

감속기에 의한 로봇 진동 특성 고찰

하 태 광

대우중공업(주) 기술연구소 기계기술부

Vibration of The Robot Due To Reducers

Tae Kwang Ha

Technical Center/DAEWOO HEAVY INDUSTRIES LTD.

Abstract

2. 감속기의 역할과 성능

Vibration characteristics of harmonic drives and cyclo drives are reviewed. Both of two have two resonance frequencies inherently. Especially, the amplitudes of cyclo drives are over 1.0g. The test of the robot also shows large amplitude of vibration in the speed which is coincide with the resonance frequencies of reducers.

감속기란 말 그대로 속도를 감속하는 기계로서, 사용하는 모터의 동력 P는 토크 T(Kg.m)와 회전수 N(rpm)의 곱

$$P = \frac{T \cdot N}{974} \text{ (Kw)}$$

으로 표현된다. 여기서, 동력이 일정하면 N을 감소시킴으로써 T의 증분을 얻을 수 있다. 따라서 로봇용 감속기는 우선적으로 고 토크를 필요로 하고, 서보센서를 위치센서로서 사용하는 경우는 감속비가 높은 만큼 위치분해 정도가 높아지는 잇점이 있다.

1. 서 론

모타와 감속기는 주로 직결되어 사용되므로, 그림 1과 같은 동력 전달 구조에 대하여 생각해 보면, 부하 질량 Mi(Arm 질량 포함)인 물체를 중력의 반대 방향으로 회전시키는 경우 모타에 필요한 가속 토크는 다음식으로 표현된다.

공장자동화(FA)에 따른 산업용 로봇의 응용이 급속히 향상되고, 이에 따른 로봇의 고속화 및 고성능화가 요구된다. 그 중에서도 시스템의 안정성(Stability)은 정밀작업과 신뢰도 향상을 위해 우선 고려되어야 할 사항이다. 그런데, 제어 시스템과 기계적 구동계와 연계된 구조적 공진(Structural resonance)현상등 시스템의 동적 특성은 로봇의 신뢰도 및 위치정밀도를 감소시키고, 고속 작업시에 성능감소 및 불안정성을 야기시키게 된다. 이러한 로봇의 진동은 시스템의 동적 영향, 서보의 게인(gains)조정 불량, 잡음(Noise), 가.감속의 급격한 변화, 속도 지령과 출력 토크의 비선형성, 기계의 조립불량(Misalignment), 베어링, 기어와 감속을 위해 사용되는 감속기의 공진 현상등에 의해 발생한다. 특히 산업용 로봇에 사용되고 있는 감속기는 주로 하모닉 드라이브(Harmonic Drive)와 사이클로 드라이브(Cyclo Drive)라는 제품화된 감속기가 사용되고 있으나, 이들의 진동 특성이 실제 로봇에 사용되었을 때 나타나는 진동 정도와 영향을 알아보지는 않았던 걸로 사료된다. 그러므로, 여기서는 로봇의 진동의 원인중의 하나인 감속기에 대하여 알아봄으로써 로봇 진동 현상을 파악하고자 한다.

$$T_a = \frac{g \Sigma M_i R_i}{n_R Z_R} + \left\{ J_{m0} + \frac{M_i R_i^2}{n_R Z_R^2} \right\} \ddot{\theta}_m$$

- J_{m0} : 모터축의 관성 (= $J_m + J_B$)
- n_R : 감속기 효율
- Z_R : 감속비
- J_R : 감속기의 입력축 관성
- R_i : 회전 반경

또, 부하 질량의 속도는,

$$V_L = \frac{R_i}{Z_R} \dot{\theta}_m$$

로 된다.

따라서, 액츄에이터(Actuator)설계는 모터의 성능(토크와 회전수)과 감속기의 성능(출력 토크, 감속비, 효율, 입력축 관성)이 밀접한 관계를 가지므로, 독립적으로는 선정되지 않는다.

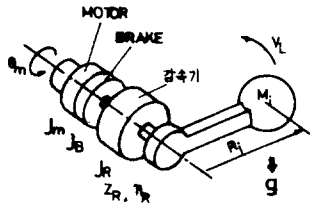


그림 1 일반적인 동력 전달 구조
Fig.1 General power transfer structure

3. 로봇용 감속기의 종류와 특징

감속기에는 유니트(Unit)형과 콤포넌트(Component)형이 있는데, 로봇의 경우에는 유니트형을 사용하는 경우는 거의 없고, 소형 경량화 관계로 콤포넌트형을 사용한다. 여기서는 산업용 로봇에 주로 사용되고 있는 하모닉 드라이브와 사이크로 드라이브에 대하여 알아본다.

(1) 하모닉 드라이브(Harmonic drive)

하모닉 드라이브는 로봇에 많이 사용되고 있는 조속식(調速式) 감속기로서, 감속비는 1/50-1/320까지 광범위하며, 부하 용량도 수십 Kgf·cm-수백 Kgf·m까지 Series화 되어 있다. 경량하고 비교적 효율이 높기 때문에 입력축의 Inertia가 크다. 이는 그림 2와 같이 웨이브 제너레이터(Wave generator), 서클러 스플라인(Circular spline), 플렉스 스플라인(Flex spline) 3부분으로 구성된다. 플렉스 스플라인은 웨이브 제너레이터에 의해 타원 형상을 이루게 되고, 타원의 장축 부분은 서클러 스플라인과 치형이 맞물리게 되고 단축 부분의 치형은 완전히 분리된 상태로 된다. 서클러 스플라인을 고정하고 웨이브 제너레이터를 시계 방향으로 회전하면, 플렉스 스플라인은 탄성 변형하면서 서클러 스플라인과의 치형의 맞물림 위치가 순차적으로 이동하게 된다(그림 3의 2,3). 웨이브 제너레이터가 1회전 하면은 플렉스 스플라인은 서클러 스플라인보다 잇수가 2개 적으므로 웨이브 제너레이터의 회전 방향과 반대 방향으로 잇수차 2개분 만큼 이동하게 된다. 일반적으로 이 이동을 출력축의 출력으로 한다.(그림 3의 4)

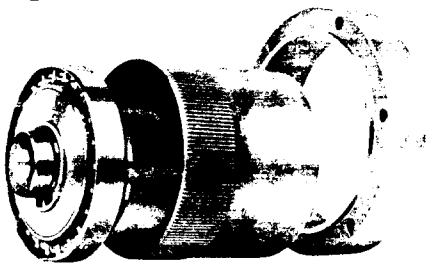


그림 2 하모닉 드라이브 구성
Fig.2 Harmonic drive components

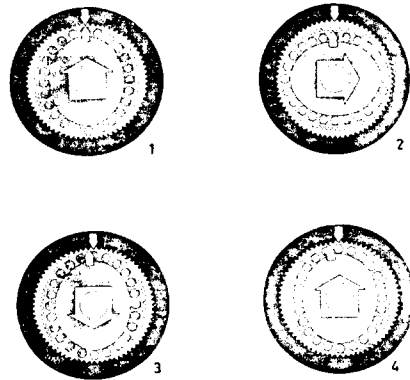


그림 3 하모닉 드라이브 동작원리도
Fig.3 Operating principle of harmonic drive

감속비는 플렉스 스플라인과 서클러 스플라인의 잇수에 의해 결정된다. 플렉스 스플라인 잇수를 Z_f , 서클러 스플라인 잇수를 Z_c 라 하면,

- a) 입력 : 웨이브 제너레이터
출력 : 플렉스 스플라인
고정 : 서클러 스플라인

일때, 감속비 $i_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{Z_f - Z_c}{Z_f}$

- b) 입력 : 웨이브 제너레이터
출력 : 서클러 스플라인
고정 : 플렉스 스플라인

일때, 감속비 $i_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{Z_c - Z_f}{Z_c}$

여기서, 감속비 1/50은 $Z_c = Z_f + 4$
1/78이상은 $Z_c = Z_f + 2$ 이다.

(2) 사이크로 드라이브(Cyclo drive)

사이크로 드라이브는 유성치차형으로 된 2장의 Disk판의 위상차에 의해 백래쉬(backlash)가 적고, 내부 강성이 높을 뿐만 아니라 GD^2 가 적어 가속성이 양호하다. 이러한 사이크로 드라이브는 그림 4와 같이 감속축과 출력축으로 분류된다.

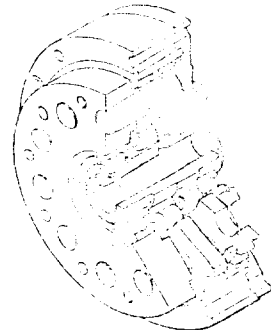


그림 4 사이크로 드라이브 구성
Fig.4 Cyclo drive components

사이크로 드라이브는 잇수가 1개차로 된 내접식 유성치차 기구와 등속도 내치차 기구의 조합에 의해 감속을 얻게 된다. 그림 5의 1과 같이 사이크로 드라이브는 내접식 유성치차 기구에서 내치차에 원호 치형과 유성치차에 에피트로코이드(Epitrochoid)평행 곡선을 사용하여 치선 간섭이 없고 1개의 잇수차를 이루며 모든 부분이 접촉하고 있는 내접식 유성치차를 이루며(그림 5의 2), 유성치차는 고속으로 공전(W_1)함과 동시에 저속으로 자전(W_2)한다. 또한 사이크로 드라이브는 그림 5의 3과 같이 원호치형에 등속도 내치차 기구를 사용하여, 감속된 자전량 만큼을 내핀으로 출력한다. 내핀은 크랭크축(고속축) 중심 O_S 와 동심원상에 위치하고 있다. 이상의 2개의 기구를 조합한 부분의 원호치형에 롤러를 장착한 그림 5의 4형태가 사이크로 드라이브이고, 감속비는

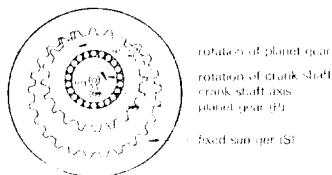
$$i_c = 1/R_C = \frac{W_2}{W_1} = 1 - \frac{S}{P} = \frac{-(S-P)}{P}$$

여기서, S : 고정 태양 내치차 잇수

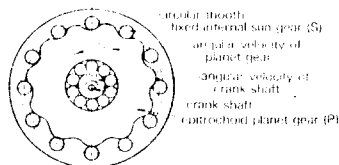
P : 유성치차 잇수

S-P=1(잇수차 1개)이다.

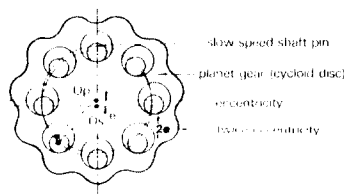
1. Principle of internal planetary gearing



2. Epitrochoid planet gear - circular (pin) tooth gear



3. Constant speed internal gearing



4. Combination of planet-sun gears and constant speed internal gear

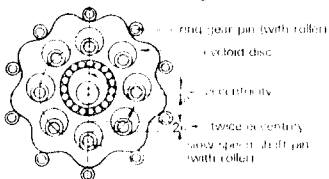


그림 5 사이크로 드라이브 동작원리도

Fig.5 Operating principle of cyclo drive

4. 하모닉 드라이브와 사이크로 드라이브의 진동특성

하모닉 드라이브와 사이크로 드라이브의 로보트에서 진동을 알아보기 위해 먼저 대략적인 시험장치를 만들어 이들 진동 특성을 알아보고, 실제 로보트에 적용되었을 때 나타나는 진동 상태와의 관계를 알아본다. 이를 행하기 위해 하모닉 드라이브는 CS-32와 CS-50 2종류와 사이크로 드라이브는 이에 대응할 수 있는 F-15, F-35 2종류에 대하여 시험한다. 또한 시험 대상 로보트는 관절형 로보트 NOVA-10의 2모델-구모델은 하모닉 드라이브 사용, 신모델은 사이크로 드라이브 사용-에 대하여 측정 비교한다.

(1) 시험 방법 및 장치

하모닉 드라이브의 CS-32와 Cs-50형식과 사이크로 드라이브 F-15, F-35형식은 그림 6과 같이 각각 로보트 암 구동 형태를 구성하여 직접 모타에 전원을 가하여 회전속도(rpm)의 변화에 따른 진동 특성을 시험하였고, 하모닉 드라이브의 CS-40형식과 사이크로 드라이브 F-25형식은 로보트 NOVA-10 2종류의 선회축(Swivel축)에 대하여 제어계를 통한 속도 변화에 대하여 시험하였다.

이들에 대한 측정 장비는 아래와 같고, 표 1은 시험 조건에 대하여 설명되어 있다.

o 측정 장비

Pick up용(Accelerometer) : B&K 4366

Amplifier : B&K 2626

Vibration Meter(FFT) : ONO SOKKI

CF-400

DC Power Supply : hp 6012A

표 1 시험 조건

Table 1. Test conditions

측정 감속기 형식		부하 GD ² (Kgf · m ²)	모타 용량 (W)	측정 형태
Harmonic Drive	Cyclo 감속기			
CS-32-100 -2A-R	F-15 1/87	21.21	180	수평선회 동작
CS-50-120 -2A-R	F-35 1/119	89.20	500	수평선회 동작
CS-40-100 -2A-R	F-25 1/119	45.2	400	NOVA-10 (Swivel 축 동작)

(2) 시험 결과

위 시험조건에 의한 결과는 그림 7-그림9와 같다. 여기서 그림7, 그림8을 보면, 사이크로 드라이브는 입력 회전수 500rpm 전후에 1차 공진점이 있고, 진폭량도 0.5-0.55g정도로 나타났으며, 1000rpm 전후에 2차 공진점이 존재하고, 진폭량은 0.55-1.25g임을 알 수 있다. 반면에, 하모닉 드라이브는 입력 회전수 350

rpm과 500rpm전후에 공진점이 있으며, 진폭량은 0.2-0.3g로 나타났다.

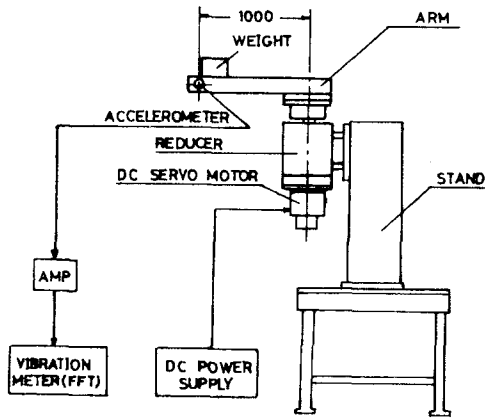


그림 6 감속기 진동 측정 장치
Fig.6 Experimental set-up

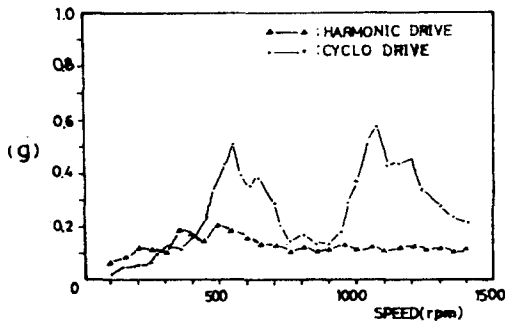


그림 7 하모닉 드라이브 : CS-32 사이크로 드라이브 : F-15 진동 특성
Fig.7 Vibration characteristics (H/D : CS-32, C/D : F-15)

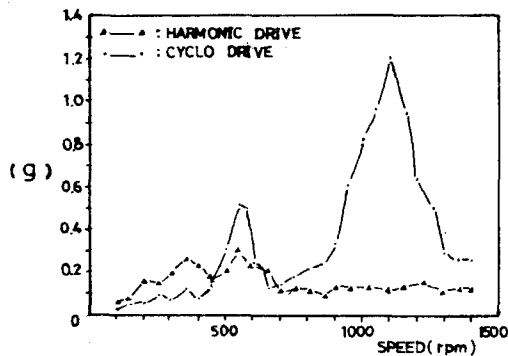


그림 8 하모닉 드라이브 : CS-50 사이크로 드라이브 : F-35 진동 특성
Fig.8 Vibration characteristics (H/D : CS-50, C/D : F-35)

또한, 공진점을 포함한 전 회전 영역에서 정성적(定性的)진동 가속도 크기를 비교한 결과 진동량에는 약간의 차이가 있으나 2종류의 감속기마다 2개의 공진점이 있음을 알 수 있다. 그림 9는 실제 사용하고 있는 로봇에 대하여 시험한 결과로서, 전 영역에 걸쳐 진폭량이 크게 나타나는데, 이는 로봇의 진동을 야기시키는 기계의 조립 불량(misalignment), 서보 게인(gains) 등에 의한 것으로 보여지고, 그림에서와 같이 공히 2개의 진폭량이 큰 공진점이 감속기의 공진 발생 위치에서 발생함을 알 수 있다.

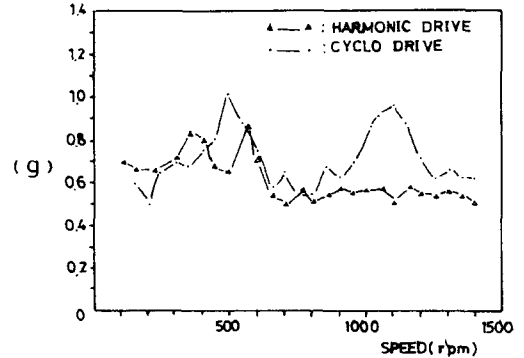


그림 9 로봇 NOVA-10 Swivel축 진동 특성
하모닉 드라이브 : CS-40
사이크로 드라이브 : F-25
Fig.9 Vibration characteristics of swivel axis for NOVA-10 (H/D : CS-40, C/D : F-25)

5. 결 론

이상과 같이 로봇의 진동을 야기시키는 원인으로는 여러가지가 작용하게 되는데, 그 중에서도 감속기에 의한 영향에 대하여 감속기 진동 특성과 실제 부하가 작용된 로봇에서의 진동관계를 알아본 결과, 하모닉 드라이브와 사이크로 드라이브에 2개의 공진점이 존재함을 알 수 있고 따라서, 로봇의 동작 속도는 이들의 공진점을 피하도록 설정해야 될 것으로 사료된다. 기타 감속기의 조립 및 기계 가공품의 강성등 로봇 진동에 관련된 사항들에 대하여서도 그 영향 정도 및 대책을 강구하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 飯倉省一, "減速装置とトルク伝達", 機械設計, 30卷, 8号, PP25~32, 1986.7
2. 古賀英士 外3人, "シミュレーション解析によるロボットの振動に関するパラメータ", 日本ロボット学会誌, 3卷, 3号, PP25~34, 1985.6
3. "Harmonic Drive R Series Components", Harmonic Drive Systems(株), 1986
4. "Cyclo Drive F Fine Series", 住友重機械工業(株), Cat.NO.C159, 1985
5. "Machinery Vibration", Scientific-Atranta, 1974