

수문용 대형 유압실린더의 신뢰성평가기준개발

김형의* 정동수** 이용범** 이근호** 강보식** 윤소남** 성백주** 김도식** 조정대***
Kim, Hyoung-Eui* Jeong, Dong-Soo** Lee, Yong-Bum** Lee, Geun-Ho** Kang, Bo-Sik**
Yun, So-Nam** Sung, Bak-Ju** Kim, Do-Sik** Cho, Jeong-Dai***

* 한국기계연구원 산업기술연구부 책임연구원

** 한국기계연구원 산업기술연구부 선임연구원

*** 한국기계연구원 산업기술연구부 연구원

Abstract

본 연구사례는 댐 수문용 대형유압실린더(Piston Diameter :630mm, Stroke:8.3m, weight :30ton, Retraction Force:450ton)의 신뢰성평가를 위한 검토과정에서 제기된 문제를 보완하여, 평가규격을 정립하고, 시험장비를 구축하여, 초대형 유압실린더의 신뢰성 평가를 실시한 사례에 대하여 정리한 것이다.

1. 신뢰성평가 실시 배경 및 제기된 문제점

관련제품은 바닷가에서 간척사업용 배수갑문을 견인하는데 활용되는 대형 유압실린더로서, 본 논문은 신뢰성을 평가하기 위하여 고민하였던 과거상황을 정리한 것임.

수문용 대형유압실린더의 신뢰성시험에 있어서 제기된 문제점은 크게 5가지로 대별된다.

첫 째 : Size가 너무 대형(피스톤지름 630mm, 행정길이 8.3m, 중량 30ton)이라 일부시험은 Prototype 크기를 직접 적용시키지 못하고 축소모델을 활용하여야 한다는 사실.

둘 째 : 실린더의 Piston Rod 부위의 부식방지 효과를 위하여 기존 유압실린더의 표면코팅(Ni-Cr 이중코팅) 방식을 채택한 것이 아니라, 국내최초로 Ceramic Coating을 적용시켰기 때문에 본 기술과 관련된 평가기법을 신규로 제정하여야 하는 상황.

셋 째 : 관련제품은 4계절동안 대기환경과 동일한 조건에서 작동되기 때문에 내환경성 시험을 현지에 맞추어서 수행하여야 되는 조건.

넷 째 : 2개의 실린더가 Synchronizing되어 450ton의 수문을 견인하는 작업에 활용되기 때문에 현장에서 직접시험을 못하고 축소모델을 사용하여 실험실에서 제어특성을 확인하여야 되는 조건.

다섯째 : 관련 실린더는 작동속도가 극 저속 (3mm/sec)이므로 한 행정을 수행하는데 약 30분이 소요되므로 KS규격을 적용(내구성시험 300km)시켰을 때 내구성시험을 수행하는데 필요 되는 시간이 약 1년 4개월 정도가 소요됨. 따라서 작동수명조건을 일반산업용 유압실린더에 적용시킬 수 없고, 약 20년 동안 실제 작동되는 횟수를 예측하여 현실적인 수명시험을 적용시켜야 되는 조건.

상기에 제기된 문제점들을 해결하기 위하여 아래와 같이 평가기준을 설정하고, 관련신뢰성시험 평가장비를 설계 및 제작하였다.

2. 신뢰성 평가기준

이 규격은 배수갑문에 사용되는 피스톤형 대형 (피스톤지름 630mm, 로드지름 320mm, 행정거리 8215mm, 최대 견인력 578ton)유압 실린더의 성능, 설계 및 신뢰성에 대하여 규정한다.

① 무부하작동시험

무부하 작동은 시험을 위한 예비단계로서 최저작동압력으로 무부하 작동을 실시하였을 때, 실린더의 Stick Slip과 진동이 발생하지 않고 움직임이 원활하여야 하며, 실린더 내부 및 연결 배관내부에는 공기(Air) 빼기가 완료되어야 한다.

② 시동압력시험

실린더를 무부하 상태로 평행하게 설치한 후, 피스톤이 실린더 중앙에 위치하게 하고, 피스톤을 작동시키는데 요구되는 최대압력은 로드부는 6.74bar, 헤드부는 5.0bar를 초과하지 않아야 한다.

③ 내부누유시험

실린더 로드부에 255bar, 혹은 헤드부에 15bar의 압력을 15분간 가했을 때 누유로 인한 피스톤의 변위량은 0.4mm/min을 초과하지 않아야 한다.

④ 외부누유시험

외부 누유는 내구성시험을 하였을 때, 로드부의 와이퍼로부터의 누유를 피스톤이 이동거리 100m의 총량으로 나타내며, 허용 누유량은 0.001 d ml 이하이어야 한다(d : 로드 지름). 또한, 로드와 와이퍼 부를 제외한 어떤 장소에서도 외부로 누유가 있어서는 안 된다.

⑤ 내압성시험

실린더의 로드부에 320bar, 헤드부에 22.5bar의 압력을 2분간 가하였을 때, 나사부분의 헐거움, 튜브 및 배관부분의 영구변형, 부품의 파괴 등이 생겨서는 안 된다.

⑥ 수명시험

가속 수명시험을 하였을 때, 헐거움, 영구 변형, 이상 마모 등이 생기지 않고, 시험완료 후 성능을 충족 시켜야 한다. 신뢰성조건은 고장간 평균시간 (MTBF) 또는 고장간 평균 행정거리(MKBF)의 형태로 정립되며, 실린더의 고장간 평균 시간은 1일 2회 작동을 기준으로 25년 이상 이어야 한다.

⑦ 저온시험

배수갑문용 대형실린더와 동종의 재질과 동종의 부품으로 구성되며, 제작 (황삭, 열처리, 정삭, 측정, 조립 및 취급 등) 공정히 동일한 시험용 샘플실린

더(TESTING SAMPLE CYLINDER)를 로드지름 90mm, 행정거리 500mm로 제작하여(샘플 실린더), MIL-STD-810C, 방법 502.1, 절차에 따라 시험한다. 저온 시험중 실시한 성능시험에서 성능저하 및 이상이 없어야 하고, 다시 $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 상온에서 성능시험을 실시하여 성능저하 및 이상이 없어야 한다.

⑧ 고온시험

MIL-STD-810C, 방법 501.1, 절차에 따라 시험한다. 샘플 실린더를 환경시험 장비에 넣고 고온시험중 실시한 성능시험에서 성능저하 및 이상이 없어야 하고, 다시 $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 상온에서 성능시험을 실시하여 성능저하 및 이상이 없어야 한다.

⑨ 습도시험

샘플 실린더는 상대습도가 $94 \pm 4\%$ 에 이르기까지의 환경에 4시간 이상 노출시킨 후 성능시험을 실시하여 성능저하 및 이상이 없어야 한다. 샘플 실린더를 다시 상대습도가 $70 \pm 4\%$ 범위 내에 위치시키고 성능시험을 실시하여 성능저하 및 이상이 없어야 한다.

⑩ 염수분무시험

샘플 실린더의 세라믹 코팅 표면에 1000시간동안 염수 분무를 실시하여, 코팅 표면에 기포가 발생되지 않아야 하며, 본래의 표면 상태를 유지하여야 한다.

⑪ 코팅표면 긁힘(SCRATCH)시험

배수갑문용 대형실린더와 동종의 재질과 동종의 부품으로 구성되며, 제작(황삭, 열처리, 정삭, 측정, 조립 및 취급 등) 공정이 동일한 시험용 샘플 실린더를 로드지름 90mm, 행정거리 500mm로 제작하여, 15,000번 이상 작동하여 실린더의 실과 베어링, 코팅표면에 이상이 없어야 한다.

⑫ 벤딩시험 (BENDING TEST)

배수갑문용 대형실린더와 동종의 재질과 동종의 부품으로 구성되며, 제작(황삭, 열처리, 정삭, 측정, 조립 및 취급 등) 공정이 동일한 시험용 샘플 실린더를 로드지름 90mm, 행정거리 1000mm로 제작하여, 중앙부위에 2mm의 휨을 최소한 10,000번 가하여, 세라믹 코팅에 크랙(CRACKS)이 없어야 한다.

⑬ 횡하중시험 (SIDE LOAD TEST)

실린더 로드의 행정이 2550mm되도록 하여 고정한 후 한 방향의 끝 부위에 282KN의 힘 가하여 51MM의 편향이 되도록 하여 최소한 100번 실시하여, 코팅표면, 실린더의 실, 베어링에 손상이 없어야 한다.

⑭ 좌굴시험

실린더로드에 정격 및 과부하를 가하였을 때 로드는 좌굴응력을 초과하지 않아야 한다.

3. 시험장치 구성

① 기본성능 및 수명시험장치 구성

기본 성능 및 수명시험을 위한 시험 장치의 한 보기를 그림 1에 나타낸다. 또한, 부하로서 부하 실린더를 사용하는 경우에는 시험용 실린더의 실린더 힘을 정확하게 산출할 수 있도록 부하 실린더의 추력 효율을 구하여 두지 않으면 안 된다. 또, 압력계는 교정된 정확한 것이어야 한다.

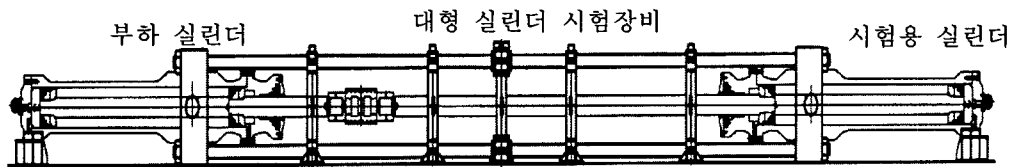


그림 1 부하 실린더를 사용하는 대형유압 실린더 시험장비

② 횡하중(Side Load) 시험장치 구성

횡하중 시험장비는 그림 2와 같이 구성한다.

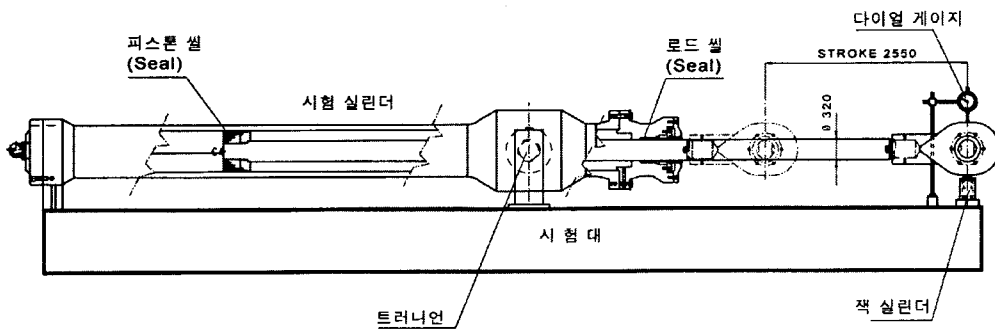


그림 2 대형유압 실린더 횡하중(Side Load)시험장비

③ 벤딩(Bending) 시험장치 구성

벤딩 시험장비는 그림 3과 같이 구성한다.

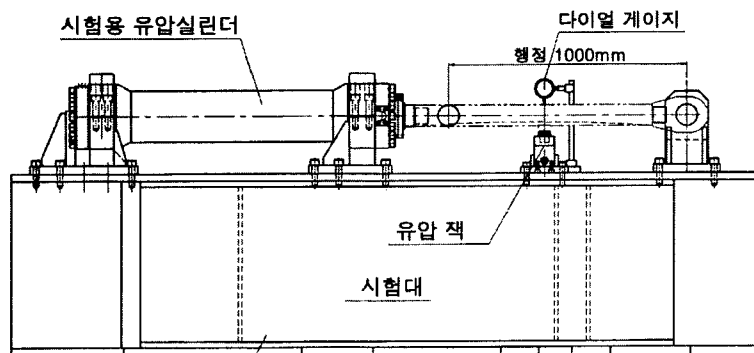


그림 3 대형유압 실린더 벤딩(Bending)시험장비

④ 코팅표면 긁힘(Scratch)시험장치 구성

긁힘 시험장비는 그림 4와 같이 구성한다.

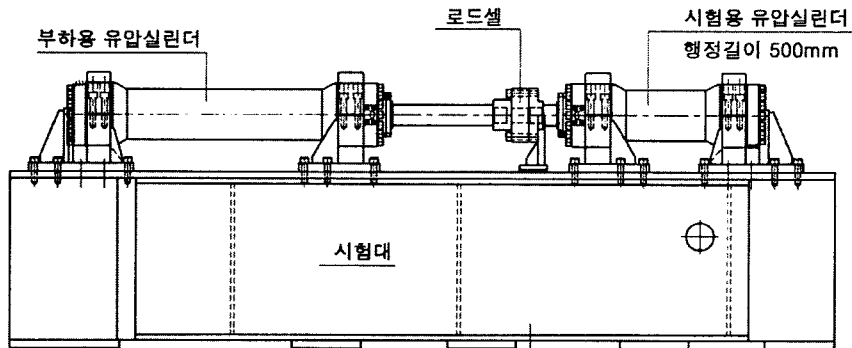


그림 4 대형유압 실린더 코팅표면 긁힘(Scratch)시험장비

⑤ 무부하 작동 및 성능시험회로 구성

시험 회로의 보기를 그림 5에 나타낸다.

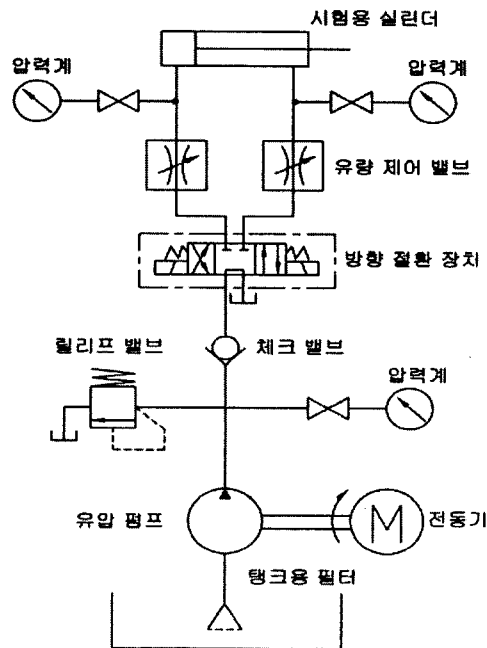


그림 5 무부하 시험회로

⑥ 부하 작동 및 수명시험회로 구성

회로의 보기를 그림 6에 나타낸다.

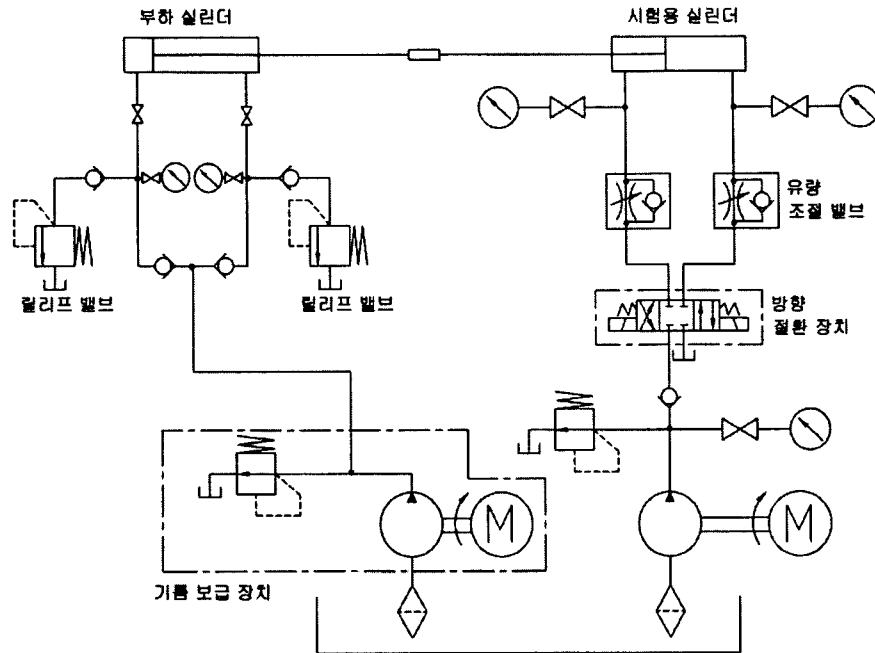
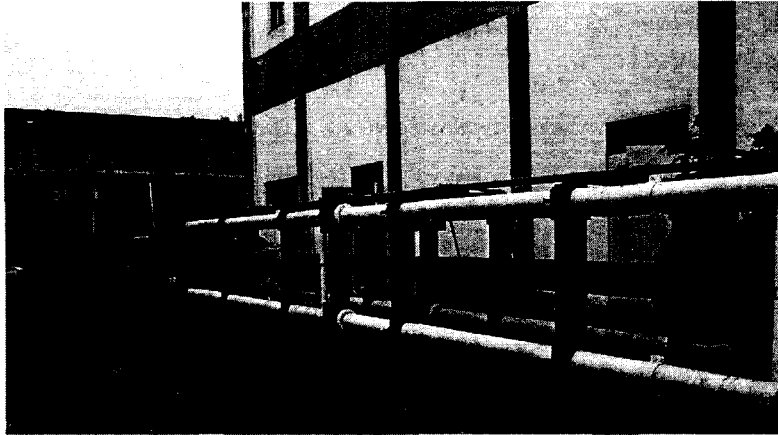


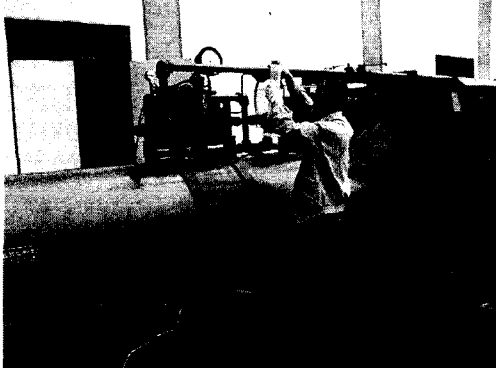
그림 6 부하 작동 시험

4. 시험결과



① 무부하 작동 시험

1. 시험 방법
<ol style="list-style-type: none"> 1) 테스트 실린더를 부하 실린더와 연결시킨다. 2) 부하제어밸브를 조작하여 테스트 실린더의 사용 압력을 최저 작동압력으로 설정한다. 3) 유압 작동유의 온도가 약$55\pm 5^{\circ}\text{C}$ 되도록 유압동력 발생장치의 온도를 설정하고, 테스트 실린더에 부하를 걸지 않고 전 스트로크에 걸쳐 30회 이상 길들이기 운전을 한다. 4) 전 스트로크에서 피스톤의 운전속도는 약3.07mm/s(신뢰성 평가기준 정상속도)로 운전을 한다. 5) 실린더 및 연결 배관내부에는 공기(Air) 빼기가 완료되어야 한다.
2. 시험 결과 : 실린더는 Stick Slip과 진동이 발생하지 않고 움직임이 원활하다.


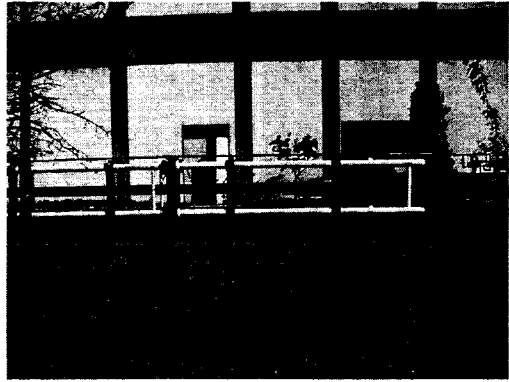

②시동 압력 시험

1. 시험 방법
<ol style="list-style-type: none"> 1) 테스트 실린더를 부하실린더와 분리시킨다. 2) 피스톤이 실린더 중앙에 위치하게 한다. 3) 실린더의 헤드부 및 로드부에 정밀한 압력계이지 (0~ 30 bar)를 설치한다. 4) 헤드측의 배관을 열고(Open) 로드부에 압력을 서서히 공급한다. 5) 헤드측 포트에서 누출되는 오일이 0.05cc/sec 이상(방울방울 떨어짐) 될 때의 압력을 계측하여 로드측 시동압력으로 기록한다. 6) 로드측의 배관을 열고(Open) 헤드부에 압력을 서서히 공급한다. 7) 로드측 포트에서 누출되는 오일이 0.05cc/sec 이상(방울방울 떨어짐) 될 때의 압력을 계측하여 로드측 시동압력으로 기록한다.
2. 시험 결과 : 헤드측 시동압력 2.1bar , 로드측 시동압력 4.7bar



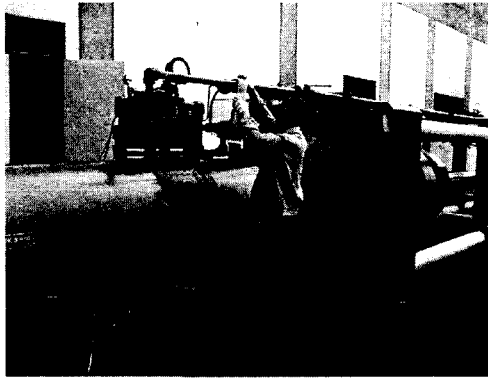
③ 내부 누유시험

1. 시험 방법	
<ol style="list-style-type: none"> 1) 실린더를 완전히 후진시켜 정지 되도록 한다. 2) 헤드부의 배관을 열고, 메스실린더로 누유량을 측정할 수 있도록 배관을 설치한다. 3) 로드부에 시험압력 255bar로 15분간 가한다. 4) 헤드부에서 15분 동안 나오는 누유량을 측정하여 로드부의 내부누유로 기록한다. 5) 실린더를 완전히 전진시켜 정지 되도록 한다. 6) 로드부의 배관을 열고, 메스실린더로 누유량을 측정할 수 있도록 배관을 설치한다. 7) 헤드부에 시험압력 15bar로 15분간 가한다. 8) 로드부에서 15분 동안 나오는 누유량을 측정하여 헤드부의 내부누유로 기록한다. 	
2. 시험 결과 : 헤드측 내부누유량 0.002mm/min, 로드측 내부누유량 0.008mm/min	
	
(로드부 누유시험)	(헤드부 누유시험)


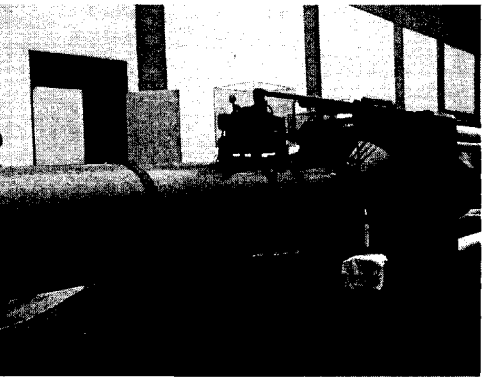
④ 내압성 시험

1. 시험 방법	
<ol style="list-style-type: none"> 1) 실린더를 완전히 후진시켜 정지 되도록 한다. 2) 로드부에 시험압력 320bar를 2분간 가한다. 3) 실린더를 완전히 전진시켜 정지되도록 한다. 4) 헤드부에 시험압력 22.5bar를 2분간 가한다. 5) 나사부분의 헐거움, 튜브 및 배관부분의 영구변형, 부품의 파괴, 외부누유 등의 이상유무 확인. 6) 내압성시험 후 이상이 없는 것을 유관으로 확인하고, 시동압력 시험 및 내부누유시험을 실시. 	
2. 시험 결과 : 헐거움, 튜브 및 배관부분의 영구변형, 부품의 파괴, 외부누유 등의 이상이 없음.	
	
(헤드부 내압시험)	(로드부 내압시험)

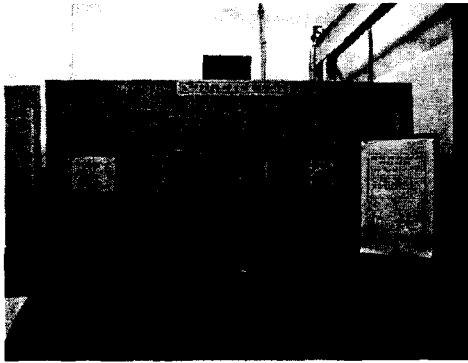
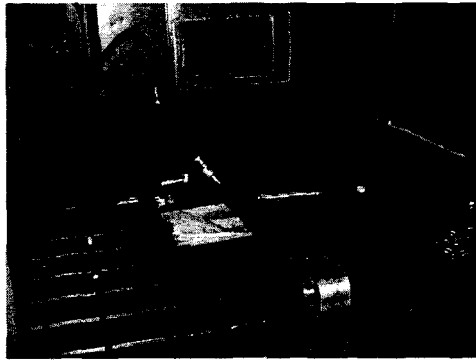
⑤ 내압시험 후 시동 압력 시험

1. 시험 방법	
1) 테스트 실린더를 부하실린더와 분리시킨다. 2) 피스톤이 실린더 중앙에 위치하게 한다. 3) 헤드측의 배관을 열고(Open) 로드부에 압력을 서서히 공급한다. 4) 헤드측 포트에서 누출되는 오일이 0.05cc/sec 이상(방울방울 떨어짐) 될 때의 압력을 계측. 5) 로드측의 배관을 열고(Open) 헤드부에 압력을 서서히 공급한다. 6) 로드측 포트에서 누출되는 오일이 0.05cc/sec 이상(방울방울 떨어짐) 될 때의 압력을 계측.	
2. 시험 결과 : 헤드측 시동압력 2.0bar , 로드측 시동압력 4.5bar	
	
(로드부 시동압력 시험)	(헤드부 시동압력 시험)

⑥ 내압시험 후 내부 누유시험

1. 시험 방법	
1) 로드부에 시험압력 255bar로 15분간 가한다. 2) 헤드부에서 15분 동안 나오는 누유량을 계측하여 로드부의 내부누유로 기록한다. 3) 실린더를 완전히 전진시켜 정지 되도록 한다. 4) 로드부의 배관을 열고, 메스실린더로 누유량을 계측할 수 있도록 배관을 설치한다. 5) 헤드부에 시험압력 15bar로 15분간 가한다. 6) 로드부에서 15분 동안 나오는 누유량을 계측하여 헤드부의 내부누유로 기록한다.	
2. 시험 결과 : 헤드측 내부누유량 0.003mm/min, 로드측 내부누유량 0.009mm/min	
	
(로드부 누유시험)	(헤드부 누유시험)


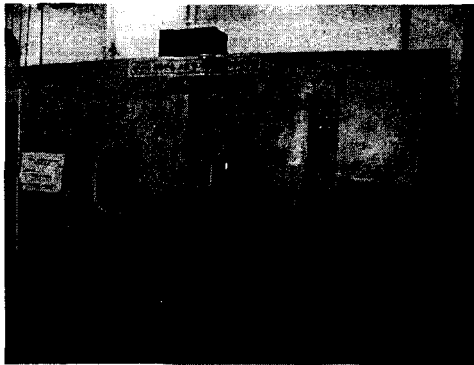
⑦ 저온 시험

1. 시험 방법 및 판정기준	
- 시험 방법 및 판정기준 : 저온 시험 규정 참조	
- 시험 온도 제어 방법 : MIL-STD-810C	
2. 시험 결과 (사진)	
	
<p>이상유무 기록 : 이상 없음</p> <p>로드부 시동압력; During시험: <u>3.2 bar</u>, After 시험: <u>3.0 bar</u> 헤드부 시동압력; During시험: <u>2.7 bar</u>, After 시험: <u>2.6 bar</u> 로드부 내부누유; During시험: <u>0.06 cc/min</u>, After 시험: <u>0.07 cc/min</u> 헤드부 내부누유; During시험: <u>없음 cc/min</u>, After 시험: <u>없음 cc/min</u></p>	

⑧ 고온시험

1. 시험 방법 및 판정기준	
- 시험 방법 및 판정기준 : 고온 시험 규정 참조	
- 시험 온도 제어 방법 : MIL-STD-810C	
2. 시험 결과 (사진)	
	
<p>이상유무 기록 : 이상 없음</p> <p>로드부 시동압력; During시험: <u>3.1 bar</u>, After 시험: <u>2.9 bar</u> 헤드부 시동압력; During시험: <u>2.5 bar</u>, After 시험: <u>2.5 bar</u> 로드부 내부누유; During시험: <u>0.05 cc/min</u>, After 시험: <u>0.07 cc/min</u> 헤드부 내부누유; During시험: <u>없음 cc/min</u>, After 시험: <u>없음 cc/min</u></p>	

⑨ 습도시험

1. 시험 방법 및 판정기준	
- 시험 방법 및 판정기준 : 습도 시험 규정 참조	
2. 시험 결과(시험 사진)	
	
<p>이상유무 기록 : 이상 없음</p> <p>로드부 시동압력; During시험: <u>3.1</u> bar, After 시험: <u>2.9</u> bar</p> <p>헤드부 시동압력; During시험: <u>2.5</u> bar, After 시험: <u>2.5</u> bar</p> <p>로드부 내부누유; During시험: <u>0.05</u> cc/min, After 시험: <u>0.07</u> cc/min</p> <p>헤드부 내부누유; During시험: <u>없음</u> cc/min, After 시험: <u>없음</u> cc/min</p>	

⑩ 수명시험

1. 시험 방법
<ol style="list-style-type: none"> 1) 시험용 실린더와 부하실린더를 연결한다. 2) 헤드부와 로드부에 시험압력이 가해지도록 부하제어밸브를 제어한다. - 헤드부 시험 압력 : 255bar, 로드부 시험 압력 25bar 3) 시험 피스톤 속도(7.67mm/sec)가 되도록 유량제어 밸브를 제어한다. 4) 행정거리의 90% ±5에서 방향을 전환한다. 5) 피스톤의 이동거리 50km를 실시한다. 6) 1회의 연속운전시간은 8시간 이상으로 하며, 시험중 이상(누유, 소음, 파손, 진동 등)이 없어야 한다. 7) 시험운전 중, 시험용 실린더의 각 부를 조정하지 않아야 한다.
2. 시험 결과
<ol style="list-style-type: none"> 1) 피스톤의 속도 : 수명 시험속도 7.67±0.7mm/s 2) 시험 압력 : 헤드부 255bar, 로드부 25bar 3) 행정 거리 : 행정거리의 90% ±5 (쿠션이 없는 실린더이므로 행정길이 말단 직전에서 방향을 전환한다) 4) 총 이동거리 : 50km

5. 관련 규격

- KS A 0401 표 준 수
- KS B 0054 유압·공기압 도면 기호
- KS B 0119 유압 용어
- KS B 0222 관용 테이퍼 나사
- KS B 2805 O 링
- KS B 2806 V 패 킹
- KS D 3503 일반 구조용 압연 강재
- KS D 3517 기계 구조용 탄소 강판
- KS D 3618 실린더 튜브용 탄소 강판
- KS D 3710 탄소강 단강품
- KS D 3652 기계 구조용 탄소 강재
- KS M 2113 공업용 윤활유 점도 분류
- KS M 2120 터 빈 유
- JIS B 2291 유압용 21MPa관 플렌지
- JIS B 2351 유압용 25MPa{250kgf/cm²} Seam less type pipe joint
- JIS B 8354: 1992 복동 유압실린더
- MIL-STD- 810C Environmental Test Method and Engineering Guidelines
- ISO 6022: 1981 Hydraulic fluid power-Single rod cylinders-Mounting dimensions - 250 bar (25000 kPa) series
- ISO6149-1 : 1993 Connections for fluid power and general use - Ports and stud ends with ISO 261 threads and O-ring sealing - Part 1 : Port with O-ring seal in truncated housing
- ISO6162 : 1994 Hydraulic fluid power - Four - screw split - flange connections for use pressures of 2.5 MPa to 40 MPa (25 bar to 400 bar) - Type I metric series and type II inch series
- ISO6164 : 1994 Hydraulic fluid power - Four - screw, one-piece square-flange connections for use at pressures of 25 MPa and 40 MPa (250 bar and 400 bar)
- ISO10762 : Hydraulic fluid power -Cylinder mounting dimensions - 10MPa (100bar) series