

과도상태 시뮬레이션을 사용한 OLED 픽셀 회로의 신뢰성 분석 방안 연구

정태호^{*†}

^{*†}서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과

Study on the Reliability of an OLED Pixel Circuit Using Transient Simulation

Taeho Jung^{*†}

^{*†}Department of Electronic and IT Media Engineering,
Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

ABSTRACT

The brightness of the Organic Light Emitting Diode (OLED) display is controlled by thin-film transistors (TFTs). Regardless of the materials and the structures of TFTs, an OLED suffers from the instable threshold voltage (V_{th}) of a TFT during operation. When designing an OLED pixel with circuit simulation tool such as SPICE, a designer needs to take V_{th} shift into account to improve the reliability of the circuit and various compensation methods have been proposed. In this paper, the effect of the compensation circuits from two typical OLED pixel circuits proposed in the literature are studied by the transient simulation with a SPICE tool in which the stretched-exponential time dependent V_{th} shift function is implemented. The simulation results show that the compensation circuits improve the reliability at the beginning of each frame, but V_{th} shifts from all TFTs in a pixel need to be considered to improve long-time reliability.

Key Words : OLED, TFT, Threshold voltage shift, Reliability, SPICE

1. 서 론

유기발광다이오드(Organic Light Emitting Diode: OLED) 디스플레이의 밝기는 각 픽셀의 OLED에 인가되어지는 전류에 비례하며, 이 전류는 박막 트랜지스터(Thin-Film Transistor: TFT)에 의해 제어된다. 디스플레이에 사용되는 TFT는 구동 중 문턱전압이 이동하는 열화 현상이 나타나기 때문에 장시간 픽셀이 동작하게 되면 OLED 전류가 감소하고 픽셀의 밝기가 감소하게 된다. 따라서 픽셀 회로 설계 시에 TFT 문턱전압 이동 현상을 보상하는 방안을 추가해야 한다. 보상 회로를 설계하기 위해서는 문턱

전압 이동 현상의 특성을 확인할 필요가 있다.

TFT의 문턱전압이 이동되는 현상은 TFT에 사용되는 다양한 재료와 구조에 따라 여러 원인이 있다. 그 중에서 외부로 유입된 산소 또는 수분에 의해 채널을 흐르는 전류에 영향을 주는 것과 채널 내의 전하가 절연막 등에서 포획되는 현상 등이 보고되었다[1]. 실제 봉지 기술이 발전하면서 외부 물질의 유입으로 인한 원인을 사라지고 있으며, 문턱전압 이동의 주된 원인은 주로 전하 포획과 관련이 있게 되었다. 다양한 TFT들에서 전하 포획에 기인한 문턱전압 이동 현상이 분석되었으며, 몇 가지 수식 모델들이 제안되었다. 이 모델들에는 멱법칙(power law)[2]와 stretched-exponential[3] 등이 있으며, 이들 중 본 연구에서 사용하는 stretched-exponential 형태의 모델은 다음과 같다[3].

[†]E-mail: taeho.jung@seoultech.ac.kr

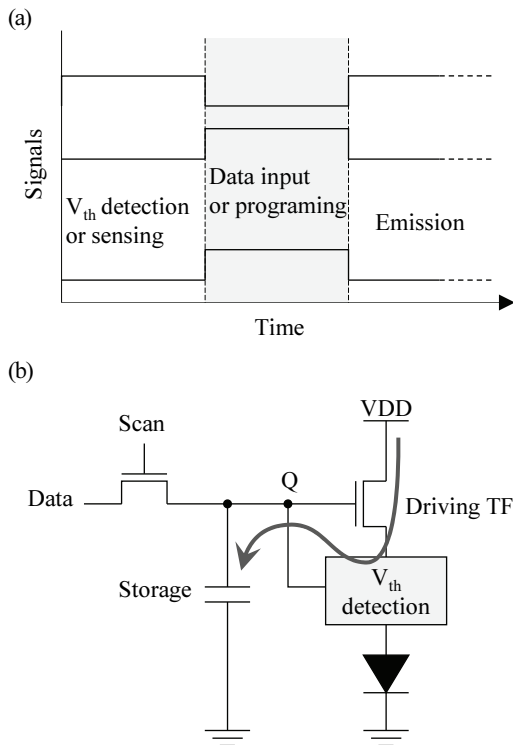


Fig. 1. (a) Concept of timing diagram and (b) schematic diagram of V_{th} shift correction enabled OLED circuit. The solid arrow indicates V_{th} detection and storage path enabled by the detection sub-circuit.

$$\Delta V_{th}(t) = (V_{GS} - V_{T0}) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right] \right\} \quad (1)$$

여기서 τ 는 시정수, β 는 확장 계수, 그리고 V_{T0} 는 TFT 고유의 문턱전압이다.

픽셀을 구성하는 TFT의 문턱전압 이동을 보정하기 위해 다양한 보상 회로들이 제안되었다. 이 회로들의 공통적인 보상 방법은 Fig. 1과 같이 능동 행렬(active matrix) 디스플레이 픽셀을 구성하는 커패시터에 데이터를 연결하기 전에 구동 TFT에 발생한 문턱전압 이동량을 저장하는 절차를 삽입하는 것이다. 이 다음 단계에서 문턱전압 이동량이 저장된 커패시터에 데이터를 연결하면 구동 TFT의 게이트에 인가되는 전압이 보정되는 원리이다. 제안된 픽셀 회로들은 1개의 커패시터를 사용하는 회로들[2, 4~6]과 2개를 사용하는 회로들[3, 7~10]로 구분할 수 있다. 이 회로들은 커패시터의 개수가 같아도 제어 신호의 개수와 타이밍에 차이가 있다. 각 연구들에서 제안된 문턱전압 보상 방식은 회로 시뮬레이션의 검증을 거쳐 실제 회로

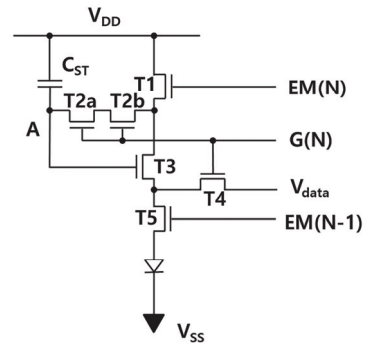


Fig. 2. Schematic diagram of 5 OLED pixel circuit proposed by Chung[6].

로 제작되는 단계를 거친다. 여기서 사용되는 시뮬레이션 검증 방법들은 대부분 구동 TFT의 문턱전압만을 변경한 회로들을 대상으로 과도상태 동작 결과를 분석하는 것이다. 향상된 신뢰성 또는 동작 결과를 예측하기 위해서는 이러한 검증 방법에 몇 가지 보완이 필요하다. 첫째로 실제 회로에서 문턱전압 이동은 구동 시간과 전압에 영향을 받아 변하므로 시뮬레이션 시 문턱전압 이동량을 구동 시간과 연결된 전압에 따라 갱신해 줄 필요가 있다. 둘째로 문턱전압 이동 현상은 구동 TFT를 포함한 모든 TFT에서 발생하므로 정밀한 신뢰성 예측을 위해서는 모든 TFT에 문턱전압 이동 현상을 적용할 필요가 있다. 마지막으로 일부 TFT에서는 구동 전압에 따라 열화된 문턱전압이 일부 또는 전부 회복되는 현상이 나타났다. 따라서 해당 TFT를 사용하는 경우 문턱전압이 회복되는 현상을 적용하면 동작 예측이 더 정확해질 수 있다.

본 연구에서는 회로 시뮬레이션 툴인 SPICE에 구현한 stretched-exponential 형태의 문턱전압 이동 모듈[11]을 사용하여 문턱전압 보정 기능이 구현된 픽셀 회로들을 대상으로 과도상태 시뮬레이션을 적용하는 방안을 제안한다. 제안하는 과도상태 시뮬레이션을 적용하여 시간에 따른 OLED 전류의 변화량을 예측할 수 있다.

2. 회로 시뮬레이션 방안

2.1 OLED 픽셀 회로 및 시뮬레이션 툴

본 연구에서는 문턱전압 이동을 보정하는데 사용되는 커패시터가 1개인 회로[6]와 2개인 회로[3]를 대표로 선택하여 유사 픽셀 회로를 설계하여 과도상태 시뮬레이션을 진행하였다. 해당 연구들에서 사용한 시뮬레이션 툴과 TFT 모델은 라이선스의 문제로 내부 수정이 용이하지 않기 때문에 본 연구에서는 오픈소스인 ngspice 툴과 BSIM4 트랜지스터 모델을 사용하였으며 TFT의 상대적 크기 비율

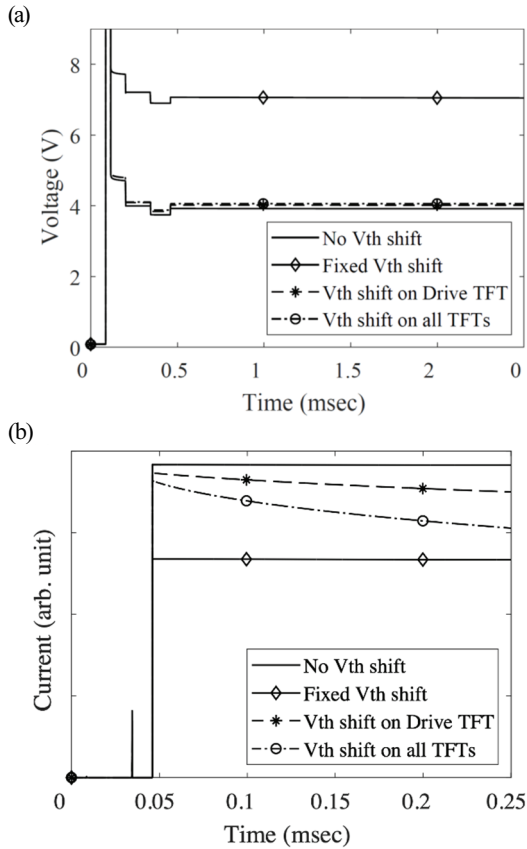


Fig. 3. Simulated transient waveforms of the (a) voltage of the driving transistor's gate (node Q in Fig. 1) and the (b) OLED current of the pixel circuit [ref]. The transistor's inherent V_{th} is 0.2 V. When simulating the effect of fixed V_{th} , the drive TFT's V_{th} is set to 3.2 V. The stretched exponential model with $\tau = 0.01$ and $\beta = 0.5$ is used for the time dependent V_{th} shift. The timings of the driving signals are modified for QHD resolution.

과 신호 전압 크기는 유지하였다. ngspice 내에 stretched-exponential 형태의 문턱전압 이동 모델은 이전 연구를 적용하였으며, OLED 픽셀에 사용되는 TFT의 문턱전압 회복 기능은 적용하지 않았다[11].

3. 시뮬레이션

3.1 문턱전압 보정 기능 시뮬레이션

본 장에서는 문턱전압 이동량을 node Q에 연결된 커패시터에 저장하고, 이를 OLED 전류에 반영하는 한 사이클

을 시뮬레이션하였다.

Fig 2는 Chung[6]이 제안한 1개의 커패시터를 사용하는 OLED 픽셀 회로를 보이고 있다. 이를 기반으로 BSIM4 모델로 픽셀 회로를 설계한 후 Fig 1(a)의 한 사이클을 시뮬레이션한 결과는 Fig 3에 나타내었다. Fig 1(a)에 보인 문턱전압 감지 단계와 데이터 입력(OLED의 밝기 정보) 단계는 QHD 해상도($2560\text{RGB} \times 1440$)에 맞도록 대략적으로 $11.5 \mu\text{sec}$ 로 설정하였다[3, 6]. Fig 3(a)에는 구동 TFT의 게이트에 연결된 node Q의 전압을 보이고 있다. Chung의 연구처럼 구동 TFT의 문턱전압을 3 V증가시켜 시뮬레이션을 진행한 경우에 node Q의 전압은 연결된 커패시터에 저장된 보정 전압으로 인해 대략 3 V정도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 과도상태 시뮬레이션 도중 하나 또는 모든 TFT의 문턱전압을 변하게 만든 경우 node Q의 전압은 커패시터에 의해 변하지 않는다. 하지만 Fig 3(b)에 표시한 OLED 전류는 시뮬레이션 도중 문턱전압 이동량의 계산 가능 여부에 따라 차이가 발생한다. 즉, Fig 1(a)의 node Q 전압은 고정 값을 유지하더라도 구동 TFT의 문턱전압이 변하여 OLED의 전류는 지속적으로 감소하게 되는 것을 볼 수 있다. 기존의 연구들처럼 구동 TFT의 문턱전압 변화 양을 고정 값으로 설정한 경우 전체적인 전류의 양은 줄어들지만, 전류의 양은 시간 경과에 거의 영향을 받지 않는 것으로 계산된다. 여기서 커패시터의 용량을 조절하여 방전 양을 크게 만들 경우 node Q의 전압 강하가 증가하여 시간에 따른 OLED의 전류 감소는 현저하게 되며, 문턱전압 이동에 따른 효과가 더해질 경우 OLED 전류 감소는 더 심해지게 된다. 추가로 본 연구에서 사용하는 TFT 모델이 다르기 때문에 본 연구에서는 동일한 조건에서 문턱전압 이동 현상을 적용할 경우 발생하는 결과에 중점을 둔다.

시간에 따라 문턱전압이 이동하는 현상을 적용한 두개의 시뮬레이션 결과를 보면, 모든 TFT에 이동 현상을 적용한 경우 OLED 전류의 변화가 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 현실적인 과도상태 시뮬레이션을 위해서는 구동 TFT에만 고정적인 문턱전압 이동량을 설정하는 기존의 연구와는 다르게 모든 TFT에 문턱전압이 이동하는 상황을 적용하는 것이 필요하다.

3.2 장시간 시뮬레이션

이전 시뮬레이션은 한 프레임을 보여주는 시간 내에서 문턱전압 이동 현상으로 인한 OLED 전류의 변화를 보여주는 것이며, 본 장에서는 여러 프레임들을 보여주는 긴 시간 동안 문턱전압 이동 현상이 OLED 전류에 미치는 영향을 시뮬레이션으로 확인하고자 한다.

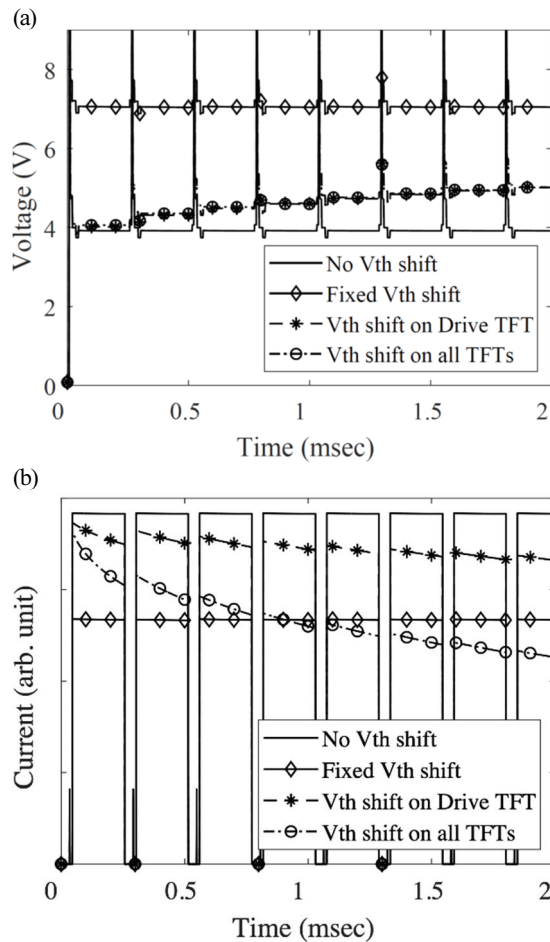


Fig. 4. Simulated transient waveforms of the (a) voltage of the driving transistor's gate (node Q in Fig. 1) and the (b) OLED current of the pixel circuit[6]. OLED is on for 200 μ sec with the extensive V_{th} shift to visualize the change in the current when the shift is enabled.

Fig. 4는 Chung의 제안을 기반으로 한 픽셀 회로에서 여러 프레임 동안 Fig. 1의 Node Q 전압과 OLED 전류를 보이고 있다. 60 Hz로 동작하는 QHD 해상도에서 한 픽셀은 대략 16.7 msec 동안 지정된 색 또는 빛을 방출해야 하며, 이 시간은 Fig. 1(a)에 보인 매우 짧은 문턱전압 감지 단계와 데이터 입력 단계를 포함한다. 따라서 OLED 전류는 대략적으로 16.7 msec 동안 흐르게 되어 있으나, 과도상태 시뮬레이션이 생산하는 데이터의 양이 방대하여 본 연구에서는 한 프레임 내에서 OLED 전류가 200 μ sec 동안 흐르는 것으로 수정하였다. Sodhani 등[3]의 연구에서

stretched-exponential 형태의 문턱전압 이동 현상의 시정수는 $\tau = 2 \times 10^4$ sec로 분석되었다. 이러한 TFT는 수 초 또는 분의 시간 동안 스트레스를 받아야 가시적인 문턱전압 이동의 효과를 관측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 과도상태 시뮬레이션 결과를 가시화하기 위해 $\tau = 0.01$ sec로 설정하여 문턱전압 이동 현상을 가속화하였다.

Fig. 4(a)에서 시간에 따라 문턱전압이 이동하는 현상을 구현한 픽셀의 node Q 전압은 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 증가한 전압은 구동 TFT의 문턱전압을 3 V로 고정된 경우의 node Q 전압보다는 작지만, 장기간 스트레스를 인가하면 상황은 변하게 될 것이다. Fig. 4(b)의 OLED 전류 비교 결과에서는 시간에 따른 문턱전압 이동 현상을 적용하면 OLED의 전류가 점점 작아지는 것을 볼 수 있다. 위의 시정수를 적용한 경우 모든 TFT에 문턱전압 이동 현상을 구현한 픽셀의 OLED 전류가 가장 작아지는 것을 볼 수 있다. 즉, 실제 회로에서는 모든 TFT에서 문턱전압 이동 현상이 발생하므로 시뮬레이션 단계에서도 모든 TFT에 문턱전압이 이동하는 것으로 설정하는 것이 필요할 것이다.

Fig. 5에는 node Q에 2개의 커패시터를 연결한 Sodhani 등이 제안을 기반으로 설계한 픽셀 회로를 대상으로 과도상태 시뮬레이션을 수행한 결과를 보이고 있다. 이 회로는 Chung의 제안을 기반으로 한 회로와는 다르게 한 프레임 시간 내에서도 OLED의 전류가 감소하는 특성을 보여 준다. 전류의 감소 정도는 커패시터들의 용량을 조절하여 제어할 수 있다. 문턱전압의 값을 고정으로 설정하는 기존의 시뮬레이션 방법들에서 200 μ sec로 단축시킨 각 프

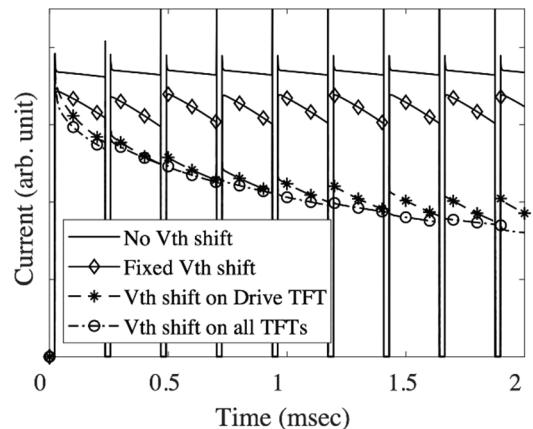


Fig. 5. Simulated transient waveforms of the OLED current of the pixel circuit[3]. OLED is on for 200 μ sec with the extensive V_{th} shift to visualize the change in the current when the shift is enabled.

레이미 끝나고 나면 OLED의 전류는 100 % 회복이 된다. 하지만, 시간에 따른 문턱전압이 이동하는 현상을 구현한 두 가지 시뮬레이션의 경우 Chung의 회로와 동일하게 OLED 전류가 지속적으로 감소하는 현상을 보여준다. 이 회로는 모든 TFT들에 문턱전압 이동 현상을 적용하여도 구동 TFT에만 적용한 경우와 비교하여 전류의 감소가 더 심하게 발생하지 않는 특징이 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 TFT의 문턱전압 이동현상을 구현한 SPICE 툴에서 과도상태 시뮬레이션을 수행하여 OLED 픽셀 회로의 모든 TFT가 신뢰성에 영향을 주는 것을 확인하였다. 디스플레이의 동작 특성 상 가시적인 결과를 관측하기 위하여 한 프레임의 폭을 짧게 만들고, 문턱전압 이동을 가속화하여 과도상태 시뮬레이션을 수행하여 OLED 전류가 감소되는 것을 보였다. 실제의 경우에는 한 프레임 보다는 장시간 동안 문턱전압 이동 현상이 심각하게 작용할 것이며, 이에 따른 소자들의 규격 또는 보상 회로 동작을 수정할 수 있을 것이다. 특히 문턱전압이 회복되는 현상 모델을 결정하면 보다 현실적인 과도상태 시뮬레이션을 진행할 수 있게 된다. 이에 따라 새로운 형태의 픽셀 회로 또는 동작 방식을 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. G. W. Shim, W. Hong, J. Cha, J. H. Park, K. J. Lee, and S. Choi, "TFT Channel Materials for Display Applications: From Amorphous Silicon to Transition Metal Dichalcogenides", *Adv. Mater.*, vol. 32, pp. e1907166-n/a, 2020.
2. Jae Won Choi, Jin Jang, Ja Hun Koo, Ji Ho Hur, Moon Hyo Kang, and Young Seoung Kim, "A New Pixel Design of Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode Display Using Amorphous-Silicon Backplane", *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 49, pp. 816-819, 2006.
3. A. Sodhani and K. Kandpal, "Design of threshold voltage insensitive pixel driver circuitry using a-IGZO TFT for AMOLED displays", *Microelectr. J.*, vol. 101, pp. 104819, 2020.
4. B. Chen, Y. Tai, Y. Kuo, C. Tsai, and H. Cheng, "New pixel circuits for driving active matrix organic light emitting diodes", *Solid-State Electron.*, vol. 50, pp. 272-275, 2006.
5. C. Fan, F. Tseng, H. Lai, B. Sun, K. Chao, and Y. Chen, "A Novel LTPS-TFT Pixel Circuit to Compensate the Electronic Degradation for Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode Displays", *Int. J. Photoenergy*, vol. 2013, pp. 1-6, 2013.
6. H. Chung, "Novel 5T1C pixel circuit for high-ppi AMOLED displays with n-channel LTPS TFTs", *J. Inf. Display*, vol. 20, pp. 39-43, 2019.
7. C. Fan, H. Tsao, C. Chen, P. Chou, and W. Lin, "New Low-Voltage Driving Compensating Pixel Circuit Based on High-Mobility Amorphous Indium-Zinc-Tin-Oxide Thin-Film Transistors for High-Resolution Portable Active-Matrix OLED Displays", *Coatings*, vol. 10, pp. 1, 2020.
8. C. Chen, J. Kanicki, K. Abe, and H. Kumomi, "P-14: AM-OLED Pixel Circuits Based on a-InGaZnO Thin Film Transistors", *SID Int. Symp. Dig. Tec.*, vol. 40, pp. 1128-1131, 2009.
9. J. Ke, L. Deng, L. Zhen, Q. Wu, C. Liao, H. Luo, and S. Huang, "An AMOLED Pixel Circuit Based on LTPS Thin-film Transistors with Mono-Type Scanning Driving", *Electronics*, vol. 9, pp. 574, 2020.
10. H. Lee, J. Kanicki, Y. C. Lin, and H. Shieh, "70.3: Current-Scaling a-Si:H TFT Pixel Electrode Circuit for AM-OLEDs", *SID Int. Symp. Dig. Tec.*, vol. 37, pp. 1968-1971, 2006.
11. T. Jung, "Implementation of Stretched-Exponential Time Dependence of Threshold Voltage Shift in SPICE", *J. of KSDT*, vol. 19, no. 1, 2020.

접수일: 2021년 12월 3일, 심사일: 2021년 12월 14일,
게재확정일: 2021년 12월 15일