

5G 지상파 방송의 전송기술 개요

글. 안석기, 정희윤, 권선형, 박성익 · 한국전자통신연구원(ETRI) 미디어방송연구실



서론

국내 이동통신 3사가 전 세계최초로 5G 신호를 송출하면서 시작된 5G 이동통신 시대는 지상파 방송 영역에도 울림이 적지 않았다. 3G 표준부터 본격적으로 개발되었던 데이터 이동통신 기술은 4G LTE를 거쳐 5G에 이르기까지 지속해서 눈부신 발전을 거듭하고 있으며, 이는 비교적 긴 주기로 단계적 발전을 거듭해오던 지상파 방송기술에 시사하는 바가 크다. 3GPP(3rd Generation Partnership Project)의 이동통신 기술은 지금에 이르러서는 셀룰러 망에서의 단말 통신뿐만 아니라 위성통신, 방송통신, 차량 간 통신을 포함해 다양한 전송 방식을 아우르는 표준 기술이 되었다. 또한 3GPP는 5G 기술의 일환으로서 지상파 방송서비스를 목적으로 하는 LTE 기반 5G 지상파 방송(LTE-based 5G terrestrial broadcast)기술에 대한 규격화를 2020년에 마무리하였으며, 차세대 지상파 방송기술에 대한 고찰을 위해서는 최신 5G 지상파 방송기술에 대한 이해가 필수적이다.

5G 지상파 방송기술은 3G 표준에서 시작된 MBMS(Multimedia Broadcast Multicast Service) 기술을 모태로 하여 5G 지상파 방송의 요구 사항을 만족하도록 설계되었다. 기술적으로는 OFDM(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 기반의 Rel-9 eMBMS(evolved MBMS) 기술에 근간을 두고 있으며, Rel-14 FeMBMS(Further evolved MBMS)를 거쳐 Rel-16의 5G 지상파 방송기술에 이르기까지 진화를 거듭해 왔다.

이에 본 고에서는 LTE 기반 5G 지상파 방송기술의 전송기술에 대해서 소개하고자 한다. 특히 물리계층 구성과 단말 스케줄링을 포함한 서비스 절차에 대해 살펴보면, 이동통신 기술 기반의 MBMS 기술로 지상파 방송을 지원하기 위하여 3GPP가 어떠한 노력을 해왔는지를 살펴보고자 한다.

5G 지상파 방송기술 : 물리계층 구성

OFDM에 기반한 LTE의 물리계층 자원은 [그림 1]과 같이 주파수축으로는 RB(resource block) 단위로 표현되고, 시간 축으로는 프레임(frame), 서브프레임(subframe), 슬롯(slot) 등과 같은 단위로 표현된다. 먼저 하나의 프레임은 10개의 서브프레임으로 구성되며, 하나의 서브프레임은 2개의 슬롯으로 구성된다. LTE에서의 RB는 주파수 축으로는 12개의 부반송파(subcarrier)에 해당하고, 시간 축으로는 슬롯으로 정의된다. 한편 물리계층 자원할당 측면에서 주파

수 축으로는 RB, 시간 축으로는 서브프레임이 최소 단위이고, 이를 환산하면 주파수 축으로는 180kHz, 시간 축으로는 1ms에 대응된다. OFDM 전송 방식을 사용할 때에는 OFDM 심볼 간 간섭을 제거하기 위하여 OFDM 심볼 사이에 CP(Cyclic Prefix)를 삽입하며, LTE는 일반 CP(normal CP)와 확장 CP(extended CP)를 지원하므로 필요에 따라 선택적으로 사용할 수 있다. 유니캐스트 전송의 경우에 일반 CP와 확장 CP에 따른 서브프레임 내 OFDM 심볼 개수를 [그림 1]에 표현하였다.

이동통신 사업자들이 사용하는 LPLT(Lower Power Low Tower) 기지국 인프라 기반의 유니캐스트 전송은 최대 커버리지가 수km 정도이고, 부반송파 간격(subcarrier spacing, SCS)은 항상 15kHz로 고정된다. 하지만 MBMS는 유니캐스트 전송에 비해 넓은 커버리지가 요구되며, 특히 방송사업자들이 사용하는 HPHT(High Power High Tower) 기지국 인프라를 사용하는 경우에는 훨씬 더 넓은 커버리지를 지원해야 하며, 이 경우에는 시간축으로 긴 길이의 OFDM 심볼과 긴 CP의 사용이 필수적이다. Rel-14에서 MBMS를 위해 추가된 SCS-1.25kHz와 Rel-16에서 추가된 SCS-2.5kHz와 SCS-0.37kHz는 모두 유니캐스트 전송보다 긴 길이의 OFDM 심볼과 긴 CP를 효율적으로 지원하기 위함이다.

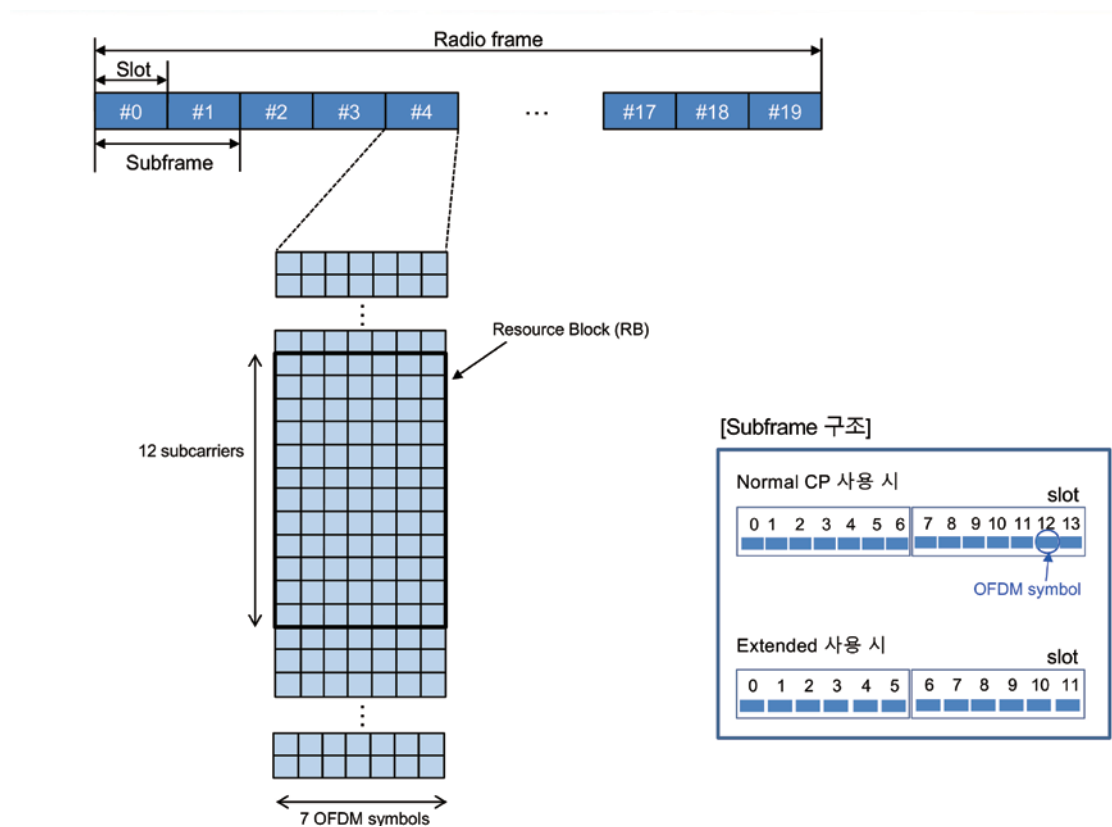


그림 1. LTE 물리계층 자원 구조

[그림 1]에 표시된 단일 프레임 구조만으로는 다양한 SCS를 모두 지원하기에는 한계가 있으며, LTE는 Rel-16에서 기존 프레임 구조 ([그림 2-1] 참고) 외에 새로운 프레임 구조 ([그림 2-2] 참고)를 추가하였다. [그림 2-1]의 'LTE 프레임 구조 1'은 유니캐스트와 MBMS의 공용 프레임 구조이고, [그림 2-2]의 'LTE 프레임 구조 2'는 MBMS 전용의 프레임 구조이며, 여기서 CAS(Cell Acquisition Subframe)는 MBMS 전송에 필요한 제어 신호들이 전송되는 서브프레임을 나타낸다.

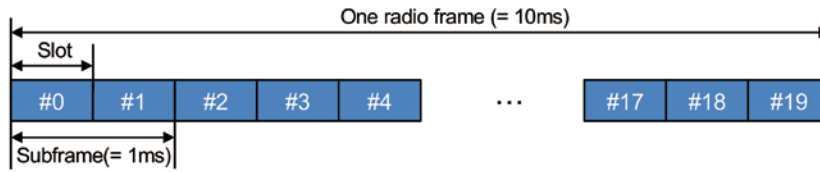


그림 2-1. LTE 프레임 구조 1

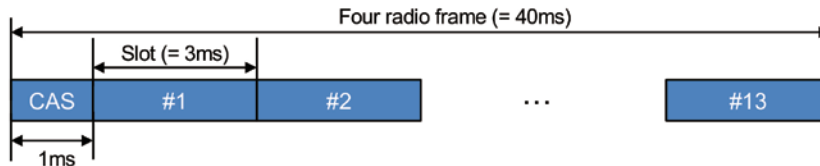


그림 2-2. LTE 프레임 구조 2

MBMS 물리계층의 시간축 구성은 유니캐스트 전송과 큰 차이가 있으며, 이는 넓은 커버리지를 지원하기 위해서는 긴 길이의 CP가 필수적이기 때문이다. 긴 길이의 CP를 자원 효율적으로 지원하기 위해서는 SCS를 줄이고 OFDM 심볼이 전송되는 시간을 늘리는 것이 바람직하며, MBMS의 물리계층은 이런 방향으로 설계되었다. 그 결과 Rel-16에서 도입된 SCS-0.37kHz의 경우에는 단일 OFDM 심볼의 전송 시간이 LTE의 기존 스케줄링 최소 단위인 서브프레임(1ms)보다 3배 길어지게 되어 [그림 2-2]의 프레임 구조가 신규로 도입되었다.

MBMS가 'LTE 프레임 구조 2'를 사용하는 경우에는 서브프레임 대신에 슬롯(3ms) 단위로만 스케줄링이 가능하며, 예외적으로 CAS만 유니캐스트와 동일한 SCS-15kHz를 사용한다. 서브프레임 기반의 'LTE 프레임 구조 1'을 사용할 때에는 MBSFN(Multimedia Broadcast multicast Single Frequency Network) 서브프레임으로 할당된 서브프레임에서만 MBMS 데이터 전송이 가능하다. 나머지 Non-MBSFN 서브프레임에서는 일반 유니캐스트 전송이나 MBMS를 위한 제어 신호 전달이 가능하며, [그림 2-2]에서는 CAS가 Non-MBSFN 서브프레임 역할을 한다.

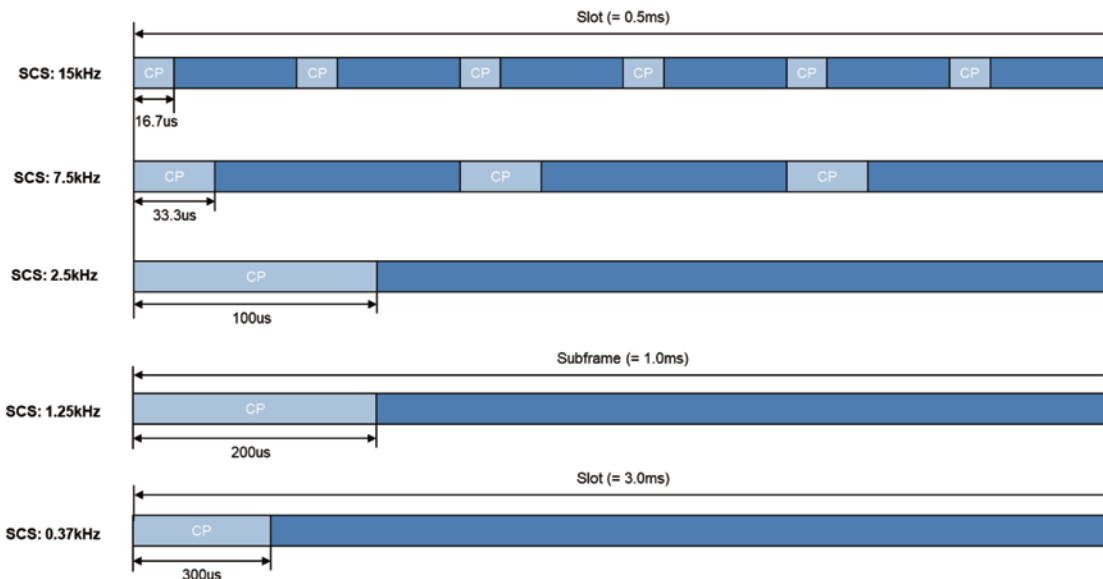


그림 3. MBMS를 위한 OFDM 전송 파라미터

MBMS를 위한 제어정보가 전송되는 서브프레임은 CAS라고 불리며 SCS-15kHz를 사용하고, 일반 CP와 확장 CP가 모두 사용될 수 있다. 이에 반해 MBMS 데이터 전송을 위해서는 [그림 3]과 같이 5가지의 SCS가 사용 가능하며, 이때는 항상 확장 CP가 사용된다. 5G 지상파 방송서비스를 제공할 때에는 [그림 3]과 같이 다양한 전송 파라미터 중에서 기지국 인프라나 서비스 커버리지에 따른 CP의 길이 등을 기반으로 적합한 SCS를 선택할 수 있다. 결과적으로 5G 지상파 방송 시 CP의 최대 길이는 300us이고, 이를 ISD(Inter Site Distance)로 환산하면 약 90km이다.

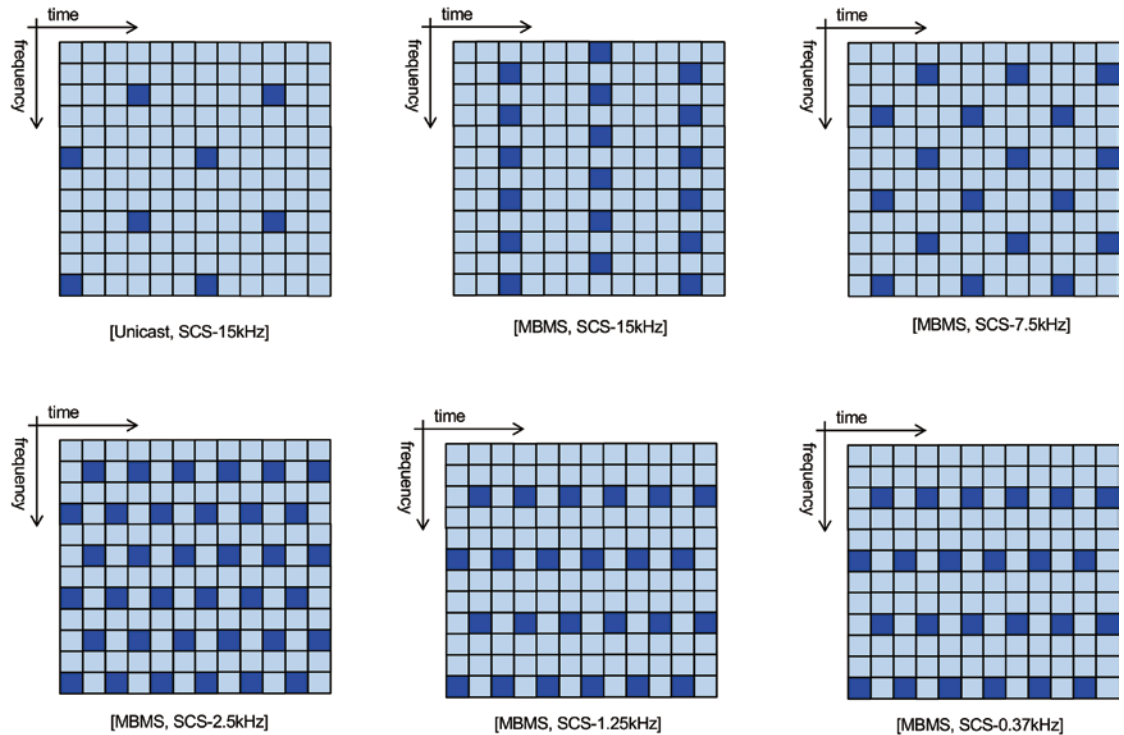


그림 4. MBMS의 파일럿 신호 배치

MBMS 전송을 위해서 다양한 OFDM 전송 파라미터가 포함되면서, 각각의 전송 파라미터별로 파일럿 신호(reference signal, RS) 배치도 함께 규격화되었다. [그림 4]는 유니캐스트 전송의 파일럿 배치와 MBMS를 위한 다양한 OFDM 전송 파라미터에서의 파일럿 배치들을 나타낸다. 먼저 MBMS 전송 시에는 파일럿의 밀도가 유니캐스트의 파일럿 밀도보다 높다. 이는 많은 수의 LPLT들로 구성된 MBSFN 망에서 길어진 다중 경로 지연(multipath delay)에 효과적으로 대응하여, 채널의 주파수 다이버시티(frequency diversity)가 높아지더라도 채널 추정 성능을 보장해주기 위함이다. 특히, Rel-16에서 고속 이동 단말을 위해 도입된 SCS-2.5kHz에서는 채널 추정의 신뢰도를 높이기 위하여 파일럿의 밀도가 25%에 이른다. 이에 반해 Rel-16에서 넓은 커버리지의 고정형(fixed) 방송을 위해 도입된 SCS-0.37kHz에서는 [그림 4]에 표시된 파일럿 배치 외에도 파일럿 밀도를 반으로 줄인 파일럿 배치도 추가로 포함하여 유일하게 2개의 파일럿 배치를 선택적으로 사용할 수 있으며, 채널 변화가 느릴 때는 전송 효율을 더욱 높일 수 있다. MBMS 데이터 전송을 위해서는 SCS를 비롯한 OFDM 전송 파라미터의 설계와 파일럿 배치가 표준화 과정에서의 주요 이슈였으며, Rel-16에서는 MBMS 서비스 시나리오를 고려한 파일럿 설계가 이루어졌다.

5G 지상파 방송기술 : 단말 스케줄링과 서비스 절차

MBMS의 단말 스케줄링 과정과 서비스 절차를 이해하기 위해서는 먼저 LTE의 프로토콜 계층(protocol stack)과 채널 맵핑(channel mapping)에 대한 이해가 필요하다. LTE의 프로토콜 계층은 다양한 레이어(layer)들로 구성되어 있

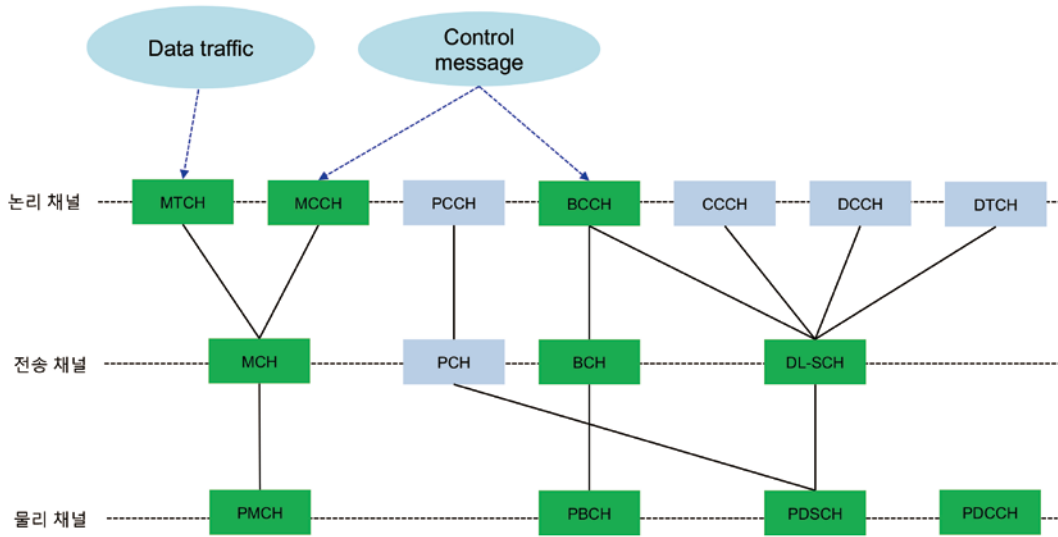


그림 5. LTE 하향링크 채널 맵핑

으며, 전송 채널과 논리 채널은 레이어들을 연결하는 통로로 볼 수 있다. [그림 5]는 LTE의 프로토콜 계층 구조에 따라 MBMS 데이터 트래픽(data traffic)과 제어 메시지(control message)의 흐름을 도시한 것으로서 LTE의 하향링크(downlink) 채널 맵핑 상에서 표현하였다. [그림 5]에서 물리 채널은 실제 물리 신호가 생성되는 방식에 따라 구분되는 채널이고, 전송 채널은 멀티캐스트 전송, 브로드캐스트 전송과 같은 전송 방법에 따라 구분된 채널이며, 논리 채널은 이동하는 메시지의 종류(ex. 데이터 메시지, 제어 메시지)와 메시지의 공통(common)/전용(dedicated) 여부에 따라 구분된 채널이다. LTE 채널 중에 MBMS를 위해 사용되는 채널들을 구분하여 [그림 5]에서 녹색으로 표시하였다. MBMS 전송 시 데이터 트래픽은 MTCH(Multicast Traffic Channel) 채널을 통해 MCH(Multicast Channel)을 거쳐 PMCH(Physical Multicast Channel)에 전달된다. 그리고 MBMS 전송을 위한 제어 정보는 MCCH(Multicast Control Channel)과 BCCH(Broadcast Control Channel)을 거쳐 MCH, BCH(Broadcast Channel), DL-SCH(Downlink Shared Channel)를 통과하여 PMCH, PBCH(Physical Broadcast Channel), PDSCH(Physical Downlink Shared Channel)에 전달된다. 마지막으로 상위 채널과의 연결 없이 물리계층 제어 정보를 운반하는 PDCCH(Physical Downlink Control Channel) 채널도 유니캐스트와 동일하게 MBMS 전송에서도 사용된다.

LTE의 다양한 채널 중에서 MBMS를 위해서 도입된 채널은 MTCH, MCCH, MCH, PMCH이며, 해당 채널들은 MBMS 전송 시에만 사용된다. 먼저 MTCH는 MBMS의 데이터 트래픽이 이동하는 채널로서 MBMS가 제공하는 서비스의 개수에 따라 여러 개의 MTCH가 하나의 MCH로 맵핑될 수 있다. 반면에 MCCH는 MBSFN 전송 영역별로 정의되며, MCH에는 하나의 MCCH만 맵핑될 수 있다. 결과적으로 MCH는 MBSFN 전송 영역과 서비스 QoS(Quality of Service)에 따라 구분되고, MCH는 하나의 MCCH, 그리고 여러 개의 MTCH와 맵핑될 수 있으며, 이 경우 MTCH들은 서비스 ID를 이용하여 서로 구분된다. MTCH는 RLC(Radio Link Control) 계층으로부터 데이터 트래픽을 전달받고, MCCH는 RRC(Radio Resource Control) 계층으로부터 MBMS 스케줄링 정보나 제어 정보를 전달받는다. 이외에 다른 제어정보는 MIB(Master Information Block) 또는 SIB(System Information Block)의 형태로 BCCH 채널을 통해 단말들에 브로드캐스트되며, 고정된 형태인 BCH로는 MIB가 전달되고, 동적 스케줄링이 가능한 DL-SCH로는 SIB가 전달된다.

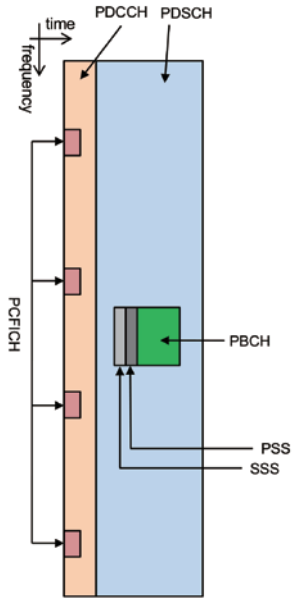


그림 6. CAS 구조

다양한 물리채널들 중에서 PMCH를 제외한 나머지 물리채널은 모두 CAS에서 전송되며, [그림 6]은 CAS의 구조를 도시한 것이다. 단말은 CAS 신호를 수신하면, 처음에 PSS(Primary Synchronization Signal)과 SSS(Secondary Synchronization Signal)를 이용하여 기지국과의 동기를 잡고 PBCH 신호를 수신하여 MIB를 획득한다. 이후에는 PCFICH(Physical Control Format Indicator Channel) 신호를 수신하여 PDCCH 채널이 점유하는 OFDM 심볼의 개수를 확인하고, PDCCH를 수신하여 PDSCH에 대한 스케줄링 정보를 획득한다. 마지막으로 PDSCH를 수신함으로써 SIB 정보를 획득할 수 있다.

[그림 7]은 MBMS 서비스의 전체적인 흐름을 도시한 것으로서, BM-SC(Broadcast/Multicast Service Center)와 MBMS 게이트웨이(gateway), MCE(Multi-cell/multicast Coordination Entity)는 MBMS를 위해 도입된 기능 블록들이다. MBMS 서비스를 제공하기 위해서는 먼저 BM-SC가 동기(synchronization) 정보를 포함한 MBMS 구성(configuration) 정보를 기지국들에 전달한다. 이후에는 MCE에서 SIB와 MCCH와 같은 제어정보를 생성하여 단말에 전달하여 단말이 MBMS 서비스를 받을 수 있도록 준비한다. 이어서 MBMS 세션(session)이 시작되면 MBMS를 통해 제공될 서비스별 QoS 정보와 세션 주기 등이 기지국들에 전달되고, MBMS 베어러(bearer)가 설정되면 MBMS 알림(MBMS notification)을 단말에 전달하여, 이후에는 단말이 MBMS 데이터를 수신할 수 있다.

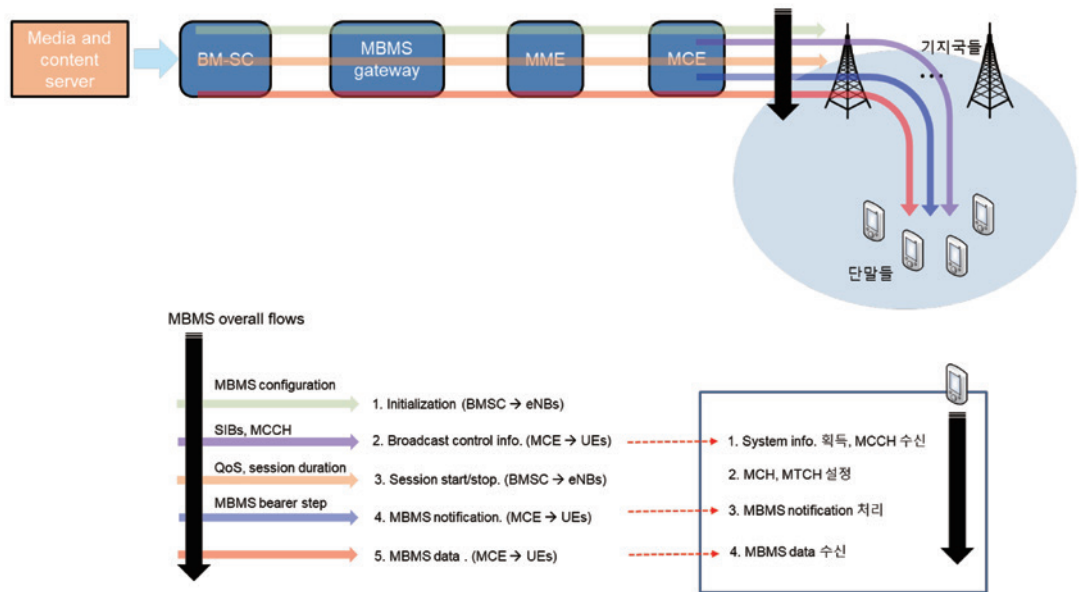


그림 7. MBMS 서비스 절차 및 단말 스케줄링

5G 지상파 방송기술 성능 분석

CAS는 MBMS 전용 캐리어(MBMS-dedicated carrier)가 도입된 Rel-14부터 정의되어, MBMS 전용 캐리어에서 제어 신호 전달을 위한 서브프레임으로 사용되었으며, Rel-16에서는 5G 지상파 방송의 CAS 성능을 향상시키기 위해서 세 가지 측면에서 기능이 개선되었다 ([그림 8] 참고). 이는 긴 길이의 CP를 사용하는 MBMS 데이터 전송보다 SCS-15kHz 기반으로 짧은 길이의 CP를 사용하는 CAS가 MBMS 수신 성능을 제약하는 요소가 될 가능성이 높기 때문이다.

Rel-16에서는 첫 번째로 주파수축 6RB로 고정된 PBCH가 점유하는 물리자원을 늘리기 위해 시간축으로 PBCH 자원을 확장하여 서브프레임 내에서 PDSCH가 점유하던 자원을 차지할 수 있도록 허용하였다. 두 번째는 PDCCH 자원 내에서 MBMS를 위한 DCI(Downlink Control Information) 정보가 전송되는 자원을 유니캐스트 전송 대비 최대 2배 까지 점유할 수 있도록 확대하였으며, 세 번째는 CFI(Control Format Indicator) 2비트를 MIB에 포함하여 PCFICH 수신에 실패하는 경우를 보완하였다.

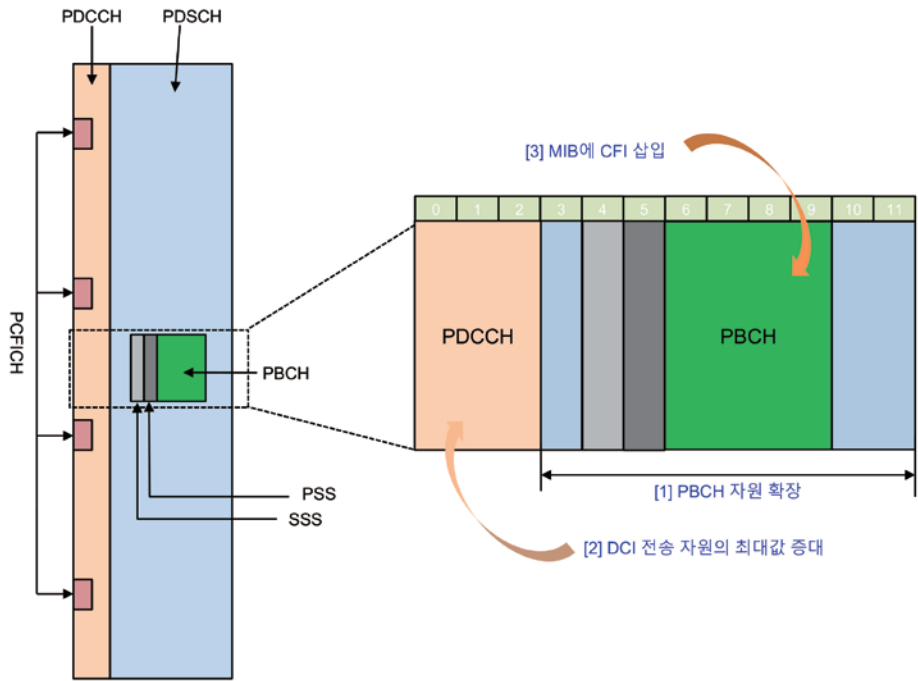


그림 8. CAS의 성능 개선 사항 (Rel-16)

MBMS 기술은 Rel-14 표준화부터 방송사업자들의 요구조건들을 적극적으로 반영하여 지상파 방송서비스를 위한 다양한 기능들이 추가되었으며, Rel-16에 이르러서는 기존의 지상파 방송 표준기술에 근접한 수준까지 도달했다는 평가를 받고 있다. [표 1]은 지상파 방송서비스 제공 측면에서 MBMS 기술을 평가하기 위해서 앞서 살펴본 MBMS의 물리계층 파라미터들을 최신 지상파 방송표준인 ATSC 3.0의 물리계층 파라미터들과 비교한 것이다. MBMS 기술은 Rel-14의 FeMBMS 기술과 Rel-16의 LTE 기반 5G 지상파 방송기술로 구분하였다. [표 1]에서 물리계층 오버헤드(physical-layer overhead)는 물리계층의 전송 효율을 결정하며, OFDM 시스템의 보호 대역(guard band), CP 신호의 길이, 그리고 채널 추정을 위한 파일럿 신호의 밀도로부터 계산된다.

MBMS는 Rel-16에서 SCS-0.37kHz를 도입함으로써 기존 FeMBMS의 약점으로 지적되었던 물리계층 오버헤드 측면에서도 ATSC 3.0과 유사한 수준에 도달하였다. 이와 동시에 지상파 방송에서 필수적인 넓은 커버리지 측면에서도 100km에 준하는 서비스 영역 제공이 가능해졌다. 한편, 이동 방송 제공 시에는 단말 이동에 의한 도플러 천이(Doppler shift)로 유발되는 부반송파 간 간섭(inter-carrier interference, ICI)에 의해 수신 성능이 열화된다. 이러한 ICI로 인한 수신 성능 열화는 신호대 간섭 비율(signal-to-ICI ratio, SIR)로 나타낼 수 있으며, [표 1]에서 표기된 SIR 값은 700MHz 주파수 대역에서 단말의 이동 속도가 250km/h인 경우를 가정한 것이다. Rel-16에서는 고속 이동성을 지원하기 위하여 MBMS에 SCS-2.5kHz를 도입함으로써 SCS-0.37kHz의 MBMS나 ATSC 3.0보다 고속 이동 환경에서 훨씬 안정적인 방송서비스 제공이 가능함을 알 수 있다.

	sub-carrier spacing (kHz)	cyclic prefix duration (us)	OFDM symbol duration (us)	FFT size	physical-layer overhead (%)	ISD (km)	SIR (dB)
MBMS (Rel-14)	15	16.7	16.7	2048	37.0	5	34.16
	7.5	33.3	133.3	4096	37.0	10	28.14
	1.25	200	800	24576	40.0	60	12.57
MBMS (Rel-16)	2.5	100	400	12288	46.0	30	18.59
	0.37 (RS type1)	300	2700	82944	25.8	90	2.00
	0.37 (RS type2)	300	2700	82944	32.5	90	2.00
ATSC 3.0	0.422	296 (GI7)	2370	16384	28.0	89	3.14
	0.211	296 (GI7)	4741	32768	16.2	89	-2.88

표 1. MBMS와 ATSC 3.0의 물리계층 전송 파라미터 비교

방송서비스 제공 시 물리계층의 전송 효율은 [표 1]에 표기된 물리계층 전송 파라미터 외에도 물리계층 신호의 복호 성능에도 영향을 받으며, 복호 성능은 주로 물리계층을 구성하는 BICM(Bit-Interleaved Coded Modulation)에 의해 결정된다. 이런 측면에서 MBMS의 BICM을 구성하는 터보 부호와 QAM 변조 방식은 ATSC 3.0의 BICM을 구성하는 LDPC(Low-Density Parity-Check) 부호와 NUC(Non-Uniform Constellation) 변조 방식에 비하여 약간의 성능 열화는 피할 수 없다. 또한 BICM 설계 시 낮은 BLER(Block Error Rate) 영역에서 철저한 성능 검증을 거친 ATSC 3.0의 LDPC 부호에 비해 오랜 기간 이동통신용으로 사용되어온 터보 부호는 상대적으로 오류 마루(error floor) 현상에 취약하여 방송서비스를 안정적으로 제공하기 위해 필요한 오류 확률($BLER < 10^{-6}$)에서 성능이 열화될 수 있다.

이처럼 MBMS 기술은 오랜 기간에 걸쳐 방송사업자들의 요구 사항들을 반영해 오면서 지상파 방송서비스를 제공할 수 있는 기술이 되었지만, 방송서비스만을 목적으로 설계된 ATSC 3.0 기술보다는 지상파 방송 전송 시 약간의 성능 열화는 피할 수 없다. 하지만 3GPP는 지속적으로 LTE와 5G NR(New Radio) 기반 기술들을 개선해나가고 있으며, MBMS 서비스 역시 향후에 5G NR 기반으로 제공될 것으로 예상된다. 미래의 MBMS 기술이 5G NR 물리계층의 우수성을 가지면서 동시에 ATSC 3.0과 같은 방송 표준기술들의 장점을 효과적으로 사용할 수 있다면, 미래의 방송서비스 제공 시 더욱 경쟁력있는 기술이 될 것이라고 전망한다.

결론

WCDMA 기반의 3G 표준에서 처음 도입된 MBMS 기술은 이후 OFDM을 사용하는 LTE를 거치면서 눈부시게 발전하여 5G 표준의 지상파 방송 요구조건을 만족하기에 이르렀다. 3GPP는 이동통신 기술의 물리계층을 사용한다는 제약을 극복하기 위하여 LTE의 물리계층에 MBMS를 위한 다양한 기술 요소를 도입하였고, 그 결과 MBMS 기반 지상파 방송서비스의 기술적 토대는 충분히 마련되었다. 향후 MBMS 기술이 5G NR이나 6G의 물리계층을 기반으로 발전을 지속해나간다면, ATSC 3.0으로 대표되는 지상파 방송 표준기술과 더불어 차세대 미디어 전송의 한 축으로 자리매김해 나갈 수 있을 것이다.

* 이 문서는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2020-0-00846, 5G와 방송망(ATSC 3.0) 연동 전송기술 개발) 