

로봇용 감속기의 진동 특성 비교

손 창 수

대우중공업(주) 중앙연구소

Comparison of Vibration Characteristics on Reducer for Robot

Chang Soo Son

Technical Center / DAEWOO HEAVY INDUSTRIES LTD.

Abstract

The reducers are widely used to reduce output speed and to amplify driving torque of actuator for industrial robots and many industrial units.

But the vibration of robot, which is affected by the reducer, becomes a problem for robot which has to move a driven part with high accuracy.

This paper compares experimentally the vibration characteristics of the reducer for industrial robot.

1. 서 론

산업용 로봇은 고도의 기술을 결합한 첨단기술의 결합체로써 유연성(Flexibility)과 지능화(Intelligence)로 특징 지을 수 있으며, 현재 생산 자동화에 핵심적인 역할을 담당하고 있다. 이에 따라 로봇의 고속화 및 고성능화가 요구되며, 그중에서도 시스템의 안정성(Stability)은 정밀 작업과 신뢰도 향상을 위해 우선 고려되어야 한다.

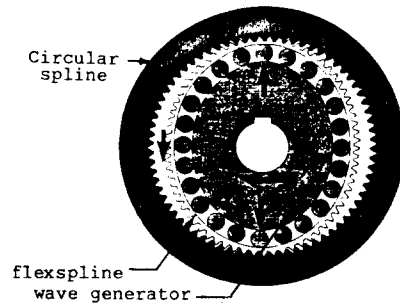
그런데 제어시스템과 기계적 구동계로 이루어진 로봇에 있어서 차중에 의한 정적변형, 관성력에 의한 동적변형, 구조적 공진등은 로봇의 신뢰도 및 위치 정밀도를 감소시키고 고속 작업시 성능감소 및 불안정성을 야기시킨다. 특히 로봇의 진동은 서보 게인(Servo Gain) 조정불량, 동적영향, 속도지령과 출력 모오크의 비선형성, 가공 및 조립오차, 베어링 및 기어의 영향, 감속기의 공진 현상등에 의해 발생한다. 특히 감속기는 모터의 속도 감속 및 고 모오크를 얻기 위해 산업용 로봇에 주로 사용되고 있으나, 이로 인한 진동은 고 정밀도를 요하는 작업에 큰 문제로 지적되고 있다.

여기서는 현 산업용 로봇에 주로 쓰이는 감속기(Cyclo Drive, Harmonic Drive, RV Reduction Gear)의 진동 특성을 고찰하며, 이들이 로봇 진동에 미치는 영향에 대해 알아 보고자 한다.

2. 로봇용 감속기

(1) Harmonic Drive

Harmonic Drive는 Wave Gear 방식으로 로봇에 많이 사용되고 있으며, 그 감속비는 1/50-1/320까지 광범위하다. 또한 경량이고 비교적 효율이 높으며, 입력축의 Inertia가 크다. 그 구조는 [그림 1]과 같이 Wave Generator, Circular Spline, Flexspline 3부분으로 구성된다.



[그림 1] Harmonic Drive Components

감속비는 Flexspline과 Circular Spline의 잇수에 의해 결정되며, Flexspline 잇수를 Zf, Circular Spline 잇수를 Zc라 하면 감속비는 다음과 같다.

A) 입력 : Wave Generator

출력 : Flexspline

고정 : Circular Spline 일때

감속비 $n_1 = 1/R_1 = (Zf-Zc)/Zf$ - - - (1)

B) 입력 : Wave Generator

출력 : Circular Spline

고정 : Flexspline 일때

감속비 $n_2 = 1/R_2 = (Zc-Zf)/Zc$ - - - (2)

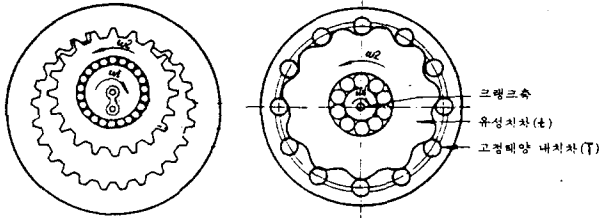
(2) Cyclo Drive

잇수가 1개차로 된 내접식 유성치차 기구와 등속도 내치차 기구의 조합에 의해 감속되며, 유성기어형으로 된 2장의 디스크

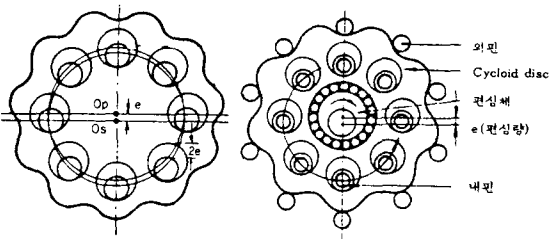
(Disc)판의 위상차에 의해 백래쉬가 적고 내부 강성이 높다,
 그 감속원리는 [그림 2]에 나타내었으며, 입력축이 1회
 전하면 유성기어와 태양기어의 잇수차이 만큼 유성기어는 회전
 하게 된다. 이 회전이 이송핀에 의해 출력축 회전이 된다.

$$\text{감속비 } n = 1/Rc = -(T - t)/t \quad (3)$$

T는 태양기어 잇수이고 t는 유성기어 잇수이다.



1. 내접식 유성치차 기구 2. Epitrochoid 유성치차기구

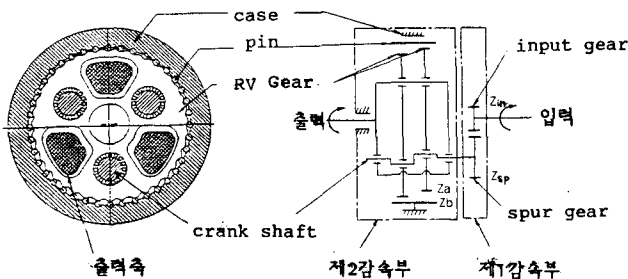


3. 등속도 내치차기구 4. Cyclo Drive 구조모형

[그림 2] Cyclo Drive 감속 원리

(3) RV Reduction Gear

이 감속기는 평기어 감속부와 내치에 핀기어, 외치에
 토로이드계 기어를 사용한 편심 차동방식 감속부를 사용한
 2단 감속형 감속기이다.



[그림 3] RV Reduction Gear

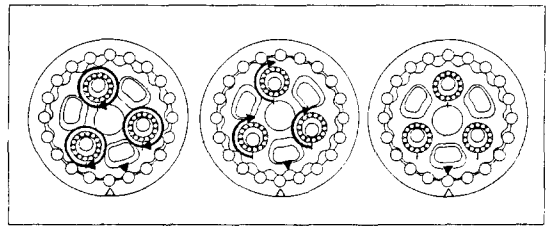
모타회전은 Input 기어에 의해 Spur 기어에 전달되며, 이들
 잇수비 만큼 감속되며, 이것이 1단 감속부이다. Spur 기어
 의 회전이 크랭크 축에 전달되어 RV 기어의 편심운동을 일으
 킨다. 이 부분이 2단 감속부이다.

A) 제 1 감속부

$$\text{감속비 } i_1 = Zin / Zsp$$

B) 제 2 감속부

$$\text{감속비 } i_2 = 1/Za$$



[그림 4] 제 2감속부의 동작 원리

C) 전 감속비

i) 케이스 고정, 출력축 회전

$$i = 1/R \quad R = 1 + (Zsp/Zin)Zb \quad (4)$$

ii) 출력축 고정, 케이스 회전

$$i = 1/(R - 1) \quad (5)$$

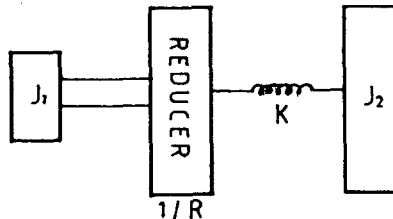
여기서 Zin : Input 기어 잇수

Zsp : Spur 기어 잇수

Zb : RV 기어 잇수

3. 토보트 구조의 진동계 모델

서보 모터, 감속기, 부하 Inertia로 구성되는 시스템의
 진동은 특정 회전수에 대해 부하 Inertia의 공진
 현상으로 발생한다. 이 진동 모델을 단순화하여 나타내면
 [그림 5]와 같다.



J1 : 모터 Inertia J2 : 부하 Inertia

K : 감속기의 비틀림 강성 1/R : 감속비

[그림 5] 진동 Model

이 계의 고유 진동수(f_w)는 식 (6)과 같다.

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{J}} \quad (6)$$

여기서 $J = \frac{J_1 J_2 R^2}{J_1 R + J_2}$

이때 감속기가 가진 Inertia는 J1, J2에 비해 작으므로
 무시한다. 이 진동 모델에 있어서 모타 회전수가 증가할때
 Harmonics 회전수와 f_w 가 일치할 때 공진 현상이 발생한다.

(1) RV 감속기의 Harmonics 회전수 및 공진 모타 회전수
 RV 감속기의 가장 큰 진동을 일으키는 첫번째 Harmon-
 ics 회전수(Hrl)는 식 (7)과 같다.

$$Hrl = Nr1 \times 40 / (Rr - 1) \quad (7)$$

여기서 Nr1 : 모터 입력 회전수(rps)

$$1/Rr : RV 감속기의 감속비 (Rr=121)$$

40 : 핀 수

또 두번째 Harmonics 회전수(Hr2)는 식 (8)이 된다,

$$Hr2 = 2 \cdot Hr1 \text{ ----- (8)}$$

이때 공진 모터 회전수는 다음과 같다,

$$Nr1 = \frac{Rr - 1}{40} \cdot fw \text{ ----- (9)}$$

$$Nr2 = \frac{Rr - 1}{80} \cdot fw \text{ ----- (10)}$$

(2) HD감속기의 Harmonics 회전수 및 공진 모터 회전수
HD 감속기의 Harmonics 회전수(Hh)는 식 (11)과 같다,

$$Hh = Nh \cdot 250 / (Rh - 2) \quad (Rh=128) \text{ -- (11)}$$

또 공진 모터 회전수는 식 (12), (13)이 된다,

$$Nh1 = \frac{Rh - 2}{250} \cdot fw \text{ ----- (12)}$$

$$Nh2 = \frac{Rh - 2}{500} \cdot fw \text{ ----- (13)}$$

(3) CD 감속기의 Harmonics 회전수 및 공진 모터 회전수
CD 감속기의 Harmonics 회전수(Hc)를 식 (14)에 나타내었다,

$$Hc = Nc \cdot 120 / (Rc - 1) \quad (Rc=119) \text{ -- (14)}$$

또 공진 모터 회전수는

$$Nc1 = \frac{Rc - 1}{120} \cdot fw \text{ ----- (15)}$$

$$Nc2 = \frac{Rc - 1}{240} \cdot fw \text{ ----- (16)}$$

이 된다,

4. 진 동 실험

(1) 실험용 감속기

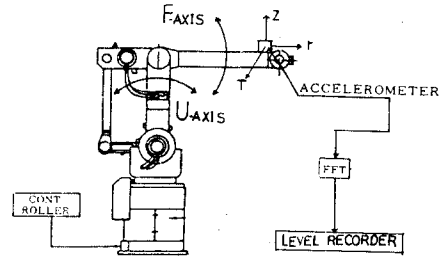
감속기명	모 델 명
RV 감속기	RV30-121-A1
Harmonic Drive	CS40-128-2A-GR-SP
Cyclo Drive	F25SS-119

(2) 측정 장비

- FFT : Vibration Analyzer Type 2515(B & K)
- Accelerometer : Type 4370 (B & K)
- Level Recorder : Type 2317 (B & K)
- 5축 다관절 로봇 NOVA-10

(3) 실험 방법

손목부 상단에 가속도계를 부착하여 속도 스텝을 변화시키면서 각 3방향의 진동량을 측정하였다.



[그림 6] 측정 장치

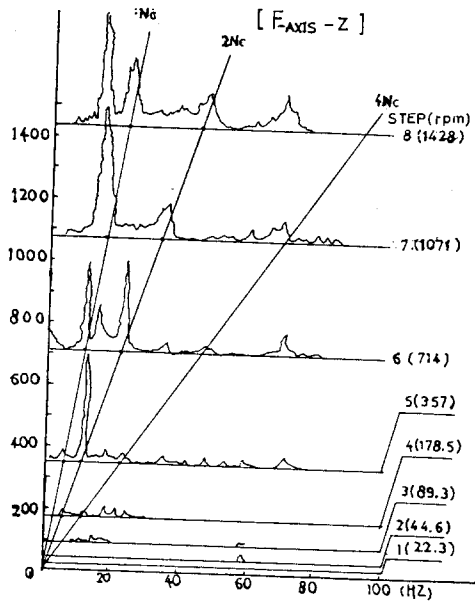
각 축 운동시 측정 방향은 r, z, T 방향이며, 동작범위는 다음과 같다,

- U축 동작 범위 : $-30^\circ \leq U \leq 40^\circ$
- F축 동작 범위 : $-40^\circ \leq F \leq 20^\circ$
- U, F축 복합 운동시 : $-25^\circ \leq U \leq 30^\circ$
 $-20^\circ \leq F \leq 15^\circ$

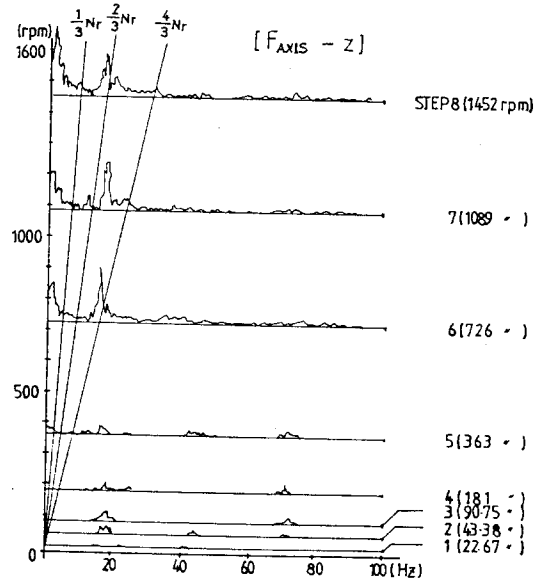
5. 실험 결과

각 감속기의 입력 회전수에 따른 진동 가속도의 주파수 성분을 나타내면 [그림 7] - [그림 9]와 같다, Cyclo Drive와 Harmonic Drive에서는 입력 주파수의 2n (n=1,2, . . .)배의 주파수 성분이 나타났으며, RV 감속기에서는 공진 입력 회전수가 실험 측정 회전수보다 높아 특별한 경향이 나타나지 않았다. U축 운동시 주된 진동 방향은 r 방향이며, F축 운동시는 z 방향이며, CD의 진동량은 Step 6,7에서 최대이며, 이 Speed Step은 1차 공진 입력 회전 속도에 해당한다. 또 HD는 속도가 증가함에 따라 진동량이 계속 증가하는 경향이며, Speed Step 8에서 최대의 진동이 발생하였으며, 고속으로 운동할 경우 진동이 증가할 가능성이 있다. RV 감속기는 2단 감속의 특성 때문에 공진 입력 회전수가 높아져 다른 감속기에 비해 진동량이 적게 나타났다.

U, F축 복합 운동시 나타나는 진동은 U, F축 각각 구동시의 진동이 복합되어 나타났으며, 단일축 구동시보다 진동이 크다. 또 단일축 구동시 큰 진동이 발생하는 경우의 복합 진동의 증폭도는 상대적으로 크게 나타났다.



[그림 7] 회전수에 따른 CD 감속기의 주파수 분석



[그림 9] 회전수에 따른 RV 감속기의 주파수 분석

6. 결 론

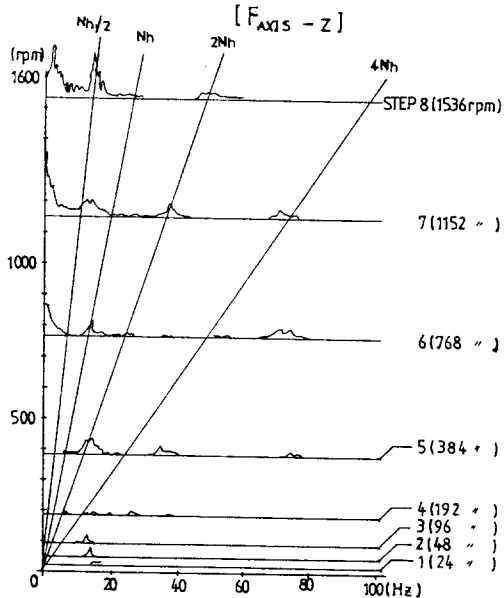
로봇의 진동: 요인중 하나인 감속기의 진동 특성 및 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다,

1) 로봇계의 고유 진동수 (f_w) = $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{J}}$ 로

표시되며, 진동 대책으로 f_w 를 크게 하는 것이 유효하며, K는 구조에서 결정되므로 변화시키기는 어려우나 공진시의 입력 회전수(N_{in})는 $N_{in} = f_w \times i_1$ (i_1 : 1단계 감속비)로 주어지므로 i_1 를 크게 하면 공진시의 입력 회전수를 고속 영역으로 이동시킬 수 있어 정밀제어를 필요로 하는 저속 영역에서의 공진을 방지하고 진동도 작게 할 수 있다,

2) CD의 진동량은 RV, HD에 비해 상대적으로 크며, 이들 감속기는 특정 회전수에서 공진점이 존재함을 알 수 있고, 따라서 로봇의 동작 속도는 이들 공진점을 피하도록 설정되어야 한다,

3) 로봇에 주로 사용되고 있는 감속기는 입·출력축이 일치 (Coaxial)하는 유성기어 방식을 채용하고 있으며, 입력부의 편심(RV, CD) 혹은 타원형상(HD)등의 특성에 의해 입력 회전수의 차수성분 즉 $2n$ ($n=1, 2, \dots$)배의 진동 주파수가 나타나는 경향이거나, 감속기의 비선형적인 특성 및 복잡한 구조인 로봇계의 영향으로 이들 주파수가



[그림 8] 회전수에 따른 HD 감속기의 주파수 분석

지배적으로 나타나지는 않았다.

REFERENCE

1. Robot Technology, Volume 4, "Robot Components and Systems", Kogan Page London.
2. 日高照晃 外 3 人, "産業用 ロボットの 旋回駆動部における 振動特性に 関する 研究" 日本機械学会論文集, 第 480号, C 編
3. 松本和幸 外 1 人, "RV 減速機と その ロボットへの 適用" 自動化技術, 第19巻, 第 7号(1987), PP87~90
4. 松本和幸 外 1 人, "偏心差動方式 減速機 RV 減速機" 機械設計, Vol.31, NO. 8, 1987. 6
5. 이봉익, 하태광, "감속기에 의한 로봇트 진동 특성 고찰" 大字技報, Vol.6, NO. 1, 1987. 2
6. "Vibrations of Rotating Machinery", KOREA STANDARDS RESEARCH INSTITUTE, KSRT - ET - 71