

Device-to-Device (D2D) 기술 동향

2013년 7월

경북대학교 통신프로토콜연구실

강형우 (hwkang0621@gmail.com)

요 약

최근 스마트폰 및 태블릿 PC의 보급으로 음성 위주의 이동통신 서비스가 무선 멀티미디어 콘텐츠 중심으로 변하고 있다. 이에 따른 고용량 멀티미디어 콘텐츠를 전송하기 위해 모바일 데이터가 급증하고 있다. 이러한 모바일 데이터의 폭증현상은 앞으로 더 심화될 것으로 보이며, 이에 따른 기지국의 부담 및 주파수 고갈 문제가 대두되고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위한 노력으로 단말 간 직접통신 기술에 대한 관심이 증가하고 있고, 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 고에서는 4세대 이동통신 기술인 LTE-Advanced 망에서의 D2D 통신을 비롯하여 관련 기술에 대해서 소개한다.

목 차

1. 서론.....	2
2. LTE-D2D 경쟁 대상 기술	4
2.1 Wi-Fi P2P	4
2.2 BLUETOOTH.....	5
3. LTE-D2D.....	6
3.1.1 LTE-D2D에서의 세션 설정 절차	7
3.1.2 LTE D2D의 연구 이슈.....	11
4. 결론.....	11
참고 문헌	12

1. 서론

최근 스마트폰의 급격한 보급과 음성 중심의 이동 통신 서비스가 무선 멀티미디어 콘텐츠를 중심으로 하는 데이터 위주의 서비스로 전환됨에 따라 모바일 데이터가 급증하는 추세를 나타낸다. 최근에는 iPad, 갤럭시탭 등의 태블릿 PC 보급이 증가하면서 무선 트래픽의 증가 추세는 더욱 가파르게 상승할 것으로 예측된다. 이러한 폭발적으로 증가하는 데이터 트래픽을 이동통신망에서 수용하기 위해 통신 사업자들은 새로운 기술을 연구하고 있다. 특히 단말 간 직접 통신 기술은 기지국의 과부하를 줄여주고, 보다 신속한 통신이 가능하므로 더욱 주목 받고 있다.

그림 1-1은 전세계 스마트폰 판매 추이를 보여준다. 그림에서 보이듯 전세계 적으로 스마트폰 보급율은 2013년 5억만대를 넘어섰다. 앞으로도 스마트폰의 보급은 지속적으로 증가할 것이고, 스마트폰 및 태블릿 기기의 보급으로 기지국의 무선 트래픽 부담은 계속 가중될 것으로 예상된다.

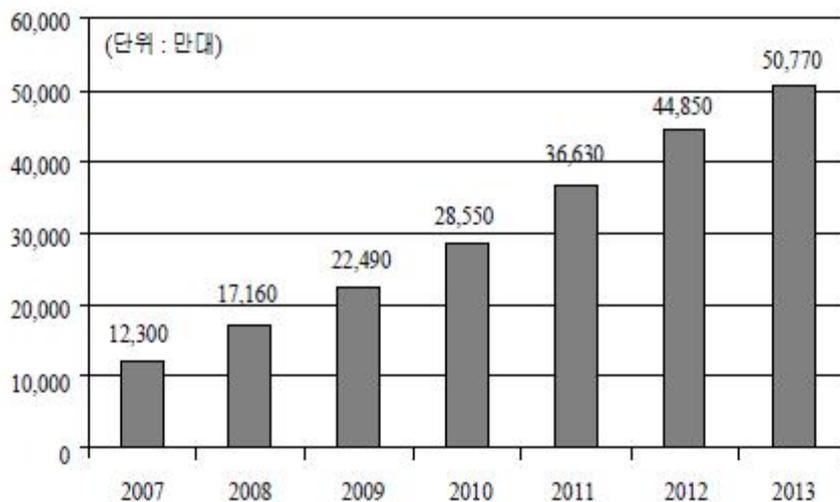


그림 1-1. 전세계 스마트폰 보급률 판매 추이

그림 1-2는 국내 스마트폰의 판매 추이를 나타낸다. 국내의 경우는 전세계 스마트폰 보급률보다 보급속도가 훨씬 높다. 2007년 애플사의 아이폰 발표 이후 스마트폰 사용자는 기하급수적으로 증가되고 있다.

이러한 스마트폰의 보급률 증가는 여러 요인들에 의해 진행되어 왔다. 먼저 Wi-Fi 장비의 가격 하락 및 Wi-Fi 칩이 고성능 컴퓨팅과 모바일 플랫폼에 통합됨에 따라, Wi-Fi 탑재 모바일 기기가 빠르게 증가한 것도 하나의 주요 요인이라 할 수 있다.[1]

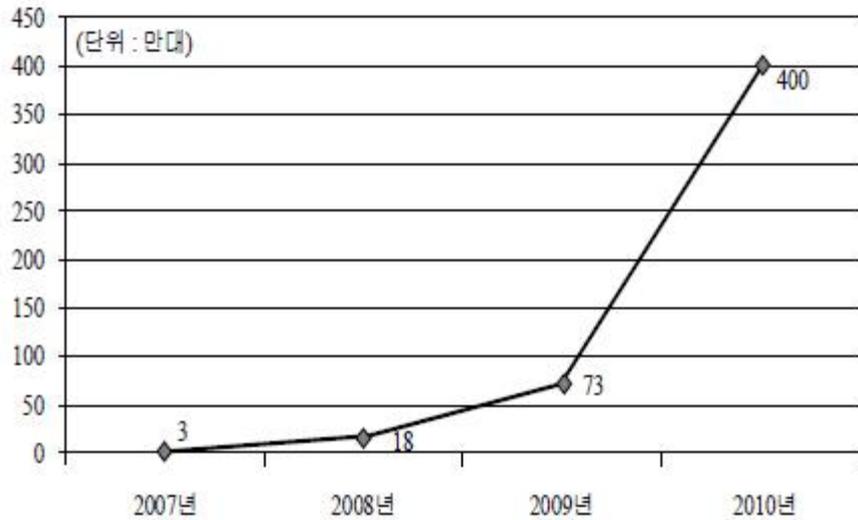


그림 1-2. 국내 스마트폰 판매 추이

그림 1-3은 Cisco의 모바일 데이터 트래픽 전망을 나타낸다. 스마트폰, 태플릿 PC는 2015년까지 수량 기준으로 각각 연평균 23.3%, 62.3%씩 초고속 성장이 이루어 질 것으로 예상되고 있다. 이러한 이동통신기기의 사용량의 증대와 일반 휴대 전화(2G)의 24배에 해당하는 스마트폰 송수신 데이터의 용량 증가는 모바일 데이터 트래픽의 폭증 현상을 유발시킬 것으로 예상된다. Cisco의 2011년 보고서에 의하면 2015년 글로벌 모바일 데이터 트래픽은 2010년 대비 26배 증가한 6,254PB에 이를 것으로 전망된다.[2]

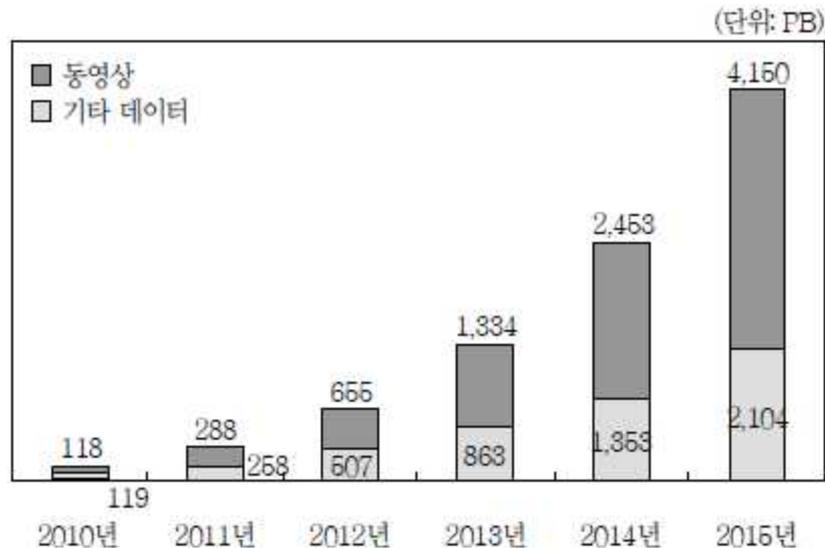


그림 1-3. 모바일 데이터 트래픽 증가 전망

이처럼 앞으로 스마트폰 보급은 더욱 증가할 것이고 이를 이용한 응용 서비스들도 더욱 활성화 될 것이기 때문에 데이터 트래픽이 지금보다 훨씬 더욱 증가할 것으로 예상되고, 뿐만 아니라 스

마트폰 공급의 증가에 따라 주파수 수요도 같이 급증할 것이다. 하지만 그에 따른 공급은 더딘 실정이기 때문에 결국에는 주파수 부족 현상이 문제점으로 대두 될 것이라고 예상된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 노력으로서 3GPP LTE-advanced에서는 기지국의 전송 용량을 증대하기 위한 다중 안테나 기반의 MIMO 기술, 셀 가장자리에서 용량 증대를 위한 효율적 간섭제어기술(ICIC), 협력송수신(CoMP) 기술, 기지국 트래픽 부하 분산을 위한 단말 간 직접 통신(device-to-device communication) 기술 등이 개발되고 있다.

본 문서에서는 기지국 트래픽 부하 분산을 위한 단말 간 직접 통신 기술에 대해서 기술한다.

2. LTE-D2D 경쟁 대상 기술

최근 급격한 스마트폰 보급으로 인한 모바일 데이터 트래픽 증가뿐만 아니라 새로운 모바일 시장인 사람과 사물 간의 통신이나 사물들 간의 통신이 활성화 될 경우, 기지국으로 전송되는 트래픽은 감당하기 어려울 정도로 증가할 것으로 예상된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 기술로서, 본 절에서는 기지국으로 전송되는 트래픽을 분산시키고 인접 단말 간 직접 통신을 가능하게 하는 단말 간 직접 통신 기술을 소개하고자 한다.

LTE-Advanced에서 단말 간 직접 통신(D2D)이란 동일 eNB의 커버리지에서 인접한 두 단말 간에 직접적인 링크 연결을 통해 기지국의 중계 없이 데이터를 주고 받는 것을 의미한다. 이러한 단말 간 직접 통신은 하나의 eNB 커버리지 내에 존재하는 underlay 형태의 통신 링크로서 eNB와 동일한 주파수 자원을 이용하므로 eNB 또는 다른 단말기에 미치는 간섭을 최소화하면서 단말기 간 통신용량을 증대시키는 것이 중요하다.

본 절에서는 LTE-Advanced에서 논의를 시작하고 있는 LTE D2D 기술을 설명하기 앞서, 경쟁 대상 기술인 비인가 대역(ISM band)에서 제공되는 근거리 무선통신 기술인 Bluetooth[2]와 Wi-Fi P2P[3][4] 기술을 소개한다.

2.1 Wi-Fi P2P

최근 Wi-Fi Alliance(WFA)는 Wi-Fi Direct라는 모바일 기기 간 직접 연결을 통하여 데이터를 전달하기 위한 새로운 규격을 발표하였고 이에 따라 관련 업계에서는 Wi-Fi Direct 규격을 만족시키기 위한 활발한 기술개발 활동이 진행 중이다. 여기서 “Wi-Fi Direct”는 마케팅 용어로서 상표명에 해당하고 이에 대한 기술 규격은 Wi-Fi P2P이다.

기존 Wi-Fi 망에서는 AP를 통하여 접속한 후 인터넷 망에서 접속하는 방법으로 Wi-Fi 탑재 기기를 사용하는 것이 일반적인 방법이었다. Wi-Fi P2P에서는 기존의 Wi-Fi 표준 규격의 대부분의 기능을 유지하면서 디바이스 간 직접 통신을 지원하기 위한 부분이 추가되었다. 따라서 Wi-Fi

chip이 탑재된 기기에 하드웨어 및 물리적 특성을 충분히 활용하고, 주로 소프트웨어 기능 업그레이드만으로 디바이스 간 P2P 통신을 제공할 수 있는 장점이 있다. 또한 다른 근거리 통신 기술에 비해 넓은 서비스 영역을 제공하여, 300Mbps의 빠른 전송 속도를 보장한다. 동작 무선 환경은 2.4Ghz 혹은 5.8GHz 대역의 비인가 ISM band를 사용한다.

Wi-Fi P2P에서는 P2P 그룹 내부에서 기존의 infrastructure 망에서 AP의 역할을 담당하는 장치인 P2P group owner(GO)가 존재한다. P2P GO를 중심으로 다양한 P2P 클라이언트가 존재할 수 있으나 1개의 P2P 그룹 내에서는 오직 하나의 GO가 존재하고 나머지 장치들은 모두 클라이언트 장치가 된다. P2P GO와 P2P 클라이언트의 연결이 이루어지는 동작 수행을 위해 P2P 규격에서는 4개의 기능을 정의하고 있다. P2P discovery는 디바이스 발견, 서비스 발견, 그룹 형성, P2P 초대와 같은 기술을 다루고 있고, P2P group operation은 P2P 그룹의 형성과 종료, P2P 그룹으로의 연결, P2P 그룹 내의 통신, 지속적 P2P 그룹의 동작 등에 대한 내용을 다루고 있다. 또한 P2P power management는 P2P 디바이스 전력 관리 방법과 절전 모드 시점에 신호 처리 방법을 다루고 있으며, 마지막으로 managed P2P device에서는 한 개의 P2P 디바이스에서 P2P 그룹을 형성하고 동시에 WLAN AP를 통해 infrastructure 망에 접속하는 방법을 다루고 있다.

2.2 Bluetooth

Bluetooth는 작고, 저렴한 가격(5달러), 적은 전력소모(100mW)로 휴대폰, 노트북, PDA 등과 같은 휴대용 장치, 가정용 전자제품, PC 주변 장치들을 근거리(10~100m)에서 무선으로 연결하기 위한 하나의 무선 인터페이스 규격 사양이다. 무선 환경으로는 비인가 주파수 대역인 ISM band의 2.45GHz band를 이용하고 최대 721kbps 데이터 전송 속도와 3개의 음성 채널을 지원한다. 또한 블루투스에는 전력 소모량이 30 micro Amps인 '대기모드'에서부터 3~30mAmps 범위의 전송량이 많은 장치에 이르기까지 다양한 제품을 대상으로 하고 있다. 도달 거리 측면에서는 in room(사무실/회의실/가정)과 personal(사용자의 주변) 공간 내에서 지원하도록 개발 되었다. 블루투스는 소모 전력이 작고 주파수 대역을 나누어 사용하기 때문에 전송할 데이터를 여러 주파수에 걸쳐 분할해 전송할 수 있다. 그러나, Wi-Fi P2P의 300Mbps에 비해 상대적 느린 전송 속도(최대 24Mbps)를 제공하며, 음성의 실효속도는 64kbps이고 데이터 전송 시 최고 723kbps의 느린 전송 속도를 지원하므로 고품질의 멀티미디어 콘텐츠 전송에는 부적절하다. 또한 최대 전송범위는 100m 정도이지만 일반적으로 10m 정도의 제한된 유효 전송 범위를 가진다.

최근 스마트폰 및 태블릿 PC, 노트북 그리고 핸드프리 디바이스, 네트워크 액세스 포인트 등과 같이 블루투스 모듈이 기본적으로 탑재된 디바이스들이 급속히 보급되는 추세로서 파일전송이나 데이터 동기화 등의 용도로 사용되고 있으나 제한된 전송 속도와 좁은 전송 범위의 극명한 단점으로 인하여 일반 사용자들에게는 많이 사용되지 않고 있고, 최근 많이 사용되는 대용량 멀티미디어 콘텐츠 전송에는 적절치 못하다.

3. LTE-D2D

LTE D2D[4-9]는 별도의 네트워크 장비를 이용하지 않고 일정한 반경 내에 있는 단말 간 직접 통신이 가능한 근거리 통신 기술로서, LTE-Advanced의 경우 LTE 전용 주파수 대역(licensed band)을 사용하지만, 단말 간 직접 통신이므로 eNB와의 통신 혹은 피코셀/펨토셀 등의 초소형 기지국의 중계가 없이 단말 간 상호 접속을 지원한다. 서로 인접한 단말 간의 직접 통신을 위한 D2D 링크가 설정된 후에는 송수신 데이터를 기지국을 거치지 않고 D2D 링크를 통해 주고 받게 된다. 그림 3-1은 D2D 통신의 예를 나타낸다.

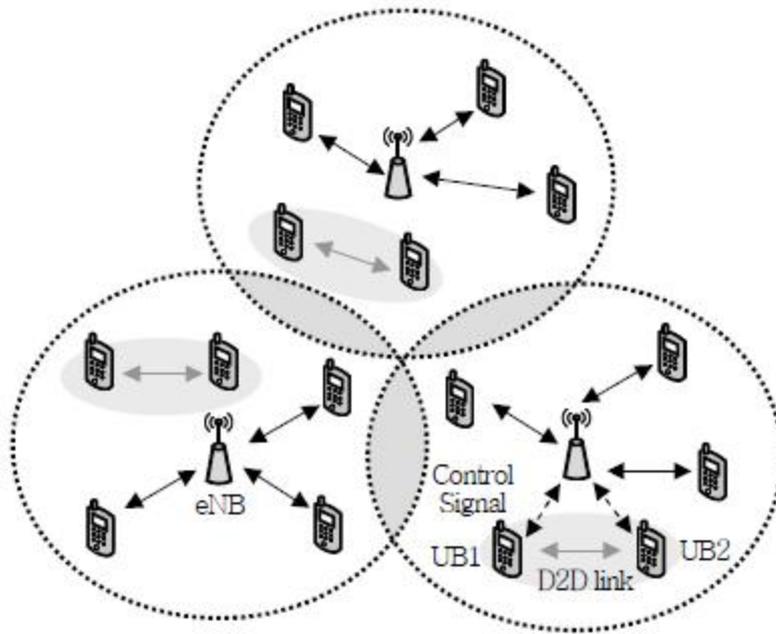


그림 3-1. D2D 통신의 예

D2D 통신에서 eNB는 기지국과 단말기 간의 통신서비스 제공의 주역할 외에 D2D 링크의 자원, 단말기의 상태 및 전송 상태 등을 관리한다. eNB는 단말과 제어 신호를 지속적으로 주고 받음으로써 D2D 통신에 대한 상태를 분석할 수 있고, 분석한 상태 정보를 바탕으로 D2D 통신 상태를 제어한다.

D2D의 장점으로서는 LTE 전용 주파수 사용으로 인한 사용자의 인증 및 보안성 제공, 단말기 인접성(proximity) 기반의 공간적 주파수 자원의 재사용, 기지국과 송수신 대신 단말 간 직접 통신을 통한 단말기의 사용전력 감소, 기지국 부하의 분산을 통한 망의 수용능력 증대, 데이터 전송 속도 증가, 셀 영역의 증대 등이 있다.

3.1.1 LTE-D2D에서의 세션 설정 절차

단말 간 직접 통신 연결 모델은 다음의 시나리오를 전제로 한다. 두 개의 디바이스 단말 1과 단말 2가 있을 때, 단말 1은 단말 2에게 데이터를 전송하기 위해 단말 2로 연결을 요청한다. 이 때, 단말 1은 기지국 1에 속해있고, 단말 2는 기지국 2에 속해있다. 또한 단말 간 직접 통신은 사용자에게 투명한 특성을 가지고 있어서 사용자간 통신이 단말 간 직접 통신인지 셀룰러 통신인지 알지 못한다.

기지국에서는 자신과 이웃한 기지국에 대한 정보를 그림 3-2의 기지국 목록을 통해 알 수 있다. 기지국 목록에는 자신과 이웃한 기지국들에 대한 eNB ID, 주변 기지국과의 거리, 주변 기지국과의 가도 등에 대한 정보들이 포함되어 있다. 또한 기지국은 자신이 현재 할당한 단말들의 ID, 통신 유형(D2D 통신, 셀룰러 통신), 할당한 주파수 대역에 대한 정보가 담긴 그림 3-3과 같은 주파수 할당 목록을 가지고 있어야 한다. 주파수 할당 목록을 통해서 기지국은 자신의 셀 범위 내에 있는 단말들의 정보를 알 수 있고, 이를 통해서 D2D 통신을 위한 주파수를 할당할 수 있다.

Adjacent eNB ID	Distance	Angle
...		
Adjacent eNB ID	Distance	Angle

그림 3-2. 기지국 목록

UE ID	Allocated resource	Frequency priority	Transmit signal power	Estimated interference
...				
UE ID	Allocated resource	Frequency priority	Transmit signal power	Estimated interference

그림 3-3. 주파수 할당 목록

그림 3-4는 처음 단말 1에서 단말 2로 데이터를 전송할 때 서로가 동일한 셀 혹은 인접한 셀에 위치해 있는지 위치를 확인하는 절차를 나타낸 것이다. 단말 1이 단말 2에게 데이터를 전송하기 위해 기지국 1로 데이터를 전송하면 기지국 1에서는 EPC(Evolved Packet Core) 망으로 데이터를 전송한다. 이 때 기지국 1은 수신 측 기지국인 기지국 2에서 두 단말들이 동일한 셀 또는 서로 인접한 셀에 위치하는지를 판단하는 것을 돕기 위해 자신의 기지국 ID를 신호에 포함시킨다. 이후 EPC에서는 단말 2가 위치한 기지국 2로 데이터를 보내게 되고, 기지국 2에서는 요청신호에 포함된 기지국 ID(기지국 1의 ID)와 자신이 가지고 있는 인접 기지국 목록의 기지국 ID 값들을 비교하여 단말 1과 단말 2가 동일한 셀에 또는 서로 인접한 셀에 위치하는지를 판단한다.

두 단말이 서로 인접한 셀에 위치한 것이 확인된 경우에는 기지국 2에서 단말 간 직접통신 요청 신호를 기지국 1로 보내어 두 단말이 단말간 직접통신이 가능한 환경에 있다는 것을 알려준다.

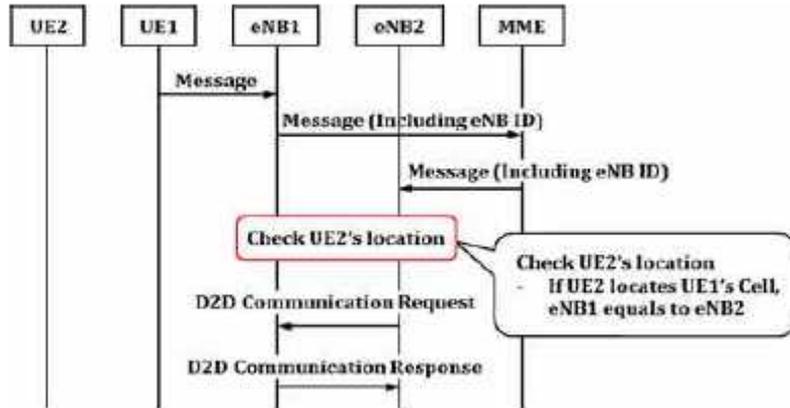


그림 3-4. 단말 위치 확인 절차

기지국에서 단말 1과 단말 2가 동일한 셀 혹은 서로 인접한 셀에 있다고 판단되면 그림 3-5의 D2D 통신 의사 결정 절차를 거치게 된다. 의사 결정 절차에서는 기지국 두 디바이스 UE1, UE2에게 의사 결정에 필요한 정보들을 요청하게 된다.

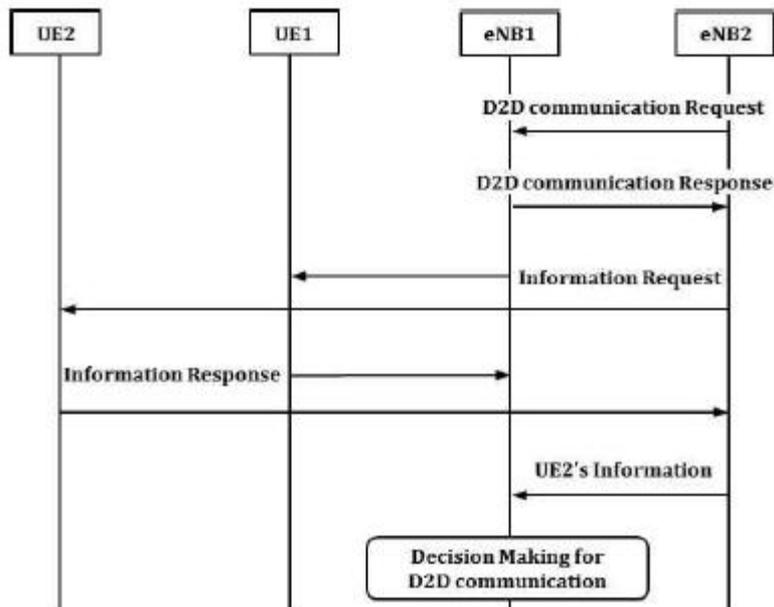


그림 3-5. D2D 통신 의사 결정 절차

기지국 2에서 기지국 1에게 단말 간 직접통신 요청 신호를 통해 단말 1과 단말 2가 단말 간 직접통신이 가능한 상태라는 것을 알리면, 요청 신호를 받은 기지국 1은 단말 간 직접통신 응답 신호를 기지국 2에게 보낸다. 단말 간 직접통신에 대한 요청과 응답이 이루어지면 두 기지국에서

는 자신의 셀에 속해 있는 단말들에게 단말 간 직접통신 의사 결정에 필요한 정보를 요청한다. 각 단말들은 요청 받은 신호에 대한 응답으로 자신의 정보를 자신이 속한 기지국으로 전달한다. 기지국에서 단말 1, 단말 2로부터 정보를 받게 되면 단말 간 직접통신 의사 결정 메커니즘을 수행하기 위해 기지국 2에서는 자신이 받은 단말 2의 정보를 기지국 1로 전송한다. 기지국 1은 받은 정보들을 가지고 D2D 통신을 이용하는 것이 좋은지, 일반 이동통신을 이용하는 것이 좋은지를 정해진 판단 기준에 따라서 최종적으로 결정한다. 판단 기준은 성능 평가를 통해 거리, 위치, 신호 세기 등에 대한 정보들의 임계값들을 의미한다.

기지국 1에서 단말 간 직접통신 결정 메커니즘을 통해 D2D 통신의 성능이 일반 이동통신보다 좋다고 결정하면 그림 3-6과 같이 단말 간 직접통신 연결 요청 신호를 기지국 2에게 전송한다.

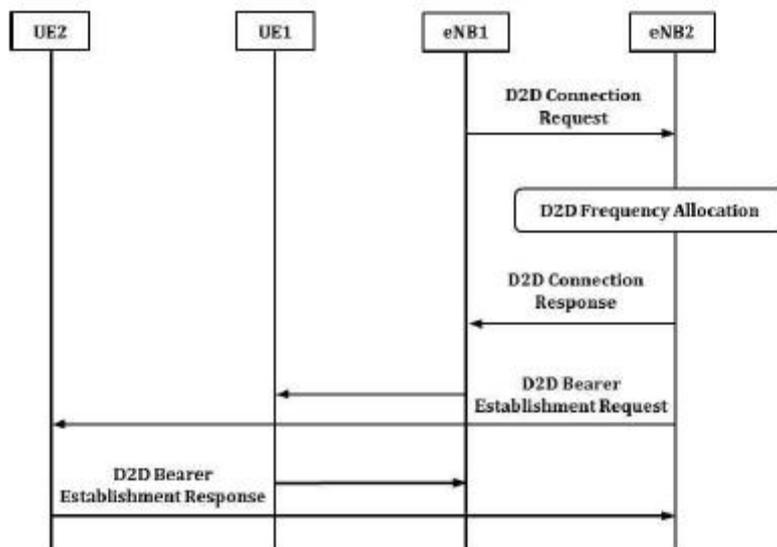


그림 3-6. 주파수 할당 절차

이 때, 단말 간 직접통신 연결 요청 신호에는 단말 간 직접통신에 할당할 주파수를 결정하기 위하여 기지국 1의 주파수 할당 목록 정보가 포함된다. 기지국 2에서는 단말 간 직접통신 연결 요청 신호를 받게 되면 사전에 정의된 자신의 주파수 할당 목록과 기지국 1의 주파수 할당 목록을 비교하여 어떤 주파수를 할당할지 결정한다.

할당할 주파수가 결정되면 기지국 2는 기지국 1에게 결정된 주파수 정보와 함께 단말간 직접통신 연결요청 신호를 보낸다. 응답을 받게 되면 단말간 직접통신이 가능한 상태가 된다.

기지국들은 각각 자신의 셀에 속한 단말들에게 단말 간 직접통신 설정 요청 신호를 보내어 단말들에게 단말 간 직접통신으로 연결할 것을 알린다. 그렇게 되면 단말들로부터 단말 간 직접통신 설정 응답 신호를 받게되고, 최종적으로 단말 간 직접통신 설정이 완료되고, 최종적으로 단말 간 직접통신 링크가 생성된다.

단말 간 직접통신 연결이 설정되면 두 단말 간 데이터 전송을 기지국을 거치지 않고 전적으로 단말 간 직접통신 링크를 통해서만 이루어진다. 하지만 기지국에서는 단말 간 직접통신 관리를 위해 단말의 이동, 채널 상태, 통신 상태 등의 정보를 알아야 한다. 뿐만 아니라 과금을 측정하기 위해 보낸 데이터 양에 대한 정보도 알아야 한다. 이러한 정보들을 알기 위하여 D2D 통신에서는 그림 3-7과 같이 기지국과 단말이 주기적으로 제어 신호를 주고받는 과정을 가진다.

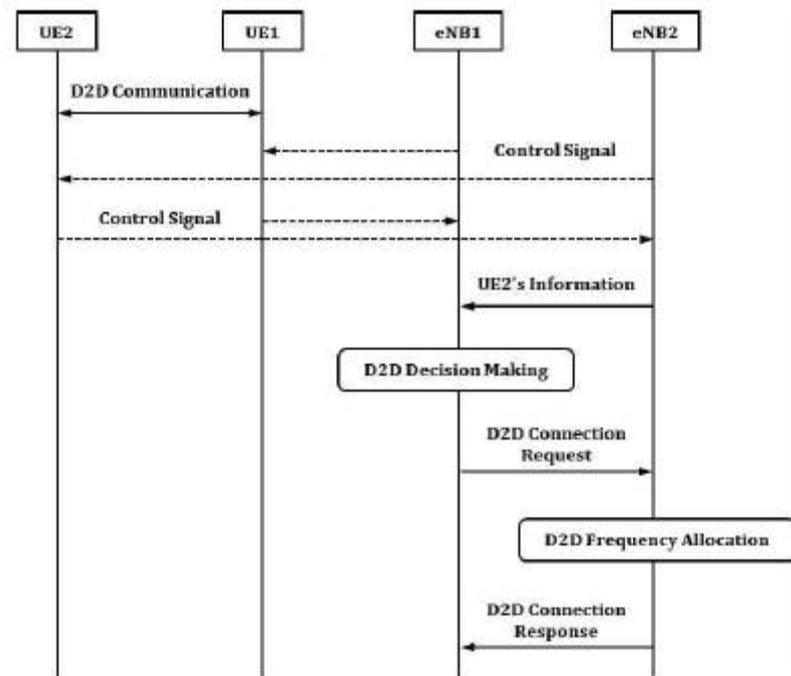


그림 3-7. 연결 설정 후 유지 관리 절차

단말 1과 단말 2 사이의 단말 간 직접통신이 연결되면 그림 2-7의 제어신호를 통한 상태 확인 절차를 주기적으로 반복하게 된다. 이 절차에서 기지국은 단말 간 직접통신의 상태 확인을 위해 단말 1, 단말 2에게 주기적으로 제어신호를 보내게 되고, 제어신호를 받은 단말 1, 단말 2는 자신의 상태 및 D2D 통신 상태를 기지국으로 보내게 된다. 이후 기지국에서는 디바이스들로부터 받은 제어신호를 통해 단말 간 직접통신의 상태를 파악하고, 의사 결정 과정을 수행하여 단말 간 직접통신이 셀룰러 통신보다 좋은지를 지속적으로 검사하게 된다. 그리고 단말 간 직접통신의 성능이 더 좋다고 결정되면 기지국 2에서 주파수 할당 절차를 거쳐서 단말 간 직접통신에 사용될 주파수를 결정하여 다음 제어 신호를 보낼 때 결정된 정보를 알려준다.

3.1.2 LTE D2D의 연구 이슈

단말간 직접 통신의 주요 연구 이슈는 크게 단말기의 연구 이슈, 기지국 측면의 연구 이슈 그리고 서비스 측면의 연구 이슈로 나눌 수 있다.

단말기 측면의 연구 이슈로는 단말기 간 통신을 위한 타 단말기의 인접성 판단을 위한 스펙트럼 센싱 기법, 기지국의 상하향 자원할당 정보 활용을 통한 기지국이 사용하지 않는 유휴자원 판단 및 이용 기법, 단말 간 직접 통신을 위해 단말기가 갖추어야 하는 최소한의 기지국 기능(스케줄링, 임의접근, 자원할당, 단말기와의 링크연결 방법 등)과 이에 대한 MAC protocol의 연구, 기존의 eNB와의 링크 연결 이외의 타 단말과의 추가적인 링크 연결에 따른 단말기의 배터리 소모 최소화를 위한 저전력 통신기술, eNB가 사용하지 않는 무선자원 혹은 TV 대역(white band)을 사용하기 위한 인지무선 기반의 자원 이용 기법, 주파수 재사용이나 간섭들로 인해 예상되는 BLER 증가에 따른 hybrid ARQ 적용 방안 등이 있다.

기지국 측면의 주요 연구 이슈로는 기지국 중심의 이동통신 서비스와 D2D 링크 사이의 사용 주파수 선택에 따른 간섭 완화 방안, 단말기 간 인접성 기반 단말기 pairing 및 grouping 방법, 보안성이 있는 단말기 간 통신을 위한 보안 및 인증 제공 기법 등이 있다.

서비스 측면에서는 단말기 간 직접 통신이 제공되는 서비스 시나리오의 발굴 및 이를 수용하기 위한 사용자의 서비스 필요성 분석이 선행되어야 한다. 이를 바탕으로 단말 간 직접 통신에 대한 서비스, 시스템 및 기술적 요구사항을 도출한 후 이를 적용할 대상 시스템의 기술적, 시스템적 특징의 정립과 서비스 제공 방안을 마련해야 한다.

4. 결론

지금까지 본 고에서는 LTE-Advanced망에서의 D2D 통신 및 LTE-D2D기술과 경쟁 기술인 Wi-Fi Direct 및 Bluetooth에 대해서 살펴보았다. 이러한 단말간 직접통신방식을 사용하면 기지국을 거치지 않고 인접한 단말기간의 데이터 및 콘텐츠의 공유, 분배가 가능해지므로 기존 이동통신 서비스의 주요한 문제점이었던 네트워크의 트래픽 부하 및 주파수 부족 문제를 해결할 수 있을 것으로 보인다. 특히, 폭증하는 모바일 데이터를 수용하면서 D2D 기술을 사용하여 새로운 서비스 및 비즈니스 모델이 다양하게 개발 될 것으로 예상된다.

하지만 D2D 기술을 활용하기 위해서는 앞으로 D2D 통신에서의 셀 또는 시스템간 간섭 문제나 보안 등의 다양한 이슈에 대한 연구가 더욱 이루어 져야 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] 오슬기, 류승완, 박세권, 신동천, 김이강, “단말기간 직접통신(Device-to-Device) 기반 4G 이통통신 서비스 발굴 및 비즈니스 모델 개발 방법론”, 『한국IT서비스학회지』, 2012, 11(2), pp. 339 - 353
- [2] 기술. "모바일 데이터 수용을 위한 LTE-Advanced 에서의 네트워크 용량 증대 기술개발 동향."
- [3] 마진석, 김도형, 이재호, 박충범, 훈석진, 이형석, 류 철, “D2D 서비스 개발 현황(Wi-Fi Direct 기술 중심으로)”, 『한국정보과학회 학회지』, 2012, 30(11), pp. 38 - 45
- [4] 홍충선, 이종민, 최진영, 조응준, 신승환, “이동통신 주파수 재사용을 위한 D2D 기술”, 『한국전자파학회』, 2012, 23(3), pp. 14-26.
- [5] 양모찬, 임이랑, 오선애, 김현민, 신오순, 신요안, “LTE-Advanced 네트워크에서 D2D 통신 기술 동향”, 『대한전자공학회』, 2012, 39(11), pp. 27-38
- [6] Doppler, Klaus, et al. "Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks." *Communications Magazine*, IEEE 47.12 (2009): 42-49.
- [7] Chae, Hyang Sin, et al. "Radio resource allocation scheme for device-to-device communication in cellular networks using fractional frequency reuse." *Communications (APCC)*, 2011 17th Asia-Pacific Conference on. IEEE, 2011.
- [8] Wang, Bin, et al. "Resource allocation optimization for device-to-device communication underlying cellular networks." *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2011 IEEE 73rd. IEEE, 2011.
- [9] Yu, Chia-Hao, et al. "Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks." *Wireless Communications*, *IEEE Transactions on* 10.8 (2011): 2752-2763.