

수문용 대형 유압실린더의 신뢰성 평가

Reliability assessment test for heavy sluice gate of hydraulic cylinder

이 용 범* 현 동 수 ** 김 형 의 * 이 근 호* 정 동 수 *
Yong-Bum LEE* Dong-So HYUN Hyoung-Eui KIM Geun-ho LEE Dong-Soo JUNG

* 한국기계연구원 기계류부품신뢰성평가센터

** 한밭대학교 기계공학과

Abstract

These Study are for the development of the reliability assessment test code and test equipment and test procedures of the heavy sluice gate hydraulic cylinder.

Because there is no reliability test code for the heavy sluice gate hydraulic cylinder inside and outside of the country, the modified reliability test code is made reference for the related existing standards like as ISO, JIS, MIL, TUV, DIN, KS and etc.. In this study, the novel method is proposed to evaluate efficiency of the heavy sluice gate hydraulic cylinder on the loading conditions and established the conditions of the acceleration life test to reduce the testing time and cycles.

The testing equipments for life test, lode operating test, high and low temperature test and salt spray test have been established for 8 month, and the reliability tests are accomplished. The test results of the heavy sluice gate hydraulic cylinder which is produced and tested initially in Korea are satisfied the durability life cycle on the using conditions.

Key words: reliability, sluice gate hydraulic cylinder, life test. etc

1. 서 론

수문용 대형유압실린더는 한 개의 실린더 무게가 30ton이고 길이가 21m 이며, 행정거리(Stroke) 8.3m, 견인력이 최고 450ton으로 시험실린더와 부하실린더 및 시험장비의 무게를 합치면 120ton이 되고, 전체 길이가 35m인 대형구조의 Test Mechanism이다.

또한 최대시험 압력이 320bar이며, 실린더 내부에 채우는 Oil량이 30드럼(drum)이 소요 되고, 수명은 약 25년을 보증해야 하는 제품이다.

그러나 이와 같은 대형실린더를 국내에서는 처음으로 제작하였으며, 응용분야 마저 없어서 정확한 설계, 제작, 시험평가가 새롭게 개척을 요하며, 특히 국내는 물론 선진외국에도 이와 같은 대형 유압실린더의 신뢰성평가 기준이 제정되어 있지 않아서, 적합한 신뢰성기준개발에 많은 연구가 요구되었다.

본 대형유압실린더의 신뢰성평가에서는 무부하작동성, 누유, 내압성, 수명, 환경조건, 코팅표면 긁힘(Scratch), 벤딩(Bending), 횡하중(Side load), 로드인장응력시험 11종 15개 항목을 평가하였는데, 이와 같은 시험항목은 수문용 유압실린더는 바닷가 옥외에 설치되어 사용하고, 실린더 로드가 해수(염분)에 접촉을 하고 있는 특징을 감안하여 결정된 것이다.

신뢰성 평가기준의 개발은 기존의 규격인 ISO, KS, JIS, MIL, TUV, DIN 규격을 참고하여 제정하였으며, 부하작동시험, 수명시험 및 로드인장응력시험은 대형시험장비에 동일한 2개의 대형실린더를 1개는 Test 실린더로 사용하고, 다른 1개는 부하실린더로 사용하여 두 개의 실린더가 그림 2.3과 같이 좌우로 배치하여 시험하였다.

또한 저온 및 고온, 코팅표면 긁힘(scratch), 벤딩시험은 동일한 재료와 제조공정으로 제작된 축소모델 실린더를 사용하여 실시하였으며, 실린더 로드 표면 세라믹 코팅부분의 염수 분무시험은 Sample rod를 사용하였다.

이와 같은 시험은 본 신뢰성평가를 위하여 설계 제작한 견인력 450ton용 대형 Test mechanism과 중형실린더 시험장비, 염수분무시험장비, 내환경(저온 및 고온) 시험장비를 활용하여 병렬로 추진하였다.

본 논고의 구성은 2장에서는 신뢰성 평가 기준의 개발배경 설명과 중요 내용 및 구축된 시험장비를 소개하고, 3장에서는 수문용 대형유압실린더 신뢰성 평가 결과 및 시험 Data를 정리하였으며, 4장에서는 신뢰성 평가 수행 중 제기된 문제점을 제시하고, 신뢰성평가의 결론을 내리고있다.

II. 신뢰성평가기준 개발 및 시험장비 구축

2.1 수문용 대형실린더의 신뢰성평가 기준 및 평가 방법

수문용 대형실린더의 신뢰성 평가기준 개발은 먼저 Air 빼기 위한 정격 사용속도 30회 무 부하로 작동시키는 무 부하 작동시험과 실린더에 서서히 압력을 가하여 움직이기 시작하는 최소 작동압력을 확인하기 위한 시동 압력시험, Piston Seal에서 발생할 수 있는 내부 누유시험, 수명시험 후 Rod 부에서 발생하는 외부누유시험, 실린더 강도를 확인하기 위한 내압성시험, 시험실린더의 수명시험이 있다.

또한 내환경성(저온, 고온, 습도, 염수분무) 시험, 코팅표면 긁힘(scratch), 벤딩(bending), 횡 하중(side load), 로드 인장응력시험 등이 있으며 중요 내용은 표 2.1과 같다.

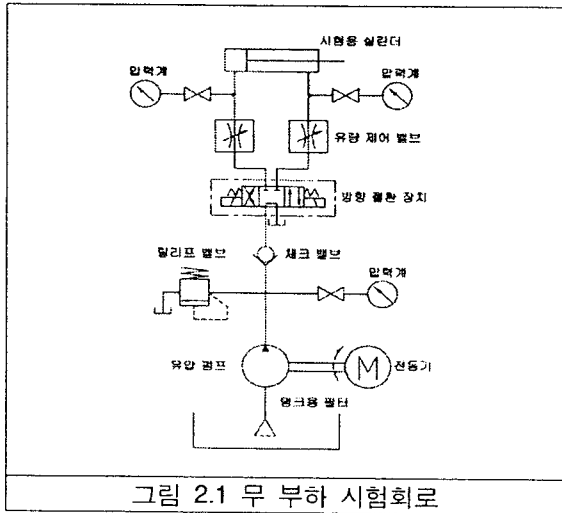
평가 항목	판정기준	평가 방법
무 부하 작동 시험	- 정격 사용속도30회 정상 작동 - Air 빼기완료 되어야 한다	- 공급압력 : 20bar - 길들이기 작동횟수: 30회 - 파스톤 평균속도 : 3.07mm/s
시동 압력 시험	실린더는 서서히 압력을 가했을 때 로드부: 6.04bar(13.9ton), Head부: 5.0bar(15.5ton). 이하에서 작동이 시작되어야 한다.	- 헤드측의 배관을 열고 로드부에 압력을 서서히 공급하며, 헤드측 포트에서 누출되는 오일이 0.05cc/sec 이상 (방울방울 떨어짐) 될 때의 압력을 계속하여 로드측 시동압력으로 기록 - 로드측의 배관을 열고 헤드부에 압력을 서서히 공급하며, 로드측 포트에서 누출되는 오일이 0.05cc/sec 이상 될 때의 압력을 계속하여 로드측 시동압력으로 기록한다.
내부 누유 시험	로드부: 255bar, Head부: 15bar를 공급하였을 때 내부누유로 인한 Piston의 변위량은 0.04mm/min을 초과하지 않아야 한다.	- 로드부에 압력 255bar로 15분간 가함. - 헤드부에서 15분 동안 나오는 누유량을 계속하여 로드부의 내부누유로 기록 - 헤드부에 압력 15bar로 15분간 가함. - 로드부에서 15분 동안 나오는 누유량을 계속하여 헤드부의 내부누유로 기록
내압 시험	로드부: 320bar, Head부: 22.5bar를 각각 2분 동안 공급하였을 때 외관상 이상이 없어야 한다.	- 로드부에 압력 320bar를 2분간 가함. - 헤드부에 압력 22.5bar를 2분간 가함. - 내사부분의 험거움, 튜브 및 배관부분의 영구변형, 부품의 파괴, 외부누유 등의 이상유무를 확인 후 기록 - 내압성시험 후, 시동압력 시험 및 내부누유 시험을 실시한다.
수명 시험	가속조건 50Km 수명시험에서 상능 시험을 실시하여, 수명시험 시작전의 초기 축정값의 성능(항 내부누유)이 10% 감소할 때까지를 수명거리로 기준하며, - 80% 신뢰수준에서 300km이상 - 90% 신뢰수준에서 272km이상	로드부: 255bar, Head부: 21.6bar의 부하를 걸고 수명시험속도 7.67mm/s로 50km를 시험하며, 누적거리15km 미다 성능을 검사한다.
외부 누유 시험	- 로드부:177bar, Head부:15bar의 부하를 걸고 정격속도로 100m 을 시험했을 때 로드에 묻은 누유량이 - 0.001dl(0.032ml)이하를 A종 - 0.001dl(0.033ml)초과 - 0.002dl(0.065ml)미만을 B종 - 로드외피에 부를 제외한 어떤 장소에도 외부 누유가 없어야함.	- 로드 표면은 이 물질이 없도록 한다. - 시험 파스톤 속도: 3.07 ± 0.3mm/s - 시험 압력: 헤드부 177bar, 로드부15bar - 행정거리는 행정거리의 90% 이상이고 총 이동거리는 100m 로 한다. - 로드부의 오일을 유포지에 흡입시켜 전자저울(5kg ± 0.1g)로 측정한다.
염수 분무 시험	KS-D-9502, JIS-Z-2371DIN50021 또는 ASTM B117-94등의 적용 규격을 만족시키는 시험조건을 시험장치에 설정하고1000시간 이상 유지한 후, 코팅표면에 기포가 발생하지 않아야 하고 본래의 표면상태를 유지하여야함.	- 세라믹 코팅된 로드를 시험장비에 넣어 1000 시간 이상 유지 - 용액 조성 : NaCl 5 ± 1%, - 시험액 비중 : 1.0268-1.0413 - 분무 액 PH : 6.50이하 - 시험조의 온도 : 35 ± 2℃ - 분무압 : 0.7-1.8kg/Cm ² - 노즐직경 : 0.508mm
코팅 표면 (Scratch) 시험	Sample 실린더로 로드부: 255bar, Head부: 21.6bar의 부하를 걸고 수명시험속도 7.67mm/s로 15,000번 시험한다.	- 샘플실린더를 로드90mm, Stroke 500mm으로 제작 - 시험실린더를 시험장비에 설치 - 시험장치에서 15,000번 이상 수명시험조건인 압력과 속도로 작동 시험을 한다.
벤딩 (Bending) 시험	Sample 실린더(로드90 Stroke 1000)로 로드 중앙부에 2mm의 힘을 10,000번 가한 후 벤딩 시험에서 코팅 표면에 손상(부식, 균열 등)이 없어야 한다.	- 시험실린더를 벤딩 시험장비에 설치한다. - 로드 중앙부위에 2mm의 힘을 10,000번 가한다.
로드 인장 시험	로드부에 정격압력(177bar) 및 극한 압력(255bar)에서 인장응력: 27.5 ± 5kgf/mm ² 이하	- 실린더를 전체행정거리의 95%까지 전진시킨 후 로드를 고정시키고, 로드부에 정격압력(177bar)극한압력(255bar)을 가한다. - 로드표면에 부착된 Strain Gauge로 로드의 인장응력을 검사
Side Load 시험	행정거리를 2.550mm에서 2.8ton의 횡력을 가하여 12mm의 편향이 되도록 100회 실시한 후 코팅표면, 실린더의 상, 베어링에 손상이 없어야 한다.	- 행정거리를 2.550mm되도록 시험 실린더를 전진시킨다. - 전자저울 부착한 후 중기를 사용하여 2.8ton의 횡력을 가하여 12mm의 편향이 되도록 100회 실시한다.

표 2.1 신뢰성평가기준 및 평가방법

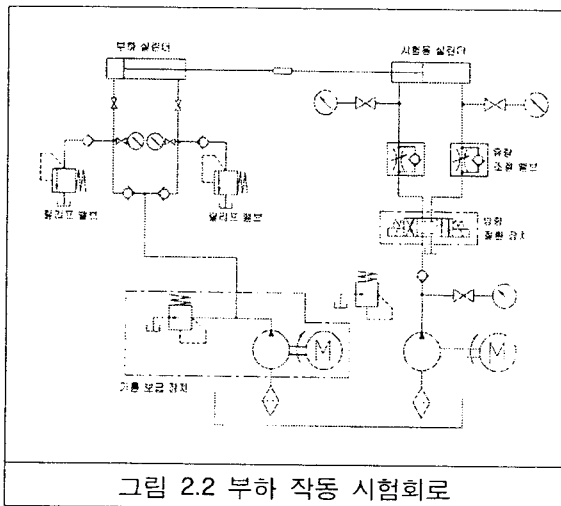
2.2 신뢰성 평가를 위한 유압회로

수문용 대형유압실린더의 신뢰성 평가를 위해서는 시험할 실린더를 1개를 단독으로 사용하여 실시하는 시험은 무 부하 작동시험,

시동압력시험, 내부 누유시험, 내압성시험, 내환경성(저온, 고온, 습도)시험 등이 있다. 이러한 시험항목을 평가하기 위해서는 그림 2.1의 유압회로에 의해서 실시가 가능하다.



또한 부하 작동시험, 수명시험, 코팅표면 긁힘(scratch), 로드 인장응력시험 등의 시험항목을 평가하기 위해서는 그림 2.2의 유압회로에 의해서 시험이 가능하다.



이때 부하용 유압실린더는 일반적으로 시험 실린더와 동일한 것을 사용하게 되며, 시험 실린더에 공급되는 유체에너지는 부하제어용 릴리프 밸브(relief valve)에서 마찰열로 변환된다. 또한 본 신뢰성평가에서와 같이 유압실린더의 로드부와 헤드부의 시험압력이 다른 경우에는 2개의 부하제어용 밸브를 필요로 한다.

2.3 시험장비 구축

수문용 대형 유압실린더의 수명시험을 위하여, 그림 2.3 및 사진2.1~2.2와 같이 구축하였으며, 특히 시험중 반복되는 큰 견인력에 시험장치가 내구성을 갖도록 4개의 Tie rod와 2개의 Side 프레임과 5개의 중간 보조 프레임을 설계하였다.

이러한 대형 Test mechanism을 이용하여 고온 다습한 여름철, 건조한 가을철 및 저온인 겨울철 등 3계절동안 장시간 수명시험을 실시하였다.

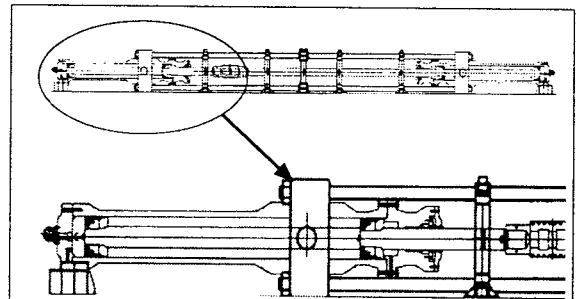


그림 2.3 대형유압 실린더의 수명시험장비

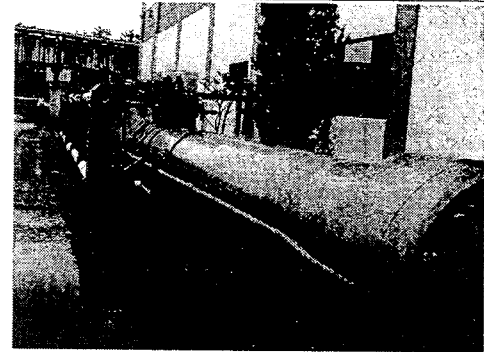


사진 2.1 수명시험 중(여름철)



사진 2.2 수명시험 중(겨울철)

또한 Sample실린더(축소모델)를 이용한 세라믹 코팅표면의 긁힘 시험장비는 그림 2.4 및 사진2.3과 같이 구축하여 병렬로 시험을 실시하였다.

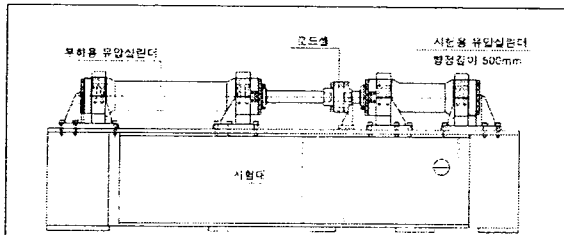


그림2.4 코팅표면 긁힘(Scratch)시험장비

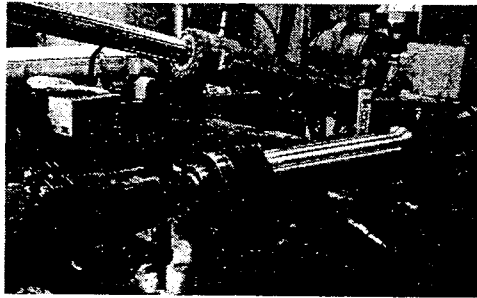


사진 2.3 코팅표면(Scratch)시험 중

세라믹코팅부분의 크랙유무와 Piston & rod Seal 및 Wearing의 강성을 파악하기 위한 벤딩(Bending) 그림 2.5 및 사진2.4와 같이 시험장비를 구축하여 시험을 실시하였다.

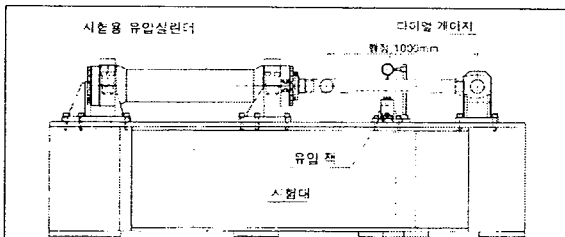


그림2.5 벤딩(Bending)시험장비

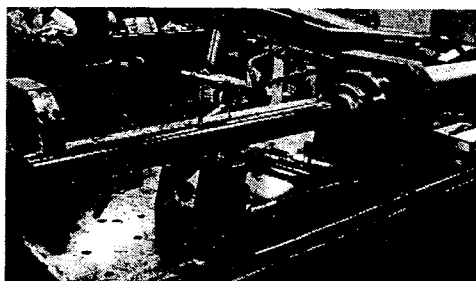


사진 2.4 벤딩(Bending)시험 중

세라믹 코팅표면 염수 분무시험장비의 구조는 수문용 대형유압실린더가 해수에 직접 접촉하기 때문에 필수적으로 이루어져야 하는 시험이다.

따라서 사진 2.5와 같이 시험장비를 구축하고, 1000시간동안 Salt spray test를 실시하였으며, 그 시험결과는 사진 2.6와 같이 만족할 만한 결과를 획득하였다.

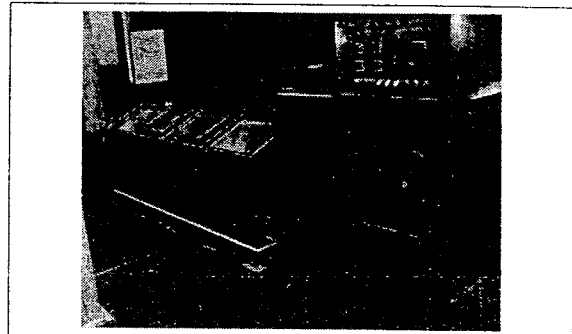


사진 2.5 코팅표면 염수 분무시험장비

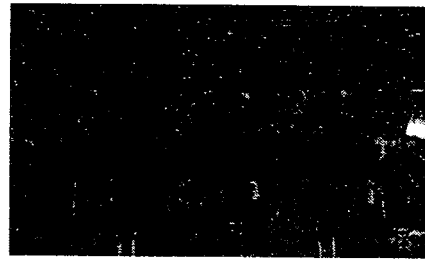


사진 2.6 염수 분무시험 후의 코팅로드

저온 내환경성 시험은 MIL-STD-810C 방법 502.1 절차1과, 고온시험 501.1 절차1에 의해서 신뢰성 평가기준을 결정하였으며, 사진 2.7의 저온 및 고온 환경시험장비에서 사진 2.8과 같이 저온(-30℃)시험을 실시하였다.

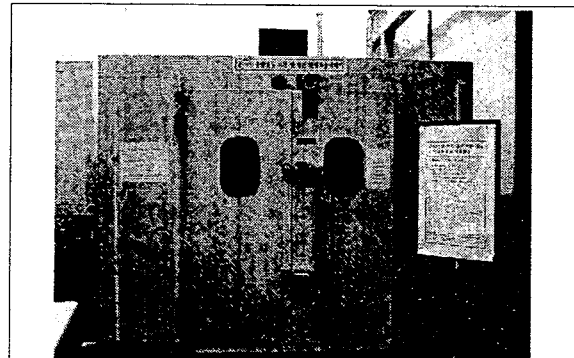


사진 2.7 저온 및 고온 환경시험장비

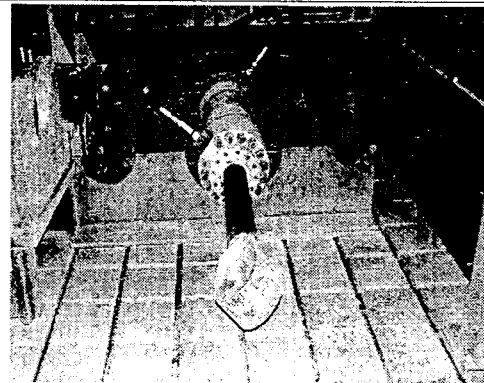
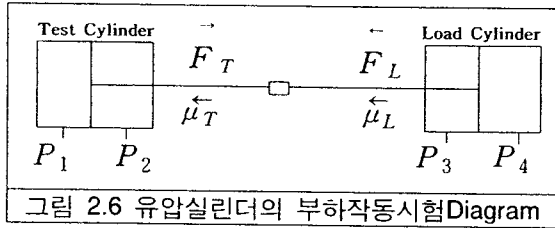


사진 2.8 저온(-30℃)시험중

2.4 대형실린더의 효율시험 방법



실린더가 전진 할 경우 그림 2.6의 부하작동시험 Diagram과 같이 표시할 수 있으며, 시험용 실린더와 부하용 실린더가 동일한 제품이므로 좌 우로 배치되어 작용할 때 동일한 힘이 작용되므로 마찰손실 또한 거의 같게되어 다음과 같이 작용압력과 마찰손실을 정리할 수 있다.

$$F_T = \frac{\pi D^2}{4} (P_1) - \left(\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} (P_2) + \mu_T \right)$$

$$F_L = \frac{\pi D^2}{4} (P_4) - \left(\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} (P_3) - \mu_L \right)$$

$$F_T = F_L$$

$$\mu_T \approx \mu_L \Rightarrow \mu_T + \mu_L = 2\mu$$

$$2\mu = \frac{\pi D^2}{4} (P_1) - \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} (P_2) - \frac{\pi D^2}{4} (P_4) + \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} (P_3)$$

$$\mu = \frac{\pi}{8} (D^2(P_1 - P_4) - (D^2 - d^2)(P_2 - P_3))$$

따라서 μ 는 Test Cylinder의 전진할 때의 손실이 되므로, 구하고자 하는 실린더의 전진할 때의 효율 η_E 는 아래와 같이 작용하는 압력을 계측하여 구할 수 있다.

$$\eta_E = \frac{F_{th} - \mu}{F_{th}} \times 100$$

$$= \left(1 - \frac{\mu}{F_{th}} \right) \times 100$$

$$= \left(1 - \frac{D^2(P_1 - P_4) - (D^2 - d^2)(P_2 - P_3)}{2(D^2 P_1 - (D^2 - d^2)P_2)} \right) \times 100$$

$$= \frac{D^2(P_1 + P_4) - (D^2 - d^2)(P_2 + P_3)}{2(D^2 P_1 - (D^2 - d^2)P_2)} \times 100$$

$$= \left(1 - \frac{\frac{\pi}{8} (D^2(P_1 - P_4) - (D^2 - d^2)(P_2 - P_3))}{\frac{\pi D^2 P_1}{4} - \frac{\pi(D^2 - d^2)P_2}{4}} \right) \times 100$$

$$\left(F_{th} = \frac{\pi D^2 P_1}{4} - \frac{\pi(D^2 - d^2)P_2}{4} \right)$$

또한 실린더가 후진 할 경우도 동일한 조건을 적용하여 μ_r 은 Test Cylinder의 후진할 때의 손실이 되므로, 구하고자 하는 실린더

의 후진할 때의 효율 η_r 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\eta_r = \frac{(D^2 - d^2)(P_2 - P_3) - D^2(P_4 + P_1)}{2((D^2 - d^2)P_2 - D^2 P_1)} \times 100$$

III. 신뢰성평가 결과

3.1 성능시험

무 부하 작동시험, 시동압력시험, 내부누유시험, 내압시험 등 성능시험을 실시한 결과 표 2.1 신뢰성평가기준을 충족하였으며, 평균 효율을 측정결과는 95.5%이었다.

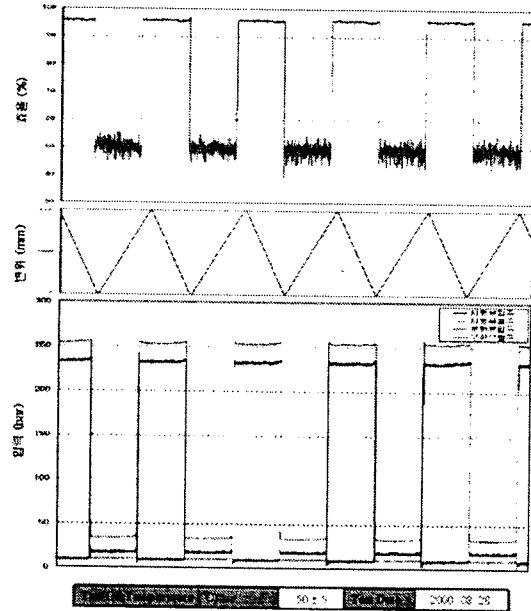


그림 3.1 초기성능시험 결과

3.2 수명시험

수문용 대형유압실린더의 수명은 정격압력(177bar)의 144%(255bar)와 정격속도(3.07mm)의 2.5배(7.67mm)인 가속 시험조건에서, 이동거리 10km마다 힘(Force) 및 성능시험(시동압력, 내부누유, 내압성시험 등)을 실시하며 성능저하를 측정하여 다음과 같은 신뢰도 보증거리를 확인할 수 있게 되었다.

초기성능시험에서 실린더의 출력 효율은 95.5%로 시작하여, 실린더의 시험누적 주파거리 64.34km에서의 출력효율이 94.2%로서 64.34km 주파동안 효율이 1.3%(95.5-94.2)감

소 하였으며, 내부누유는 규정치(9.25cc/min)를 만족(3.34cc/min)하였음.

상기 수명시험은;

- ① 정격압력(177bar)의 144%(255bar)와 정격 속도(3.07mm)의 2.5배(7.67mm)로 가속수명 시험을 수행하였고,
- ② Seal의 제작회사 독일의 M사의 의견은 1200km까지를 보증을 요구하는 회사에 제품을 공급하고 있다는 점.
- ③ 현재 동일 회사의 Seal을 사용하고 있는 P제철은 고장간 정비기간이 500km 이상 사용되었다는 점.
- ④ Seal의 최고허용 압력이 400bar인 제품으로, 본 실린더 정격사용압력 177bar의 약 2.25배로 되어있다는 점등을 감안하고, 유압실린더적용시스템의 안전계수가 일반적인 경우 약120%로 설계됨으로써, 수명시험 시작전의 초기 측정값의 성능(Force, 내부누유)이 10%감소될 때까지를 내구수명거리로 기준하면, 본 실린더의 사용가능거리는 494.92km ($\frac{10}{1.3} \times 64.34$) 이상으로 추정됨.
- ⑤ 실린더의 수명은 Weibull 분포를 따르는 것으로 가정하면, 신뢰도 보증거리는 아래와 같고, 확률밀도 함수는

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \text{ 이고,}$$

유압Cylinder의 경우 $\beta=2$ 로 추정됨.

- ⑥ 평균 수명을 추정하기 위해서 먼저 θ 를 추정하면

80% 신뢰수준에서 θ 의 lower bound 는

$$\left(\frac{2t^\beta}{\chi_{0.8}^2}\right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{2 \times 494.92^2}{3.22}\right)^{\frac{1}{2}} = 390$$

90% 신뢰수준에서 θ 의 lower bound 는

$$\left(\frac{2t^\beta}{\chi_{0.9}^2}\right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{2 \times 494.92^2}{4.6}\right)^{\frac{1}{2}} = 326$$

수명시험 결과 보증거리(평균 수명)는

$$\theta \Gamma\left(\frac{\beta+1}{\beta}\right) = \theta \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) \text{ 식에서}$$

80% 신뢰수준에서

$$390 \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = 390 \times 0.886 = 345Km$$

90% 신뢰수준에서

$$326 \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = 326 \times 0.886 = 288Km \text{ 임.}$$

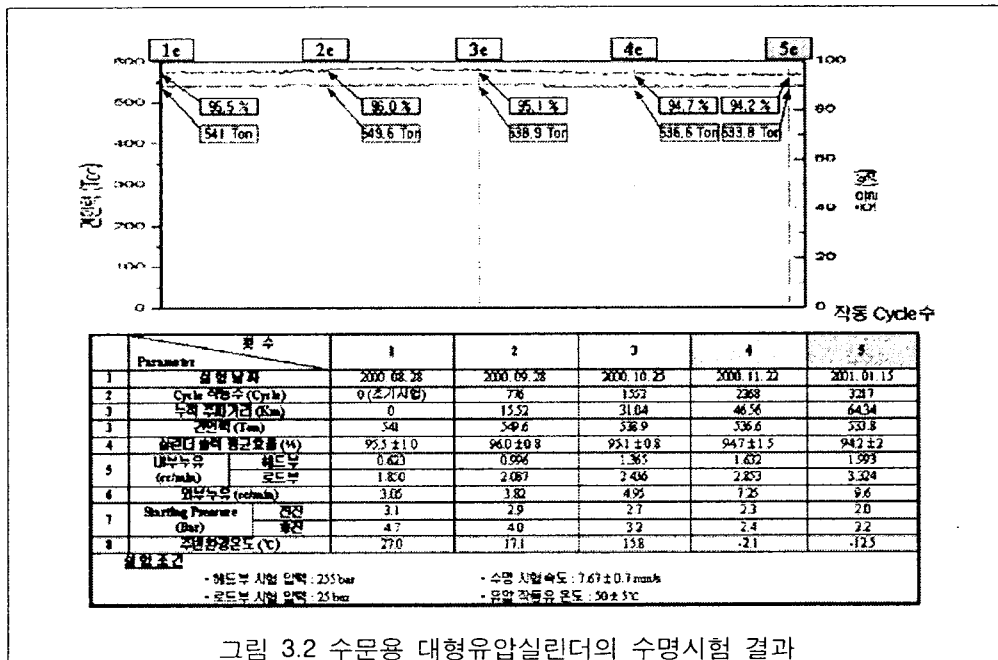


그림 3.2 수문용 대형유압실린더의 수명시험 결과

IV. 결론

본 연구는 국내에서 처음으로 실시한 수문용 대형유압실린더의 신뢰성 평가과정을 소개한 것으로서;

- 1) 신뢰성 평가기준 개발
- 2) 신뢰성 평가장비의 구축
- 3) 대형실린더의 효율측정식을 정립하였고
- 4) 시료의 수는 대형실린더 2개와 Sample 실린더 2개 및 코팅로드 1개(총 3종 5개)를 사용하여 무 부하 작동시험, 시동압력시험, 내부누유시험, 내압시험, 외부누유시험, 염수 분무시험, 코팅표면 긁힘(scratch)시험, 벤딩(bending)시험, 로드인장시험, Side Load 시험을 실시 한 결과 신뢰성 평가기준에 충족한 결과를 획득하였다.

- 5) 가속 수명시험으로 보증거리(평균 수명)는 80% 신뢰수준에서 345km와 90% 신뢰수준에서 288km의 결과를 얻었다.

단, 염수분무 시험에서 염수 농도조정 실패로 재시험을 실시경우와 수명 시험 중 실린더 Head 부에 부착된 Sensor에서 누유가 발생하였으나, 경미한 고장으로 Seal을 교체한 후 시험을 완료하였다.

*** 참고문헌

- 1) John W. Evans(Report), Derivation of Acceleration Factor Models for Test Designs of Large Scale Hydraulic Actuators, 2001
- 2) James C. Chesley & Tyrone L. Jones, Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, 1998, pp3-1~3-27
- 3) 엄윤용, Reliability Evaluation and Design for Electronic Packaging,2001, pp217~246
- 4) 기술표준원, 부품·소재 신뢰성 Workshop 2000
- 5) 기술표준원, 부품·소재 신뢰성 Workshop 2001
- 6) ISO, JIS, MIL, TUV, DIN, KS