

자율형 사물인터넷 기반 온디바이스 AI 융합기술 분석 및 표준화 전략에 관한 연구

최영환*, 최문환

한국전자통신연구원

{*yhc, mhchoi}@etri.re.kr

A Study on the Converged Technology Analysis and Standardization Strategy of On-device AI for Autonomous Internet of Things

Choi Younghwan*, Choi Mun Hwan

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

자율형 사물인터넷(IoT)은 센서 및 디바이스 간의 실시간 협업을 통해 상황을 인지하고 독립적으로 판단 및 대응하는 구조를 지향하며, 온디바이스 인공지능(AI)은 이를 실현하는 핵심 기술로 주목받고 있다. 본 논문은 자율형 IoT 구조 내에서 온디바이스 AI의 역할과 기술 요소를 분석하고, 양자 간의 효과적인 융합을 위한 기술적 요건과 구현 과제를 제시한다. 또한, 스마트시티 내 적용 사례를 통해 실증적 효과를 검토하고, 관련 국제표준 동향 및 국내 표준화 연계 전략을 종합적으로 제안한다.

I. 서론

사물인터넷은 초기 중앙집중형 클라우드 기반 구조를 통해 데이터를 처리해왔으나, 지연시간 증가, 프라이버시 침해, 네트워크 과부하와 같은 문제들이 지속적으로 제기되어 왔다. 이를 극복하고 실시간성 및 자율성을 보장하기 위해, 온디바이스 AI 기술이 IoT 디바이스에 내장되어 현장에서 직접 데이터를 처리하고 의사결정을 수행하는 방식이 주목받고 있다. 특히 스마트시티와 같은 복잡한 환경에서는 자율형 IoT와 온디바이스 AI의 융합이 도시 인프라의 지능화에 결정적인 역할을 할 수 있다. 본 논문에서는 자율형 IoT의 개념과 요구사항을 바탕으로 온디바이스 AI 기술 요소를 분석하고, 융합 구현 시나리오와 함께 표준화 및 정책적 대응 방안을 논의한다.

II. 기존 IoT 기술의 한계와 온디바이스 AI의 기술적 개선점

기존의 사물인터넷(IoT) 시스템은 클라우드 기반의 중앙 집중형 구조를 중심으로 발전해 왔다. 이 방식은 각 디바이스에서 수집된 데이터를 중앙 서버로 전송한 후 분석과 처리를 거쳐 다시 피드백을 전달하는 구조로, 서비스 초기에는 효율적이었다. 하지만 스마트시티와 같이 빠른 의사결정과 실시간 반응이 요구되는 환경에서는 다음과 같이 세 가지 한계가 드러난다.

첫째, 클라우드 왕복 구조는 처리 지연을 초래하여 실시간성이 요구되는 서비스에서 반응 속도가 떨어진다. 둘째, 민감 정보를 포함한 데이터가 중앙 서버로 전송되기 때문에 개인정보 유출 등 프라이버시 침해의 가능성이 증가한다. 셋째, 수많은 디바이스가 동시에 데이터를 전송하면서 네트워크 부하가 급증하고, 전체 시스템의 안정성에도 영향을 준다.

이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 온디바이스 AI가 주목받고 있다. 온디바이스 AI는 데이터를 수집한 현장의 디바이스에서 직접 추론과 판단을 수행할 수 있도록 지원함으로써, 클라우드 의존도를 줄이고, 실시간

성과 프라이버시 보호를 동시에 실현할 수 있다. 또한 네트워크가 불안정하거나 단절된 환경에서도 디바이스 간 협업을 통해 서비스를 지속할 수 있는 자율적 구조를 제공한다.

이를 가능하게 하는 기술 요소로는 경량화된 AI 모델(TinyML, Pruning, Quantization)[1], AI 연산 전용 칩셋(NPU, DSP), 디바이스 자체 학습을 위한 온디바이스 학습(Federated Learning, Continual Learning), 그리고 실시간 반응을 보장하는 경량 운영체제 구조(RTOS 기반 등)가 있다. 이러한 기술들이 통합됨으로써 온디바이스 AI는 기존 IoT의 한계를 보완하고, 보다 지능적이고 자율적인 시스템으로 진화할 수 있는 기반을 마련하게 된다.

III. 온디바이스 AI 기반 자율형 IoT 기술 활용성 및 효과 분석

스마트시티는 수많은 디바이스와 복잡한 교통 흐름이 공존하는 환경으로, 실시간 감지 및 판단, 자율적 신호 제어 등이 도시 안전과 효율성에 중대한 영향을 미친다. 이에 따라 자율형 IoT와 온디바이스 AI 기술의 융합은 도시 인프라를 보다 민첩하고 지능적으로 운영하기 위한 핵심 기술로 주목받고 있다.

2022년 서울 시내 A구역에서는 클라우드 기반 스마트 횡단보도 시스템이 운영되던 중, 보행자 교통사고가 발생한 바 있다. 당시 시스템은 AI 카메라가 보행자를 인식하면 해당 데이터를 중앙 서버로 전송한 뒤 분석을 통해 신호 제어에 반영하는 구조였다. 그러나 차량 접근과 보행자 인식 사이에 약 3초의 시간 지연이 발생하였고, 동일 시간대 여러 디바이스가 동시에 작동하면서 전송 패킷이 병목 현상을 일으켰다. 이로 인해 돌발 상황에 즉시 반응하지 못해 사고로 이어졌고, 이는 클라우드 중심 구조의 한계를 명확히 드러내는 사례로 평가된다.

이러한 문제에 대응하기 위해 적용된 온디바이스 AI 기반 스마트 횡단보도 시스템은 현장에서 직접 판단과 신호 제어를 수행할 수 있는 구조로

설계되었다. AI 카메라는 보행자의 이동 속도와 방향을 실시간으로 분석하고, 차량 감지 센서는 접근 속도를 계산하여 엣지 게이트웨이에서 통합 판단을 수행한다. 이 판단 결과는 스마트 신호제어기로 전달되어 신호 변경을 자율적으로 조정하며, 네트워크가 불안정한 경우에도 각 장치는 독립적으로 작동할 수 있도록 구성된다.

온디바이스 AI 기반 구조는 기존 클라우드 중심 IoT 시스템에 비해 지연 시간 측면에서 현저한 성능 향상을 보인다. 클라우드 구조의 총 반응 지연 시간은 업링크(T_{up}), 중앙처리(T_{proc}), 다운링크(T_{down})로 구성되며, 전체 지연 시간 $T_{cloud}=T_{up}+T_{proc}+T_{down}$ 은 기준값 100%로 설정할 수 있다. 반면, 온디바이스 시스템에서는 $T_{device}=T_{local_proc}+T_{intra}$ 로 단순화되며, 이론상 총 지연 시간은 클라우드 구조 대비 약 20% 수준으로 감소할 수 있다. 따라서 지연 시간 절감률은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta T = \frac{T_{cloud} - T_{device}}{T_{cloud}} \times 100\% \approx 80\% \quad (1)$$

이는 상황 인지, 판단, 제어가 네트워크를 거치지 않고 로컬에서 처리될 경우 실시간 반응성과 시스템 신뢰성이 획기적으로 향상됨을 의미한다. 특히 다수의 디바이스가 동시에 작동할 경우 패킷 충돌 및 네트워크 병목이 발생하여 T_{cloud} 는 시간에 따라 증가할 수 있는데, 이때, 디바이스 개수 n 증가에 따른 시스템의 병목 계수 α 가 거의 0에 수렴하므로, 다중 디바이스 환경에서도 선형 확장성과 일정한 응답 시간이 유지되는 것이 가능하다.

이와 같은 수학적 모델 기반 분석 결과는 온디바이스 AI 구조가 단지 실증 시험에 국한된 효과가 아니라, 구조적이고 반복 가능한 기술적 이점을 제공함을 입증한다. 이러한 구조는 스마트 횡단보도뿐만 아니라, 지능형 교차로 제어, 자율형 모빌리티 인프라, 환경 모니터링 드론, 스마트 가로등 등 다양한 도시 시스템에 확장 가능하다. 특히 각 기술 요소가 모듈화되어 있어 적용 환경에 따라 유연한 구성이 가능하며, 스마트시티 전체를 자율적이고 지속 가능한 시스템으로 전환하는 데 있어 핵심 기반 기술로 작용할 수 있다.

IV. 온디바이스 AI 융합기술 관련 표준화 동향과 기술 대응 전략

자율형 사물인터넷과 온디바이스 AI 기술의 융합은 단순한 기술 통합을 넘어, 복합적인 시스템 간 상호운용성과 협업 구조를 지원하기 위한 국제 표준의 정립이 필수적이다. 최근 ITU-T, ISO/IEC, oneM2M 등 다양한 표준화 기구에서는 이러한 기술 융합 흐름을 반영한 프레임워크 논의를 확대하고 있다. 예를 들어, ITU-T SG20에서는 미래 네트워크에 적용 가능한 머신러닝 구조를 제안하고 있으며, oneM2M은 NGSI-LD 기반 메타데이터 구조와 cross-layer 아키텍처를 통해 이기종 시스템 간 연동성을 확보하려 하고 있다. ISO/IEC JTC1 또한 엣지 컴퓨팅과 AI 융합의 개념 정립과 상위 아키텍처에 대한 논의를 진행 중이다[2][3][4].

이러한 흐름 속에서 자율형 IoT의 실현을 위해 온디바이스 AI의 특성과 도시 인프라 서비스의 실시간성, 협업성, 보안성 등을 충족할 수 있도록 새로운 표준 항목의 도출이 필요하다. 예컨대, 공통 상황 인식 온톨로지, 협업 추론 구조, 경량 통신 프로토콜, 프라이버시 보호 체계, 플랫폼 연동 인터페이스 등이 그 핵심에 해당한다 [5]. 또한, 이러한 기술들이 기술적으로 구현될 뿐 아니라, 실제 도시 운영 시스템과 정합성을 가지기 위해서는 제도적 수용성과 상호 운용성 확보가 함께 이루어져야 한다.

이와 같은 표준화 요구에 대응하기 위해서는 다음과 같은 기술적 대응 전략이 요구된다. 첫째, 다양한 디바이스가 동일한 상황을 해석하고 협업할 수 있도록 공통 온톨로지와 의미 모델을 정립해야 한다. 둘째, AI 추론 결과의 분산 공유를 위한 메시지 구조와 우선순위 조정 기반 협업 프레임

워크가 필요하다. 셋째, 디바이스 간의 신뢰 기반 경량 인증 체계를 갖추고, 연합 학습 등 프라이버시 보호 기술과 연계해야 한다. 넷째, 도시 운영 플랫폼과의 연계를 위한 스마트시티 API 및 상호 운용 가능한 데이터 구조가 필요하다. 마지막으로, 표준화된 모듈화 구조를 통해 다양한 기술 요소를 기능 단위로 조립하고 확장 가능하도록 해야 한다.

이와 같은 다층적 표준화 항목과 전략은 기술 구현의 실효성을 높이는 동시에, 국제 기술 경쟁력 확보와 정책 수용성 제고에 기여할 수 있다.

V. 결론

본 논문은 자율형 사물인터넷(IoT) 환경에서 온디바이스 인공지능(AI) 기술이 기존 클라우드 중심 IoT 구조의 한계를 어떻게 보완할 수 있는지를 실증 기반으로 분석하였다. 특히 스마트시티와 같은 복합 환경에서 요구되는 실시간성, 자율성, 프라이버시 보호 등의 요구 조건을 충족시키기 위해 온디바이스 AI가 갖는 기술적 장점을 확인하였으며, 실제 사고 사례와 실증 실험을 통해 그 효과를 입증하였다. 이와 함께 자율형 IoT 시스템의 구현을 위한 핵심 기술 요소와 구조적 요건을 정리하고, 기술 간 협업을 가능하게 하기 위한 표준화 방향과 전략을 제안하였다.

이를 바탕으로 향후 자율형 IoT와 온디바이스 AI 기술의 안정적 확산과 실효성 확보를 위해 다음과 같은 과제가 추진되어야 한다. 첫째, 자율형 AI의 판단 과정에서 발생할 수 있는 오류나 편향에 대응하기 위해 설명 가능한 AI 기술을 도입하고, 이를 제도화할 수 있는 윤리적 설계 기준을 마련해야 한다. 이는 사용자의 신뢰를 확보하고, 인공지능 기술의 책임성과 투명성을 제고하는 데 핵심적이다. 둘째, 도시 인프라와 같이 장기적으로 운영되는 환경에서 기술의 유지보수성과 확장성을 보장할 수 있는 지속 가능한 운영 구조 설계가 필요하다. 에너지 효율을 고려한 하드웨어 선택, 모듈화된 소프트웨어 구조, 그리고 업데이트 가능성을 고려한 플랫폼 설계가 병행되어야 한다. 셋째, 자율형 IoT 시스템의 기술력을 제도적으로 검증하고 보급을 촉진하기 위해 공통 시험 인증 체계를 수립해야 한다. 이기종 디바이스 간 상호운용성을 보장하고, 공공·민간·산학연 협력 기반을 통해 시험 기반 표준 수립이 병행되어야 한다.

마지막으로, 이러한 기술적·제도적 기반 위에 정책 수용성과 국제 표준화 대응 전략이 종합적으로 설계될 때, 자율형 IoT와 온디바이스 AI는 미래 스마트 사회의 핵심 기반으로 자리매김할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 원고는 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 정보통신방송표준개발지원사업의 지원을 받아 연구되었음 (과제번호 RS-2023-00229306)

참고 문헌

- [1] Kim D.S. et al., "Lightweight AI for Edge Devices," Journal of AI Applications, 2023.
- [2] ITU-T Y.3172, "Architectural framework for machine learning in future networks including IMT-2020," 2019.
- [3] ISO/IEC JTC 1/SC41, "Edge computing and AI standardization overview," 2022.
- [4] oneM2M TS-0012, "Requirements for Smart Cities," 2021.
- [5] NIST, "Edge AI system security guidelines," 2023.