

인슐레이션-그라파이트 합지 제품을 이용한 모바일 전자기기 시스템 성능 개선

Mitchell Warren¹, Julian Norley², John Allen¹, Jonathan Taylor², Lindsey Keen¹

1. W. L. Gore & Associates, 201 Airport Rd,
Elkton MD, 21921 USA
mwarren@wlgore.com, jallen@wlgore.com, lkeen@wlgore.com

2. NeoGraf Solutions, LLC 11709 Madison Ave.,
Lakewood, Ohio 44133 USA
jnorley@neograf.com, jtaylor@neograf.com

초록

이 연구에서는 높은 열전달량의 그라파이트 시트와 초저 열 전도율의 인슐레이션 합지 제품을 발열이 심한 스마트폰 구글 픽셀 3XL에 적용해 정상상태의 표면 접촉(피부) 온도(T_s)를 최대 3.2°C 낮추고, 최대 내부 IC 온도(T_i)의 상승폭을 1°C 미만으로 통제할 수 있었다. COMSOL을 활용한 축대칭 열 전도 모델 시뮬레이션으로 각기 다른 유사한 두께(~350 μm)를 가진 5가지 단열 솔루션의 표면 온도 감소 추이를 분석하였다. 이 중 4개 솔루션은 구글 픽셀 3XL에 대한 열해석 테스트 실험용으로 제작, 테스트 및 검증되었다. 최대 T_s 감소 효과를 보인 합지 제품을 활용하여 사용하기에 가장 적합한 표면 온도를 유지했을 때, 정상상태 시스템 성능 개선 효과를 확인하였다.

정상상태에서의 3DMark – *Sling Shot Extreme* 벤치마크 점수는 3401에서 3823으로 증가하여 정상상태에서 시스템 성능이 12.4% 개선되었음을 확인하였다. 단열 소재의 수직 방향(through-plane) 열 전도율에 대해서는 정상상태에서의 열류계법(heat flow method) 및 두께 테스트(thickness testing), 그라파이트의 수평 방향(in-plane) 열 전도율에 대해서는 열 확산(thermal diffusivity) 테스트를 통해 디바이스 성능 개선효과와 소재 특성 사이에 연관성이 있음을 확인하였다. 정상상태 열 분산 테스트를 통해 그라파이트의 수평 방향 열 전도율을 검증한 결과 100 μm 고성능 그라파이트 시트가 100 μm 합성 및 천연 그라파이트 시트 대비 ~30% 높은 열전달량을 가진 것으로 나타났다.

키워드

그라파이트, 초고도 발열 용량, 단열 소재, 초저 열 전도율, 합성 소재, 히트 스프레더, 열 전도율, 두께, 표면 접촉(피부) 온도, 열점, 접합 온도, 환경 온도, 정상상태, 구글 픽셀 3XL(Pixel), 시스템 온 칩(SoC), 3DMark – Sling Shot Extreme, 벤치마크 점수, 시스템 성능, 사용자 안전.

용어 설명

k	열 전도율 (W/m·K)
t	두께 (mm, μm)
T_s	표면 접촉(피부) 온도 (K, °C)
T_J	내부 IC 온도 (K, °C)
ΔT	온도 변화 (K, °C)
q''	열전달량 (W/m ²)
R''	열 저항 (K·m ² /W)
t·ΔT	고유의 열전달량 (μm·K)

서론

열 확산 시트(그라파이트) 및 단열 소재(에어갭, 폴리머)는 모바일 전자기기 산업에서 발생하는 발열 문제에 대한 솔루션으로 통용되어 왔다. 하지만 디바이스의 전력소비 증가와 디바이스의 소형화로 인해 표면 접촉(피부) 온도(T_s)로 사용 안전성에 큰 문제가 대두되고 있다.

모바일 전자기기 산업에서는 특정 온도 및 시간의 직접적인 피부 접촉을 바탕으로 하는 UL(Underwriters Laboratories)의 T_s 관련 지침을 준수하고 있다. 지금까지는 기존의 수동적인(passive) 단열 솔루션으로 T_s를 필요 수준 이하로 통제해 왔으나, 에어갭이나 합지 그라파이트 등 다양한 일반 소재가 기술적 한계에 봉착한 상황이다.² 시스템 성능 유지할 수 있는 방열 솔루션이 없는 상황에서 현재 널리 사용되고 있는 솔루션은 바로 프로세서의 스로틀링(throttling) 기능으로, 시스템 전력을 최대 50%까지 줄일 수 있다.³

온도가 상대적으로 낮고(<100°C) 능동적(active) 냉각이 이루어지지 않는 얇은 모바일 전자기기의 경우, 디바이스 내부의 주된 열 전달 방법은 전도(conduction)이다.⁴ 내부 대류 및 복사는 전도와 비교했을 때 무시해도 될 정도의 수준으로, 본 연구에서는 더 이상 논의하지 않기로 한다.

푸리에의 1차원 열 전도 법칙에 따른 식 (1)에서 이론적인 온도 변화(ΔT)는 열 전달 매체의 열 저항(R'')과 정비례한다.

$$(1) \quad q'' = \frac{\Delta T}{R''} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

특정 시스템의 열 유입(q'')이 일정하다고 가정했을 때, ΔT는 R''값(열 전도율(k) 대비 두께(t) 비율)에 따라 정해진다.

$$(2) \quad R'' = \frac{t}{k} \left(\frac{K \cdot m^2}{W} \right)$$

식(1)과 식(2)를 조합하고 재배열했을 때, 식(3)과 같이 T_s는 내부 온도(T_J), t, k 및 q''를 변수로 하는 함수이자 1차원 저항 네트워크(그림 1)로 볼 수 있다. 상수 q''와 t가 제한된 상황에서 k를 낮춤으로써 T_s를 감소시킬 수 있다.

$$(3) \quad T_s = T_J - \frac{q'' \cdot t}{k} \quad (K, ^\circ C)$$

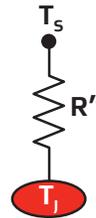


그림 1: 1차원 열 저항 네트워크. R''를 통해 열이 T_J에서 T_s로 흐름.

시스템을 3차원 열 전달로 확대했을 때(그림 2), 수평 방향의 열 분산은 T_s결과값을 도출하는데 필수 변수가 될 수 있다. 수평 및 수직 방향 열 전도율은 모두 특정 두께와 사이즈를 가진 소재의 열 분산 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 수직 방향의 초저 열 전도율 인슐레이션과 높은 열전달량의 그라파이트를 합치하면 기존 소재 대비 탁월한 열 분산 성능을 가진 합지 방열 솔루션을 얇은 모바일 전자기기에 탑재할 수 있다.

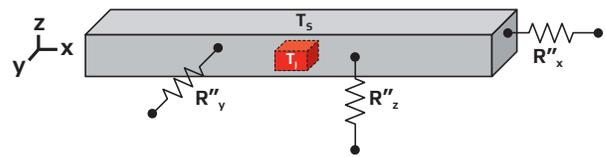


그림 2: 3차원 열 저항 네트워크. 열이 T_J(디바이스 중심)에서 T_s(디바이스 표면)방향으로 포함 여러 방향으로 이동.

소재 선정

GORE® 써멀 인슐레이션(W. L. Gore & Associates, Inc.)은 얇은 시트 형태(100 μm 및 250 μm)로 된, 공기보다 낮은 초저 열 전도율을 지닌 단열 소재(“인슐레이션”)이다. NeoNxGen™ Thermal Management Solutions(NeoGraf Solutions, LLC)에는 높은 열전달량의 두꺼운 타입의 시트 그래파이트(70 μm~270 μm)가 포함되어 있다.(“고성능 두꺼운 타입의 그래파이트”)

열점과 디바이스 표면 사이에 각각 인슐레이션과 그래파이트를 배치했을 때, 각 레이어의 단열 성능을 통해 T_s 를 감소시킬 수 있다. 한편, 단일 인슐레이션 소재는 열점 표면적 대비 가용면적의 비율이 약 1:1일 때 사용하는 것이 가장 적합하다. 인슐레이션은 상대적으로 등방성(isotropic)의 특징을 보이나, 그래파이트는 높은 이방성(anisotropic)의 특징을 보이며 소재에서 수평 방향의 열 전도가 이루어진다. 따라서 열점 표면적 대비 가용면적 비율이 1:2 이상일 때 더욱 뛰어난 T_s 감소 효과를 가질 수 있다. 이러한 시스템 구조에서는 인슐레이션을 그래파이트와 결합하여 사용했을 때 효과적으로 열 확산이 개선될 수 있다. 열점 표면적 대비 가용면적을 나타낸 도식은 그림 3에서 확인할 수 있다.

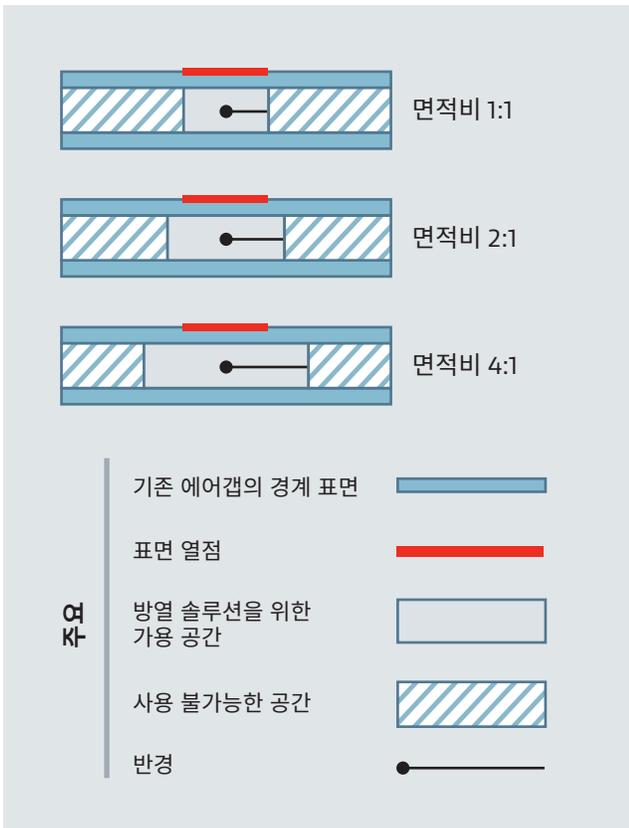


그림 3: 열점 표면적 대비 가용면적 비율을 보여주는 단면도. 면적은 반경의 제품과 비교한다.

인슐레이션 열 전도를 정의

인슐레이션은 크누센 효과(Knudsen Effect)로 알려진 열 전도 현상으로 인해 $< 0.020 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 의 매우 낮은 열 전도율을 갖는다. 크누센 효과에 의하면 열 전도 매체의 기공 직경이 공기의 평균 자유이동거리(약 70nm)보다 작을 때, 해당 매체의 열 전달 통로는 공기의 자유이동거리를 통한 열 전달 통로 보다 저하된 성능을 보인다(disrupted).⁵ 이 원리는 주로 기공 직경이 작고 다공성 형태의 에어로겔을 사용할 때 적용된다. 이 인슐레이션은 균일한 에어로겔 구조, 초저(균일한) 열 전도율 및 두께라는 고유한 특징을 지녀, 안정적이고 높은 열 저항성을 나타낸다. 이에 비해, 실온에서 공기의 열 전도율은 $0.026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 온도에 따라 비선형적으로 증가한다($0.028 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ at 50°C).⁶ 따라서 에어갭은 모바일 전자기기의 고온 환경($> 50^\circ\text{C}$)에서는 불일정하면서도 불충분한 열 저항을 보일 수 있다.

인슐레이션의 수직 방향 열 전도율은 두 가지 테스트로 측정된다: 열류계법(heat flow method)을 통해 열 저항을 측정하고, 정밀 두께 테스트(precision thickness method)로 소재 두께를 측정한다. 두 시험 모두 6 psi의 압력 설정 지점에서 수행된다. ASTM C518-17을 개조한 열량계(TA Instruments, Model FOX 50)를 이용하여 열 전달 정상상태에서 열 저항을 측정하였다.⁷ 이 테스트는 두께가 얇은 제품과 두꺼운 타입의 제품(적층 구조) 두 가지 샘플 모두 대상으로 진행되었다. 이후, 변형된 ASTM F36-15 방법을 통해 각 샘플(Instron, Model 5565)의 두께를 테스트하였다. 식 (4)의 two thickness resistance procedure를 사용하여 수직 방향 열 전도율을 계산하였다. 이 방법은 열류계법의 접촉 저항의 영향을 모두 제거하기 위해 사용되었다.⁹

$$(4) \quad k = \frac{t_2 - t_1}{R''_2 - R''_1} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

그래파이트의 열 전도율 정의

그래파이트는 수평 방향 열 전도율이 높고 수직 방향 열 전도율은 상대적으로 낮은 고유의 특성으로 인해 열 확산 솔루션으로 사용되어 왔다. 인조 그래파이트의 두께는 25 μm 미만($\sim 1500 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)에서 100 μm ($\sim 600 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)까지로 수평 방향의 열 전도율은 대체로 소재의 두께와 반비례한다. 얇은 고열전도율 그래파이트 시트를 적층하면 보다 두꺼운 두께에서도 발열 용량을 잠재적으로 개선할 수 있으나, 단열 성능의 일관성 부재 및 제조 과정의 어려움으로 이어진다. 고성능 두꺼운 타입의 그래파이트 시트는 최대 $1100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 의 수평 방향 열 전도율로 얇은 합성 그래파이트에 견줄만한

높은 열 전도율을 보유하고 있다. 단층일 때 천연 그래파이트와 유사한 두께의 제품이다. 수직 방향 열 전달계수는 각 그래파이트 등급(grade)과는 무관하게 ~3.5 W/m·K이다.

고성능 두꺼운 타입의 그래파이트 시트의 열 확산율(thermal diffusivity)을 측정하기 위한 수단으로는 두 개의 검증된 장치가 있다. 첫 번째는 그래파이트 섬유를 측정하기 위해 Wagoner et al.에 의해 개발된 Angstrom 장치이며, 발명가의 이름을 따 명명되었다.¹⁰ 이 장치에서 길고 얇은 샘플의 온도는 한쪽 끝에서 사인파 형(sinusoidally)을 따라 변화하며, 진공환경에서 샘플을 따라 전파되는 열 파형(heat wave)를 측정한다. 샘플의 한쪽 끝은 열원에 고정되고 다른 한쪽은 약한 스프링 장력 하에 유지된다. 두 개의 thermo-couple이 그 길이를 따라서 샘플에 붙여져 있고, 열 파형이 전파됨에 따라 그 진폭과 열 전달 지연시간을 측정한다. 진폭, 지연시간 및 thermo-couple간의 거리는 샘플의 열 확산율을 측정하는 데 사용된다.

두 번째 장치인 Bethel Co., Ltd.의 TA-33 Thermowave Analyzer는 사각형 샘플의 상단표면은 조율된 레이저빔 열 펄스로 조사(irradiate)하고, 샘플의 밑바닥 중앙부에는 적외선 감지기로 진폭과 열 펄스의 상태 변화를 감지한다. 레이저 주파수 및 레이저빔과 적외선 감지기 간의 수평거리는 달라질 수 있다. 레이저빔 주파수, 신호 진폭 변화, 상변화(change in phase)를 이용하여 열 확산율을 계산할 수 있다. 수평 방향의 열 전도율은 식 (5)와 같이 이후 열 확산율(α), 밀도(ρ), 및 열용량(c_p)을 사용하여 계산된다.

$$(5) \quad k = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

Angstrom 장치는 그래파이트 샘플의 열 확산율 측정에 있어 32 μm ~ 940 μm 의 광범위한 범위의 두께를 안정적으로 측정할 수 있음이 증명되었다. 한편, Bethel TA-33장치는 Angstrom 장치와 유사한 결과를 보였으나, 32 μm ~ 168 μm 의 두께에서는 상대적으로 작은 편차를 보였다. 두께 168 μm 이하의 얇은 그래파이트 샘플의 열 확산율을 측정하는데 있어서는 작은 샘플 크기, 비접촉식 측정기법, 짧은 테스트 사이클 시간을 고려했을 때 Bethel TA-33가 선호되었다. 본 백서에서는 이러한 Bethel TA-33 테스트 결과를 이용하여 100 μm 고성능 두꺼운 타입의 그래파이트 샘플의 열 확산율을 계산하였다.

실험 테스트 및 시뮬레이션

모바일 전자기기에서 인슐레이션 그래파이트 합지 소재에 대한 정상상태 표면 온도 및 성능과 함께 그래파이트의 고유 방열 용량을 측정하기 위해 일련의 실험이 진행되었다. 테스트 결과는 공기 및 적용 가능한 단일 소재 솔루션에 대해 벤치마킹 되었다.

정상상태 열 확산 테스트

정상상태 열 확산 테스트에는 일정한 출력(4.16W)의 전기저항 가열기로 한쪽 끝을 가열한 3인치 x 1인치의 그래파이트 시트가 사용되었다. 그래파이트의 양쪽 끝을 열 인터페이스 재료(TIMs)로 thermo-couple에 안정적으로 접촉시켜 고정하였다. 시트의 온도 저하는 정상상태에서 측정되었다. 그림 4는 테스트 셋업에 대한 도식이다.

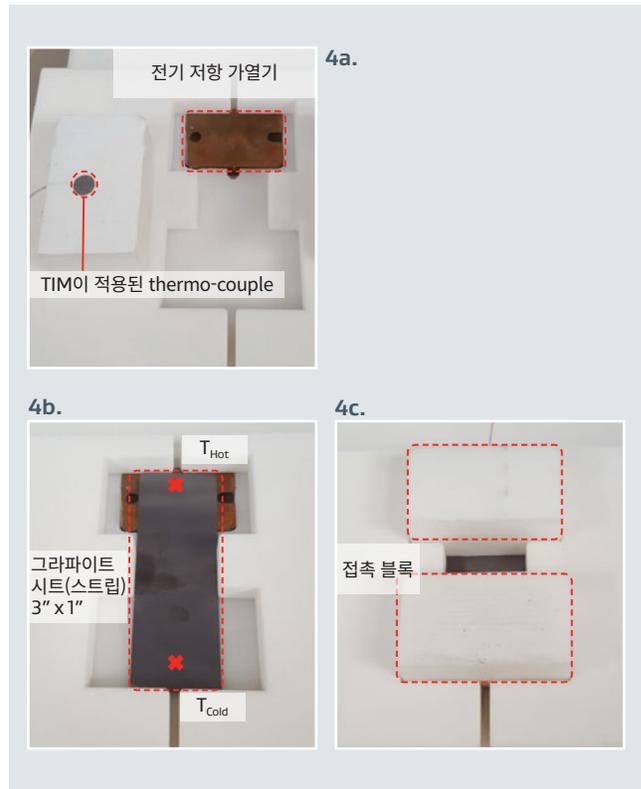


그림 4 (a, b, c): 4a(상단)은 thermo-couple이 내장되어 있는 TIM 이 적용된 전기 저항 가열기와 하나의 접촉 블록으로 구성된 빈 테스트 셋업을 보여준다. 4b(좌측 하단)은 그래파이트 시트를 테스트 셋업에 배치한 모습으로, 그에 맞게 고온 및 저온 thermo-couple 위치도 지정하였다. 4c(우측 하단)은 두 접촉 블록이 배치되어 thermo-couple TIM과 그래파이트 시트 사이가 솔리드 접촉된 (solid contact) 모습을 보여준다.

각 그래파이트 샘플의 고유의 방열 용량을 비교하기 위해 식 (6)을 이용하여 테스트 결과를 분석하였다. 개별 시트의 두께 (Instron, Model 5565를 이용한 압축 테스트로 측정)를 온도 저하 폭에 곱함으로써 두께 차이를 고려하였다.

$$(6) \quad t \cdot \Delta T = t \cdot (T_{Hot} - T_{Cold}) \quad (\mu m \cdot K)$$

그래파이트 표면의 양쪽 끝의 온도가 보다 균일하기 때문에, 온도 저하폭이 적으면 방열이 훨씬 효과적으로 이루어진 것을 의미한다. 열 확산 효과가 없는 소재의 경우 T_{Cold} thermocouple은 실온과 거의 동일하여 $t \cdot \Delta T$ 값이 높게 나타날 수 있다.

시뮬레이션 - 열 전도 모델

COMSOL에서는 축대칭 열 전도 모델을 구축하여 여러 방열 솔루션이 대표적인 스마트폰 아키텍처에서 정상상태 T_s 와 T_j 에 미치는 영향을 시뮬레이션하고자 하였다. 해당 모델은 일정한 출력의 열원, 개별 소재층 및 디바이스 커버로 구성되어 있다; 열 전달계수와 방사율은 열점의 외부 표면 및 모든 레이어에 적용할 수 있다. 수평 및 수직 방향 열 전도율은 모든 레이어에 적용되며, 온도 변화에 상관없이 동일하게 유지된다. 시스템의 기하학 구조는 열원, 소재 레이어 및 디바이스 커버 각각의 반경과 두께에 의해 정의된다. 이 모델의 주요한 결과는 커버를 따라 방사상(radial profile)으로 나타나는 T_s 와 열점의 최대 T_j 이다. 그림 5는 전반적인 모델 셋업과 결과를 보여주는 도식이다.

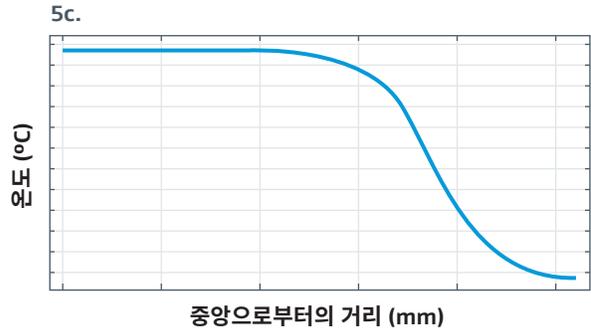
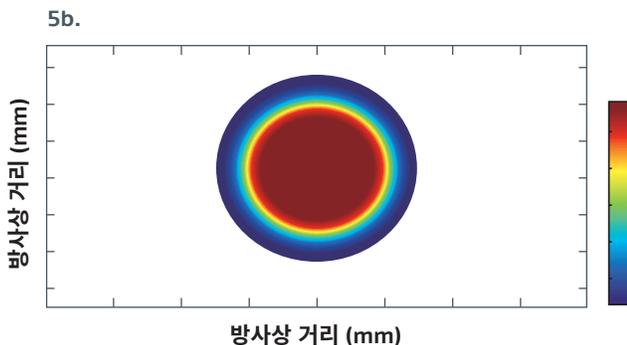
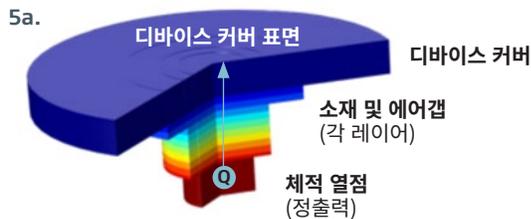


그림 5 (a, b, c): 5a(상단)은 체적 열원, 소재와 에어갭 그리고 디바이스 커버 등 주요 부품이 라벨링된 COMSOL에서의 축대칭적 열 전도 모델 셋업을 보여준다. 5b(중간) 및 5c(하단)은 시뮬레이션 결과를, 각각 열분포도(heat map)와 디바이스 커버 표면에 대한 방사열 그래프로 보여준다.

본 시뮬레이션은 SoC 위에 배치된 대표적인 기하학 구조인 구글 픽셀 3XL 후면 커버에 초점을 맞추고 있으며, 그림 6에서 그 단면도를 확인할 수 있다. 열 전도율 측정값이 인슐레이션(수직 방향) 및 고성능 두꺼운 타입의 그래파이트에 적용되었다. 에어갭 및 유리의 열 전도율 값은 문서자료와 데이터시트로부터 대략적으로 추정되었다. 사용된 열 전도율 값은 표 1에서 볼 수 있다. 모든 테스트 환경에서는 레이어 총 두께를 최대 500 μm 로 한정하였다. 총 두께 중 소재가 적층되지 않은 빈 부분은 공기로 채워졌다. 모든 소재 솔루션은 350 μm 의 두께로 모델링되어 물리적인 테스트 소재와 일관되도록 하였다. 시뮬레이션 구성은 표 2에 상세하게 나와 있다.

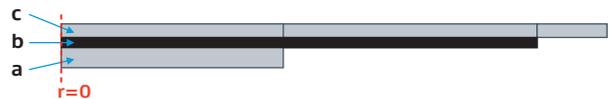


그림 6: 'r=0' 축을 중심으로 회전되기 이전의 축대칭적 열 전도 모델의 2D 도식. 블록 'a'는 반경 11.3mm 및 두께 1mm의 열원을 나타낸다. 블록 'b'는 반경 24.1mm, 총 두께 0.5mm의 방열 소재 가용공간을 나타낸다. 블록 'c'는 반경 27.6mm 및 두께 0.65mm의 유리 커버를 나타낸다.

표 1: 시뮬레이션에 사용된 수평 및 수직 방향 열 전도 값

소재	수평 방향 열 전달계수 (W/m·K)	수직 방향 열 전달계수 (W/m·K)
에어갭	0.028	0.028
유리	15	15
고성능 두꺼운 타입의 그래파이트	1000	3.5
인슐레이션	0.018	0.018

표 2: 열점에서부터 디바이스 커버까지 단열 소재 가용공간(블록 'b')을 여섯 가지 방법으로 시뮬레이션한 구성도

구성	소재 두께 (mm)	구성 도식
S1 (control)	에어갭, 0.500	
S2	인슐레이션, 0.350 에어갭, 0.150	
S3	그래파이트, 0.350 에어갭, 0.150	
S4	인슐레이션, 0.175 그래파이트, 0.175 에어갭, 0.150	
S5	그래파이트, 0.175 인슐레이션, 0.175 에어갭, 0.150	
S6	그래파이트, 0.117 인슐레이션, 0.116 그래파이트, 0.117 에어갭, 0.150	



구글 픽셀 3XL 3DMark Stress 테스트

시판되는 구글 픽셀 3XL을 구입하여 소로틀링 없이 일정한 파워를 가할 수 있도록 개조하였다. 테스트를 위해 하이엔드 스마트폰의 물리(CPU) 및 그래픽(GPU) 점수를 평가하는 데 널리 통용되는 UL의 3DMark- Sling Shot Extreme 벤치마크를 선택하였다.¹² 정상상태 테스트 결과를 달성하기 위해 3DMark 프로페셔널 버전을 구입하여 픽셀에 설치함으로써 90초의 Sling Shot Extreme 벤치마크 테스트의 무한 루핑(looping)을 가능케 하였다. 모든 테스트는 무풍 환경에서 주변 온도와 습도를 정확하게 통제된 상태에서 진행되었다. 측정 가능한 파라미터는 thermo-couple을 이용한 표면 접촉온도, IR 카메라(Fluke, Model Ti55)로 촬영한 이미지, 빌트인 서미스터를 이용한 내장부품 온도(CPU, GPU 등), CPU 및 GPU 클럭

주파수, 그리고 Sling Shot Extreme 벤치마크 점수를 이용한 시스템 성능이 있다. 초기 stress 테스트는 적외선 이미징(그림 7) 방법으로 특수한 조건 하에 진행되었다. 열점 위치를 먼저 확인 후 TIM이 붙어있는 thermo-couple을 배치하였다.(그림 8)

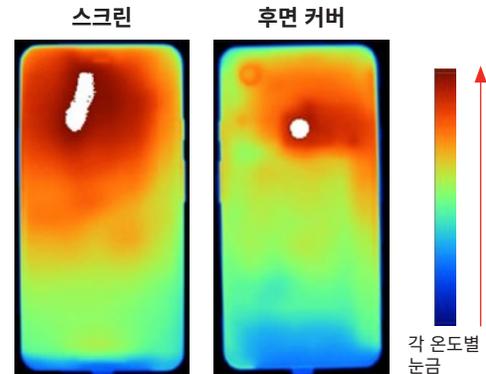


그림 7: 구글 픽셀 3XL의 스크린(좌) 및 후면 커버(우)의 적외선 이미지. 색깔과 온도 간의 방향성을 나타내기 위해 숫자가 없는 온도 눈금을 함께 배치하였다. 표면의 열점은 흰색으로 표시되었다.

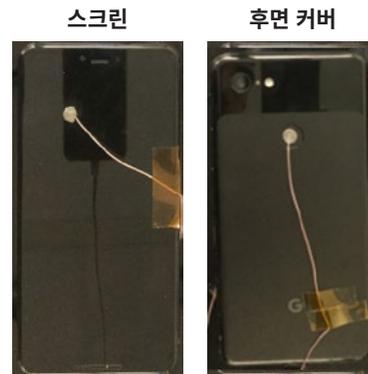


그림 8: 구글 픽셀 3XL에서 TIM이 붙어있는 thermo-couple이 부착된 스크린(좌) 및 후면 커버(우). 스크린 열점 온도를 보다 정확히 측정하기 위해 thermo-couple을 가장 이상적인 위치에 부착하였다.

접착제를 가열하고 떼어내어 픽셀의 후면 커버를 제거하였다. 후면 커버 내부 SoC와 가까운 7개의 각기 다른 위치에 압축성이 높은 폴리머를 시공하여(그림 9) 단열 솔루션을 위한 가용공간을 확보하였다; 이후 각 위치에서 폴리머를 기존 에어갭에 압축하기 위해 후면 커버를 교체하였다. 후면 커버를 다시 한번 제거하고 압축된 폴리머에 스펀 게이지를 사용하여 모든 위치의 두께를 측정하였다. 이 과정을 2회 추가로 반복하였고 모든 위치에서 측정된 두께의 평균을 구했다. 각 위치의 두께 평균값은 표 3에서 찾아볼 수 있다.



그림 9: 후면 커버가 제거된 구글 픽셀 3XL. 그림의 7개 위치에서 압축성이 높은 폴리머를 활용해 기존 에어갭의 두께를 측정하였다.

표 3: 밀폐된 픽셀 SoC 주변의 에어갭 측정값

위치	에어갭 측정 평균값 (mm)
1	0.900
2	0.625
3	0.520
4	0.520
5	0.440
6	0.450
7	0.640

5, 6번 위치에서 기계적 압축을 방지하기 위해 모든 단열 솔루션의 명목 두께를 350 μm 로 설정했다. 테스트가 진행된 물리적 소재는 110 μm 인슐레이션 시트, 110 μm 그래파이트 시트 및 5 μm 아크릴 양면 테이프이다. 소재 및 구성 예시는 그림 10에 나타나 있다.

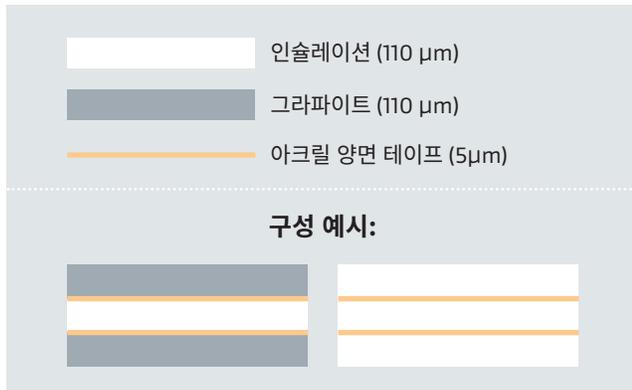


그림 10: 테스트를 위한 물리적 소재와 접착제를 포함한 소재 구성 예시를 나타낸 도식.

그림 11의 부품 기하학 구조는 내부 부품에 대한 방해를 최소화 혹은 저지하여 가용면적을 극대화하기 위해 선택되었다. 단순하게 하기 위해, 두께가 균일한 구성과 동일한 형태와 면적의 레이어만 고려되었다. 형태, 장착성 또는 이상적인 기능을 확보하기 위해 레이어 두께 및 크기는 최적화될 여지가 있다. 스마트폰 두께 단면도는 그림 12에서 볼 수 있다. 픽셀 테스트에 적합한 소재 구성을 알아내기 위해 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

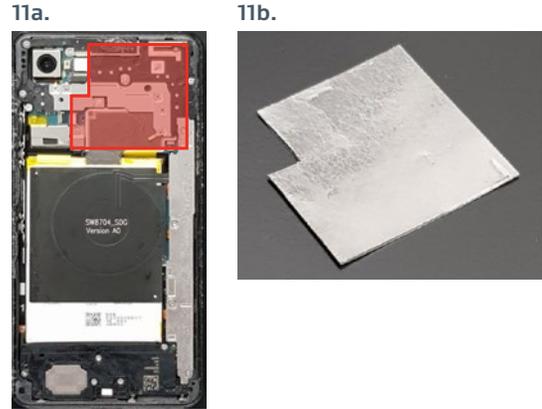
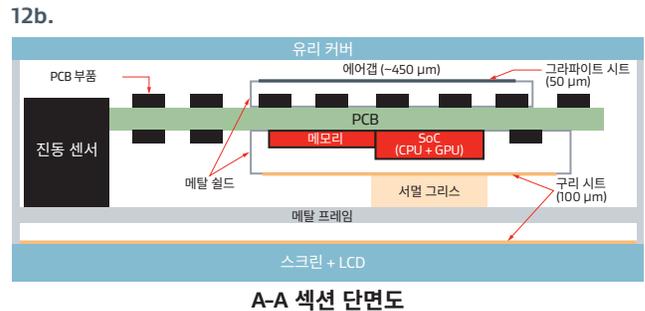


그림 11 (a, b): 11a(좌) 후면 커버 내부에 배치된 부품. 11b(우) 지정된 기하학 구조에 맞게 절단된 합지 소재의 샘플. 부품 면적은 1825mm²로 측정되었다.



A-A 섹션 단면도

그림 12 (a, b): 12a(상단) 픽셀의 A-A 섹션 단면 위치. 12b(하단) 디바이스 A-A 섹션의 단면도.

결과

정상상태 열 확산 테스트

명목 두께가 100 μm 인 인조, 천연 및 고성능 그래파이트를 등급별로 테스트하였다. 식 (6)을 이용하여 $t \cdot \Delta T$ 값을 구했고, 각 그래파이트의 6가지 샘플을 무작위 실험을 통해 테스트하였다. 결과는 그림 13에서 볼 수 있다.

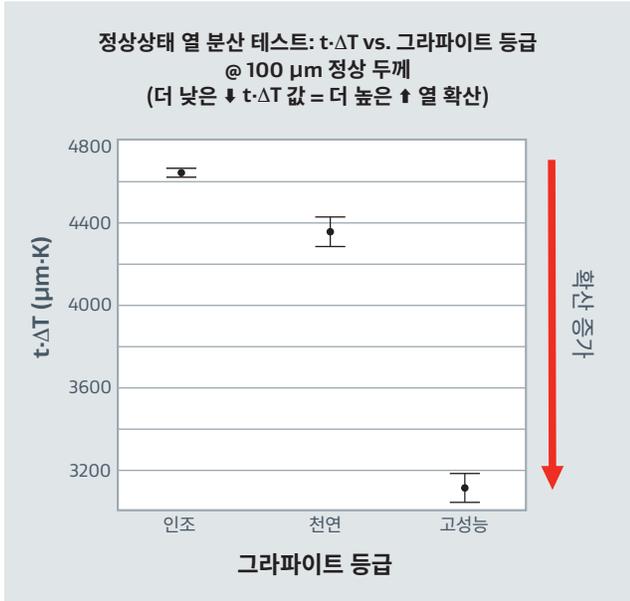


그림 13: 정상상태 열 확산 테스트 $t \cdot \Delta T$ 그래프(평균값 및 표준편차), 각 그래파이트 등급 당 n=6.

고성능 두꺼운 타입의 그래파이트가 평균값은 $\sim 3100 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 로 가장 낮은 $t \cdot \Delta T$ 값을 보였다. 이는 천연 그래파이트의 $t \cdot \Delta T$ 평균($\sim 4350 \mu\text{m} \cdot \text{K}$) 대비 29% 낮고, 인조 그래파이트의 $t \cdot \Delta T$ 평균($\sim 4650 \mu\text{m} \cdot \text{K}$) 대비 33% 낮다.

시뮬레이션 - 열 전도 모델

전력 및 열 전달계수를 반복적으로 구하여 픽셀 테스트에 필요한 커버 및 열점 온도에 도달하였다. 본 시뮬레이션에서 표면의 방사율은 무시되었다. 모든 테스트 구성에 선택된 파라미터는 표 4에서 볼 수 있다.

표 4: 모든 구성에 동일하게 적용된 시뮬레이션 설정값

	디바이스 커버 열 전달 계수 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)	열점 열 전달 계수 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)	소재 레이어 열 전달 계수 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
설정값	1.5	20	25
			1

구성 S1~S6에 대한 시뮬레이션을 진행하였으며 그에 대한 그래프는 그림 14, 결과는 표 5에서 볼 수 있다. 모든 구성을 대조군 시나리오인 S1 구성(에어갭만 적용된)과 비교하였다. 그림 15는 그래파이트와 인슐레이션-그래파이트 합재 구성별(S3, S4, S5, S6) 커버 표면 온도 그래프를 확대하여 보여준다.

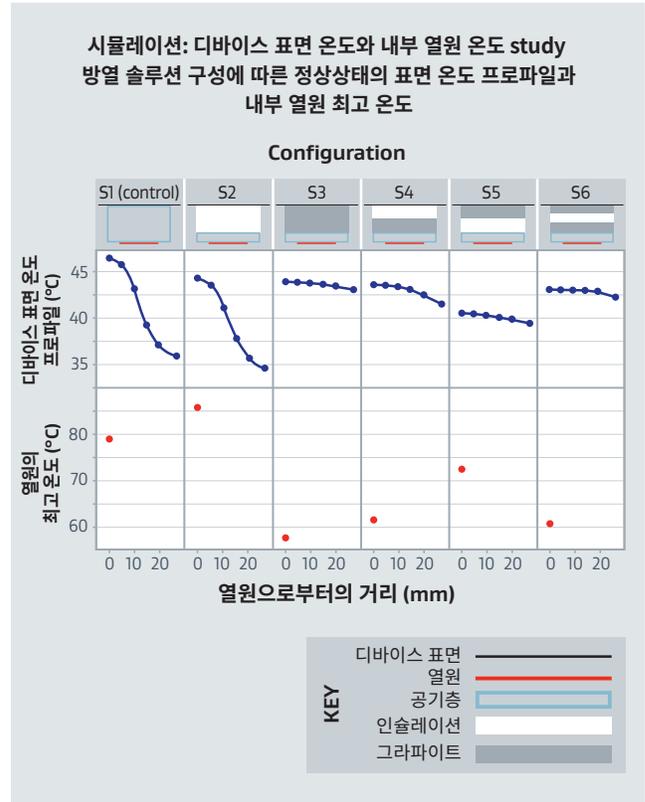


그림 14: 각 구성의 시뮬레이션 결과. 상단의 그래프는 디바이스 중앙($r=0\text{mm}$)에서부터 디바이스 경계($r=27.6\text{mm}$)까지 디바이스 커버 표면에 따른 방사형 온도 수치를 보여준다. 하단 그래프는 디바이스 열점의 최대 온도에 대한 단일 값을 보여준다.

표 5: 커버 표면 및 열점 최대 온도에 대한 시뮬레이션 결과

구성	커버 표면 최대 온도 ($^{\circ}\text{C}$)	열점 최대 온도 ($^{\circ}\text{C}$)
S1 (대조군)	46.55	78.82
S2	44.28	85.43
S3	43.79	57.58
S4	43.54	61.73
S5	40.52	72.48
S6	42.96	60.42

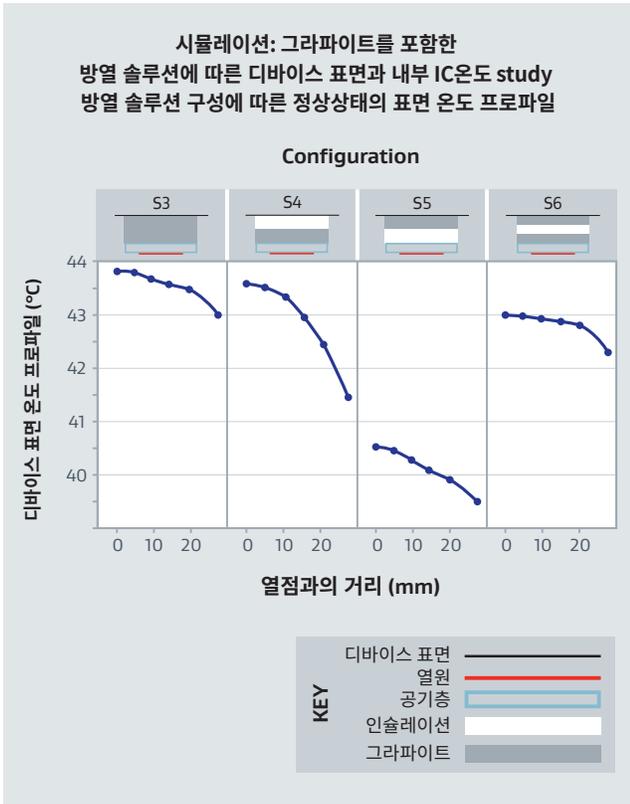


그림 15: 그림 14 상단의 단일 그래파이트와 인슐레이션-그래파이트 합지 소재 구성(S3, S4, S5, S6)을 확대한 그래프.

대조군(S1)과 비교했을 때 최대 표면 온도 하락 폭이 가장 큰 것은 구성 S5였다. 테스트된 모든 구성에서 디바이스 커버 표면과 열점의 최대 온도는 디바이스 중앙($r = 0$)에서 발생하였다. 디바이스 중심에서 방사형으로 열이 이동하며 이에 따라 온도가 감소한다. 시스템에 인슐레이션을 추가하였을 때(구성 S2) 표면 온도 감소 수치는 대조군과 비슷한 모습을 보였으나, 모든 위치에서 그 정도는 줄어들었다. 이는 인슐레이션의 매우 낮은 열 전도율과 열점으로 열을 반송하는 특징으로 T_j 가 증가했기 때문이다. 그래파이트 및 인슐레이션-그래파이트 합지 소재를 시스템에 도입했을 때(구성 S3, S4, S5, S6), 최대 표면 온도는 하락했고 방사형 온도 수치는 대조군 대비 증가하였다. 이는 열을 수평 방향으로 퍼뜨리는 그래파이트의 성질로 인한 결과로, 디바이스 표면에서의 열 확산이 보다 균일한 모습을 띄게 된다.¹³ 해당 4가지 구성에서 시뮬레이션된 T_j 는 대조군과 비교했을 때 유지 또는 감소되었다.

구글 픽셀 3XL 3DMark 응력 테스트

후면 커버 접촉 온도 연구

픽셀 디바이스 테스트를 위해 시뮬레이션 구성 옵션 중 구성 S1, S2, S3, S5, S6을 선택하여 앞단의 그림 6에 소개한 물리적 소재로 구현하였다. 디바이스 테스트 구성은 각 D1, D2, D3, D5, D6로 명명되었으며, D1이 대조군 시나리오이다. CPU 및 GPU 주파수는 각각 2169.6 MHz 및 675 MHz로 설정하고 각 테스트 종료 이후 주파수를 기록 및 검증하였다. 모든 테스트에 대해 성능의 일관성을 보여주기 위해 벤치마크 점수를 기록하였다. 무풍 환경의 환경 온도는 모든 테스트에 대해 21.6~21.8 °C로 설정되었다. 무작위 실험을 통해 모든 구성은 정상상태에서 3회씩 테스트(> 90분)되었다. 각 테스트 종료 후, 픽셀을 정상 작동 온도까지 냉각시키고, 다음 테스트 셋업을 위해 디바이스를 열어두었다. 정상상태 후면 커버 열점 접촉 온도 및 GPU 최대 온도는 그림 16에 나와 있다. 후면 커버의 적외선 이미지는 그림 17에서 볼 수 있다. 테스트가 진행된 모든 구성의 도식, 두께 및 측정결과(평균값 및 표준편차)는 표 6에 상세하게 소개되어 있다.

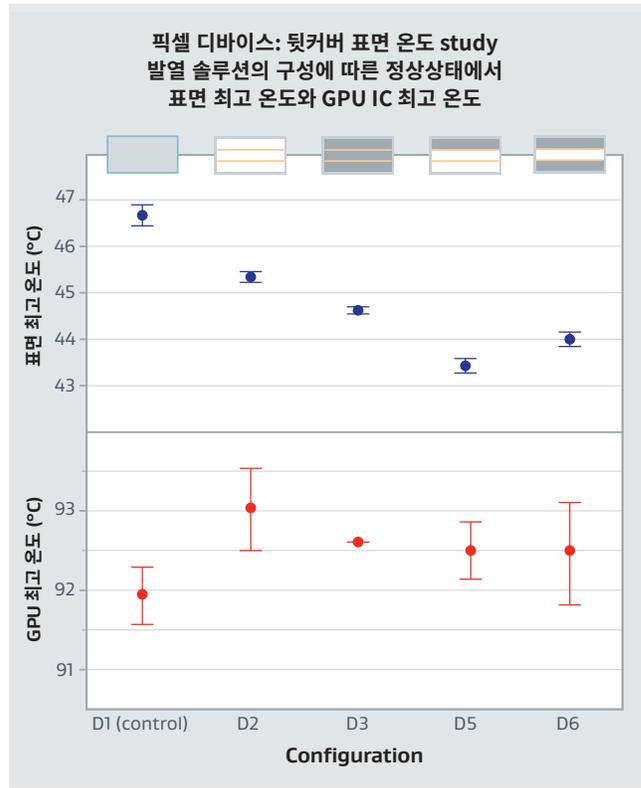


그림 16: 픽셀 디바이스에서 측정된 모든 구성의 후면 커버 열점 온도(상단) 및 GPU 최대 온도(하단)의 정상상태 그래프(평균값 및 표준편차), 각 구성 당 n=3

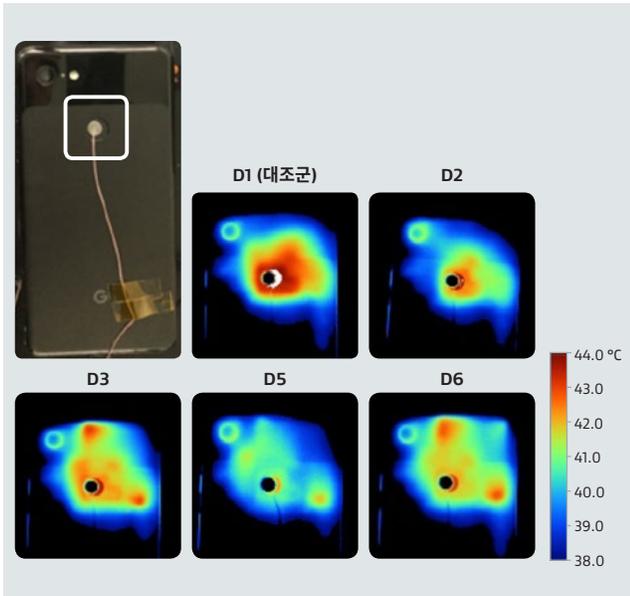


그림 17: 픽셀 디바이스에서 진행한 모든 구성의 후면 커버 열점을 확대한 적외선 이미지.

표 6: 픽셀 테스트 결과: 후면 커버 표면 온도 연구

구성	커버 열점 온도 (°C)		스크린 열점 온도 (°C)		CPU 최대 온도 (°C)		GPU 최대 온도 (°C)		Sling Shot Extreme 벤치마크 점수	
	평균 값	표준 편차	평균 값	표준 편차	평균 값	표준 편차	평균 값	표준 편차	평균 값	표준 편차
D1 (대조군)	46.7	0.21	49.7	0.25	84.8	0.17	91.9	0.35	4374.3	1.15
D2 (344 μm)	45.4	0.12	50.5	0.10	86.1	0.51	93.0	0.51	4377.7	1.15
D3 (339 μm)	44.6	0.06	50.1	0.10	85.4	0.65	92.6	0.00	4375.7	1.53
D5 (347 μm)	43.5	0.15	49.9	0.26	85.6	0.17	92.5	0.35	4372.3	2.08
D6 (347 μm)	44.0	0.15	49.9	0.26	85.6	0.51	92.5	0.67	4375.0	1.00

모든 테스트 구성으로부터 각기 상이한 후면 커버 접촉 온도를 높은 정확도로 얻었고, 이는 모두 대조군(구성 D1)보다 현저히 낮았다. 시뮬레이션과 동일하게 구성 D5의 경우 후면 커버 접촉 온도 하락 폭이 가장 커서, 대조군보다 3.2°C 낮았다. 구성 D6, D3, D2는 후면 커버의 접촉 온도를 각각 2.7, 2.1, 1.3°C 낮추었다. 스크린 온도는 대조군을 기준으로 테스트된 모든

구성에 대해서는 >1°C 증가했고, 합지 소재 구성에 대해서는 >0.5°C 증가했다. CPU 및 GPU 온도는 테스트가 진행된 모든 구성에서 대조군 대비 >1.5°C 증가했고, 합지 소재 구성에서는 >1°C 증가했다. 픽셀 후면 커버 접촉 온도 연구 결과는 시뮬레이션 모방연구 구성에서 확인된 디바이스 표면 온도의 방향성을 검증해준다. 시뮬레이션에서의 접합 온도 방향성은 재현되지 않았고, 물리적 디바이스를 대상으로 한 테스트에서 CPU 및 GPU의 온도는 상대적으로 일관된 모습을 보였다. 이 차이는 실제 픽셀 디바이스의 SoC 부근에 적용된 복잡한 발열 구조에 기인하는 것으로 추정된다.

시스템 성능 및 안전 표면 온도 연구

인슐레이션-그래파이트 합지 소재가 적용된 경우 시스템 성능이 어느 정도 증대될 수 있는지 확인하기 위해 지속적으로 연구를 설계하였다. 본 연구에는 구성 D5가 선정되었다. 픽셀에 기본(out-of-box) 스로틀링 조건으로 재구성하였으며, 에어갭만을 남기고 모든 단열 솔루션을 제거하였다. 3회의 테스트를 통해, 정상상태 스로틀링 상태에서의 후면 커버의 표면 온도를 측정하고 기록하였다. 대조군의 스로틀링 정상상태 커버 온도를 맞추기 위해, 구성 D5를 설치하고 주파수를 설정하였다. 테스트에 적합한 CPU 및 GPU 주파수는 각각 1996.8 MHz 및 596 MHz로 설정되었다. 주파수, 커버 열점 온도, 벤치마크 점수 및 FPS(초 당 프레임)를 측정하여 2개의 테스트 시나리오를 비교하였다. 그림 18에서 6회분에 대한 러닝타임에 따른 벤치마크 점수, CPU 주파수 및 GPU 주파수의 스무딩된 플롯(smoothed plot)을 볼 수 있다. 그림 19는 정상상태 커버 온도 평균값, 벤치마크 점수, FPS를 나타낸다. 세부사항은 표 7에 요약되어 있다.

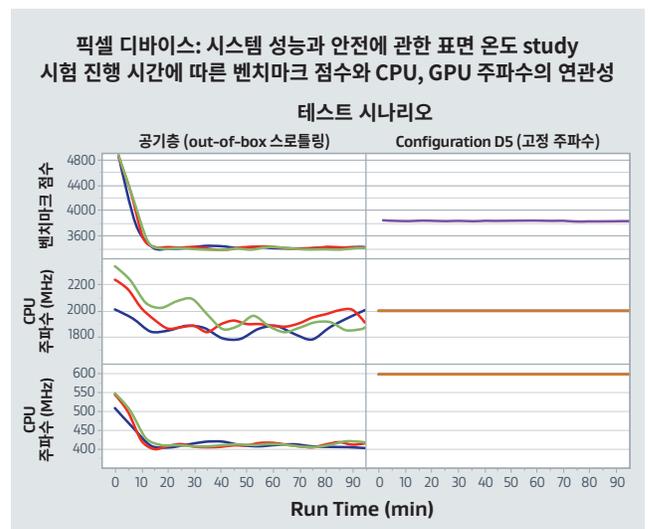


그림 18: 픽셀에서 측정된 벤치마크 점수(상단), CPU 주파수(중간), GPU 주파수(하단)의 과도(transient) 그래프 에어갭(스로틀링, 좌)과 구성 D5(고정 주파수, 우), 각 테스트 당 n=3.

픽셀 디바이스: 시스템 성능과 안전에 관한 표면 온도 study
 시험 조건에 따른 정상상태에서의 표면 온도, 벤치마크 점수와
 초당 프레임 수의 연관성

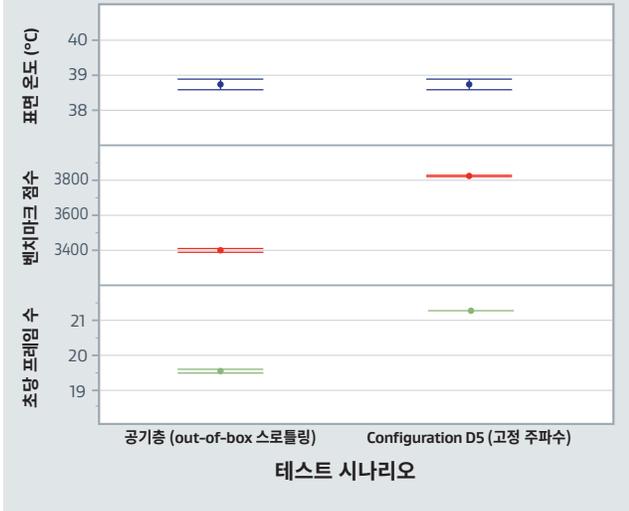


그림 19: 픽셀에서의 단일 에어갭 솔루션, 스로틀링 및 구성 D5, 고정 주파수에 대한 후면 커버 열점 온도(상단), Sling Shot Extreme 벤치마크 점수(중간), FPS(하단)의 정상상태 그래프(평균값 및 표준편차), 각 구성 당 n=3.

표 7: 픽셀 테스트 결과: 시스템 성능 및 안전 표면 온도 연구

테스트 시나리오	커버 온도 (°C)		Sling Shot Extreme 벤치마크 점수		FPS	
	평균 값	표준 편차	평균 값	표준 편차	평균 값	표준 편차
에어갭 (기본 스로틀링)	38.7	0.15	3401.0	8.19	19.5	0.06
구성 D5 (주파수 고정)	38.7	0.15	3822.7	3.06	21.3	0.00

21.7°C 온도로 통제된 환경에서 정상상태의 스로틀링 모드에서 달성한 커버의 표면 온도 평균값은 38.7°C였다; 이 온도는 장기간의 UL 62368-1 모바일 전자기기 접촉(피부) 온도와 관련성이 있다. 이 시나리오 하에, 정상상태 벤치마크 점수 및 FPS 평균값은 각각 3401과 19.5였다. 구성 D5가 후면 커버에 설치되는 경우, 벤치마크 점수는 3823, FPS는 21.3으로 증가하여 시스템 성능이 ~12% 개선되는 동시에 스로틀링 조건에 맞게 설정된 안전 표면 온도 상한선 아래로 유지되었다.

요약/결론

매우 높은 방열 용량의 그라파이트 시트 및 매우 낮은 열 전도율의 인슐레이션 시트로 구성된 합지 소재를 개조된 구글 픽셀 3XL에 탑재하여 표면 접촉(피부) 온도 감소뿐만 아니라, 시스템 성능을 증대하는 동시에 기기의 내부 온도에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다. 축대칭적 열 전도 모델을 사용하는 유사한 시뮬레이션 연구를 검증하기 위해 각기 다른 방열 구성 5개의 디바이스 표면 온도 실험결과를 사용하였다. 인슐레이션-그라파이트를 동일한 면적과 두께로 결합한 합지 소재는 단일 에어갭, 인슐레이션 및 그라파이트 솔루션과 비교했을 때 표면 온도 하락 폭이 더 컸다. 이후 하나의 인슐레이션-그라파이트 합지 소재 구성을 기본(out-of-box) 대조군과 비교하여 테스트를 진행한 결과, UL 벤치마크 테스트에서 시스템 성능이 ~12% 개선되는 동시에 기본 커버 표면 온도는 상한선 아래로 유지되었다.

픽셀 테스트와 시뮬레이션에서 인슐레이션-그라파이트 합지 소재가 보여준 결과는 두 소재의 뛰어난 방열 특성에 의해 설명될 수 있다. 인슐레이션의 수직 방향 열 전도율은 TA-FOX 50이 적용된 열류계법, Instron-5565가 적용된 두께 방법 및 two thickness resistance procedure를 통해 측정 및 계산되었다. 고성능 두꺼운 타입의 그라파이트의 방열 용량을 Bethel TA-33이 적용된 열 확산율 방식으로 측정 및 계산되었다. 100 µm 고성능 두꺼운 타입의 그라파이트의 방열 용량을 100 µm 합성 및 천연 그라파이트와 대조하여 정상상태 열 확산 테스트를 이용한 실험으로 검증하였다.

고성능 인슐레이션-그라파이트 합지 소재는 고전력, 초박형 모바일 전자기기에서 활용될 수 있는 기회가 많다. 단, 시스템 전력, 가용공간 및 / 또는 기타 제약 사항으로 인해 각 모바일 전자기기 시스템의 발열 이슈는 각기 상이할 수 있다는 점을 염두에 두어야 한다. 따라서 기기에 적합한 시뮬레이션 및 테스트를 통해 최적의 디자인(면적, 두께, 방향)을 결정해야 한다. 본 논문에서 제시된 사례연구는 모바일 전자기기에서의 방열 성능을 개선할 수 있는 가능성을 보여준다. 두 가지의 첨단 소재를 조합했을 때 부분의 합보다 우수한 성능의 방열 솔루션이 될 수 있는 것이다.

참고문헌

1. UL, UL. "62368-1: 2017 Audio/video, information and communication technology equipment - Part 1: Safety requirements." (2017).
2. Wagner, Guy, and William Maltz. "Thermal management challenges in the passive cooling of handheld devices." 19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). IEEE, 2013.
3. Wagner, Guy R. "A study of the maximum theoretical power dissipation of tablets under natural convection conditions." 20th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems. IEEE, 2014.
4. Luo, Zhaoxia, et al. "System thermal analysis for mobile phone." Applied Thermal Engineering 28.14-15 (2008): 1889-1895.
5. Bi, C., G. H. Tang, and W. Q. Tao. "Prediction of the gaseous thermal conductivity in aerogels with non-uniform pore-size distribution." Journal of Non-Crystalline Solids 358.23 (2012): 3124-3128.
6. Kannuluik, W. G., and E. H. Carman. "The temperature dependence of the thermal conductivity of air." Australian Journal of Chemistry 4.3 (1951): 305-314.
7. ASTM C518 – 17 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus
8. ASTM F36 – 15 Standard Test Method for Compressibility and Recovery of Gasket Materials
9. LaserComp, Inc.. "Tests of thin samples stacked (using FOX50 instrument)" Application Note AN-TSS © 2008 (October 23).
10. Wagoner, G., Skokova, K.A. and Levan, C.D., "Angstrom's Method for Thermal Property Measurements of Carbon Fibers and Composites", The American Carbon Society, CARBON Conference, 1999.
11. Beyerle, R., Smalc, M., Kantharaj, R., Taylor, J., Norley, J., "Thermal Diffusivity Characterization of Thick Graphite Foils", 35th Semi-Therm Symposium, 2019.
12. 3DMARK® Technical Guide, Underwriters Laboratories, Fremont, CA, 2020.
13. Xiong, Yin, et al. "Thermal tests and analysis of thin graphite heat spreader for hot spot reduction in handheld devices." 2008 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. IEEE, 2008.

Contact Us

제품 및 기술 관련 문의는 각국의 고어 법인으로 연락 주십시오.

INTERNATIONAL CONTACTS

호주	+61 2 9473 6800	멕시코	+52 81 8288 1281
베네룩스	+49 89 4612 2211	스칸디나비아	+46 31 706 7800
중국	+86 21 5172 8299	싱가포르	+65 6733 2882
프랑스	+33 1 5695 6565	남아프리카 공화국	+55 11 5502 7800
독일	+49 89 4612 2211	스페인	+34 93 480 6900
인도	+91 22 6768 7000	대만	+886 2 2173 7799
이탈리아	+39 045 6209 240	영국	+44 1506 460123
일본	+81 3 6746 2570	미국	+1 410 506 7812
한국	+82 2 393 3411		

(주) 고어 코리아

서울시 중구 통일로 2길 16 AIA Tower 17층
· 전화: 02-3149-7634 · 팩스: 02-393-1285
· Email: thermal@wlgore.com

kr.gore.com/products/thermal

산업용으로만 사용 가능합니다. 식품, 의약품, 화장품 또는 의료기기 제조, 처리, 또는 포장 공정 용도로 사용할 수 없습니다.

본 자료에 기재된 모든 기술 정보 및 권고 사항은 고어의 경험 및 테스트 결과에 의거하여 작성되었습니다. 고어가 보유한 지식을 기반으로 작성된 본 자료에 대해 고어는 법적 책임을 지지 않습니다. 제품의 정확한 성능은 모든 필요 데이터가 있을시에만 판단 가능하므로 구체적인 적용 분야에서의 제품의 적합성 및 유용성은 개별 테스트가 필요합니다. 상기 정보는 변경될 수 있으며, 사양서의 용도로 사용될 수 없습니다.

고어의 판매 조건은 고어사가 제조한 제품의 판매에 적용됩니다.
GORE® 및 디자인은 W. L. Gore & Associates의 등록 상표입니다.

©2020 W. L. Gore & Associates, Inc.

