

은행 계원용 자동현금관리기의 소음 저감

Noise Reduction of a Bank Teller Cash Recycler

원 홍 인* · 심 우 정* · 김 재 원* · 박 창 호** · 김 종 우** · 정 우 철** · 정 진 태†
Hong-In Won, Woojeong Sim, Jaewon Kim, Changho Park, Jongwoo Kim,
Woochul Jung and Jintai Chung

(Received April 7, 2016 ; Revised April 28, 2016 ; Accepted April 28, 2016)

Key Words : Automatic Teller Machine(ATM, 금융자동화기기), Teller Cash Recycler(TCR, 계원용 자동현금관리기), Gear Mesh Frequency(GMF, 기어물림주파수), Low Noise Design(저소음 설계)

ABSTRACT

This paper proposes design guidances for noise reduction of a bank teller cash recycler(TCR). The operating noise of a TCR is required to be reduced because it bothers bank tellers and customers. The operating noise from a TCR is measured and the most influential driving system is examined. To find the main sources of the noise, the frequency spectra are analyzed by comparing with excitation frequencies of the driving system. From the analysis results, we reveals that the main sources of the noise are gear mesh frequency of a certain gear train and its side band frequencies, which is attributed by vulnerable support condition. Consequently, to reduce the operating noise, the structural modification for the gear train support is suggested and its effectiveness for the noise reduction is confirmed experimentally.

1. 서 론

각종 금융기관에서 사용되는 금융자동화기기(ATM, automatic teller machine)는 금융 업무의 연속성과 효율성을 증진시키기 위해 개발되고 개선되어 왔다. 그 중에서도 은행 계원용 ATM에 해당하는 자동현금관리기(TCR, teller cash recycler)는 다양하고 많은 업무를 수행해야 하는 계원의 부담을 경감하고 실수를 방지하기 위해 개발되어 여러 금융기관으로부터 관심을 받고 선호되고 있는 제품이다.

TCR은 많은 현금을 분류하여 보관하고 입출금 이외에도 지폐의 감별, 계수, 보충, 회수 등의 다양

한 기능을 수행하기 위한 전용 작동 모드를 갖는다. 따라서 TCR은 일반적으로 고객들이 입출금 용도로 사용하는 ATM보다 크고 복잡한 구조로 되어 있으며, 여러 개의 구동 모터와 기어, 폴리-벨트 등이 사용되기 때문에 큰 소음이 발생할 여지가 많다. 이러한 소음은 사무 공간의 정숙성을 저해할 뿐만 아니라 업무시간 동안 기기를 사용해야 하는 계원에게 지속적으로 불쾌감과 피로감을 유발하게 된다. 이에 따라 TCR을 구매하고 사용하는 소비자들은 다양한 기능과 높은 성능을 유지하면서도 조용한 사양을 요구하고 있으며, 제품의 개발자들은 이러한 요구에 부응하여 보다 경쟁력 있는 제품을 개발하기 위해 TCR의 소음 저감 기술 및 저소음 설계 가이드를

† Corresponding Author; Member, Hanyang University
E-mail: jchung@hanyang.ac.kr

* Hanyang University
** Nautilus Hyosung

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

필요로 하고 있다.

현재까지 ATM의 설계 및 해석 기술에 대한 연구는 주로 기능적인 측면에서 이루어져 왔다. 서준호와 최연선은⁽¹⁾ ATM에서 지폐의 이송방향을 결정하는 게이트 모듈의 응답속도 개선을 위한 연구를 수행하였으며, 정중기 등은⁽²⁾ 지폐의 두께를 감지하는 센서부의 성능 향상에 대한 연구를 수행하였다. 또한 윤여훈 등은⁽³⁾ ATM의 개발에 사용되고 있는 유연매체거동의 해석과 실험 사례를 발표하였고, 강기봉 등은⁽⁴⁾ 저전력에서도 기기의 성능을 효율적으로 확보하기 위하여 ATM의 구동 메커니즘에 대하여 최적화 연구를 수행하였다.

한편, ATM의 소음/진동에 대한 연구는 그 수가 많지 않으며, 실제로 ATM의 소음 수준을 평가하고 개선하는 연구는 아직 미진한 실정이다. ATM의 소음을 저감하기 위한 취지에서, 신범식 등이⁽⁵⁾ ATM 케이스의 진동 저감 연구를 수행하였고 손영부와 최연선이⁽⁶⁾ 지폐를 이송하는 크라운벨트의 횡방향 진동특성을 해석적 방법과 실험을 통해 분석하였지만, 이들 연구는 소음 수준에 대한 내용을 포함하지 않고 있다.

이 연구에서는 TCR, 즉, 계원용 ATM의 소음을 저감하기 위한 개선 설계 방안을 제시하고 그 효과를 검증하였다. TCR의 소음 수준은 실험을 통해 측정되었으며, 소음 주파수와 구동계의 가진주파수의 비교를 통해 주요 소음에 대한 가진원을 찾아내었다. TCR의 소음 발생 원인은 소음 신호 분석과 고속카메라 촬영을 통해 분석되고 규명되었으며, 소음 저감을 위한 구조개선 설계 방안을 도출한 후 이를 반영하였을 때 TCR의 소음이 저감되는 것을 확인하였다.

2. TCR의 소음 측정 및 평가 기준 수립

2.1 소음 발생 시스템

TCR은 지폐의 감별과 분류, 이송 등 다양한 기능을 수행하기 위해 많은 구동계로 이루어져 있으며 각 구동계들이 함께 작동하면서 소음을 발생시킨다. 이 연구의 대상인 TCR은 Fig. 1에 표시된 것처럼 6개의 모터에 의한 구동계를 가지고 있으며, 각 구동 모터는 업무수행 시 37.5 rps로 작동된다. 각 구동계는 다수의 축과 기어, 풀리, 벨트 등으로 구성되어

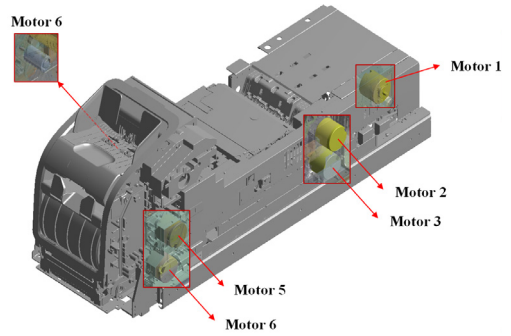


Fig. 1 Driving motors for TCR operation

있으며 이러한 기계요소들이 제품의 소음과 진동을 유발하는 가진원이 된다.

2.2 소음 신호의 측정 및 평가 기준 수립

TCR의 소음을 측정하고 분석하기 위해 소음계를 Fig. 2와 같이 제품 본체의 좌/우측 방향으로 거리 0.5 m, 높이 1.0 m에 설치하였다. 이때 소음계의 설치 위치는 TCR을 사용하는 계원의 위치를 고려하여 선정되었다.

TCR을 작동시키면 앞서 설명하였던 구동계가 모두 작동하면서 소음이 발생하고 소음 신호의 시간응답은 Fig. 3과 같이 암소음(background noise) 구간과 정상상태 소음(steady state noise) 구간으로 나타난다. 소음 측정의 단위는 Pa(A)이다. 암소음 구간은 TCR을 작동시키기 전의 소음 구간이며, 정상상태 구간은 TCR의 작동 후 지속적인 소음이 발생하는 구간이다. 이후 본문에서의 TCR 소음은 특별한 언급이 없다면 정상상태 구간의 소음을 의미한다.

TCR의 소음 수준은 다음 식을 통해 음압레벨(SPL, sound pressure level)로 계산되었다. 음압레벨의 단위는 dB(A)이다.

$$SPL = 10 \log_{10} \left(p_{\text{rms}}^2 / p_{\text{ref}}^2 \right) \quad (1)$$

여기서 p_{rms} 는 정상상태 구간에서 측정된 10초 동안의 소음 RMS이며, p_{ref} 는 사람의 최소 가청음압인 20 $\mu\text{Pa(A)}$ 이다.

앞서 설명한 방법으로 TCR의 소음 수준을 2회 측정한 결과는 Table 1과 같다. 이때 소음 수준의 평균은 Pa(A) 단위에서 산술평균을 취한 후 식(1)을 통해 dB(A) 단위로 나타낸 값이다.

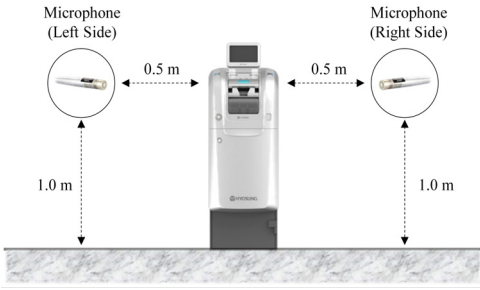


Fig. 2 Experimental setup for noise measurement

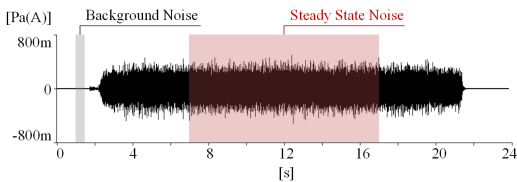


Fig. 3 Time response of the TCR noise

Table 2 Sound pressure level and contribution ratio of each driving system

| Driving system | Sound pressure level | Contribution ratio |
|----------------|----------------------|--------------------|
| System 1 | 56.8 dB(A) | 2 % |
| System 2 | 72.9 dB(A) | 68 % |
| System 3 | 62.9 dB(A) | 7 % |
| System 4 | 64.5 dB(A) | 10 % |
| System 5 | 65.3 dB(A) | 12 % |
| System 6 | 56.0 dB(A) | 1 % |
| Total | 74.3 dB(A) | 100 % |

Table 2는 각 구동계를 독립적으로 작동시키면서 측정된 소음 수준과 각 구동계가 전체 소음에 미치는 기여도를 나타낸다. 소음 수준의 측정 방법은 2절에서 소개한 방법과 동일하다. 각 구동계의 소음 수준 측정 결과를 기반으로, 수학적으로 계산되는 각 구동계의 소음 합

Table 1 Experimental results for sound pressure level

| Measurement number | Sound pressure level(dB(A)) | | |
|--------------------|-----------------------------|------------|---------|
| | Left side | Right side | Average |
| No. 1 | 74.0 | 74.4 | 74.2 |
| No. 2 | 74.4 | 74.2 | 74.3 |
| Mean | 74.2 | 74.3 | 74.3 |
| Std. deviation | 0.2 | 0.1 | 0.1 |

TCR의 소음 수준은 좌측과 우측 소음계에서 측정된 값에 큰 차이가 없고 반복실험에 대한 편차 또한 작기 때문에, 이 연구에서는 좌/우측의 평균 소음 수준 74.3 dB(A)를 TCR 소음의 평가 기준으로 수립하였다. 암소음 수준은 좌/우측 평균 54.3 dB(A)로 TCR 소음 수준에 거의 영향을 미치지 않는다고 판단하여 논의에서 제외하였다.

3. TCR의 소음 발생 원인 분석

3.1 각 구동계의 소음 기여도 분석

앞서 설명하였듯이, TCR의 소음은 6개의 구동계가 모두 작동되면서 발생하는 종합적인 소음이다. 따라서 각 구동계를 독립적으로 작동시키면서 소음 수준을 측정하면 각 구동계가 전체 소음에 미치는 기여도를 분석할 수 있다.

$$SPL_{sum} = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^6 (p_i^2 / p_{ref}^2) \right] \quad (2)$$

은 앞서 모든 구동계를 함께 작동하여 측정된 전체 소음 74.3 dB(A)과 일치하므로, 전체 소음에 각 구동계의 소음이 독립적으로 기여함을 뒷받침한다. 식 (2)에서 p_i 는 i 번 구동계를 독립적으로 작동시킬 때 측정되는 소음 RMS이다. 또한 각 구동계의 소음 기여도는 다음 식을 통해 계산된다.

$$CR_j = p_j^2 / \sum_{i=1}^6 p_i^2 \times 100 \text{ for } j=1,2,\dots,6 \quad (3)$$

여기서 CR_j 는 j 번 구동계의 기여도를 나타내며, 전체 구동계 대비 j 번째 구동계의 음향파워(sound power) 백분율을 의미한다.

각 구동계의 소음 기여도 분석 결과로부터, 2번 구동계가 약 68%의 기여도를 갖고 전체 소음에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 TCR의 소음을 저감하기 위해서는, 2번 구동계의 소음 발생 메커니즘을 파악하고 저소음 설계 방안을 수립하는 것이 가장 중요하다.

3.2 소음 발생 주파수 분석

TCR 소음의 가진원을 파악하기 위해 정상상태

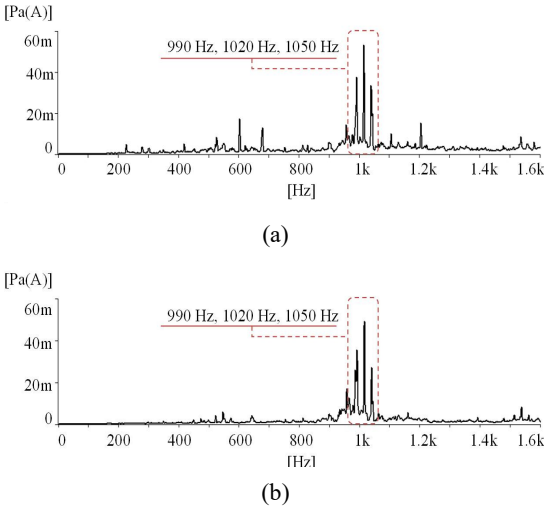


Fig. 4 Frequency spectra of the TCR noise: (a) when all driving motors were operated and (b) when the second driving motor was operated

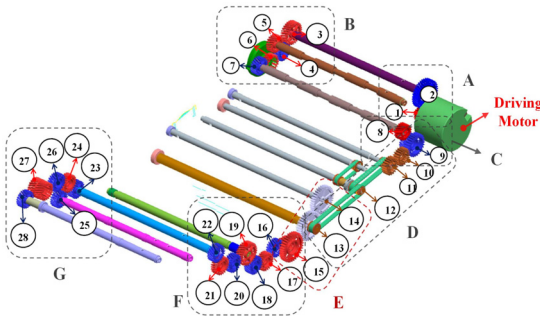


Fig. 5 Configuration of the 2nd driving system

구간의 소음 신호를 샘플링하여 주파수 분석을 수행하였고, 이때 획득된 주파수 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 TCR 평가 기준의 소음 주파수, 즉, 모든 구동계가 작동할 때의 소음 주파수이며, Fig. 4(b)는 2번 구동계만 작동할 때의 소음 주파수이다. Fig. 4(a)를 보면, TCR의 소음에는 여러 주파수 성분이 존재하지만 1020 Hz의 소음 주파수가 가장 크게 나타나며 600 Hz와 675 Hz, 990 Hz, 1050 Hz, 1200 Hz 등이 눈에 띈다. 또한 Fig. 4(a)와 (b)를 대조해 보면, 1020 Hz와 그 근방의 소음 주파수는 2번 구동계에 의해서 발생함을 알 수 있으며, 2번 구동계의 소음 저감 필요성이 다시 한 번 강조된다.

1020 Hz와 그 근방의 소음 발생 원인은 2번 구동

Table 3 Gear mesh frequencies of the 2nd driving system when the speed of driving motor is given by X

| Gear train | GMF | Gear train | GMF |
|------------|--------|------------|--------|
| A | 18.00X | E | 27.20X |
| B | 14.00X | F | 14.00X |
| C | 12.67X | G | 14.00X |
| D | 15.55X | | |

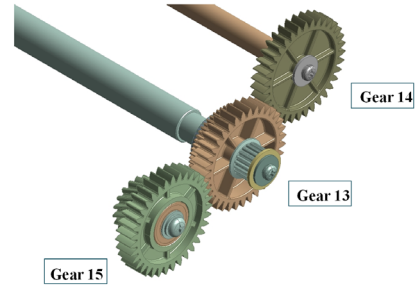


Fig. 6 Magnified illustration for the gear train-E

계의 작동 메커니즘과 가진주파수 분석을 통해 확인할 수 있다. 2번 구동계는 지폐를 이송시키고 권종을 감별하기 위해 작동되는 구동계로, Fig. 5와 같이 다수의 축과 기어, 폴리-벨트로 구성되어 있다. 따라서 2번 구동계는 구동 모터에 의해 작동되고 동력을 전달하면서 기어 및 폴리-벨트의 물림에 의한 힘을 발생시키고, 이때 발생하는 가진주파수는 기어 및 폴리-벨트의 초당 물림수, 즉, 기어물림주파수 (GMF, gear mesh frequency)로 나타난다. GMF는 기어/폴리의 회전속도와 잇수의 곱으로 계산할 수 있으며, 2번 구동계의 GMF는 구동 모터의 회전속도를 X라고 하였을 때 Table 3과 같이 정리된다. 여기서 2.1절에서 주어진 2번 구동 모터의 회전속도 37.50 rps를 X에 대입하면 E-기어열의 GMF는

$$27.20 \times 37.50 \text{ rps} = 1020 \text{ Hz} \tag{4}$$

로 계산되고, Fig. 4의 소음 주파수 스펙트럼에서 가장 크게 나타난 1020 Hz의 가진원이 E-기어열임을 알 수 있다. 또한 Fig. 6에 나타내었듯이, E-기어열은 13~15번의 3개 기어가 맞물려 돌아가며, 이 기어들은 모두 잇수가 35개로 같고 작동 상태에서 29.14 rps의 회전속도를 갖는데, 만약 기어의 물림 과정에서 기어 축의 흔들림이 발생하면 다음 식에

따라 GMF의 측대역 가진주파수(SBF, side band frequency)가 추가적으로 나타나게 된다.

$$SBF = GMF \pm n\Omega \tag{5}$$

여기서 n 은 임의의 자연수이며 SBF의 차수를 나타내며, Ω 은 기어 축의 회전속도이다. 일반적으로 SBF의 크기는 n 이 커질수록 작아진다. 식 (5)를 통해 E-기어열의 1차 SBF는 약 991 Hz와 1049 Hz로 계산되고, 이들은 Fig. 4에서 나타났던 1020 Hz 근방의 소음 주파수를 설명하기에 적절하다.

3.3 소음 발생 메커니즘 규명

2번 구동계의 가진주파수 분석을 통해 제시된 TCR 소음의 발생 메커니즘을 명확히 확인하기 위해, Fig. 7과 같이 고속카메라를 이용한 실험을 수행

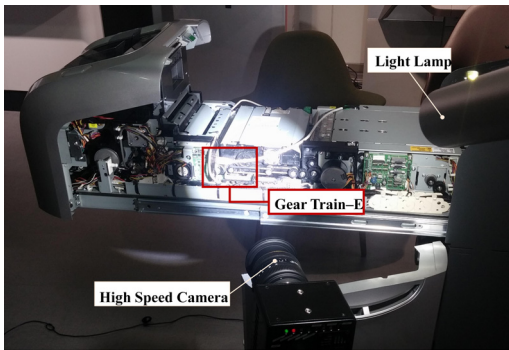


Fig. 7 High speed photography for the gear train-E

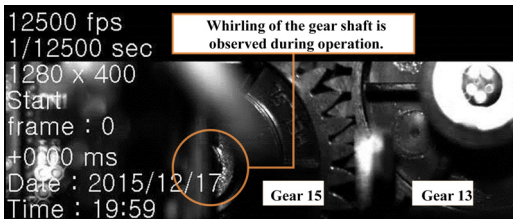


Fig. 8 Observation of whirling motion of the 15th gear shaft via the camera recording

하여 E-기어열의 축이 작동 중에 흔들리는지를 확인하였다. 실험에 사용한 고속카메라는 1020 Hz의 기어물림과 29.14 Hz의 축 회전을 충분히 관찰할 수 있도록 1초에 12 500 프레임(12 500 fps)을 촬영하도록 설정되었다.

E-기어열의 고속카메라 촬영 결과, 실제로 TCR이 작동될 때 Fig. 8에서와 같이 15번 기어의 축이 흔들리는 현상이 관측되었으며, 이러한 관측 결과는 3.2절에서 설명한 소음 주파수의 발생 메커니즘을 뒷받침한다.

따라서 이 연구에서 가장 문제가 되고 있는 TCR의 소음은 E-기어열의 물림과 15번 기어 축의 흔들림에 기인한다고 할 수 있으며, 각 소음 주파수의 발생 원인은 Table 4와 같이 정리할 수 있다.

4. 저소음 설계 방안 도출 및 효과 검증

4.1 현 구조의 문제점

TCR에는 6개의 구동계가 있고 각 구동계마다 다수의 기어열이 있음에도 불구하고, 2번 구동계의 E-기어열과 관계된 소음이 유난히 크게 나타나는 것은 현재 해당 위치의 구조에 문제가 있기 때문이다.

E-기어열의 현재 설계 구조는 Fig. 9와 같이 13번과 15번 기어가 서로 다른 구조에 부착되어 있는 형태이다. 이러한 구조는 제품의 지폐 감별기(currency discriminator)가 규격화된 형태로 개발되어 설치와 유지보수를 용이하게 하기 위함이지만, 기어열의 조립 과정에서 유격이 변화할 수 있으며 기어열이 작동될 때는 기어물림의 전달오차를 크게 만든다. 특히 15번 기어는 Fig. 10과 같이 플라스틱 구조물(plastic mold)의 가장자리에 고정되도록 설계되면서 기어 축의 지지 상태가 매우 불안정하게 되어 있다.

4.2 구조 개선 방안 도출

이 연구에서는 TCR의 소음 저감 방안으로 E-기어열의 구조적 문제를 해결하는 방법을 제안하였다. 기어물림에 기인한 소음을 저감시키는 방안으로는 기어의 종류를 변경하거나 치형을 수정하는 방법도 이용되지만, 구조적 문제가 내재되어 있는 상태에서 기어 설계 사양의 변경은 소음 저감에 대해 큰 효과를 기대하기 어렵기 때문이다.

Table 4 Main sources of the noise frequencies

| Frequency | Noise source |
|-----------|---|
| 1020 Hz | GMF induced by the gear train-E |
| 990 Hz | SBF caused by gear meshing with whirling of the 15th gear shaft |
| 1050 Hz | |

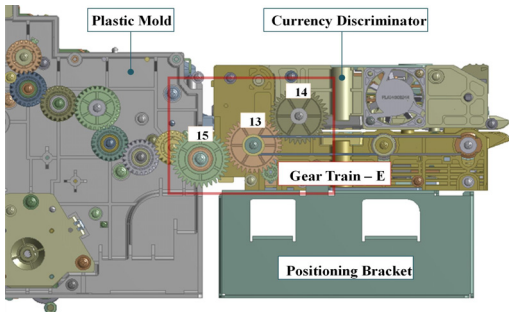


Fig. 9 Current design for the installation of gear train-E

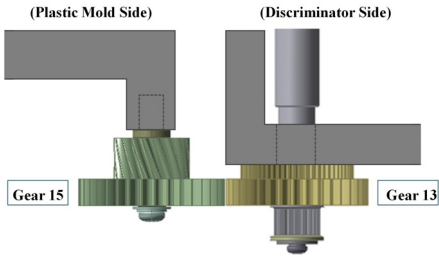


Fig. 10 Attachment position of the 13th and 15th gears

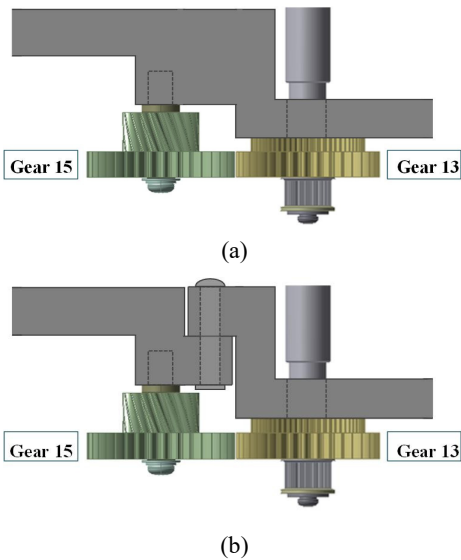


Fig. 11 Structural modification proposals for the noise reduction: (a) merging of the gear train supports and (b) binding of the gear train supports

앞서 설명하였듯이, 현재 TCR 구조의 문제점은 2번 구동계 13번과 15번 기어가 다른 구조에 부착되어

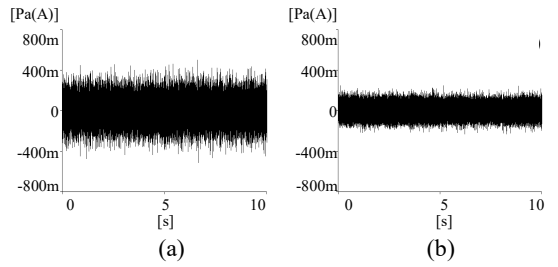


Fig. 12 Comparison of time responses of the noise: (a) steady state response for original state and (b) steady state response for improved state

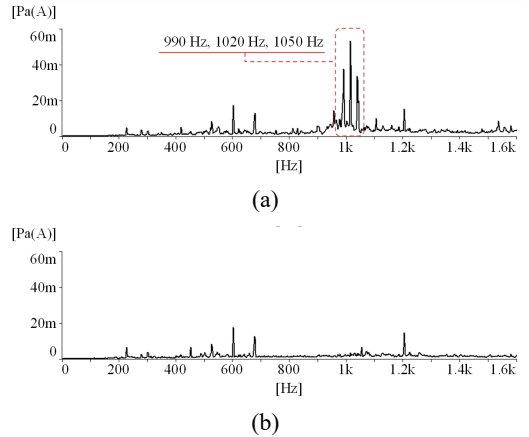


Fig. 13 Comparison of frequency spectra of the noise: (a) frequency spectrum for original state and (b) frequency spectrum for improved state

있다는 것과 15번 기어 축의 지지 상태가 취약하다는 것이며, 이러한 두 가지 문제는 Fig. 11과 같이 기어를 지지하고 있는 구조를 변경함으로써 해결할 수 있다. Fig. 11(a)는 두 기어가 하나의 구조에 부착되도록 설계를 변경하는 방안이며, Fig. 11(b)는 나사를 체결하거나 브래킷 등의 부재를 이용하여 두 기어의 지지 구조를 연결 또는 조립하는 방안이다.

이 연구에서 제시한 방안 이외에도 현재의 구조 문제를 해결하고 TCR의 소음을 저감할 수 있는 방법은 다양할 것이다. 중요한 것은, 기어 간의 유격이 변화하지 않도록 기어열을 설계하고 기어의 축을 안정적인 구조에 설치하는 것이다.

4.3 구조 개선 방안의 효과 검증

이 연구의 분석 내용과 구조개선 방안의 효과를

실험적으로 검증하기 위해 13번 기어가 있는 감별기와 15번 기어가 고정된 플라스틱 구조물 사이에 경질의 고무 시편을 채워 넣고 서로 간에 상대운동을 하지 않도록 압착시켰다. 3.2절에서 제안한 방법은 양산 사양으로 제작되어 있는 현재 제품에 즉시 적용하기 어렵기 때문에, 현재 상태에서 13번 기어와 15번 기어의 유격을 최대한 고정시키고 15번 기어 축의 지지강성을 보완한 방법이다.

다음으로 위와 같은 개선 상태에서 TCR의 소음 측정 실험을 수행하였고, 개선 전/후의 소음신호 응답과 주파수 스펙트럼을 Figs. 12, 13과 같이 비교하였다. Fig. 12에서 개선 상태의 소음의 크기가 기존 상태에 비해 상당히 작아진 것을 확인할 수 있으며, Fig. 13을 통해 가장 큰 문제가 되었던 1020 Hz와 그 근방 주파수의 소음이 현저하게 줄어든 것이 확인된다. 실제로 실험 당시 측정된 두 상태의 음원들을 청취해보면, 상대적으로 귀에 거슬리는 높은 주파수의 소음이 사라지는 것이 인지된다. 최종적으로, 개선 상태의 소음 수준은 69.6 dB(A)로, 기존 상태의 소음 수준 74.3 dB(A) 대비 4.7 dB(A) 저감되었다.

5. 결 론

이 연구에서는 TCR의 소음을 저감하는 방안을 제시하였고 그 효과를 검증하였다. TCR의 소음은 제품을 사용하는 계원의 위치를 기준으로 측정되었고, 소음 신호의 주파수와 TCR 구동계의 가진 주파수를 비교하여 소음 발생의 원인을 분석하였다. 분석 결과, TCR의 소음은 지폐 감별기 축의 기어(2번 구동계의 13번과 15번 기어)들이 서로 다른 구조에 부착되어 있기 때문에 발생하는 것으로 확인되었다. 이러한 기어열의 연결 방법은 규격화된 형태로 개발되는 감별기의 설치 및 유지보수의 편의상 유리하지만 소음/진동 측면에서는 매우 불안정하다. 따라서 TCR의 소음 저감을 위해 기어열의 설치 구조에 대한 개선 방안을 제시하였고, 실제로 개선 방안을 적용시켰을 때 소음이 저감되는 것을 확인하였다.

References

- (1) Suh, J. H. and Choi, Y. S., 2006, Reduction of the Response Time of an ATM Gate Module, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 380~386.
- (2) Jeong, J. K., Suh, J. H., Beak, Y. K. and Choi, Y. S., 2006, Dynamic Analysis of ATM Double Bill Detector, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 1208~1214.
- (3) Yoon, Y. H., Beak, Y. K. and Yoon, J. H., 2005, The Finite Element Analysis and Experiment of Flexible Media Separation Mechanism, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 322~325.
- (4) Kang, K., Lee, G., Ma, S. B. and Choi, D. H., 2011, Design Optimization of Driving Mechanism for Banking Automation Equipment, Proceedings of the KSME Conference, pp. 1143~1148.
- (5) Shin, B. S., Lee, S. M., Kim, D. H. and Choi, Y. S., 2006, Operation Deflection Shapes Analysis for Vibration Reduction of ATM Case, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 202~207.
- (6) Son, Y. B. and Choi, Y. S., 2007, Transverse Vibration of ATM Crown Belt, Proceedings of the KSNVE Annual Fall Conference, pp. 1206~1211.



Jintai Chung received his B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Seoul National University, Seoul, Korea in 1984 and 1986, respectively, and a Ph.D. degree in mechanical engineering from the University of Michigan, Ann Arbor, USA in 1992. He is now a professor in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Korea. His research fields are structural dynamics, vibration and noise.