

Enhanced Compression Model(ECM) 개요

□ 임성창, 최진수, 강정원, *문기화, *김재곤 / ETRI, *한국항공대학교

요약

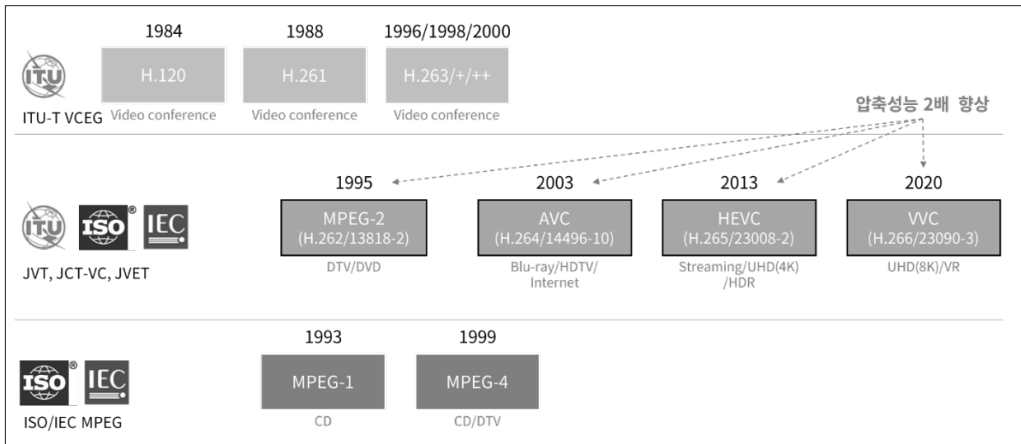
ISO/IEC JTC 1/SC 29 MPEG(Moving Picture Experts Group)과 ITU-T SG 21 Q6/21 VCEG(Video Coding Experts Group)은 2017년에 영상 압축 국제 표준을 공동으로 개발하기 위한 협력팀인 JVET(Joint Video Experts Team)을 구성하였다. JVET은 VVC(Versatile Video Coding) 표준화가 완료된 이후, 이를 능가하는 압축성능(coding efficiency) 향상을 목표로 탐색실험(EI: Exploration Experiment)을 진행하고 있다. 이러한 탐색실험의 일환으로 개발된 ECM(Enhanced Compression Model)은 신호처리 기반 부호화 기술을 중심으로 약 320개의 기술을 통합한 탐색실험 모델이다. ECM은 임의접근(RA: Random Access) 실험조건에서 VVC 대비 평균 약 27% 비트율 절감의 압축성능 향상을 달성했지만, 복잡도 측면에서 VVC 대비 인코딩(encoding) 실행시간은 약 11배 증가하였고 디코딩(decoding) 실행시간은 약 13배 증가하였다. 본 고에서는 ECM-19.0을 기반으로 ECM에 포함된 주요 기술들의 특징을 소개한 뒤, VVC와의 성능 비교를 통해 ECM의 기술적 효과를 분석하고, 향후 새로운 영상 압축 표준화 전망을 정리한다.

I. 서론

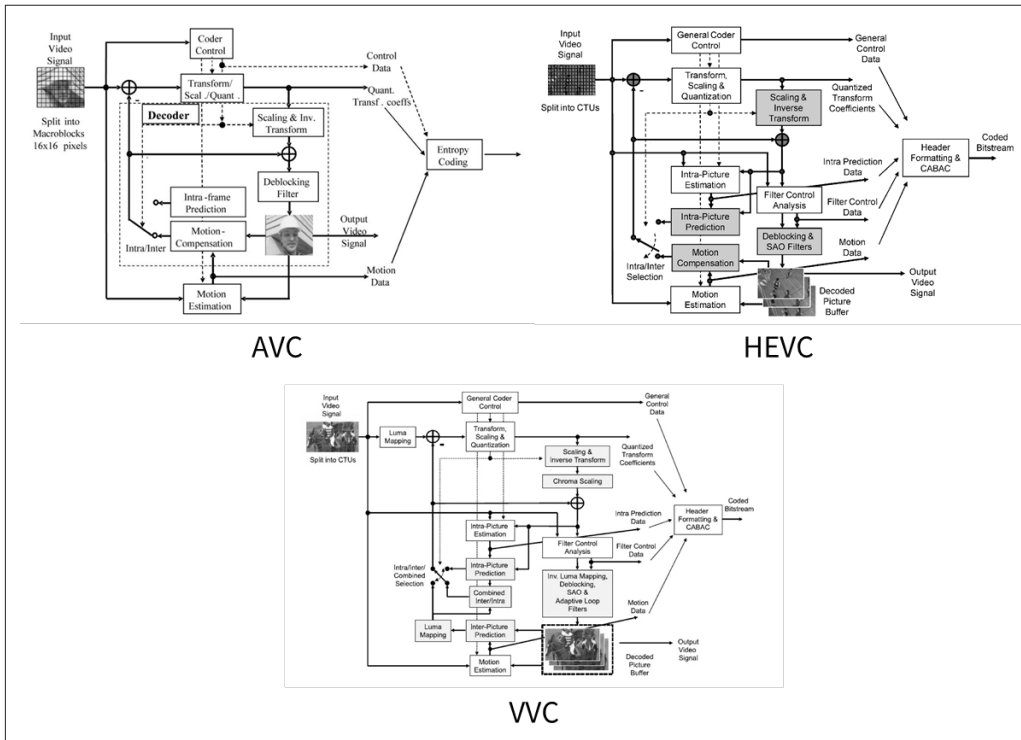
영상 압축은 디지털 영상 신호를 저장하거나 전송할 때 화질 열화를 최소화하면서 데이터량을 효율적으로 감소시키는 기술로, 방송, 통신, 저장 등 대부분의 미디어 응용 서비스에서 핵심적인 역할을 한다. <그림 1>과 같이 ISO/IEC JTC 1, ITU-T 등 공적 표준화 기구는 이전 표준 대비 동일 화질 기준에서 비트율(bitrate)을 절반 수준으로 줄이는 것을 목표로, MPEG-2 Video[1], AVC(Advanced Video Coding)[2, 3], HEVC(High Efficiency Video

Coding)[4, 5]와 같은 공적 표준(de jure standard)을 제정해 왔다. 그리고 이러한 공적 표준을 중심으로 미디어 산업 생태계가 형성되고 있다.

2020년 7월 표준화가 완료된 VVC[6, 7]를 포함한 국제 표준들은 <그림 2>와 같이 공통적으로 블록 기반 하이브리드 부호화 구조(block-based hybrid coding structure)를 기반으로 발전해 왔다. 이 구조는 화면내 예측(intra prediction), 화면간 예측(inter prediction), 변환(transform), 양자화(quantization), 엔트로피 부호화(entropy coding), 인루프 필터(in-loop filter) 등 신호



<그림 1> 영상 압축 국제 표준의 발전 추이



<그림 2> 영상 압축 국제 표준의 공통적인 블록 기반 하이브리드 부호화 구조

처리 기반 모듈이 결합된 형태이며, 지난 30여 년간 큰 구조 변화 없이 고도화되어 왔다[3, 5, 7]. VVC는 HEVC 대비 더 큰 부호화 단위 블록을 기반으로 한 다양한 블록분

할, 색성분 간(cross-component) 중복성 활용, 간소화된 학습 기반 화면내 예측, 서브블록(subblock) 단위의 정교한 예측/보정, 디코더 복잡도를 활용한 화면간 예측 보

정, 더 큰 크기 및 비정방형(non-square) 변환, 2차 변환(secondary transform), 두 종류의 새로운 인루프 필터 도입 등이 특징이다. 그 결과 VVC는 HEVC 대비 동일한 주관적 화질 기준에서 비트율이 약 절반 감소하였다.

그러나 UHD/8K, HDR(High Dynamic Range), HFR(High Frame Rate) 영상과 대규모 스트리밍 서비스의 확산으로 영상 데이터 규모가 지속적으로 증가함에 따라, VVC 이후에도 추가적인 압축성능 향상에 대한 요구가 지속되고 있다. 이러한 압축성능 향상 요구와 더불어, 강력한 컴퓨팅 자원과 대규모 학습 데이터를 바탕으로 급속히 발전한 신경망 기술이 영상 압축 분야에서 새로운 가능성으로 부각되고 있다. 이러한 신경망 기반 접근 방식은 정지영상 압축[8] 분야에서는 2017년경부터, 동영상 압축[9] 분야에서는 2019년 이후 활발히 연구되고 있으며, 복잡한 영상 패턴과 시공간적 상관성을 비선형적으로 모델링함으로써 일부 부호화 모듈에서 기존 신호처리 기반 방식 대비 높은 압축성능 향상이 보고되고 있다.

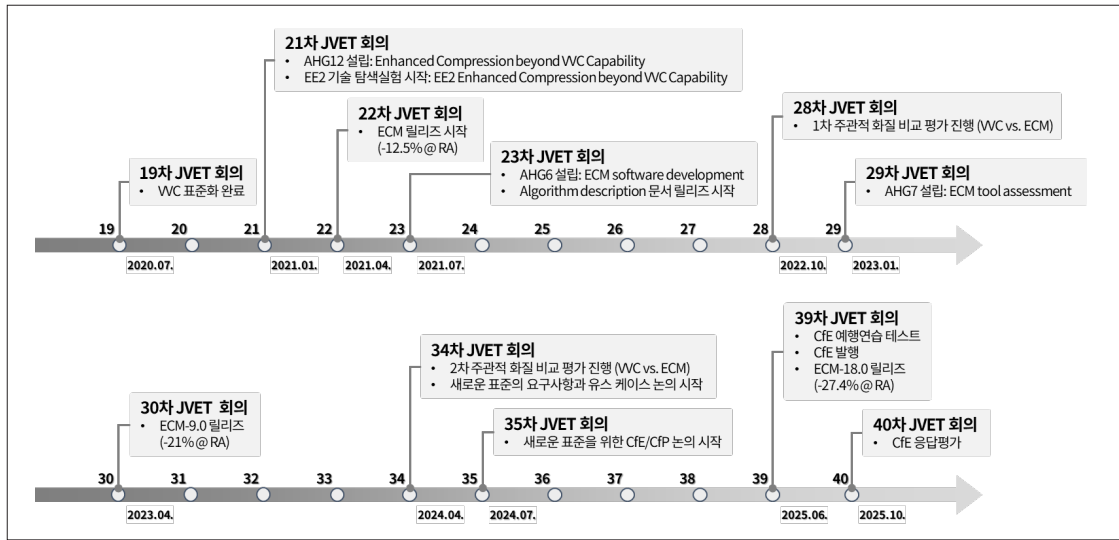
JVET은 이러한 기술적 요구와 변화된 환경을 반영하여 새로운 영상 압축 표준을 위한 후보 기술 탐색을 목적으로 두 개의 AHG(Ad Hoc Group)[10, 11]를 구성하고, EE1과 EE2 탐색실험을 병행하고 있다. 첫 번째는 2020년 7월부터 시작된 신경망 기반 영상 압축에 대한 EE1 탐색실험(NNVC: Neural Network-based Video Coding)[12]으로, JVET은 ① 전체 인코딩/디코딩 과정을 종단간(end-to-end)으로 최적화한 단일 신경망 방식, ② 기존 부호화 구조 내 일부 모듈을 신경망으로 대체하거나, 신경망 기반 후처리 필터(post-processing filter), 초해상화(super-resolution) 등의 모듈을 추가하는 방식, 그리고 ③ 종단간 신경망 기반 압축 영상을 기존 블록 기반 하이브리드 부호화 구조에서 참조 영상으로 활용하는 방식 등 다양한 접근 방식에 대한 표준화 가능성을 검토하고 있다. 두 번째 탐색실험은 2021년 1월부터 시작된 EE2(Enhanced compression beyond VVC capability)[13]로, ECM[14, 15]을 탐색실험 모델로 사용하며 신호처리 기반 부호화 기술의 압축성능 향상에 중점을 둔다. ECM은 새로운 표준

에 적용 가능한 후보 기술들의 압축성능 잠재력을 최대한 탐색하기 위해, VVC 표준화 과정에서 구현복잡도로 인해 채택되지 않았던 기술을 포함하여 VVC 개선 기술과 신규 부호화 기술을 폭넓게 통합하고 있으며, 이에 따라 VVC 대비 상당한 압축성능 향상이 보고되고 있다. 아울러 최근에는 화면내 예측과 인루프 필터를 중심으로, 신경망 기반 기술과 기존 신호처리 기반 기술 간의 결합 가능성과 시너지 효과를 검토하고 있다.

본 고에서는 2025년 10월 JVET 표준화 회의 이후 배포된 ECM-19.0[15]에 포함된 주요 부호화 기술을 소개하고, 본 고 작성 시점에 가용한 ECM-18.0의 성능 결과도 함께 제시한다. II장에서는 ECM과 관련된 EE2 탐색실험을 설명하고, III장에서는 ECM에 포함된 분야별 주요 부호화 기술을 살펴본다. 이어 IV장에서는 VVC 대비 ECM의 압축성능 및 복잡도를 분석하며, V장에서는 ECM이 보여준 신호처리 기반 부호화 기술의 표준화 가능성과 향후 전망을 정리한다.

II. ECM 관련 탐색실험

JVET은 JVT(Joint Video Team) 및 JCT-VC(Joint Collaborative Team on Video Coding)의 표준화 활동을 계승한 조직으로, AVC, HEVC, VVC 등 기존 국제 표준의 유지보수를 수행하는 한편, VSEI(Versatile Supplemental Enhancement Information messages for coded video bitstreams)[16] 표준화를 진행하고, VVC 이후의 새로운 표준 개발을 위한 기술 탐색실험도 추진하고 있다. <그림 3>은 ECM과 관련된 탐색실험의 추진 경과를 개괄적으로 보여준다. 첫 번째 버전의 VVC 표준화 완료 후, 2021년 1월 JVET 회의에서 “Compression efficiency methods beyond VVC” 기고서[17]가 제출되었으며, 해당 기고서에서 RA 실험조건에서 휘도(luma) 성분 기준 11.5%의 압축성능 향상 결과가 보고되었다. 이를 계기로 AHG12: Enhanced compression beyond

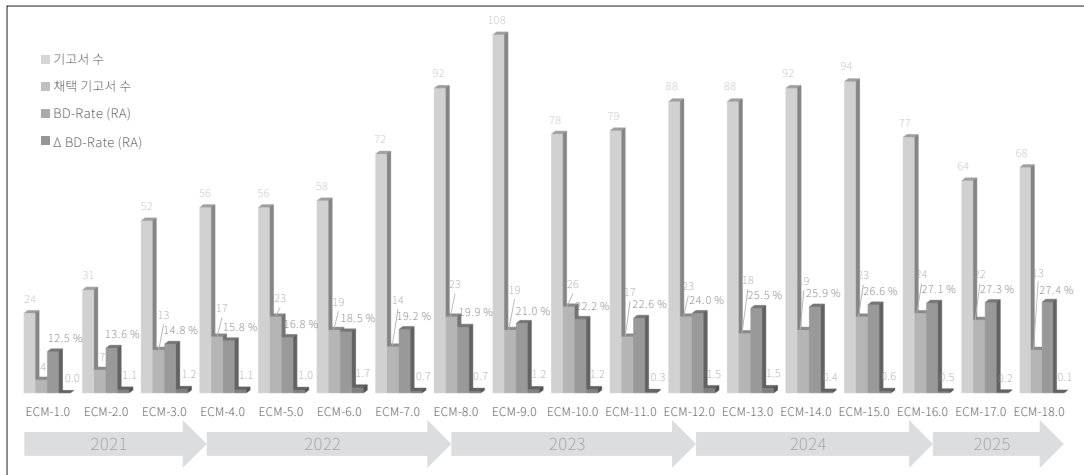


<그림 3> ECM 관련 탐색실험의 추진 경과

VVC capability와 EE2 탐색실험이 구성되었고, 이후 EE2 탐색실험을 통해 신규 부호화 기술들이 ECM에 지속적으로 통합되면서 ECM의 압축성능은 비전별로 단계적인 향상을 보여왔다. 2021년 7월 JVCET 회의에서는 ECM 탐색실험 모델 소프트웨어 관리를 위한 AHG6: ECM software development[18]가 설립되었고, ECM에 포함된 부호화 기술에 대한 알고리즘 설명(algorithm description) 문서[15]가 배포되기 시작하였다. 2023년 1월부터는 AHG7: ECM tool assessment[19]를 통해 ECM 기술들을 구현복잡도 기준으로 그룹화하고, 그룹별 압축성능 기여도를 분석하고 있다. 또한 VVC 대비 ECM의 주관적 화질 이득을 평가하기 위해 2022년 10월과 2024년 4월 두 차례에 걸쳐 전문가 대상 주관적 화질 평가가 수행되었다[20, 21]. 이 결과를 바탕으로 새로운 표준에 대한 요구사항과 유스 케이스(use case)에 대한 논의가 구체화되었으며[22], 이후 CfE(Call for Evidence)[23]와 CFP(Call for Proposal)에 대한 본격적인 논의로 확장되었다. 2025년 6월 JVCET 회의에서 CfE가 발행되었으며, 2025년 10월에는 CfE 응답평가에서 ECM 기반 응답이 압축성능 측면에서 우수한

결과를 보인 것으로 평가되었다[24].

<그림 4>는 ECM 관련 탐색실험에서의 기고서 수 변화와 ECM 압축성능의 추이를 함께 나타낸다. ECM 개발 초기에는 VVC 대비 소수의 기술 추가만으로도 높은 압축성능 향상이 관측되었으며, HEVC 이후의 탐색실험 모델인 JEM(Joint Exploration Model)[25]과 유사하게 구현복잡도를 주요 제약으로 두지 않고 압축성능 잠재력을 최대한 탐색하는 방향으로 연구가 진행되었다. 이 과정에서 매 JVCET 회의마다 다양한 부호화 기술이 제안되었고, 표준화 단계만큼 엄격한 선별 절차는 적용되지 않았으나, 압축성능 측면에서 효과가 검증된 기술들이 채택되면서 ECM 버전 증가와 함께 객관적 압축성능 향상 지표인 BD(Bjontegaard Delta)-Rate[26]는 지속적으로 개선되었다[18]. 반면 2024년 하반기 이후에는 추가되는 기술 수 대비 압축성능 개선폭이 점차 감소하며 기술적 포화 상태에 근접하고 있고, 동시에 새로운 표준에 대한 준비가 병행됨에 따라 ECM 탐색실험과 관련된 신규 기고서 수도 전반적으로 감소하는 추세를 보이고 있다.



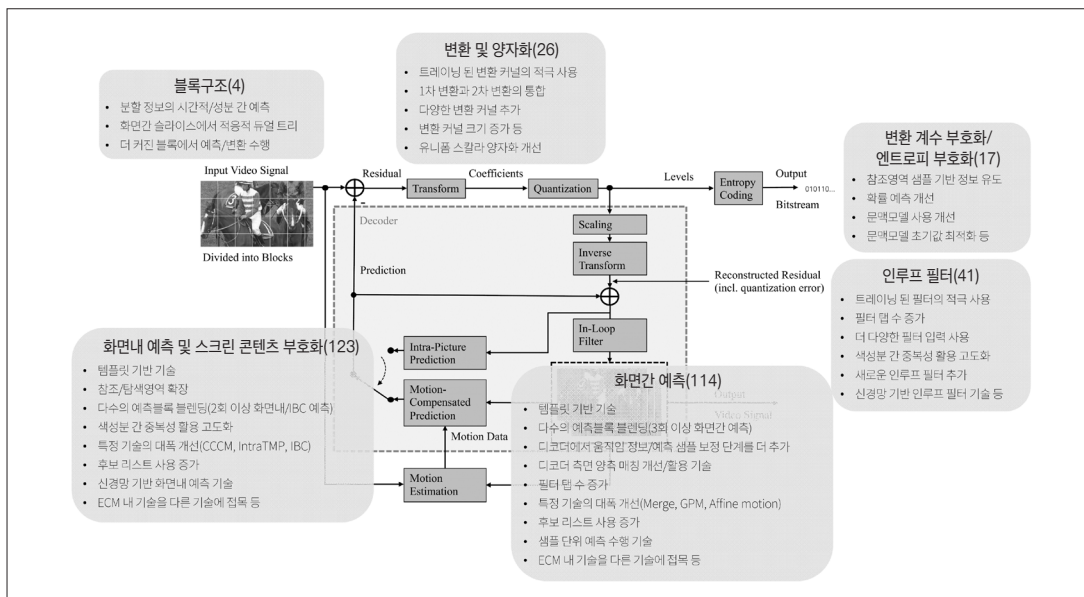
<그림 4> ECM 관련 탐색실험의 기고서 수 및 ECM 압축성능 변화

III. ECM의 주요 부호화 기술

ECM에는 기존 영상 압축 표준과 유사한 기술 분야가 존재하며, 각 분야에는 다수의 세부 부호화 기술들이 복합적으로 작용하여 압축성능을 향상시킨다. <그림 5>와 같

이 ECM-19.0 기준으로 ECM에는 전통적인 블록 기반 하 이브리드 부호화 구조에 총 325개의 부호화 기술이 포함 되어 있으며, ECM에 포함된 주요 부호화 기술의 분야별 특징은 다음과 같이 정리할 수 있다.

블록 구조(block structure) 분야에서는 기본적인 분



<그림 5> ECM-19.0에 포함된 부호화 기술의 분야별 특징

할 방식은 VVC와 유사하나, 분할 정보의 예측, 듀얼 트리(dual tree) 사용 범위의 확장, 예측 및 변환을 위한 더 큰 블록 활용이 특징이다. 가장 많은 기술이 포함된 화면 내 예측 및 스크린 콘텐츠 부호화(screen content coding) 분야에서는 템플릿(template) 기반 기술, 참조영역 및 탐색영역 확장, 다수의 예측블록을 가중합하는 블렌딩(blending), 고도화된 색성분 간 예측, 신경망 기반 화면 내 예측 등이 도입되어 압축성능이 크게 향상되었다. 템플릿 기반 기술은 ① 템플릿 매칭을 통한 샘플 예측 또는 정보 보정, ② 템플릿 간 비용(cost) 계산을 통한 정보 유도 및 재정렬, ③ 템플릿 샘플을 활용한 정보 또는 모델 유도로 구분할 수 있으며, 부호화 정보를 명시적으로 시그널링(signaling)하지 않고 디코더 측에서 유도함으로써 시그널링 오버헤드(overhead)가 감소한다. 화면간 예측 분야에서는 템플릿 기반 기술, 다양한 방식으로 생성된 예측블록의 블렌딩, 디코더 측에서의 적극적인 움직임 보정과 예측 샘플 보정 등을 통해 압축성능이 크게 개선되었다. 변환 분야에서는 1차 및 2차 변환의 통합 활용, 새로운 변환 커널(kernel)의 도입, 트레이닝(training)된 변환 커널 활용 등을 통해 성능 개선이 이루어졌다. 양자화 분야에서 변화 폭은 상대적으로 작으나, 균등 스칼라(uniform scalar) 양자화를 고도화하기 위해 비균등(non-uniform) 양자화 효과를 도입하거나 벡터(vector) 양자화를 모방하는 기술들이 포함되어 있다. 변환 계수(transform coefficient) 부호화

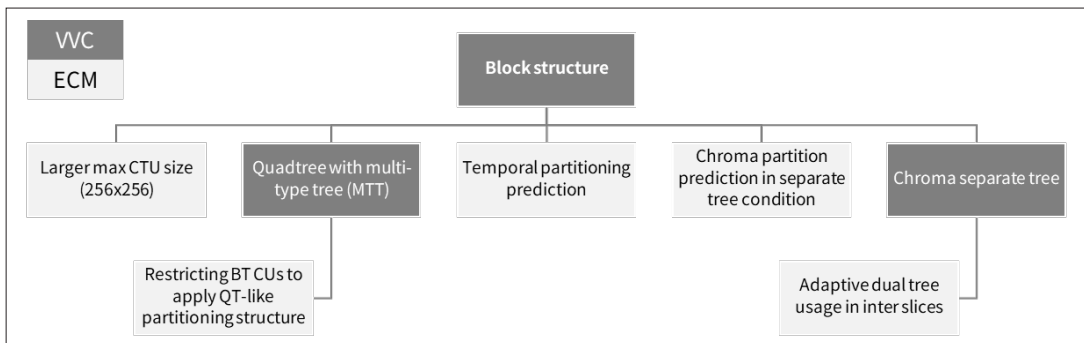
분야에서는 변환 계수 부호(sign) 예측 등의 개선이 이루어졌으며, 엔트로피 부호화 분야에서는 VVC 이전에 제안된 일부 기술들이 포함되고, 문맥모델(context model) 활용을 강화하는 방향으로 개선되었다. 인루프 필터 분야에서는 트레이닝된 필터의 적극적인 활용, 필터 탭(tap) 수 증가, 다양한 필터 입력 사용, 새로운 형태의 인루프 필터 및 신경망 기반 인루프 필터 추가 등이 주요 특징이다[27, 28].

1) 블록 구조

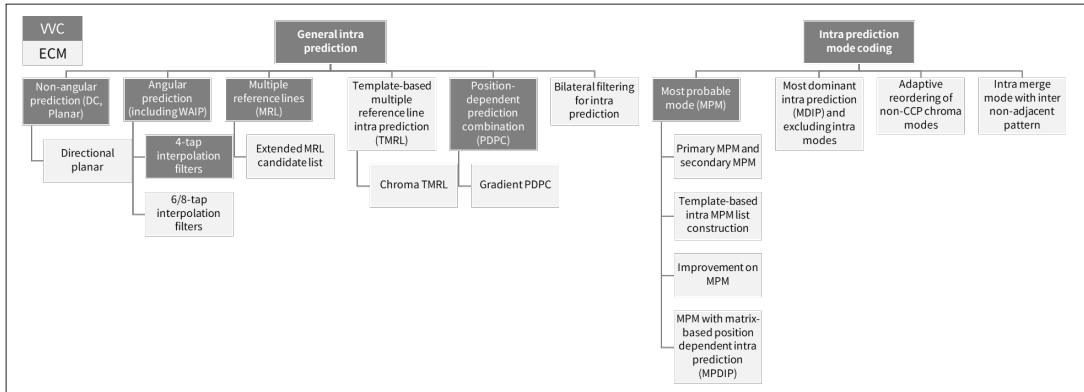
VVC는 CTU 내에서 QTBT(Quaternary Tree plus Binary Tree) 기반의 유연한 쿼드/이진 트리 분할 구조를 도입하여 블록 구조를 세분화하였다. <그림 6>과 같이 ECM은 VVC와 동일한 블록분할 구조를 유지하되, 인접 픽처(picture) 간 및 색성분 간 분할 정보 예측을 통해 분할 정보의 활용을 고도화하였으며, 듀얼 트리 적용 범위를 화면간 슬라이스(slice)까지 확장하였다.

2) 화면내 예측 및 스크린 콘텐츠 부호화

화면내 예측은 공간적 중복성을 활용하여, 현재 블록 주변의 이미 복원된 샘플을 참조함으로써 현재 블록을 예측하는 기술이다. <그림 7, 8, 9, 10>과 같이 ECM에는 다양한 화면내 예측 기술이 포함되어, 자연 영상(natural content)과 스크린 콘텐츠 영상 모두에서 예측성능이 크게 개선되었다. 초기에는 자연 영상과 스크린 콘텐츠 영상



<그림 6> ECM 블록 구조 기술



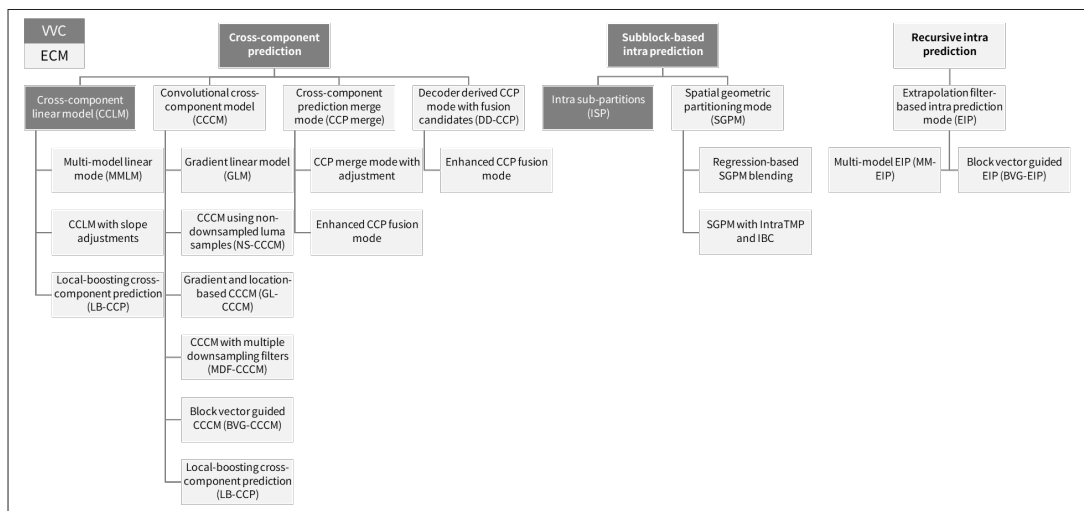
<그림 7> ECM 화면내 예측의 주요 부호화 기술: 일반 화면내 예측, 화면내 예측 모드 부호화

을 구분하여 관련 기술이 개발되었으나, 이후 IBC(Intra Block Copy)와 IntraTMP(Intra Template Matching Prediction)를 중심으로 스크린 콘텐츠 특화 기술이 자연 영상에도 확장 적용되면서 기술 간 경계가 완화된 것이다. 이러한 화면내 예측 및 스크린 콘텐츠 부호화 기술들은 총 8개의 세부 분야로 분류되며, 이하에서 주요 특징을 정리한다.

① 일반 화면내 예측(general intra prediction): ECM

은 기존 각도(angular) 기반 화면내 예측의 정확도 향상을 위해 MRL(Multiple Reference Line)을 개선하고, 예측블록에 양방향 필터(bilateral filter)를 적용하여 경계 보존(edge preservation)과 평활화(smoothing)를 동시에 고려하였다.

② 화면내 예측 모드 부호화(intra prediction mode coding): MPM(Most Probable Mode) 기반 화면내 예측 모드 부호화에서는 SMPM(Secondary MPM)



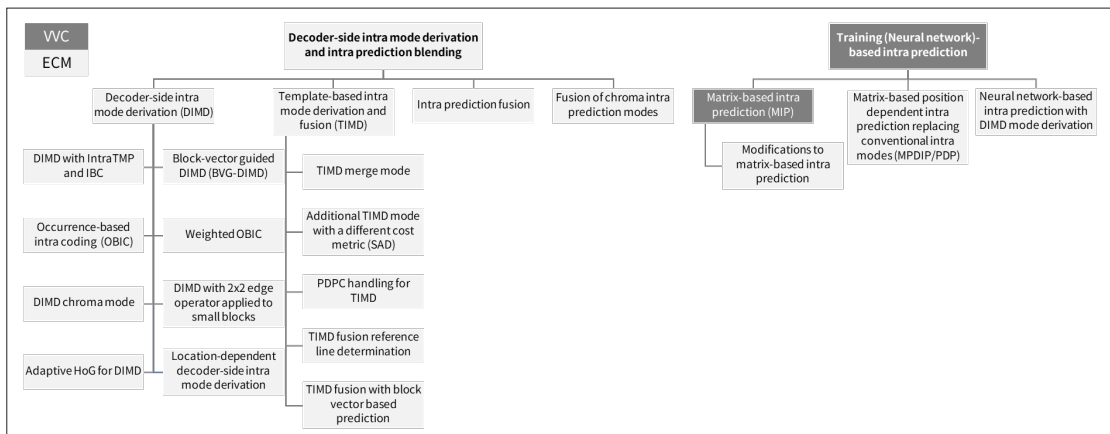
<그림 8> ECM 화면내 예측 기술: 색성분 간 예측, 서브블록 기반 화면내 예측, 재귀적 화면내 예측

등 MPM 리스트를 확장하고, 주변 복원 샘플로부터 주요 화면내 예측 모드를 유도함으로써 시그널링 오버헤드가 효과적으로 감소한다.

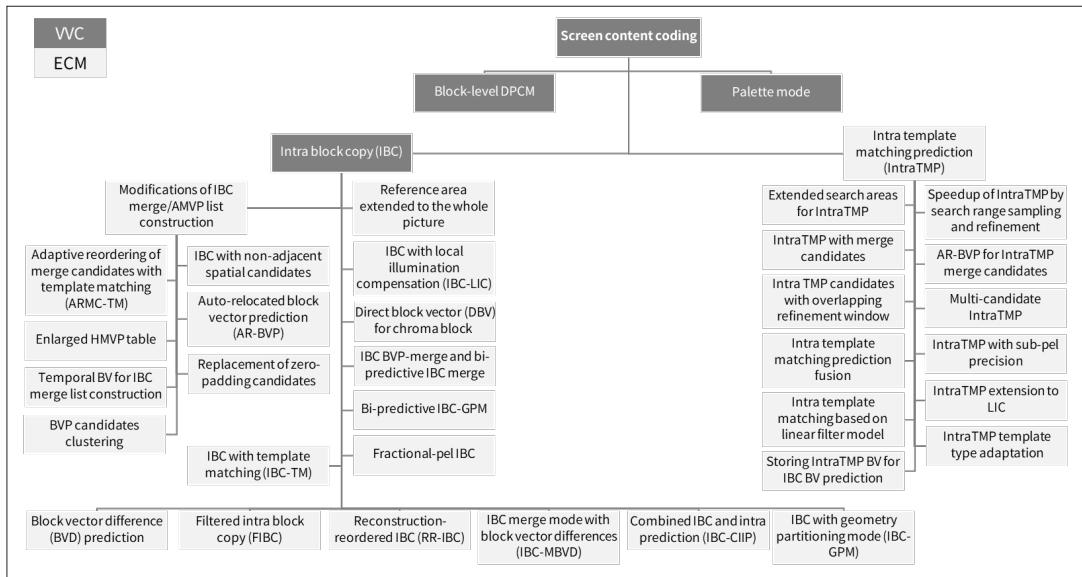
- ③ **색성분 간 예측(CCP: Cross-Component Prediction)**: ECM은 VVC의 CCLM(Cross-Component Linear Model)을 개선하고, 컨볼루션(convolution) 필터 기반의 다양한 CCCM(Convolutional Cross-Component Model) 모드 및 색차(chroma) 예측 모델의 머지(merge) 모드 등을 도입하여 휘도와 색차 성분 간 중복성을 보다 정교하게 활용한다.
- ④ **서브블록 기반 화면내 예측(subblock-based intra prediction)**: 서브블록 기반 화면내 예측에서는 VVC의 화면간 예측에 적용되었던 GPM(Geometric Partitioning Mode)을 화면내 예측으로 확장하였다.
- ⑤ **재귀적 화면내 예측(recursive intra prediction)**: EIP(Extrapolation filter-based Intra Prediction)는 IIR(Infinite Impulse Response) 필터를 이용해 블록 내부 샘플을 재귀적으로 예측함으로써 미세한 텍스처(texture)를 효과적으로 표현한다.
- ⑥ **디코더 측 화면내 예측 모드 유도 및 화면내 예측 블렌딩(decoder-side intra mode derivation and intra prediction blending)**: ECM에는 디코더가 주변 복

원 샘플을 기반으로 화면내 예측 모드를 유도하는 DIMD(Decoder-side Intra Mode Derivation)와 TIMD(Template-based Intra Mode Derivation and fusion)가 도입되었으며, 다수의 예측블록을 가중합(weighted sum)하는 블렌딩을 통해 잔차(residual)를 감소시킨다.

- ⑦ **트레이닝 기반 화면내 예측(training-based intra prediction)**: VVC의 MIP(Matrix-based Intra Prediction)를 확장한 기술과 함께, 가중치 행렬(weighted matrix) 또는 신경망 모델을 활용한 화면내 예측 기술이 포함되어 있으며, 이는 복잡한 블록 내부 텍스처를 효과적으로 모델링한다.
- ⑧ **스크린 콘텐츠 부호화**: 스크린 콘텐츠에 특화된 BDPCM(Block-based Differential Pulse Code Modulation)과 팔레트(palette) 모드는 VVC와 동일하게 유지되어, 텍스트나 단색 영역과 같이 신호 특성이 단순한 영역을 효과적으로 부호화한다. 또한, 기존 IBC 및 HEVC 표준화 이전에 제안되었던 IntraTMP 기술에는 스크린 콘텐츠뿐만 아니라 복잡한 자연 영상에 대해서도 압축 성능을 향상시키기 위한 다양한 기술이 추가되었다.



<그림 9> ECM 화면내 예측 기술: 디코더 측 화면내 예측 모드 유도 및 화면내 예측 블렌딩, 트레이닝 기반 화면내 예측

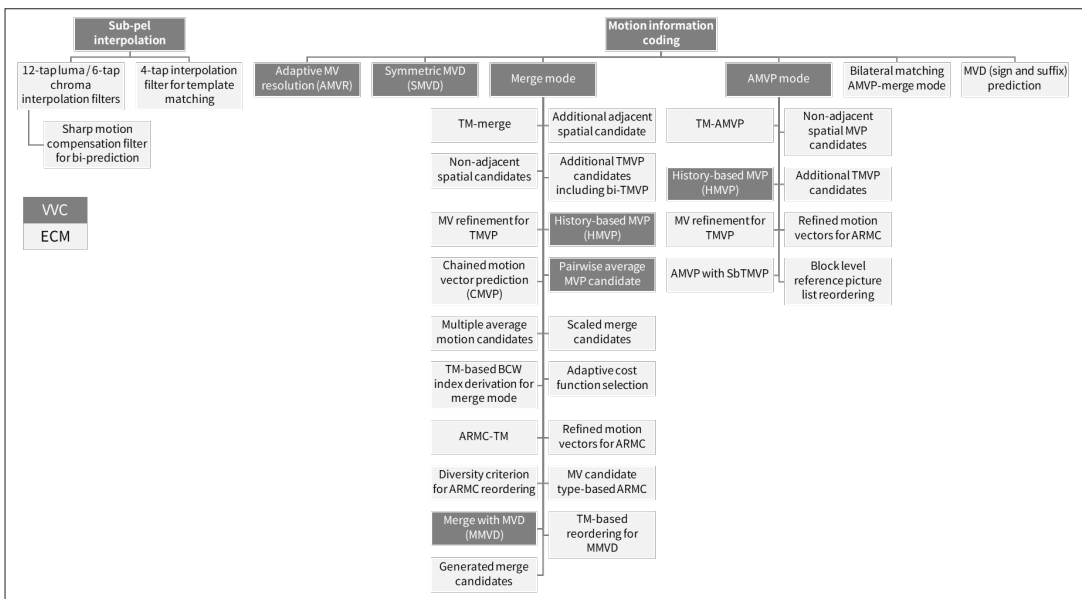


<그림 10> ECM 화면내 예측 기술: 스크린 콘텐츠 부호화

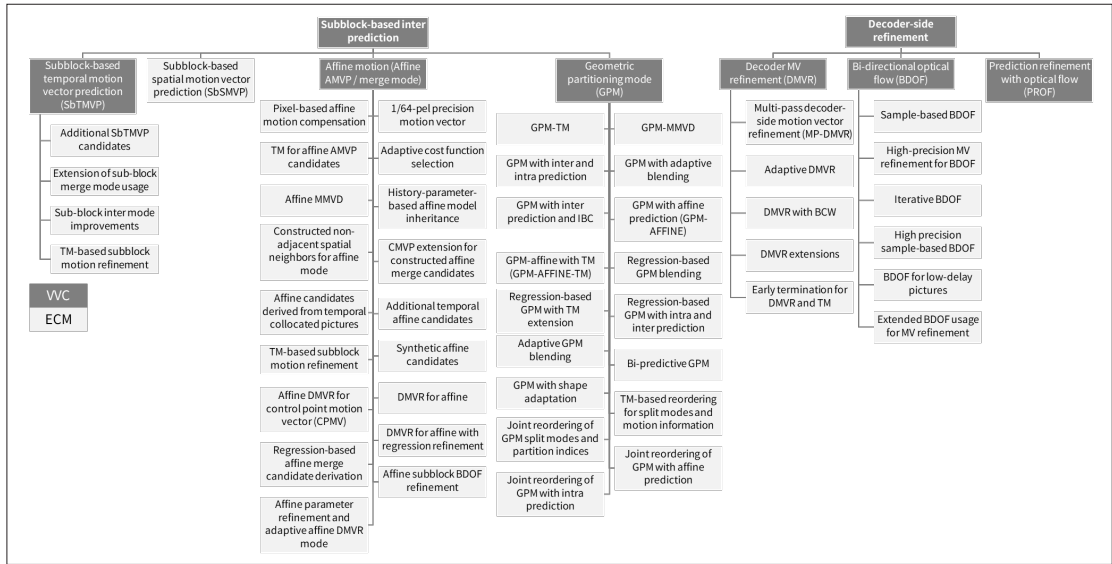
3) 화면간 예측

화면간 예측은 시간적으로 인접한 픽처 간 상관성을 활용하여 현재 블록을 예측하는 기술이다. <그림 11, 12,

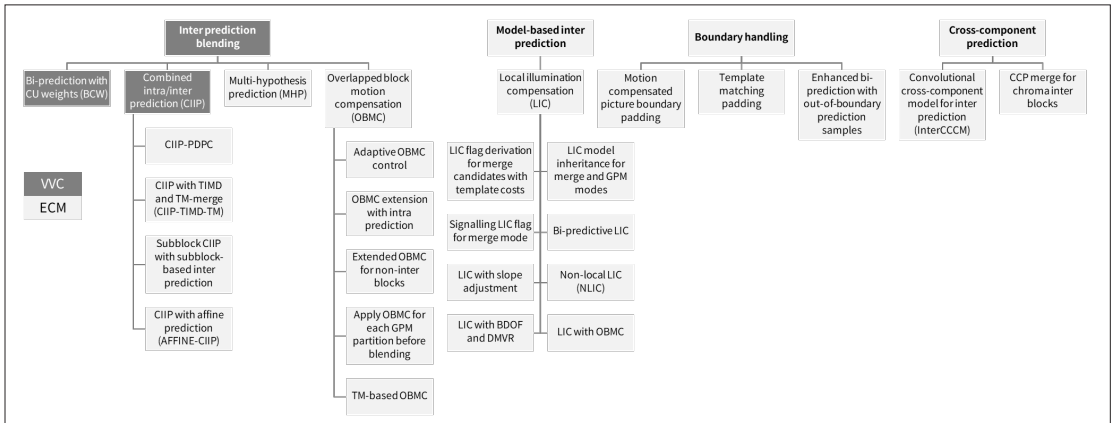
13>과 같이 ECM에서는 화면내 예측 및 스크린 콘텐츠 부호화 분야와 함께 가장 많은 기술이 추가 및 확장되어 압축성능이 크게 향상되었으며, 화면간 예측 기술은 총 8개



<그림 11> ECM 화면간 예측 기술: 부호소 보간, 움직임 정보 부호화



<그림 12> ECM 화면간 예측 기술: 서브블록 기반 화면간 예측, 디코더 측 보정



<그림 13> ECM 화면간 예측 기술: 화면간 예측 블렌딩, 모델 기반 화면간 예측, 경계 처리, 색성분 간 예측

의 세부 기술 분야로 분류할 수 있다. 이하에서는 세부 기술 분야별 주요 부호화 기술을 정리한다.

- ① **부화소 보간(sub-pel interpolation)**: ECM에서는 부화소 단위 움직임 벡터 기반 예측의 정밀도를 높이기 위해 부화소 보간 필터의 탭 수를 VVC 대비 증가시켜, 미세한 움직임 추정 정확도를 향상시켰다.
- ② **움직임 정보 부호화(motion information coding)**: 머지 모드와 AMVP(Advanced Motion Vector

Prediction) 모드에 다양한 후보 추가와 동시에 주변 블록 참조 방식을 개선하였고, 템플릿 매칭(template matching)을 활용한 디코더 측 움직임 보정과 AMVP-머지 결합 예측을 도입하여 예측 정확도와 부호화 유연성을 강화하였다.

- ③ **서브블록 기반 화면간 예측(subblock-based inter prediction)**: VVC의 어파인 움직임(affine motion)과 GPM을 확장하여, 서브블록 단위 예측 효율을 향

상시키는 기술들이 도입되었다. 어파인 모델은 정밀도와 예측 후보 구성이 개선되었으며, 어파인 AMVP 및 머지 모드에 다양한 후보와 보정 기술이 추가되었다. GPM에는 새로운 분할 형태와 방향, 템플릿 매칭 활용, 다양한 예측 기술을 활용한 예측블록 생성 등이 적용되었다. 그리고 SbTMVP(Subblock-based Temporal Motion Vector Prediction) 확장을 통해 서브블록 단위의 시간적 움직임 추정 정확도가 향상되었다.

- ④ 디코더 측 보정(decoder-side refinement): ECM에서 DMVR(Decoder-side Motion Vector Refinement)은 디코더가 움직임 벡터를 단계적으로 보정할 수 있도록 하고, BDOF(Bi-Directional Optical Flow)는 샘플 단위 보정과 고정밀 움직임 벡터 보정을 통해 예측 정밀도를 개선한다. 이러한 디코더 측 보정 기술은 인코딩 단계에서의 움직임 벡터 예측 한계를 디코딩 단계에서 효과적으로 보완한다.
- ⑤ 화면간 예측 블렌딩(inter prediction blending): ECM에서는 CIIP(Combined Inter-Intra Prediction)의 화면내/화면간 예측블록 생성 방식이 개선되었고, VVC 표준화 과정에서 제외되었던 OBMC(Overlapped Block Motion Compensation)가 도입되어 인접 블록 간 움직임 차이를 완화하고, 다양

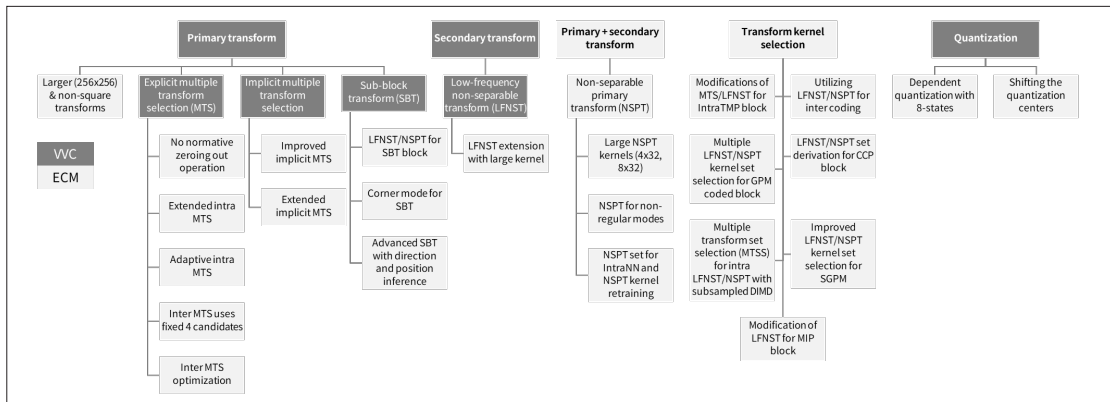
한 방식으로 생성된 예측블록을 블렌딩할 수 있도록 확장되었다.

- ⑥ 모델 기반 화면간 예측(model-based inter prediction): 현재 블록과 참조 블록의 주변 샘플을 이용해 선형 모델을 적용함으로써 국소적인 조명 변화를 효과적으로 모델링하는 LIC(Local Illumination Compensation)는 VVC 표준화 과정에서는 채택되지 않았으나, ECM에서 개선되어 포함되었다.
- ⑦ 경계 처리(boundary handling): 픽처 경계 외곽 샘플을 위한 다양한 패딩(padding) 기술이 적용되었고, 참조 블록이 영상 경계를 벗어나는 경우를 위한 예외처리 기술이 추가되었다.
- ⑧ 색성분 간 예측: 휘도 성분을 이용해 색차 성분을 예측하는 방식을 화면간 예측에도 도입하여 색차 성분의 잔차를 효과적으로 감소시켰다.

4) 변환 및 양자화

변환은 공간 영역(spatial domain)의 잔차 신호를 주파수 영역(frequency domain)의 변환 계수로 변환하여 에너지를 소수의 계수에 집중시키고, 양자화는 변환 계수를 유한한 레벨로 근사(approximation)하여 시각적으로 덜 중요한 정보를 제거한다.

- ① 변환: <그림 14>와 같이 ECM은 VVC의 MTS(Multi-



<그림 14> ECM 변환 및 양자화 기술

ple Transform Selection)를 확장하여 다양한 1차 변환(primary transform) 커널을 추가하였고, 2차 변환에서는 LFNST(Low-Frequency Non-Separable Transform)를 확장하여 더 큰 크기의 변환 커널을 지원한다. 또한 1차 변환과 2차 변환을 통합한 NSPT(Non-Separable Primary Transform)를 도입하여, 특정 블록 크기에서 화면내 예측 모드에 따라 선택된 비분리(non-separable) 변환을 적용함으로써 복잡한 잔차 신호를 효과적으로 표현한다. 아울러 1차 변환, 2차 변환, NSPT에 대한 변환 커널 선택이 유도된 화면내 예측 모드를 기반으로 이루어지도록 하여, 예측 블록의 특성에 적합한 변환을 적용할 수 있다.

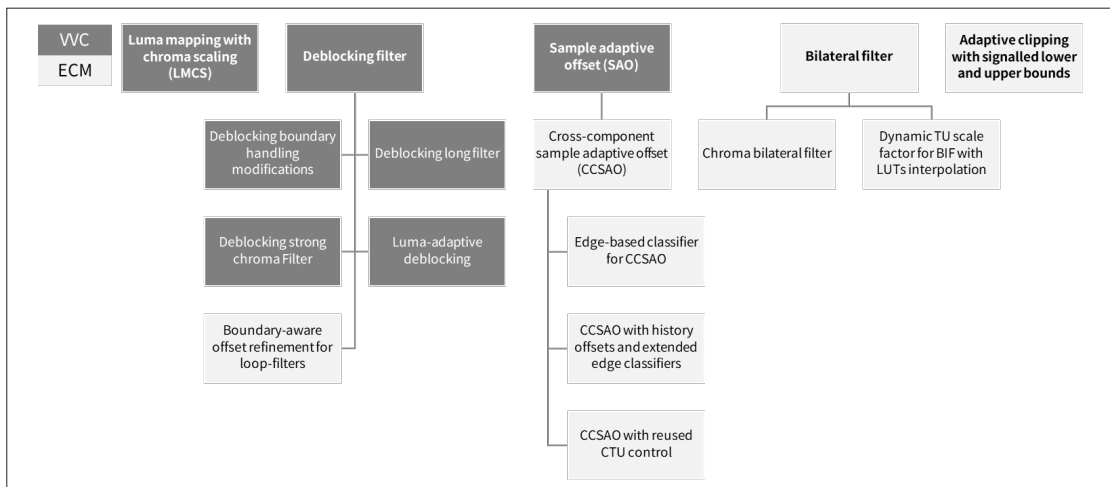
- ② 양자화: ECM은 양자화 중심의 이동과 VVC의 DQ(Dependent Quantization) 확장을 통한 정교한 양자화를 적용함으로써, 기존의 균등 스칼라 양자화를 개선한다.

5) 인루프 필터

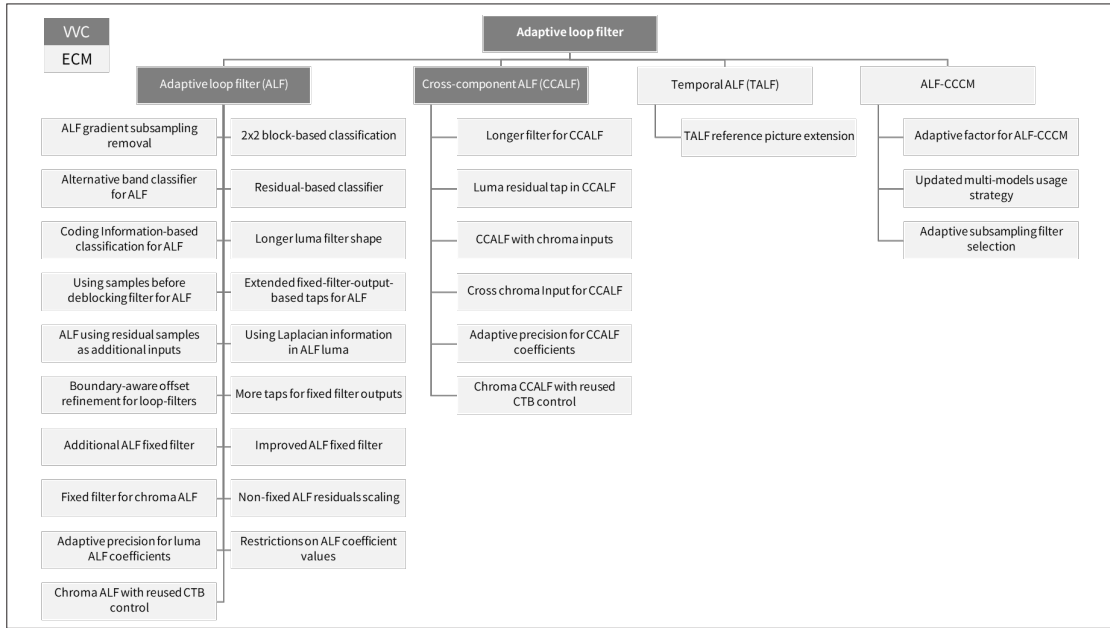
인루프 필터는 블록킹 아티팩트(blocking artifact), 링잉 아티팩트(ringing artifact), 그리고 원본 영상과 복

원 영상 간의 왜곡을 완화하여 현재 픽처의 복원 화질을 향상시키고, 후속 픽처의 화면간 예측 효율을 높여 객관적/주관적 화질 개선에 모두 기여한다. <그림 15, 16>과 같이 ECM에는 양방향 필터와 적응적 클리핑(adaptive clipping)이 추가되었으며, 이하에서는 주요 부호화 기술을 정리한다.

- ① 휘도 매핑과 색차 스케일링(LMCS: Luma Mapping with Chroma Scaling): LMCS는 휘도 성분을 효과적으로 재분포하여 압축성능을 향상시키고, 이에 연동하여 색차 성분을 함께 스케일링하는 기술이다. ECM에서는 VVC의 LMCS 구조를 그대로 유지한다.
- ② 디블록킹 필터(DF: Deblocking Filter): DF는 블록 경계에서 발생하는 불연속성을 완화하는 역할을 한다. ECM은 VVC의 디블록킹 필터 구조에서 경계 여부에 따른 오프셋 적용을 도입하였다. 향후 새로운 표준화 과정에서 주관적 화질 개선을 위해 추가 발전 가능성이 있다.
- ③ 샘플 적응적 오프셋(SAO: Sample Adaptive Offset): SAO는 픽셀 단위 보정을 통해 복원 오차를 감소시키는 기술이다. ECM에는 HEVC 및 VVC의 SAO 구조를 확장한 CCSAO(Cross-Component SAO)가



<그림 15> ECM 인루프 필터 기술: 휘도 매핑과 색차 스케일링, 샘플 적응적 오프셋, 양방향 필터, 적응적 클리핑



<그림 16> ECM 인루프 필터 기술: 적응적 루프 필터

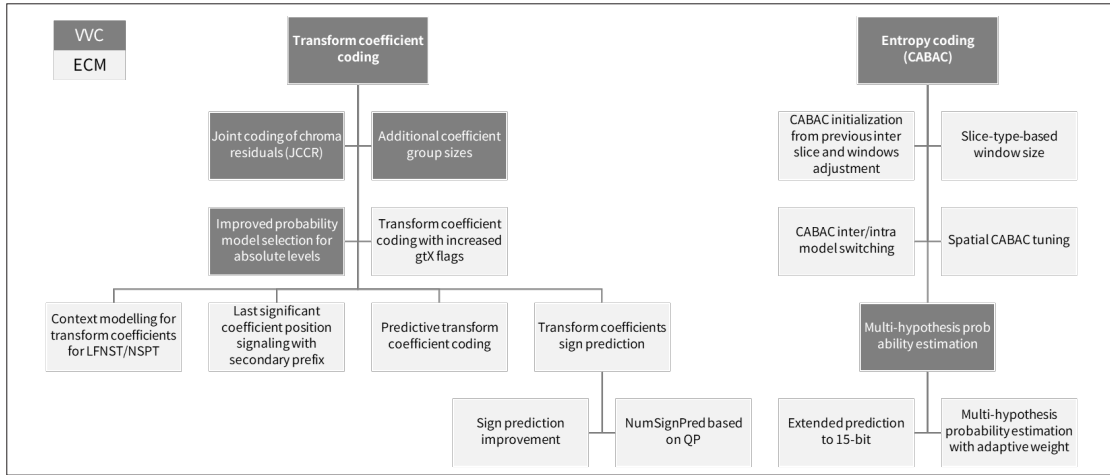
추가되어, 휘도와 색차 성분 간 중복성을 활용함으로써 복원 샘플의 오차를 효과적으로 보정한다.

- ④ **양방향 필터**: VVC 표준화 과정에서 채택되지 않았던 양방향 필터가 ECM에 다시 도입되었다. 이 필터는 샘플 간 공간적 거리와 샘플 값 차이를 동시에 고려하여 고주파 텍스처를 보존하면서 노이즈(noise)를 제거한다. ECM에서는 SAO와 병렬로 동작하며, 커널 크기, 가중치 계산 방식 등에 대한 최적화가 이루어졌다.
- ⑤ **적응적 클리핑**: 적응적 클리핑은 샘플 값의 동적 범위를 제한함으로써 왜곡을 줄이는 기술로, 압축성능 향상과 함께 밝기나 색상이 비정상적으로 튀는 현상을 억제하여 주관적 화질 개선에 기여한다.
- ⑥ **적응적 루프 필터(ALF: Adaptive Loop Filter)**: ALF는 원본 영상과 복원 영상 간의 왜곡을 최소화하도록 설계된 필터를 적용하여 복원 화질을 개선한다. ECM은 VVC의 ALF 구조를 기반으로 블록 분류(block classification) 크기 축소, 필터 탭 수 확장 등

다양한 개선 기술을 도입하였다. 또한 디블록킹 필터 이전 샘플, 잔차 샘플, 고정 필터(fixed filter) 출력 등 다양한 입력 신호를 활용하여 필터의 왜곡 감소 능력을 강화하였다. CCALF(Cross-Component ALF)는 필터 입력과 탭 수 확장을 통해 구조적으로 확장되었으며, TALF(Temporal ALF)는 참조 픽처의 샘플을 활용하여 현재 픽처에 대한 필터링을 수행한다. ALF-CCCM은 디코더 측 색차 성분 간 필터링 구조를 사용하며, 다양한 영역 크기와 모델에 따른 컨볼루션 연산을 수행하여 색차 성분을 보정한다. 마지막으로 ECM에는 신경망 기반 루프 필터(NNLF: Neural Network-based Loop Filter)를 위한 인터페이스 구조가 도입되어, 기존 신호처리 기반 필터와의 호환성을 유지하면서 신경망 기반 루프 필터를 접목할 수 있는 기반을 제공한다.

6) 변환 계수 부호화 및 엔트로피 부호화

- ① **변환 계수 부호화**: 변환 계수 부호화는 잔차 신호에



<그림 17> ECM 변환 계수 부호화 및 엔트로피 부호화 기술

대해 변환과 양자화를 거쳐 생성된 양자화된 레벨을 효율적으로 표현하는 과정이다. <그림 17>과 같이 ECM에서는 VVC 대비 정교한 양자화된 레벨 표현과 문맥모델 개선을 통해 압축성능을 향상시켰다. 특히 예측된 계수의 크기(magnitude)에 따라 필요한 부호화 정보만을 선택적으로 시그널링하는 예측 기반 변환 계수 부호화가 추가되었다. 또한 복원 샘플의 경계 불연속성 비용을 고려하여 계수의 부호(sign)를 예측하는 부호 예측 기술도 포함되었다.

- ② **엔트로피 부호화:** 엔트로피 부호화는 부호화 대상 정보의 발생 확률에 기반하여 무손실 압축을 수행하는 기술로, AVC부터 CABAC(Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding)이 사용되고 있다. CABAC은 확률모델(probability model)을 이용해 이진 심볼(binary symbol)을 부호화하며, 부호화 과정에서 문맥모델을 적응적으로 갱신하여 확률 예측 정확도를 향상시킨다. <그림 17>과 같이 ECM에서는 CABAC의 확률모델 정밀도를 향상시키고, 슬라이스 유형(slice type)별 윈도우 크기 조정과 화면 내/화면간 문맥모델 전환을 통해 상황에 따른 적응성을 높였다. 또한 공간 문맥 튜닝을 통해 인접 블록

의 문맥 정보를 효과적으로 반영하였으며, 두 개의 확률 상태를 활용한 적응적 가중치 기반 확률 예측과 이전 슬라이스 문맥모델을 현재 슬라이스의 초기 문맥모델로 활용하는 기술도 포함되어 있다.

IV. ECM 성능

JVET은 매 표준화 회의마다 채택된 기술을 반영한 ECM 탐색실험 모델 소프트웨어를 배포하고, 공통실험 조건(CTC: Common Test Conditions)[29] 하에서 이전 ECM 버전과 VVC 참조 소프트웨어인 VTM(VVC Test Model)-11.0[30]을 비교 대상(anchor)으로 하여 성능을 보고한다[18]. 압축성능 지표로는 BD-Rate를, 복잡도 지표로는 인코딩/디코딩 실행시간(EncT/DecT)을 사용한다.

<표 1>과 같이 ECM-18.0은 VTM-11.0 대비 AI(All Intra), RA, LDB(Low Delay B) 실험조건에서 각각 -16.87%, -27.37%, -23.44%의 휘도 성분 BD-Rate 감소를 보였다. 화면간 예측이 활용되는 RA 및 LDB 조건에서 AI 조건 대비 더 큰 BD-Rate 감소가 관찰되며, 이는 ECM

<표 1> ECM-18.0의 압축성능 및 인코딩/디코딩 실행시간

	All Intra Main 10						
	Over VTM-11.0						
	Y	U	V	EncT	DecT	EncVmPeak	DecVmPeak
Class A1	-14.82%	-16.49%	-27.44%	1202.2%	577.9%	236.6%	325.9%
Class A2	-21.47%	-24.85%	-29.07%	1119.5%	624.0%	237.6%	325.3%
Class B	-15.06%	-23.15%	-21.18%	1086.0%	627.5%	181.0%	355.2%
Class C	-15.19%	-12.08%	-13.23%	1026.3%	583.6%	121.7%	394.4%
Class E	-19.58%	-23.35%	-21.51%	992.5%	615.0%	139.3%	381.4%
Overall	-16.87%	-19.90%	-21.83%	1080.0%	606.4%	173.6%	357.4%
Class D	-12.92%	-8.80%	-9.64%	1013.4%	663.9%	109.3%	414.2%
Class F	-30.84%	-34.56%	-34.60%	688.3%	658.9%	125.9%	374.2%
Class TGM	-43.72%	-49.31%	-48.60%	513.1%	658.7%	149.7%	351.4%

	Random Access Main 10						
	Over VTM-11.0						
	Y	U	V	EncT	DecT	EncVmPeak	DecVmPeak
Class A1	-27.52%	-25.12%	-37.22%	1205.3%	1195.4%	153.0%	247.5%
Class A2	-30.81%	-34.98%	-40.50%	1103.1%	1346.4%	152.7%	246.9%
Class B	-25.42%	-34.33%	-31.10%	999.4%	1197.0%	144.5%	267.5%
Class C	-27.12%	-24.29%	-25.03%	1064.9%	1294.1%	116.8%	321.1%
Class E	-	-	-	-	-	-	-
Overall	-27.37%	-29.94%	-32.58%	1076.3%	1250.9%	139.7%	272.1%
Class D	-27.81%	-24.52%	-25.81%	1003.1%	1417.7%	104.9%	360.3%
Class F	-33.60%	-36.80%	-37.37%	851.2%	853.5%	121.7%	296.3%
Class TGM	-43.07%	-48.90%	-48.87%	693.7%	676.2%	125.7%	281.3%

	Low Delay B Main 10						
	Over VTM-11.0						
	Y	U	V	EncT	DecT	EncVmPeak	DecVmPeak
Class A1	-	-	-	-	-	-	-
Class A2	-	-	-	-	-	-	-
Class B	-22.61%	-40.61%	-35.58%	976.7%	1030.5%	166.8%	266.9%
Class C	-25.00%	-28.31%	-30.38%	937.3%	1074.8%	125.2%	316.1%
Class E	-22.74%	-29.72%	-28.28%	965.0%	712.7%	139.7%	296.8%
Overall	-23.44%	-33.79%	-32.02%	960.5%	953.0%	145.0%	290.0%
Class D	-26.46%	-29.97%	-31.37%	938.9%	1175.1%	110.5%	352.6%
Class F	-31.37%	-41.12%	-41.47%	859.7%	808.4%	129.6%	295.0%
Class TGM	-41.36%	-51.49%	-51.48%	691.5%	643.3%	125.2%	281.6%

에 포함된 다수의 화면간 예측 관련 기술이 압축성능 향상에 크게 기여하고 있음을 보여준다. 또한 자연 영상과 스크린 콘텐츠가 혼합된 Class F와 스크린 콘텐츠 중심의 Class TGM에서 자연 영상으로 구성된 Class A1, A2, B, C, D, E 대비 상대적으로 더 큰 BD-Rate 감소를 보여, ECM에 포함된 스크린 콘텐츠 부호화 기술이 구조적으로 단순하고 반복 패턴이 많은 영상에 특히 효과적임을 보여

준다. 한편, ECM에는 약 320개의 부호화 기술이 포함되어 있으나, RA 조건에서의 BD-Rate 감소는 -27.37% 수준이다. 물론 기술 간 기여도는 상이하나, 단순 평균 관점에서 기술 하나당 기여도는 0.1% 미만에 불과하며, 이는 신호처리 기반 부호화 기술을 통한 압축성능 향상이 한계에 도달했음을 시사한다. 복잡도 측면에서 인코딩 실행시간은 VTM-11.0 대비 AI, RA, LDB 조건에서 각각 약 10.8배,

<표 2> ECM-18.0에서 기술 그룹 단위 제거 성능

	Random Access Main 10									
	Over ECM-18.0					Over VTM-11.0				
	Y	U	V	EncT	DecT	Y	U	V	EncT	DecT
기술 그룹 1 제거	4.99%	5.05%	5.25%	77.4%	62.1%	-23.72%	-26.44%	-28.99%	830.2%	995.5%
기술 그룹 2 제거	1.55%	1.29%	1.51%	85.4%	95.9%	-26.24%	-29.00%	-31.56%	905.9%	1482.6%
기술 그룹 3 제거	1.29%	3.39%	4.04%	92.4%	98.9%	-26.44%	-27.66%	-30.08%	956.5%	1258.5%
기술 그룹 4 제거	1.25%	2.98%	3.34%	95.4%	99.4%	-26.47%	-27.94%	-30.51%	1057.1%	1335.2%
기술 그룹 5 제거	4.25%	2.91%	3.48%	94.0%	92.8%	-24.28%	-27.90%	-30.27%	968.9%	1218.1%
기술 그룹 1~5 제거	15.10%	18.37%	20.63%	51.6%	54.4%	-16.40%	-17.40%	-19.13%	501.0%	572.8%

10.8배, 9.6배 증가하였고, 디코딩 실행시간은 각각 약 6.1배, 12.5배, 9.5배 증가하였다. 또한 인코더의 최대 메모리 사용량(EncVmPeak)은 VTM 대비 약 140~175%, 디코더의 최대 메모리 사용량(DecVmPeak)은 약 270~360%까지 증가하였다. 이러한 실행시간 및 메모리 사용량 증가는 ECM 초기 개발 과정에서 압축성능 극대화를 우선시하고 실행시간과 메모리 사용량을 주요 제약으로 두지 않았던 설계 기초의 영향이 크며, 높은 압축성능 달성을 위해 상당한 복잡도가 요구됨을 의미한다.

JVET은 ECM에 포함된 구현복잡도가 높은 부호화 기술들을 복잡도 관점의 주요 특징에 따라 다섯 개의 기술 그룹으로 분류하고 있다. 기술 그룹 1은 화면간 템플릿 매칭 기반 부호화 기술, 기술 그룹 2는 머지/스킵(skip)/AMVP/서브블록/IBC 등에서 후보 리스트를 도출하는 과정을 화면내 예측/복원 과정과 교차 수행하는 기술, 기술 그룹 3은 화면내 예측 및 IBC에서 템플릿 매칭과 탐색을 수행하는 기술, 기술 그룹 4는 VVC 대비 더 많은 주변 복원 샘플 처리가 요구되는 기술, 기술 그룹 5는 대규모 메모리 접근이 필요한 기술로 구성된다. 이러한 분류에 따라 RA 조건에서 각 기술 그룹을 ECM에서 제거했을 때의 압축성능 결과를 <표 2>에 제시하였으며, 그 결과 기술 그룹 1과 5를 각각 제거한 경우 ECM 대비 압축성능 저하가 가장 크게 나타났다. 특히 기술 그룹 1부터 5까지 모두 제거한 경우에는 ECM 대비 15.10%의 회도 성분 BD-Rate 증가가 발생하였다[19]. 이를 통해 ECM은 화면간 템플릿 매칭과 대규모 메모리 접근을 수반하는 고복잡도 부호화

기술 등을 적극적으로 도입함으로써 VVC 대비 유의미한 압축성능 향상을 달성하였음을 알 수 있다. 나아가 이러한 성능 향상은 다수의 기술이 균등하게 기여한 결과라기보다는 압축 성능에 결정적인 영향을 미치는 일부 핵심 기술의 지배적인 기여에 의해 달성된 것임을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 고에서는 ECM의 개요와 관련 탐색실험의 추진경과를 정리하고, VVC 대비 ECM의 압축성능을 분석하였다. ECM은 VVC 이후의 압축성능 향상을 목표로 신호처리 기반 기술을 중심으로 개발된 탐색실험 모델로, 약 320개의 부호화 기술이 통합되어 약 27% 비트를 절감의 상당한 압축성능 향상을 달성하였다. 최근에는 신경망 기반 부호화 기술이 점진적으로 포함되면서, ECM은 신호처리 기반 기술과 신경망 기반 기술이 공존하는 구조로 발전하고 있다. 향후 새로운 영상 압축 표준에서는 신호처리 기반 부호화 기술이 여전히 핵심적인 역할을 수행하는 한편, 신경망 기반 기술은 특정 기능을 보완하는 형태로 활용될 가능성이 높을 것으로 예상된다. ECM 개발 과정에서는 VVC 대비 두 차례의 주관적 화질 평가를 통해 화질 측면에서도 우수성이 확인되었으며, 이를 토대로 2025년 6월 JVET 회의에서 CfE가 발행되면서 본격적인 표준화 준비 단계에 진입하였고, 2025년 10월에 진행된 CfE 응답평가에서 ECM 기반 응답이 압축성능 측면에서 우수한 성능을 입증하였

다. 이에 따라 2026년 7월 CfP 발행과 2027년 1월 CfP 응답평가를 거쳐 새로운 영상 압축 표준화가 본격화되어, 최종 표준은 2029년 10월에 완료될 것으로 예상된다. 종합하면 ECM은 차세대 영상 압축 표준을 위한 기술적 성능

의 상한선을 제시하고 다양한 부호화 기술의 가능성을 사전에 검증하는 역할을 수행하였으며, 향후 표준화 과정에서는 압축성능과 구현복잡도 간의 균형을 고려한 보다 실용적인 부호화 기술 설계가 요구될 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

- [1] ITU-T Rec. H.262 | ISO/IEC 13818-2, Generic coding of moving pictures and associated audio information: Video, 1995.
- [2] ITU-T Rec. H.264 | ISO/IEC 14496-10, Advanced video coding for generic audiovisual services, 2003.
- [3] T. Wiegand et al., "Overview of the H.264/AVC video coding standard," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 13, no. 7, pp. 560-576, Jul. 2003.
- [4] ITU-T Rec. H.265 | ISO/IEC 23008-2, High efficiency video coding, 2013.
- [5] G. J. Sullivan et al., "Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 22, no. 12, pp. 1649-1668, Dec. 2012.
- [6] ITU-T Rec. H.266 | ISO/IEC 23090-3, Versatile video coding, 2020.
- [7] B. Bross et al., "Overview of the Versatile Video Coding (VVC) Standard and its Applications," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 31, no. 10, pp. 3736-3764, Oct. 2021.
- [8] J. Ballé et al., "End-to-end optimized image compression," Proc. International Conference on Learning Representations (ICLR), Toulon, France, Apr. 2017.
- [9] G. Lu et al., "DVC: An end-to-end deep video compression framework," Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, Jun. 2019.
- [10] E. Alshina et al., "JVET AHG report: Neural network-based video coding (AHG11)," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AN0011, Oct. 2025.
- [11] M. Karczewicz et al., "JVET AHG report: Enhanced compression beyond VVC capability (AHG12)," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AN0012, Oct. 2025.
- [12] E. Alshina et al., "Exploration experiment on neural network-based video coding (EE1)," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AN2023, Oct. 2025.
- [13] V. Seregin et al., "Exploration experiment on enhanced compression beyond VVC capability (EE2)," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AN2024, Oct. 2025.
- [14] ECM software, Available: <https://vcgit.hhi.fraunhofer.de/ecm/ECM>
- [15] M. Coban et al., "Algorithm description of Enhanced Compression Model 19 (ECM 19)," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AN2025, Oct. 2025.
- [16] ITU-T Rec. H.274 | ISO/IEC 23002-7, Versatile supplemental enhancement information messages for coded video bitstreams, 2020.
- [17] Y.-J. Chang et al., "Compression efficiency methods beyond VVC," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-U0100, Jan. 2021.
- [18] V. Seregin et al., "JVET AHG report: ECM software development (AHG6)," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AN0006, Oct. 2025.
- [19] X. Li et al., "JVET AHG report: ECM tool assessment (AHG7)," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AN0007, Oct. 2025.
- [20] V. Baroncini et al., "Visual quality comparison of ECM/VTM encoding," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AB2029, Oct. 2022.
- [21] V. Baroncini et al., "Visual quality comparison of ECM/VTM encoding," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AH2029, Apr. 2024.
- [22] WG 2 MPEG Technical Requirements, "Draft of use cases and requirements for potential next-generation video coding standard beyond VVC capability," ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 2, N448, Apr. 2025.
- [23] J.-R. Ohm et al., "Joint Call for Evidence on video compression with capability beyond VVC," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AM2026, Jul. 2025.

참 고 문 헌

- [24] F. Bossen et al., "Results of the Joint Call for Evidence on video compression with capability beyond VVC," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AN2029, Oct. 2025.
- [25] J. Chen et al., "The Joint Exploration Model (JEM) for Video Compression With Capability Beyond HEVC," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 30, no. 5, pp. 1208-1225, May 2020.
- [26] G. Bjøntegaard, "Improvements of the BD-PSNR model," ITU-T SG 21 Q6/21 Video Coding Experts Group (VCEG), VCEG-AI11, Jul. 2008.
- [27] 임성창, "ECM Overview," 제9회 MPEG뉴미디어포럼 총회 및 기술워크숍, MPEG뉴미디어포럼, 2025년 9월.
- [28] 전상훈 등, "Overview of ECM," 방송과 미디어 제29권 제1호, 2024년 1월.
- [29] M. Karczewicz et al., "Common test conditions and evaluation procedures for enhanced compression tool testing," Joint Video Experts Team (JVET), JVET-AI2017, Jul. 2024.
- [30] VTM-11.0 reference software, Available: https://vcgit.hhi.fraunhofer.de/jvet/VVCSoftware_VTM-/tags/VTM-11.0

저 자 소 개

임 성 창



- 2006년 2월 : 세종대학교 컴퓨터공학과 학사
- 2008년 2월 : 세종대학교 컴퓨터공학과 석사
- 2022년 2월 : 세종대학교 컴퓨터공학과 박사
- 2008년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 미디어부호화연구실 책임연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-0110-7489>
- 주관심분야 : 영상 압축, 영상 처리

최 진 수



- 1990년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사
- 1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 석사
- 1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 박사
- 1996년 5월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 미디어부호화연구실 책임연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-4297-5327>
- 주관심분야 : 2D/3D 영상 압축, 비디오 신호처리

강 정 원



- 1993년 : 한국항공대학교 항공전자공학과 학사
- 1995년 : 한국항공대학교 항공전자공학과 공학석사
- 2003년 : Georgia Institute of Tech, ECE 공학박사
- 2003년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 미디어부호화연구실 실장
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-4003-4638>
- 주관심분야 : 2D 영상 압축, 입체 비디오 영상 압축, 영상신호처리

저 자 소 개



문 기 화

- 2021년 2월 : 한국항공대학교 소프트웨어학과 학사
- 2023년 2월 : 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사
- 2024년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학과 박사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-6727-7790>
- 주관심분야 : 비디오 신호처리, 비디오 부호화



김 재 곤

- 1990년 : 경북대학교 전자공학과 학사
- 1992년 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사
- 2005년 : KAIST 전자전산학과 박사
- 1992년 ~ 2007년 : 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원/팀장
- 2001년 ~ 2002년 : Columbia University, NY, 연구원
- 2015년 ~ 2016년 : UC San Diego, Visiting Scholar
- 2007년 9월 ~ 현재 : 한국항공대학교 서울캠퍼스 교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3686-4786>
- 주관심분야 : 비디오 신호처리, 비디오 부호화, 몰입형 비디오