

접촉상태에 있는 3D SPRAG TYPE의 초정밀 역전방지클러치의 내구성 평가에 관한 연구

이상범*(경상대 대학원 기계공학과), 서정세, 이석순(경상대 기계공학과),
이태선((주)성곡나노텍), 최중환(국방품질관리소)

A Study on Endurance Estimation of 3D Sprag Type Ultra Precision Reverse-Locking
Clutches under Contact Condition

S. B. Lee(Graduate School, Mech. Eng. Dept., GSNU), J. S. Suh, S. S. Lee(Mech. Eng. Dept., GSNU),
T. S. Lee(SungGok Nanotech Corp.), J. H. Choi(DQAA)

ABSTRACT

Recently, a dangerous event occurred at the field industry and mechanical system. At developed by SUNGGOK corp. a R-L clutches of a small and high capacity serves safety device from a variety environment of mechanical system, it permits transmission of driving torque form input to output shaft in both directions of rotation, but restrains any feedback torque of the driven load from rotating the output shaft in either direction. This study was carried out to demonstrate through finite element methode and durability estimation for safety of the R-L clutches without sliding during the engagement process. As results, we organized about endurance test methode when applied rated torque.

Key Words : Ultra precision(초정밀), Reverse-locking clutches(역전방지 클러치), Endurance evaluation(내구성 평가), Finite element analysis(유한요소해석), Contact state(접촉상태)

1. 서론

기계시스템의 구성 부품이 서로 접촉하여 수직하중을 받고 있는 경우 접촉면에서는 마모에 의한 손상, 표면조도, 접촉재료의 조건 등에 의해 압력이 크게 발생한다. 이러한 접촉부는 국부적인 응력집중이 발생하여 마멸이나 파손의 직접적인 원인이 되어 균열이 발생하여 구성부품의 구조적 건전성에 악영향을 미쳐 설계시의 요구 조건을 설계 수명 기간 전에 만족시키지 못하는 결과를 가져오기도 한다. 이러한 기계시스템에서 두 물체간의 상대 접촉 운동을 하는 경우 두 물체에 가해진 하중이나 토크에 대하여 선 접촉이나 점 접촉 상태에서 마찰 접촉 운동을 하여 접촉압력이 크게 발생한다.

접촉압력으로 인한 변형 양상은 탄성, 탄소성, 점탄성으로 분류될 수 있으며, 기계 구성부품들의 접촉면은 최근 기계시스템의 고정밀화에 따라 접촉부

문제의 중요성은 널리 알려져 있으며, 이러한 접촉 영역 문제 해석을 위한 헤르쯔 이론, 접촉영역에서 마찰 현상을 다룬 쿨롱의 법칙, Penalty methode, Lagrange multiplier method 등 여러 가지 해석방법이 있으며, Melville¹는 접촉부에 압축하중을 주었을 경우 접촉하여 미끄러질 때 응력확대계수는 마찰계수의 크기에 따라 결정됨을 보였고, Goo등²은 자동차용 브레이크 드럼과 패드의 접촉해석을, Hong등³은 저압 터빈 블레이드의 접촉특성과 접촉부분의 응력집중 현상으로 인한 선형정적해석을 수행하였다. 이러한 접촉해석은 합리적인 기계 시스템의 설계를 위해서는 선행되어야 하는 과제이다.

기계 구성품 들은 결합 또는 접촉으로 구성되어 있으며, 이러한 접촉하는 두 물체 사이의 문제로 한 방향으로 동력전달 및 연결하는 역할을 하는 다양한 용도의 클러치가 항공, 자동차, 선박 등의 수송기계 및 대형 산업전반에 걸쳐 널리 사용되고 있다.

본 연구에서의 클러치는 양방향으로 연결되는 동력을 차단하여 전체 기계시스템의 안전을 유지하는 역할을 하는 3D Sprag type의 역회전 방지클러치(Reverse-Locking clutches, R-L 클러치)로써 부피가 작고 중량이 가벼운 반면 고용량의 토크를 전달할 수 있어 콘베어, 버킷(Bucket) 엘리베이터, 승강기, 군용장비의 선회장치 등 산업전반에 걸쳐 사용되고 있으며, 일반적인 클러치와는 특이한 양상을 띠며 기계시스템의 안전을 유지하는 역할을 한다.

R-L 클러치의 적용을 위해서는 접촉상태에 있는 각 구성 부품들이 사용기간 중에 하중 조건에 대해서 파손되지 않고 기능을 원활히 수행하는지 확인하기 위해서는 유한요소 해석(Finite element analysis) 및 물리적 모델의 내구성능 만족을 확인하기 위한 내구성 평가 기술을 통해 구조적 안전성이 확보되어야 한다.

본 연구에서는 접촉상태에 있는 소형 고용량 3D Sprag type의 초정밀 R-L클러치를 상용유한요소 Code인 ABAQUS를 사용한 해석 및 기본성능 및 내구성능을 평가함으로써 구조적 안전성을 검토하였다.

2. Sprag type R-L 클러치 특성

2.1 R-L 클러치 구성

아래 Fig. 1의 (a), (b), (c)는 3D 모델과 3D 유한요소모델을 나타낸 것이며, Sprag type의 초정밀 R-L클러치는 다음과 같은 구성품과 특성으로 이루어져 있다.

평형유지 및 접촉을 통해 외부구조를 형성하는 외륜(Outer race), 외륜 내면과 마찰을 유도하여 피동측 양방향의 회전을 구동부 쪽으로 전달하지 못하게 함으로써 피드백(Feed back)토크를 억제하여 역회전을 방지하는 핵심부품 스프레그(Sprag), 피동측에 연결되어 스프레그를 작동시켜 내륜과 접촉을 유도하는 소켓멤버(Socket member), 외륜과 스프레그의 마찰로 인한 제동된 상태를 해제하는 역할을 하는 콘트롤 멤버(Control member)의 8종으로 구성되어 있다.

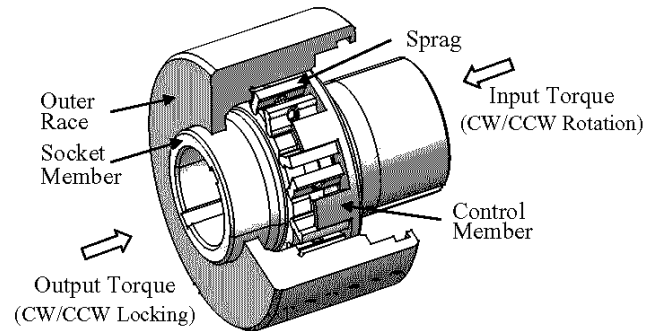
Table 1은 R-L 클러치의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

2.2 R-L 클러치 해석방법

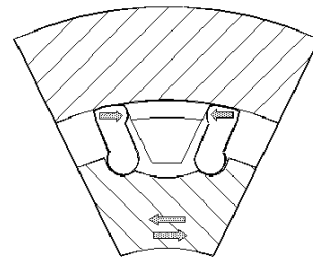
Pre-processor는 Hypermesh를 사용하였으며 Solver로는 ABAQUS를 사용하였다. Fig.1 (c)에서 유한요소 모델링은 원주방향 대칭성을 고려하여 축대칭 모델을 이용하였다. 양방향 제동시 사용된 노드

(Node)와 요소(Element)는 28,235, 18,862이며, 솔리드(Solid) 요소를 사용하였다.

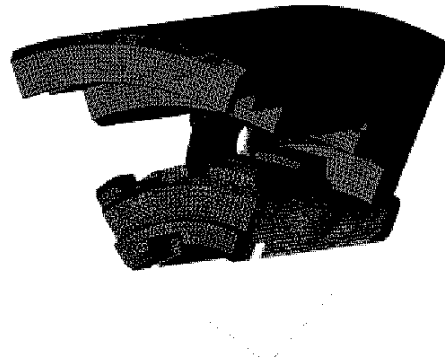
구속 및 하중 조건은 소켓멤버의 키 홈으로부터 하중을 지지한다고 가정하여 강제 키가 입력측 및 출력측과 결합하고 있는 조건을 부여하였으며, 소켓멤버와 스프레그, 스프레그와 외륜은 접촉조건을 주었고, 마찰계수(μ)는 0.1을 적용하였으며, 소켓멤버 중심에 33.90 N·m의 토크를 적용하였다.



(a) 3D modeling



(b) Front view



(c) Finite element modeling

Fig. 1 Shape of a Reverse-Locking clutches of 3D sprag type under contact condition((a), (b), (c))

Table 1 Mechanical properties of R-L clutches

Division	Sprag	Socket member	Outer racer
Young's modulus(Gpa)	215	205	210
Yield strength(Mpa)	2,960	958	657
Materials	SKH	SNCM	STB
Poisson's ratio	0.33	0.33	0.33

3. 내구성 시험장치 및 방법

3.1 시험장치 구성

초정밀 R-L 클러치에 대한 내구성 시험을 수행할 시험기의 형상 및 구성은 아래 Photo 1, Fig.2 와 같다.

내구 시험기의 구성은 크게 R-L 클러치 장착부, 정·역회전(CW/CCW) 방향제어 스위치, 정격 피동부, 회전부의 토크측정을 위한 SETECH 社 YDR-10K 10V DC, 용량(Capacity) 100kg-m의 토크 트랜스듀스(Torque transducers), RPM 인디케이터(Indicator), 회전 센서(Sensor), 회전 속도 컨트롤부(Control panel), 출력 0.75kw, 220V, 3상(phase) 4극(polar), 1800 rpm으로 구성된 구동 모터부, 3상 230V 공간 벡터 제어방식의 인버터(Inverter), 회전 속도별 슬립율(Slip ratio) 확인을 위한 피동토크 측정 토크렌치 등으로 구성되어 있다.

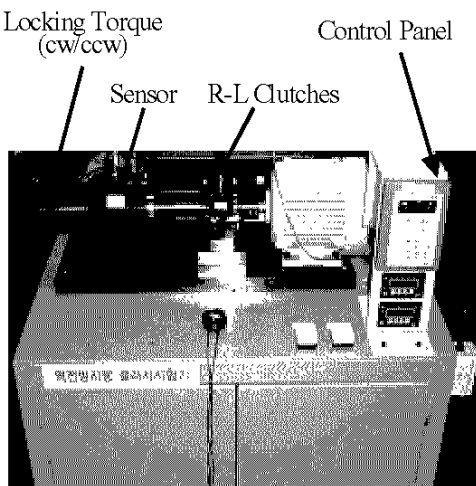


Photo 1. Endurance evaluation testing machine of Reverse-Locking clutches

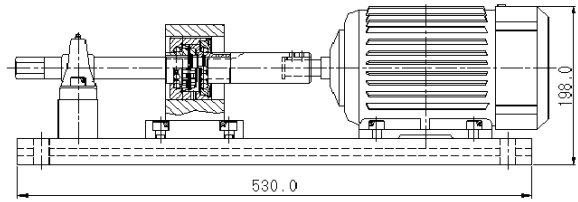


Fig. 2. Endurance evaluation testing machine drawing of R-L clutches

3.2 기본성능 및 내구성 시험방법

초정밀 R-L 클러치에 대해 생산품질 확인을 위한 내구성 시험은 필수적으로 요구되어 진다. 본 연구에 대한 시험 조건은 미국 form社의 설계 후 품질 확인을 위한 규정 시험조건이며, 선진국 대비 동등이상의 품질성능 요구조건이다. 아래 Table 2 는 초정밀 R-L 클러치 내구성 시험전용 설비 및 치구에 장착한 상태에서 구동부 및 피동부의 백래시(Backlash)시험, 최대정격 토크(Torque) 시험, 잠금 해제시험을 통한 기본성능 평가방법 및 판정기준을 나타낸 것이다.

내구성 시험방법 및 판정기준은 잠금 해제(Unlocking) 토크는 1,200 rpm 으로 10분간 정방향 및 역방향(CW/CCW) 작동 후 최대토크(2,770 kgf-cm) 작용시 미끄러짐(Slip)이 없어야 한다.

Table 2 Performance test method

Division	Condition
Backlash rotation	within backlash 6°
Backlashat break	0°
Rating torque	no slip at max. torque (2,770 kgf-cm)
Locking release torque	release torque within (2.23 kgf-cm)

4. 성능시험 결과

4.1 기본성능 시험결과

3D sprag type 초정밀 R-L 클러치의 기본성능 시험 결과는 (주)성곡나노텍에서 개발한 시험전용 백래시 치구를 사용하여 확인한 결과, Table 2에서 전술한 조건 대비 구동부 입력측 백래시(Backlash)는 4.5°, 피동부 출력측 백래시는 0°로 각각 나타났고, 이는 기본성능 요구조건에 충족하는 값이다.

Table 3 Basic performance test results

Division	Condition
Backlash rotation	4.5°
Backlash at break	0°
Rating torque	no slip
Locking release torque	2.20 kgf-cm

4.2 내구성능 시험결과

아래 Table 4는 R-L 클러치의 기본성능 시험 결과를 나타낸 것이다. 최대 1,800 rpm 에서 10분 경과후의 정회전 방향(CW)과 역회전 방향(CCW)의 회전 속도별 누계치를 나타낸 것으로, Table 4에서는 나타낸 실험값은 대표치만 나타낸 것이다. 회전 속도에 따른 온도와 이때의 최대토크 27,700 kgf-cm 적용시 슬립(Slip)이 없어야 하는데 파동부 정역회전 내구성능 시험 결과는 아래와 같다.

아래 Table 4 의 성능시험결과에서 확인할 수 있듯이 정회전 및 역회전의 슬립이 발생하지 않고 원활한 작동을 수행하는 회전수는 실험결과 각각 약 1,692,000, 1,728,000 사이클(cycles)로 나타났다.

아래 Fig. 2는 출력축의 회전 제동(Locking)시의 시계방향과 반시계방향의 시간에 따른 최대 1,800 rpm에서 초정밀 R-L 클러치의 누계 회전속도 변화를 나타낸 것이다. 실험시 먼저 시계방향으로 제동을 실시한 후 콘트롤 멤버로써 제동을 해제하고, 반시계방향으로 다시 제동을 시켰으므로 반시계방향의 시간에 따른 누계 회전속도가 높게 나타난 것이다.

Table 4 Endurance performance test results

No.	Direction (CW/CCW)	Rev. (rpm:1,800)	Temperature (°C)	Slip/No slip
1	CW	36,000	30.5	no slip
	CCW	72,000	31.5	no slip
2	CW	180,000	34.2	no slip
	CCW	216,000	34.6	no slip
3	CW	324,000	35.3	no slip
	CCW	360,000	36.6	no slip
4	CW	468,000	37.1	no slip
	CCW	504,000	38.4	no slip
5	CW	612,000	29.2	no slip
	CCW	648,000	32.2	no slip
6	CW	756,000	36.3	no slip
	CCW	792,000	36.5	no slip
7	CW	900,000	35.6	no slip
	CCW	936,000	36.1	no slip
8	CW	1,044,000	36.9	no slip

9	CCW	1,080,000	37.1	no slip
	CCW	1,188,000	33.3	no slip
	CW	1,224,000	33.6	no slip
10	CW	1,692,000	36.3	no slip
	CCW	1,728,000	38.0	no slip

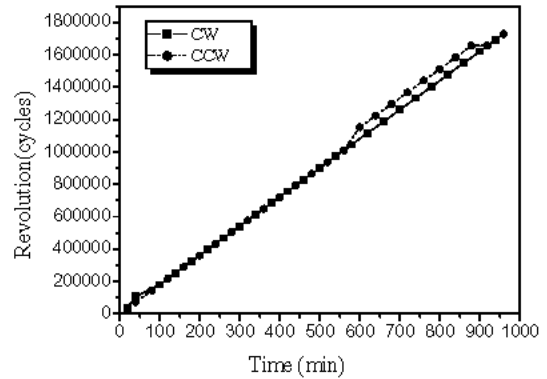


Fig. 2 Comparison of endurance performance test results of output shaft at max. 1,800rpm.

4.3 유한요소 해석결과

아래 Table 5는 정적상태의 최대하중 작용시 ABAQUS로 유한요소해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. R-L 클러치에서 최대하중이 작용하는 조건은 작동 메커니즘(Mechanism)상 소켓멤버와 스프레그가 수직으로 세워졌을 경우이다.

최대응력은 외륜과 스프레그의 접촉부에서 나타났으며, 재질의 항복응력 보다 낮은 값이다. 해석결과를 바탕으로 R-L 클러치의 정격하중으로 내구성 시험을 실시한 후, 정격 과하중의 변동하중을 적용하여 파괴시험(Fracture test)을 실시한 결과, 최대 집중응력이 나타나는 스프레그 홀부의 균열을 기점으로 파괴가 시작되어 소켓멤버의 키홈으로 균열이 성장함을 확인 할 수 있었다. 스프레그는 취성재질로 홀부는 최대 압축하중을 받는 부분이며 과하중이 적용되었을때는 벽개형 파괴(Cleavage type fracture)로 나타났으며, 소켓멤버 하부에는 단면이 급격히 변하는 노치(Notch)가 있는 곳이기 때문에 이 부분을 기점으로 균열이 진전되었다.

Table 5 Von Mises stress results of R-L clutches

Parts	Von Mises stress (MPa)	Displacement (mm)
Outer race	276	0.029
Socket member	540	0.021
Sprag	813	0.039

5. 결론

기계시스템의 안전장치 및 포탑구동 선회장치에 활용이 가능한 접촉상태에 있는 소형 고용량 3D Sprag type의 초정밀 R-L클러치의 기본성능 및 내구성능을 평가함으로써 구조적 안전성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기본성능 및 내구성 시험결과 구동부 입력측 및 피동부 출력측 백래시는 각각 3~5°, 0°로 나타났고, 2,700 kgf-cm의 정격토크 적용시 슬립 발생은 없었으며 안전하게 작동함을 확인할 수 있었다.
2. 정회전 및 역회전시의 슬립이 발생하지 않고 원활할 기능을 수행하는 회전속도는 각각 1,692,000, 1,728,000 cycles로 나타났다.
3. 시험평가 기술측면에서 구동부 및 피동부의 백래시 시험입증 방법을 체계화하여 향후 Sprag type의 클러치 개발시 활용가능하게 하였다.
4. 최대응력발생 부위는 스프레그와 외륜의 접촉부에서 나타났으며, 해석결과와 실제 파괴 시험결과와의 일치함을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구내용은 2001년도 산·학·연 연합 컨소시엄 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Melville, P., H., "Fracture Mechanics of Brittle Material in Compression," International Journal of Fracture, Vol. 13, pp. 532-534, 1977.
2. Goo, B., C., Seo, J., W., "Thermoelastic Contact Analysis of Drums Brums Brakes by Finite Element Method," 한국자동차공학회논문집, 제9권, 3호, pp. 173-180, 2001.
3. Hong, S., H., Cho., S., H., and Joo, W., S., "A Study on the Safety Estimation of Low Pressure Torsion Mounted Turbine Blade," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20,

No. 3, March 2003.

4. Sheppard, S., Barber, J., R., and Communou, M., "Short Subsurface Cracks Under Conditions of Slip and Stick Caused by a Moving Compressive Load," Journal of Applied Mechanics, Vol. 52, No. 12, pp. 811-817, 1985.
5. Kim, B., W., Kim, Y., K., and Lee, K., S., "Frictional Contact Analysis of the Crack Surface Under the Compressive Loading," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 7, July 2001.
6. Jang, D., H., Cho, S., H., and Hwang, B., B., "Finite Element Analysis for Frictional Contact Problems of Axisymmetric Deforming Bodies," Transactions of Materials Processing, Vol. 12, No. 1, 2003.