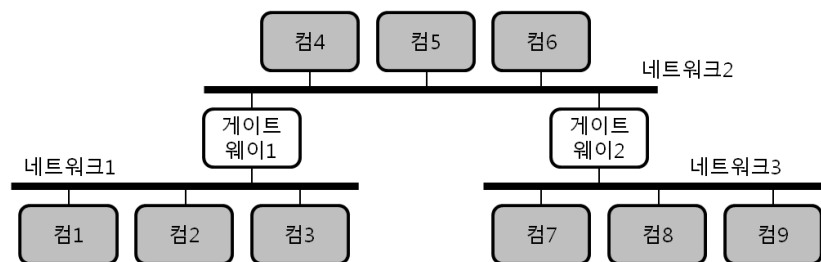


그림 12 네트워크가 셋으로 늘어나면

그림 12를 예로 든다면, 게이트웨이는 넷1에는 컴1,2,3, 넷2에는 컴4,5,6, 그리고 넷3에는 컴7,8,9가 연결되어 있다는 것을 **어떻게든** 안다고 생각해보자. 즉, 각 게이트웨이가 다음과 같은 표를 각자 갖고 있다고 생각해보자.

컴퓨터	소속 네트워크
컴1	넷1
컴2	넷1
컴3	넷1
컴4	넷2
컴5	넷2
컴6	넷2
컴7	넷3
.....	...

만약 컴1이 컴5에게 보낼 데이터가 있어서 패킷을 쏘면 게이트웨이1이 컴5는 넷2에 있다는 것을 아니까 받아서 넷2에 다시 쏜다. 그럼 컴5가 받게 된다. 거기까지는 좋다. 그럼 이번에 컴2가 컴7에게 보낼 데이터가 있어서 패킷을 쏘었다고 하자. 게이트웨이1은 이 패킷의 수신자가 넷1에 있지 않기 때문에 자기가 대신 받아서 넷3으로 전달해줘야 한다는 것까지는 알고 내가 넷1,2에 연결된 것까지는 아는데 문제는 넷2에 그 패킷을 쏘도 넷3으로 전달된다는 것은 모른다는 점이다. 따라

서, 이런 표를 추가로 갖고 있어야 한다.¹⁶

게이트웨이	연결 네트워크
게이트웨이1	넷1 -- 넷2
게이트웨이2	넷2 -- 넷3
.....	...

그럼 이제 네트워크를 계속 연결하더라도 어떻게든 통신은 가능하다. 하지만, 실제로는 이렇게 만들면 거의 동작 안 한다. 여기서의 함정은 위에서 설명한 표를 만들 수 있다는 가정에 있다. 이렇게 해보자. 컴퓨터 한 대를 네트워크에 연결하면 그 사실을 세상의 모든 게이트웨이에게 알려주고 각 게이트웨이는 이 내용을 표에 기록한다. 마찬가지로 게이트웨이가 추가될 때에는 그 정보를 모두에게 알려야 한다.

지구 전체를 통틀어 본다면 새로운 컴퓨터를 네트워크에 추가하는 빈도가 얼마나 될까? 게이트웨이를 추가하거나 연결 상태를 바꾸는 일이 얼마나 될까? 어마어마하게 많을 것이다. 더군다나 요즘처럼 컴퓨터(라고 쓰고 스마트폰이라고 읽는다)가 이동이 가능한 상황에서 이들은 이동하면서 계속 다른 네트워크에 붙었다 떨어졌다 한다. 이 모든 정보를 어떻게 세상의 모든 게이트웨이에 알려줄 것인가? 어차피 이 정보는 전세계 모든 게이트웨이가 다 알아야 하므로 전세계 네트워크 전체에 다 보내야 한다.¹⁷ 만약, 세상에 백 억대의 컴퓨터가 있고 한 네트워크에 대략 백 대가 연결된다면 네트워크랑 게이트웨이도 대략 1억 개쯤 있을 것이다. 따라서, 컴퓨터 하나가 추가되면 그 사실을 알리기 위해 최소 1억 개의 패킷이 전송되어야 한다. 이런 식으로 가다가는 컴퓨터 네트워크가 데이터를 전송하는 것이 아니라 네트워크 연결 상태 정보를 공유하는데 대부분의 시간을 보내게 될 판이다.¹⁸ 이 문제는 어떻게 풀 수 있을까? 새로운 개념이 필요하다. 이를 위해 주소라는 개념을 도입해보자.

3.3 딴 이야기

¹⁶ 네트워크가 단순한 선형 연결이 아니라 임의의 그래프가 되면 최적의 경로를 찾아내기 위한 알고리즘이 필요한데 이 설명은 생략한다.

¹⁷ 이런 식으로 네트워크 전체에 패킷을 다 보내는 것을 홍수(flood)라고 하며 네트워크의 효율을 떨어뜨리므로 특별한 이유가 없는 한 피해야 할 방법이다.

¹⁸ 이 문제는 아니지만 다른 경우에도 이런 문제가 있어서 대부분의 네트워크 알고리즘(algorithm, 문제 처리 절차 또는 방법)은 전달할 정보가 발생하자마자 보내기 보다는 모아 두었다가 일정 주기가 되면 보내는 방식으로 하여 총 전송 패킷 수를 줄이는 수법을 쓴다. 물론, 이런 방식을 쓰게 되면 정보의 정확도는 희생될 수 밖에 없다. 정확도와 부담 사이의 균형이 (네트워크) 알고리즘 설계의 핵심이라 할 수 있다.

주소 개념과 그 유용성을 이해하기 위해서 진짜 주소를 다루는 사례를 잠시 살펴보자.

요즘은 손 편지를 보낼 일이 많지 않아 택배 배달 아저씨로 변신하였지만 우편 집배원 아저씨들의 일상을 살펴보자. “집배원”이라는 단어에서 “집”은 모은다는 뜻이고 “배”는 나눈다(배달한다)는 뜻이다. 즉, 편지를 모아와서 배달해주는 사람들이다. 오산에서 부친 편지가 어떻게 마포의 어느 사무실로 가는지 과정을 보자.

편지를 오산시내 어딘가의 우체통에 넣으면 오산시 우체국의 집배원들이 와서 수거해간다. 수거하는 과정에서는 별다른 절차가 없다. 그냥 다 수거해서 오산시 우체국으로 가져간다. 오산시 우체국은 별다른 분류절차 필요 없이 자기가 속한 큰 우체국인 수원 우편집중국으로 보낸다. 수원 우편집중국에서는 주소에 따라(실은 주소를 처리하기 좋게 코드로 표현한 우편번호에 따라) 어느 우편집중국으로 보낼 것인지 분류하여 해당 우편집중국으로 보낸다. 마포의 경우에는 고양 우편집중국으로 보낸다. 고양 우편집중국은 한번 더 분류하여 마포로 가야 할 다른 편지와 함께 마포 우체국으로 보낸다. 마포 우체국에서는 동네 별로 분류하여 분류함에 넣어두면 각 동네를 담당하는 집배원들이 자기 동네 것을 가져다가 주소를 보면서 배달한다. 이 전달 방식이 잘 동작하는 이유는 첫째, 수거 과정에서는 일체의 정보가 필요 없다. (오산의 어느 우체통부터 수원 우편집중국까지는 일체의 판단 절차 없이 무조건 보낸다.) 둘째, 어디로 가야 하는 지 분류하고 전달하는 것은 소수의 전문적인 우체국(즉, 우편집중국에서 이뤄진다)에서 자동화된 방법으로 이뤄진다. 셋째, 최종 전달은 그 동네 사정을 잘 아는 사람이 한다.

사례를 하나 더 보자. 1960년대에 예일대학을 다녔던 프레드릭 스미스(Frederick W. Smith)는 경제학 수업 시간에 정보 기술을 이용한 당일 배송 시스템을 리포트로 낸 적이 있지만 C학점에 그친 바 있다. (현실성이 없었다나 어쨌다나.....) 나중에 이 개념을 적용하여 배송 회사를 세운 것이 그가 회장으로 있는 FedEx다. 이 개념의 핵심은 허브와 바퀴살이다. 자전거 바퀴를 유심히 보면 가운데 허브(hub)라는 원통이 있고 여기에 가느다란 바퀴살이 켜어 방사형으로 뻗어 나간다. 즉, 택배 시스템도 이런 형태로 전달하는 것이 좋다는 것이 그의 생각 이었다. 그림 13에서 보는 바와 같이 각 도시에는 그 도시의 화물을 모아오거나 배달하는 기능을 두고 다른 도시로의 전달은 일단 허브인 덴버나 LA로 보낸 뒤 그곳에서 다른 도시로 전달하게 한다.

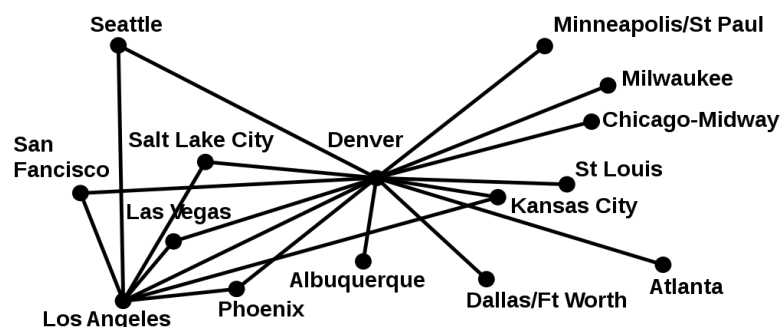


그림 13 공항의 연결 방식도 전형적으로 바퀴살 모양이다. 이 그림에서는 덴버와 LA가 허브 공항이고 여기에서 다른 모든 공항으로 연결된다.¹⁹

¹⁹ 그림 출처. http://en.wikipedia.org/wiki/Spoke-hub_distribution_paradigm

왜 이 방법이 더 좋은가? 첫째 모든 도시를 다 연결하려면 도시 수의 제곱에²⁰ 비례하는 연결편이 필요하다. 그 모든 연결편을 관리하는 것도 비용이 발생하지만 각 연결편이 모두 비행기 또는 트럭이 꼭 찬다는 보장이 없다. 둘째 화물의 분류, 요금 처리나 정확한 배송을 위한 주소확인 등 까다로운 처리는 허브에서만 하면 되고 다른 곳에서는 아무 생각 없이 일단 허브로 보내면 그만이다. 셋째, 새로운 도시에 바퀴살을 추가하는 것은 그 바퀴살이 연결되는 허브에만 영향을 미칠 뿐 다른 모든 도시에서는 알 필요가 없다. 이러한 장점 덕분에 FedEx는 단시간 내에 압도적인 지위를 차지하게 된다.

3.4 IP 주소의 탄생

이들 사례를 앞의 우리 문제와 연결해보자. 우리 시스템에서 게이트웨이는 집배원과 비슷한 역할을 해야 하는데 우리의 경우에는 이들 집배원이 전세계 지리 정보를 다 알고 있어야 한다는 것이 엄청난 부담이었다. 왜 이런 차이가 발생하는가? 주소라는 개념이 없기 때문이다.

우리 문제에서도 각 컴퓨터가 자기를 식별하기 위해서 MAC 주소를 쓴다. 하지만, 이 주소는 말이 주소지 그 녀석이 어디에 있는지는 알려주지 않는다. 따라서, MAC 주소는 주소라기 보다는 이름 또는 식별자(ID, identifier)라고 보는 것이 맞다. 다시 말해서 우리의 문제를 우편 배달 문제로 표현하자면 받을 사람 이름(또는 주민등록번호)가 달랑 적혀 있는 편지 봉투를 달고 배달을 해야 하는 것과 같다. 따라서, 모든 배달부가 모든 사람들의 이름과 있는 곳을 알아야 배달 가능한 것이었다. 따라서, MAC 주소 대신에 집 주소 또는 우편 번호처럼 어디로 보내야 될 지 **힌트를 주는** 주소를 써야 한다. 그런 주소를 IP 주소라고 한다.

IP 주소에서 IP란 인터넷 프로토콜(internet protocol)의²¹ 줄임말이다. 인터넷은 inter - network 라는 뜻으로 여러 개의 네트워크를 연결한다는 뜻이다. 즉, MAC은 하나의 네트워크에서 쓰는 기술이고 IP 는 여러 네트워크를 연결할 때 쓰는 기술이다. 물론 실제 전달은 이 둘이 협력을 해야 전달이 되는 것이고.

그럼 IP 주소는 어떻게 생겼고 어떻게 붙이는가? IP 는 여러 번 개정되었고 현재 가장 널리 쓰는 것은 넷째(IPv4, IP version 4)와 여섯째(IPv6, IP version 6)다. 설명의 편의를 위해서 IPv4를 기준으

²⁰ 쓸데 없이 정확하게 표현하자면 $n(n-1) / 2$ 단, n 은 도시의 수.

²¹ 프로토콜이라고 하면 통신 프로토콜을 줄여서 하는 말이다. 통신 프로토콜이란 컴퓨터 통신에서 서로 어떤 순서로 어떤 내용을 어떤 형태로 주고 받을 지를 정해 놓은 것을 말한다. 원래 프로토콜은 (많은 서양 말이 다 그렇듯이)그리스에서 온 말이다. 고대 그리스에서는 파피루스 두루마리에 기록을 하였는데 파피루스 두루마리는 자꾸 펼쳐보면 문서가 쉽게 망가지므로 두루마리 겉에 종이를 붙이고 여기에 문서 날짜 등을 적어 두었다. 그래서 굳이 펴보지 않아도 무엇인지 알 수 있게 하였던 것이다. (책을 철한 쪽에 책 제목을 인쇄해서 책꽂이에 쪽 낀 상태에서 굳이 펴쳐보지 않아도 책을 찾을 수 있는 것과 같은 원리다.) 그러던 것이 외교 문서에서 조약의 초안을 뜻하는 것으로 바뀌었다가 정식 절차를 진행하기 위해 미리 정한 절차(흔히 의전이라고 부르는 것)의 의미로 현재는 쓰이고 있다.

로 설명하겠다. IPv4 주소는 4 바이트 숫자로 구성되며 대개는 사이에 점을 찍어서 표시한다. 192.168.0.1 이런 식으로 말이다. 한 바이트로는 0부터 255까지의 숫자를 표현할 수 있으므로 IPv4 주소는 0.0.0.0부터 255.255.255.255까지 총 43억 개가 있는 셈이다.²² 이들 중 일부는 특수한 용도로 쓰므로 실제 컴퓨터에 나눠줄 수 있는 수는 좀 적다.

컴퓨터 한 대마다 IP 주소를 하나씩 나눠줘야 하는데 아무거나 막 주면 되나? 앞서 MAC 주소의 경우 공장에서 아예 박혀서 나오고 서로 고유한 번호로서 충돌만 나지 않으면 그만이었지만 IP 주소는 도입 목적이 있기 때문에 그 목적을 달성할 수 있게 나눠줘야 한다. 그 목적이란 무엇이 있는가? 새 컴퓨터에게 새 IP 주소를 주더라도 전 지구적으로 이 정보를 알릴 필요 없어야 하며 그럼에도 불구하고 그 컴퓨터에게 패킷을 전달해야 할 때 어디로 보내야 하는지 알 수 있어야 한다. 그러려면 어떻게 해야 할까?

이 장면에서 우체국의 사례를 좀 더 살펴보자. 수원 우편집중국 산하에는 수원/화성/오산/평택 등이 속해있다. 고양 우편집중국 산하에는 서대문/마포/은평/고양 등이 속해있다. 앞의 예에서, 오산 우체국의 우편물이 수원 우편집중국을 거쳐 고양 우편집중국을 거쳐 마포우체국을 거쳐 마포의 어느 사무실로 전달되기 위해서 알아야 할 것은 다음과 같다.

- 오산 우체국
 - 내가 속한 수원 우편집중국으로 가려면 어떻게 간다.
- 수원 우편집중국
 - 마포는 고양 우편집중국 산하에 있다.
 - 고양 우편집중국으로 가려면 어떻게 간다.
- 고양 우편집중국
 - 마포 우체국으로 가려면 어떻게 간다
- 마포 우체국
 - 그 사무실로 가려면 어떻게 간다.

이 과정을 요약해 보자면;

- (1) 아래에서 위로 갈 때는 외길이므로 그 길만 알면 된다.
- (2) 위에서 아래로 갈 때는 자기 산하에 속한 곳으로 가는 길만 알면 된다.²³
- (3) 더 이상 위로 넘기지 못하는 우편집중국은 다른 우편집중국으로 가는 길을 알아야 한다.
- (4) 우편집중국은 다른 우편집중국 산하에 누가 있는지 알아야 한다.

그럼 이 방식을 IP 주소에도 적용해보자. IPv4의 주소가 네 칸으로 이뤄진다고 하니 첫째 칸은 우

²² 실제로 연결해야 할 컴퓨터의 수는 이것보다 훨씬 많기 때문에 IPv4로는 감당이 안되고 그래서 IPv6가 제안되었다. 하지만, 주소 부족을 극복하는(또는 회피하는) 방안도 없는 것이 아니라 지금 당장 고갈되었다고 말할 수는 없다.

²³ 수원 우편집중국은 마포 우체국 가는 길을 몰라도 된다.

편집중국을 나타내고 둘째 칸은 우체국을 나타내고 셋째 칸은 한 우체국 관내의 동네를 나타내고 넷째 칸은 한 동네의 각각의 컴퓨터를 나타낸다고 해보자. 예를 들어, 수원 인근의 모든 컴퓨터는 주소 첫째 자리가 1로 시작하는 한편 고양 인근의 모든 컴퓨터는 2로 시작하는 것으로 하자. 또 한 수원에 속하는 수원/화성/오산/평택 등은 각각 1.1/1.2/1.3/1.4...로 나타내고 고양에 속하는 서대문/마포/은평/고양 등은 각각 2.1/2.2/2.3/2.4/...로 나타내기로 하자. 그리고 마포에 있는 각 동네는 2.1.1/2.1.2/2.1.3/... 등으로 나타내고 마포의 첫째 동네의 첫째 컴퓨터에는 2.1.1.1의 주소를 줬다고 해보자. 그리고 우체국이나 우편집중국은 번호 0을 붙여보자.

	IP 주소 네 자리			
수원 우편집중국	1	0	0	0
수원 우체국	1	1	0	0
화성 우체국	1	2	0	0
오산 우체국	1	3	0	0
오산 첫째 동네 담당 집배원	1	3	1	0
...				
고양 우편집중국	2	0	0	0
서대문 우체국	2	1	0	0
마포 우체국	2	2	0	0
마포 첫째 동네 담당 집배원	2	2	1	0
마포 첫째 동네 첫째 컴퓨터	2	2	1	1
마포 첫째 동네 둘째 컴퓨터	2	2	1	2
...				

누군가 마포 첫째 동네 첫째 컴퓨터(2.2.1.1)에게 패킷을 보냈는데 오산 첫째 동네 담당 집배원이 이 패킷을 보고 “우리 동네로 가는 것이면 1.3.1로 시작해야 되는데 그게 아닌 걸 보내 딴 동네로 구나”라고 판단하여 곧바로 자신의 속한 우체국 즉 1.3.0.0으로 전송한다. (이 집배원은 자기 동네 것이 아니면 무조건 1.3.0.0으로 보내면 된다는 것을 알고 있다.) 오산 우체국은 이 패킷을 보고 “1.3으로 시작하지 않는 것을 보니 우리 우체국 관내가 아니구나”라고 판단하여 자신이 속한 우편집중국 즉, 1.0.0.0으로 보낸다. 수원 우편집중국에서는 “2로 시작하는 것을 보니 고양 우편집중국으로 보내야 되는구나”라고 판단하여 2.0.0.0으로 전송한다. 고양 우편집중국은 “우리 우체국 중 2.2로 시작하는 것은 마포 우체국”이라고 알고 있으므로 2.2.0.0으로 전송한다. 마포 우체국에서는 “2.2.1로 시작하는 것은 모두 첫째 동네다”라고 판단하여 첫째 동네 담당 집배원인 2.2.1.0에게 전달한다. 2.2.1.0은 이를 자기 동네 네트워크에 전달하고 해당 컴퓨터가 받게 된다.

얼른 생각하기에 이렇게 하면 될 것 같지만 실은 살짝 더 복잡하다. 위의 전달 과정을 실제 컴퓨

터와 게이트웨이 그리고 라우터로²⁴ 표현해보면 그림 14과 같다. 이 그림에서 실제 컴퓨터는 연한 색칠이 된 1.1.1.1 등의 박스이고 그 외의 것들은 모두 네트워크의 상호 연결을 위한 게이트웨이 또는 라우터다. 각 박스에는 IP 주소가 써어 있는데 컴퓨터와 달리 게이트웨이나 라우터는 IP 주소가 두 개씩 붙어 있다. 그 이유는 이들이 두 네트워크를 연결하기 위해서는 각각의 네트워크에 속하는 주소를 하나씩 갖고 있어야 하기 때문이다. (박쥐의 운명이다!) 만약 하나의 네트워크 장비가 세 개 이상의 네트워크를 서로 연결한다면 네트워크 장비에 그 개수만큼 네트워크 카드가 붙어야 하고 그 만큼의 주소를 할당해야 한다. 그런 경우가 왜 생기는지는 3.8장에서 다룬다.

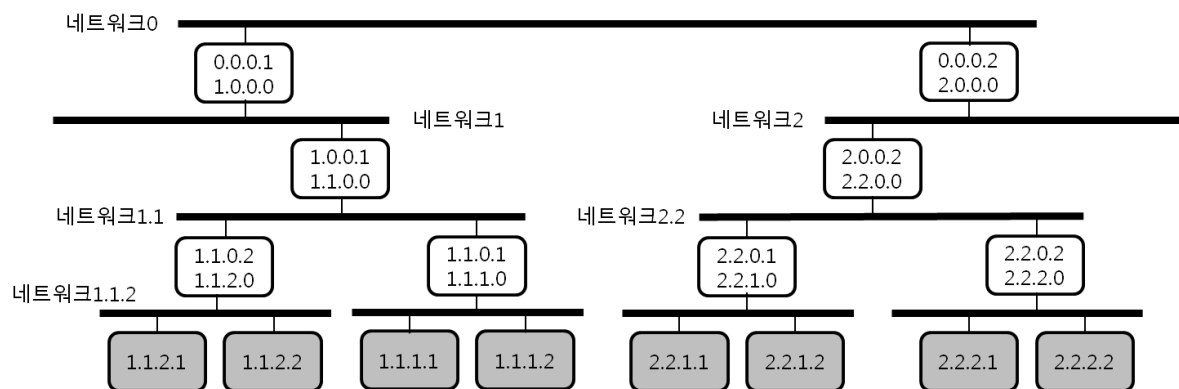


그림 14 무척 간단한 네트워크 구성 (흰 박스는 네트워크 장비)

3.5 중간 결산 – 문제는 해결되었나?

이렇게 긴 이야기를 한 이유는 새로운 컴퓨터가 네트워크에 추가되었을 때 이 사실을 전세계에 다 알리지 않아도 되는 방법을 찾기 위함이었다. 그럼 그 목적은 달성되었는가? 우선, 어떤 컴퓨터(1.1.1.1)가 다른 컴퓨터(2.2.2.2)에게 패킷을 쏘았을 때 이를 제대로 전달하기 위해서 각 네트워크 장비가 알고 있어야 할 정보가 무엇인지 한번 더 정리해보자. (설명의 편의를 위하여 상당부분을 생략했다.)

1.1.1.0 장비: “1.1.1로 시작하는 것이 아니면 1.1.0.0에게 보낸다”

1.1.0.0 장비: “1.1로 시작하는 것이 아니면 1.0.0.0에게 보낸다”

1.0.0.0 장비: “2로 시작하면 0.0.0.2에게 보낸다”

2.0.0.0 장비: “2.2로 시작하면 2.0.0.2에게 보낸다”

2.2.0.0 장비: “2.2.2로 시작하면 2.2.0.2에게 보낸다”

이 상황에서 2.2.2로 시작하는 네트워크에 새 컴퓨터(2.2.2.3)이 추가되었다. 이때 이 사실을 아무에게도 알릴 필요가 없다. 여전히 위의 정보만 가지고도 1.1.1.1이 2.2.2.3에게 패킷을 보낼 수 있

²⁴ 라우터(router)는 게이트웨이보다 살짝 더 복잡한 장비라고 일단 생각해보자.

다. 즉, 새로운 컴퓨터를 추가한다고 해서 네트워크 장비가 이 사실은 알 필요가 없다. 왜냐하면 네트워크 장비가 알고 있는 정보는 개별 주소가 아니라 주소 블록(예를 들자면, 2.2.2.0으로 시작하는 모든 주소) 단위로 관리하므로 개별 컴퓨터의 추가는 신경 쓸 필요가 없다. 다만, 새로운 주소 블록이 추가되면 이를 알고 있어야 한다.

예를 들어, 위의 구조에서 3으로 시작하는 네트워크가 추가되었다면 1.0.0.0과 2.0.0.0 이 두 장비는 3으로 시작하는 주소를 전달하는 방법을 **추가로** 알아야 한다. 반면 그 아래의 네트워크 장비들 예컨대, 1.1.0.0은 이런 사실을 알 필요가 없다. 어차피 자기 위의 1.0.0.0이 알아서 할 거니까. 마찬가지로 만약, 1.1 네트워크 아래에 1.1.3으로 시작하는 네트워크를 추가했다고 했을 때 이를 알아야 할 장비는 1.1.0.0뿐이다. 이 하나의 장비를 제외하고는 전세계 어느 장비도 1.1.3으로 시작하는 네트워크가 추가되었다는 사실을 몰라도 패킷 전송에 아무런 문제가 없다.

그래서 애초의 문제는 해결되었다. 단, IP 주소 블록 할당을 체계적으로 잘 했다는 전제하에. 주소 블록 할당에 대해서는 다음 장에서 살펴보기로 하고 잠시 실용적인 얘기를 살펴보자. 요즘은 대부분의 환경에서 IP 주소 할당을 동적으로 하기 때문에 사용하는 사람들이 드물긴 하지만 정적으로 주소를 할당하는 경우에는 네트워크 설정을 위하여 알아야 할 정보로 (그림 10에서 보듯이) IP 주소와 서브넷 마스크, 그리고 게이트웨이 주소가 필수이다. (물론 DNS 서버 주소도 사실상 필수지만 이는 7장에서 더 알아보기로 하자. 또한 주소의 동적 할당과 정적 할당에 대해서는 3.6에서 다룬다.) 이제 이들의 의미를 분명히 이해할 수 있게 되었다.

우선 하나의 단위 네트워크(이를 전체 네트워크의 일부라는 의미에서 서브 네트워크라고 부른다)에 IP 주소 블록이 할당된다. 예를 들어, 1.1.1로 시작하는 모든 주소를 하나의 블록으로 그 서브 네트워크에 할당했다면 1.1.1.0~1.1.1.255 사이의 아무 주소나 쓸 수 있는 권한이 생겼다는 뜻이다. 그 중에서 **아무거나** 예를 들어, 1.1.1.10을 꺼내서 어떤 컴퓨터에²⁵ 할당했다고 하면 그것이 곧 그 컴퓨터의 IP 주소가 된다. 이 서브 네트워크의 모든 컴퓨터는 다 1.1.1으로 시작하므로 1.1.1로 시작하지 않는 모든 주소는 이 서브 네트워크의 **밖에** 있다. 예를 들어, 1.1.0.10은 비록 앞의 두 자리까지는 같아서 우리 서브 네트워크 소속이 아니다. 따라서, 몇 자리까지 같아야 우리 서브 네트워크인지를 나타내는 것이 서브넷 마스크다. 이 예에서처럼 앞의 세 자리까지 같으면 우리 네트워크라는 것을 나타내려면 255.255.255.0 이라고 쓰면 된다. (왜 이렇게 쓰면 되는지 그리고 왜 이것을 마스크라고 부르는지는 부록 9.1에서 따로 설명하였다.) 그리고 우리 네트워크 밖에 있는 컴퓨터에게 보낼 때에는 게이트웨이를 통해서 보내야 하므로 그 게이트웨이의 주소를 알고 있어야 한다. (어떻게 게이트웨이를 통해서 외부로 중계되는지에 대하여는 3.8장에서 설명한다.) 따라서, IP 주소, 서브넷 마스크, 게이트웨이 주소 이 세가지가 IP 네트워크 설정의 기본 중의 기본인 것이다.

3.6 IP 주소 블록의 할당은 어떻게 하나?

앞의 예에서 우리에게 1.1.1 블록을 할당해주는 것은 누구일까? 거의 대부분의 경우에 인터넷 서비스 사업자(ISP, Internet service provider)에게서 받는다. 그럼 ISP는 어디서 블록을 받아오나? 작은

²⁵ 실은 더 정확히는 하나의 네트워크 카드에.

ISP는 더 큰 ISP에게 받아오고 큰 ISP는 권역 별 주소 블록 할당을 담당하는 기구(RIR)에게서²⁶ 받아온다. 그럼 RIR은 어디서 받아오나? 궁극적으로는 IANA(Internet Assigned Numbers Authority)에게서²⁷ 받아온다. 즉, 0.0.0.0~255.255.255.255 사이의 주소를 적당한 크기를 블록으로 쪼개서 IANA → RIR → ISP → 실 사용자에게로 나눠주는 것이다. 물론 아주 초창기에는 이러한 체계 없이 사용자(초창기의 사용자라면 대개는 큰 대학들이나 연구소들)가 직접 IANA를 담당하는 존 포스텔에게 연락해서 받아가는 식이었겠지만 나중에는 이를 기구화하였으며 특히, IPv4 주소의 고갈 문제가 제기되면서부터는 나눠준 것을 다 썼다는 것이 확인되어야 추가로 할당하는 등 점차 짜게 나눠주고 있다. IANA를 기준으로 보면 2011년 2월 3일에 마지막으로 주소 블록을 할당함으로써 고갈되었다. 하지만 아직은 RIR에 할당되어 있는 것들이 고갈된 것이 아니므로 실제 IPv4 주소의 완전한 고갈은 아니다.

3.7 IP 패킷과 MAC 패킷 그리고 ARP

이 장면에서 헛갈리지 말아야 할 것. 전 지구적인 네트워크를 구축하고 운용하기 위해서 MAC 주소 대신 IP 주소를 도입했으니 그럼 MAC 주소는 안 쓰고 IP 주소만 쓰는 건가? 아니다. 둘 다 쓴다. **어떻게** 그리고 **왜** 둘 다 쓰는지 생각해보자. 먼저 뒤의 질문부터.

우선 실용적인 면에서 IP 주소 없이 동작해야 하는 프로토콜이 있으므로 IP 주소로 다 처리할 수 가 없다. 예를 들어, DHCP(dynamic host configuration protocol)처럼 IP 주소를 할당하는 프로토콜이 동작하려면 IP 주소 없이도 특정 컴퓨터를 지정해서 통신할 수 있어야 하므로 MAC 주소는 필요하다.

하지만 더욱 근본적인 이유는 **IP는 이 세상의 유일한 네트워크 프로토콜이 아니라는 점**이다. 컴퓨터 네트워크 기술이 처음으로 상업적으로 퍼져나가던 1980년대 초반 큰 컴퓨터 공급업체(예를 들어, IBM이나 DEC)는 물론이고 네트워크 전문업체(예를 들어, 3Com 이나 노벨)가 각기 자기 나름의 네트워크 기술 다시 말해서 서로 호환성 없는 네트워크 프로토콜을 사용하였다. 컴퓨터 공급자들이 제공했던 컴퓨터 네트워크 기술로 대표적인 것은 제록스의 XNS(Xerox Network Systems), DEC(Digital Equipment Corporation)사의 DECnet, IBM의 SNA(Systems Network Architecture) 등이었다. 당시의 컴퓨터 네트워크는 우리가 갖고 있는 컴퓨터가 어느 회사의 제품 이냐에 따라 어느 네트워크 기술을 쓸 것이냐가 결정되는 상황이었다. IBM PC가 많이 팔리면서 이들을 시장으로 삼아 노벨사(Novell, Inc.)의 넷웨어(Netware)와 사이텍사(Sytek Inc.)의 넷바이오스(NetBIOS)가 1983년에 시장에 등장하였다. 그런 상황에서 네트워크 제품을 공급하는 회사들 관점

²⁶ 이러한 기구를 RIR(regional internet registry)이라고 부르며 아시아-태평양 권역의 경우에는 APNIC이 RIR의 역할을 하고 있다

²⁷ 인터넷의 전신인 아르파넷 시절부터 인터넷 주소와 포트 번호를 배분하는 역할은 주요 개발자 중 한 사람인 존 포스텔(Jon Postel)이 맡고 있었으며 그 역할을 IANA라고 불렀다. 처음에는 존 포스텔이 혼자 다 했을 것이고 그 이후로는 몇 명의 스태프를 두고 관리자의 역할을 했다. 1998년 급작스럽게 죽을 때까지 그는 IANA의 관리자인 동시에 (인터넷 표준 문서인) RFC 편집자의 역할을 계속하였다.

에서 IP는 잘 봐줘야 성가신 부가기능 정도였다.²⁸

이렇게 경쟁하는 환경에서 당신이 새로운 네트워크 기술을 개발했다고 하자. 그리고 우리가 그 네트워크 기술을 판매하려는 시장에서는 이미 기존의 네트워크 기술이 있고 그 기술을 이용하기 위하여 회선이 다 설치되어 있다. 만약 당신의 기술이 기존의 회선에서 돌아가지 않는다면 이미 돈 들여서 설치한 회선을 다 들어내고 새로 회선을 설치해야 하는 부담이 있어서 시장에서 인기를 끌기 어려울 것이다. 따라서 새로운 네트워크 기술은 기존의 회선을 그대로 둔 채로 동작하도록 만들게 된다. 심지어, 처음 컴퓨터 네트워크 기술이 나왔을 때에도 새로운 회선을 설치한 것이 아니라 다른 네트워크(아마도 전화 네트워크)의 회선에 빌붙어서 시작했을 것이다. 이를 그림으로 표현해보자면 다음과 같다.



그림 15 네트워크 기술의 공존²⁹

두 지점을 구리 선으로 연결할 지 유리 섬유를 쓸 지 심지어는 선을 안 쓰고 전파로 할 지를 고민하고 설치하는 문제(L1의 문제)와 이렇게 설치된 회선을 잘 활용하는 방법(L2의 문제)와 이들을 이용하여 전 세계에 흩어진 컴퓨터를 큰 부담 없이 찾아가게 만드는 방법(L3 또는 네트워크 계층 즉, L3의 문제)을 따로 해결함으로써 하나의 기술이 다른 기술을 제약하는 것도 피할 수 있고 각각 독립적으로 발전을 할 수 있는 것이다. 앞서 전 지구 규모의 네트워크를 작은 여러 개의 네트워크로 나눠서 네트워크의 네트워크 즉 인터넷(internet, inter-network)으로 쪼개 풀자는 아이디어가 **수평적인 분할 정책**이라면 네트워크를 구성하기 위한 기술을 여러 다른 측면의 문제 즉, 여러 계층으로 나눠서 푸는 것은 **수직적인 분할 정책**이라고 할 수 있다.

²⁸ <http://www.internetsociety.org/internet/what-internet/history-internet/brief-history-internet>

²⁹ 달리는 사람 그림의 출처 <http://dribbble.com/shots/58816-Running-Man>

또한 이를 네트워크 산업이나 정책의 측면에서 본다면 각 계층별로 투자 주체가 분리될 수 있는 장점이 (또는 단점이) 있다. 예를 들어, 회선은 전화 회사가 설치하고 인터넷 서비스는 ISP가 전화 회사의 회선을 이용해서 할 수 있는 것이 이러한 수직적으로 분할된 기술 덕분이다.

이것으로 왜 MAC 주소와 IP 주소가 따로 있어야 하는지 설명이 되었다 치고 그럼 IP 주소와 MAC 주소가 어떻게 협력하는지 살펴보자. 앞서 MAC 주소를 설명하면서 데이터를 전송할 때에는 겹봉투에 주소를 쓰고 안에 편지를 넣듯이 앞에 MAC 주소를 쓰고 그 위에 보내려는 데이터를 달아서 보냄으로써 앞 부분을 보고 (즉, 겹봉투를 보고) 누구에게 전달되는 것인지 알 수 있다고 했다. IP 주소도 마찬가지다. 특정 IP 주소를 가진 상대방에게 데이터를 전송하기 위해서는 맨 앞부분에 상대의 IP 주소를 적고 그 뒤에 보내려는 데이터를 달아야 한다. 그림으로 나타내면 다음과 같다.

가상의 MAC 패킷

상대의 MAC 주소	보내려는 데이터
------------	----------

가상의 IP 패킷

상대의 IP 주소	보내려는 데이터
-----------	----------

그림 16 데이터를 어디에 담아야 하나? MAC 패킷? IP 패킷?

우리는 IP 주소를 써서 데이터를 보낼 상대를 표현하고 찾아가기로 했으니 IP 패킷의 형태로 만들어서 네트워크에 쏘아 되는데 이걸 그대로 네트워크에 쏘면 어떻게 될까? 앞서 설명하였듯이 모든 네트워크 카드는 자기가 연결된 회선에 지나가는 모든 패킷 중에서 헤더 부분을 보고 MAC 주소가 자기 자신과 같은 것을 받고 그 외에는 버린다. 따라서 그림에서의 가상의 IP 패킷을 쏘면 그 누구도 받지 않는다. 따라서, 하는 수 없이 우리는 IP 패킷을 MAC 패킷으로 변신시켜서 보내야 한다. 그럼 MAC 주소에는 뭐라고 쓰나? 이제 우리는 상대 컴퓨터를 IP 주소로 표현하기 때문에 통신 하려는 상대의 IP 주소는 알지만 상대의 MAC 주소는 모른다. 따라서, IP 주소로부터 MAC 주소를 알아내는 방법이 필요하다. 이때 사용하는 프로토콜이 ARP(address resolution protocol)다.

상대의 MAC 주소를 모르기 때문에 ARP는 브로드캐스트(broadcast)라는 특별한 방법을 사용한다. 브로드캐스트는 영어 단어 그대로 방송이다. 아무나 다 듣는다는 얘기다. MAC 주소 중 FF:FF:FF:FF:FF:FF는 특별한 주소로서 상대방의 주소를 이것으로 쓰면 같은 서브 네트워크에 연결된 모든 컴퓨터가 받는다.³⁰ 상대방의 MAC 주소를 알아내려는 컴퓨터는 ARP 요청 패킷을 보내는데

³⁰ 미안하다. 앞에서 MAC 주소가 자기 자신인 경우에만 받는다고 한 것은 설명의 편의를 위한 것이었다. 그리고, 앞에서 프로미스큐어스 모드로 패킷을 수신하는 것은 이것과는 다른 얘기다. 일반적으로 MAC 주소가 자기 자신이거나 브로드캐스트인 경우에만 수신하는데 프로미스큐어스 모드가 되면 그렇지 않는 경우에도 받는다는 뜻이다.

그 패킷의 MAC 주소는 브로드캐스트 주소이며 데이터에는 이렇게 쓴다 “IP 주소 X.X.X.X는 누구예요?”. 그럼 그 IP 주소를 가진 컴퓨터가 요청을 보냈던 컴퓨터에게 “IP 주소 X.X.X.X의 MAC 주소는 YY:YY:YY:YY:YY:YY 입니다”라고 답변을 보낸다. 요청과 달린 답변을 보낼 때는 브로드캐스트 주소를 사용하지 않는다. 왜냐하면 요청을 보낼 때 실은 요청하는 컴퓨터의 MAC 주소도 따라가기 때문에 답변을 보내는 컴퓨터는 요청한 컴퓨터의 MAC 주소를 알 수 있기 때문이다. 이렇게 **브로드캐스트를 이용한 요청 → 유니캐스트를 이용한 답변** 패턴은 컴퓨터 네트워크 기술에서 아주 흔히 사용되고 있다.

ARP 요청

브로드캐스트 주소	“IP 주소 X.X.X.X는 누구예요?”
-----------	------------------------

ARP 응답

상대의 MAC 주소	“TX.X.X.X의 MAC 주소는 YY:YY:YY:YY:YY:YY 입니다”
------------	---

그림 17 (지나치게 간략하게 그려본) ARP 요청과 응답

그런데 앞서 설명한대로 홍수를 피하기 위해서 **브로드캐스트는 전달되지 않는다**. ARP는 같은 네트워크에 붙어 있는 컴퓨터끼리 MAC 주소를 알아내는 것에 그친다. (하긴, 다른 네트워크에 붙어 있는 컴퓨터의 MAC 주소는 알 필요가 없다.) 그럼 다른 네트워크에 붙어 있는 상대방에게 패킷을 보내려면 MAC 주소에는 뭐라고 써야 하나?

이 장면에서 다른 예를 들어 답을 찾아보자. 큰 회사에서는 우편물이 아주 많이 온다. 예를 들어, 회사가 본사와 여러 지사로 나뉘어 있다고 하자. 그럼 지사로 가야 할 상당수의 우편물이 본사에 온다. 그럼 그 우편물을 지사의 실제 수취인에게 보내야 하는데 이럴 때는 따로 보내는 대신 큰 자루에 담아서 보낸다. 그 자루에 겉에는 ‘XX 지사 우편 담당자 앞’라고 써어 있다. 자루를 받은 우편 담당자는 실제 수취인에게 전달한다. (지사마저 무척 크다면 다시 부서별로 분류하여 하나로 묶은 뒤 부서별 담당자에게 묶음째로 전달할 것이다.) 요약하자면, 내가 보내려는 편지를 담은 봉투에는 실제 수취인의 주소가 적히지만 이런 편지를 담은 **자루에는 중계해주는 사람들(즉, ‘담당자들’)의 주소가 적힌다**.

이를 우리 상황에 대입해보자면 게이트웨이의 MAC 주소를 적어주면 된다는 얘기가. 물론, IP 네트워크 설정에서는 게이트웨이의 IP 주소만 입력하므로 ARP를 이용해서 MAC 주소를 알아내야 한다. 결국, MAC 패킷은 다음과 같은 모양이 된다.



그림 18 패킷 속의 패킷

그림에서 “상대의 MAC 주소” 부분은 같은 네트워크 내에서는 데이터를 실제로 받을 상대의 MAC 주소이지만 다른 네트워크로 보내야 하는 경우에는 이 자리에 게이트웨이의 MAC 주소가 들어간다. 게이트웨이가 이런 패킷을 받으면 어떤 일이 벌어질까?

3.8 IP 라우팅

게이트웨이가 자신의 MAC 주소로 보낸 패킷을 받아서 퍽 까보니 그 안에는 IP 패킷이 들어 있다. (안에 있는 것이 뭔지 판별하는 방법에 대하여는 부록 9.2에서 다룬다.) 앞에서 살펴본 대로 게이트웨이는 목적지 IP 주소를 보면 그것을 어느 네트워크로 보내야 하는지 알고 있다. 앞의 그림 14에서 1.1.1.1이 2.2.2.2에게 보내려고 한다면 같은 네트워크가 아니므로 게이트웨이인 1.1.1.0의 MAC 주소를 알아내서 보냈을 것이다. 그럼 1.1.1.0과 1.1.0.1 두 개의 네트워크 카드를 가진 게이트웨이는 “내가 모르는 것은 위로 보낸다”라는 원칙에 따라 자기 위의 네트워크 즉, 네트워크 1.1의 게이트웨이인 1.1.0.0에게 자기가 받은 패킷을 **전달**한다. 전달할 때는 다음 그림처럼 내용 부분은 복사하고 패킷의 헤더부분만 바꿔서 보낸다. 한 가지 더 알고 넘어가야 할 부분은 그 게이트웨이가 패킷을 받은 네트워크 카드(IP 주소 1.1.1.0)와 전달하기 위해서 내보내는 네트워크 카드(IP 주소 1.1.0.1)는 다르다. 말하자면 왼쪽에서 받아서 오른쪽으로 넘기고 오른쪽에서 받아서는 왼쪽으로 넘기고 하는 식으로 패킷은 네트워크에 흩어진 각종 장비를 통과하여 목적지로 날아간다.

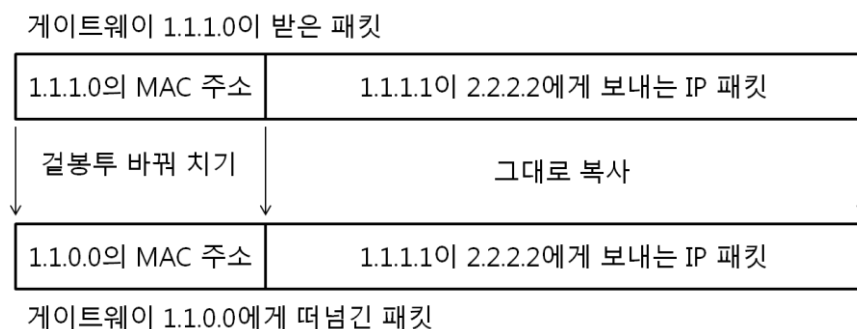


그림 19 패킷의 전달

이 과정을 기업이나 군대 같은 조직의 의사 전달 체계와 비교해서 설명해보자. 다른 부서의 누군가에게 할 말이 있으면 상관에게 보고를 하고 이 보고는 사장에게 전달된다. 사장은 전달 받을 부서장을 불러서 얘기를 하고 부서장은 해당 부서원에게 그 내용을 전달한다. 이 방법의 장점은 전달 체계가 단순하여 전달을 하기 위해서 **알아야 할 정보가 최소화** 된다는 점이다. 다만 단점이 있다면 의사 소통에 시간이 오래 걸리고 사장님은 귀가 아프고 입이 부르틀 것이며 혹시라도 외근을 나가는 날이면 부서간 의사 소통은 불가능해진다. 이렇게 기이한 전달 체계를 가진 곳은 거의 없을 것이며 실은 많은 정보가 실무자 선에서 직통으로 교환된다. “혹시 저쪽 부서에 입사 동기나 아는 사람 없어?” 뭐 이런 식으로 말이다. IP 네트워크도 마찬가지다. 큰 골격은 계층 구조를 따르지만 사이 사이에 지름길이 뚫려있다.

아래의 그림은 인터넷의 계층적 구성을 보여주고 있다. 가정이나 기업의 네트워크는 전화망, 케이블 TV망, 광케이블 등을 통하여 동네 ISP(Tier 3)에 연결되고 이들 ISP는 전국 규모의 ISP(Tier 2)에

연결되며³¹ 이들은 다시 인터넷의 핵심부를 이루고 있는 최종 보스 ISP(Tier 1)로 연결된다. 어떻게 이 구조가 만들어지고 유지되는지를 이해하는 한 방법은 돈의 흐름을 보는 것이다.

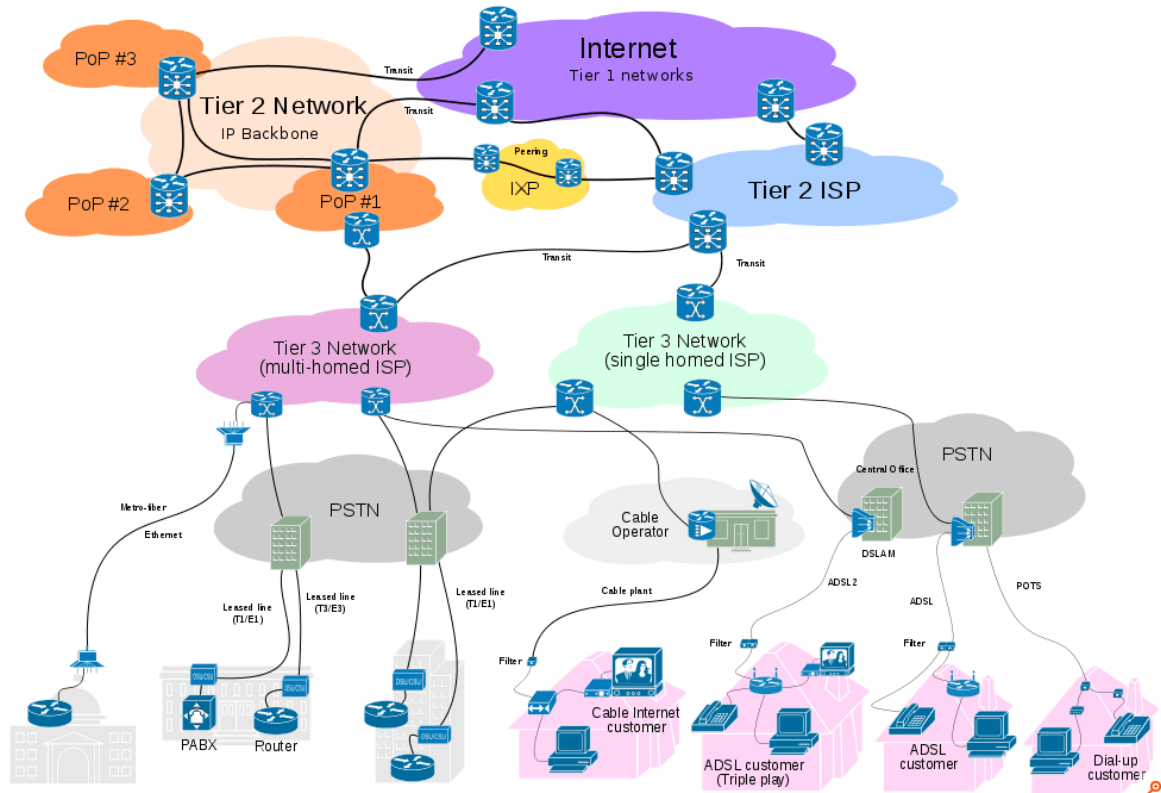


그림 20 인터넷의 연결 모습³²

인터넷을 접속하기 위해서 돈을 내는 사람들은 가정이나 기업의 이용자들이다. 이들에게 돈을 걷는 곳은 동네 ISP들이다. 그런데 이들이 제공하는 인터넷 서비스가 제대로 동작하기 위해서는 다른 동네 ISP에 연결된 컴퓨터와 통신이 되어야 한다. 따라서, 다른 동네 ISP와 연결하기 위해서 큰 ISP에 가입한다. 그래서 큰 ISP는 동네 ISP에서 보내오는 패킷을 서로 전달해주는 서비스를 해주는 대신 돈을 받는다. 하지만 큰 ISP도 전 세계 모든 곳으로 다 연결되지는 않으니 더 큰 ISP에 가입한다. 이런 식으로 쭉 올라가다가 더 이상 올라갈 수 없는 곳까지 올라가면 거기에는 최종 보스 ISP인 Tier 1 ISP가 있으며 이들은 서로 돈을 주고 받지 않는다. (위/아래 개념이 없으니까.) 따라서, Tier 1 ISP를 제외하고는 모두 상위 ISP에게 돈을 내고 인터넷 서비스를 받고 있는 것이다. 그런데 만약 어떤 큰 ISP끼리 주고 받을 패킷이 아주 많다면 둘 사이에 회선을 직접 연결함으로

³¹ 우리 나라는 땅이 좁기도 하거니와 대기업들이 골목 상권 침투하기를 즐겨서 그런지 동네 ISP가 따로 없이 대부분 전국 규모의 ISP에 바로 가입되어 있다. 골목 상권을 보호하기 위해서 대기업의 동네 ISP 진출을 막으면 좋을라나?

³² 그림 출처. <http://arstechnica.com/security/2013/04/can-a-ddos-break-the-internet-sure-just-not-all-of-it/>

써 상위 ISP에 주는 요금을 아낄 수 있을 것이다. 이렇게 ISP끼리 상호 연결하는 것을 IX(internet exchange 또는 IXP, internet exchange point)라고 부르며 앞의 그림에서도 Tier 2 ISP는 IXP를 통하여 서로 연결되어 있어서 굳이 Tier 1을 거치지 않아도 서로 패킷을 교환할 수 있다.

꼭 ISP 간에만 이렇게 연결되는 것은 아니고 예를 들어, 한 ISP 내부에도 많은 네트워크가 있을 것이고 이들 중 일부는 계층적으로 일부는 옆으로 뚫려 있는 구조가 될 것이다. 왜냐하면 계층적으로만 구성한 경우 앞서 귀 아프고 입 부르튼 사장님의 경우처럼 일부 상층부의 네트워크 장비가 큰 부담을 지게 되고 데이터 전송도 더 많이 지연될 수 있기 때문이다. 그런데 이렇게 옆으로 뚫기를 시작하면 전에는 없던 문제가 생긴다.

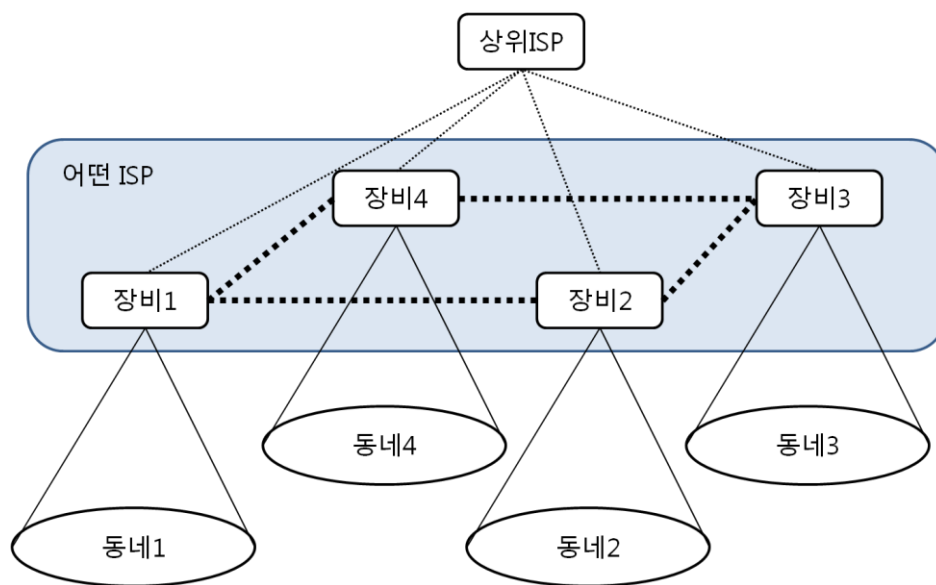


그림 21 네트워크 장비끼리 수평으로 연결한 모습

예전 같으면 동네1에서 동네2로 보낼 것이 있으면 그냥 장비1이 받아서 상위 ISP로 쓰면 상위 ISP에서 장비2로 보내줘서 해결이 되었는데 이제는 그 대신 장비1에서 상위 ISP를 거치지 않고 장비2로 바로 보낼 수 있다는 것을 **추가로** 알고 있어야 한다. 그리고 바로 보낼 때 더 좋은 경로가 [장비1→장비2] 인지 아니면 [장비1→장비4→장비3→장비2] 인지 알아야 한다. (심지어는 [장비1→장비4→상위 ISP→장비2] 가 더 좋은 경로일 수도?) 얼른 보기에는 여러 칸 건너는 것 보다 한 칸 건너는 것이 더 좋아 보이겠지만 만약 그 한 칸이 인공위성을 경유해서 연결된 것이고 다른 길은 그냥 짧은 광 섬유로 연결되어 있다면 당연히 다른 길이 더 좋은 길이다. 여기에 가끔 이들 연결 중 일부가 끊기기도 해서 우회해야 한다거나 각 칸을 지날 때 발생하는 비용(특히 상위 ISP 연결하는 비용)이 다 다르고 심지어는 시시 각각 가격이 달라진다면 어느 길이 더 좋은냐는 갑자기 몹시 어려운 문제가 되어버린다.

그렇다고 답이 없는 것은 아니고 다 방법이 있다. 여러 조건을 고려하여 최적의 경로를 찾아내서 패킷을 전송하는 것을 라우팅(routing)이라고 부르며 라우팅을 위해 각종 네트워크 장비가 서로 정보(예를 들어, 연결 상태나 연결 비용 등)를 교환하는 프로토콜을 라우팅 프로토콜이라고 한다. 또한 이렇게 서로 연결된 네트워크에서 적절한 경로를 찾아서 패킷을 전송해주는 네트워크 장비를 라우터(router)라고 부른다.

이상으로서 인터넷은 완성되었다. 이제 우리는 지구 규모의 네트워크를 구성할 수 있는 기술을 만들었다. 하지만 막상 써보니 생각지 않았던 문제가 줄줄이 생기기 시작했다. 다음 장부터 다루는 기술은 단지 연결을 하는 것을 넘어 연결을 통하여 각종 서비스가 잘 동작하기 위해서 필요한 것들이다.

- 4 TCP/UDP 와 Layer4
- 5 RTP & TLS/SSL Layer 5
- 6 MIME and contents encoding Layer 6
- 7 DNS DHCP HTTP Layer 7
- 8 그 외의 주제들
 - 8.1 허브 / 스위치 / 게이트웨이 / 라우터
 - 8.2 포트
 - 8.3 특별한 IP 주소들
 - 8.4 공유기는 그래서 뭐 하는 것임?
 - 8.5 방화벽은 어떻게 동작하나요?
 - 8.6 Mobile IP, HIP 그리고 4G
 - 8.7 인터넷은 (더 이상) 계층적이지 않다.
 - 8.8 왜 QoS는 어려운가?
 - 8.9 인터넷의 미래 인터넷
- 9 부록
 - 9.1 서브넷 마스크의 의미
 - 9.2 EtherType

인터넷 만들기

고양우

*We reject: kings, presidents and voting.
We believe in: **rough consensus** and
running code. – David D. Clark*

관리자@오픈넷.KR

RFC6530 / RFC6531 / RFC6532 / RFC6533

RFC5890 / RFC5891 / RFC3743 / RFC4290

THE FIFTY-THIRD
INTERNET ENGINEERING TASK FORCE
Hosted by Cable and Wireless
Minneapolis, Minnesota USA
March 17 – 22, 2002

2.1.18 Keywords Naming Services (kwns) Bof
Current Meeting Report
[kwns BOF]

Co-Chair YangWoo Ko introduces charter, defines
"Keywords" for the purpose of this meeting:

- Keywords are defined as internationalized string for internet navigation.
- Charter highlights – direct navigation is very desirable for users –users wish to use keywords as unambiguous addresses

WHO RUNS THE INTERNET?

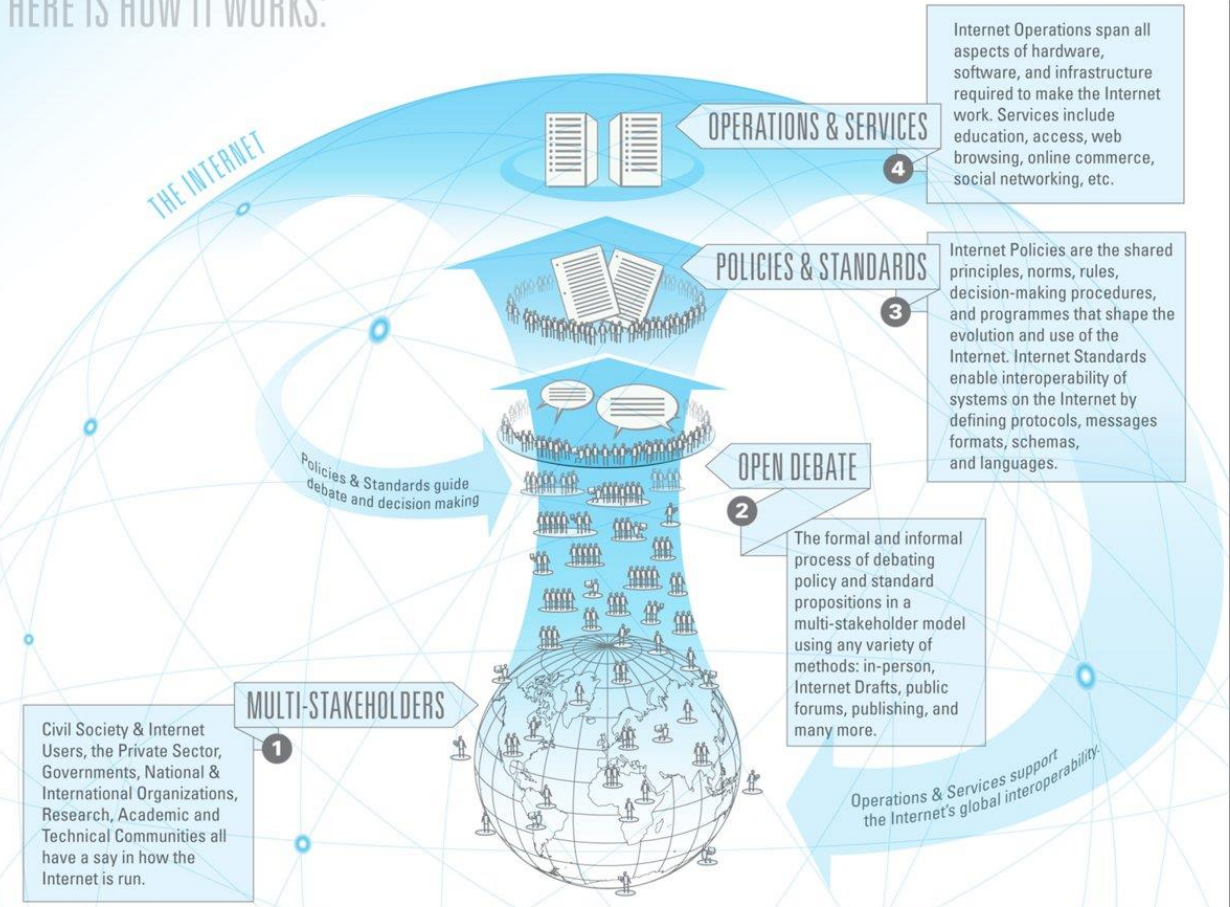
NO ONE PERSON, COMPANY, ORGANIZATION OR GOVERNMENT RUNS THE INTERNET.

The Internet itself is a globally distributed computer network comprised of many voluntarily interconnected autonomous networks. Similarly, its governance is conducted by a decentralized and international multi-stakeholder network of interconnected autonomous groups drawing from civil society, the private sector, governments, the academic and research communities, and national and international organizations. They work cooperatively from their respective roles to create shared policies and standards that maintain the Internet's global interoperability for the public good.

WHO IS INVOLVED:

- IAB** **A C P S R**
INTERNET ARCHITECTURE BOARD
Oversees the technical and engineering development of the IETF and IRTF.
www.iab.org
- ICANN** **C O P V**
INTERNET CORPORATION FOR ASSIGNED NAMES AND NUMBERS
Coordinates the Internet's systems of unique identifiers: IP addresses, Protocol-Parameter registries, top-level domain space (DNS root zone).
www.icann.org
- IETF** **C P S**
INTERNET ENGINEERING TASK FORCE
Develops and promotes a wide range of Internet standards dealing in particular with standards of the Internet protocol suite. Their technical documents influence the way people design, use, and manage the Internet.
www.ietf.org
- IGF** **A C P**
INTERNET GOVERNANCE FORUM
A multi-stakeholder open forum for debate on issues related to internet governance.
www.intgovforum.org
- IRTF** **R**
INTERNET RESEARCH TASK FORCE
Promotes research of the evolution of the Internet by creating focused, long-term research groups working on topics related to Internet protocols, applications, architecture and technology.
www.irtf.org
- GOVERNMENTS AND INTER-GOVERNMENTAL ORGANIZATIONS** **C P**
Develop laws, regulations and policies applicable to the Internet within their jurisdictions; participants in multilateral and multi-stakeholder regional and international fora on Internet Governance.

HERE IS HOW IT WORKS:

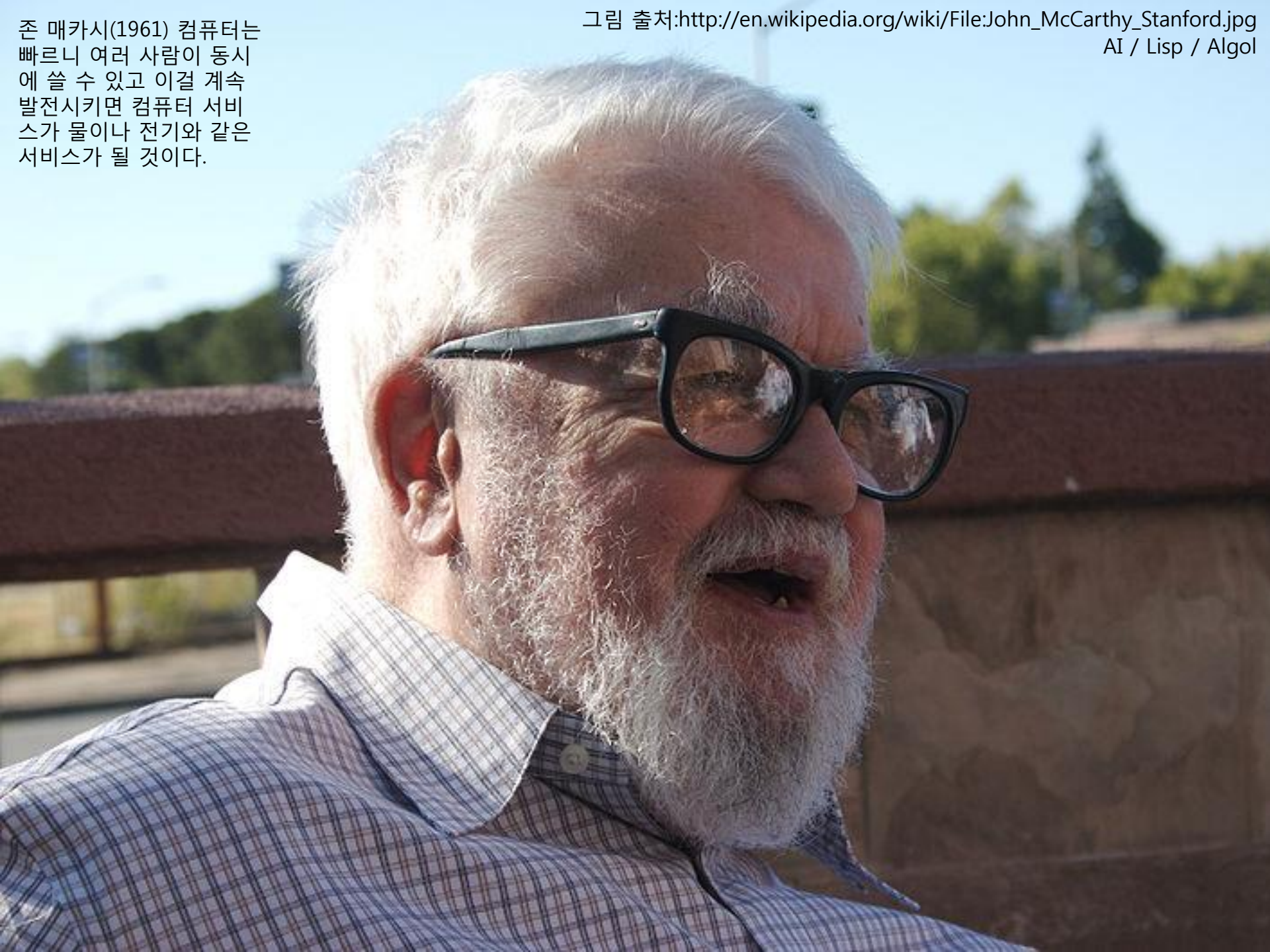


WHO IS INVOLVED:

- ISO 3166 MA** **S**
INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, MAINTENANCE AGENCY
Defines names and postal codes of countries, dependent territories, special areas of geographic significance.
www.iso.org/iso/country_codes.htm
- ISOC** **C E P V**
INTERNET SOCIETY
Assure the open development, evolution and use of the Internet for the benefit of all people throughout the world. Currently ISOC has over 90 chapters in around 80 countries.
www.internetsociety.org
- RIRs** **O P V**
5 REGIONAL INTERNET REGISTRIES
Manage the allocation and registration of Internet number resources, such as IP addresses, within geographic regions of the world.
www.afrinic.net Africa
www.apnic.net Asia Pacific
www.arin.net Canada & United States
www.lacnic.net Latin America & Caribbean
www.ripe.net Europe, the Middle East & parts of Central Asia
- W3C** **S**
WORLD WIDE WEB CONSORTIUM
Create standards for the world wide web that enable an Open Web Platform, for example, by focusing on issues of accessibility, internationalization, and mobile web solutions.
www.w3.org
- INTERNET NETWORK OPERATORS' GROUPS** **A O V**
Discuss and influence matters related to Internet operations and regulation within informal fora made up of Internet Service Providers (ISPs), Internet Exchange Points (IXPs) and others.

LEGEND: **A** Advice **C** Community Engagement **E** Education **O** Operations **P** Policy **R** Research **S** Standards **V** Services

존 매카시(1961) 컴퓨터는
빠르니 여러 사람이 동시
에 쓸 수 있고 이걸 계속
발전시키면 컴퓨터 서비
스가 물이나 전기와 같은
서비스가 될 것이다.




1장에 80 바이트.
2MB = 2만 6천장.

그림 출처:http://www.maximumpc.com/files/u69/IBM_Punch_Card.png

데이터는 무겁고 컴퓨터는 비싸고

나는 1960년대에 예일 대학에 있었는데 그 때의 컴퓨터는 무척 크고, 비싸고 또한 몹시 귀했다. 그래서 전산 센터는 희귀한 자원이 있는 핵심 지점의 역할을 했다. 옛날 마을에서 공동 우물과 같은 역할인 셈이다. 컴퓨터를 이용해야 하는 입장이라면 그 무거운 펀치 카드 박스를 들고 멀리 걸어 다니고 싶진 않았을 것이다. (Mitchell, 2005)

그림 출처:<http://www.computescotland.com/images/EfVIPmek4Y2B6oYEnMI10e30b7.jpg>



SAGE(1950s) 컴퓨터
기반의 항공 방위
시스템용 사용자 단말

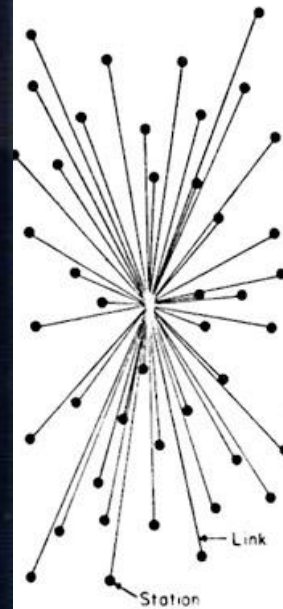
릭라이더(1962) 전 세
계 어디서나 원하는 프
로그램과 자료를 활용
할 수 있게 해주는 은
하 네트워크 제안

붙
어
야

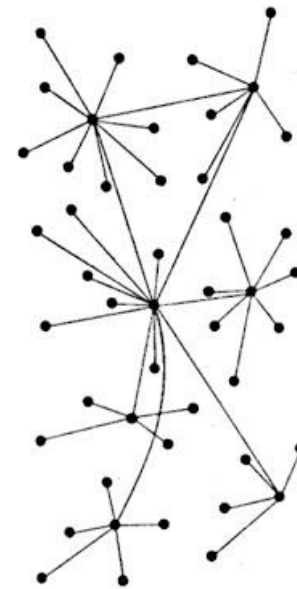
통
한
다



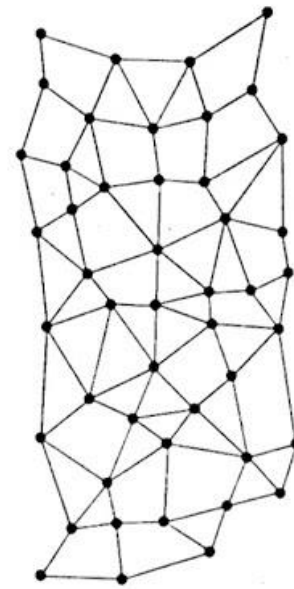
패킷의 탄생



CENTRALIZED
(A)



DECENTRALIZED
(B)



DISTRIBUTED
(C)

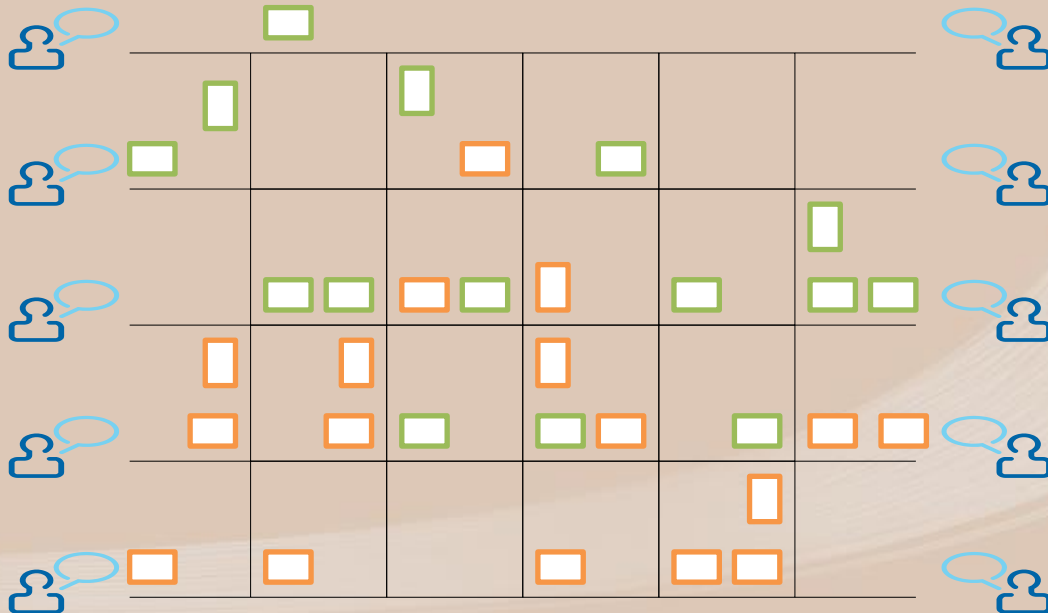
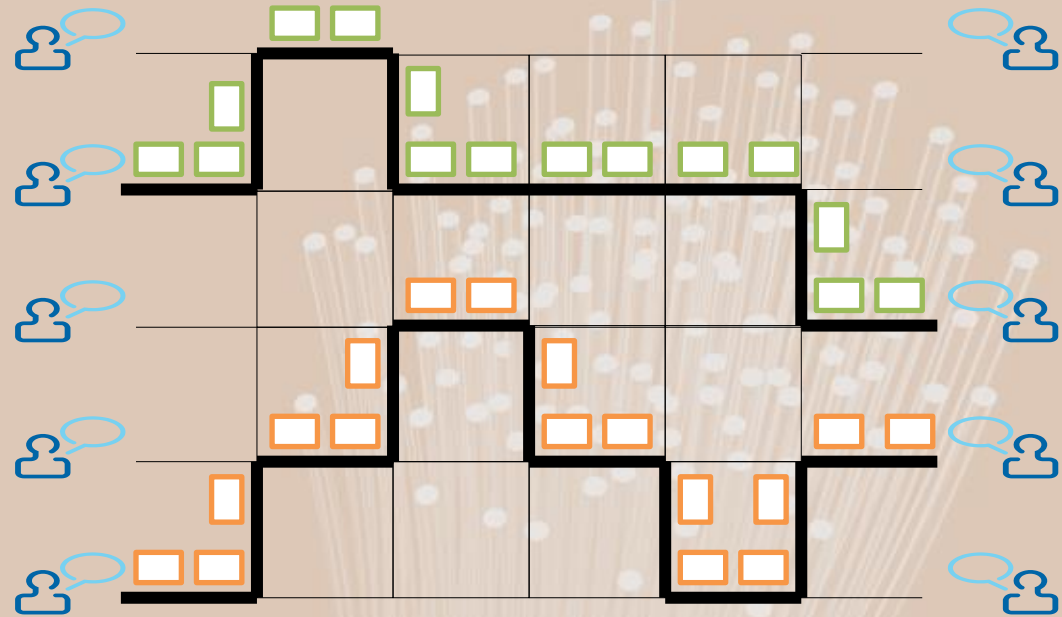
폴 바란@RAND(1960)
핵 무기에도 버티는
생존형 통신 수단 개발

레너드 클라인락 (1962)
컴퓨터를 시간의 축으로
쪼개서 공유할 수 있다면
회선도 같이 하면 안돼?

도널드 데이비스@NPL
(1964) 패킷 스위칭!

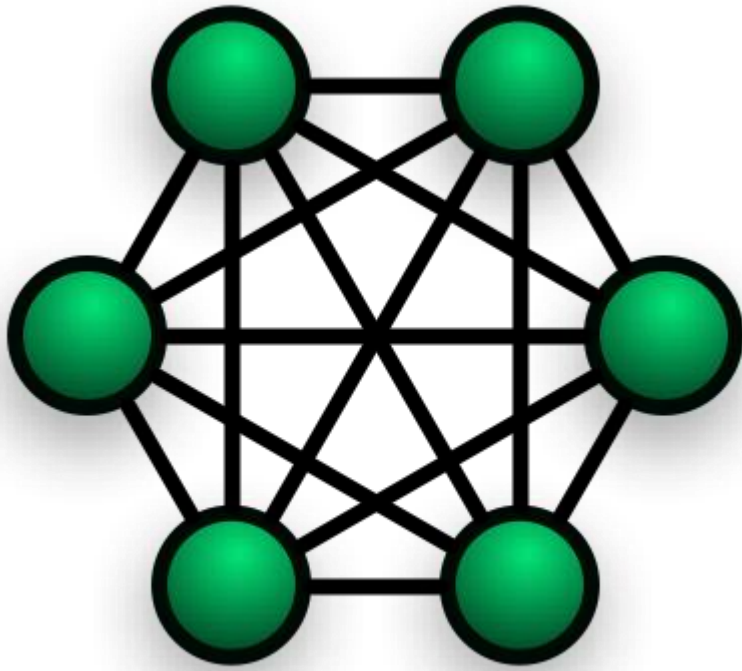
길을 미리 뚫어 놓는다.
 통화(세션) 끝까지 전용이다.
 회선이 낭비될 수 있다.
 품질이 보장된다.
 끊기면 끊긴다.

circuit switching



packet switching

패킷을 전달할 때 길을 정한다.
 통화(세션) 개념이 없다.
 회선을 공유할 수 있다.
 품질이 보장되기가 거의 불가능.
 끊기면 돌아서라도 간다.

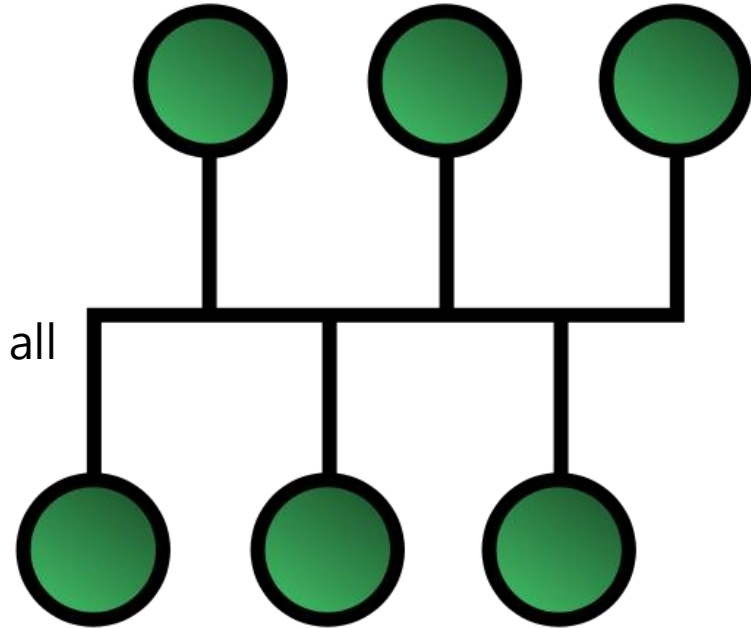


100억대의 컴퓨터를 완전히 연결하려면?

굵기 0.1mm의 회선으로 연결해도
8만 Km 높이로 전 지구를 덮어야 한다.



omni bus = for all



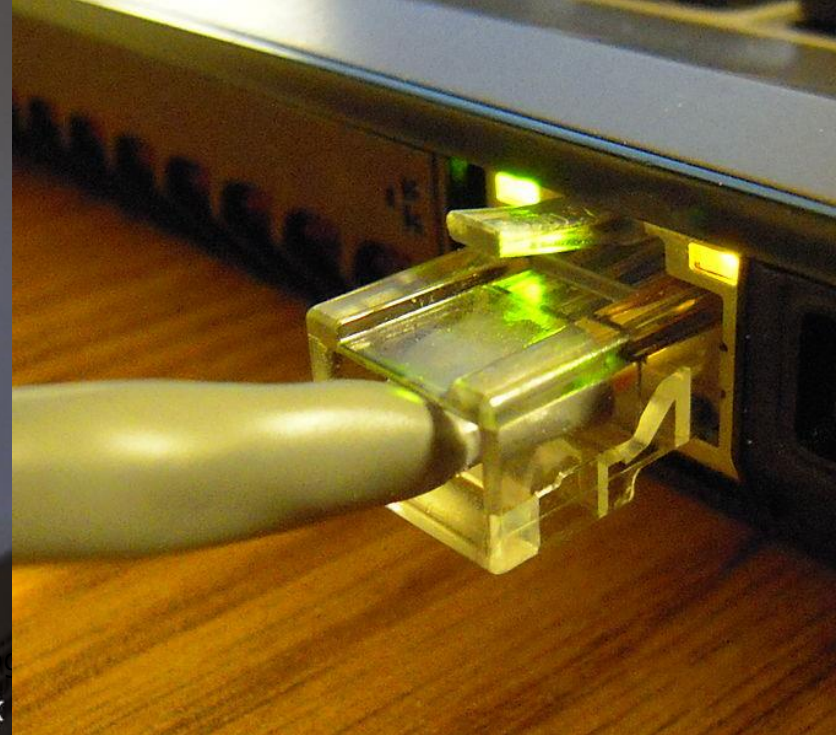


그림 출처: http://farm8.staticflickr.com/7267/7113714943_902f956c5b_z.jpg

costermk



그림 출처: <http://hbernstaedt.de/thinethernet.jpg>

버스+패킷의 운명: 주소 & 충돌 →

→ 메트칼프(1973) **Ethernet**

MAC 주소를 봉투에

CS: carrier sense 남이 안 보낼 때

MA: multiple access 여럿이 공유

CD: collision detection 충돌 확인

→ **random** back off

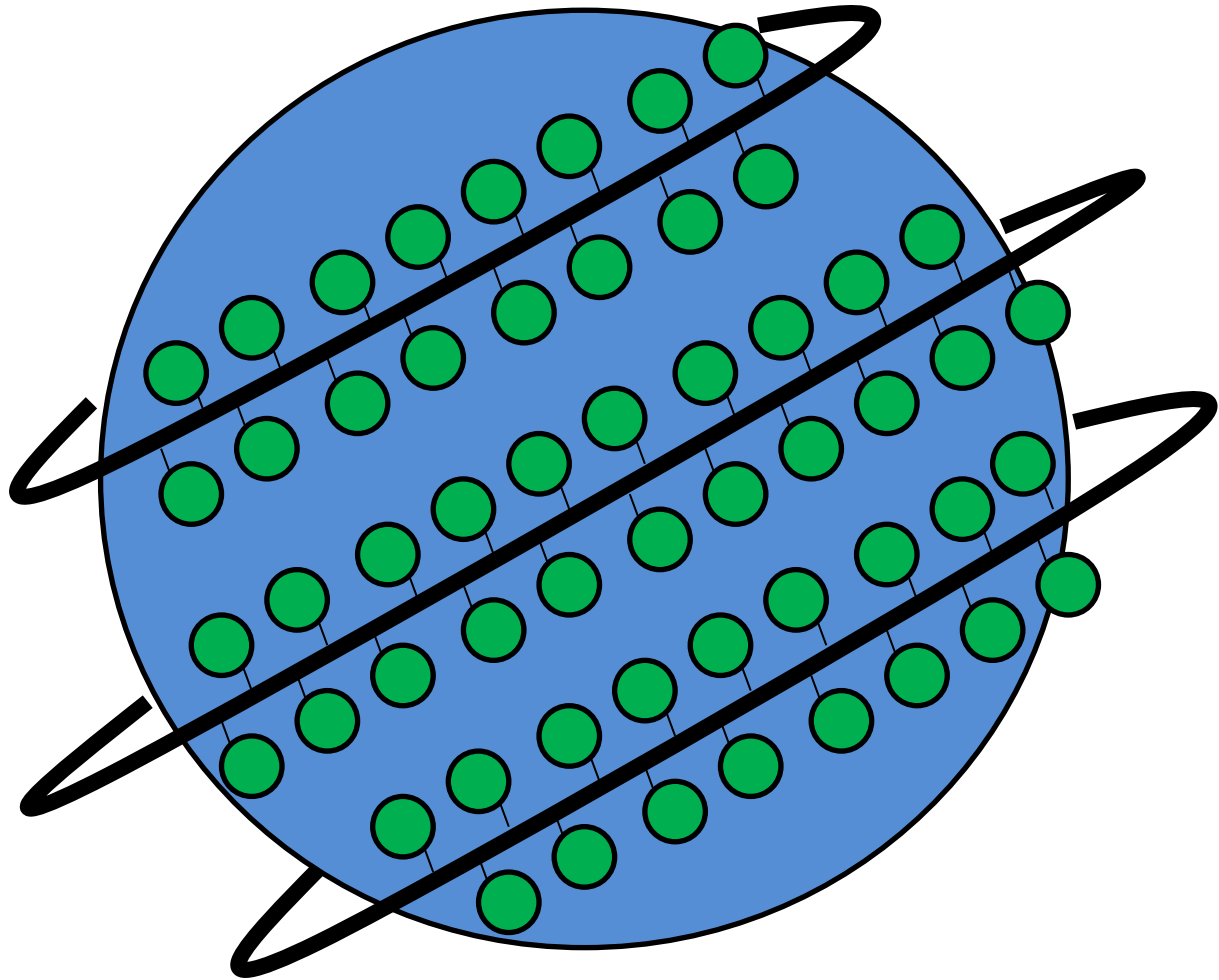
→ 그리고 도청

Promiscuous mode

들리지만 못 듣는 척

Throat Chakra
made of
Ether.

전 지구 단일 버스 네트워크



곰벵이 빛 또는 너무 큰 지구

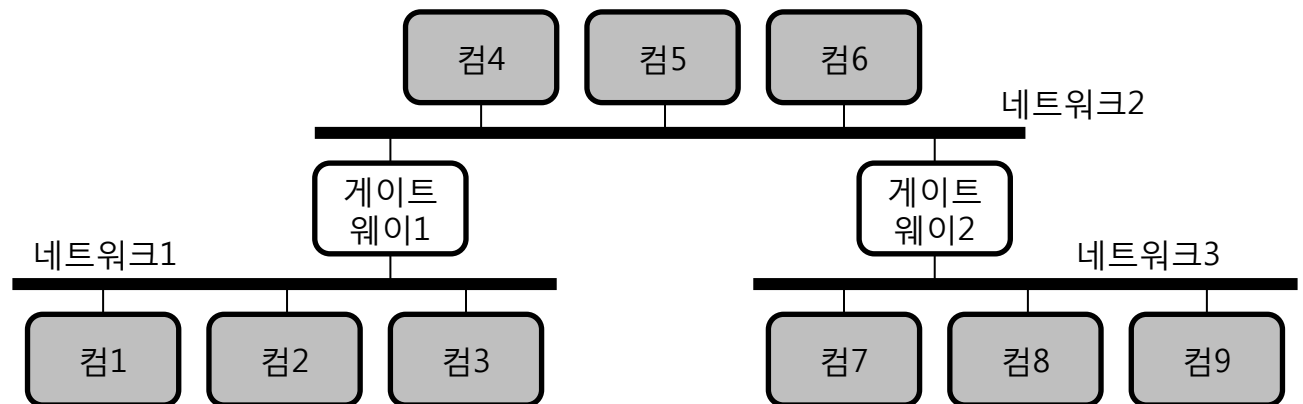


하나로 안 된다 ➔ 여러 네트워크로 쪼개자.
서로 연결은? ➔ 양 다리 걸친 장비를 만들자.

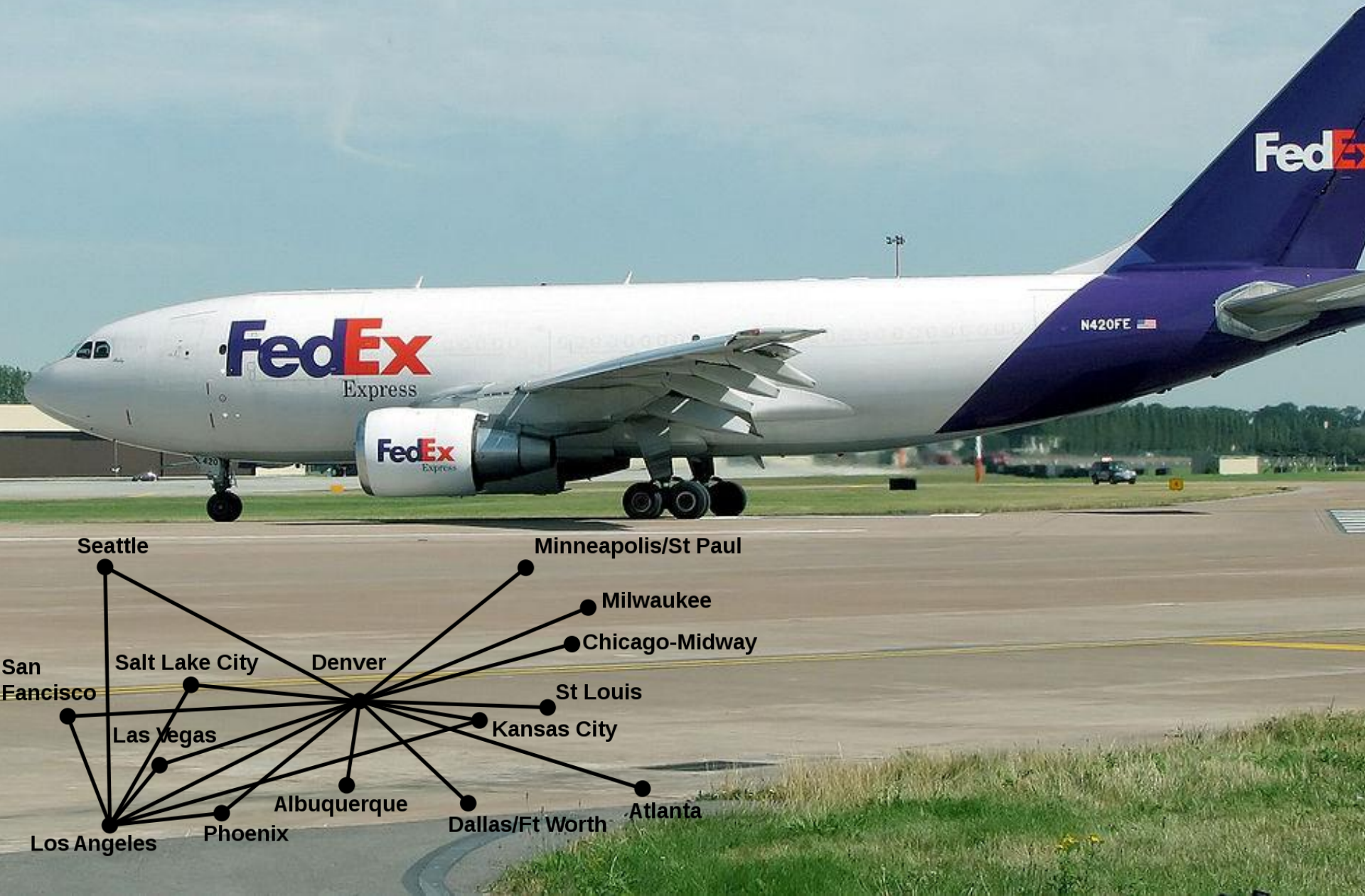
게이트웨이의 고민

- 무엇을 퍼 나를지 어떻게 아는가?
- 그것을 알기 위한 비용을 어떻게 줄일 것인가?

inter - net

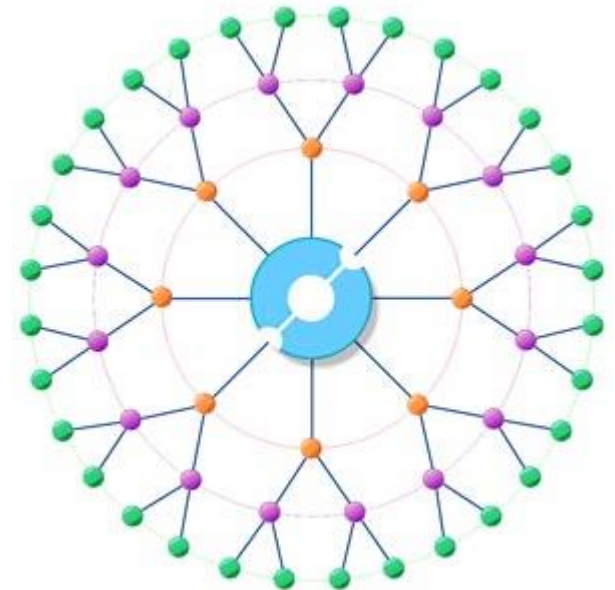
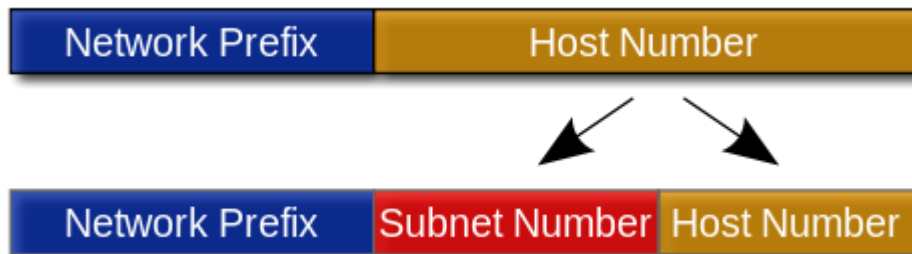
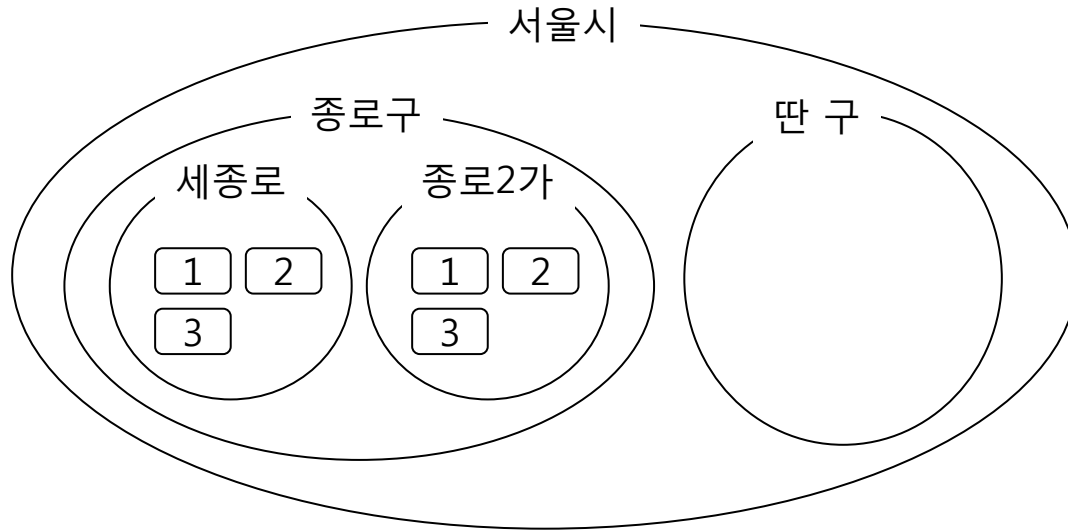


프레데릭 스미스 (1960s)
대학 리포트로 IT 기술을
이용한 당일 배송 시스템
제안 → C학점 $\pi\pi$



1. 모르면 위로 보내라. 고민은 한 곳에서 하자.
2. 주소는 "위치"를 나타내야 한다. (!= MAC)
 - ➔ 컴퓨터 주소 = 네트워크 주소 + 자신을 구별하는 번호
 - ~ = "서울시 종로구 세종로" + "1번지"

IP 주소와 라우팅



계층 구조의 다른 시각

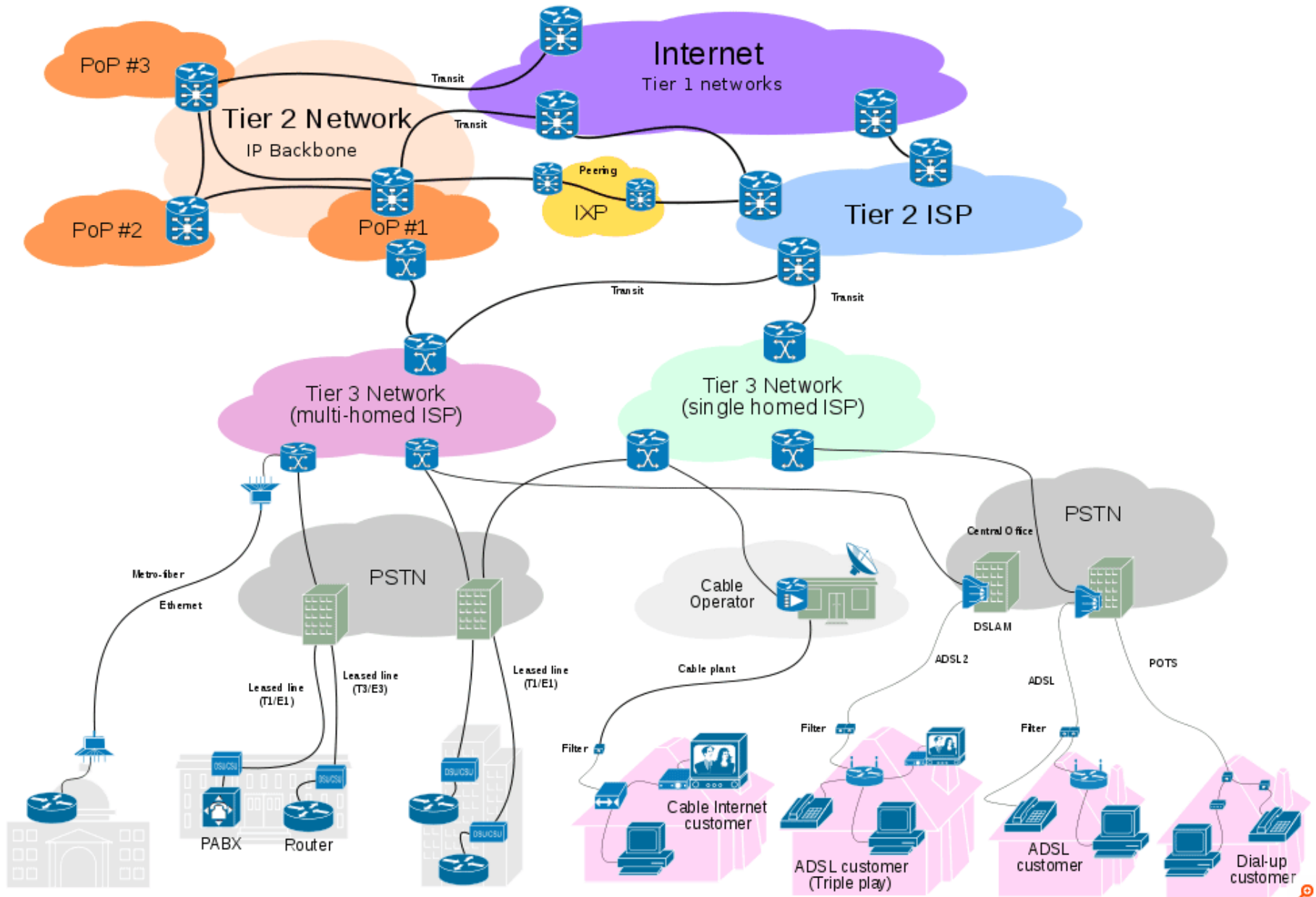
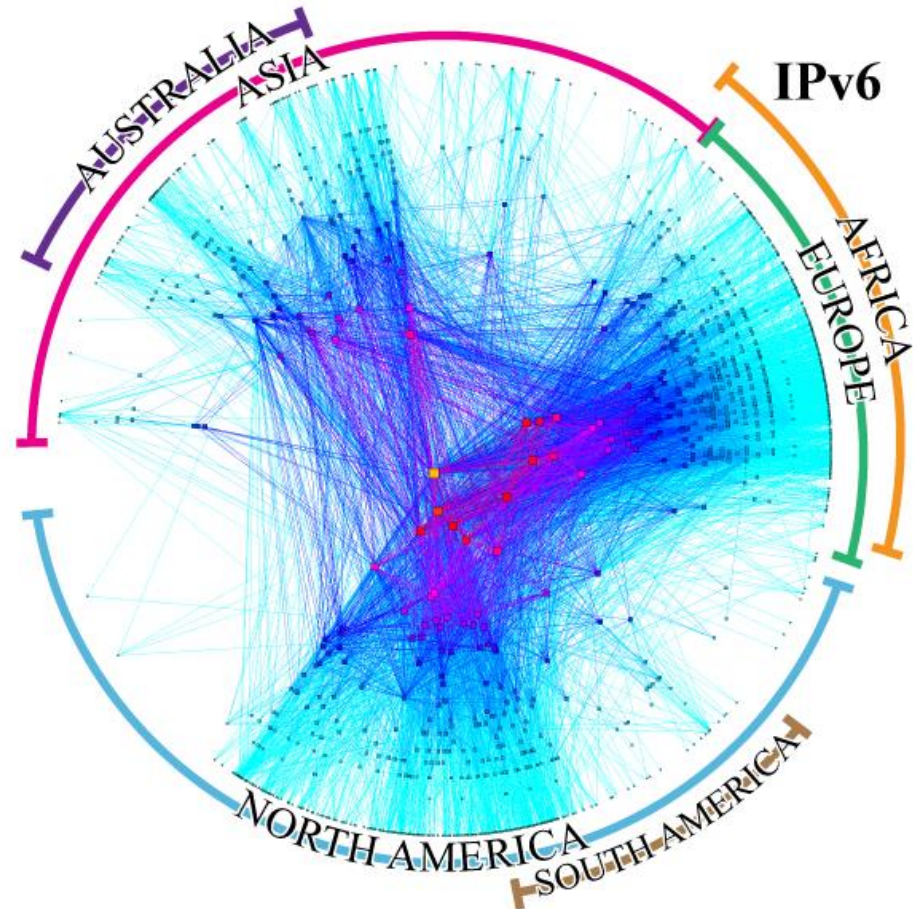
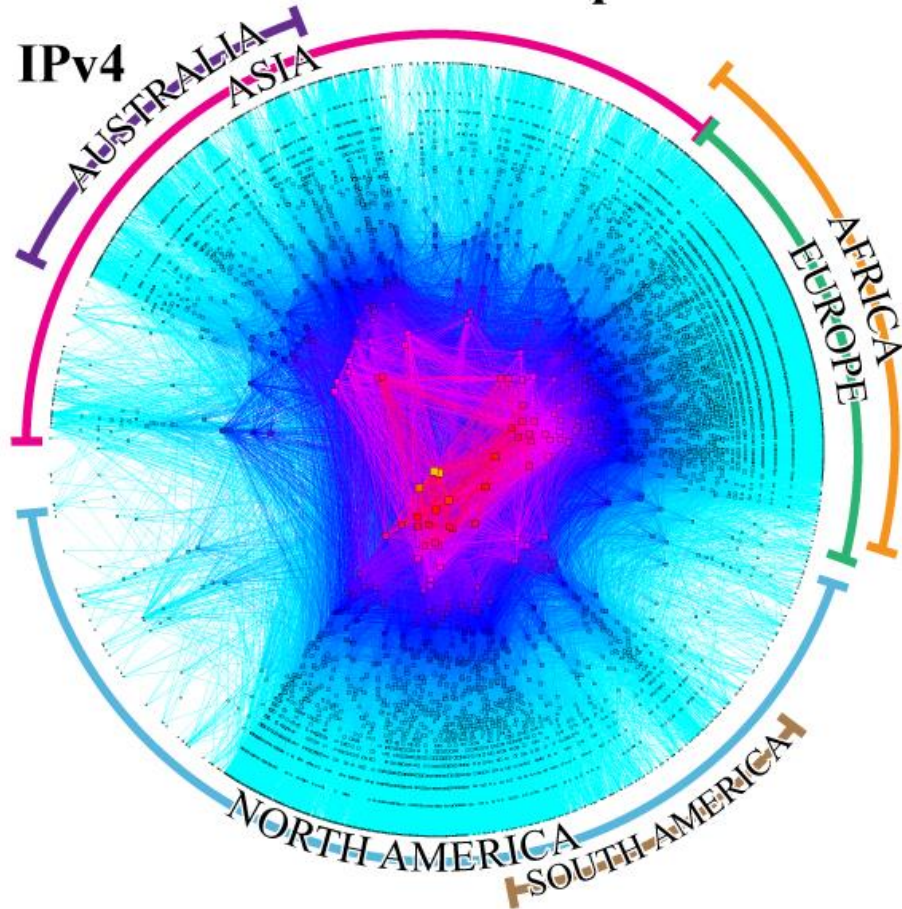
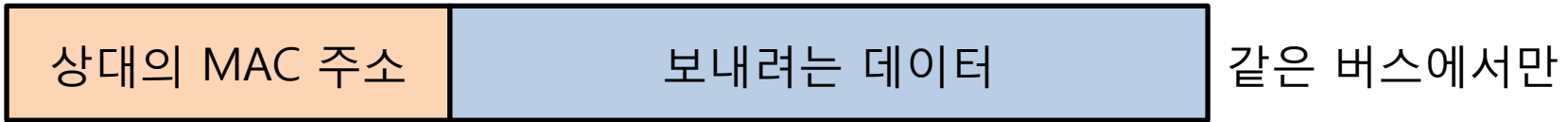


그림 출처: <http://arstechnica.com/security/2013/04/can-a-ddos-break-the-internet-sure-just-not-all-of-it/>

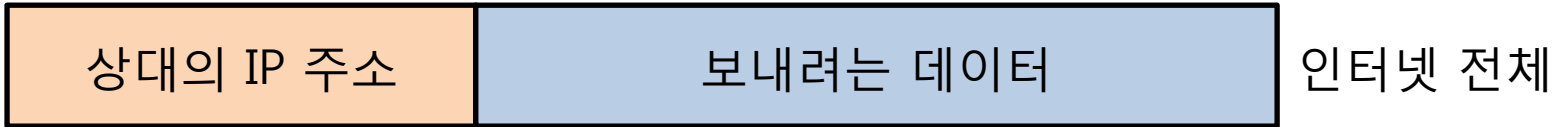
CAIDA's IPv4 & IPv6 AS Core AS-level INTERNET Graph



MAC 패킷



IP 패킷



하지만... 패킷을 보내고 받는 양자는 **늘 같은 버스**에 연결되어 있어야 한다!

MAC의 탈을 쓴 IP



IP 패킷이 생각하는 내용물

MAC 패킷이 생각하는 내용물



ARP 요청

브로드캐스트 주소

"IP 주소 X.X.X.X는 누구예요?"

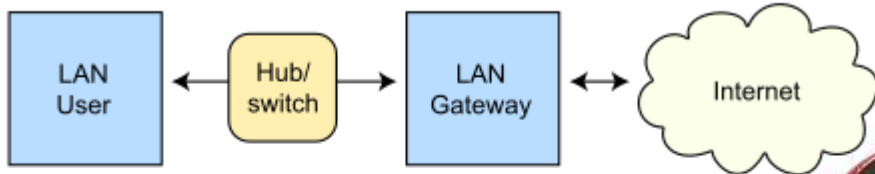
ARP 응답

상대의 MAC 주소

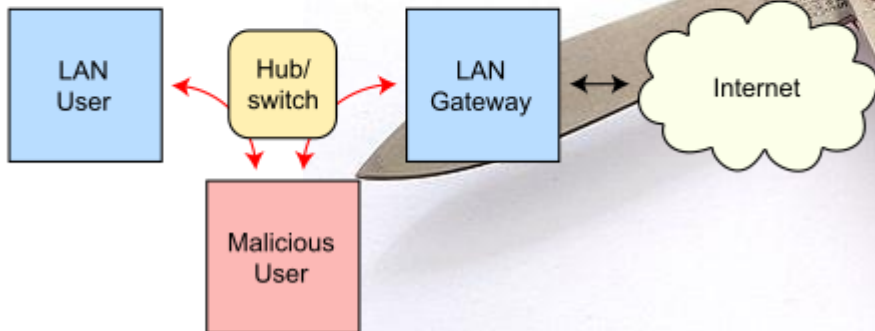
"X.X.X.X의 MAC 주소는 YY:YY:YY:YY:YY:YY 입니다"

Broadcast Q → Unicast A
- Man-in-the-middle attack
- Denial of service attack
+ IP 통제

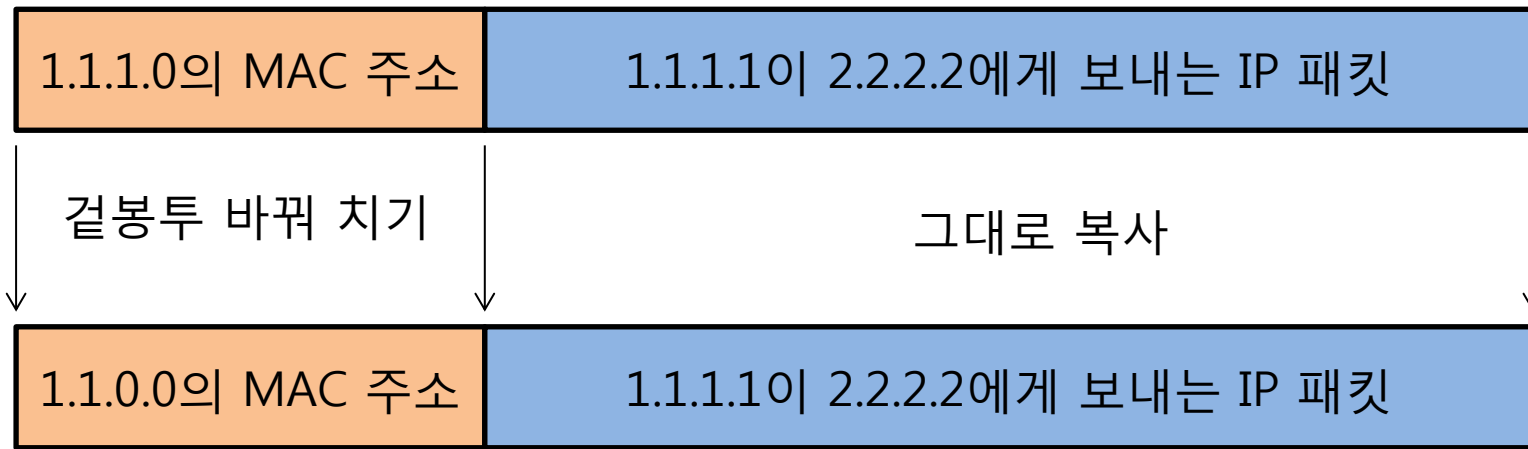
Routing under normal operation



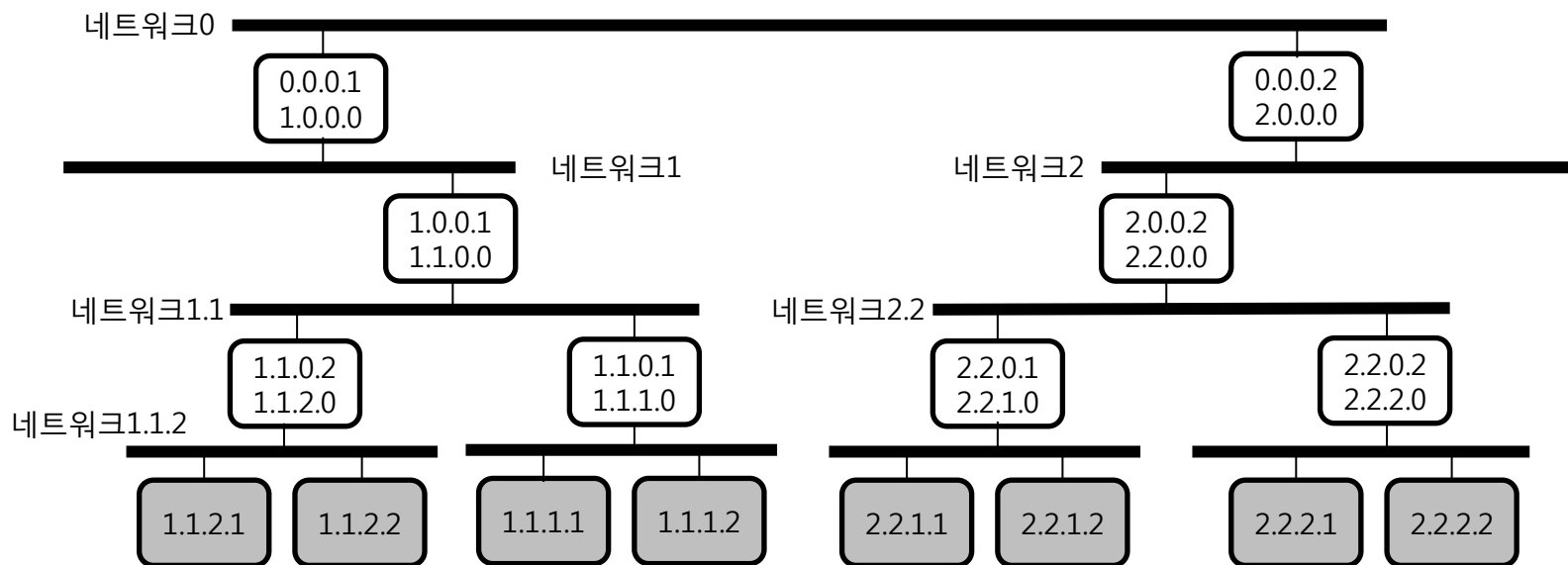
Routing subject to ARP cache poisoning



게이트웨이 1.1.1.0이 받은 패킷



게이트웨이 1.1.0.0에게 떠넘긴 패킷



포
대
갈
이

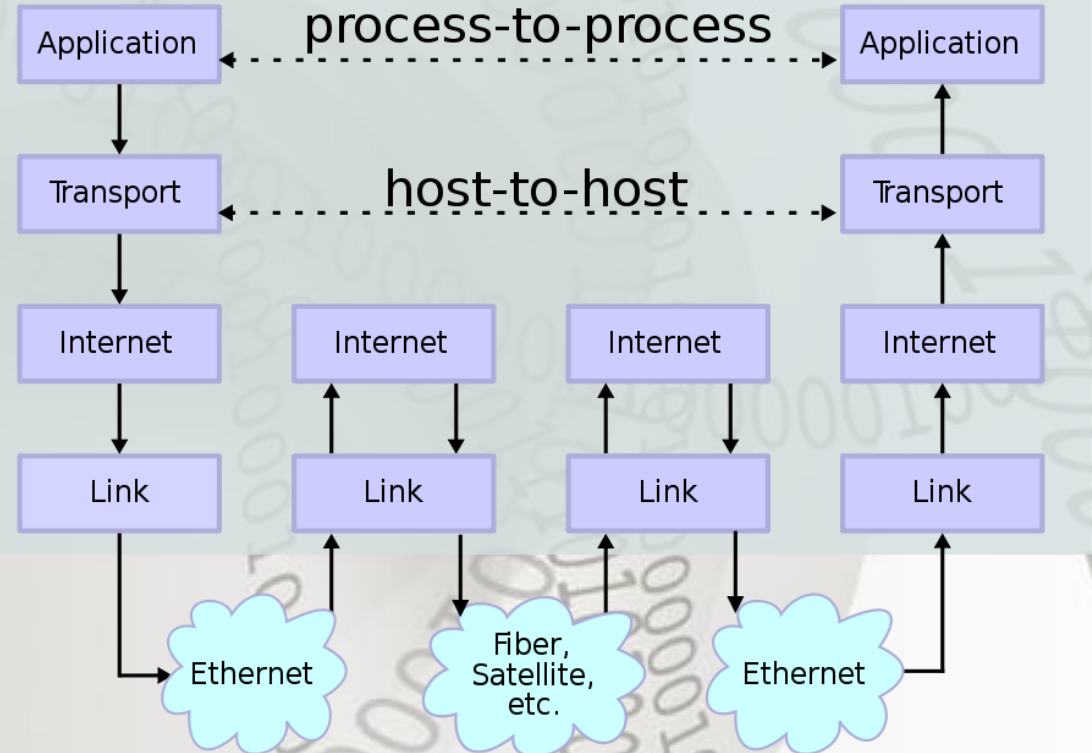
Data Flow

L4

L3

L2

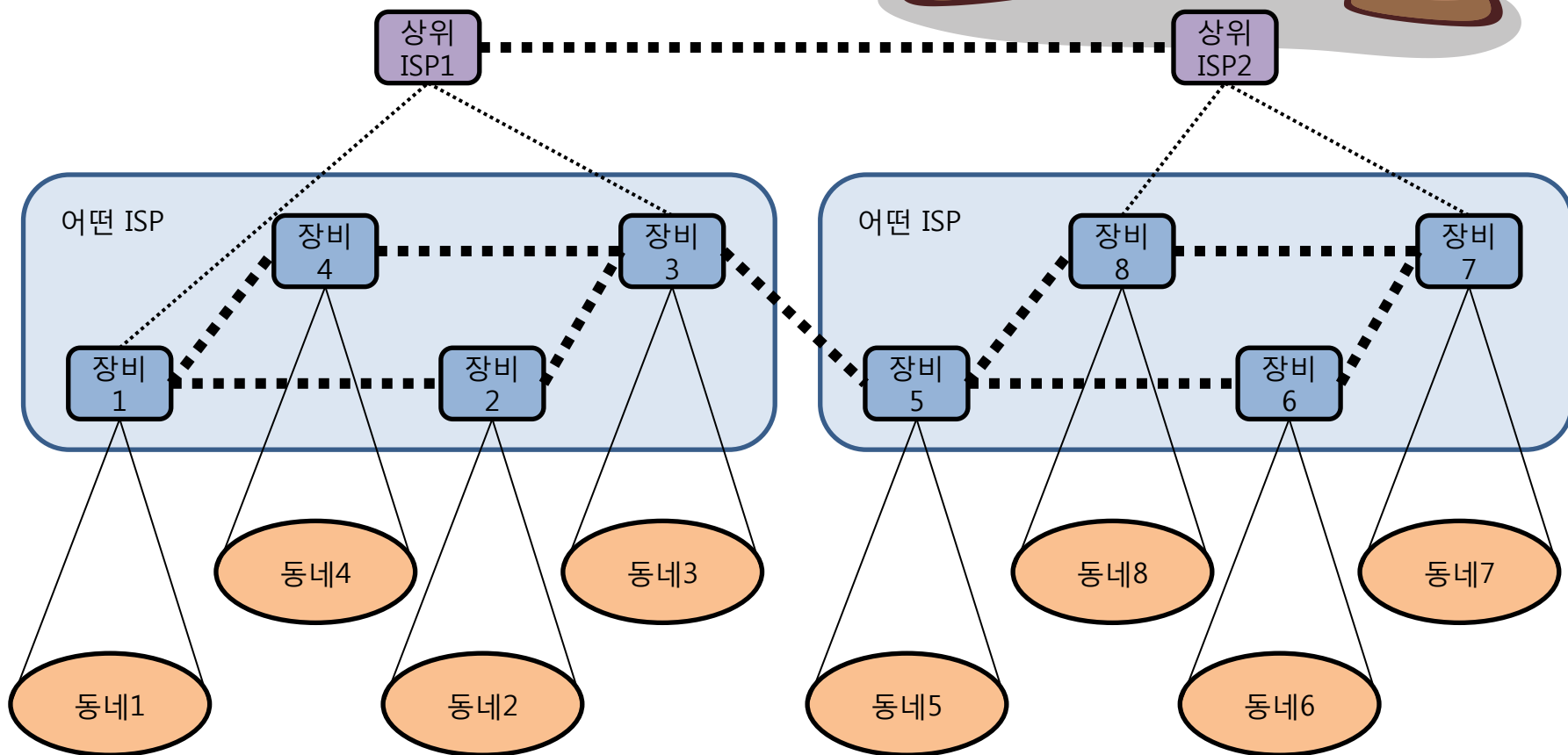
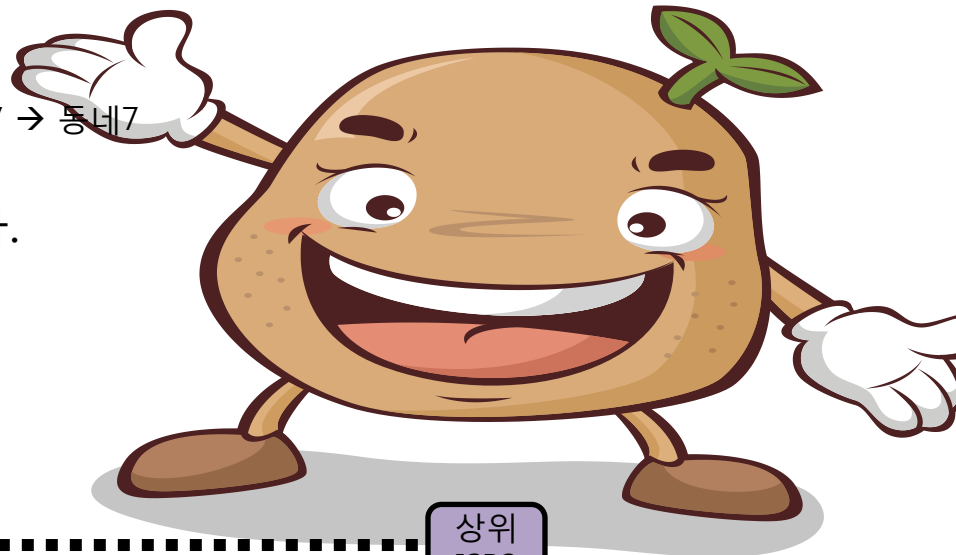
L1



오르락 내리락

동네1 → 장비1 → 상위ISP1 → 상위ISP2 → 장비7 → 동네7
동네1 → 장비1 → 장비2 → 장비3 → 장비5 → 장비8 → 장비7 → 동네7

가는 길은 네트워크 장비의 **설정**에 따른다.
설정에는 이윤을 최대화하기 위한
여러 가지 요소가 고려된다.

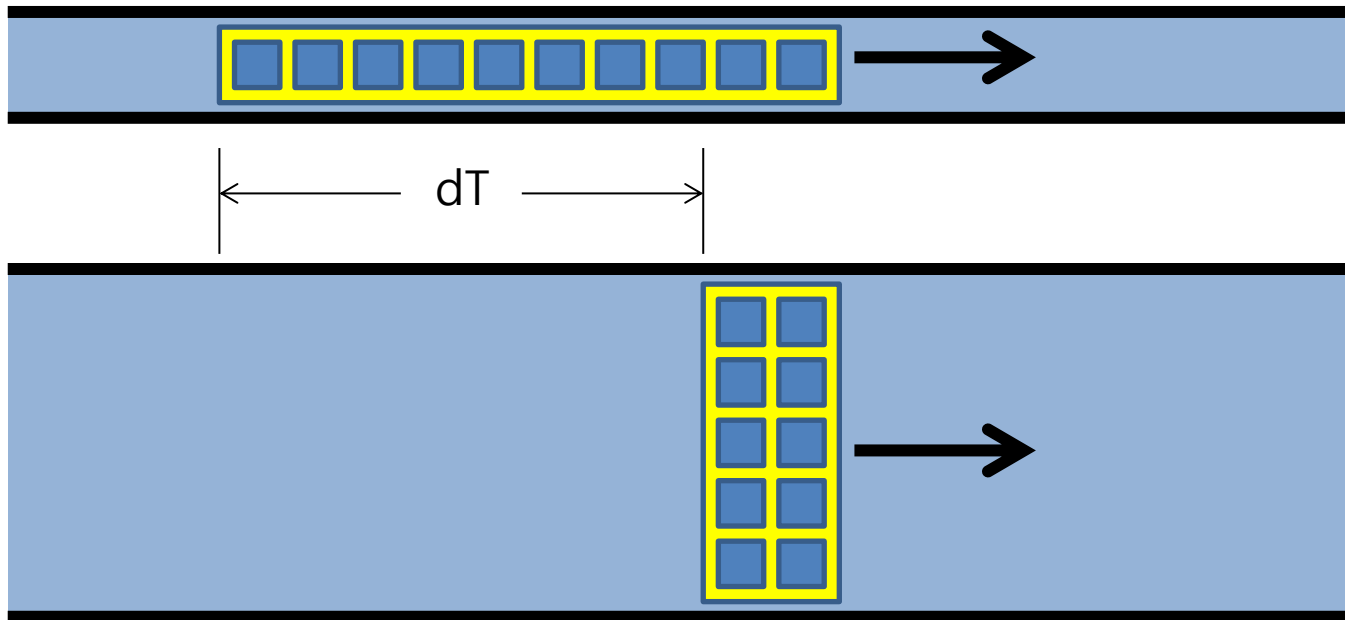




패킷의 전달 속도는 거의 같다. 다만 길이 넓어질 뿐

굵고 짧게 혹은 가늘고 길게

패킷 몇 개 보내서는 낙이 없다.

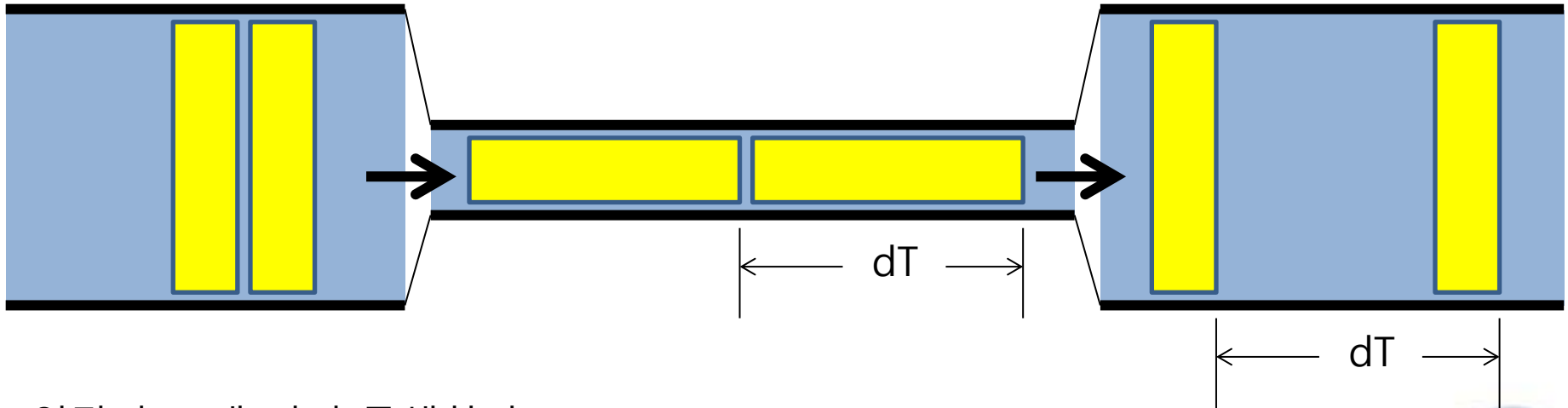


n개 연달아 보내면 $n \times dT$ 만큼 짧아진다!

네트워크A

네트워크B

네트워크C



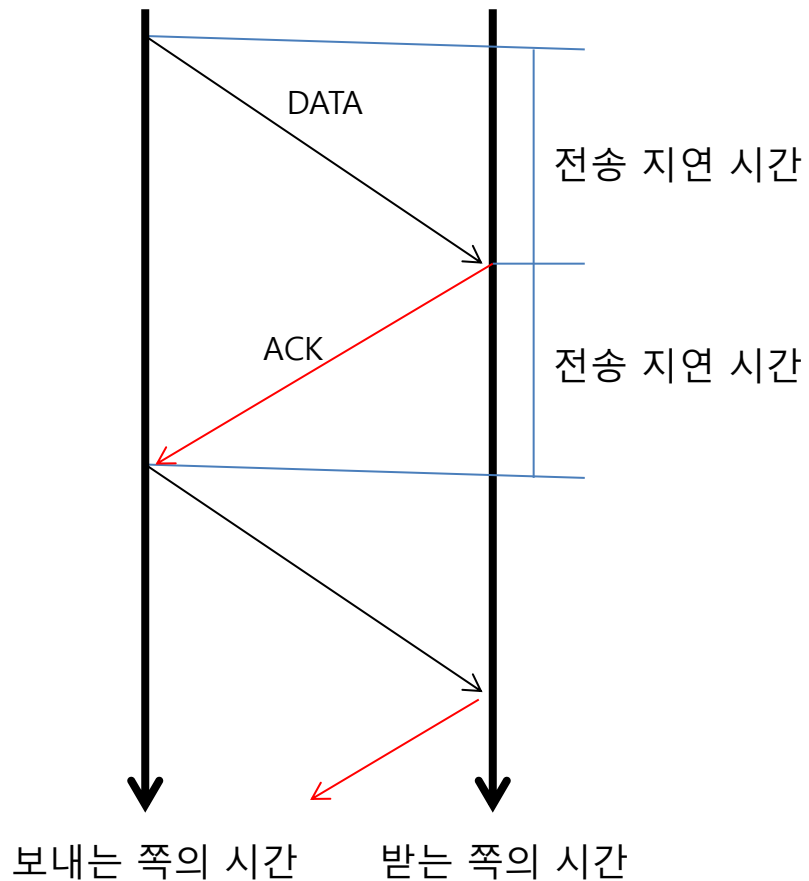
연달아 보낸 것이 무색하다.

그리고 패킷이 **손실** 될 수도...



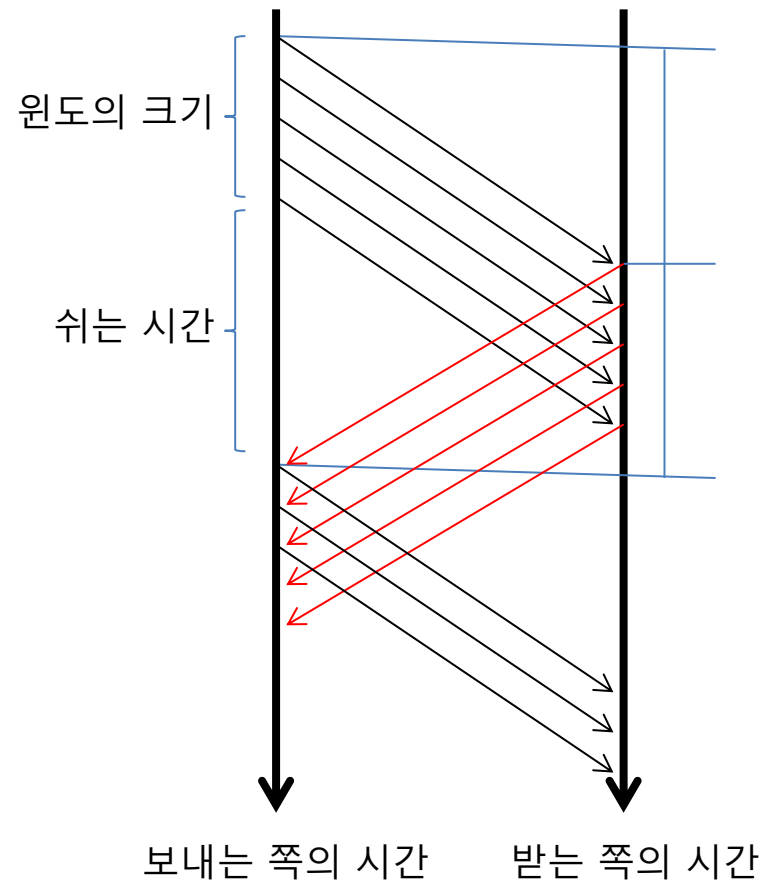
순진한 ARQ

전달을 확인할 수 있지만 전달아 보낼 수 없다.
패킷 손실을 확인하는데 오래 걸린다.



윈도 개념 적용

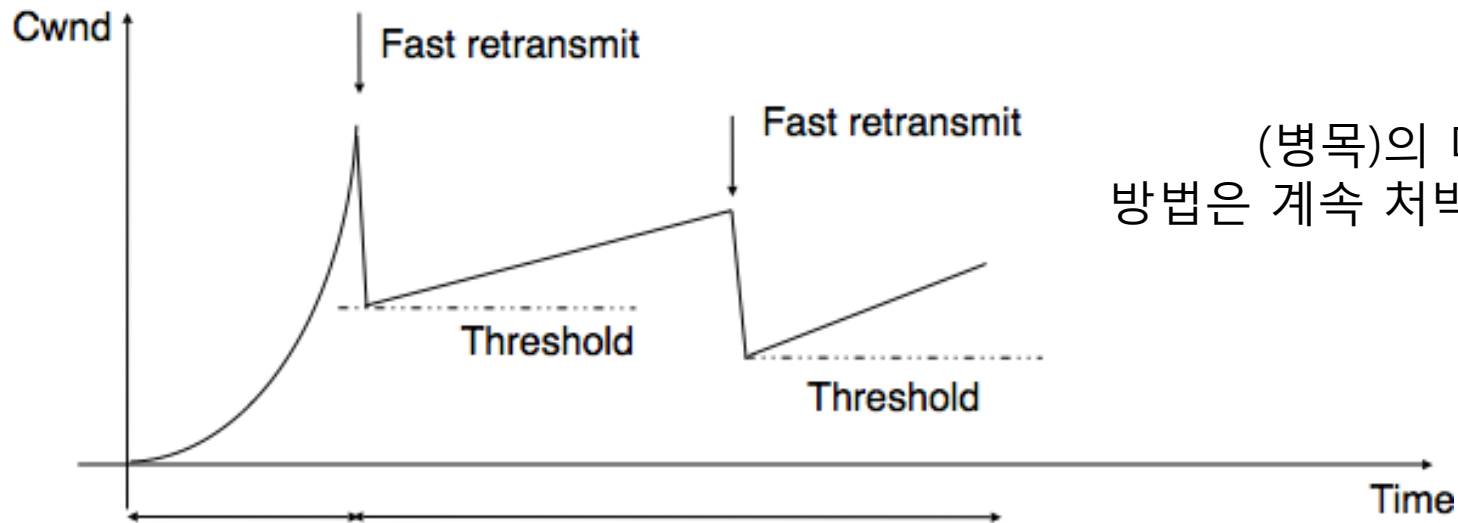
답이 안 와도 몇 개는 믿고 보내자.
패킷 손실도 더 빨리 알 수 있다. 왜?



전송 계층 프로토콜의 목표는

Bandwidth x Delay

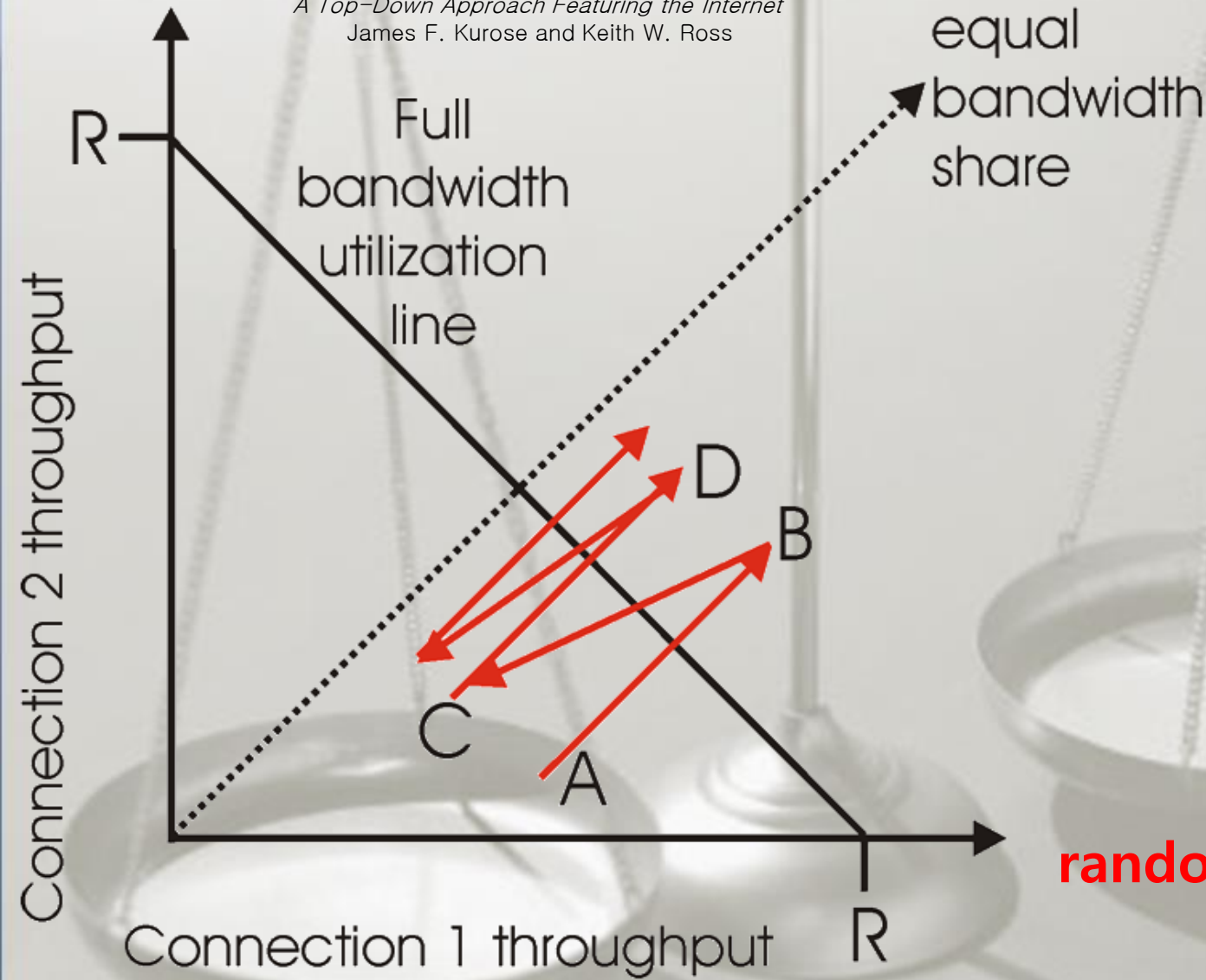
만큼의 패킷을 네트워크에 흐르게 하는 것!



(병목)의 대역을 아는
방법은 계속 쳐박는 수 밖에
→ AIMD

Slow-start
exponential increase of cwnd

Congestion avoidance
linear increase of cwnd

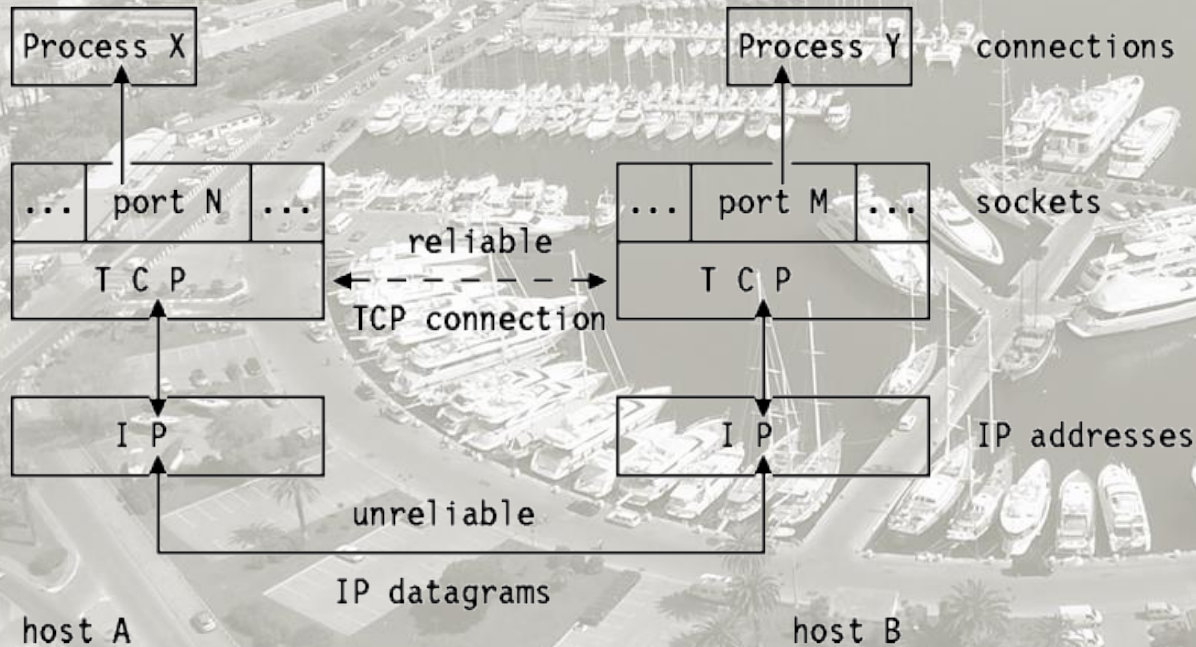
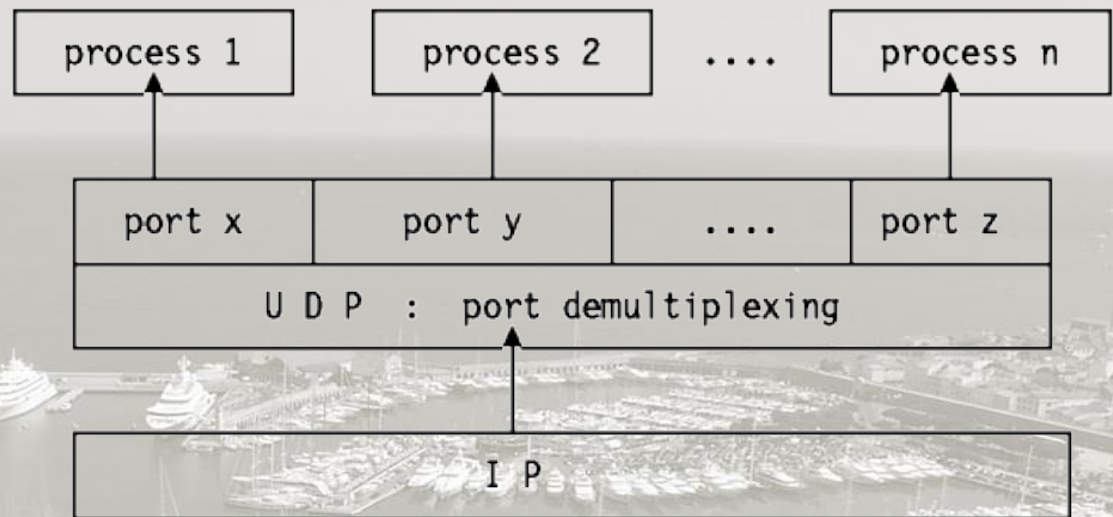


tail drop vs.
random early drop vs.
any others

네트워크에서의 **의도적 간섭**은
언제 얼마나 허용되어야 하는가?

ports

공존을 허용하는 비밀 병기



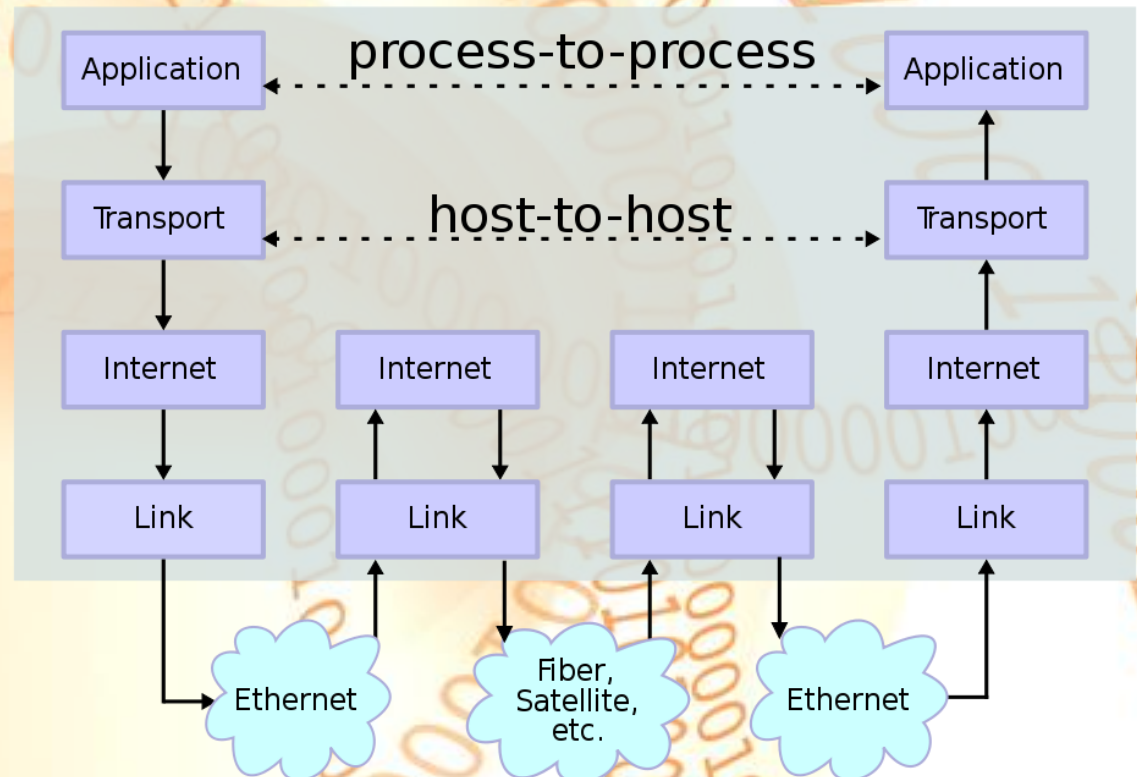
Data Flow

L4

L3

L2

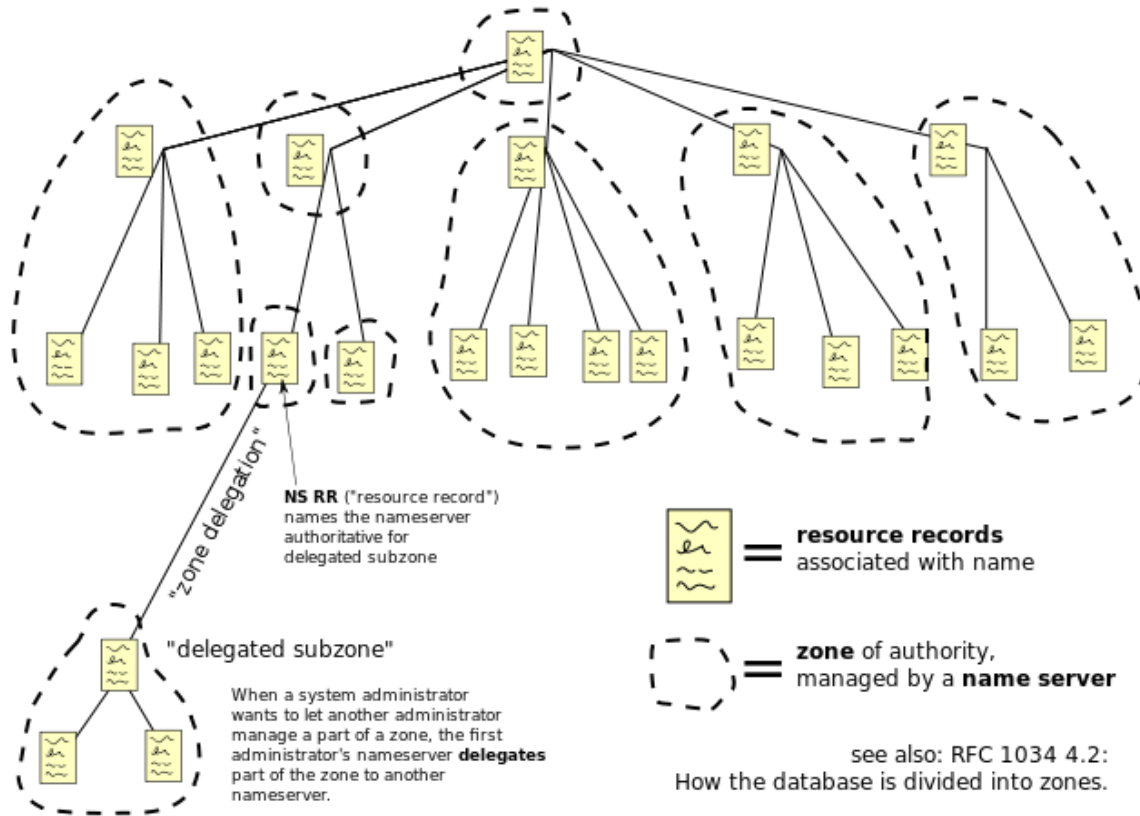
L1



L4는 e2e

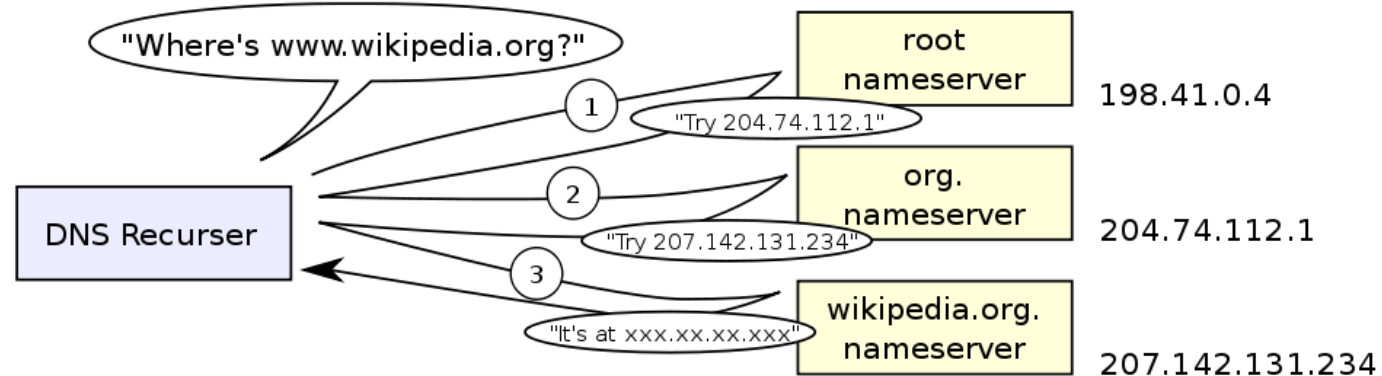
Domain Name Space

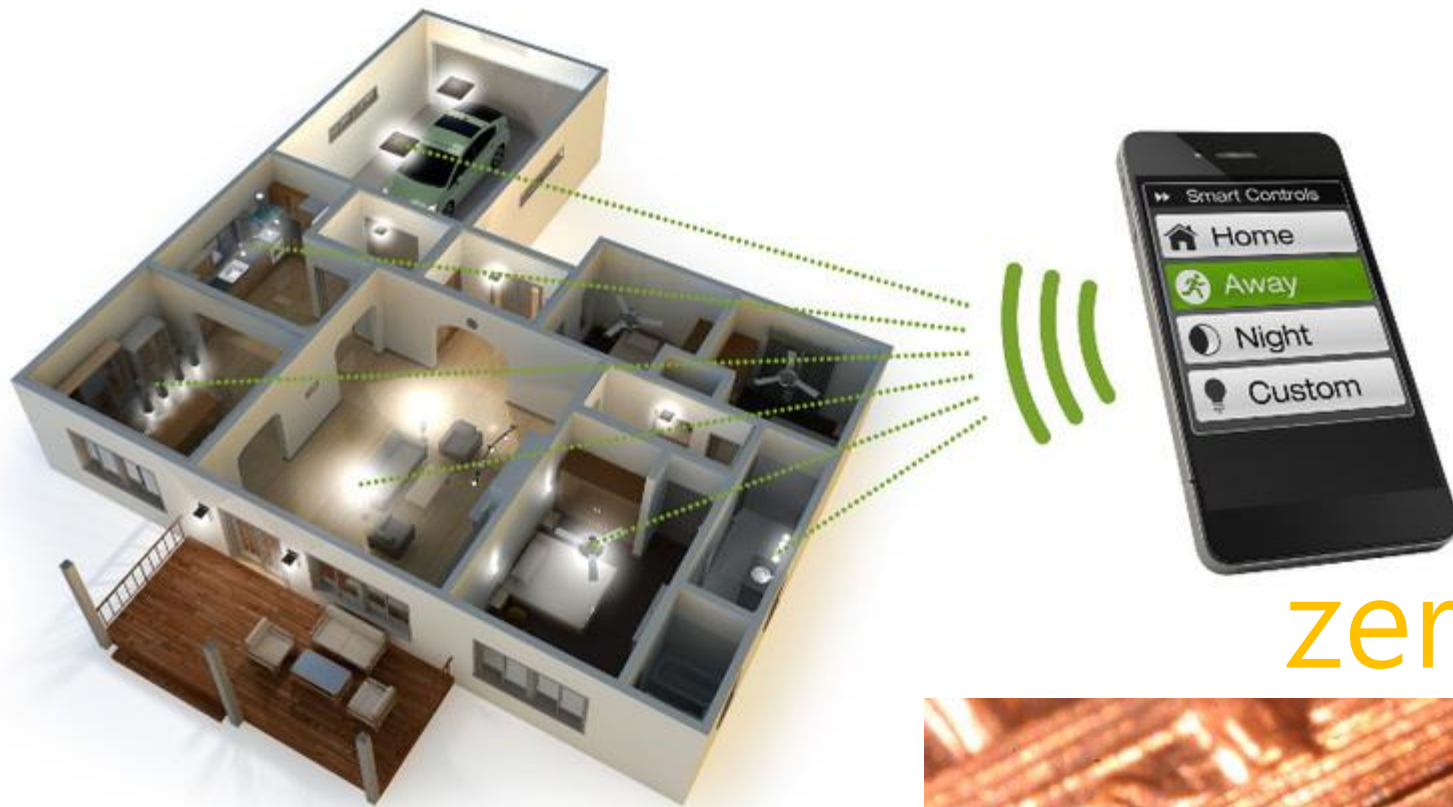
폴 모카페트리스(1983)
hosts 파일 관리를 분산
시키자.



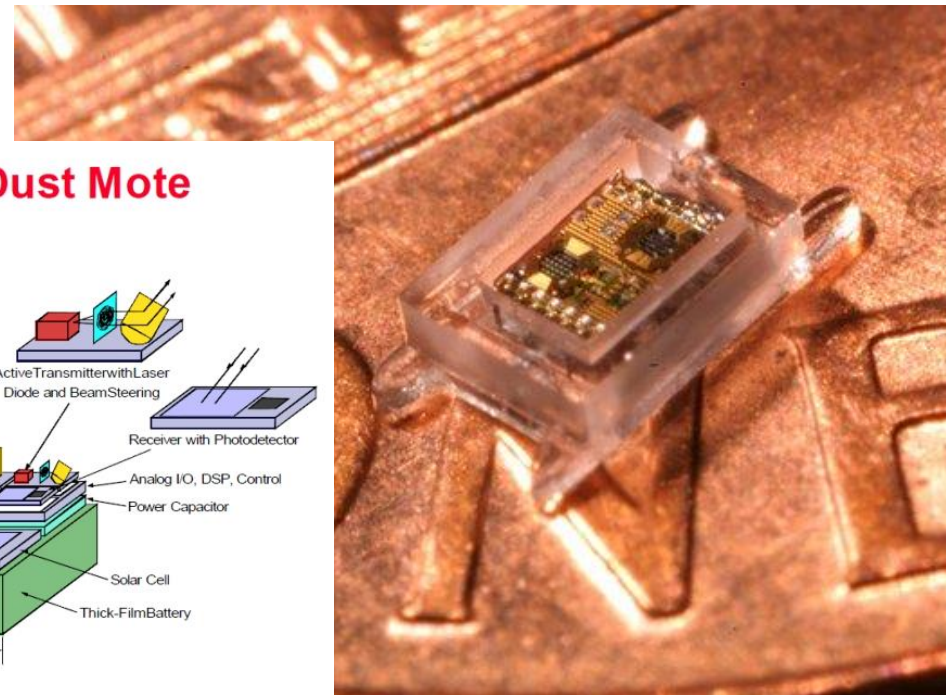
HOSTS.TXT

see also: RFC 1034 4.2:
How the database is divided into zones.





zeroconf



Smart Dust Mote

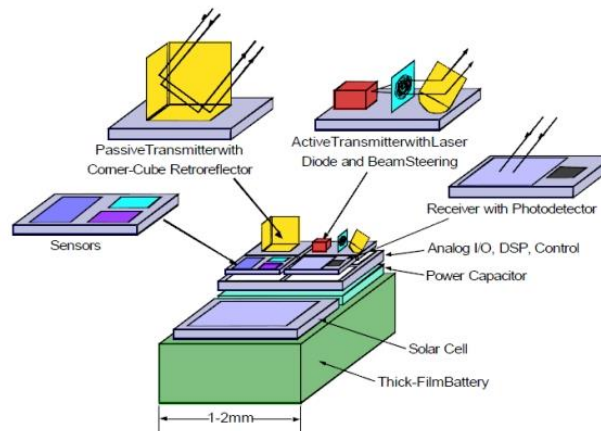


그림 출처: <http://inteldigitalreport.com>

그림 출처: <http://binarydissent.com>

DHCP 요청

브로드캐스트 주소

네트워크 설정 하는 법 알려줘요

DHCP 응답

브로드캐스트 주소

상대의 MAC 주소

당신의 IP는 X.X.X.X이고 G/W는...



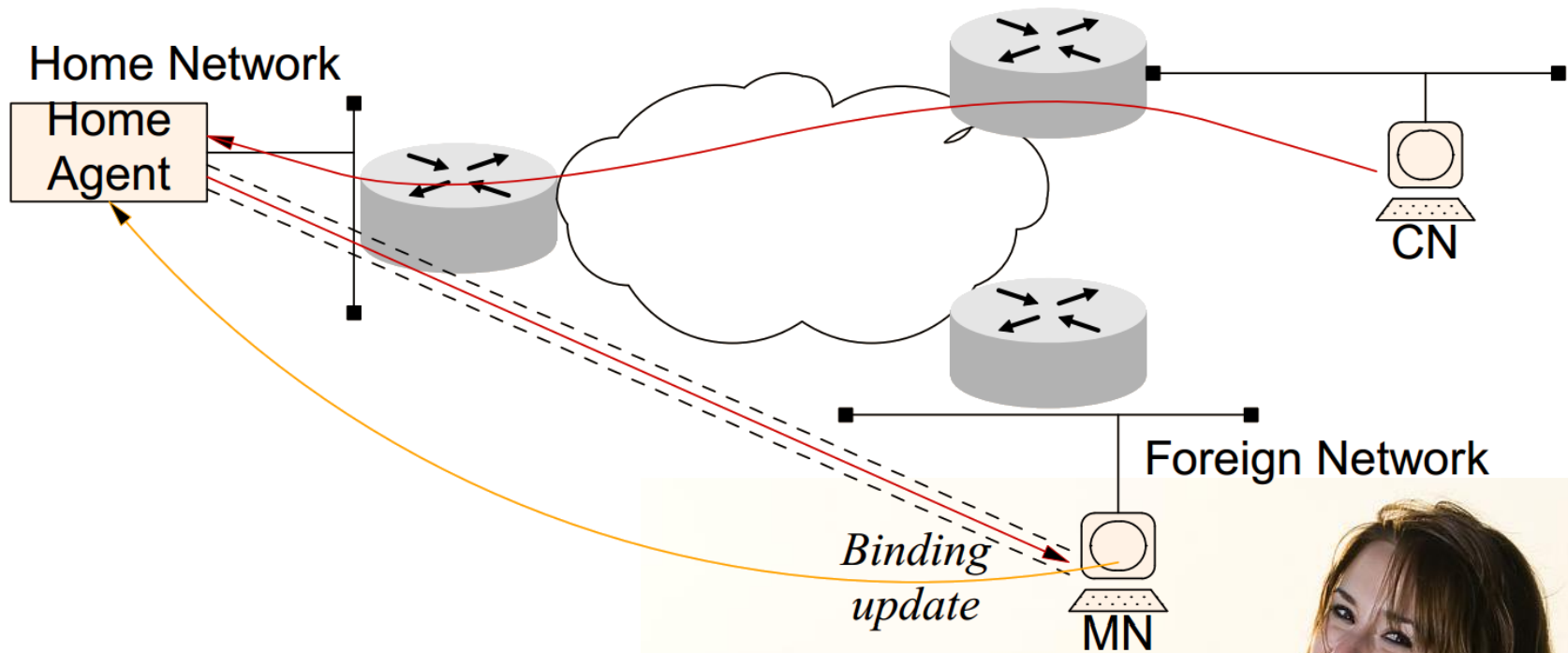
NAT

Public address vs. Private address

10.0.0.0/8 (255.0.0.0)
172.16.0.0/12 (255.240.0.0)
192.168.0.0/16 (255.255.0.0)

ISP (ingress) filtering

127.0.0.1 해킹하지 마세요 ^^



IP tunneling
Triangular routing
Binding update

semantic overload

IP address = Locator + Identifier

스마트폰(WIFI+4G) : 같은 기계 다른 주소

DHCP, NAT, proxy : 다른 기계 같은 주소

Mobile IP / Multi homing : 같은 카드 다른 주소



route aggregation

efficiency vs. flexibility

Provider independent address block



25%

패킷?
fiber

평평한 인터넷
Backbone vs. Google & CDN

Goodbye hosts!
computing → data → contents
pull → push

인터넷이 필요한지?
facebook / kakao

많은 인터넷?
clean slates / openflow