

추진장치 조합시험을 위한 프로그래머블 다이내모미터 제어

김길동** 이한민* 오세찬* 강승욱** 이훈구***
 *한국철도기술연구원, **카톨릭상지대학, ***용인송담대학

A Programmable-Dynamometer Control For Propulsin system combined Testing

Gil-Dong Kim**, Han-Min Lee*, Seh-Chan Oh+, Seung-Wook Kang**, Hun-Gu Lee***
 *Korea Railroad Reaserch Institute(KRRI), **Catholic Sangji college, ***Yong-in Songdam college

Abstract - A programmable dynamometer is the proposed system improved the problem of the torque measuring delay with torque transducer, and the load torque is estimated by the minimal order state observer based on the torque component of the vector control induction moter. Therefore, the torque controller is not affected by a load torque disturbance.

To verify a superiority of the proposed control algorithm, the analysis for a root locus of a conventional control method and the proposed one, and simulation and experiment is performed. Therefore we hope to be extended in industrial application.

Key Words : Dynamometer, Feed-forward, a load torque observer,

1. 서 론

본 논문에서는 기존의 토크 검출기 사용에 대한 문제점을 개선하기 위해서 시험체(MUT)의 토크 검출 없이 부하 토크 관측기에 의한 제어방식을 제안하였다. 제안된 시스템에서는 PDM의 부하토크를 관측한 값에 관성 토크를 더하여 MUT의 구동토크를 추정하는 방식으로 토크 검출기를 이용할 때 발생하는 토크 지연현상에 대한 문제점을 개선하였고, 속도관측기에 의해 추정되는 부하토크를 이용하여 피드포워드 제어를 함으로써, 속도 변화에 독립적으로 부하토크를 제어 할 수 있도록 하였다. 제시한 제어 알고리즘에 대하여 타당성을 검증하기 위해서 토크 검출기를 이용할 때 나타나는 필터의 차단 주파수에 대한 문제점을 근계적용 통해 입증하였고, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제시한 방법이 우수함을 확인하였다. 따라서 확인된 PDM 장치는 토크검출 없이 시험이 가능하므로 산업용 가변속 구동장치의 여러 가지 부하를 시험하기 위한 시험장치로 활용이 확대 될 것이며, 빠른 설계를 원하는 모터구동장치 제작자에 의해 널리 사용 될 것으로 기대된다.

2. PDM의 시스템 구성

본 논문에서는 22[kW] 유도전동기 2대를 이용하였다. 인버터는 35[kW] 인버터 2대를 이용하였다. 그리고, 인버터에 공급되는 DC 전원은 MUT 인버터와 PDM 인버터를 DC bus로 구성하여 회생시 발생된 전력이 순환하고 DC link 커패시터에 에너지를 저장함으로써 약간의 전압 상승이 나타날 수 있지만, 주 전력 공급장치는 드라이브의 손실분만을 공급할 수 있는 시스템으로 구성하였다.

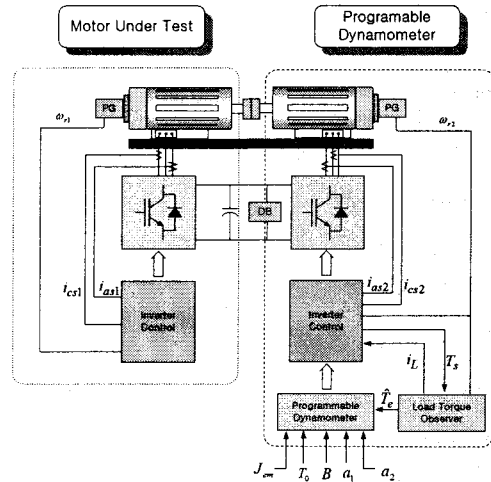


그림 2.1 전체 제어 블록도

2.1 운동방정식

유도전동기 시험세트를 이용하여 기계적인 부하를 전기적 관성으로 구현하면 그림 2.2과 같이 모델링 할 수 있다.

PDM를 제어하기 위한 MUT의 속도와 가속에 이용되는 토오크와의 관계의 기본 운동방정식은 식 (2-1), (2-2)과 같다.

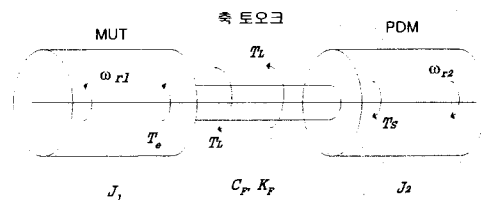


그림 2.2 시험 장치의 운동 방정식

$$T_e = J_1 \frac{d\omega_{r1}}{dt} + T_L \quad (2-1)$$

$$\omega_{r1} = \frac{1}{J_1} \int (T_e - T_L) dt \quad (2-2)$$

여기에서 T_e 는 모터의 구동 토크, T_L 는 부하 토크, ω_{em}^* 은 모터의 관성 모멘트, J_1 는 전동기의 회전모멘트이다.

2.2 기존의 제어방식

2.2.1 PDM의 축토크 모델링

그림 2.3은 그림 2.2와 같은 시험장치를 구성할 경우에 필요한 기계적 커플링에 대한 수학적 모델링을 나타내었다.

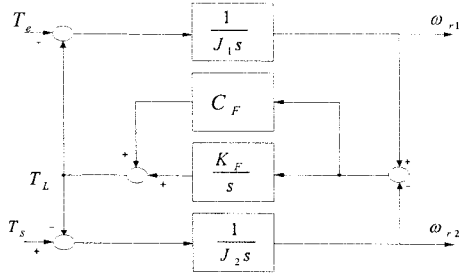


그림 2.3 기계적 커플링에 대한 기계계의 모델

그림 2.4의 블록도에서 G_i 는 2대의 모터의 기계적 커플링에 대하여 수학적 모델로 표현하면 식 (2-8)과 같다. 여기서, C_F 는 토크전달기구의 점성마찰계수이고, K_F 는 용수철 정수로서, 기계계의 운동방정식을 구하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\omega_{r1} = \frac{1}{J_1 s} (T_e - T_L) \quad (2-6)$$

$$\omega_{r2} = \frac{1}{J_2 s} (T_s - T_L) \quad (2-7)$$

$$T_L = \frac{K_F}{s} (\omega_{r1} - \omega_{r2}) + C_F (\omega_{r1} - \omega_{r2}) \quad (2-8)$$

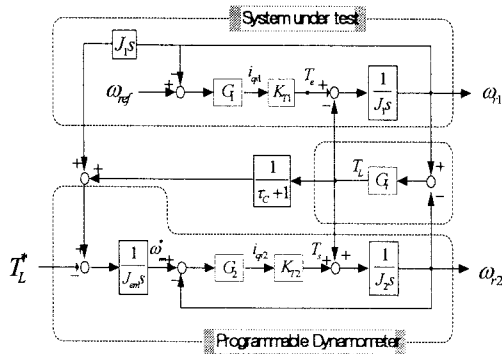


그림 2.4 기존의 전기적관성 부하를 위한 제어 블록도

2.2.2 토크 검출기 필터의 차단 주파수에 의한 속도 응답특성

제어 블록도에서 볼 수 있듯이 직접 토오크를 검출하는 방식은 필터의 지연현상으로 인하여 정확한 크기의 관성 부하구현이 어렵고, 필터의 대역폭이 작아지는 경우 제어의 특성에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 필터의 대역폭에 대한 제어특성을 알아보기 위해서 지령 속도에 대한 전달함수를 구성하면 식(2-9), (2-10)와 같다.

$$\frac{\omega_r}{\omega_r^*} = \frac{G_1 K_{i1} (1 - (L_3 + L_4 + L_5)) / J_1 s}{1 - \Delta_1 + \Delta_2} \quad (2-9)$$

$$\frac{T_L}{T_L^*} = \frac{G_2 K_{i2} G_1 (1 - L_1) / J_{em} J_2 s^2}{1 - \Delta_1 + \Delta_2} \quad (2-10)$$

식 (2-9)을 이용하여 기계적 관성에 대한 필터 대역폭 변화에 대한 근계적을 구하며 필터의 대역폭 변화에 대한 근의 변화를 보면, 대역폭이 커지고 적은 전기적 관성일

경우, 심한 진동현상을 보여주고 있다. 그러나 전기적 관성이 커질수록 기계적 관성의 변화와 유사한 특성을 보여주고 있다, 이것은 대역폭이 작은 필터일수록 토크 지연현상으로 인하여 PDM모터의 토크응답이 늦어져 나타나는 현상이다.

또한 부하에 대한 특성방정식도 속도에 대한 특성방정식과 같기 때문에 $J_1, 3J_1$ 과 같은 적은 크기의 전기적 관성구현에 있어서 심한 진동 현상을 보여주고 있다. 이것은 PDM의 늦은 제어특성 때문에 나타나는 것으로 피드포워드 제어회로에 의해 개선될 수 있다.

기계적 관성부하와 전기적 관성부하의 차이를 보다 명료하게 표현하기 위해서 동일한 좌표에 우세근을 도시하면 그림 2.5과 같다.

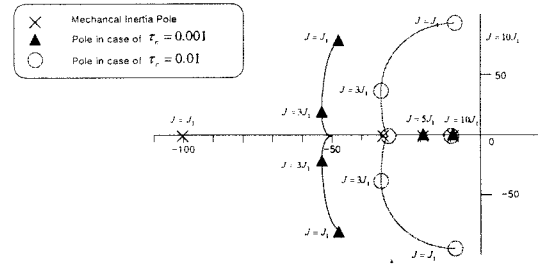


그림 2.5 필터의 차단 주파수 변화에 대한 근계적

이상과 같이 PDM의 필터에 대한 근계적을 검토한 결과 PDM는 토크 검출시 지연 없거나 또는 대역폭이 넓은 필터를 이용하여 검출하여야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 종래의 토크 검출방식의 제어기는 전기적 관성부하에 대하여 만족할만한 성능을 기대할 수 없다.

2.3 부하토크 관측기에 의한 MUT 모터의 토크추정

2.3.1 피 시험체 구동토크 추종 알고리즘

VCIM의 토크 발생 메카니즘은 종래의 DC 모터의 토크 발생 메카니즘과 동일하기 때문에 기계적인 방정식은 VCIM의 토크 성분을 토대로 다음과 같이 얻어질 수 있다.

여기서 점선 부분이 없을 경우 모터의 구동 토크 및 부하 토크에 대한 속도식은 식 (2-11)과 같다.

$$\omega_{r2} = \frac{1}{J_2 s} [K_T i_{as2} - T_L] \quad (2-11)$$

식 (2-11)로부터 모터의 속도 ω_{r2} 는 부하토크 T_L 에 의해 변하게 된다.

그림 2.6은 점선으로 표시된 부하토크 피드 포워드 루프가 있는 속도 제어 블록도를 보여준다. 여기서 T_L 은 알 수 없는 변수이기 때문에, 제어기에서 \mathcal{T}_L 으로 추정되어져야만 한다. 토크 \mathcal{T}_L 추정하였다고 가정하면,

$$\omega_{r2} = \frac{1}{J_2 s} \left[K_T (i_{as2} + \frac{\mathcal{T}_L}{K_T}) - T_L \right] \quad (2-12)$$

으로부터

$$\omega_{r2} = \frac{1}{J_2 s} [K_T i_{as2} + \mathcal{T}_L - T_L] \quad (2-13)$$

식 (2-13)으로 정리된다. 여기서 추정된 부하토크 \mathcal{T}_L

와 실제 부하 토크 T_L 가 일치한다면 전동기의 속도는 부하토크 T_L 에 무관하게 된다. 따라서, 부하 외란 토크 \mathcal{T}_L 의 영향은 그림 2.6 점선 블록으로 표시된 피드포워드 제어기에 의해서 토크 전류 i_T 로 제거될 수 있다.[8]

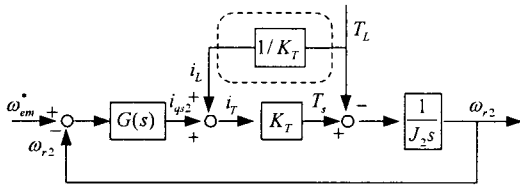


그림 2.6 부하토크 피드포워드 제어기를 갖는 제어블록

따라서, 속도 지령에 대한 속도 응답은 속도 제어기 $G(s)$ 에 의해 결정된 이상적인 제어기로 설정될 수 있다. 본 논문에서 부하토크 관측기는 T_L 을 추정하기 위해 도입되었다. 그래서, MUT의 구동토크 및 PDM의 지령속도는 식(2-18), 식(2-19)와 같다.

$$\mathcal{T}_e = J_1 d \frac{\omega_{r1}}{dt} + \mathcal{T}_L \quad (2-18)$$

$$\omega_{em}^* = \frac{1}{J_{em}} \int [\mathcal{T}_e - T_L] dt \quad (2-19)$$

따라서, 식 (2-18), 식(2-19)으로부터 제어 블록을 구성하면 그림 2.7와 같이 표현된다.

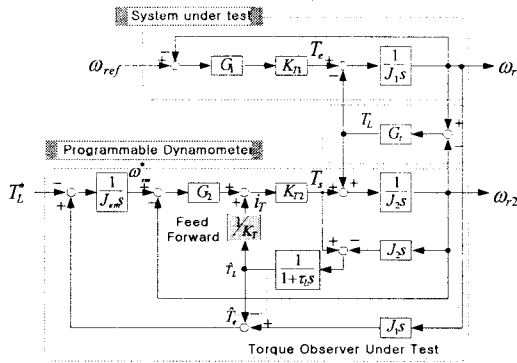


그림 2.7 제안된 PDM 제어블록도

2.3.3 부하토크 관측기에 의해 토크 추정에 의한 속도 응답특성

부하토크 관측기에 의해 토크 추정된 시스템의 제어특성을 알아보기 위해서, 속도지령에 대한 속도 응답과 토크 지령에 대한 부하응답을 전달함수를 나타내었다. 여기에서, 식 (2-20), (2-21)는 Mason 방정식에 따라 Closed-loop 로 구성하면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\omega}{\omega_r^*} = \frac{G_1 K_{i1} (1 - (L_3 + L_4 + L_5)) / J_1 s}{1 - \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3} + \frac{G_1 K_{i1} (L_3 L_8 + L_3 L_7) / J_1 s}{1 - \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3} \quad (2-20)$$

$$\frac{T_L}{T_L^*} = \frac{G_2 K_{i2} G_f (1 - L_1) / J_{em} J_2 s^2}{1 - \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3} \quad (2-21)$$

식 (2-20)로 부터 제안된 PDM의 속도 전달함수에 대한 근계적을 그림 2.8에서 나타내고 있다.

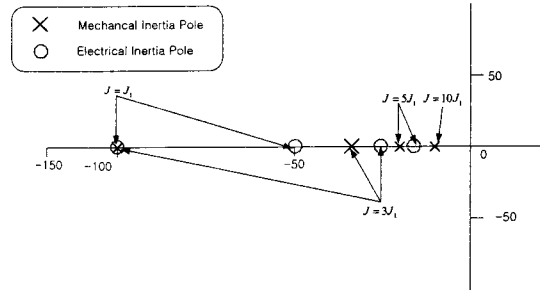


그림 2.8 속도 전달함수에 대한 모의 관성계수 변화시 근계적 (부하토크 관측기를 이용한 제어방식)

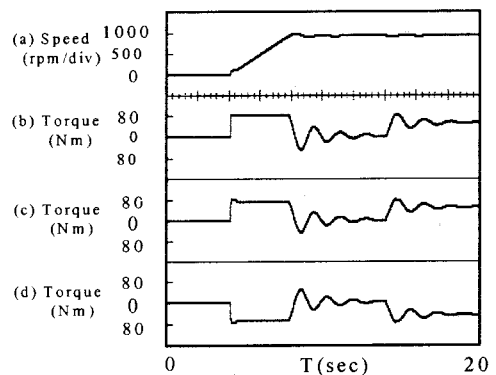
여기에서 MUT의 실제관성 J 의 1배에 해당하는 모의관성의 우세극점은 -100, -47에 위치한다. 이것은, 실제 관성체와는 다소 차이를 보이지만 토크 검출기를 이용한 경우보다 진동현상이 없고 유사한 등가 부하관성을 보여주고 있다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서, 전기적 관성 부하 시스템의 시뮬레이션은 전기적 관성변화에 대한 속도응답특성과 지령 토크에 대한 부하 토크구현을 확인하기 위해서, MUT 속도제어기의 대역폭은 100[rad/s]으로 하고 PDM의 속도제어기의 대역폭은 500[rad/s]로 설정하여, matlab simulink을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

두 대의 전동기는 벡터제어를 하였으며, 2대 전동기의 속도 차에 의한 부하토크가 상호 작용하여 프로그래밍이 가능한 PDM를 구성할 수 있다.

그림 3.1은 기존의 시스템에 대하여 모의 관성 변화시 속도 및 부하 외란 토크에 대한 특성을 보여주고 있으며, MUT의 회전자 관성모멘트 J 가 0.23 [kg · m²]일 때, PDM의 모의관성변화는 $J_{em} = 8J$ 로 하였고, 10초 후 전 부하토크에 해당하는 80[Nm]의 스텝부하를 인가하였을 경우에 MUT의 구동토크 전류를 나타내고 있다.



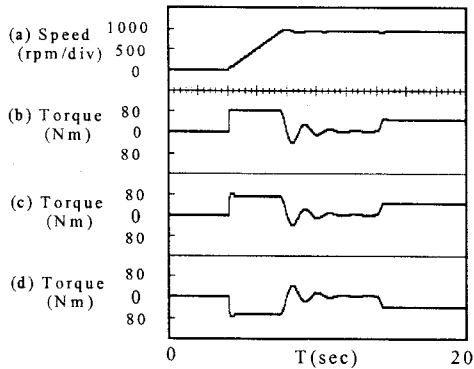
(A) $J_{em} = 8J$ 일 경우 속도 및 토크파형

(a) MUT의 속도 (b) MUT의 토크 (c) 추정된 MUT 토크 (d) 관측된 PDM의 부하토크 (Time/div:2[sec])

그림 3.1 J_{em} 변화 및 스텝부하토크에 대한 MUT의 특성

여기에서 볼 수 있듯이 모의관성 및 스텝부하에 대하여

PDM가 부하를 구현하고 있다. 그러나 속도상승 시에 속도가 비선형적으로 상승되고 있음을 알 수 있다. 이것은 PDM 모터와 토크 메터의 기계적 커플링에 의한 유격 및 MUT 모터와 토크 메터의 기계적 커플링시 존재하는 유격에 대한 영향과 PDM 모터의 속도제어 지연현상에 의해 나타난 것이다. 또한 스텝 부하 인가시 지령토크를 구현하는데 많은 정착시간이 요구되는 것을 알 수 있다. 이것은 토크 검출기로부터 검출된 토크 출력신호에 나타나는 Noise를 제거하기 위해서 대역폭이 좁은 필터를 사용하게 되는데 이로 인한 토크 지연현상에 의해 토크 트러블 현상을 보여주고 있는 것으로 판단된다.



(A) $J_{em}=8J$ 일 경우 속도 및 토크파형

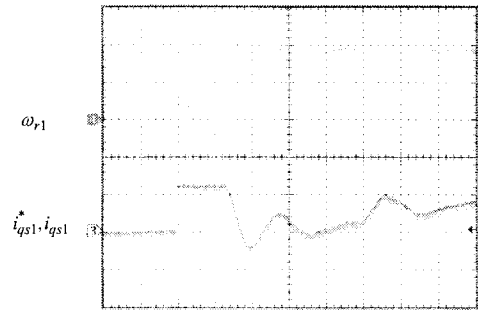
(a) MUT의 속도 (b) MUT의 토크 (c) 추정된 MUT 토크
(d) 관측된 PDM의 부하토크 (Time/div:2[sec])

그림 3.2 J_{em} 변화 및 부하에 대한 제안된 MUT의 특성

그림 3.2는 그림 3.1과 같은 시험조건에서의 MUT의 구동모터를 추정하여 연산하고, 전류제어기에 부하토크에 해당하는 토크성분전류를 피드포워드 제어하였을 경우에 시스템 응답 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 관성 변화에 대하여 보다 선형적으로 잘 구현됨을 알 수 있으며, 스텝부하 인가시 빠른 토크 응답으로 MUT 모터에 정확한 크기의 부하 작용을 하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 토크 추정에 의한 제어방법의 타당성은 시스템에 근계적을 통하여 예측할 수 있었고 시뮬레이션에서 확인할 수 있었다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 제안된 제어방식을 검증하기 위하여 22[kW] 유도전동기 2대를 이용하였다. 인버터는 35[kW] 인버터 2대를 이용하였으며, 인버터에 사용된 주회로 IGBT 소자는 1200[V] 200[A]이다. 인버터에 공급되는 DC 전원은 MUT 인버터와 PDM가 DC bus로 구성하여 회생시 발생된 전력이 순환하고 DC link 커패시터에 에너지를 저장함으로써 약간의 전압 상승이 나타날 수 있지만, 주전력 공급장치는 드라이브의 손실분만을 공급할 수 있는 시스템으로 구성하였다. 그리고 제어 알고리즘을 구현하기 위해서 TMS320F240 DSP를 이용하였다. 벡터제어방법은 회전자 자속기준 벡터제어를 이용하였으며 전류제어루프는 200[μ S]마다 동작되며 속도제어루프는 5[mS]마다 제어되도록 하고, 실험에 사용된 encoder는 1024[ppr]로 4채배하여 사용하였다.

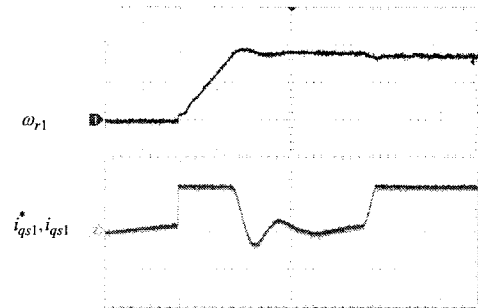


(b) $J_{em}=8J$ 일 경우 속도 및 토크파형

그림 4.2 기존 제어방식에 의한 MUT의 속도제어

그림4.2는 기존의 제어방식에 의한 기동특성 및 부하외란토크에 대한 실험파형으로 관성 모멘트를 8J로 변화시켰다. 그림에서 볼 수 있듯이 기동특성에서는 속도 점프현상이 비교적 크게 나타나며, 정속도 운전시 부하 외란 토크를 구현하는데 있어서도 만족할만한 특성을 보여주지 못하고 있다.

그림 4.3은 그림에서 볼 수 있듯이 기동특성에서는 속도 점프현상이 기존 방식에 비하여 적게 나타나며, 정속도 운전시 부하 외란 토크를 구현하는데 있어서도 안정된 특성을 보여주고 있다.



(b) $J_{em}=8J$ 일 경우 속도 및 토크파형

그림 4.3 feedforward제어에 의한 MUT의 속도제어

5. 결 론

본 논문에서는 MUT의 구동 토크를 관측하여 기존의 토크 검출기를 이용할 때 발생하는 문제점을 개선하였으며, 근계적을 통하여 PDM의 토크검출기 필터에 의한 영향을 분석하였다. 또한 관측기를 이용하여 부하토크에 해당하는 부하토크 전류를 피드포워드 제어함으로써 보다 우수한 PDM을 구현하였으며, 또한 기존의 토크 검출기 사용에 대한 문제점을 개선하기 위해서 부하토크 관측기에 의한 제어방식으로 MUT의 토크 검출 장치를 제거하였고, 토크 검출기가 없기 때문에 모터 커플링이 줄게 됨으로써 기계적 강성을 높일 수 있어 토크 진동현상 없이 양호한 제어응답을 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] 김길동 외 4명 "벡터제어 유도전동기를 이용한 축소형 관성 시뮬레이터", 2002. 2. pp74-80
- [2] G. D. Kim, " Development of induction motor -generator set for traction system ", in ISIE 2001, pp 907-909
- [3] E.R.Collins, Y.Huang, "A programmable dynamometer for testing rotating machinery using a three-phase induction machine ", IEEE Trans, Vol.9, No.3, Sep 1994
- [4] B. Gopinath, " On the control of linear multiple input-output system", Bell Syst. Tech. J., vol. 50, no. 3, pp. 1063-1081