

인쇄회로기판 배선소재 표면 거칠기에 따른 HDMI 전송선로 설계 기준 연구

사기동*** · 임영석**

Study on Design Criteria of HDMI Transmission Line according to Surface Roughness of
Printed Circuit Board Wiring Material

Gi-Dong Sa*** · Yeong-Seog Lim**

요 약

최근 스마트폰 카메라 기술의 발달로 고화질의 동영상을 촬영할 수 있다. 이러한 기술을 다양한 방법으로 활용하기 위해 디스플레이 등의 외부 장치로 신호 전송이 가능하여야 한다. 영상신호의 전송 성능은 전송선로의 손실과 배선의 길이에 따라 결정된다. 논문에서는 스마트폰 디자인에 따라 변경되는 배선 길이와 인쇄회로기판 도체 배선 소재 표면 거칠기 진폭에 따른 HDMI 전송선로 설계 기준을 제안하였다. 또한 실제 스마트폰 설계에 제안된 설계 기준을 적용하여 검증하였다. 본 논문을 통해 제안된 설계 기준은 모바일 어플리케이션 외 고속신호 전송선로가 포함되는 다양한 응용분야에 확대 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

Recently, the development of smartphone camera technology enables to shoot high quality video. In order to utilize these techniques in various ways, it is necessary to be able to transmit signals to an external device such as an external display. The transmission performance of the video signal is determined by the loss of the transmission line and the length of the wiring. In this paper, we propose the HDMI transmission line design criterion according to the wiring length changed according to the smartphone design and the surface roughness amplitude of the printed circuit board conductor wiring material. Also, we verified the proposed design criteria for the actual smartphone design. The proposed design criterion can be applied to various application fields including high-speed signal transmission line besides mobile application.

키워드

Transmission line, Conductor loss, Skin effect, Surface roughness amplitude, HDMI
전송선로, 도체손실, 표피효과, 표면 거칠기 진폭, HDMI

1. 서 론

최근 스마트폰 카메라 기술의 발달로 고화질의 동

영상을 촬영할 수 있다. 이러한 기술을 다양한 방법으로 활용하기 위해 디스플레이 등의 외부 장치로 신호 전송이 가능하여야 한다[1-2]. 현재 스마트폰 내부의

* 한국광기술원 (gdsa@kopti.re.kr)

** 교신저자 : 전남대학교 전자컴퓨터공학부

• 접수일 : 2019. 02. 23

• 수정완료일 : 2019. 03. 20

• 게재확정일 : 2019. 04. 15

• Received : Feb. 23, 2019, Revised : Mar. 20, 2019, Accepted : Apr. 15, 2019

• Corresponding Author : Yeong-Seog Lim

School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University,

Email : limys@jnu.ac.kr

고속 영상 신호 전송은 HDMI 규격에 따라 처리된다. HDMI 1.4 버전에서 1920 × 1080 (1080p) 해상도의 영상신호를 전송할 때 채널 당 전송속도는 1.48 Gbps 이다[3].

고해상도의 영상신호 전송을 위한 시스템의 성능은 주로 전송손실, 전파지연시간, 특성임피던스에 의해 제한된다. 전파지연시간과 특성임피던스는 인쇄회로기판 설계에 의해 최적화가 이루어 질 수 있으나, 전송손실은 기판 소재의 전기적 특성에 따라 변화한다. 고속 신호 전송에 있어 가장 장애요소는 신호 감쇠와 그에 따른 에러율 증가이므로 배선의 전송손실을 줄이는 노력이 필요하다. 전송손실은 금속 배선의 전기적 저항에 의한 손실과 표피효과에 의한 저항성 손실로 구분될 수 있다. 특히 표피효과에 의한 저항성 손실은 배선 표면 거칠기 진폭이 클 경우 전송손실에 미치는 영향이 더욱 커진다. 스마트폰에서는 디자인에 따라 부품 실장 위치와 외부 커넥터의 위치가 결정되는 경우가 많은데, 이 경우 반드시 배선의 표면 거칠기 진폭과 길이에 따른 전송손실 검증 절차가 필요하다.

본 논문에서는 스마트폰의 디자인과 고속 영상신호 전송용 HDMI 전송선로의 성능을 동시에 만족하도록 설계하기 위해 먼저 전송선로 길이와 배선 금속 소재의 표면 거칠기 진폭에 따른 성능 분석용 기판을 설계하고 이에 대한 전송손실을 측정하였다. 다음으로 측정된 전송손실을 적용하여 Agilent ADS를 통한 시간영역 시뮬레이션으로 HDMI 전송선로 성능을 분석하였고, 이로부터 설계 기준을 도출하였다. 마지막으로 도출된 설계 기준을 실제 스마트폰 설계에 적용하여 유효성을 검증하였다.

II. 전송선로의 손실과 도체손실

2.1 전송선로의 손실

전송선로의 손실은 식 (1)의 감쇠상수에 의해 결정된다. 여기서 α_c 는 도체손실에 의한 감쇠상수이며, α_d 는 유전체손실에 의한 감쇠상수이다. 이 가운데 유전체손실에 의한 감쇠상수는 식 (2)와 같으며, 일반적인 인쇄회로기판 설계 변수에 반영될 수 있다. 여기서 λ 는 전송신호의 파장, ϵ_r 은 비유전율, 그리고

$\tan\delta$ 는 손실 탄젠트이다.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d \tag{1}$$

$$\alpha_d = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r} \tan\delta \tag{2}$$

2.2. 전송선로의 도체손실

전송선로의 도체손실은 금속 배선의 고유저항에 의한 손실과 표피효과에 의한 손실로 구분된다. 그림 1의 (a)는 표피효과를 나타낸다. 전송신호의 주파수가 높아짐에 따라 발생하는 자속의 변화에 의해 유도되는 와전류는 도체 중심부에 역기전력을 발생시킨다. 역기전력에 의해 전류 밀도는 도체의 표면으로 집중되고 이로 인한 표피저항 상승으로 인해 도체손실이 증가된다.

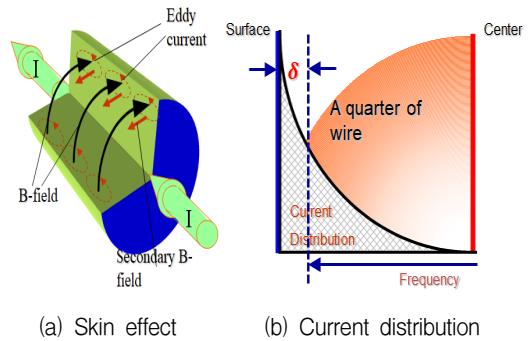


그림 1. 표피효과에 의한 전류분포
Fig. 1 Current distribution by skin effect

그림 1의 (b)는 표피효과에 의해 발생하는 주파수에 따른 도체 내부의 전류분포를 나타내며, 전송신호의 주파수가 높아질수록 전류는 도체의 표면에 집중됨을 알 수 있다. 이때 전류가 흐르는 평균적인 표피영역을 표피 깊이라 하며, 식 (3)과 같다. 여기서 μ 는 선로의 투자율, σ 는 선로의 도전율 그리고 f 는 전송신호 주파수이다[4].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{3}$$

$$\alpha_c = \left[\frac{\beta_0 \eta_0}{4pZ_0} \delta \right]^{ideal} + \left[\frac{1}{\delta} \frac{\beta_0 \eta_0}{4pZ_0} \sum_{k=1}^{\infty} (H_k^2 (1 - \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{k^4 s^4 \delta^4 + 4} - k^2 s^2 \delta^2)})) \right]^{roughness} \quad (4)$$

일반적인 금속 배선에는 표면 거칠기가 존재한다. 배선에 표면 거칠기가 존재할 경우 도체손실은 식 (4) 과 같이 표현된다. 여기서 β_0 는 자유공간의 전파상수, η_0 는 자유공간의 고유임피던스, p 는 도체의 횡단면 둘레길이, Z_0 는 전송선로의 특성임피던스, δ 는 표피 깊이, $H_k = A(-1)^{k-1}/k\pi$ 는 표면함수의 k 번째 고조파의 크기, 그리고 A 는 표면 거칠기 함수의 피크이다. 식 (4)의 첫 번째 항은 이상적인 도체의 고유 저항과 표피저항에 의한 손실 항으로 이에 대한 수학적 모델을 반영한 전산모사를 통해 예측이 가능하다. 그러나 두 번째 항은 표피효과가 발생하는 조건에서 배선 표면 거칠기에 의한 손실 항으로 주파수가 높아 질수록 그 영향이 더욱 커지지만, 이에 대한 수학적 모델을 전산모사에 반영하여 정확히 예측하는 것은 어려운 일이다. 따라서 이에 대한 실험적 결과로부터 설계 기준을 도출하고 이를 반영하여 시스템 설계에 적용하는 노력이 필요하지만, 스마트 등의 모바일 어플리케이션에서는 이를 고려한 설계가 이루어지지 않고 있다[5-6]. 인쇄회로기판에서 배선 소재로 사용되는 동박은 표면 거칠기에 따라 그림 2와 같이 STD(Standard), VLP(Very low profile), HVLP(Hyper very low profile)로 구분된다.

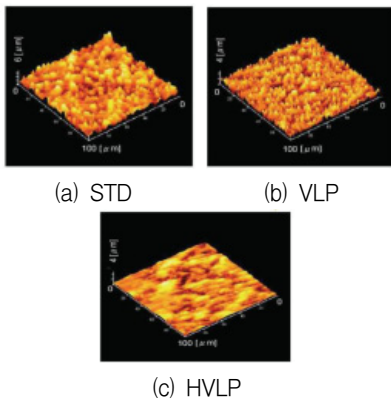


그림 2. 동박 종류별 표면 거칠기
Fig. 2 Surface roughness by type of copper foil

동박의 종류에 따른 표면 거칠기는 표 1과 같다. 여기서 Ra는 평균 산술 거칠기 진폭이고, Rrms는 제곱평균 제곱근 거칠기 진폭이며, Rz는 5개의 최대 피크 점과 및 최소 피크 점의 평균 진폭으로 일반적인 동박의 표면 거칠기는 Rz로 표현된다[7-8].

표 1. 동박 종류별 표면 거칠기
Table 1. Surface roughness by type of copper foil

Ruughness	STD	VLP	HVLP
Ra	1.56 um	0.75 um	0.35 um
Rrms	1.91 um	0.92 um	0.44 um
Rz	8.41 um	4.19 um	2.29 um

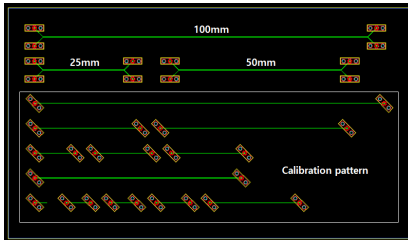
III. HDMI 전송선로 설계 기준 도출

3.1 HDMI 전송선로 성능 분석용 기판 설계

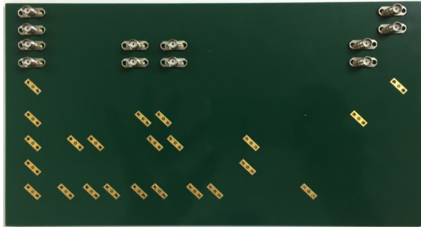
최근 모바일 어플리케이션의 디자인은 시장 선점에 있어서 핵심적인 부분으로 대두되고 있다. 디자인에 따라 시스템 설계 시 내부 부품의 위치와 외부 인터페이스용 커넥터의 실장 위치의 제한으로 전송선로 길이에 제약이 가해지는 경우가 빈번히 발생된다. 이러한 상황으로 인해 전송선로의 길이가 길어질 경우 손실이 증가하여 HDMI와 같은 고속 영상 신호 전송선로의 성능을 만족시킬 수 없는 경우가 발생한다. 전송선로의 성능 제한 문제를 해결하기 위한 방안은 인쇄회로기판의 손실을 줄이는 것이다. 기판의 손실을 줄이는 방법은 절연소재의 유전체손실을 줄이는 것과 표면 거칠기의 진폭이 작은 동박을 적용하여 도체손실을 줄이는 두 가지 방법이 있으나, 도체손실을 줄이는 방법이 원가 경쟁력 면에서 우수하다.

본 논문에서는 배선 표면 거칠기의 진폭이 전송선로에 미치는 영향을 분석하고 이를 스마트폰의 고속 영상 신호 전송용 HDMI 전송선로 설계에 반영할 수 있도록 실험적 결과로부터 도출된 설계 기준을 제안한다. 배선 표면 거칠기의 진폭과 배선의 설계 길이에

따른 도체손실을 분석하기 위해 그림 3과 같이 각각 25 mm, 50 mm, 100 mm 길이를 가지는 차동배선을 종단에 SMA 커넥터가 삽입되는 구조로 설계하였다. 설계된 인쇄회로기판은 동일한 유전체손실을 가지도록 유전율 4.6, 손실 탄젠트 0.017을 가지는 Panasonic R-1650M Prepreg 및 R-7155M Laminate을 적용하고 동박의 종류를 STD와 VLP 및 HVLP의 3가지 종류 동박 종류로 구분하여 제작하였다.



(a) Substrate design for transmission loss analysis



(b) Fabrication of substrate for transmission loss analysis

그림 3. 전송손실 분석용 기판

Fig. 3 Substrate for transmission loss analysis

3.2 HDMI 전송선로 손실 측정

제작된 인쇄회로기판의 특성임피던스는 Tektronix사의 Time domain reflectometer (DSA8200)을 적용하여 그림 4와 같이 측정하였다. 측정된 특성임피던스는 모든 거칠기 조건에서 설계 기준인 100 Ohm 대비 ± 2 Ohm 이내의 오차를 가진다. 전송손실은 Agilent사의 Vector network analyzer (E5071C)를 적용하여 측정하였다. 이는 전송선로의 주파수에 따른 신호전송 특성을 나타내며, 제작된 전송선로의 길이와 표면 거칠기에 따라 그림 5와 같은 측정되었다. 제작된 전송선로를 통해 HDMI 신호를 전송하기 위해서는 최소 요구 대역폭 내에서 전송손실 기준을 만족하여야 한다.

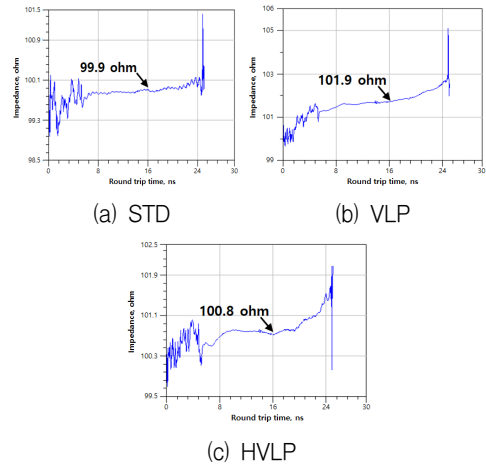


그림 4. 인쇄회로기판의 특성임피던스 측정결과
Fig. 4 Characteristic impedance of a transmission line

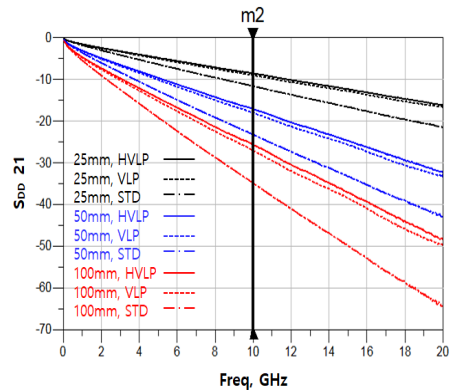


그림 5. 전송손실 측정결과

Fig. 5 Transmission loss measurement result

HDMI 1.4 1080p 영상 신호의 채널 당 전송 속도는 1.48 Gbps이므로 하나의 비트시간은 676 ps 이다. 이때 전송채널의 최소 요구 대역폭은 아래 식 (5)와 같다. 여기서 T_r 은 상승시간으로 비트시간의 5%인 34 ps 이다. 따라서 HDMI 전송채널에 요구되는 최소 대역폭은 10 GHz 이다. 이는 Driver 입력신호의 70% 주파수 성분이 전송선로를 통해 전송될 수 있는 대역폭으로 5 고조파에 해당된다[9-10].

$$BW = 0.35 / T_r \tag{5}$$

제작된 인쇄회로기판 차동배선의 최소 요구 대역폭인 10 GHz에서 측정된 전송손실은 표 2과 같다. 이는 동일 유전체손실을 가지는 기판에서 동박 표면 거칠기 진폭의 크기와 배선 길이에 따라 측정된 전송손실이다. 측정된 전송손실이 -20 dB 이하일 경우 배선을 통해 전송되는 신호의 해당 주파수 성분이 전력 기준으로 1 % 이하가 전송되는 수준이 되어 고주파 신호 왜곡 문제가 발생된다. 측정 결과를 분석해보면 스마트폰 HDMI 전송선로의 설계시 가장 보편적으로 적용되는 50 mm 길이에서 STD 표면 거칠기의 동박을 적용한 경우와 100 mm 길이에서 3 종류의 표면 거칠기의 동박을 적용한 모든 배선에서 측정된 전송손실이 -20 dB 이하로 측정되어 고주파 신호 왜곡 문제가 발생될 것으로 예측된다.

표 2. 10 GHz에서 전송손실 측정결과
Table 2. Transmission loss measurement result at 10 GHz

Line length	STD	VLP	HVLP
25 mm	-11.6 dB	-8.9 dB	-8.5 dB
50 mm	-23.2 dB	-17.9 dB	-17.0 dB
100 mm	-34.8 dB	-26.9 dB	-25.5 dB

3.3 HDMI 전송선로 성능 시뮬레이션

측정된 전송손실 파라미터가 HDMI 전송선로의 신호 전달 성능에 미치는 영향을 시간영역 시뮬레이션으로 분석하기 위해 Agilent사 ADS를 이용하여 그림 6과 같이 회로를 구성하였다. HDMI 전송선로의 시간영역 시뮬레이션에서 입력되는 영상 신호는 1080p 해상도, 60 Hz의 주파수로 refresh되는 신호로 채널 당 전송속도는 1.48 Gbps 이다. 영상신호는 스마트폰의 AP의 HDMI TMDS Data 핀으로부터 배선 기판을 통해 외부로 연결되는 USB C 커넥터로 전송된다. 회로 시뮬레이션에서 AP 칩은 IBIS (I/O buffer information specification) 모델을 적용하고 스마트폰 내부의 전송 선로와 이에 연결된 USB C 커넥터는 측정된 S-Parameter 모델을 적용하여 종단인 USB C 커넥터에서 HDMI 1.4 TP1 측정 규격으로 배선의 표면 거칠기와 배선 길이에 따른 전송성능 시간영역 시

뮬레이션을 수행하였다. HDMI 1.4 TP1 측정 규격은 아래 그림 7의 Eye mask 이상의 Eye opening을 확보하여야 하는 기준으로 세부 규격은 그림 7과 같다 [11].

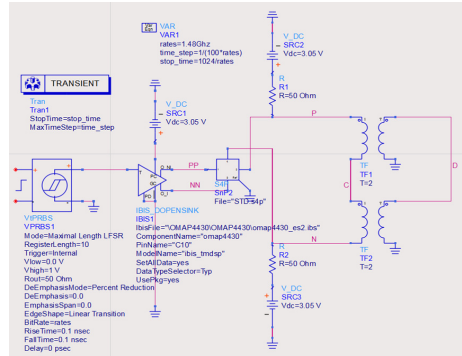


그림 6. 전송선로 성능 분석을 위한 시뮬레이션 회로
Fig. 6 Simulation circuit for transmission line performance analysis

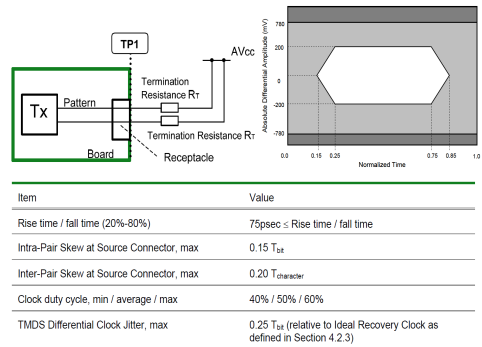
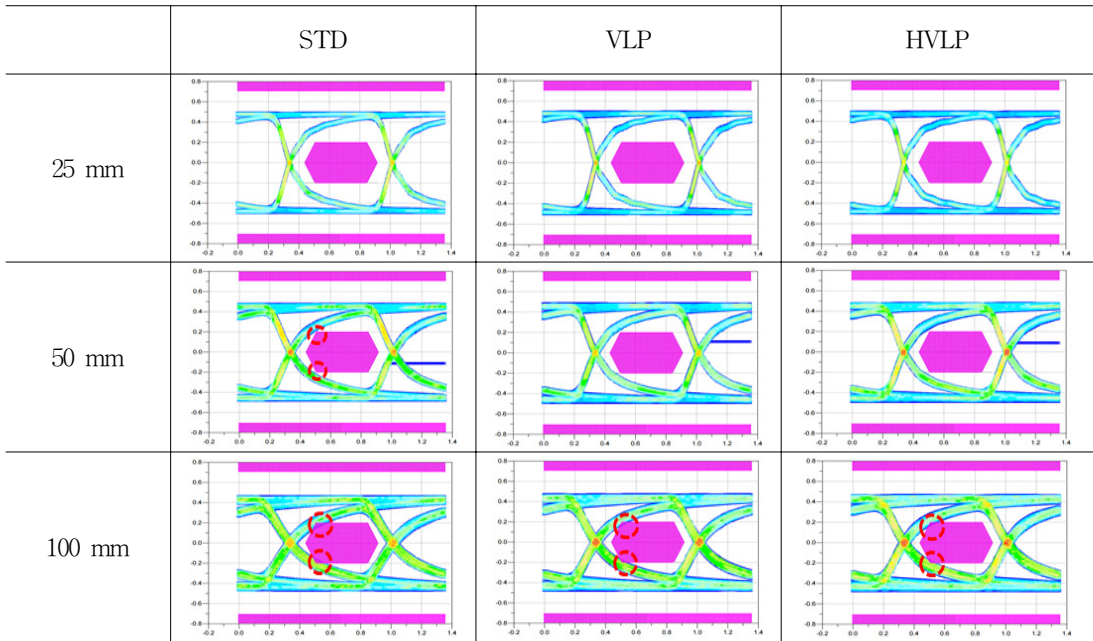


그림 7. HDMI TP1 Eye mask 측정 규격
Fig. 7 HDMI TP1 Eye mask measurement standard

배선길기와 전송선로 표면 거칠기에 따른 전송성능을 시간영역 시뮬레이션 수행 결과는 표 3과 같다. 시뮬레이션 결과를 분석해보면 측정된 전송손실로 예측한 결과와 동일하게 25 mm 길이에서 3 종류의 표면 거칠기의 동박을 적용한 경우에는 HDMI 1.4 TP1 Eyemask 규격을 모두 만족하였으나 50 mm 길이에서 STD 표면 거칠기의 동박을 적용한 경우와 100 mm 길이에서 3 종류의 표면 거칠기의 동박을 적용한 모든 경우는 HDMI 1.4 TP1 Eyemask 규격을 만족하지 못하였다.

표 3. 도체손실에 따른 HDMI 전송선로 Eye pattern 분석 결과
Table 3. Analysis of eye pattern of HDMI transmission line due to conductor loss



전송손실 실험 결과 및 이를 반영한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 스마트폰의 HDMI 1.4 1080p 영상 신호 전송선로의 성능이 TP1 규격을 만족하기 위한 설계 기준을 아래 표 4와 같이 제안한다.

표 4. HDMI 1.4 1080p 전송선로 설계 기준
Table 4. HDMI 1.4 1080p transmission line design standard

	Line length	Surface roughness (Rz)
1	Less than 50 mm	Below 8.41 um (STD)
2	50 to 60 mm	Below 4.19 um (VLP)
3	61 to 65 mm	Below 2.29 um (HVLP)
4	Greater than 65 mm	Non-adjustable with surface roughness (Changed to dielectric material with loss tangent less than 0.017)

낮은 표면 거칠기를 가지는 동박 소재를 사용한 인쇄회로기판을 적용하면 스마트폰 디자인에 있어 사이즈를 확장 시킬 수 있다. 만약 배선 길이를 65 mm 이상으로 설계하고자 한다면 손실 탄젠트가 0.017 보다 낮은 기판소재를 적용하여야한다.

IV. 스마트폰 HDMI 전송선로 설계 검증

III장에서 도출된 설계 기준을 실제 스마트폰의 설계에 적용하여 검증하였다. 스마트폰의 영상 신호를 외부로 전송하기 위한 HDMI 채널은 디자인을 고려하여 Qualcomm사의 SDM670 AP와 USB-C 커넥터 사이에 MUX와 Common mode filter 및 ESD Protector를 그림 8과 같이 배치하였다. 인쇄회로기판은 유전율이 4.6이며, 손실 탄젠트가 0.017인 Panasonic R-1650M Prepreg 및 R-7155M Laminate 소재를 적용하여 10층 구조로 설계 하였다. 기판 내부에 설계된 HDMI 배선은 Coplanar waveguide 구조의 차동배선으로 배선 폭은 50 um이며, 배선 간 간격 및

배선과 수평방향 그라운드 사이 간격은 150 μm 가 되도록 설계하였다. HDMI 배선은 표 4의 2번 설계기준을 만족하도록 표면 거칠기는 4.19 μm 이하의 VLP 동박을 적용하여 전체 길이가 60 mm로 제작하였다.

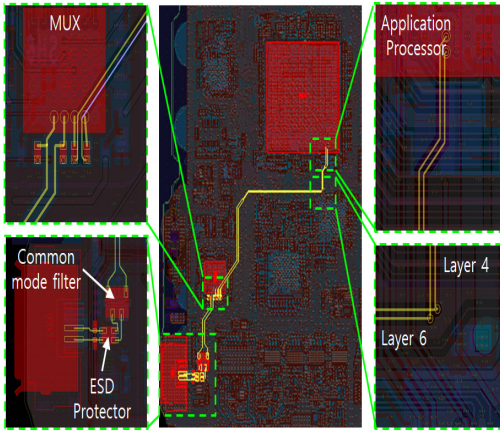


그림 8. HDMI 전송선로 설계 구조
Fig. 8 HDMI transmission line design structure

제작된 스마트폰 HDMI 전송선로의 성능을 분석한 결과 좌, 우 지터가 각각 70.2 ps, 72 ps로 Tbit인 676.7 ps 대비 11% 이내이며, 그림 9와 같이 HDMI 1.4 TP1 Eyemask 규격의 Eye opening 기준을 만족하였다.

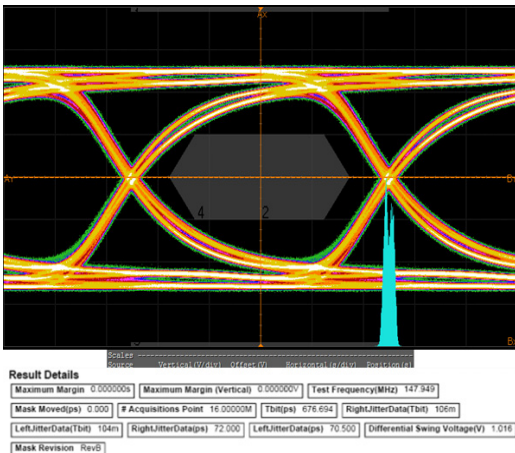


그림 9. HDMI 전송선로 Eye pattern 측정결과
Fig. 9 Eye pattern measurement result by HDMI transmission line

V. 결 론

도체손실은 금속 배선의 전기적 저항에 의한 손실과 표피효과에 의한 저항성 손실로 구분될 수 있다. 전송되는 신호의 주파수가 높을 경우 전기적 저항보다 표피효과에 의한 저항성 손실이 신호 전송 성능에 미치는 영향이 크다. 특히 표피효과는 배선 표면 거칠기 진폭이 클 경우 전송손실에 미치는 영향이 더욱 커짐에도 불구하고 스마트폰 등의 모바일 어플리케이션에서는 이를 설계에 반영한 사례가 없었다.

본 논문에서는 배선 표면 거칠기 진폭에 의한 도체손실을 고려한 스마트폰 HDMI 전송선로 설계 기준을 제안하였다. 스마트폰 HDMI 배선의 설계 기준 도출을 위해 표면 거칠기 진폭과 배선 길이에 따른 전송손실을 측정하고 이를 반영한 회로 시뮬레이션으로 HDMI 1.4 1080p 영상신호 입력 조건에서 전송성능을 분석하여 Eyemask 규격을 만족하는 설계 기준을 도출하고 이를 실제 스마트폰의 설계에 적용하여 검증하였다. 본 연구를 통해 제안된 스마트폰 HDMI 전송선로 설계 기준은 모바일 어플리케이션 외 고속신호 전송선로가 포함되는 다양한 응용분야에 확대 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2018년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 소재부품기술개발사업(10080324)의 성과임

References

- [1] P. Moon, "The Comparison and Analysis of Mobile Advertising Platform," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 3, 2012, pp. 515-520.
- [2] Y. Jeon, B. Song, J. Kim, J. Park, and Y. Yu, "Implementation of Automotive Multimedia Interface Supporting Multi-Channel Display in Multi-Screen Display," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 1, 2013, pp. 199-206.

- [3] Wikimedia Foundation. Inc., "High-Definition Multimedia Interface," 2019.
- [4] D. Pozar, *Microwave engineering*. New york: Wiley, 2011.
- [5] S. Sundstroem, "Stripline Models with Conductor Surface Roughness," Master's Thesis, *Helsinki University of Technology*, 2004.
- [6] S. Hinaga, M. Koledintseva, P. Anmula, and J. Drewniak, "Effect of conductor surface roughness upon measured loss and extracted values of PCB laminate material dissipation factor," *IPC APEX Expo*, Las Vegas, USA, 2009.
- [7] M. Koledintseva, A. Razmadze, A. Gafarov, S. De, J. Drewniak, and S. Hinaga, "PCB Conductor Surface Roughness as a Layer with Effective Material Parameters," *IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Pittsburgh, USA, 2012.
- [8] X. Guo, D. Jackson, M. Koledintseva, S. Hinaga, J. Drewniak, and J. Chen, "An Analysis of Conductor Surface Roughness Effects on Signal Propagation for Stripline Interconnects," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 3, 2014, pp. 707-714.
- [9] E. Bogatin, *Signal and Power Integrity - Simplified*. New Jersey: Prentice Hall, 2009.
- [10] H. Johnson and M. Graham, *High-speed signal propagation: Advanced black magic*. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- [11] HDMI Std., *High-definition multimedia interface specification version 1.4b*. HDMI licensing, LLC, San Jose, USA, 2011.

저자 소개



사기동(Gi-Dong Sa)

2003년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 2005년 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2013년~현재 전남대학교 대학원 전자공학과 재학 (박사과정)
 2005년~2010년 ㈜이수페타시스 선행기술연구소 전임연구원
 2010년~2012년 한국모토로라 H/W개발 전임연구원
 2012년~2013년 삼성테크윈(주) 선행기술연구소 책임연구원
 2013년~현재 한국광기술원 책임연구원
 ※ 관심분야 : Signal and Power Integrity, RF Circuit Design, Computational Electromagnetics, Stretchable and Implantable bio system



임영석(Yeong-Seog Lim)

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1982년 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1989년 전북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
 1984년~현재 전남대학교 전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : Antenna and RF Circuit Design