

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제29권 제2호, 2024년 3월 (JBE Vol.29, No.2, March 2024)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2024.29.2.134>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

ECM의 라인별 가중치를 이용한 TIMD 개선

전 상 훈^{a)}, 문 기 화^{a)}, 임 성 창^{b)}, 김 재 곤^{a)†}

Enhancement of Template-based Intra Mode Derivation (TIMD) with Line-Wise Weighting in ECM

Sanghun Jeon^{a)}, Gihwa Moon^{a)}, Sung-Chang Lim^{b)}, and Jae-Gon Kim^{a)†}

요 약

JVET은 VVC 표준화 완료 후, 새로운 비디오 압축 표준화를 위한 기술 탐색을 진행하고 있으며 이를 위한 탐색모델 소프트웨어로 ECM(Enhanced Compression Model)을 개발하고 있다. 현재 ECM에는 새로운 화면내 예측 부호화 기술의 하나로 TIMD (Template-based Intra Mode Derivation)가 채택되어 있다. TIMD는 현재블록 주변의 복원된 샘플들로 구성된 템플릿(template)과 MPM(Most Probable Mode) 리스트를 사용하여 화면내 예측 모드를 유도하는 기술이다. 본 논문은 TIMD의 예측 모드 결정을 위한 비용함수인 SATD(Sum of Absolute Transformed Difference) 계산에서 현재블록과 가까운 템플릿에 많은 가중치를 적용하여 보다 적절한 예측 모드를 유도하는 방법을 제안한다. 실험결과 ECM-10.0 대비 휘도성분에서 0.03% BD-rate 이득을 확인하였다.

Abstract

JVET is currently exploring potential technologies for a new video coding standardization after completion of the VVC standardization, and is developing Enhanced Compression Model (ECM) as an exploration model software for this purpose. Currently, ECM incorporates a new technology called Template-based Intra Mode Derivation (TIMD) to enhance the intra prediction. TIMD utilizes a template consisting of reconstructed samples of the neighboring blocks and the Most Probable Mode (MPM) list to derive the intra prediction mode for the current block. This paper proposes a method of deriving a more appropriate prediction modes through line-wise weighting, applying greater weights to template lines close to the current block in the cost function of TIMD mode prediction, Sum of Absolute Transformed Difference (SATD). Experimental results show that the proposed method gives a 0.03% BD-rate gain in luminance compared to ECM-10.0.

Keyword : Intra prediction, Enhanced Compression Model, TIMD, Line-wise weight, Most Probable Mode

a) 한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

b) 한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

† Corresponding Author : 김재곤(Jae-Gon Kim)

E-mail: jgkim@kau.ac.kr

Tel: +82-2-300-0414

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3686-4786>

※ This work was supported by IITP grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2017-0-00072, Development of Audio/Video Coding and Light Field Media Fundamental Technologies for Ultra Realistic Tera-media).

· Manuscript January 9, 2024; Revised February 5, 2024; Accepted February 5, 2024.

Copyright © 2024 Korean Institute of Broadcast and Media Engineers. All rights reserved.

“This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and not altered.”

1. 서론

ISO/IEC MPEG(Moving Picture Experts Group)과 ITU-T VCEG(Video Coding Experts Group)의 공동 협력팀인 JVET(Joint Video Experts Team)은 2020년 최신 비디오 부호화 국제표준인 VVC(Versatile Video Coding)^[1] 표준화를 완료하였다. 이후 보다 높은 압축 성능을 가지는 새로운 비디오 부호화 표준의 후보 기술들을 탐색하기 위해 AHG(Ad-Hoc Group)^[2]를 구성하고 기술 탐색실험(EE: Exploration Experiment)^[3]을 진행하고 있으며, 탐색모델 소프트웨어인 ECM(Enhanced Compression Model)을 통해 탐색기술에 대한 성능검증과 채택된 기술을 통합하여 관리하고 있다^[4].

현재 ECM은 크게 VVC 표준 기술을 개선하는 기술, VVC 표준화 과정에서 채택되지 않은 기술, 새롭게 제안되는 기술들을 포함하고 있다. ECM은 화면내 예측 부호화 성능향상을 위한 기술로 현재블록 주변의 복원된 영역인 템플릿(template)을 사용하여 디코더에서 인코더와 동일한 동작을 수행함으로써 시그널링(signaling)을 줄이면서 예측 모드를 유도하거나 예측블록으로 사용하는 기술인 DIMD(Decoder-side Intra Mode Derivation), TIMD(Template-based Intra Mode Derivation), IntraTMP(Intra Template Matching Prediction) 등의 기술을 포함하고 있다^[5].

본 논문은 2장에서 ECM-10.0의 화면내 예측 부호화 모드와 TIMD에 대해 설명한다. TIMD는 예측된 템플릿과 현재 템플릿의 비용이 가장 작은 화면내 예측모드를 현재블록의 화면내 예측모드로 사용한다. 한편, 템플릿이 한쪽 방향만 사용가능 할 때, 적절한 화면내 예측모드를 유도하는데 한계점을 가질 수 있다. 3장에서 보다 적절한 화면내 예측 모드 유도를 위한 템플릿 간의 비용 계산 과정에서 라인별 가중치를 적용하는 방법을 제안하고 4장에서 제안기법에 대한 실험결과 및 성능분석을 제시한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. ECM 화면내 예측 부호화 및 TIMD

1. 화면내 예측 부호화

ECM은 VVC의 화면내 예측 부호화를 확장 개선한 기

술과 새롭게 채택된 기술로 IntraTMP, MIP(Matrix based Intra Prediction), TIMD, SGPM(Spatial Geometric Partitioning Mode), DIMD, MRL(Multiple Reference Line Intra prediction) 등의 부호화 틀을 채택하고 있다. IntraTMP는 새로운 화면내 예측 모드로 주변의 템플릿을 사용하여 정의된 탐색영역 내에서 가장 작은 매칭(matching) 비용을 갖는 참조 템플릿을 찾고 이에 대응하는 참조블록을 현재블록의 예측블록으로 사용하는 기술이다^[6]. DIMD^[7] 또한 현재블록 주변의 템플릿을 사용한다. 템플릿에 소벨(Sobel) 필터를 적용하여 기울기 히스토그램을 생성한다. 히스토그램에서 가장 높은 빈도의 여러 개의 기울기에 해당하는 화면내 예측 모드를 현재블록에 대한 방향성(Angular) 예측 모드로 매핑하고, Planar 모드와 가중 융합하여 현재블록의 최종 예측블록으로 사용한다. VVC의 MRL은 {0, 1, 2}번째 참조샘플 라인을 사용해 화면내 예측을 수행하며, 이는 ECM에서 {0, 1, 3, 5, 7, 12}의 참조샘플 라인을 사용할 수 있도록 확장되었다^[8]. 또한 TMRL(Template-based MRL)^[9]은 {1, 3, 5, 7, 12}의 5가지의 참조샘플 라인과 10가지의 화면내 예측 모드의 조합을 구성한 후, 구성된 후보를 사용하여 0번째 참조샘플 라인으로 정의된 템플릿을 예측하고 템플릿 비용으로 조합 후보를 구성한다. 이후 예측 비용이 가장 낮은 후보 인덱스를 시그널링한다. TMRL은 TIMD가 적용되지 않을 경우의 MRL을 대체한다. SGPM은 VVC GPM의 개념을 화면내 예측 기술로 확장한 것이다^[10]. SGPM은 26개의 분할 각도와 3개의 화면내 예측 모드 후보를 사용하여 현재블록을 부호화한다.

ECM의 화면내 예측 부호화 과정은 앞서 언급한 IntraTMP, DIMD, TIMD, SGPM, MRL 등의 기술이 적용되지 않는 블록에 대해 67가지 비방향성 및 방향성 예측모드를 적용한다. VVC와 동일하게 65개의 방향성 모드와 2개의 비방향성(Planar, DC) 모드, 그리고 20개의 광각 방향성 모드를 포함하여 총 87개의 화면내 예측 모드를 지원한다. 또한, ECM은 VVC의 6가지의 MPM 리스트와 추가적인 16가지의 SMPM(Secondary MPM)^[11]을 포함하여 총 22가지의 MPM 리스트를 구성한다. SMPM이 적용되는 블록은 4개의 그룹으로 나누어 그룹 인덱스를 시그널링하고, 그룹 내의 모드 인덱스를 시그널링 한다.

여 단일 모드 또는 가중 융합 모드를 사용한다.

$$\text{costMode2} < 2 * \text{costMode1} \quad (2)$$

여기서 costMode1 은 SATD 비용이 가장 작은 예측 모드, costMode2 는 두 번째로 작은 예측 모드를 의미한다. 식 (2)의 조건을 만족할 때, TIMD 융합 모드를 그렇지 않은 경우 단일 모드를 현재블록의 화면내 예측 모드로 사용한다. 융합에 사용되는 가중치는 식 (3)을 통해 계산된다. 이때, LUT(Look-Up Table)을 사용하여 나눗셈 연산을 피하고 복잡도를 줄인다. TIMD 모드 사용 여부는 timd_flag 로 시그널링하고 디코더에서 같은 과정을 수행하여 화면내 예측 모드를 유도한다.

$$\begin{aligned} \text{weight1} &= \text{costMode2} / (\text{costMode1} + \text{costMode2}) \\ \text{weight2} &= 1 - \text{weight1} \end{aligned} \quad (3)$$

한편, TIMD는 화면내 예측 모드를 유도하는 기술로 CIIP(Combined Inter-Intra Prediction), SGPM 등 화면내 예측모드 리스트(IPM)가 필요한 다른 부호화 톨에 광범위

하게 적용되고 있다.

III. 제안기법

ECM의 TIMD는 현재블록의 크기에 따라 좌측, 상단의 템플릿 크기가 식 (1)에 따라 결정된다. 그림 2와 같이 SATD 비용 계산은 두 템플릿 간의 차이를 계산하고 현재블록의 크기에 따른 커널을 설정하여 Hadamard 변환을 적용하고 절댓값의 합을 계산하는 과정을 가진다. 한편, 식 (1)에 따라 템플릿의 크기는 최대 4로 결정되며 이로 인해 TIMD의 SATD 계산 시 변환 커널의 크기는 앞서 표 1과 같이 2×2, 4×4, 4×8, 8×4의 크기만을 사용한다. TIMD는 비용 계산 시 상단과 좌측의 템플릿은 현재블록의 참조라인 좌상단(corner) 템플릿은 사용하지 않는다.

TIMD는 디코더에서 같은 동작을 수행하여 화면내 예측 모드를 유도하여 비트량을 절감하는 기술이다. 본 논문의 제안하는 방법은 템플릿 크기와 상관없이 템플릿에 라인별 가중치를 적용하여 예측 성능이 보다 우수한 예측 모드를 유도할 수 있도록 하며, TIMD의 선택 비율을 높여 압축률



그림 2. SATD 계산 과정
 Fig. 2. Process of SATD calculation

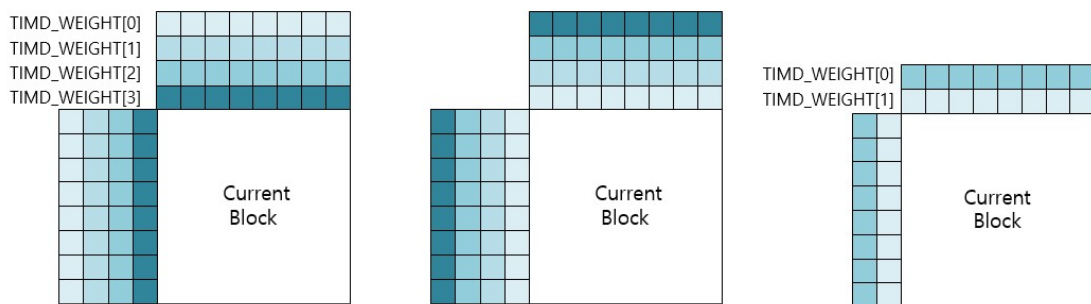


그림 3. 제안하는 방법의 가중치 적용 예시: (a): 현재블록에 가까운 템플릿 라인에 큰 값의 가중치, (b): 참조샘플 라인과 가까운 템플릿 라인에 큰 값의 가중치, (c): 템플릿 크기가 2일 때 적용하는 가중치
 Fig. 3. Example of applying weights in the proposed method: (a) Higher weight on template lines closer to the current block, (b): Higher weight on template lines closer to the reference sample lines, (c): Weight applied when the template size is 2

항상이 가능하다^[13]. 그림 2와 같이 라인별 가중치를 적용하기 위해 SATD 비용 계산 과정 중 샘플값의 차이를 계산하는 첫 번째 단계 이후에 라인별로 구한 차이값에 가중치를 적용한다. 가중치를 적용하여 해당 라인에 패널티 값을 크게 설정하여 SATD 비용이 가장 작은 모드를 유도할 때, 현재블록에 가장 적절한 화면내 예측 모드를 유도할 수 있다. 이때, 그림 3과 같이 TIMD_WEIGHT를 정의하여 사용하고 두 가지 방법으로 가중치를 적용할 수 있다. 즉, 그림 3-(a)와 같이 템플릿 라인이 현재블록과 가까울 때 더 큰 값의 가중치를 설정하거나 반대로 그림 3-(b)와 같이 참조 샘플 라인과 가까운 템플릿 라인에 더 큰 가중치를 적용하여 비용 계산을 할 수 있다. 또한 그림 3-(c)와 같이 작은 현재블록에 대해서는 라인별 가중치를 적용하거나 적용하지 않을 수 있다.

제안방법은 템플릿 샘플의 위치에 따라 가중치를 적용한다. 표 1에 표시된 커널 크기인 4×8, 8×4의 변환 커널은 현재블록의 크기에 따라 템플릿 샘플의 위치를 알 수 있는 반면, 2×2와 4×4의 정사각형 변환 커널 크기는 템플릿의 위치 정보를 유추할 수 없다. 따라서 라인별 가중치를 적용하기 위해 이러한 정사각형의 커널 크기가 설정될 때 템플릿의 위치 정보를 포함하도록 설계한다.

IV. 실험결과

본 논문에서 제시한 라인별 가중치 기반의 TIMD의 성능 검증을 위해 제안기법을 ECM-10.0에 구현하고 All Intra (AI) 모드에서 부호화 성능을 확인하였다. JVET CTC (Common Test Conditions)^[14]의 B, C, D, E 클래스의 시퀀스를 사용하였다. 앞서 3장에서 언급한 것과 같이 라인별 가중치의 적용은 두 가지 경우로 나뉜다. 두 가지 경우에 대한 성능 경향성 파악을 위하여 5가지의 가중치 세트 {[2, 1, 1, 1], [1, 1, 1, 2], [1, 2, 2, 3], [1, 1, 2, 2], [2, 2, 2, 3]}를 구성하고 1 프레임에 대한 성능을 표 2와 같이 확인하였다.

세트 1과 2의 결과를 통해 현재블록에 가까운 템플릿에 많은 가중치를 적용하였을 때 부호화 성능이 개선되는 경향성을 보였다. 이 결과를 바탕으로 추가적인 3가지의 가중

치 세트를 구성하여 성능을 확인하였고, 세트 2의 가중치 실험에서 각 채널에 대해 -0.02%, 0.11%, -0.45%의 부호화 효율을 확인하였다.

표 2. 가중치에 따른 부호화 성능 경향성 확인 실험 (1 프레임)

Table 2. Results of the coding efficiency according to weight variations (1 frame encoding)

Weight Sets		Proposed method Over ECM-10.0		
		Y	U	V
Set 1: [2, 1, 1, 1]	Class B	0.00%	0.59%	-0.83%
	Class C	0.08%	-0.17%	0.25%
	Class E	0.18%	-0.84%	0.22%
	Overall	0.07%	-0.02%	-0.21%
	Class D	0.08%	-0.06%	-1.03%
Set 2: [1, 1, 1, 2]	Class B	0.05%	1.06%	-1.14%
	Class C	-0.09%	-0.19%	0.31%
	Class E	-0.03%	-1.07%	-0.34%
	Overall	-0.02%	0.11%	-0.45%
	Class D	0.00%	-0.05%	-0.09%
Set 3: [1, 2, 2, 3]	Class B	0.00%	1.17%	-0.58%
	Class C	0.00%	0.11%	0.89%
	Class E	-0.12%	-0.64%	0.15%
	Overall	-0.03%	0.36%	0.09%
	Class D	-0.07%	-1.86%	-0.37%
Set 4: [1, 1, 2, 2]	Class B	0.08%	0.82%	-0.23%
	Class C	-0.06%	0.01%	0.64%
	Class E	0.03%	-0.68%	-0.92%
	Overall	0.02%	0.17%	-0.11%
	Class D	-0.06%	-1.05%	-1.01%
Set 5: [2, 2, 2, 3]	Class B	0.00%	1.13%	-0.16%
	Class C	-0.04%	0.28%	0.40%
	Class E	-0.10%	-0.73%	-0.51%
	Overall	-0.04%	0.38%	-0.06%
	Class D	0.13%	-1.29%	-0.85%

표 3. 제안하는 세트 2 가중치의 부호화 실험결과 (1초 시퀀스)

Table 3. Results of the proposed Set 2 weights (1 second sequence)

	Proposed method Over ECM-10.0			
	Y	U	V	EncT
Class B	0.01%	0.21%	-0.27%	103%
Class C	-0.05%	0.13%	0.38%	100%
Class E	-0.04%	-0.28%	-0.41%	101%
Overall	-0.03%	0.06%	-0.09%	101%
Class D	0.03%	-0.33%	0.16%	100%

표 3과 표 4는 가중치 세트 2 {[1, 1, 1, 2]}에 대한 1초 길이의 영상의 실험결과 및 TIMD 선택 비율을 나타낸 것이다. 템플릿 크기가 2인 작은 블록에 대해서 [1, 1]의 가중치로 동일한 가중치가 적용된다. 실험결과 Y, Cb, Cr 채널에서 -0.03%, 0.06% -0.09%의 BD-rate이득과 1%의 부호화 시간(EncT) 증가를 확인하였다. 제안방법의 TIMD 선택 비율은 평균적으로 변화가 없으며 D, E 클래스의 영상에서는 선택 비율이 증가한 것을 확인하였다. 특히 E 클래스에서 약 0.1%의 선택 비율 증가와 -0.04%, -0.28%, -0.41%의 BD-rate 비트율 절감을 확인하였다.

표 4. TIMD 선택 비율 (Anchor: ECM-10.0)
 Table 4. Selection ratio of TIMD (Anchor: ECM-10.0)

	Anchor	Proposed
Class B	18.62%	18.35%
Class C	18.52%	18.46%
Class E	21.54%	21.63%
Average	19.41%	19.41%
Class D	18.96%	19.20%

V. 결론

본 논문에서는 ECM의 TIMD 화면내 예측 모드의 성능 개선을 위하여 예측 모드 탐색을 위한 SATD 기반의 예측 비용 계산에서 템플릿의 참조샘플 라인별 가중치를 적용하는 방법을 제안하였다. 즉, 가중치를 적용하는 두 가지 방법에 대한 부호화 성능의 경향성에 대한 실험결과를 바탕으로 현재블록에 가까운 라인에 큰 가중치를 적용하여 예측 성능이 개선된 화면내 예측 모드를 유도할 수 있음을 확인하였다. 실험결과 제안기법은 ECM-10.0 대비 약 1%의 인코딩 복잡도 증가로 휘도성분에서 0.03%의 BD-rate 부호화 이득이 있음을 확인하였다. 또한, 화면내 예측에서 TIMD의 선택 비율을 높임으로서 추가적인 비트율 절감을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌(References)

- [1] B. Bross et al., "Overview of the Versatile Video Coding (VVC) Standard and its Applications," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 31, no. 10, pp. 3736-3764, Oct. 2021. doi: 10.1109/TCSVT.2021.3101953
- [2] M. Karczewicz, Y. Ye, B. Bross, X. Li, K. Naser, and H. Yang, "JVET AHG report: Enhanced compression beyond VVC capability (AHG12)," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-V0012*, Apr. 2021.
- [3] V. Seregin, J. Chen, S. Esenlik, F. Le Léanec, L. Li, M. Winken, J. Ström, X. Xiu, and K. Zhang, "Exploration Experiment on Enhanced Compression beyond VVC capability," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-U0204*, Jan. 2021.
- [4] ECM-10.0 software, <https://vcgit.hhi.fraunhofer.de/ecm/ECM/-/tree/ECM-10.0>
- [5] M. Coban, R.-L. Liao, K. Naser, J. Ström, and L. Zhang, "Algorithm description of Enhanced compression Model 10," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-AE2025*, Oct. 2023.
- [6] K. Naser, T. Poirier, F. Le Léanec, and G. Martin-Cocher, "EE2: Intra Template Matching," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-V0130*, Apr. 2021.
- [7] M. Abdoli, T. Guionnet, E. Mora, M. Raullet, S. Blasi, A. Seixas Dias, and G. Kulupana, "Non-CE3: Decoder-side Intra Mode Derivation (DIMD) with prediction fusion using Planar," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-O0449*, Jul. 2019.
- [8] K. Cao, Y.-J. Chang, B. Ray, V. Seregin, and M. Karczewicz, "Non-EE2: Extended MRL candidate list," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-X0142*, Oct. 2021.
- [9] L. Xu, Y. Yu, H. Yu, and D. Wang, "EE2-1.10: Template-based multiple reference line intra prediction," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-AB0156*, Oct. 2022.
- [10] F. Wang, Y. Yu, H. Yu, and D. Wang, "EE2-1.4: Spatial GPM," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-AA0118*, Jul. 2022.
- [11] Y.-J. Chang, C.-C. Chen, J. Chen, J. Dong, H. E. Egilmez, N. Hu, H. Huang, M. Karczewicz, J. Li, B. Ray, K. Reize, V. Seregin, N. Shlyakhov, L. Pham Van, H. Wang, Y. Zhang, and Z. Zhang, "Compression efficiency methods beyond VVC," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-U0100*, Jan. 2021.
- [12] K. Cao, N. Hu, V. Seregin, M. Karczewicz, Y. Wang, K. Zhang, and L. Zhang, "EE2-related: Fusion for template-based intra mode derivation," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-W0123*, Jul. 2021.
- [13] S. Jeon, G. Moon, S. Lim, and J.-G. Kim, "A Method of Template-based Intra Mode Derivation (TIMD) Enhancement with Line-Wise Weighting in ECM," *In Proc. KIBME Autumn Annual Conf.*, Nov. 2023.
- [14] M. Karczewicz, and Y. Ye, "Common Test Conditions and evaluation procedures for enhanced compression tool testing," *Joint Video Experts Team of ITU-T and ISO/IEC, JVET-AE2017*, Jul. 2023.

저 자 소 개



전 상 훈

- 2023년 2월 : 한국항공대학교 정보통신학과 학사
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정
- ORCID : <https://orcid.org/0009-0009-7679-5026>
- 주관심분야 : 비디오 신호처리, 비디오 부호화



문 기 화

- 2021년 2월 : 한국항공대학교 소프트웨어학과 학사
- 2023년 2월 : 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사
- 2023년 : 한국항공대학교 항공전자연구소 연구원
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-6727-7790>
- 주관심분야 : 비디오 코딩, 영상 압축, 영상 처리



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



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 항공전자정보공학부 교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3686-4786>
- 주관심분야 : 비디오 신호처리, 비디오 부호화, 이머시브 비디오