

광파이버 센서를 이용한 유압실린더 스트로크의 원격 검출에 관한 연구

김 인 환* · 김 중 화**

A Study on the Remote Detection of a Hydraulic Cylinder Stroke Using Optical Fiber Sensors

I-H Kim* · J-H Kim**

Key words : Stroke Sensor(스트로크 센서), Remote Detection(원격 검출), Ceramic Plasma Coating(세라믹 플라즈마 코팅), Incremental Type Sensor(증분형 센서), Optical Fiber Sensor(광파이버 센서)

Abstract

In order to comprise a basic closed-loop control system for hydraulic systems it is necessary to detect the piston rod stroke of a hydraulic cylinder. There are many conventional type sensors which can detect the displacement of cylinders. However, they cannot reveal the original performance normally or they cannot be applied at all where the operating circumstance of cylinders is beyond specifications of sensors. Especially, for the purpose of detecting the strokes of cylinders mounted on heavy equipments, a special exclusive sensor must be used because the operating circumstances of heavy equipments are so severe that general purpose sensors cannot endure such circumstance as a shock and a residual vibration induced by rough works.

In this paper, an exclusive method for detecting the piston rod stroke for heavy equipments is suggested, which adopts a remote detecting technique using optical fiber sensors. Several experiments using the prototype are executed for verifying the effectiveness of the suggested method and the possibility of the accurate detection of stroke.

1. 서 론

산업현장이나 건설현장에서 사용되는 유압장비는 다른 장비에 비해 사용환경이 열악하고 충격이나 진동이 심하여 아직 자동화나 무인화가 미비한 상태이다. 이는 유압실린더의 스트로크를 측정할

* 진주산업대학교 기계설계공학과(원고접수일 : 2000년 12월)

** 한국해양대학교 기계·정보공학부

수 있는 전용센서의 개발이 뒤받침되지 않았기 때문이다.

중장비에서 요구되는 센서의 문제점은 사용환경과 작업환경을 견딜 수 있어야 한다. 항상 옥외에서 사용되고 굴삭작업이나 암반작업이 수반되는 유압 중장비의 사용환경은 매우 가혹하기 때문에 기존 센서들을 응용하여 스트로크를 측정하기 위해서는 센서를 보호하기 위한 하우징(housing)을 필수적으로 설계하여야 한다. 넓은 범위의 온도 사양은 열원(Heat source)을 이용하여 센서의 동작온도를 일정하게 유지하거나 온도보상 알고리즘을 이용하여 온도차이로 인한 비선형성을 보상할 수 있다. 그러나 중장비 작업 시 발생하는 진동이나 충격을 센서의 사양내로 완화시키는 것은 매우 어렵다. 그 이유는 굴삭기 등으로 작업할 때 발생하는 진동과 충격의 형태를 살펴보면, 1차적으로 버킷(Bucket)에 충격이 전달된 다음의 진동은 충격 이후에 발생하는 잔류진동(Residual vibration)의 성격이 매우 강하여, 하우징 등의 부수적인 보호수단을 강구하더라도 과도한 충격과 진동의 영향을 줄이는 데는 한계가 있기 때문이다^{[1][2]}. 따라서 중장비에 사용되는 유압실린더 전용의 센서는 이와 같은 문제를 해결할 수 있어야 한다. 피스톤로드 상에 비자성체로 스케일을 형성하고 피스톤 로드 가 이동될 때 마그네틱 센서(홀 소자)에서 감지되는 자기장의 포화상태를 처리하여 스트로크를 검출하는 방식을 택한 일본의 Kayaba^[1] 제품이나, 피스톤 로드 에 홈을 가공하고 크롬으로 채워 넣음으로써 크롬 깊이의 차이에 의해 마그네틱 센서에서 감지되는 자기장의 포화상태를 처리하여 스트로크를 검출하는 전용센서에 관련된 연구^{[3]-[6]}가 있으나, 이러한 방법도 마그네틱 센서 자체를 실린더에 직접 부착하여야 하기 때문에 과도한 충격과 진동이 인가될 때에는 여러 가지 문제점을 야기한다.

본 논문에서는 위에서 언급된 여러 가지의 문제점 특히, 넓은 동작온도 범위의 사용환경과 진동 충격에 대한 작업환경을 극복함과 동시에 열원이나 하우징과 같은 부수적인 설비가 필요 없는 간단하면서도 새로운 개념의 유압실린더 스트로크 검출방법을 제안한다. 제안하는 원격검출 방법은 광

파이버센서^[7]를 이용한 방법으로 실린더 상에서 발생하는 충격과 진동의 영향을 근원적으로 받지 않으며 대기와 직접 접촉되지 않기 때문에 유압중장비의 사용환경과 작업환경에 매우 강인한 특성을 가지고 있다. 제안하는 방법의 유효성을 검증하고 원격검출의 가능성을 확인하기 위하여 실제 제작한 유압실린더와 데이터처리보드를 포함한 프로토타입(Prototype)을 이용하여 실험을 수행한다.

2. 유압실린더 스트로크 원격 검출방법의 제안

2.1 스트로크 원격 검출방법

유압실린더 피스톤 로드 의 스트로크를 검출하기 위하여 본 논문에서 제안하는 방법은 원격 검출 방법이다. 여기서 정의되는 원격 검출이란 피스톤 로드 의 스트로크를 직접 검출하면서도 검출소자 즉 센서를 유압실린더 상에 직접 부착하지 않고 유압실린더와는 별개의 곳에 위치시켜 스트로크를 검출한다는 의미로 사용된다. 서론에서도 언급한 바와 같이 중장비의 작업도중 발생하는 과도한 충격과 진동의 영향을 거의 받지 않으면서도 스트로크의 강인한 검출을 위해서는 센서를 실린더 상에 부착하지 않아야 하는 것이 필수조건이기 때문에, 제안하는 방법은 이와 같은 조건을 만족시킬 수 있도록 광파이버센서를 이용한 방법을 도입한다.

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 방법을 구현하기 위하여 필요한 스트로크 원격 간접검출 방법의 기본 구성도이다. 이를 구성하는 필수요소로는 피스

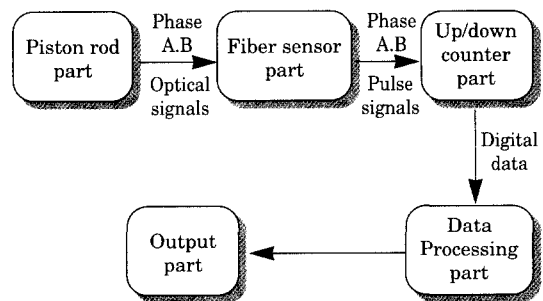


Fig. 1 Basic configuration of remote detection method

톤로드부(Piston rod part), 광파이버 센서 증폭부(Fiber sensor amplification part), 업/다운 카운터부(Up/down counter part), 데이터 처리부(Data processing part), 출력부(Output part) 등이 있으며 각 부에 대해서는 다음 절에서 설명한다.

2.2 피스톤 로드부

본 논문에서는 피스톤 로드 스트로크의 검출수단으로 빛을 이용한다. 따라서 로드에서 조사되어 반사된 빛의 명암 차이에 의해 스트로크를 측정할 수 있도록, 서로 다른 색을 가진 물질을 이용하여 일정한 간격으로 피스톤 로드를 처리하여야 한다. 또한 유압실린더 로드로서의 기능을 가지도록 표면조도 및 표면강도, 경도를 유지할 수 있어야 하며 동시에 인장이나 압축 또는 굽힘에 충분히 견딜 수 있도록 처리해야 한다. 본 논문에서는 기계적으로 흠을 판 후, Al계열의 세라믹과 Ti계열의 세라믹을 플라즈마 코팅함으로써 피스톤 로드의 기능을 가지도록 하였으며, 1mm 간격으로 스케일 처리하였다. Fig. 2는 제안하는 피스톤로드 스케일 처리과정이다.

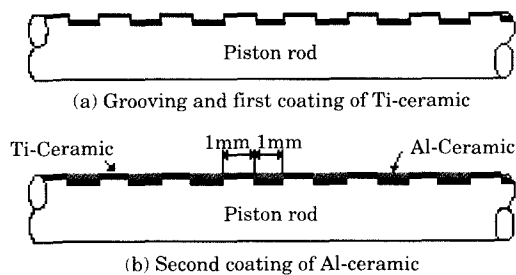


Fig. 2 A scaling process of piston rod

2.3 광파이버센서부

2.3.1 광파이버 헤드의 부착

피스톤 로드의 스트로크 원격검출 수단인 광파이버를 사용하기 위해서는 실린더 상에 광파이버의 헤드를 삽입할 수 있는 구조를 설계해야 한다. 이 때 실린더와 피스톤 로드 사이의 상대변위를 정확히 측정하는 것이 바로 스트로크의 측정이므로 실린더와 광파이버 헤드 사이에는 상대변위가 존재하지 않아야 하며, 특히 진동이나 충격이 실린더에 가해질 때, 미소 변위로 인한 오차가 발생하지

않도록 주의를 기울여야 한다. 또한 로드의 표면에 형성되어 있는 유압작동유 유막의 기화로 인해 광파이버 헤드 표면에 기름방울이 맺히지 않도록 해야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 광파이버 헤드 설치전후에 오일 시일을 설치함으로써 유막의 두께가 최소화되도록 하고, 그럼에도 불구하고 기화된 기름은 구멍을 통하여 배출되도록 하였다.

Fig. 3은 광파이버 헤드의 설치방법이며, 스케일 처리된 피스톤로드 스트로크의 양방향 검출을 위하여 두 쌍의 광파이버를 사용하였다. 증분방식으로 스트로크를 측정하기 위하여 A상 및 B상 두 광출력의 위상차가 90°가 되도록 광파이버헤드를 위치시키는 것이 매우 중요하고¹⁷⁾¹⁸⁾, 이것은 앰프의 감도조정 및 헤드의 설치와 밀접한 관계가 있다. 따라서 본 논문에서는 피스톤로드의 스케일을 1mm간격으로 처리한 후, 두 쌍의 광파이버를 0.5mm간격으로 위치시켜 A상 및 B상의 출력 파형이 90°의 위상차를 가지도록 함으로써 업/다운 카운트를 수행할 수 있도록 한다.

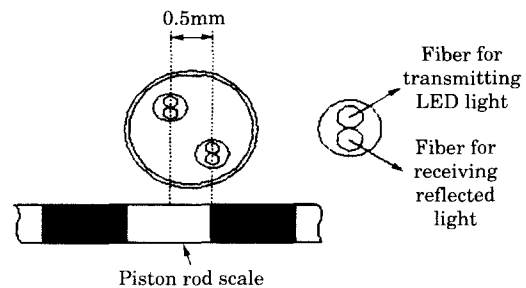


Fig. 3 Setting method of optical fiber heads

2.3.2 광파이버센서의 신호획득

① 발광 및 수광부

발광부는 빛의 감쇠를 줄이기 위하여 940nm의 적색 발광다이오드를 사용하고, 수광부는 증폭효율을 높이기 위하여 포토트랜지스터를 사용한다¹⁷⁾. 광파이버는 발광다이오드에서 생성된 빛을 광파이버헤드의 설치부분까지 전송하고 피스톤 로드 스케일에서 반사된 빛을 수광센서까지 전송하는 역할을 한다.

② 원격검출의 가능성

Fig. 4는 실험결과 얻은 광파이버 앰프의 출력을

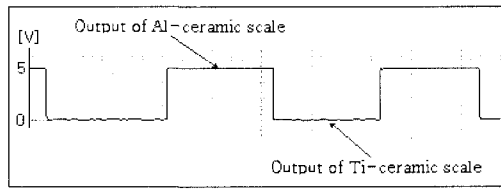


Fig. 4 Output from optical fiber amplifier for Al and Ti-ceramic scales

오실로스코프로 포착한 것이다. 이 그림은 Al 계열의 세라믹스케일에서 반사되는 광량과 Ti 계열의 세라믹스케일에서 반사되는 광량에 대한 수광센서의 출력전압을 감도 조정함으로써 파형의 폭이 일정하도록 파형정형시킨 결과이다. 이 때 수광센서의 출력이 코팅된 세라믹의 색깔 정도에 따라 조금씩 달라질 수 있으므로, 파형정형을 위한 문턱값(Threshold)은 광파이버 앰프에서 출력되는 구형펄스의 폭이 일정하도록 감도조정회로의 저항을 가변시켜 결정되어야 한다. 또한 앰프의 출력이 다른 두 개의 세라믹 스케일에 따라 구형펄스의 형태로서 이를 카운트하는 것은 피스톤로드의 스케일을 카운트하는 것과 동일하기 때문에 증분형태로 스트로크를 측정할 수 있다.

2.4 업/다운 카운터부

2.4.1 1/4분주에 의한 업/다운 카운트

Fig. 5는 세라믹 스케일에 대한 광파이버 증폭기

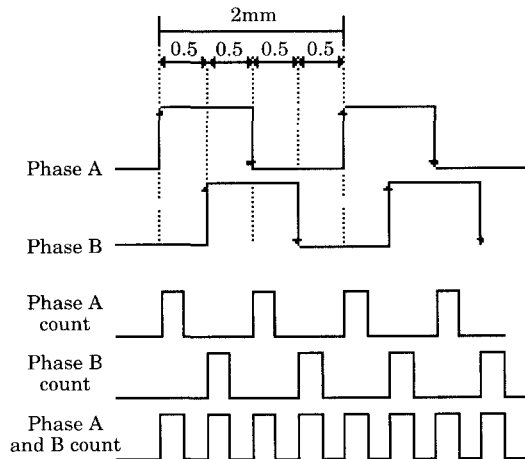


Fig. 5 Counting method of scales by 1/4 partitioning of one period

의 출력 펄스신호를 상승에지와 하강에지에서 각각 카운트함으로써 A상과 B상의 한 주기 즉 2mm 동안 총 4번의 카운트를 수행할 수 있는 1/4분주 방법¹⁾²⁾을 설명한 것이다. 따라서 기계적 가공의 제약으로 인하여 최소 1mm 간격으로 스케일된 피스톤로드의 스트로크 검출 정밀도를 0.5mm까지 향상시킬 수 있으며, 유압실린더에서 요구되는 보편적 정밀도인 1mm이하를 가질 수 있다.

2.4.2 업/다운 카운터

Fig. 6은 스트로크의 업/다운 카운트를 수행하기 위해 사용된 일본 NEC사의 PD4701의 내부블록 다이어그램이다. 이 칩은 하드웨어적으로 4분할 내삽을 수행할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 여기서 얻어진 데이터를 CPU에서 처리함으로써 양방향 스트로크를 측정할 수 있게 된다. 그리고 이 칩은 350ns의 펄스폭까지 카운트 할 수 있고 8비트의 데이터값을 low와 high로 나누어 두 번 카운트함으로써 12비트의 카운터 값을 얻을 수 있도록 설계되어 있다.

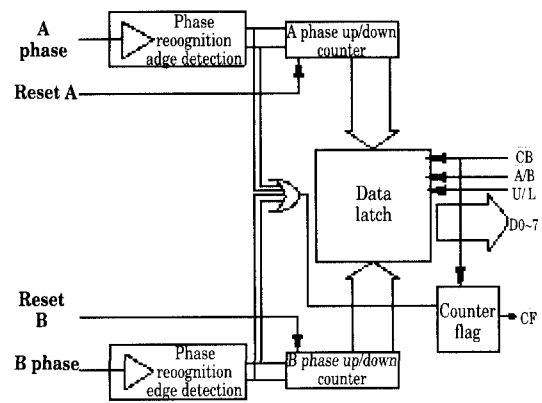


Fig. 6 Block diagram of up/down counter PD4701

2.4.3 스트로크의 양방향 검출과 업/다운 카운트의 가능성

Fig. 7은 두 쌍의 광파이버와 증폭기에 의해 출력되는 전압신호인 A상과 B상의 파형을 오실로스코프로 포착한 것이다. 광파이버 헤드를 0.5mm 간격으로 설치함으로써 A상과 B상이 90°의 위상차를 가지고 출력됨을 볼 수 있다.

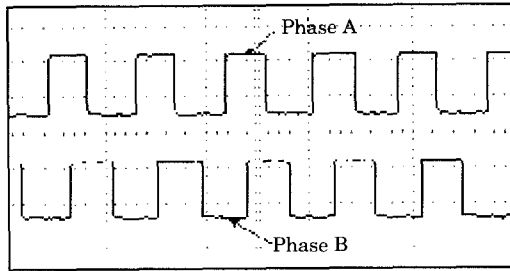


Fig. 7 Phase A and B signals from optical fiber amplifiers

2.5 80C196KC 중심의 데이터 처리부

Fig. 8의 80C196KC⁽¹⁰⁾ 중심의 데이터 처리보드는 카운터로부터 데이터를 받아 처리하여 LCD에

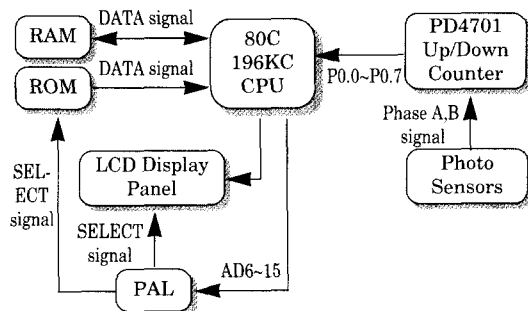


Fig. 8 Schematic diagram for data processing using 80C196KC

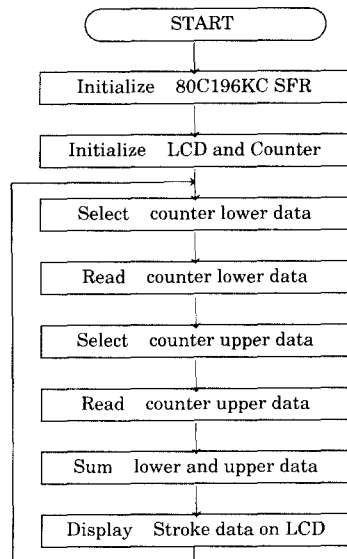


Fig. 9 Flowchart for data processing

디스플레이해 주는 역할을 하며 피스톤로드 스트로크 측정과정 전체를 제어하는 기능을 갖고 있다. Fig. 9는 이를 위한 실행순서도를 나타낸 것이다.

3. 제작된 프로토타입을 이용한 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 유압실린더 피스톤로드 스트로크 검출 방법의 유효성을 확인하기 위하여 실제로 제작된 프로토타입을 이용하여 실험을 수행한다. 이 때 측정되는 스트로크의 정확성을 비교하기 위하여, 실제로 많이 이용되고 있는 SANTEST사 제품인 LVDT GYMTC-11-A-600-24S-D를 비교기준으로 사용하며 그 주요사양은 Table 1과 같다.

Photo. 1은 앞에서 제시된 방법을 적용하여 실

Table 1 Main specifications of SANTEST LVDT

Articles	Specifications
Nonlinearity	0.05 % below
Resolution	0.05 % below
Hysteresis	0.01 % below
Vibration	6G maximum
Shock	20G maximum

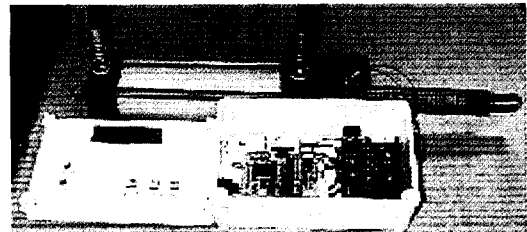


Photo. 1 Developed prototype for remote detection of stroke

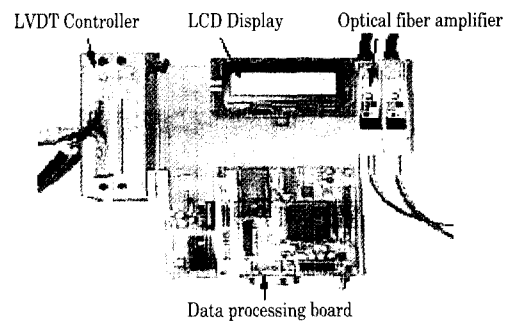


Photo. 2 Data processing board using 80C196KC

제로 제작한 유압실린더 스트로크 검출 프로토타입의 실물사진이다. Photo. 2는 제작된 마이크로프로세서 80C196KC 중심의 데이터 처리보드와 광파이버앰프, 비교대상인 LVDT의 컨트롤러를 보여 주는 것이다. LCD 판넬은 LVDT와 제안한 방법을 비교 검토할 수 있도록 측정된 스트로크 값을 10진수로 디스플레이해 준다.

센서의 유효성 검증을 위하여 수행되어야 하는 실험 중에서 중요한 평가항목은 센서의 정확도, 선

형성 및 반복재현성 검토에 대한 것이다. 특히 증분형태의 센서에 있어서는 펄스의 정확한 검출과 인식여부 및 반복재현성이다.

3.1 원격검출 스트로크 센서의 정확도 검토

Fig. 10는 제안한 방법의 유효성과 정확성을 입증하기 위하여 원격검출 스트로크센서의 출력과 상대기준으로 채용한 LVDT 출력을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 매 샘플링마다 두 출력이 잘 일치함을 볼 수 있다. 최소검출단위가 0.5mm이므로 오차는 최대 0.5mm 이내이어야 하며, 그림에서 보는 바와 같이 이 범위 내에 오차가 존재하므로 제시된 방법은 정확하게 펄스를 검출하고 있다.

3.2 양방향 반복정확도 검토

증분방식 센서의 단점은 펄스의 검출 오류로 인한 오차라고 할 수 있다. 특히 장시간 동작시킬 경우 검출되지 않은 펄스로 인한 오차가 누적되어 정확도에 심각한 영향을 미칠 수 있다. Fig. 11(a)는 스트로크센서의 반복정확도를 분석하기 위하여 피스톤 로드를 2만회이상 왕복 운동시켜 측정한

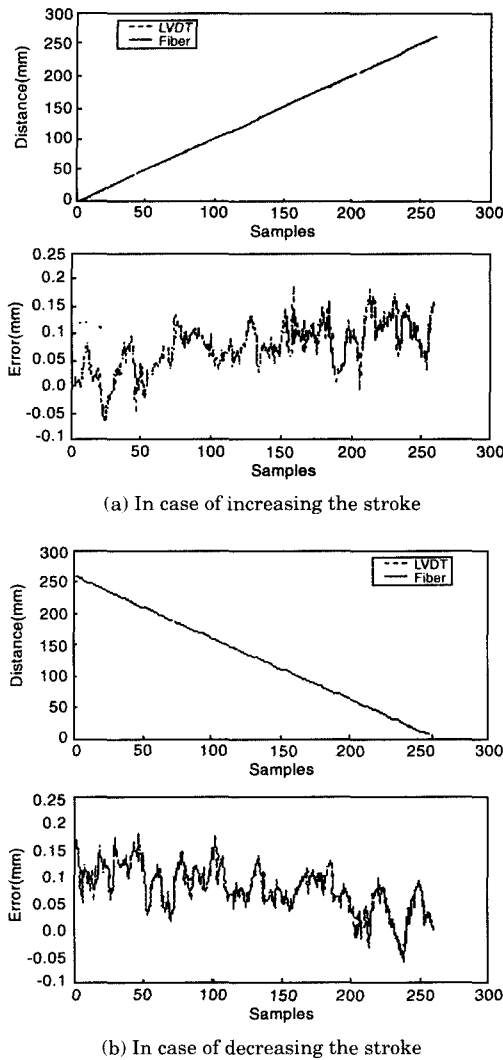


Fig. 10 Output comparison of the stroke sensor with LVDT

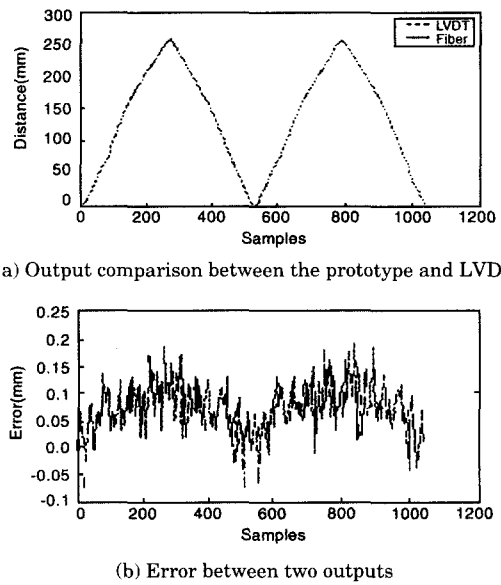


Fig. 11 Output comparison of the prototype with LVDT for the bidirectional repeatability

스트로크센서와 LVDT 출력의 일부분을 비교한 것이다. Fig. 11(b)는 스트로크센서와 LVDT의 출력 값 차이를 표시한 것이다. 오차의 범위가 $\pm 0.2\text{mm}$ 의 범위 안에 있는 것을 알 수 있다. 한편, 제작된 프로토타입은 0.5mm 의 분해능을 가지고 동작하므로 Fig. 11(b)의 오차는 프로토타입에서의 펄스 검출 오류로 인한 것이 아니라 LVDT 신호의 AD변환 과정에서 유발되는 오차와 LVDT 출력신호의 측정잡음, LVDT 자체의 비선형성 때문에 발생하는 오차라고 할 수 있다. 그 이유는, 만약 프로토타입에서 펄스 검출오류가 한 번만 발생하더라도 오차가 최소한 0.5mm 이상 발생하여야 하기 때문이다. (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 스트로크센서는 펄스의 검출오류 없이 정확히 스트로크를 측정하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 본 논문에서 제안하는 스트로크 측정 방법은 피스톤 로드 스케일에 대응하는 펄스를 정확히 검출함으로써 증분방식 센서가 가질 수 있는 펄스의 오검출로 인한 오차누적 요인을 배제할 수 있기 때문에 우수한 반복정확도를 갖고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 광센서와 광파이버를 이용한 유압실린더 피스톤로드 스트로크의 원격 검출 방법을 제안하였고, 프로토타입을 구현한 후 실험을 수행함으로써 원격검출의 가능성을 확인하였다. 이 용된 검출 수단은 빛이므로 유압작동유의 서지압 등으로 인해 발생하는 피스톤로드의 고속 순간속도에도 지연없이 반응할 수가 있기 때문에 펄스의 오검출이나 검출지연으로 생기는 오차의 누적을 배제시킬 수 있는 장점을 가지고 있으며, 광파이버 헤드만을 실린더상의 검출부위에 설치함으로써 중장비등의 작업도중에 발생하는 과도한 충격과 진동이나 온도변화가 심한 열악한 환경에서도 안정적으로 스트로크를 검출할 수 있는 강인성을 가지고 있다. 또한 피스톤로드 처리과정에서 세라믹 플라즈마 코팅을 기본으로 하기 때문에 내부식성을 높여 해수와 접촉되는 가혹한 환경에서도 사용 가능하다. 실험결과에서 보는 바와 같이 제시된 원격 간접검출 방법은 센서가 갖추어야 하는 정확성

과 반복 재현성 면에서 우수함이 입증되었으며, 피스톤로드 스케일을 1mm 단위로 가공함으로써 측정단위를 0.5mm 로 하였으나 스케일을 더욱 정밀 가공한다면 이보다 더 좋은 분해능을 가질 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 김종화, 배건성, "굴삭기 작업장치의 위치검출 센서개발," 삼성중공업(주) 연구보고서, 1992.
2. 김종화, 류길수, "굴삭기 전용 위치검출 센서의 개발에 관한 연구," 한국해양대 부설 산업기술연 구소 논문집, 제10집, pp. 61~76, 1992.
3. S. Y. Yang et. al., "Measuring System for Development Stroke-sensing Cylinder for Automatic Excavator," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 45, no. 3, pp. 379~384, June 1998.
4. S. Y. Yang et al, "Development of Digital Stroke Sensing Cylinder and Its Performance Evaluation," Robotica, vol. 14, no. 6, pp. 687~694, 1996.
5. M. C. Lee et.al., "On Development of Stroke Sensing Cylinder for Automatic Excavator," Proc. of the IEEE ISIE '95, vol. 1, pp. 363~368, 1995.
6. 김진근, 박민규, 이민철, "절대위치 검출형 유압 실린더 개발 및 성능 평가," '98한국정밀공학회지, pp. 329~333, 1998.
7. 全在昇 譯, 센서 인터페이싱 no. 4 光센서徹底活用篇, 機電研究社, pp. 30~36, 1989.
8. 全在昇 譯, 센서 인터페이싱 no. 3 메카트로닉스 센서活用篇 PART-Ⅱ, 機電研究社, pp.16-21, 1989.
9. 박선희, FA 센서 응용백과 2, 永進出版社, pp. 36-53, 1995.
10. 차영배, Micro Controller 80196, 다다미디어, 1997.

저 자 소 개



김인환(金仁煥)

1982년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1989년 동대학원 석사(제어공학). 1999년 한국해양대학교 제어계측공학과 박사과정 수료. 1982~1986 국방과학연구소 연구원. 1993년~현재 진주산업대학교 기계설계공학과 부교수. 관심분야는 적응추정론, 적응제어, 퍼지제어임. 당학회 증신회원.



김종화(金鍾和)

1981년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1985년 동 대학원 석사(제어공학). 1989년 동 대학원 박사(제어공학). 1990년~현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 부교수. 1996~1997 University of Wales, Cardiff 연구교수. 관심분야는 적응제어, 퍼지제어, 지능제어 등임. 당학회 증신회원 및 평의원.