

Chapter 8. Instrument Connections

산업계측 배선의 핵심: 설치에서 시험·진단까지

산업계측제어기술사 학습용 블로그 노트

이 장의 핵심

계측 신호의 신뢰성은 센서 정확도만으로 결정되지 않는다. **배선 보호, 노이즈 억제, 반사 관리, 광전송 품질, 시험·진단**을 하나의 연결 시스템으로 설계해야 한다.

1 용어 정의

1.1 배선과 기계적 보호

용어	정의와 용도
Cable (케이블)	도체와 절연체·외피 등으로 구성된 신호·전력 전달 매체. 여기서는 전기 케이블을 뜻한다.
Conduit (전선관)	전선·케이블을 내부에 수용하여 충격 등으로부터 보호하는 관.
Metal / PVC Conduit	금속관은 적절한 본딩·접지 시 차폐와 접지 경로에 기여한다. PVC 관은 내식성이 좋지만 도전성 차폐·접지 경로는 제공하지 않는다.
Cable Tray	다수의 케이블을 지지하고 포설 경로를 형성하는 구조물.
Wire Duct	제어반 내부의 고정 배선을 정리하고 보호하는 채널.
Wire Loom	전선을 묶고 보호하는 유연한 슬리브·나선형 보호재 등. 가동부는 별도로 케이블의 굴곡 수명과 여유 길이를 고려한다.

1.2 노이즈와 전송선로

정전결합 (Capacitive Coupling) 도체 사이의 기생 정전용량을 통해 전압 변화가 잡음 전류로 결합하는 현상.

유도결합 (Inductive Coupling) 신호선 루프를 통과하는 자속이 변하면서 유도전압이 생기는 현상.

차폐 (Shield) 도전성 외피를 이용하여 전기장 결합 등을 줄이는 방법. 효과는 접속 방식과 주파수에 좌우된다.

꼬임쌍 (Twisted Pair) 두 선을 꼬아 유효 루프 면적과 외부 자기장에 의한 차동 잡음의 누적을 줄이는 구조.

집중정수 / 분포정수 모델 전파 지연을 무시하는 회로 모델 / 선로를 따라 분포한 저항·인덕턴스·정전용량·컨덕턴스를 고려하는 모델.

특성 임피던스 Z_0 선로에서 한 방향으로 진행하는 전압파와 전류파의 비. 케이블의 직류 저항과 구별한다.

종단 (Termination) 선로 끝에서 적절한 임피던스를 제공하여 반사를 억제하는 처리.

HART / Fieldbus HART는 기존 아날로그 계장 루프에 디지털 통신을 중첩하는 방식이다. Fieldbus는 현장 장치의 디지털 통신망을 가리키며, 배선·종단 조건은 물리계층별로 다르다.

1.3 광섬유와 광계측

Optical Fiber / Galvanic Isolation 빛을 유도하여 전달하는 광섬유 / 회로 사이에 직접적인 도전 경로가 없는 전기적 절연. 광전송 경로는 접지 전위차의 전달을 피할 수 있다.

Multimode / Modal Dispersion 여러 전파 모드를 허용하는 광섬유 / 모드별 도착시간 차이로 펄스가 넓어지는 현상. 모드는 단순한 선 하나가 아니라 허용된 전자기장 분포이다.

Graded-index / Single-mode 코어의 굴절률을 반경에 따라 변화시켜 모드 간 지연 차이를 줄이는 구조 / 사용 파장에서 하나의 공간 모드만 전파하도록 설계한 광섬유.

Fabry-Perot Interferometry 두 반사면 사이의 다중 반사에 따른 간섭을 이용하는 측정 원리. 학습 사례에서는 사파이어의 광학적 두께 변화를 온도로 환산한다.

Fluorescence Quenching 산소 등 소광 물질에 의해 형광의 세기나 수명이 감소하는 현상. 용존산소 (DO) 측정에 이용한다.

Arc Flash Detection 아크의 강한 빛을 검출하는 방식. 분포형 광섬유 센서에서는 감광 구간의 광섬유가 빛 수집과 전달을 담당한다.

광손실 시험 / OTDR 광원과 파워미터로 링크 전체 손실을 측정하는 시험 / 광펄스의 후방산란·반사를 시간에 따라 분석하는 광 시간영역 반사계.

2 용어 간 관계

2.1 설치 위치와 보호 수단

대표적인 연결 경로는 다음과 같다. 실제 배치와 보호 방식은 설치 환경에 맞춘다.

배선의 흐름

제어반 내부의 Wire Duct → 단자대 → 장거리 경로의 Cable Tray → 현장 인입부의 Conduit → 계측기.
문 등 가동부에는 유연한 보호재와 함께 굴곡·인장에 대한 대책을 적용한다.

2.2 노이즈의 발생 원인과 억제 원리

$$i_n = C_m \frac{dV}{dt}$$

정전결합: 전압 변화와 상호 정전용량

$$e_n = -\frac{d\Phi}{dt}$$

유도결합: 루프를 관통하는 자속 변화

	주요 결합	대표 대책	억제 원리
C_m 은 결합 정전용량, Φ 는 신호선 루프의 자속이다.	전기장에 의한 정전결합	Shield	전기장 결합 감소
	자기장에 의한 유도결합	Twisted Pair	루프 면적 감소·유도전

두 대책을 결합한 **Twisted Shielded Pair**가 계장 배선에 널리 쓰인다. 전력선과의 이격, 배선 경로, 본딩도 함께 고려한다. 차폐 접지를 무조건 한 점 또는 양단으로 고정해서 암기하지 않는다.

2.3 전파시간, 반사, 종단

$$t_d = \frac{L}{v}, \quad t_d \ll t_r \Rightarrow \text{집중정수 근사}, \quad t_d \sim t_r \Rightarrow \text{전송선로 효과 중요}$$

L 은 선로 길이, v 는 전파속도, t_r 은 신호 상승시간이다. 판단 기준은 데이터 속도만이 아니라 **실제 신호 변화시간과 선로 지연의 비**이다. 예를 들어 $L = 100 \text{ m}$, $v = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$ 이면 편도 지연은 $0.5 \mu\text{s}$ 이다.

$$\Gamma_V = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

종단 상태	부하 Z_L	Γ_V	전압 반사파
정합	Z_0	0	없음
개방	∞	+1	같은 극성
단락	0	-1	반대 극성

HART와 디지털 버스의 연결

HART는 비교적 느린 신호 변화를 이용하므로 일반적인 계장 배선에서 전파 지연의 영향이 작다. 다만 루프 임피던스와 케이블 정전용량 등의 조건은 충족해야 한다. 전송선로 효과가 중요한 디지털 버스에서는 규정된 케이블과 종단 방식으로 반사를 억제한다. **느린 신호란 전파속도가 느리다는 뜻이 아니다.**

2.4 광섬유의 모드와 분산

구분	도착시간 차이의 원리	모드 분산
Step-index multimode	균일한 코어 굴절률에서 모드별 경로 차이가 지연 차이를 만든다.	상대적으로 큼
Graded-index multimode	외곽의 낮은 굴절률로 속도를 높여 긴 경로의 지연을 보상한다.	감소하지만 잔류 가능
Single-mode	여러 공간 모드 사이의 지연 차이 자체를 없앤다.	모드 간 분산 없음

$$v \approx \frac{c}{n}, \quad \text{굴절률 분포 조절} \Rightarrow \text{모드별 도착시간 차이 감소}$$

이는 기하광학적 직관이다. 정확한 펄스 지연은 군속도로 해석한다. **단일모드에서도 색분산·편광모드 분산은 남을 수 있다.**

2.5 광섬유: 전달 매체인가, 센서인가?

학습 사례	실제 감지 요소	광섬유의 역할
Fabry-Perot 온도	사파이어 디스크	입사광·반사광 전달
형광식 용존산소	형광 감응층	여기광·형광 전달
분포형 아크 검출	감광용 광섬유 구간	빛 수집과 전달

온도 측정의 인과관계는 $T \rightarrow n(T)$, $\ell(T) \rightarrow n\ell \rightarrow$ 간섭 변화이다. 즉, 광섬유가 쓰였다는 사실만으로 광섬유 자체가 감지 요소라고 판단하면 안 된다.

2.6 전체 손실과 결합 위치

$$A_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \right), \quad d = \frac{v_g \Delta t}{2} = \frac{c \Delta t}{2n_g}$$

A_{dB} 는 양수로 표현한 손실, Δt 는 왕복시간, n_g 는 군굴절률이다. 광원·파워미터는 기준을 설정하여 전체 삽입손실을 측정한다. 출력/입력 전력비가 -4 dB이면 손실은 +4 dB이다.

두 시험의 역할

광원 + Power Meter: 얼마나 손실됐는가?

입·출력 전력 비교만으로는 손실 발생 위치를 구분할 수 없다.

OTDR: 어디에서 어떤 이벤트가 나타나는가?

짧은 광펄스 → 반사·후방산란 → 왕복시간 → 거리. 반사 피크·손실 단차·종단 등을 분석하여 접속부나 단선 등의 후보를 추정한다. 사각지대와 공간 분해능 때문에 모든 결함의 원인을 단정할 수는 없다.

3 스토리에 따른 내용 정리

3.1 먼저, 신호가 지나갈 길을 만든다

현장 계측기에서 제어반까지의 연결은 기계적으로 안정적이어야 한다. Tray로 지지하고, Conduit로 보호하며, Duct로 정리한다. 배선 정돈성은 외관뿐 아니라 점검성·오결선 예방·장기 신뢰성을 위한 조건이다.

3.2 길이 만들어지면, 주변 노이즈를 줄인다

VFD와 전력선 주변에서는 빠른 전압·전류 변화가 계장 신호에 결합할 수 있다. 정전결합에는 차폐, 유도결합에는 꼬임쌍을 중심으로 대책을 세우고, 이격과 접속 상태까지 확인한다. 핵심은 **잡음의 유입 경로를 끊거나 약하게 만드는 것**이다.

3.3 신호가 빨라지면, 케이블을 전송선로로 본다

느리게 변하는 아날로그 신호에서는 전파 지연을 무시할 수 있지만, 짧은 상승시간의 신호는 선로 위치마다 전압이 달라질 수 있다. 임피던스 불연속에서 생긴 반사는 링잉·오버슈트와 오검출을 유발하므로, 해당 통신 방식에 맞는 종단과 배선 구조로 관리한다.

3.4 전기적 연결의 부담을 줄이기 위해 빛을 쓴다

광섬유는 광신호 경로의 EMI 내성이 높고, 떨어진 장치 사이에 도전 경로를 만들지 않는다. 따라서 접지 전위차가 있는 구간에 유리하다. 단, 금속 외장·보강재가 있는 케이블은 그 금속부의 전기적 연결을 별도로 고려한다.

3.5 빛은 정보를 운반하고, 측정에도 쓰인다

사파이어의 광학적 두께로 온도를, 형광 소광으로 용존산소를 측정할 수 있다. 분포형 아크 검출에서는 광섬유 구간이 직접 빛을 모은다. 응용을 설명할 때는 **측정량 → 광학적 변화 → 감지 요소 → 신호 전달** 순서로 정리한다.

3.6 광전송에도 한계가 있으므로 시험으로 마무리한다

다중모드의 펄스 퍼짐은 굴절률 분포를 조절하거나 단일모드를 사용하여 줄인다. 설치 후에는 광손실 시험으로 링크 성능을 확인하고, OTDR로 이벤트 위치를 조사한다. 좋은 연결은 설치와 진단까지 포함한다.

기술사 답안용 압축 정리

계측 연결은 기계적 보호 → EMI 억제 → 전송선로 정합 → 광전송·센싱 → 시험·진단의 흐름으로 설명한다. 각 단계에서 문제 원인, 작동 원리, 대책, 확인 방법을 연결하면 단순한 용어나 열을 넘어 신뢰성 확보 방안을 제시할 수 있다.

작성 범위: 기존 Chapter 8 학습 대화의 블로그 요약을 재구성한 개념 노트.