

접촉상태에 있는 초정밀 역전방지클러치의 내구성 평가에 관한 연구

이상범[#], 서정세^{*}, 이석순^{*}, 이태선^{**}, 최종환^{***}

A Study on Endurance Estimation of Ultra Precision Reverse-Locking Clutches under Contact Condition

Sang Bum Lee[#], Jeong Se Suh^{*}, Seok Soon Lee^{*}, Tae Sun Lee ^{**} and Jung Hoan Cho i^{***}

ABSTRACT

A dangerous event occurred at the field industry and mechanical system. At developed by SUNGGOKNANOTECH 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 from 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 method and durability estimation for safety of the R-L clutches without sliding during the engagement process. As results, we organized about endurance test method when applied rated torque.

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

1. 서론

기계시스템의 구성 부품이 서로 접촉하여 수직하중을 받고 있는 경우, 접촉면에서는 표면조도, 접촉재료의 조건 등에 의해 마모에 의한 손상이 발생한다. 가해진 하중이나 토크에 대하여 응력집중이 접촉부에 국부적으로 발생하고 마멸이나 파손의 직접적인 원인이 되어 균열이 발생한다. 또한 구성부품의 구조적 건전성에 악영향을 미쳐 요구

설계수명을 만족시키지 못하는 결과를 가져오기도 한다. 가해진 하중과 토크에 대하여 선 접촉이나 점 접촉을 하게 되며, 접촉압력으로 인한 변형 양상은 탄성, 탄소성, 점탄성으로 분류될 수 있다.

최근 기계시스템의 고정밀화에 따라 접촉 문제의 중요성은 널리 알려져 있으며, 이러한 접촉 영역 문제 해석은 헤르쯔(Hertz)가 해석을 시작한 이후로 많은 연구가 진행되었다. 접촉영역에서 마찰 현상을 다룬 쿨롱의 법칙, 수식화가 간단하며

*** 접수일: 2004년 12월 20일; 게재승인일: 2005년 3월 11일

교신저자: 경상대학교 기계공학과

E-mail: bumso@hanmail.net Tel. (055) 252-8698

* 경상대학교 기계공학과

** ㈜성곡나노텍

*** 국방품질관리소

병렬처리가 용이한 벌칙 함수법(Penalty method), 접촉력이 수식으로 계산되어 안정된 수렴성을 가진 라그랑지 승수기법등 여러 가지 해석방법이 있다.

접촉부의 해석에 관한 연구로는 Melville¹는 접촉부에 압축하중을 주었을 경우 접촉하여 미끄러질 때 응력확대계수는 마찰계수의 크기에 따라 결정됨을 보였고, Go 등²은 자동차용 브레이크 드럼과 패드의 접촉해석을, Hong 등³은 저압 터빈 블레이드의 접촉특성과 접촉부분의 응력집중 현상으로 인한 선형 정적해석을 수행하였다. 이러한 접촉해석^{4, 5, 6}은 합리적인 기계 시스템의 설계를 위해서는 선행되어야 하는 과제이다.

접촉하는 두 물체 사이의 문제로 구동체와 피동체가 서로 회전할 때 한 방향으로만 동력전달 및 단속하는 역할을 하여 자동차의 자동변속기에 적용되고 있는 2D 타입의 일방향 클러치(One-way clutch)가 있다. 또한 국외의 연구로 진공상태의 우주공간에서 보다 효율적인 조사를 위해 기계시스템에 적용된 3D 스프레그(Sprag) 타입⁷이 있다. 이처럼 3D 스프레그 타입의 초정밀 클러치는 국외에서는 항공, 자동차, 선박 등의 승수기계 및 대형 산업전반에 걸쳐 널리 사용되고 있으나, 국내에서는 고비용 및 개발실패로 사용이 지연되고 있으며, 개발 후 양산으로 적용된 예는 전무한 상태이다.

본 논문에서의 3D 스프레그 타입의 클러치는 양방향으로 연결되는 동력을 차단하여 전체 기계시스템의 안전을 유지하는 역할을 하는 역회전 방지클러치(Reverse-Locking clutches, 이하 R-L 클러치)를 대상으로 한다. 부피가 작고 중량이 가벼우며 고용량의 토크를 전달할 수 있어 콘베어, 버킷(Bucket) 엘리베이터, 승강기, 군용장비의 선회장치 등 산업전반에 걸쳐 사용될 수 있으며, 일반적인 클러치와는 특이한 양상을 띄며 위험한 상황에서 기계시스템의 안전을 유지하는 역할을 한다. 이러한 스프레그 형태 역전방지 클러치의 적용을 위해서는 접촉상태에 있는 각 구성 부품들이 사용기간 중 하중 조건에 대해서 파손되지 않고 기능을 원활히 수행하는지 확인하여야 한다. 유한요소해석(Finite element analysis) 및 물리적 모델의 내구성능 만족을 확인하기 위한 내구성 평가 기술^{8, 9}을 통해 구조적 안전성이 확보되어야 한다.

본 논문에서는 접촉상태에 있는 소형 고용량 3D 스프레그 타입의 초정밀 역전방지 클러치를 상용유한요소 코드인 ABAQUS를 사용한 해석 및 기

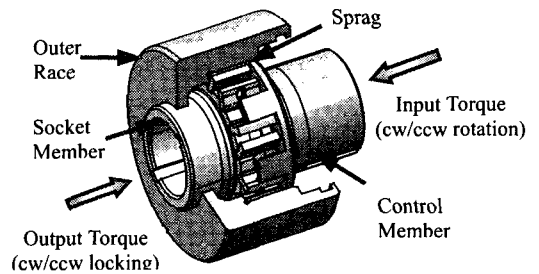
본성능 및 내구성능을 평가함으로써 구조적 안전성을 검토하고자 하였다.

2. 스프레그형 역전방지 클러치 특성

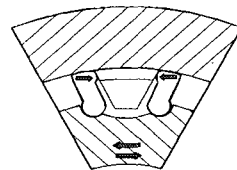
2.1 역전방지 클러치 구성

아래 Fig. 1 (a), (b)는 역전방지 클러치의 3D 모델링과 양방향 제동시의 단면형상을 각각 나타낸 것이다. 스프레그 형의 초정밀 역전방지 클러치는 다음과 같은 구성품과 특성으로 이루어져 있다.

평형유지 및 접촉을 통해 외부구조를 형성하는 외륜(Outer race)과, 외륜 내면과 마찰을 유도하여 피동축 양방향의 회전을 구동부 쪽으로 전달하지 못하게 함으로써 피드백(Feed back) 토크 역제를 통한 역회전을 방지하여, 안전을 유지하는 역할을 하는 스프레그가 있다. 또, 피동축에 연결되어 스프레그를 작동시켜 내륜과 접촉을 유도하는 소켓멤버(Socket member), 외륜과 스프레그의 마찰로 인한 제동된 상태를 해제하는 역할을 하는 콘트롤 멤버(Control member), 원활한 회전 및 평형을 유지하는 상·하부 베어링조립체(Bearing assembly), 일정간격을 유지시키며 마찰을 감소시키는 추력베어링(Thrust bearing) 외 6종으로 구성되어 있다.



(a) 3D modeling



(b) R-L clutch front view

Fig. 1 Shape of a reverse-locking clutches

2.2 역전방지 클러치 해석방법

역전방지 클러치 해석을 위한 CAD/CAM/CAE 소프트웨어인 CATIA V5 를 활용하여 정적 해석을 사전 실시하였고, 이후 전처리(Pre-processor)로는 Hypermesh 를 사용하였으며, Solver 로는 ABAQUS 를 사용하여 해석을 실시하였다.

아래 Fig. 2 는 유한요소해석 모델을 나타낸 것이다. 스프레그 타입의 역전방지 클러치는 중심축에 대하여 원주 방향으로 대칭이므로 축대칭(axisymmetric) 모델을 이용하였다. 양방향 제동력을 발생시키는 구성부품은 전체구성부품 중 외륜, 스프레그, 소켓 멤버가 피드백 토크를 억제하므로 해석대상으로 하였다. 1 차적인 토크전달은 소켓멤버에서 시작되어 스프레그, 외륜 순으로 이루어진다. 해석에 사용된 노드(Node)와 요소(Element)수는 28,235 개, 18,862 개이며, 솔리드(Solid) 요소를 사용하였다.

소켓멤버에서 경계조건은 6 자유도(DOF)중 축방향에 대해서만 회전운동을 허용하였고, 스프레그는 축방향에 대한 이동과 회전을 구속하였으며, 외륜은 축방향을 구속하였다. 소켓멤버와 스프레그, 외륜과 스프레그는 접촉과 마찰계수(μ) 는 0.1 을 적용하였다.

하중조건은 자유도를 소켓멤버의 키 홈으로부터 역방향 토크가 적용됨으로 강체 키가 입력축 및 출력축과 결합하고 있는 조건을 부여하였다. 역방향 피드백 토크를 발생시키는 제동력은 전체 스프레그 수인 16 개 중에서 한 방향으로 각각 8 개가 균일하게 제동력을 발생시키므로 소켓멤버 중심에 안전율이 포함된 346 kgf-cm 의 제동토크를 적용하였다.

Table 1 은 역전방지 클러치의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

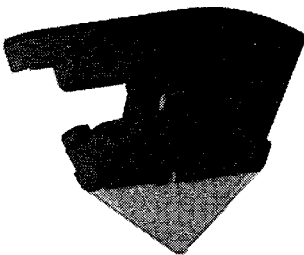


Fig. 2 Finite element model of reverse-locking clutches of 3D sprag type under contact condition

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. 내구성능 시험장치 및 방법

3.1 시험장치 구성

초정밀 역전방지 클러치에 대한 내구성능 시험을 수행할 시험기의 형상 및 구성은 아래 Fig. 3 과 같다.

내구 시험기의 구성은 크게 R-L 클러치 장착부, 양방향 정·역회전(CW/CCW) 방향제어 스위치, 정격 피동부, 회전부의 토크측정을 위한 SETECH 社 의 YDR-10K 10V DC, 용량(Capacity) 10,000 kgf-cm 의 토크 트랜스듀스(Torque transducers), RPM 인디케이터(Indicator), 회전 속도센서(Speed sensor), 회전속도 제어부(Control panel)가 있다. 또, 출력 0.75kw, 220V, 3 상(phase) 4 극(polar), 1,800 rpm 으로 구성된 구동 모터부, 3 상 230V 공간벡터 제어방식의 인버터(Inverter), 회전 속도별 슬립율(Slip ratio) 확인을 위한 대용량의 정격피동토크 측정 토크렌치(Torque wrench), 진동을 최소화하기 위한 방진고무, 타이머 등으로 구성되어 있다.

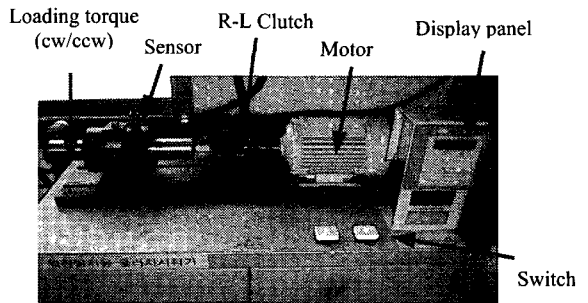


Fig. 3 Endurance evaluation testing machine of reverse-locking clutches

3.1.1 기본성능 및 내구성능 시험방법

조정밀 3D 스프레그 타입 역전방지 클러치에 대해 설계 및 생산품질 확인을 위한 내구성 시험은 개발초기에는 필수적으로 요구되어 진다. 본 연구에서의 내구성능에 대한 시험 조건은 미국 Formsprag 社의 설계 후 품질 확인을 위한 규정 시험조건이며, 선진업체 대비 동등이상의 품질성능 요구조건이다.

아래 Table 2 는 조정밀 역전방지 클러치 내구성 시험전용 설비 및 역전방지 클러치 성능확인용 치구에 장착한 상태에서 구동부 및 피동부의 백래시(Backlash)시험, 최대 정격토크(Rated torque) 시험, 잠김 해제시험(Locking release torque)을 통한 기본성능 평가방법 및 판정기준을 나타낸 것이다. Fig. 4 는 구동부 및 피동부의 백래시 측정을 위한 시험장치이다.

내구성능 시험에 적용된 R-L 클러치의 타입은 R-L/72A, R-L/115A 의 2 종류의 타입이 있으며, 이의 구별은 최대제동 토크와 스프레그 수에 따른 치수변화에 있다. 방법 및 판정기준은 R-L/72A 인 경우, 잠김 해제토크는 1,200 rpm 으로 10 min 간 정방향 및 역방향(CW/CCW) 작동 후 최대토크 2,770 kgf-cm 작용시 슬립(Slip)이 없어야 한다.

R-L/115A 인 경우, 잠김 해제토크는 1,200 rpm 으로 10 min 간 정방향 및 역방향 작동 후 최대토크 9,793 kgf-cm 작용시 슬립이 없어야 한다. 슬립이 발생할 경우에는 3D 스프레그 타입 조정밀 역전방지 클러치의 기능을 제대로 수행하지 못한다고 볼 수 있으므로 슬립을 발생 유무가 중요한 인자로 작용한다.



Fig. 4 Test machine for the backlash measurement of a reverse-locking clutches

4. 시험 결과

4.1 기본성능 시험결과

3D 스프레그 타입 조정밀 역전방지 클러치의 기본성능 시험 결과는 (주)성곡나노텍에서 개발한 시험전용 백래시 치구를 사용하여 확인하였다. 아래 Table 2 의 조건 대비 구동부 입력측 백래시(Backlash)는 4.5°, 피동부 출력측 백래시는 0°로 각각 측정되었으며 아래 Table 2 에 나타내었다. 이 시험결과는 기본성능 요구조건에 충족하는 값이다.

Table 2 Basic performance test condition and results

Division	Condition	Results
Backlash rotation	within backlash 6°	4.5°
Backlash at break	0°	0°
Rating torque	no slip at max. torque (2,770 kgf-cm)	no slip
Locking release torque	release torque within (2.23 kgf-cm)	2.20 kgf-cm

4.2 내구성능 시험결과

아래 Table 3 은 3D 스프레그 타입 조정밀 역전방지 클러치의 개발품에 대한 내구성능 시험 결과를 나타낸 것이다. 국내에서의 개발이 전무한 관계로 개발품의 성능평가를 위해 수입품과의 비교 테스트를 실시하였다.

먼저 (주)성곡나노텍의 개발품 내구성능 시험평가 결과이다. Table 3 은 R-L/ 72A, 최대 1,800 rpm 에서 10 분 경과후의 정회전 방향(CW)과 역회전 방향(CCW)의 회전 속도별 누계치를 나타낸 것이다. 이때의 회전속도에 따른 온도와 최대토크 27,700 kgf-cm 적용시 슬립(Slip)이 없어야 하며, 피동부 정역회전 내구성능 시험 결과는 아래와 같다. Table 3 에 나타낸 실험값은 대표치만 표시하였다. Table 3 의 성능시험결과(R-L/72A)에서 확인할 수 있듯이 정회전 및 역회전의 슬립이 발생하지 않고 원활한 작동을 수행하는 개발품의 회전수는 실험 결과 각각 약 1,692,000, 1,728,000 사이클(cycles)로 나타났다.

미국 Formsprag 社의 회전수 변화 및 온도변화에 따른 자세한 데이터는 아래의 Table 3 과 유사한 미미한 차이를 나타내었으며, 약 1,260,000,

1,296,000 사이클까지는 슬립이 발생하지 않았다. 이를 넘어선 1,440,000 사이클 이상에서는 슬립으로 인한 소음이 발생하여 실험을 중단하였다. 이러한 소음발생 원인은 스프링 인장력 변화에 기인한 것으로 판단된다. 초정밀 역전 방지클러치에서의 스프링의 역할은 스프레그가 항상 방사형(Radial)으로 유지하여 외륜과의 접촉을 유도하는 역할을 수행하는데, 스프링 인장력의 변화에 의한 기능상실로 스프레그가 구동 및 제동시 원위치에 복귀가 되지 않아 이상소음이 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 5 는 출력축의 회전 제동(Locking)시의 시계방향과 반시계방향의 시간에 따른 최대 1,800 rpm 에서 초정밀 역전방지 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 는 도입품 대비 개발품의 내구성능 실험결과를 표시한 것이다. 이 결과에서 확인할 수 있듯이 고용량의 제동토크 R-L/115 적용시와 보다 적은 R-L/72A 의 제동토크 적용시에는, 내구성능 사이클 수가 길어짐을 확인할 수 있었다.

Table 3 Endurance performance test results(R-L72A)

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
	CCW	1,080,000	37.1	no slip
9	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

최대 제동력이 R-L/72A 에 비해 R-L/115 는 7,023 kgf-cm 더 큰 제동력을 가진다. 도입품의 정회전 및 역회전의 슬립이 발생하지 않고 원활한 작동을 수행하는 회전수는 실험결과 각각 약 120,000, 144,000 cycles 로 나타났으며, 개발품은 312,000, 336,000 cycles 로 나타났다.

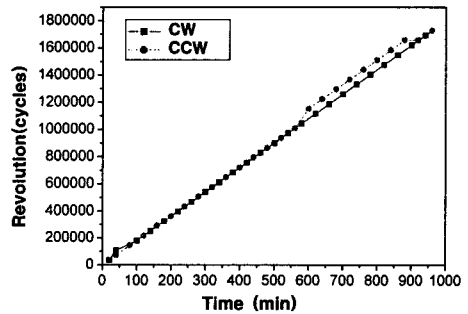


Fig. 5 Comparison of endurance performance test results of output shaft at max. 1,800 rpm (R-L72A)

Table 4 Comparison of endurance performance test results with torque change at max. 1,800 rpm

Division		Endurance performance test results (cycles)	
		Fromsprag	SUNGGOK
R-L/115A (9,793 kgf-cm)	CW	120,000	312,000
	CCW	144,000	336,000
R-L/72A (2,770 kgf-cm)	CW	1,260,000	1,692,000
	CCW	1,296,000	1,728,000

4.3 유한요소 해석결과

아래 Table 5 는 정적 상태의 최대하중 작용시 CATIA V5 및 ABAQUS 로 유한요소해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 역전방지 클러치에서 최대하중이 작용하는 조건은 작동 메커니즘 (Mechanism)상 소켓멤버와 스프레그가 수직으로 세워졌을 경우다. 최대응력은 외륜과 스프레그의 접촉부, 소켓멤버와 스프레그 접촉부순으로 나타났다으며, 재료의 항복응력 보다 낮은 값이다.

아래 Fig. 6 은 초정밀 역전방지 클러치 주요 관심부위인 외륜의 변형량을 알아보기 위하여, 외륜과 접촉하는 스프레그 수 변화(16, 14, 12, 10 EA)

에 따른 변위를 나타낸 것이다. 이때 변형량을 계산하기 위하여 적용된 제동토크는 346, 395, 461, 553 kgf-cm 이다. 스프레그 수가 적어짐에 따라 x 축과 y 축에 대한 변위가 다소 증가함을 확인할 수 있다.

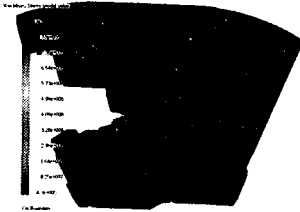


Fig. 6 Von Mises stress of R-L clutches in break

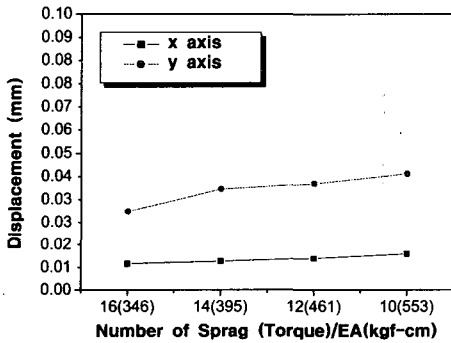


Fig. 7 Comparison of displacement with sprag number of the reverse-locking clutches

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

4.4 파괴시험 결과

수치해석결과를 바탕으로 R-L 클러치의 정격 하중으로 내구성 시험을 실시한 후, 정격 과하중을 적용하여 파괴현상을 살펴보기 위하여 파괴손상시험(Fracture damage test)을 실시하였다.

파괴시험 조건은 1,200 rpm 으로 정방향(CW) 및 역방향(CCW)으로 10 분 회전 후 토크를 확인하고, 9,793 kgf-cm 의 토크를 적용하여 R-L 클러치의 파

손시까지 반복수행 하였다.

아래 Fig. 8, 9, 10, 11 은 상기 조건의 파괴시험 결과 스프레그, 콘트롤멤버, 소켓멤버, 외륜의 손상상태 및 균열 상태를 나타낸 것이다. 초정밀 클러치의 균열이 확인된 시점의 R-L/115A 의 회전수는 192,000 사이클 이었다.

콘트롤멤버의 파손은 수치해석 결과에 의하면 표면적이 급격히 변하는 콘트롤멤버 이뿌리 부분에서 국부응력이 발생한다. 실험시에서는 가동·정지에 대한 재질의 피로현상을 초래하여 변형률 속도의 증대를 가져와 취성파괴 촉진 인자요인이 되어 파괴가 이루어진 것으로 사료된다. 실험결과에서 확인할 수 있듯이 파손파면은 취성 파괴의 전형적인 양상을 띄고 있다.

소켓멤버에서 나타난 파손의 양상은 반복적인 제동으로 인한 노치취성 즉, 표면적이 급격히 변하는 키홈의 응력집중 효과 때문에 파괴되는 것은 일반적인 사실이다.

스프레그의 파손형태는 최대 집중응력이 나타나는 홀부의 균열을 기점으로 파괴가 시작되어 소켓멤버의 키홈으로 균열이 성장함을 확인할 수 있었다. 스프레그는 최대 압축하중 및 비틀림 모멘트를 받는 부분이며, 균열의 상태가 45°로 파손된 것으로 보아 최대주응력설에 의한 비틀림전단력 때문으로 판단된다. 또한, 과하중이 적용되었을 때는 홀부를 기점으로 전단벽개형 파괴(Cleavage type fracture)양상을 나타내었다.

외륜은 스프레그의 압축하중으로 인하여 균일 접촉 방향으로 손상이 나타났다. 이론적으로 계산된 외륜의 변형량이 0.035 mm, 수치해석결과 외륜의 변형량은 0.029 mm 이다. 이는 수치해석시의 오차를 감안하면 충분히 정확한 값으로 판단된다.

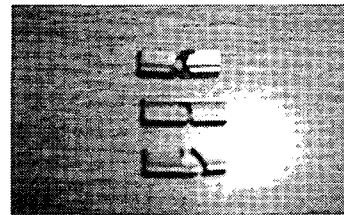


Fig. 8 Fracture test results of a sprag type after overload applied at 9,793 kgf

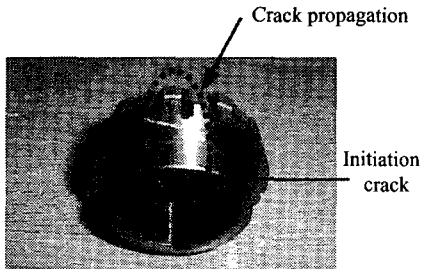


Fig. 9 Fracture results of a socket member after overload applied at 9,793 kgf-cm

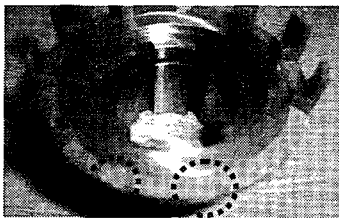


Fig. 10 Fracture results of a control member after overload applied at 9,793 kgf-cm



Fig. 11 Damage shape of an outer race the reverse-locking clutches after overload applied at 9,793 kgf-cm

실제품의 마모현상 및 균열성장방향을 파괴시험을 통해 확인한 결과 수치해석의 응력분포결과와 유사함을 확인하였다. 수치해석 결과와 내구성 및 파괴 시험결과와의 상호비교를 통해 초정밀 역전방지 클러치의 설계 및 성능을 검증하였다.

5. 결론

기계시스템의 안전장치 및 포탑구동 선회장치에 활용이 가능한 접촉상태에 있는 소형 고효율 3D 스프레그 타입 초정밀 역전방지 클러치의 기본

성능 및 내구성을 평가하여 구조적 안전성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기본성능 및 내구성 시험결과 구동부 입력측 및 피동부 출력측 백래시는 각각 3~5°, 0°로 나타나 도입품 대비 동등이상의 규격을 만족하였으며, 2,770 kgf-cm, 9,793 kgf-cm의 정격토크 적용시 슬립 발생은 없었다.
2. 정회전 및 역회전시의 슬립이 발생하지 않고 원활한 기능을 수행하는 회전수는, R-L/115A에서 312,000 cycles, 336,000 cycles로 나타났다. R-L/72A에서는 각각 1,692,000 cycles, 1,728,000 cycles로 나타났다.
3. 시험평가 기술측면에서 구동부 및 피동부의 백래시 시험 입증 방법을 체계화하여, 향후 스프레그 타입의 클러치 개발시 활용가능하게 하였다.
4. 최대 응력발생 부위는 스프레그와 외륜의 접촉부에서 나타났으며, 수치해석과 실제 파괴시험결과와 일치함을 확인할 수 있었다.
5. 수입에 의존하고 있는 초정밀 역전방지 클러치 국산화 개발로 수입대체 효과 및 원가절감은 물론, 수요자의 요구에 안정적인 공급원으로서 역할이 기대된다.

후 기

본 논문은 국방품질관리소 주관 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 Brakes by Finite Element Method," The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 9, No. 3, 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.
7. Roberts, Brian, "Three-Dimensional Roller Wrench and Human Performance Neutral Buoyancy Laboratory 98.2 Test Results," *Space Systems Laboratory University of Maryland College Park, SSL Document Number 99-001*, March 1999.
8. Kim, T. B., Kim, D. K., Lee, S. J., Kim, I. S., Lee, W. R., Lee, D. K., "A Study on the Fatigue Test and Performance Evaluation for Linear Motion Rolling Bearing," *Proc. Korean Society of Precision Engineering*, pp. 1270-1274, June, 2003.
9. Jung, E. W., Choi, B. L., Jeon, J. W., "A Consideration on the Strength and Durability Estimation Techniques in Passenger Car," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 015, No. 004, pp. 34-43, 1993.