Fire Science and Engineering, Vol. 40, No. 4, pp. 129-143, 2026
DOI: https://doi.org/10.7731/KIFSE.8ef6fee3

ISSN : 2765-088X (Online)
ISSN : 2765-060X (Print)

[Research Paper]

# 디지털 멀티채널 필터링을 이용한 무선통신 중계기 오절체 개선방안에 관한 실험 및 해석적 연구

정성우† · 박인선*

중앙대학교 ICT 안전학과 대학원생, *중앙대학교 ICT 안전학과 교수

# An Experimental and Analytical Study on the Improvement of False Path-switching in Auxiliary Radio Communication System Repeaters Using Digital Multichannel Filtering

Sung-Woo Jung† · In-Seon Park*

Graduate Student, Dept. of ICT Safety, Chung-Ang University,
*Professor, Dept. of ICT Safety, Chung-Ang University

(Received July 8, 2026; Revised July 27, 2026; Accepted August 12, 2026)

## 요 약

무선통신보조설비는 화재안전성능기준·화재안전기술기준(NFPC/NFTC 505)상 디지털 무전기 사용에 지장이 없어야 하나 증폭기·중계기에 요구되는 적합성평가는 전자파 적합성만 규율할 뿐 절체 로직의 주파수 선택성은 시험하지 않는다. 이 공백을 실증하기 위해 오절체를 주파수 무차별 임계모델로 정식화하고, 적합성평가 완료 상용 아날로그 절체형 중계기에 무변조 연속파(continuous wave, CW)와 2형 생활무전기의 digital mobile radio (DMR) 실변조 신호를 전도 주입하여 오절체 임계를 실측하였다. 소방 채널에서 6채널(75 kHz) 이격된 DMR 신호는 검출 임계인 최소 검출 레벨(MDL)보다 1 dB 높은 −79 dBm에서, 1 MHz 이격 CW는 −65 dBm에서 수신경로를 오점유하였고, MDL을 5 dB 낮추면 임계도 1:1로 동반 하락하였다. 이러한 결과는 적합성평가 통과가 곧 화재현장 무전 신뢰성을 의미하지 않음을 보여준다. 개선 방안으로는 채널외 신호를 저지대역 감쇠(60 dB 이상)로 억제하는 디지털 멀티채널 필터링 중계기 구조를 제시하고 그 효과를 해석적으로 검토하였다. 아울러 채널외 신호 오절체 내성 시험 등 적합성평가와 분리된 소방 성능시험의 형식 승인·점검 체계 도입을 제안한다.

## ABSTRACT

Korean fire-safety standards such as the National Fire Performance Code (NFPC) 505 and the National Fire Technical Code (NFTC) 505 require that auxiliary radio communication systems do not impede digital radios. However, most repeaters and line amplifiers are analog path-switching devices driven by carrier detection, which respond to input power rather than signal identity. This study quantifies false path-switching vulnerabilities and proposes structural and institutional remedies. The mechanism was formulated as a frequency-blind threshold model, and a bench test was performed on a KC (Korea Certification) conformity-assessed commercial repeater by injecting unmodulated continuous-wave (CW) and real-modulated Digital Mobile Radio (DMR) signals from a commercial Type-2 license-free radio into the receiver (RX) port with a power sweep. A DMR signal only six channels (75 kHz) away from the fire channel falsely captured the RX path at −79 dBm, 1 dB above the minimum detectable level (MDL). A 1 MHz-offset CW did likewise at −65 dBm; lowering the MDL by 5 dB shifted both thresholds by exactly 5 dB, confirming the threshold-selectivity decomposition. A digital multichannel filtering repeater combining spectrum detection and synchronization, polyphase filter-bank finite impulse response (FIR) filtering, and least-mean-squares (LMS) adaptive notch filtering was proposed. Analytical calculations without hardware implementation predicted that channel-selective filtering would raise the equivalent false-switching threshold by the stopband attenuation (60 dB or more) and nonlinearly improve DMR synchronization retention. As conformity assessment does not test switching selectivity, supplementary fire-performance test items, including an off-channel false-switching immunity test, should be introduced into the type-approval and inspection framework; prototype validation can be conducted in the future.

**Keywords :** Auxiliary radio communication system, Digital multichannel filtering, Repeater path-switching, False path-switching, Conformity assessment

† Corresponding Author, TEL: +82-31-548-2603, E-Mail: fiogrant@cau.ac.kr
ⓒ 2026 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

무선통신보조설비는 화재 및 구조 현장에서 건물 내부의 소방대원과 외부 지휘대간의 무선교신을 보장하기 위한 소화활동설비로서, 「소방시설 설치 및 관리에 관한 법률 시행령」은 지하가, 지하층, 터널, 공동구, 30층 이상 건축물 등 전파 음영이 구조적으로 발생하기 쉬운 특정소방대상물에 그 설치를 요구한다[1]. 건물 내부 구조로 인한 통신 두절과 그 해결 수단으로서의 건물 내 무선 통신 시스템의 필요성은 미국 국가통신정보관리청(national telecommunications and information administration, NTIA) 기술보고서를 통해서도 보고된 바 있다[2]. 한편 국내 소방용 무전기는 디지털 방식으로 전환되었고 현행 화재안전기준은 디지털 방식 무전기의 사용에 지장이 없도록 설비를 구성할 것을 요구한다[3,4]. 그러나 현장에 설치 운용되는 소방 중계기와 라인앰프의 상당수는 반송파 검출(carrier detection)에 기반한 아날로그 송신(transmit, TX)/수신(receive, RX) 경로 절체형 장비이다. 반송파 검출은 입력신호의 전력만을 감지하여 동작할 뿐 신호의 종류는 식별하지 못하므로, 소방 채널이 아닌 다른 신호라도 소방 주파수 대역 내로 유입되거나 인접대역 임계전력을 초과하여 유입되면 송신 또는 수신 경로를 점유하게 된다.

## 1.2 문제 제기

국내 소방 무선 운용 주파수는 지역에 따라 다르지만 449 MHz 주파수 대역이 가장 많이 사용되며 그 인접 대역에는 448 MHz 대역의 관리용 무선과 무선감지기 등 안전관리용 소방 기기가 운용된다. 또한 약 900 MHz 대역 등 인접 타 대역 신호의 유입 가능성도 보고되고 있다[5]. 이러한 채널외・불요파 신호가 아날로그 소방 중계기의 반송파 검출기를 작동시키면, 해당 경로가 점유되어 있는 동안 실제 소방대원의 무전신호는 중계되지 못하는 오절체(false path-switching)가 발생한다. 본 연구의 벤치 실측에서는 Korea certification (KC) 적합성평가를 통과한 중계기에서 소방채널로부터 75 kHz 이격된 생활무전기 DMR 신호가 −79 dBm에서(1 MHz 이격 CW는 −65 dBm) 수신경로가 점유됨을 확인하였다. 이 결과는 현행 적합성평가[6]가 절체 로직의 주파수 선택성을 시험하지 않으며, 디지털 방식 무전기의 사용에 지장이 없도록 한다는 화재안전기준의 정성적 요구를 검증할 정량적 시험 또한 부재함을 보여준다. 화재 현장에서 이러한 오절체가 발생하면 그 점유가 지속되는 동안 소방대원과 지휘대 간 교신이 중단되며, 이는 화재 현장의 지휘체계에 직접적인 영향을 미친다[5,7,8]. 따라서 오절체의 발생 메커니즘에 대한 정량적 규명과 함께, 이를 억제할 수 있는 장비 구조와 그 성능을 확인할 시험기준의 마련이 요구된다.

## 1.3 연구 목적 및 기여

본 연구의 목적은 무선통신보조설비 중계기의 오절체 문제를 실증적으로 제기하고, 실측 가능한 정량지표(오절체 임계)를 확립하는데 있다. 4장의 디지털 멀티채널 필터링 구조는 이 지표가 요구하는 성능이 기술적으로 달성 가능함을 보이기 위한 설계 예이며, 6장에서는 실측에서 확인된 검증 공백을 보완할 시험기준을 제안하였다. 본 연구의 기여는 다음과 같다. 첫째, 아날로그 절체형 중계설비의 오절체 메커니즘을 주파수 무차별(frequency-blind) 임계 모델로 정식화하고, 상용 장비에 대한 벤치 실측으로 오절체 임계(75 kHz～1 MHz 이격에서 −79～−65 dBm, 실변조 DMR 포함)를 정량화하였다. 둘째, 그 구조적 해법으로 스펙트럼 탐지 및 동기화, 다상 필터뱅크 기반 고차 FIR 필터링, 적응형 노치필터로 구성되는 디지털 멀티채널 중계기를 제안하였다. 셋째, 채널 선택 필터링이 등가 오절체 임계를 저지대역 감쇠량만큼 상승시키고 SYNC 유지율을 비선형적으로 개선함을 해석적으로 분석하였다. 넷째, 전자파 적합성평가와 분리된 소방 성능 시험항목(채널외 신호 오절체 내성시험 등)을 국내 형식승인 및 점검 체계에 도입하는 방안을 제안하였다. 또한, 본 연구는 오절체 임계라는 실측 가능한 정량 지표를 확립하였고(3장), 저지대역 감쇠가 등가 오절체 임계의 상승으로 환산되는 등가관계를 정립하였으며(식(7)), 이를 구현방식에 중립적인 시험기준으로 정식화하였다(6장). 다만, 제안 구조의 실장 구현과 실측 검증은 향후 연구에서 수행하고자 한다.

## 1.4 논문의 구성

2장에서는 관련 연구와 국내 외 기준을 검토하였고, 3장에서는 오절체 메커니즘의 모델화와 벤치 실측 결과를 제시하였다. 4장에서는 제안 중계기의 구조를 기술하였고, 5장에서는 해석적 성능 분석과 기존 방식과의 비교를 수행하였다. 6장에서는 인증・제도 측면의 고찰과 함께 도입이 필요한 시험항목을 권고하였으며, 7장에서 연구 결과와 한계에 대한 결론을 정리하였다.

# 2. 관련 연구 및 기준 검토

## 2.1 무선통신보조설비와 건물 내 전파 및 주파수 환경

NFPC 505상 무선통신보조설비는 누설동축케이블, 동축케이블과 안테나, 옥외안테나, 분배기, 증폭기, 소방중계기 등으로 구성되며 설치층의 모든 부분에서 유효한 통신이 가능하여야 한다[3]. NTIA 보고서는 도너안테나-분배망-양방향증폭기(bidirectional amplifier, BDA)로 구성되는 인빌딩 시스템에서 BDA가 상호변조, 궤환, 잡음, 지연을 유발할 수 있고, 외부 강신호의 유입이 증폭기의 이득 감소를 초래할 수 있음을 지적한다[2]. 주파수 환경의 측면에서 국내 소방 무선은 449 MHz 대역을 사용하며 448 MHz의 관리무선 주파수 및 무선식 감지기 등 다양한 무선 기기가 공존하고 약 900 MHz 대역의 이동통신 등 타대역 강신호간의 상호변조산물이나 수신기 스퓨리어스 응답성분이 소방주파수 대역내로 유입될 수 있다[5]. 요컨대, 소방 무선 중계기의 수신단은 소방 채널 신호만이 아니라

대역내 채널외 신호와 유입 불요파가 상시 혼재하는 환경이다. 국내 선행연구 역시 설치방식과 구성부품에 따른 전송 능력 편차, 아날로그와 디지털 호환성 문제, 설계・감리・점검의 정량화 미흡을 보고해 왔다[7,8].

### 2.2 아날로그 TX/RX 절체형 중계기의 동작 원리와 구조적 취약점

현장의 소방 중계기 시스템은 통상 1대의 주 중계기에 다수의 라인앰프가 연결되어 지하 및 지상 음영지역의 통신망을 구성한다[5]. 단일 선로를 송수신이 공유하는 이러한 장비는 반송파 검출 기반의 TX/RX 경로 절체로 동작한다. 즉, 수신포트의 입력 전력이 설정 임계를 초과하면 해당 방향의 경로를 활성화하고 반대 방향을 차단하는 방식이다. 이 구조는 회로가 단순하고 비용이 낮은 장점이 있으나 검출기가 전력 임계만으로 동작하여 신호의 주파수와 변조 정체를 식별하지 못하는 본질적인 한계가 있다. 전치 필터의 통과대역이 소방 대역보다 넓게 설계되는 현실에서 대역내 채널외 신호가 임계를 초과하면 경로가 점유되고, 점유가 지속되는 동안 실제 필요한 소방 송수신 신호는 차단된다. 본 연구는 이러한 오절체를 3장에서 모델화하고 벤치 실측으로 정량화하였다.

### 2.3 DMR/TDMA 구조와 디지털 무전 품질 지표

국내 소방 디지털 무전이 따르는 DMR은 유럽전기통신표준협회(European telecommunications standards institute, ETSI) TS 102 361-1에 규정된 바와 같이 12.5 kHz RF 반송파 대역폭에서 2-슬롯 시분할 다중접속(time division multiple access, TDMA)를 사용하며, 프레임 60 ms, 타임슬롯 30 ms, 음성 슈퍼프레임 360 ms로 구성된다. 일반 burst는 264 bit가 27.5 ms를 차지하고 중앙에 48-bit 동기(SYNC) 필드를 가지며, 수신기는 상관기로 이를 검출하여 동기를 유지한다[9]. 따라서 중계경로에서의 간섭, 차단 및 지연 변동은 SYNC 유지율의 저하로 나타나며, 본 연구는 장치의 동작 방식과 무관하게 적용할 수 있는 수신 품질 지표인 SYNC 유지율을 디지털 무전 적합성의 정량 평가 지표로 사용한다[9].

### 2.4 국내외 기준 비교와 규범 공백

한국 기준은 설치대상과 50 Ω 계통, 비상전원, 적합성평가, 디지털 무전기 사용 적합성 등 설치 및 구성 중심의 규율이다[1,3,4]. 소방 무선 중계기 및 증폭기에 요구되는 적합성평가[6]는 전자파 적합성(방사와 내성)을 규율하는 제도로서 절체 로직의 주파수 선택성이나 채널 식별 성능을 시험 대상으로 하지 않는다. 미국방화협회(national fire protection association, NFPA) 1225는 건물 내 비상대응요원 통신보강시스템(emergency responder communications enhancement system, ERCES)을 별도 장으로 규정하고 시스템 구성품의 underwriters laboratories (UL) 2524 인증을 요구하며[10,11] 미국 관할기관의 공개 기술기준은 near-far 효과 최소화, 필터별 자동이득제어, 발진 감시를 설계요건으로 명시한다[12]. 미국 연방통신위원회(federal communications commission, FCC)는 47 CFR §90.219에서 통과대역 75 kHz 이하의 채널형 Class A와 광대역 Class B를 구분하고 잡음지수 9 dB 이하, 스퓨리어스 −13 dBm/100 kHz 이하, 비간섭 운용책임 등을 정량 규정한다[13]. Table 1은 한국(NFPC/NFTC 및 적합성평가), 미국 NFPA/UL, FCC 3가지 기준 체계의 대상을 요약한 것이다. 어느 체계에도 본 연구가 제기하는 채널외 신호에 의한 오동작을 직접 시험하는 항목은 검토 범위 내에서 확인되지 않았다.

### 2.5 오절체・간섭 문제에 대한 선행 개선 접근

무선 중계 계통의 간섭 문제에 대한 기존의 개선 접근은 크게 네 가지이다. 첫째, 수동 필터의 강화이다. 전치 대역통과 필터의 스커트를 급경사화하거나 간섭 주파수에 노치를 형성하는 공동(cavity)필터를 부가하는 접근으로, 현장에서 개별 간섭원에 대한 사후 대책으로 적용된다. 그러나 이 접근은 고정 주파수의 간섭에만 유효하고, 소방 채널에 근접한 이격(본 실측의 75～262.5 kHz)에서는 통과대역 왜곡없이 충분한 감쇠를 얻기 어려우며, 반송파 검출기가 전력 임계로 동작한다는 절체 구조 자체는 변하지 않는다. 둘째, 채널화(channelized)부스터이다. 미국 FCC는 47 CFR §90.219에서 통과대역 75 kHz 이하의 채널형 Class A 부스터를 별도 등급으로 규정하고 있으며[13], 이에 따라 해외 공공안전(ERCES)시장에서는 DSP기반으로 채널단위필터링・채널별이득제어・채널별스켈치를 제공하는 채널선택형 디지털 BDA가 상용화되어 있다[14]. 이 사례는 채널선택필터링 구조의 기술적 실현가능성이 상용 수준에서 입증되어 있음을 보여준다. 다만 이러한 장비는 북미의 기준・인증체계(NFPA/UL/FCC)를 전제로 설계・인증되며, 국내 무선통신보조설비의 기준체계에는 이러한 채널 선택성 요구나 이를 검증할 시험항목 자체가 존재하지 않는다(2.4절, Table 1). 셋째, 발진・궤환 억제이다. 도너-서비스 안테나 간 격리 부족으로 발생하는 궤환발진은 이동통신 중계기 분야에서 적응필터기반의 간섭제거시스템(interference cancellation system, ICS)으로 다루어져 왔으며, 최소평균제곱(least mean squares, LMS)계열의 적응 알고리즘으로 궤환 성분을 추정・상쇄하는 기법이 확립되어 있다[15]. NTIA보고서 역시 인빌딩 증폭 계통의 발진・상호변조 위험과 그 감시 필요성을 지적한 바 있다[2]. 국내에서도 소방대역을 포함하는 상용 무선통신보조설비 중계시스템에 ICS 발진방지 기능이 탑재되어 있다[16]. 그러나 ICS는 자기 송신신호의 궤환을 제거하는 기술로서, 외부의 채널외 신호가 반송파 검출기를 작동시키는 오절체와는 대상이 다르다. 넷째, 디지털 신호처리 요소기술이다. 다상 필터뱅크에 의한 다중채널 동시 수신[17,18]과 적응 노치 필터링[15]은 통신 분야의 공지 기술로서 본 연구 제안 구조의 구성요소이기도 하다. 이상을 종합하면, 선행 접근들은 각각 개별 간섭원 감쇠(수동필터), 규제 준수형채널화(해외 Class A), 자기 궤환 제거(ICS)를 다루어 왔다. 그러나 채널외 신호에 의한 오절체를 정량 임계로 실측하고 시험기준으로 구체화한 연구는 보고되지 않았다. 국내 학술 선행연구[7,8] 역시 오절체 임계를 정

**Table 1.** Comparison of Korean, NFPA/UL, and FCC Regulatory Frameworks for In-Building Radio Communication Systems (Normative Comparison)

| Comparison Item | Korea NFPC/NFTC 505 + Conformity Assessment | NFPA 1225 / UL 2524 | FCC 47 CFR §90.219 |
|---|---|---|---|
| Regulatory Scope | Installation Target / Configuration Criteria + Electromagnetic Compatibility | Communication Quality, System Stability, Product Reliability | Booster Classification, Operational Responsibility, Non-Interference |
| Coverage Expression | Effective Communication in All Areas of Installed Floors | Performance-Based Design and Approval Testing | Operational Constraints Rather Than Coverage |
| Product/Device Regulation | Conformity Assessment (EMC), Suitability of Digital Radio Use (Qualitative) | UL 2524 Certification, Near-Far Minimization, Oscillation Monitoring | Class A/B Classification, Noise Figure ≤ 9 dB, Registration and Consent |
| Switching/Interference Selectivity | No Test Items | No Direct Test Items Confirmed | Indirect Regulation Via Minimum Passband and Spurious Emission Limits |
| Institutional Implications | EMC Compliance ≠ Radio Reliability (Empirically Verified in This Study) | Strong Integration of Performance Criteria and Product Certification | Clear Legal Responsibility for Channelization and Broadbanding |

량화하지는 않았다. 본 연구는 오절체 임계의 최초 실측 정량화(3장)와 저지대역 감쇠-등가 임계상승의 등가관계 정립(5장), 그리고 이를 국내 형식승인・점검 체계의 시험항목으로 구체화하는 제도설계(6장)를 수행한다.

## 3. 오절체 메커니즘의 모델화 및 벤치 실측

### 3.1 오절체의 정의와 메커니즘의 모델화

본 논문에서 오절체(false path-switching)란 반송파 검출 기반 절체형 중계설비에서 소방 채널 신호가 아닌 신호에 의해 송신 또는 수신 경로가 점유되어(이하 비소방 신호에 의한 점유를 오점유라 한다), 그 점유가 지속되는 동안 정상적인 소방 무전 신호의 중계가 차단되는 현상으로 정의한다. 반송파 검출 기반 절체형 장비의 경로 활성화 조건은 수신 포트 입력전력 $P_{in}$과 절체 임계 $P_{th}$의 비교로 단순화된다. 전치 필터의 통과대역 내에서 검출기는 주파수에 대해 사실상 무차별이므로, 소방 채널 중심 주파수로부터 Δf만큼 떨어진 간섭 신호의 전력을 $P_I(\Delta f)$, 그 지점에서의 장비 선택도(감쇠)를 $A(\Delta f)$라 하면 오절체 발생 조건은 다음과 같다.

$$P_I(\Delta f) - A(\Delta f) \geq P_{th}, \quad P_{th} = MDL \tag{1}$$

여기서 $P_I(\Delta f)$는 소방 채널 중심 주파수로부터 Δf만큼 이격된 간섭 신호의 전력(dBm), $A(\Delta f)$는 해당 이격에서 장비 전단이 제공하는 선택도로서 감쇠를 양(+)의 dB 값으로 정의하고, $P_{th}$는 절체 판단의 전력 임계(dBm)로서 본 장비에서는 MDL 설정값과 같다. 아날로그 절체형 장비는 전치필터 통과대역 내에서 $A(\Delta f) \approx 0$ dB이므로, 식(1)은 $P_I \geq P_{th}$로 축약되며 어떤 신호든 임계 전력만 넘으면 경로를 점유한다. 간섭 전력이 확률적으로 변동하는 환경에서 오절체 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{false}(\Delta f) = \Pr[P_I(\Delta f) \geq P_{th} + A(\Delta f)] \tag{2}$$

여기서 $P_{false}(\Delta f)$는 이격 Δf의 간섭에 의한 오절체 발생 확률, Pr[・]는 확률 연산자이며, 확률변수는 시간에 따라 변동하는 간섭 전력 $P_I(\Delta f)$이다. 식(2)는 오절체 내성이 두 변수로 결정됨을 보여준다. 절체 임계 $P_{th}$ (=MDL)를 높이는 것은 정상 무전 신호의 감도 저하를 수반하므로 한계가 있고, 결국 본질적 개선 변수는 간섭 주파수에서의 선택도 $A(\Delta f)$이다. 이것이 4장에서 제안하는 디지털 채널 선택 필터링의 이론적 근거이며 3.3절의 실측은 임계의 MDL종속성과 $A(\Delta f)$의 MDL 독립성을 각각 확인함으로써 이 분해가 실제 장비에서 성립함을 보인다. 이하에서는 신호의 주파수 위치를 다음과 같이 구분하여 지칭한다. 소방 운용 채널 이외의 모든 신호를 채널외 신호(out-of-channel signal)라 하고 장비 수신대역(전치필터 통과대역)내에 위치하는 신호를 대역내 채널외 신호(in-band, off-channel signal), 수신대역 밖의 신호를 대역외 신호(out-of-band signal)라 한다. 본 연구가 다루는 448 MHz대 신호는 피시험기기(device under test, DUT)의 수신대역(444～450 MHz)내에 있으므로 대역내 채널외 신호에 해당한다.

### 3.2 벤치시험구성

오절체 임계를 정량화하기 위하여 449 MHz 대역에서 운용중인 상용 아날로그 TX/RX 절체형 소방 중계기 1종을 대상으로 벤치 시험을 수행하였다. 시험 대상 장비는 수신대역 444～450 MHz의 반송파 검출형 절체 장비로서, 「전파법」 제58조의2에 따른 적합성평가를 완료하고 현장에 설치되는 제품과 동일한 사양이다. 본 논문에서 최소 검출 레벨(minimum detectable level, MDL)은 장비가 수신 입력을 반송파 검출로 판정하는 최소 입력 전력으로, 장비관리 메뉴에서 설정되는 값이다. 시험에서는 MDL을 통상값인 −80 dBm으로 설정하였으며, 약신호 현장에서는 −85 dBm까지 하향 설정할 수 있다. 설정된 MDL이 실제 검출 임계와 일치하는지는 소방 채널 주

파수의 기준 CW측정으로 확인하였다(3.3절). 시험은 두 가지 신호원 구성으로 수행하였다(Figure 1). 하나는 기준 CW측정으로, 신호발생기(HP8648C)의 무변조 CW출력을 케이블 손실 보정 후 DUT의 수신(RX)입력 포트에 직결하고, 소방채널과 동일한 449 MHz에서는 검출 임계($P_{th}$)를, 1 MHz 이격된 448 MHz에서는 원거리 선택도를 각각 측정하였다. 다른 하나는 실변조 측정으로, 상용 2형 생활무전기(DMR, 채널간격 12.5 kHz, 정격출력 0.5 W)의 송신 출력을 교정된 고정 감쇠기의 조합을 거쳐 RX포트에 전도 결합하였다. 감쇠기 조합을 변경하여 주입전력을 1 dB 간격으로 설정하였고 각 설정의 주입전력은 감쇠기와 케이블의 손실을 교정한 뒤 DUT 연결면 기준으로 실측 확인하였으며 12.5 kHz 채널 전력을 기준으로 한다. 각 전력 스텝에서 push-to-talk (PTT)를 5 s 이상 유지하였다. 실변조 신호원의 주파수 선정 근거는 다음과 같다. 면허대역에서 운용되는 무전기는 허가 주파수를 임의로 변경할 수 없으므로, 실변조 조건은 신고를 요하지 않는 2형 생활무전기용 대역(448.7375~449.2625 MHz, 채널간격 12.5 kHz, 협대역 디지털 전파형식F1D (주파수변조 디지털 데이터)/F1E (주파수변조 디지털 음성)에서 고정 채널로 동작하는 DMR 무전기를 이용하여 구성하였다[19]. 이 대역의 채널 배치는 소방 운용 채널을 회피하도록 구성되어 있어 448.9250 MHz는 소방채널(449 MHz)에 근접한 생활 무전기 운용 채널에 해당한다. 측정주파수는 이 채널 블록의 상단 경계인 448.9250 MHz ($\Delta f$ = 75 kHz, 12.5 kHz 채널간격기준 6채널)와 대역 하단 경계인 448.7375 MHz ($\Delta f$ = 262.5 kHz, 21채널)로 선정하였으며, 각 송신 주파수는 스펙트럼 분석기로 실측 확인하였다. 따라서 두 측정점은 상용 생활무전기가 소방 채널에 대해 실제로 취할 수 있는 최소 이격과 해당 블록 내 최대이격에 각각 대응하며, 특히 최소 이격조건은 현장에서 발생 가능한 최악 조건을 대표한다. 소방 채널과 동일 주파수($\Delta f$ = 0)조건은 검출기 관점에서 정상 검출과 구분되지 않아 오절체 임계의 정의에 부합하지 않으므로 제외하였다. 모든 조건에서 주입전력을 낮은 값부터 1 dB간격으로 상승시키며, 경로점유여부는 PC관리 graphical user interface (GUI)의 경로 상태표시가 유지되는 것을 기준으로 판정하였다(Figure 2(b)). 각 측정점은 상온에서 3회 반복하였다. 측정값에는 CW의 경우 신호발생기 레벨 정확도와 케이블 손실 보정, 실변조의 경우 무전기 송신출력 실측과 감쇠경로교정에 따른 불확도가 포함된다.

### 3.3 실측결과

In-band (449 MHz)조건에서는 주입 전력이 −80 dBm에 도달할 때 수신경로가 점유되었다. 이 결과는 장비의 검출 임계 $P_{th}$가 MDL 설정값(−80 dBm)과 같음을 의미한다. 대역내 채널 외 조건의 결과는 다음과 같다. 소방 채널에서 불과 6채널(75 kHz) 이격된 448.9250 MHz의 DMR 실변조 신호는 −79 dBm에서 수신경로를 오점유하였고 −80 dBm에서는 점유되지 않았다(분해능 1 dB). 즉 A (75 kHz) = (−79) − (−80) = 1 dB로 근접채널외 신호에 대한 장비 전단의 선택도는 사실상 존재하지 않는다. 21채널(262.5 kHz)이격의 448.7375 MHz DMR 신호는 −77 dBm에서 경로를 오점유하여 A (262.5 kHz) = 3 dB였으며 1 MHz 이격의 448 MHz CW는 −65 dBm에서 오점유되어 A (1 MHz) = 15 dB였다. 모든 측정점에서 3회 반복 임계가 1 dB 분해능 내에서 동일하게 재현되었다. Figure 2(a)는 측정된 오절체 임계를 주파수 이격에 대해 나타낸 것으로 이격이 줄어듦에 따라 선택도는 15 dB, 3 dB, 1 dB로 단조 감소하여 소방 채널 근방에서 0으로 수렴한다. Table 2는 시험조건과 결과의 요약이다.

검출 임계와 MDL의 관계를 확인하기 위하여 MDL을 −85 dBm으로 5 dB 하향한 조건에서 두 실변조 측정점을 재측정하였다. 그결과 오절체 임계는 각각 −84 dBm (448.9250 MHz),

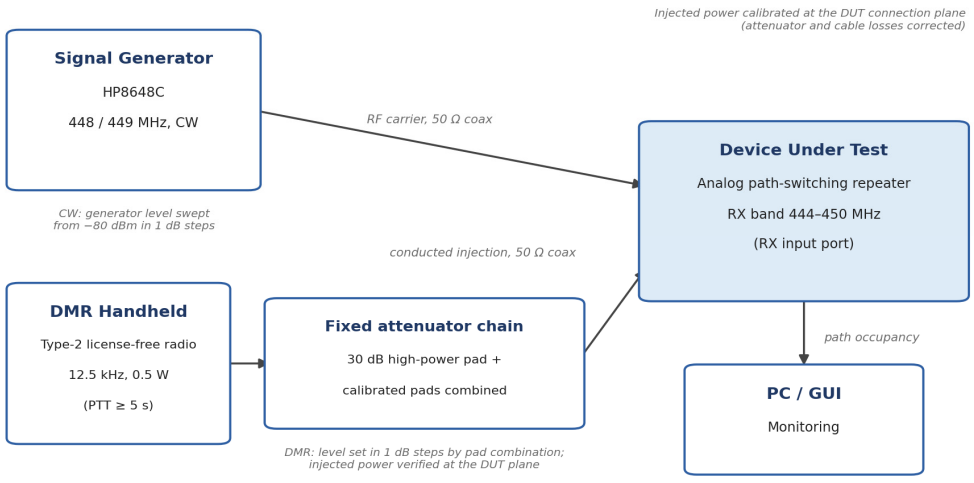



**Figure 1.** Bench measurement setup with two signal-source configurations: Reference CW (HP8648C) and real-modulated DMR conducted injection.

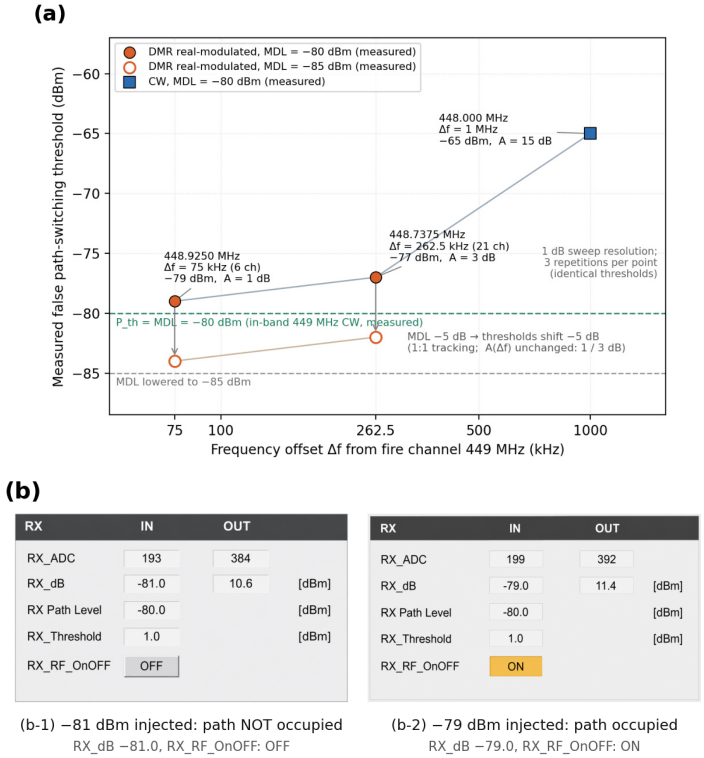



**Figure 2.** (a) Measured false path-switching thresholds versus frequency offset from the fire channel (449 MHz). Circles: Real-modulated DMR signals from a commercial Type-2 license-free radio (conducted injection); Square: Unmodulated CW; Open circles: Thresholds re-measured with MDL lowered to −85 dBm, showing a 1:1 shift with the selectivity A(Δf) unchanged. All values are measured. (b) PC-GUI path-occupancy indication below the threshold (left, −81 dBm injected, not occupied) and at the threshold (right, −79 dBm injected, occupied) for the 448.9250 MHz DMR injection; the GUI-indicated RX level is the device's internal reading, while the injected power is referenced to the DUT connection plane.

**Table 2.** Bench-Test Conditions and Measured Threshold for False Path-Switching

| Item | Description |
|---|---|
| Device Under Test (DUT) | 450 MHz-Band Fire-Service Repeater (RX Band 444～450 MHz), Carrier-Detection TX/RX Path-Switching, Conformity-Assessed Product (Anonymized) |
| Signal Source ① (Reference CW) | Signal Generator HP8648C; Unmodulated CW Injected Into the RX Input Port; Used for the In-Band Detection-Threshold Reference (449 MHz) and the 1 MHz-Offset Point (448 MHz) |
| Signal Source ② (Real-Modulated) | Commercial Type-2 License-Free DMR Handheld Radio (12.5 kHz Channel Spacing, Rated 0.5 W); Conducted Injection Via a Combination of Calibrated Fixed Attenuators (Including a 30 dB High-Power Pad); Injection Level Set in 1 dB Steps by Pad Combination and Verified by Measurement at the DUT Connection Plane (Channel-Power Basis); PTT Held ≥ 5 s per Power Step |
| Path-Occupancy Judgment | Sustained Path-Status Indication on the PC Management GUI (Figure 2(b)); 1 dB Sweep Resolution |
| Detection Threshold (MDL) | −80 dBm (Typical Setting); Additionally Lowered to −85 dBm to Test Threshold-MDL Coupling |
| Point ① (In-Band Reference) | 449 MHz CW; Path Occupied at −80 dBm; Thus $P_{th}$ = MDL (Measured) |
| Point ② (Near Off-Channel) | 448.9250 MHz DMR (Δf = 75 kHz, 6 Channels); Occupied at −79 dBm But Not at −80 dBm; Thus A (75 kHz) = 1 dB (Measured) |
| Point ③ (Mid Off-Channel) | 448.7375 MHz DMR (Δf = 262.5 kHz, 21 Channels); Occupied at −77 dBm; Thus A (262.5 kHz) = 3 dB (Measured) |
| Point ④ (Far Off-Channel) | 448.000 MHz CW (Δf = 1 MHz); Occupied at −65 dBm; Thus A (1 MHz) = 15 dB (Measured) |
| MDL-Coupling Check | With MDL Lowered to −85 dBm, Thresholds at Points ②/③ Shifted to −84/−82 dBm, i.e., a 1:1 Downward Shift With A(Δf) Unchanged (Measured) |
| Repeatability & Environment | 3 Repetitions per Point; Identical Thresholds Within the 1 dB Resolution; Room Temperature |

−82 dBm (448.7375 MHz)으로 정확히 5 dB 동반 하락한 반면 선택도 A(Δf)는 1 dB와 3 dB로 변하지 않아, 다음 두가지가 실측으로 확정된다. 첫째, 오절체 임계는 식(1)의 구조대로 $P_{th}$ + A(Δf)로 분해되며 A(Δf)는 MDL설정과 무관한 장비 고유의 특성이다. 둘째, 수신감도(MDL)와 오절체 내성은 1:1로 상충하므로 임계(MDL)조정만으로는 문제를 해결할 수 없고 본질적 개선 변수는 선택도 A(Δf)이다(4장, 5장).

측정된 임계는 현장에서 일상적으로 도달 가능한 수준이다. 생활무전기의 정격 출력은 0.5 W (+27 dBm)를 기준으로 449 MHz 대역의 자유공간 경로손실은 10 m에서 45.5 dB, 100 m에서 65.5 dB이므로, 건물 내부 손실 20∼30 dB를 감안하더라도 수십 m 거리에서 −79 dBm을 상회하는 결합이 성립하며, 누설동축케이블이나 실내안테나에 근접한 경우에는 더 강한 결합이 발생한다. 이 결과가 현장에서 갖는 의미는 3.4절에서 논한다.

### 3.4 현장 함의

동일한 메커니즘은 본 시험의 측정 주파수에 국한되지 않는다. 2.1절에서 기술한 관리용 무전 신호・무선 감지기 신호 및 타 대역 상호변조 신호와 같이 전치 필터 통과대역으로 유입되는 모든 비소방 신호가 식(1)의 조건을 만족하는 순간 오절체를 유발할 수 있다[2,5]. 특히 448∼449 MHz 대역에서는 2형 생활무전기(digital private mobile radio, DMR/dPMR)가, 449 MHz 대에서는 일부 관리용 무전기가 각각 주파수를 할당받아 운용되므로, 소방 채널과 동일하거나 근접한 대역에 비소방 신호가 상존한다. 본 실측은 이러한 위협이 가설이 아님을 보여준다. 측정에 사용한 448.9250 MHz는 실제 유통 중인 생활무전기의 운용 채널 그 자체이며, 이 채널에서 송신된 DMR 실신호는 소방 채널로부터 6채널 이격임에도 MDL 대비 불과 1 dB 높은 전력으로 적합성평가 완료 장비의 수신경로를 오점유하였다. 3.3절에서의 검토에 따르면 동일 건물 내 수십 m 떨어진 생활 무전기나 관리용 무전기 1대의 송신만으로도 도달되는 전력 수준이므로 같은 현상이 현장에서 재현될 수 있다. 이러한 동일채널・근접신호는 전력만으로는 소방 신호와 구분되지 않아 전력 임계 방식으로는 원천적으로 차단할 수 없다(4장). 특히 라인앰프가 다단으로 연결되는 실제 계통에서는 한 지점의 오절체가 계통 전체의 중계 차단으로 확산될 수 있어 화재 현장 지휘체계의 불통이라는 안전 문제로 직결된다[7,8]. 한편 전파법령 개정으로 아날로그 생활무전기는 2024년 1월 1일부터 제조・판매가 금지되고 2026년 12월 31일까지만 한시적으로 사용할 수 있으므로, 인접 주파수 간섭원의 구성은 디지털(DMR/dPMR) 신호 중심으로 재편되고 있다. 본 실측은 디지털 무전기를 신호원으로 하였으므로, 측정된 임계는 아날로그 무전기 사용 종료 이후의 간섭 조건을 반영한 값이다.

## 4. 제안하는 디지털 멀티채널 필터링 중계기

### 4.1 설계 개념

3장의 분석이 보여주듯 오절체 내성의 본질적 개선 변수는 간섭 주파수에서의 선택도 A(Δf)이다. 제안 구조의 설계 개념은 수신 광대역 신호를 디지털 영역에서 채널 단위로 분해하여, 유효한 소방 채널 주파수 신호만을 탐지・동기화・필터링한 뒤 재방사하는 것이다. 이로써 절체(경로 활성화)의 판단 근거가 수신 전력이 임계를 초과하는지 여부에서 유효한 소방 채널이 존재하는지 여부로 바뀌며, 채널 래스터 밖의 채널외・불요파 신호는 절체 판단에 도달하기 전에 필터에서 제거된다. 본 구조는 다상 필터뱅크[17,18]와 LMS 적응 필터링[15]의 공지기법을 소방 중계 요구사항에 맞게 통합한 것이다.

### 4.2 시스템 구조

제안 장치는 아날로그-디지털 변환모듈, 스펙트럼 탐지/동기화 모듈, 멀티채널 필터링 모듈, 디지털-아날로그 변환모듈을 기본 구성으로 한다(Figure 3). 수신 안테나로 유입되는 신호는 440∼470 MHz 범위의 광대역 신호로서 소방 무선 신호 외에 각종 간섭과 잡음을 포함한다. 스펙트럼 탐지/동기화 모듈은 변환된 디지털 신호를 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform,

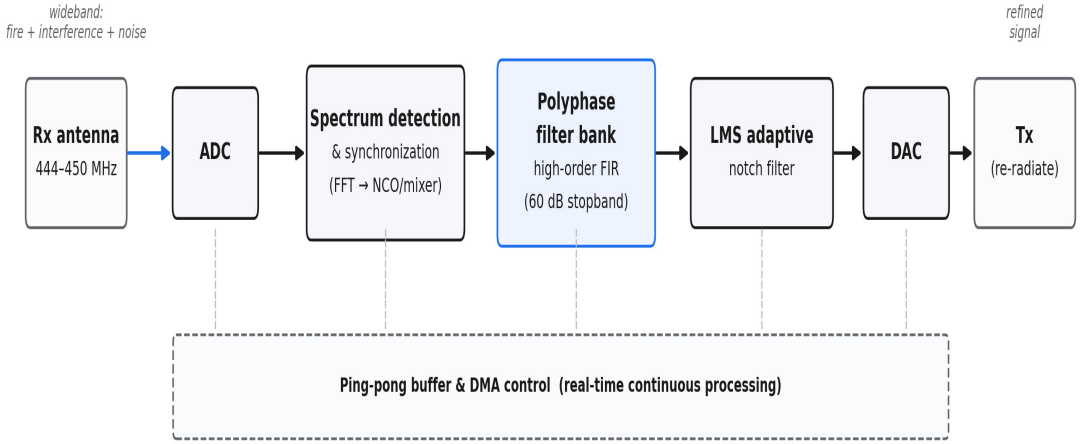



**Figure 3.** Proposed repeater block diagram.

FFT)하여 가장 강한 피크 주파수를 검출하고, 검출 정보를 바탕으로 수치 제어 발진기(numerically controlled oscillator, NCO)의 주파수를 조절한 뒤 믹서를 통해 원하는 주파수 대역의 신호만을 기저대역으로 추출한다. 이로써 수동 설정 없이 현장 무전 신호를 실시간 추적·동기화할 수 있다. 멀티채널 필터링 모듈은 동기화된 채널 신호를 정류자(commutator) 스위치를 통해 복수의 서브 필터로 분배하고, 다상 필터뱅크(polyphase filter bank) 구조의 고차 FIR 필터링으로 대역 외 잡음을 급경사 차단한다. 다상 필터뱅크는 단일 프로토타입 필터로 다수 채널을 효율적으로 분리·처리할 수 있어 다중채널 동시 수신과 연산 효율 확보에 적합함이 알려져 있다[17,18]. 필터링된 신호는 LMS 알고리즘 기반 적응형 노치 필터를 추가로 거쳐 하울링·비트톤과 같이 실시간으로 변하는 대역 내 협대역 잡음이 제거되며, 디지털-아날로그 변환을 거쳐 정제된 신호로 재방사된다. 실시간성 확보를 위하여 제어모듈은 핑퐁 버퍼(ping-pong buffer) 구조의 이중 메모리와 직접 메모리 접근(direct memory access, DMA) 제어를 사용하여 끊김 없는 연속 처리를 수행한다.

### 4.3 채널선택 FIR의 설계

채널 선택 필터는 선형위상 FIR을 채택하여 선택도와 위상 왜곡 최소화를 동시에 달성하며, 그 군지연은 식(3)과 같다.

$$\tau_g = \frac{N-1}{2f_s} \tag{3}$$

여기서 $\tau_g$는 필터의 군지연(초), N은 탭수, $f_s$는 표본화율(Hz)이다. DMR 채널 구조(12.5 kHz 간격)를 기준으로 기저대역 표본화율 $f_s$ = 96 kHz (심볼당 20 표본), 저지대역 감쇠 60 dB, 천이폭 약 1.65 kHz (통과대역 모서리 ±4.6 kHz, 저지대역 모서리 ±6.25 kHz)의 Kaiser 창(β ≈ 5.65) 설계를 적용하면 근사 탭 수는 N ≈ 211이며, 본 연구는 여유를 두어 N = 223을 선택한다. 이 설계의 크기 응답을 수치 계산한 결과(Figure 4) 저지대역 감쇠는 60 dB 이상(±6.25 kHz에서 약 69 dB, 저지대역 바닥 약 62 dB)으로 확인되었다. 이때 $\tau_g$ ≈ 1.156 ms이고, 아날로그-디지털 변환기(analog-to-digital converter, ADC)/디지털-아날로그 변환기(digital-to-analog converter, DAC) 버퍼 처리지연을 포함한 고정 one-way 지연은 2∼3 ms 범위로 설계 가능하다. 후보채널 8개 전체의 정밀 필터링은 약 171 MMAC/s (million multiply-accumulate operations per second)를 요구하나 다상 필터뱅크 구조와 상위 후보 선별 처리로 연산량을 크게 절감할 수 있으며[17,18], 핑퐁 버퍼 기반 DMA 제어가 이 처리율의 실시간 달성을 뒷받침한다.

### 4.4 적응형 노치필터와 운용안정성

다상 필터뱅크가 대역 외 간섭을 차단하더라도, 통과 채널 내부로 유입되는 협대역 잡음(피드백 하울링, 비트톤 등)은 별도의 처리가 필요하다. 제안 구조의 적응형 노치 필터는 LMS 알고리즘으로 오차가 최소화되도록 필터 계수를 실시간 갱신하여 대역 내 협대역 잡음을 스스로 학습·제거한다[15]. 이는 도너-서비스 격리 부족 시 발생하는 궤환 성분의 억제에도 기여하며, 미국 기준이 ERCES에 요구하는 발진 감시·필터별 이득제어의 설계 방향과 부합한다[2,12]. 운용 측면에서도 제안 장치 역시 기존 장비와 동일하게 「전파법」상 적합성평가(KC)를 취득하여 설치할 수 있으므로[6], 현행 설치 제도와의 충돌 없이 도입 가능하다.

### 4.5 유효채널 식별 및 폴백 로직

제안 구조에서 재방사 판단은 유효한 소방 채널의 존재를 전제한다. 그러나 탐지된 가장 강한 신호가 곧 소방신호라고

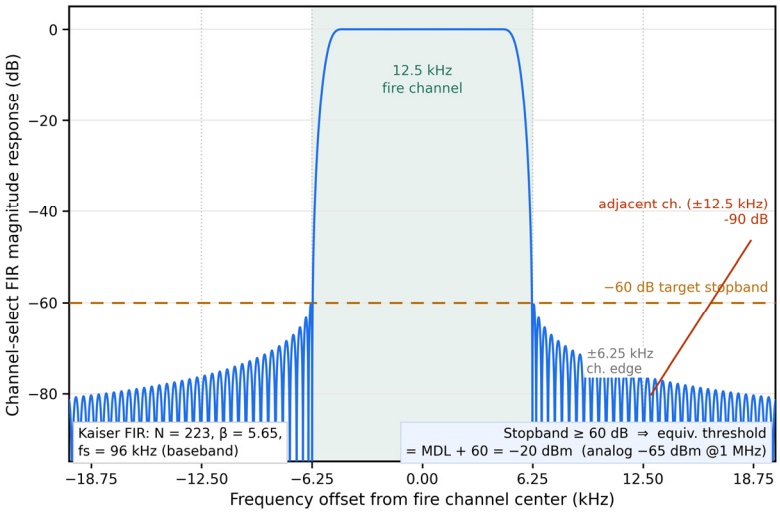



**Figure 4.** Simulated magnitude response of the channel-select FIR (Kaiser, N = 223, β = 5.65, fs = 96 kHz). The stopband attenuation exceeds 60 dB, raising the equivalent false-switching threshold for out-of-channel signals from the analog −65 dBm (Δf = 1 MHz) to MDL + 60 dB = −20 dBm.

보장할 수 없으므로, 강한 비소방 신호에 잘못 동기화될 가능성에 대한 방어절차가 필요하다. 제안 구조의 식별・폴백 로직은 다음의 4단계로 구성된다. 첫째, 채널 정합 단계에서는 FFT로 검출된 피크 주파수를 설치 시 등록되는 허가 소방채널 목록(화이트리스트)과 대조한다. 화이트리스트는 설계단계의 채널계획서(6.3절)에 근거하여 등록・관리되며 채널 래스터에 정합하지 않거나 목록에 없는 주파수의 신호는 전력과 무관하게 재방사 후보에서 제외된다. 둘째, 신호 판별 단계에서는 화이트리스트에 정합하는 후보채널에 대하여 ETSI TS 102 361-1에 규정된 DMR 프레임의 공개요소인 48-bit SYNC 패턴의 상관검출과 컬러코드(colour code)확인을 통해 해당 신호가 소방 운용 신호인지를 판별한다[9]. SYNC 패턴은 음성/데이터 및 상・하향의 구분을, 컬러코드는 동일 주파수를 공유하는 상이한 시스템 간의 구분을 제공하므로 관리용 무선 등 비소방 DMR 신호가 소방 채널 주파수에 유입되는 동일채널 조건에서도 식별이 가능하다. 셋째, 복수 신호 선택 단계에서는 복수의 화이트리스트 채널에서 유효 신호가 동시에 검출되는 경우 다상필터뱅크 구조가 다중채널 동시 처리를 지원하므로[17,18] 원칙적으로 검증을 통과한 모든 소방 채널을 병렬로 중계한다. 처리 자원의 제약으로 선별이 필요한 경우에는 신호 판별을 통과한 채널을 미통과 채널보다 우선하고 동순위 내에서는 수신 전력이 큰 채널을 우선한다. 넷째, 폴백 단계에서는 채널 식별이 실패하거나 판별이 지연되는 경우의 중계 공백을 방지하기 위하여 2단 폴백을 둔다. 1차로 직전 유효 채널의 필터링 경로를 일정시간 유지하고(last-valid-channel hold) 유지시간내에 재식별이 이루어지지 않으면 2차로 소방 분배대역 전체를 통과시키는 광대역 투명 중계 모드로 강하한다. 투명 모드에서는 채널 선택 이득은 상실되나 종래 아날로그 중계와 동등한 중계 연속성이 보장되므로 식별 기능의 어떠한 실패도 기존 방식 대비 중계 가용성을 저하시키지 않는다. 폴백의 진입・복귀 이벤트는 장치의 감시 신호로 기록되어 6장의 점검 체계와 연계될 수 있다. 이 4단계 로직에서 채널 정합과 신호 판별은 오식별(비소방 신호에의 동기화)을, 폴백은 미식별(소방 신호의 누락)을 각각 방어하며, 이로써 절체 판단의 신뢰성은 수신 대역 내 최강 피크를 소방 채널로 간주하는 가정에 의존하지 않는다. 본 절에서는 식별・폴백 로직을 기능 수준의 설계 요건으로 제시하였으며, 판별 임계와 유지시간 등 세부 파라미터는 다루지 않았다.

## 5. 해석적 성능 분석 및 기존 방식과의 비교

### 5.1 분석모델과 평가지표

건물 내부 수신점의 기저대역 등가 수신신호를 식(4)와 같이 모델링한다.

$$r(t) = s(t) + \sum_{k} i_k(t) + n(t) \tag{4}$$

여기서 r(t)는 수신점의 기저대역 등가 수신신호, s(t)는 소망 소방 채널 신호, $i_k(t)$는 k번째 채널외・불요파 간섭, n(t)는 잡음이며, 각 항은 기저대역 등가 전압 신호이다. 채널선택필터 H(f)의 주파수 오프셋 Δf에서의 선택도는 식(5)와 같다.

$$A(\Delta f) = -20\log_{10}|H(\Delta f)| \quad (dB) \tag{5}$$

여기서 H(f)는 채널선택필터의 기저대역 주파수 응답으로, 통과대역 중심에서 |H(0)| = 1이 되도록 정규화한다. 필터출력의 신호 대 간섭・잡음비는 식(6)과 같다.

$$SINR_{out} = \frac{P_S}{\sum_{k}|H(f_k)|^2 P_k + N_0 B_{eff}} \tag{6}$$

여기서 $P_s$는 필터 출력에서의 소망 신호 전력, $P_k$와 $f_k$는 각각 k번째 간섭의 전력과 주파수 오프셋, $N_0$는 잡음 전력밀도, $B_{eff}$는 필터의 등가 잡음 대역폭이며, 분모의 합은 모든 간섭원 k에 대하여 취한다. 평가지표는 ① 등가 오절체 임계, ② 인접채널 선택도, ③ 출력 신호 대 간섭 및 잡음비(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)와 DMR SYNC 유지율, ④ 처리지연의 네 가지로 하며, 아날로그 절체형과 제안 방식에 동일하게 적용한다. 본 장의 모든 수치는 실측이 아닌 설계 수치에 근거한 해석적 계산값이며, 가정은 각 절에 명시한다. 이하의 SYNC 유지율 분석에서는 잔류 간섭을 등가 백색잡음으로 취급하여 출력 SINR을 유효 Eb/N0로 대응시키는 가정을 사용한다.

### 5.2 등가 오절체 임계의 개선

3장의 모델에 채널 선택 필터링을 결합하면, 간섭 주파수 Δf에서의 등가 오절체 임계는 식(7)과 같이 상승한다.

$$P_{th,eq}(\Delta f) = P_{th} + A(\Delta f) \tag{7}$$

여기서 $P_{th,eq}(\Delta f)$는 이격 Δf의 간섭이 절체를 유발하는 데 필요한 최소 전력인 등가 오절체 임계(dBm)이고, $P_{th}$는 장비의 검출 임계로서 MDL 설정값(−80 dBm)이며, A(Δf)는 식(1)에서 정의한 양(+)의 감쇠량(dB)이다. 식(7)은 채널 선택 필터 전단의 수신회로(전치필터, 저잡음증폭기(low noise amplifier, LNA), ADC)가 해당 입력 레벨에서 포화나 상호변조 없이 선형으로 동작하는 범위에서만 성립한다. 즉, 식(7)의 등가임계는 필터 감쇠에 의한 개선만을 계량한 값이며 전단이 비선형 영역에 진입하면 블로킹・상호변조 등으로 필터 감쇠와 무관한 성능 저하가 발생할 수 있다. 제안 필터의 저지대역 감쇠 60 dB를 적용하면 채널 래스터 밖 신호에 대한 등가 오절체 임계는 −80 + 60 = −20 dBm으로 상승한다. 이는 아날로그 장비가 같은 채널외 신호에 보인 −79 dBm (Δf = 75 kHz, DMR) ~−65 dBm (Δf = 1 MHz, CW) 대비 약 45~59 dB 높은 값으로, 오절체를 유발하는 데 필요한 간섭 전력이 그만큼 증가함을 의미한다. 이 개선은 MDL (수신감도)을 낮추지 않고 달

성된다는데 의의가 있다. 더 본질적으로는, 제안 구조에서 재방사 판단이 유효 소방 채널 신호의 탐지 · 동기화를 전제하므로, 채널 래스터에 정합하지 않는 신호는 전력과 무관하게 경로를 점유할 수 없다. Figure 4는 제안 채널 선택 FIR의 크기 응답으로, 저지대역에서 60 dB 이상의 감쇠를 보인다. 이 등가 임계가 전단의 선형 동작 범위 내에 있는지를 확인하기 위하여 광대역 직접 표본화 구조(아날로그 믹서 단 부재)를 전제로 한 예시 이득 배분(전치 필터 삽입손실 2 dB, LNA 이득 15 dB, 순이득 +13 dB, LNA-ADC 간 디지털 제어 감쇠기)에 대해 −20 dBm 입력 시의 단별 레벨과 요구 사양을 역산하였다 (Table 3). 안테나 단자 기준 −20 dBm의 채널외 신호는 LNA 입력에서 −22 dBm, ADC입력에서 −7 dBm이 된다. 10 dB의 압축 여유를 확보하기 위한 LNA입력 1 dB 이득압축점(P1dB, 1 dB gain compression point)요건은 −12 dBm 이상, 두 채널 외 신호가 동시에 −20 dBm으로 유입되는 최악 조건에서 3차 상호변조(third-order intermodulation, IM3) 산물을 검출 임계(MDL)이하로 억제하기 위한 LNA입력 입력 3차 교차점(input third-order intercept point, IIP3)요건은 +8 dBm이상이며 풀스케일 +4 dBm (1 Vpp, 50 Ω)의 14-bit ADC기준 헤드룸은 11 dB이다. 이들 요건은 450 MHz급 고선형 LNA (입력 P1dB 0 ∼+10 dBm, 입력 IIP3 +10∼+25 dBm)와 상용 RF 표본화 ADC의 통상 사양 범위 내이므로 −20 dBm 입력에서 전단 포화는 발생하지 않는 것으로 확인된다. 아울러 동일 이득 배분에서 ADC잡음 바닥은 12.5 kHz 채널 기준 안테나 환산 약 −116 dBm으로, MDL −80 dBm (−85 dBm)신호에 대해 36 dB (31 dB)의 여유가 확보되어 채널외 내성의 개선이 수신감도의 희생없이 성립함을 뒷받침한다. −20 dBm을 초과하는 극단적 강신호에 대해서는 자동이득제어(automatic gain control, AGC)를 수행하는 디지털 제어감쇠기가 개입하며 ERCES기준이 요구하는 필터별 이득제어의 설계방향과 부합한다[12]. Table 3의 값은 −20 dBm 입력 조건에서 요구되는 사양을 역산하여 상용 사양 범위와 대조한 결과이다. 실장 검증은 향후 연구에서 수행할 예정이다.

### 5.3 인접 채널 SINR과 SYNC 유지율

디지털 무전 적합성의 평가에는 DMR 48-bit SYNC의 유지율을 사용한다. DMR은 4치 주파수편이변조(4-level frequency shift keying, 4FSK) 변조를 사용하므로 심볼당 비트수 $\log_2 M$ ($M = 4$)에 따라 심볼 SNR $\gamma_s = 2\,\gamma_b$이다. 비코히어런트 직교 4FSK 근사에서 심볼오류율과 비트오류율은 식(8a)∼식(8c)와 같고, 48-bit SYNC를 상관 검출하되 t bit까지의 오류를 허용하는 검출기의 SYNC 유지확률은 식(9)와 같다[9,15].

$$\gamma_s = (\log_2 M)\gamma_b = 2\gamma_b, M = 4 \tag{8a}$$

$$P_s = \sum_{k=1}^{M-1} (-1)^{k+1} C(M-1,k) \frac{1}{k+1} exp\left[-\frac{k}{k+1}\gamma_s\right] \tag{8b}$$

$$P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_s = \frac{2}{3} P_s \tag{8c}$$

여기서 M은 변조 차수(4FSK이므로 M = 4), $\gamma_s$와 $\gamma_b$는 각각 심볼당 · 비트당 신호 대 잡음비, $P_s$와 $P_b$는 각각 심볼오류율과

**Table 3.** Front-End Linearity Budget for a −20 dBm Out-of-Channel Input (Requirement Back-Calculation, Example Gain Plan)

| Item | Level/Requirement | Derivation | Representative Commercial-Grade Spec | Margin |
|---|---|---|---|---|
| Example Gain Plan (RX Front End) | Preselector BPF (IL 2 dB), Followed by LNA (Gain 15 dB) and ADC; Net Gain +13 dB; Digitally Controlled Attenuator (AGC) Between LNA and ADC | Design Example for Feasibility Check | - | - |
| Blocker Level Along the Chain (−20 dBm at Antenna Port) | −22 dBm at LNA Input; −7 dBm at ADC Input | −20 − 2 (BPF IL) + 15 (LNA Gain) = −7 dBm at ADC | - | - |
| LNA Gain Compression | Input P1dB ≥ −12 dBm Required | −22 dBm Input +10 dB Back-Off | Input P1dB ≈ 0 to +10 dBm (450 MHz-Class High-Linearity LNA) | ≥ 12 dB |
| LNA Intermodulation (Two-Tone Worst Case, Both at −22 dBm) | Input IIP3 ≥ +8 dBm Required | IM3,in = $3P_{blk}$ − 2 · IIP3 ≤ −82 dBm (MDL Referred to LNA Input) | Input IIP3 ≈ +10 to +25 dBm | ≥ 2 dB (Typ. ≥ 10 dB) |
| ADC Clipping | Blocker −7 dBm vs. Full Scale +4 dBm (1 Vpp) | Headroom = FS - P Blocker | 14-bit RF-Sampling ADC, FS ≈ +4 dBm | 11 dB |
| Sensitivity Preserved (Desired at MDL) | ADC Noise in 12.5 kHz ≈ −116 dBm Referred to Antenna | SNR FS 70 dB, f s 122.88 MHz Processing Gain 36.9 dB | 14-bit ADC Class | 36 dB at −80 dBm (31 dB at −85 dBm) |

비트오류율, C (M − 1,k)는 M − 1개에서 k개를 선택하는 조합의 수이며, log의 밑은 2이다.

$$P_{SYNC} = \sum_{k=0}^{t} C(48,k) P_b^k (1-P_b)^{48-k} \quad (9)$$

여기서 $P_{SYNC}$는 48-bit SYNC워드의 검출(유지)확률, t는 상관 검출기가 허용하는 오류 비트 수, C (48, k)는 48비트 중 k비트를 선택하는 조합의 수, $P_b$는 식(8c)의 비트오류율이다. 허용 오류 t = 4 bit를 기준으로 계산하면 $\gamma_b$ = 4 dB에서 $P_{SYNC}$ ≈ 0.83, 6 dB에서 약 0.999, 8 dB에서 약 1에 수렴한다(Figure 5). 허용오류 t = 4의 선정 근거는 오동기(false sync)와 미검출(missed sync)의 상충 관계에서 도출된다. 무작위 데이터가 우연히 SYNC로 오인될 확률은 식(9)에서 비트오류율을 1/2로 둔 값에 해당하며, t = 4에서 약 $7.6 \times 10^{-10}$이다. DMR 비트율(9,600 bit/s)의 슬라이딩 탐색을 가정하더라도 연속 무작위 입력기준 약 1.6일에 1회 수준으로 운용상 무시할 수 있다. 반면 검출 성능은 t에 민감하여, $\gamma_b$ = 4 dB에서 t = 0의 SYNC 검출 확률 0.047이 t = 4에서는 0.83으로 상승한다. t를 6으로 늘리면 검출 확률은 0.97로 소폭 더 개선되나 오동기 확률이 약 67배($5.0 \times 10^{-8}$)로 증가하므로 본 연구는 오동기 확률을 $10^{-9}$ 수준 이하로 유지하면서 검출 개선이 포화 구간에 진입하는 t = 4를 기준값으로 채택하였다. 본 근사 모델의 한계는 다음과 같다. 실제 DMR 4FSK는 주파수 편이 ±648/±1,944 Hz의 비직교 연속위상 주파수편이변조(continuous phase frequency shift keying, CPFSK)로서 인접 심볼간 변조지수가 약 0.27이고 제곱근 상승여현(root raised cosine, RRC) 펄스정형에 따른 심볼간 간섭이 존재하나, 비코히어런트 직교 근사는 이를 반영하지 않는다. 또한 5.1절의 가정대로 잔류 간섭을 등가 백색잡음으로 취급하며 실제 수신기의 연판정 상관 검출을 경판정 비트오류 허용으로 근사한다. 따라서 Figure 5는 DMR 수신기 실성능의 정량적 예측이 아니라 선택도 개선이 동기 안정성에 미치는 구조간 상대 경향을 보이기 위한 해석 자료로 한정된다. 인접 간섭의 억제로 burst-SINR을 수 dB만 개선하여도 SYNC 유지율은 급격히 상승하며, 제안 구조의 60 dB급 선택도는 인접채널 점유 환경에서 이 개선 여유를 구조적으로 보장한다.

### 5.4 처리 지연의 경계 분석

제안 구조의 고정 one-way 지연은 FIR 군지연(식(3), 1.156 ms)에 ADC/DAC/버퍼 지연을 더한 2∼3 ms 범위로 설계되며 아날로그 경로(통상 1 ms 미만으로 알려져 있음)보다 길다. 그러나 DMR의 30 ms 슬롯 구조에서 절대지연은 슬롯 길이의 10% 수준에 불과하고, 고정지연은 계통 설계 단계에서 예측·보상이 가능하다[9]. 디지털 동기 품질에 실질적으로 중요한 것은 지연의 크기가 아니라 변동성인데, 제안 구조의 지연은 결정론적 신호처리 경로(고정 탭 FIR과 버퍼)에서 발생하므로 그 변동은 버퍼 구조에 의해 설계적으로 상한이 제한된다. 반면 절체형 장비는 절체 천이 시점마다 경로 단절과 재연결이 발생하여 burst 단위의 불연속을 만든다. 본 절에서는 지연 변동성을 구조적 관점에서 비교하였다. 변동성의 정량적 실측 비교는 향후 연구에서 수행할 예정이다.

### 5.5 종합 비교

Table 4가 보여주듯 제안 방식의 비용은 구현 복잡도이고 효용은 오절체 내성과 디지털 적합성이다. 무선통신보조설비

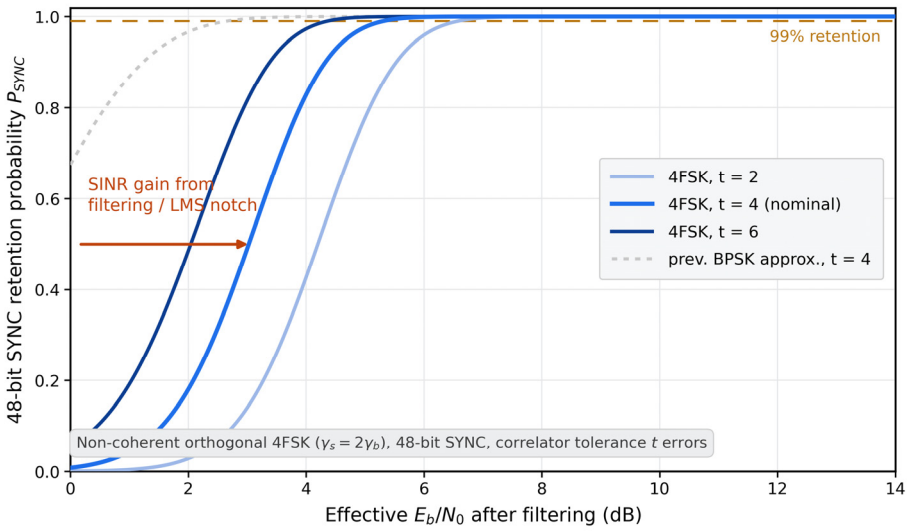



**Figure 5.** SYNC retention probability of a 48-bit DMR sync word versus effective $E_b/N_0$, modeled with non-coherent orthogonal 4FSK ($\gamma_s = 2\gamma_b$) and a correlator error tolerance t. Improving SINR via channel-selective filtering shifts the operating point rightward, nonlinearly raising retention; a coherent-BPSK approximation (dotted) is shown for comparison. All curves are analytical trends under the non-coherent orthogonal 4FSK approximation, intended for relative comparison between architectures rather than as a quantitative prediction of DMR receiver performance (analytically calculated).

**Table 4.** Comparison Between the Measured Analog Path-Switching Device and the Analytically Predicted Performance of the Proposed Digital Multichannel Filtering Repeater

| Metric | Analog Path-Switching | Proposed Digital Multichannel Filtering (Analytical Prediction, Not Implemented) | Verification Level | Basis |
|---|---|---|---|---|
| Path-Switching Decision | Power Threshold (Frequency-Blind) | Detection and Synchronization of Whitelist/SYNC Verification and Fallback (Sec. 4.5) | Measured/ Design Concept | Model (Ch.3), Sec. 4.5 |
| False-Switching Threshold | −79 dBm (Δf = 75 kHz, DMR) to −65 dBm (Δf = 1 MHz, CW), Measured | ≥ −20 dBm Equivalent (Out-of-Channel, Calculated)[a] | Measured/ Analytical | Eq. (7), Table 2 |
| Off-Channel Selectivity | 1 dB at 75 kHz; 3 dB at 262.5 kHz; 15 dB at 1 MHz (Measured) | ≥ 60 dB Stopband (FIR Design) | Measured/ Simulated | Sec. 4.3, Figure 4, Table 2 |
| In-Band Narrowband Noise | No Countermeasure | Removed in Real Time by LMS Adaptive Notch | –/Design Concept | Sec. 4.4 |
| Digital (DMR) Compatibility | Vulnerable to Switching Transients and Interference | SINR Gain Nonlinearly Improves SYNC Retention | –/Analytical | Eq. (9), Figure 5 |
| Processing Delay | < 1 ms (Reported) | 2～3 ms (Fixed, Predictable) | Literature / Design Value | Eq. (3) |
| Certification | Conformity-Assessed (KC) Products Exist | Same Conformity Assessment Obtainable[6] | - | - |
| Implementation Cost | Simple, Low-Cost | Requires DSP/FPGA, Relatively Higher Cost | Qualitative | Trade-Off |

a) Analytical Value that Accounts for Filter Attenuation Only, Valid Under the Condition that the Receiver Front-End (LNA,ADC) Operates in Its Linear Region Without Saturation at the Corresponding Input Level; The Applicability Condition of Eq. (7) and the Front-End Input Budget are Given in Sec. 5.2 and Table 3.
Note: All Values in the Proposed Column are Analytical Predictions or Design Values Without Hardware Implementation; The Analog Threshold and Selectivity Values are Bench-Measured (Table 2).

가 인명 안전을 직접 담보하는 소화활동설비라는 점을 고려하면, 이 상충관계(trade-off)는 안전 설비의 설계 철학 차원에서 평가되어야 한다. 다만 이 방식에도 한계가 있다. 유효 채널 탐지가 잘못되는 경우의 공백 가능성에 대비하여 허가채널 화이트리스트와 폴백 로직을 4.5절의 설계요건으로 제시하였으나, 그 세부 파라미터와 실장 검증은 과제로 남는다. 또한 아날로그 · 디지털 무전이 혼재하는 과도기 환경에서는 채널 운용 계획과의 정합이 전제되어야 한다. 아울러 도입 비용의 상승은 제도적 유인(6장)이 없으면 시장 채택의 장애가 될 수 있다.

## 6. 고찰: 인증 · 제도적 적용방안

### 6.1 적합성평가 체계의 사각지대

시험 대상 장비는 「전파법」 제58조의2에 따른 적합성평가를 완료한 제품임에도 −79 dBm 채널외 실신호(DMR)로 수신 기능이 무력화되었다. 이는 장비의 인증 위반이 아니다. 적합성평가는 전자파의 방사와 내성, 곧 기기가 타 기기를 방해하지 않고 외부 전자파 환경에서 오동작하지 않을 것을 규율하는 제도이며, 절체 로직이 소방 채널과 비소방 신호를 식별하는지는 시험 범위가 아니기 때문이다[6]. 한편 NFPC 505는 증폭기 · 무선중계기에 적합성평가 제품의 사용을 요구함으로써[3] 사실상 적합성평가를 품질 관문으로 원용하고 있으나, 본 실측은 적합성평가의 통과가 화재 현장에서의 무전 신뢰성을 보장하지 않음을 보여준다. 점검 체계 역시 자체점검 고시의 성능시험조사표 서식이 존재함에도[20] 실제 점검이 접속단자함 · 송수신기 확인 중심으로 운영되어 이러한 동적 간섭 취약점을 포착하기 어렵다는 한계가 선행연구에서 지적된 바 있다[7].

### 6.2 도입이 필요한 시험 항목의 권고

이에 본 연구는 3～5장의 모델 · 실측 · 분석에 근거하여 Table 5의 시험항목 도입을 권고한다. 1순위 항목은 본 연구가 새로 제기하는 인접대역 채널외 신호 오절체 내성 시험이다. 이 시험은 본 연구의 벤치 절차(3.2절)를 그대로 표준화할 수 있어 도입 비용이 낮다. 본 권고 시험항목은 합격기준(예: 채널외 신호가 일정 전력 이하일 때 오절체 · 중계 차단이 없을 것)을 결과 기준으로 규정할 뿐, 특정 구현방식(아날로그/디지털, 본 연구 제안 구조 포함)을 전제하거나 요구하지 않는다. 어떤 기술이든 동일한 성능기준을 충족하면 된다. 성능 기준이 구현 방식에 중립적임에도 본 연구가 4장의 특정 구조를 함께 제시한 것은, 우선 실현가능성을 입증하기 위해서이다. 합격기준이 달성 불가능한 규제가 아님을 보이기 위해서는 이를 충족하는 구조가 적어도 설계 · 해석 수준에서 존재함을 보여야 하며 채널 선택형 구조의 상용 수준 실현 가능성은 해외 Class A 장비의 사례로도 뒷받침된다(2.5절). 아울러 설계변수

**Table 5.** Proposed Supplementary Test Items for the Type-Approval and Inspection Framework (Design Draft)

| Proposed Test Item | Test Concept | Proposed Pass/Fail Criteria | Regulatory Entry Point | Basis |
|---|---|---|---|---|
| Off-Channel False-Switching Immunity (New, Top Priority) | Inject an Out-of-Channel Adjacent-Band Signal (e.g., ±1 MHz) With a Power Sweep and Check for False Path Occupancy / Call Blocking (Standardizing the Sec. 3.2 Procedure) | No False Switching or Relay Blocking for Out-of-Channel Signals at or Below −20 dBm[b] | Type-Approval / Performance-Certification Sub-Test; Completion Inspection | Proposed – Analytical (Sec. 5.2, Eq. (7), Table 3) |
| Adjacent-Channel Rejection | Simultaneous Injection of the Desired Channel With ±12.5 / ±25 kHz Interferers | ≥ 50 dB at ±12.5 kHz, ≥ 60 dB at ±25 kHz | Type-Approval Sub-Test | Proposed – ETSI EN 300 113 Receiver ACS Class (60 dB at 12.5 kHz)[21] |
| One-Way Delay | Input/Output Timestamp Measurement | Fixed Delay ≤ 5 ms | Type-Approval; Completion Inspection | Proposed - ≈ 1/6 of the 30 ms DMR Slot[9] |
| Digital (DMR) Compatibility | Repeated DMR Burst Injection, Then Measure SYNC-Lock Retention | ≥ 99% Retention in Representative Scenarios | Additional Test Linked to Conformity Assessment | Proposed – Operational Reliability Target |
| Uplink Noise & Spurious | Spectrum Observation at the Donor Side | No Rise in Donor-Side Noise Floor and No Spurious Emissions | Completion Inspection; Periodic Inspection | - |
| Oscillation / Feedback Stability | Verify Donor–Service Isolation and Oscillation-Monitoring Function | Isolation Margin ≥ System Max. Gain + 15 dB (Recommended) | Design Review; Completion Inspection | Adopted From AHJ (Authority Having Jurisdiction) /NTIA Practice[2,12] |
| Active RF Equipment Fault Monitoring | Verify Interlock of Power / Battery / RF Fault Monitoring | Normal Interlock of the Monitoring Signal to the Fire Receiver | Fire-Receiver Interlock Criteria | - |

b) The −20 dBm Example Criterion is Derived From the Analytical Calculation of Sec. 5.2 Under the Front-End Linearity Condition of Table 3, and May be Recalibrated Based on Field Interference Surveys When Institutionalized.

를 특정하기 위해서이다. 식(7)은 합격 여부를 지배하는 변수가 간섭 주파수에서의 선택도 A(Δf)임을 보이므로 제안구조는 제조사가 어떤 구현방식을 택하든 확보해야 할 설계방향(채널선택성)을 구체화하는 참조 설계의 역할을 한다. 즉 4장의 구조는 시험기준의 전제가 아니라 그 달성 가능성과 설계방향을 보이는 근거이다. 다만 예시 기준값 −20 dBm은 5장의 해석적 계산에서 도출된 값이므로, 제도화 시에는 현장 간섭 실태조사에 근거한 값으로 재설정될 수 있음을 부기한다. 나머지 항목은 미국 NFPA・UL・FCC 체계의 설계 논리[10-13]와 ETSI EN 300 113의 수신기 인접채널선택도 등급[21]을 국내 시험 가능 지표로 정리한 것이다. 이 권고표는 현행 법령의 조문이 아니라 제도화를 위한 설계형 초안이다.

### 6.3 제도화 경로와 설계・감리・점검의 연계

제도화는 2단계 접근이 적절하다. 1단계는 전파법상 적합성평가 체계를 유지한 채, 소방용 능동 RF 방사기기에 대하여 보충적 화재안전 성능시험(Table 5)을 부가하는 방식이다. 전자파 적합성과 소방 성능검정을 분리하되 상호 연동하는 구조로서, 기존 인증 제품의 지위를 부정하지 않으면서 신규 시험을 점진 도입할 수 있다. 2단계는 특정소방대상물용 무선통신보조설비에 한하여 오절체 내성・선택도・지연・SYNC 유지율을 준공검사와 정기점검의 계량항목으로 편입하는 것이다. 운영 측면에서는 설계 단계의 채널계획서・격리 계산서・허가채널 목록 제출, 감리 단계의 채널외 강신호 조건 정량시험, 자체점검 단계의 스펙트럼 분석기 기반 연 1회 정량시험과 층별 성능대장 기록이 함께 연계되어야 한다. 이러한 연계는 국내 선행연구가 요구한 계산서 기반 설계와 분석기 기반 성능검사의 연장선이다[7,20].

## 7. 결 론

본 연구의 핵심 기여는 전파법상 적합성평가를 통과한 장비라도 화재현장의 무전 신뢰성까지 담보되지 않는다는 제도적 공백을 실측으로 입증한 데 있다. 적합성평가를 완료한 상용 중계기가 채널외 신호 −79 dBm (75 kHz 이격 DMR 실신호)만으로 수신 기능을 상실한다는 사실은, 현행 인증이 전자파 적합성만을 규율할 뿐 절체 로직의 주파수 선택성을 검증하지 않는다는 구조적 한계에서 비롯된다. 이는 개별 장비의 결함이 아니라 제도 설계의 사각지대이며, 따라서 해법 또한 장비 교체가 아닌 시험 가능한 성능 기준의 신설에서 찾아야 한다. 이러한 관점에서 본 연구는 오절체를 커버리지가 아닌 절체 선택성과 burst 무결성의 문제로 재규정하였다는 학술적 의의

가 있다. 본 연구는 실측 가능한 정량 지표를 확립하고 이를 시험기준으로 구체화하였다. 오절체 내성이 검출 임계(수신감도)와 1:1로 상충하는 아날로그 구조에서는 임계 조정만으로 문제를 해소할 수 없으며, 본질적 개선 변수는 간섭 주파수에서의 선택도라는 점을 모델과 실측으로 확인하였다. 제안한 디지털 멀티채널 필터링 구조는 재방사 판단의 근거를 전력 임계의 초과 여부에서 유효 소방 채널의 존재 여부로 전환함으로써, 채널 래스터를 벗어난 신호를 전력과 무관하게 배제하도록 설계되었다. 해석적 분석은 이 구조가 수신감도를 희생하지 않고 등가 오절체 임계를 저지대역 감쇠량만큼 상승시키며, 인접 간섭의 소폭 억제만으로도 DMR SYNC 유지율이 비선형적으로 개선될 것으로 예측하였다. 다만 이 예측은 설계값에 근거한 해석적 계산으로서 실장 성능의 입증이 아니며, 그 검증은 향후 연구에서 수행할 예정이다. 제도적으로 본 연구는 본 벤치 절차를 표준화한 채널외 신호 오절체 내성 시험을 1순위로 하는 보충 시험항목과, 기존 인증 체계를 부정하지 않는 2단계 제도화 경로를 제시하였다. 특히 아날로그 생활무전기의 사용 종료(2026년 12월 31일)로 인접대역 간섭원이 재편되는 전환기라는 점에서, 시험 가능한 성능 기준의 도입은 시의성을 갖는다.

본 연구의 한계와 향후 연구 내용은 다음과 같다. 첫째, 벤치 실측은 상용 장비 1종을 대상으로 하였으며 임계 수치는 기종에 따라 다를 수 있으나 임계가 $P_{th} + A(\Delta f)$로 분해되는 구조는 반송파 검출 절체라는 아키텍처에 내재한다. 다기종 장비 및 관리용 무선 실신호 조건으로의 확장이 필요하다. 둘째, 5장의 성능 비교는 설계 수치에 근거한 해석적 계산과 필터 응답 시뮬레이션이며, 제안 장치의 실장 성능 실측을 포함하지 않는다. 셋째, SYNC 유지율은 비코히어런트 직교 4FSK 근사에 기반하므로 DMR의 비직교 CPFSK 정밀 성능을 대변하지 않는다. 후속 연구에서는 FPGA 기반 시제품의 실장 측정, 지하주차장・터널・고층 코어부 현장 실증, 권고 시험항목의 표준 시험절차서 구체화, 그리고 아날로그 무전 사용 종료 전후의 채널외 간섭 환경 변화 추적이 요구된다.

기호설명(Nomenclature)

$A(\Delta f)$: 이격 $\Delta f$에서 장비 전단이 제공하는 선택도, 감쇠를 양(+)으로 정의(dB)
$B_{eff}$: 채널선택필터의 등가 잡음 대역폭(Hz)
$C(n, k)$: n개에서 k개를 선택하는 조합의 수
$f_k$: k번째 간섭의 주파수 오프셋(Hz)
$f_s$: 표본화율(Hz)
$H(f)$: 채널선택필터의 기저대역 주파수 응답, $|H(0)| = 1$로 정규화
$i_{k(t)}$: k번째 채널외・불요파 간섭 신호
M: 변조 차수(4FSK이므로 M = 4)
MDL: 최소 검출 레벨(dBm)
N: 채널선택 FIR 필터의 탭 수
$N_0$: 잡음 전력밀도(W/Hz)
n(t): 잡음 신호
$P_b$: 비트오류율
$P_{false}(\Delta f)$: 오절체 발생 확률
$P_I(\Delta f)$: 이격 $\Delta f$의 간섭 신호 전력(dBm)
$P_{in}$: 수신 포트 입력전력(dBm)
$P_k$: k번째 간섭의 전력(W)
$P_s$: 심볼오류율
$P_S$: 필터 출력의 소망 신호 전력(W)
$P_{SYNC}$: 48-bit SYNC 워드의 검출(유지) 확률
$P_{th}$: 절체 판단의 전력 임계, MDL 설정값(dBm)
$P_{th,eq}(\Delta f)$: 등가 오절체 임계(dBm)
Pr[・]: 확률 연산자
r(t): 기저대역 등가 수신신호
s(t): 소망 소방 채널 신호
$SINR_{out}$: 필터 출력의 신호 대 간섭 및 잡음비
t: SYNC 상관 검출기의 허용 오류 비트 수
$\gamma_b$: 비트당 신호 대 잡음비
$\gamma_s$: 심볼당 신호 대 잡음비
$\Delta f$: 소방 채널 중심 주파수로부터의 주파수 이격(Hz)
$\tau_g$: FIR 필터의 군지연(s)

## References


1. Korea Ministry of Government Legislation, “Enforcement Decree of the Act on Installation and Management of Firefighting Systems” (2023).
2. R. J. Achatz, R. A. Dalke and J. J. Lemmon, “In-Building Radio Enhancement Systems for Public Safety”, NTIA Technical Report TR-11-480, U.S. Department of Commerce (2011).
3. NFPC 505, “Performance-Based Standards of Fire Safety for Auxiliary Radio Communication Systems” (2022).
4. NFTC 505, “Technical Standards of Fire Safety for Auxiliary Radio Communication Systems” (2022).
5. Ministry of Science and ICT, “Republic of Korea Frequency Allocation Table”, Ministry of Science and ICT Notification No. 2024-44 (2024).
6. Korea Ministry of Government Legislation, “Radio Waves Act”, Article 58-2 (Conformity Assessment of Broadcasting and Communications Equipment) (2024).
7. J. J. Park and D. M. Choi, “Improvement and Utilization of Auxiliary Radio Communication System”, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 23, No. 3, pp. 83-93 (2023). https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2023.23.3.83.
8. D. M. Choi, “A Study on the Problems and Improvement Methods of Auxiliary Radio Communication System for Firefighting”, Proceedings of 2022 Autumn Annual Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering, p. 33

(2022).
9. ETSI, “Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) Protocol”, ETSI TS 102 361-1 V2.6.1 (2023).
10. NFPA 1225, “Standard for Emergency Services Communications” (2022).
11. ANSI/CAN/UL 2524, “Standard for In-Building 2-Way Emergency Radio Communication Enhancement Systems” (2024).
12. Snohomish County 911, “In-Building ERCES Technical Criteria, Version 2.1”, Snohomish County, WA, USA (2024).
13. FCC, “Use of Signal Boosters”, 47 CFR §90.219, U.S. Federal Communications Commission (2023).
14. Honeywell (Gamewell-FCI), “Channelized Digital Class A and Class B BDA–Bi-Directional Amplifier System”, Data Sheet No. 9021-62042, Honeywell International Inc., USA (2020).
15. J. G. Proakis and M. Salehi, “Digital Communications”, 5th Edition, McGraw-Hill, New York, USA (2008).
16. LS Cable & System, “RF Feeder System–Auxiliary Radio Communication Facilities (ICS Oscillation Prevention)”, https://www.lscns.co.kr/kr/product/prod_view.asp?searchSeq=3059&searchCate=123 (n.d.).
17. F. J. Harris, C. Dick and M. Rice, “Digital Receivers and Transmitters Using Polyphase Filter Banks for Wireless Communications”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 51, No. 4, pp. 1395-1412 (2003). https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.809176.
18. F. Harris, E. Venosa, X. Chen and B. Rao, “Polyphase Analysis Filter Bank Down-Converts Unequal Channel Bandwidths with Arbitrary Center Frequencies”, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 71, pp. 481-494 (2012). https://doi.org/10.1007/s10470-011-9746-y.
19. Ministry of Science and ICT, “Technical Standards for Radio Equipment for Radio Stations Exempt from Notification”, Ministry of Science and ICT Notification No. 2026-10 (2026).
20. National Fire Agency, “Notification on Self-Inspection Matters of Firefighting Systems”, National Fire Agency Notification No. 2022-71 (2022).
21. ETSI EN 300 113, “Land Mobile Service; Radio Equipment Intended for the Transmission of Data (and/or Speech) Using Constant or Non-Constant Envelope Modulation and Having an Antenna Connector”, ETSI EN 300 113 V2.2.1 (2016).