

# 사용자 환경 기반 웹 UX 실행 및 성능 분석 시스템\*

한채연<sup>0</sup>, 박상근

경희대학교 소프트웨어융합학과

strawberry@khu.ac.kr, sk.park@khu.ac.kr

## A User Environment-Based System for Web UX Execution and Performance Analysis

Chaeyeon Han<sup>0</sup>, Sangkeun Park

Department of Software Convergence, Kyung Hee University

### 요약

본 연구는 사용자 기기 및 네트워크 인프라의 다양성으로 인해 발생하는 웹 퍼포먼스 격차를 해소하기 위해, 다중 제약 조건 기반의 자동화된 웹 브라우징 품질 스크리닝 시스템을 제안한다. 기존의 성능 진단 도구들이 대개 단일 환경에서의 결과만을 제공하는 것과 달리, 제안 시스템은 CPU 성능, 네트워크 대역폭, 가용 메모리 등을 다차원적으로 조합하여 실제 사용자가 마주할 수 있는 복합적인 제약 환경을 배포 전 단계에서 선제적으로 재현한다. 이를 통해 단독 자원의 저하만으로는 파악하기 어려운 성능 저하 구간을 자동으로 식별하며, OpenAI API를 연동한 AI 심층 분석과 해당 제약 조건에서의 브라우저 렌더링 재현 기능을 제공함으로써 실무적인 개선 방향 도출을 지원한다.

### 1. 서론\*

AI 기술의 보편화와 함께 전 세계적으로 수많은 웹 서비스가 새롭게 생성되고 있다. 사용자들은 각자 다른 디지털 환경에서 이러한 웹 서비스를 경험하고 있다. 이는 사용자 간의 웹 성능 격차라는 새로운 문제를 야기할 수 있다. 예를 들어, 선진국과 개발도상국 사이의 인프라 차이로 인해 웹페이지 로딩 속도, 상호작용성, 데이터 소비량 등에서 유의미한 UX 격차가 존재한다[1]. 모바일 방문 시 페이지 로드 시간이 3 초를 넘으면 사용자의 53%가 이탈하며, 로드 시간이 1 초에서 10 초로 늘어날 경우 이탈 확률은 123%까지 급증한다[2]. 이처럼 웹 성능은 단순히 기술적인 지표를 넘어 서비스의 비즈니스 성공과 직결되는 핵심 요소이다.

웹 서비스 사용자는 저사양 모바일 기기나 불안정한 네트워크 등 다양한 환경에서 웹에 접속한다. 하지만 웹 서비스 개발자는 사용자의 다양한 접속 환경을 개발 단계에서 고려하기 어렵다. 개발자 입장에서는 파편화된 수많은 클라이언트 장치를 직접 확보하여 테스트하기에 현실적인 한계가 있으며, 특정 자원 제약 조건에서만 발생하는 간헐적인 성능 저하 문제를 미리 예측하기란 매우 어렵다. 특히 기존의 수동 테스트 방식은 개발자가 일일이 조건을 변경해가며 반복 측정해야 하므로 막대한 시간과 비용이 소요된다는 문제점이 있다

이러한 문제를 해결하기 위해 오픈 소스 웹 성능 측정 도구인 WebPageTest<sup>1</sup>, 웹페이지의 품질을 측정하고 개선 방안을 제시하는

오픈소스 자동화 도구인 Lighthouse<sup>2</sup>, 크롬 개발자 도구 등이 널리 활용되고 있다. 이러한 도구들은 특정 CPU 및 네트워크 조건에서 성능 지표를 측정하고 분석 자료를 제공함으로써 웹 품질 개선에 기여해 왔다. 하지만 기존 도구는 보통 단일 환경에서의 진단 결과를 제공하는데 그치는 경우가 많다. 즉, 어느 자원 조건의 조합에서 UX 측면의 웹 성능 문제가 발생하는지 찾기 위해서는 개발자가 직접 CPU 나 네트워크의 제약 조건을 바꿔가며 반복 측정하고 결과를 수작업으로 비교해야 한다. 이 과정은 막대한 시간이 소요될 뿐만 아니라 측정시마다 발생하는 미세한 변동으로 인해 데이터의 재현성을 확보하기 어렵다는 한계가 있다 [4].

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 다양한 사용자 환경에서 발생하는 웹 브라우징 품질 저하를 배포 전 단계에서 선제적으로 식별하는 자동화된 웹 브라우징 품질 스크리닝 시스템을 제안한다. 제안 시스템은 CPU, 네트워크, 메모리 제약 조건을 다각도로 조합하여 테스트 시나리오를 자동 실행하며, 각 환경에서 수집된 Web Vitals 지표를 분석하여 성능이 급격히 악화되는 구간을 탐지한다. 또한, 탐지된 특정 환경 조건을 실제 브라우저에서 재현하여 검증할 수 있는 기능을 제공하며, GPT-4o-mini 모델을 연동해 데이터에 대한 심층적인 해석과 구체적인 개선 방향을 제시한다. 이는 기존 진단 중심 도구의 한계를 넘어, 문제 식별부터 해결 방안 도출까지 지원하는 통합적인 성능 최적화 방안까지 제공한다는 점에서 그 의의가 있다.

\* "본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 2026년도 SW중심대학사업의 결과로 수행되었음"(2023-0-00042)

<sup>1</sup> <https://www.webpagetest.org/>

<sup>2</sup> <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse?hl=ko>

## 2. 관련 연구

### 2.1 웹 성능 측정 및 지표 기반 분석 연구

웹 성능을 객관적으로 평가하기 위한 지표 정의 및 측정 방법론에 관한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. Kumar et al.[3]은 브라우저 환경에서의 네트워크 성능 평가를 위해 초기 응답 시간, 전체 로드 시간, 자원 요청 수 등의 주요 지표를 체계화하고 시각화 기반의 분석 기법을 제시하였다. 웹 성능 측정의 변동성 문제를 다룬 Heričko et al.[4]은 Lighthouse 기반 측정 시 동일 페이지에서도 웹 성능 지표가 측정할 때 마다 일정하게 나오지 않을 수 있음을 입증하고, 데이터 신뢰성 확보를 위해 반복 측정 후 중앙값을 활용하는 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 연구들은 주로 지표의 정의나 측정 결과의 통계적 유의성 확보에 집중할 뿐, 다양한 하드웨어 및 네트워크 자원 제약이 복합적으로 작용할 때 발생하는 UX 저하 임계점을 탐색하는 데에는 한계가 있다.

### 2.2 제약 환경 및 자원 영향 분석 연구

모바일 기기 및 저사양 환경에서 웹 성능에 영향을 미치는 개별 자원 요인을 분석하는 연구들이 꾸준히 수행되어 왔다. Dasari et al.[5]은 다양한 성능의 모바일 디바이스를 대상으로 실측 실험을 진행하여, 특히 CPU 성능이 웹 브라우징의 사용자 체감 품질에 결정적인 영향을 미친다는 것을 확인하였다. Qazi et al.[6]은 메모리 제약 상황에서 발생하는 웹페이지 로딩 지연과 브라우저 비정상 종료 현상을 분석하여 메모리 자원의 중요성을 강조하였다. 이처럼 기존 연구들은 개별 자원의 독립적인 영향력을 규명하는 데 집중해 왔으나, 실제 사용 환경은 다중 자원 제약이 특정 조합으로 결합하여 웹 성능에 복합적인 상호작용을 일으키는 경우가 빈번하다. 그럼에도 불구하고 다중 제약 조건의 상호작용이 웹 UX 에 미치는 영향을 체계적으로 스크리닝하고 분석한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

## 3. 웹 브라우징 품질 지표 및 사용자 제약 환경 선정

본 연구에서는 웹 브라우징 경험 품질을 선정하고, 웹 브라우징 경험 품질이 사용자의 컴퓨팅 자원 조건에 따라 어떻게 변화하는지 측정하기 위해 세 가지 사용자의 컴퓨팅 제약 환경 지표를 선정했다.

### 3.1 웹 브라우징 경험 품질 측정 지표 선정

현대 웹 성능 분석의 표준으로 활용되고 있는 Web Vitals<sup>3</sup> 지표인 LCP(Largest Contentful Paint)와 CLS(Cumulative Layout Shift)를 기반으로, 사용자가 웹서비스 이용시 경험할 수 있는 UX 렌더링 문제를 빠르게 식별할 수 있다 [7]. 이 두 지표는 자바스크립트 API 인 PerformanceObserver<sup>4</sup>를 사용해서 측정했다.

- LCP : 페이지의 가장 큰 콘텐츠가 로딩되는 시간을 의미하는 지표로, 사용자의 체감 로드 속도에 직결되는 핵심 웹 필수 지표
- CLS : 페이지에서 예기치 않게 발생하는 레이아웃 이동의 정도를 수치화한 지표

### 3.1 사용자 제약 환경 선정

본 연구에서는 웹 브라우징 품질에 결정적인 영향을 미치는 핵심 컴퓨팅 자원을 CPU 성능, 네트워크 대역폭, 가용 메모리의 세 가지 축으로 정의하였다. 각 제약 조건은 실제 저사양 모바일 기기부터 고성능 데스크톱 환경까지 광범위하게 포괄할 수 있도록 다음과 같이 세분화하여 구성하였다. 해당 환경은 Chrome DevTools Protocol(CDP)을 활용하여 브라우저의 런타임을 동적으로 제어함으로써 인위적인 제약 상황을 재현할 수 있다.

- CPU: 10%, 25%, 50%, 100%
- 네트워크: Slow 3G, Fast 3G, 4G, LTE
- 메모리: Very Low (512MB), Low (1GB), Medium (2GB), High (3GB)

## 4. 웹 브라우징 경험 품질 평가 시스템 프로토타입 개발

본 시스템은 사용자 환경의 다양성을 복합 제약 조건 시나리오로 모델링하고, 이를 자동화된 브라우저 제어 기술로 스크리닝하여 웹 브라우징 품질의 병목 구간을 선제적으로 탐지할 수 있다. 시스템의 핵심 구동 엔진은 자바스크립트 라이브러리인 Puppeteer<sup>5</sup>를 기반으로 하며, 내부적으로 CDP 명령을 호출하여 앞서 정의한 CPU, 네트워크, 메모리 제약 조건을 브라우저 인스턴스에 동적으로 적용한다.

사용자가 분석 대상 웹사이트 URL 과 테스트하고자 하는 자원 제약 범위를 선택하면, 시스템은 생성 가능한 모든 환경 조합에 대해 순차적으로 자동 접속을 실행한다. 이 과정에서 각 환경별로 LCP 와 CLS 등의 핵심 Web Vitals 지표를 자동으로 수집 및 분석한다 [그림 1].



[그림 1] 분석 대상 URL 및 사용자 환경 제약 조건 선택

<sup>3</sup> <https://web.dev/articles/vitals?hl=ko>

<sup>4</sup> <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/PerformanceObserver>

<sup>5</sup> <https://pptr.dev/>

모든 환경 조합에 대한 분석 과정이 완료되면, 수집된 성능 데이터는 대시보드 형태로 시각화되어 제공된다 [그림 2]. 환경 제약 조건의 조합에 따른 Web Vitals 지표의 변화 추이를 그래프로 제시함으로써, 사용자는 특정 임계점에서 LCP나 CLS 수치가 급격히 저하되는 구간을 직관적으로 파악할 수 있다. 이는 개발자가 배포 전 어떤 환경에서 웹 브라우징 품질 저하 문제가 발생할지 사전에 식별하고 대응 전략을 수립할 수 있다.

본 시스템은 정량적인 수치 제공을 넘어, 문제의 원인 분석과 해결 방안 도출을 위한 다각적인 검증 기능을 지원한다. 사용자가 대시보드에서 특정 환경 조합을 선택하면, 해당 조건에 특화된 Web Vitals 상세 요약 및 병목 분석 결과와 함께 GPT-4o-mini 모델을 연동한 AI 해석 리포트가 제공된다. AI 는 수집된 퍼포먼스 로그를 분석하여 성능 저하의 근본적인 원인을 진단하고, 실무에 즉시 적용 가능한 최적화 가이드를 제시함으로써 개발자의 의사결정을 보조한다.

또한, Puppeteer 의 Headful 모드를 활용한 환경 재현 기능을 통해 선택된 제약 조건이 실제 브라우저 렌더링 과정에 미치는 영향을 실시간으로 관찰할 수 있다. 이는 텍스트 및 수치 기반의 분석 결과를 실제 시각적 경험과 직접 연결하여 검증할 수 있게 함으로써, 분석 결과의 정확성을 확보하고 잠재적인 웹 브라우징 결함을 더욱 직관적으로 파악할 수 있도록 돕는다.



[그림 2] 분석 결과 대시보드

## 5. 결론 및 향후 연구

본 연구는 사용자 기기 및 인프라 환경의 파편화로 발생하는 웹 브라우징 품질 저하 문제를 선제적으로 탐지하기 위해 CPU, 네트워크, 메모리 등 다중 제약 조건을 조합하여 자동으로 스크리닝하는 시스템을 제안하였다. 제안 시스템은 단일 환경 진단에 국한된 기존 도구와 달리, 복합 자원 제약 하에서 발생하는 성능 저하 구간을 식별하고 AI 기반 해석과 시각적 재현을 통해 문제 식별부터 해결 방안 도출까지의 통합적인 최적화 워크플로우를 제공한다는 점에서 차별성을 갖는다. 향후에는 에뮬레이션 제약 환경의 범위를 확장하고 실제 사용자 트래픽 데이터와의 연계를 통해 분석의 정밀도를 높여, 다양한 환경의 사용자들에게 고품질의 웹 경험을 제공하기 위한 핵심적인 의사결정 도구로 활용될 수 있도록 발전시킬 계획이다.

## 6. 참고 문헌

- [1] Masudul Hasan Masud Bhuiyan et al. "Digital Disparities: A Comparative Web Measurement Study Across Economic Boundaries," Proceedings of the ACM Web Conference 2025 (WWW '25), pp. 1-11, 2025
- [2] Daniel An. New Industry Benchmarks for Mobile Page Speed. Think with Google, 2017.
- [3] Saurabh Kumar et al., "Network Performance Evaluation in Web Browsers: Comprehensive Methodologies, Key Metrics, and Visualization Techniques," Journal of Scientific Innovation and Advanced Research (JSIAR), vol. 1, no. 2, pp. 1-7, 2025.
- [4] Tjaša Heričko et al. "Towards representative web performance measurements with Google Lighthouse," 2021, pp. 1-4.
- [5] Mallesham Dasari et al. "Impact of Device Performance on Mobile Internet QoE," Proceedings of IMC '18, 1-7, 2018.
- [6] Ihsan Ayyub Qazi et al. "Mobile Web Browsing Under Memory Pressure," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 50(4), 1-14, 2020.
- [7] V. Jain, "Web Vitals and Core Metrics for Web Performance Optimization," International Journal of Core Engineering & Management, vol. 7, no. 6, 2023.